



# هندبوک انرژی تجدیدپذیر دریایی



ترجمه:

دکتر امین نجفی (استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه امام حسین (ع))

مهندس هاشم نوروزی (دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

مهندس علی اصغر مقدس (کارشناس ارشد مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه امام حسین (ع))

عنوان کتاب: هندبوک انرژی تجدیدپذیر دریایی

تألیف: برنارد مولتون

ترجمه: دکتر امین نجفی، مهندس هاشم نوروزی، مهندس علی اصغر مقدس

چاپ الکترونی اول: اسفندماه ۱۳۹۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**تقدیم به ساحت مقدّس**

**حضرت ولی عصر (عج)**

## پیشگفتار (مترجمان)

انرژی تجدیدپذیر دریایی به عنوان یکی از علوم و فناوری‌های بین رشته‌ای در حوزه‌ی صنایع دریایی می‌باشد. انرژی تجدیدپذیر دریایی، یک حوزه‌ی علمی جذاب و کارآمد است که شناخت دقیق این حوزه، نقشی اساسی در توسعه‌ی فزاینده‌ی دانش در صنایع دریایی و حوزه‌ی انرژی‌های نوین و سبز را به همراه دارد. از اینرو، امروزه کتب متعددی با رویکردهای جهت‌دار و کاربردهایی مشخص در حوزه‌ی انرژی تجدیدپذیر تدوین شده است. با این حال ترجمه‌ی کتابی مرجع در حوزه‌ی انرژی تجدیدپذیر دریایی تا کنون مغفول مانده است. لذا مترجمان، با انتخاب یکی از مناسب ترین کتب مرجع در حوزه‌ی انرژی تجدیدپذیر دریایی که توسط برنارد مولتون نگارش شده است، تلاش کرده‌اند تا خلاء وجود چنین کتابی را در حوزه‌ی مذکور برای جامعه‌ی علمی کشور مرتفع سازند. از اهداف اصلی مترجمان آن بوده است که کتاب حاضر برای دانشجویان حوزه‌های مهندسی دریا و مکانیک، پژوهشگران، محققان و صنعتگران حوزه‌ی صنایع دریایی کارآمد و راهگشا می‌باشد. در پایان، خدای متعال را برای توفیق ترجمه‌ی این کتاب شاکریم و امید است ترجمه‌ی حاضر، مسیر رشد و شکوفایی جامعه‌ی علمی کشور را تسهیل نماید. همچنین از تمامی خوانندگان کتاب حاضر، تقاضا داشته تا با نظرات و پیشنهادات خود (از طریق ایمیل [hashemdesigner@gmail.com](mailto:hashemdesigner@gmail.com))، ما را در چاپ‌های الکترونی بعدی کتاب یاری نمایند.

اسفندماه ۱۳۹۷

دکتر امین نجفی (استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه امام حسین (ع))

مهندس هاشم نوروزی (دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی امیرکبیر)

مهندس علی اصغر مقدس (کارشناس ارشد مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه امام حسین (ع))

## فهرست

صفحه	عنوان
۱.....	پیشگفتار.....
۱۱۱.....	دبیاچه.....
۱.....	<b>فصل ۱. محیط و منابع انرژی دریایی.....</b>
۱.....	۱-۱ مقدمه.....
۲.....	۲-۱ منابع فیزیکی و پتانسیل.....
۳.....	۱-۲-۱ تعاریف و اندازه ها در موضوع انرژی دریایی.....
۴.....	۲-۲-۱ پتانسیل تبدیل و انرژی.....
۵.....	۳-۲-۱ انرژی بادی.....
۷.....	۴-۲-۱ انرژی جزرومدی.....
۸.....	۵-۲-۱ انرژی جریان جزرومدی.....
۱۰.....	۶-۲-۱ انرژی خیز آب.....
۱۱.....	۷-۲-۱ تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس.....
۱۲.....	۳-۱ جنبه های فیزیکی محیط دریایی.....
۱۳.....	۱-۳-۱ عمق آب.....
۱۵.....	۲-۳-۱ طبیعت بستر دریا.....
۱۶.....	۳-۳-۱ وضعیت آب و هوای اقیانوسی.....
۱۷.....	۴-۳-۱ فاصله از ساحل.....
۱۸.....	۴-۱ داده های محیطی.....
۱۸.....	۱-۴-۱ فاکتورهای محیطی که باید در نظر گرفته شوند.....

۱۹	..... ۲-۴-۱ مناطق ویژه
۲۳	..... ۵-۱ کتابشناسی
<b>۲۵</b>	<b>..... فصل ۲. محدودیت های محیط دریایی</b>
۲۵	..... ۱-۲ شرایط بحرانی در دریا
۲۶	..... ۱-۱-۲ برخی ملاحظات پیرامون عدم قطعیت ها
۲۶	..... ۲-۱-۲ از پاسخ بحرانی تا شرایط ایجادکننده ی آنها
۲۷	..... ۳-۱-۲ از شرایط متداول تا وقایع منحصر به فرد
۳۲	..... ۴-۱-۲ برخی مشخصه های مقادیر بحرانی آب و هوای دریایی
۳۹	..... ۲-۲-۲ دوام
۴۲	..... ۳-۲-۲ حفاظت در مقابل رسوب
۴۶	..... ۳-۲ کتابشناسی
<b>۵۱</b>	<b>..... فصل ۳. برخی از مفاهیم هیدرودینامیک و مهندسی اقیانوس</b>
۵۱	..... ۱-۳ محیط دریایی
۵۱	..... ۱-۱-۳ امواج اقیانوسی
۵۶	..... ۲-۱-۳ جریان ها و باد
۵۷	..... ۲-۳ بارهای وارده بر سازه های دریایی
۵۸	..... ۱-۲-۳ نیروی هیدرواستاتیک
۵۹	..... ۲-۲-۳ نیروهای تحریک در امواج
۶۰	..... ۳-۲-۳ نیروهای تشعشع
۶۲	..... ۴-۲-۳ نیروهای دریفت در امواج
۶۲	..... ۵-۲-۳ نیروهای ویسکوز درگ
۶۴	..... ۳-۳ ابزارهای عددی و آزمایشگاهی برای انجام تحلیل
۶۴	..... ۱-۳-۳ روش های عددی

۶۸	..... ۲-۳-۳ روش های آزمایشگاهی
۷۵	..... ۴-۳ نتیجه گیری
۷۵	..... ۵-۳ کتابشناسی
<b>۷۷</b>	<b>..... فصل ۴. انرژی دریایی و بازیگران صنعتی</b>
۷۷	..... ۱-۴ چرا انرژی دریایی به عوامل صنعتی بزرگ مربوط می شود؟
۷۷	..... ۱-۱-۴ محیط دریایی، پیچیده و گاهی اوقات خشن می باشد
۷۸	..... ۲-۱-۴ تجهیزات مداخله در دریا
۷۹	..... ۲-۴ منبع انرژی با پتانسیل عظیم
۸۲	..... ۳-۴ انرژی دریایی: بخش مخصوص بازیگران صنعتی و سرمایه گذاران عمده بین المللی
۸۳	..... ۴-۴ نمونه ای از انرژی بادی فراساحلی: بازیگران اصلی و صنعت در فرانسه
۸۵	..... ۵-۴ گردهمایی صنعتی
۸۵	..... ۱-۵-۴ بازیگران پروژه
۸۶	..... ۲-۵-۴ موثرترین روش اختصاص کار
۸۷	..... ۶-۴ خطرات صنعتی و چگونگی مدیریت آنها
۸۷	..... ۱-۶-۴ مرحله ی توسعه
۹۳	..... ۲-۶-۴ خطرات فنی در حین احداث
۹۴	..... ۳-۶-۴ خطرات احتمالی در حین مرحله ی عملیات
۹۶	..... ۴-۶-۴ خطرات مربوط به تخریب
۹۷	..... ۷-۴ مدیریت خطرات ناشی از مداخله های انجام شده در دریا
۹۸	..... ۸-۴ طراحی و نگهداری تأسیسات تولید برق در دریا
۱۰۱	..... ۹-۴ سیاست ها و سازمان نگهداری
۱۰۳	..... ۱۰-۴ فعالیت های عملیاتی و نگهداری
۱۰۶	..... ۱۱-۴ تخمین هزینه های نگهداری



۱۰۷ ..... ۱۲-۴ تصمیم‌گیری توسط سرمایه‌گذاران

۱۱۲ ..... ۱۴-۴ کتابشناسی

**۱۱۵ ..... فصل ۵. نصب توربین‌های بادی در دریا**

۱۱۵ ..... ۱-۵ مشخصات ویژه‌ی محیط دریایی

۱۱۵ ..... ۱-۱-۵ اثر امواج

۱۱۷ ..... ۱-۱-۵ فرسایش

۱۱۸ ..... ۲-۵ طراحی سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی

۱۱۸ ..... ۱-۲-۵ معیارهای تحمل‌کننده‌ی اندازه‌سازه

۱۲۰ ..... ۲-۲-۵ انواع اصلی سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی

۱۲۴ ..... ۳-۵ مونتاژ توربین‌های بادی فراساحلی

۱۲۷ ..... ۴-۵ کابل‌های الکتریکی

۱۲۸ ..... ۵-۵ دسترسی به توربین‌های بادی فراساحلی

۱۳۰ ..... ۶-۵ توربین‌های بادی شناور

۱۳۰ ..... ۱-۶-۵ حقایق کلی درباره‌ی توربین‌های بادی شناور

۱۳۲ ..... ۲-۶-۵ ستون شناور

۱۳۲ ..... ۳-۶-۵ شناور نیمه‌مغرق

۱۳۳ ..... ۴-۶-۵ سکوی پایه‌کششی

۱۳۳ ..... ۵-۶-۵ توربین‌های بالادست یا پایین‌دست

**۱۳۶ ..... فصل ۶. سیستم‌های تبدیل انرژی در توربین‌های بادی فراساحلی**

۱۳۶ ..... ۱-۶ تحول فناوری انرژی بادی

۱۳۶ ..... ۱-۱-۶ تاریخچه مختصر

۱۴۱ ..... ۲-۱-۶ معماری توربین بادی مدرن

۱۴۸ ..... ۳-۱-۶ دستاوردها و توسعه‌های اخیر

۱۵۱	..... ۴-۱-۶ رویه های فنی
۱۵۴	..... ۲-۶ برآورد منابع انرژی باد
۱۵۴	..... ۲-۱-۶ طبیعت باد
۱۵۶	..... ۲-۲-۶ شناخت پتانسیل ساحل
۱۶۲	..... ۳-۲-۶ پتانسیل انرژی باد فراساحلی
۱۶۵	..... ۱-۳-۶ منحنی های آماری مشخصه
۱۷۸	..... ۴-۳-۶ مزارع بادی فراساحلی چندمگاواته
۱۸۴	..... ۴-۶ کتابشناسی

## **فصل ۷. تولید انرژی جزرومدی ..... ۱۹۳**

۱۹۳	..... ۱-۷ انرژی دامنه جزرومدی-تئوری و پتانسیل
۱۹۳	..... ۱-۱-۷ تئوری
۱۹۷	..... ۲-۷ پتانسیل توسعه ی انرژی دامنه ی جزرومدی
۱۹۷	..... ۱-۲-۷ پتانسیل جهانی
۲۰۰	..... ۲-۲-۷ پروژه ها و نیروگاه های برق جزرومدی موجود
۲۰۱	..... ۳-۷ انرژی دامنه ی جزرومدی درفرانسه: نیروگاه برق جزرومدی رنس
۲۰۱	..... ۱-۳-۷ تاریخی مختصرازانرژی دامنه ی جزرومدی درفرانسه
۲۰۴	..... ۲-۳-۷ احداث نیروگاه برق جزرومدی رنس
۲۰۷	..... ۳-۳-۷ گروه های حبابی درنیروگاه برق جزرومدی رنس
۲۰۹	..... ۴-۳-۷ چرخه های عملیاتی در نیروگاه برق جزرومدی رنس
۲۱۲	..... ۵-۳-۷ حفاظت کاتدی
۲۱۲	..... ۶-۳-۷ تخصص فنی حاصل ازآزمایش
۲۱۳	..... ۷-۳-۷ اثرات زیست محیطی تجربه شده
۲۱۴	..... ۴-۷ انرژی دامنه ی جزرومدی درکانادا-آناپولیس

۲۱۴	۱-۴-۷ تاریخی مختصرازانرژی دامنه ی جزرومدی درکانادا (خلیج فاندی).....
۲۱۷	۲-۴-۷ ایستگاه رویال جنریتینگ آنابولیس .....
۲۲۱	۵-۷ انرژی دامنه ی جزرومدی درانگلستان-سهورن .....
۲۲۱	۱-۵-۷ تاریخی مختصرازانرژی دامنه ی جزرومدی در انگلستان.....
۲۲۳	۲-۵-۷ پژوهش هایی در رابطه با پروژه های انرژی دامنه ی جزرومدی دردهانه ی سهورن.....
۲۲۷	۳-۵-۷ بررسی پاسخ های ابتکاری برای دهانه ی سهورن .....
۲۳۰	۵-۴-۷ پژوهش درباره ی پروژه های انرژی دامنه ی جزرومدی دردهانه ی میرزی ..
۲۳۲	۶-۷ انرژی دامنه ی جزرومدی در کره ی جنوبی-سیهوا.....
۲۳۲	۱-۶-۷ تاریخی مختصر از انرژی دامنه ی جزرومدی در کره ی جنوبی .....
۲۳۳	۲-۶-۷ طرح انرژی دامنه ی جزر و مدی سیهوا.....
۲۳۵	۷-۷ چالش انرژی دامنه ی جزر و مدی .....
۲۳۵	۱-۷-۷ هزینه ها .....
۲۳۷	۲-۷-۷ اثرات زیست محیطی.....
۲۳۸	۸-۷ کتابشناسی .....
<b>۲۴۶</b>	<b>فصل ۸. مفاهیم، مدل سازی و کنترل توربین های جزرومدی .....</b>
۲۴۶	۱-۸ مقدمه .....
۲۴۷	۲-۸ فناوری پیشرفته در زمینه ی توربین های جزرومدی .....
۲۴۷	۱-۲-۸ مفاهیم پایه و توپولوژی .....
۲۵۱	۲-۲-۸ توربین های بنانهاده شده براساس نیروی لیفت .....
۲۵۴	۳-۲-۸ مفاهیم دیگر .....
۲۵۷	۴-۲-۸ داکت ها .....
۲۵۹	۵-۲-۸ پتانسیل انرژی و انتخاب سایت.....

۲۶۳	..... مدل سازی و کنترل توربین های جزرومدی
۲۶۳	..... ۱-۳-۸ مدل سازی
۲۸۷	..... ۲-۳-۸ کنترل عناصر توربین جزرومدی
۳۰۳	..... ۴-۸ کتابشناسی
<b>۳۰۸</b>	<b>..... فصل ۹. پیمپولبریهات: توسعه ی اولین مجموعه ی جزرومدی در فرانسه</b>
۳۰۸	..... ۱-۹ مقدمه و مفهوم
۳۱۰	..... ۱-۱-۹ انتخاب سایت
۳۱۱	..... ۲-۱-۹ انتخاب محلی
۳۱۲	..... ۳-۱-۹ انتخاب مکانی برای مسیر ساحلی و کابل ها در آینده
۳۱۵	..... ۴-۱-۹ اکتشاف
۳۱۶	..... ۲-۹ انتخاب فنآوری ها
۳۱۶	..... ۱-۲-۹ روش متدولوژی برای توربین ها
۳۲۰	..... ۲-۲-۹ نگاهی مقایسه ای به فنآوری ها
۳۲۴	..... ۳-۲-۹ نتیجه گیری
۳۲۵	..... ۴-۲-۹ انتخاب توپولوژی اتصال
۳۲۷	..... ۵-۲-۹ انتخاب راهبرد اتصال
۳۲۸	..... ۶-۲-۹ پیشرفت های فنی
۳۲۹	..... ۳-۹ مشخصات فنی پروژه و توان قابل تولید
۳۲۹	..... ۱-۳-۹ مزرعه ی توربین ها
۳۳۰	..... ۲-۳-۹ محاسبات توان قابل تولید
۳۳۳	..... ۳-۳-۹ نظارت محیطی
۳۳۶	..... ۴-۹ روند اجرایی
۳۳۶	..... ۱-۴-۹ زمینه و روند قابل اعمال

- ۳۴۰ ..... ۲-۴-۹ باز خورد
- ۳۴۱ ..... ۵-۹ نتیجه گیری و چشم اندازها
- ۳۴۲ ..... ۶-۹ کتابشناسی

### **فصل ۱۰. باز خورد پروژه ی توربین جریان جزرومدی سابلا ..... ۳۴۵**

- ۳۴۵ ..... ۱-۱۰ مقدمه
- ۳۴۶ ..... ۲-۱۰ طراحی توربین های سابلا
- ۳۴۶ ..... ۱-۲-۱۰ طرح اولیه
- ۳۴۶ ..... ۲-۲-۱۰ طرح دوم
- ۳۴۸ ..... ۳-۲-۱۰ طرح سوم
- ۳۵۰ ..... ۴-۱۰ پروژه ی نمایشی سابلا D03
- ۳۵۰ ..... ۱-۳-۱۰ ارائه ی پروژه
- ۳۵۱ ..... ۲-۳-۱۰ نتایج اندازه گیری ها
- ۳۵۳ ..... ۳-۳-۱۰ مشاهدات
- ۳۵۵ ..... ۴-۱۰ نتایج
- ۳۵۵ ..... ۵-۱۰ کتابشناسی

### **فصل ۱۱. مبدل های انرژی باد ..... ۳۵۸**

- ۳۵۹ ..... ۱-۱۱ معرفی منبع انرژی موجی
- ۳۶۱ ..... ۱-۱-۱۱ در نظر گرفتن طبیعت طیفی خیز آب
- ۳۶۲ ..... ۲-۱-۱۱ نمودار رخدادهای وضعیت های دریایی
- ۳۶۴ ..... ۳-۱-۱۱ توزیع جغرافیایی
- ۳۶۵ ..... ۲-۱۱ دسته بندی مبدل های انرژی موجی
- ۳۶۹ ..... ۱-۲-۱۱ سیستم های روگذر: نوع A
- ۳۷۲ ..... ۲-۲-۱۱ سیستم های نوسانی ستون آب: نوع B

۳۷۷	۱۱-۲-۳ سیستم های جسم نوسانی: نوع C
	۱۱-۲-۴ عملکرد هیدرودینامیکی مبدل های انرژی موجی: پهنای (عرض) دریافت و
۳۸۳	نسبت پهنای دریافت
	۱۱-۳ مبدل های مستقیم انرژی موجی به همراه تبدیل مستقیم الکترومکانیکی (نوع C5)
۳۸۵	
۳۸۷	۱۱-۳-۱ کار در دانشگاه های دوامادینبورگ (UK)
۳۸۹	۱۱-۳-۲ کار در دانشگاه آپسالا (سوئد)
۳۹۲	۱۱-۳-۳ کار در دانشگاه صنعتی دلفت (هلند)
	۱۱-۳-۴ مبدل انرژی موجی SEAREV (CNRS، دانشگاه مرکزی نانت، دانشگاه
۳۹۴	نرمال سوپر یورکاشن)
۳۹۶	۱۱-۴ نوسانات توان تولیدی مبدل های انرژی موجی
۴۰۱	۱۱-۵ کتابشناسی

## **فصل ۱۲. تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس از بعد تاریخی** ۴۰۶

۴۰۶	۱۲-۱ منبع حرارتی اقیانوس ها
۴۰۶	۱۲-۱-۱ منشاء منابع حرارتی
۴۱۱	۱۲-۱-۲ توزیع و تنوع منبع حرارتی
۴۱۳	۱۲-۲ قواعد اصلی تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس
۴۱۳	۱۲-۲-۱ یخچال معکوس
۴۱۵	۱۲-۲-۲ تفاضلات دمایی کوچک
۴۱۸	۱۲-۳ جورجیسکلاد، پیشگام
۴۱۸	۱۲-۳-۱ شروع یک ماجراجویی
۴۱۹	۱۲-۳-۲ نیروگاه روی خشکی در کوبا
۴۲۲	۱۲-۳-۳ پایان یک رویا در برزیل
۴۲۳	۱۲-۴ رنسانسی در اواخر قرن ۲۰م؟

.....	۱۲-۴-۱ پروژه ی کوچک OTEC	۴۲۴
.....	۱۲-۴-۲ پروژه ی OTEC-1	۴۲۵
.....	۱۲-۴-۳ پروژه ی آزمایشی OTEC واقع بر خشکی در نائورو	۴۲۸
.....	۱۲-۴-۴ آزمایش لوله ی معلق آب سرد (NOAA)	۴۲۹
.....	۱۲-۴-۵ انجام آزمایش برای نصب بخشی از لوله ی آب سرد در بستر دریا	۴۳۲
.....	۱۲-۴-۶ آزمایش تولید توان خالص	۴۳۳
.....	۱۲-۴-۷ موانع بر سر راه پروژه ی هند-ژاپن	۴۳۹
.....	۱۲-۵ بازتاب ها	۴۴۱
.....	۱۲-۶ کتابشناسی	۴۴۲
.....	<b>فصل ۱۳. تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس: پاسخ های بررسی شده</b>	<b>۴۴۷</b>
.....	۱۳-۱ روش صنعتی برای تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس	۴۴۷
.....	۱۳-۲ سیستم تبدیل انرژی در مرکز OTEC	۴۴۸
.....	۱۳-۲-۱ چرخه های ترمودینامیکی	۴۴۸
.....	۱۳-۲-۲ اجزای عمده ی "سیستم انرژی"	۴۵۷
.....	۱۳-۲-۳ سیالات	۴۶۴
.....	۱۳-۳ یکپارچه سازی نیروگاه های OTEC	۴۷۸
.....	۱۳-۳-۱ نیروگاه های ساحلی و فراساحلی	۴۷۸
.....	۱۳-۳-۲ پاسخ های مختلف برای سکو	۴۸۵
.....	۱۳-۴ نیروگاه OTEC در محیط دریایی	۴۹۸
.....	۱۳-۴-۱ داده های محیطی که بر کارکرد OTEC تأثیر دارند	۴۹۸
.....	۱۳-۴-۲ OTEC، شکلی از انرژی که به شرط نظارت دقیق بر مکان ها، به محیط احترام می گذارد	۵۰۲
.....	۱۳-۴-۳ چهارچوب کاری قانونی که باید تقویت شود	۵۰۶

۵۰۸	..... ۴-۴-۱۳ تفکرات
۵۰۸	..... ۵-۱۳ نتیجه گیری
۵۰۹	..... ۶-۱۳ کتابشناسی
<b>۵۱۱</b>	<b>..... فصل ۱۴. سیستم های تبدیل برق</b>
<b>۵۱۱</b>	<b>..... ۱-۱۴ تاریخچه</b>
۵۱۲	..... ۲-۱۴ حقایق کلی
۵۱۶	..... ۱-۲-۱۴ تحلیل پاسخ های تبدیل
۵۱۷	..... ۲-۲-۱۴ شرایط شبکه ها
۵۳۸	..... ۳-۱۴ اینورترهای (متناوب سازهای) ولتاژدرمدولاسیون پهنای پالس
۵۴۴	..... ۱-۳-۱۴ اتصال DC
۵۵۰	..... ۲-۳-۱۴ جریان های DC
۵۶۰	..... ۳-۳-۱۴ طراحی رابط DC
۵۶۵	..... ۴-۳-۱۴ فنآوری باس DC
۵۶۶	..... ۵-۳-۱۴ طراحی خازن ها
۵۶۸	..... ۴-۱۴ ذخیره سازی
۵۷۱	..... ۵-۱۴ کنترل ولتاژ <i>Ed</i>
۵۷۱	..... ۱-۵-۱۴ پایداری
۵۷۴	..... ۶-۱۴ فیلترسازی ولتاژهای خروجی
۵۷۶	..... ۱-۶-۱۴ فیلترهای محتمل
۵۸۶	..... ۷-۱۴ انتقال
۵۸۶	..... ۱-۷-۱۴ نکاتی درموردکابل ها
۵۹۴	..... ۲-۷-۱۴ نمودارهای محتمل برای انتقال
۶۰۰	..... ۳-۷-۱۴ ارتباطات



۶۰۰	..... ۴-۷-۱۴ جبران سازی
۶۰۲	..... ۸-۱۴ فنآوری
۶۰۲	..... ۱-۸-۱۴ مدارهای خنک کاری
۶۰۵	..... ۲-۸-۱۴ خنک کاری نیمه هادی ها
۶۱۱	..... ۳-۸-۱۴ مبدل
۶۱۲	..... ۴-۸-۱۴ نمودار توان
۶۱۴	..... ۵-۸-۱۴ اجزای سیستم کنترل
۶۱۶	..... ۹-۱۴ نگهداری
۶۱۷	..... ۱۰-۱۴ نتیجه گیری
۶۱۸	..... ۱۱-۱۴ کتابشناسی

## **فصل ۱۵. کابل های دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فنآوری های فراساحلی .. ۶۲۲**

۶۲۲	..... ۱-۱۵ مقدمه
۶۲۳	..... ۲-۱۵ حقایق کلی
۶۲۵	..... ۳-۱۵ کاربردهای سیستم های کابلی با ولتاژبالا (فشاربالا)
۶۲۶	..... ۱-۳-۱۵ سیستم کابلی برای انتقال جریان متناوب
۶۴۵	..... ۲-۳-۱۵ سیستم کابل تک هسته ای برای کاربرد DC
۶۴۵	..... ۳-۳-۱۵ لوازم جانبی اتصال
۶۵۹	..... ۴-۱۵ تولید کابل های زیرآبی
۶۵۹	..... ۱-۴-۱۵ مقدمه
۶۶۲	..... ۲-۴-۱۵ رسانا
۶۶۴	..... ۳-۴-۱۵ عایق کاری
۶۶۵	..... ۴-۴-۱۵ استفاده از جداره فلزی
۶۶۶	..... ۵-۴-۱۵ روکش کاری

- ۶۶۶ ..... ۱۵-۴-۶ مونتازیا لایه گذاری
- ۶۶۸ ..... ۱۵-۴-۷ زره گذاری
- ۶۶۸ ..... ۱۵-۴-۸ آزمایش روال
- ۶۶۹ ..... ۱۵-۵-۵ قواعد کلی و ابزارهای طراحی کابل های زیرآبی
- ۶۶۹ ..... ۱۵-۵-۱ طراحی الکتریکی
- ۶۶۹ ..... ۱۵-۵-۲ ظرفیت انتقال
- ۶۷۲ ..... ۱۵-۵-۳ مشخصات فیزیکی مواد مورد استفاده
- ۶۷۵ ..... ۱۵-۵-۴ زره
- ۶۷۶ ..... ۱۵-۶-۶ آزمایش های کابل های زیرآبی
- ۶۷۶ ..... ۱۵-۶-۱ آزمایش توسعه
- ۶۷۷ ..... ۱۵-۶-۲ آزمایش تأیید اولیه (پیش تأیید)
- ۶۷۸ ..... ۱۵-۶-۳ آزمایش نوع
- ۶۷۸ ..... ۱۵-۶-۴ آزمایش روال
- ۶۷۹ ..... ۱۵-۶-۵ آزمایش بر روی نمونه ها
- ۶۷۹ ..... ۱۵-۷-۷ مشخصات کابل های DC
- ۶۷۹ ..... ۱۵-۸-۸ مشخصات کابل های پویا
- ۶۸۰ ..... ۱۵-۹-۹ مشخصات الکتریکی کابل های زیرآبی
- ۶۸۰ ..... ۱۵-۹-۱ فرمول های مرسوم
- ۶۸۱ ..... ۱۵-۹-۲ کاردرحال پیشرفت در CIGRE
- ۶۸۱ ..... ۱۵-۱۰-۱۰ حصول پیشرفت در هنگام Jicable 2011
- ۶۸۳ ..... ۱۵-۱۱-۱۱ کتابشناسی
- ۶۸۷** ..... واژگان فارسی به انگلیسی
- ۷۰۹** ..... واژگان انگلیسی به فارسی







## پیشگفتار

هنگامی که من برای اولین بار با برنار مولتور در اوایل ۲۰۰۰ ملاقات کردم در آن هنگام یک "کلوب انرژی دریایی" در <sup>۱</sup> ECRIN تأسیس شد. در آن زمان همه فقط در مورد انرژی باد فراساحل صحبت می‌کردند (در حقیقت، در مورد فرانسه نیز صحبت نمی‌کردند). تعداد کمی از ما به عنوان نمایندگان سازمان‌های تحقیقاتی و عوامل صنعتی جرأت کردیم که به پتانسیل بالقوه انرژی دریایی به صورت کامل و همچنین خطری که فرانسه در از دست دادن کشتی انرژی تجدیدپذیر دوباره با آن رو برو بود، اشاره کنیم. همان‌طور که برنارد مولتون در پیشگفتار این کتاب به آن اشاره می‌کند، خطرات و جوایز زیادی در انرژی تجدیدپذیر دریایی (MRE) وجود دارد که به پتانسیل انرژی آن و اثر اقتصادی آن به لحاظ بازارها و مشاغل بستگی دارند (به ویژه در فرانسه نواحی خارجی و همچنین در بازار صادرات). با در نظرگیری اینکه تعدادی از دولت‌های اروپایی شروع به اتخاذ روش‌های ابتکاری و آینده‌نگرانه با سیاست‌های تشویقی در این زمینه کردند، این مطلب درست. این سیاست‌ها باعث شد تا برخی شرکت‌های صنعتی حتی در مرحله‌ی اولیه در این بازار بسیار بزرگ شکل بگیرند.

پس از آن، دورنما در فرانسه دچار تغییر شد. با این که همچنان افراد بدبین حضور دارند، اما ضرورت و فوریت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر (REها) پذیرفته شده است. معیارهای پیرو گرنل در باب محیط<sup>۲</sup> و گرنل در باب اقیانوس، مشورت گسترده از عوامل مربوطه و ابتکارات سازمان‌های تحقیقاتی، جوامع شرکت‌های صنعتی و محلی نشان داده‌اند که به توسعه بیشتر فن‌آوری‌های موجود در استخراج MREها، شناسایی اولویت‌های تحقیقاتی و شکل دادن به روابط میان عوامل بالقوه در زمینه انرژی دریایی در فرانسه به صورت راهبردی نیاز است. بسیاری از این عوامل در زمره نویسندگان این کتاب هستند.

پنج نمونه‌ی اولیه MRE به صورت مشترک به عنوان بخشی از برنامه‌ی "سرمایه‌گذاری برای آینده" تأمین مالی شده‌اند. این نمونه‌ها از امسال تا ۲۰۱۳ آزمایش خواهند شد. فراخوان مزایده برای باد فراساحل در ژوئیه ۲۰۱۱ به ما این امکان را می‌دهد که در طی چند سال بعدی به ظرفیت ۳۰۰۰ MW دست پیدا کنیم که گامی به سمت دستیابی به هدف ۶۰۰۰ MW تا

---

<sup>۱</sup> ECRIN: "Échange et coordination recherche-industrie" انجمنی برای ارتقای روابط صنعت و محقق بود که توسط CNRS و CEA بنا نهاده شده است.

<sup>۲</sup> "محیط گرنل" کنفرانسی است که در آن دولت، مقامات محلی، اتحادیه‌های تجاری، بخش‌های تجاری و داوطلبانه گرد هم می‌آیند تا به طرحی عملی شامل معیارهای عینی برای کنترل مسائل محیطی دست پیدا کنند.

۲۰۲۰ است. اولین مزرعه‌ی جریان جزر و مدی پیش‌صنعتی در ۲۰۱۲ در خارج از ساحل پیمپول در کوتست د'آرمور افتتاح خواهد شد. با این وجود، به سرمایه‌گذاری در مقیاس ملی و اروپا، کمک به تحقیقات، توسعه‌ی نمونه‌های اولیه، "مزارع" آزمایشی و آزمایش در دریا نیاز است تا این فناوری‌ها به مرحله‌ی عملی فنی و اقتصادی برسند.

در این زمینه، ریاست جمهوری فرانسه در ژوئیه‌ی ۲۰۰۹ اعلام کرد که برنامه‌ی فنی بسیار بزرگی برای انرژی دریایی در فرانسه اختصاص یافته است. این مطلب چند ماه بعد توسط نخست‌وزیر با بیان اینکه در برست بنا خواهد شد، تأیید گشت. انجمن مزیت انرژی بدون کربن<sup>۱</sup> (IEED) که توسط "انرژی دریایی فرانسه"<sup>۲</sup> تشکیل شده است، یک طرح ابتکاری ملی است که در محدوده‌ی شرکت‌ها، سازمان‌های تحقیقاتی و موسسات آموزش عالی و جوامع محلی ساخته شده است. این طرح تقریباً ۵۰ بخش عامل را گرد هم می‌آورد و پتانسیل چند انضباطی برای تحقیقات و توسعه (R&D) و احتمالاً برای آزمایش روش‌ها و آزمایش سایت‌ها ایجاد می‌کند. انتظار می‌رود که این IEED در ۲۰۱۱ ایجاد شود و ما را قادر خواهد ساخت تا به توسعه‌ی بخش جدید انرژی با پیشنهاد کارهای ابتکاری و تازه سرعت ببخشیم.

این کتاب، کتاب راهنمای انرژی تجدیدپذیر دریایی، توسط برنارد مولتون ویراستاری شده است و در زمان دقیقاً درستی منتشر شده است و باعث کمک حقیقی به ترویج دانش ضروری برای تحقیق در MRE می‌گردد. این کتاب با فاصله گرفتن از چشم‌انداز سخت و فهرست راهبردی متداول، زمینه‌هایی را بررسی می‌کند که در آن‌ها فضایی برای پیشرفت قابلیت اطمینان و عملکرد وجود دارد. بسیار مهم خواهد بود که جنبه‌های غیر فنی، محیطی و اقتصادی-اجتماعی را توسعه داد. به خصوص هنگامی که ما از مدل‌های اولیه تجربه کسب کنیم و از این درس‌های آموخته برای شناسایی جهات جدید در تحقیق استفاده کنیم.

این کتاب به عنوان مرجعی برای برخی از عوامل در زمینه‌ی انرژی دریایی استفاده خواهد شد: محققان، SMEها، صنعت‌گران و غیره و همچنین برای محصلین علاقه‌مند به این زمینه که می‌توانند دروس عمومی یا تخصصی برگزار شده در فرانسه (بیشتر در برست با اساتید انرژی تجدیدپذیر دریایی) و همچنین در اروپا و کل جهان را دنبال کنند.

*Michel PAILLARD*

*Project Manager, "Energies Marines Renouvelables" IFREMER*

*November 2011*

---

<sup>1</sup>The Institut d'Excellence dans le domaine des Energies Décarbonées

<sup>2</sup>France Energies Marines

## دیباچه

در زمینه‌ی فناوری‌های استخراج انرژی تجدیدپذیر دریایی که به سرعت در حال پدیدار شدن هستند، ما اطلاعاتی از بهترین متخصصان فرانسوی گردآوری کرده‌ایم تا جنبه‌های فنی آن را بدون در نظرگیری جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی این حوزه‌ی نسبتاً تازه بررسی کنیم.

مجموعه‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر (*RE*) دارای پتانسیل بسیاری است، اما به سبب عدم اعتماد یا بدنامی آن مدت‌ها بود که ناکافی در نظر گرفته می‌شد. اما امروزه به صورت گسترده شناسایی و پذیرفته شده است. در کل زیست‌کره‌ی خاکی، این منابع حدود ۸۰۰۰ برابر مصرف انرژی اولیه‌ی امروز جهان دارای انرژی می‌باشند [*MUL II*]. ما می‌توانیم با فرض اینکه اقیانوس‌ها حدود دو سوم سطح زمین را پوشش دهند، بیان کنیم که آن‌ها به تنهایی شامل منبعی معادل ۵۰۰۰ برابر مصرف ما می‌شوند. بنابراین، مسئله در اینجا پتانسیل بالقوه‌ی در فضاهایی است که در عین داشتن محدودیت کمتر، خطرات بیشتری دارند.

در سال ۱۹۹۹، هنگامی هرمن شیر او موفق به کسب جایزه‌ی جایگزین نوبل شد [*SCH 06*] (عضو پارلمان آلمان و طرفدار قوانین مربوط به توسعه‌ی *RE*ها در آلمان) نظرات زیر را ارائه داد که به خوبی آینده‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر را توضیح می‌داد (خشکی و آبی): "انرژی‌های تجدیدپذیر پایان ناپذیر هستند. آن‌ها محیط زیست را تخریب نمی‌کنند. در هر جایی در موجود هستند. [...] استفاده از آن‌ها کار هبستگی با نسل‌های آتی را تسهیل می‌بخشد. [...] آن‌ها آینده‌ی بشر را تأمین می‌کنند."

در رابطه با الکتریسیته، اگرچه این انرژی تنها دارای ۱۷٪ از مصرف نهایی انرژی در جهان هستند، بی‌شک یکی از نمادهای قدرتمند پیشرفت بشریت است. در حقیقت، بیشتر از هر چیز دیگری به نیازهای اساسی انسان، مانند تغذیه، مراقبت و کشت کمک می‌کند. این انرژی از میان تمام شکل‌های نهایی (تجاری) آن، به سرعت در حال رشد است و احتمالاً به مقام اول بازار انرژی جهانی در قرن ۲۱م برسد.

در حالی که ممکن است استفاده از الکتریسیته به عنوان شکلی از انرژی بی‌خطر باشد (انتشار کم یا صفر)، با این وجود، اثر عمیقی بر محیط زیست دارد؛ زیرا در حال حاضر بیش از ۸۰٪ آن با استفاده از منابع تجدیدناپذیر و به شدت آلوده‌کننده تولید می‌گردند (۶۷٪ از سوخت‌های فسیلی و ۱۳٪ از فناوری هسته‌ای). نگرانی درباره‌ی کاهش منابع تجدیدناپذیر و اثرات زیست-



محیطی آن‌ها به توسعه‌ی گسترده‌ی فن‌آوری‌هایی منجر شده است که منابع تجدیدپذیر را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. به احتمال بسیار زیاد تا سال ۲۰۳۰ تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر، حدود یک سوم تا نصف تولید جهانی را تشکیل دهند. همچنین، برخی سناریوهای جدی مطرح شده است که تا سال ۲۰۵۰ ۱۰٪ تولید الکتریسیته در سطح "محلی" (در مقیاس مناطق بزرگ) از منابع تجدیدپذیر فراهم شود.

در این زمینه یکی از مشکلات اصلی، تناوب تولید الکتریسیته از منابع در دسترس (خورشید و باد) است. ذخیره‌ی انرژی، بهره‌برداری از پیش‌بینی وضع هوا و مدیریت هوشمند (به ویژه مصرف) از جمله راه‌های اصلی برای دور زدن این مشکل است. با این حال عامل دیگری نیز وجود دارد که به طور ویژه برای کاهش هزینه‌ها حائز اهمیت است (تکمیل‌کننده‌ی تولید). مطالعات نشان داده است که برای مثال در اروپا [PEL 10]، سهم تکمیلی باد/خورشید بسیار زیاد است و این امر به کاهش چشمگیر نیاز به ذخیره‌سازی کمک می‌کند. همچنین اثبات گشته است که در مقیاس کوچک، توان موجی اثر یکنواخت‌سازی را افزایش می‌دهد و به کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مورد نیاز کمک می‌کند [BAB 06]. علاوه بر این حقیقت که بهره‌برداری از این مورد تکمیلی باعث می‌شود تا بتوانیم هزینه‌های کلی را کاهش دهیم، حقیقت اینکه بخش زیادی از جمعیت جهان در نواحی ساحلی زندگی می‌کنند، مشوق اصلی جستجوی دریا برای استخراج منابع است؛ علی‌رغم اینکه شرایط دریا بسیار سخت‌تر از روی خشکی است.

منابع انرژی دریایی دارای انواع شکل‌های مختلف هستند. علاوه بر منابع زمین‌گرایی و زیست-توده‌ی دریایی (به ویژه جلبک)، اکثر منابع از تابش خورشید و "بقایای تفکیک" آن، یعنی باد و امواج و جریان‌های چرخشی ترموهالین ناشی می‌شوند. فقط اثرات جزر و مد، منشأ متفاوتی دارد، زیرا از برهمکنش جاذبه‌ی زمین، ماه و خورشید ناشی می‌گردد.

جدول زیر برگرفته از [MUL 09] است و دید کلی درباره‌ی منابع اقیانوسی می‌دهد. ارقام صرفاً به عنوان نمونه ارائه شده‌اند. می‌توان اندازه‌ی بخش‌های قابل استخراج و قابل بازیابی و همچنین دستاوردها در نظر گرفته‌شده برای محاسبه‌ی انرژی برق قابل استخراج مورد نقد قرار داد. منبع دقیق این داده‌ها و توضیحات مربوطه را می‌توانید در [MUL 09] بیابید. تولید جهانی برق در ۲۰۰۸ حدود  $TWh$  بود (به عنوان مرجع).

جزر و مد		سیکل‌های هیدرولوژیکی			زیست توده دریایی	جریان‌های پیوسته دریایی	انرژی خورشیدی، دریایی	انرژی برای سال 1000 TWh
جریان‌ها	سد‌ها	انرژی ازموتیک	موج‌ها	مزارع فراساحلی				
22		30	80	>>500	450	?	400,000	تخمین جهانی
1.8	0.6	0.3?	2	100	4 (1/100 <sup>th</sup> ?)	1?	4,000 (1/100 <sup>th</sup> ?)	سهام قابل بهره‌برداری
0.9	0.6	0.1? ( $\eta$ 30%)	0.75 ( $\eta$ 35%)	37 ( $\eta$ 37%)	1 ( $\eta$ 25%)	0.3? ( $\eta$ 30%)	80 ( $\eta$ 2%)	انرژی برق قابل بازیافت

جدول ۱ اندازه‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر و بخشی از آن که به صورت انرژی اولیه و برق با وسایل تولید قابل بازیابی می‌باشد و بازده این وسایل  $\eta$  تعیین شده است.

در حالی که عوامل اقتصادی و اجتماعی نیز دخیل هستند، این کتاب عمدتاً جنبه‌های فنی و به ویژه الکتریکی مبدل‌های انرژی دریایی را پوشش می‌دهد. می‌توان بعد محیطی را به ویژه در ارزیابی طول عمر (که بسیار مهم است) در چنین موضوعاتی بیشتر توسعه داد. ما در اینجا تمامی عوامل را تشویق می‌کنیم تا در زمینه‌ی تولید انرژی تجدیدپذیر، در هر جا که اطلاعات در دسترس باشد اثر محیطی را در تمام طول عمر مفاهیم مورد بحث در نظر بگیرند.

در نهایت، ما مایل هستیم تا به بریتانی که پتانسیل زیادی برای انرژی دریایی دارد (جدا از تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی)، اشاره کنیم. آن‌ها در سال ۲۰۰۹ سند مرجعی را تولید کردند [JOU 90] که ویژگی فنی کمتری از این کتاب دارد، اما به خوبی این کتاب را تکمیل می‌کند و ما توصیه می‌کنیم که آن را بخوانید.

در پایان، ما امیدوار هستیم که این کتاب به توسعه‌ی سریع‌تر انرژی تجدیدپذیر دریایی با فنآوری‌های جدید و مفاهیم جدید کمک کند که در ایجاد توسعه‌ی پایدار آن نقش خواهد داشت و بشریت امروزه بسیار به این توسعه بسیار نیاز دارد.

[BAB 06] BABARIT A., BEN AHMED H., CLÉMENT A.H., DEBUSSCHERE V., DUCLOS G., MULTON B., ROBIN G., “Simulation of electricity supply of an Atlantic island by offshore wind turbines and wave energy converters associated with a medium scale local energy storage”, *Elsevier Renewable Energy*, vol 31, pp. 153-160, 2006.

[JOU 09] JOURDEN G., MARCHAND P., *Des énergies marines en Bretagne: à nous de jouer!*, Report of the Conseil économique et social de Bretagne, Région Bretagne, March 2009.

[MUL 09] MULTON B., CLÉMENT A.H., RUELLAN M., SEIGNEURBIEUX J., BEN AHMED H., “Marine energy resources conversion systems”, Chapter 7 in SABONNADIÈRE J.C. (ed.), *Renewable Energy Technologies*, ISTE Ltd., London, John Wiley & Sons, New York, 2009.

[MUL 11] MULTON B., THIAUX Y., BEN AHMED H., “Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité”, *Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique*, D3900v2, February 2011.

[PEL 10] HEIDE D., VON BREMEN L., GREINER M., HOFFMANN C., SPECKMANN M., BOFINGER S., “Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe”, *Elsevier Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2483-2489, 2010.

[SCH 06] SCHEER H., *Energy Autonomy: The Economic, Social and Technological Case for Renewable Energy*, EarthScan, 200





# محیط و منابع انرژی دریایی

## ۱-۱ مقدمه

منابع انرژی دریایی به ویژگی‌های محیط دریایی وابسته می‌باشند: باد، امواج، جزر و مد، جریان‌ها، دما و غیره و البته زیست توده<sup>۱</sup>.

این منابع در طول زمان تغییر کرده و به صورت محیطی بسیار متغیر می‌باشند (به خصوص در مناطقی با جریان‌های قوی). بنابراین شناختن آن‌ها با جزئیات دقیق به منظور ارزیابی پتانسیل واقعی انرژی و سودمندی پروژه انرژی دریایی حائز اهمیت می‌باشد. همچنین ویژگی‌های محیط فیزیکی در جنبه‌های ساختاری اثر خواهد گذاشت (به عنوان مثال، مقاومت در برابر باد و امواج). به طور مشابه، طبیعت بستر دریا انواع زیرسازی‌های امکان‌پذیر را تعیین خواهد کرد.

با این حال، محیط دریایی به جنبه‌های فیزیکی ختم نمی‌شود. به طور آشکار، ما باید محیط بیولوژیکی (جانداران و گیاهان) را در نظر بگیریم و به طور کامل از تاثیر پروژه‌ها در تعادل زیست محیطی موجود آگاه باشیم.

در این فصل با استفاده از مثال ساحل بریتانی مشخصات محیط دریایی را ارائه می‌دهیم که باید از طرفی به منظور ارزیابی پتانسیل انرژی پروژه و از طرف دیگر بر تاثیر آن آگاه باشیم. ما به ترتیب منابع، عوامل ثابت فیزیکی و داده‌های محیطی را مورد بحث قرار می‌دهیم.

مثال بریتانی به عنوان بخشی از مطالعه‌ی راهبردی انجام شده از طرف شورای منطقه‌ای بریتانی<sup>۱</sup> در توسعه‌ی منابع انرژی دریایی در این منطقه [1] مورد پژوهش قرار گرفته است.

---

<sup>1</sup>Biomass

این فصل برگرفته از یک گزارش پیشرفت می‌باشد که به طور مشترک توسط اکتیمار<sup>۲</sup>، ناسکا ژئوسیستمس<sup>۳</sup> (فردی که نقشه‌های عرضه شده‌ی مربوطه را ارائه داد) و شرکت حقوقی الگانز<sup>۴</sup> (که بخشی از مطالعه‌ی آن در بخش ۱-۴-۲ دوباره تکرار شده است). این گزارش شامل بررسی نوشته‌هایی در رابطه با موضوع انرژی تجدیدپذیر دریایی و خصوصاً دو عنوان اخیر [2] و [3] می‌باشد که به عنوان کارهای مرجع در عناوین مورد بحث استفاده می‌شوند.

## ۱-۲ منابع فیزیکی و پتانسیل

پنج نوع اصلی منابع انرژی دریایی که برای تولید صنعتی کوتاه مدت و میان مدت دارای پتانسیل می‌باشند در ذیل آمده‌اند:

- انرژی باد که برای آن تأسیسات صنعتی بسیاری از قبل مورد استفاده قرار گرفته‌اند.
  - انرژی جزر و مدی (مانند نیروگاه برق جزر و مدی رنس<sup>۵</sup>) که برای آن به خصوص به دلیل تاثیر زیست محیطی این تأسیسات پروژه‌های طرح ریزی شده‌ی کمی وجود دارد.
  - انرژی هیدروسینتیکی<sup>۶</sup> (یا هیدروالکتریکی<sup>۷</sup>) که توسط جریان‌ها به وجود می‌آید و برای تولید آن وسایل بسیاری توسعه یافته است و چندین نمونه در دست آزمایش می‌باشند
  - انرژی خیزآب<sup>۸</sup> که توسط امواج تولید شده و وسایل تولید آن در مرحله‌ی توسعه و برخی در فاز آزمایش می‌باشند؛
  - انرژی حرارتی اقیانوسی که از تفاوت میان دمای سطح و دمای عمق بهره‌برداری می‌کند.
- تکنولوژی‌های دیگری نیز در دست مطالعه و آزمایش قرار دارند (به عنوان مثال، در موارد تکنیک‌های زیست توده و اسموزی<sup>۹</sup>) اما هنوز برای بهره‌برداری صنعتی آماده در نظر گرفته نشده‌اند.
- قبل از توصیف منابع و پتانسیل آن‌ها، مشخص کردن برخی تعاریف و اندازه‌ها سودمند می‌باشد [1].

<sup>1</sup>Conseil Régional de Bretagne

<sup>2</sup>Actimar

<sup>3</sup>Nasca Geosytemes

<sup>4</sup>Alligans

<sup>5</sup>Rance

<sup>6</sup>Hydrokinetica

<sup>7</sup>Hydroelectric

<sup>8</sup>Swell energy

<sup>9</sup>Osmotic

## ۱-۲-۱ تعاریف و اندازه‌ها در موضوع انرژی دریایی

وات ( $W$ ) عبارتی برای توان الکتریکی یک وسیله الکتریکی می‌باشد. این توان بیانگر مقدار آنی الکتریسیته‌ی تولیدی یا مصرف شده توسط تأسیسات است. ما در اینجا برای سیستم‌های تولید الکتریسیته از رایج‌ترین واحد استفاده شده یعنی مگاوات ( $MW$ ) بهره خواهیم برد.

میزان تولید انرژی تأسیسات مطابق ذیل می‌باشد:

- توربین آب نمونه: ۰/۵ تا ۱ مگاوات

- توربین بادی دریایی جدید: ۳ تا ۶ مگاوات

- نیروگاه برق جزر و مدی رنس: ۲۴۰ مگاوات

- راکتور هسته‌ای نوع  $EPR$  که در فلامانویل<sup>۱</sup> ساخته می‌شود: ۱۶۰۰ مگاوات.

انرژی الکتریکی بیانگر مقدار الکتریسیته‌ای است که در یک تأسیسات در طول یک بازه‌ی زمانی داده شده (که با ساعت بیان می‌شود) تولید یا مصرف می‌گردد. بنابراین انرژی با وات ساعت ( $Wh$ ) یا کیلووات ساعت ( $kWh$ ) بیان می‌شود. آسیاب بادی ۵ مگاوات در حال کار در توان کامل به مدت ۳۰۰۰ ساعت انرژی برابر  $۳۰۰۰ \times ۵$  یعنی ۱۵۰۰۰ مگاوات ساعت یا به عبارت دیگر ۱۵ گیگاوات ساعت تولید می‌کند.

اندازه‌ی انرژی الکتریکی سالانه تأسیسات تولید انرژی به صورت ذیل می‌باشد:

- توربین آبی نمونه ۱ مگاواتی: ۳ گیگاوات ساعت

- توربین بادی دریایی ۵ مگاواتی: ۱۶ گیگاوات ساعت

- نیروگاه برق جزر و مدی رنس ۲۴۰ مگاواتی: ۵۵۰ گیگاوات ساعت یا به عبارت دیگر ۰/۵۵ تراوات ساعت

- راکتور هسته‌ای ۱۶۰۰ مگاواتی در نیروگاه فلامانویل: بیش از ۱۰ تراوات ساعت

- جمع کل مصرف الکتریسیته‌ی فرانسه در سال ۲۰۰۸: ۵۰۰ تراوات ساعت

هنگامی که ما در مورد پتانسیل انرژی منبع صحبت می‌کنیم این یک پتانسیل نظری است:

- میانگین سالانه می‌باشد تا یک ایده‌ی کلی از منبع یک ساله به دست آید؛

<sup>۱</sup>Fellamanville



- بازده واقعی یا بازه‌ی عملکرد ماشین‌ها را در نظر نمی‌گیرد؛

- تغییرات فصلی یا محلی ناشی از جغرافیای محیط زیست را که می‌توانند منجر به تفاوت‌های قابل توجه شوند توصیف نمی‌کند.

بنابراین برای هر پروژه‌ی داده شده مطالعات محلی دقیق در مورد پتانسیل نوع انرژی و تکنولوژی مورد بحث ضروری می‌باشد. در مطالعات فنی-اقتصادی باید تغییرات فصلی در نظر گرفته شود. توجه شود که انواع مشخصی از انرژی به صورت تصادفی نوسان می‌کنند اما با این وجود در مدت کوتاه قابل پیش‌بینی می‌باشند (انرژی بادی و موجی) و دیگر انرژی‌ها قابل پیش‌بینی بوده یا در طبیعت بسیار منظم می‌باشند (انرژی جزر و مدی و حرارتی).

بنابراین ما باید به خاطر داشته باشیم که انتخاب محل نصب تأسیسات تولید انرژی دریایی به سادگی بر مبنای میانگین منبع در یک سال مشخص نمی‌گردد.

### ۱-۲-۲ پتانسیل تبدیل و انرژی

پتانسیل انرژی برای انرژی بادی یا شار هیدروالکتریکی به شکل توان بیان شده با  $W$  بر واحد سطح (در صفحه‌ی عمودی) و برای انرژی خیزآب با  $W$  بر واحد طول (عمود بر جهت انتشار خیزآب) توصیف می‌شود.

در رابطه با تمامی تأسیسات تولید الکتریسیته، سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر دریایی انرژی اولیه‌ی ویژه‌ای را (باد، امواج، آب خیز و غیره) به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. این فرآیند تبدیل طی مراحل انجام می‌شود که به طور کلی عبارتند از:

- تبدیل انرژی اولیه به انرژی مکانیکی

- تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی

هر مرحله از تبدیل برای خود بازده‌ای دارد و بازده کلی ماشین با احتساب این بازده‌های میانی را توصیف می‌کند. به علاوه، ماشین‌ها از پتانسیل لحظه‌ای بهره می‌برند. به طور کلی، هنگامی که منبع لحظه‌ای قاعده‌مند باشد بازده‌ها مطلوب می‌گردند.

توان نظری (اولیه) انرژی‌های بادی و هیدروالکتریک به سادگی به عنوان تابعی از سرعت سیال ( $V$ ) و چگالی آن ( $d$ ) بیان می‌شود. این توان به ازای واحد سطح (ناحیه‌ی جاروب شده توسط پره‌های ماشین) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3$$

این توان به صورت  $W/m^2$  بیان شده و به توان سوم سرعت وابسته می‌باشد. فرض اینکه آب دریا تقریباً ۸۰۰ برابر هوا چگالی دارد و جریان آب نه برابر ضعیف‌تر از باد است توان نظری یکسانی را به دست خواهد داد.

توان نظری آنی انرژی خیزآب با حاصلضرب مربع ارتفاع قابل توجه موج ( $H_s$ ) و دوره تناوب ( $T$ ) امواج متناسب است. این توان در واحد طول رأس موج به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P = \frac{\rho \cdot g^3}{64\pi} H_s T$$

این توان به صورت  $W/m$  بیان شده و به شتاب جاذبه‌ای ( $g$ ) (که مقدار نظری آن مطابق عرض جغرافیایی تغییر می‌کند) وابسته می‌باشد.

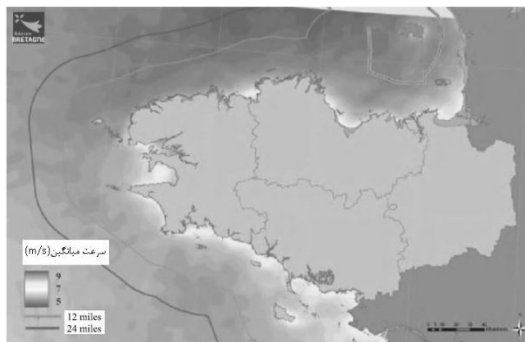
شکل ۱-۱ تغییر فضایی سرعت میانگین باد در طول یک سال در عرض جغرافیایی ۸۰ متر را (که توسط میتیو-فرانس<sup>۱</sup> محاسبه و با  $m/s$  بیان شده است) نشان می‌دهد. این محاسبه به کمک مدل عددی انجام شده است (مدل *Meso NH* که به صورت مشترک توسط مرکز ملی تحقیقات متروپولیژیکی میتیو - فرانس و آزمایشگاه آیرولوژی<sup>۲</sup> در *CNRS* توسعه یافته است). تنها مدلهایی این چنین برای تولید نقشه‌های فضایی مناسب می‌باشند. کیفیت مدل در این مطالعه‌ی موردی ۳ کیلومتر است.

### ۱-۲-۳ انرژی بادی

در ابتدا، توسعه‌دهندگان پروژه به سرعت میانگین باد علاقه‌مند می‌باشند تا نواحی را از پیش انتخاب نمایند (به عنوان قانون کلی شناخته می‌شود) و نواحی سودمند نواحی می‌باشند که سرعت میانگین سالانه باد در عرض جغرافیایی ۸۰ متر از  $7 m/s$  ( $25 km/h$ ) بیشتر باشد که به انرژی نظری میانگین اولیه بزرگتر از  $200 w/m^2$  مربوط می‌شود (با فرض اینکه توربین بادی در طول سال با این سرعت کار می‌کند).

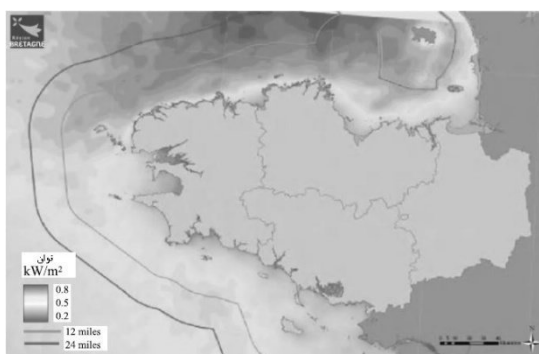
<sup>۱</sup>Météo-France

<sup>۲</sup>Aérologie



شکل ۱-۱ سرعت میانگین سالانه باد در بریتانی. منبع: میتیو - فرانس [3] (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

ما می‌توانیم در نگاه اول مشاهده کنیم که بریتانی برای تولید انرژی بادی دارای مزیت می‌باشد. با این حال به منظور دستیابی به ایده‌ی بهتر برای پتانسیل ناحیه، این داده‌ها با قوانین توزیع مربوط به توزیع باد (مطابق با جهت آن، قدرت آن، فصل و غیره) تصحیح می‌شوند. به طور کلی تخمین زده می‌شود که توربین‌های بادی تنها در حدود ۲۰۰۰ ساعت در سال (یعنی ضریب بار ۲۲٪) توان کامل را منتقل می‌کنند. با این حال، این پتانسیل انرژی باد است که مصرف می‌شود. شکل ۱-۲ ارزیابی از توان میانگین انرژی بادی در عرض جغرافیایی ۸۰ متر را نشان می‌دهد. این ارزیابی با استفاده از داده‌های مشابه میتیو- فرانس انجام شده و با  $kW/m^2$  (یعنی در  $kW$  بر واحد سطح جاروب شده توسط پره‌های ماشین) بیان می‌شود.



شکل ۱-۲ پتانسیل انرژی توان بادی در بریتانی منبع: میتیو - فرانس [3] (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)



ما می‌توانیم میان پتانسیل شمال و جنوب بریتانی تفاوت واضحی مشاهده کنیم. شمال به دلیل وقوع پی‌درپی کاهش<sup>۱</sup> در کانال انگلیس (دریای مانش) بادهای بسیار قوی‌تری دارد. هنگامی که توان آبی نظری با توان سوم سرعت باد متناسب است تفاوت‌های پتانسیل تقویت می‌شود. به طور مشابه انرژی پتانسیل باد در دریا بیشتر از نزدیک ساحل است.

این تصویر میانگین سالانه به ما ایده‌ی کلی از منابع سالانه می‌دهد. با این حال همانطور که در بالا بیان شد ما باید تغییرات فصلی را نیز تحلیل کنیم زیرا پتانسیل نظری در زمستان بسیار بیشتر از تابستان است.

همچنین باید توجه شود که این نمودارها (که مبتنی بر مدل‌های اتمسفری می‌باشند) اثرات محلی مشخصی را به طور کافی در نظر نمی‌گیرند که در شارهای اتمسفری (نزدیک برجستگی زمین، اثرات حرارتی و غیره) تاثیرگذار می‌باشند.

### ۱-۲-۴ انرژی جزر و مدی

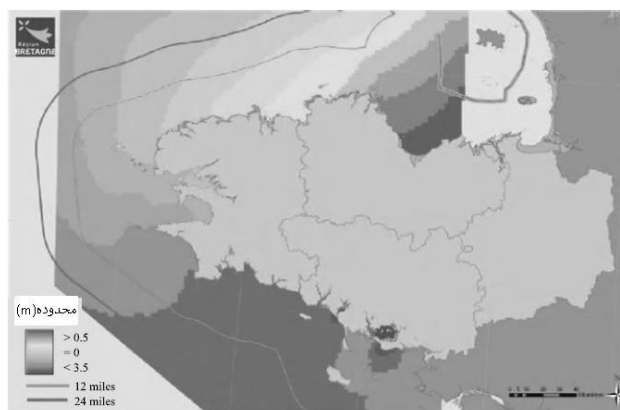
در تولید انرژی جزر و مدی از تکنیک‌های مشابه تولید هیدروالکتریک با انطباق‌های معین استفاده می‌شود. با بهره‌برداری از گستره‌ی جزر و مدی زیاد نواحی ساحلی مشخص و استفاده از سدی برای مسدود کردن آب‌های ساحلی و دهانه‌ی رود در موقعیت بالا یا پایین، تولید بر تفاوت ارتفاع میان آب‌های ساحلی و دور از ساحل (به نوبت بالاتر یا پایین‌تر) متکی است.

بنابراین پتانسیل انرژی به طور ویژه انرژی پتانسیل متناسب با تفاوت ارتفاع آب می‌باشد که مطابق چرخه‌های جزر و مدی تغییر می‌کند. شکل ۱-۳ (مبتنی بر داده‌های SHOM) گستره‌ی میانگین جزر و مدی را در اطراف بریتانی در شرایط میانگین جزر و مدی بهار نشان می‌دهد. گستره‌های جزر و مدی از مکانی به مکان دیگر بسیار متغیر می‌باشند (مقادیر زیاد در شمال بریتانی، بیشتر از ۱۵ متر حوالی سنت مالو<sup>۲</sup> در حالی که در جنوب بریتانی تقریباً ۴ متر می‌باشند).

قابل پیش‌بینی بودن و همچنین نوسانات فصلی کم از مزیت‌های ویژه‌ی انرژی هیدروالکتریک جزر و مدی می‌باشند که در طول سال باعث تولید منظم می‌شوند.

<sup>1</sup>Depression

<sup>2</sup>Saint - Malo



شکل ۱-۳ گستره‌ی جزر و مد میانگین بهار در حوالی بریتانی منبع [3] SHOM (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

### ۱-۲-۵ انرژی جریان جزر و مدی

پتانسیل هیدروالکتریکی توسط فرمولی مشابه پتانسیل انرژی بادی تعریف می‌شود. به همان روش بخش‌های قبل، شکل ۱-۴ تغییر فضایی سرعت بیشینه‌ی حاصل‌شده توسط جریان‌های در جهت چرخه‌ی جزر و مدی (جزر یا مد) را در شرایط جزر و مدی میانگین بهار (ضریب جزر و مدی ۹۵) نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های تولیدشده توسط مدل عددی اجرا شده در *SHOM* (که با  $m/s$  بیان می‌شود) محاسبه می‌گردند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از مدل *(EDF-LNHE)TELEMAC-2D* در یک مش بدون ساختار با استفاده از المان‌های محدود انجام می‌شود که ما را قادر به افزایش کیفیت مدل مطابق عمق و فاصله از ساحل می‌کند. این مدل توسط هارمونیک‌های ثابت مولفه‌های اصلی جزر و مد استخراج شده است.

شکل خط ساحلی و به خصوص انتشار موج جزر و مدی در کانال انگلیس باعث تنوع فضایی جریان‌های جزر و مدی و تشدید آن‌ها در تنگه‌های رود همچون در بریتانی (سین راض)<sup>۱</sup>، فرومور<sup>۲</sup> در یوشانت<sup>۳</sup> و نواحی پیمپولبرهت<sup>۴</sup> می‌گردد. ما ابتدا متذکر می‌شویم که جریان‌های جزر و مدی که در اینجا بسیار قوی‌تر از جریان‌های ایجاد شده توسط باد نزدیک سطح هستند در راستای قائم همگن می‌باشند (به اصلاح جریان‌های باروتروپیک<sup>۵</sup>).

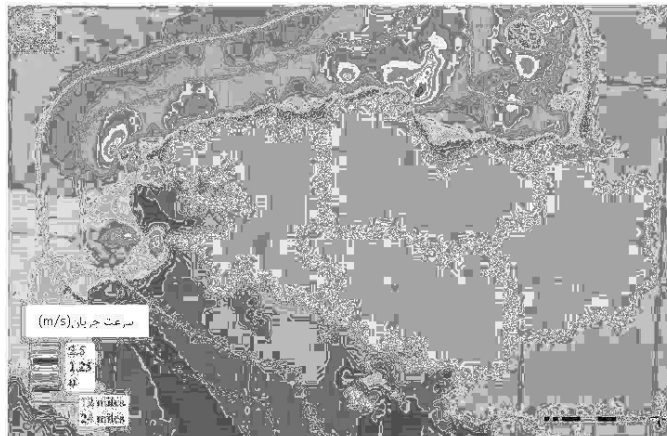
<sup>1</sup>Raz de Sein

<sup>2</sup>Formover

<sup>3</sup>Ushant

<sup>4</sup>Paimpol-Brehat

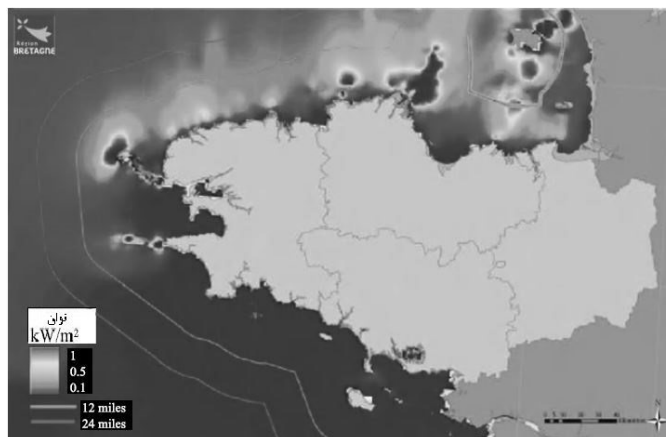
<sup>5</sup>Barotropic



شکل ۱-۴ سرعت جریان‌های جزر و مدی در حین جزر یا مد در شرایط جزر و مدی میانگین بهار منبع: *SHOM* - *ACTIMAR*[3] - (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

به طور کلی تصور می‌شود بهترین نواحی برای تولید انرژی هیدروالکتریکی مناطقی هستند که سرعت‌های جریان در حین جزر و مد در شرایط جزر و مدی میانگین بهار بیشتر از  $2 \text{ m/s}$  باشد که نشان‌دهنده‌ی توان میانگین اولیه از درجه‌ی  $1/5 \text{ kW/m}^2$  به ازای چرخه‌ی جزر و مدی است (با فرض تغییر سینوسی در جریان، میانگین چرخه‌ی توان سوم سرعت از درجه‌ی  $0/4$  ضرب در مربع سرعت بیشینه‌ی حاصل‌شده در حین جزر و مد). بنابراین ما می‌توانیم بیان کنیم که مناطقی کمی برای تولید هیدروالکتریک در حوالی خط ساحلی بریتانی مناسب می‌باشند.

شکل ۱-۵ ارزیابی از توان میانگین انرژی هیدروالکتریکی در پیوند با جریان‌های جزر و مدی میانگین در جزر و مد بهاری را نشان می‌دهد (به ویژه نواحی مساعد برای پیاده‌سازی آن را نشان می‌دهد). توان نظری با  $\text{kW/m}^2$  بیان می‌گردد (یعنی در  $\text{kW}$  بر واحد سطح جاروب شده توسط پره‌های ماشین).



شکل ۱-۵ پتانسیل انرژی جزر و مد بهاری در بریتانی منبع: [3] SHMA-ACTIMAR (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

به روشی مشابه پتانسیل باد، توان نظری آبی متناسب با توان سوم سرعت جریان می‌باشد که تفاوت‌های مشخص انرژی هیدروالکتریک وابسته به ناحیه‌ی مورد بحث را توضیح می‌دهد.

ما مشاهده می‌کنیم که تغییرات فضایی بسیار زیاد می‌باشند. جریان‌ها به ازای مسافت‌های چند کیلومتری به صورت قابل توجهی تغییر می‌کنند و ممکن است پتانسیل به صرفه نباشد.

همچنین ما می‌توانیم مشاهده کنیم که کیفیت این نقشه این امکان را به ما نمی‌دهد که پتانسیلی را که در نواحی خاصی همچون دهانه‌های رود و رودهای طویل باریک موجود هست (که در آن‌ها به طور محلی جریان‌های قوی حضور دارند) نشان داد. در برخی از این مناطق توسعه‌ی توربین‌های با توان کم غیر قابل تصور نمی‌باشد.

همانند انرژی جزر و مدی، مزیت انرژی هیدروالکتریکی قابل پیش‌بینی بودن و عدم تغییر فصلی آن می‌باشد. با این حال، توربین‌های سطحی به دلیل امواج و جریان‌های ایجاد شده توسط باد (که در همان زمان باعث به وجود آمدن تغییرات در توان تولید شده و قیده‌های اضافی در عبارت‌های خستگی می‌شوند) بسیار در معرض شرایط اتمسفری قرار می‌گیرند.

### ۱-۲-۶ انرژی خیزآب

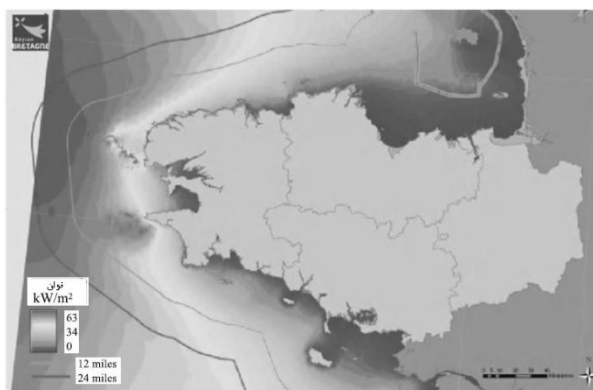
شکل ۱-۶ ارزیابی از توان میانگین انرژی خیزآب را نشان می‌دهد که با استفاده از پایگاه داده-های CETMEANEMOC محاسبه شده است. این ارزیابی با استفاده از شبیه‌سازی‌های مدل TOMAWAC (که توسط EDF-LNHE توسعه و اجرا شده است) تولید گشته است. توان میانگین با  $Kw/m$  بیان شده است (یعنی به ازای واحد طول جبهه‌ی موج خیزآب). کد

*TOMAWAC* امکان تولید و انتشار حالت‌های دریا و برهم‌کنش‌های اتمسفر (ایجاد شده توسط باد، اتلاف، انتقال انرژی و غیره) و برهم‌کنش‌های بستر دریا (شکست، اصطکاک و غیره) را فراهم می‌کند. این کد در مش‌سازمان نیافته با استفاده از المان‌های محدود اعمال می‌شود که ما را قادر به افزایش کیفیت مدل مطابق عمق و فاصله از ساحل می‌کند.

با این حال، این نمودارها به مدل‌هایی متکی می‌باشند که به اندازه‌ی کافی اثرات محلی مشخصی را در نظر نمی‌گیرند. به عبارت دیگر باید طبیعت فصلی پتانسیل نظری را (که در زمستان بیشتر از تابستان است) در برنامه‌ریزی‌ها در نظر گرفت.

توان نظری آبی با ضرب مربع ارتفاع عمده موج و دوره تناوب امواج ( $Hs^2.T$ ) متناسب است. این امر تفاوت‌های بسیار مشخص نواحی را توضیح می‌دهد: بیشترین پتانسیل تولید انرژی خیزآب در اطراف بریتانی در غرب آن است. به طور مشابه همانطور که به ساحل نزدیک می‌شویم پتانسیل به شدت کاهش یافته و در معرض عوامل محلی قرار می‌گیرد: پتانسیل سیستم‌های تولید در ساحل باید توسط مطالعه‌ی محلی مورد ارزیابی قرار گیرد.

درست همانند انرژی باد، انرژی موج در معرض تغییر زیاد قرار دارد اما به کمک مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت دریا در مدت زمان کوتاه قابل پیش‌بینی می‌باشد.



شکل ۱-۶ پتانسیل انرژی باد در بریتانی (توان میانگین اولیه سالانه به ازای واحد طول جبهه‌ی موج) منبع: *CETMED/EDF-LNHE-ACTIMAR*[3] (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

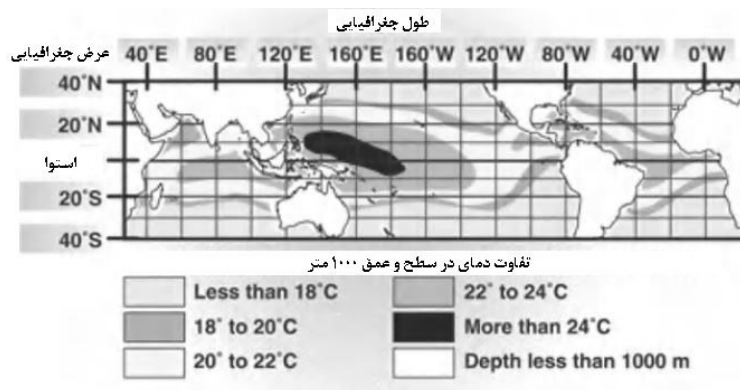
## ۷-۲-۱ تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس

تولید انرژی حرارتی اقیانوس بر اثرات ترمودینامیکی متکی می‌باشد بدین صورت که با استفاده از تفاوت دما در سطح دریا و دما در عمق قابل تولید شود. به طور کلی برای بازده مطلوب به



حداقل تفاوت دمایی  $20^{\circ}\text{C}$  نیاز است (در اقیانوس دمای جست و جو شده حداقل  $25^{\circ}\text{C}$  دمای عمق  $100\text{ m}$  تقریباً  $5^{\circ}\text{C}$  باشد).

شکل ۱-۷ تفاوت میان دمای میانگین سطح و عمق  $1000\text{ m}$  را نشان می‌دهد. تولید انرژی حرارتی از اقیانوس‌ها تنها در مناطق استوایی اتفاق می‌افتد (اقیانوس آرام غربی محبوب ترین مکان می‌باشد). ما همچنین باید به خاطر داشته باشیم که دمای آب دریا در لایه‌های سطحی تا اعماق  $100\text{ m}$  یا بیشتر در معرض نوسانات فصلی و همچنین تغییرات مربوط به آشفتگی‌های اتمسفری قرار دارد. پدیده‌ی امواج داخلی (نوسانات عمودی در ترموکلاین<sup>۱</sup>) نیز باعث به وجود آمدن آشوب‌هایی در تعادل حرارتی لایه‌های آب می‌شود. باید به دقت برای هر پروژه‌ی داده شده این پدیده‌ها را تحلیل کرد.



شکل ۱-۷ تفاوت دماهای سطح و عمق  $1000\text{ m}$  منبع: آزمایشگاه بین‌المللی انرژی‌های دریایی <http://www.nrel.gov/otec/> (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

### ۳-۱ جنبه‌های فیزیکی محیط دریایی

علاوه بر منابع، دیگر مشخصات فیزیکی ناحیه‌ی ساحلی به شدت در انتخاب نواحی قرارگیری مناسب پروژه‌های انرژی تأثیر می‌گذارند، به طور ویژه عمق آب، طبیعت بستر دریا، فاصله از ساحل و شرایط آب و هوای اقیانوسی. این پارامترها ناملموس می‌باشند اما ممکن است اثر عمیقی بر امکان‌پذیری فنی و اقتصادی پروژه داشته باشند.

<sup>۱</sup>Thermocline

### ۱-۳-۱ عمق آب

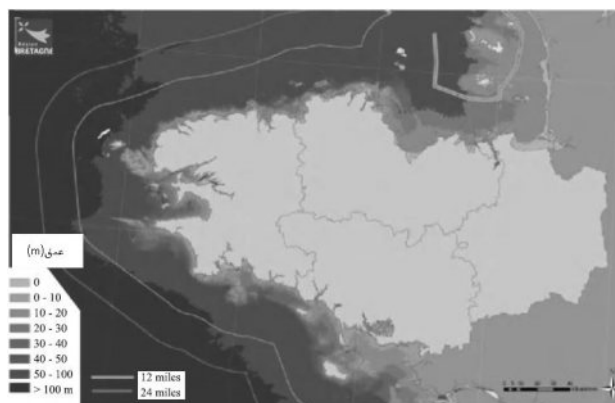
عمق آب مسئله‌ی عمق سنجی، گستره‌ی جزر و مدی و دورترین سطوح آب را در کنار هم مطرح می‌کند:

- در فنآوری‌های غوطه‌ور ساختن باید کمترین عمق آب در نظر گرفته شود، به خصوص به منظور امکان عبور شناورها کمترین عمق به عمق هیدروگرافیک<sup>۱</sup> آب مربوط بوده که در نمودارهای دریانوردی یافت می‌شود.

- در فنآوری‌های که در بستر دریا قرار گرفته یا نصب می‌گردند باید کمترین عمق در نظر گرفته شود که این امر مسئله‌ی عمق سنجی، گستره‌ی بیشینه جزر و مدی، امواج صد ساله و دورترین سطوح آب را در کنار هم مطرح می‌کند. این عمق بیشینه دارای نقش مهمی در تامین مالی پروژه‌ی نیمه غوطه‌ور می‌باشد. (به خصوص در ابعاد فونداسیون و در نتیجه در هزینه‌ی آن)

- در مورد فنآوری‌های شناور دارای لنگر این دو عامل نیز باید در نظر گرفته شوند.

عمق سنجی خط ساحلی بریتانی در شکل ۱-۸ نشان داده شده است. این شکل با استفاده از پایگاه داده‌ی SHOM تولید گشته و به اعماق آب با مبدأ صفر هیدروگرافیک (سطحی با کمترین جزر و مدهای نجومی) مربوط می‌باشد که به عنوان مبدأ نمودار نیز شناخته می‌شود.



۱-۸ عمق سنجی آب‌های ساحلی بریتانی با مبدأ صفر هیدروگرافیک. منبع: [3] SHOMA-NASCA (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

<sup>۱</sup>Hydrographic

نظریه‌ی عمق‌سنجی کمترین عمق آب و هم بستر هموار یا ناهموار دریا را پوشش می‌دهد. بستر هموار دریا (بدون ناهمواری زیاد با شیب کم) به علت محدودیت‌های تأسیسات و پایداری فونداسیون به صورت نظام‌مند جست‌وجو می‌شود.

عمق‌سنجی ارائه شده در بالا مشخصات عمده را به دست می‌دهد. داده‌های عمق‌سنجی *SHOM* کم و بیش بسته به ناحیه قدیمی بوده و دقت آن‌ها متغیر می‌باشد. به منظور داشتن توانایی نصب انرژی دریایی تجدیدپذیر باید درباره‌ی منطقه دانشی کامل به اندازه‌ی یک متر داشته باشیم. بنابراین ارزیابی عمق سنجی محلی برای یک پروژه‌ی داده شده ضروری می‌باشد.

این نمودار (با نادیده گرفتن خلیج نرمند-بریتون<sup>۱</sup> و ناحیه‌ای دور از ساحل مریبهان<sup>۲</sup>) نشان می‌دهد که بستر دریا به سرعت در اطراف بریتانی به خصوص در پرتگاه غربی افت می‌کند.

از طریق گستره‌ی جزر و مدی که در مورد بریتانی در بخش ۱-۲-۴ (شکل ۱-۳) بررسی شد به همراه سطوح بسیار دور آب در ارتباط با اثرات اتمسفری (اثرات باد و فشار اتمسفری) سطح بیشینه‌ی آب تعیین می‌گردد که ما باید به آن ارتفاع رئوس امواج قدرتمند را اضافه کنیم.

این داده‌های مربوط به سطوح آب و امواج قدرتمند برای پروژه‌ها نیز بسیار حائز اهمیت می‌باشند: این موضوع در فصل ۲ بررسی می‌گردد.

به طور خلاصه بسته به نوع ۶ گروه از سیستم‌های تولید انرژی (سیستم‌هایی که در مدت کوتاه یا متوسط بسیار محبوب می‌باشند) ما می‌توانیم نواحی سودمند را بر اساس عمق کمینه آب (عمق‌شناسی ساحل با مبدأ صفر هیدروگرافیک که به کمترین جزر و مدها مربوط است) مشخص کنیم در حالی که باید به خاطر داشته باشیم این‌ها قوانین مطلق نمی‌باشند:

- طراحان پروژه برای توربین‌های بادی ثابت به دنبال عمق بیشینه تقریباً  $30\text{ m}$  (مبدأ نمودار) می‌باشند.

- شرایط برای توربین‌های بادی شناور متفاوت می‌باشد. به منظور عملکرد درست این توربین‌ها به عمق کمینه نیازمند می‌باشند. عمق جست‌وجو شده تقریباً  $100\text{ m}$  (در بازه‌ی  $50\text{ m}$  تا  $200\text{ m}$  یا بیشتر) می‌باشد.

<sup>1</sup>Normand - Britton

<sup>2</sup>Bathymetrical

- عمق کمینه توربین‌های جزر و مدی ثابت یا کاملاً مستغرق به لقی عمودی (آبخور<sup>۱</sup>) بستگی دارد که باید به منظور ناوبری ملاحظه شود. به طور کلی این اعماق کمینه برای بزرگترین توربین‌ها بزرگتر از  $20\text{ m}$  یا  $40\text{ m}$  می‌باشند (قطر  $20\text{ m}$ )

- توربین‌های جزر و مدی نزدیک ساحل با ظرفیت متوسط و وابسته به قواعد (به صورت قابل توجه توربین‌های جزر و مدی شناور) می‌توانند در اعماق چند متری کار کنند.

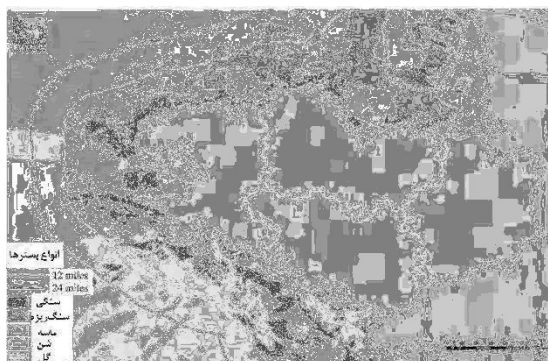
- برای فرآیندهای انرژی خیزآب در نزدیکی ساحل تنها هموار بودن بستر دریا و احتمالاً اثرات مناسب برای انتشار خیزآب در نواحی اصلی جست‌وجو می‌شود.

- برای فرآیندهای انرژی خیزآب، دریایی بسته به انتخاب فرآیند، به عمق کمینه‌ی  $10$  تا  $50$  متر نیاز است.

برای انرژی حرارتی اقیانوس به طور واضح به عمق بیشتر از  $1000$  متر نیاز است تا به منبع سرد دست پیدا کرد. پروژه‌هایی که اخیراً طرح شده‌اند در شیب‌هایی تا عمق  $1500$  متر قرار خواهند گرفت.

### ۱-۳-۲ طبیعت بستر دریا

تکمیل عمق شناسی، دانش طبیعت بستر دریا برای ابعاد فونداسیون‌ها یا لنگرگاه‌ها ضروری می‌باشد. شکل ۱-۹ طبیعت بستر دریا در نواحی ساحلی را نشان می‌دهد که با استفاده از پایگاه داده‌های *SHOM* و *IFREMER* تولید شده است.



شکل ۱-۹ طبیعت بستر دریا در آب‌های ساحلی بریتانی. منبع: [3] *SHOMA-IFREMER* (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

<sup>1</sup>Draught

در حالی که تکنیک‌هایی وجود دارد که به ما امکان گذر از محدودیت‌هایی را می‌دهد که توسط طبیعت بستر دریا ایجاد شده‌اند این فاکتور در تعیین قیمت فونداسیون و در نتیجه در قیمت کلی پروژه نقش دارد. و این دلیلی است که چرا مدیران پروژه‌های توربین بادی به بسترهای ماسه‌ای علاقه‌مند می‌باشند. نمودار بستر دریا در بالا به ما مشخصات عمده را می‌دهد. با این وجود، هیچ نمودار جامعی که نوع بستر، توزیع اندازه دانه رسوب، زبری آن و غیره را نشان دهد، وجود ندارد. بنابراین وجود دانش ویژه در مقیاس هر پروژه ضروری می‌باشد. همانند مطالعات اثر محیطی (که رسوبات دریایی بخشی از آن هستند) ارائه شده در بخش ۱-۴، اثر پروژه‌های انتقال رسوب و دینامیک ریخت‌شناسی باید تأیید شوند. بدین منظور، داشتن دانشی جامع درباره‌ی رسوبات در منطقه‌ای بزرگتر از آنچه که پروژه پوشش می‌دهد و (دست کم) تا ساحل ضروری می‌باشد؛ بنابراین انجام مطالعات دینامیک رسوبی با کمک مدل‌های عددی ایجاد شده که اثر فونداسیون، لنگرگاه‌ها یا خود ماشین‌ها را در نظر می‌گیرند نیز ضروری می‌باشد.

### ۱-۳-۳ وضعیت آب و هوای اقیانوسی

وضعیت آب و هوای اقیانوسی شرایط آب و هوایی، وضعیت عادی در یک ناحیه و پدیده‌های شدید بالقوه را مطرح می‌کند. وضعیت آب و هوایی شدید اقیانوسی شامل موارد زیر می‌شود:

- باد صد-ساله و شرایط موجی در ارتباط با قدرتمندترین طوفان‌ها

- جریان‌های بیشینه

- سطوح دور افتاده‌ی آب

ما بیشتر پتانسیل هر منبع انرژی را توصیف کردیم. با این حال، این پتانسیل‌ها شامل محدودیت‌های فنی می‌شوند. در حقیقت، این نواحی دارای بادهای شدید، خیزآب‌های بزرگ یا جریان‌های قدرتمند در جاهایی قرار دارند که بزرگترین کرنش بر سازه‌ها تحمیل می‌گردد.

مجموعه‌ای از این وضعیت‌های آب و هوای اقیانوسی موارد زیر را تعیین می‌کنند:

- اندازه‌ی سازه‌ها. باید بیشترین کرنشی که به سازه‌ها اعمال می‌شود در نظر گرفته شود. در نتیجه، پدیده‌های شدید عوامل تعیین کننده‌ای در ابعاد سازه‌ها می‌باشند

- بهره‌برداری از منابع. در سیستم از گستره‌ی کامل منبع استفاده نمی‌شود (بازه‌هایی وجود دارد که سیستم در آن بازه عمل می‌کند). به عنوان مثال برای انرژی بادی به منظور چرخش توربین‌ها به سرعتی کمینه برای باد نیاز است (به طور کلی  $5 m/s$ ، یعنی  $18 km/h$ ) و

همچنین به منظور محافظت از توربین‌ها در بادهای شدید توربین‌ها متوقف می‌گردند (تقریباً  $25m/s$ ، یعنی  $90km/h$ )

- عملیات نصب و نگهداری. ممکن است شرایط آب و هوایی با این عملیات تداخل پیدا کرده (از کار انداختن افراد، مصالح و غیره) و در نتیجه مستلزم هزینه‌های اضافی برای پروژه شود. همچنین به طور کلی ما در نواحی که در معرض شرایط شدید قرار دارند بسترهایی نامنظم به همراه صخره‌های خالی پیدا می‌کنیم برای پروژه‌ها ایده‌آل نمی‌باشند. این جنبه‌ها اثری مشخص بر هزینه‌های نصب و راه اندازی دارند. بنابراین باید این اثرات را در مسئله‌ی مالی پروژه‌ها در نظر گرفت. موضوع شرایط شدید در فصل ۲ مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۱-۳-۴ فاصله از ساحل

فاصله از ساحل باید از چند لحاظ در نظر گرفته شود:

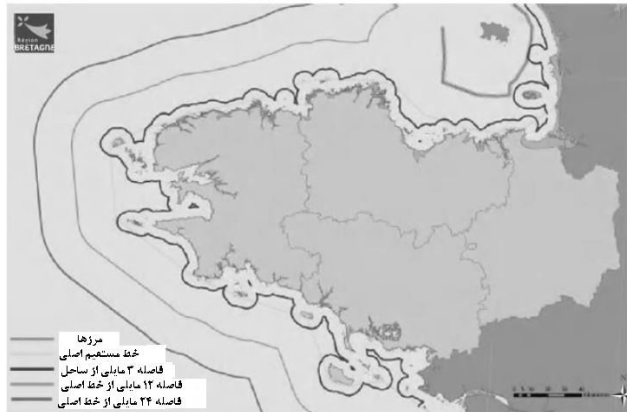
- عامل عمده‌ای است که بر طول کابل الکتریکی زیر دریا تاثیر می‌گذارد در نتیجه عامل بسیار مهمی در قیمت پروژه می‌باشد

- همچنین در موردی که سیستم‌ها به صورت کامل مستغرق نمی‌باشند عنصر ضروری موثر بر منظره می‌باشد

- بسته به فاصله از ساحل، محدودیت‌های اجرایی و بنابراین قوانین تغییر می‌کند.

شکل ۱-۱۰ مرزهای مناطق دریایی اطراف خط ساحلی بریتانی را نشان می‌دهد. خط مبنا، مرزی است که از آن مرز آب‌های ساحلی محاسبه می‌گردد. این خط به حاشیه‌ی نواحی مربوط می‌شود که در هر جزر و مدی مستغرق باقی می‌مانند (خط مبنای معمول یا حد جزر و مد پایین). هنگامی که خط ساحلی بسیار نامنظم می‌باشد خط مبنا از قسمت‌هایی ساخته می‌شود تا کانتور ساده‌سازی شود. آب‌های قرار گرفته در عقب خط مستقیم مبنا آب‌های داخلی<sup>۱</sup> می‌باشند.

<sup>1</sup>Inland waters



شکل ۱-۱۰ مرزهای مناطق دریایی در حوالی بریتانی. منبع: SHOM – NASCA  
 [3] Géosystèmes (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه  
 نمایید)

## ۴-۱ داده‌های محیطی

جنبه‌های محیطی در اجرای پروژه‌ها در دریا و در نتیجه در انتخاب مکان‌هایی برای تولید الکتریکی در دریا از اهمیت اولیه برخوردار می‌باشند.

به طور ویژه در حین فرآیندهای اجرایی، هدف ارزیابی‌های اثر محیطی پروژه‌ها می‌باشند و یک جنبه‌ی ضروری که باید در نظر گرفته شود محدودیت‌های غالباً مربوط به نواحی خاص می‌باشد.

### ۱-۴-۱ فاکتورهای محیطی که باید در نظر گرفته شوند

مسائل دریایی، ساحلی و خشکی پیچیده می‌باشند:

- شناخت حالت "طبیعی" یک منطقه در یک لحظه‌ی داده شده به دلیل نبود داده‌های دریایی جامع ناقص می‌باشد؛

- از میان مناطق بزرگ و متنوع، پیش‌بینی دقیق تحول محیط تحت تاثیر نیروهای طبیعت (بدون تاثیر بشر) یا تحت تاثیر انسان دشوار می‌باشد.

- تا به امروز، هیچ پایگاه داده‌ای موجود نمی‌باشد که به عنوان مرجع شامل تمامی داده‌های ضروری توصیف دقیق یک حالت "اولیه" باشد. این بدین معناست که این کار باید قبل از ارزیابی اثر محیطی انجام شده توسط مدیران پروژه در هنگام درخواست مجوز انجام شود.

به علاوه، عوامل محیطی با زمان و مکان تغییر می‌کنند. بنابراین باید مطالعات اثر برای تحلیل تحول طبیعی آن محیط و تغییرات این تحول حاصل از اجرای سیستم‌های تولید و در نتیجه مجموعه‌ی اثرات بالقوه مناسب باشند.

بنابراین اول از همه باید مناطق در معرض این اثرات شرح داده شوند.

علاوه بر نواحی ویژه‌ای که در زیر بحث شد باید به طور ویژه جنبه‌های زیر و اثرات بالقوه‌ی پروژه‌ها مشخص گردند:

- رسوب دریایی، خط ساحلی و دینامیک ریخت‌شناسی<sup>۱</sup> (به ویژه در عطف به توصیف داده شده در بخش ۱-۳-۲)

- زیستگاه خط ساحلی و به طور کلی تر گیاهان دریایی و خط ساحلی

- جانوران و پرندگان دریایی.

از میان اثرات بالقوه، اثرات مستقیم و غیر مستقیم باید در نظر گرفته شوند. به عنوان مثال، در مورد مزرعه‌ی بادی برای پرندگان دریایی:

- مانع به وجود آمده توسط ماشین‌ها اثر مستقیم می‌باشد.

- اصلاح زیستگاه دریایی گونه‌های مشخصی از ماهی تاثیر غیر مستقیمی بر پرندگانی می‌گذارد که آن نوع ماهی را می‌خورند.

این چند عنصر از جنبه‌های محیطی که باید در نظر گرفته شوند به ما امکان نگاه اجمالی به گستره‌ی مسئله‌ی محیطی را می‌دهند. در حالی که امکان دادن راه حلی جامع برای این موضوع در اینجا وجود ندارد ما می‌توانیم بگوییم که در ساحل فرانسه بسیاری از مناطق ویژه مشخص شده و اطلس‌های با حساسیت در این موارد موجود می‌باشند.

#### ۱-۴-۲ مناطق ویژه

به منظور حفظ محیط‌ها یا گونه‌هایی مشخص، مناطق قانونمندی ایجاد شده که برخی از آنها مطابق ذیل می‌باشند:

- AMP-مناطق حفاظت شده‌ی دریایی

- پارک‌های دریایی طبیعی

<sup>1</sup>Morphodynamics



- *APCB* - دادگاه‌های قضایی برای حفاظت از زیست‌بوم
- مناطق حفاظت شده بیوژنتیک
- مناطق حفاظت شده ناحیه‌ای و ملی
- مکان‌های طبیعی طبقه‌بندی شده و ثبت شده
- تالاب‌های حفاظت شده به واسطه‌ی قرارداد رمسر
- *ZIOC* - مناطق مهم برای بقای پرندگان
- *ZSC* - مناطق حفاظت ویژه و *SIC* - مکان‌های مورد توجه عموم یا *pSIC* برای *SIC* پیشنهادی
- *ZPS* - مناطق حفاظت ویژه
- *ZNIEFF* - (مناطق طبیعی دارای محبوبیت اکولوژی جانوری و گیاهی) دریایی یا در غیر اینصورت از انواع ۱ و ۲

یک جنبه‌ی بسیار مهم در رابطه با این مناطق حفاظت‌شده، محدودیت‌های قانونی و تنظیم‌کننده می‌باشند. ما در ذیل ارزیابی ارائه می‌دهیم که توسط شرکت حقوقی الگانز به عنوان بخشی از مطالعه از طرف شورای محلی بریتانی انجام شده است [۳]. امرزه با در نظر گیری قانون‌گذاری موجود، هیچکدام از این مقررات از قبل به صورت رسمی از نصب مکان تولید انرژی تجدیدپذیر دریایی در حدودی جلوگیری نمی‌کنند که این امر هدف گفت‌وگوی بیان‌شده یا معیار حفاظت و قابلیت اجرای آن در دریا می‌باشد. به طور کلی هر پروژه‌ی جدیدی در معرض گزارشی درباره‌ی قانونی بودن یا تطبیق‌پذیری با معیارهای قابل اجرا در مکان مورد بحث قرار خواهد گرفت. مسئله‌ی اثر (نوع اثر، زمان لازم، قابلیت بازگشت‌پذیری و غیره) باید در چهارچوب کاری وابسته به آن گنجانده شود که این امر دید کلی درباره‌ی پروژه‌ی ساخت، توسعه یا فعالیت تازه در آن مکان می‌دهد. این چهارچوب‌های کاری همانطور که در بالا اشاره شد لزوماً مطالعاتی درباره‌ی اثر خواهند بود. اثراتی که باید در نظر گرفته شوند نیز به شدت به نوع فرآیند تولید مورد بحث، ابعاد تأسیسات و کار لازم بستگی دارند. درنهایت، ما نباید این حقیقت را نادیده بگیریم که این معیارهای حفاظتی لزوماً برای یک روش واقع بر خشکی طراحی می‌شوند؛ ما باید عوامل مخصوص دریا را در نظر بگیریم.

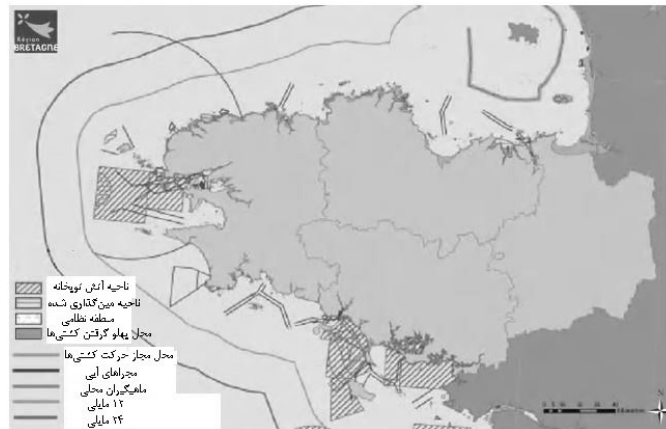
بنابراین به طور قانونی هیچ قطعیتی وجود ندارد که یک معیار حفاظتی داده شده از شروع پروژه‌های جلوگیری کند. با این حال، این احتمال وجود دارد که بسته به معیارهای حفاظتی مورد بحث، درجه‌ی محدودیت قابل اعمال به آن مکان را تعیین کرد. این مسئله باید درک شود که شدت چنین محدودیت‌هایی به طور اساسی با اهداف این معیارهای حفاظتی تغییر می‌کند. به عنوان مثال، در مناطق حفاظت‌شده‌ی طبیعت طبقه‌بندی به منظور حفاظت مناطق از هر گونه مداخله‌ی مصنوعی منجر به آسیب آن‌ها می‌باشد و از آنجا یک محدودیت بسیار قوی می‌باشد. به عبارت دیگر، برای یک ZNIEFF که هیچ اثر تنظیمی مستقیمی ندارد پروژه‌ی تأسیسات در معرض ارزیابی دقیق اثرات خود بر انواع ساکنین آنجا قرار می‌گیرد بنابراین یک محدودیت نسبتاً ضعیف است. در نتیجه، درحالی که این مناطق از تمامی پروژه‌ها جلوگیری نمی‌کنند این حقیقت که پروژه در این نوع از منطقه یا نوع دیگری قرار گرفته است می‌تواند تفاوت‌های بسیار محسوسی برای آن ایجاد کند.

بر اساس داده‌های نقشه‌نگاری آژانس مناطق دریایی محافظت‌شده، شکل ۱-۱۱ تعدادی از مناطق ویژه واقع بر ساحل بریتانی را نشان می‌دهد. این شکل این حقیقت را تشریح می‌کند که تقریباً سراسر خط ساحلی "حفاظت‌شده" است که هیچ کاری برای ساده‌سازی روند اداری مورد نیاز برای مجوز انجام نمی‌دهد.

در نواحی ساحلی فاکتورهای دیگری همچون آثار تاریخی، مکان‌هایی برای محافظین ساحلی و غیره نیز باید در نظر گرفته شوند. این مکان‌های حساس تقریباً در سراسر طول ساحل پراکنده شده‌اند.

به علاوه سودمند است که اشاره کنیم اگرچه این در واقع ریشه در داده‌های "محیطی" ندارد اما مناطق ساحلی در معرض بسیاری از محدودیت‌ها می‌باشند که اغلب به محدودیت‌های دفاعی و امنیتی و همچنین به منابع ماهیگیری (روستای ماهیگیری) مربوط می‌شوند. شکل ۱-۱۲ مناطق اصلی محدود شده در اطراف ساحل بریتانی را نشان می‌دهد.





شکل ۱-۱۱ مناطق حفاظت شده در بریتانی. [3] AAMP (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)



شکل ۱-۱۲ مناطق محدود شده در بریتانی. منبع: [3] SHOM (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

به طور خلاصه در مورد موضوع مسائل محیطی می‌توان گفت که مناطق کنترل شده بسیار ضروری می‌باشند. پروژه‌های مرتبط با انرژی از قبیل با این محدودیت‌ها سازگار می‌باشند اما به نظر می‌آید که طراحان پروژه به مناطقی علاقه دارند که کمتر با این محدودیت‌ها سر و کار دارند. همچنین محیط طبیعی در امتداد ساحل فرانسه با جزئیات طرح نشده است. برای هر پروژه باید مطالعه‌ای اولیه درباره‌ی زیستگاه‌های ساحلی، جانوران و شرایط ته‌نشینی انجام شود. در رابطه با اثر بر روی منظره، وضعیت آب و هوای اقیانوسی در ارتباط با فاصله‌ی پروژه از ساحل تاثیر بسزایی در قابلیت دید پروژه‌های نیمه مستغرق دارند.

## ۵-۱ کتاب‌شناسی

[1] JOURDEN G., MARCHAND P., *Des énergies marines en Bretagne: à nous de jouer,*

*ouvrage collectif, Région Bretagne – Conseil économique et social, 2009.*

[2] PAILLARD M., LACROIX D., LAMBLIN V., *Energies renouvelables marines – Etude*

*prospective à l'horizon 2030, ouvrage collectif, Quae, 2009.*

[3] REGION BRETAGNE, *Une planification et une concertation pour l'implantation des*

*projets énergétiques en mer – Eléments et données de contexte –*

*Recommandations pour*

*une concertation régionale, progress report, <http://www.bretagne.fr>, 2009.*







## محدودیت‌های محیط دریایی

### ۱-۲ شرایط بحرانی<sup>۱</sup> در دریا

به منظور اجرای یک تأسیسات دریایی مطابق طراحی انجام شده انتظار می‌رود که این تأسیسات بارهای متناوب در پی خستگی<sup>۲</sup> و بحرانیترین شرایط محتمل در طول عمر خود (شرایط بحرانی) را تحمل کند. همچنین اغلب انتظارات بیشتری نیز وجود داشته، برای مثال سیستم مذکور باید بدون اختلال در فرآیند تحت شرایط سخت (نیمه بحرانی) به درستی عمل کند.

تا جایی که به سازه‌های اختصاص‌یافته به تبدیل انرژی دریایی مربوط می‌شود، بررسی دانش بارهای متناوب بنابر حداقل نیاز طراحی از اهمیت حداقلی برخوردار هستند. البته ضروری است که این بارها را به درستی مدل‌سازی شده و پیچیدگی آن‌ها و همچنین عوامل بارگذاری محیطی دیگر را نیز (به عنوان مثال باد و جریان‌ها برای یک مبدل انرژی موجی) در نظر گرفت، اما بطور کلی شرایط موثر بر تأسیسات اغلب قابل مشاهده و اندازه‌گیری می‌باشند و در این امر مشکل اجرایی عمده‌ای وجود ندارد.

از طرف دیگر، شرایط بحرانی و نیمه بحرانی با این تعریف به سختی قابل مشاهده می‌باشند و تعیین صحت مدل‌سازی آن‌ها دشوار بوده و هیچ قطعیتی وجود ندارد که اطلاعات جمع‌آوری شده برای حالات مذکور در شرایط عادی به آسانی قابل استناد (بدلیل برون‌یابی<sup>۳</sup>) برای شرایط بحرانی) باشند: ممکن است شرایط بحرانی وجود داشته باشد که بعلت عدم تجربه آن شرایط نتایج غیر منتظره بوجود آید.

---

<sup>1</sup>Extreme conditions

<sup>2</sup>Fatigue

<sup>3</sup>Extrapolated



علاوه بر این، تهیه وسایل اندازه‌گیری قابل اعتماد در دریا بسیار دشوار و هزینه‌بر بوده و تهیه این تجهیزات برای شرایط بحرانی و اندازه‌گیری دقیق به مراتب دشوارتر و پرهزینه‌تر خواهد بود.

در نهایت، باید توجه شود که شرایط دریایی بحرانی به طور کامل پدیده‌های قابل پیش‌بینی مانند جزرومدها را به همراه دیگر پدیده‌ها مطرح می‌کنند که از خطرهای اقلیمی ناشی شده و به طور دقیق قابل پیش‌بینی نمی‌باشند. همچنین مشخصات آن‌ها متغیر بوده و تعداد عوامل موثر به صورت غیرقابل کنترل زیاد می‌باشد (معمولاً ۱۰۰ میلیون موج تکی در طول عمر سازه) بنابراین امکان چشم پوشی از پژوهش کامل شرایط بحرانی دریای در فازهای طراحی و تعیین اندازه وجود نخواهد داشت.

## ۲-۱-۲ برخی ملاحظات پیرامون عدم قطعیت‌ها<sup>۱</sup>

به طور کلی خطاهای غیر آشکار و عدم قطعیت‌ها به دو دسته تقسیم می‌گردند: تصادفی<sup>۲</sup> و دانش‌شناختی<sup>۳</sup>. دسته‌ی تصادفی فقط به اثر شانس مربوط می‌شود که ممکن است به عنوان مثال، به برخاست موجی در زمان  $T$  به جای ۱۰ ثانیه زودتر یا دیرتر منجر شود. دسته‌ی دانش‌شناختی محدودیت‌های مدل‌های ما، مشاهدات ما و دانش ما را هنگام نشان دادن واقعیت طبیعت بیان می‌کند و خطاهای این دسته حتی قابل تقلیل می‌باشند. با این حال، هزینه و پیچیدگی نظریه‌ها و مدل‌های استفاده‌شده برای تعیین شرایط بحرانی محیطی گاهی اوقات باعث می‌شود فراموش کنیم که علاوه بر حاشیه‌ی خطای مجاز، این طراحی‌ها تنها مدل‌هایی هستند که ممکن است به طور قابل توجهی با واقعیت تفاوت داشته باشند.

## ۲-۱-۲ از پاسخ بحرانی تا شرایط ایجادکننده‌ی آن‌ها

مسئله‌ی اصلی هنگام مطالعه‌ی شرایط بحرانی در دریا تعیین ترکیب (های) غیرمعمول امواج، باد، جریان و سطح آب (جزرومد یا امواج طوفان) محتمل در به خطر انداختن تأسیسات می‌باشد. هر کدام از این موارد برخی از مشخصه‌ها را وارد می‌سازند: طول موج، تناوب (یا طول موج)، جهت، سرعت باد، جهت، احتمالاً اغتشاش، پروفیل سرعت و پروفیل جهت جریان وابسته به عمق، حضور جریان‌های برشی و غیره.

نه تنها تعیین مقدار بحرانی هر کدام از عوامل محیطی بلکه ترکیب آن‌هایی که احتمال به خطر انداختن یکپارچگی (به عنوان مثال، با تناوب بازگشتی ۱۰۰ سال) آن را دارند و سازه باید توانایی تحمل آن‌ها را داشته باشد بسیار ضروری است.

<sup>1</sup>Uncertainties

<sup>2</sup>Random

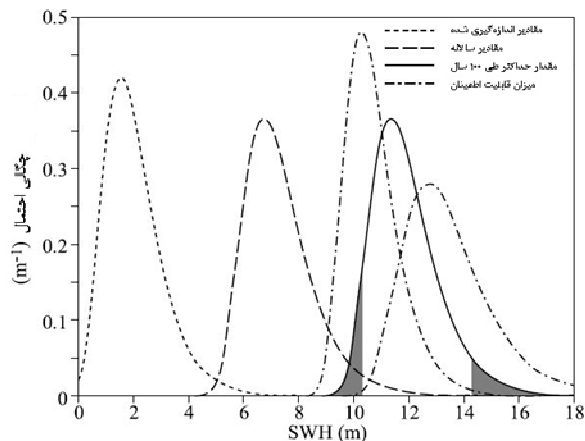
<sup>3</sup>Epistemological

هدف روش‌های قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> ارائه روش‌های برای بررسی مکان هندسی<sup>۲</sup> این ترکیب‌های پارامتری است به خصوص ترکیب طول، تناوب و جهت امواج و سرعت و جهت بادها و جریان-هایی که خطر زیادی را برای تأسیسات بوجود می‌آورند. ارائه این روش‌ها به همراه توصیف قابل اعتماد احتمال پیوند<sup>۳</sup> (یعنی، احتمال وقوع همزمان آن‌ها) این المان‌های متفاوت و مشخصه-های آن‌ها، عمدتاً در دنباله‌های توزیع<sup>۴</sup> (وقایع بحرانی)، حائز اهمیت می‌باشد.

چگونگی به دست آوردن و تأیید چنین داده‌هایی موضوع ادامه این بخش می‌باشد. در بخش 1.1 روند سه سال یکبار [ISS 09] کنگره بین‌المللی سازه‌های کشتی و دریایی (ISSC) لیست مراجع کامل به همراه بررسی توسعه‌های مفید روش‌مند و علمی اخیر در رابطه با این موضوع وجود دارد.

## ۲-۱-۳ از شرایط متداول تا وقایع منحصربه‌فرد

پیش‌بینی شرایط محیطی بحرانی که (به عنوان مثال) هر ۱۰۰ سال اتفاق می‌افتند هنگامی که فقط چند سال اندازه‌گیری انجام شده‌است تقریباً کاری غیرممکن به نظر می‌رسد. با این حال، ما در نظریه‌ی مقادیر بحرانی ابزار قدرتمندی در اختیار داریم که به ما امکان برون‌یابی (تعمیم) مشاهدات خود از تقریباً دوره‌ی زمانی کوتاه به دوره‌ی بسیار طولانی‌تر را می‌دهد. با این نظریه نیز همانند تمامی ابزارهای قدرتمند باید با دقت برخورد شود. در این نظریه به داده‌های ورودی قابل اتکا، مهارت و معقول بودن در تأیید فرضیه‌های اساسی و هوشیاری در استفاده از نتایج بدست آمده نیاز است.



شکل ۲-۱ قوانین توزیع گنجانده‌شده برای داده‌ها و تعمیم داده‌شده برای ۱۰۰ سال

<sup>1</sup>Reliability

<sup>2</sup>Locus

<sup>3</sup>Joint Probability

<sup>4</sup>Tails of distributions

شکل ۱-۲ فرآیند برون‌یابی را توضیح می‌دهد. در این قسمت با استفاده از پایگاه داده‌ی اندازه‌گیری‌شده یا احتمالاً مقادیر محاسبه‌شده (توزیع سمت چپ) - در اینجا، ۴ سال  $SWH$  (طول عمده موج‌های بزرگ) در هر ۶ ساعت، خارج از ساحل پرتغال، خروجی مدل  $ERA40$ - توزیع آماری برازش<sup>۱</sup> گردیده که به طور رضایت‌بخش بیشینه‌های مشاهده‌شده‌ی سالانه را پیش‌بینی می‌کند. سپس با تمرکز ویژه بر محتمل‌ترین مقادیر (بخش بدون سایه توزیع) و همچنین بر عدم قطعیت‌ها در برازش و فواصل اطمینان (توزیع خارجی) ناشی از اندازه‌ی محدود پایگاه داده، این توزیع را به بازه‌ی زمانی که علاقه‌مند هستیم (یعنی طول عمر سازه یا بیشتر- توزیع سمت راست -)، تعمیم می‌دهیم.

تعمیم به ۱۰۰ سال به نوع قانون انتخاب‌شده برای برازش بیشینه‌های مشاهده‌شده‌ی سالانه بستگی دارد. در این توزیع نشان‌داده‌شده در اینجا (توزیع گامبل<sup>۲</sup>) رأس توزیع بیشینه‌ی ۱۰۰ سال، به بیان دیگر، محتمل‌ترین مقدار (در اینجا حدود ۱۱/۵ متر)، دقیقاً به مقدار بازگشتی متداول ۱۰۰ سال مربوط می‌شود. بدون وارد شدن به جزئیات نظریه‌ی مدار بحرانی، سه قانون وجود دارد که به طور تئوری برای برازش محتمل می‌باشند. یکی از این قوانین مناسب پدیده‌های اشباع‌شده (به عنوان مثال، محدودیت ارتفاع ناشی از شکست موج در نواحی ساحلی) می‌باشد. دو قانون دیگر که یک از آن‌ها قانون گامبل می‌باشد، مقادیر بازگشتی را بدون حد بالا فراهم می‌کنند که با افزایش مدت زمان مربوطه افزایش پیدا می‌کنند (۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ سال). بدیهی است که پدیده‌های مورد بحث همگی باید در اندازه‌ی تأسیسات آستانه‌ی اشباع داشته باشند. با این وجود برآورد آن‌ها باید مبتنی بر ملاحظات فیزیکی یا آزمایش‌های آماری دقیق باشد. اگر دوره‌ی زمانی آزمایش‌شده "به اندازه‌ی کافی" طولانی باشد باید پدیده‌ی اشباع قابل مشاهده بوده و در برازش و سپس در تعمیم در نظر گرفته شود.

همانطور که قبلاً ذکر گردید، مدل‌سازی عدم قطعیت نشان داده‌شده در این شکل که جزئی از ذات مدل و نظریه‌ی مقدار بحرانی است (خطاهایی که علی‌رغم اندازه پایگاه داده نسبتاً بزرگ هستند) نباید خطاهای اضافه‌شده مدل‌سازی و اندازه‌گیری را پنهان کنند.

## ۲-۱-۳-۱ تأییدسازی داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده به عنوان مبنای تعمیم به شرایط بحرانی از اندازه‌گیری‌ها یا شبیه‌سازی‌های عددی حاصل می‌شوند.

<sup>1</sup>Fitting

<sup>2</sup>Gumble's Law

اغلب نیاز است که پایگاه داده‌های اندازه‌گیری با نتایج مدل‌سازی تکمیل شوند تا اعتبار آن را افزایش دهد که این امر از طریق افزایش مدت زمان پوشش داده‌شده در اندازه‌گیری یا ثبت نتایج از چند روش متفاوت عملی خواهد بود.

### اندازه‌گیری‌ها

اساساً مزایای اندازه‌گیری‌ها، میزان دقت تنظیم‌شده برای آن‌ها و تناظر کاملاً معمول هر مقدار اندازه‌گیری‌شده با تاریخ و مکان مورد بحث می‌باشد. متناظراً معایب نیز اساساً از هزینه‌ها و دشواری‌های اندازه‌گیری در دریا و از مدت زمان کوتاه استفاده از ابزارها در عملیات (به دلیل هزینه و ضرورت) ناشی می‌گردند.

اگرچه نظریه مقدار بحرانی قدرتمند است اما در حقیقت ممکن است تعمیم پایگاه داده‌ی بسیار کوتاه مدت به منظور نشان‌دادن صحیح تغییرپذیری طبیعی شرایط در محل موردنظر منطقی نباشد. هر مکانی که مورد بحث باشد در کنار هر تغییر فصلی دارای تغییرپذیری قابل توجهی در هر سال بوده و این امر دینامیک حدود بحرانی را تعریف می‌کند، اگرچه ممکن است این امر دارای یک اثر جزئی بر مقادیر متوسط و در نتیجه بر ارزیابی منبع انرژی داشته باشد. به علاوه، مطلوب است که نسبت میان دوره‌ی زمانی تعمیم‌یافته و دوره‌ی زمانی مبنا تا جای ممکن کوچک نگه داشته شود و چراکه قابلیت اطمینان تعمیم را ورای نسبت‌های ۵:۱ به طور قابل توجهی کاهش داده و در نسبت‌های بیشتر از ۱۰:۱ به ندرت قابل اعتماد و دقیق می‌باشد. اگرچه این مقادیر به مسئله خاص مورد بحث بستگی دارند.

قابل ذکر است اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط حسگرهای دوردست (به خصوص توسط ماهواره) برحسب نوع حسگر دارای کیفیت متفاوتی می‌باشند. در حقیقت ممکن است برخی از این حسگرها به طور قابل توجهی به واسطه‌ی مجاورت به ساحل تحت تاثیر قرار بگیرند و یا بدلیل در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌کننده در پردازش سطح پایین، مقادیر واقعی اندازه‌گیری-شده غیرقابل اعتماد و دور از دسترس باشند. با این حال، اندازه‌گیری جریان توسط رادارهای ساحلی  $HF$  (با فرکانس بالا) و امواج و سطوح توسط فراسنج ماهواره‌ای یا میدان باد توسط تفرق‌سنج‌ها<sup>۱</sup> نشان‌دهنده‌ی فراوانی منابع اطلاعاتی می‌باشد که اغلب مدت زمان‌های طولانی را پوشش می‌دهند و نباید نادیده گرفته شوند.

### مدل‌ها

<sup>۱</sup>Scatterometers

مدل‌های عددی پیش‌بینی موج<sup>۱</sup> دارای مزیت تأمین نتایج در دوره‌های زمانی توسعه‌یافته می‌باشند. داده‌های هواشناسی که در این مدل‌ها به عنوان ورودی استفاده می‌گردد در بسیاری از بخش‌های زمین برای مدت زمان طولانی در دسترس بوده‌اند. این مدل‌ها پیوسته به وسیله‌ی مقایسه خروجی‌های آن‌ها با مشاهدات جمع‌آوری شده بهبود یافته‌اند. معایب عمده‌ی این مدل‌ها عبارتست از تنظیم‌شدن برای شرایط عادی به جای شرایط بحرانی، نیاز آن‌ها به مدل‌های دیگر برای تکمیل‌شدن یا بهبود برای پرداختن به مکان‌های ساحلی و روش نسبتاً غیردقیق آن‌ها برای در نظرگیری برخی پدیده‌ها مانند: امواج شکننده، برهم‌کنش موج-جریان و غیره. استفاده از این مدل‌ها در برخی از موارد نه برای ایجاد دوباره وقایع تاریخی واقعی بلکه برای شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی مناسب می‌باشد که با احتمال وقوع آن‌ها می‌توان موارد ذیل را نیز تعیین نمود: گردبادهای مصنوعی<sup>۲</sup> فرستاده‌شده به وضعیت‌های اقلیمی متداول، طوفان‌های بیشینه‌ی مربوط به میدان‌های فشار و گرادیان‌هایی با فرض بیشترین احتمال وقوع برای دوره‌ی زمانی مورد بحث.

می‌توان از مدل‌های گسترش یافته برای "انتقال" داده از یک نقطه‌ی اندازه‌گیری به قسمت مورد نظر استفاده کرد. در اینجا باید دوباره آگاه باشیم زیرا تنظیم (کالیبراسیون) این مدل‌ها منعکس‌کننده‌ی متداول‌ترین شرایط می‌باشند در حالی که پدیده‌های برهم‌کنش که به اندازه‌ی کافی رخ نداده‌است در شرایط بحرانی تشدید می‌شوند.

## ۲-۱-۳-۲ فرضیه‌های تعمیم

به منظور اعمال روش‌های نظریه‌ی مقادیر بحرانی، متغیرهای تصادفی مورد بحث، باید در موضوع ما داده‌هایی که به عنوان مبنای تعمیم استفاده می‌شوند  $IDD^3$  باشند (مستقل بوده و به صورت یکسان توزیع شوند).

به عبارت دیگر این روش‌ها تنها هنگامی کاربردی هستند که در هر مشاهده و بررسی موضوع، اطلاعات جدیدی کسب شود که حتی به صورت جزئی از اطلاعات قبلی قابل استنباط نباشند و همچنین مقادیر بحرانی از مکانیزم مشابهی حاصل شوند که مقادیر به صورت متداول مشاهده شده‌اند. شرط دوم سخت‌گیرانه‌تر بوده و اعمال آن دشوار است (با توجه به اینکه مورد اول را می‌توان با تصدیق شکل‌های خفیف وابستگی معتدل کرد) به طور کلی تمرکز بیشتر جهت رسیدن به شرط دوم است.

<sup>1</sup>Numerical hindcast models

<sup>2</sup>Artificial cyclones

<sup>3</sup>Independence and Identically Distributed

به منظور تضمین عدم وابستگی معمولاً در تاریخ‌های زمانی مشاهده‌شده، "وقایع" را ایزوله می‌کنند و برای هر کدام از آن‌ها تنها سختگیرانه‌ترین اندازه‌گیری را نگه می‌دارند. جداسازی میان وقایع هنگامی مشخص می‌گردد که مقادیر به کمتر از آستانه افت کنند اما می‌تواند از تفسیر هواشناسی وضعیتی نیز ناشی شود که نشان می‌دهد مقادیر بیشینه در حقیقت بیشینه‌ی پدیده‌های مجزا می‌باشند. اساساً این پدیده‌ها برای باد، امواج و سطوح آب به شکل طوفان می‌باشند.

ممکن است جریان‌ها پدیده‌های دیگری را وارد سازند: به عنوان مثال، عبور موج‌های داخلی، ورتکس‌ها و غیره.

یکنواختی جامعه آماری اطلاعات که در ادامه وارد فرآیند تعمیم می‌شود باید با تحلیل پدیده‌ها در کنار عوامل آن‌ها مورد تأیید قرارگیرد: خارج‌سازی تمام مقادیر به غیر از بیشترین مقدار و فرض اینکه هر گونه غیریکنواختی به کمترین مقدار ممکن محدود شده و تأثیرگذار نخواهد بود کافی نیست. به عنوان مثال، ممکن است بادهای موسمی<sup>۱</sup> و طوفان‌های دریایی<sup>۲</sup> به لحاظ امواج طوفان<sup>۳</sup> مشابه به نظر برسند اما واضح است که میزان شدت طوفان‌های دریایی استثنایی که تنها یکبار در چند سال اندازه‌گیری می‌شوند بسیار بیشتر از بادهای موسمی است که به ندرت اتفاق می‌افتند. اگر در پایگاه داده میان این‌ها تمایز قائل نشویم، تعمیم حالت بحرانی حالتی میان دو حالت مذکور خواهد بود و در نتیجه دور از واقعیت می‌باشد.

## ۲-۳-۱-۳ ملاحظات فیزیکی پیرامون قوانین بحرانی

یک پرسش مکرر در مطالعه‌ی مسائل بحرانی، دینامیک مقادیر زیاد است. ما همچنین درباره‌ی کرتسیز<sup>۴</sup> یا سنگینی یا چاقی دنباله توزیع<sup>۵</sup> صحبت خواهیم کرد. در حقیقت، میزانی از آزادی عمل قابل قبول در انتخاب مقادیر بحرانی مدل‌سازی میان دنباله‌های سنگین (که مقادیر بحرانی فاصله‌ی زیادی از مقادیر مشاهده‌شده دارند) و دنباله‌های سبک (که مقادیر بحرانی توسط برخی مرزهای نسبتاً نزدیک به بیشترین مقادیر مشاهده‌شده محدود خواهند شد) وجود دارد.

انتخاب نوع مدل مورد استفاده مسئولیت مدیر پروژه است زیرا تا جایی که ما می‌دانیم هیچ آزمایش آماری قابل اعتمادی برای انجام این کار به صورت خودکار وجود ندارد. قانون تجربی انجام این کار بدین صورت است که هرچقدر مقادیر مشاهده‌شده به محدودیت‌های اعمالی

<sup>۱</sup>monsoons

<sup>۲</sup>Typhoons

<sup>۳</sup>Storm surges

<sup>۴</sup>Kurtosis

<sup>۵</sup>Heaviness or fatness of the distribution tail

توسط فیزیک نزدیک باشند دنباله‌ی توزیع باید سنگین‌تر باشد. در رابطه با شرایط آب‌وهوایی در دریا، توزیع‌های دنباله سنگین تنها برای پدیده‌هایی یافت می‌شوند که به تنهایی متداول نمی‌باشند: گردبادها<sup>۱</sup>، تسونامی‌ها، سیل‌ها و غیره. تعداد اندک مشاهدات باعث می‌شود که امکان نزدیک شدن داده‌های موجود به بیشینه‌های فیزیکی وجود نداشته باشد. در چنین مواردی ممکن است این ایده در طراحی سازه‌ها پیشنهاد شود که ما شکست را در شرایط بحرانی می‌پذیریم به جای اینکه برای توانمندی‌سازی آن‌ها برای مقاومت در برابر شرایط بحرانی (سخت و نامعلوم) تلاش کنیم.

از طرف دیگر، به عنوان مثال، امواج و جریان‌ها در یک حوضچه‌ی بسته دارای مقادیر بحرانی خواهند بود که بزرگتر از بیشینه‌های مشاهده‌شده نمی‌باشند. همین مورد برای باد در شرایط واکسره و فشارهای پایین (مانند آن‌هایی که در ساحل‌های خشکی فرانسه مواجه می‌شویم) صادق است.

امواج خارج از ساحل اروپا به علت بسیاری از عواملی که تولید آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد مانند مدت زمان، گستره و شدت طوفان‌ها و احتمالاً ترکیب چندین طوفان یا حضور حلقه‌هایی در مسیر آن‌ها نسبتاً از نوع متوسط می‌باشند.

## ۲-۱-۴ برخی مشخصه‌های مقادیر بحرانی آب و هوای دریایی

### ۲-۱-۴-۱ امواج

در رابطه با امواج، پیش‌بینی طول عمده بیشینه‌ی آن‌ها (در سایه‌ی گسترش توسط مدل‌های عددی) هم در ساحل و هم نزدیک ساحل دشوار نمی‌باشد. با این حال، پیش‌بینی دوره‌ی تناوب و جهات مربوطه امواج دوردست گاهی اوقات به علت شدت آن‌ها هنگام پرداختن به پدیده‌های کمیاب دشوار می‌باشد. ممکن است این سوال در مورد تغییر علاقه از ارتفاع عمده حالت دریایی به طول بیشینه موج تکی مطرح شود که باید در نظر گرفته شود. ممکن است در تأسیسات سطوحی از قابلیت اطمینان برای به کارگیری  $MRE^2$  ها (انرژی‌های دریایی تجدیدپذیر) در نظر گرفته شود (از درجه‌ی احتمال سالانه  $1/10^2$  تا  $1/10^3$ ) و به طور کلی پذیرفته شده است که نظریه‌های موج مرتبه دوم کافی می‌باشند و ضرورتی ندارد که در مورد احتمال امواج به اصطلاح عجیب (که با این مدل سازگاری ندارند) نگران باشیم.

<sup>1</sup>Cyclones

<sup>2</sup> Marine Renewable Energy

به علاوه، تعدادی از این تأسیسات در نواحی ساحلی قرار گرفته‌اند که در آن امواج به دلیل عمق کم آب محدود شده‌اند. بنابراین، به ندرت می‌توان امواجی به ارتفاع بیشتر از ۱۰ متر در این مکان‌ها یافت درحالی که به عنوان مثال در خارج از ساحل یوشانت<sup>۱</sup> ارتفاع عمده امواج بحرانی به ۱۵ متر می‌رسد که به امواج تکی به ارتفاع تقریباً ۳۰ متر مربوط می‌شود. تأسیسات بزرگ دور از ساحل که گاهی اوقات دارای پرسنل می‌باشند از قوانین سازه‌ی دریایی استفاده خواهند کرد که ما بر حسب سی سال تجربه به آن آگاهی داریم، به طور ویژه در دریای شمال و دریای نروژ<sup>۲</sup> (جایی که امواج بحرانی تنها کمی بیشتر از امواج نزدیک آتلانتیک هستند) تأسیسات قادر به برآورد شرایط ایمنی در حد احتمال وقوع خطر سالانه<sup>۳</sup> ۱/۱۰ را دارند.

### ۲-۱-۴-۲ باد

سرعت‌های پایای متوسط باد شدید تا حدودی در مناطق معتدل شناخته شده‌است. با این حال به دلیل تندبادها<sup>۴</sup>، به اطلاعاتی در رابطه با آشفتگی و ناهمگنی فضایی نیاز است: طول افقی هم‌فاز<sup>۵</sup> و پروفیل عمودی در دریا، اطلاعاتی که جمع‌آوری آن‌ها در دریا در شرایط طوفانی دشوار بوده و اغلب با تعمیم اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در شرایط با شدت کمتر یا در ساحل به دست می‌آیند.

محاسبه‌ی مقادیر بحرانی در مناطق مستعد گردبادها باعث بروز مشکلاتی در فواصل اطمینان می‌شود زیرا تعداد داده‌های تاریخی که به صورت مستقیم قابل استفاده هستند کم می‌باشد. این مورد مشابه در خارج از مرزهای فرانسه است یعنی جایی که ما باید روش بخش‌بندی<sup>۶</sup> را به کار بگیریم (گردبادهایی را در نظر بگیرید که این مکان را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند اما به طور نسبی توسط مناطق نزدیک تحت تاثیر قرار می‌گیرند) و شبیه‌سازی‌های عددی "گردبادهای مصنوعی" را انجام دهیم (یا از روش‌های استنتاجی مبتنی بر این عوامل استفاده کنیم که باعث ایجاد گردبادها شده و تنها به صورت جزئی وابسته می‌باشند).

همچنین نکته‌ی قابل توجه، احتمال وقوع طوفان‌های بحرانی و کوتاه مدت<sup>۷</sup> به طور ویژه در مناطق استوایی بوده (جایی که دانش کنونی بسیار اندک بوده است) که یک یا دو ساعت به طول می‌انجامد اما با این وجود موضوع مطالعات چند سال گذشته توسط صنعت نفت بوده است.

<sup>1</sup> Ushant

<sup>2</sup> North Sea and Norwegian Sea

<sup>3</sup> Gusts

<sup>4</sup> Horizontal coherence lengths

<sup>5</sup> Regionalization

<sup>6</sup> Violent and brief squalls



### ۲-۱-۴-۳ جریان

به طور کلی جریان‌ها از بخش جبری یا شبه جبری (جزرومدها، گردش کلی) و بخش تصادفی تشکیل شده‌اند. مولفه‌ی دوم ممکن است از امواج داخلی (خواه به جزرومدر مربوط باشد یا نه)، از گردابه‌های متصل به ترکیب جریان‌ها، از آشفتگی مربوط به برهمکنش جریان‌های اقیانوسی عمده به همراه دیگر جریان‌ها یا به همراه ساحل و غیره حاصل شود. گاهی اوقات جریان، فرازهای کوتاه مدتی را نشان می‌دهد که در اندازه‌گیری‌ها و توسط مدل‌های که دارای مقیاس زمانی نسبتاً طولانی هستند مورد توجه قرار نمی‌گیرند. همچنین همانند باد باید جریان‌های بحرانی به پروفیلی مربوط شوند که اغلب ایجاد آن دشوار بوده و ممکن است به طور قابل توجهی با پروفیل‌های رایج تفاوت داشته باشد.

### ۲-۱-۴-۴ امواج طوفان<sup>۱</sup>

امواج طوفان، افزایش‌های غیر جزرومدی سطح میانگین آب، به دلیل فشار کم، تا حدودی به دلیل اثر بارومتري<sup>۲</sup> و (به صورت گسترده‌تر) تا حدودی توسط برش باد در سطح دریا ایجاد می‌شوند که توده آب سطح را "به جلو می‌راند" و آن را متراکم می‌کند. تجربه نشان می‌دهد که امواج بزرگ طوفان کمیاب می‌باشند و همانند گردبادها باید به بخش‌بندی یا شبیه‌سازی سناریوها پرداخت تا مقدارهای بحرانی را مشخص کرد. همچنان این پدیده در طراحی بیشتر مبدل‌های *MRE* نقش بسیار کمی دارد.

### ۲-۱-۴-۵ تسونامی‌ها

تسونامی‌ها در دریا تنها اثر جزئی دارند: جریان تندباد، موج پایین، موج و در نتیجه در مناطق تحت تاثیر به سادگی این مسئله‌ای درباره‌ی در نظرگیری علل آن‌ها در کنار علل جریان‌های بحرانی و امواج طوفان است.

### ۲-۱-۴-۶ انتخاب مصالح

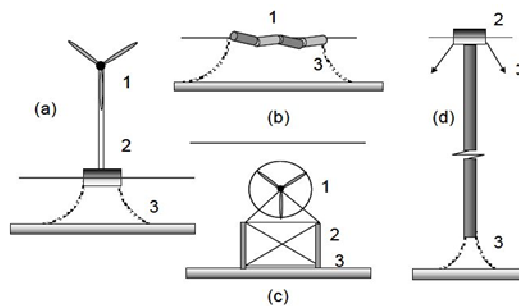
<sup>۱</sup>Storm surges

<sup>۲</sup>Barometrical

امروزه اکثر سیستم‌های تبدیل *MRE* در مرحله‌ی نمونه‌سازی می‌باشند و تعداد کمی موجود هستند که به شبکه‌ی برق متصل باشند. بنابراین، ما پشتوانه‌ی تجربی زیادی در رابطه با انتخاب مصالح نداریم. با این حال، تجربه‌ی بسیار گسترده‌ای در زمینه‌ی مصالح موجود در دیگر زمینه‌های دریایی به خصوص در صنعت نفت و ساخت‌وساز دریایی وجود دارد. بنابراین بسیار مهم است که ویژگی‌های فنی المان‌های مختلف این ساختارهای جدید را تحلیل کرد تا مشاهده نمود که چه چیزی در دسترس است و چه چیزی همچنان نیاز به تأیید دارد.

ما می‌توانیم سه مولفه‌ی اصلی مبدل *MRE* را تعریف کنیم:

- بخش‌های متحرک (پره‌ها، شناورها و غیره)
- سازه‌های تکیه‌گاهی (چهارچوب‌های کاری، پلتفرم‌ها و غیره)
- لنگرگاه<sup>۱</sup> (اسکله‌ها، سیم‌های مهار و غیره).



شکل ۲-۲ نمایش ترسیمی المان‌های مختلف چهار نوع مبدل *MRE* است.

شکل ۲-۲ مولفه‌های سازه‌هایی که انرژی دریایی تجدیدپذیر را تبدیل می‌کنند. الف) توربین بادی دریایی، ب) مبدل انرژی خیزآب<sup>۲</sup>، پ) توربین آبی، ت) انرژی حرارتی ما در بخش اول از این فصل دیدیم که محیط دریایی محیطی ناسازگار بوده و جنبه‌ی کلی این کاربردها به معنای ظرفیت مقاومت در برابر آن محیط است. این گفته برای قطعات فلزی به مقاومت در برابر خوردگی<sup>۳</sup> و برای قطعات مبتنی بر پلیمر به مقاومت در برابر پیری<sup>۴</sup> ترجمه می‌گردد. میان محیط‌ها تفاوت‌های قابل توجهی وجود دارد: تکیه‌گاه‌های توربین‌های بادی دریایی تا حدودی مستغرق می‌باشند اما خود توربین در هوا قرار دارد. مبدل‌های انرژی خیزآب (برای بیشتر بخش‌ها (به فصل ۱۱ مراجعه شود)) در سطح آب قرار گرفته‌اند و سازه‌های دیگر-

<sup>1</sup>Anchorage

<sup>2</sup>Swell energy convertor

<sup>3</sup>Resistance to corrosion

<sup>4</sup>Resistance to ageing

توربین‌های آبی (به فصل ۸ مراجعه شود) و لوله‌های مبدل‌های انرژی حرارتی اقیانوس (به فصل-های ۱۲ و ۱۳ مراجعه شود) به طور دائم متسغرق می‌باشند.

در رابطه با خوردگی فلز ما می‌توانیم میان خوردگی تعمیم‌یافته معروف در فولاد که منطبق بر کاهش سالانه ضخامت [ISO 92] است و خوردگی‌های موضعی تمایز قائل شویم (شکاف‌ها<sup>۱</sup>، سوراخ‌ها، خوردگی گالوانیک<sup>۲</sup> میان دو فلز متفاوت و غیره). این پدیده‌ها برای مدت طولانی در مرحله‌ی طراحی در نظر گرفته می‌شده‌اند و نباید به خصوص برای سازه‌ی تبدیل MRE مشکلات بزرگی به وجود بیاورند. رنگ‌های مخصوص و آندهای محافظ<sup>۳</sup> یا سیستم‌های حفاظتی کاتدی به منظور کند کردن خوردگی به کار گرفته می‌شوند و مراجع بسیاری در رابطه با خوردگی در دریا [SCU 90, CRO 98] وجود دارند که با جزئیات این موضوع را بررسی می‌کنند. مکانیزم‌های فرسودگی قطعات ساخته‌شده از پلیمرها و کامپوزیت‌ها متفاوت بوده و از گسترش آب در ماده حاصل می‌شوند. پیش‌بینی مقاومت در برابر پیری دشوار بوده و به دانش مناسبی از سینتیک مکانیزم‌های فرسودگی نیاز دارد که ممکن است بازگشت‌پذیر (پلاستیکی-شدن) یا غیر بازگشت‌پذیر (آبکافت<sup>۴</sup>) باشند.

المان دوم که برای تمامی مبدل‌های انرژی دریایی ضروری و کلی بوده، کابل زیر دریا می‌باشد (به فصل ۱۵ مراجعه شود) که سیستم تبدیل را به شبکه‌ی برق متصل می‌کند. در ارتباطات از راه دور و صنعت دریایی تجربه‌ی زیادی در رابطه با این کابل‌ها وجود دارد [WOR 09]. مادامی که پایانه‌ها به خوبی طراحی شوند آن‌ها هیچ مشکلی به غیر از مشکلات تجربه‌شده در تأسیسات موجود ایجاد نخواهند کرد.

با بازگشت به ایده‌ی سه نوع ساختار نام برده‌شده در بالا (بخش‌های متحرک، سازه‌های تکیه-گاهی و لنگرگاه) می‌توان نیازهای ویژه‌ای که انتخاب مصالح را تحت تاثیر قرار می‌دهند، مشخص گردد.

## ۲-۱-۲-۱- بخش‌های متحرک

مصالح کامپوزیتی به طور گسترده‌ای در پره‌های توربین‌های بادی خشکی و دریایی استفاده می‌شوند تا وزن را کاهش دهند و همچنین که این مواد مقاومت عالی در برابر خستگی<sup>۵</sup> در هوا را دارا هستند. انتخاب ماده از بین رزین‌ها (پلی استرها، وینیل-استرها یا اپوکسی‌ها) و فیبرها عمدتاً فیبر شیشه یا فیبرهای کربن برای پره‌های طویل‌تر) صورت می‌گیرد.

<sup>1</sup>Crevices

<sup>2</sup>Galvanic corrosion

<sup>3</sup>Sacrificial anodes

<sup>4</sup>Hydrolysis

<sup>5</sup>Fatigue

این انتخاب برای پره‌های توربین آبی که در معرض کرنش عظیمی قرار دارند دشوار می‌باشد. ابعاد پره‌ها حداکثر به طول ۱۰ متر بسیار کوچکتر از ابعاد پره‌های توربین بادی می‌باشند که امروزه بیشتر از ۵۰ متر هستند. مصالح می‌بایست از میان مصالح فلزی همچون مس-آلومینیوم یا فولاد ضد زنگ (که اغلب برای پروانه‌های کشتی استفاده می‌شود) و مصالح کامپوزیتی انتخاب شود. دوام و وزن، معیارهای استفاده‌شده برای این انتخاب (که در بخش بعدی بحث خواهد شد) می‌باشند. در سازه دریایی، انتخاب متداول مارپیچ‌های فلزی در حال تغییر به سمت مارپیچ‌های کامپوزیتی می‌باشد اما اگر وزن مطرح نباشد (در موارد معینی به منظور تضمین پایداری سازه‌ی تکیه‌گاه توربین آبی باید وزن مطرح گردد) احتمالاً از پره‌های فلزی استفاده شود. با این حال، توجه شود که امروزه پره‌های اکثر نمونه‌ها در دریا (سیزن<sup>۲</sup>، همرفست<sup>۳</sup>، وردانت پاور<sup>۴</sup>) از مواد کامپوزیتی ساخته شده‌اند. محبوب‌ترین طرح شامل تیرک مرکزی<sup>۵</sup> (تیر صلب) ساخته‌شده از فیبر کامپوزیت می‌شود که باعث افزایش صلبیت و مقاومت شده و با بدنه‌ی کامپوزیت فیبر شیشه احاطه شده است که در برابر شوک مقاوم‌تر است. هزینه نیز یک معیار مهم بوده و تولید پره‌های فلزی بسیار هزینه‌بر می‌باشد (پروانه مس-آلومینیوم ناو هسته‌ای هواپیما بر چارلز د گالی<sup>۶</sup> به قطر ۶ متر و وزن ۱۹ تن).

بیشتر مبدل‌های انرژی خیزآب بر روی سطح شناور بوده و همچنین طرفداران بسیاری دارند. پیشرفته‌ترین نمونه، پلامیس<sup>۷</sup>، از چندین بخش فولادی به همراه مفاصلی میان آن‌ها ساخته شده است. در این مورد، مقاومت در برابر اثر امواج ضروری می‌باشد، اما این مسئله به همان اندازه که به طراحی سازه بستگی دارد به مصالح نیز بستگی دارد.

مسئله‌ی اصلی در رابطه با مبدل‌های انرژی حرارتی اقیانوس مجرا می‌باشد که چندین هزار متر طول و چندین متر قطر داشته وظیفه انتقال آب سرد را به سطح برعهده دارد. این لوله در معرض جریان‌هایی در ستون آب<sup>۸</sup> و همچنین وزن قرار دارد. مواد کامپوزیتی برای این کاربرد بسیار مناسب می‌باشند اما ابعاد بسیار زیاد به لحاظ تولید و هزینه به موانعی تبدیل می‌شوند. می‌توان مصالح دیگر را نیز در نظر گرفت. به عنوان مثال، در پروژه‌ی *DIFIS[COZ 08]* برای پروژه‌ی اروپایی بازیابی سوخت کشتی‌های تخریب و غرق شده در اعماق زیاد، راه‌حل‌های مختلفی ارائه گردیده‌اند که شامل استفاده از کامپوزیت‌ها و همچنین مواد پلی‌اتیلنی ضخیم و

<sup>1</sup>Helical<sup>2</sup>SeaGen<sup>3</sup>Hammerfest<sup>4</sup>Verdant Power<sup>5</sup>Center spar<sup>6</sup>Nuclear aircraft carrier Charles de Gaulle<sup>7</sup>The Pelamis<sup>8</sup>Water Column

سایر سازه‌های ساخته شده از پوشش‌های دریایی<sup>۱</sup> می‌شدند. انتخاب ماده در سودمندی مبدل انرژی حرارتی اقیانوس ضروری بوده و راه‌حل‌های مختلفی برای این هدف مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند [HUR 10].

بسیاری از طراحی‌های مبدل‌های حرارتی انرژی خیزآب شامل بخش‌های واسط میان بخش‌های متحرک و میان سازه و لنگرگاه می‌شوند. درخواست بسیار زیادی برای این بخش‌های اتصالی وجود داشته و بخش‌های فلزی تاکنون باعث بروز مشکلاتی شده‌اند. می‌توان با راه‌حل‌های خلاقانه‌تر، مفاصل توپی چندلایه‌ای فلزی-الاستومر، همچون آن‌هایی که تاکنون در دریا برای کاربردهای دیگری استفاده می‌شوند، این مشکلات را مرتفع نمود.

### ۲-۱-۲-۲ سازه‌های تکیه‌گاهی

سازه‌های تکیه‌گاهی توربین‌های بادی دریایی، پلتفرم‌های شناوری هستند که باید صدها تن وزن را تحمل کنند. این سازه‌ها بیشتر شبیه سکوه‌های حفاری نفت<sup>۲</sup> هستند که برای استقامت در دریا به مدت ۲۰ سال طراحی می‌شوند. مطابق قوانین این صنعت [ISO 02] ممکن است یک طراح فرض کند که طراحی انجام شده در برای شرایط دشواری نخواهد بود. بنابراین فولاد با محافظت مناسب یا گاهی اوقات چدن مواد استفاده شده می‌باشد. همچنین قابل ذکر است با در نظرگیری وزن ترکیبی برج و توربین، سبک کردن پلتفرم در اولویت نمی‌باشد. ممکن است توربین‌های آبی در بستر دریا یا بر روی فونداسیون تک ستونه قرار گیرند و لوله‌ها یا سازه‌های فولادی جوش خورده تکیه‌گاه‌های آن‌ها باشند. این تکیه‌گاه‌ها باید به منظور تضمین پایداری سنگین بوده تا از سستی و اعوجاج فونداسیون ستونی جلوگیری شود. همچنین ارتفاع مشخصی برای توربین مطلوب می‌باشد تا اثر اغتشاشات محدود گردد. با این وجود، فناوری و تجربه‌ی مورد نیاز در صنعت نفت موجود می‌باشد.

### ۲-۱-۲-۳ لنگرگاه

لنگرگاه توربین‌های بادی شناور در آب‌های کم عمق مبتنی بر یک یا چند خط مهار زنجیروار است. در انتخاب مصالح بر اساس قوانین می‌تواند راهنمای راهگشا و مناسبی برای طراحی باشند [API 05].

بنابراین به منظور اجتناب از خوردگی و برای سازه‌های از نوع انرژی حرارتی در آب‌های عمیق می‌توان خطوط مهار ساخته شده از فیبرهای مصنوعی را در نظر گرفت. طی ۱۰ سال گذشته، پلی‌استرها برای خطوط مهار دریایی مشخصی استفاده گشته‌اند [FLO 07] و این مواد نسبت

<sup>1</sup>Sail Cloth

<sup>2</sup>Oil rigs

به فولاد در مقابل خستگی مقاومت بیشتری دارند [BAN 05]. گوی‌های شناور علامت‌دهی<sup>۱</sup> مشخصی به وسیله‌ی سیم‌های مهار پلی‌پروپیلن در جای خود نگه داشته می‌شوند که ارزانتر می‌باشند اما این فیبرها نسبت به پلی‌استر سریعتر دچار فرسودگی شده و برای کاربردهای طولانی مدت پیشنهاد نمی‌گردند.

## ۲-۲-۲ دوام

دوام به معنای ظرفیت ماده در اجرای وظیفه‌ی خود در بلند مدت است. به منظور محدود کردن کارهای تعمیر که برای توربین‌های آبی بسیار هزینه‌بر می‌باشند ما نیاز داریم تا قادر به تضمین قابلیت اطمینان این سازه‌ها باشیم. این نکته مبدل‌های *MRE* را از همتای زمینی خود جدا می‌سازد که در آن بررسی‌های دوره‌ای نسبتاً به آسانی انجام می‌شوند. در اینجا نگرانی اصلی پدیده خستگی است. کرنش وارده بر پره‌های توربین‌های بادی واقع بر زمین شناخته شده می‌باشد و یک سری از طیف‌های معرف (*WISPER, WISPERX, [SUT 96]*) به ما این امکان را می‌دهند که عملکرد آن‌ها را با استفاده از مدل‌سازی ارزیابی نمود. در رابطه با توربین‌های بادی دریایی همچنان اثر حرکت پلتفرم بر کرنش واقع بر پره‌ها با جزئیات مطالعه نشده است و به منظور شناخت بهتر آن به پژوهش بیشتری نیاز است.

برای پره‌های توربین‌های آبی محیط قرارگیری آن‌ها و غرق بودن دائمی آن‌ها در آب عامل تعیین کننده بوده و آن‌ها را از پره‌های توربین‌های بادی متمایز می‌سازد. دهه‌های بسیاری است که کامپوزیت‌ها در آب برای قایق‌ها و سازه‌های زیردریایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج نشان بدست آمده بسیار مثبت می‌باشند [DAV 08, CHO 08]. با این حال، اکثر این سازه‌ها در معرض بارهای بزرگ قرار نمی‌گیرند اما برخی قایق‌های مسابقه‌ای مشخصی بارهای به مراتب شدید تری را تجربه می‌کنند [CAS 08] اما آن‌ها طول عمر محدودی دارند و تنها می‌توان مابین مسابقات آن‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. نکته‌ی اصلی در پره‌های توربین آبی کامپوزیتی، خستگی در آب است و درباره‌ی اثرات ترکیبی انتشار آب<sup>۲</sup> و بارهای متناوب موجود، مطالعات بسیار کمی موجود است.

باتوجه به مطالعات اخیر توسط ایفرمر<sup>۳</sup> در این باره [DAV 10]، عمر خستگی کامپوزیت به چهار عامل بستگی دارد:

- ترکیب فیبرها (نوع شیشه و کربن).
- ترکیب شیمیایی رزین (فرمول‌بندی، سخت‌کننده‌ها، افزودنی‌ها).

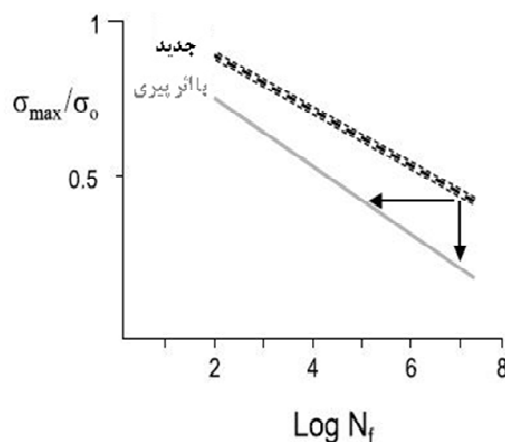
<sup>1</sup>Signaling buoys

<sup>2</sup>Spread of Water

<sup>3</sup>Ifremer

- سطح مشترک فیبر/ماتریس (بارور کردن فیبرها، برهم کنش).  
- شرایط تولید.

بنابراین انتخاب ماده برای این کاربرد ضروری می‌باشد. نتایج آزمایش بر روی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با فیبرهای مشابه نشان می‌دهد که جایگزین کردن یک رزین با دیگری در رفتار شبه استاتیکی تفاوت زیادی به وجود نمی‌آورد اما ممکن است باعث افزایش عمر خستگی تا ۱۰ برابر گردد. شکل ۲-۳ برخی از نتایج را نشان می‌دهد که به صورت نموداری اثر پیری در آب را بر رفتار خستگی کامپوزیت تک‌جهته<sup>۱</sup> تحت بار خمشی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ شماتیک منحنی‌های  $S-N$  برای یک کامپوزیت جدید و پس از پیری. کرنش اعمالی نرمال شده در رابطه با مقدار مقاومت شبه استاتیکی در مقابل تعداد چرخه‌ها قبل از گسیختگی ( $N_f$ )

اگر ماده به جای هوا در آب دریا آزمایش شود ممکن است برحسب نوع فیبر، مقدار کمی انحراف از منحنی  $S-N$  مشاهده گردد. همچنین پس از اثر پیری می‌توان انحراف بیشتری را از نمودار مذکور مشاهده نمود. امکان اینکه این اثر با استفاده از بهینه‌سازی رزین و سطح مشترک به حداقل برسد وجود داشته اما همچنان اجرای آزمایش‌های ارزیابی ضروری می‌باشند. باید توجه شود که تعویض فیبرهای شیشه با فیبرهای کربن در واقع این مشکل را حل نخواهد کرد. در کشش خالص، مقاومت فیبرهای کربن عالی است و در شرایط خشک طول عمر کامپوزیت-های آن‌ها احتمالاً بیشتر خواهد شد. با این حال، در یک کامپوزیت، رزین و سطح مشترک فیبر/ماتریس متحمل انتقال نیروها هستند و این انتقال با حضور آب تحت تاثیر قرار می‌گیرد و در نتیجه استفاده و یا عدم استفاده از فیبر کربن در افزایش عمر کامپوزیت تأثیر چندانی نخواهد داشت. رزین‌های اپوکسی که با سفت‌کننده‌های مشخصی فرمول‌بندی شده‌اند (به ویژه

<sup>1</sup>Unidirectional

انیدریدها<sup>۱</sup> اگرچه نه به صورت منحصر به فرد) به طور ویژه به آبکافت<sup>۲</sup> حساس می‌باشند که منجر به از دست رفتن خواص ماده به مقدار قابل توجهی پس از پیری در آب می‌شود. در نهایت می‌توان نتایج پیری را برای توربین آبی تخمین زد. اگر توربین با نرخ ۱۵ دور بر دقیقه بچرخد، پره‌ها بیشتر از هفت میلیون بار در سال چرخش خواهند کرد. گستره‌ی آسیب بر این چرخه‌ها به طراحی (محورهای عمودی یا افقی)، عمق غوطه‌ور بودن و توپولوژی بستر دریا بستگی خواهد داشت که پروفیل سرعت جریان با آن تعیین می‌گردد. شرط لازم برای کاربردهای صنعت پتروشیمی ضریب ایمنی ۱۰ برای طول عمر بار در شرایط بحرانی است. با توجه به منحنی  $S-N$  برای به کارکرد پره‌ها به مدت بیشتر از ۵ سال (با ضریب ایمنی ۵۰ سال) ضمانت دوام قطعه تا  $10^6 \times 3/5$  چرخه مورد نیاز خواهد بود. که این امر دامنه‌ی بیشینه بار را زیر ۰.۵٪ مقاومت استاتیکی در حالت جدید را می‌طلبد. پدیده پیری اثر قابل توجه بر بحث مقاومت استاتیکی و مقاومت خستگی پره داشته و در نظر گرفتن ضریب اطمینان بالا اجتناب ناپذیر خواهد بود.

این محاسبات برای مبدل انرژی خیزآب که با فرکانس امواج نوسان می‌کند (دوره تناوب ۶ تا ۱۰ ثانیه) مشابه است. این روش بسیار ساده بوده اما در آن بر اهمیت در نظرگیری بار متناوب این سازه‌ها تأکید می‌شود. این باور که پره‌های توربین بادی در شرایط کاری خود با دوام هستند، وضعیت مشابه را برای پره‌های توربین آبی را در محیط دریایی تضمین نمی‌کند و بار متناوب در سازه‌های دریایی مسئله‌ای بسیار حساس در محاسبات خواهد بود.

نکته‌ی دوم که باید در نظر گرفته شود این است که پره‌های توربین اغلب با اتصال چسبی دو نیمه به هم تولید می‌گردند. همانند جوش زدن قطعات فلزی ممکن است کرنش در قسمت چسب‌خورده متمرکز شده و پیری در چسب‌ها نسبت به قطعات کامپوزیتی سریع‌تر اتفاق بیفتد [BOR 09]. بنابراین استفاده از چسبی که برای کاربردهای دریایی تأیید شده است [DAV II] و توجه ویژه به شرایط تولید به منظور اجتناب از مسائل از بین رفتن چسب ضروری می‌باشد.

نکته‌ی نهایی که باید در نظر گرفته شود این است که به دلایل آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی ممکن است مبدل‌های  $MRE$  به زنجیره‌ها یا پنل‌ها یا شبکه‌های محافظتی مجهز شوند (در مقابل تورهای ماهیگیری، گردو خاک و غیره). کامپوزیت‌ها و مواد فشرده‌شده<sup>۳</sup> به خوبی برای این کاربردها مناسب می‌باشند زیرا نصب آن‌ها آسان است. با این حال، حفظ مجموعه‌ی این سازه‌ها در مقابل رسوب زیستی<sup>۴</sup> ضروری می‌باشد.

<sup>1</sup>Anhydrides

<sup>2</sup>Hydrolysis

<sup>3</sup>Sandwiched materials

<sup>4</sup>Bio-fouling



## ۳-۲-۲ حفاظت در مقابل رسوب

### ۱-۳-۲-۲ رسوب دریایی

رسوب دریایی یا زیستی به عنوان تجمع ارگانیسم<sup>۱</sup>های (گیاهان یا حیوانات) ناخواسته‌ی ریز یا درشت بر سازه‌های مستغرق در دریا تعریف می‌گردد (به عنوان مثال بدنه‌های قایق‌ها، پلتفرم‌ها، گوی‌های شناور، توربین‌های آبی، حسگرها و غیره). تمام انواع مواد چنین حالتی را تجربه می‌کنند و بیش از ۴۰۰۰ گونه‌ی پرفیتون<sup>۲</sup> به عنوان عامل رسوب زیستی توصیف شده‌اند [YEB 04]. نمونه‌ای از رسوب دریایی یافت‌شده پس از ۹ ماه غرق بودن در اسکله‌ی بrest<sup>۳</sup> در شکل ۴-۲ ارائه شده است. به طور کلی این رسوب به دو دسته‌ی ارگانیسم‌های "نرم" (که هیچ پوسته‌ی سختی ندارند) مانند سرنگ‌های دریایی<sup>۴</sup>، جلبک و غیره و ارگانیسم‌های "سخت" مانند بارناکل‌ها<sup>۵</sup>، ماسل‌ها<sup>۶</sup>، صدف‌ها، کرم‌های آهکی<sup>۷</sup>، اسفنج‌های پوسته‌ای<sup>۸</sup> و غیره دسته‌بندی می‌شود. با این حال، بافت "نرم" ارگانیسم‌ها بسیار متغیر می‌باشد (از انعطاف‌پذیر تا اجسام صلب). تجمع این ارگانیسم‌ها به عوامل بسیاری بستگی داشته و در ادامه مثال‌هایی ارائه شده است. موقعیت جغرافیایی، فاصله از ساحل، فصل، میزان روشنایی، شرایط هیدرودینامیکی، عمق و همچنین طبیعت مواد موجود در آن ناحیه [LEH 08]. ممکن است این تجمع باعث ایجاد پوششی بر روی مواد به ضخامت‌هایی در گستره‌ی چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر شود.

<sup>1</sup>Organisms

<sup>2</sup>Periphyton

<sup>3</sup>Brest harbor

<sup>4</sup>Sea squirts

<sup>5</sup>Barnacles

<sup>6</sup>Mussels

<sup>7</sup>Calcareous Worms

<sup>8</sup>Encrusting sponges



شکل ۲-۴ نمونه‌ای از رسوب دریایی پس از ۹ ماه غوطه‌وری در آب

به طور کلی تجمع ارگانسیم‌ها در زیرلایه در چهار مرحله در نظر گرفته می‌شود:

- جذب سطحی مولکول‌های ارگانیک و غیر ارگانیک در چند ثانیه‌ی اول غوطه‌وری.
- چسبندگی برگشت‌پذیر باکتری‌ها.
- توسعه‌ی اجتماع پیچیده‌تر توسط باکتری‌ها و جلبک‌های ریز که به پلیمرها تراوش کرده تا به صورت غیر بازگشت‌پذیر خود را به زیرلایه، خار و خاشاک، رسوبات و غیره متصل کنند که این امر یک غشای زیستی را تشکیل می‌دهد.
- و در نهایت، چسبندگی ارگانسیم‌های بی‌مهره بزرگتر مانند بارناکل‌ها<sup>۱</sup>، ماسل‌ها<sup>۲</sup> و جلبک که رسوب ریز را تشکیل می‌دهند. گونه‌های مختلف برای سکونت در زیرلایه‌ها و همچنین لایه-بندی‌های خاص با هم رقابت می‌کنند.

مقالات سال‌های اخیر به مطالعات کمی درباره‌ی فرآیند تجمع (ارگانسیم‌ها) در سازه‌های دریایی در طول زمان پرداخته‌اند [LAN 09a, LAN 09b, WHO 03, WIL 08]. اکثر مطالعات انجام‌شده درباره سکوه‌های نفتی، عمدتاً در دریای شمال، می‌پردازند. تغییرات قابل توجه در طبیعت حضور گونه‌ها و استقرار ارگانسیم‌های مختلف حتی برای پلتفرم‌هایی که تنها در چند کیلومتری از هم قرار گرفته‌اند قابل مشاهده می‌باشند [FOR 84].

تلاش‌های انجام‌شده برای پیش‌بینی نوع تجمع و تخمین ضخامت لایه‌های رسوب دریایی در طول زمان نشان داده است که نتایج این کار قطعی نیست [BRA 05]. تفاوت‌های قابل توجهی

<sup>1</sup>Barnacles

<sup>2</sup>Mussels

میان مقادیر برآورد شده و مقادیر واقعی مشاهده شده است. اساساً این مسئله به نبود دانشی دقیق درباره‌ی مراحل تجمع ارگانسیم‌های درشت مربوط می‌شود که به بسیاری از عوامل متفاوت همچون موقعیت جغرافیایی، خواص فیزیکی-شیمیایی آب دریا و وقوع حوادث غیر قابل پیش‌بینی همچون طوفان‌های بحرانی، شکارچیان و غیره بستگی دارد. برای مثال گونه‌های تجمع‌شونده مشخصی همچون بارناکل‌ها و ماسل‌ها قبل از سکونت در زیرلایه از مرحله‌ی تشکیل لارو عبور می‌کنند. ممکن است آزادانه توسط جریان‌های سطحی حمل شده و به سازه‌های بسیار دور از ساحل مهاجرت کنند.

## ۲-۲-۳-۲ اثر رسوب‌گرفتگی دریایی بر سازه‌های دریایی

نتایج مربوط به حضور رسوب دریایی و غشای زیستی در سازه‌های دریایی مستغرق بسیار زیاد می‌باشد. در این مورد به چند نمونه اشاره می‌شود:

- افزایش خطر خوردگی موضعی در فولاد ضد زنگ در قسمت‌هایی که به صورت ناقص جوش خورده است. پتانسیل خوردگی فولاد ضد زنگ هنگامی که در آب طبیعی دریا مستغرق باشد فارغ از موقعیت جغرافیایی، فصل و نوع ریزساختار فولاد استفاده‌شده، افزایش می‌یابد [LEB 00] [FER 02]. این افزایش پتانسیل فرسایش به حضور غشای زیستی و افزایش واکنش تقلیل کاتدی<sup>۱</sup> مرتبط است. با این حال، مکانیزم‌هایی که افزایش پتانسیل خوردگی را توضیح می‌دهند همچنان به طور کامل واضح نمی‌باشند. این بالا رفتن پتانسیل خوردگی در حضور کلریدها باعث افزایش بحرانی خطر خوردگی موضعی در قطعاتی می‌شود که به درستی جوش نخورده‌اند.

- افزایش نرخ خوردگی فولاد در شرایط بی‌هوای<sup>۲</sup>. نرخ خوردگی چند میلی‌متر تا حدود ده میلی‌متر در سال در حضور سولفات و تیوسولفات<sup>۳</sup> با کاهش باکتری‌ها گزارش شده است [FER 02]. این خوردگی در محیط‌های بی‌اکسیژن یا در زیر رسوبات لجن گسترش پیدا می‌کند.

- خطرات از بین رفتن مواد پلیمری [FER 02].

- افزایش بار هیدرودینامیکی و ضرایب درگ واقع بر سطوح بدون پوشش [PIC 85]. در یک پلتفرم دریایی، لایه‌ای از رسوب دریایی به ضخامت ۱۵ سانتیمتر (مطابق [HEA 79]) شامل وزن اضافی ۰/۱۱۵٪ است اما بار هیدرودینامیکی را به اندازه‌ی ۱۷/۵٪ افزایش می‌دهد که منجر به افزایش آسیب مربوط به خستگی به اندازه‌ی ۶۲/۳٪ می‌شود. افزایش درگ در سازه‌ی

<sup>1</sup>Cathodic Reduction Reaction

<sup>2</sup>Anaerobic

<sup>3</sup>Thiosulfate-reduction



شابلونی<sup>۱</sup> از ۰/۷۸ به ۱/۰۵ به ازای ۲۵٪ سطح پوشیده از ماسل‌ها مشاهده شده است [BOU 04]. بوکیندا و همکاران<sup>۲</sup> خودشان را وقف توسعه‌ی مدل احتمالی بار خیزآب در یک سازه‌ی دریایی در دریای شمال با حضور رسوب دریایی کردند [BOU 04, BOU 07]. این مدل، طبیعت تصادفی ارتفاع و دوره‌ی تناوب خیزآب و همچنین عدم دقت مربوط به ضرایب درگ و رسوب دریایی را در نظر می‌گیرد.

- تغییراتی در الگوی جریان حول سازه‌ها.

- به علاوه، حضور لایه‌های ضخیم رسوب دریایی مانع هر گونه بازرسی به منظور نگهداری می‌شود.

### ۲-۳-۳ وسایل مقابله با رسوب دریایی

به طور کلی معیارهای مبارزه با رسوب دریایی بر حسب نیاز داشتن یا نداشتن به انرژی ورودی به دو دسته‌ی فعال و غیر فعال تقسیم می‌گردند [COM 08, QUI 09]. وسایل فعال عمدتاً برای محدود کردن چسبندگی رسوب دریایی واقع بر حسگرها و در بافت مبدل‌های حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رایج‌ترین و موثرترین ابزارها مبتنی بر برقافت آب<sup>۳</sup> دریا و تولید سدیم هیپوکلریت می‌باشند.

آبکاری<sup>۴</sup> همچنان گسترده‌ترین روش غیر فعال حفاظتی است. در آبکاری که محصولات فعال زیست‌کش<sup>۵</sup> رها می‌شوند (که به طور کلی از آفت‌کش‌ها و محصولات گیاهی<sup>۶</sup> حاصل می‌گردند) بر جانوران و گیاهان محیط دریایی تاثیر می‌گذارند. اثرات بحرانی به استفاده از زیست‌کش‌هایی همچون نمک‌های تریبوتیلین<sup>۷</sup> مرتبط می‌باشند که امروزه ممنوع بوده و به افزایش قوانین توسط سازمان بین‌المللی دریایی<sup>۸</sup> و تصویب دستورالعمل زیست‌کش‌ها<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۸ (دستورالعمل ۹۸/۸/EC پارلمان اروپا و شورا در ۱۶ فوریه ۱۹۹۸) منجر شد که این دستورالعمل درباره‌ی جایگزینی محصولات زیست‌کش در بازار می‌باشد.

می‌توان بر اساس اثر ضد چسبندگی از نوع دوم آبکاری استفاده کرد. این آبکاری‌های سطح با انرژی کم شامل هیچ زیست‌کشی نمی‌شوند و به طور کلی سیلیکون‌ها و فلوروپلیمرها می‌باشند. قدرت چسبندگی رسوب دریایی بر روی این مواد کاهش یافته و به عنوان مثال هنگام عبور

<sup>1</sup>Jacket-type structure

<sup>2</sup>Boukinda et al

<sup>3</sup>electrolysis of Sea Water

<sup>4</sup>Coating

<sup>5</sup>Biocidal

<sup>6</sup>Phytosanitary products

<sup>7</sup>Salts of tributyltin

<sup>8</sup>International Maritime Organization

<sup>9</sup>Biocides Directive

قایق‌ها با سرعت زیاد یا با فواره‌های آب قابل پاک‌سازی می‌باشند. با این حال، این پوشش‌ها دارای خواص مکانیکی ضعیفی می‌باشند. انواع مختلف حفاظت در برابر خوردگی زیستی (زیست‌کش‌ها) در اینجا بررسی نگردیده و خواننده به فصل‌های مرتبط [FER 02] ارجاع می‌گردد. خواص ضد رسوب آلیاژهای مس اغلب در مسیرهای آب دریا استفاده می‌شوند و رفتار این مواد نیز در [FER 02] بررسی شده است.

## ۲-۳ کتاب‌شناسی

[BAC 91] BACON S., CARTER D.J.T., "Wave climate changes in the north Atlantic and North Sea", *Int. J. of Climatology*, vol. 11, pp. 545-558, 1991.

[BOR 09] BORDES M. et al., "Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 6, pp. 595-608, September 2009.

[BOU 04] BOUKINDA M., SCHOEFS F., BELORGEY M., "Modélisation probabiliste des efforts de houle sur une structure offshore en présence de biosalissures", *Proc. VIIIème Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*, Compiègne, 7-9 September 2004.

[BOU 07] BOUKINDA M., *Modélisation des efforts sur une structure de type jacket colonisée par des biosalissures pour le calcul en fiabilité – optimisation des inspections/nettoyage*, Thesis, University of Nantes, 14 September 2007.

[BRA 05] BRAM J.B., PAGE H.M., DUGAN J.E., "Spatial and temporal variability in early successional patterns of an invertebrate assemblage at an offshore oil platform", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 317, no. 2, pp. 223-237, April 2005.

[CAS 08] CASARI P., CHOQUEUSE D., DAVIES P., DEVAUX H., "Application Marine des matériaux composites, Cas des voiliers de compétition", *Techniques de l'Ingénieur*, AM5 655, January 2008.

[CHO 08] CHOQUEUSE D., DAVIES P., "Ageing of composites in

- underwater applications*”,  
Chapter 18 in MARTIN R. (ed.), *Ageing of Composites*, Woodhead Publishers, pp. 467-498, 2008.
- [COM 08] COMPERE C., DELAUNEY L., “Systèmes antisalissures”, Chapter XVIII in *Biodétérioration des matériaux – Action des micro-organismes, de l’échelle nanométrique à l’échelle macroscopique*, Ellipses, pp. 229-238, 2008.
- [COZ 08] COZIJNS H. et al., “Recovery of oil trapped in ship-wrecks: the DIFIS concept”, *Proc International Oil Spill conference IOSC 2008, Savannah, May 2008*.
- [COZ 10] LE COZANNET G., LECACHEUX S., DELVALLEE E., CHARLES E., DESRAMAULT N., IDIER D., KRIEN Y., PEDREROS R., OLIVEROS C., “Influence de la variabilité climatique sur les vagues dans le golfe de Gascogne”, *Proc . 8ièmes JST, Theme 3, Brest, 2010*.
- [DAV 08] DAVIES P., CHOQUEUSE D., “Aging of composites in marine vessels”, Chapter 12 in MARTIN R. (ed.), *Ageing of Composites*, Woodhead Publishers, pp. 326-353, 2008.
- [DAV 11a] DAVIES P., BOISSEAU A., GERMAIN G., GAURIER B., PERREUX D., “Durability of composite tidal turbine blades”, *Proc. 9th EWTEC (European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, September 2011*.
- [DAV 11b] DAVIES P., “Marine industry”, Chapter 51 in OCHSNER A., ADAMS R.D., DASILVA L.F.M., *Handbook of Adhesion Technology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.
- [FER 02] FERON D., COMPERE C., DUPONT I., MAGOT M., “Biodétérioration des matériaux métalliques ou biocorrosion”, Chapter 15 in *Corrosion des métaux et alliages: mécanismes et phénomènes, traité MIM, série alliages métalliques*, Hermès-Lavoisier, pp. 385-405, 2002.
- [FOR 84] FORTEATH G.N.R., PICKEN G.B., RALPH G.B., “Patterns of macrofouling on steel platforms in the central and the northern North Sea”, in LEWIS J.R., MERCER A.D., *Corrosion and Marine Growth on Offshore Structures*, Society of Chemical Industry and

*Ellis Horwood Limited, 1984.*

[FRA 06] FRAENKEL P.L., "Tidal current energy technologies", *IBIS, International Journal of Avian Science, Wiley, pp. 145-151, 2006.*

[HEA 79] HEAF H.J., "The effect of marine growth on the performance of fixed offshore platforms in the North Sea", *Proc 11th Annual Offshore Technology Conference, vol. 1, pp. 255-268, 1979.*

[ISS 09] ISSC, *Report of Committee I.1 Environment, Proceedings of the 17th International Ship and Offshore Structures Congress, vol. 1, Seoul National University, 2009.*

[LAN 09a] LANGHAMER O., *Wave energy conversion and the marine environment: Colonization patterns and habitat dynamics, doctoral thesis, Uppsala University, 2009.*

[LAN 09b] LANGHAMER O., WILHELMSSON D., ENGSTRÖM J., "Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys – a pilot study *Estuarine*", *Coastal and Shelf Science, vol. 82, pp. 426-432, 2009.*

[LEB 00] LE BOZEC N., *Réaction de réduction de l'oxygène sur les aciers inoxydables en eau de mer naturelle. Influence du biofilm sur les processus de corrosion, Thesis, University of Bretagne Occidentale, 2000.*

[LEH 08] LEHAITRE M., DELAUNEY L., COMPÈRE C., "Biofouling and underwater measurements in Real-time coastal observing systems for marine Ecosystem", Chapter 12 in BABIN M., ROESTER C.S., CULLEN J.J. (ed.), *Dynamics and Harmful Algal Blooms: Theory, Instrumentation and Modeling, Oceanographic methodology series, Uresco Publishing, 860p, 2008.*

[PIC 85] PICKEN G.B., "Review of marine fouling organisms in the North Sea on offshore structures", *Discussion Forum and exhibition on Offshore Engineering with Elastomers, Plastics and Rubber Inst., London, vol. 5, pp.5.1-5.10, June 1985.*

[QUI 09] QUINIOU F., COMPÈRE C., "La chimie et la mer. Ensemble au

- service de l'homme*",  
*EDP Sciences 2009, Chapter 3, Part 3, La chimie à l'assaut des biosalissures, pp. 177-194, 2009.*
- [WHO 03] WHOMERSLEY P., PICKEN G.B., "Long-term dynamics of fouling communities found on offshore installations in the North Sea", *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, vol. 83, pp. 897-901, 2003.
- [WIL 08] WILHELMSSON D., MALM T., "Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata Estuarine", *Coastal and Shelf Science*, vol. 79, pp. 459-466, 2008
- [YEB 04] YEBRA D.M., KIIL S., DAM-JOHANSEN K., "Antifouling technology – past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings",  
*Progress in Organic Coatings*, vol. 50, pp. 75-104, 2004





# ۳

## برخی از مفاهیم هیدرودینامیک و

### مهندسی اقیانوس

#### ۳-۱ محیط دریایی

#### ۳-۱-۱ امواج اقیانوسی

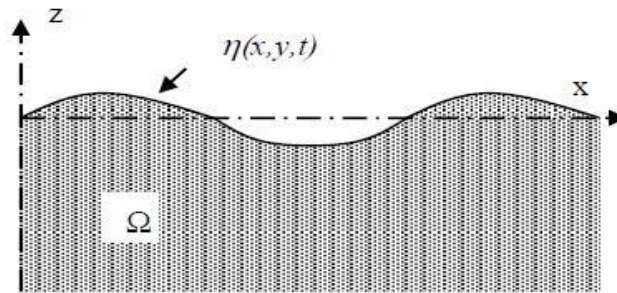
امواج اقیانوسی به وسیله‌ی اثر باد بر روی سطح اقیانوس تولید می‌شوند. هر چقدر باد قوی‌تر و طولانی‌تر و دورتر بوزد، امواج بزرگتری ایجاد می‌گردند. یکی از مشخصه‌ها ویژه‌ی موج اقیانوسی، انتشار بدون از دست دادن انرژی است. بنابراین، قبل از اینکه این موج در سواحل ناپدید شود می‌تواند تا مسافت‌های دور جابجا شود.

به منظور نمایش جریان مربوط به انتشار امواج اقیانوسی باید از چهارچوب کاری سیال ایده‌آل استفاده گردد (چشم‌پوشی از اثر ویسکوزیته) و جریان تراکم‌ناپذیر و غیرچرخشی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه می‌توان نوشت که سرعت سیال  $V$  از پتانسیل  $\Phi$  ناشی می‌گردد.

$$\vec{V} = \overline{\text{grad}} \phi$$

با ترکیب این معادله با فرضیه تراکم‌ناپذیری و معادله لاپلاس نتیجه می‌شود که پتانسیل در تمامی قلمرو سیال حاکم است:

$$\Delta\phi(M, t) = 0 \quad \forall M \in \Omega$$



شکل ۳-۱ تعریف قلمرو سیال

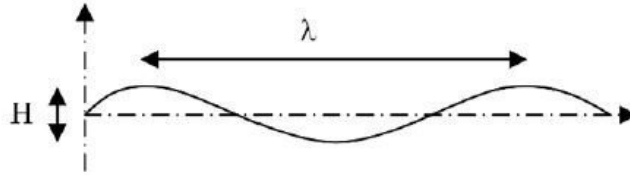
همچنین نوشتن شرایط مرزی سیال برای حل این مسئله موردنیاز خواهد بود. مناسبترین شروط مرزی آنهایی هستند که در سطح آزاد نوشته می‌شوند و موقعیت آن‌ها به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$z = \eta(x, y, t)$$

این شرایط حدود به صورت زیر می‌باشند.

اولین مورد شرط سینماتیکی سطح آزاد بوده و بیانگر این حقیقت است که سطح آزاد یک مانع فیزیکی می‌باشد و مورد دوم شرط دینامیکی سطح آزاد بوده که بیانگر پیوستگی فشار در هر طرف سطح مشترک می‌باشد (اثرات کشش سطحی در مقیاس امواج اقیانوسی ناچیز می‌باشند و صرفنظر می‌گردند). در دستگاه معادله‌ی بالا،  $g$  شتاب جاذبه و  $\rho$  چگالی آب می‌باشد.

$$\begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial\eta}{\partial x} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{\partial\eta}{\partial y} \\ \eta = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\overrightarrow{\text{grad}} \phi|^2 \right) \end{cases}$$

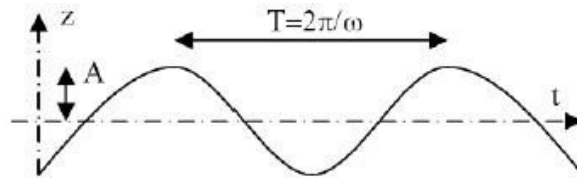


شکل ۲-۳-۳ تعریف طول موج و ارتفاع موج (حداقل موج تا حداکثر موج)

همانطور که مشاهده می‌شود این دو شرط در سطح آزاد غیر خطی بوده و در نتیجه تحلیل بیشتر آن‌ها با استفاده از این فرمول‌ها دشوار می‌باشد. با این حال می‌توان با فرض اینکه ارتفاع موج  $H$  به طور کلی نسبت به طول موج  $\lambda$  کوچک است یک بسط توزیعی  $\varepsilon = H/\lambda$  برای مقادیر مرتبط با جریان را تولید کرد:

$$\begin{cases} \eta = \varepsilon \eta_1 + \varepsilon^2 \eta_2 + \dots + \varepsilon^{n-1} \eta_{n-1} + O(\varepsilon^n) \\ \phi = \varepsilon \phi_1 + \varepsilon^2 \phi_2 + \dots + \varepsilon^{n-1} \phi_{n-1} + O(\varepsilon^n) \end{cases}$$

این بسط، بسط استوکس<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. موج مربوط به مرتبه‌ی  $n$  برش<sup>۲</sup> را موج استوکس از مرتبه‌ی  $n$  می‌نامند. اگر از اثرات مرتبه‌ی بیشتر از یک صرف نظر گردد، شرایط مرزی خطی می‌گردند که این امر به امکان یافتن پاسخ تحلیلی با استفاده از روش جداسازی متغیرها را ممکن می‌سازد.

شکل ۳-۳-۳ تعریف دوره تناوب گذرا<sup>۳</sup> و دامنه موج منظم

بگذارید مورد ویژه‌ی موج منظم (موج پیشرو صفحه‌ای تک‌فام<sup>۴</sup>) را با فرکانس  $\omega$ ، دامنه‌ی  $A$  (نصف فاصله‌ی دره تا قله به ارتفاع  $H$ ) در نظر بگیریم که در جهت مثبت  $x$  در محیطی به عمق

<sup>۱</sup>Stokes development

<sup>۲</sup>The order of truncation  $n$

<sup>۳</sup>Temporal

<sup>۴</sup>Monochromatic

نامحدود در حال انتشار است (موج استوکس مرتبه اول که موج هوایی<sup>۱</sup> نیز نامیده می‌شود)، می‌توان نشان داد که پتانسیل این موج به صورت زیر نوشته می‌شود:

که در آن:

$$\phi(x, y, z, t) = \operatorname{Re} \left( A \frac{ig}{\omega} e^{k(z-tx)} e^{j\omega t} \right)$$

-  $g$  شتاب ناشی از جاذبه است.

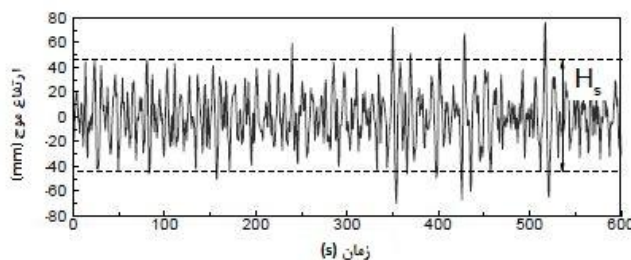
-  $k$  تعداد موج بوده و توسط  $k = 2\pi/\lambda$  تعریف می‌گردد که در آن  $\lambda$  طول موج (معمولاً  $m$  ۱۰۰) است.

توجه کنید که شرایط سطح آزاد بیانگر رابطه میان تعداد موج  $k$  و فرکانس  $\omega$  بوده که رابطه‌ی پراکندگی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. این رابطه در آب‌های عمیق به سادگی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$kg = \omega^2$$

بنابراین ما می‌توانیم مشاهده کنیم که تعداد موج (و در نتیجه طول موج) فقط به فرکانس موج و شتاب ناشی از جاذبه وابسته می‌باشد. در مهندسی اقیانوس، موج‌های مورد بحث دارای دوره-ی تناوب ۲ تا ۲۰ ثانیه، ارتفاع ۰/۵ تا ۱۵ متر و طول موج ۶ تا ۶۰ متر می‌باشند.

موج هوایی یک پاسخ منظم (یعنی تکفام و تک‌جهته) برای انتشار امواج در سطح اقیانوس‌ها می‌باشد. در عمل، امواج اقیانوس نامنظم می‌باشند، بدان معنا که آن‌ها چند جهته و چند فرکانسی هستند و زمان‌های ثبت‌شده در دریا نشان می‌دهد که امواج مذکور پدیده‌ای کاملاً تصادفی می‌باشند.

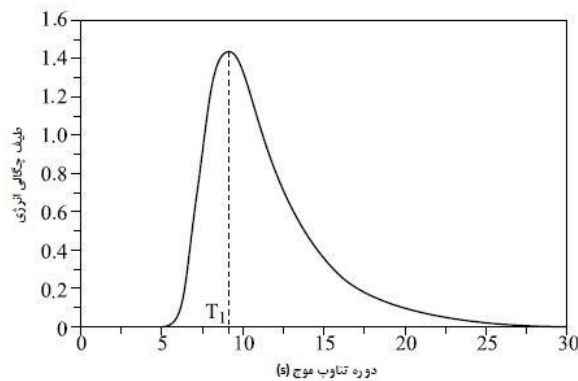


شکل ۳-۴ زمان‌های اندازه‌گیری‌شده در ارتفاع سطح آزاد در دریا

<sup>۱</sup>Airy Wave

<sup>۲</sup>Dispersion relation

خوشبختانه، هنگام پرداختن به محتوای طیفی امواج نامنظم مشاهده می‌شود که امواج در طول دوره‌ی تقریباً یک ساعته خواه برای دریای آرام یا طوفانی به صورت نسبی پایا می‌باشند، این موضوع بیانگر مشخصات شکل موج می‌باشد. می‌توان این شکل را با استفاده از توابع ریاضی که به چندین پارامتر آماری وابسته هستند تقریب زد و تقریب بدست آمده که طیف موجی نامیده می‌شود را بدست آورد.



شکل ۳-۵ نمونه‌ای از طیف موجی (طیف پیرسون-مسکوویچ)<sup>۱</sup>

یکی از رایج‌ترین شکل‌های ریاضی، طیف پیرسون-مسکوویچ است:

$$S(f) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{T_1^5 f^5} e^{-\frac{5}{4} \frac{1}{T_1^4 f^4}}$$

این طیف توسط دو مقدار مشخص می‌گردد که برای ساده‌سازی تعیین وضعیت دریا یک مزیت بشمار می‌رود:

- دوره‌ی تناوب اوج طیف  $T_1$  که در آن طیف بیشینه است؛

- ارتفاع عمده موج  $H_s^2$  می‌باشد. این مقدار به تعریف دقیق آماری مربوط می‌شود اما ساده‌تر است به خاطر داشته باشیم این ارتفاع با تقریب مناسبی به ارتفاع احساس‌شده توسط دریانوردان نیز مربوط می‌شود. جدول زیر مثال‌هایی از مشخصات متداول  $H_s$  و  $T_p$  وابسته به مقیاس بیوفورت<sup>۳</sup> را دربر دارد.

<sup>۱</sup>Pierson-Moskowitz spectrum

<sup>۲</sup>Significant wave height

<sup>۳</sup>Beaufort scale

مقیاس بیوفورت	۴	۵	۶	۸
$H_s$	۱	۲	۳	۵/۵
$T_p$	۶	۸	۱۰	۱۴

جدول ۱-۳ وضعیت دریایی متداول وابسته به مقیاس بیوفورت

در نهایت، متذکر می‌شویم که ارتفاع عمده موج بیانگر مقدار میانگین ارتفاع امواج است. ممکن است ارتفاع موج منفرد از این مقدار بیشتر بوده و حتی موج‌هایی یافت شوند که ارتفاع آن‌ها از دو برابر مقدار عمده بیشتر باشد.

### ۳-۱-۲ جریان‌ها و باد

#### ۳-۱-۲-۱ امواج

ممکن است در دریا امواج منشاء متفاوتی داشته باشند. برای مثال می‌توان به جزرومد و امواج بسیار قدرتمند حوالی بریتانی و جزایر بریتانیا اشاره کرد. با این حال، ممکن است امواج به دلیل گرادیان دما و یا شوری میان جرم‌های آب در بخش‌های مختلف جهان ایجاد شوند. جریان خلیج<sup>۱</sup> نمونه‌ای از این مورد است. جریان‌های تولیدشده توسط این گرادیان‌ها ممکن است دارای انرژی زیادی باشند تا جایی که برای مثال تجهیزات وسایلی در خارج از ساحل فلوریدا برای کنترل این انرژی در نظر گرفته شوند. در نهایت، نباید جریان‌های سطحی تولیدشده توسط باد فراموش شود. هنگامی که باد بر سطح اقیانوس می‌وزد، قیود ویسکوزی در سطح مشترک لایه‌ی بالایی آب را حرکت می‌دهند و ممکن است جریان‌های حاصل‌شده تا یک متر بر ثانیه سرعت داشته باشند.

امواج به طور عمودی دارای پروفیل پیچیده‌ای می‌باشند. آن‌ها هم به لحاظ شدت و هم جهت مبتنی بر ارتفاع در ستون آب تغییر می‌کنند. اغلب این امواج به وسیله‌ی تخمین‌های توانی<sup>۲</sup> مدل‌سازی می‌گردند.

#### ۳-۱-۲-۱-۲ باد

در رابطه با آنچه که در خشکی است، به طور کلی پذیرفته‌شده است که باد در دریا بسیار قوی‌تر و منظم‌تر می‌وزد. به همین جهت اغلب جریان‌ها با استفاده از تخمین‌های توانی مدل‌سازی می‌شوند که به سرعت میانگین  $V_{ave}$  باد و ارتفاع  $z$  مرتبط می‌گردند:

<sup>۱</sup>Gulf Stream

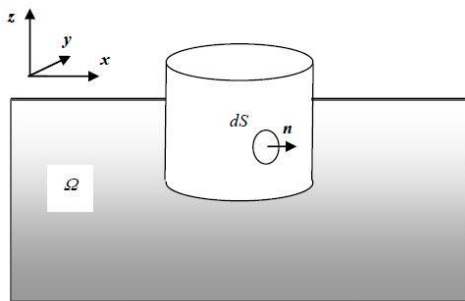
<sup>۲</sup>Power Law

$$V_{ave}(z) = Cz^\alpha$$

که در آن  $\alpha$  ضریب توان، معمولاً مابین  $0/1$  و  $0/2$  می‌باشد. اگر سرعت باد در ارتفاع داده شده (اغلب  $10\text{ m}$ ) مشخص باشد، می‌توان ضریب  $C$  را محاسبه نمود.

### ۲-۳ بارهای وارده بر سازه‌های دریایی

اکنون ما توجه خود را به تنش‌های اعمالی به سازه‌های دریایی و به ویژه آن‌هایی که توسط امواج، جریان و باد ایجاد گشته‌اند، معطوف می‌کنیم. شکل زیر بیانگر مسئله و علائم اختصاری استفاده شده می‌باشد.



شکل ۳-۶- شکل مسئله

سطح تر جسم با علامت  $S$  نشان داده شده و  $dS$  یک بخش کوچک از این سطح می‌باشد و  $n$  بردار عمود بر سطح<sup>۱</sup> در جهت سیال است.

محور  $Z$  در جهت عمودی و به سمت بالا در نظر گرفته می‌شود. به صورت تئوری جسم شناور در سطح اقیانوس دارای ۶ مرتبه‌ی آزادی می‌باشد: ۳ جابجایی در امتداد محورهای  $x$ ،  $y$  و  $Z$  و ۳ دوران حول محورهای  $x$ ،  $y$  و  $Z$ . به طور متداول در مهندسی اقیانوس، این سه جابجایی مرکز گرانش سازه  $x_G$ ،  $y_G$ ،  $z_G$  به ترتیب سرج (حرکت جلو و عقب)<sup>۲</sup>، سوی (حرکت چپ و راست)<sup>۳</sup> و هیو (بالا و پایین رفتن)<sup>۴</sup> و سه دوران  $\varphi$ ،  $\theta$  و  $\psi$  به ترتیب رول<sup>۵</sup>، پیچ<sup>۶</sup> و یاو<sup>۷</sup> نامیده می‌شوند. بردار حرکت‌های تولیدشده ( $x_G$ ،  $y_G$ ،  $z_G$ ،  $\varphi$ ،  $\theta$ ،  $\psi$ ) با  $X$  نشان داده می‌شود.

<sup>1</sup>Normal Vector of the Surface

<sup>2</sup>Surge

<sup>3</sup>Sway

<sup>4</sup>Heave

<sup>5</sup>Roll

<sup>6</sup>Pitch

<sup>7</sup>Yaw



### ۳-۲-۱ نیروی هیدرواستاتیک

می‌توان نیروی ارشمیدسی را با اصل زیر بیان نمود:

هر جسمی (به طور کامل یا نیمه مغروق در سیال) با نیرویی برابر وزن سیال جابجا شده توسط جسم شناور می‌گردد.

بیان این اصل به صورت ریاضی به سادگی به انتگرال مولفه‌ی هیدرواستاتیکی میدان فشار واقع بر سطح تر جسم مربوط می‌شود:

$$\vec{F}_{hydrostatic} = \int_S \rho g z \vec{n} dS$$

نیروی ارشمیدسی و جاذبه در یک جسم ساکن همدیگر را خنثی می‌کنند. حال فرض کنید که جسم از حالت ثابت به یک موقعیت بدون تعادل جابجا شود. نیروی ارشمیدسی و جاذبه دیگر به طور کامل مساوی نمی‌باشند. این تفاوت نیروی بازگرداننده هیدرواستاتیکی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

ما می‌توانیم به ازای جابجایی‌های کوچک نشان دهیم که نیروی برانگیخته شده<sup>۲</sup> حاصله را می‌توان به صورت فنر خطی نوشت (احتمالاً در نتیجه‌ی خطی‌سازی) که در آن  $K_H$  ضریب ماتریس سختی هیدرواستاتیکی است.

$$\vec{F}_{hydrostatic} = -k_H X$$

بیشتر ضرایب این ماتریس صفر می‌باشند. در حقیقت، نیروی ارشمیدس در اثر حرکت‌های افقی (سرج و سوی) یا حرکت یابو تغییر داده نمی‌شود.

همچنین توجه کنید که علامت ضرایب  $-k_{H55}$  و  $-k_{H44}$  اطلاعاتی را درباره‌ی پایداری سازه فراهم می‌سازند. علامت منفی بیانگر افزایش اغتشاشات می‌باشد و در نتیجه نشان‌دهنده‌ی ناپایداری سازه بوده و به عبارت دیگر خبر از غرق شدن آن می‌دهد.

### ۳-۲-۲ نیروهای تحریک در امواج

#### ۳-۲-۲-۱ نیروهای فرود-کریلوف<sup>۳</sup>

<sup>1</sup>Hydrostatic restoring force

<sup>2</sup>Resulting Generalized Force

<sup>3</sup>Froude-Krylov forces

اکنون بگذارید ما مسئله امواج منظم منتشرشده واقع بر سطح قلمرو سیال در غیاب هر گونه سازه و در جهت مثبت  $x$  را در نظر بگیریم:

$$\eta(x, t) = A \cos(kx - \omega t)$$

این اغتشاش سطح آزاد از طریق عبارت فشار ناپایا در قلمرو سیال تأثیرگذار بوده و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p(x, y, z, t) = -\rho g A e^{kz} \cos(kx - \omega t)$$

ما در عبارت آخر وجود عبارت  $e^{kz}$  را متذکر می‌شویم. بنابراین، اثر موج تنها در اطراف سطح احساس می‌شود. هنگامی که جسم تا عمقی بیشتر از نصف طول موج داخل آب فرو برده شود اثر نوسانات فشار ناشی از حضور امواج قابل چشم‌پوشی خواهد بود. این عبارت ناپایا بعنوان یک اثر هیدرودینامیکی در نظر گرفته می‌شود که در مقابل مولفه‌ی هیدرواستاتیکی نیروهای فشاری قرار دارد. اکنون بگذارید ما جسمی را در قلمرو سیال قرار دهیم و برای لحظه‌ای برهم‌کنش آن را با امواج نادیده بگیریم، بنابراین جریان با حضور جسم دچار اغتشاش نمی‌گردد. نیروی مربوط به انتگرال فشار دینامیکی واقع بر سطح جسم نیروی فرود-کریلوف نامیده می‌شود:

$$\vec{F}_{Froude-Krylov} = \int_S p \vec{n} dS$$

لازم به ذکر است که اغتشاش ایجادشده توسط جسم قابل توجه بوده و قابل چشم‌پوشی نخواهد بود و بنابراین این نیرو تقریب مناسبی از نیروهای هیدرودینامیکی را ارائه نمی‌کند.

### ۲-۲-۲-۲ نیروهای تفرق

اکنون بگذارید ما مسئله‌ی جسم ثابت در امواج را در نظر بگیریم. واکنش جسم با میدان موج برخوردی<sup>۱</sup> (میدان موج مختل نشده که در غیاب جسم وجود خواهد داشت) میدان موج دیگری را ایجاد می‌کند که میدان موج پراکنده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

همچنین میدان فشار هیدرودینامیکی در قلمرو سیال به میدان موج پراکنده مربوط می‌شود. انتگرال این میدان فشار در سطح تر نیروی تفرق<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. هنگامی که اندازه‌ی مشخصه<sup>۴</sup> جسم برابر یا بزرگتر از طول موج امواج باشد اندازه‌ی این نیروهای تفرق مشابه

<sup>1</sup>Incident wave field

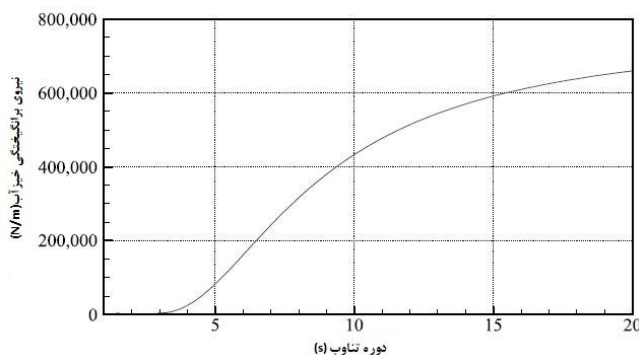
<sup>2</sup>Diffracted wave field

<sup>3</sup>Diffraction Force

<sup>4</sup>Characteristic Size

نیروهای فرود-کریلوف خواهد بود. به عبارت دیگر، هنگامی که جسم در مقایسه با طول موج امواج بسیار کوچک باشد، میدان موج پراکنده‌ای که توسط آن تولید می‌گردد نیز بسیار کوچک خواهد بود و می‌توان از نیروی تفرق صرف نظر کرد.

جمع نیروهای فرود-کریلوف و نیروهای تفرق برابر نیروی تحریک سازه بوده که ناشی از عمل موج برخوردی می‌باشد. شکل ۳-۷ مدول این نیروهای تحریک را با هیو موج منظم به دامنه‌ی  $m$  ۱ نشان می‌دهد که به دوره‌ی تناوب امواج بستگی دارد. جسم مورد بحث یک استوانه‌ی عمودی به قطر  $m$  ۱۰ و درفت<sup>۱</sup> عمودی  $m$  ۱۰ می‌باشد.



شکل ۳-۷ نیروی تحریک موج بر متر برای استوانه‌ای به قطر  $m$  ۱۰ و درفت عمودی  $m$  ۱۰ در هیو که به دوره تناوب وابسته می‌باشد.

### ۳-۲-۳ نیروهای تشعشع

اکنون بگذارید ما مسئله‌ی یک سازه‌ی که در ابتدا ساکن، قرار گرفته در هر جای قلمرو سیال را در نظر بگیریم. اکنون بگذارید که آن را در حرکت نوسانی قرار دهیم. می‌توان مشاهده کرد که میدان امواج در اطراف سازه توسعه می‌یابد که به دور از جسم منتشر می‌گردد. این میدان امواج انتشار یافته توسط سازه می‌باشد که میدان فشار و نیروی مرتبط به آن به ترتیب فشار تشعشعی و نیروهای تشعشعی نامیده می‌شوند. ما می‌توانیم برای حرکت هارمونیک فرکانس  $\omega$  از مرتبه‌ی یک نشان دهیم که این نیروی تشعشعی به صورت جمع عبارت متناسب با سرعت جسم و عبارت متناسب با شتاب آن قابل نوشتن است:

$$\vec{F}_{radiation} = CM(\omega)\ddot{X} - CA(\omega)\dot{X}$$

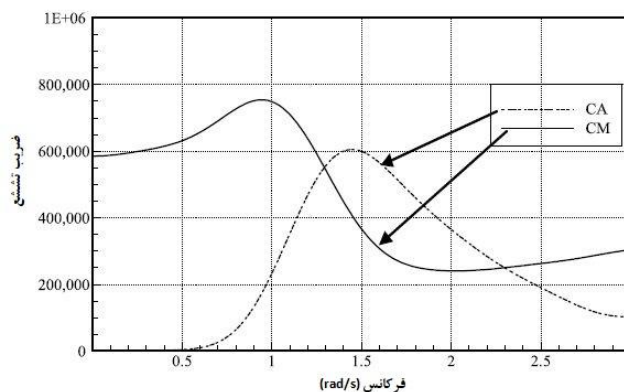
<sup>1</sup>Draft

ضریب عبارت شتاب، جرم افزوده نامیده می‌شود. می‌توان این جرم را به عنوان جرم آب جذب- شده توسط جسم در حرکت تعبیر کرد. ضریب عبارت سرعت، ضریب میرایی تشعشعی می- باشد. این ضریب بیانگر تبدیل انرژی جنبشی جسم به انرژی مربوط به میدان موج تشعشعی است. این دو ضریب به فرکانس وابسته هستند.

در ناحیه‌ی گذرا<sup>۱</sup> از مرتبه یک، نیروی تشعشعی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F}_{radiation} = -\mu_{\infty} \ddot{X} - \int_0^t K(t-\tau) \dot{X}(\tau) d\tau$$

مجدداً در این قسمت عبارت جرم افزوده وجود دارد. با این حال، اکنون عبارت سرعت به عنوان یک ترکیب از سرعت‌های قبلی جسم با تابع حافظه<sup>۲</sup> ظاهر می‌گردد که اثر انتشار امواج در امتداد طول جسم را در نظر می‌گیرد.



شکل ۳-۸ ضرایب تشعشعی حرکت هیواستوانه‌ی عمودی به قطر  $10\text{ m}$  و درفت عمودی  $10\text{ m}$

تابع حافظه و ضریب جرم افزوده آب در ناحیه‌ی گذرا توسط فرمول‌های زیر به ضرایب تشعشعی در ناحیه‌ی فرکانسی مرتبط می‌شوند:

$$\mu_{\infty} = CM(\omega) + \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau$$

$$K(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} CA(\omega) \cos(\omega t) d\omega$$

<sup>1</sup>Temporal domain

<sup>2</sup>Memory Function

### ۳-۲-۴ نیروهای دریفت در امواج

نیروهای تحریک و تفرق، نیروهای مرتبه اول می‌باشند. اثرات دیگری در مرتبه دوم ظاهر می‌گردند. به طور ویژه می‌توان نشان داد که برای هر جسم داخل امواج (در حال حرکت یا سایر حالات) نیروی ثابتی وجود دارد. این نیرو، نیروی دریفت نامیده می‌شود. اگرچه این نیرو در مقایسه با اثرات تحریک و تشعشعی اهمیت ثانویه دارد اما بسیار مهم است که هنگام طراحی مهارهای سازه‌ی دریایی این نیرو را در نظر گرفت.

### ۳-۲-۵ نیروهای ویسکوز درگ

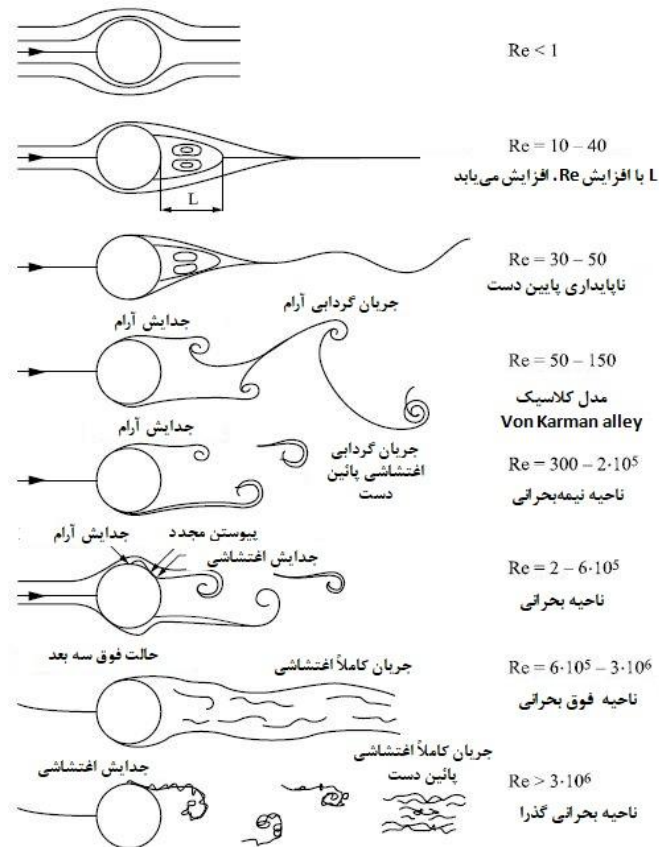
به دلیل وجود ویسکوزیته، سرعت سیال در سطح جسم صفر می‌باشد (شرط چسبندگی). سرعت سیال در یک فاصله‌ی مشخص از جسم تقریباً برابر سرعت میانگین سیال است. مابین این دو نقطه ناحیه‌ای از گذار سیال وجود دارد که لایه‌ی مرزی نامیده می‌شود. در کاربردهای دریایی، ضخامت این ناحیه بسیار کم است. اثرات ویسکوزیته در لایه‌ی مرزی بزرگ بوده و جریان به شدت تحت تأثیر برش<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد. این برش ناشی از وجود ویسکوزیته در سیال می‌باشد. انتگرال این قید ویسکوز بر سطح جسم برابر نیروی اصطکاکی است که متمایل به مقابله با حرکت جسم می‌باشد.

ممکن است این نیروی اصطکاکی قابل توجه بوده و حتی در مورد قایق با سرعت رو به جلو در آب آرام یا برای تخمین نیروی واقع بر پره‌های توربین آبی بسیار بزرگ باشد اما به طور کلی این نیروها در مورد سازه‌های بدون سرعت زیاد در مقایسه با نیروهای موجی (تحریک و تشعشع) قابل چشم‌پوشی می‌باشد.

### ۳-۲-۵-۲ نیروهای برشی ویسکوز

هنگامی که سازه در یک جریان قوی قرار می‌گیرد یا هنگامی که حرکت سیال در مقایسه با ابعاد آن زیاد باشد، اغلب جریان از هم پاشیده می‌شود، به این صورت که لایه‌ی مرزی از بین رفته و ورتکس‌هایی در جریان تولید می‌گردد. این پدیده در شکل ۳-۹، برداشت شده از [۱]، تشریح شده است.

<sup>۱</sup>Shearing



شکل ۳-۹ جریان حول استوانه به عنوان تابعی از عدد رینولدز. عدد رینولدز توسط ... تعریف می‌گردد که در آن  $V$  و  $D$  سرعت‌های متداول جریان و  $\nu$  ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال است. عدد رینولدز به عنوان نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای ویسکوز تعبير می‌گردد. این شکل برگرفته از [11] می‌باشد.

این تولید ورتکس‌ها در جریان به اتلاف معینی از انرژی مربوط می‌شوند که اغلب به وسیله‌ی نیروی میرای مرتبه دوم مدل‌سازی می‌گردد:

$$\vec{F}_{drag} = -\rho C_D A |\vec{V}| \vec{V}$$

که در آن  $V$  سرعت نسبی جسم نسبت به جریان،  $A$  سطح مشخصه‌ی جسم در صفحه‌ی عمود بر  $V$  و  $C_D$  ضریب درگ است. اثر اصطکاک در ضریب  $C_D$  در نظر گرفته می‌شود.



به طور کلی، نیروهای ناشی از باد موثر بر سازه نیز با فرمول‌بندی مشابهی در نظر گرفته می‌شود. برای سازه‌هایی با پوشال<sup>۱</sup>های بسیار زیاد، همچون سکوه‌های حفاری نفت یا توربین‌های بادی شناور فراساحلی ممکن است این عبارت قابل توجه باشد.

### ۳-۳ ابزارهای عددی و آزمایشگاهی برای انجام تحلیل

ارزیابی مجموعه‌ی این بارها به صورت مجزا یا کلی یک مسئله‌ی بسیار پیچیده می‌باشد. به طور کلی به غیر از موارد بسیار ساده و با فرض‌های بسیار زیاد امکان حل این مسائل به صورت تحلیلی وجود ندارد. در گذشته، تنها شانس به دست آوردن جواب انجام آزمایش بر روی مدل‌های با مقیاس کوچکتر در حوضچه‌های آزمایش بود. برحسب اثراتی که ما می‌خواهیم بررسی کنیم، انواع مختلفی حوضچه وجود دارد: حوضچه‌های موجی، حوضچه‌های یدک کشی، کانال‌های سیرکولاسیون و غیره.

با رشد توان کامپیوتری در طی بیست سال گذشته ابزارهای شبیه‌سازی عددی در حوزه‌ی هیدرودینامیک (نمایش مجازی حوضچه‌های فیزیکی) پدیدار گشته‌اند. امروزه ابزارهای عددی بسیاری وجود دارند که برحسب فرضیه‌هایی که بر آن بنا شده‌اند، دقت نتایج آن‌ها و سرعت اجرای آن‌ها با هم تفاوت دارند.

ما در بخش بعدی این فصل ابتدا به روش‌های عددی مختلفی نگاه می‌کنیم که معمولاً برای آزمایش مسئله‌ی برهم‌کنش سیال-سازه مورد استفاده قرار می‌گیرند و سپس به روش‌های آزمایشگاهی عمدتاً استفاده‌شده برای تأیید پیش‌بینی‌های این مدل‌های عددی خواهیم پرداخت.

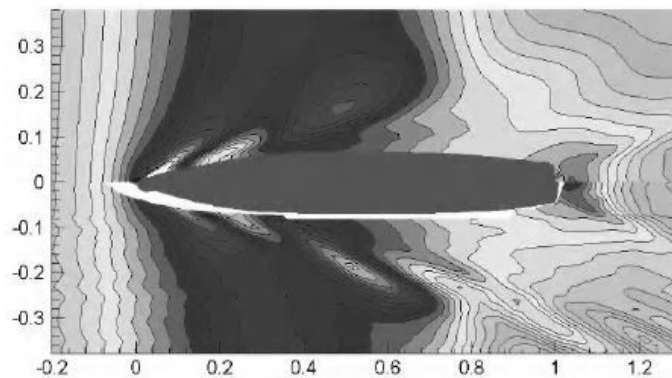
#### ۳-۳-۱ روش‌های عددی

به منظور شبیه‌سازی عددی برهم‌کنش سازه‌ی دریایی با محیط خود بدون هیچ تقریب خاصی، باید به صورت مستقیم معادلات ناویر-استوکس را حل کرد ( $DNS$ - شبیه‌سازی عددی مستقیم) این روش یکی از انواع روش‌های عددی بوده که کاربردهای بسیاری مربوط به این روش وجود دارند. با این حال، در مهندسی اقیانوس، اندازه و چگالی مش‌های مورد نیاز به زمان‌های محاسباتی بازدارنده منجر می‌شوند و این دلیلی است که چرا هیچگاه از این روش استفاده نمی‌گردد. روش‌های استفاده‌شده در عمل تماماً بر پایه‌ی فرضیه‌های ساده‌کننده‌ای قرار دارند که اغلب به خوبی توجیه می‌شوند. اساساً این فرضیه‌ها از مدل‌سازی اثرات اغتشاش یا صرف نظر از آن شکل می‌گیرند.

<sup>1</sup> Dunnage

سطح اول ساده‌سازی شامل مدل‌سازی اغتشاش با مقیاس کم در جریان می‌باشد در حالی که سازه‌های بزرگتر همچنان شبیه‌سازی می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها و روش‌های مبتنی بر این اصل، *LES* (شبیه‌سازی‌های گرداب بزرگ<sup>۱</sup>) نامیده می‌شوند. نتایج به دست آمده دقیق بوده اما همچنان زمان محاسبات برای اکثر کاربردهای عملی در مهندسی اقیانوس بسیار زیاد می‌باشد.

سطح دوم ساده‌سازی شامل حل معادلات ناویر-استوکس میانگین رینولدز (*RANSE*) می‌شود. در این روش، نوسانات سرعت که ناشی از اغتشاش می‌باشند توسط مدل نشان داده شده و پارامترهای آن‌ها نیز در شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. به طور کلی این مدل‌ها نسبتاً دقیق می‌باشند اما زمان محاسبات همچنان بالا است. با این حال، این مدل‌ها در بسیاری از کاربردها توجیه می‌گردند و این دلیلی است که چرا این روش‌ها به صورت گسترده با سرعت بالا در حال فرگیر شدن هستند.



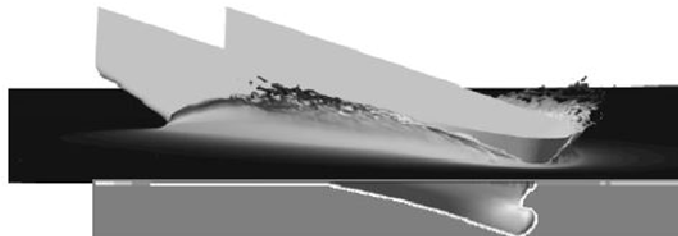
شکل ۳-۱۰ مقایسه‌ی بالا رفتن سطح آزاد در حوالی قایق با سرعت رو به جلو. نیمه‌ی بالایی شکل با استفاده از محاسبات عددی حل‌کننده *ICARE (RANSE)* در بالا) به دست آمده و نیمه‌ی پایینی مربوط به اندازه‌گیری-های آزمایشگاهی می‌شود

روش‌های اشاره‌شده در بالا به مش عددی فضای سیال وابسته می‌باشند. ساختن این مش، انطباق آن با مسئله‌ی اولیه و جریان (همزمان با توسعه‌ی آن) نشان‌دهنده‌ی یک مشکل واقعی می‌باشد که اغلب همگی دست کم گرفته می‌شوند. طی چند سال گذشته، روش‌های آزاد مش<sup>۲</sup> همچون روش *SPH* (هیدرودینامیک ذره‌ی یکنواخت) پدیدار گشته‌اند. این به معنای گسترش قابلیت به کارگیری روش‌های عددی در مسائلی بود که همچنان تا آن موقع پابرجا بودند به ویژه در مسائل جریان‌های سریع دینامیکی (برخوردها).

<sup>۱</sup>Large eddy simulations

<sup>۲</sup>Mesh free methods



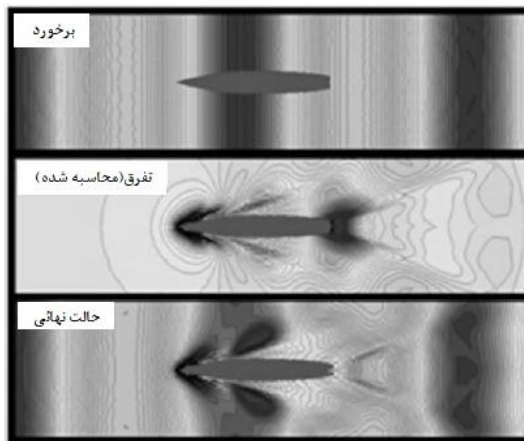


شکل ۳-۱۱ شبیه‌سازی برخورد میان قایق و سطح آزاد با استفاده از حل‌کننده‌ی *SPHflow* (*SPH*). به لطف مجوز *Hydrocean* (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

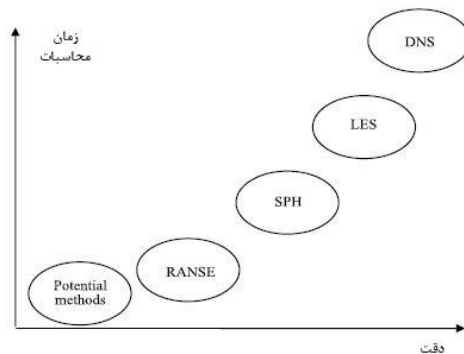
با این حال، توجه کنید که تمامی روش‌های پیشتر اشاره‌شده هنگام تحلیل مسائل مرتبط با امواج اقیانوس به مشکلاتی بر می‌خورند، زیرا شماهای عددی بر مبنای انتقال اتلاف به جریان هستند. هنگامی که شما برای انتشار این امواج با استفاده از این روش‌ها تلاش می‌کنید شما یک میرایی غیرفیزیکی در دامنه‌ی امواج به دست می‌آید. یک روش برای پرداختن به این مسئله، استفاده از روش مبتنی بر *SWENSE* (معادلات صریح ناویر-استوکس موج طیفی) می‌باشد. این روش از تفکیک متغیرهای مسئله (فشار، سرعت) به دو عبارت تشکیل می‌شود، اولی نمایش میدان امواج برخوردی دچار اغتشاش نشده و دیگری نشان دادن اغتشاش. بنابراین می‌توان میدان امواج برخوردی را به طور دقیق با استفاده از روش‌های انطباقی، همچون مدل‌سازی *HOS* (طیفی مرتبه بالا) مدل‌سازی کرد و در نتیجه وظیفه‌ی حل‌کننده‌ی عددی شبیه‌سازی بخش تکمیلی جریان است. در نهایت، جریان کلی با استفاده از منطبق کردن یکی بر دیگری به دست می‌آید.

سطح آخر ساده‌سازی شامل چشم‌پوشی از اثرات ویسکوزیته می‌شود. بنابراین ما خود را در چهارچوب کاری نظریه‌ی جریان‌های پتانسیل در می‌یابیم. اغلب، با استفاده از فرض اینکه اغتشاش‌ها جزئی هستند مسئله بیشتر ساده‌سازی شده و امکان خطی‌سازی آن فراهم می‌گردد. ابزارهای عددی ساخته‌شده که مبتنی بر این فرضیات هستند از نقطه نظر زمان محاسباتی بسیار خوب عمل می‌کنند (اما به قیمت دقت کمتر نسبت به روش‌های قبلی). ضرایب داده‌شده در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ با استفاده از روشی از این نوع محاسبه گردیده‌اند (*Aquaplus*). همچنین توجه کنید که این ابزارها برای اثرات نیروهای ناشی از درگ امکان‌پذیر نمی‌باشند. در عمل این ضرایب با استفاده از عبارت‌های اصلاح‌کننده به ضرایب آزمایشگاهی افزوده می‌شوند.

تمامی این روش‌ها دارای مزایا و معایبی می‌باشند و برای اجرای محاسبات به مصالحه‌ی متفاوتی میان دقت و تلاش نیاز است. شکل ۳-۱۵ توزیع کیفی این روش‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین آن‌ها به صورت متقابل مکمل هم هستند. در عمل، ممکن است ما این روش‌ها را با واضح‌تر شدن اندازه یکی پس از دیگری اجرا کنیم.



شکل ۳-۱۲ جریان حول قایق در امواج که با استفاده از روش *SWENSE* در تجزیه‌ی قلمرو محاسبه شده است. بالا: بالا رفتن سطح آزاد مربوط به میدان موجی بدون اغتشاش؛ وسط: بالا رفتن سطح آزاد مربوط به میدان متفرق که با استفاده از حل‌کننده‌ی عددی محاسبه شده است؛ پایین: کل مجموعه

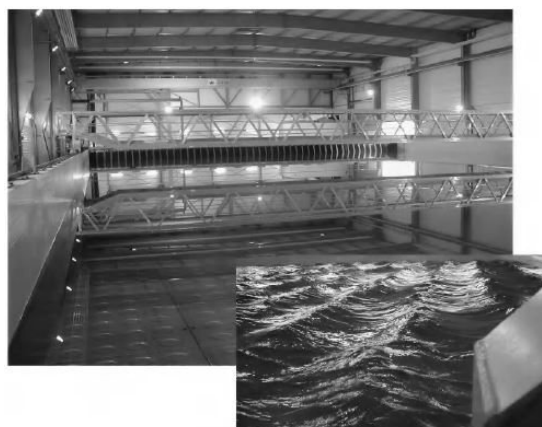


شکل ۳-۱۳ توزیع کیفی مصالحه‌ی میان دقت و زمان محاسبه که اساس روش‌های عددی می‌باشند

### ۳-۳-۲ روش‌های آزمایشگاهی

#### ۳-۳-۲-۱ حوضچه آزمایش

هدف اصلی اجرای آزمایش‌ها در حوضچه‌ها، مطالعه‌ی رفتار سازه و ارزیابی عملکرد آن با استفاده از مدلی است که در شرایط محیطی شبیه‌سازی شده و کنترل شده قرار داده می‌شود. بنابراین، این مسئله‌ای درباره‌ی آزمایش دوباره‌ی وسیله با دقت و واقعیت امکان‌پذیر و اندازه‌گیری مقادیر فیزیکی به منظور توصیف سیستم و سپس مقایسه‌ی این داده‌ها با نتایج مطالعات عددی است. در این زمینه، بسته به نوع آزمایش‌های در نظر گرفته شده ممکن است محتمل‌ترین حوضچه‌ی آزمایشی یک حوضچه‌ی به اصطلاح مهندسی اقیانوس، حوضچه‌ی یدک کشی، تونل کاویتاسیون و غیره باشد.



شکل ۳-۱۴ حوضچه‌ی مهندسی اقیانوس در اکول سنترال دنانتز<sup>۱</sup>

حوضچه‌ی مهندسی اقیانوس، حوضچه‌ای است که معمولاً حاوی آب شیرین و وسیله‌ی تولید موج در یک انتها می‌باشد. امواج ممکن است تنها در یک جهت (در امتداد محور حوضچه) یا در بسیاری از جهات منتشر شوند (امواج چندجهته). به طور کلی این امواج در انتهای حوضچه توسط سیستمی جذب شده که مانند ساحلی عمل می‌کند که در آن امواج دچار شکست می‌شوند. ممکن است برخی از حوضچه‌ها در آب دریا قرار داشته باشند و ممکن است دیگر حوضچه‌ها دارای وسایلی برای تولید باد در سطح آزاد یا جریان‌هایی باشند که تمام یا بخشی از ستون آب را به حرکت در می‌آورند. ما می‌توانیم به عنوان مثال به حوضچه‌ی اکول سنترال

<sup>۱</sup> École Centrale De Nantes

دنانتز اشاره کنیم که بزرگترین حوضچه در فرانسه است. این حوضچه‌ی آب شیرین با  $50\text{ m}$  طول در  $30\text{ m}$  عرض با عمق ثابت  $5\text{ m}$  دارای  $48$  دریچه است که به آن امکان تولید امواجی چندجهته و بزرگتر از  $1\text{ m}$  از دره تا قله موج را می‌دهد. این مقدار برای یک مدل به مقیاس  $20/1$  به امواج واقعی به ارتفاع بیشتر از  $20\text{ m}$  مربوط می‌شود. در نهایت، توجه کنید که حوضچه‌های مهندسی اقیانوس تجهیزات محبوب در آزمایش مبدل‌های انرژی موجی می‌باشند. حوضچه‌ی یدک کشی نیز حوضچه‌ای است که حاوی آب شیرین بوده اما این بار دارای یک واگن برای کشیدن مدل نیز می‌باشد. در نتیجه، این حوضچه‌ها به لحاظ مشخصاتی در جهت کشش بسیار طولی‌تر از دیگر حوضچه‌ها می‌باشند. گاهی اوقات این حوضچه‌ها به تولیدکننده‌ی موج مجهز می‌گردند تا رفتار قایق با سرعت رو به جلو در امواج را بررسی کنند. در فرانسه، بزرگ‌ترین حوضچه‌ی یدک کشی  $B600$  حوضچه آزمایش کارنس<sup>۱</sup>  $DGA$  (سازمان زرادخانه فرانسه<sup>۲</sup>) در وال دِ روئیل<sup>۳</sup> می‌باشد. این تأسیسات  $600\text{ m}$  طول،  $10\text{ m}$  عرض و  $10\text{ m}$  عمق دارد و به تولیدکننده‌ی موج مجهز شده است. در اکول سنترال دنانتز، حوضچه‌ی کشش  $130\text{ m}$  طول،  $5\text{ m}$  عرض و  $3\text{ m}$  عمق دارد. سرعت بیشینه‌ی پلتفرم کششی برابر  $8.5\text{ m}$  بر ثانیه است. در مقیاس‌های متداول مدل‌ها در دنیای واقعی این عدد به چند ده گره مربوط می‌شود.



شکل ۳-۱۵ حوضچه‌ی کشش در اکول سنترال دنانتز

انتخاب مقیاس کاهش اولین مرحله‌ی مهم در آماده‌سازی آزمایشات می‌باشد چرا که باید با ابعاد و ظرفیت‌های فنی حوضچه و ویژگی‌های مکانیکی مدل کاهش یافته سازگار باشد.

<sup>۱</sup> Bassin d'Essai des Carènes

<sup>۲</sup> French armory department

<sup>۳</sup> Val de Reuil

به منظور مدل‌سازی فیزیکی و وابسته‌ی این ویژگی‌ها اغلب مسئله دربار‌ه‌ی تناسب نیروهای خارجی اعمالی به سیستم مورد مطالعه و نیروهای جاذبه است. مقدار این نسبت باید فارغ از هر مقیاس مورد بحث یکسان بماند. این روش به تشابه فرود مرتبط است: عدد فرود  $Fr = V^2 / gD$  باید برای مدل و دنیای واقعی یکسان باشد که در آن  $V$  و  $D$  سرعت مشخصه و ابعاد مسئله می‌باشند.

$\lambda$  را عامل کاهش هندسه (مقیاس) در نظر می‌گیریم. نسبت به این تشابه، زمان و سرعت مدل به اندازه‌ی جذر  $\lambda$  و نیروها به اندازه‌ی  $\lambda^3$  نسبت به نمونه کاهش پیدا می‌کنند. به عنوان مثال برای یک ماشین واقعی (که نمونه نامیده می‌شود) در مقیاس ۱:۲۵ شاهد تقسیم ابعاد آن به اندازه‌ی ۲۵، سرعت آن به اندازه‌ی ۵ و نیروهای آن بر ... می‌باشیم. ما همچنین در مورد مبدل انرژی موجی به انرژی جذب‌شده علاقه‌مند می‌باشیم. این امر به اندازه‌ی ضریب مقیاس به توان ۳.۵ تغییر می‌کند. اگر توان نمونه در دنیای واقعی  $500 kW$  باشد توان مدل در مقیاس ۱:۲۵ تنها  $6.4 W$  خواهد بود.

ویژگی‌های آب برای نمونه یا برای مدل عملاً یکسان می‌باشند اما نتیجه‌ی آن انحراف از شباهت دیگر به نام شباهت رینولدز است که اثرات ویسکوزیته‌ی آب بر جریان‌های حول سیستم مورد مطالعه را مشخص می‌سازد وجود خواهد داشت. به دلیل اینکه نمی‌توان عدد رینولدز را هم برای نمونه و هم برای مدل در نظر گرفت در نتیجه، به عاملی دربار‌ه‌ی تضمین یکسان ماندن الگوی جریان تبدیل می‌شود. این امر معمولاً شامل تضمین آشفتگی ماندن جریان به صورت موضعی در نزدیکی مدل می‌باشد. این روش اغلب به افزودن کمی زبری در قطعات مدل (سنباده چسبیده به کناره‌ها و غیره) منجر می‌شود تا در دیواره‌ها آشفتگی تولید کند.

در انتخاب مقیاس کاهش باید محدودیت‌های ایجادشده توسط خود حوضچه‌ی آزمایش نیز در نظر گرفته شوند: مشخصات امواج تولیدشده، اندازه و هزینه‌ی ساخت مدل و غیره. به عنوان مثال، در مورد سیستم انرژی موج معمولاً رفتار آن در وضعیت عملیاتی عادی تفکیک می‌شود، به عبارت دیگر استخراج وضعیت تولید برای شرایط محیطی متداول (جهت، ارتفاع و دوره تناوب امواج، سرعت و جهت باد، امواج و غیره) از رفتار موج در وضعیت‌های بحرانی نزدیک به حد نهایی. بنابراین ما از آزمایش قابلیت بقا صحبت می‌کنیم و گاهاً ساختن دو مدل با مقیاس‌های متفاوت به منظور بررسی این دو مورد ضروری می‌باشد. در نتیجه بزرگترین مقدار ممکن برای ابعاد نصب<sup>۱</sup> نمونه<sup>۲</sup> انتخاب می‌شود تا اثرات مقیاسی که ممکن است استنتاج داده‌ها از

<sup>۱</sup>Setup

<sup>۲</sup>Prototype

مدل به نمونه را منحرف سازند کاهش داد. این اثرات مقیاس را می‌توان در وضعیت‌های بفرنج مشاهده کرد که در حین آن پدیده‌های فیزیکی به درستی مدل‌سازی نمی‌شوند، زیرا آن‌ها در ابتدا معلوم نیستند یا در محیط‌های مورد بحث تفاوت‌هایی وجود دارد (دریای آزاد و فضای "نامحدود" برای نمونه، دیواره‌ها و فضای "محدود" برای مدل). بنابراین حوضچه‌ی آزمایش شامل ساختن مدلی می‌شود که می‌توان بر روی آن انواع بسیاری از اندازه‌گیری‌ها را انجام داد. بگذارید ابتدا ما به اندازه‌گیری‌های مرتبط به محیط مدل اشاره کنیم: اندازه‌گیری بالا رفتن سطح آزاد (هنگامی که تحلیل گردید) که مشخصات آماری و طیفی امواج (ارتفاع، دوره‌ی تناوب، جهت) را آشکار می‌سازد، اندازه‌گیری باد (مدول سرعت، جهت)، جریان‌ها و غیره.

اندازه‌گیری‌های دیگر به مشخص‌سازی رفتار و عملکرد سیستم مورد مطالعه مربوط می‌شوند. ما می‌توانیم به طور ویژه به موارد زیر اشاره کنیم (لیست زیر کامل نمی‌باشد):

- حرکت‌های مدل (شش درجه‌ی آزادی) که با استفاده از مسیرنگاری یا با استفاده از واحد مرکزی اینرسی گردآوری می‌شوند

- بارهای کلی و موضعی که با استفاده از نیروسنج‌ها<sup>۱</sup> و حسگرهای فشار اندازه‌گیری می‌شوند

- کرنش‌های موجود در سیستم مهار در صورتی که سیستم شناور باشد

- کرنش‌های داخلی وارد بر مواد که با استفاده از کرنش‌سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شوند

- مشخصات فیزیکی که به ما امکان تقریب عملکرد مبدل انرژی را می‌دهند (اندازه‌گیری گشتاور، سرعت، تغییر شکل، جریان الکتریکی یا نوع دیگر، مبتنی بر فنآوری استفاده‌شده)

تنوع وسیع ماشین‌هایی که به این روش آزمایش شده‌اند به معنای روش‌های بین‌المللی استانداردشده‌ی اتخاذی می‌باشد که اثبات گشته و توسط پیشروان بسیاری دنبال شده‌اند (طراحان، محققان، مدیران تأسیسات حوضچه‌ی آزمایش و غیره). یک روش مشابه تقریباً یک قرن پیش از این در زمینه‌ی هیدرودینامیک دریایی (ساخت کشتی) و حوضچه‌های آزمایش بدنه ابداع شد. این روش امروزه همچنان به کار گرفته شده و به صورت پیوسته به ویژه در چهارچوب کاری کنفرانس بین‌المللی حوضچه‌ی یدک کشی (ITTC) آن را بهینه‌سازی می‌کنند. به دلیل اینکه حوزه‌ی انرژی دریایی در حال پدیدار شدن است، روش‌های این آزمایش هنوز به طور کامل ارزیابی و تأیید نشده‌اند.

<sup>۱</sup>Dynamometers

### ۳-۳-۲ مکان‌های آزمایش در دریای آزاد

توسعه‌ی قدم به قدم فنآوری‌های جدید برای تولید انرژی با استفاده از منابع دریایی مستلزم تحولی در امکان‌پذیری فنی و تخمین هزینه‌های تولید انرژی است. بررسی و ارزیابی نمونه‌های آزمایشی در شرایط واقعی قبل از تجاری‌سازی در دستورکار بوده و توجه اقتصادی دارد.

آزمایش در دریای آزاد یک مرحله از فرآیند تأیید رفتار و عملکرد ماشین‌ها در شرایط عملیاتی می‌باشد. برای مورد نمونه اولیه، این مرحله شامل بررسی عملکرد و مشاهده‌ی برهم‌کنش تمام مولفه‌های سیستم باشد. همچنین وسایل ساخت، نصب و جداسازی سیستم‌ها نیز در دریا آزمایش می‌شوند.

آزمایش سیستم تولید انرژی در دریا نیازمند دسترسی به پایگاه فراساحلی به منظور اجرای آزمایش‌ها و دسترسی به زیرساخت‌های شبکه‌ی برق می‌شود. جمع‌آوری داده‌های اندازه‌گیری-شده و اجرای برنامه‌های آزمایش شامل دسترسی به پایگاهی در خشکی انجام می‌شود تا از طریق آن نمونه‌های مورد آزمایش را کنترل و رصد کرد.

آزمایش‌ها در دریا در مقیاسی انجام می‌شوند که شرایطی مشابه شرایط واقعی را برای مدل اولیه رقم می‌زند. به طور رایج، نمونه‌های آزمایش‌شده در دریا در مقیاس‌هایی مابین ۱:۳ و ۱:۱ مطالعه می‌شوند. بر روی این نمونه‌ها سیستم تبدیل انرژی توان برخاست<sup>۱</sup> و همچنین تعداد کثیری از حسگرها و ابزارهای اندازه‌گیری وجود دارد که در حین آزمایش‌ها امکان نظارت بر حالت سیستم را فراهم می‌سازند.

هدف این آزمایش‌ها مطالعه و تأیید نکات زیر می‌باشد:

- روند عملیاتی در دریا
- کیفیت جریان الکتریکی تولیدشده
- یکپارچگی با شبکه‌ی برق
- دستاوردها و نتایج سیستم تبدیل انرژی
- کارایی راهبردهای نظارتی

<sup>۱</sup>Power Take Off

- قابلیت دریامانی<sup>۱</sup> سازه‌ها

در مورد مبدل‌های انرژی موجی ممکن است این آزمایش‌ها در زیرساخت‌های اختصاصی به نام مکان‌های آزمایش با اندازه‌ی واقعی<sup>۲</sup> (مقیاس کامل) اجرا شوند. این مکان‌های آزمایش زیرساخت‌هایی هستند که دسترسی به محدوده‌ی دریایی عمومی را فراهم کرده تا برنامه‌های موقت برای ارزیابی نمونه در دریا را اجرا کرد. آزمایش با مقیاس کامل دسترسی به ناحیه‌ای مشخص شده توسط نشانه‌های شناور را فراهم می‌کند که منطبق بر قوانین دریایی محلی می‌باشد. مدت زمان رشته آزمایش‌ها در دریا معمولاً در بازه‌ی ۳ ماه تا ۱ سال قرار دارد. چنین زیرساخت‌هایی وجود دارند یا در حال توسعه می‌باشند. به عنوان مثال، می‌توان به مرکز انرژی دریایی اروپایی (EMEC) در اسکاتلند اشاره کرد که در سال ۲۰۰۴ ساخته شده است. پروژه در دست ساخت SEM-REV توسط اکول سنترال دنانتز در خارج از ساحل کرویسیک<sup>۳</sup> در فرانسه برای آزمایش مبدل‌های انرژی موجی و یا مقر پایمول-بریپات<sup>۴</sup> در بریتانی برای آزمایش توربین‌های آبی اجرا می‌شود. این مکان‌های آزمایش به منظور انتقال انرژی تولیدشده به زیرساخت‌های الکتریکی مجهز گشته‌اند. این به معنای وجود کابل استاتیکی ولتاژ-بالا بر روی بستر دریا یا داخل آن و ایستگاه انتقال برق به همراه پیل‌هایی<sup>۵</sup> برای کوپل و محافظت از ماشین‌ها می‌باشد. برحسب ولتاژ استفاده‌شده ممکن است ایستگاه‌های انتقال به ترانسفورماتورها مجهز شوند که ولتاژ را تقویت می‌کنند. آزمایش‌های الکتریکی به تحلیل المان-های سیستم که در ادامه اشاره شده‌اند مربوط می‌شوند:

- میزان وابستگی شارژ مبدل به شرایط عملیاتی

- پایداری الکتریکی

- سطوح انرژی تولید شده و محدوده تولید انرژی

- کیفیت جریان (ولتاژ دائمی، چشم‌ک‌زدن، تغییرات تحت کرنش، هارمونیک، توان غیرفعال<sup>۶</sup>، فیلترسازی و رفتار قراردادی)

این اندازه‌گیری‌ها در سطحی از ایستگاه انتقال برق و درون خود سیستم مبدل انرژی نمونه انجام شده‌اند. داده‌های جمع‌آوری‌شده در دریا دوباره توسط فیبر نوری یا توسط رادیو با

<sup>1</sup>Sea-keeping

<sup>2</sup>Full Scale Test Sites

<sup>3</sup>Croisic

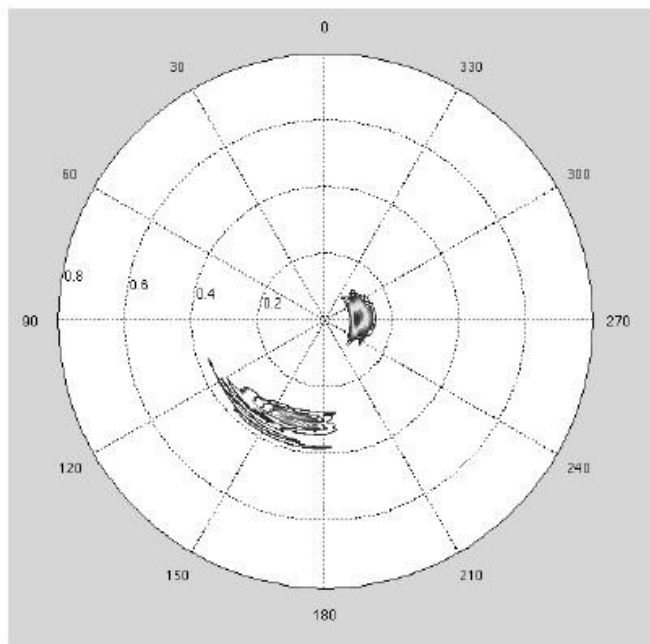
<sup>4</sup>Paimpol-Bréhat site

<sup>5</sup>cells

<sup>6</sup>Reactive power



فرکانس بالا به ساحل انتقال داده می‌شوند. اندازه‌گیری‌های الکتریکی مطابق مشخصات هیئت الکتروتکنیک<sup>۱</sup> و با استفاده از ابزارهای الکتریکی کیفیت‌سنجی مناسب انجام می‌شوند.



شکل ۳-۱۶ اندازه‌گیری‌های محیطی، طیفی از انرژی موجی جهت‌دار در *SEM-REV* در ۰۱/۰۶/۰۹ در ۰۹:۰۰ (برای ورژن رنگی این تصویر لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید).

همانند آزمایش در حوضچه‌های مهندسی اقیانوس، آزمایش انجام شده در دریا مستلزم مشخص‌سازی محیط با استفاده از اندازه‌گیری‌های شرایط اقلیمی اقیانوس است. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از ابزارهای زیر در دریا انجام می‌شوند:

- شناوری که امواج جهت‌دار را اندازه‌گیری می‌کند؛

- جریان‌سنج‌های اثر داپلر<sup>۲</sup>

- حسگرهای *PUV* (فشار و سرعت)

- اندازه‌گیری سه‌بعدی باد در دریا

- جزر و مد سنج‌ها

<sup>۱</sup>Electrotechnical Commission specifications

<sup>۲</sup>Doppler effect current meters

اندازه‌گیری حرکت‌های سیستم با استفاده از فنآوری‌های مختلف اندازه‌گیری اینرسی<sup>۱</sup> واقع شده بر روی نمونه انجام می‌شود. ممکن است از نیروسنج‌ها<sup>۲</sup> در خطوط مهار<sup>۳</sup> برای مشخص کردن نیروی کرنشی<sup>۴</sup> و پاسخ خطوط استفاده کرد.

### ۳-۴ نتیجه‌گیری

ما در این فصل، منشاء بارهای وارد بر سازه‌های دریایی و اثرات مختلف این بارها بر سازه‌ها را بررسی کردیم. سپس ما روش‌های مختلفی را بررسی کردیم که در مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی وجود دارند به ما اجازه می‌دهند که آن‌ها را مطالعه کنیم.

### ۳-۵ کتاب‌شناسی

مطالب بالا صرفاً مقدمه‌ای بر جنبه‌های هیدرودینامیکی تبدیل انرژی دریایی می‌باشند. ما به خوانندگانی که مایل به کسب اطلاعات بیشتر در این موضوع هستند کارهای زیر را پیشنهاد می‌کنیم:

[1] MOLIN B., *Hydrodynamique des structures offshore*, Editions Technip, 2002.

[2] FALNES J., *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interaction Including*

*Wave-energy Extraction*, Cambridge University Press, 2000.

[3] FALTINSEN O.M., *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge

*University Press*, 1993.

[4] GUYON E., HULIN J.P., PETIT L., *Hydrodynamique physique*, CNRS Editions, 2001.

[5] NEWMAN J.N., *Marine Hydrodynamics*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1977

<sup>1</sup>Inertial Measurements Technologies

<sup>2</sup>Load Cells

<sup>3</sup>Mooring Lines

<sup>4</sup>Straining Force



## انرژی دریایی و بازیگران صنعتی

### ۴-۱ چرا انرژی دریایی به عوامل صنعتی بزرگ مربوط می‌شود؟

انرژی دریایی دارای پتانسیل بسیاری می‌باشد اما برای استخراج آن باید بر موانع بسیاری غلبه شود. به منظور تشریح این نکته در این فصل به مورد ویژه‌ی انرژی بادی فراساحلی<sup>۱</sup> پرداخته می‌شود زیرا توسعه‌ی چنین انرژی تجدیدپذیری و پروژه‌هایی با چنین اندازه‌ی فیزیکی و مالی بزرگ تنها توسط عوامل صنعتی بزرگ قابل گسترش می‌باشند. آن‌ها با بازار جدید روبه‌رو می‌شوند که عظیم و شناور هستند اما همچنان مشکلات جدیدی وجود دارد که باید برای آن‌ها راه حل‌های کافی پیدا شود.

امروزه شکل‌های دیگر انرژی دریایی صرفاً در مرحله‌ی مقدماتی توسعه می‌باشند که در آن‌ها بازیگران مختلفی درگیر شده و ریسک مالی کمتری وجود دارد.

می‌توان با استفاده از تشابه میان انرژی بادی ساحلی و فراساحلی محدودیت‌های انرژی بادی فراساحلی و عملیات مورد نیاز برای بهره‌برداری آن را مورد توجه قرار دهیم. این پژوهش از نقطه نظر توسعه‌دهنده‌ای انجام می‌گردد که در ابتدای پروژه تمامی مراحل توسعه خود را تا زمان پیاده‌سازی عملیاتی مزرعه بادی را پیش‌بینی و برنامه‌ریزی می‌کند.

### ۴-۱-۱ محیط دریایی، پیچیده و گاهی اوقات خشن می‌باشد

دریا محیطی است که در آن انجام هر فعالیتی بسیار پیچیده‌تر از روی خشکی است:

---

<sup>۱</sup>Off shore Wind Energy

- آب، محیط طبیعی انسان نبوده و هنگامی که انسان داخل آب بیفتد اگر هیچ پیشگیری انجام نشود، زمان زنده ماندن او کوتاه خواهد بود. هر کاری در دریا تنها با پیروی از روند سختگیرانه ایمنی قابل انجام خواهد بود؛

- دریا محیط سیالی است که در آن پشتیبانی مکانیکی صلب فراهم نمی‌شود؛ تمامی سازه‌های ثابت باید با بستر یکپارچه و سازه‌های شناور به بستر دریا متصل شوند؛

- حوادث استثنائی وزش طوفان به کرنش سهمگینی منجر می‌شوند که باید به عملیات طراحی توربین‌های بادی که قادر به تحمل آن‌ها باشند با دقت زیاد انجام گردند. اگرچه در حین یک طوفان دریایی به شدت سهمگین (که مشابه آن اکثراً تنها در هر ۱۰۰ سال اتفاق می‌افتد) ممکن است سرعت باد در قوی‌ترین تندبادها به بیش از  $50 \text{ m/s}$  برسد؛

- اگر باد در گستره‌ی دریا بوزد اغلب امواج به ارتفاع  $10 \text{ m}$  یا در آب عمیق به بیش از  $10 \text{ m}$  می‌رسند. هنگامی که این امواج در پایه‌ی سازه دچار شکست شوند به آن شوک قابل توجهی وارد می‌سازند؛

- اگر عمق آب کمتر از تقریباً  $40 \text{ m}$  باشد، حرکت توده‌های آبی، بستر دریا را تحت تأثیر قرار خواهند داد. ممکن است بسترهای نرم به حرکت در بیایند. به عنوان مثال، توده‌های شنی در طول سال‌ها جابجا می‌شوند؛

- آب دریا در برابر فلزات خاصیت خوردگی داشته و باید از آن‌ها به درستی حفاظت شود؛

- رسوب دریایی ناشی از رشد تعداد زیادی از ارگانسیم‌های زنده به سرعت هر سطح مستغرق را می‌پوشانند. نیروهای هیدرودینامیکی واقع بر سازه افزایش یافته و ممکن است باعث انسداد روزنه‌ها، افزایش اندازه‌ی لولاها و غیره شود.

#### ۴-۱-۲ تجهیزات مداخله<sup>۱</sup> در دریا

تمامی فعالیت‌های موجود در دریا به تجهیزات ویژه‌ی دریایی نیاز دارند که کارگذاری آن‌ها در محل بسیار دشوارتر از کار مشابه در خشکی است و سختی‌های ناشی از محیط دریایی در هر مرحله از عملیات مشابه در مزرعه بادی آشکار می‌باشد. مثال‌هایی از این قبیل در ادامه ارائه شده است:

<sup>1</sup>Intervention

- مطالعات مکان شامل استفاده از تجهیزات دریایی می‌شود که نسبت به وسایل استفاده‌شده در خشکی بسیار گران‌تر می‌باشد و هدف آن‌ها اندازه‌گیری پتانسیل باد، مطالعه‌ی طبیعت بستر دریا و ارزیابی محیط اطراف می‌باشد؛

- در حالی که در ساخت مزارع توربین بادی ساحلی از جرثقیل‌هایی استفاده می‌شود که از طریق جاده آورده شده و بر روی زمین قرار می‌گیرند، در دریا، به منظور تکرار چنین روشی باید از کشتی جرثقیل‌دار مخصوصی استفاده کرد که بتوان به صورت پایداری توسط پایه‌های قابل جمع‌شدن در بستر دریا از آن پشتیبانی کرد؛

- کابل‌های برق مطابق سفارش ساخته می‌شوند و توسط مهارت ویژه‌ای قرار می‌گیرند. به علاوه، این کابل‌ها باید به دلیل مسائل ایمنی ۱ الی ۲ متر زیر بستر دریا پوشیده شوند و اگر بستر بسیار سخت باشد برای حفر مجرای ضروری زیردریایی، کابل‌ها توسط لایه‌ای حفاظتی از سنگ‌ها در امتداد تمام طول خود پوشیده می‌شوند؛

- ممکن است در آن مکان به منظور نگهداری توربین‌های بادی به پرسنل نیاز شود. دسترسی ایمن به ماشین‌هایی که ده‌ها کیلومتر دورتر از نزدیک ترین ساحل نصب گشته‌اند همواره توسط قایق عملی نمی‌باشد، زیرا سفر مدت زمان زیادی طول می‌کشد و انتقال تکنسین‌ها در دریای خروشان، خطرناک می‌باشد. بنابراین، دسترسی از طریق هلیکوپتر انجام می‌شود.

#### ۴-۲ منبع انرژی با پتانسیل عظیم

در پاسخ به افزایش ناگهانی جمعیت (که پیش‌بینی می‌گردد تا سال ۲۰۵۰ به ۹/۵ میلیارد برسد) و پویایی اقتصاد در مناطقی با پتانسیل عظیم همچون کشورهای *BRIC* (برزیل، روسیه، هند و چین) افزایش شدیدی در تقاضا برای انرژی اولیه در طول دو دهه‌ی آینده وجود خواهد داشت. با در نظرگیری قابلیت انطباق الکتریسیته برای پوشش کاربردهای بسیار و کاربردهای جدیدی همچون خودروهای الکتریکی که در حال پدیدار شدن هستند، پیش‌بینی می‌شود تقاضا برای الکتریسیته باید با سرعت دو برابر رشد کند. طبیعتاً منابع الکتریسیته به عنوان خدمات عمومی با اهمیت عمده ظاهر خواهند شد. تولیدکنندگان و اپراتورهای شبکه که در قاره‌های مختلف فعال هستند مجبور خواهند شد که خود را با نزدیک به ۲ میلیارد کاربر سازگار کنند و تولید الکتریسیته را به نزدیک  $55.000 TWh$  در سال ۲۰۵۰ برسانند که بیانگر افزایش ۱۷۰٪ نسبت به سال ۲۰۱۰ است.

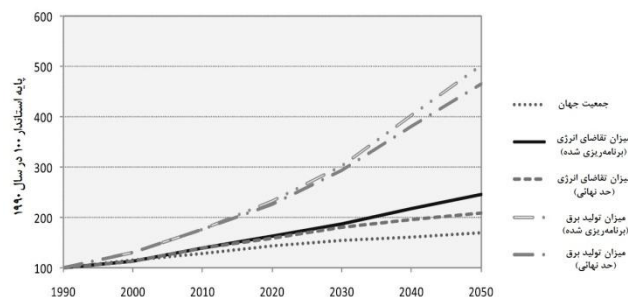
بنابراین، پیرو گردهمایی شورای انرژی جهان (مونترال، ۲۰۱۰) سه چالش عمده ظاهر می‌شود که عوامل بین‌المللی باید غلبه بر این مسئله را در طول چند دهه‌ی بعد در اولویت کار خود قرار دهند:

- تضمین امنیت منابع؛

- محدود کردن اثرات افزایش تولید الکتریسیته بر آب و هوا و محیط؛

- احتمال افزایش قیمت برق به منظور عدم تشدید نابرابری میان مردم.

منابع انرژی پتانسیل عظیمی برای تبدیل به الکتریسیته دارند. از میان آن‌ها، امروزه باد فراساحلی در حال رسیدن به مرحله‌ی اتمام توسعه می‌باشد. انرژی دریایی برای تولیدکنندگان انرژی، گوناگون ساختن "ترکیب" تولید برق را امکان‌پذیر خواهد کرد. سهم آن نیز در طی چند دهه‌ی بعد به سرعت رشد خواهد کرد و از ۲۰۳۰ به بعد به صورت محسوس خواهد بود. در آن زمان، سهم انرژی بادی فراساحلی تقریباً  $450 TWh$  خواهد بود، یعنی ۲۰٪ کل توان تولیدی توسط باد که به مقدار  $2250 TWh$  برنامه‌ریزی شده است. از دهه‌ی ۲۰۳۰ به بعد، باید سهم انرژی دریایی افزایش پیدا کند تا مابین ۵ الی ۸٪ از "ترکیب" الکتریسیته‌ی جهان قرار گیرد.



شکل ۴-۱ مقایسه‌ی تحول جهانی: جمعیت، تقاضا برای انرژی و تولید الکتریسیته (منبع: ترجمه مطالعات مختلف بین‌المللی)



۲۰۳۰		۲۰۱۰		برق تولیدی
%	TWh	%	TWh	
	۱۱،۷۴۳		۷،۳۶۸	زغال سنگ
	۸،۵۸۱		۵،۹۳۳	گاز
	۹۶۷		۸۱۱	نفت
	۵،۱۹۷		۲،۸۹۸	انرژی هسته‌ای
%۷۵/۶	۲۶،۴۸۹	%۸۰/۷	۱۷،۰۱۱	تولیدات متداول
	۱،۷۴۷		۴۴۷	زیست توده
	۴،۲۵۵		۳،۱۹۷	هیدروالکتریک
	۲،۲۵۰		۳۸۰	باد
	۳۰۰		۳۴	خورشید
%۲۴/۴	۸،۵۵۱	%۱۹/۳	۴،۰۵۸	تولیدات تجدیدپذیر
%۱۰۰/۰	۳۵،۰۴۰	%۱۰۰/۰	۲۱،۰۶۹	تولیدات جهان

جدول ۱-۴ مقایسه‌ی "ترکیب" الکتریسیته در ۲۰۱۰ و ۲۰۳۰ (منبع: ترجمه مطالعات مختلف بین‌المللی)



### ۴-۳ انرژی دریایی: بخش مخصوص بازیگران صنعتی و سرمایه‌گذاران عمده بین‌المللی

می‌توان نیروگاه‌های برق دریایی را فارغ از اینکه در فاز نهایی (باد فراساحلی)، پیدایش (توربین-های آبی) یا نمایش (مبدل‌های انرژی موجی) باشند، با معیارهای زیر مورد آزمایش قرار داد:

- پتانسیل انرژی موجود در شرایط "منطقی" فنی و اقتصادی. معمولاً این پتانسیل توسط هزینه‌ی تولید الکتریسیته میان ۲ و ۳ برابر هزینه‌ی تولید مبتنی بر  $MWh$  از نیروگاه‌های برق متداول مشخص می‌گردد که امروزه میان ۵۰ و ۶۰ یورو بر  $MWh$  قرار می‌گیرد. این پتانسیل بسیار قابل توجه است.

-  $CAPEX$ : مصرف سرمایه: بسیار قابل توجه. این میزان تقریباً ۳ میلیون یورو بر  $MW$  در مورد انرژی بادی فراساحلی در آب‌های ساحلی است؛ این مخارج حتی برای انرژی هیدروالکتریکی و مبدل‌های انرژی موجی بیشتر است.

-  $OPEX$ : هزینه‌ی عملیات: قابل توجه. مابین ۲۵ و ۳۵ یورو بر  $MWh$  برای هزینه‌های عملیاتی و نگهداری برای تأسیسات انرژی باد فراساحلی به استثنای هزینه‌های اجرایی. این هزینه برای دیگر اشکال انرژی دریایی که در حال پیدایش یا آزمایش هستند، شناخته شده نمی‌باشد اما احتمالاً اگر بیشتر نباشد تقریباً مشابه می‌باشد (برای مبدل‌های انرژی موجی).

- فناوری تأسیسات: مبتکرانه.

- توان بحرانی تأسیسات: قابل توجه. این مقدار در مورد توربین‌های بادی فراساحلی برابر  $100 MW$  و برای توربین‌های آبی یا مبدل‌های انرژی موجی برابر ده‌ها  $MW$  است.

- خطرات صنعتی: بسیار قابل توجه. این خطرات از کارها (بررسی مکان و در حقیقت ساخت تأسیسات) و از راه‌اندازی و نگهداری ( $O&M$ ) ناشی می‌شوند که باید در دریا انجام شوند و تمامی خطرات ناشی از این محیط در نظر گرفته می‌شود.

به دلیل این مسائل که از ویژگی‌های نیروگاه‌های تولید برق در دریا می‌باشند توسعه‌ی این اشکال مختلف از تولید انرژی تنها توسط کنسرسیوم‌های بین‌المللی قابل تضمین می‌باشد که تولیدکنندگان انرژی، صنعت‌گران و سرمایه‌گذاران بین‌المللی را گردآوری می‌کنند که هدف

اصلی آن‌ها سهیم شدن در خطرات صنعتی و میزان بدهی است. بنابراین آن‌ها تنها خطری را می‌پذیرند که با ظرفیت آن‌ها برای مداخله‌ی فنی یا منابع مالی آن‌ها سازگار است.

در حقیقت، در این نوع از سازمان‌دهی است که به سازمان‌های وام‌دهی و دیگر افراد بین‌المللی که پول قرض می‌دهند نیاز است تا "قابلیت پذیرش پروژه توسط بانک" تأیید شود و منابع مالی آن (معمولاً ۷۵ تا ۸۰٪ از کل CAPEX) در کنار سهام گذاشته‌شده توسط اشخاص علاقه‌مند (20 تا ۲۵٪ از کل CAPEX) فراهم گردد.

در این زمینه از SMEها و SMIها درخواست می‌شود که به عنوان پیمانکار ثانویه برای حساب‌های زیاد و اهداکنندگان سهامداران در کنسرسیوم، منابع و وام فراهم کنند.

#### ۴-۴ نمونه‌ای از انرژی بادی فراساحلی: بازیگران اصلی و صنعت در

##### فرانسه

در اواخر ۲۰۱۰ هنگامی که توان انباشتی تأسیسات انرژی بادی فراساحلی به  $3200\text{ MW}$  رسید، بیش از ۶۰٪ آن در اختیار چهار تولیدکننده‌ی بزرگ انرژی در اروپا بود: DONG انرژی (دانمارک، ۲۲٪)، VATTENFALL (سوئد، ۲۰٪)، E.On (آلمان، ۱۵٪) و RWE (آلمان، ۷٪).

پروژه‌هایی که امروزه در حال توسعه هستند بازیگران جدیدی همچون SSE Renewables (انگلستان؛  $7000\text{ MW}$ ) و به دنبال آن RWE ( $6000\text{ MW}$ ) و IBERDROLA (اسپانیا؛  $5000\text{ MW}$ ) را وارد میدان می‌کنند.

در ۲۰۱۰، سازمان مختصر تهیه‌کنندگان اصلی مطابق ذیل می‌باشد:

- ژنراتورهای بادی: SIEMENS (آلمان، ۵۰٪ از کل توان بهره‌برداری شده)<sup>۱</sup> VESTAS (دانمارک، ۴۵٪)؛ SINOVEL (چین، ۳٪) و مابقی توسط REPOWER (آلمان)، GE Wind (ایالات متحده) و AREVA (فرانسه)؛

- دکل‌های فولادی: AMBAU (آلمان)، SIAG (آلمان)، HENDRICKS (دانمارک)؛

- زیرسازه‌های الکتروتکنیکی (ایستگاه‌های فرعی<sup>۱</sup>، ایستگاه‌های تخلیه انرژی): ABB (سوئیس)، SIEMENS (آلمان)، ALSTOM T&D (فرانسه)، اشنایدر الکترونیک<sup>۲</sup> (فرانسه)؛

<sup>۱</sup>Installed power

- کابل‌های الکتریکی با ولتاژ متوسط یا بالا: *ABB* (سوئیس)، *NEXANS* (نروژ)، جنرال کابل-*NSW* (آلمان).

در رابطه با صنعت ویژه‌ی فونداسیون ساختمان‌ها، توربین‌های انتقال و مداخله‌ی فنی در اجرا یا تعمیر، اکثریت تأمین‌کنندگان شرکت‌های خصوصی بریتانیایی، آلمانی، نروژی، سوئدی، هلندی یا بلژیکی هستند که تجهیزات سازگار با این هدف و کارکنان باتجربه‌ای دارند.

تولید فونداسیون‌های بتنی گرویتی<sup>۱</sup>، دریل‌کاری فونداسیون‌های تک‌ستونه و مهارکردن پوش-های<sup>۲</sup> پروژه‌های باد فراساحلی مستلزم شرکت‌های تخصصی عمده می‌باشد که در کشورهای در بالا اشاره‌شده ثبت گشته‌اند؛ این شرکت‌ها از اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ با کار بر روی تأسیسات برق خارج از سواحل پیرامون اروپا (انگلستان، دانمارک، هلند، نروژ و غیره) در حال کسب تجربه بوده‌اند.

در چین، تعدادی از صاحبان کشتی و شرکت‌های ساخت‌وساز دریایی (از میان آن‌ها *CCCC* هاربر<sup>۳</sup>) از قبل در حال فعالیت برای پوشش تقاضا برای پروژه‌های فراساحلی در حال توسعه در سراسر کشور می‌باشند.

صنعت باد فراساحلی با یادگیری درس‌هایی از ۱۵ سال تجربه در حال سازمان یافتن در اطراف شرکت‌های تخصصی و موثر اروپایی است.

علاوه بر این، پیمانکاران فرعی بسیاری در فرانسه و اسپانیا به عنوان مثال، به تحقق مطالعات مهندسی و اکتشاف در دریا و تولید اجزای توربین‌های بادی کمک می‌کنند.

با این حال، چندین منطقه از فرانسه دارای تأسیسات بندرگاهی می‌باشند که در امتداد سواحل آتلانتیک، کانال انگلیس و مدیترانه و فضاهای لجستیکی بزرگ پراکنده شده‌اند و باید برای توسعه‌ی نیروگاه‌های برق دریایی اطراف فرانسه و انگلستان به کار گرفته شوند.

اگرچه امروزه هیچ کارخانه‌ی تولید توربین‌های بادی در فرانسه وجود ندارد اما صنعت باد فراساحلی به گستره‌ی متنوعی از بازیگران وابسته است تا مطالعات با ارزش افزوده بالا و همچنین تولید اجزای با تکنولوژی بالا در آسیانه‌ها اجرا گردند که شامل صنعت فرانسه به نسبت هر جایی تا ۶۰٪ از *CAPEX* می‌شود.

<sup>1</sup>Sub-Stations

<sup>2</sup>SCHNEIDER ELECTRIC

<sup>3</sup>Concrete gravity foundations

<sup>4</sup>Jackets

<sup>5</sup>CCCC Harbour

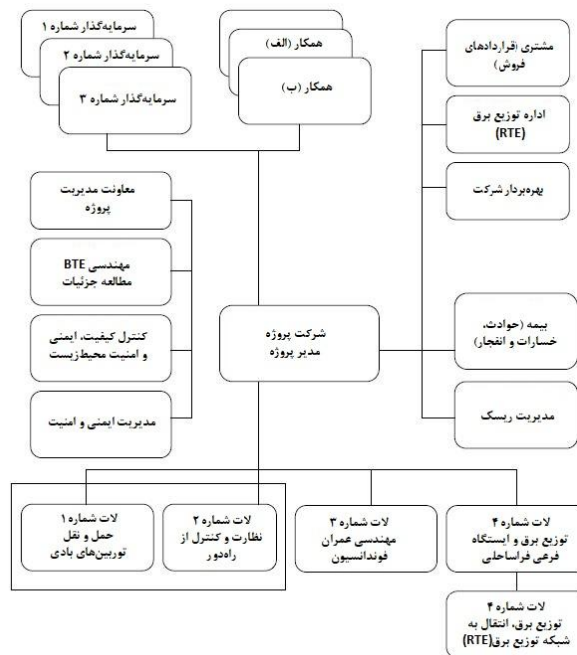
به طور کلی‌تر، تعیین ارزش انرژی دریایی که از ایجاد تا اجرا و سپس نگهداری مبدل‌های انرژی پیشرفته در جریان است، مشاغل بسیاری با کیفیت بالا در چنین نواحی متنوع مانند بخش دریایی، صنایع سنگین و بخش‌های تبدیل و سوم ایجاد می‌کند.

#### ۴-۵ گردهمایی صنعتی

##### ۴-۵-۱ بازیگران پروژه

نیروگاه‌های برق در دریا شامل توربین‌های بادی فراساحلی، توربین‌های آبی، مبدل‌های انرژی موجی و غیره بخشی از پروژه‌های عظیم صنعتی هستند که هزینه‌های ساخت آن‌ها به طور کلی تا صدها میلیون یورو هم می‌رسد. گردهمایی صنعتی انتخاب‌شده توسط مدیر پروژه برای تقویت سازی خود باید به این مشخصه‌ی مالی پاسخ دهد و همچنین خطرات مربوط به احیاء فنآوری‌های جدید و محیط را یکپارچه سازد.

به عنوان مثال، مدیر پروژه باید برای احداث مزرعه‌ی بادی فراساحلی (توان بحرانی،  $100 MW$ ) ترتیب سازمانی را بدهد که می‌خواهد برای پروژه به کار ببرد. نمودار ساده‌ای از سازمان صنعتی در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲ نمونه‌ای از احداث صنعتی مزرعه‌ی بادی فراساحلی (توان بحرانی  $100 MW$ )

#### ۴-۵-۲ موثرترین روش اختصاص کار

هنگامی که پروژه‌های نصب تأسیسات تولید برق در دریا بزرگ باشند امروزه هیچ فروشنده‌ای نیست که احتمالاً بخواهد برای ساخت‌وساز پیشنهاد قرارداد آماده به کار بدهد (تعیین قیمت توافقی از قبل برای کار انجام‌شده). در حقیقت، هیچ گروه مالی در موقعیتی نیست (در شرایط اقتصادی رضایت‌بخش) تا مسئولیت فنی و مالی را بر دوش بگیرد یا تمامی ریسک‌های ذاتی ساخت این تأسیسات و به طور کلی‌تر اجرای کل پروژه‌ی پیچیده صنعتی در دریا را به عهده بگیرد.

با این حال، سازندگان تجهیزات در مقیاس بین‌المللی یا تأمین‌کنندگان نیازهای مهندسی الکتروتکنیک و عمران امروزه در موقعیتی می‌باشند که برای ساخت یک یا چندین "بخش (لات)<sup>۱</sup>" در حیطه‌ی تخصص خود می‌توانند قراردادهای آماده به کار را پیشنهاد کنند.

بنابراین باید مدیر پروژه به دنبال بهینه‌سازی توزیع کار باشد و اندازه و تعداد لات‌ها را با دانستن این در نظر بگیرد که هر بار لاتی را تعریف می‌کند او باید رابطه‌ی میان آن لات و دیگر لات‌ها را تعریف کند و در نتیجه هزینه‌ی مدیریت پیوندها را طرح‌ریزی کند.

هنگامی که یک تهیه‌کننده قرارداد آماده به کاری برای یک یا چند لات پیشنهاد می‌دهد آن‌ها این مسئولیت اضافی را با افزایش کارمزد مربوط به قیمت توافقی منابع و یا خدمات جبران می‌کنند. به علاوه، هزینه‌ی مدیریت پیوندها به سرعت تقریباً به صورت نمایی با تعداد لات‌های مورد بحث افزایش پیدا می‌کنند. بنابراین افزایش تعداد لات‌ها مورد علاقه‌ی مدیر پروژه نمی‌باشد به خصوص برخی از لات‌های نسبتاً کوچک اندازه‌ی بحرانی را نشان نمی‌دهند. به عبارت دیگر، اگر آن‌ها دریابند که حاشیه سودی که تهیه‌کننده تمایل دارد در ازای پذیرش مسئولیت لات اضافی بگیرد کمتر از هزینه‌ی مدیریت واسطه‌هایی باشد که از وجود این لات ناشی خواهند شد، برای آن‌ها وارد شدن به قرارداد با تهیه‌کننده و سرمایه‌گذاری مشترک چندین لات مطلوب می‌گردد.

بنابراین، منطقی است که در نمودار بالا منطقی‌بودن لات شماره ۲ را مورد سوال قرار داد: نظارت و کنترل از راه دور. گروه‌بندی این لات با لات شماره ۱ محتمل است: در توربین‌های بادی کار به طور موثر تقسیم می‌شود و هزینه‌ی کلی ساخت کاهش پیدا می‌کند. این تفکر دلیلی است برای جعبه واقع در نمودار که دو لات اول از این مثال را خلاصه می‌کند.

<sup>۱</sup>Lot

#### ۴-۶ خطرات صنعتی و چگونگی مدیریت آنها

در هر مرحله از حیات مزرعه‌ی بادی، باید توسعه‌دهنده خطرات بسیاری را در نظر بگیرد که به همان اندازه مشکلات بالقوه نیز وجود دارد. می‌توان آن‌ها را مطابق زیر به دنبال مراحل مختلف پروژه خلاصه کرد: توسعه، احداث، عملیات و تخریب<sup>۱</sup> و ما باید برای هر کدام به طور خلاصه به مراحل لازم برای مدیریت آن‌ها به بهترین وجه، نگاه کنیم.

##### ۴-۶-۱ مرحله‌ی توسعه

##### ۴-۶-۱-۱ خطرات مربوط به مکان‌بند

دانستن پتانسیل باد در تمامی پروژه‌های انرژی باد به منظور تضمین تولید انرژی در سطوح پیش‌بینی شده ضروری می‌باشد. اگرچه باد در دریا نسبت به خشکی منظم‌تر می‌وزد، اما سواحل اطراف بر شرایط باد حتی در فواصل دور از ساحل نیز تأثیر می‌گذارند. به طور کلی ارزیابی منابع انرژی با استفاده از مدل‌سازی دقیق محیط دریایی مورد بحث و بر اساس مدل‌های اقلیمی جهانی به دست می‌آیند. کیفیت نتایج با استفاده از مقایسه‌ی آن‌ها با اندازه‌گیری‌های انجام شده در ایستگاه‌های هواشناسی مجاور که معمولاً بر روی خشکی واقع شده‌اند (به عنوان مثال، در بندرگاه‌ها، فرودگاه‌ها) سنجیده می‌شود.

اغلب، یک دکل هواشناسی بر روی مکانی نصب می‌شود و به مدت یک سال رها می‌شود و سرعت و جهت باد را تا ارتفاع آشیانه‌های<sup>۲</sup> واقع بر مزرعه‌ی طرح‌ریزی شده اندازه‌گیری می‌کند. زیرساخت‌های مشابه نیز امکان اندازه‌گیری امواج را به صورت محلی فراهم می‌کنند. نصب چنین دکل‌های اندازه‌گیری در نوع خود یک پروژه‌ی کامل محسوب می‌شود که شامل مطالعات مقدماتی، دستیابی به مجوز لازم، آماده‌کردن کشتی‌ها برای انجام کار و غیره می‌شود.

به علاوه، به دلیل اینکه نیروهای هیدرودینامیکی بسیار قوی می‌باشند باید مشخصات دریایی اطراف شامل جزر و مد‌ها، امواج جریان و غیره اندازه‌گیری شوند. ما باید با توجه ویژه به شرایطی که باید در طوفان‌های استثنائی در نظر گرفته شوند قادر به شناسایی آن‌ها باشیم بدون اینکه بتوانیم مشاهدات واقعی را در مکان تحت تأثیر قرار دهیم.

#### امواج

<sup>1</sup>Deconstruction

<sup>2</sup>Nacelles

ممکن است در حین طوفان امواج به ارتفاع قابل توجهی برسند. امواج بالای  $m$  ۱۰ به طور متداول اتفاق می‌افتند و در شرایط معینی می‌توان شاهد امواج غیرعادی به ارتفاع تقریباً  $m$  ۳۰ دور از ساحل بود. سازه‌هایی که ممکن است در معرض چنین امواجی قرار گیرند (حتی یکبار در تمام طول عمر خود) باید متناسب با آن طراحی گردند. به عنوان مثال این مورد در حفاری پلتفرم‌های نفت و گاز در دریای شمال اتفاق می‌افتد. خطر شکست در طول عمر پروژه باید با متعادل کردن هزینه‌ی سازه‌های قادر به تحمل یک واقعه‌ی داده‌شده و احتمال اتفاق افتادن آن واقعه ارزیابی گردد. از طرف دیگر، اگر آن خطر در مکان مورد بحث وجود نداشته باشد احتمالاً بتوان سازه‌ها را ارزان‌تر طراحی کرد.

با کاهش عمق آب امواج ناپایدارتر می‌گردند و ممکن است با شکست به سازه‌ها آسیب وارد کنند. این فرآیند شکست به نحوی اتفاق می‌افتد که در فاصله‌ای معین از ساحل دوباره تکرار نمی‌شود، زیرا این امر به ارتفاع موج و عمق آب و در نتیجه به زمان جزر و مد بستگی دارد. بنابراین، باید این خطر را به ازای تمامی احتمالات در تمامی سازه‌هایی ارزیابی کرد که مزرعه‌ی بادی را شکل می‌دهند. با این حال، اگر یک ناحیه‌ی مرتفع از بستر دریا میان آن مکان و دریای آزاد وجود داشته باشد امواج در بستر مرتفع (موج‌شکن‌ها) نه در اطراف مکان دچار شکست شده و مکان حفاظت می‌شود.

برای تعدادی از مکان‌های مرجع که ابزار اندازه‌گیری برای چندین سال در آن جا قرار گرفته‌اند مشخصات امواج شناخته‌شده می‌باشد. در مدل‌های عددی با استفاده از این مکان‌ها به عنوان نقطه‌ی شروع، رفتار آماری امواج در مکان مورد بحث پیش‌بینی می‌گردد. به طور ویژه به ارتفاع بیشینه موج نگاه می‌شود که ممکن است هر ۵۰ یا ۱۰۰ سال اتفاق بیفتد.

## زمین

زمین باید قادر به تحمل کرنش مکانیکی باشد در نتیجه دارای نقش مهمی می‌باشد. اغلب هنگامی که از فونداسیون‌های ستونی استفاده می‌شود، فونداسیون توربین‌های بادی نه تنها با لایه بالایی بستر دریا برهمکنش دارند بلکه با لایه‌ی زیرین نیز تا عمق ده‌ها متر رابطه دارند.

بستر دریا حاصل فرآیند طولانی تغییر زمین‌شناختی<sup>۱</sup> است که به عنوان مثال، بستر رودخانه یا دشت‌های سیل‌خیز که از پایان آخرین عصر یخبندان با افزایش آب غرق شده‌اند. آن‌ها به اندازه‌ی خاک روی زمین متنوع می‌باشند به جزء اینکه اشاره به ویژگی‌های خاص آن‌ها بسیار دشوارتر می‌باشد. با گسترش مزرعه‌های بادی به طول چندین کیلومتر، ممکن است تنوع بستر

<sup>۱</sup>Geological Changes

دریا از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر در همان مزرعه متفاوت شود که این موضوع بدین معناست که باید تحلیل‌ها و آزمایش‌های مکانیکی بسیاری انجام شود تا از ارزیابی نادرست ظرفیت زمین برای توربین‌های مشخصی در مزرعه جلوگیری شود.

در ابتدا، مطالعه‌ی تاریخ جغرافیای مکان، امکان پیش‌بینی ویژگی‌های متفاوت یافت‌شده را فراهم می‌کند. سپس اندازه‌گیری‌هایی در مکان انجام می‌شود. دو نوع از این اندازه‌گیری‌ها وجود دارد و آن‌ها یکی پس از دیگری انجام می‌شوند:

- اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی<sup>۱</sup>: شناوری ارزیابی دقیقی از ناحیه با استفاده از صداسازهای فراصوتی انجام می‌دهد. بنابراین، نقشه‌ای از منطقه با تعدادی از لایه‌های زمین در هر نقطه و ضخامت تقریبی هر لایه تولید می‌شود. متأسفانه این ارزیابی به ما امکان تعیین نوع مواد زیرین را نمی‌دهد.

- اندازه‌گیری‌های ژئوتکنیکی<sup>۲</sup>: شناور مخصوصی مقاومت زمین را در برابر نفوذ آزمایش می‌کند و نمونه‌های استوانه‌ای بستر دریا را برداشت می‌کند و ما را قادر به تعیین طبیعت خاک زیرین و استخراج داده‌های مکانیکی مورد نیاز هنگام انجام محاسبات مربوط به فونداسیون می‌سازد. شناورهای نسبتاً کمی در حال عملیات وجود دارد که توانایی انجام این محاسبات را دارند.

مطالعه‌ی بستر دریا ناحیه‌ای بزرگتر از خود مزرعه را پوشش می‌دهد زیرا مسیر بازگشت کابل به ساحل را نیز شامل می‌شود.

تعیین مشخصات بستر دریا شامل یکی از بحرانی‌ترین مراحل عمده‌ی فنی در حین توسعه‌ی پروژه می‌شود. این آزمایش‌ها پرهزینه بوده و در نتیجه تنها هنگامی اجرا می‌شوند که به لحاظ سیاسی، مالی، اجتماعی و صنعتی شانس بهره‌وری داشته باشند. گاهی اوقات، آزمایش‌ها نشان خواهند داد که سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی که در ابتدا به منظور توصیف پروژه و تخمین بودجه برای آن در نظر گرفته شده‌اند، ناکافی می‌باشند و منجر به بازنگری چشمگیری می‌شوند (در صورتی که منجر به حذف پروژه نشود).

بنابراین ضروری است که هرچه سریعتر فرآیند ژئوتکنیکی را شروع کرد.

#### ۴-۱-۶-۲ خطرات فنی

<sup>1</sup>Geophysical Measurements

<sup>2</sup>Geotechnical Measurements



از نقطه نظر توسعه‌دهنده ضروری است که تضمین شود توربین‌های بادی هنگام نصب به درستی کار می‌کنند. بنابراین، باید توربین‌های بادی قابل اتکا باشند. خرابی‌هایی که در چند ساعت کار یک تکنسین در خشکی قابل تعمیر می‌باشند، خرابی مشابه در دریا توقف بسیار زیادی را بوجود می‌آورد زیرا احتمال دارد که دسترسی ایمن به ماشین‌آلات در مدت زمان طولانی به خصوص در زمستان حاصل نشود. در نتیجه، هنگامی که باید تولید انرژی بهینه باشد خرابی‌ها به طور غیرقابل کنترلی طولانی می‌شوند که ممکن است به ضرر مالی فاجعه باری منجر شود.

این مشکل عمده بوده و باید در حین اجرای مرحله‌ی توسعه بررسی گردد تا ماشین‌آلاتی انتخاب شوند که به بهترین شکل عمل می‌کنند و از کیفیت مناسبی برخوردار هستند.

چندین مسیر توسعه به منظور پیشینه کردن قابلیت اطمینان توربین‌های بادی دنبال می‌شود:

- تمامی ماشین‌های تجاری پروژه‌های فراساحلی در معرض آزمایش‌های طولانی بر روی بسیاری از توربین‌های بادی یکسان نصب‌شده در خشکی قرار می‌گیرند؛

- به طور کلی برای مهم‌ترین عناصر سیستم بیش از یک جزء نصب می‌شود که بصورت یدکی<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد (به عنوان مثال سیستم گردش<sup>۲</sup> و فیلتر سیال هیدرولیکی در آشپانه وجود دارد). با این حال، هم به صورت عملی و هم مالی داشتن چندین جزء پشتیبانی نصب‌شده قابل قبول نمی‌باشد؛

- پارامترهای کاری بسیاری از اجزاء همچون ارتعاشات یا دمای داخلی به صورت پیوسته اندازه‌گیری شده و بر داده‌ها در ایستگاه کنترل واقع بر خشکی نظارت می‌شود. بنابراین، می‌توان انحراف از این پارامترها را تشخیص داد و قبل از رخ دادن خرابی‌ها یک بررسی نگهداری پیشگیرانه را برنامه‌ریزی کرد؛

- برخی از توربین‌های بادی از ابتدا با هدف داشتن قابلیت اطمینان بسیار بالا، اما نه مناسب طراحی می‌شوند. این به معنای بازنگری کامل معماری آشپانه است. به عنوان مثال، تقویت‌کننده‌ی سرعت<sup>۳</sup> کنار گذاشته شده و ژنراتور برق به صورت مستقیم (کوپل مستقیم) به روتور متصل می‌گردد. بنابراین جزء مکانیکی که از نظر نگهداری حساس می‌باشد کنار گذاشته شده اما یک ژنراتور کند بسیار بزرگتر، سنگین‌تر و پرهزینه‌تر از ژنراتور سریع جایگزین گردیده است!

<sup>1</sup>Stand by

<sup>2</sup>Circulation

<sup>3</sup>Speed Multiplier

- تجربه، اهمیت جزئیات را نشان می‌دهد. برای مثال در کیفیت ایزوله‌سازهای الکتریکی که تهیه‌کنندگان بدلیل چنین جزئیات ساده مجبورند تعمیرات را تکرار کنند یا از پره‌ها در برابر صاعقه حفاظت نمایند. با ظهور این فنآوری، تمامی مشکلات بسیار پیچیده‌ای که منجر به جداشتن شناورها یا و پره‌ها می‌شده‌ان مرتفع گردیده است.

خطرات مربوط به قابلیت اطمینان با استفاده از سری ماشین‌آلات یکسان تقلیل پیدا می‌کنند. متأسفانه، همانطور که توسعه‌دهنده‌ها به طور پیوسته به دنبال افزایش اندازه و توان توربین‌های بادی هستند مدل‌های جدیدی تولید می‌گردد که نیاز دارد تا فرآیند انطباق دوباره شروع شود حتی اگر فنآوری جدید اغلب به طور عمده از نسخه‌ی قدیمی گرفته شوند.

در نتیجه، پیش‌بینی احتمال شکست به طور عمده به صورت یک شانس باقی می‌ماند و مسئولیت تلاش برای تضمین حداقل کردن شانس آن همواره برعهده توسعه‌دهندگان خواهد بود.

#### ۴-۶-۱-۳ خطرات اجتماعی

خطرات اجتماعی بسیاری وجود دارد که مانع توسعه‌ی پروژه می‌شوند:

- دریا یک فضای ۴ بعدی است که ممکن است شغل‌های مختلف بسیاری در زمان‌های گوناگون برای کار در سطح، در بستر یا در خود آب میان بستر و سطح بیابند. ممکن است حضور مزرعه بادی شرایط را به صورت چشمگیری تغییر دهد زیرا برای سال‌های زیادی از فعالیت‌های معینی جلوگیری می‌کند. بنابراین، شناسایی تمامی کاربران دریا که ممکن است تحت تأثیر قرار گیرند و مشورت با آن‌ها به منظور درک کامل منافع آن‌ها و تعیین چگونگی غلبه بر مشکلات ایجادشده ضروری می‌باشد؛

- ممکن است این پروژه، منطقه‌ی جستجوی ماهیگیران حرفه‌ای را کاهش دهد به خصوص با در نظرگیری این که آب‌ها کم‌عمق به لحاظ بیولوژیکی بسیار حاصل‌خیز می‌باشند. با این حال، تا زمانیکه هر فرد از قوانین ایمنی که باید رعایت شوند آگاه باشد هیچ محدودیتی در بهره‌برداری عمومی نظیر ماهیگیری وجود نخواهد داشت.

- در دریا محدودیت‌هایی وجود دارد تا نیاز ناوبری دریایی و هوایی تأمین گردد: رادارها، کابل‌های زیر دریا و غیره. این عناصر از شروع پروژه قابل شناسایی می‌باشند تا توسعه‌هایی که هیچ شانس موفقیتی ندارند، آغاز نشوند؛

- در میان خطرات دیگر، می‌توان به مردم محلی اشاره کرد که به دلایل فرهنگی تمایل ندارند توربین‌های بادی را دور از ساحل ببینند، کارشناسان محیط زیست که درباره‌ی اثرات هرگونه تغییر در محیط زیست دریایی نگران هستند، افراد سرمایه‌گذار که فکر می‌کنند توان بادی فراساحلی در مقایسه با دیگر اشکال، منابع متداول‌تر، بسیار گران است، لابی‌های<sup>۱</sup> مشخصی که ترجیح می‌دهند دیگر اشکال انرژی مورد استفاده قرار گیرند و غیره.

#### ۴-۶-۱-۴ خطرات زیست‌محیطی

مزارع بادی زیرساخت‌های جدیدی در فضای دریایی می‌باشند و معقول است که سوالی درباره‌ی اثر زیست‌محیطی آن مطرح گردد. پیرو اولین پروژه میزان مشخصی از مزیت تجربه بدست آمده در دسترس می‌باشد. تا به امروز ما می‌توانیم به نکات زیر اشاره کنیم:

- پرنده‌ها به طور گسترده تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند. اکثر پرندگان مهاجرتی از دور دست متوجه حضور توربین‌ها شده و مسیر پروازی خود را به دور آن‌ها یا بالای آن‌ها تغییر می‌دهند. گونه‌های مشخصی هم که به پرواز در ارتفاع پایین معروف هستند ترجیح می‌دهند که از میان ماشین‌آلات موجود عبور کنند. با این حال، حضور آن‌ها باعث می‌شود تا پرندگان در جای دیگری به دنبال ماهی باشند. بنابراین، زمین‌هایی برای تغذیه از دست می‌روند؛

- به نظر نمی‌رسد که ماهی‌ها نیز به صورت چشمگیری تحت تأثیر قرار گیرند. سرشماری‌ها هیچ تغییر خاصی در تعداد گونه‌ها نشان نمی‌دهد. اگر سازه‌های مصنوعی و صخره‌های ضد خوردگی به عنوان پناهگاه این موجودات استفاده شوند ممکن است اثرگذاری محدودی بر این نوع گونه‌ها مشاهده شود؛

- کابل‌های برق تنها اثرات کوچک الکترومغناطیسی تولید می‌کنند زیرا جمع جریان‌های منتقل شده در یک کابل در جریان سه فاز و همچنین در جریان متناوب برابر صفر است. با این حال، تلفات ژول باعث افزایش جزئی در دمای بستر دریا می‌شود اثرات وارد بر موجودات کف دریا به فاصله‌ی تقریباً یک متر محدود می‌شود:

- پستانداران دریایی، حیوانات نمادینی می‌باشند که انسان‌ها در مورد آن‌ها بسیار حساس می‌باشند. مطالعاتی پیرامون رفتار فوک‌ها و پورپوس‌ها<sup>۲</sup> با توجه ویژه به اثرات محتمل بر نويز زیر آب بر روی آن‌ها در حال انجام می‌باشد. بر اساس این حقیقت که این حیوانات به صورت

<sup>1</sup>Lobbyist

<sup>2</sup>Porpoises

شگفت‌آوری سفر می‌کنند و حضور آن‌ها در محل مزرعه‌ی بادی اساساً بسیار کوتاه است این مطالعات متوقف شده‌اند.

امروزه با دانشی بسیاری که در این زمینه وجود دارد، احتیاط در مسائل زیست محیطی کاملاً رعایت می‌شود. به عنوان مثال، اگر گونه‌ها به اغتشاش‌های غالب در منطقه حساس باشند هیچ کار احداث پر سروصدایی در دریا در حین مهاجرت یا فصل تولید مثل در آن مکان انجام نمی‌شود.

#### ۴-۶-۲ خطرات فنی در حین احداث

ساخت مزرعه‌ی بادی فراساحلی نمایانگر پروژه‌ای عظیم می‌باشد که باید با هزاران تن از سازه‌های متنوع در دریا ساخته شوند، صدها کیلومتر از کابل زیر دریا قرار می‌گیرند، صدها پره نصب و راه انداخته می‌شوند.

تمامی این اجزاء که در ناحیه‌ی جغرافیایی پهناوری پراکنده شده‌اند باید توسط تهیه‌کنندگان بسیاری به موقع تولید شوند.

سپس آن‌ها را به بندرگاه می‌برند تا قبل از انتقال به آخرین مقصد، ماشین‌ها آماده و بررسی شوند. فضای موجود در بندرگاه یک جنبه‌ی بسیار مهم می‌باشد که روش استفاده برای تأسیسات موجود در دریا را تحمیل می‌کند. به عنوان مثال، اگر مانع موجود قابل قبول باشد می‌توان روتورها را بر روی اسکله مونتاژ کرد؛ اگر چنین نباشد باید پره‌ها بر روی آشیانه‌هایی که از قبل در رأس برج‌ها آویخته شده‌اند نصب شوند.

عملیات لجستیک بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تجهیزات نباید خیلی زود برسند تا مانع آماده‌سازی مکان در بندر نشوند. با این حال، دیر رسیدن آن‌ها نیز قابل قبول نخواهد بود.

برای مونتاژ در دریا از شناور کاری مخصوصی استفاده می‌شود. به طور کلی، سازه‌های پشتیبان (فونداسیون‌ها) توسط شناوری در محل قرار می‌گیرند که قادر به حمل بارهای بسیار سنگین هستند و شناورهای استفاده‌شده برای بلند کردن توربین‌های بادی جرثقیل‌های عظیم را حمل می‌کنند. این عملیات‌ها تنها در بادهای خفیف قابل انجام می‌باشند. این امر با مکانی که به بادخیزی معروف است در تناقض می‌باشد و به این معناست که کارهای مربوطه باید در تابستان در هوایی آرام انجام شوند. خطر بسیار تأثیرگذار بر زمان برنامه‌ریزی شده برای پروژه وجود دارد که خطر آب و هوایی نامیده می‌شود (ممکن است شرایط اقلیمی باعث توقف کار در مکان مورد نظر به مدت روزها و یا هفته‌ها شود). بنابراین این احتمال، اجاره‌ی کشتی‌ها برای مدت طولانی‌تر ضروری می‌باشد.

در دسترس بودن این کشتی‌ها در طول فصل مناسب یک نکته‌ی ضروری می‌باشد که ممکن است باعث شود که کار ساخت‌وساز یک سال تمام عقب بیفتد. مادامی که توسعه‌دهنده بتواند تضمین کند که تمامی تجهیزات و مجوزها به موقع حاضر خواهند شد او وارد قراردادی با پروانه‌های ویژه می‌شود. در غیر اینصورت، همچنان این ریسک وجود دارد که برنامه‌کاری کشتی‌ها با یک پروژه‌ی پر تأخیر مواجه باشد.

هنگامی که توربین‌ها به محل برسند فرآیند فعال‌سازی آن‌ها آغاز می‌شود. ما باید بررسی کنیم که تمامی اجزاء به درستی کار می‌کنند، اتصالات را وصل کنیم، کل شبکه‌ی برق داخلی و سیستم‌های خودکار را آزمایش کنیم و غیره. این‌ها عملیات طاقت‌فرسایی هستند که به زمان زیادی نیاز دارند. این مدیریت ساده بدلیل نیاز به انتقال ایمن پرسنل بوسیله هلی‌کوپتر به مقصد پیچیده می‌شود.

توان توربین‌های بادی به تدریج و به صورت تصاعدی افزایش پیدا می‌کند و قبل از اینکه توان اسمی حاصل شود در هر مرحله صحت کار اجزای الکتریکی و مکانیکی بررسی می‌گردد. این کار چندین هفته به طول می‌انجامد. اگر در آن نقص کارکردی شناسایی شود باید علت آن پیدا شده و تعمیر گردد. در این مرحله سازنده مسئول ریسک اجبار به تعویض تجهیزات خراب می‌باشد اما هزینه‌های مالی تأخیر همچنان بر دوش توسعه‌دهنده می‌باشد.

#### ۴-۶-۳ خطرات احتمالی در حین مرحله‌ی عملیات

مزرعه‌ی بادی فراساحلی برای کار به مدت حداقل بیست سال طراحی می‌شود. در طول این مدت طولانی، آسیب‌های ناشی از زمان به ما درباره وقایع استثنائی می‌گویند که ممکن است در دریا اتفاق بیفتند و ممکن است چشم‌انداز تولید انرژی بالا و صنعتی آن تغییر کند.

در مرحله‌ی عملیات مجهولاتی شروع به ظاهر شدن می‌کنند. موفقیت انرژی بادی ساحلی چنان است که انرژی که آن به شبکه تزریق می‌کند به زودی بخش قابل توجهی از کل توان برقی خواهد بود. این یعنی تولیدکننده‌ی انرژی بادی باید مسئولیت‌های مشابهی با تمامی تولیدکنندگان دیگر بر عهده بگیرد. ممکن است مدیر شبکه به درستی تقاضای همکاری در نگهداری ولتاژ، فرکانس، توان بازواکنش<sup>۱</sup> و غیره بدهد. به طور کلی تولیدکننده باید ۲۴ ساعت قبل بیان کند که چه مقدار از توان در دسترس خواهد بود. اگر توان منتقل شده در حقیقت کمتر از این مقدار باشد مدیر شبکه به مشکل برخورد خورد و ممکن است هزینه‌های مربوط به آماده‌سازی انرژی اضافی اضطراری به تولیدکننده‌ی متخلف تحمیل شود. از طرف دیگر، ممکن است

<sup>۱</sup>Reactive power

هنگامی که نیاز به انرژی در شبکه کم باشد تولید انرژی باد اضافی نشان داده شود. به منظور پیشگیری از این پدیده که تا به امروز در کشورهای مشخصی دیده شده است، اندیشه‌ی قیمت منفی برق بوجود آمده است. اگر این انرژی انتقال یابد، تولیدکننده باید جریمه پرداخت کند! این وضعیت عجیب در آینده بدتر خواهد شد و مکانیزم‌های موثر تنظیم همچنان باید توسعه پیدا کنند. خطری که این شرایط برای مالک مزرعه‌ی بادی بوجود می‌آورد قابل جلوگیری نبوده و مشکلات زیادی را ایجاد می‌نماید.

معمولاً فرسودگی اجزاء در مرحله‌ی اول طراحی در نظر گرفته می‌شود. شکست در سازه‌های فلزی و پره‌ها محاسبه می‌شود تا از نیاز به تعمیر یا جایگزین کردن آن‌ها در طول عمر کاری توربین جلوگیری شود. با این حال، نبود کاتالوگ به اندازه‌ی کافی جامع درباره‌ی رویدادها ممکن است باعث نگرانی برخی درباره‌ی ناقص بودن محاسبات شود. نمی‌توان خطر مربوط به نیاز به جایگزین کردن تجهیزات را به طور کامل نادیده گرفت.

قطعات مشخصی که در گذشته در مزارع بادی به کار گرفته شده‌اند مشکلاتی ایجاد می‌کنند و باید جایگزین شوند. در جایگزینی این قطعات فرض می‌شود که قطعات جدید موجود هستند. با این حال، قطعات مهمی همچون تقویت‌کننده‌ها تنها ماه‌ها پس از سفارش منتقل می‌شوند. مدیریت انبار قطعات یدکی مشمول بزرگترین مشکلی می‌شود که اپراتور در حین عملیات مزرعه‌ی بادی با آن روبه‌رو می‌شود. یک انبار گسترده بار مالی بسیاری به دنبال دارد که باید در مقابل خطر خراب ماندن توربین‌ها در غیاب قطعات کمکی بالانس شود.

خطر دیگر مربوط به این حقیقت است که در چنین دوره‌ی زمانی طولانی ممکن است سازنده-های مشخصی ناپدید یا خطوط مشخصی متوقف شوند. ما باید به طور پیوسته تضمین کنیم که زنجیره‌ی منابع اجزای لازم برای عملیات روان مزرعه دچار اختلال نشود.

همچنین کشتی‌هایی که قادر به انجام بالابری ضروری هستند در حین عملیات سنگین تعمیر و نگهداری فوراً در دسترس قرار نمی‌گیرند.

نکات بالا، اهمیت قابلیت اطمینان مناسب و نیاز به انجام نگهداری به موثرترین روش ممکن به وسیله‌ی اقدامات پیشگیرانه را برجسته می‌کنند که می‌توانند با قطعیت اینکه کشتی‌ها در دسترس خواهند بود از قبل برنامه‌ریزی شوند.

برای پروژه‌های بزرگی که با صدها مگاوات سروکار دارند، کشتی‌های کاری همچنان با مزرعه در ارتباط باقی می‌مانند و هلیکوپترها برای مدت طولانی اجار می‌شوند.

#### ۴-۶-۴ خطرات مربوط به تخریب

در انتهای عملیات باید ماشین‌های نصب‌شده در دریا جداسازی شوند. در قراردادهای ملی و بین‌المللی قید شده است که مکان مورد نظر باید به حالت اولیه خود بازگردد.

عملیات تخریب اساساً متقارن با عملیات احداث است. کشتی‌های مخصوص قطعات جداشده را به بندرگاه باز می‌گردانند.

هر تجهیز واقع در بالای سطح دریا باید خارج شود. در مورد سازه‌های فلزی امکان قطع ستون-ها با اره‌های مخصوص وجود دارد. این کار بسیار پیچیده‌تر از نصب اولیه بوده و منجر به بیشتر شدن هزینه‌ی مرحله‌ی تخریب نسبت به مرحله‌ی احداث می‌شود. فروش قطعات فلزی در بندرگاه نسبتاً ساده بوده (به دلالت ضایعات فلزی یا صنعت فولاد و آهن) و این هزینه تقریباً با این کار جبران می‌شود.

هنگامی که از فونداسیون‌های گرویتی<sup>۱</sup> بتنی استفاده می‌شود می‌توان آن‌ها را تخریب و دوباره به بندرگاه بازگرداند. تخریب بتن یک فرآیند طولانی بوده و مقدار فراوانی از خرده سنگ تولید می‌کند که تا حدودی می‌توان از آن بهره اقتصادی برد. با توجه به این که بتن دوام عالی دارد می‌توان با نگه داشتن فونداسیون یکسان، مزرعه را در اواخر طول عمر خود با جایگزین کردن توربین‌های بادی با نمونه‌های مشابه با توان یکسان نوسازی کرد. سنگریزه‌هایی که از خوردگی سازه‌ها جلوگیری می‌کردند در آن مکان رها می‌شوند. کابل‌ها را از خاک در آورده و از آن مکان خارج می‌کنند.

یک خطر دیگر که درک آن دشوار است در پتانسیل تغییر قانون در طول چنین دوره‌ی زمانی طولانی نهفته است که ممکن است باعث پیچیدگی بیشتر در کار جداسازی شود.

یک احتمال قوی این است که حضور مزرعه‌ی بادی ماهیگیری را در آن محل محدود می‌کند و باعث به وجود آمدن اثر مثبت یعنی ایجاد نوعی منطقه‌ی حفاظت‌شده که منجر به رشد جمعیت ماهی‌ها می‌شود. در این مورد دور از احتمال نیست که در انتهای دوره‌ی عملیات، به منظور نگهداری این مزیت در حد ممکن تخریب بازنگری شود.

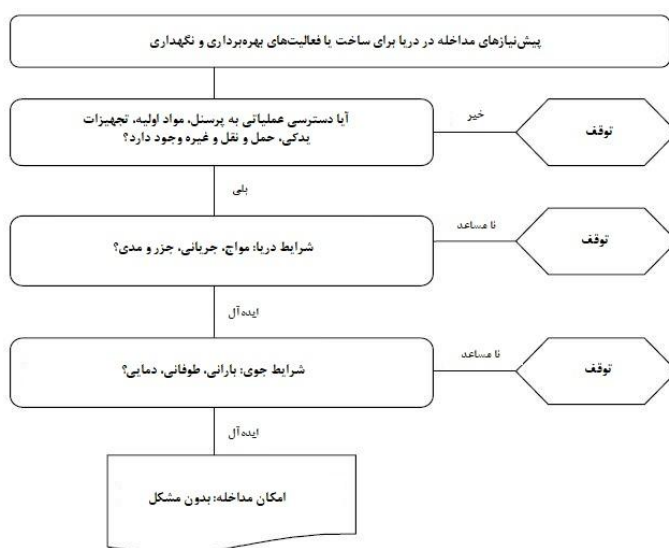
<sup>۱</sup>Gravity

#### ۴-۷ مدیریت خطرات ناشی از مداخله‌های انجام‌شده در دریا

هر عملیاتی در دریا که به آماده‌سازی مکان در مرحله‌ی احداث یا مداخله‌ی عملیاتی و نگهداری *O&M* مربوط می‌شود در معرض خطرات متفاوتی قرار دارد که مدیر فنی باید برای کنترل آن‌ها به بهترین وجه بکوشد. می‌توان این خطرات را به دو گروه زیر تقسیم نمود:

- خطرات عملیاتی یا "داخلی" که در حیطه‌ی کاری مدیریت قرار می‌گیرند. این خطرات عمدتاً به در دسترس بودن پرسنل، صلاحیت و آموزش آن‌ها، در دسترس بودن مواد ضروری در آن مکان یا قطعات جایگزین در مورد مداخله‌ی *O&M*، در دسترس بودن و کافی بودن ابزارهای لجستیک همچون کشتی یا لنج<sup>۱</sup> دارای تجهیزات مورد نیاز (وسایل پایدارسازی، جرثقیل، بالابر<sup>۲</sup> و غیره) مربوط می‌شوند؛

- خطرات محیطی یا "خارجی" که فرد مسئول به جای کنترل، فقط توانایی پیشگیری یا پیش-بینی آن‌ها را دارد. این خطرات اساساً از شرایط دریا و شرایط اقلیمی ناشی می‌شوند.



شکل ۴-۳ توضیح خطرات عملیاتی و محیطی که احتمال انجام مداخله در دریا را تحت تأثیر قرار می‌دهند

اگر ما بپذیریم که خطرات محیطی (شرایط دریا، آب و هوا) دارای همبستگی می‌باشند در حقیقت ثابت می‌شود که آن‌ها به خطرات عملیاتی مرتبط می‌باشند و همه‌ی آن‌ها با هم ترکیب‌شده و علیه توسعه دهنده بوجود می‌آیند؛ در حقیقت، هنگامی که وضعیت دریا و شرایط

<sup>۱</sup>Barge

<sup>۲</sup>Winch



اقلیمی مطلوب باشند تمامی مکان‌های ساخت‌وساز دریایی باز خواهند شد و تقاضا افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه احتمالاً باعث کمبود در گروه مشخصی از کارکنان و کشتی‌های مخصوص می‌شود.

به دنبال آن، تقاضا برای فعالیتی که از قبل پیش‌بینی، تحلیل و برنامه‌ریزی نشده است (با در نظرگیری خطرات موجود) به احتمال بسیار زیاد در زمان مطلوب به نتیجه نخواهد رسید و یا همانطور که در نمودار بالا توضیح داده شد، از طریق فرآیندی انجام خواهد شد که بهینه نمی‌باشد. به منظور انجام نگهداری توربین‌های بادی معمولاً باید در زمستان دو یا سه هفته صبر کرد تا دسترسی به مکان در آن وضعیت دریایی و شرایط اقلیمی امکان‌پذیر باشد.

با توجه به این تحلیل، تعدادی از قواعد کلی پدیدار می‌شوند. هرگونه مداخله در دریا به منظور ساخت‌وساز یا عملیات و نگهداری از تأسیسات تولید انرژی در یک محیط محدود انجام می‌گردد. بنابراین، این کار خطرناک، دشوار و پرهزینه بوده و بیانگر سطح بالایی از خطر است:

- همواره ترجیح داده می‌شود که کارها را در خشکی یا در محل بندرگاه انجام داد. به این دلیل که انجام کارهای مقدماتی در خشکی تا جای ممکن و محدود کردن تعداد فعالیت‌های انجام‌شده در دریا در حد امکان مفید خواهد بود؛

- متعاقباً هنگام طراحی پروژه باید به قابلیت اطمینان و برنامه‌ی نگهداری آن‌ها به طور کامل توجه داشت تا تعداد فعالیت‌های لازم در دریا را در حد امکان پایین نگه داشت؛

- در حین فعالیت ماشین‌ها هنگامی که آن‌ها را به صورت صنعتی به کار می‌گیرند بهتر است که از قبل عملیات نگهداری پیشگیرانه‌ای برای فعالیت‌های اصلاح‌کننده‌ای برنامه‌ریزی شود که اجرای آن‌ها دشوار و پرهزینه است؛

- امروزه کار برای مدیر و تیم‌های فنی بدون پیش‌بینی امکان‌پذیر نیست. پیش‌بینی کوتاه‌مدت یا متوسط وضعیت دریا و شرایط اقلیمی برای برنامه‌ریزی فعالیت در دریا ضروری می‌باشد.

#### ۴-۸ طراحی و نگهداری تأسیسات تولید برق در دریا

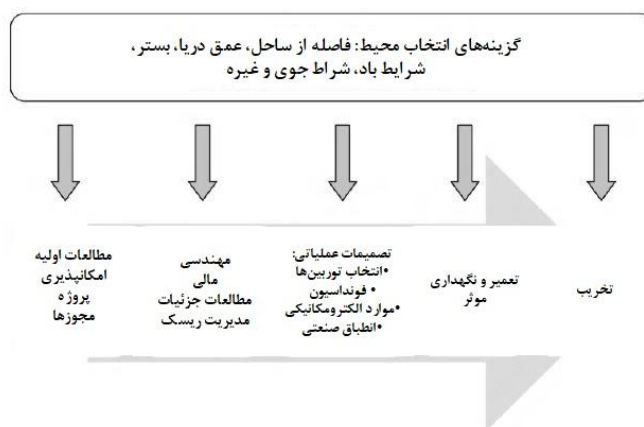
احداث تأسیسات در دریا و به دنبال آن فعالیت‌های عملیاتی و نگهداری در محیطی مستعد انجام می‌شوند که در معرض خطرهای بسیاری قرار دارد. در مثال مزرعه‌ی بادی فراساحلی (اندازه‌ی بحرانی:  $100MW$ ) کار ساخت و ساز همچنان بین ۱۲ تا ۱۸ ماه طول می‌کشد؛ احتمالاً با توجه به فصل‌هایی که برای کار مناسب نمی‌باشند این کار در بیش از دو سال انجام

شود. پیرو کمیسیون صنعتی آن‌ها، توربین‌های بادی به مدت ۲۰ یا ۳۰ سال به کار ادامه خواهند داد و به دنبال آن مرحله‌ی تخریب انجام می‌شود.

بسیار قبل از اجرای پروژه در مطالعه‌ی امکان‌پذیری، انتخاب مکان و سپس مطالعات مهندسی و دقیق این محدودیت‌های عملیاتی و محیطی و همچنین تمایل کارفرما به کمینه کردن خطرات در طول عمر تأسیسات در نظر گرفته خواهند شد.

همچنین با در نظرگیری تنوع تأسیسات و تجربه‌ی حاصل از وسایل مشخصی که به تکامل رسیده‌اند؛ به عنوان مثال، باد فراساحلی؛ می‌توان تا حدودی از بازاندیشی گذشته استفاده کرد. در نتیجه، در نظرگیری مشکلات عملیاتی به منظور راهنمایی طراحی ماشین‌ها، انتخاب ژنراتورهای هوایی و اجزای فنی مفید می‌باشد. به علاوه، در مسیر دوره تولید توسط ماشین، مدیر O&M پیشنهاد بهینه‌سازی‌هایی را خواهد داد (نوسازی عملیات) که فعالیت‌های مشخص O&M را ساده‌تر می‌کند یا حتی بهتر، تناوب نیاز به آن‌ها را کاهش می‌دهد.

طراحی تأسیسات در دریا و برنامه‌ی نگهداری مربوط به آن باید از آغاز تا زمان تخریب (در مراحل مختلف چرخه‌ی عمر تأسیسات) مورد مطالعه قرار گیرند.



شکل ۴-۴ نمودار طراحی ژنراتور در دریا

اولین مزرعه‌ی بادی فراساحلی صنعتی (همچون میدلگراندن<sup>۱</sup>، دانمارک، ۴۰ MW نصب‌شده) در آغاز سال ۲۰۰۰ به صورت صنعتی عملیاتی شد. درس‌های مختلفی از این تجربه آموخته شده است و امروزه برای تأسیسات تولید برق در دریا سود بیشتری دارد:

<sup>۱</sup>Middelgrunden

- صرف نظر از اینکه چقدر انتخاب اجزاء، ژنراتورها و به طور کلی تر توربین‌ها در مورد مزارع بادی فراساحلی سختگیرانه انتخاب شده اند، احتمال وجود خطای سریالی<sup>۱</sup> همچنان هست. در نتیجه، باز خورد این تجربه به صورت زیر بنا می‌شود:
- اگر فردی بتواند تنها ژنراتورها را از جایی تهیه کند (در این مثال) که اجزاء در آشیانه‌ها (پره-ها، تقویت‌کننده‌ی سرعت، یاتاقان‌ها، ژنراتور برق، مبدل توان الکترونیک، ترانسفورماتور و غیره) دست کم در دو تهیه‌کننده موجود باشند، وقوع خطای سریالی به طور واضح کاهش پیدا می‌کند؛
- همچنین اگر ما تصمیم بر توزیع سفارش ژنراتورهای هوایی میان چندین سازنده بگیریم احتمال خطای سریالی کاهش پیدا می‌کند؛
- با این حال، هر دوی این شرایط در مهندسی پروژه، ساخت ماشین‌ها و عملیات آن‌ها باعث ایجاد تعدادی عیب می‌شوند. آن‌ها احتمالاً هزینه‌ی تولید برق را افزایش دهند؛
- در نهایت، خطاهای سریالی (اگر وجود داشته باشند) در طول دوره‌ی گارانتی هنگامی که ماشین‌هایی وارد عملیات شوند نسبتاً سریع آشکار می‌گردند. این مورد به لحاظ مسئولیت (احتمال خطای سریالی) تهیه‌کننده را نسبت به مدیر پروژه بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- دسترسی به ماشین‌ها در دریا مشکلاتی را ایجاد می‌کند و اگر نیاز به دخالت مطرح شود، خطر تأخیر جدی خواهد بود.
- گزینه‌هایی همچون نظارت از راه دور و کنترل از راه دور برای کنترل عملیات توربین‌های بادی به بهترین نحو و در نتیجه در دسترس بدون وسایل تولید ضروری می‌باشند؛
- به منظور تضمین تولید حداقل در حال صرف وقت برای انجام عملیات اصلاحی، باید گزینه‌ی جداسازی مدارهای الکتریکی مشخصی - به عنوان مثال، جداسازی مدارها برای راه‌اندازی استاتور ژنراتور برق - آزمایش شود. در غیر این صورت، باید فراوانی بیش از حد اجزای حساس مد نظر باشد: در کنار موتورها یا پمپ‌های هیدرولیکی که کنترل گام را تضمین می‌کنند بهتر است برای مبدل توان الکتریکی، ترانسفورماتور فزاینده<sup>۲</sup>، ربات روی کشتی، SCADA (کنترل نظارتی و کسب داده) و همچنین قطعات کمکی حیاتی (سیستم تهویه هوا و هواساز و غیره) قطعات پشتیبان داشته باشیم؛

<sup>۱</sup>Serial<sup>۲</sup>Step-up transformer

- دانشی کامل درباره‌ی برنامه‌ی نگهداری کل تأسیسات ضروری می‌باشد. باید فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه مد نظر قرار گیرند زیرا می‌توان آن‌ها را از قبل برنامه‌ریزی کرد؛

- بهینه‌سازی نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان روشی مطلوب در کاهش هزینه‌ی نگهداری تأسیسات و به طور همزمان بهبود دسترسی آن‌ها می‌باشد؛ یک *VCS* (سیستم کنترل ارتعاش) به همراه حسگرهای قرارگرفته در اجزای دوار و سیستم‌های فرعی (یاتاقان اصلی، جعبه‌دنده، ژنراتور برق، یاتاقان سریع<sup>۱</sup> و غیره)، سیستمی برای تحلیل اجزای موجود در روغن تقویت-کننده‌ی سرعت و سیستمی برای تحلیل سیگنال الکتریکی موجود در ژنراتور عملاً ضروری می‌باشند. این وسایل ما را قادر می‌سازند تا از خرابی یا توقف غیرمنتظره اجزای ضروری جلوگیری کنیم. امروزه پیشرفت حاصل‌شده در رفتارشناسی سیگنال ما را قادر می‌سازند تا در پیش‌بینی خرابی محتمل همچنان به جلو برویم. با این ابزارهای تحلیل زمان واقعی<sup>۲</sup> موجود در مکان، امروزه مدیر فنی نشانه‌ی قابل اطمینانی در رابطه با طول عمر بالقوه‌ی اجزای مورد بحث دارد و در نتیجه، می‌تواند معیارهای کنترلی (به عنوان مثال، کاهش توان) و همچنین مداخله‌های نگهداری اصلاحی که از قبل به خوبی برنامه‌ریزی شده‌اند را در جای خود قرار دهد.

#### ۴-۹ سیاست‌ها و سازمان نگهداری

هنگامی که تصمیم به سرمایه‌گذاری گرفته شد و تأسیسات در دریا ساخته شد باید شرایط کارکردی در طول عمر واحد تولیدی بررسی گردد. اساساً برای شرایط کارکردی به موارد زیر اشاره می‌شود:

- مدیریت هزینه‌ی عملیات فنی و نگهداری تأسیسات که نشان‌دهنده‌ی ۲۵ تا ۳۰٪ (چه خوب یا بد) از کل هزینه‌ی تولید بر *MWh* است و شامل تلاقی *CAPEX* و *OPEX* فنی و اجرایی (کارمزدهای کلی، اجاره، بیمه، اجاره زمین و مالیات‌های محلی) می‌شود؛

- سعی در بهینه‌سازی تعمیرات و در دسترس بودن تأسیسات (به معنای در سرویس بودن تجهیزات و عدم وجود توقف تولید)

در حقیقت، این دو جنبه (هزینه‌ی نگهداری و دسترسی) بسیار مرتبط به هم هستند و بهتر است که آن‌ها را به صورت همزمان تحلیل کنیم. ما می‌توانیم با در نظرگیری مدت طولانی بر دو نکته‌ی ویژه‌ی زیر را تأکید کنیم:

- اگر نگهداری هیچ هزینه‌ای نداشته باشد، دسترسی نیز وجود نخواهد داشت؛

<sup>1</sup>Fast bearing

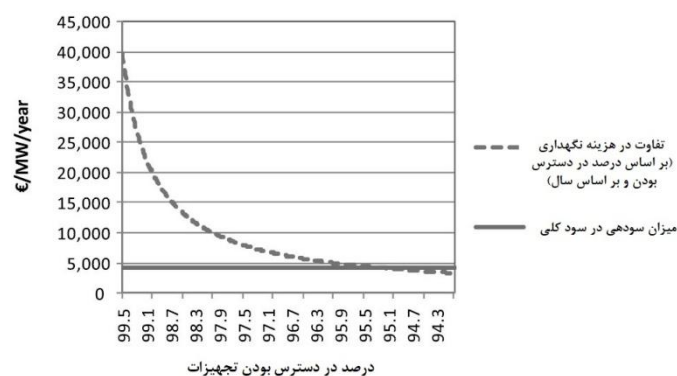
<sup>2</sup>Real-time

- اگر هزینه نگهداری بینهایت باشد، دسترسی نیز به بینهایت میل می کند.

به لحاظ سودآوری، کار نگهداری و در نتیجه افزایش هزینه نگهداری تنها در صورتی منطقی به نظر می رسد که افزایش سود ناخالص (به سبب افزایش جزئی در دسترسی تأسیسات) بیشتر از هزینه کار انجام شده باشد.

به عنوان مثال، بگذارید ما یک مزرعه بادی فراساحلی در انگلستان را در نظر بگیریم (اندازهی بحرانی:  $100 MW$ ، ضریب تخلیه سالانه:  $3200$  ساعت). هزینه متوسط سالانه قرارداد نگهداری تقریباً  $60 k/MW$  است و دسترسی قراردادی ضمانت شده توسط کمپانی وام دهنده مسئول نگهداری  $95\%$  است.

اگر ما برای این مزرعه بادی فرض کنیم که افزایش سود ناخالص برابر  $144/MWh$  است، نرخ بهینه دسترسی تأسیسات در  $95/66\%$  قرار داده می شود. بنابراین، این هدف عملیاتی سیاستها و سازمان نگهداری است که در شکل نمودار زیر نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ بهینه سازی هزینه نگهداری مطابق دسترسی تأسیسات تولید برق در دریا

اگر نرخ خرید انرژی کاهش یابد و سود ناخالص  $130/MWh$  شود دسترسی که قابل دست-یابی خواهد بود تنها  $95/20\%$  می باشد.

بنابراین، سیاست و سازمان نگهداری تأسیسات تولید برق در دریا، عوامل اصلی در مدیریت موفق این اموال می باشند. آنها  $OPEX$  (مخارج عملیاتی) و مقدار فروش سالانه<sup>۱</sup> از طریق دسترسی عملیاتی تعیین می کنند.

<sup>۱</sup> Annual turnover

خدمات نگهداری مطابق هدف عملیاتی تعیین شده پی‌ریزی می‌شوند؛ این کار باعث خراب‌شدن برنامه‌ی نگهداری تأسیسات و اجزای اصلی خواهد شد که بر روی ماشین‌های مختلف مخصوص تولید برق قرار دارند: توربین‌های بادی، توربین‌های آبی، مبدل‌های انرژی موجی و غیره.

نگهداری بر اساس سیستم مدیریت نگهداری به کمک کامپیوتر (*CMMS*) سازمان‌دهی می‌شود که در آغاز فرآیند نصب، از برنامه‌ی نگهداری پشتیبانی خواهد کرد و با اطلاعات مربوط به وقایع و خرابی‌ها و گزارش‌های مربوط به فعالیت‌ها تکمیل خواهد شد.

سیستم *CMMS*، منبع اطلاعات آماری رفتار و از کار افتادگی<sup>۱</sup> اجزاء، به مدیر فنی در فرآیند تصمیم‌گیری کمک خواهد کرد. این سیستم امکان کالیبره کردن مجموعه‌ای بهینه از اجزای الکترومکانیکی<sup>۲</sup> و سیستم‌های فرعی را فراهم می‌کند که برای عملیات صنعتی ضروری می‌باشند. همانطور که ما به تأسیسات در دریا می‌پردازیم، اغلب مدیر فنی باید فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه را مطابق کارایی آن‌ها اولویت‌بندی کند و باید تعداد کمی از آن‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه قرار گیرند، زیرا انجام آن‌ها خطرناک و همواره نسبت به مداخله‌ی پیشگیرانه هزینه‌ی بیشتری دارند.

#### ۴-۱۰ فعالیت‌های عملیاتی و نگهداری

در حین عملیات مزرعه بادی، فعالیت‌ها شامل فعالیت‌های عملیاتی مرتبط با تولید انرژی و فعالیت‌های نگهداری می‌شوند که برای حفظ پتانسیل تولید هدف‌گذاری شده‌اند.

##### ۴-۱۰-۱ عملیات

برای عملیات موفق به نظارت دقیق بر کارکرد مزرعه‌ی بادی نیاز است. ما باید به دلیل مدیریت شبکه‌ی برق، بتوانیم تولید روز بعد را پیش‌بینی و تضمین کنیم. برای مزارع بزرگ ممکن است مشوق‌های مالی به اجرای اهداف ضمانت‌شده متصل شوند. بسیاری از افراد به تنهایی به این کار اختصاص داده می‌شوند. پیش‌بینی مشخصه‌های باد به یک حوزه‌ی پیشرفت بسیار مهم در صنعت توان بادی تبدیل شده است.

اگر شرایط ایجاب کند، اگر خرابی در شبکه وجود داشته باشد، اگر تولیدکننده‌ی دیگری کوتاهی کند و غیره، ممکن است در زمان واقعی، مدیر شبکه درخواست کند که توان فراهم‌شده تعدیل شود. بنابراین، فردی به صورت دائمی مسئول مدیریت می‌باشد.

<sup>1</sup>Ageing

<sup>2</sup>Electromechanical

## ۴-۱۰-۲ نگهداری

### کنترل از راه دور

به طور پیوسته بر کارکرد صحیح ماشین‌ها با عنوان نگهداری، نظارت می‌شود. پارامترهای تمامی ماشین‌ها به مرکز کنترل گزارش می‌شوند که در آن اپراتورهای آماده و منتظر مداخله می‌باشند. این مرکز به طور کلی بر روی خشکی واقع شده است. در آینده، اندازه‌ی مزارع بادی فراساحلی، قرارگیری این مرکز نظارت را در دریا بر روی پلتفرم تبدیل توجیه خواهند کرد. این مرکز به تمامی مصالح مورد نیاز برای انجام نگهداری و تعمیر توربین‌های اطراف مجهز خواهد شد که طول زمانی را که ژنراتورهای هوایی در دسترس نیستند، کاهش می‌دهد.

### انواع نگهداری



فعالیت‌های نگهداری مطابق زیر از هم متمایز می‌شوند:

- نگهداری نظام‌مند پیشگیرانه: این کار شامل مداخله‌های منظم برنامه‌ریزی شده همچون بررسی‌های بصری، بررسی اتصالات، تغییرات و میزان روان‌کننده‌ها و غیره می‌شود؛
- نگهداری مشروط پیشگیرانه: این کار به مداخله‌هایی مربوط می‌شود که با توجه به انحراف در عملکرد پارامترهای معینی که از دور نظارت می‌شوند، مشخص می‌گردند. بازدید از مکان مورد نظر انجام می‌شود که هدف آن شناسایی علت این انحراف و روش درست کردن آن می‌باشد. این کار ممکن است به جایگزینی اجزای معیوب منجر شود؛
- نگهداری اصلاحی: در این روش به تعمیراتی اشاره می‌شود که زمان وقوع خرابی انجام می‌شوند. به طور کلی، یک یا چند قطعه باید تعویض شوند.

### پرسنل نگهداری

تیم‌هایی برای مداخله در ماشین‌ها فرستاده می‌شوند که در مانورها قرارگیری قایق در اسکله و وینچینگ<sup>۱</sup> هلیکوپتر آموزش دیده‌اند. قانون آن‌ها را ملزم به داشتن پروانه‌های مخصوصی می‌کند که توسط مربیان متخصص در این زمینه اعطا می‌شوند. این پروانه‌ها باید به صورت دوره‌ای تمدید شوند و تیم‌ها به صورت پیوسته تحت آموزش قرار گیرند.

به طور کلی، آموزش متداول تمامی کارکنان در دریا شامل موثرترین روش تضمین رعایت قوانین ایمنی و انجام کار بدون سانحه می‌شود.

<sup>1</sup>Winching

## مواد مورد نیاز برای نگهداری

تدارکات مربوط به عملیات نگهداری ما را به جداسازی انواع مداخله سوق می دهند:

- نگهداری سبک: یک قطعه‌ی کوچک توسط فردی که از توربین بازدید می کند آورده می شود؛
- نگهداری در مقیاس متوسط: قطعه‌ی یدک بر روی شناور سبک آورده می شود. سپس توسط یک جرثقیل کوچک از پایه‌ی توربین به بالای پلتفرم برده می شود؛
- نگهداری سنگین: یک قطعه‌ی سنگین باید تعویض شود. به منظور حرکت دادن یک قطعه از تجهیزات نصب شده در آشیانه، این مورد آخر به یک جرثقیل جمع‌شدنی مجهز شده است که قادر به حمل چندین تن می باشد. اگر این قابلیت بالابری کافی نباشد از این جرثقیل برای مونتاژ جرثقیلی قوی تر در آشیانه استفاده می شود. مصالح توسط لنجی منتقل می گردد که در پایین توربین مهار شده است.

در نهایت، هنگامی که انجام تعمیرات در دریا بسیار پیچیده باشد پیشنهاد می شود که روتور و آشیانه به طور کامل جدا شده و به بندرگاه بازگردانده شوند. در نتیجه به ظرفیت کشتیرانی مشابه آنچه که برای نصب اولیه استفاده شد، نیاز است.

## عدم دسترسی به توربین‌ها

مدت زمان عدم دسترسی اساساً به سه عامل بستگی دارد:

- زمان تکرار نابهنگام توقف‌ها؛
  - دسترسی پرسنل و تجهیزات وینچینگ به توربین‌ها؛
  - دسترسی قطعات جایگزین.
- مسلماً قابلیت دسترسی در فصل نامناسب در بدترین حالت خود قرار دارد. این حقیقت باعث می شود تا توسعه‌دهندگان توربین‌هایی را نصب کنند که تا جای ممکن قابل اعتماد باشند و به طور نظام‌مند در طول فصل تابستان کار نگهداری را انجام دهند.
- مدیریت موجودی قطعات جایگزین امری ضروری می باشد. ممکن است تولید قطعات معینی ماه‌ها به طول بینجامد و نبود آن‌ها در انبار باعث افزایش مدت زمان عدم دسترسی شود.



#### ۴-۱۱ تخمین هزینه‌های نگهداری

به لطف شبیه‌سازی‌ها و به شرطی که فرضیه‌های مشخصی در نظر گرفته شوند می‌توان هزینه‌های نگهداری را محاسبه کرد. البته در اینجا مسئله تأیید این فرضیه‌ها است که برخی از آن‌ها به ماشین‌هایی مربوط می‌شوند که تاکنون برای آن‌ها تنها میزان محدودی از تجربه به دست آمده است زیرا مدل‌های جدید به سرعت جایگزین مدل‌های قدیمی می‌شوند:

- به عنوان مثال، قابلیت اعتماد در نظر گرفته شده از این فرض تشکیل می‌شود که توربین به یک مداخله‌ی نگهداری نظام‌مند، یک عملیات نگهداری مشروط و یک عملیات نگهداری اصلاحی در هر سال نیاز دارد. در حقیقت، تجربه نشان می‌دهد که با در نظرگیری اینکه تمامی مشکلات در آغاز دوره‌ی عملیاتی شناسایی نمی‌گردند، باید در طول سال اول چندین بازدید انجام شود. اگر مجوزها در ابتدا دوره‌ی عملیات را مشخص نکنند، این کار تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که هزینه‌های نگهداری به لحاظ مالی غیرقابل توجیه شوند؛

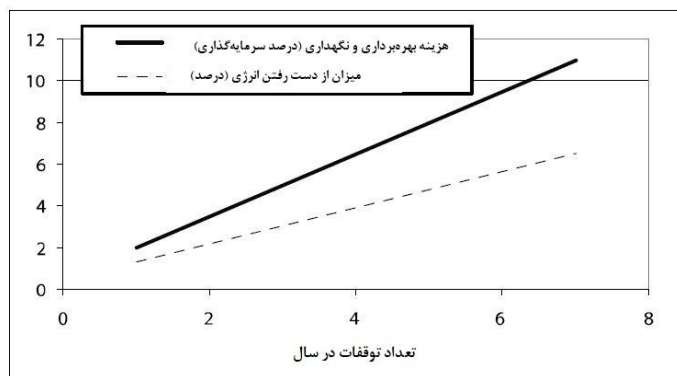
- نرخ خرابی‌های مشاهده شده در طول یک فصل متناسب با توان میانگین موجود در طول آن دوره است. بنابراین، به احتمال زیاد خرابی‌ها در پاییز و تابستان اتفاق می‌افتند که متأسفانه دقیقاً زمانی است که انجام تعمیرات بسیار دشوار است؛

- عملیات نگهداری مستلزم خاموش کردن توربین است که منجر به از دست رفتن انرژی و در نتیجه از بین رفتن سود می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی این نوع در زیر داده شده است. البته این‌ها صرفاً اطلاعات آموزنده می‌باشند.

هزینه‌ی سالانه نگهداری مزرعه‌ی بادی فراساحلی عادی تقریباً ۴٪ CAPEX اولیه است، اگرچه هدر رفت تولید تقریباً ۲٪ است. این تنها در صورتی معتبر است که دو توقف نابهنگام طولانی در سال وجود داشته باشد (یکی برای بازدید سالانه نگهداری مشروط، به علاوه یکی برای نگهداری اصلاحی).

با افزایش تعداد توقف‌های نابهنگام طولانی، هزینه‌ی کلی نیز همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴-۶ هزینه‌های O&M و اتلاف انرژی مطابق با تعداد توقف‌ها

قابل ذکر است که ۸۰٪ از هزینه‌های نگهداری به مداخله‌های اصلاحی (اساساً به هزینه‌ی قطعات جایگزین) مربوط می‌شود. با تغییر تعداد مداخله‌ها در طول عمر مزرعه، هزینه‌ها نیز دچار تحول می‌شوند.

#### ۴-۱۲ تصمیم‌گیری توسط سرمایه‌گذاران

این حقیقت که سرمایه‌گذاران بین‌المللی یا تأمین‌کنندگان انرژی برای راه‌اندازی تأسیسات تولید برق در دریا (همچون مزارع بادی فراساحلی) وارد می‌شوند موارد زیر را برجسته می‌کند:

- مقدار عظیم CAPEX: برای یک مکان صنعتی (اندازه‌ی بحرانی  $100\text{ MW}$  برای باد فراساحلی) در آب‌های ساحلی احتمالاً CAPEX در بازه‌ی ۲۸۰ میلیون یورو و ۳۲۵ میلیون یورو قرار خواهد گرفت؛

- افزایش سطح خطر در تمام طول عمر تأسیسات، از مطالعات مقدماتی تا تخریب ماشین‌ها. به یاد داشته باشید که خطرهای اصلی زیر وجود دارند:

- در حین پردازش پرونده، پاسخ به درخواست برای مزایده یا جستجوی مجوز قانونی و اجرایی: تمامی این مراحل در معرض خطرات اجرایی قرار دارند که ممکن است باعث تعویق برنامه‌ریزی پروژه و همچنین احتمالاً منجر به هزینه‌ی مطالعات اضافی شوند؛

- به دلیل شرایط اقلیمی و وضعیت دریا در حین انجام کارها در دریا؛

- در حین عملیات صنعتی در سطح:  $i$  عملیات فنی (هزینه‌ی فعالیت‌های O&M، دسترسی به ماشینها، طول عمر موثر آنها)؛  $ii$  منبع انرژی اولیه (معمولاً این خطر برای باد فراساحلی به قابل پیش‌بینی نبودن باد مربوط می‌شود که به معنای کم یا زیاد بودن تولید نسبت به

برنامه‌ریزی کاری پروژه می‌باشد؛ *iii*) قیمت انرژی (اگر برق در بازار با قیمت متغیر فروخته شود، حاشیه سود تأسیسات در معرض ریسک بازار قرار خواهد گرفت)؛

- در نهایت، در حین تخریب ماشین‌ها، این امر حدود سی سال پس از آغاز عملیات تأسیسات اتفاق می‌افتد. باید انتظار داشت که ممکن است شرایط غیرمنتظره پیش‌بینی نشده زمان در نظر گرفته شده برای این مرحله را افزایش دهند که در نتیجه هزینه را فراتر از آنچه که در آغاز بودجه‌بندی شده بود افزایش می‌دهند.

با وجود آینده نامشخص، شرکت‌های صنعتی بزرگ به منظور ارزیابی سودآوری پروژه معمولاً صرف ریسکی<sup>۱</sup> (*RP*) قرار می‌دهند که به هزینه‌ی میانگین وزنی سرمایه (*WACC*) استفاده شده در شرکت افزوده می‌شود. سپس پروژه بر مبنای  $WACC + RP$  ارزیابی می‌گردد، یعنی شرکت سرمایه‌گذاری می‌تواند پروژه‌ها را دسته‌بندی کند که مستلزم یک سطح ریسک هم‌ارز مطابق با گستردگی آن است.

بدین منظور، یک سناریوی پایه یا گروهی اساسی از فرضیه‌ها استنتاج می‌شوند که شامل تمامی فاکتورها می‌باشند: *CAPEX*، *OPEX* فنی و اجرایی، دسترسی عملیاتی، قیمت انرژی در طول آن دوره، سود، طول عمر تأسیسات و غیره.

در این شرایط تیم پروژه جمع‌تعدیل‌شده جریان مالی سالانه و سپس مقدار خالص کنونی<sup>۲</sup> (*NPV*) را برای  $WACC + RP$  تعیین می‌کنند:

$$NPV = \sum (\text{مخارج تعدیل شده}) - \sum (\text{دریافتی‌های تعدیل شده})$$

اگر *NPV* مثبت یا صفر باشد این پروژه معیارهای شرکت مسئول سرمایه‌گذاری را برآورده می‌کند.

سرمایه‌گذار علاوه بر سناریوهای پایه، تحلیل‌های اضافی و آزمایش‌های حساسیت را بر روی بسیاری از پارامترها انجام می‌دهند این آزمایش‌ها توسط خود افراد یا با کمک ابداع گشته‌اند: تغییر *CAPEX*، *OPEX*، تولید، دسترسی عملیاتی، طول عمر ماشین‌ها و غیره.

برای پروژه، پیدا کردن هزینه‌ی تعدیل‌شده‌ی تولید (*Cp*) بر *MWh* با در نظرگیری  $WACC + RP$  به عنوان هزینه‌ی تعدیل‌کننده مورد توجه می‌باشد. به طور کلی هزینه‌ی تعدیل‌شده تولید با استفاده از فرمول بسیار ساده‌ی زیر توسط تولیدکنندگان برق تعیین می‌گردد:

<sup>1</sup>Risk premium

<sup>2</sup>Net present value

$$C_p = [\sum (CAPEX + OPEX) \text{ تعدیل شده}] / - \sum (\text{تولیدات تعدیل شده})$$

بهتر است حساسیت هزینه‌ی میانگین تعدیل‌شده بر اساس صرف ریسک ( $RP$ ) اندازه‌گیری شود.

بگذارید ما مثال مزرعه‌ی بادی فراساحلی خارج از انگلستان را در نظر بگیریم. توان نصب‌شده تقریباً  $100 MW$  است. ویژگی‌های ساده‌ی این تأسیسات مطابق زیر می‌باشند:

-  $CAPEX$  ویژه:  $3/050 \text{ €/kW}$  نصب‌شده؛

- فاکتور شارژ ناخالص:  $2950$  ساعت/سال؛

- فاکتور شارژ ناخالص:  $2803$  ساعت/سال، مبتنی بر دسترسی عملیاتی متوسط  $95\%$ ؛

-  $OPEX$  فنی (عملیات و نگهداری):  $25 \text{ €}$  تا  $35 \text{ €/MWh}$  افزایش بر اساس طول عمر تأسیسات؛

-  $OPEX$  اجرایی (دستمزدهای کلی، اجاره، اجاره‌ی زمین و مالیات‌های محلی، بیمه و غیره):  $15 \text{ €/MWh}$ ؛

- طول عمر تأسیسات:  $30$  سال.

مقدار  $WACC$  تولیدکننده‌ی انرژی که به طور معمول در بخش‌های مختلف دنیا سرمایه‌گذاری می‌کند امروزه برابر  $6\%$  قرار داده می‌شود. بر اساس تجربه‌ی به دست آمده از انرژی بادی فراساحلی در انگلستان، آن‌ها در نظر دارند که صرف خطر  $3\%$  را برای پروژه‌ی آنجا نسبت دهند.

در این شرایط،  $WACC + RP$  برابر  $9\%$  قرار داده می‌شود و هزینه‌ی میانگین تعدیل‌شده‌ی تولید به  $152.7 \text{ €/MWh}$  افزایش پیدا می‌کند.

مطابق فرضیه‌های ساده داده‌شده در بالا، تغییر هزینه‌ی میانگین تعدیل‌شده مبتنی بر صرف خطر در جدول ۴-۲ به صورت خلاصه آورده شده است.

هزینه ریسک ( $RP$ )	$WACC + RP$	$C_p$ در $\text{€/MWh}$
$2\%$	$8\%$	$142/8$
$2/5\%$	$8/5\%$	$147/7$
$3\%$	$9\%$	$152/7$
$3/5\%$	$9/5\%$	$157/7$

۱۶۲/۹	٪۱۰	٪۴
-------	-----	----

جدول ۴-۲ تغییر هزینه‌ی میانگین تعدیل‌شده تولید بر  $MWh$  که مبتنی بر صرف خطر نسبت‌داده‌شده به پروژه‌ی باد فراساحلی است.

بنابراین، صرف خطری که سرمایه‌گذار به پروژه‌ی تولید برق در دریا نسبت می‌دهد (به عنوان مثال ممکن است به آن‌ها اجازه دهد تا به درخواست برای مزایده‌های مطرح‌شده توسط یک ایالت برای توسعه‌ی انرژی دریایی پاسخ دهند)

امروزه برای تأمین مالی تأسیسات تولید برق در دریا سه سیستم اصلی وجود دارد:

- سیستم درخواست برای مزایده‌های مطرح‌شده توسط یک ایالت یا منطقه، در این مورد درخواست‌دهنده، رئیس پروژه، قیمت فروش انرژی را در طول دوره‌ی عملیاتی تنظیم می‌کند که در درخواست برای مزایده تعریف شده است.

- قیمت ثابت (گنجانده‌شده در تعرفه) که توسط قانون وضع‌شده در کشور برای فنآوری تولید انرژی دریایی مورد بحث تعریف شده است.

- فروش در بازار که شامل قیمت پایه به علاوه گواهی سبز می‌شود که ممکن است ارزش آن برحسب فنآوری مورد بحث توسط مقامات دولتی تنظیم گردد: این سیستم در انگلستان مورد توجه است.

در هر مورد، ما می‌توانیم ببینیم که معیارهای سودآوری ( $WACC$ ) درون شرکت مسئول سرمایه‌گذاری و ارزشیابی سطح ریسکی ( $RP$ ) که به فنآوری تولید انرژی دریایی نسبت داده می‌شود، فاکتورهای تعیین‌کننده‌ای می‌باشند که به سرمایه‌گذار این امکان را می‌دهند تا در بازار نسبت به رقابت موضع‌گیری کند.

در مورد اول (سیستم درخواست مزایده‌ها)، انتخاب  $WACC + RP$  انجام‌شده توسط شرکت باعث می‌شود که آن کم و بیش در رابطه با رقابت‌کننده‌ها پرخاشگرانه باشد. برای دو سیستم آخر، کاربرد  $WACC + RP$  در صورتی که  $NPV$  مثبت باشد به شرکت برای سرمایه‌گذاری چراغ سبز می‌دهد یا اگر  $NPV$  به صورت منفی درآید هشدار خروج از پروژه می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

انرژی دریایی به ویژه توان بادی فراساحلی دارای منبع بالقوه‌ی عظیمی می‌باشند که به صورت گسترده پیرامون قاره‌های مختلف موجود است؛ صرف نظر از ملاحظات مالی، این مقدار برای تأمین چند برابر مصرف انرژی جهان کافی خواهد بود. با در نظرگیری اقدامات لازم درباره‌ی

محدودیت‌های محیطی، فنی و مالی، تبدیل انرژی دریایی به الکتریسیته (باد فراساحلی به تکامل رسیده است و توربین‌های آبی در حال ظهور می‌باشند، مبدل‌های انرژی موجی در مرحله‌ی آزمایش می‌باشند) در جایگاه بسیار مهمی از بسته‌ی انرژی آینده قرار خواهد گرفت و تا ۲۰۳۰ باید چندین درصد از برق جهان را تولید کند (برآورد  $35000 TWh$ ).

با این حال، محیط دریایی پیچیده و مستعد خطر است و باید با دریا با دقت بسیار برخورد شود و طبیعت فرساینده‌ی آب و اثرات وقایع استثنائی همچون طوفان، امواج شکننده یا جزرومدهای بزرگ در نظر گرفته شوند. فعالیت انسان در دریا بسیار دشوارتر و خطرناک‌تر از خشکی است. چنین فعالیتی به تجهیزات دریایی ویژه‌ای نیاز دارد که هزینه‌ی کار و عملیات را در حین انجام مطالعات در آن مکان، در حین توسعه‌ی پروژه‌ها، ساخت آن‌ها و عملیات آن‌ها افزایش می‌دهد.

امروزه ما از مزیت کسب تجربه از نیروگاه‌های دریایی بی‌شمار همچون توربین‌های بادی فراساحلی نصب‌شده در اروپا که بیش از  $3000 MW$  هستند، بهره‌مند می‌شویم. احداث و سپس عملیات تجاری‌سازی این نیروگاه‌های برق در محیط طبیعی و اجتماعی انجام می‌شود که مملو از خطراتی است (باد، امواج، طبیعت بستر دریا، حضور پرندگان، ماهی و پستانداران دریایی، تضاد با دیگر فعالیت‌های دریانوردی همچون ماهیگیری و دریانوردی برای مقاصد تجاری یا تفریحی و در نهایت تغییر احتمالی در قوانین در حین انجام مطالعات و هنگامی که کارمزد تولیدکنندگان پرداخت شده است) که صنعت‌گران باید در طول مراحل مختلف پروژه ارزیابی و بر آن‌ها غلبه کنند. علاوه بر این، خطرات فنی و صنعتی دیگری وجود دارد که باید همچون تکنولوژی استفاده‌شده، اجزاء و ماشین‌های استفاده‌شده و وسایل حمل‌ونقل و جابجایی در دریا که برای انجام کار مورد نیاز می‌باشند در نظر گرفته شوند.

هزینه‌ی نصب تأسیسات تولید برق در دریا بسیار زیاد می‌باشد. در مورد انرژی بادی فراساحلی هزینه‌ی مشخص آن در بیشتر مناطق مطلوب  $3000 \text{€}/kW$  است بنابراین، بسیار هزینه‌بر می‌باشد در حالی که توان بحرانی تأسیسات چندصد  $MW$  است. به طور معمول ممکن است هزینه‌ی نصب مزارع بادی فراساحلی میلیاردها یورو باشد. در نتیجه، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ( $O\&M$ ) در دریا نسبت به نیروگاه‌های برق متداول در خشکی بسیار بیشتر می‌باشند؛ به عنوان مثال، هزینه‌ی  $O\&M$  برای مزارع بادی فراساحلی ( $25\text{€}$  تا  $35\text{€}/MWh$ )، با بالا رفتن عمر دستگاه افزایش پیدا می‌کند) تقریباً دو برابر مزارع بادی ساحلی است.

تنها شرکت‌هایی که ظرفیت صنعتی اثبات‌شده و قابلیت حل‌شدن مالی مستحکم دارند می‌توانند توسعه در بخش انرژی دریایی را در نظر بگیرند. سرمایه‌گذاران به منظور تقسیم خطرات صنعتی و محیطی تمایل دارند تا در کنسرسیوم بین‌المللی تشکیل گروه دهند تا تجربه و

کاردانی افراد وارد شده (دستیاران، طراحان، سازندگان، سازندگان ثانویه و غیره) یکدیگر را تکمیل کنند که طبیعتاً برای افراد قرض‌دهنده تضمین‌کننده می‌باشد. امروزه، با در نظرگیری خطرات تخمین‌زده شده توسط تجار مختلف، چنین پروژه‌هایی به ندرت با ساختار آماده به کار طراحی سازه بر عهده گرفته می‌شوند؛ در عوض، ترجیح داده می‌شود که پروژه را به چندین لات به خوبی تعریف شده سازمان‌دهی کرد، به عنوان مثال، ژنراتورهای بادی، حمل‌ونقل، نصب در دریا، شبکه‌ی برق و ایستگاه انتقال در دریا، اتصال به شبکه‌ی حمل‌ونقل عمومی و غیره. همچنین مطالعات مهندسی و دقیق و طراحی و ساخت تقویت‌شده، در این مورد، مدیر پروژه باید واسطه‌های میان لات‌های مختلف را هماهنگ کند.

بنابراین، تقسیم این پروژه‌ها خطرات مشاهده شده توسط افراد قرض‌دهنده را بهبود نمی‌بخشند، بنابراین هزینه‌ی مالی پروژه بیشتر خواهد شد که شامل صرف ریسک تنظیم‌شده مطابق پیچیدگی، ریسک کارها و عملیات و تقسیم پروژه به چندین لات می‌شود.

سرمایه‌گذاران برای خود تصمیم خواهند گرفت تا با وارد کردن صرف ریسک اعمالی به معیارهای خود برای سوددهی سرمایه جاری، پول تزریق کنند (نرخ داخلی بازگشت پروژه، نرخ بازگشت سرمایه‌های خصوصی و غیره). مدل مالی ساده‌ی مزرعه‌ی بادی دور از ساحل انگلستان با  $100\text{ MW}$  توان نصب‌شده و ضریب تخلیه شبکه  $2.800$  ساعت در هر سال نشان می‌دهد که اگر به ترتیب صرف ریسک  $2\%$  یا  $4\%$  به هزینه‌ی میانگین وزنی سرمایه  $(WACC)$  اضافه شود، هزینه‌ی تولید برق از  $143\text{ €}$  به  $163\text{ € / MWh}$  افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، ارزش فعلی خالص  $(NPV)$  محاسبه شده‌ی پروژه برحسب صرف ریسک مورد بحث به شرکت خواهد گفت تا با در نظرگیری فرضیه‌های فنی، اقتصادی و مالی مورد بحث، اگر  $NPV$  مثبت باشد سرمایه‌گذاری کند و یا اگر منفی باشد، یعنی به لحاظ مقدار مخرب باشد، از آن خودداری کند.

#### ۴-۱۴ کتاب‌شناسی

- [BOU 09] BOULENGER A., PACHAUD C., *Aide-mémoire, Surveillance des machines par analyses des vibrations*, Dunod, 2009.
- [CLE 06] CLELAND D., GAREIS R., *Planning, Global Project Management Handbook (2nd edition)*, McGraw-Hill Books, 2006.
- [FIN 07] FINNERTY J., *Project Financing, Asset-Based Financial Engineering (2nd edition)*, Wiley Finance, 2007.
- [INT 09] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Technology Roadmap – Wind Energy*, 2009.
- [MON 08] MONCHY F., VERNIER J., *Maintenance, méthodes et*

*organisations (3rd edition),  
Dunod, 2008.*

*[PER 00] PERROT J., CHATELUS G., Financement des infrastructures et  
des services collectifs, Presse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées,  
2000.*





# ۵

## نصب توربین‌های بادی در دریا

### ۵-۱ مشخصات ویژه‌ی محیط دریایی

با توجه به این که این مشخصات ویژه در فصل‌های قبل ارائه شده‌اند ما در اینجا بر تفاوت‌هایی متمرکز می‌شویم که هنگام تلاش برای نصب توربین‌های بادی در دریا به جای خشکی آشکار می‌شوند.

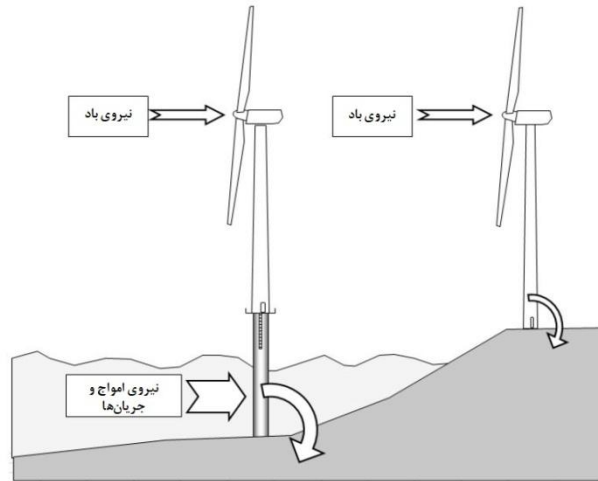
### ۵-۱-۱ اثر امواج

در حالی که توربین‌های بادی زمینی بر روی فونداسیون‌هایی ثابت شده‌اند که بلافاصله در زمین و زیر پایه‌ی دکل قرار گرفته‌اند، توربین‌های بادی فراساحلی باید به سازه‌های پشتیبان اضافی مجهز شوند که در تمام ارتفاع ستون آب قرار گرفته و تنش‌ها را به بستر دریا منتقل می‌کنند. ممان خمشی نیروی باد واقع بر توربین، با ارتفاع این سازه افزایش پیدا می‌کند. تنش‌ها همچنان با نیروهای هیدرودینامیکی امواج و جریان‌های واقع بر قطعه‌ی مغرق افزایش پیدا می‌کنند (شکل ۵-۱ را ببینید).

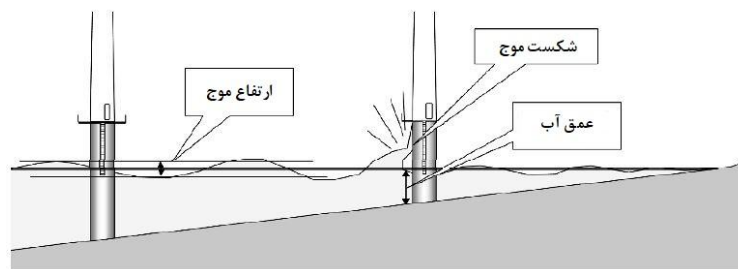
رفتار موج<sup>۱</sup> یک پدیده‌ی بسیار پیچیده است که به طور پیوسته مورد پژوهش قرار دارد، به عنوان مثال، در یک محل مشخص، ممکن است امواج از اثر باد مجاور ناشی شوند که در آن مورد با دوره تناوب نسبتاً کم، نامنظم می‌باشند. ممکن است امواج از نقاط دیگر – گاهی اوقات بسیار دور- آمده باشند که در این مورد ما امواج نسبتاً منظم با دوره تناوب زیاد مشاهده می‌کنیم.

---

<sup>۱</sup>Wave Action



شکل ۵-۱ مقایسه‌ی نیروها و ممان‌های معکوس واقع بر توربین بادی در خشکی و در دریا - نیروهای هیدرودینامیکی به نیروهای آیرودینامیکی افزوده می‌شوند. بازوی فشار<sup>۱</sup> ممان خمشی نسبت به زمین افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵-۲ شکست امواج - این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد که عمق کاهش پیدا کند، بنابراین توربین‌های در معرض آن، لزوماً در آب‌های کم عمق قرار نگرفته‌اند.

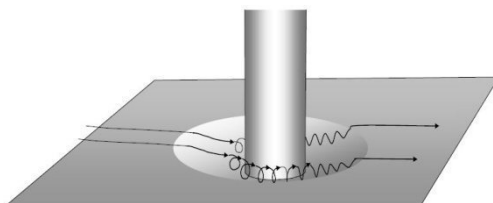
هنگامی که امواج به ساحل برسند و ارتفاع آن‌ها بزرگتر از تقریباً  $0/6$  عمق آب باشد، متمایل شده و ناپایدار می‌گردند و سپس دچار شکست شده و خیز برمی‌دارند (شکل ۵-۲ را ببینید). این خیز موج<sup>۲</sup>، مقدار زیادی از آب را به جلو پرتاب می‌کند و اگر این پدیده درست در مکان ثابت سازه اتفاق بیفتد ممکن است نیروی ضربه‌ای موضعی بسیار زیادی را وارد نماید. برحسب ارتفاع امواج و جزرومد، خیز موج در مکان‌های مختلف اتفاق می‌افتد و یکی از نگرانی‌های اولیه - ی طراحان مزارع بادی فراساحلی تعیین احتمال یافتن شرایط موج شکننده در منطقه و ارزیابی اندازه آن است.

<sup>1</sup>Rocker Arm

<sup>2</sup>Wave Surge

۵-۱-۲ فرسایش<sup>۱</sup>

انواع متحرک زمین همچون بسترهای شنی، در معرض اثر امواج و جریانها قرار دارند. حرکت آب که از امواج و جریانها ناشی می‌شود باعث ایجاد ورتکسهای "نعل‌اسبی"<sup>۲</sup> می‌شود که اطراف سازه‌ی قرارگرفته در زمین می‌چرخند و می‌توانند رسوبات را بالا برده و آنها را در فواصل دور رها سازند (شکل ۳-۵ را ببینید). یک حفره فرسایشی پیرامون سازه گسترش پیدا می‌کند که تا حدودی بدون پوشش رها می‌شود. در مورد فونداسیون‌های تک‌ستونه، حفره‌هایی یافت شده است که به اندازه‌ی ضخامت لوله عمق دارند. بنابراین، اجرای تمهیداتی جهت اجتناب از این پدیده ضروری می‌باشد.



شکل ۳-۵ ورتکس نعل‌اسبی و شکل‌گیری حفره فرسایشی

به منظور جلوگیری از فرسایش، سازه با لایه‌ای از سنگ که به اندازه‌ی کافی بزرگ هستند احاطه می‌شود تا گرداب‌ها نتوانند آنها را به حرکت دریاورند (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵ آزمایش‌هایی بر روی سنگ‌ریزه‌ها برای جلوگیری از فرسایش پیرامون یک ستون در حوضچه‌ای با موجی در این کانال به عرض ۵ m (شرایط روبه‌رو شده در دریا دوباره تولید شده‌اند). بستر با ماسه پوشیده شده و بلوک‌ها، سنگ‌ریزه‌های محافظ را شبیه‌سازی می‌کنند. این آزمایش با پر کردن حوضچه با آب و تولید امواج در

<sup>۱</sup>Scouring<sup>۲</sup>Horseshoe

مقیاس بیانگر شرایط طرح ریزی شده در دریا انجام می‌شود. ما می‌توانیم در این عکس مشاهده کنیم که هنگامی که حوضچه تخلیه گشت چگونه بلوک‌ها توسط خیز آب<sup>۱</sup> جایگزین شده‌اند (عکس توسط نویسنده گرفته شده است)

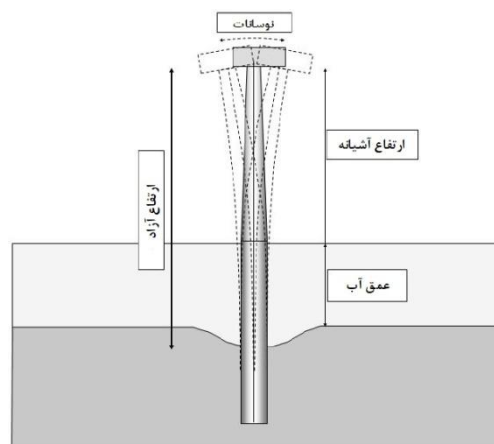
## ۵-۲ طراحی سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی

### ۵-۲-۱ معیارهای تحمل‌کننده‌ی اندازه سازه

توربین‌های بادی باید قادر به تحمل کرنش‌های شدید در شرایط طوفانی باشند. یک توربین ۵MW گاهی اوقات در معرض تندبادهایی به سرعت  $50 \text{ m/s}$  قرار می‌گیرد که به محرک MN ۲ (مگانیوتن) در روتور یا نیروی افقی ۲۰۰ تنی در آشیانه تبدیل می‌شوند. این امواج می‌توانند نیرویی دو برابر بر قطعه‌ی مغرق سازه وارد کنند. تمامی این بارها توسط فونداسیون جذب می‌گردند.

عامل دیگری که اندازه را در مرحله‌ی طراحی تعیین می‌کند، خستگی مکانیکی سازه‌ها می‌باشد. توربین‌های بادی در معرض ۴ میلیون موج در هر سال قرار دارند در حالی که روتور ۷ میلیون بار می‌چرخد. در نتیجه، جوش سطوح فلزی و تمامی پیچ‌های ثابت دفعات بسیاری در معرض کرنش‌های متغیر در طول ۲۰ سال عمر توربین بادی قرار می‌گیرند.

آشیانه بالای سازه قرار گرفته که از بستر دریا به آن فشار وارد می‌شود و بنابراین آشیانه به تنهایی یک تشدیدکننده‌ی مکانیکی بشمار می‌رود که قابلیت نوسان تحت بارهای بادی و آبی را دارد (شکل ۵-۵ را ببینید).



شکل ۵-۵ فاصله‌ی کلی دهانه‌ی آزاد<sup>۱</sup> توربین بادی فراساحلی

<sup>۱</sup>Swell

اگر اولین معیار طراحی سازه توانایی آن در تحمل بارهای شدید باشد، معیار دوم بدین صورت است که سازه نباید با یکی از منابع چندگانه تحریک دچار تشدید شود. از جملهی آنها موارد زیر می‌باشند:

- اثر امواج بر سازه‌ی پشتیبان با دوره‌ی تناوبی در بازه‌ی ۶ تا ۱۵ ثانیه؛
- اثر نامتوازن کننده‌ی<sup>۲</sup> چرخش روتور که در توربین‌های بادی بزرگ با دوره‌ی تناوب ۴-۶ ثانیه می‌چرخد (و روتور با سرعت متغیر در بازه‌ی ۱۰ الی ۱۵ دور بر دقیقه می‌چرخد)؛
- عبور پره از مقابل دکل، بنابراین فرکانس سه برابر مقدار بالا یا دوره‌ی تناوب میان ۱.۳ تا ۲ ثانیه.

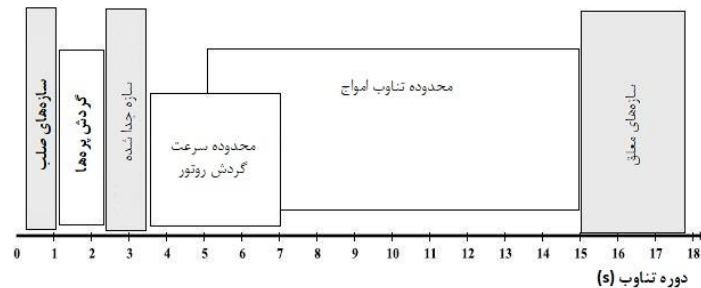
شکل ۵-۶ این پدیده را توضیح می‌دهد که هنگامیکه دوره‌ی تناوب خود سازه به هیچ فرکانس تحریکی مربوط نشود دو روزه‌ی محتمل وجود خواهد داشت. این دوره یا کمتر از ۱ ثانیه است یا مابین ۲ و ۴ ثانیه قرار دارد. اولین سازه‌ها، توربین‌های بادی کوچک به سختی قابل ساخت بودند و به اولین معیار مربوط می‌شوند. علی‌رغم توربین‌های بادی بزرگی که در آب‌های کم‌عمق کار گذاشته شده‌اند، تنها گزینه‌ای که در رابطه با عدم به کارگیری مقدار زیادی فولاد در سازه به لحاظ مالی عملی است، طراحی سازه مطابق معیار دوم می‌باشد، یعنی، به طور معمول دوره‌ی تناوب حول ۳ ثانیه که از وسایل اصلی تحریک مجزا شده است.

توربین‌های بادی شناور بیانگر یک مورد ویژه می‌باشند. تحلیل، طراحان را به سمت انتخاب سازه‌های شناوری سوق می‌دهد که دوره‌ی تناوب رول و پیچ آنها بیشتر از دوره‌ی تناوب امواج (تقریباً ۲۰ ثانیه) است.

دروه‌ی تناوب سازه‌ی مهارشده در بستر دریا به ارتفاع کلی، با در نظرگیری عمق آب و ارتفاع آشیانه بالای آب و همچنین اینرسی مکانیکی بستگی دارد.

<sup>1</sup>Free span

<sup>2</sup>Unbalanced effect

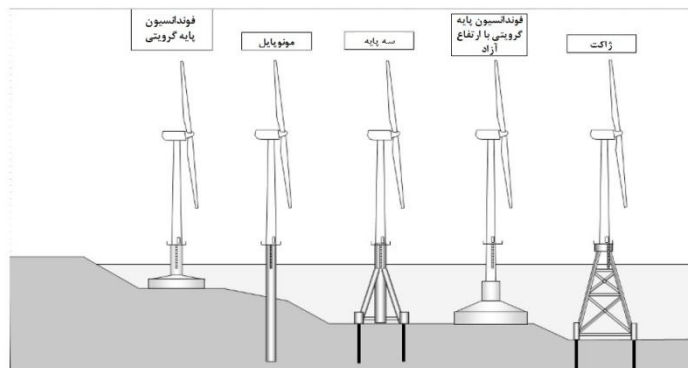


شکل ۵-۶ معیارهای تحمل‌کننده‌ی اندازه‌ی دوره‌ی تناوب نوسان سازه‌های توربین بادی فراساحلی.

### ۵-۲-۲ انواع اصلی سازه‌های پشتیبان توربین‌های بادی فراساحلی

بر حسب معیارهای اصلی مذکور برای طراحی، می‌توان از پیشنهادات و راه‌حلهایی که انتخاب سازه‌های پشتیبان موردنیاز را معین می‌کند، ق‌دردانی کرد. در شکل ۵-۷ به این موضوع اشاره شده است. ابتدا بگذارید ما یک ویژگی مشترک تمامی این گزینه‌ها را متذکر شویم که در رابطه با ارتفاع اتصال میان سازه‌ی پشتیبان و پایه‌ی دکل توربین بادی است. در اینجا ما سکویی را پیدا می‌کنیم که می‌توانیم از طریق یک در به درون دکل دسترسی پیدا کنیم. اینجا همچنین جایی است که کابل‌های الکتریکی قبل از اینکه در امتداد سازه‌ی پشتیبان به بستر دریا بروند از دکل بیرون می‌زنند. بسیار حیاتی است که سکو توسط امواج احاطه نشود. بنابراین با در نظرگیری جزرومدها و بلندترین امواجی که احتمالاً در این مکان جذب شوند، به اندازه‌ی کافی بالا قرار داده می‌شود.

مطابق آنچه که در پاراگراف قبل گفته شد هنگامی که عمق آب و همچنین فاصله‌ی آزاد دهانه افزایش پیدا کند و به منظور اجتناب از وارد شدن دوره‌ی تناوب خود سازه به ناحیه‌ی خطر، باید صلبیت پایه‌ی سازه افزایش پیدا کند. این تصویر نشان می‌دهد که چندین پاسخ امکان‌پذیر می‌باشند.



شکل ۵-۷ انواع اصلی سازه‌ی توربین‌های بادی فراساحلی

### فونداسیون‌های گرویتی<sup>۱</sup>

فونداسیون گرویتی اساساً یک پایه‌ی بزرگ بتنی است که بر روی بستر دریا قرار گرفته است. این پایه به لطف وزن واردشده به زمین، توربین را در جای خود نگه می‌دارد. انتخاب این نوع از تکیه‌گاه به چند عامل بستگی دارد:

- زمین باید به اندازه‌ی کافی صلب باشد تا تحت وزن پایه نشست نکند؛
- ارتعاشات سازه نباید به سست شدن زمین منجر نشود، بنابراین استفاده از این فونداسیون در انواع مشخصی از بستر دریا که از ترکیب ماسه و گل<sup>۲</sup> ساخته شده‌اند جلوگیری می‌شود؛
- هنگامی که زمین سنگلاخی است، فونداسیون گرویتی مانند مورد فونداسیون‌های تک‌ستونه، استقرار بدون نیاز به حفاری را سهولت می‌بخشد؛
- پایه‌ی بتنی بسیار صلب است. اگر برج زیر آب نیز از بتن ساخته شده باشد مجموعه بسیار صلب می‌گردد. استفاده از بتن به ما امکان می‌دهد تا رابطه‌ی میان عمق آب و دوره‌ی تناوب نوسان توربین را به صورت قابل توجه تغییر دهیم و استفاده از طراحی‌های متغیر را که مطابق با عمق آب می‌باشند، امکان‌پذیر می‌کند.

توربین بادی باید عمودی باشد. به این دلیل، اگر از پایه‌ی بتنی استفاده شود باید اندازه‌گیری‌هایی انجام داد تا تضمین کرد که اتصال پایه توربین افقی است. یک راه حل، قرار دادن بستری

<sup>۱</sup>Gravity foundations

<sup>۲</sup>Silt



افقی از سنگریزه‌ها<sup>۱</sup> بر روی زمین است. راه‌حل‌های دیگر، طراحی یک بال رابط قابل تنظیم در پایه‌ی برج توربین خواهد بود.

### مونوپایل<sup>۲</sup>

تا به امروز، اکثر توربین‌های بادی فراساحلی بر روی مونوپایل‌ها نصب گشته‌اند (لوله‌های فلزی که برج توربین را تا زیر زمین گسترش می‌دهند). هنگامی که بستر زمین از رسوبات ماسه‌ای ساخته شده است، مونوپایل با قرار گرفتن توسط چکش هیدرولیکی نصب می‌گردد. اگر زمین سنگلاخی باشد، باید از قبل حفاری انجام شود و لوله با سیمان در جای خود قرار گیرد یا لوله باید با پایه‌ی بتنی ثابت شود که ما را دوباره به طراحی قبلی باز می‌گرداند.

مونوپایل‌ها راه‌حلی هستند که به کمترین مقدار فولاد نیاز دارند و به صرفه‌ترین حالت می‌باشند زیرا در آن می‌توان از یک لوله‌ی فلزی استفاده کرد. مونوپایل از بخش‌های لوله‌ای به هم جوش‌خورده ساخته شده است. ضخامت دیواره‌ی هر قسمت به منظور مقاومت بهتر در مقابل کرنش موضعی بهینه‌سازی می‌شود. بنابراین، ضخیم‌ترین قسمت لوله در سطح زمین است که در آن جا ممان خمشی بیشترین مقدار است. این ضخامت به تدریج تا بالا، تا بال رابط پایه‌ی برج و به سمت انتهای پایینی مونوپایل کاهش پیدا می‌کند. در آنجا ممان خمشی صفر خواهد بود. با این حال، ضروری است که دیواره در پایین کمترین ضخامت را داشته باشد تا در مقابل کرنش‌های تجربه‌شده در لحظه‌ی قرارگیری در محل دوام بیاورد. به منظور توضیح این ایده‌ها، یک توربین ۵MW نصب‌شده در ۲۵m از آب به مونوپایلی به قطر ۶m که ۴۰m به داخل زمین فرو رفته است، نیاز دارد. ضخامت بیشینه‌ی دیواره در سطح زمین ۶۵mm بوده و جرم مونوپایل ۴۵۰ تن است.

با این حال، دو عامل وجود دارد که استفاده از مونوپایل‌ها را محدود می‌کنند:

- در آب‌های عمیق، تراست ایجاب می‌کند که مونوپایل‌ها قطر بسیار زیادی داشته باشند تا به صلبیت مطلوب و دوره‌ی تناوب حول ۳ ثانیه دست پیدا کنند. قطر آن که از قبل در آب‌های کم‌عمق برای توربین‌های ۵MW بیشتر از ۶m بوده است ممکن است بیشتر از ۷m یا ۸m شود.
- تولید لوله‌های بسیار بزرگ و بردن آن‌ها به زمین ممکن است فراتر از حدود امکان‌پذیری ابزارهای موجود در بازار باشد.

### سه پایه‌ها و چهار پایه‌ها<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>Ballast

<sup>۲</sup>Mono-pile

هنگامی که آب عمیق است می‌توان سازه‌های فلزی را در نظر گرفت که صلبیت آن‌ها با سازه‌ی شامل تیرهای تقویت‌کننده کافی است (شکل ۵-۸ را ببینید). برای توضیح این ایده‌ها بگذارید ما متذکر شویم که یک سه‌پایه‌ی در نظر گرفته‌شده برای توربین بادی  $5\text{ MW}$  نصب‌شده در آب به عمق  $30\text{ m}$  تقریباً  $700$  تن وزن دارد. این نوع از سازه نسبت به مونوپایل کمتر در معرض اندازه‌ی توربین یا عمق آب قرار دارد، زیرا دوره‌ی تناوب نوسان آن با افزایش اینرسی مکانیکی با استفاده از گسترش پهنای پایه‌ها قابل تنظیم می‌باشد.

این سازه‌ها در هر گوشه توسط ستونی مهار شده‌اند و به داخل زمین کشیده شده و توسط یک نوع مخصوص دوغاب سیمان<sup>۲</sup> به سازه متصل می‌گردند.



شکل ۵-۸ نمونه‌ی سه‌پایه نصب‌شده برای توربین بادی  $5\text{ MW}$  در خشکی. اگر توربین در دریا نصب شده بود، این خط بیانگر سطح آب بود (عکس توسط نویسنده گرفته شده است)

هنگامی که سازه شامل تعداد زیادی تیر آهن در بخش‌های کوچک باشد، اینگونه سازه را "جکت"<sup>۳</sup> می‌نامند که معمولاً به عنوان پاسخ برای سکوه‌های حفاری نفتی فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۵-۹ را ببینید).

<sup>1</sup>Tripod/quadripd

<sup>2</sup>Cement grouting

<sup>3</sup>Jackets



شکل ۵-۹ نمونه‌ی پوشش نصب‌شده برای توربین ۵ MW در خشکی (عکس توسط ژاک روئر<sup>۱</sup> گرفته شده است)

نام پروژه	اسکوربی سندز <sup>۲</sup>	سی-پاور <sup>۳</sup>	آلفا ونتوس <sup>۴</sup>	بئاتریس <sup>۵</sup>
توربین بادی	۵ MW	۵ MW	۵ MW	۵ MW
عمق آب	۱۰m	۲۷m	۵۰m	۵۰m
مدل نگهدارنده	مونوپایل به قطر ۴ متر	فوندانسیون بتنی مخروطی	سه پایه	جکت
وزن نگهدارنده	۲۱۰ تن استیل	۲/۴۰۰ تن استیل	۷۰۰ تن استیل	۷۵۰ تن استیل
			۱۰۰ تن در ۳ پایه	۱۱۵ تن در ۴ پایه

جدول ۵-۱ مقادیر متداول برای سازه‌های توربین‌های بادی فراساحلی

### ۵-۳ مونتاژ توربین‌های بادی فراساحلی

نصب توربین بادی فراساحلی شامل قراردادن تجهیزات به وزن صدها تن در محلی به ارتفاع بیش از ۱۰۰m بر روی دریای متحرک می‌شود. شکل ۵-۱۰ راه‌حل‌هایی مختلفی را نشان می‌دهد که می‌توان مورد استفاده قرار داد.

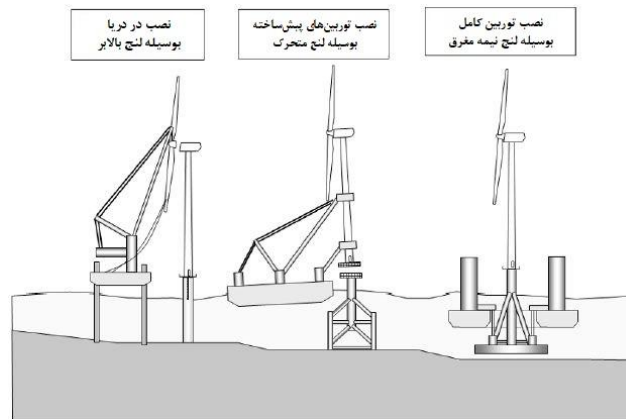
<sup>1</sup>Jacques Ruer

<sup>2</sup>Scroby Sands (UK)

<sup>3</sup>C-Power (Belgium)

<sup>4</sup>Alpha Ventus (Germany)

<sup>5</sup>Beatrice (UK)



شکل ۵-۱۰ روش‌های گوناگون نصب

### نصب به وسیله‌ی بارج بالابر<sup>۱</sup>

مونتاز توربین‌های بادی فراساحلی در ابتدا به عنوان مونتاز مجدد توربین‌های بادی زمینی در دریا در نظر گرفته می‌شد. یعنی ابتدا سازه‌ی پشتیبان و به دنبال آن عناصر مختلف برج، سپس آشیانه و در نهایت روتور نصب می‌شود. این عملیات بر روی خشکی با استفاده از جرثقیلی قرار گرفته در پایه‌ی توربین انجام می‌شود. تکرار این فرایند در دریا مستلزم استفاده از جرثقیلی است که به طور محکم به بستر دریا متصل شده است و این کار غالباً با یک کشتی قرار گرفته در بستر دریا به وسیله‌ی پایه‌های قابل جمع‌شدن انجام می‌شود (شکل ۵-۱۱ را ببینید). ما در اینجا درباره‌ی سکوی بالابر صحبت می‌کنیم. قبل از اینکه یک کشتی چندین هزار تنی را شناور کنیم ما باید مطمئن باشیم که پایه‌ها پس از بالا بردن تجهیزات در زمین گیر نمی‌کنند. در نتیجه، فرآیند بالا بردن کشتی به خارج از آب مدت زمان معینی طول می‌کشد که در آن حین کشتی بسیار در معرض اثر امواج قرار می‌گیرد بنابراین هنگامی که دریا متلاطم بوده یا جریان بسیار قوی باشد، این عملیات غیرممکن می‌شود.

مزیت این روش این است که در آنجا ممکن است چندین کشتی مخصوص حاضر باشد که یکی فونداسیون و کشتی‌های دیگر توربین‌ها را نصب می‌کنند. این امر، به شرط تدارک منابع و آماده‌سازی مصالح مناسب بندرگاه، نصب تعداد بسیاری توربین در طول فصل ملایم را امکان‌پذیر می‌کند.

<sup>۱</sup>Self-elevating barge

کشتی که می‌تواند توربین بادی  $5\text{ MW}$  را مونتاژ کند با پایه‌هایی که  $45\text{ m}$  زیر بستر حفر شده‌اند قادر به بالا بردن آشیانه  $350$  تن به  $100\text{ m}$  بالای آب است. این کشتی معمولاً به طول  $130\text{ m}$  بوده،  $20000$  تن را جابجا و در حین انجام کارها  $70$  خدمه‌ی قوی را حمل می‌کند.



شکل ۵-۱۱ مونتاژ یک توربین بادی  $5\text{ MW}$  با استفاده از بارج بالابر. روتور به  $100\text{ m}$  بالای سطح آب بالا برده می‌شود (© DOTI GmbH)



شکل ۵-۱۲ نصب توربین  $5\text{ MW}$  از قبل مونتاژ شده با استفاده از بارج شناور. سازه‌ی جکیت از قبل نصب گشته است. اتصال میان جکیت و برج توربین به خوبی بالای سطح آب قرار دارد زیرا حتی در جزرومد یا در حین طوفان نباید غرق شود به سیستم‌های جذب شوک در پایه‌ی دکل و بالای پوشش توجه کنید. این سیستم‌ها جدا شده و هنگامی که نصب انجام گشت بازگردانده می‌شوند (© REPOWER)

### نصب با استفاده از بارج شناور

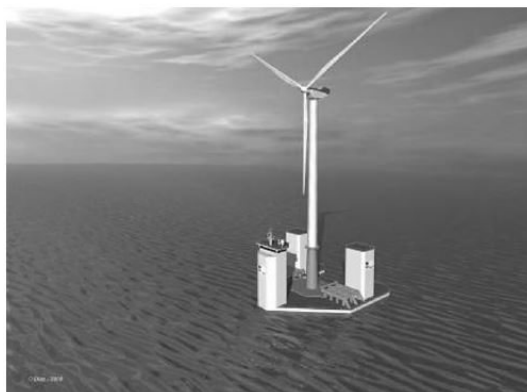
استفاده از بارج بالابر در عمق  $40\text{ m}$  دشوار می‌شود. بنابراین استفاده از بارج شناور قابل تصور می‌باشد. شکل ۵-۱۲ نشان می‌دهد که چگونه ممکن است عملیات بدین روش صورت گیرد. سازه‌ی پشتیبان جکیت از قبل نصب گشته و محکم به زمین مهار شده است. بارج با امواج

حرکت می‌کند. هنگامی که پایه‌ی توربین با سقف سازه‌ی پشتیبان در تماس قرار می‌گیرد کوچکترین حرکت کنترل نشده می‌تواند باعث ایجاد شوکی شود که ممکن است به تجهیزات آسیب برساند. با استفاده از سازه‌های واسط در پایه‌ی دکل بر این مسئله غلبه می‌شود که شامل جذب‌کننده‌های شوک می‌شود که امکان انتقال تدریجی بار را از جرثقیل به سازه‌ی پشتیبان فراهم می‌کنند. این جذب‌کننده‌های شوک پس از نصب جدا، هنگامی که توربین در محل قرار گرفت، جدا می‌گردند.

### نصب با استفاده از بارج نیمه‌مغرق

هنگامی که پایداری توربین با استفاده از فونداسیون گرویتی تضمین شد، یک پاسخ جالب توجه انتقال کل پایه می‌باشد زمانیکه توربین از قبل در بندرگاه مونتاژ شده است (شکل ۵-۱۳ را ببینید).

بارج حامل باید به اندازه‌ی کافی برای بالا بردن پایه‌ی سنگین قدرتمند باشد و همچنین به اندازه‌ی کافی پایدار باشد تا در حین ترانزیت آشیانه به مکان دچار شتاب ناخواسته نشود. برای اینکه سازه به آرامی در محل قرار گیرد بارج به طور جزئی در آب غرق می‌شود تا حساسیت مجموعه به حرکت امواج محدود گردد. همچنین با کاهش فاصله میان بستر دریا و پایه، لایه‌ی باقیمانده‌ی آب به طور موثر از حرکت‌های عمودی جلوگیری می‌کند.



شکل ۵-۱۳ شماتیکی از بارج نیمه‌مغرق برای حمل و نصب توربین از قبل مونتاژ شده بر روی پایه‌ی بتنی (Saipem©)

### ۴-۵ کابل‌های الکتریکی

یک مزرعه‌ی بادی فراساحلی شامل کابل‌های الکتریکی بسیاری می‌شود. در فصل ۱۵ به این جنبه‌ی بسیار مهم از پروژه‌های فراساحلی پرداخته می‌شود. در اینجا تنها به این موضوع اکتفاء

می‌شود که قرار دادن این کابل‌ها در محل مستلزم استفاده از کشتی‌های مختلف، به خصوص سازگار با این وظیفه می‌باشد.



شکل ۵-۱۴ بارگذاری کابل مخصوص زیر دریا در کشتی حامل کابل برای مزرعه‌ی بادی فراساحلی (© DOTI GmbH)

کابل‌ها به دلیل مسائل ایمنی  $1\text{ m}$  الی  $2\text{ m}$  زیر بستر دریا مدفون می‌شوند و اگر زمین برای حفر گودال‌های ضروری زیردریایی بسیار سخت باشد، کابل‌ها در امتداد تمام طول خود با لایه-ای از سنگ‌های محافظ پوشیده می‌شوند.

## ۵-۵ دسترسی به توربین‌های بادی فراساحلی

اهمیت اقتصادی نگهداری توربین‌های بادی در فصل ۴ مورد بحث قرار گرفت. اجرای نگهداری شامل دسترسی به توربین‌ها با رعایت قوانین ایمنی است:

تا زمانیکه فاصله از ساحل زیاد نباشد زمان سفر در یک قایق قابل قبول است (شکل ۵-۱۵ را ببینید). با این حال، اگر امواج بزرگتر از  $1/5\text{ m}$  باشند دسترسی به سکو از طریق نردبانی بر روی قایق امکان‌پذیر نمی‌باشد. هنگامی که پرسنل بر روی توربین می‌باشند این ریسک وجود دارد که آب‌وهوا بد شود. به طور کلی هنگامی که باد شدیدتر بوزد دریا نامساعد خواهد شد. هر ماشینی حداقل شرایطی دارد که به پرسنل اجازه خواهد داد تا برای چند روز بر روی توربین بمانند تا اینکه شرایط آرام شود. کم و بیش مشخص می‌باشد که ممکن است دریازدگی توانایی‌های فیزیکی را هنگام بالا رفتن از نردبان کاهش دهد. ممکن است قایق به سیستم پل

مفصلی<sup>۱</sup> مجهز شده باشد که با قلاب به نردبان توربین متصل می‌گردد در نتیجه، ایمنی به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۵-۱۵ انتقال پرسنل با استفاده از قایق (عکس توسط نویسنده گرفته شده است)

ساخت مزارع بادی بزرگ به انتقال پرسنل به صورت رایج با استفاده از هلیکوپتر منتهی شده است (شکل ۵-۱۶ را ببینید). علی‌رغم افزایش هزینه بر ساعت این روش حمل‌ونقل، مزایای بسیاری در ارتباط با آن وجود دارند:

- در جاییکه ممکن است سرعت باد دسترسی از طریق دریا را غیر ممکن کند این روش دسترسی را تسهیل می‌بخشد؛
  - زمان سفر بسیار کمتر است؛
  - سفر بسیار راحت‌تر است؛
  - پرسنل مستقیم به آشیانه می‌رسند و نیازی به بالا رفتن از برج ندارند؛
  - یک تیم می‌تواند در یک روز کاری از چندین توربین بازدید کند.
- توربین‌ها در حین فرآیند بالابری هلیکوپتر متوقف می‌گردند. پرسنل باید آموزش کافی ببینند و مهارت‌های خود را به صورت منظم تجدید کنند. هلیکوپتر به ساحل باز می‌گردد اما می‌تواند بر روی سکوی تبدیل نیز فرود بیاید.

<sup>1</sup>Articulated gangplank system





شکل ۵-۱۶ هلیکوپتری که تکنسینی را از روی توربین بادی بالا می‌برد (DOTI GmbH©)

## ۵-۶ توربین‌های بادی شناور

### ۵-۶-۱ حقایق کلی درباره‌ی توربین‌های بادی شناور

گستره‌ی وسیعی از فضا در نواحی دور در دریا موجود است که باد در آنجا بسیار قوی‌تر از نزدیک ساحل است. با این حال، در اکثر نواحی آب با افزایش فاصله از ساحل عمیق‌تر می‌شود. بدین دلیل، توربین‌ها شناور ساخته می‌شوند.

حقیقت شناور بودن به صورت قابل توجه تمامی پارامترهای طراحی و عملیات را تغییر می‌دهد:

- سازه به صورت پیوسته در معرض حرکت قرار دارد؛ نیروهای اینرسی به موارد اشاره شده درباره خستگی سازه نیز افزوده می‌شود.

- حرکت بالا و پایین رفتن<sup>۱</sup> آشیانه باعث ایجاد نوسان اضافی در باد موجود (علاوه بر اغتشاش طبیعی) می‌شود؛

- وزن سازه توربین شناور دیگر به عمق آب بستگی ندارد؛

- بار اعمالی به سازه‌ی شناور باید توسط خطوط مهار در کف تحمل شود؛

- کابل‌های الکتریکی در معرض حرکات توربین می‌باشند. آن‌ها انعطاف‌پذیر بوده و متفاوت از کابل‌های ثابت تولید می‌گردند؛

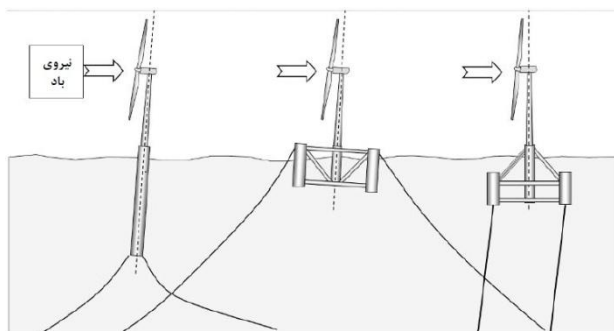
<sup>۱</sup>Swaying movement

- آن‌ها در بندرگاه یا ناحیه‌ی حفاظت‌شده مونتاژ می‌گردند؛ اساساً کار نصب شامل کشیدن توربین به آن مکان و اتصال خطوط مختلف می‌شود؛

- عملیات سنگین نگهداری با برگرداندن توربین به بندرگاه به آسانی انجام می‌شود؛

با این حال ممکن است در حین طوفان، امواج در دریای آزاد به ارتفاع قابل توجهی برسند. سکوهای حفاری نفت واقع در دریای شمال برای تحمل امواج شدید به ارتفاع  $30\text{ m}$  طراحی شده‌اند و چنین امواجی در حقیقت مشاهده شده‌اند.

همانطور که در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است برخی از طرح‌ها مطرح گشته‌اند و برخی از آن‌ها به واقعیت تبدیل شده‌اند.



شکل ۵-۱۷ طرح‌هایی برای توربین‌های بادی شناور. از چپ به راست: ستون شناور؛ شناور نیمه‌مغرق؛ سکوی پایه کششی<sup>۱</sup>

طرح‌های دیگر پیشنهاد می‌کردند که چندین توربین بر روی یک شناور نصب گردد. این امر مستلزم ساخت شناورهای غول‌پیکر تا چندین هزار متر بر جانب می‌شد تا توربین‌ها به اندازه‌ی کافی از هم جدا قرار گیرند و از اختلال جریان‌های گردابی<sup>۲</sup> آن‌ها در عملیات مشترک اجتناب شود. ساخت چنین شناورهایی فراتر از توانایی‌های کارگاه‌های کشتی‌سازی بود. شرایط مورد نیاز برای قابلیت دریانوردی<sup>۳</sup> به نصب‌های سنگین و پرهزینه منجر می‌گردند. با پیدایش توربین‌های توان بالا که تولید انرژی کافی را با یک ماشین ممکن می‌ساختند و ساخت شناور آن‌ها آسان‌تر بود، این طرح‌ها از میان رفتند.

<sup>1</sup>Tension leg platform

<sup>2</sup>Wake

<sup>3</sup>Seaworthiness

### ۵-۶-۲ ستون شناور

یک ستون عمودی سیلندری شناور با سنگریزه در کف سنگین می‌شود. اگر ما فرض کنیم که شناور یک استوانه‌ی ساده است، مرکز شناوری در وسط قسمت غرق‌شده قرار می‌گیرد. اگر پایه شناور به درستی با سنگریزه پر شود مرکز جاذبه پایین‌تر می‌آید. برای یک توربین بزرگ ممکن است شناور تا عمق  $100\text{ m}$  گسترش پیدا کند. با حاصل شدن عمل قائم‌کردن<sup>۱</sup>، پایداری عمودی تضمین می‌گردد. بخش افقی شناور در سطح آب نسبتاً کوچک است. در نتیجه، تغییر سطح آب تنها تغییرات کمی در نیروی ارشمیدس ایجاد می‌کند. متعاقباً این نوع شناور در مقابل امواج حساسیت چندانی نشان نمی‌دهد.

نصب توربین بادی بر روی ستون شناور آسان نیست. با فنآوری امروزی نمی‌توان توربین را به صورت خوابیده انتقال داد زیرا این امر مستلزم تقویت شدید برج است. بنابراین باید شناور به صورت افقی به خارج از بندرگاه کشیده شده، راست شود و به مکان مورد نظر حمل شود، سپس باید توربین با استفاده از جرثقیل شناوری که به صورت موقت به شناور متصل گشته است در بالا مونتاژ گردد. به طور مشابه، دیگر نمی‌توان کل توربین را بدون جداسازی آن در دریا به بندرگاه بازگرداند. اگر در نزدیکی ساحل آب عمیق باشد ستون شناور قابل توجیه است؛ به خصوص مناطق حفاظت‌شده‌ی عمیق ساخت آسان آن را امکان‌پذیر می‌کنند. این روش در آبدری<sup>۲</sup> نروژ است در پروژه هیویند<sup>۳</sup> پیاده‌سازی شده است.

### ۵-۶-۳ شناور نیمه‌مغرق

با استفاده از تعدادی از شناورها که در مرزهای سکوی عریض قرار گرفته‌اند پایداری تضمین می‌شود. همانند مورد قبل، اگر بخش نفوذ به سطح<sup>۴</sup> شناورها کوچک باشد، سازه چندان در معرض اثر موج قرار نمی‌گیرد. میزان لقی عمودی مورد نیاز برای این نوع سازه‌ی شناور کمتر از مقدار مورد نیاز برای ستون‌های شناور است. هنگامی که آب بسیار عمیق باشد، یعنی حدود  $m$  ۵۰ می‌توان از این طرح برای توربین‌های کف ثابت استفاده کرد.

یک مزیت شناورهای نیمه‌مغرق این است که می‌توان آن‌ها را با مونتاژ کامل توربین از بندرگاه بکسل کرد (اگر نیاز باشد در نواحی کم‌عمق سنگریزه‌ی شناور را خالی می‌کنند). همچنین می‌توان برای عملیات نگهداری بزرگ آن‌ها را به بندرگاه بازگرداند.

<sup>۱</sup>Righting action

<sup>۲</sup>Fjord

<sup>۳</sup>Hywind

<sup>۴</sup>Surface-piercing section

### ۵-۶-۴ سکوی پایه کششی<sup>۱</sup>

شناور با استفاده از چندین میله کششی<sup>۲</sup> که محکم به زمین متصل شده‌اند، پایین‌تر از سطح عادی شناوری نگه داشته می‌شود. میله‌ها همواره در حالت کشش باقی می‌مانند تا اینکه توربین راست باقی بماند و سازه دچار رول و پیچ نشود. این یک مزیت قابل توجه برای توربین می‌باشد که ما امیدواریم همچنان با باد مواجه شویم.

باید تأکید کنیم که کرنش‌های لنگر برای پاسخهای قبلی بزرگتر می‌باشند. پیکر پایه‌ی کشش به لنگرهای به شدت قوی نیاز دارد. پایه‌های کشش در طول‌های کم چندان انعطاف‌پذیر نیستند. این پاسخ تنها برای اعماق زیاد، بیش از  $100\text{ m}$ ، مناسب است.

قرار دادن سکوی پایه کششی عملیاتی حساس است و به راحتی قابل بازگشت نیست. بدین معنا که تمامی نگهداری باید در دریا انجام گردد.

### ۵-۶-۵ توربین‌های بالادست یا پایین‌دست<sup>۳</sup>

می‌توان به این موضوع اشاره کرد که تا به امروز برای استفاده‌ی دوباره از فناوری توربین‌های بادی موجود بسیار تلاش شده است، یعنی تا جای ممکن روتور در مقابل باد قرار گیرد. این جهت‌گیری در خشکی توجیه می‌گردد زیرا برج باید باد را از تمامی جهات دریافت کند و بدین منظور دارای بخش استوانه‌ای می‌باشد. اگر روتور پایین‌دست باشد این امر جریان گردابی تولید می‌کند که باعث تولید ارتعاشاتی در پره‌ها می‌شود که از پشت برج عبور می‌کنند. به طور مشابه، بهتر است در روتور بالادست تا جای ممکن توربین عمودی نگه داشته شود زیرا هر خمیدگی رو به عقبی به زاویه شیب آشیانه افزوده می‌شود تا از تماس میان پره و دکل جلوگیری شود. اگر صفحه‌ی موثر چرخش پره‌ها دارای شیب تند باشد، احتمال تماس یان پره و آشیانه آن کاهش پیدا می‌کند.

در طراحی توربین بادی شناور آزادی عمل بیشتری وجود دارد. به خصوص، برای برج قابل قبول است که شیب زیادی به سمت باد داشته باشد. اگر روتور در پایین‌دست قرار گیرد همانطور که در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است زاویه‌ی هیل از زاویه‌ی شیب آشیانه کاسته می‌شود. به منظور اجتناب از جریات گردابی قابل توجه، ممکن است آشیانه دارای پره باشد که به دور برج می‌چرخد. پروفیل پره نصب شده، جریانی منظم از هوا ایجاد می‌کند که از شکل-

<sup>1</sup>Tension leg platform

<sup>2</sup>Tendons

<sup>3</sup>Upwind or downwind turbines

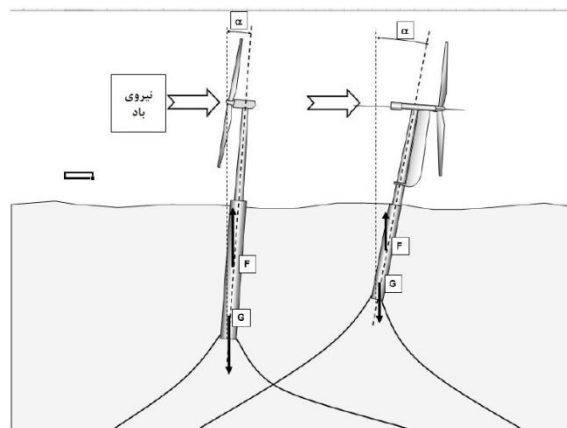
گیری آشفته‌گی در پشت برج و خستگی در پره‌ها جلوگیری می‌کند. این اصل در توربین‌های بادی SWAY در نروژ و همچنین در طرح‌های دیگر به کار گرفته شده است.

ممان پیچ ( $M$ ) ستون شناور به وسیله فرمول زیر مشخص می‌شود:

$$M = \rho \cdot g \cdot V \cdot BG \cdot \sin(\alpha)$$

که در آن  $\rho$  = چگالی آب دریا؛  $g$  = شتاب ناشی از وزن؛  $V$  = حجم زیر آب‌رفته‌ی شناور؛  $BG$  = بازوی قائم میان مرکز شناوری  $B$  و مرکز جاذبه‌ی  $G$ ؛  $\alpha$  = زاویه‌ی شیب.

این فرمول نشان می‌دهد که اگر ما برای ممان پیچ  $M$  مشابه زاویه‌ی پیچ  $\alpha$  بزرگی انتخاب کنیم شناور می‌تواند کوچک‌تر باشد که هزینه‌ی وارده را کاهش می‌دهد.



شکل ۵-۱۸ توربین‌های بادی شناور واقع بر ستون‌های شناور. چپ: توربین بالادست. راست: توربین پایین دست. پره به شدت جریان گردابی برج و اغتشاش که روتور در معرض آن است را کاهش می‌دهد. در پایین دست، زاویه‌ی بیشتر برای هیل قابل قبول است که اجازه می‌دهد تا اندازه‌ی شناور کاهش داده شود.

ما همچنین تصور می‌کنیم که در آینده توربین‌های بادی شناوری را خواهیم دید که بسیار متفاوت از توربین‌های مرسوم ساخته خواهند شد.

به عنوان مثال، یک گزینه‌ی دیگر استفاده از روتور محور افقی است، همانند آن‌هایی که در پروژه‌ی ورتیویند<sup>۱</sup> استفاده شد. ژنراتور به شدت سنگین است بنابراین در پایین قرار می‌گیرد تا مشکل پایداری را به طور قابل توجهی کاهش دهد که این امر برای توربین‌های بادی شناور حیاتی می‌باشد.

<sup>۱</sup>Vertiwind



# ۶

## سیستم‌های تبدیل انرژی در توربین‌های

### بادی فراساحلی

#### ۶-۱ تحول فناوری انرژی بادی

##### ۶-۱-۱ تاریخچه مختصر

در طول دهه‌ی ۱۹۲۰ (توربین بادی دو پره‌ای شرکت *CEM* به قطر  $20\text{ m}$ ) و سپس در دهه‌های ۱۹۵۰-۱۹۶۰ (ماشین  $30\text{ m}$  سه پره‌ای و ژنراتور سنکرون<sup>۱</sup>  $800\text{ kW}$  در نجت لروی<sup>۲</sup>؛ ماشین  $35\text{ m}$  دو پره‌ای به همراه ژنراتور القایی  $1\text{ MW}$  در سنت رمی دس لاندس<sup>۳</sup> [ARG 82]) در فرانسه توسعه‌ی تحقیقات آغاز گشت. در سال ۱۹۷۸ در دانمارک یک ماشین  $54\text{ m}$  سه پره‌ای با توان  $2\text{ MW}$  ساخته شد.

در ورمانت<sup>۴</sup> ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۴۱ یک توربین بادی دو پره‌ای  $1250\text{ kW}$  (ماشین سنکرون) مورد آزمایش قرار گرفت. تأسیسات آزمایشگاهی بسیار (به خصوص در کالیفرنیا) به توسعه‌دهندگان این امکان را می‌دهند که توربین‌ها، سیستم‌های ترمز اضطراری، برج‌ها و وسایل مختلف نظارت را تکمیل کنند که این امر باعث ایجاد توربین‌های با دوام و رقابتی می‌شود. پاسخ‌های مختلفی جستجو شده‌اند، به طور برجسته توربین‌های محور عمودی شناخته‌شده به

<sup>۱</sup>Synchronous generator

<sup>۲</sup>Nogent le Roi

<sup>۳</sup>Saint Remy des landes

<sup>۴</sup>Vermont

عنوان توربینهای داریوس<sup>۱</sup> (به افتخار مخترع آنها)، اما تقریباً تنها ماشینهایی که امروزه به کار انداخته می‌شوند توربینهای محور افقی سه پره می‌باشند.

در آغاز دهه‌ی ۱۹۸۰، اولین آزمایش در مقیاس بزرگ در کالیفرنیا با توربینهای توان متوسط ( $55kW$ ) به لطف مشوق مالی آینده‌نگر زیاد انجام شد ( "ازحام باد"<sup>۲</sup> کالیفرنیا، شکل ۶-۱ را ببینید). بنابراین تعداد توربینهای موجود در سال ۱۹۸۱ از ۱۴۴ ماشین (توان کلی  $7MW$ ) به ۴۶۸۷ ماشین ( $386MW$ ) در ۱۹۸۵ افزایش پیدا کرد.



شکل ۶-۱ مزرعه‌ی بادی کالیفرنیا - ۱۹۸۰ [ECR 02].

امروزه در اروپا، ایالات متحده و همچنین آسیا و آفریقای جنوبی بازار سیستمهای مرتبط با شبکه‌ی برق در حال رشد است.

با رشد تقاضا برای انرژی بدون کربن، تمامی مکان‌ها با پتانسیل بهره‌برداری توسط توسعه-دهندگان مزرعه بادی جستجو شده‌اند. خیلی زود آشکار شد که به دلیل کاهش نویز و آلودگی بصری، مزایای بسیاری در رابطه با مکان‌های بهره‌برداری در دریا (فراساحلی) وجود دارد. با این حال پذیرش کاربران دریایی، خطرات محیط دریایی، نیاز به ابزارهای قابل اطمینان تولید و همچنین توانایی بازیابی آسان انرژی تولیدی و تزریق آن به شبکه‌ی برق به چالش‌های تازه‌ای تبدیل شدند.

<sup>1</sup>Darrius turbines

<sup>2</sup>Wind rush



## انرژی بادی فراساحلی

در شکل ۶-۲ تصویری از اولین مزرعه‌ی بادی فراساحلی نشان داده شده است که در ۱۹۹۱ در دریای بالتیک در خارج از ساحل دانمارک به کار گرفته شد (۱۱ توربین هر کدام با ظرفیت  $450 kW$ ، در ویندبی<sup>۱</sup>) [HEN 99].



شکل ۶-۲ اولین مزرعه بادی فراساحلی [EOL].

امروزه تأسیسات فراساحلی به سرعت در حال گسترش می‌باشند و بازار بالقوه‌ی انرژی بادی فراساحلی نیروی محرک اصلی توسعه‌ی فناوری توربین‌های بسیار بزرگ است. طبیعت مکان و محیطی که برای توسعه‌ی مزارع بادی بزرگ سودمند هستند، باعث می‌شود تا تولیدکنندگان در عرض چند سال به ماشین‌هایی با ظرفیت تقریبی  $10 MW$  فکر کنند.

هنگامی که صنعت باد فراساحلی به موفقیت رسید، توربین‌های ساحلی با حفاظت بیشتر برای قرارگیری در فضای مرتبط حول آشیانه<sup>۲</sup> در موقعیت‌های معین، تغییرات در طراحی، سرعت-های ویژه‌ی بیشتر برای سازگاری با بادهای قوی‌تر و مدیریت یکپارچه‌تر تجهیزات، در آشیانه به جای پایه‌ی برج مورد بررسی کارشناسان قرار گرفت و برای دریا بومی سازی<sup>۳</sup> گردید [GRU 00].

همچنین اغتشاش که توربین‌های فراساحلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد اساساً در مقایسه با مکان‌های روی خشکی کاهش یافته است. بنابراین می‌توان مقدار زیادی پول در تولید، زیرساخت‌های لجستیکی و تولید واقعی انرژی حفظ کرد.

<sup>1</sup>Vindeby

<sup>2</sup>Nacelle

<sup>3</sup>Marinized

تجربه‌ی اندوخته‌شده نزدیک ۳۰ سال به ما کمک می‌کند تا در این ابزارهای تولید برق شاهد افزایش گسترده‌ای باشیم. ساخت مزارع بادی فراساحلی با ظرفیت بیشتر از  $150 MW$  از نقطه نظر فنی قابل دستیابی می‌باشد. یک عامل محدودکننده در ایجاد این مزارع بادی، ژرفاسنجی<sup>۱</sup> و طبیعت بستر دریا است. فونداسیون‌های مورد نیاز برای دکل برحسب مسئله‌ی مورد بحث می‌توانند مونوپایل‌ها، چندبخشی یا پایه‌های شناور مهارشده (فصل ۵ را ببینید) باشند.

در سال ۲۰۱۰ در اروپا شاهد رکوردی در افزایش ظرفیت انرژی بادی بودیم و پروژه‌های بزرگ جدیدی به زودی ایجاد خواهند شد (شکل ۶-۳).



شکل ۶-۳ مزرعه‌ی بادی فراساحلی اسکروبی سنندز<sup>۲</sup> ( $60 MW$ ) در انگلستان [MAX].

مطابق انجمن انرژی بادی اروپا<sup>۳</sup> (EWEA) در ژانویه ۲۰۱۱، اروپا بیش از ۱۱۰۰ توربین بادی فراساحلی با توان کلی حدود  $3 GW$  از مقدار کلی زیر  $300 GW$  (ساحلی و فراساحلی) داشت. انگلستان با ظرفیت نصب‌شده‌ی  $1341 MW$  پرچم‌دار این زمینه در سطح جهانی است. در مقام دوم دانمارک و به دنبال آن هلند، بلژیک و سوئد قرار دارند.

<sup>1</sup>Bathymetry

<sup>2</sup>Scroby Sands

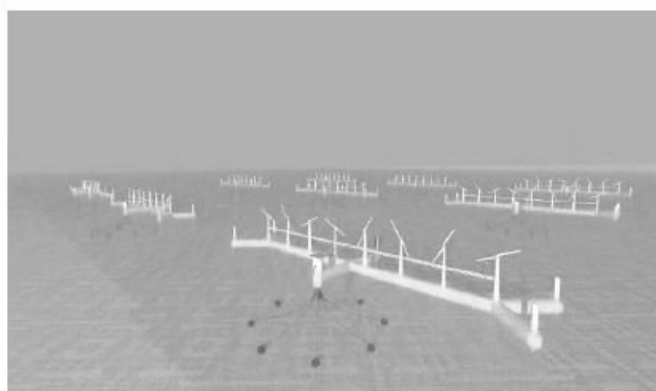
<sup>3</sup>European Wind Energy Association

تولید برق از توربین‌های بادی فراساحلی با درخواست فرانسه در سال ۲۰۱۱ برای مزایده به منظور تأمین ظرفیت  $6GW$  تا ۲۰۲۰ و ساخت مزرعه‌ی بزرگ در خارج از ساحل انگلستان، آرایه لندن<sup>۱</sup> با توان کلی  $1GW$ ، افزایش پیدا خواهد کرد.

همچنین مطابق *EWEA* توان نصب‌شده در فرانسه در ۲۰۲۰ می‌تواند به  $40GW$  برسد و معادل کل مصرف سالانه‌ی فرانسه را پوشش دهد *[MAX]*.

باید متذکر شویم که پتانسیل فرانسه برای انرژی بادی در اروپا پس از بریتانیای کبیر در رتبه‌ی دوم قرار دارد. هدف فرانسه برای باد فراساحلی  $4GW$  در ۲۰۱۵ و  $6GW$  در ۲۰۲۰ است.

مفهوم توربین‌های بادی شناور که از فناوری سکوه‌های نفتی الهام گرفته شده است (شکل ۴-۶) برای مدتی تحت پژوهش بوده است *[HEN 99]*، اگرچه فناوری‌های در نظر گرفته‌شده‌ی اخیر متفاوت هستند (فصل ۵ را ببینید).



شکل ۴-۶ مفهوم توربین‌های بادی فراساحلی شناور *[HEN 99]*

امروزه تنها یک توربین بادی فراساحلی شناور در مقیاس صنعتی به نام هایویند<sup>۲</sup> در دنیا وجود دارد که نصب‌شده در خارج از ساحل نروژ بوده و سودآوری آن هنوز باید اثبات گردد. فرانسه ۸ تا ۱۰ برابر پتانسیل بیشتری برای فناوری باد فراساحلی شناور نسبت به توربین‌های تثبیت‌شده در بستر را دارد. در حقیقت، در سال ۲۰۱۱، در *IFP-Energies Nouvelles* تخمین زده شد که ظرفیت فرانسه در تولید انرژی با استفاده از توربین‌های بادی شناور بیش از سال  $10,000TWh$  است.

<sup>1</sup>London Array

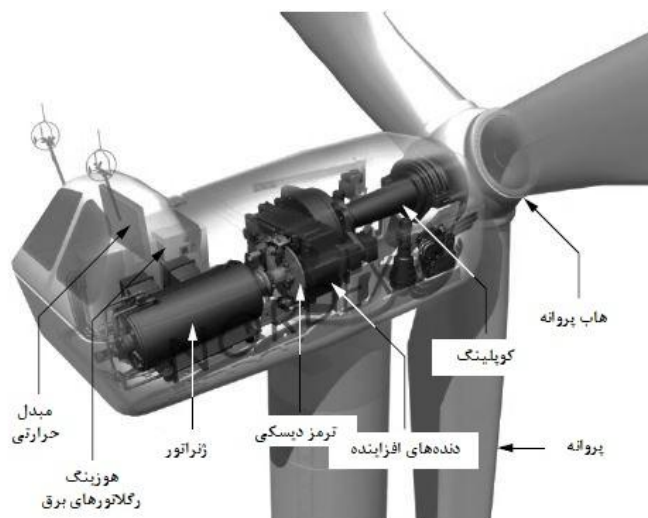
<sup>2</sup>Hywind

## ۶-۱-۲ معماری توربین بادی مدرن

## اجزای اصلی توربین بادی کلاسیک

شرایط بد دریا به معنای این است که توربینها باید مستحکمتر ساخته شوند: دکلها باید نیروی امواج و جریان را تحمل کنند. سازههای فراساحلی پوشالهای<sup>۱</sup> قابل توجهی دارند که باعث ایجاد مقدار زیادی کرنش (گشتاور خمش) و همچنین کرنشهای دینامیکی در بازه‌ی گسترش یافته‌ی فرکانس می‌شوند. در نهایت، نیاز به محافظت در برابر خوردگی و قرار دادن کابل‌های زیر دریا برای بازگرداندن برق به خشکی، باعث افزایش هزینه در مقایسه با تأسیسات روی خشکی می‌شوند.

توربین بادی فراساحلی با اصول کلی مشابه توربین بادی ساحلی کار می‌کند. محرک توان<sup>۲</sup> اساساً مشابه فناوری ساحلی است. توربین بادی از چهار زیرسازه‌ی اصلی تشکیل شده است: فونداسیون، برج (دکل یا تیر)، آشیانه (که سیستم تبدیل الکترومکانیک را دربر دارد) و توربین (پره‌ها و روتور) [GOU 08].



شکل ۶-۵ اجزای اصلی توربین بادی دارای جعبه‌دنده (منبع: نردکس<sup>۳</sup>).

برج از آشیانه و توربین پشتیبانی می‌کند. آشیانه که تا حدودی عایق صدا است، ژنراتور و سیستم خنک‌کننده‌ی آن، تقویت‌کننده‌ی سرعت (اگر از آن یک عدد باشد) و قطعات مختلف

<sup>1</sup>Dunnage

<sup>2</sup>Power train

<sup>3</sup>Nordex

تجهیزات الکترونیکی مربوط به توان و کنترل را در خود جا می‌دهد. مکانیزمی که از سرور موتورهای الکتریکی استفاده می‌کند به آشیانه اجازه می‌دهد تا در جهت باد قرار گیرد (شکل ۵-۶).

یک جعبه‌دنده (هنگامی که یک عدد موجود باشد) از شفت کاهشی (۱۰-۲۰ دور بر دقیقه برحسب توان وارده) تشکیل شده که به توربین و شفت سرعت ( $1000-2000\text{rpm}$ ) متصل شده است. جعبه‌دنده دارای ترمز دیسکی مکانیکی است که به آن ژنراتور کوپل گشته است. جعبه‌دنده به یک سیستم روان‌کننده مبتنی بر روغن مجهز می‌باشد.

توربین‌های مدرن شامل نوع فراساحلی، دارای سه پره می‌باشند. اساساً سیستم الکترومکانیکی به ما اجازه می‌دهد تا بر گام پره‌ها اثر بگذاریم، گشتاور توربین را کنترل کنیم و سرعت چرخش آن را به ویژه در بادهای شدید تنظیم کنیم. پره‌ها همچنین کارکرد ترمز ایرودینامیکی را با استفاده از "فدرینگ"<sup>۱</sup> به لطف کنترل گام یا به سادگی با چرخش حدهای آن‌ها هنگامی که سیستم گام در دسترس نباشد، فراهم می‌کنند.

بادسنج<sup>۲</sup> و بادنما<sup>۳</sup> در رأس آشیانه داده‌های مورد نیاز را برای سیستم کنترل به منظور جهت-گیری توربین و شروع یا توقف کار برحسب سرعت باد فراهم می‌کنند.

یک ترانسفورماتور در پایه‌ی هر توربین ولتاژ الکتریکی تولیدشده را مبتنی بر فناوری ژنراتور و استانداردهای ولتاژ شبکه به طور کلی از  $690\text{V}$  به  $20\text{kV}$  تبدیل می‌کند.

توربین بادی - پارامترهای اصلی

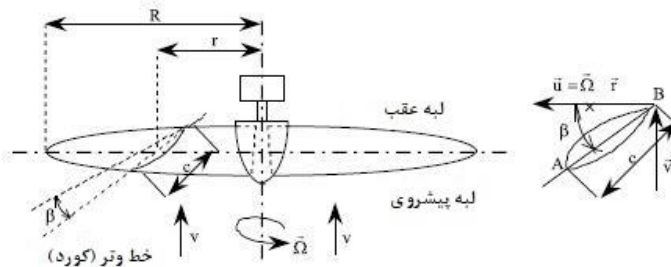
یک توربین بادی بخشی از سیستم تبدیل انرژی بادی است که انرژی بادی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند.

امروزه فناوری که به صورت گسترده برای دریافت انرژی بادی و تبدیل آن به برق استفاده می‌شود از پروانه‌ای با محور افقی استفاده می‌کند که ویژگی‌های اصلی آن در شکل ۶-۶ ارائه گشته‌اند.

<sup>1</sup>Feathering

<sup>2</sup>Anemometer

<sup>3</sup>Wind Vane



شکل ۶-۶ نمونه‌ای از توربین بادی محور افقی دارای دو پره.

بخشی از پره در فاصله‌ی  $r$  از محور توربین به صورت زیر تعریف می‌گردد:

- پروفیل، یعنی شکل آن بخش؛

- محور مرجع  $AB$ ، که ممکن است خط وتر (کورد)<sup>۱</sup> پروفیل باشد؛

- زاویه‌ی گام  $\beta$  میان محور مرجع و صفحه‌ی دوران (صفحه‌ی عمود بر محور دوران).

عرض پره با علامت  $c$  در فاصله‌ی  $r$  از محور پروانه به طول خط وتر پروفیل مربوط می‌شود. متغیر  $c$  به شعاع  $r$  بستگی دارد و تابع  $c(r)$  شکل پره نشان داده شده در صفحه‌ی پروانه را تعریف می‌کند.

زاویه‌ی گام  $\beta$  به شعاع  $r$  بستگی دارد: هنگامی که  $r = R_b$  باشد بزرگ است ( $R_b$  شعاع هاب<sup>۲</sup> است) و به سمت انتهای پره کاهش می‌یابد. پیچش ویژه‌ی پره با رابطه‌ی

$$\frac{[\beta(R_b) - \beta(R)]}{R}$$

تعریف می‌گردد؛ حدود  $1^\circ$  الی  $2^\circ$  بر متر است.

گام بخش به شعاع  $r$  با رابطه‌ی زیر تعریف می‌گردد:

$$H_r = 2\pi t g \beta(r)$$

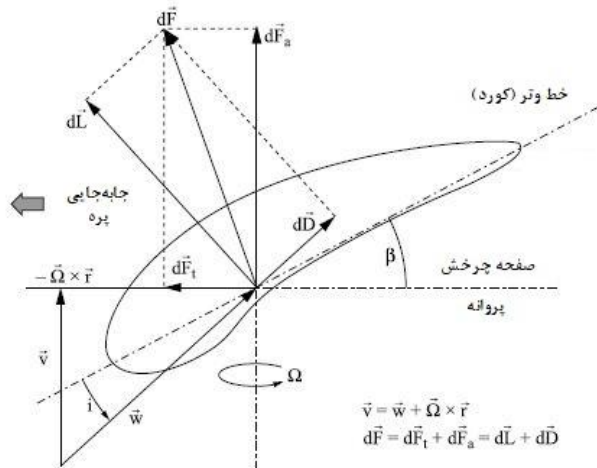
گام هندسی قراردادی پروانه، گام بخشی به شعاع  $r = 0.7R$  است. مطابق قرارداد، بخشی از پره به شعاع  $r = 0.7R$  بخش پایه نامیده می‌شود.

در تحلیل کیفی روشی که توربین در آن کار می‌کند باید برای بخشی که در فاصله‌ی  $r$  از محور دوران قرار گرفته است بردار سرعت هوا  $\vec{w}$  نسبت به توربین در نظر گرفته شود.

<sup>۱</sup>Chord

<sup>۲</sup>Hub

در شکل ۶-۷ سرعت‌ها و بارهای واقع بر بخش مورد بحث نشان داده شده‌اند.



شکل ۶-۷ نمایش سرعت‌ها و نیروهای واقع بر بخشی که در فاصله  $r$  از محور توربین قرار گرفته است

بردار سرعت  $\vec{w}$  از ترکیب سرعت باد  $\vec{v}$  و سرعت مماس بخش چرخشی  $(-\vec{\Omega} \times \vec{r})$  حاصل می‌شود. زاویه‌ی شکل‌گرفته از بردار  $\vec{w}$  و خط وتر، زاویه‌ی برخورد  $i$  نامیده می‌شود. این زاویه با جهت باد و زاویه‌ی کالیبراسیونی که نسبت به صفحه‌ی دوران تنظیم شده است (کنترل شده است) تغییر می‌کند.

می‌توان نیروی  $\vec{F}$  اعمالی باد بر روی بخش را به دو مولفه‌ی زیر تقسیم نمود:

- نیروی لیفت  $d\vec{L}$ ، عمود بر سرعت  $\vec{w}$ ؛

- نیروی درگ  $d\vec{D}$ ، موازی سرعت  $\vec{w}$ .

همچنین  $\vec{F}$  را می‌توان مبتنی بر موارد زیر تفکیک نمود:

- نیروی در جهت دوران  $d\vec{F}_t$ ؛

- نیروی محوری  $d\vec{F}_a$ .

ما با استفاده از انتگرال‌گیری در طول پره خواهیم داشت:

$$D = \frac{1}{2} C_x \rho v^2 A; L = \frac{1}{2} C_z \rho v^2 A$$

که در آن  $C_x$  و  $C_z$  به ترتیب ضرایب بدون بعد درگ و لیفت هستند،  $A$  سطح پره (وتر ضرب در طول پره) و  $\rho$  چگالی هوا است.

ضرایب بدون بعد  $C_x$  و  $C_z$  به پروفیل پره و زاویه برخورد  $i$  بستگی دارند. هنگامی که ما کارکرد توربینهای بادی را تحلیل می‌کنیم از نمودار رابطه‌ی  $C_x/C_z$  به عنوان تابعی از زاویه برخورد استفاده می‌کنیم. این رابطه منعکس‌کننده‌ی بازده تبدیل انرژی بادی می‌باشد. در شکل ۶-۸ ما ملاحظه می‌کنیم که یک زاویه برخورد بهینه وجود دارد در آن بازده بیشینه است.

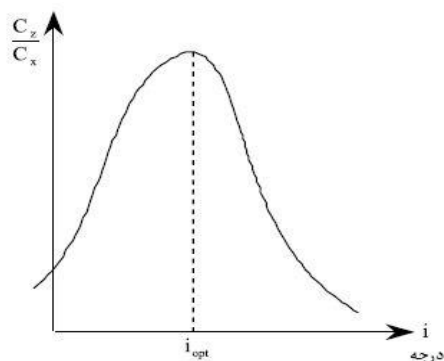
تحلیل کیفی کارکرد توربین بادی با استفاده از نمودار سرعت‌ها و نیروها در شکل ۶-۷، موارد زیر را آشکار می‌سازد:

۱- هنگامی که توربین از  $\vec{w} = \vec{v}$  شروع می‌کند به دلیل اینکه  $\Omega.r = 0$  است زاویه برخورد باید بزرگ باشد تا بر روی صفحه‌ی دوران نیرو (که ممان آن یک کوپل است) ایجاد کند. به دلیل اینکه زاویه گام به منظور افزایش مولفه‌ی لیفت زاویه برخورد را تغییر می‌دهد باید زاویه گام  $\beta = \beta_D$  را تنظیم کرد.

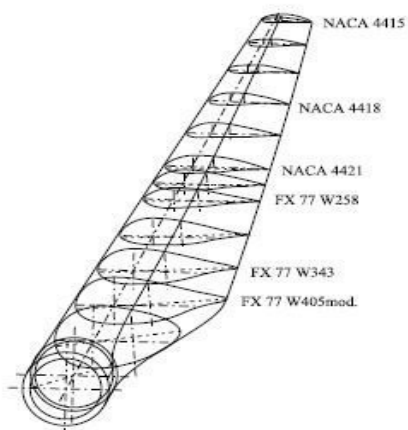
۲- هنگامی که توربین کار می‌کند، با فرض ثابت ماندن سرعت باد  $v$  با افزایش سرعت مماسی  $\Omega.r$  زاویه برخورد باید کاهش پیدا کند، زیرا مقدار نسبی ضریب درگ با سرعت گرفتن توربین بسیار قابل توجه می‌شود. زمانی که جهت‌گیری پره نسبت به هاب (یعنی صفحه‌ی دوران) می‌تواند در حین عملیات تغییر یابد، توربین دارای زاویه گام متغیر است نقطه‌ی جاری واقع بر منحنی مشخصه  $C_z/C_x = f(i)$  به چپ حرکت کرده و اطراف نقطه‌ی بهینه  $(i \cong i_{opt})$  یا برای بارهای کمتر در بخش صعودی منحنی قرار می‌گیرد (شکل ۶-۸).

۳- دستیابی به زاویه برخورد بهینه برای سرعت خطی  $\Omega.r$  یک بخش پره به پروفیل و فاصله‌ی  $r$  از آن بستگی دارد. زاویه گام باید به  $r$  وابسته باشد:  $\beta(r)$  [NIC 95]. بنابراین گام واقعی از حد وسط در کل طول پره ناشی می‌شود که تعدادی از پروفیل‌های استاندارد را با هم ترکیب می‌کند (شکل ۶-۹). در نتیجه، توربین در هر بخش از پره‌های خود کارکرد آیرودینامیکی بهینه ندارد: بهترین عملکردها (یعنی پروفیل و برخورد) در آن سوی  $0.7R$ ، مساحتی که بیشترین سطح را جاروب کرده و دارای بزرگترین بخش انرژی جنبشی است، به دست می‌آیند.



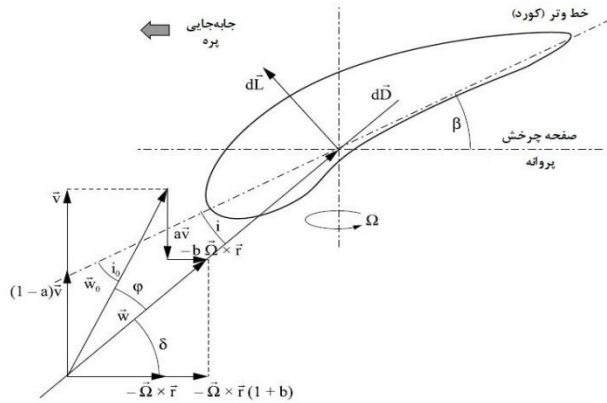


شکل ۸-۶ زاویه‌ی برخورد بهینه،  $i_{opt}$



شکل ۹-۶ نمونه‌ای از پروپیل پره با استانداردهای صنعتی (شرکت *DEBRA 25 Gill*)

ما همچنین باید به منظور تحلیل دقیق‌تر کارکرد توربین مولفه‌های سرعت ناشی از ورتکس‌های توربین را در نظر بگیریم. نمودار سرعت (شکل ۱۰-۶) نشان‌دهنده‌ی مولفه‌های محوری  $(-a\bar{v})$  و مماسی  $(-b\bar{\Omega} \times \bar{r})$  است که سرعت‌های ناشی از حرکت ورتکس نامیده می‌شوند [DUM 90; GOU 08].



شکل ۶-۱۰ نمودار سرعت

با فرض اینکه ما مولفه‌های سرعت ناشی از ورتکس‌ها را نادیده بگیریم در این شکل  $\vec{w}_0$  و  $i_0$  به ترتیب علامت سرعت هوا نسبت به پره و زاویه‌ی برخورد می‌باشند. بردار سرعت حقیقی  $\vec{w}$  دارای مقدار مطلق کاهش یافته و به اندازه‌ی زاویه‌ی  $\varphi$  تغییر می‌کند که به معنای این است که زاویه‌ی واقعی برخورد کمتر از  $i_0$  است.

ضرایب القایی سرعت، به ترتیب، محوری ( $a$ ) و مماسی ( $b$ ) در فاصله‌ی  $r$  از محور توربین به نسبت سرعت رأس، وابستگی داشته و با رابطه‌ی زیر تعریف می‌شوند:

$$\lambda_r = \frac{r\Omega}{v}$$

به ازای  $r = R$  شعاع توربین) ما به دست می‌آوریم  $\lambda_R \equiv \lambda = \frac{R\Omega}{v}$  که نسبت سرعت رأس<sup>۱</sup> ( $TSR$ ) توربین نامیده می‌شود.

وابستگی‌های ضرایب القایی سرعت،  $a$  و  $b$  برحسب نسبت سرعت رأس  $\lambda_r$  در مقالات تخصصی ارائه گشته‌اند [DUM 90; GOU 08].

این تحلیل کیفی برای بخش قرارگرفته در فاصله‌ی  $r$  از محور توربین نشان می‌دهد که متغیرهای  $w$  و  $i$  به ضرایب سرعت‌های القایی،  $a$  و  $b$ ، و به نسبت سرعت رأس  $\lambda_r$  بستگی دارند. متعاقباً، وابستگی‌های  $v$  و  $\Omega$  نیروی لیفت و درگ به مدل‌های تحلیلی پیچیده تبدیل می‌گردند.

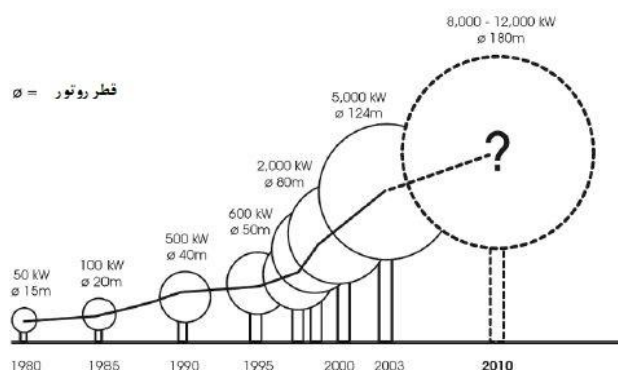
<sup>۱</sup>Tip Speed ratio

### ۳-۱-۶ دستاوردها و توسعه‌های اخیر

#### اندازه‌ی توربین‌های بادی

در سراسر بازار تمایل واضحی در جهت استفاده از توربین‌های بادی قوی‌تر وجود دارد (شکل ۱۱-۶). امروزه، توربین‌هایی موجود هستند که ظرفیت  $8\text{MW}$  یا بیشتر دارند [مکان EWE 05; IND].

نویز خروجی با  $TSR$  به شدت افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه، توربین‌هایی با  $TSR$  بالا نویز بیشتری ایجاد می‌کنند [GRU 00]. هنگامی که ما  $TSR$  استفاده‌شده در طراحی توربین‌های بادی فراساحلی را با مدل‌های ساحلی آن‌ها مقایسه می‌کنیم با در نظرگیری اینکه سطح نویز تأثیر یکسانی در مورد توربین واقع بر خشکی ندارد، ما متوجه افزایش زیادی مابین ۱۰ الی ۳۰٪ در کاربردهای دریایی می‌شویم.



شکل ۱۱-۶ اندازه‌ی توربین‌های بادی و توان مربوط به آن [EUR 02]

#### تنظیم مکانیکی توان توربین بادی

بیشتر توربین‌های بادی از دو قاعده‌ی تنظیم آیرودینامیکی برای کنترل سرعت پره‌ها نسبت به سرعت باد استفاده می‌کنند:

- زاویه‌ی متغیر گام یا سیستم "گام"؛

- سیستم "استال" (قطع)؛

<sup>1</sup>Stall system

در صنعت انرژی باد همچنان بحث درباره‌ی مزایا و معایب تنظیمات گام و استال ادامه دارد. با این حال، تنظیم گام به تدریج به صورت گسترده‌تر مورد استفاده قرار گرفته و امروزه برای توربین‌های بادی ساحلی و همچنین نمونه‌های فراساحلی گزینه‌ی مطلوب می‌باشد.

تنظیم استال به دانشی مناسب درباره‌ی منابع باد نیاز دارد؛ در محدوده‌ی فراساحل تعداد کمی پروژه‌ی پژوهشی انجام شده است [MER 11].

ما می‌توانیم در منحنی مشخصه‌ی عملیات توربین بادی (شکل ۶-۱۲) چهار ناحیه‌ی عمده‌ی کارکردی را مشاهده کنیم:

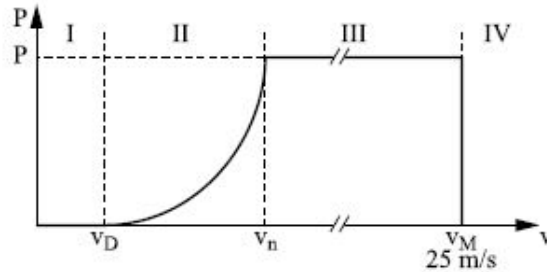
- منطقه‌ی I که در آن سرعت باد کمتر از سرعت شروع (برش) توربین<sup>۱</sup> است. در این مورد، توربین کار نکرده و در نتیجه، هیچ انرژی‌ای تولید نمی‌گردد؛

- منطقه‌ی II که در آن سرعت باد در محدوده  $[v_D, v_n]$  بوده، به منطقه‌ای مربوط می‌شود که می‌توان در آن تبدیل انرژی را بهینه‌سازی کرد. در این منطقه است که به طور مطلوب سرعت چرخش را تغییر می‌دهیم؛ بنابراین، منحنی مشخصه‌ی توان یک رابطه‌ی درجه سوم است [SPE 94]؛

- منطقه‌ی III که در آن توان توسعه‌یافته توسط توربین به توان اسمی  $P_n$  محدود می‌شود. در حقیقت، در ورای "سرعت اسمی باد" هزینه‌ی اضافی طراحی (توان بیشتر ژنراتور، دوام مکانیکی بیشتر سازه‌ها) با بهره‌ی تولید از سرعت‌های باد که خیلی کم اتفاق می‌افتند، جبران نمی‌شود؛

- منطقه‌ی IV که در آن سرعت باد بیشتر از سرعت بیشینه‌ای است که توربین می‌تواند تحمل کند. در این مورد، توربین با سیستم ترمز متوقف می‌شود تا از آسیب به بخش مکانیکی توربین جلوگیری شود.

<sup>1</sup>Cut-in speed of turbine



شکل ۶-۱۲ منحنی متداول توان استخراجی توربین بادی بر حسب سرعت باد

### سیستم "استال"

یک روش غیر فعال به کار گرفته می‌شود [GOU 08]. افزایش در سرعت نسبی باد به صورت خودکار با کاهش در زاویه‌ی گام همراه می‌گردد تا جداسازی سرعت‌های باد را که بیشتر از سرعت اسمی هستند میسر سازد. بنابراین، همانطور که در شکل ۶-۱۲ نشان داده شده است منحنی توان در منطقه‌ی III به طور کامل صاف نبوده و در عوض دارای برآمدگی می‌باشد.

### سیستم سرعت/کالیبراسیون متغیر یا "گام"

سیستم کنترلی "گام" مبتنی بر تغییر زاویه‌ی کالیبراسیون پره‌ها می‌باشد (تغییر زاویه‌ی برخورد) [GOU 08]. ما با افزایش یا کاهش زاویه‌ی برخورد پره رابطه‌ی میان عوامل لیفت و درگ را در جستجوی مقدار بهینه‌ی زاویه‌ی برخورد تنظیم می‌کنیم تا بیشینه‌ی توان به دست آید. این سیستم به ما اجازه می‌دهد تا لیفت پره‌ها را با سرعت باد تنظیم کنیم تا توان را به مقداری نسبتاً ثابت در منطقه‌ی III محدود کنیم.

به طور کلی، تغییر زاویه‌ی پره باعث می‌شود تا چهار چیز مختلف اتفاق بیفتد:

- ایجاد برش در باد با سرعت کمتر،  $v_D$ ؛
- بهینه‌سازی ناحیه تبدیل انرژی هنگامی که سرعت باد در کنار سرعت متغیر در بازه‌ی نسبتاً کوچک، در محدوده  $[v_D, v_n]$  تغییر می‌کند (۱ تا ۲ یا ۱ تا ۳ برای رابطه‌ی  $v_n/v_D$  تقریباً از ۴ تا ۵)؛
- تنظیم محدودیت توان برای  $v > v_n$ ؛

- حفاظت توربین در برابر بادهایی که بسیار شدید هستند ( $v \geq v_M$ ) با استفاده از "فدرینگ"<sup>۱</sup> پره‌های پروانه.

ما ملاحظه می‌کنیم که این سیستم با تغییر قابل توجه کالیبراسیون پره  $\beta$  از شروع (منطقه‌ی I) و در محدوده تنظیم سرعت (منطقه‌های II و III) به پدیده‌ی قطع<sup>۲</sup> آیرودینامیکی (منطقه‌ی IV) توربین، بر کارکرد توربین تأثیر می‌گذارد [NIC 95].

#### ۴-۱-۶ رویه‌های فنی

##### بهینه‌سازی تبدیل انرژی بادی

سیستم گامی برای توربین‌های بادی فراساحلی گزینه‌ی مطلوب می‌باشد.

تعیین اهداف جستجو شده مرحله‌ای مهم در انتخاب سیستم کنترلی می‌باشد که در آن عملکرد دست‌یافته تأثیر مستقیمی بر بازده سیستم و هزینه‌ی فناوری دارد. به منظور طرح-ریزی عملکرد سیستم کنترلی باید معیارهایی ایجاد گردند که با استفاده از آن‌ها کیفیت سیستم قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

برحسب نوع عملیات استفاده‌شده ممکن است بهینه‌سازی بر اساس موارد زیر انجام شود:

- معیار انرژی، که برای بیشینه کردن توان خروجی وسیله‌ی تبدیل طراحی می‌گردد [LEI 90; IQB 94; CON 93; THI 93];

- معیار قابلیت اطمینان، با کمینه کردن کرنش مکانیکی به منظور بیشینه کردن طول عمر توربین [NOV 94; TAN 95];

- کیفیت انرژی الکتریکی تولیدشده، با کنترل توان (راکتیو) و کمینه کردن آلودگی با فیلتر هارمونیک در شبکه (فیلتر فعال یا غیرفعال) [TAN 92; CAS 97].

سیستم کنترلی مطابق یکی از دو راهبرد روبه‌رو توسعه می‌یابد: سرعت ثابت یا سرعت متغیر.

راهبردهایی برای سرعت ثابت

این قاعده مبتنی بر کنترل کالیبراسیون پره‌ها به منظور تضمین شرایط زیر می‌باشد:

<sup>1</sup>Feathering

<sup>2</sup>Cut-out

$$\text{Max} C_p \left( \frac{R\Omega}{v}, \beta \right)$$

$$\Omega = \text{constant}$$

با محدودیت‌هایی در توان توسعه‌یافته و تغییرهای محتمل در  $\beta$ :

$$\frac{1}{2} \rho \pi C_p \left( \frac{R\Omega}{v}, \beta \right) v^3 R^2 \leq P_{Max}; \beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{Max}$$

از لحاظ فنی، به دلیل برهمکنش‌های مکانیکی و آیرودینامیکی در پاسخ به تغییرات تصادفی سرعت و جهت باد، این سیستم‌ها به صورت مکانیکی پیچیده و دست‌کاری آن‌ها به منظور بیشینه کردن توان خروجی دشوار می‌باشد [NIC 95; NIC 06].

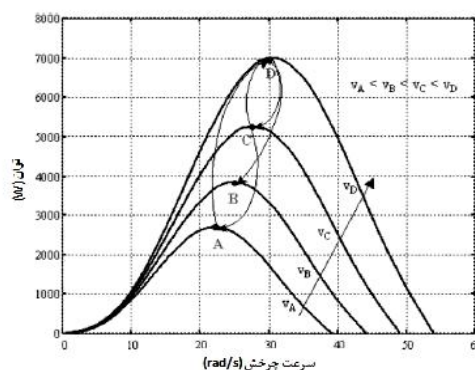
راهبردهایی برای سرعت متغیر

در این مورد، منحنی مشخصه  $C_p(\lambda, \beta)$  مشخص می‌باشد و می‌توان مدل ریاضی توربین را به درستی تولید کرد.

ما به منظور فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی از منحنی مشخصه‌ی توان  $P(\lambda, \beta)$  استفاده می‌کنیم که در آن مشاهده می‌کنیم که برای هر مقدار سرعت باد  $v$  بیشینه‌ای برای توان مکانیکی وجود دارد که توربین می‌تواند آن را انتقال دهد [NIC 95; ELM 06].

معیار بهینه‌سازی شامل تولید توان بیشینه برای هر محدوده ساکن می‌شود. این راهبرد با استفاده از رابطه‌ی  $\lambda = \lambda_{opt}$  در صفحه‌ی منحنی مشخصه  $C_p(\lambda)$  بیان می‌گردد.

ما در شکل ۶-۱۳ قاعده‌ی کلی بهینه‌سازی را نشان می‌دهیم که در آن  $A$ ،  $B$ ،  $C$  و  $D$  به منحنی تعلق دارند که معمولاً منحنی محدوده‌های بهینه نامیده می‌شود.



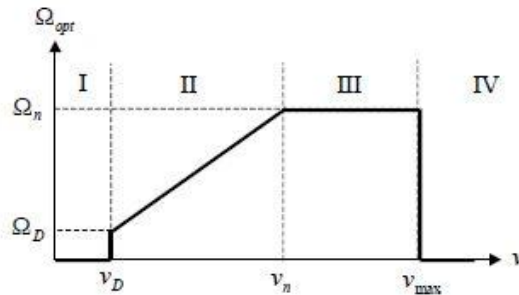
شکل ۶-۱۳ منحنی‌های مشخصه‌ی محدوده‌های بهینه (توان)

ما مطابق قانون کنترل برای منطقه II از عملیات، سرعت چرخش بهینه را به دست می‌آوریم که در آن سرعت  $\Omega$  متغیر است:

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v = \Delta_0 v,$$

که در آن  $\Delta_0$  در توربین مفروض ثابت است.

مشخصه‌ی کنترلی در شکل ۱۴-۶ داده شده است.



شکل ۱۴-۶ منحنی مشخصه‌ی قانون کنترل بهینه

ما به ازای  $v_n \leq v \leq v_{Max}$  شرط  $\Omega = \Omega_n$  را قرار می‌دهیم که به توان اسمی  $P_n$  و در نتیجه به توانی که از نقطه نظر یکپارچگی توربین قابل قبول می‌باشد، مربوط می‌شود.

این دو محدوده با روابط زیر تعریف می‌گردند:

$$\Omega_{opt} = \begin{cases} \Delta_0 v & \text{for } v_D \leq v < v_n \\ \Omega_n & \text{for } v \geq v_n \end{cases}$$

و با دو سیستم مختلف یا با یک سیستم کنترلی محقق می‌شوند.

تحقق قانون کنترلی با استفاده از مبدل الکترونیکی توان در ارتباط با ژنراتور حاصل می‌شود. انواع مختلفی از شماتیک‌های کنترلی و تنظیمی وجود دارد که عوامل زیر را در نظر می‌گیرند:

- نوع محدوده عملیاتی توربین باد برحسب اینکه به کدام یک از شبکه‌ی جریان متناوب یا شبکه‌ی جریان مستقیم متصل است؛

- نوع ژنراتور استفاده‌شده در واحد تبدیل؛



- ساختار حلقه‌های کنترلی و نوع تنظیم‌کننده.

## ۶-۲ برآورد منابع انرژی باد

### ۶-۱-۲ طبیعت باد

#### منشاء و مشخصات باد

انرژی خورشیدی دریافت‌شده توسط زمین تا حدودی به انرژی باد تبدیل می‌گردد. از میان اثرات دیگر، تغییرات دما باعث ایجاد تفاوت‌هایی در دانسیته‌ی جرمی هوا می‌شود که در نتیجه، هوا از یک منطقه‌ی جغرافیایی به منطقه‌ی دیگر حرکت می‌کند. این حرکت از نواحی با فشار اتمسفری بالا به نواحی با فشار کمتر صورت می‌گیرد.

مجموعه‌ی اغتشاشات مرتبط با گردش کلی میانگین در هر لحظه باعث ایجاد اغتشاش شدید افقی می‌شود.

حرکت هوای اتمسفری در سطح زمین باد نامیده می‌شود. تعیین جهت باد هنگام نصب توربین‌های باد دارای نقش مهمی می‌باشد، زیرا باید در حد امکان موانع کمی در جهت باد غالب وجود داشته باشد [MET, ASSb]. انرژی جنبشی باد مستقیماً به سرعت توده‌های متحرک هوا مربوط می‌شود. در نتیجه، دسته‌بندی‌های مختلفی بر اساس مشخصات جنبشی باد در رابطه با مکان مفروض و دوره‌ی تناوب مرجع وجود دارد.

#### انواع باد

انواع باد در محدوده‌ی انرژی بادی با استفاده از منحنی‌های مختلف و مقادیر میانگین تولیدشده در مکان که منحنی‌های مشخصه‌ی باد نامیده می‌شوند، تعریف می‌گردند (منحنی سرعت میانگین ماهانه‌ی باد، منحنی مشخصه‌ی سرعت/ارتفاع و غیره).

سرعت باد متغیری است که قدرت باد را در نقطه‌ی داده‌شده در فضا مشخص می‌کند. در عمل، این امر با بادسنج‌هایی اندازه‌گیری می‌شود که در طول دوره‌های زمانی از ۱۰ دقیقه تا ۱ ساعت تغییر می‌کنند. انواع باد توسط موسسه‌های معیارسازی همچون هیئت بین‌المللی الکترونیک<sup>۱</sup> (IEC) ارجاع داده می‌شوند.

انواع IEC باد برای توربین‌های بادی بزرگ به وسیله‌ی معیار بین‌المللی IEC-61400-1 (ویرایش ۲، ۱۹۹۹) تعریف می‌گردند. این معیار ۵ نوع باد را تعریف می‌کند: I, II, III, IV, S.

<sup>۱</sup>International Electro Technical Commission

توربین‌های نوع  $I$  به لحاظ ساختاری مقاوم‌تر هستند و توربین‌های نوع  $IV$  کمترین انعطاف-پذیری را دارند. نوع  $I$  یک نوع مخصوص بوده که به طور کلی برای پروژه‌های فراساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نوع	$I$	$II$	$III$	$IV$	$S$
$V_{reference} (m/s)$	۵۰	۴۲/۵	۳۷/۵	۳۰	
$V_{average} (m/s)$	۱۰	۸/۵	۷/۵	۶	
$V_{50} (m/s)$	۷۰	۵۹/۵	۵۲/۵	۴۲	
$I_{15} Type A$	٪۱۸				
$I_{15} Type B$	٪۱۶				
$\alpha Type A$	۰/۲				
$\alpha Type B$	۰/۳				

برای اغتشاشات دو سطح شدت تعریف می‌گردد:  $A$  و  $B$  در  $m/s$  ۱۵. شدت اغتشاش نشان-دهنده‌ی رفتار آشفته‌ی باد در رابطه با میدان سینماتیک متوسط است. به طور معمول شدت اغتشاش در جریان‌ها مابین ۲ الی ۳۰٪ متغیر است.

توربین‌های نوع  $A$  باید بادهای متلاطم‌تری را نسبت به ماشین‌های نوع  $B$  تحمل کنند. نماد  $V_{50}$  با استفاده از معیار  $IEC-61400-1$  به عنوان سرعت حدی باد (بیش از ۳ ثانیه) با تکرار در فاصله‌ی زمانی هر ۵۰ سال یکبار تعریف می‌گردد که ممکن است توربین در معرض آن قرار گیرد. نماد  $V_{average}$  با استفاده از معیار  $IEC-61400-1$  به عنوان سرعت میانگین سالانه باد در ارتفاع هاب تعریف می‌شود. نماد  $\alpha$  ضریب برشی است.

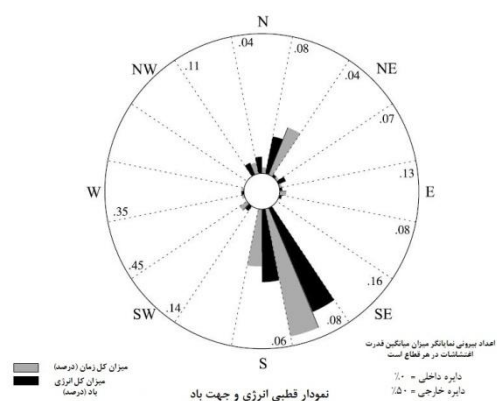
ما اندازه‌گیری‌های میانگین (بیش از ۱۰ دقیقه) سرعت باد را در ارتفاع هاب در نظر می‌گیریم (چگالی هوا  $1.225 kg/m^3$ ).

#### جدول بادنما

جدول بادنما یک نمودار با مختصات قطبی است که به ما امکان نمایش سرعت و جهت باد در طول زمان اندازه‌گیری‌ها را می‌دهد (در یک سال، یک ماه یا حتی یک ساعت از روز).

۳ عنصر نمایش داده می‌شوند (شکل ۶-۱۵):

- درصد زمان کلی که در حین آن باد در یک جهت مفروض می‌وزد (با قطاع خاکستری مشخص شده است)؛
- درصد کلی انرژی در هر قطاع (که با قطاع با زمینه‌ی سیاه مشخص شده است). این مورد جهتی را مشخص می‌کند که بیشترین انرژی را فراهم می‌کند؛
- شدت متوسط اغتشاش در هر قطاع با عدد نمایش داده‌شده در هر قطاع نشان داده می‌شود.



شکل ۶-۱۵ جدول بادنما.

این اطلاعات به طور قابل توجه به ما اجازه می‌دهند تا فرارگیری نسبی بهینه‌ی توربین‌ها را در مزرعه طرح‌ریزی کنیم. جداول بادنما نمودارهای فضا-زمانی هستند که توسط نرم‌افزار تخصصی تولید یا استفاده گشته‌اند تا به صورت کیفی پتانسیل یک مکان ارزیابی شود. تعداد منابع انرژی باد به طور عمده با استفاده از توابع توزیع سرعت‌های دسته‌بندی‌شده‌ی باد به دست می‌آید.

## ۲-۲-۶ شناخت پتانسیل ساحل

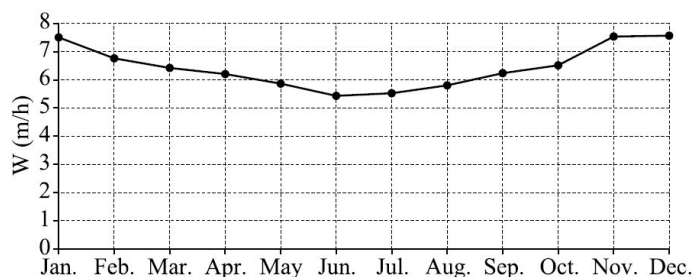
### پتانسیل انرژی بادی روی ساحل

پتانسیل انرژی بادی یک مکان توسط  $[KRO 03]$  به عنوان انرژی تعریف می‌گردد که می‌توان در طول زمان مفروض (معمولاً یک سال) عملیات توربین بادی در مکان استخراج کرد. سیستم‌های تبدیل انرژی باید با مشخصات پتانسیل انرژی ناحیه‌ای که در آن نصب گردیده‌اند (که حتی قبل از مرحله‌ی طراحی مزرعه‌ی بادی مشخص می‌گردد) تطابق داشته باشند.

از میان منحنی‌های مختلف و قرائت‌هایی که در مکان روی خشکی انجام شده‌اند استفاده‌ی ویژه‌ای از موارد زیر می‌شود.

### منحنی سرعت‌های میانگین ماهانه باد

شکل ۶-۱۶ توزیع سالانه‌ی سرعت‌های میانگین مکانی را برای دوره‌ی مفروض نشان می‌دهد. همانطور که بیشتر توربین‌های بادی با سرعت باد کمتر از  $3\text{ m/s}$  شروع می‌کنند ما می‌توانیم در این شکل مشاهده کنیم که استخراج انرژی باد محتمل بوده و احتمالاً در این مکان مطلوب است، زیرا سرعت‌های میانگین ماهانه باد همواره بیشتر از  $5\text{ m/s}$  هستند.



شکل ۶-۱۶ سرعت میانگین ماهانه باد

### منحنی مشخصه‌ی سرعت-ارتفاع

سرعت باد با ارتفاع افزایش پیدا می‌کند. این وابستگی با رابطه‌ی تجربی زیر بیان می‌گردد [GOU 08]:

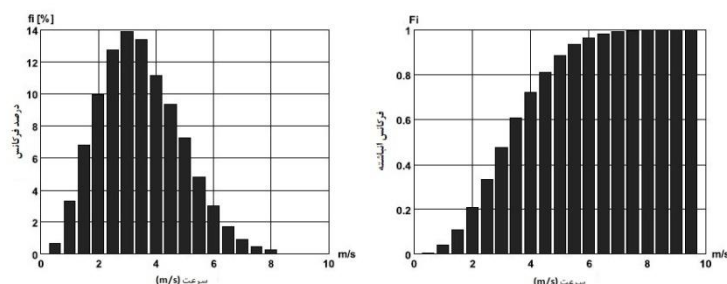
$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^n$$

در جایی که  $v_1$  و  $v_2$  به ترتیب سرعت‌های باد در ارتفاع‌های  $h_1$  و  $h_2$  هستند.

توان  $n$  برای توربین‌های بادی ساحلی به طرح زمین بستگی داشته و مابین  $0.1$  و  $0.4$  متغیر است ( $n$  برای زمین نامنظم به مقادیر حد بالا می‌رسد).

### منحنی‌های آماری مشخصه‌ی سرعت باد

هنگامی که ما برای دوره‌ی معین، اندازه‌گیری‌های سرعت باد را انجام دادیم می‌توانیم منحنی مشخصه‌ی توزیع سرعت باد ( $f_i\%$ ) و منحنی مشخصه‌ی فرکانس تجمعی ( $F_i\%$ ) (شکل ۶-۱۷) را برای  $\Delta v = 0.5\text{ m/s}$  به دست بیاوریم [NIC 95].



شکل ۶-۱۷ منحنی‌های مشخصه‌ی توزیع و فرکانس تجمعی سرعت‌های باد.

با انتگرال‌گیری نسبت به زمان چگالی توان جنبشی باد (متناسب با توان سوم سرعت باد بوده و با  $kW/m^2$  بیان می‌شود) این امکان وجود دارد که چگالی انرژی ناخالص سطح متقاطع، بیان شده با  $kWh/m^2$ ، را تعیین کرد. به منظور انجام تحلیل مشخصات آماری اصلی منبع انرژی باد ما از توابع توزیع استفاده می‌کنیم که در مکان مفروض به سرعت باد مربوط می‌شوند.

اگر  $N \rightarrow \infty$  و  $\Delta v \rightarrow dv$ ، دو منحنی مشخصه‌ی آماری  $f_i$  و  $F_i$  به ترتیب به سمت تابع چگالی احتمال  $f(v)$  و به سمت تابع توزیع  $F(v)$  تمایل پیدا می‌کنند. از میان توزیع‌های استفاده‌شده در مدل‌های آماری اثبات شده است که توزیع ویبول<sup>۱</sup> برای توصیف مشخصات آماری باد مناسب است [KEL 92].

این منحنی آماری برای ارزیابی اهمیت نمونه‌های سرعت باد برای تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین پتانسیل انرژی تعریف شده برحسب طبیعت توربین مطابق محدودیت‌های فیزیکی اولیه (محدودیت‌های سیستم الکترومکانیکی و بارهای وارد بر سازه) کم و بیش به صورت کامل استخراج می‌شود.

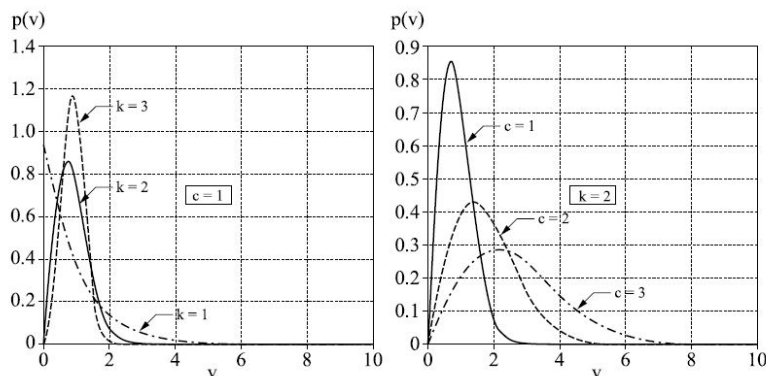
تابع توزیع ویبول با استفاده از دو پارامتر  $C$  و  $k$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right],$$

که در آن پارامتر  $C$  ضریب مقیاس (با بعد  $[m/s]$ ) و  $k$  ضریب شکل بدون بعد است که عدم تقارن توزیع را مشخص می‌کنند.

<sup>۱</sup>Weibull distribution

ممکن است تعدادی از روشها برای برآورد دو پارامتر ویبول استفاده شوند [GAR 98; SEG 00]. رایجترین روشهای استفاده شده روش ممان، روش خطی بازگشتی (رگرسیون) و روش تخمین احتمال بیشینه میباشند [GAR 98; SEG 00].



شکل ۶-۱۸ توزیع ویبول

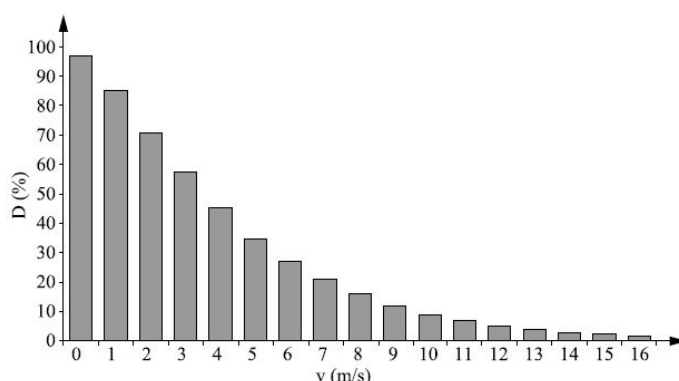
شکل ۶-۱۸ چگالی احتمال دو مورد از مدل سازی را نشان می دهد: (منحنی اول)  $c$  ثابت و  $k$  متغیر و (منحنی دوم)  $k$  ثابت و  $c$  متغیر [LON 05]. پارامترهای  $c$  و  $k$  با استفاده از نمودار فرکانسهای تجمعی اندازه گیری شده و روش خطی بازگشتی محاسبه می گردند.

وابستگی پارامتر  $k$  به شدت غیرخطی بوده و به طور کلی یکنواخت نیست. اگر  $k > 2$  باشد حساسیت چگالی باد در رابطه با  $k$  کاهش می یابد. هنگامی که غیره باشد حساسیت چگالی توان باد افزایش می یابد، یعنی افزایش چگالی توان بادی با کاهش  $k$  بسیار قابل توجه است.

وابستگی چگالی توان بادی در رابطه با پارامتر  $c$  غیرخطی بوده اما یکنواخت است. به ازای  $k > 2$ ، منحنیهای چگالی توان بادی در رابطه با ضریب مقیاس  $c$  بسیار نزدیک بوده و شکل سهموی دارند. ضریب مقیاس  $c$  مهمترین معیار در ارزیابی چگالی توان بادی است. اگر  $1 \leq k \leq 2$  باشد ما می توانیم ببینیم که صرف نظر از مقدار ضریب  $k$ ، آن مکان برای نصب سیستم توان بادی مطلوب است. اگر  $c > 7$  باشد اما مقداری داشته باشد که به صورت قابل توجه از سرعت شروع توربین بیشتر باشد ضریب شکل باید به یک واحد نزدیک باشد تا امکان پذیری سیستم را وارد بحث کرد [BOU 05; CEL 03; MEI 05].

## منحنی مشخصه‌ی سرعت/مدت

مدل ویبول برای دنبال کردن منحنی سرعت/مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد که درصد زمانی را می‌دهد که در حین آن سرعت‌های مشاهده‌شده‌ی باد بیشتر از مقدار مشخصی می‌باشند. این منحنی برای پیش‌بینی دوره‌های عملیات توربین بادی در مکان‌های گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۶-۱۹ منحنی مشخصه‌ی سرعت/مدت مکان را برای حالت  $k = 2$  و  $c = 9$   $m/s$  نشان می‌دهد [BOU 05].



شکل ۶-۱۹ منحنی مشخصه سرعت/مدت

منحنی مشخصه طیفی باد که به عنوان فرآیند تصادفی در نظر گرفته می‌شود

داده‌های مربوط به پتانسیل انرژی باد که توسط مطالعات محلی فراهم گشته‌اند از مدل‌های آماری استخراج داده درباره‌ی باد حاصل شده و با استفاده از داده‌های شبکه‌ی هواسنجی در طول چند دهه توسعه می‌یابند.

این مدل‌ها برای دستیابی به نقشه‌های پتانسیل باد در مقیاس کوچک فضایی و بهینه‌سازی قرارگیری ماشین‌ها به کار گرفته می‌شوند. این مرحله شامل نصب برج اندازه‌گیری بر روی مکان می‌شود تا در ارتفاع‌های مختلف داده‌های دقیقی را به دست آورد و با تغییرات کوچک منبع انرژی باد و همچنین رفتار پروفیل سرعت باد آشنا شد. این کار شامل اندازه‌گیری در مدت زمانی طولانی می‌شود اما اطلاعات خوبی از آن مکان به دست می‌دهد [FIC 03].

دو روش برای تعریف سرعت باد وجود دارد [LEI 90]:

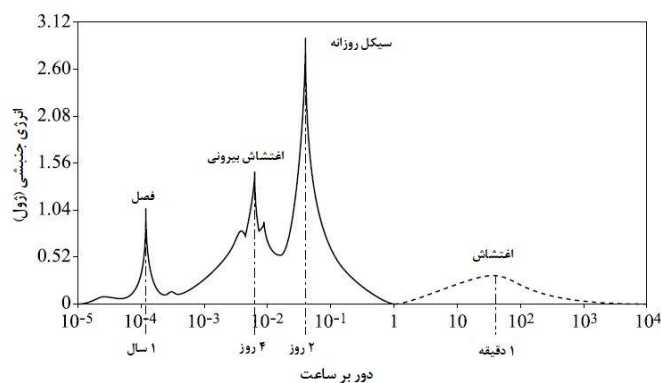
- "سرعت نقطه‌ای باد" با استفاده از بادسنج اندازه‌گیری شده و همچنین "سرعت بادسنج" نامیده می‌شود؛

- "سرعت باد نسبت به پره"، مقداری است که توان استخراج شده توسط شفت توربین را مشخص می کند. با استفاده از فناوری امروزی نمی توان اندازه گیری کرد.

مشخصات این متغیر از مدل سازی برهمکنش سرعت نقطه ای باد و توربین استنتاج می گردد. تعیین سرعت باد یک فرآیند تصادفی است که برای آن ثبت آزمایشگاهی نشان دهنده ی یک "پیشامد" از میان بینهایت پیشنهاد دیگر است. مدل های ریاضی این فرآیند تصادفی شامل خلاصه ای از مشخصات اصلی آن می شوند [LEI 90; WIL 90];

طیف وندراون<sup>۱</sup> در میان مدل های غیر پارامتری توسعه یافته از داده های آزمایشگاهی می باشد که به عنوان نقطه ی شروع در مدل سازی باد استفاده شده و به عنوان فرآیند تصادفی در نظر گرفته می شود [VAN 57].

شکل ۶-۲۰ یک مدل غیر پارامتری دیگر را نشان می دهد. در این مدل، مشاهده می شود که این توزیع طیفی به صورت کیفی نشان داده شده و دارای دو مولفه ی طیفی می باشد: مولفه ی تک-نمایی<sup>۲</sup> اغتشاش که منعکس کننده ی مشخصات سرعت باد با فرکانس بالا است و مولفه ی فصلی دو نمایی<sup>۳</sup> که مشخصات طیفی سرعت باد با فرکانس پایین را تعیین می کند [MUL 09].



شکل ۶-۲۰ مدل غیر پارامتری سرعت باد

ما می توانیم برحسب این مدل ها و مطابق شروع تصادفی بینهایت "پیشامد" تولید کنیم (داده ها پراکنده می شوند) که مشخصات آن ها تا ضریب خطای نزدیک، مشخصات آماری سرعت باد را منعکس می کند [NIC 02].

<sup>1</sup>The Van der Hoven spectrum

<sup>2</sup>Unimodal

<sup>3</sup>Bimodal



### ۶-۲-۳ پتانسیل انرژی باد فراساحلی

به منظور ارزیابی پتانسیل فراساحل ما به توزیع سرعت باد در مکان نیاز داریم. ارزیابی منبع انرژی باد با برآورد کلی انرژی میانگین شامل باد در منطقه‌ای عظیم انجام می‌گردد [TRO 91].

پژوهشی توسط BWEA (انجمن انرژی باد بریتانیا)<sup>۱</sup> انجام شده است که تعداد از مناطقی را نشان می‌دهد که باید هنگام در نظرگیری پتانسیل انرژی بادی فراساحلی حذف شوند. این مناطق شامل تمامی آب‌ها در ۵ کیلومتری ساحل، کانال‌های کشتیرانی، زمین‌های تمرین نظامی، نواحی که حق ماهیگیری دارند، نواحی خطرناک (انبار تسلیحات، مواد منفجره و دیگر مواد خطرناک) و شامل تمامی مناطقی می‌شوند که آب کمتر از  $10\text{ m}$  یا بیشتر از  $50\text{ m}$  است.

#### کاربرد WasP در انرژی بادی فراساحلی

مدل WasP (تحلیل اطلس باد و برنامه‌ی کاربردی)<sup>۲</sup> توسط آزمایشگاه رویز<sup>۳</sup> در دانشگاه فنی دانمارک توسعه داده شده است. این مدل، استاندارد بین‌المللی برای ارزیابی پتانسیل انرژی باد بوده و برای دستیابی به داده‌های آماری باد در مکان مفروض اختصاص داده شده است. در پایان، این مدل به جای مقادیر لحظه‌ای ایستگاه اندازه‌گیری در مکان مورد نظر، داده‌های آماری را ترسیم می‌کند. این داده‌های آماری با استفاده از اندازه‌گیری میانگین ساعتی باد در طول ۱۰ سال محاسبه می‌شوند.

به طور خلاصه، WasP به صورت زیر کار می‌کند [TRO 91]:

- ایستگاه اندازه‌گیری نزدیک به مکان مورد نظر انتخاب می‌شود؛
- توزیع آماری سرعت باد در ارتفاع مرجع برای ۱۲ بخش از جهت در این ایستگاه محاسبه می‌گردد؛
- این توزیع آماری اصلاح می‌گردد تا اثرات کوه‌شناسی یا موانع حول ایستگاه اندازه‌گیری نیز در نظر گرفته شوند؛

<sup>1</sup>British Wind Energy Association

<sup>2</sup>Wind Atlas Analysis and Application Program

<sup>3</sup>Roisse laboratory

- اثرات کوه‌شناسی و موانع مربوط به سایت به منظور تنظیم توزیع آماری همدید (سینوپتیک)<sup>۱</sup> و دستیابی به اقلیم‌شناسی مکان مورد پژوهش در نظر گرفته می‌شوند.

پایداری اتمسفری در اقیانوس و خشکی بسیار متفاوت می‌باشد. این تفاوت به ظرفیت گرمایی محیط مربوط است. ما همچنین در خشکی متوجه تغییرات زیادی در پایداری اتمسفری در طول روز می‌شویم در حالی که این تغییرات در دریا کمتر می‌باشند [FIC 03]. پایداری اتمسفری بر پروفیل سرعت باد تاثیرگذار است (سرعت باد با ارتفاع تغییر می‌کند) [GAR 94]. در مدل *WasP* تغییرات پایداری اتمسفری به صورت مستقیم برای تنظیم پروفیل سرعت باد در نظر گرفته می‌شود.

در فراساحل، ناهمواری سطح دریا به برهمکنش‌های میان اقیانوس و اتمسفر مربوط می‌شود که بر اساس سرعت باد، فاصله از ساحل و مسافت طی‌شده توسط باد در مسیر بدون مانع تغییر می‌کند [LAN 01]. این تغییرات در ناهمواری میان خشکی و دریا با مدل لایه‌ی مرزی داخلی نشان داده می‌شوند.

بگذارید ما متذکر شویم که در این تحلیل از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در دریا استفاده می‌شود تا از راه دور منبع انرژی دریایی ارزیابی گردد. با این حال، در زمینه‌ی مطالعات محلی، جمع‌آوری مجموعه‌ی داده‌هایی که در دریا و در طی چندین دهه اندازه‌گیری شده‌اند دشوار می‌باشد.

در [LAN 01] پتانسیل قابلیت اجرای *WasP* در زمینه‌ی مکان فراساحلی نشان داده می‌شود. با این حال، از این روش تنها می‌توان در زمینه‌ی مطالعات محلی بدون حل مشکل موجود بودن اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در دریا استفاده کرد.

تغییرات سرعت باد با ارتفاع

برای سرعت میانگین  $V_{ave}$  پذیرفته‌شده است که در اتمسفری که به لحاظ حرارتی پایدار باشد از قانون تجربی لگاریتمی زیر تبعیت می‌کند [MOL 02]:

$$V_{ave}(z) = \frac{v}{K} \ln \frac{z}{z_0}$$

<sup>1</sup>Synoptic statistical distributions

در جایی که «سرعت اصطکاک،  $K$  ثابت کارمن است (حدود ۰.۴)،  $z_0$  ارتفاع مرجع مبتنی بر وضعیت دریا است (و در نتیجه به سرعت باد وابسته است). مقادیر اشاره شده در مقالات موجود از چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر متفاوت می‌باشند.

ما رابطه‌ی میان  $z_0$  و سرعت اصطکاک زیر را پیشنهاد می‌کنیم:

$$z_0 = 0.0144 \frac{v^2}{g}$$

در عمل، چیزی که استفاده شده یا قانون لگاریتمی است یا قانون نمایی است که  $V_{ave}(z, t)$  را به  $V_{ave}(10, t)$  و  $V_m(z, t)$  را به  $V_m(10, t)$  مربوط می‌کند و  $10m$  به عنوان ارتفاع مرجع در نظر گرفته می‌شود.

قانون لگاریتمی:

$$\frac{V_{ave}(z, t)}{V_{ave}(10, t)} = \frac{\ln z/z_0}{\ln 10/z_0}$$

قانون نمایی:

$$\frac{V_m(z, t)}{V_m(10, t)} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha$$

ضریب  $\alpha$  مابین ۰/۱ و ۰/۲ قرار دارد. در بیشتر تنظیمات به این نوع قانون نیاز است. در ارتفاع  $200m$  ممکن است اختلاف سرعت باد به بیش از ۵۰٪ برسد که بر روی توزیع بارهای وارد بر اجزای پروانه‌ی توربین تأثیر می‌گذارد.

ترسیم پتانسیل انرژی بادی فراساحل

نصب مزارع بادی فراساحل به ما کمک می‌کند تا نسبت به خشکی از باد قوی‌تر و منظم‌تری بهره‌مند شویم و در نتیجه به تولید انرژی بیشتر و منظم‌تری برسیم. هنگام انتخاب مکان برای مزرعه‌ی بادی فراساحل عوامل مختلف بسیاری نقش پیدا می‌کنند: دسترسی آسان، اقلیم-شناسی باد در آن منطقه، عمق سنجی، تأثیر زیست‌محیطی و غیره.

اقلیم‌شناسی باد در مکان، یعنی تناوب سرعت‌های مختلف باد در جهات مختلف، یک از مهم‌ترین عوامل می‌باشد، زیرا منبع انرژی و در نتیجه مقدار الکتریسته‌ی تولیدی را تحت تأثیر قرار

می‌دهد. بنابراین، ارزیابی توزیع فضایی منبع انرژی باد در دریا یک عامل مهم است. ما باید در مرحله‌ی انتخاب مکان تأسیسات نقشه‌ای دقیق از منابع انرژی داشته باشیم [BEN 07].

دقیق‌ترین وسیله برای اندازه‌گیری سرعت و جهت باد، نصب برجی در محل ارزیابی منبع است اما به لحاظ مالی نصب برج و تحمل چندین سال برای دستیابی به مجموعه‌ی عظیم داده‌ها واقع‌گرایانه نیست. همچنین این اندازه‌گیری‌ها تنها بیانگر منطقه‌ای محدود در اطراف نقطه‌ی انتخابی می‌باشند. این گفته به خصوص در نزدیکی ساحل صادق است، یعنی جایی که تنوع فضایی باد زیاد است. به علاوه، مطابق EWEA (انجمن انرژی بادی اروپا) پراکندگی شبکه‌ی ایستگاه‌های آب‌وهوایی در دریا باعث بروز مشکلاتی به لحاظ دسترسی به اندازه‌گیری‌ها مربوط به باد در ناحیه‌ی اطراف مکان آتی می‌شود [EUR 04]. در نتیجه، ما باید دیگر وسایل اندازه‌گیری، یا مدل‌ها روی بیاوریم.

به مدت چندین سال منابع "کلاسیک" اندازه‌گیری باد (ایستگاه‌های آب‌وهوا، تجهیزات روی کشتی‌ها و غیره) با ابزارهای شناسایی از راه دور حامل در فضا به هم متصل گشته‌اند: ارتفاع-سنج‌های راداری<sup>۱</sup> [BRO 81]، تفرق‌سنج‌های راداری<sup>۲</sup> [MOO 04]، رادارهای دهانه<sup>۳</sup> [WAC 96]، تابش‌سنج‌ها<sup>۴</sup> [GLO 77] و غیره. این منابع داده برای بیشتر بخش‌ها مزیت داشتن داده‌ها از اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ را دارند.

این ابزارهای شناسایی از راه دور برای دسترسی به اطلاعات فضایی درباره‌ی بادهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

این نمودارها بیانگر اندازه‌گیری‌های سرعت و جهت باد در شبکه‌ای هستند که منطقه‌ی اجرای اندازه‌گیری‌ها را پوشش می‌دهد. از این نمودارها برای ارزیابی تنوع فضایی باد استفاده می‌شود.

### ۳-۶ توربین‌های بادی

توربین‌های بادی امروزی ساحلی و فراساحلی بر اساس طرح محور افقی سه‌پره‌ای ساخته می‌شوند.

### ۳-۶-۱ منحنی‌های آماری مشخصه

#### ضرایب توان و گشتاور

<sup>1</sup> Radar Altimeter

<sup>2</sup> Radar Diffusometer

<sup>3</sup> Synthetic aperture radars

<sup>4</sup> Radiometer



توان مکانیکی موجود در شفت توربین بادی با عبارت زیر نشان داده می‌شود:

$$P = \Gamma \Omega$$

که در آن  $\Gamma$  گشتاور اعمالی شفت است.

این گشتاور به سرعت چرخش  $\Omega$  و سرعت باد  $v$  وابسته می‌باشد:

$$\Gamma = \Gamma(\Omega, v)$$

این رابطه مشخصه‌ی مکانیکی توربین باد را نشان می‌دهد.

به منظور بیان مشخصه‌ی توان توربین بادی از ضریب توان  $C_p$  استفاده می‌شود:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho R^2 v^3}$$

این ضریب تابعی از نسبت سرعت رأس  $\lambda = \frac{\Omega R}{v}$  است،

$$C_p = C_p(\lambda)$$

به ما امکان ارزیابی توان موجود در شفت توربین را می‌دهد:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi C_p v^3 R^2$$

گشتاور شفت به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\Gamma = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{v}{R \Omega} \right) \rho \pi v^2 R^3 = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda} \rho \pi v^2 R^3$$

یا با استفاده از رابطه‌ی زیر:

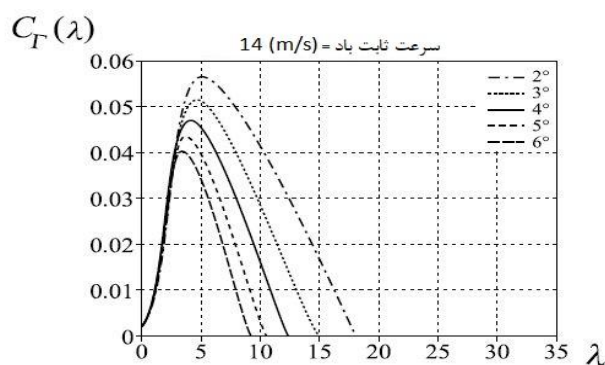
$$\Gamma = \frac{1}{2} C_\Gamma \rho \pi v^2 R^3$$

که در آن  $C_\Gamma$  ضریب گشتاور بوده و با رابطه‌ی زیر به ضریب توان مرتبط می‌شود:

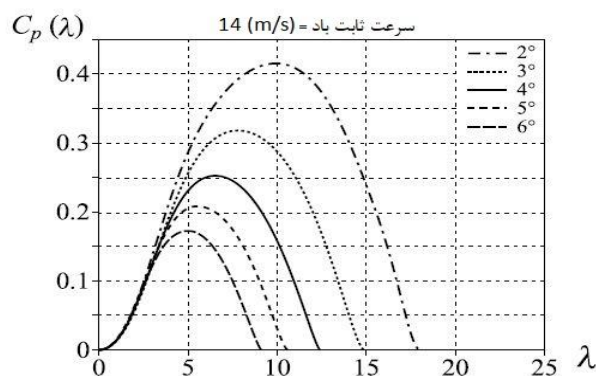
$$C_p(\lambda) = \lambda C_\Gamma(\lambda)$$

می‌توان توربین‌های بادی فراساحلی را برای کار در  $TSR$  بهینه‌ی بیشتر نسبت به توربین‌های ساحلی طراحی کرد. در نتیجه، هزینه تبدیل انرژی کم می‌شود، زیرا جرم قابل استفاده‌ی توربین کاهش می‌یابد (گشتاور انرژی باد کاهش می‌یابد) [EWE 05]. بنابراین نویز افزایش پیدا کرده اما هنگامی که فناوری فراساحل مطرح باشد آلودگی نویزی نگرانی عمده نیست.

شکل‌های متداول منحنی‌های مشخصه  $C_p(\lambda)$  و  $C_T(\lambda)$  توربینی با زاویه گام متغیر به ترتیب در اشکال ۶-۲۱ و ۶-۲۲ نشان داده شده‌اند. این منحنی‌های مشخصه با استفاده از محاسبه‌ی کد توسعه‌یافته در [DIO 99, NIC 06] به دست می‌آیند.



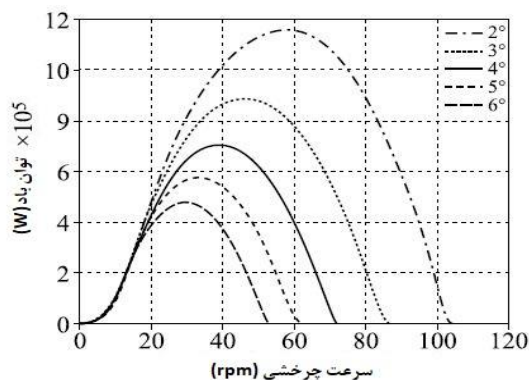
شکل ۶-۲۱ ضریب گشتاور مطابق نسبت سرعت رأس توربین بادی سه‌پره‌ای با زاویه گام متغیر (۶-۲)



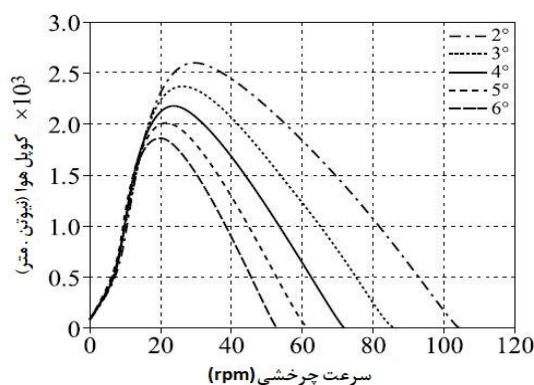
شکل ۶-۲۲ ضریب توان مطابق با نسبت سرعت رأس توربین بادی سه‌پره‌ای با زاویه گام متغیر (۶-۲)

ممکن است منحنی‌های مشخصه‌ی توان به عنوان تابعی از سرعت چرخش در شفت توربین توسط تولیدکننده ارائه شوند یا با مدل‌سازی به دست آیند. از آن‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد توربین با بیشینه کردن توان خروجی و بهینه‌سازی طراحی سیستم تبدیل استفاده می‌شود.

شکل ۶-۲۳ نتایج مدل‌سازی توربین بادی با توان متوسط (قطر  $m$  ۴۶) را نشان می‌دهد که با زاویه‌ی گام متغیر کار می‌کند. سرعت‌های در نظر گرفته شده برای باد در شبیه‌سازی در گستره-ی مقدار شروع  $3 m/s$  و سرعت اسمی  $14 m/s$  قرار می‌گیرند. شکل ۶-۲۴ منحنی گشتاور مشخصه همان توربین نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲۳ منحنی‌های مشخصه توان باد با زاویه‌ی گام متغیر (۲-۶°)



شکل ۶-۲۴ منحنی‌های مشخصه‌ی گشتاور باد با زاویه‌ی گام متغیر

### بازده توربین

اگر انرژی جنبشی توده‌ی هوا  $m$  که با سرعت  $v$  حرکت می‌کنند به صورت کامل توسط وسیله-ای به مساحت سطح  $A$  (عمود بر جهت باد) دریافت شود توان آنی باد به صورت زیر خواهد بود  
 [GOU 08]:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

که در آن  $\rho$  چگالی هوا می باشد ( $1/25 \text{ kg/m}^3$ ).

با این حال، در واقعیت، توربین بادی مقداری از توان  $P$  را استخراج می کند که کمتر از توان موجود  $P_e$  است، زیرا سرعت توده های هوا در پشت توربین بادی صفر نیست. بازده تبدیل انرژی بادی با استفاده از ضریب توان  $C_P$  نشان داده شده که با رابطه ی زیر تعریف می گردد:

$$C_P = \frac{P}{P_e}; C_P < 1$$

اگر  $m$  جرم جریان هوای روی سطح  $A$  بر واحد زمان در سرعت متوسط  $v_0$  باشد ما به دست می آوریم:

$$m = \rho A v_0 \quad \text{and} \quad P = \frac{1}{2} \rho A v_0 (v_1^2 - v_2^2)$$

که در آن:

$v_1$  سرعت محوری جریان بالادست توربین است؛

$v_2$  سرعت محوری جریان پایین دست توربین است؛

$v_0$  سرعت متوسط جریان در طول سطح  $A$  جاروب شده توسط توربین است.

ما می توانیم با محاسبه ی  $\frac{dP}{dv_2} = 0$  نشان دهیم که توان بیشینه به صورت زیر نشان داده

می شود:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho A v_1^2$$

این رابطه فرمول بتز<sup>۱</sup> را تشکیل داده و مطابق زیر می باشد:

$$C_P^{max} = \frac{P_{max}}{P_e} = \frac{16}{27}$$

<sup>۱</sup>Betz's formula



بازده دریافت انرژی که به مشخصه‌های آیرودینامیکی و تنظیم سیستم تبدیل وابسته است کمتر از این حد ۵۹٪ می‌باشد.

بنابراین، "کیفیت آیرودینامیکی" توربین بادی در شرایط بهینه‌ی تعدیل با رابطه‌ی زیر نشان داده می‌شود:

$$\eta_a = \frac{C_p(\lambda)}{C_p^{max}}$$

در پروفیل پره‌های مدرن این "کیفیت آیرودینامیکی" می‌تواند به مقادیر بیش از ۸۰٪ برسد.

۶-۳-۲ برآورد توان توسعه‌یافته توسط توربین بادی

به طور کلی، توربین‌های بادی مدرن برای رسیدن به خروجی توان اسمی در سرعت‌های باد مابین ۱۲ و ۱۵ m/s طراحی شده‌اند و در حدود ۲۵ m/s به صورت خودکار خاموش می‌شوند.

یک توربین بادی توان بیشینه‌ای در شفت تولید می‌کند که توان اسمی،  $P_n$  نامیده شده و مطابق آن طراحی می‌شود. توان  $P_n$  به ازای سرعت باد  $v_n$  به دست می‌آید که سرعت اسمی نامیده می‌شود. به ازای  $v > v_n$  باید پارامترهای توربین بادی تنظیم شوند تا توان تولیدی عملاً مساوی  $P_n$  باقی بماند؛ ما از محدودیت توان صحبت می‌کنیم. بنابراین، قابلیت تولید عمده‌اً کاهش داده می‌شود.

انتخاب سرعت اسمی  $v_n$  (که برای آن توان با تنظیم سرعت گریز از مرکز محدود می‌شود) عمدتاً بر پایه‌ی محدودیت‌های مالی قرار گرفته است.

بگذارید  $v_n^*$  سرعت اسمی باشد که با استفاده از این معیار سازگار شده است. اگر ما قرار دهیم  $v_{n1} < v_n^*$  ما به توان اسمی کاهش‌یافته  $P_{n1}$  خواهیم رسید که در آن ظرفیت توربین برای بازیابی کمتر می‌شود. اگر ما قرار دهیم  $v_{n2} > v_n^*$ ، توان اسمی توربین  $P_{n2}$  افزایش می‌یابد اما افزایش انرژی تبدیل‌شده ناچیز است، زیرا دوره‌ی تناوب افزایش‌یافته کار در توان  $P_{n2}$  (مدت زمانی که به احتمال پیشامد سرعت باد در گستره‌ی مکان تأسیسات مربوط می‌شود) بسیار کوچک است تا هزینه‌های مربوط به انتخاب توان اسمی  $P_{n2}$  را توجیه کند.

ما می‌توانیم برای بیان توان به عنوان تابعی از سرعت در منطقه‌ی II از کارکرد توربین (شکل ۶-۱۲) از میان تعدادی از مدل‌های زیر انتخاب کنیم [JAN 76; FRE 90]:

- مدل خطی که دارای عیب نادیده گرفتن توان حقیقی تأمین‌شده توسط توربین می‌باشد؛

- مدل سهموی؛

- مدل غیرخطی شکل:

$$P = a + bv^k$$

که در آن  $k$  ضریب شکل<sup>۱</sup> توزیع ویبول بوده و مشخصات آماری باد را نشان می‌دهد. پارامترهای  $a$  و  $b$  از شرایط زیر استنتاج می‌گردند:

$$P(v_D) = 0$$

$$P(v_n) = 0$$

این پارامترها با عبارات زیر نشان داده می‌شوند:

$$a = \frac{P_n v_D^k}{v_n^k - v_D^k}$$

$$b = \frac{P_n}{v_n^k - v_D^k}$$

توان متوسط فراهم‌شده به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{ave} = \int_0^{\infty} P(v) f(v) dv = \int_{v_D}^{v_n} (a + bv^k) f(v) dv + P_n \int_{v_n}^{v_M} f(v) dv$$

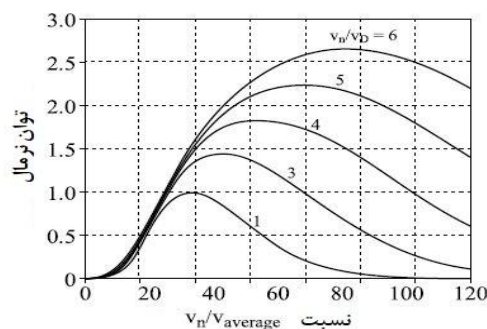
که در آن  $f(v)$  تابع چگالی احتمال توزیع ویبول است. در نهایت، ما رابطه‌ی زیر را به دست می‌آوریم:

$$\frac{P_{ave}}{P_n} = \left[ \left( \frac{v_n}{c} \right)^k - \left( \frac{v_D}{c} \right)^k \right] \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{v_D}{c} \right)^k \right] - \exp \left[ - \left( \frac{v_n}{c} \right)^k \right] \right\} - \exp \left[ - \left( \frac{v_M}{c} \right)^k \right]$$

ما می‌توانیم برای مطالعه‌ی کیفی وابستگی توان متوسط  $P_{ave}$  به عنوان تابعی از پارامترهای  $v_D$  و  $v_n$  از پارامترهای توزیع ویبول استفاده کنیم و مجموعه‌ی مشخصات  $\left( \frac{v_n}{v_{ave}}, \frac{P_{ave}}{P_n} \right)$  را به

<sup>۱</sup>Form factor

ازای مقادیر مختلف رابطه‌ی  $\frac{v_n}{v_D}$  به دست آوریم. یک مجموعه در شکل ۶-۲۵ نشان داده شده است [NIC 95, LON 05].



شکل ۶-۲۵ منحنی‌های مشخصه‌ی  $\frac{P_{ave}}{P_n} \left( \frac{v_n}{v_{ave}} \right)$  به ازای مقادیر مختلف رابطه‌ی  $\frac{v_n}{v_D}$

توجه کنید که رابطه‌ی  $\frac{v_n}{v_D}$  اثر قابل توجهی بر بازده توربین بادی دارد. از آنجایی که سرعت اسمی  $v_n$  با هزینه مشخص می‌گردد معیار مالی اهمیت حیاتی برای مزرعه‌ی بادی دارد بنابراین، تنها با کاهش سرعت شروع  $v_D$  می‌توان رابطه‌ای بهتر برای  $\frac{v_n}{v_D}$  به دست آورد. در ساخت توربین باید موارد زیر در نظر گرفته شوند:

- توربین باید تا جای ممکن با باد کم‌سرعت  $v_D$  شروع به حرکت کند؛

- به ازای  $v_n < v < v_M$  سرعت شفت ثابت خواهد بود؛

- به ازای  $v > v_M$  عملیات توربین به دلایل ایمنی متوقف خواهد شد.

### ۳-۳-۶ ژنراتور و سیستم‌های توان الکترونیکی

سازگاری‌های مکانیکی با جعبه‌دنده یا بدون آن

برای توربین‌هایی با توان متوسط یا بالا، سرعت چرخش روتورها در توان اسمی نسبتاً کم است. با این حال، یک ماشین الکتریکی خواه به عنوان موتور یا ژنراتور استفاده شود نسبت به مقدار گشتاور طراحی می‌گردد. گشتاور بر جرم یک ماشین پیستونی سریع با معماری کلاسیک و تعداد کمی جفت‌های قطبی به ازای گشتاورهای چندین  $kN.m$  چندین  $N.m/kg$  می‌باشد.

در ماشین‌های با توان کم سرعت چرخش نسبتاً بالا است و می‌توان ژنراتور را (اغلب با آهن-رباهای دائم) بدون نیاز به ماشین بسیار سنگین مستقیماً به توربین کوپل کرد [ECR 02]. از طرف دیگر، سرعت کم چرخش در ماشین‌های با توان بالا (چند صد  $kW$  تا چندین  $MW$ ) به گشتاور بسیار زیاد منجر می‌شود (به عنوان مثال  $170 \text{ kN.m}$  برای  $600 \text{ kW}$  در  $35 \text{ rpm}$ ) که اگر از فناوری متداول استفاده شود (به خصوص ماشین‌ها القایی) ژنراتور به صورت بازدارنده‌ای سنگین خواهد بود. یک ماشین القایی  $170 \text{ kN.m}$  بیش از ۶۰ تن وزن دارد (وزن ماشین  $13 \text{ MW}$  با  $750 \text{ rpm}$ ). بدین سبب است که معمولاً جعبه‌دنده میان توربین و ژنراتور قرار داده می‌شود.

ما می‌توانیم به منظور دستیابی به سرعت پیوسته متغیر از تعدادی از راه‌حل‌ها استفاده کنیم. با این که احتمالات بسیاری وجود دارد اما ۳ نوع عمده از این سیستم‌ها یافت شده است: ماشین‌های القایی دارای قفسه سنجابی با تغییردهنده‌ی الکتریکی فرکانس، ماشین‌های القایی دارای روتور لغزان<sup>۱</sup> و تأمین توان دو برابری و ماشین‌های سنکرون با تغییردهنده‌ی فرکانس.

با این حال، تقویت‌کننده‌ی مکانیکی دارای عیب‌هایی چون افزایش نیاز به نگهداری (تغییر روغن و غیره)، نرخ نسبتاً بالای خرابی، افزایش تلفات انرژی، نویز صوتی که گاهی اوقات ناخوشایند بوده و دست و پا گیر بودن (به خصوص با افزایش طول آشیانه) می‌باشد. این دلیلی است بر اینکه چرا سازنده‌های مشخصی برای پاسخ‌های مستقیم محرک انتخاب شده‌اند که در بخش بعدی بحث خواهد شد.

### توربین‌های بادی دارای ژنراتورهای القایی

از میان ماشین‌های استفاده‌شده در زمینه‌ی تبدیل انرژی بادی، انواع القایی دارای مزیت قابلیت اطمینان خوب، هزینه‌ی نسبتاً کم و در نهایت کاهش وزن می‌باشند [MUL 00; BAU 00].

ما در توربین‌های با توان متوسط و بالا، سیستم‌های ساحلی را پیدا می‌کنیم که به شبکه‌ی برق متصل می‌باشند و هر وقت باد بوزد برق تولید می‌کنند. اولین ماشینی که هنگام فکر کردن به چنین سیستم‌هایی به ذهن می‌رسد ژنراتور سنکرون است؛ با این حال، هزینه‌ی کم و استانداردهای ماشین‌های القایی به سلطه‌ی گسترده‌ی ماشین‌های القایی قفسه سنجابی (با توان‌هایی فراتر از مگاوات) بر بازار منجر شده است.

<sup>1</sup>Wound rotor

ماشین‌های القایی قفسه سنجابی‌دار در غیاب کار با سرعت متغیر تنها به نصب نسبتاً سریع نیاز دارند. آن‌ها اغلب به انبار خازنی جبرانی توان راکتیو و استارتر خودکار متوالی دارای گردیتور<sup>۱</sup> (هنگامی که به شبکه‌ی نزدیک به سرعت سنکرون متصل است برای محدود کردن طبیعت گذرای تقاضا برای جریان استفاده می‌شود) کوپل می‌شوند. بنابراین، سرعت آن‌ها با حاشیه خطای کم و با قرار دادن فرکانس ( $50\text{ Hz}$  یا  $60$ ) و با تعداد جفت‌های قطبی مشخص می‌شود. اگر سرعت به طور پیوسته متغیر نباشد، با کمی هزینه‌ی اضافی از سیم‌پیچی استارتر دارای دو پیکربندی قطبی برای ساخت ماشین دو سرعت استفاده می‌شود.

برای کار کردن با سرعت متغیر باید ماشین به مبدل فرکانس ایستا کوپل شود. امروزه، این ژنراتورها معمولاً برای توان‌های بالاتر از ۲ تا  $3\text{ MW}$  استفاده می‌شوند. ماشین‌های القایی دارای روتورهای سیم‌پیچ امروزه به صورت گسترده در توربین‌های بادی به خصوص توربین‌های فراساحل استفاده می‌شوند. ما برای کنترل از یک اتصال سری الکترونیکی با مدهای هایپو و هایپر-سنکرون<sup>۲</sup> به نام ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای<sup>۳</sup> ( $DFIG$ ) استفاده می‌کنیم.

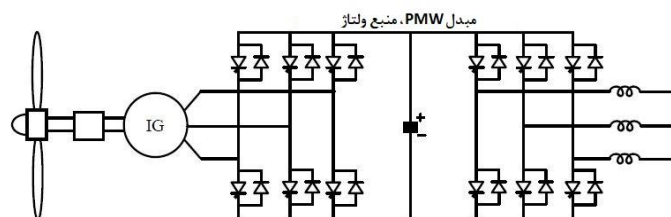
برای اینکه ماشینی با سرعت متغیر عمل کند باید آن ماشین به مبدل ایستا یا استاتور (در ماشین قفسه سنجابی‌دار) یا به مدار روتور مجهز شود [ $LEC 01$ ]. می‌توان ساختارهای مورد استفاده در توربین بادی را به گروه‌های زیر دسته‌بندی کرد:

۱- کار با سرعت ثابت (یا دو سرعت).

۲- مبدل ولتاژ استاتور - کنترل اسکالر یا برداری.

۳- ژنراتور القایی با دو تغذیه و مبدل ولتاژ روتور.

شکل ۶-۲۶ ژنراتور القایی را نشان می‌دهد که با استفاده از مبدل ولتاژ منبع به شبکه متصل و با استفاده از روش  $PWM$  (تغییر پهنای پالس<sup>۴</sup>) کنترل می‌شود.



<sup>1</sup>Gradator

<sup>2</sup>Hypo-Hyper Sanchron

<sup>3</sup>Doubly-fed induction generator

<sup>4</sup>Pulse Width Module

شکل ۶-۲۶ توربین بادی با سرعت متغیر و دارای ژنراتور قفسه سنجایی دار و اتصال سری میدل‌های ولتاژ که با استفاده از تغییر پهنای پالس کنترل می‌گردند

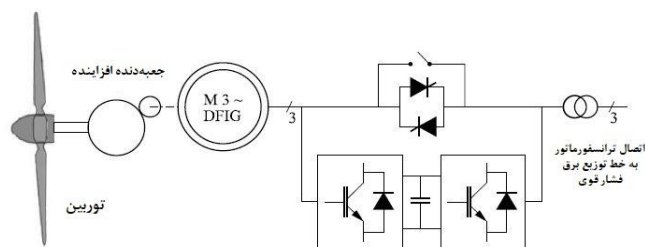
این نمودار چندین مزیت مهم را نشان می‌دهد:

- انتقال دو جهتی توان؛ احتمال کنترل عامل توان خروجی،

- نرخ پایین انحراف هارمونیک جریان تزریقی به شبکه.

پرکاربردترین نوع کنترل برای مبدل متصل به خروجی ژنراتور رگلاتورهای میدانی (برداری) می‌باشند که به دلیل مشخصه‌های دینامیکی بهبودیافته‌ی خود نسبت به نوع اسکالر بسیار ارجحیت دارند. با این حال، این امر برای توربین‌های بادی کمتر از مزیت می‌باشد یعنی جایی که سرعت پاسخ حلقه‌ی کنترلی سرعت از اهمیت کمتری برخوردار است.

ماشین‌های دو تغذیه‌ای مزیت قابل توجهی در کاهش اندازه‌ی توان مبدل الکترونیکی توان دارند [MUL 04]. اندازه‌ی توان مبدل الکترونیکی توان حتی هنگامی که بازه‌ی تغییر سرعت کاهش یابد کوچک‌تر می‌شود. به طور معمول، به ازای تغییر سرعت چرخشی در بازه‌هایی با نسبت ۳:۲ توان مبدل مابین یک چهارم و یک سوم توان کلی ماشین قرار می‌گیرد.



۶-۲۷ سیستم توانی دو تغذیه‌ای [MUL 09]

با کنترل برداری می‌توان کنترل تنظیم بهینه‌ی سرعت مکانیکی و همچنین کنترل موثر توان راکتیو (بدون انبارهای متصل خازن) را تضمین کرد. امروزه، مبدل یک نوع منبع ولتاژ است که اساساً از ترانزیستور دو قطبی با گیت عایق<sup>۱</sup> (IGBT) و فناوری PWM استفاده شده است [YAZ 06; CHO 06].

<sup>۱</sup>Insulated gate bipolar transistor

## توربین‌های بادی دارای ژنراتور سنکرون

### توربین‌های بادی با محرک مستقیم

سرعت چرخش کم در ماشین‌های با توان زیاد به افزایش شدید گشتاور و اگر از فناوری کلاسیک، به خصوص فناوری القا استفاده شود به ژنراتورهای بیش از حد سنگین منجر می‌گردد. همانطور که ما پیشتر مشاهده کردیم این دلیلی است بر اینکه چرا جعبه‌دنده مابین توربین و ژنراتور نصب می‌گردد [EUR 02]. با این حال، اگر ما بخواهیم که از به کارگیری تقویت‌کننده خودداری کنیم تنها ماشین سنکرون قادر به تأمین گشتاور افزایش‌یافته بر جرم است.

در این سیستم‌های به اصطلاح محرک مستقیم، روتور توربین به صورت مستقیم به ژنراتور الکتریکی (بدون جعبه‌دنده) متصل می‌گردد؛ بنابراین ما از محرک مستقیم صحبت می‌کنیم. افزایش قابلیت اطمینان، کاهش مدت از کار افتادگی و زمان نگهداری (در کاربردهای فراساحل حیاتی است) و کاهش تلفات انرژی از جمله مزیت‌های این سیستم‌ها می‌باشند.

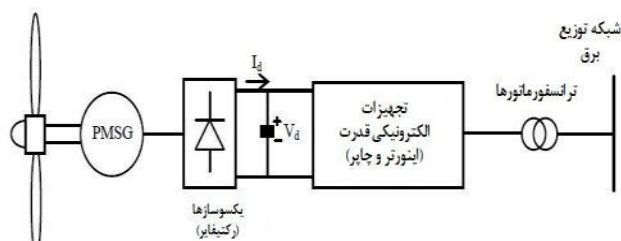
امروزه، بسیاری از تولیدکنندگان به ساختارهای محرک مستقیم علاقه دارند. به طور تاریخی، تولیدکننده آلمانی انرکن<sup>۱</sup> به تعمیم این فناوری با گستره‌ی وسیعی از ماشین‌های سنکرون  $1-6 MW$  دارای تعداد زیادی قطب و سیم‌پیچ القاگر کمک کرد (سیستم تحریک او نه حلقه داشت و نه جاروبک). امروزه تولیدکنندگان دیگر (جنرال الکتریک، آلستم، زیمنس، ونسیز، گلدویند و غیره<sup>۲</sup>) توربین‌های بادی با محرک مستقیم را پیشنهاد می‌دهند اما این‌ها توربین‌هایی هستند که در ژنراتور آن‌ها از تعداد بسیار زیادی قطب و مغناطیس دائم استفاده می‌شود. صنایع جنومونت<sup>۳</sup> با  $J48$  ( $750 kW$ ) در اواخر ۱۹۹۰ اولین شرکتی بود که دست به این اختراع مهم زد. با این حال، اندازه و وزن ژنراتورهای محرک مستقیم بسیار زیاد است به خصوص قطر ژنراتور قابل توجه است. می‌توان توربین‌های بادی محرک مستقیم را که به مبدل‌های توان کوپل شده‌اند به لطف قابلیت اطمینان آن‌ها به طور ویژه با کاربردهای فراساحل سازگار کرد [BRU 01].

<sup>1</sup>Enercon

<sup>2</sup>General Electric, Alstom, Siemens, Vensys, Goldwind, etc.

<sup>3</sup>Jeumont Industrie

ژنراتورهای با مغناطیس دائم ( $PMMSG$ )<sup>۱</sup> به دلایل فشردگی و بازده در حال پیدایش بوده و انتظار می‌رود علی‌رغم مشکلاتی که امروزه در تأمین عناصر زمینی کمیاب برای تولید آهن-رباهای بسیار مرغوب وجود دارد در طی چند سال آینده بسیار برجسته شود.



شکل ۶-۲۸ نمودار سینوپتیک سیستم توربین بادی با سرعت متغیر مبتنی بر ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم ( $PMMSG$ )

شکل ۶-۲۸ برای انتقال توان از ژنراتور به شبکه‌ی برق ساختاری را نشان می‌دهد که مبتنی بر اینورتر<sup>۲</sup> با منبع ولتاژ، جریان تنظیم‌شده می‌باشد و می‌تواند برای کاهش هزینه‌ی کلی سیستم تبدیل انرژی با جایگزین کردن مبدل سویچی سمت ماشین استفاده شود اما این کار به قیمت افزایش هزینه‌ی ماشین به خصوص هزینه‌ی کلی جرم آهن‌رباها تمام می‌شود [MUL 04].

می‌توان با کنترل مناسب چاپر<sup>۳</sup> (که بار معادل ژنراتور را در جریان پیوسته تعیین می‌کند) به بهینه‌سازی تبدیل، یعنی نگهداشتن نسبت سرعت رأس  $\lambda(t)$  در مقدار بهینه دست پیدا کرد. اینورتر با حلقه‌ی تنظیم ولتاژ طراحی می‌شود و توان اکتیو بهینه و همچنین توان راکتیو مطلوب را به شبکه تزریق می‌کند.

ملاحظات پیرامون فناوری نوین

می‌توان از نکات مطرح‌شده در بالا دو نتیجه گرفت [LAV 05]:

- مزارع بادی دارای ماشین‌های القایی قفسه سنجابی تک‌سرعت به ما امکان تولید انرژی الکتریکی را با استفاده از فناوری ساده می‌دهند. با این حال، آن‌ها دیگر به لحاظ نقشه‌های ولتاژ (عدم تنظیم توان راکتیو)، مقاومت در برابر شیب ولتاژ<sup>۴</sup> (مزارع جداشده و رای پیش‌فرض)، یا ولتاژ (قطع و وصل بسیار زیاد) با استانداردهایی که امروزه وجود دارند یا در آینده اعتبار خواهند یافت، سازگار نیستند.

<sup>1</sup>Permanent Magnet Sycronus Generator

<sup>2</sup>Inverter

<sup>3</sup>Chopper

<sup>4</sup>Votage dips



- مزارع بادی دارای ژنراتورهای سرعت متغیر به لطف واسطه‌های الکترونیکی توان احتمالات جدیدی را به وجود می‌آورند. آن‌ها احتمالاً قادر به برآورد معیارهای اعمالی باشند به خصوص هنگامی که به مبدل‌های الکترونیکی با توان کامل مجهز گردند. در حقیقت، ساختارهای دو تغذیه‌ای شامل بخش‌های پوششی (سیستم حلقه و جاروبک) هستند و برخلاف پیشرفت زیاد آن‌ها همچنان در مقابل توان ناگهانی<sup>۱</sup> حساس است.

اولویت‌های پژوهشی شناسایی شده‌اند. اولین مورد به کیفیت انرژی مربوط می‌شود، موضوعی جهانی که در تمامی ساختارهای دارای الکترونیک توانی (*D-FACTS*، فیلتر اکتیو) یافت می‌شود. نوسانات باد و پدیده‌های مکانیکی مربوط به توربین باعث ایجاد نوسان توان می‌شوند، بنابراین پاسخ‌های جدیدی به منظور یکنواخت‌سازی منبع توان تزریقی به شبکه پدیدار شده‌اند.

اولویت دوم مربوط به مقاومت در برابر شیب ولتاژ و بازیابی سریع کارکرد است تا ژنراتورهای انرژی بادی پس از شیب ولتاژ همچنان متصل بمانند که مستلزم تجهیزات بسیار بزرگ یا کمکی است بنابراین توربین‌های بادی دست کم به لحاظ عملکرد (ذخیره‌ی توان اکتیو راکتیو، شرکت در تنظیم ولتاژ و فرکانس) بسیار مشابه منابع متداول می‌باشند.

### ۶-۳-۴ مزارع بادی فراساحلی چند مگاواته

#### تغییرپذیری و قابل پیش‌بینی بودن تولید انرژی باد

تغییرپذیری انرژی باد فراساحل باید در زمینه‌ی گسترده‌تر مزرعه بادی ویژه بررسی گردد. به دلیل اینکه باد به طور پیوسته در یک مکان خاص نمی‌وزد اگر در ناحیه‌ای معین وزش باد متوقف شود، اثر کلی کوچک خواهد بود. ما می‌توانیم بگوییم که در سطح سیستم، می‌توان از منبع جهانی انرژی باد، به طور مستقل از این حقیقت که باد همواره در آن مکان خاص موجود نیست برای تأمین منبع منظم توان بهره‌برداری کرد.

انرژی باد فراساحل عمدتاً به دلیل نوسانات اقلیمی در طول زمان دچار تغییر می‌شود. این تغییرات در تمامی مقیاس‌های زمانی اتفاق می‌افتند: ثانیه‌ها، دقیقه‌ها، ساعت‌ها، روزها، ماه‌ها، فصل‌ها و سال‌ها. داشتن توانایی پیش‌بینی آن‌ها به منظور نصب و بهره‌برداری کامل از سیستم‌های تولید انرژی باد در سیستم‌های تأمین توان از اهمیت حیاتی برخوردار است.

#### تغییرپذیری کوتاه‌مدت

<sup>1</sup>Power surges

در تحلیل داده‌ها به منظور مدیریت مزارع بادی باید توان بادی که برای یک دوره‌ی داده‌شده قابل پیش‌بینی می‌باشد و بنابراین نظریه‌ی تغییرپذیری کوتاه‌مدت در نظر گرفته شوند. باید تفاوت میان مقیاس‌های زمانی متفاوت (یک دقیقه یا یک ساعت یا چندین ساعت) لزوماً استنتاج شوند تا تعادل میان توان فراهم‌شده توسط مزارع توربین بادی و توان درخواستی (که متغیر است) تضمین گردد [IEA 05].

#### تغییرات در طول زمان

تغییرات سریع (از چند ثانیه تا یک دقیقه) ناشی از اغتشاش یا وقایع گذرا در تولید انرژی بادی فراساحلی تنها اثر کوچکی بر شبکه دارند به خصوص به دلیل اینکه مزارع بادی فراساحلی شامل چندین توربین می‌شوند [IEA 05].

#### تغییرات در طول یک ساعت

تغییرات از درجه ساعت برای سیستم بسیار حیاتی می‌باشند اما همچنان باید آن‌ها را در رابطه با نوسانات تقاضا مطالعه کرد. اساساً تغییرات محلی مابین  $\pm 5\%$  از ظرفیت نصب‌شده در سطح منطقه‌ای می‌باشند [IEA 05]. هنگامی که نفوذ انرژی باد به نقطه‌ای رسیده باشد که تغییرات منابع برابر تغییرات تقاضا باشد (در عمل، هنگامی که ۵ الی ۱۰٪ از تقاضای سالانه برای الکتریسیته از توان بادی سرچشمه می‌گیرد) این تغییرات بیانگر مشکلی در ذخایر کلی سیستم تولید خواهند بود که برای تعادل منابع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

هنگامی که توربین‌ها به سرعت بیشینه‌ی خود رسیده و منفصل گردند، بیشترین تغییرات از عبور جبهه‌های طوفان ناشی می‌شوند. با این حال، به دلیل اثر متوسط بر روی مزرعه‌ی بادی چند دقیقه طول نمی‌کشد تا خروجی کلی توان به صفر افت کند. به طور کلی، این امر تنها برای نواحی جغرافیایی نسبتاً کوچک قابل توجه می‌باشد، زیرا در مناطق بزرگ ساعت‌ها طول می‌کشد تا ظرفیت انرژی بادی به طور موثر صفر گردد.

#### تغییرات از یک ساعت به بعد

تغییرات میان پیش‌بینی‌ها و تولید واقعی انرژی بر طراحی سیستم الکتریکی تأثیر می‌گذارند. عدم دقت پیش‌بینی‌های انرژی باد باید همواره نسبت به خطاهای موجود در پیش‌بینی تقاضا در نظر گرفته شوند. مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است و واضح است که پاسخ‌هایی در دسترس می‌باشند [IEA 05].

#### تغییرات بلندمدت

تغییرات کند یا بلندمدت در انرژی باد که با سیستم تأمین توان یکپارچه در نظر گرفته می‌شوند شامل تغییرات فصلی و سالانه می‌شوند که توسط اثرات اقلیمی ایجاد شده‌اند. این تغییرات به ویژه در راه‌اندازی و مدیریت روزانه‌ی شبکه‌ها اهمیت ندارند اما در طرح‌ریزی راهبرد منابع الکتریکی نقش دارند [IEA 05].

برای تأمین‌کنندگان الکتریسیته که باید به پیش‌قراردادهای الکتریسیته بپردازند (که در آن‌ها مقدار انرژی باد موجود بر قیمت تأثیر می‌گذارد) این تغییرات حائز اهمیت می‌باشند.

می‌توان تغییرپذیری سالانه تا بلند مدت سرعت میانگین باد در مکان‌هایی در سراسر اروپا را با توزیع نرمال به همراه انحراف ۶٪ استاندارد مشخص کرد.

#### گزینه‌هایی برای مدیریت وقفه

در مورد انرژی باد ساحلی باید تأکید گردد که چگونه می‌توان وقفه در شبکه‌ی برق را با فناوری‌های استفاده‌شده برای اتصال سیستم به شبکه با توزیع جغرافیایی و با بهبود روش‌های پیش‌بینی آب و هوا کاهش داد.

ابزارهای عمده‌ای که باید مورد استفاده قرار گیرند عبارتند از ذخایر عملیاتی و ظرفیتی که باید پاسخگوی کوتاه‌مدت، مدت زمان متوسط و بلندمدت باشد [IEA 05]. اپراتور شبکه‌ی فرانسه RTE اعتقاد دارد که نوسانات کوتاه‌مدت در ظرفیت  $10\text{GW}$  انرژی بادی نصب‌شده در یک دقیقه بیشتر از  $100\text{MW}$  نمی‌باشند که امروزه بدون هیچ مشکلی با ذخایر انرژی قابل جبران می‌باشند. در رابطه با یکپارچه‌سازی بلندمدت انرژی بادی در شبکه‌های برق باید هزینه‌های چشمگیر در نظر گرفته شوند تا ذخیره‌ی عملیاتی اضافی و ظرفیت قابل تغییر تضمین گردند [IEA 05].

ما باید گزینه‌هایی با کمترین هزینه را در مقیاس سیستم فراساحلی تحلیل کنیم. لیست گزینه‌های زیر جامع نبوده و نباید به عنوان تلاشی برای پیش‌داوری تصمیمات بازار در نظر گرفته شوند.

پنج گزینه‌ی اصلی که امروزه تحت بررسی هستند عبارتند از:

- ایستگاه‌های توان که ذخیره‌ی عملیاتی را فراهم می‌کنند؛

- ذخیره‌ی الکتریسیته؛

- اتصال داخلی میان شبکه‌ها؛

- تولید توزیع شده؛

- واکنش به تقاضا.

قاعده‌ی اساسی تمامی این گزینه‌ها از بالانس عرضه و تقاضا در مقیاس‌های مختلف شکل گرفته است. ملزومات این بالانس‌سازی و ذخیره‌ی عملیاتی به صورت متفاوت و برحسب قوانین اجرایی هر کشوری تضمین می‌گردند.

فراهم‌سازی ذخیره‌ی عملیاتی توسط ایستگاه‌ها گزینه‌ای می‌باشد که غالباً در مقالات به آن اشاره شده و اغلب به عنوان مرجعی برای محاسبه‌ی هزینه‌های اضافی یکپارچه‌سازی تولید متناوب در سیستم با تأخیر بلندمدت و کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از ایستگاه‌های تعدیل‌کننده خدماتی است که شناخته‌شده می‌باشد و در سیستم‌های کمکی الکتریسیته به خوبی آزمایش شده است [STR 00; STR 02]. به طور کلی، در بیشتر کشورها ایستگاه‌های کلاسیک توان با سوخت فسیلی برای تأمین خدمات کمکی مورد نیاز تولید انرژی بادی متناوب به لحاظ هزینه‌های رقابتی و یکپارچه‌سازی آسان سیستم‌ها و به خصوص از دیدگاه مدیریت شبکه در مرحله‌ی آزمایش و توسعه قرار دارند [IEA 04].

مراکز ذخیره‌ی الکتریسیته به شکل مخازن پمپ یا دریاچه‌های ذخیره، نقش کلیدی در تأمین خدمات تعدیل‌کننده‌ی شبکه دارند. از مزایای آن ظرفیت ذخیره‌ی الکتریسیته در مقیاس بزرگ (بیش از  $1000 MW$  و به مدت چندین ساعت، برحسب مکانی که در آن قرار گرفته) پاسخ سریع و هزینه‌های اجرایی نسبتاً کم می‌باشند.

دیگر فناوری‌های ذخیره‌سازی هنوز به قیمت‌های رقابتی نرسیده‌اند. با این حال، سیستم‌های ذخیره‌سازی مشخصی همچون فلاپویل‌ها<sup>۱</sup> و انواع مشخصی از باتری‌ها می‌توانند خدمات پشتیبانی خاصی برای انرژی تجدیدپذیر در نوسانات بسیار کوتاه‌مدت (کمتر از یک دقیقه) در تولید فراهم کنند.

مشکل اساسی ذخیره‌سازی به این حقیقت مربوط می‌گردد که تلفات ناگزیری در تبدیل وجود دارد. همچنین، باید طبیعت و اندازه‌ی واحدها به لحاظ انرژی ذخیره‌شده‌ی مورد نیاز برای بردن شارژ سرویس به شبکه نسبت به هدف مزرعه‌ی بادی سنجیده شوند [MCG 03].

اجرای تکنیکی فناوری‌های ذخیره‌سازی به مقیاس‌های زمانی کار و ظرفیت ذخیره‌سازی وابسته است [MIL 01].

<sup>۱</sup>Fly Wheel

تولید غیرمتمرکز برق تمامی ابزارهای تولید برق را در ابعاد کوچک و متوسط (معمولاً کمتر از  $10\text{ MW}$ ) کنار هم می‌آورد که اغلب به شبکه‌ی توزیع متصل بوده و برای تولید نزدیک مکان مورد استفاده به کار می‌روند. امروزه، تعدادی موانع بر سر راه یکپارچه‌سازی تولید غیرمتمرکز در شبکه‌های برق با مقیاس گسترده‌تر وجود دارد. یک حوزه‌ی مهم تبادل اطلاعات است که قبلاً در زمینه‌ی پیش‌بینی آب‌وهوای مزارع باد فراساحل تأکید شد [IEA 02; IEA 03].

مزارع بادی فراساحل آینده، تأمین‌کنندگان بالقوه‌ی خدمات "تلفیقی"<sup>۱</sup> برای شبکه‌ی غیرمتمرکز هستند که در آن‌ها تولید توزیع می‌گردد.

مزارع بادی بزرگ با تعداد زیادی توربین چند مگاواتی به طور کلی هر کدام خدمات کمکی را فراهم می‌کنند که جایگزین ایستگاه‌های کلاسیک توان خواهند شد [GAR 03]. استفاده از توربین‌های بادی فراساحل برای ذخیره‌ی عملیاتی در حال تبدیل شدن به یک گزینه‌ی واقع-بینانه است. به علاوه، تقاضای مربوط به تولید فراساحلی در شبکه توزیع برق همراه است.

#### موقعیت مزارع بادی

نصب مزارع بادی در دریا یکی از راه‌های توسعه‌ی انرژی بادی می‌باشد. مکان‌های فراساحل دارای تعدادی مزیت می‌باشند [EWE 10]:

- انرژی تولیدشده نسبت به مکان‌های روی خشکی بیشتر می‌باشد، زیرا در فراساحل مسئله‌ی کوه‌شناسی وجود ندارد و ناهمواری در مقایسه با خشکی ناچیز است؛

- انرژی بادی فراساحل به صورت گسترده از مسئله‌ی زیبایی‌شناسی و آلودگی نويز محلی جدا است. ماشین‌های بزرگ را می‌توان در گستره‌ی کوچکی از فضا نصب کرد.

به علاوه، در فراساحل باد قوی‌تر و ثابت‌تر از خشکی است. نرخ دسترسی انرژی باد در دریای شمال ۹۶٪ تخمین زده می‌شود. این امر به شدت برای توسعه‌ی توربین‌های بادی فراساحل توان-بالا مطلوب است. رقمی که اغلب به عنوان میانگین نقل می‌شود برابر  $2.500\text{ MWh}$  بر  $\text{MW}$  نصب‌شده در دریا است که در مقابل  $2.000\text{ MWh}$  بر  $\text{MW}$  نصب‌شده در خشکی قرار دارد. در نواحی دریایی که به لحاظ جغرافیایی برای انرژی باد بسیار مطلوب می‌باشند، رکورد  $3.800\text{ MWh}$  بر  $\text{MW}$  نصب‌شده ثبت گشته است [Repower].

به طور کلی مزارع بادی فراساحل در نواحی نصب می‌شوند که در فواصل مابین  $1/5$  تا  $50\text{ km}$  از ساحل و در اعماق مابین  $3$  و  $30\text{ m}$  واقع شده‌اند [UNI 03]. به دلیل هزینه‌های اضافی

<sup>1</sup>Consolidation

مرتبط با سازه‌ی فراساحلی بسیار ضروری است که تأسیسات بزرگ احداث شوند (از مرتبه‌ی  $100 MW$  یا بیشتر) [FIC 03].

برای اولین مزارع بادی فراساحل ساخته‌شده در دانمارک در سال ۱۹۹۰ از فونداسیون‌های به اصطلاح گرویتی (ساخته‌شده از بلوک‌های بتنی) استفاده شد. در این نوع از فونداسیون برای نگهداشتن توربین بادی در موقعیت عمودی از جاذبه استفاده می‌شود. ما از توربین نصب‌شده در بستر بحث می‌کنیم که در مقابل توربین شناور قرار دارد که در آن هنگامی که عمق بیشتر از  $50 m$  باشد از پایه‌ی شناور با خطوط مهار استفاده می‌شود.

فناوری‌های زیر نیز قابل توجه می‌باشند (فصل ۵ را ملاحظه کنید):

- مونوپایل فولادی به قطر ۳.۵ تا ۴.۵؛

- فونداسیون سه‌پایه، برگرفته از سکوه‌های سبک سه‌پایه‌ای مورد استفاده در مته‌کاری میدان‌های نفتی [ASSA].

بهره‌برداری از توربین‌های بادی فراساحل و مدیریت خدمات کمکی

به دلیل اینکه همواره سیستم‌های بزرگ انرژی به دلیل هزینه‌ها تنها با ظرفیت کم ذخیره‌سازی کار می‌کنند اصول راهنمایی همیشه برقراری تعادل میان عرضه و تقاضا است.

استانداردهای ایمنی بر شبکه‌ی برق حکم می‌کنند که طوری طراحی شوند که در مقابل خرابی‌هایی با اندازه‌ی مشخص و افزایش بار بدون از دست دادن کارکرد، به اصطلاح وقایع  $N-1$  یا  $N-2$ ، دوام بیاورند. در کل باید قابلیت اطمینان سیستم انرژی باد فراساحل با استفاده از "احتمال تلفات بار" (خطر رد بار) تعیین گردد که می‌توان به عنوان "احتمال تجاوز بار از تولید موجود" تعریف کرد.

ثانیاً، استانداردهای کیفیت طبیعت دقیق خدمات برق انتقالی را تعریف می‌کنند که فرکانس و ولتاژ دو متغیر مهم می‌باشند. فرض می‌شود که اپراتور فراساحل تغییرات فرکانس و ولتاژ را در محدوده‌ی مشخص‌شده نگه خواهد داشت تا به تجهیزات الکتریکی آسیب نرسد و پایداری شبکه تضمین گردد.

بهره‌برداری از مزارع بادی فراساحل باید با مدیریت خدمات کمکی مربوط به ایمنی و استانداردهای شبکه (که در آن برق انتقال داده شده و توزیع می‌گردد) در نظر گرفته شود. افزایش تولید توزیع‌شده که از تکثیر نقاط منبع ناشی می‌شود مدیریت فعال برهم‌کنش‌های آتی

را ایجاب می‌کند. هنگامی که نرخ نفوذ انرژی تناوبی همانند چیزی که در مزارع بادی فراساحل تولید می‌شود، در بسته‌ی انرژی اهمیت پیدا کند این مسئله پر رنگ‌تر می‌شود.

در سال ۲۰۰۹، کمی بیشتر از ۴٪ از تولید برق اروپا توسط انرژی باد پوشش داده شد اما این مقدار تا سال ۲۰۲۰ تا ۱۲٪ و قبل از ۲۰۳۰ بیش از ۲۰٪ پیش‌بینی می‌شود [ENEb]. آخرین ارقامی که توسط EWEA در مجله‌ی ماهانه‌ی توان بادی<sup>۱</sup> منتشر شده است نشان می‌دهد که در ۲۰۱۱، اروپا پیشرو مسلم تولید جهانی انرژی باد فراساحل است که چین، ژاپن و ایالات متحده به دنبال آن می‌آیند.

#### ۶-۴ کتاب‌شناسی

- [ARG 82] ARGAND A., "L'énergie électrique d'origine éolienne", RGE, vol. 82, no.1, p. 43-50, January 1982.
- [BAU 00] BAUER P., DE HAAN S.W.H., MEYL C.R., PIERIK J.T.G., "Evaluation of electrical systems for offshore windfarms", CDROM of the IEEE IAS Conf., October 2000.
- [BEN 07] BEN TICHA M.B., *Fusion de données satellitaires pour la cartographie du potentiel éolien offshore*, PhD Thesis, Ecole des Mines, Paris, 2007.
- [BOU 05] BOUMAHRAZ I., *Analyse par simulation numérique et physique d'un système éolien de faible puissance en site isolé*, Thesis, University of Le Havre, 2005.
- [BRO 81] BROWN G.S., STANLEY H.R., ROY N.A., "The wind-speed measurement capability of spaceborne radar altimeters", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-6, no.2, p. 59-63, 1981.
- [BRU 01] BRUTSAERT P., LOFFREDO Y., "L'alternateur discoïde: une technologie innovante", *Revue Flux*, no. 213, p. 31-35, April 2001.
- [CAS 97] CASTELLI DEZZA F., DI GERLANDO A., PERINI R., "Modelling and experimental investigation of energy conversion systems employing wind-driven induction generators with electronically controlled self-excitation and power output", *EPE 97, Trondheim*, p. 2.652-2.658, Norway, 8-10 September 1997.
- [CEL 03] CELEK A.N., "Assessing the suitability of wind speed probability distribution functions based on wind density function", *Renewable Energy*, no. 28, p. 1563-1574, 2003.
- [CHO 06] CHOWDHARY H., CHELLAPILLA S., "Doubly-fed induction

<sup>1</sup>Wind Power Monthly

- generator for variable speed wind power generation*", in BHADRA N., BANERGEE S. (eds), *Transactions on Electric Power System Research*, vol. 76, p. 786-800, Oxford University Press, Oxford, January 2006.
- [CON 93] CONNOR B., LEITHEAD W.E., "Investigation of a fundamental trade-off in tracking the  $C_p$  max curve of a variable speed wind turbine", *Proc. British Wind Energy Conference*, p. 313-319, 1993.
- [DAK 07] DAKYO B., EL MOKADEM M., NICHITA C., KOCZARA W., "A new method to define power and energy share in a DC link hybrid wind-diesel powered system by means of storage and dual time-frequency approach", *Proceedings of EPE'2007*, CD-ROM, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [DIO 95] DIOP A.D., *Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateur: simulation et commande en temps réel d'une turbine éolienne de puissance moyenne à angle de calage variable*, PhD Thesis, University of Le Havre, 1999.
- [DUM 90] DUMITRESCU H., GEORGESCU A. et al., *Calculul elicei, Calcul de l'hélice*, Editia Academiei Române, 1990.
- [ECR 02] ECRIN, Report extract from "L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", May 2002.
- [ELM 06] EL MOKADEM M., *Modélisation et simulation d'un système hybride pour un site isolé. Problématique liée aux fluctuations et variations d'énergie au point de couplage*, PhD Thesis, University of Le Havre, September 2006.
- [EUR 02] EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION, *Wind energy: the facts*, Altener Program, 2002.
- [EUR 04] EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. *Wind energy: the facts*, <http://www.ewea.org/index.php?id=91>, 2004.



- [EWE 05] EUROPEAN WIND ENERGY REPORT EUROPE, *Large scale integration of wind energy in the European power supply: analysis, issues and recommendations*, December 2005.
- [FIC 03] FICHAUX N., *Evaluation du potentiel éolien offshore et imagerie satellitale*, PhD Thesis, Ecole des Mines, Paris, December 2003.
- [FRE 90] FRERIS L.L., *Wind Energy Conversion System*, Prentice Hall, London, 1990.
- [GAR 03] GARDNER P., SNODIN H., HIGGINS A., MCGOLDRICK S., *The impacts of increased levels of wind penetration on the electricity systems of the Republic of Ireland and Northern Ireland*, Final Report, Commission for Energy Regulation, Garrad Hassan and Partners Ltd., 2003.
- [GAR 94] GARRAT J.R., *The Atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, UK, 1994.
- [GAR 98] GARCIA A., TORRES J.L., PRIETO E., DE FRANCISCO A., "Fitting wind speed distribution", *Solar Energy*, no. 62, p. 139-144, 1998.
- [GLO 77] GLOERSEN P., BARATH F.T., "A scanning multichannel microwave radiometer for Nimbus-G and SEASAT-A", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-2, p. 172-178, 1977.
- [GOU 08] LE GOURIERES D., *Les Eoliens, énergie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations*, Du Moulin, Cadiou, 2008.
- [GRU 00] GRUD P., "State of the art offshore wind technology", *Workshop Offshore Windenergienutzung Technik*, Wilhelmshafen, 27 June 2000.
- [HAU 00a] HAUSER E., *Wind-Turbines*, Springer, Berlin, 2000.
- [HAU 00b] HAUSER D., DUPUIS H., DURRIEU DE MADRON X., ESTOURNEL C., FLAMANT C., PELON J., QUEFFEULOU P., LEFEVRE

J.M., "La campagne FETCH – Etude des échanges océan-atmosphère dans le Golfe du Lion", *La Météorologie*, no. 29, p. 14-31, 2000.

[HEN 99] HENDERSON A.R., PATEL M.H., HALLIDAY J., WATSON G., "Multiple turbine

floating offshore windfarms", *Europe Wind Energy Conf.*, Nice, 1999.

[ICQ 94] ICQBAL M.T., COONICK A.H., FRERIS L.L., "Dynamic control options for variable

speed wind turbines", *Wind Engineering*, vol. 18, no. 1, p. 1-12, 1994.

[IEA 02a] IEA, *Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets*, IEA/OECD, Paris,

2002.

[IEA 02b] IEA, *Renewables for Power Generation – Status and Prospects*, IEA/OECD, Paris,

2003.

[IEA 04] IEA, *World Energy Outlook*, IEA/OECD, Paris, 2004.

[IEA 05] IEA, *Variability of Wind Power and Other Renewables.*

*Management Options and*

*Strategies*, IEA, June 2005.

[ILI 08] ILINCA A. et al., "Les aspects techniques des éoliennes, fonctionnement, technologie,

entretien, manufacturiers", *Colloque éolien*, Quebec, 19 November 2008.

[JAN 76] JANSEN W.A.M., *Horizontal Axis Fast Running Wind Turbines for Developing*

*Countries*, SCWDC, Holland, June 1976.

[KEL 92] KELLER J.K., "Simulation of wind with 'K' parameter", *Wind Engineering*, vol. 16,

no. 6, p. 307-312, 1992.

[KRO 03] KROHN S., *Manuel de référence sur l'énergie éolienne 2e partie: Définitions de*

*l'énergie et de la puissance*, <http://www.windpower.org>, 2003.

[LAM 00] LAMPOLA P., "Directly driven low-speed permanent magnet generators for wind

power applications", *Acta Polytechnica Scandinavica, Elect. Eng. series no. 101*, Espoo,

Finland, 2000.

[LAN 01] LANGE B., HOJSTRUP J., "Evaluation of the wind resource estimation program WasP for offshore applications", *Journal of Wind*

*Engineering and Industrial Aerodynamics*,

no. 89, p. 271-291, 2001.

- [LAV 05] LAVERDURE N., *Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires*, Thesis, INPG, 2005.
- [LEC 01] LECONTE P., RAPIN M., SZECHENYI E., "Eoliennes", *Techniques de l'ingénieur*, no.4640, 2001.
- [LEI 90] LEITHEAD W.E., "Dependence of performance of variable speed wind turbines on the turbulence, dynamics and control", *I.E.E. Proceedings*, vol. 137, no. 6, p. 403-413, November 1990.
- [LON 05] BUN L., *Caractérisation des régimes et profils du vent sur le site de FECAMP pour l'analyse de la production d'énergie d'une éolienne de 10 KW*, DEA report, University of Le Havre, 2005.
- [MCG 03] MCGOVERN M., "Steep Learning Curve for Grid Operators", *Windpower Monthly*, December 2003.
- [MEI 05] MEISHEN L., XIANGUO L., "MEP-type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions", *Renewable Energy*, no. 30, p. 1221-1240, 2005.
- [MER 11] MERZ K., *Conceptual design of stall-regulated rotors for offshore wind turbines*, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [MIL 01] MILBORROW D.J., "Wind and storage – and a look at Regenesys", *Proceedings of the Wind Power on Islands Conference*, Gotland University, Gotland, Sweden, 15 September 2001.
- [MOL 02] MOLIN B., *Hydrodynamique des structures offshore*, Editions Technip, Paris, 2002.
- [MOO 04] MOORE R.K., JONE W.L., "Satellite scatterometer wind vector measurements – the legacy of the Seasat satellite scatterometer", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Society Newsletter*, p. 18-32, September 2004.
- [MÜL 00] MÜLLER S., DEIKE M., DE DONCKER R.W., "Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-Quadrant IGBT converters linked to the rotor", *CDROM of the IEEE IAS Conf.*, October 2000.

- [MÜL 02] MÜLLER S., DEIKE M., DE DONCKER R.W., "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Indust. Appl. Magazine*, p.26-33, May/June 2002.
- [MUL 04] MULTON B., ROBOAM X., DAKYO B., NICHITA C., GERGAUD O., BEN AHMED H., "Aérogénérateurs électriques", *Techniques de l'Ingénieur*, D3960, November 2004.
- [MUL 09] MULTON B., *Master Recherche STS IST-SPEE Paris 11 – ENS, Module K16, Ecole Normale Supérieure de Cachan – SATIE UMR CNRS-ENS Cachan 8029 Antenne de Bretagne, Cachan, 2009.*
- [NIC 95] NICHITA C., *Etude et développement de structures et lois de commande numériques pour la simulation en temps réel d'actionneurs. Application à la réalisation d'un simulateur d'aérogénérateur de 3 kW, PhD Thesis, University of Le Havre, 1995.*
- [NIC 02] NICHITA C., LUCA D., DAKYO B., CEANGA E., "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators", *IEEE Transactions on Energy Conversion, IEEE PE-074EC*, 05 2002, vol. 17, no. 4, p. 523-530, December 2002.
- [NIC 06] NICHITA C., EL MOKADEM M., DAKYO B., "Wind turbine simulation procedures", *Wind Engineering Journal*, vol. 30, p. 187-200, 2006.
- [NOV 95] NOVAK P., EKELUND T., JOVIK I., SCHMIDTBAUER B., "Modelling and control of variable-speed wind turbine drive-system dynamics", *IEEE Control Systems*, p. 28-38, August 1995.
- [SEG 00] SEGURO J.V., LAMBERT T.W., "Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 85, p. 75-84, 2000.
- [STR 00] STRBAC G., KIRSCHEN D., "Who should pay for reserve?", *The Electricity Journal*, no. 13, p. 32-37, 2000.
- [STR 02] STRBAC G., "Quantifying the system costs of additional renewables in 2020", London, Department of Trade and Industry, [www.dti.gov.uk/energy/developpep](http://www.dti.gov.uk/energy/developpep), Ilex Consulting, London, 2002.
- [TAN 95] TANG Y., XU L., "A flexible and reactive power control strategy

- for a variable speed constant frequency generating system”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, no. 4, p. 472-478, July 1995.
- [THI 93] THIRINGER T., LINDERS J., “Control by variable rotor speed of a fixed-pitch wind turbine operating in a wide speed range”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 8, no. 3, p. 520-526, September 1993.
- [TRO 91] TROEN I., PETERSEN E.L., *Atlas éolien européen*, Directorate General for Science, Research and Development, European Commission, Brussels, 1991.
- [WAA 93] MORTENSEN N. G., LANDBERG, L., PETERSEN E. L., *Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP)*, Risoe National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1993.
- [WAC 96] WACKERMAN C.C., RUFENACH C.L., SHUCHMAN R.A., JOHANNESSEN J.A., DAVIDSON K.L., “Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 6, p. 1343-1352, 1996.
- [YAZ 06] YAZHOU L., MULLANE A., LIGHTBODY G., YACAMINI R., “Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies”, *IEEE Energy Conversion*, vol. 21, p. 257-264, March 2006.

## وبسایتها

- [ADE] [www.ademe.fr/bretagne/actions\\_phares/energies\\_renouvelables/eolienne](http://www.ademe.fr/bretagne/actions_phares/energies_renouvelables/eolienne).
- [ASSa] Association danoise de l'industrie éolienne, [www.talentfactory.dk](http://www.talentfactory.dk).
- [ASSb] Association danoise de l'industrie éolienne, <http://www.windpower.dk/>.
- [BWE 11] [www.bwea.com/offshore](http://www.bwea.com/offshore), 2011.
- [CPO] <http://www.c-power.be>, REPOWER Systems.
- [ENEa] <http://www.enercon.de>.
- [ENEb] <http://energiesdelamer.blogspot.com/2011/04/leolien-offshore-dans-le-monde-les.html>.
- [EOL] <http://www.eole.org/>.
- [EWE 10] EWEA, Greenpeace, *Wind Force 12 - A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020*, [www.ewea.org/03publications/WindForce12.htm](http://www.ewea.org/03publications/WindForce12.htm).
- [ICG] [www.ic.gc.ca/eic/site/wei-iee.nsf](http://www.ic.gc.ca/eic/site/wei-iee.nsf).

[LAG] <http://www.lagerweywind.nl>.

[MAX] <http://www.maxisciencences.com>.

[MET] <http://www.meteoconsult.fr>.

[THE] <http://www.thewindpower.net/fiche-eolienne>.

[UNI 03] TU Delft, *Offshore Wind Energy in Europe*, Delft, Netherlands, [www.offshorewindenergy.org](http://www.offshorewindenergy.org), 2003.





# تولید انرژی جزر و مدی

## ۷-۱ انرژی دامنه جزر و مدی - تئوری و پتانسیل

### ۷-۱-۱ تئوری

توده‌های آب اقیانوس که در معرض جاذبه‌ی متغیر خورشید و ماه قرار دارند با رزونانس در دامنه‌های کم، نوسان می‌کنند. با این حال، این جزر و مدها به سمت نواحی ساحلی منتشر می‌شوند که عمق آب در آنجا کم و ممکن است توپوگرافی ساحل (خلیج، تنگه)، دامنه را افزایش دهد.

چنین جزر و مدهایی هم انرژی جنبشی (جریان‌های جزر و مدی) و هم انرژی پتانسیل مربوط به سطح بالارفته‌ی دریا را فراهم می‌کنند. همانند توان هیدروالکتریک می‌توان از این انرژی پتانسیل با ایجاد مخازن بزرگ پر شده با پدیده‌های جزر و مدی و افزایش اختلاف ارتفاع با دریا (دامنه‌ی جزر و مدی)، بهره‌برداری کرد.

قاعده‌ای که نیروگاه برق جزر و مدی بر اساس آن کار می‌کند مطابق ذیل است: به وسیله‌ی آب‌بندهای نصب‌شده در خلیج یا دهانه‌ی رود، یک یا چند دریاچه برای دستیابی به تفاوت در سطح آب در هر طرف نیروگاه‌های برق مجهز به توربین ایجاد می‌شوند.

با تغییر سطح دریا به مدت نصف روز در سواحل (جزر و مدهای شبه-روزانه) می‌توان میان سطح دریاچه و دریا تفاوت ایجاد کرد که به عنوان ارتفاع هد<sup>۱</sup> شناخته شده و برای به حرکت درآوردن توربین‌های با هد پایین<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. ممکن است پروژه علاوه بر توربین‌ها دارای

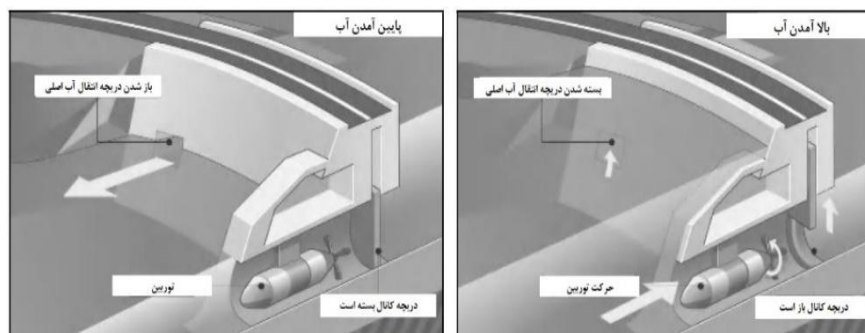
---

<sup>۱</sup> Head height

<sup>۲</sup> Low head turbines



دریچه‌هایی برای تسهیل پر یا خالی کردن دریچه می‌باشد و در نتیجه ارتفاع هد افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۱ قواعدی که نیروگاه برق جزر و مدی بر اساس آن عمل می‌کند (منبع: [www.planetes-energies.com](http://www.planetes-energies.com))

نیروگاه برق جزر و مدی می‌تواند مطابق چندین چرخه کار کند:

- چرخه تخلیه تک اثره<sup>۱</sup>: دریچه از طریق دریچه‌ای با جریان مد پر می‌شود و هنگامی که جزر و مد به بیشتر سطح خود برسد، دریچه بسته می‌شود. هنگامی که تفاوت سطح میان دریچه و دریا در جزر کافی باشد با مناسب‌شدن ارتفاع هد، توربین‌ها شروع به کار می‌کنند (تخلیه‌ی دریچه). چرخه‌ی تک اثره پیرو ریتم جزر و مدها در مجموعه‌ای از مراحل امکان تولید را فراهم می‌کند؛ ممکن است ما برای بیش از چهار ساعت در هر جزر و مد از توان کامل بهره‌مند نشویم.

- چرخه‌ی پر کردن تک اثره: در مد دریچه‌ها بسته نگه داشته می‌شوند تا دریچه را در حالیکه در پایین‌ترین سطح خود است ایزوله کرد. هنگامی که جزر و مد بالا باشد می‌توان از هد میان دریا و دریچه برای تولید برق با استفاده از توربین‌ها و پر کردن دریچه در جزر استفاده کرد. سپس دریچه‌ها باز می‌شوند تا دریچه در جزر خالی گردد. این چرخه کمتر مفید می‌باشد زیرا از یک طرف انرژی تولیدی کمتر از چرخه‌ی تخلیه تک اثره (به خصوص به دلیل حجم کمتر آب عبوری از توربین‌ها) بوده و تا حدودی به دلیل اینکه اختلالاتی عمده در دریچه‌ای ایجاد می‌کند که به مدت طولانی دو بار در روز در سطح کم نگه داشته شده است.

- چرخه‌ی دو اثره: شامل تحمیل دو چرخه‌ی تک اثره تخلیه و همچنین پر کردن دریچه می‌باشد. در این مورد، باید از توربین‌های بازگشت‌پذیر در عمل برای بالا رفتن جزر و مد (مد) و افت جزر و مد (جزر) استفاده کرد. برق تولیدی در این مورد کم بوده ولی از طرف دیگر تولید

<sup>۱</sup> Single-effect emptying cycle



کمتر گسسته می‌شود و این امر اجازه می‌دهد تا با داشتن دو بازه‌ی زمانی چهار ساعته در هر جزر و مد بهتر پاسخگوی تقاضا بود.

باید توجه شود که می‌توان از توربین‌ها برای عمل در "روزنه"<sup>۱</sup> (در غیاب کوپلینگ) استفاده کرد تا پر یا خالی شدن دریاچه تضمین گردد.

در دوره‌های ویژه‌ای از جزر و مد می‌توان با توانایی راه‌اندازی توربین‌ها در پمپ به تولید بیشتری دست پیدا کرد. عمدتاً از پمپ برای افزایش سطح دریاچه پس از پر کردن در جزر و مد بالا استفاده می‌شود تا هنگامی که تخلیه شده است، هد را افزایش داد. در برخی موارد ممکن است هنگامی که حوضچه پر شده است، کاهش سطح حوضچه در جزر و مد پایین برای افزایش تولید ارزشمند باشد. پمپاژ اجازه می‌دهد تا زمان توقف کار در دریاچه کاهش پیدا کند زیرا می‌توان از توربین زودتر استفاده کرد. سودآوری چنین چرخه‌ای به ویژه هنگامی که پمپ در خارج از پیک عمل کند و دوباره در زمان‌های پیک پر شود جالب توجه است.

در رابطه با نوع توربین‌های استفاده‌شده برای چنین تأسیساتی تا به امروز معمولاً از میان گروه-های توربو-آلترناتورهای<sup>۲</sup> زیر انتخاب‌هایی انجام شده است:

- نوع "حبابی"<sup>۳</sup> (اولین بار در ۱۹۳۲ توسط تولیدکننده‌ی سوئیسی اشر-وایس<sup>۴</sup> ثبت گشت و اولین بار در ۱۹۳۶ در ایستگاه برق هیدروالکتریک در راستین آلمان نصب گشت): یک ژنراتور-توربین یکپارچه و فشرده که از توربین محوری نوع کاپلان ساخته شده و مستقیماً ژنراتوری را به حرکت در می‌آورد که درون هوزینگ‌های آب‌بندی شده با پروفیل حبابی<sup>۵</sup> قرار گرفته است. این نوع از گروه که در اصل برای ایستگاه‌های برق هیدروالکتریک با هد کم طراحی شده است، به خصوص در ایستگاه برق جزر و مدی رنس<sup>۶</sup> توسعه داده شده و می‌تواند به صورت بازگشت-پذیر و همچنین در حالت پمپاژ کار کند.

نوع "استرافلو"<sup>۷</sup> ("جریان مستقیم") (طرح در ۱۹۱۹ توسط ل.هرزا آمریکایی<sup>۸</sup> ثبت گشت و متعاقباً توسط اشر-وایس تولیدکننده توسعه یافت): از توربینی محوری ساخته شده است که آلترناتور آن در اطراف چرخ محرک (توربین) قرار گرفته و یک واحد در صفحه‌ی عمودی مشابه

<sup>۱</sup> Orifice

<sup>۲</sup> Turbo-alternators

<sup>۳</sup> Bulb type

<sup>۴</sup> Escher-Wyss

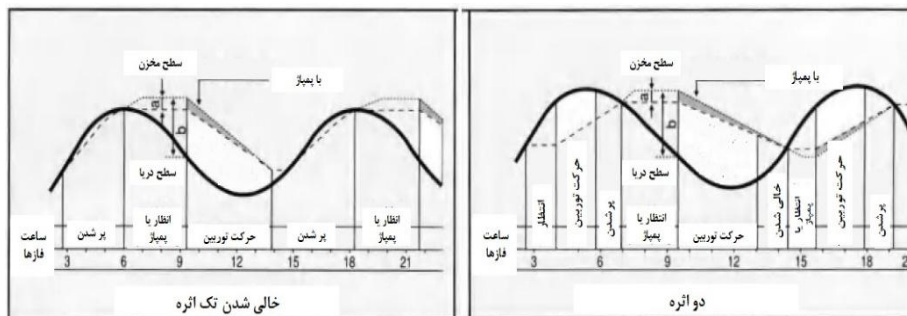
<sup>۵</sup> Bulbous profile

<sup>۶</sup> The Race Tidal Power Station

<sup>۷</sup> Straflo

<sup>۸</sup> American L.Harza

شکل می‌دهد. توان مستقیماً از یکجا به جای دیگر منتقل شده و شفت تنها حامل می‌باشد. این طراحی فشرده به ویژه در کاهش هزینه‌های مهندسی معماری موثر است. این نوع از گروه در بسیاری از ایستگاه‌های برق هیدروالکتریک با هد پایین به کار گرفته شده و تا به امروز تنها یک ایستگاه برق جزر و مدی آنابولیس در کانادا نصب شده است.



شکل ۷-۲ چرخه‌های مختلف عملیاتی نیروگاه برق جزر و مدی (منبع: EDF- La Rance)

در نگاه اول، محاسبات<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که انرژی تولیدی سالانه‌ی نیروگاه برق جزر و مدی متناسب با سطح دریاچه و مربع دامنه است. بنابراین متناسب با نیاز به انتخاب مکان‌هایی است که دامنه‌ی جزر و مدی زیاد (حداقل  $5\text{ m}$ ) و جایی که می‌توان مخازن بزرگ را ایجاد کرد.

با این حال، یک حوضچه تنها امکان تأمین انرژی ۵ ساعت در هر چرخه‌ی جزر و مدی را فراهم می‌کند بدون اینکه تولید با تقاضا تعدیل شود. چنین طرحی برای خلیج‌های نسبتاً بسته یا دهانه‌ی رودخانه‌ها بسیار مناسب است.

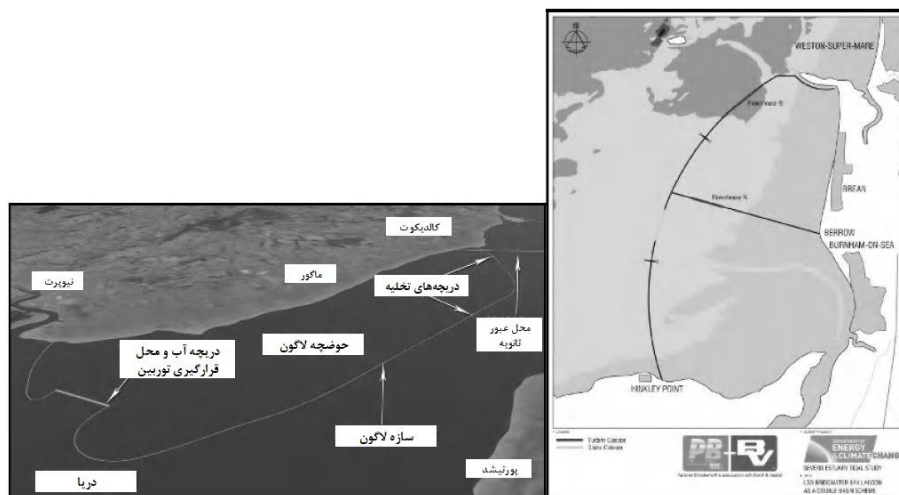
طرح دارای دو حوضچه در نزدیکی مکانی که بسیار به سمت دریا باز است تولید را بهینه خواهد کرد و به معنای توزیع بهتر انرژی است. چندین پیکربندی در این زمینه محتمل می‌باشند:

- ژنراتور نصب‌شده میان حوضچه‌ی بالا و پایین که از طریق دریچه به دریا متصل گشته است؛

- چیدمان مشابه مورد بالا اما با یک ژنراتور اضافی در هر حوضچه‌ی متصل به دریا.

قرار دادن چرخه‌های پمپاژ نیز تولید میان حوضچه‌های مختلف را بهبود خواهد بخشید. پیکربندی‌های دیگری با چندین حوضچه به خصوص برای توسعه‌های نوع تالابی (پایین را ببینید) محتمل می‌باشند که سازگاری بهتری دارند.

<sup>۱</sup> به [CLA 07] مراجعه شود.



شکل ۷-۳ پروژه‌ی تالاب ولز گراند<sup>۱</sup> و پروژه‌ی تالاب دو حوضچه‌ای خلیج بریج واتر<sup>۲</sup>. هفت دهانه (منبع: DECC & Parsons Brinckerhoff)

به منظور به حداقل رساندن اثر آب‌بندی که در عرض دهانه نصب شده است (اتلاف نوار جزر و مدی، دامنه‌ی کم جزر و مدی در دریاچه) و احتمالاً اثر بر کشتیرانی (نیاز به ساخت لاک‌ها [آب‌بند]<sup>۳</sup>) مفهوم تالاب مصنوعی نیز قابل تصور می‌باشد. یک دریاچه هم می‌تواند در خارج از ساحل ("تالاب فراساحل") یا در امتداد ساحل یا خط ساحلی ساخته شود ("تالاب ساحلی")؛ عملیات مشابه آب‌بند جزر و مدی متداول است (ممکن است چندین دریاچه وجود داشته باشد). با این حال، برای این نوع از توسعه به سدهای طولی نیاز است و باید در آب کم‌عمق نصب گردند تا سطح مقطع آن‌ها کاهش پیدا کند (باید حد وسطی میان عمق آب و محور توربین‌ها پیدا کرد). شرکت تایدل الکتریک<sup>۴</sup> چندین سال برای ارتقای این طرح تلاش کرده است اما تا به امروز هیچ نمونه‌ی اولیه‌ای ساخته نشده است.

## ۷-۲ پتانسیل توسعه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی

### ۷-۲-۱ پتانسیل جهانی

مرتفع‌ترین جزر و مدها در جهان در خلیج فاندی (کانادا، مابین نووسکوشیا و نیو برانزویک) واقع شده‌اند که می‌توانند به دامنه‌ای تا  $17\text{ m}$  برسند. هند، کره‌ی جنوبی، انگلستان، روسیه

<sup>1</sup> Welsh Ground

<sup>2</sup> Bridgewater Bay

<sup>3</sup> Locks

<sup>4</sup> Tidal Electric Company: [www.tidalelectric.com](http://www.tidalelectric.com).

(دریای بارنتز، دریای سفید، دریای اوختسک<sup>۱</sup>)، مین و آلاسکا در ایالات متحده آمریکا دارای مکان‌های هستند که برای بهره‌برداری از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی با دامنه‌های حداکثری مابین ۱۰ تا ۱۳ m مساعد می‌باشند.

انرژی که توسط جزر و مد تلف می‌گردد سال/  $TWh/20,000$  تخمین زده می‌شود اما انرژی دامنه‌ی جزر و مدی که به لحاظ فنی و مالی قابل بهره‌برداری می‌باشد حدود سال/  $TWh/2,000$  می‌باشد که بخشی از آن در نواحی قرار گرفته‌اند که دسترسی به آن‌ها دشوار یا در فواصل دور از جایی قرار گرفته‌اند که به الکتریسیته نیاز است (به عنوان مثال، سیبری، شمال کانادا، شمال استرالیا، آلاسکا و غیره). در ۲۰۰۷ در شورای انرژی جهان<sup>۲</sup> ("ارزیابی منابع انرژی") برآورد شد که پتانسیل انرژی دامنه‌ی جزر و مدی قابل بهره‌برداری سال/  $TWh/380$  است که به  $GW/160$  توان نصب‌شده مربوط است (کارکرد سال/  $h/2,000$  با تمام توان). در غیاب مطالعات دقیق و جامع تنها این ارقام اطلاعات در دسترس و قابل ارجاع هستند.

مکان‌های اصلی با پتانسیل توسعه مطابق ذیل می‌باشند:<sup>۳</sup>

- کانادا: خلیج فاندی با حدود ۳۰ مکان بالقوه ( $50 MW - 10 GW$ ) که واقع‌بینانه‌ترین از میان آن‌ها حوضچه‌ی کامبرلند ( $1.5 GW - 5 TWh$ )، حوضچه‌ی میناس ( $3.8 GW - 12 TWh$ ) و خلیج کوبکوید ( $5.4 GW - 4 TWh$ )؛ مکان بالقوه در دریای بارنت: کولا ( $40 MW$ )؛ گرمیخا ( $140 MW$ )؛ لومبوکا ( $670 MW$ ) و غیره است.

- انگلستان: حدود ۱۵ مکان بالقوه که مهم‌ترین آن‌ها دهانه‌ی سه‌ورن است (پروژه‌های  $14.8 GW - 8.6$  تا  $25 TWh - 17 TWh$ ). به بخش ۷-۵ مراجعه شود.

- آرژانتین: مکان‌هایی تماماً در امتداد ساحل جنوب غربی شامل پرتوریکو گالگوس ( $1.9 GW - 4.8 TWh$ ). در هر طرف شبه‌جزیره‌ی والدز دو مکان محتمل وجود دارد: خلیج سنت خوزه ( $5 GW - 9.4 TWh$ ) و نیو گالف ( $6.5 GW - 16 TWh$ ).

- کره‌ی جنوبی: مکان‌هایی تماماً در امتداد ساحل غربی، شامل سیهوا ( $254 MW - 550 GW$ )، اخیراً عملیاتی شده است)، گارولیم ( $480 - 520 MW$ )، اینچئون ( $700 - 1000 MW$ )، یونگ کونگ دو ( $1.8 GW$ ) و چانسوا ( $600 - 800 MW$ ).

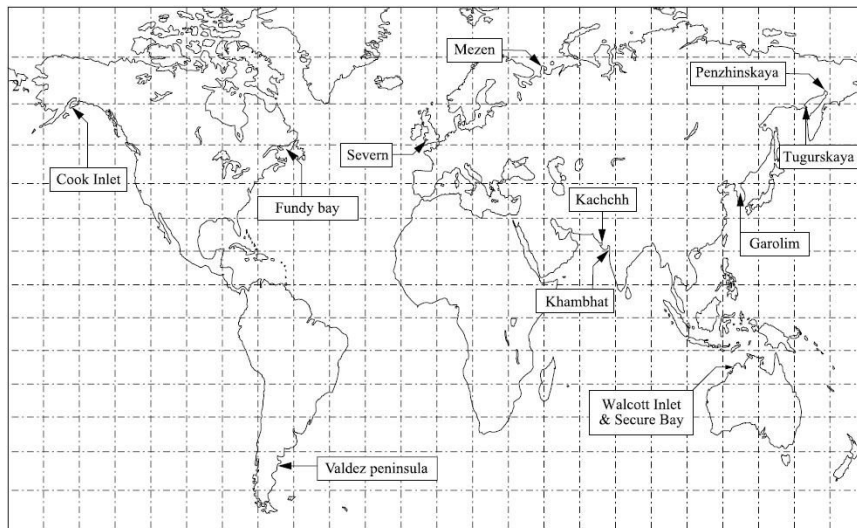
<sup>۱</sup> Sea of Okhotsk

<sup>۲</sup> [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org) را ببینید.  
<sup>۳</sup> به [CLA 07] رجوع شود.

- ایالات متحده آمریکا: کوک اینلت (آلاسکا) با بسیاری از مکان‌های بالقوه همچون تِرن اگین آرم ( $18TWh - 7GW$ )، خلیج ایگل ( $4TWh - 1.5GW$ )، خلیج پاساماکودی (مین- $400MW$ ).

هند: مکان‌هایی واقع در ساحل غربی در خلیج کمبات-کمی ( $15TWh - 7.6GW$ ) یا خلیج کاج<sup>۱</sup> ( $3TWh - 1.2GW$ ).

- استرالیا: مکان‌های بالقوه در شمال غرب (کیمبرلی - دریای تیمور) در سمت راست دهانه‌های والکوت اینلت ( $4TWh - 1.3GW$ ) و خلیج سکیور ( $1.7TWh - 0.6GW$ ).



شکل ۷-۴ نصب ایستگاه‌های اصلی در جهان با پتانسیل تولید انرژی دامنه‌ی جزر و مدی (منبع: نویسنده)

به منظور توسعه‌ی ایستگاه جزر و مدی، دست کم باید پنج معیار اساسی زیر رعایت شوند:

- دامنه‌ی زیاد جزر و مد (کمترین میانگین:  $5m$ )؛
- وجود احتمال ایجاد دریاچه بزرگ (چندین  $km^2$ )؛
- عمق کافی آب برای جاگذاری توربین‌ها (سازگاری با اندازه‌ی آن‌ها به علاوه‌ی مسئله‌ی کاویتاسیون)؛
- توپوگرافی ایستگاه امکان کاهش طول دایک<sup>۱</sup> و سد<sup>۲</sup> را داشته باشد.

<sup>۱</sup> Gulf of Kachchh - Kutch

## ۲-۲-۷ پروژه‌ها و نیروگاه‌های برق جزر و مدی موجود

نیروگاه‌های برق جزر و مدی امروزی و ویژگی‌های اصلی آن‌ها در جدول ۱-۷ مرتب شده‌اند.

کشور	نیروگاه	توربین	توان کل	تولید سالیانه	سال تأسیس	مساحت ذخیره آب	میانگین محدوده جزر و مد
فرانسه	رنس	24 گروه حیابی (10 مگاوات)	240 مگاوات	540 گیگاوات ساعت	1967	22 کیلومتر مربع	8/5 متر
کانادا	اناپولیس	1 گروه استارفلو (20 مگاوات)	20 مگاوات	50 گیگاوات ساعت	1984	15 کیلومتر مربع	6/4 متر
چین	جیانژیا	5 گروه حیابی (500 کیلووات، 600 کیلووات و 3 عدد 700 کیلووات)	3/2 مگاوات	11 گیگاوات ساعت	1980	1/4 کیلومتر مربع	5 متر
روسیه	کیسلوگوو؛ سکایا (کیس) لایا گویا	1 گروه حیابی (400 کیلووات)؛ توربین‌های هشت وجهی (1/5 مگاوات)	1/9 مگاوات	نامعلوم	2007/1968	1/1 کیلومتر مربع	2/3 متر
کره جنوبی	سیوا	10 گروه حیابی (25/4 مگاوات)	254 مگاوات	550 گیگاوات ساعت (تخمینی)	2011	43 کیلومتر مربع	5/6 متر

جدول ۱-۷ ایستگاه‌های اصلی برق دامنه‌ی جزر و مدی موجود در جهان و ویژگی‌های اصلی آن‌ها

چین نیز ۷ نیروگاه برق جزر و مدی کوچک با توان کلی  $2.92 MW$  دارد.



شکل ۵-۷ نیروگاه برق جزر و مدی رنس (منبع: نویسنده)

<sup>1</sup> Dyke

<sup>2</sup> Barrage

زمینه‌ی پر انرژی اخیر، نیاز به توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر و پیشرفت فنی ساخت و ساز در دریا (به عنوان مثال، موج‌شکن‌ها به عنوان بخشی از برنامه‌ی دلتا در هلند) به بازبایی توجه به انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در دنیا کمک کرده است. بسیاری از کشورهایی که دارای مکان‌های بالقوه می‌باشند دوباره برنامه‌های پژوهشی خود را آغاز کرده‌اند. می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- انگلستان، با پروژه‌هایی در دهانه‌های سه‌ورن ( $0.6GW - 8.6GW$ ) مرزی ( $700MW$ )، اسلوی ( $300MW$ ) و داین ( $160MW$ ) و غیره. به بخش ۷-۵ مراجعه شود.

- کره‌ی جنوبی، که در آن نیروگاه سیهوا در حال عملیاتی شدن است و پژوهش‌هایی دربارهی پروژه‌های دیگر در حال انجام است: گارولیم ( $480MW$ )، اینچئون ( $1320MW$ ) و غیره.

- روسیه، که به مدت چندین سال در حال توسعه‌ی نسل جدیدی از توربین "قائم" (محور عمودی) و همچنین طرح‌هایی برای هوزینگ‌های شناور است، که در نیروگاه کیسلوگوبزکایا ( $2007$ ) به منظور تأیید این فناوری‌ها برای پروژه‌های آتی توسعه داده شده توسط روس‌هیدرو، آزمایش شده‌اند: سورنایا ( $12MW$ )، مزنسکایا ( $8GW$ ) - سال  $35TWh$  - دریاچه  $2000km^2$  شامل  $80km$  دایک) و تاگورزکایا ( $3.6GW$ ).

- هند با پروژه‌هایی در دورگادوانی ( $3.6MW$ )، کالپاسار ( $5.9GW$ ) و غیره.

- استرالیا با پروژه‌ی دبری ( $50MW$ ).

- کانادا (نوا اسکوشیا، خلیج فاندی) که پروژه‌های "فراساحل" از نوع انرژی دامنه‌ی جزر و مدی (تالاب) را راه انداخته است.

## ۷-۳ انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در فرانسه: نیروگاه برق جزر و مدی رنس

### ۷-۳-۱ تاریخچه مختصر از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در فرانسه

آسیاب‌های جزر و مدی شناخته شده از جهان عرب در حدود سال ۱۰۰۰، در ساحل فرانسه از آتلانتیک و کانال انگلیس از قرن ۱۲م توسعه یافته‌اند. این آسیاب‌ها با استفاده از تخلیه‌ی تک-اثره کار می‌کردند و شامل دایک، دریچه‌ها و یک چرخ داخلی یا خارجی محرک برای سنگ‌های آسیاب در ساختمان بودند. تا زمانیکه الکتریسیته جایگزین انرژی مکانیکی مستقیم جزر و مدی شود از این آسیاب‌های جزر و مدی استفاده شد.

افزایش قیمت زغال سنگ و توسعه‌ی کاربردهای الکتریسیته (راه آهن‌ها و غیره) پس از اولین جنگ جهانی به محبوبیت توان هیدروالکتریک ("زغال سفید") و همچنین افزایش علاقه به



تولید برق از انرژی جزر و مد ("زغال آبی") منجر شد. در سال ۱۹۲۱، پژوهشی توسط جورجیس بوزینیر، مهندس ارشد پل‌ها و اتوبان‌ها در رنس<sup>۱</sup>، انجام شد که پیشنهاد ساخت ایستگاهی را در دهانه‌ی رنس به ویژه برای بهره‌برداری از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی می‌داد (دامنه‌ی بیشینه:  $m$  ۱۳.۵). در ۱۹۲۵، مقامات عمومی مکانی در ابر رکیچ را به عنوان ایستگاه آزمایشگاهی انتخاب کردند تا برای پروژه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی رنس آماده شوند. این پروژه هیچگاه به نتیجه نرسید.

در ۱۹۴۰، رابرت جیبرات<sup>۲</sup>، سرپرست الکتریسیته در وزارت کارهای عام‌المنفعه، هنگام مطالعه-ی اثر بویژنر<sup>۳</sup> "استفاده از انرژی جزر و مد"<sup>۳</sup> به پتانسیل توسعه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی پی برد. در ۱۹۴۱، به ابتکار او گروهی از شرکت‌های *SEUM*<sup>۴</sup> (انجمن مطالعه‌ی جزر و مدها) گرد هم آمدند و پژوهشی آغاز شد: مدل کوچک نیروگاه برق جزر و مدی رنس در آزمایشگاه دافینوز هیدرولیک و پژوهش در زمینه‌ی توربین‌های باد هد بسیار پایین پذیرفته‌شده توسط شرکت نیرپیک. هنگامی که در ۱۹۴۶ الکتریسیته ملی شد، *EDF* این مسئولیت را از *SEUM* دریافت کرد که به بزرگترین "سرویس" با حروف اول یکسان تبدیل شد و رجیبرات به مشارکت در *EDF* به عنوان مهندس مشاور ادامه داد. شرکت‌های *SEUM* پروژه‌ی مقدماتی را ارائه دادند و سازمان منطقه‌ای مهندسی هیدرو *EDF* مسئول پژوهش‌های ساخت و ساز شد. در ۱۹۵۲ هنگامی که نیروگاه برق هیدروالکتریک در دنزری-مندراگون عملیاتی شد، رئیس جمهور فرانسه آغاز پروژه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی رنس را اعلام کرد.

علاوه بر پروژه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی رنس (به کار افتاده در ۱۹۶۶؛ بخش ۷-۳-۲ را ببینید) *SEUM* دیگر مکان‌های مابین شبه جزیره کوتنتین و بریتانی را مورد پژوهش قرار دادند و در نهایت توجه خود را بر پروژه‌ی عظیم جزایر چائوسی متمرکز کردند: محوطه‌ی خلیج مانت سنت میشل با ۳۰ تا ۵۰ *km* دایک، تالابی به بزرگی ۵۰۰ تا ۷۰۰ *km*<sup>۲</sup> (توانی مابین ۸ تا ۱۲ *GW*) ایجاد کرده است. مابین ۱۹۵۵ و ۱۹۵۸ بسیاری از متغیرها نه تنها توسط *EDF* و از طریق *SEUM* یا سازمان منطقه‌ای مهندسی هیدرو بلکه توسط شرکت‌هایی همچون *SGE*، فاجرول یا *GTM*<sup>۵</sup> پژوهش شدند.

<sup>۱</sup> Rennes

<sup>۲</sup> به [GIB 66] رجوع شود

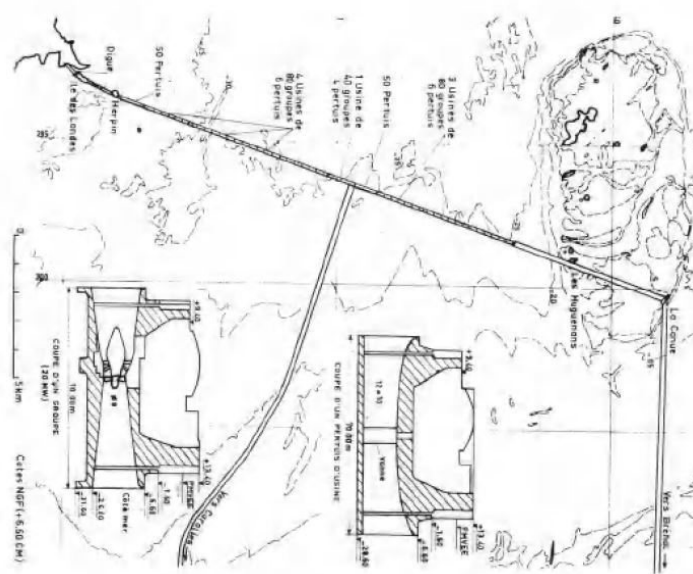
<sup>۳</sup> "L'utilisation de l'Energie de marées"

<sup>۴</sup> Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées

<sup>۵</sup> به [BON 76] مراجعه شود.

در ۱۹۷۱، آلبرت کیكات پیشنهاد کرد تا یکی از پروژه‌ها (در لس مینکویرز) دوباره از سر گرفته شوند و یک نیروگاه برق جزر و مدی با دو حوضچه‌ی  $1100 km^2$  ساخته شود که توسط نیروگاه برق مابین لس مینکویرز و چائوسی از هم جدا گشته‌اند ( $6GW$ ؛  $200$  گروه  $30MW$ ؛ سال  $34TWh$ ).

شروع برنامه هسته‌ای مانع این پیشرفت‌ها شد و با وجود اینکه تحقیقاتی توسط شرکت دپارتمان مطالعات و پژوهش مابین سال‌های ۱۹۷۶ و ۱۹۸۲ در ۱۰ یا تعداد بیشتری مکان در امتداد سواحل کانال انجام شده بود، به طور قطع این کارها توسط *EDF* در ۱۹۸۳ متوقف شدند. به منظور تضمین توان پیک تکمیل‌کننده‌ی انرژی هسته‌ای که منابع آن مبتنی بر آن بودند، *EDF* به سراغ پاسخ‌های ابتکاری رفت: چندین حوضچه، پمپاژ، دریاچه در خارج از ساحل ایجاد شدند اما همچنان هزینه‌های ساخت زیاد بود (طول سدها و غیره) و کاهش اثرات زیست‌محیطی دشوار بود.



شکل ۶-۷ پروژه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی *EDF* در جزایر چائوسی در ۱۹۵۸  $12 GW$  -  $600$  گروه  $MW$  (منبع: *La Houille Blanche - No. 2/1976*)  $23 TWh$ /سال - ۲۰

تعهدات فرانسه به موافقت با درخواست‌های اروپا برای توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر تا ۲۰۲۰ (۲۳٪ از کل مصرف) و نتایج میزگرد محیط زیست فرانسه<sup>۱</sup> ("Grenelle del'Environnement") و میزگرد دریایی ("Grenelle de la Mer") به مطرح‌شدن دوباره-ی بحث جایگاه انرژی دامنهی جزر و مدی درمیان اشکال انرژی دریایی منجر شدند. مقاله‌ی آبی<sup>۲</sup> از تعهدات انجام‌شده در میزگرد دریایی (ژوئیه ۲۰۰۹) ۳٪ از انرژی دریایی را تا سال ۲۰۲۰ هدف‌گذاری کردند (حدود ۱GW)، که ۴۰۰MW آن از انرژی دامنهی جزر و مدی حاصل می‌گردد). عمدتاً پیشرفت‌هایی در جهت پروژه‌هایی با چندین حوضچه در خارج از ساحل یا در امتداد خط ساحلی صورت خواهند گرفت (دهانه‌ها و خلیج‌های اطراف سواحل فرانسه دارای سطح دریاچه بسیار کوچکی می‌باشند). با این حال، طرح عملیات انرژی تجدیدپذیر ملی<sup>۳</sup> (۲۰۰۹-۲۰۲۰) در تابستان ۲۰۱۰ توسط فرانسه به کمیسیون اروپا پیشنهاد شد که در آن به منابع بالقوه‌ی تأسیسات انرژی دامنهی جزر و مدی در حدود ۵۰۰MW اشاره می‌شود اما دیگر با فرض این که هیچ برنامه‌ای تا ۲۰۲۰ قابل طرح شدن نیست، شامل انرژی دامنهی جزر و مدی برای کمک به تحقق این اهداف اروپا نمی‌شود.

یکی از طرفداران خاص چنین پروژه‌هایی فرانسیس لمپریر<sup>۴</sup> از شرکت هیدروکوپ است. به منظور محدود کردن هزینه‌ی ساخت دایک‌ها در آب کم‌عمق او از طرح‌های بزرگ ( $50 km^2$  - ۱۰۰ سطح حوضچه) متصل به ساحل (بیش از  $10 km$  در امتداد ساحل) و استفاده از چرخه‌ی دو اثره دفاع کرد.

### ۷-۳-۲ احداث نیروگاه برق جزر و مدی رنس

ایستگاه رنس به این دلیل انتخاب شده است که شکل دهانه‌ی آن برای احداث نیروگاه برق جزر و مدی مناسب است:

- دامنهی میانگین  $8.5 m$  با بیشینه‌ی  $13.5 m$ ؛

- دهانه‌ای به عرض  $750 m$  و مناسب برای احداث آب‌بند؛

- ایجاد دریاچه حاوی ۱۸۴ میلیون  $m^3$  با سطح  $22 km^2$ .

<sup>۱</sup> French Environmental Roundtable

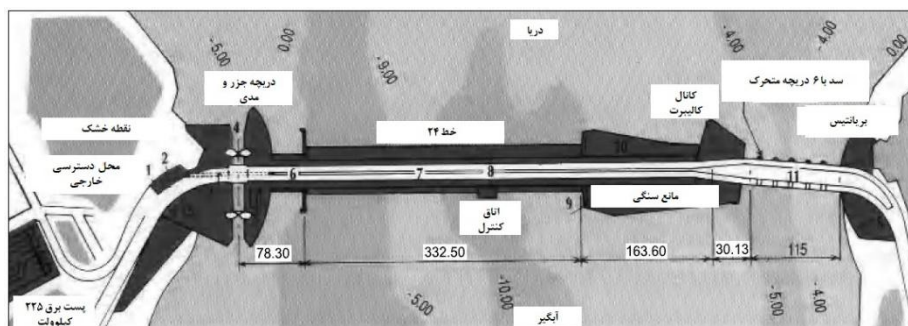
<sup>۲</sup> Blue Paper

<sup>۳</sup> The National Renewable Energy Plan of Action

<sup>۴</sup> به [LEM 08] and [LEM 10] در [www.hydrocoop.org](http://www.hydrocoop.org) مراجعه شود.

برنامه‌ی رنس که در ۱۹۶۶ طرح شده است، شامل موارد زیر می‌باشد:<sup>۱</sup>

- لاک در ساحل چپ؛
- نیروگاه برق جزر و مدی در عمیق‌ترین بخش از رنس و مجهز به ۲۴ گروه از نوع حبایی؛
- دایک سنگی، نیروگاه را از طریق جزیره‌ی چلیبرت به شرق متصل می‌کند؛
- یک آب‌بند متحرک به ۶ دریچه‌ی از نوع "واگن"<sup>۲</sup> مجهز شده است تا به پر یا خالی شدن دریاچه در طول چرخه‌های عملیاتی سرعت بخشد.



شکل ۷-۷ نقشه‌ی نیروگاه برق جزر و مدی رنس (منبع: EDF)

ساخت این طرح یک چالش فنی واقعی بود، زیرا ممکن است نرخ جریان دهانه در جزر و مد میانگین بهاری به  $15000 \text{ m}^3/\text{s}$  برسد. بنابراین، تصمیم گرفته شد تا طرح را در محوطه‌ی بدون آب از سه سد متوالی موقت بسازند.

از ۱۹۶۱ تا ۱۹۶۶، لاک و سد متحرک در پناهگاه سد موقت (دیواره‌های بتنی ساخته‌شده در جزر و مد کمبرای سازه‌های لاک و گابیون<sup>۳</sup> به همراه ورقه‌های فلزی برای آب‌بند). ساخته شدند. این روند مرحله‌ای به این معنا بود که در طول کارها به لطف لاک و دریچه‌هایی که به جزر و مد اجازه می‌داند تا در دهانه جریان داشته باشند، کشتیرانی دچار اختلال نمی‌شد.

محوطه‌ی بزرگ طراحی‌شده در ۱۹۵۶ توسط آلبرت کاکوت<sup>۴</sup> از امتداد دو سد ساخته شده است (هر کدام به طول  $600 \text{ m}$ ). خط شمالی (به سمت دریا) که به‌طور ویژه عملیاتی حساس بود، امکان مسدود کردن رنس را می‌داد. همانند دیواره‌ی سد متحرک،  $240 \text{ m}$  اول با ورقه‌های

<sup>۱</sup> به [LAH 62] و کارهای [LAH 66a] و [LAH 66b] مراجعه شود.

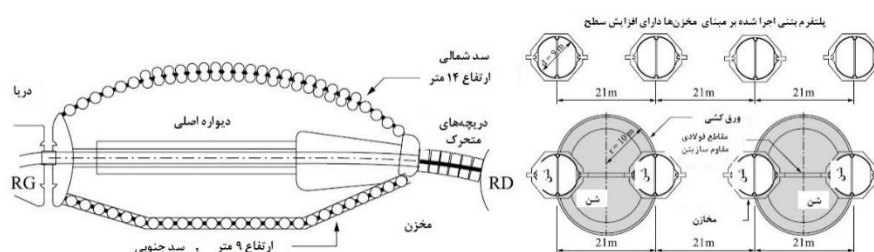
<sup>۲</sup> Wagon-type

<sup>۳</sup> Gabion

<sup>۴</sup> به [BON 64] و [DUH 64] مراجعه شود.

گابیون (به قطر  $m$  ۱۶-۱۹) ساخته شد. با این حال، به منظور بستن  $m$  ۳۶۰ باقیمانده از روشی متفاوت استفاده شد، زیرا قدرت جریان با باریک شدن راه عبور جریان افزایش می‌یافت.

این روش شامل قرار دادن تکیه‌گاه‌های نسبتاً سبک در هر  $m$  ۲۱ بود: هوزینگ‌ها استوانه‌ای به قطر  $m$  ۹ با بتن مسلح (که از قبل در محل احداث روی خشکی در بندر سنت مالو ساخته شدند) و با ارتفاع متغیر مابین ۲۰ تا  $m$  ۲۵ در فونداسیونی قرار داده شدند که از قبل با کار در زیر آب و درون هوزینگ از هوای فشرده آماده شده بود. این ۱۹ هوزینگ با قرارگیری در محل با ماسه پر شدند تا به تعادل برسند.



شکل ۷-۸ نیروگاه برق جزر و مدی رنس. دیواره‌ی نیروگاه و نمودار دقیق هوزینگ‌ها (منبع: EDF)

فضای میان هوزینگ‌ها در ابتدا با حفره‌هایی به شکل ورقه با الگوی یک در دو بسته شدند و دو کمان متصل به هوزینگ‌ها را شکل دادند که با استفاده از قطعات ویژه‌ای که در تمام ارتفاع ادامه داشتند به هم متصل شده بودند و تمامی سازه‌ها با ماسه پر شد. نقاط تکیه‌گاهی جدیدی نیز ساخته شد - نیمی از آن - که پایدارتر از هوزینگ‌های ایزوله بودند. به منظور ساخت کمان‌هایی از حفره‌ها ابتدا باید با کشیدن تیرهایی از بتن مسلح یا فلزی درون شیارهای ویژه در هوزینگ‌ها جلوی جریان‌های عبوری گرفته شود، در نتیجه قطع موقت جریان تضمین گردد.

این مجموعه‌ی هوزینگ‌های پیش‌ساخته از بتن مسلح و حفره‌های ورقه‌ای و گابیون‌ها امکان قطع جریان را در ۲۳ ژوئیه ۱۹۶۳ فراهم کردند. سپس مسیر جنوبی با استفاده از روش‌های متداول حفره‌ها ورقه‌ای ساخته شد.



شکل ۹-۷ نمای هوایی نیروگاه برق جزر و مدی رنس: در حین احداث آن در ۱۹۶۴ و امروز (منبع: EDF)

### ۳-۳-۷ گروه‌های حبابی در نیروگاه برق جزر و مدی رنس

گروه‌های نیروگاه برق جزر و مدی رنس<sup>۱</sup> به طور عمده ابتکاری هستند. به منظور امکان‌پذیر کردن عملیات توربین‌ها و پمپ در هر دو جهت، تصمیم به استفاده از گروه‌های از نوع "حبابی" گرفته شد که اخیراً در نیروگاه‌های هیدروالکتریسیته‌ی EDF مورد استفاده قرار گرفته بودند (*Cambeyrac on the Truyère, Argentat on the Dordogne, and BeaumontMonteux on the Isère*). به منظور آزمایش بازگشت‌پذیری این گروه‌ها، یک گروه حبابی آزمایشی ۹MW در اواخر ۱۹۵۹ در یک لاک قدیمی در سنت مالو نصب گردید.

یک گروه حبابی ممکن است با دو تنظیم (توزیع‌کننده و پره‌ها قابل کنترل هستند) یا یک تنظیم (توزیع‌کننده ثابت و پره‌های متحرک) طراحی گردد. هنگامی که باید جریان پیوسته عبوری از توربین تضمین گردد و به خصوص اگر گروه به طور ناگهانی از شبکه جدا شود، گروه حبابی مجهز به دریچه‌ی جریان پایین‌دست به طور ویژه برای کار در تخلیه بار به خوبی سازگار شده است.

مشخصات هر ۲۴ گروه حبابی در نیروگاه برق جزر و مدی رنس (چرخ پروانه با پره‌های متحرک و توزیع‌کننده‌ی مخروطی با تیغه‌های راهنما) مطابق ذیل می‌باشند:

- قطر (چرخ):  $5.35 m$ ؛

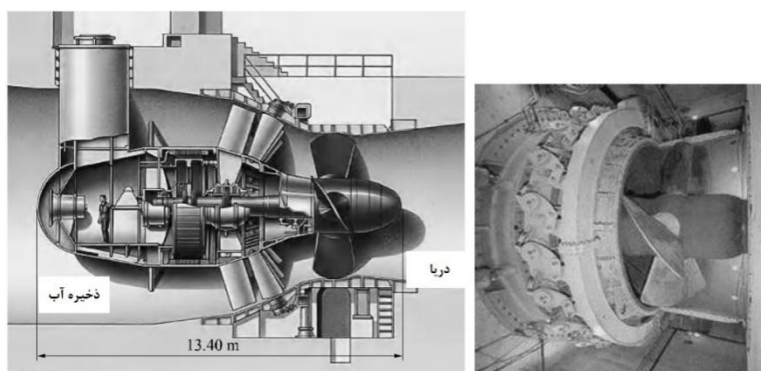
- وزن:  $470 t$ ؛

- نرخ جریان:  $275 m^3/s$ ؛

- ارتفاع هد اسمی:  $5.65 m$ ؛

<sup>۱</sup>به [GAN 73, GIB 73, DUH 73, LEF 73, BON 73, CAS 73, FAR 73, LEB 73, LEB 73, LEG 73] مراجعه شود.

- سرعت چرخش:  $93.75rpm$ ؛
- توان اسمی:  $10MW$ ؛
- ۴ پره با شیب  $5^\circ$  تا  $35^\circ$ ؛
- سرعت بیشینه:  $260rpm$ ؛
- دامنه‌ی کارکرد (ارتفاع هد):  $3m-11$ .



شکل ۷-۱۰ نمای نزدیک از گروه حبایی در نیروگاه برق جزر و مدی در رنس (منبع: EDF)

پیش‌توزیع‌کننده‌ی ساخته‌شده از دو کلاهک مخروطی که توسط ۱۲ تیغه راهنمای متحرک به هم متصل شده‌اند تنها قطعه‌ای است که کرنش را از گروه جذب می‌کند؛ ستاپ مکانیکی جوش خورده و به شدت صلب است.

توزیع‌کننده مخروطی بوده و از مجموعه‌ی ۲۴ تیغه راهنما تشکیل شده است و میان دو بطری کروی هم‌مرکز دارای سوکت، قطعات لولا و آب‌بند آویزان است. تیغه‌های راهنما توسط سیستمی از اهرم‌های توپی و سوکتی کوچک به همراه حلقه‌ی ساسات به هم متصل شده‌اند که این حلقه‌ها توسط دو سرو موتور روغنی عمودی وابسته به سیستم رگلاتور کنترل می‌شوند.

به منظور کار مستقیم توربین، آب از توزیع‌کننده به سمت چرخ جریان دارد. باید توزیع‌کننده در ارتباط با پره‌های واقع بر چرخ تنظیم شود تا به بهترین نتیجه‌ی ممکن رسید و همچنین گروه را در زمان‌های از کار افتادگی متوقف کرد.

برای عملیات معکوس توربین آب از چرخ به توزیع‌کننده جریان دارد. مورد آخر به طور کاملاً باز قفل می‌شود. بنابراین، ممکن است در موقعیت‌های مشخصی چرخ ارتعاشات خطرناکی را در توزیع‌کننده ایجاد کند. این دلیلی است که چرا تیغه‌های راهنما در توزیع‌کننده در موقعیت کاملاً باز قرار می‌گیرند و تا جای ممکن محکم قفل می‌شوند.

توجه شود هنگامی که توربین‌ها در حالت "اریفیس" کار می‌کنند، دریاچه به طور کامل پر شده و توزیع‌کننده و پره‌ها در نرخ بیشینه‌ی جریان و سرعت گروه  $30-60\text{ rpm}$  به ازای ارتفاع هد مابین  $0.3$  و  $1.2\text{ m}$ ، در موقعیت کاملاً باز قفل می‌شوند.

توان  $240\text{ MW}$  نیروگاه برق جزر و مدی رنس با  $24$  آلترناتور  $10\text{ MW}$  تولید شده و با ولتاژ  $V$   $3500$  تحت هوای بیش از حد متراکم  $2$  بار کار می‌کند. هر مجموعه‌ی دارای  $4$  گروه با ترانسفورماتور ثانویه‌ی "بلاک"،  $3.5/220\text{ kV}$  از  $80\text{ MVA}$  کار کرده و درون نیروگاه قرار داشته و به شبکه‌ی  $220\text{ kV}$  از طریق کابل‌های روغنی در فشار  $3.5$  بار متصل شده‌اند. ضریب توان این آلترناتورها به دلایل اقتصادی برابر  $1$  قرار داده شده بود.

### ۷-۳-۴ چرخه‌های عملیاتی در نیروگاه برق جزر و مد رنس

به دلیل اینکه در چرخه‌های عملیاتی از پمپاژ استفاده می‌شود باید گروه‌های نیروگاه برق جزر و مدی رنس قادر به اجرای هر دو به عنوان آلترناتور و در حالت پمپاژ باشند. اگر ما حالت اریفیس را که برای افزایش سرعت تخلیه و پر شدن دریاچه استفاده می‌شود اضافه کنیم و با در نظرگیری این حقیقت که از چرخه‌ی دو اثره استفاده شده است ما با معکوس شدن جهت چرخش و استارت با ولتاژ کامل به حالت‌های تعریف‌شده‌ی زیر می‌رسیم (دست کم  $4$  استارت روزانه در هر گروه در طول عملیات دو اثره).

نیروگاه برق جزر و مدی رنس در کمترین جزر ومد با چرخه‌ی تک‌اثره  $5$  مرحله‌ای کار می‌کند که امکان تنظیم سطوح دریا/حوضچه را تا جای ممکن فراهم می‌کند تا توربین‌ها تحت ارتفاع هد حدود  $6\text{ m}$  کار کنند:

- هر  $6$  دریچه باز می‌شوند و گروه در حالت اریفیس کار می‌کند؛ با مد دریاچه پر می‌گردد؛
- هنگامی که جزر و مد به سطح حداکثری خود برسد، دریچه‌ها بسته شده و ممکن است گروه در حالت پمپاژ درگیر شوند تا سطح دریاچه بیشتر افزایش پیدا کند (پمپاژ مستقیم؛ سطح آب در حوضچه به اندازه‌ی  $0.5\text{ m}$  تا  $1.75\text{ m}$  افزایش پیدا می‌کند)؛

گروه متوقف می‌شود (مرحله‌ی توقف)؛ شروع جزر؛



- هنگامی که ارتفاع هد کافی باشد، گروه با حالت مستقیم راه انداخته می‌شود (جریان از حوضچه به دریا)؛

- گروه متوقف می‌شود (ارتفاع هد کمتر از  $1.20m$ ).

در جزر و مد بهاری (ضریب  $< 1.05$ )، نیروگاه برق جزر و مدی رنس با استفاده از ۷ مرحله‌ی چرخه‌ی دو اثره کار می‌کند:

- گروه با حالت معکوس شروع به کار می‌کنند (جریان از دریا به سمت حوضچه)؛ تغییر سریع سطح دریا (مد) به معنای ارتفاع هد کافی برای عملیات توربین‌ها است؛ هنگامی که ارتفاع هد به  $1.70m$  برسد گروه متوقف می‌شود. با این حال، سطح بیشینه‌ی آب در حوضچه در این چرخش‌زایی معکوس کمتر از سطح بیشینه‌ی سمت دریا است؛

- دریچه‌ها و پر شدن حوضچه تسریع می‌شود؛

- دریچه‌ها بسته می‌شوند؛ گروه به حالت اریفیس تغییر می‌کند و سپس احتمالاً در پمپاژ مستقیم درگیر می‌شوند؛

- گروه متوقف می‌شوند (مرحله‌ی توقف)؛ دریاچه پر شده و جزر شروع می‌شود؛

- گروه در حالت مستقیم راه انداخته می‌شود؛

- گروه متوقف شده، نیروگاه در حالت اریفیس کار می‌کند و دریچه‌ها در انتهای چرخه باز می‌شوند تا تخلیه‌ی حوضچه تکمیل شود؛ ممکن است از پمپاژ معکوس استفاده شود تا تخلیه‌ی حوضچه بیشتر انجام شده و برای چرخه‌ی بعدی چرخش‌زایی معکوس به ارتفاع هد بهتری دست پیدا کرد.

گروه‌ها باید برحسب مشخصات در ارتفاع هد کمینه و بیشینه‌ی تعریف شده توسط سازندگان، کار کنند (اختلاف ارتفاع میان سطوح دریاچه و دریا). از علامت + هنگامی برای ارتفاع هد استفاده می‌شود که سطح حوضچه از دریا بیشتر باشد (حالت مستقیم) و هنگامی از علامت منفی برای آن استفاده می‌شود که سطح حوضچه کمتر از دریا باشد (حالت معکوس).

جریان از حوضچه به سمت دریا:

- توربین مستقیم: مابین  $11m$  و  $1m$ ؛

- تسریع پمپاژ معکوس: مابین  $0m$  و  $6m$ -؛

- اریفیس مستقیم: مابین  $m$  ۳ و  $m$  ۰؛
  - جریان از دریا به سمت حوضچه:
  - توربین معکوس: مابین  $m$  ۱۱- و  $m$  ۱-؛
  - تسریع پمپاژ مستقیم: مابین  $m$  ۳- و  $m$  ۰؛
  - پمپاژ مستقیم و عادی: مابین  $m$  ۰ و  $m$  ۶؛
  - اریفیس معکوس: مابین  $m$  ۳- و  $m$  ۰.
- امروزه به طور متوسط خرابی چرخه‌های عملیاتی (به عنوان درصدی از زمان عملیاتی بیان می‌شود) مطابق ذیل می‌باشد:
- توربین مستقیم (حوضچه به دریا): ۶۰٪؛
  - پمپاژ معکوس (حوضچه به دریا): ۰٪؛
  - توربین معکوس (دریا به حوضچه): ۲ تا ۶٪؛
  - پمپاژ مستقیم (دریا به حوضچه): ۱۵ تا ۲۰٪؛
  - عملکرد اریفیس (اساساً معکوس): ۲۰٪ (به ازای ارتفاع هد  $m$  ۰.۳-۱.۲)؛
  - هنگامی که دامنه‌ی جزر و مدی بیش از  $m$  ۷-۱۰ است، پمپاژ صورت نمی‌گیرد.
- امروزه به دلیل قرارداد منعقدشده میان *EDF* و *RTE* (پراتور انتقال فرانسه<sup>۱</sup>) برای تأمین انرژی مورد نیاز عملیات پمپ، ظرفیت پمپاژ به  $56 MW$  محدود شده است. پیش‌تر، سیستم کنترلی نیروگاه امکان پمپاژ  $100 MW$  یا حتی  $150 MW$  را می‌داد.
- تولید میانگین خالص (پس از کسر مصرف اضطراری- حدود  $8 GWh$  اما بدون در نظرگیری پمپاژ) نیروگاه برق جزر و مد رنس  $540 GWh$  بر سال است. گستره‌ی تولید خالص در بازه‌ی  $500$  تا  $600 GWh$  قرار دارد. امروزه حدود ۱۰٪ از تولید صرف پمپاژ می‌شود.

<sup>۱</sup> Réseau de Transport de l'Electricité

### ۷-۳-۵ حفاظت کاتدی

حفاظت کاتدی<sup>۱</sup> نیز موضوعی مطلوب بود و بنابراین آزمایش‌های مقدماتی در سنت مالو بر روی گروه حبایی انجام شد.

این حفاظت ابتدا به گروه‌ها اعمال شد: در هر گروه، سه تاج از ۱۲ آند پلاتین تانتال ۵۰ میکرونی وجود دارد (روی پوشش سمت دریا، روی توزیع‌کننده و روی بازوی دسترسی). حفاظت از حباب با میانگین کلی شدت  $44A$  بر گروه و با چگالی جریان  $17mA/m^2$  ( $\pm 15\%$ ) تضمین می‌گردد تا پتانسیل میان فلز و آب دریا در بازه‌ی مقادیر  $1100mV$ - و  $850mV$ - قرار گیرد (الکترودهای نقره/نقره کلرید).

پیرو نتایج رضایت‌بخش این حفاظت کاتدی، در سال ۱۹۶۸ دریچه‌های سد (۴ لوله‌ی تیتانیوم پلاتینی با ۵ میکرون به ازای هر دریچه) و در ۱۹۷۰ دریچه‌های لاک محافظت شدند (۱۶ لوله-ی تیتانیوم پلاتین). امروزه اپراتور تقریباً ۹۰۰۰ اندازه‌گیری در هر سال انجام می‌دهد.

### ۷-۳-۶ تخصص فنی حاصل از آزمایش

پس از ۴۰ سال عملیات<sup>۲</sup> می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب‌های فنی به طور کلی موفقیت‌آمیز بوده‌اند. به منظور محدود کردن هزینه‌ها، معمار نیروگاه برق جزر و مدی رنس نکات مشترک بسیاری را وارد ساخت و اجزا را میان چندین گروه تقسیم نمود. ما برای دو گروه یک مدارشکن و معکوس‌کننده، یک ترانسفورماتور توان برای هشت گروه و ایستگاه هیدرولیک برای ۴ گروه خواهیم یافت. مدارهای رگلاتور و روغن‌کاری نیز تنها یکی هستند که بدنه‌ی یکسانی از روغن برای این دو هدف مختلف استفاده می‌شود.

این طرح به شدت ژنراتورها را تحت تأثیر قرار می‌دهد زیرا در معرض سطوح بالای از تنش ناشی از چرخه‌های متوالی شروع-توقف و کوپلینگ‌های آسنکرون<sup>۳</sup> (یک مدارشکن برای دو ماشین) قرار دارند. این کرنش‌های ثابت و تقاضا منجر به گسیختگی پین‌های محکم‌کننده‌ی مدار مغناطیسی استاتور به فریم می‌شوند که در نتیجه باعث کاهش شکاف‌ها به تقریباً صفر می‌شود (اصطکاک روتور بر روی استاتور). مابین سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۲ رشته عملیاتی بر

<sup>۱</sup> به [GAN 73, GIB 73, DUH 73, LEF 73, BON 73, CAS 73, FAR 73, LEB 73, LEB 73, LEG 73] مراجعه شود.

<sup>۲</sup> به مقالات ژورنال‌های [GAN 73, GIB 73, DUH 73, LEF 73, BON 73, CAS 73, FAR 73, LEB 73, LEB 73, LEG 73, BAN 97A, BAN 97B, BOS 97, CAZ 97, CHA 97, LAM 97, SAL 97, NAU 97, RÉT 97, EDF 09, ENF 97] و کتاب [ENF 97] مراجعه کنید.

<sup>۳</sup> Asynchronous

روی ۲۴ استاتور صورت گرفت: تمامی قطب‌های روتور خارج شده و دوباره ایزوله شدند و مدار میراگر نیز تعمیر شد.

درباره‌ی روتورها، سایدگی ناشی از خوردگی الکتریکی روی قطب‌ها خیلی زود آشکار شد و در ۱۹۶۸، ۶۴ قطب ۲۴ آلترناتور جدا شدند تا میله‌های درهم استهلاکی در مکان آن‌ها قرار داده شد و در نتیجه، از جرقه‌ی الکتریکی اجتناب شود. تمامی قطب‌ها از ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۲ خارج شدند.

درباره‌ی توربین‌ها، جداسازی ماشین‌های به کار گرفته‌شده از ۱۹۷۵ تا ۱۹۸۲ نشان داد که حفاظت کاتدی چقدر موثر است. تعمیراتی در مفاصل ضد آب انجام شد. رشته نگهداری‌های بازدارنده در ۱۹۹۴ انجام شد و هنگامی که گروه‌ها ابتدا جدا شدند هیچ عیب عمده‌ای ملاحظه نشد. در ۱۹۹۹، نگهداری بازدارنده متوقف شد و ناگهان توجهات به نگهداری از نوع تعمیر جلب شد.

در ۲۰۱۰ تصمیم گرفته شد که نوسازی‌هایی برای گروه‌های وارد نشده در سلسله فعالیت‌های ۱۹۹۴ انجام شود. این برنامه‌ی جدید نوسازی این گروه‌ها باید طی ۱۲ سال آینده با یک توقف موقت در انتهای ۶ سال انجام شود.

### ۷-۳-۷ اثرات زیست‌محیطی تجربه‌شده

در رابطه با اثرات زیست‌محیطی، ما می‌توانیم ۳ دوره‌ی زمانی را از هم جدا کنیم که از میان دیگر دوره‌ها توسط کار آزمایشگاه دریایی، موزه‌ی ملی تاریخ طبیعت در دینارد<sup>۱</sup> و توسط ایفرمر تأکید شده‌اند:

- دوره‌ی احداث (۱۹۶۳-۱۹۶۶)، هنگامی که دهانه بسته شد و به دلیل ثابت نگه داشتن سطح آب در دریاچه (۸.۵۰ m) با تبادلات بسیار کم میان دهانه و دریا (تخلیه دو بار در روز با دامنه-ی: ۱ m-) اختلالات بسیاری در محیط زیست آبریان ایجاد شد. این امر با کاهش ۱۰ درصدی نزدیک سد و افزایش شدید نرخ رسوبات ریز باعث بروز تغییرات عمده‌ای در میزان شوری آب دریاچه شد. تبدیل یک دهانه به دامنه‌ی جزر و مدی بالا با سطح ثابت تقریباً به ناپدید شدن کامل گیاهان و جانوران دریایی منجر شد. از طرف دیگر، جمعیت ماهی‌های مقاوم و بی‌مهرگان افزایش یافت.

<sup>۱</sup> به ژورنال، [GAN 73, GIB 73, DUH 73, LEF 73, BON 73, CAS 73, FAR 73, LEB 73, LEB 73, LEG 73, BAN 97A, BAN 97B, BOS 97, CAZ 97, CHA 97, LAM 97, SAL 97, NAU 97, RÉT 97, EDF 09] مراجعه شود.

- دوره‌ی بازسازی محیط زیست و دوباره ساکن شدن (۱۹۶۶-۱۹۷۶). دهانه به دریای داخلی با تنوع وسیعی از گونه‌ها (زرفین‌ها، سخت‌پوستان، ماهی‌ها و غیره) تبدیل شد و تعادل بیولوژیکی تازه‌ای پدیدار شد. نرخ تغییرات سطح آب حوضچه که با حالت عملیات نیروگاه مشخص می‌شود به کاهش نواحی صنعتی منجر شد که در نتیجه‌ی آن شرایط هیدرودینامیکی و هیدروبیولوژیکی تازه‌ای ایجاد گشت و رسوبات آزاد دوباره در حوضچه توزیع شدند.

- از ۱۹۷۶ به بعد، مرحله‌ی پایدارسازی جمعیت دریایی آغاز شد (همگن‌سازی بستر دریا و موجودات کف دریا) اما همچنان تعادل شکننده بود و به شدت به حالت عملیات نیروگاه بستگی داشت (ممکن بود تغییرات ناگهانی در سطح دریاچه نتایج آبی بر جانوران داشته باشند). این محدودیت‌ها در عملیات نیروگاه برق جزر و مدی رنس در نظر گرفته شدند.

از آن زمان به بعد، جمعیت ماهیان افزایش یافت و حتی از دیگر دهانه‌ها و خلیج‌ها در منطقه نیز بیشتر شد. دریاچه امکان فعالیت‌های تفریحی جدید (مانند کشتیرانی) و همچنین ماهیگیری حرفه‌ای را فراهم می‌کند.

در رابطه با پدیده‌ی رسوبات، به نظر نمی‌رسد که وجود سد حجم رسوبات طبیعی (عمدتاً برخاسته از دریا) را افزایش داده باشد اما توزیع آن‌ها تحت تأثیر قرار گرفته است. افزایش مدت زمان ساکن ماندن آب و افزایش سطح میانگین آب دهانه به اندازه‌ی تقریباً  $2.5 m$  (حوضچه) توزیع رسوبات را تغییر داده و منجر به کاهش رسوبات (لجن) بخش بالادستی شده است (پدیده‌ی افزایش "لجن" در سمت راست مرز میان آب شیرین و شور).

توجه کنید که این تأسیسات جاده‌ی ارتباطی میان دینارد و سنت مالو ( $15 km$  به جای  $km$  ۴۵) را بهبود بخشیده و هر روز مابین ۲۰۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ وسیله‌ی نقلیه از امتداد بالای سد عبور می‌کنند. لاک هر سال تقریباً امکان عبور ۲۰۰۰۰ شناور را فراهم می‌کند.

## ۷-۴ انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در کانادا - آنابولیس

### ۷-۴-۱ تاریخی مختصر از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در کانادا (خلیج فاندی)

خلیج فاندی موضوع مطالعات بسیاری در رابطه با احتمال مهار انرژی دامنه‌ی جزر و مدی استثنائی آن بوده است. به عنوان مثال<sup>۱</sup>:

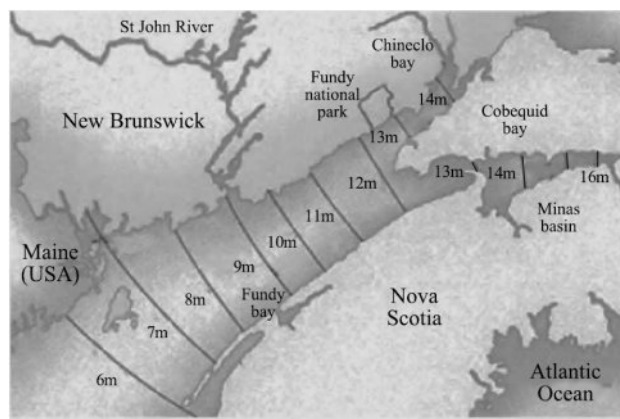
- دانشگاه اسیدیا ایستگاه کیپ اسپلیت را در ۱۹۱۵ مورد پژوهش قرار داد؛

<sup>۱</sup> به [CLA 07] مراجعه شود.



- دولت نیوبرنزویک منابع مالی پژوهش تأسیسات دامنه‌ی جزر و مدی را در خلیج شپودی تأمین کرد (۱۹۴۴-۱۹۴۵).

پس از اتمام نیروگاه برق جزر و مدی رنس و بازدید نمایندگان کانادایی از آن ایستگاه، دولت نیوبرنزویک، نوا اسکوشیا و کانادا اولین تحقیق خود درباره‌ی خلیج فاندی را در ۱۹۶۹ (برق جزر و مدی فاندی)<sup>۱</sup> آغاز و هیئت برنامه‌ریزی برق جزر و مدی آتلانتیک (ATPPB) را ایجاد کردند.



شکل ۷-۱۱ دامنه‌ی جزر و مدهای خلیج فاندی (منبع: [yellomaps.com](http://yellomaps.com))

در ۱۹۷۲، هیئت بررسی برق جزر و مدی فاندی (FTPRB) تشکیل شد و یک برنامه‌ی پژوهشی دو ساله در ۱۹۷۵ توسط دولت‌های مختلف انجام شد. ۳۰ ایستگاه بالقوه در خلیج فاندی شناسایی شد که ۳ ایستگاه به طور ویژه مورد توجه <sup>۲</sup>FTPRB قرار گرفت (به مکان روی نقشه در شکل ۷-۱۳ مراجعه کنید):

- خلیج کوبکوید B9: 3,200 MW-10,375 GWh

- خلیج شپودی A6: 920 MW-2,970 GWh

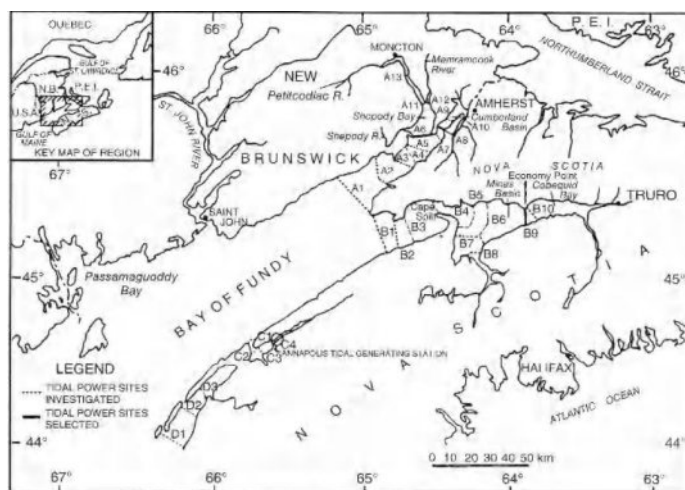
- حوضچه‌ی کامبرلند A8: 795 MW-2,350 GWh

<sup>۱</sup> به [ALT 69] مراجعه شود.

<sup>۲</sup> به [BAY 77] مراجعه شود.

موج دوم تحقیقات عمیق‌تری باید در ۱۹۷۸ به خصوص در ایستگاه حوضچه‌ی کامبرلند، جالب-ترین پروژه‌ی در نظر گرفته‌شده، انجام می‌شد. با این حال، به دلیل اختلاف‌های میان ایالت‌ها در رابطه با روش‌های مالی و سیاسی، این مطالعات هیچگاه آغاز نشدند.

در ۱۹۸۲، شرکت برق جزر و مدی مسئولیت تجدید نظر در مطالعات قبلی<sup>۱</sup> را به عهده گرفت و "نیروی کار به روز" را برای این مضمون معرفی کرد. از ۱۹۸۴ تا ۱۹۸۵، شرکت برق جزر و مدی نوا اسکوشیا تحقیقات خود درباره‌ی پروژه‌ی حوضچه‌ی کامبرلند A8 را، به ویژه به خاطر ALCAN (شرکت آلومینیوم کانادا) از سرگرفت.



شکل ۷-۱۲ ایستگاه‌های بالقوه برای انرژی دامنه‌ی جزر و مدی - خلیج فانیدی (برگرفته از ر. کلارک، "عناصر مهندسی برق جزر و مد" [CLA 07])

مرور این مطالعات در ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵ به این نتیجه منجر شد که باید هزینه‌های ساخت‌وساز باید همچنان بیشتر کاهش پیدا کنند به خصوص از ۱۹۷۴ به بعد با عرضه‌ی توربین استرافلو توسط اشر وایس برای ایستگاه‌های برق هیدروالکترونیک با هد کم این مسئله مطرح شد. این طرح‌ها باید با استفاده از هوزینگ‌ها و سدهای واصل احداث می‌شدند. محتمل‌ترین ایستگاه‌های بالقوه، حوضچه‌ی کامبرلند A8 و خلیج کوبکوید B9 بودند.

بندر کوبکوید B9	حوضچه کامبرلند A8
-----------------	-------------------

<sup>۱</sup> به [TID 82] مراجعه شود.

<sup>۲</sup> به تحقیق [TID 85] مراجعه شود.

طول دریچه	۲۵۶۰ متر	۸۰۰۰ متر
طول دایک (سد)	۱۳۴۰ متر	۱۸۰۰ متر
تعداد توربین‌های استرافلو	۴۲	۱۲۸
میزان توان هر گروه	۳۴ مگاوات	۴۱/۷ مگاوات
تولید سالیانه	۳۳۰۷ گیگاوات ساعت	۱۲۲۸۰ گیگاوات ساعت
توان کلی	۱۴۲۸ مگاوات	۵۳۳۸ مگاوات

جدول ۲-۷ نتایج پژوهش انجام شده در ۱۹۸۲ و ۱۹۸۵ در خلیج فاندی

به منظور آمادگی برای اجرای طرح‌های دامن‌های جزر و مدی با مقیاس بزرگ و آزمایش توربین‌های استرافلو در محیط دریایی، در ۱۹۸۰ تصمیم گرفته شد تا ایستگاه رویال جنریتینگ آنابولیس (نوا اسکوشیا) به عنوان نمونه به کار گرفته شود.

#### ۷-۴-۲ ایستگاه رویال جنریتینگ آنابولیس

ایستگاه رویال آنابولیس به این دلیل انتخاب شده بود که از قبل یک سد متحرک و  $m$  ۲۲۵ دایک در آن جا وجود داشت که در ۱۹۶۰ بر روی رودخانه‌ی آنابولیس ساخته شده بودند (حفاظت از منطقه‌ای باتلاقی به مساحت ۱۷۴۰ هکتار در برابر سیل) که به خلیج فاندی جریان دارد. شرکت برق جزر و مدی این پروژه را مدیریت می‌کرد و با شرکت برق نوا اسکوشیا در رابطه با پژوهش، ساخت و عملیات نیروگاه به توافق رسیدند.<sup>۱</sup>

احداث نیروگاه از ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۴ در پناهگاه سد موقت انجام شد. با میانگین دامن‌های جزر و مدی  $m$  ۶ در عملیات چرخه‌ی تک‌اثره‌ی شرکت برق نوا اسکوشیا  $50\text{ GWh}$  توان تولید می‌شود (تولید جزری) زیرا توربین استرافلو برگشت پذیر نیست.

تولیدکننده‌ی سوئیزی توربین اشروایس (اکنون بخشی از گروه اتریشی اندریتز هیدرو است) این توربین ویژه‌ی استرافلو را طراحی کرده است (توسط شرکت دمینیون بریج-سالزر در منترنال تولید شده است) که مشخصات آن مطابق ذیل می‌باشد:

- قطر (چرخ):  $m$  ۷.۶؛

- قطر کلی:  $m$  ۱۳؛

<sup>۱</sup> به مقاله‌های [DEL 86] و [RIC 92] مراجعه کنید.



- نرخ جریان (دبی):  $407.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ؛

- ارتفاع اسمی هد:  $5.5 \text{ m}$  (حداکثر  $7.1 \text{ m}$ )؛

- سرعت چرخش:  $50 \text{ rpm}$ ؛

- سرعت گریز:  $98 \text{ rpm}$ ؛

- توان اسمی:  $19.6 \text{ MW}$ ؛

- ۴ پرهی ثابت - ۱۸ پرهی متحرک.



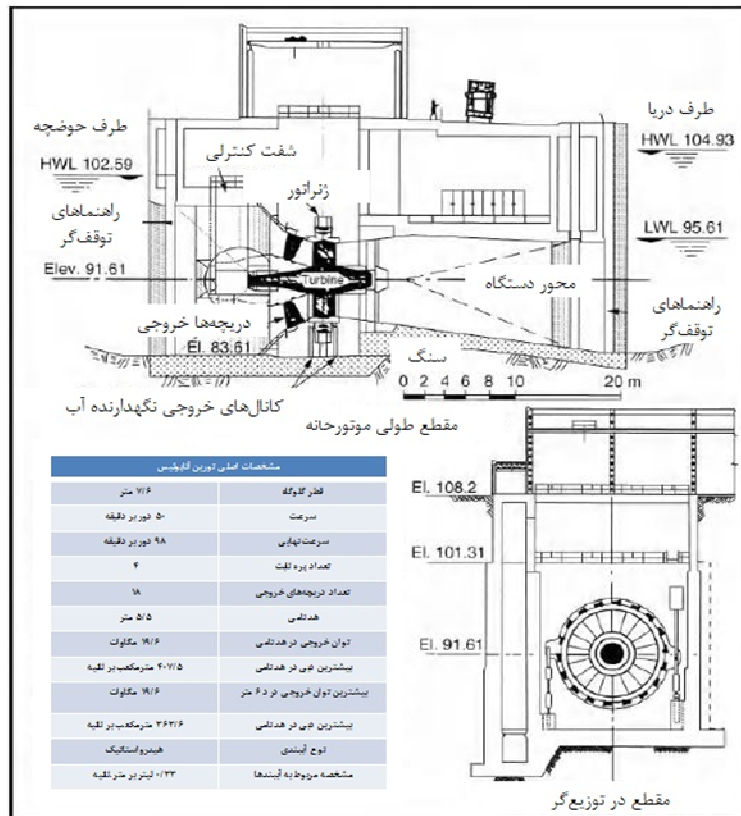
شکل ۷-۱۳ توربین استرافلو (منبع: اندریتز)

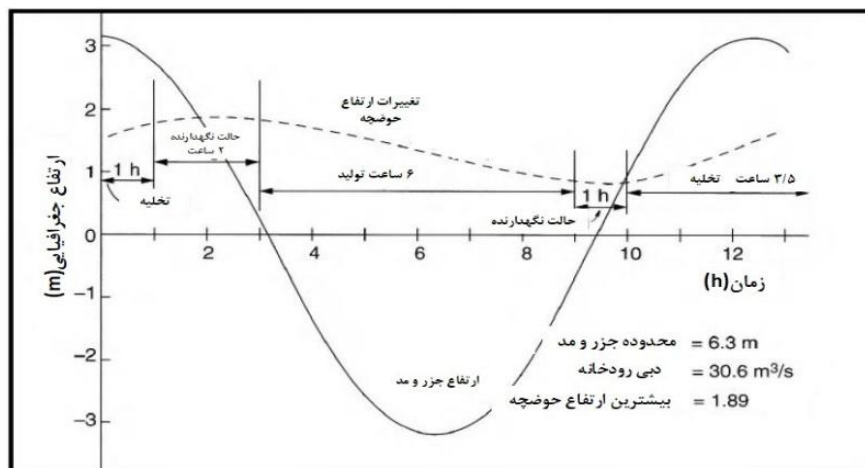
در آلترناتور از مغناطیس‌های دائم (۱۴۴ قطب  $19.1 \text{ mVA}$ ) با حاصل  $4160 \text{ V}$  استفاده می‌شود.

بازخورد این گروه رضایت‌بخش است (به طور میانگین، هر ۳ یا ۴ سال به ۲ هفته تعمیر نیاز دارد). منبع اصلی کرنش استفاده از آب دریا برای خنک‌سازی ژنراتور (تبادل‌گرها) و یاتاقان روغنی، و همچنین روغن‌کاری مفاصل هیدرواستاتیکی است. ابزار فیلترسازی آب دریا به فعالیت‌های نظارتی و تمیزکاری بسیار زیادی نیاز دارد (فرسایش و گسیختگی و رسوبات منگنزی). در رابطه با حفاظت در برابر خوردگی، به سبب انتخاب مواد (فولاد ضد زنگ) و حفاظت کاتدی، نتایج مطابق پیش‌بینی‌ها می‌باشند.

در رابطه با محیط زیست، این تأسیسات باعث فرسایش سواحل دریاچه شده که سپس تثبیت می‌گردند. معمولاً به دلیل افزایش نرخ تلفات ماهیان مهاجر که در منطقه به وفور یافت می‌شوند

(شاه ماهی، سالمون و غیره)، توربین استرافلو مورد سرزنش قرار می‌گیرد؛ به علاوه، وسایل عبور ماهی نیز ناکارآمد می‌باشند. مطالعات بسیاری انجام گشته و یک وسیله‌ی صوتی در سال ۱۹۹۹ در محل قرار داده‌شده تا در جریان پایین دست گذر ماهیان را از توربین محدود کند اما کارایی آن ناچیز است (عمدتاً برای شاه‌ماهی).





شکل ۷-۱۴ چرخه‌ی عملیاتی در آنابولیس و سطح مقطع نیروگاه (برگرفته از ر.کلارک "عناصر مهندسی برق جزر و مد" [CLA 07])



شکل ۷-۱۵ تصویر هوایی از نیروگاه آنابولیس (منبع: برق نوا اسکوشیا)

پس از انجام آزمایش‌هایی در آنابولیس، طرح‌های بزرگ انرژی دامنهی جزر و مدی در خلیج فاندى از سر گرفته نشدند. توسعه‌ی منبع جریان جزر و مد فراگیر شده بود اما در نوا اسکوشیا همچنان تمایل به توسعه‌ی طرح انرژی دامنهی جزر و مدی از نوع مردابی وجود داشت که امروزه پژوهش‌هایی در رابطه به آن در حال انجام است.

## ۷-۵ انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در انگلستان – سه‌ورن

### ۷-۵-۱ تاریخی مختصر از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در انگلستان

انگلستان به سبب دهانه‌های بزرگ دارای دامنه‌های جزر و مدی قابل توجه، پتانسیل بسیاری برای تولید انرژی دامنه‌ی جزر و مدی دارد. این دهانه‌ها (سه‌ورن، مرزی، اسلوی، دی، مورکمب و غیره) از ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ هدف پژوهش‌های بسیاری در رابطه با احتمال ساخت سد بودند و گاهی اوقات شامل ایجاد کنسرسیومی از شرکت‌های خصوصی برای ارتقای این پروژه‌ها می‌شدند (گروه برق جزر و مدی سه‌ورن، شرکت سد مرزی و غیره). با این حال، دورنمای مالی و پر انرژی آن باعث شد تا به دلیل هزینه‌های زیاد این طرح‌ها و انتخاب راهبردی دیگر منابع انرژی شروع این پروژه‌ها در انگلستان غیر ممکن شود (به عنوان مثال، توسعه‌ی نیروگاه‌های برق گازی در ۱۹۹۰).



نیروگاه	میانگین محدوده جزر و مد	سطح آب (کیلومتر مربع)	طول سد (کیلومتر)	توان کل (گیگاوات)	انرژی (تن وات ساعت)
سورن - محدوده بیرونی (مانهد - آیرتاو)	6/0	1000	20	13/5	19/70
سورن - محدوده داخلی (کرا دیف - وستون)	7/0	450	17	7/2	12/90
سولوی فیرت	5/3	860	30	7/2	10/25
یندر مورکامیه	6/3	350	16/6	3	4/63
واش	4/45	590	6/19	2/4	3/75
هیومبر	4/1	270	8/3	1/08	1/65
تلمس	4/2	190	9	1/12	1/37
مسی	6/45	70	1/75	0/62	1/32
دی	5/95	90	9/5	0/84	1/16

شکل ۷-۱۶ موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های انرژی دامنه‌ی جزر و مدی انگلستان (این نقشه برگرفته از BOY [04] است؛ جدول برگرفته از پژوهش‌های بنی و پاتنرز<sup>۱</sup> در ۱۹۸۹)

با این حال، وضعیت امروز انگلستان (از کار افتادن نیروگاه‌های برق موجود، اهداف جاه‌طلبانه برای توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر و غیره) باعث شده است تا پژوهش درباره‌ی پروژه‌های انرژی دامنه‌ی جزر و مدی بازیابی شوند.

در ۲۰۰۷، کمیسیون توسعه‌ی پایدار (SDC) تحقیقات جدید خود درباره‌ی پتانسیل انرژی جزر و مدی (جریان‌ها و دامنه‌ی جزر و مدی) انگلستان را منتشر کرد (گزارش<sup>۲</sup> "تبدیل کردن جزر و مد - برق جزر و مدی در انگلستان"). این مقاله در جمع‌بندی خود پیشنهاد می‌کند که پروژه‌های انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در دهانه‌ی سه‌ورن از سر گرفته شوند که می‌تواند ۵٪ از برق انگلستان را تأمین کنند و همچنین به مرزی به عنوان یک ایستگاه مستعد نیز اشاره می‌شود.

<sup>۱</sup> binnie & Partners

<sup>۲</sup> به [SUS 07] و بسایته‌ها و گزارشات مراجعه کنید.

## ۷-۵-۲ پژوهش‌هایی در رابطه با پروژه‌های انرژی دامن‌های جزر و مدی در

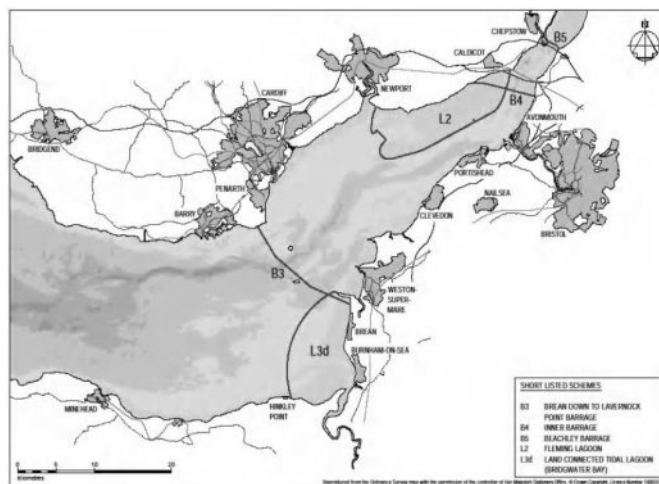
## دهانه‌ی سه‌ورن

پیرو مطالعات بسیاری که توسط گروه برق جزر و مدی سه‌ورن در ۱۹۸۱ و ۱۹۸۹<sup>۱</sup> انجام شد و به پیشنهاد *SDC*، در ۲۰۰۷ وزیر انرژی به سازمان بنگاه تجاری و ساماندهی تنظیمی (*BERR*) که در سپتامبر ۲۰۰۸ به سازمان انرژی و تغییرات اقلیمی (*DECC*) تبدیل شد) مسئولیت هدایت تحقیق درباره‌ی بهره‌برداری از پتانسیل انرژی دامن‌های جزر و مدی دهانه‌ی سه‌ورن را داد (۲ سال - بودجه‌ی ۱۰ میلیون £). پروژه‌ی "برق جزر و مدی سه‌ورن" (*STP*) در ژانویه‌ی ۲۰۰۸ آغاز شد و گروهی از ۲۰ فرد با نمایندگانی از ۶ سازمان دولتی (محیط زیست، انرژی، مالی و غیره) و شرکت نمایندگانی از آژانس سازمان منطقه‌ای جنوب غرب و دولت مجموعه‌ی ولز ایجاد شد. هدف این پژوهش فراهم کردن اطلاعاتی برای دولت در رابطه تمامی جنبه‌های پروژه (فنی، اقتصادی، مالی، زیست‌محیطی و غیره) بود تا امکان تصمیم‌گیری برای آغاز مناسب‌ترین طرح انرژی دامن‌های جزر و مدی مطابق با سیاست توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر را فراهم کند (هدف ۱۵٪ تا ۲۰٪) و منابع برق را تضمین و انتشار *CO2* را کاهش دهد (کاهش ۸۰٪ تا ۲۰۵۰٪).

برنامه‌ی این پژوهش مطابق ذیل می‌باشد:

- مرحله‌ی ۱ (ژانویه‌ی ۲۰۰۸ تا ژانویه‌ی ۲۰۰۹): پژوهش مقدماتی در رابطه با ۱۰ پروژه‌ی بالقوه بر اساس درخواست برای پروژه‌های پوشش‌دهنده‌ی وسایل عمده‌ی مهار انرژی جزر و مدی در دهانه (سدها، تالاب "ساحلی" و "فراساحلی"، توربین‌های جریان جزر و مدی و غیره)؛
- ژانویه تا آوریل ۲۰۰۹: اولین مشورت عمومی برای تأیید انتخاب پنج طرح لیست‌شده (۳ سد و ۲ تالاب متصل به خشکی)؛
- مرحله‌ی ۲ (آوریل ۲۰۰۹ تا آوریل ۲۰۱۰): امکان‌سنجی پژوهش درباره‌ی طرح‌های لیست‌شده، آزمایش تمامی متغیرهای محتمل (تعداد توربین‌ها، عملیات تک یا دو اثره و غیره) و ترکیب طرح‌ها (به عنوان مثال، تالاب + سد کوچک)؛
- تابستان ۲۰۱۰: ارائه‌ی نتایج به دولت جدید.

<sup>۱</sup> به [SEV 81] و [SEV 89] مراجعه کنید.



شکل ۷-۱۷ سه‌ورن - موقعیت ۵ پروژه‌ی انتخابی (منبع: DECC)

در ابتدا، در بهار ۲۰۱۰ یک رایزنی عمومی قبل از تصمیم نهایی دولت (که برای تابستان در نظر گرفته شده بود) انجام شد. با این حال، به دلیل اینکه پژوهش‌های مقدماتی نشان داده بودند که به لحاظ فنی (و مالی) اجرای طرح تا ۲۰۲۰ برای کمک به دستیابی اهداف اروپا در رابطه با انرژی‌های تجدیدپذیر غیر ممکن است، تصمیم گرفته شد تا پیرو انتخاب دولت جدید در مه ۲۰۱۰ این تصمیم اطلاع داده شود.

تا اکتبر ۲۰۱۰ طول کشید<sup>۱</sup> تا دولت ائتلافی جدید تصمیم خود را بگیرد و قصد خود مبنی بر عدم پیگیری پژوهش‌های مربوط به سه‌ورن را اعلام کند با این تصور که چنین پروژه‌ای بسیار پرهزینه خواهد بود و خطرات فنی و محیطی بسیاری ایجاد خواهد کرد. با این حال، اگر دورنمای انرژی این امکان را بدهد و اگر راه‌حل‌های ابتکارانه که در حین تحقیقات پدیدار شدند به سطح کافی از رشد فنی برسند، دولت می‌تواند پس از ۲۰۱۵ ارزیابی دوباره‌ی پروژه را در نظر بگیرد.

پژوهش‌های زیر توسط کنسرسیوم مشاوران قبلی انجام شده‌اند:

- ارزیابی راهبردی محیط زیست (SEA) مطابق با بخشنامه پارلمان اروپا *EC/۲۰۰۱/۴۲*، شامل پژوهش‌های فنی و محیطی: پارسون برینکرهوف و بلک و ویچ<sup>۲</sup>

- راه‌حل‌هایی برای تأمین مالی و احداث پروژه در آینده: *PricewaterhouseCoopers*؛

<sup>۱</sup> نتایج و تمامی تحقیق‌ها در وبسایت <http://www.decc.gov.uk> در دسترس می‌باشند [DEP 10a-c].

<sup>۲</sup> Parsons Brinckerhoff and Black & Veatch

- مطالعات اقتصادی: اقتصاد برای گروه محدود مشاوره‌های محیط زیست؛
  - اثرات محیطی و منطقه‌ای (اجتماعی اقتصادی): گروه مشاوره‌ای *DTZ*.
- این مطالعات توسط تیم *STP* انجام شده‌اند و همچنین این تیم مسئولیت‌های زیر را نیز بر عهده داشت:
- بررسی اثرات وارد بر شبکه‌ی برق و نیاز به تقویت/اصلاح آن (با شبکه‌ی ملی)؛
  - تحلیل شرایط مورد نیاز برای مواد، تجهیزات و پاسخ بازارهای ملی و اروپایی (زنجیره‌ی منابع)؛
  - انجام مطالعات اقتصادی، انتخاب فرضیه‌ها (تحول بازار الکتریسیته، میزان تخفیف، مشوق‌های مالی و غیره)؛
  - بررسی مشارکت و ارتباط محلی (سازمان‌دهی جلسات بسیاری با حضور سهامداران اصلی)؛
  - انتخاب معیارهای جبرانی (به خصوص در رابطه با بخشنامه‌های *EC* درباره‌ی ساکنین و پرندگان)؛
  - بررسی فرایندهای اجرایی؛
  - اجرای مشاوره‌های عمومی؛
  - روابط مدیریت با سازمان‌های دولتی، انجمن‌های حفاظت از محیط زیست و غیره.
- گروهی از ۷ متخصص مستقل ("فهرست متخصصان فنی و مهندسی") نیز در بررسی پروژه‌های مبتنی بر انتخاب‌های فنی شرکت کردند.
- ۵ پروژه‌ی لیست‌شده که در حین مطالعات امکان‌سنجی انتخاب شدند، مطابق ذیل می‌باشند:
- سد مابین برین داون و لاورناک پوینت (*B3*): عموماً به عنوان سد کاردیف-وستون شناخته شده و از مطالعات قبلی گروه برق جزر و مدی سه‌ورن (۱۹۸۶-۱۹۸۹) حاصل شده است. این پروژه به ویژه با طرح جدیدی برای لاک (مدل کلاس *II* پاناما) به روز شده است.
  - سد شوتز (*B4*): پروژه از قبل بررسی شد (سد استونز انگلیس در ۱۸۹۶، سپس سد هوکر در ۱۹۹۰) و در این پژوهش اصلاح گشت (انطباق جدید و اولویت گروه‌های حبابی).



- سد بیچلی (B5): پروژه‌های جدید که در پایین‌دست دهانه واقع شده است (تا بر رودخانه‌ی وای تأثیر نگذارد)؛ طراحی مشابه سد شوتز ولی با استفاده از توربین‌های استرافلو.

- تالاب ولز گراند (متصل به ساحل ولز -L2): پروژه مبتنی بر پیشنهاد گروه ایرلندی فلمینگ بوده و برای کمیته‌ی سد سه‌ورن از تالاب‌های راسل الهام گرفته شده است که در ۱۹۸۰ مطالعه شده و در ۱۹۷۸ توسط سر هرمن باندی، مشاور ارشد سابق سازمان انرژی، ایجاد شده است.

- تالاب خلیج پل آبی (متصل به ساحل انگلیس -L3d): پروژه‌ی جدید از نوع تالاب که در ابتدا توسط شرکت محدود برق جزر و مدی، شرکتی که توسعه‌ی طرح تالاب را ارتقا می‌دهد، مورد پژوهش قرار گرفت.

نتیجه‌ی بررسی امکان‌سنجی ۵ پروژه‌ی انتخابی در جدول ۷-۳ زیر خلاصه شده است.

نام پروژه	تعداد توربین‌ها	توان نامی توربین‌ها (مگاوات)	قطر توربین (متر)	توان کللی (مگاوات)	تعداد درجه‌های خروجی	میزان تولید (تن وات ساعت بر سال)	هزینه ساخت (میلیارد یورو)	طول کلی (کیلومتر مربع)	مساحت آب (کیلومتر مربع)	تعداد Calssons
سد کرادیف وستون	216	40	9	8640	166	14/16-6/7	27/28-1/6	15/5	550	141
سد شوتز	30	35	8/15	1050	42	2/2-6/8	5/5-5/9	7/2	94	48
سد بیچلی	50	12/5	4/65	625	26	1/1-3/6	4-4/3	1/9	62	31
سد ولشگروندز	40	25	6/7	1000	41	2/2-5/7	7/8-7/5	28/5	86	34
بندر بریج واتر لوگان	144	25	8/9	3600	0	5/6-6/9	14/14-2/5	28/4	87	45

جدول ۷-۳ سه‌ورن: پروژه‌های انتخابی در ۲۰۰۹ (داده‌های برگرفته از DECC)

بهینه‌سازی مطالعات نشان داد که تنها در پروژه‌ی از نوع تالاب خلیج پل آبی می‌توان از حالت دو اثره استفاده کرد، در حالیکه در طرح‌های دیگر از حالت تک‌جزر استفاده می‌شود. انتخاب ابزارهای عملیات بر اساس مطالعات اثر چنین طرح‌هایی بر تلفات ماهیان، تغییرات سطح آب در دریاچه، تلفات نواحی جزر و مدی و غیره صورت می‌گیرد.

در مورد نوع توربین‌ها، تنها برای سد بیچلی توربین‌های استرافلو در نظر گرفته شدند (کاهش هزینه‌های مهندسی عمران)، در حالیکه در طرح‌های دیگر از گروه‌های حبایی استفاده شد.

در تقسیم هزینه‌های احداث، معیارهای جبرانی ویژه‌ای به دلیل اتلاف نواحی جزر و مدی در نظر گرفته شدند (بخشنامه ساکنین *EC*) که مبتنی بر هزینه‌ی غرامت هکتار/۰۰۰۰۰۰۰۰ با نسبت متغیر میان ۱ و ۳ برای نواحی سطحی جبران‌شده بودند.

هر کدام از این طرح‌ها از هوزینگ‌هایی ساخته شده‌اند که شامل گروه‌ها یا دریچه‌ها و دایک‌های محدودکننده با طراحی سنتی می‌باشند.

توجه کنید که از میان ترکیب‌های محتمل طرح‌ها تنها پاسخ‌های "سد شوتز + تالاب خلیج پل آبی" و "سد کاردیف-وستون + تالاب خلیج پل آبی" احتمالاً می‌توانند به لحاظ اقتصادی و پویایی دارای مزیت باشند.

### ۷-۵-۳ بررسی پاسخ‌های ابتکاری برای دهانه‌ی سه‌ورن

در طول مشاوره‌ی عمومی، از *DECC* به دلیل مطرح کردن تنها پاسخ‌های "متداول" همچون سدها یا تالاب‌های مجهز به توربین‌های حبابی یا استرافلو و چشم‌پوشی از پاسخ‌های ابتکاری برای پروژه همچون مانع "حصار جزر و مدی" توربین‌های جریان جزر و مدی یا طرح جدید سد مجهز به توربین‌های دو اثره جدید، به نام "صخره‌ی جزر و مدی"، مورد سرزنش قرار گرفت. در حقیقت، این پروژه‌ها در مرحله‌ی ۱ پیگیری نشدند زیرا فرض شده بود که آن‌ها به لحاظ انرژی یا فناوری‌های استفاده‌شده (که همچنان در مرحله‌ی آزمایشی بودند) بازده کمی دارند.

در پاسخ به این نیاز، *DECC* تصمیم گرفت تا در آوریل ۲۰۰۹ درخواست جدیدی برای پروژه‌های مبتنی بر پاسخ‌های فنی مبتکرانه بدهد که می‌توانستند اثرات زیست‌محیطی را نیز کاهش دهند ("طرح فناوری‌های مقدماتی سه‌ورن" - *SETS*) و این امر توسط آژانس‌های حفاظت از محیط زیست بسیاری حمایت شد (به ویژه *WWF* - سازمان جهانی خیریه‌ی حیات وحش و *RSPB* - جامعه‌ی سلطنتی در راستای حفاظت از پرندگان). در این موقعیت، ۶۰۰۰۰۰۰۰ توسط دولت برای اجرای برنامه‌ی پژوهشی ۶ ماهه (سپتامبر ۲۰۰۹ - فوریه ۲۰۱۰) اعطا شد تا مزیت فنی و اقتصادی طرح‌های مبتکرانه تأیید و رابطه‌ی آن‌ها به عنوان پاسخ جایگزین برای سدها و تالاب‌ها آزمایش شود. هفده پیشنهاد دریافت شد و تنها سه عدد از آن‌ها برای برنامه‌ی *SETS* در نظر گرفته شدند که عبارتند از:

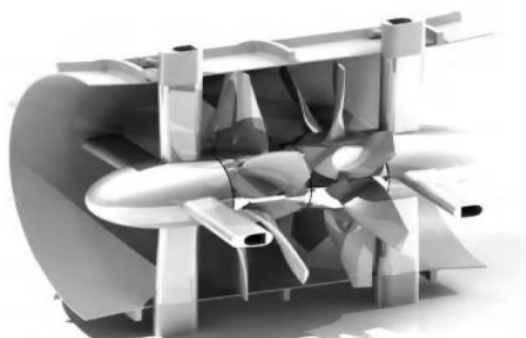
- پروژه‌ی "حصار جزر و مدی سه‌ورن" توسط کنسرسیوم توسعه‌دهندگان و شرکای صنعتی توربین جریان جزر و مدی ارائه شد و توسط *IT Power* به پیش رفت: خط مضاعف از توربین‌های (۲\*۲۰ km) مبتنی بر طرح سیژن از شرکت توربین دریایی امروز (واحد ۳۸۳\*۲) یا طرح جزر و مد پالس (واحد ۳۳۹\*۲). ردیفی از توربین‌های سیژن به توان کلی (۱ MW) (۳۸۳ MW)

امکان تولید سال  $0.88TWh$  را فراهم خواهند کرد و هزینه‌ی برآوردی احداث  $€2.4$  میلیارد خواهد بود. توجه شود که فنآوری توربین جریان جزر و مدی موضوع فصل‌های ۸-۱۰ است.



شکل ۷-۱۸ طرح "حصار جزر و مدی سه‌ورن"، با توربین‌های سیژن از MCT (منبع: MCT)

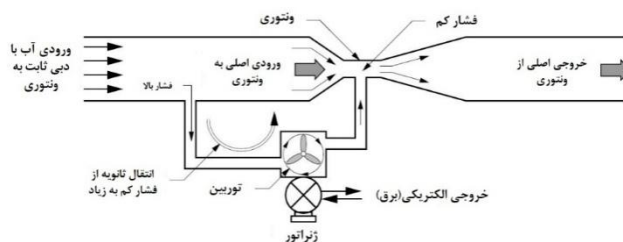
- پروژه‌ی "میله‌ی جزر و مدی" توسط رولز رویس و شرکت مشاوره‌ی اتکینز مطرح شد: سد با هد پایین و مجهز به توربین جدید کاملاً بازگشت‌پذیر (دو مارپیچ با چرخش مخالف). رولز رویس در راستایی مشابه سد کاردیف-وستون، توان  $5.8GW$  را برای تولید کلی  $20.8TWh$  و هزینه‌ی احداث  $€20.3$  میلیارد را اعلام کرد (۹۰۰ توربین، قطر  $9m$ :  $4.5MW$  و ۱۶۵ توربین، قطر  $14m$ :  $10.5MW$ ). قبل از اینکه این توربین تجاری‌سازی شود دست کم به ۵ یا ۶ سال برای توسعه‌ی فنی آن نیاز است.



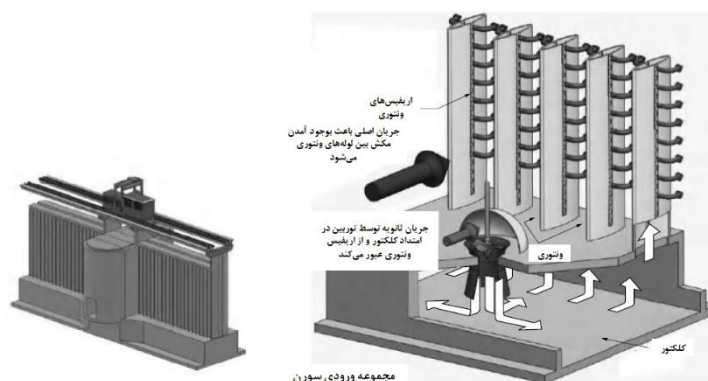
شکل ۷-۱۹ توربین جدید رولز رویس (منبع: رولز رویس)

- پروژه‌ی "مبدل طیفی انرژی دریایی - SMEC" توسط شرکت سازنده‌ی VerdErg مطرح شد: طرح جدیدی که مبتنی بر اصل اثر ونتوری می‌باشد. هنگامی که جریان از مجرای ونتوری

عبور کند، در جایی که مجرا باریک می‌شود شتاب با کاهش فشار همراه خواهد شد. اگر ما یک مجرای "فرعی" مجهز به توربین نصب کنیم ما می‌توانیم شاهد حرکت آن با استفاده از اختلاف فشار تولیدی باشیم. پروژه‌ی *SMEC* شرکت *VerdErg* شامل یک سری از سازه‌های لوله‌ای و نتوری (مجهز به اریفیس) است که در عرض دهانه توزیع شده و به وسیله‌ی انشعاب افقی شامل توربین‌های از نوع کاپلان به پایه متصل شده‌اند. با استفاده از اختلاف فشار می‌توان جریان ورودی به توربین (مدار "فرعی") را به کلکتور و اریفیس‌های سازه‌ی لوله‌ای منحرف کرد. تا کنون *VerdErg* تنها آزمایش‌هایی تجربی انجام داده است که اصل کلی آن را تأیید می‌کند (در سال ۲۰۰۷ در تأسیسات ایفرمر و در سال ۲۰۰۹ در گروه پژوهش هیدرولیک). در همان راستای سد کاردیف-وستون، *VerdErg* برای تولید کلی سال  $11.7 TWh$  و هزینه‌ی احداث  $11.8$  میلیارد توان  $7.5 GW$  را (مدول ۱۲۰ *SMEC* مجهز شده به ۵ توربین کاپلان با توان  $12.5 MW$  برای هر کدام) اعلام کرد. شرکت *VerdErg* به دنبال مکانی برای آزمایش نمونه‌ی طرح جدید خود است.



شکل ۷-۲۰ اصل *SMEC* در مجرای ونتوری (منبع: *VerdErg*)



شکل ۷-۲۱ ساختار *SMEC*. چپ: نوع کوچک؛ راست: اصول کارکرد با مدار "فرعی" که با رنگ قرمز نشان داده شده است (منبع: *VerdErg*)

## ۷-۴-۵ پژوهش درباره‌ی پروژه‌های انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در دهانه‌ی

### مرزی

دهانه‌ی مرزی (لیورپول) مکانی است که به لحاظ تبدیل انرژی دامنه‌ی جزر و مدی (دامنه‌ی ۸m جزر و مد بهاری) مساعده است به ویژه به دلیل باریکی بالادست آن مکان (کمتر از ۲km) برای احداث سد مناسب است. مطالعات انجام شده توسط شرکت سد مرزی از ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۲، احتمال ساخت سد ۷۰۰MW را تأیید کرد (۲۸ گروه حسابی ۲۵MW به ازای هر کدام؛ ۴۶ دریچه؛ سال ۱.۴TWh).

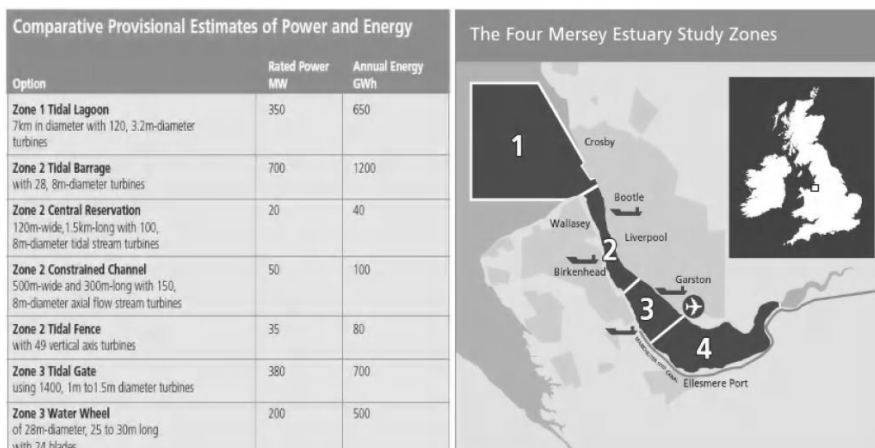


شکل ۷-۲۲ تصویری از دهانه‌ی مرزی در بندر لیورپول (منبع: پیل انرژی)

گروه پیل که در منطقه شناخته شده است (صاحب از جمله چیزهای دیگر همچون شرکت اسکله و لنگرگاه مرزی و فرودگاه جان لنون لیورپول است) تصمیم گرفتند تا بهره‌برداری از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی این مکان (پروژه‌ی برق جزر و مدی مرزی) را به عنوان بخشی از توسعه‌ی پرتوان از سر بگیرند (از طریق پیل انرژی).

در سال ۲۰۰۷ پژوهشی در رابطه با امکان‌سنجی مقدماتی (توسط پیل و آژانس توسعه‌ی منطقه‌ای شمال غرب -NWRDA- سرمایه‌گذاری شد) توسط شرکت مشاوره‌ای بورو هیپولد<sup>۱</sup> انجام شد. این پژوهش اجازه داد تا لیستی از پاسخ‌های فنی متفاوتی تهیه شود تا انرژی دامنه‌ی جزر و مدی دهانه و پتانسیل انرژی جریان جزر و مدی مهار شوند و نواحی مناسب انجام این توسعه‌ها تعریف گردند.

<sup>۱</sup> به تحقیق [BUR 07] مراجعه شود.



شکل ۷-۲۳ خلاصه‌ای از پروژه‌های محتمل در دهانه‌ی مرزی (منبع: بورو هیولد)

در سپتامبر ۲۰۰۹ شرکت محدود پیل انرژی و *NWRDA* پژوهشی در رابطه با امکان‌سنجی انجام داد که هدف آن تعیین (تا اواخر ۲۰۱۱) بهترین پروژه‌ی دهانه‌ی مرزی بود که احتمالاً مابین ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ تکمیل شود. اخیراً کنسرسیومی از شرکت‌های مشاوره‌ای به رهبری اسکات ویلسون مسئولیت این پژوهش‌ها را بر عهده گرفته است که از طرف مرکز مهندسی هیدرو *EDF*<sup>۱</sup> در بخش توربین و انتخاب فنآوری‌ها حمایت می‌شود. این پژوهش از ۴ قسمت تشکیل شده است:

- مرحله ۱: ایجاد لیستی جامع از تأسیسات محتمل و موقعیت آن‌ها ("لیست طولانی" - ۲۰۰۹)؛
- مرحله ۲: انتخاب طرح‌ها و مکان‌های قابل دست‌یابی ("لیست کوتاه" - ۲۰۱۰)؛
- مرحله ۳: تعیین پاسخ قطعی (گزینه‌ی برتر" - اوایل ۲۰۱۱)؛
- مرحله ۴: آماده‌سازی فرایند شروع عملیات (۲۰۱۱).

در انتهای مرحله ۲، با فرض اینکه فنآوری‌های دیگر (حصار جزر و مدی و غیره) برای این مکان مناسب نبودند (آب کم‌عمق و سرعت ناکافی جریان) ۳ پروژه‌ی سد (که در دو پروژه از توربین‌های با هد پایین استفاده می‌شود) به پیش برده شدند.

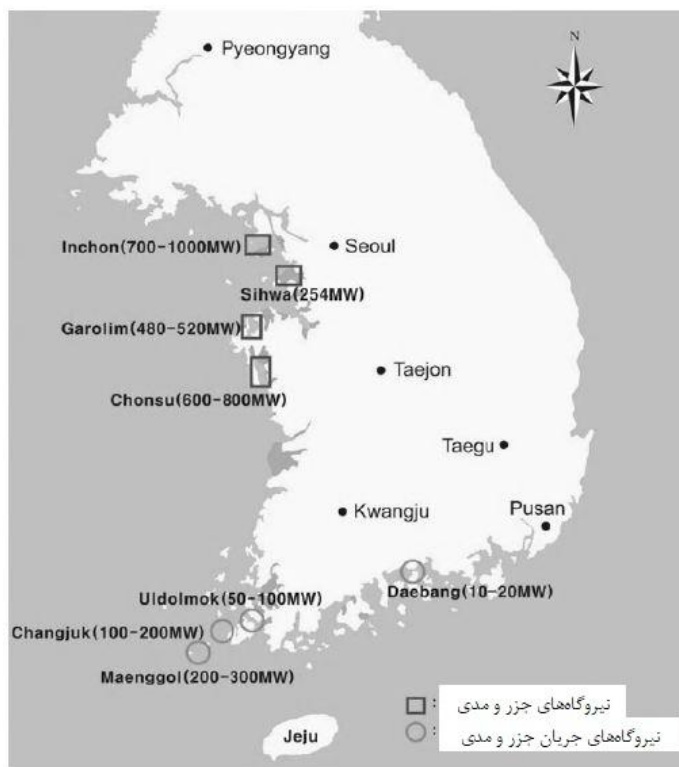
<sup>۱</sup>EdF's Centre d'Ingénierie Hydraulique

## ۶-۷ انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در کره‌ی جنوبی - سیهوا

### ۱-۶-۷ تاریخی مختصر از انرژی دامنه‌ی جزر و مدی در کره‌ی جنوبی

کره‌ی جنوبی پتانسیل قابل توجهی برای تولید انرژی دامنه‌ی جزر و مدی (و انرژی جریان جزر و مدی) دارد. اولین مطالعات در سال ۱۹۳۰ در جنوب کانگودو انجام شدند؛ سپس بعدها، موسسه‌ی تحقیق و توسعه‌ی اقیانوس کره (*KORDI*) و مهندسان شاوینیگان از طرف شرکت توان الکتریکی کره (*KEPCO*) در سال ۱۹۷۸ این مطالعات را اصلاح کردند.

کشور وارد برنامه‌ای بلند پروازانه برای کاهش انتشار  $CO_2$  و توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر شد (با هدف ۵٪ تا سال ۲۰۱۱). در سال ۲۰۰۰، برنامه‌ی بررسی انرژی دریایی آغاز شد (*KORDI*، وزارت امور دریایی و شیلات، وزارت بازرگانی، صنعت و انرژی و غیره).



شکل ۲۴-۷ موقعیت انرژی دامنه‌ی جزر و مدی عمده و سایت‌های هیدروالکتریکی در کره‌ی جنوبی (منبع: *KORDI*)

### ۷-۶-۲ طرح انرژی دامنه‌ی جزر و مدی سیهوا

دریاچه‌ی سیهوا با قرارگیری در خلیج جیونگی، شرق دریای زرد، با استفاده از  $12.4 km$  دایک و شکل‌گیری مخزنی  $(56.5 km^2)$  برای تأمین نیازهای منطقه به آبیاری کشاورزی و همچنین فراهم‌سازی امکان ساخت زمین‌های پست کنار دریا  $(173 km^2)$  ایجاد شد.

به دلیل نبود تبادلات و آلودگی زیاد در این دریاچه، تا حدودی به دلیل سایت صنعتی نزدیک به شهر آنسان، تصمیم به بازکردن دوباره‌ی دایک گرفته شد تا امکان تبادلات با دریا فراهم شده و منابع آب‌های شیرین رها شوند. به دلیل اینکه این سایت دارای میانگین دامنه‌ی جزر و مدی  $7 m$  است، در شرکت منابع آب کره (*KOWACO*)، بعدها به اسم *K-Water* تغییر کرد، مجموعه‌ی دولتی مدیریت آب، تصمیم گرفته شد تا نیروگاه برق جزر و مدی نصب شده و این پروژه هدایت شود.<sup>۱</sup> یک پارک تفریحی نیز در آن نزدیکی طرح‌ریزی شد.

پیرو فراخوان برای مناقصه، کنسرسیوم به رهبری مهندسی و احداث دوو مسئولیت انجام مطالعات و ساخت این نیروگاه  $254 MW$  را به عهده گرفت که در آن اندریتز هیدرو تأمین‌کننده‌ی اصلی گروه‌های حسابی و تجهیزات الکتریکی بود.<sup>۲</sup>

این نیروگاه برای برآورده کردن محدودیت سطح حداکثر مخزن و همچنین به دلایل اقتصادی تنها با جریان از دریا به سمت مخزن (مد) کار می‌کند. در حین جزر، آب از سمت مخزن از طریق ۸ دریچه‌ی تازه نصب‌شده در قسمت گسترش‌یافته‌ی نیروگاه و همچنین از طریق گروه‌های حسابی در حالت معکوس (نه حالت تولیدی) عبور می‌کند. تولید سالانه‌ی نیروگاه  $552 GWh$  برآورد می‌شود.

مشخصات هر کدام از این ۱۰ گروه حسابی مطابق ذیل می‌باشند:

- قطر (چرخ):  $7.5 m$ ؛

- نرخ جریان اسمی:  $482 m^3/s$ ؛

- ارتفاع هد اسمی:  $5.82 m$ ؛

- سرعت چرخش:  $64.3 rpm$ ؛

- توان اسمی:  $25.4 MW$ ؛

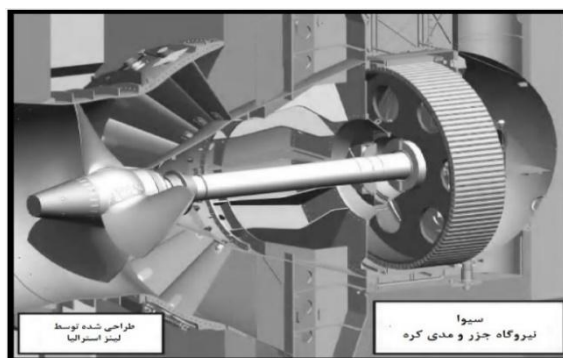
<sup>۱</sup> به گزارش [HOB 10b] مراجعه شود.

<sup>۲</sup> به سخنرانی‌های [SCH 08] و [HOB 10a] مراجعه شود.



- ۳ پره؛

- ولتاژ خروجی  $10.2kV$ .



شکل ۲۵-۷ سطح مقطع گروه حبایی (منبع: اندریتز)

کار ساخت نیروگاه برق در ۲۰۰۵ در پناهگاه سد موقت متصل به دایک موجود آغاز شد. اولین بتن‌ریزی در پاییز ۲۰۰۷ اجرا گشت و برنامه‌ریزی شد تا نیروگاه در ۲۰۱۱ عملیاتی شود (ابتدا در ۲۰۱۰ اعلام شد). هزینه‌ی پروژه‌ی سیهوا حدود  $US\$355$  میلیون است.



شکل ۲۶-۷ نمایی از سایت احداث در اواخر ۲۰۰۸ (منبع: K-Water)



شکل ۷-۲۷ اثر هنری پروژه‌ی سیهوا؛ پارک تفریحی و سد (منبع: K-Water)

## ۷-۷ چالش انرژی دامنه‌ی جزر و مدی

در حالیکه بسیاری از پروژه‌های توسعه‌ی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی به سبب زمین‌های پرنرژی مطلوب در سال‌های اخیر (دوباره) آغاز شده‌اند، اما همچنان موانع بسیاری باقی مانده است.

مطالعات انجام‌شده در سه‌ورن مشکلات زیر را به ویژه برای توسعه‌های عمده مشخص کرده‌اند: هزینه‌های بالای احداث، اثرات محیطی که پیش‌بینی و جبران آن‌ها دشوار، تأمین سرمایه‌ی چنین پروژه‌هایی و غیره.

### ۷-۷-۱ هزینه‌ها

به دلیل محوطه‌ی گسترده‌ی سازه‌ها (دایک‌ها، هوزینگ‌ها) همچنان هزینه‌ی احداث به ویژه برای تالاب‌ها زیاد است. مطالعات انجام‌شده درباره‌ی سه‌ورن هزینه‌های احداث را به صورت تقریبی مشخص کرده‌اند (CAPEX، مصرف سرمایه؛ گذشته از هزینه‌ی جبران‌سازی که ممکن است به ۱۰٪ از هزینه‌ی ساخت پروژه برسد):

- سد کوچک (> 1 GW): €5,000-6,000 k/MW

- سد بزرگ: €2,600-3,000 k/MW

- تالاب "ساحلی": €4,000-7,300 k/MW

این نتایج چگونگی تغییر هزینه‌ها را مشخص می‌کنند که ممکن است از مکانی که طرح قرار گرفته (عمق آب، نیاز یا نبود نیاز به لایروبی به منظور قرار دادن گروه در جای خود، طول سازه‌های حصارکشی - دایک‌ها، هوزینگ‌ها)، مشخصات فنی (تعداد توربین‌ها و دریچه‌ها)، به

طور کلی تدارکات (جایی که هوزینگ‌ها ساخته می‌شوند، فاصله‌ی سایت از منابع مصالح ساختمانی و غیره) و محدودیت‌های مختلف که باید کاهش پیدا کنند، (ساخت لاک‌ها و غیره) ناشی شوند. علی‌رغم استفاده از لاک‌ها که احتمالاً مناسب‌ترین طرح باشند، انتظار می‌رود که هزینه‌های نصب کاهش پیدا کنند، به عنوان مثال، از طریق اسمبلی‌های گروه‌ها و دیگر قطعات الکترومکانیکی (دریچه‌ها و غیره) در حالیکه این هوزینگ‌ها ساخته می‌شوند.

ممکن است رویه‌ی جدید احداث امکان کاهش هزینه‌ها را فراهم کند؛ در جهت مطالعات انجام‌شده در سه‌ورن، پیشنهادهای ابتکاری (دیواره‌های "پیش‌ساخته" گروه فلمینگ، دیواره‌ها و هوزینگ‌های ساخته‌شده بر روی پیل‌ها<sup>۱</sup> توسط هیدروالکترونیک دریایی هلیکون و غیره) و با فرض عملی بودن آن‌ها دارای مزایای اقتصادی می‌باشند.

اگر از یک تقویت‌کننده‌ی سرعت استفاده شود یا نیروگاه با سرعت متغیر کار کند (به ویژه با استفاده از مبدل‌های فرکانس استاتیک با توان کلی یا جزئی) ممکن است برای گروه‌های حبابی متداول بهره‌ی اقتصادی وجود داشته باشد. سرعت متغیر، به ویژه، برای ما امکان افزایش بهره‌برداری از ماشین‌ها و تولید چرخه را فراهم می‌کند (با کاهش ارتفاع هد گروه کند می‌شود). این ابزارهای بهینه‌سازی توسط تولیدکنندگان گروه‌های حبابی در حال بررسی می‌باشند.

هزینه‌های برق تولیدی ("سطح‌بندی کردن هزینه‌ی انرژی") سه‌ورن، بر اساس تخفیف ۸٪ و چشم‌پوشی از معیارهای جبرانی مطابق ذیل می‌باشند:



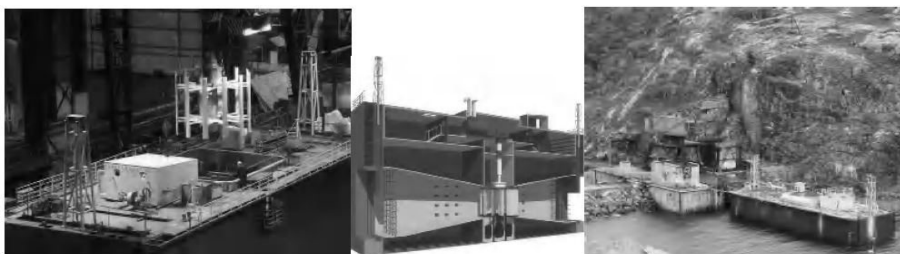
- سد کوچک: €200-260/MWh

- سد بزرگ: €180-200/MWh

- تالاب "ساحلی": €230-300/MWh

سودآوری چنین طرح‌های نیز با بهینه‌سازی تولید، به ویژه از طریق توربین‌های برگشت‌پذیر کارآمدتر قابل ارتقا می‌باشد. به نظر می‌رسد که طرح توربین توسعه‌یافته توسط رولز رویس (که هزینه‌ی هوزینگ‌ها را نیز کاهش می‌دهد [اندازه‌ی کوچک‌تر]) یک مسیر مساعده بوده و تحت بررسی فنی قرار دارد. به طور مشابه، مطالعه‌ی انجام‌شده توسط روس هیدرو بر روی توربین‌های "متعامد" می‌تواند پاسخ‌های اقتصادی‌تری را فراهم کند.

<sup>۱</sup> Piles



شکل ۷-۲۸ نیروگاه برق جزر و مدی کیسلوگوپزکایا - توربین "متعامد" در هوزینگ شناور خود (منبع: روس-هیدرو)

### ۷-۷-۲ اثرات زیست محیطی

اثرات توسعه‌ی جزر و مد بر محیط زیست همچنان نگرانی بزرگی بوده و یکی از بحث‌های عمده‌ی افرادی است که مخالف چنین پروژه‌هایی هستند. اگرچه می‌توان با ابزارهای مدل‌سازی اثرات این توسعه‌ها را بهتر ارزیابی کرد اما همچنان عدم قطعیت وجود دارد و پژوهش‌های انجام‌شده درباره‌ی سه‌ورن نشان داده است که در پیروی از بخشنامه‌های پرنندگان و ساکنین *EC* و درک کامل پدیده‌هایی همچون تغییرات در رسوبات، فرسایش ساحل و غیره دشواری‌هایی وجود دارد. به طور مشابه، تعیین کمی اثرات بر ماهیان مهاجر یا مصب رود دشوار است (برآورد تلفات ماهیان به دلیل وجود توربین‌ها). به طور ویژه با فرض نبود تجربه‌ی قبلی، برآورد غرامتی که باید مطابق بخشنامه‌ی ساکنین *EC* پرداخت شود دشوار است. معیارهای جبرانی برای سه‌ورن (اتلاف هکتار/ $k/54$  برآورد شده است) بر اساس سه نرخ جبرانی در نظر گرفته شده‌اند: ۱:۱، ۱:۲ و ۱:۳ (جبران ۱ تا ۳ برابر نواحی "از دست‌رفته"). نواحی صنعتی تحت پوشش این بخشنامه در جدول ۷-۴ نشان داده شده‌اند.

Cardiff-Weston Barrage	Shoots Barrage	Beachley Barrage	Welsh Grounds Lagoon	Bridgwater Bay Lagoon
14,050 ha	3,200 ha	2,550 ha	7,150 ha	2,100 ha

جدول ۷-۴ سه‌ورن: اتلاف سطح در نواحی حاشیه‌ی ساحل، تحت پوشش بخشنامه‌ی *EC* درباره‌ی ساکنین (منبع: DECC)

به دلیل خاص بودن هر سایت و اندازه‌ی طرح‌ها، اعمال تجربه‌های فراگرفته از نیروگاه‌های رنس و آنابولیس در پروژه‌های آبی دشوار می‌باشد. طرح‌های آبی انرژی دامنه‌ی جزر و مدی به مطالعات دقیقی به خصوص برای ارزیابی اثرات زیست محیطی نیاز خواهند داشت. ابزارهای مدل‌سازی کارآمدتر به ما امکان خواهند داد تا پدیده‌های محیطی را دقیق‌تر ارزیابی و پیش‌بینی کنیم.

## ۷-۸ کتاب‌شناسی

منابع اشاره‌شده در این فصل

- [ATL 69] ATLANTIC TIDAL POWER PROGRAMMING BOARD, *Feasibility of tidal power development in the Bay of Fundy*, Department of Energy, Ottawa, Canada, 1969.
- [BAN 82] BANAL M., "L'énergie marémotrice en 1982", *La Houille Blanche*, no. 5-6, September 1982.
- [BAN 97a] BANAL M., "Histoire de l'énergie marémotrice en France", *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [BAN 97b] BANAL M., "Genèse technique de l'usine marémotrice de la Rance", *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [BAY 77] BAY OF FUNDY TIDAL POWER REVIEW BOARD AND MANAGEMENT COMMITTEE *Reassessment of Fundy tidal power*, Department of Energy, Ottawa, Canada, 1977.
- [BON 64] BONNEFILLE R., JEANNEL M., "Étude sur modèle réduit de la coupure de la Rance", *La Houille Blanche*, no. 4, June 1964.
- [BON 73] BONNEFILLE R., SALOMONE A., "Comparaison de quelques mesures en nature et sur modèles réduits hydrauliques", *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [BON 76] BONNEFILLE R., "Les réalisations d'Electricité de France concernant l'énergie marémotrice", *La Houille Blanche- Revue internationale de l'eau*, no. 2 April 1976, [www.shf-lhb.org](http://www.shf-lhb.org).
- [BOS 82] BOS J., MEGNINT L., "Évolution des Groupes axiaux pour l'équipement des installations marémotrices", *La Houille Blanche*, no. 5-6, September 1982.
- [BOS 97] BOS J., "Les Groupes bulbes de la Rance après trente ans d'exploitation - Retour d'expérience", *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [BOU 82] BOUCLY F., FUSTER S., "Énergie marémotrice, Les conceptions françaises actuelles", *La Houille Blanche*, no. 5-6, September 1982.
- [BUR 07] BURO HAPPOLD, *Mersey Tidal Power Study*, SPA, RSK,

- University of Edinburgh,  
September 2007.
- [CAS 73] CASACCI S., “Les Groupes bulbes. Projets et perspectives”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [CAZ 97] CAZENAVE P., “L'utilisation des Groupes bulbes dans les aménagements de basse chute”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [CHA 97] CHARON A., “La conduite automatique de la centrale de la Rance”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [CLA 07] CLARK R.H., *Elements of Tidal-Electric Engineering*, IEEE Press, Canada, 2007.
- [DEL 86] DELORY R.P., “The Annapolis Tidal Generation Station”, *Proceedings of the Symposium on Water for Energy*, British Hydropower Association, Brighton, May 1986.
- [DEP 10] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, *Severn Tidal Power Feasibility Study*, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), 2010.
- [DEP 10a] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, *Feasibility Study Conclusions and Summary Report*, *Severn Tidal Power Feasibility Study*, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), October 2010.
- [DEP 10b] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, *Strategic Environmental Assessment – Environmental Report*, *Severn Tidal Power Feasibility Study*, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), May 2010.
- [DEP 10c] DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE, *Strategic Environmental Assessment of Proposals for Tidal Power Development in the Severn Estuary – Options Definition Report*, vol. 1-3, *Severn Tidal Power Feasibility Study*, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), April – May 2010.
- [DUH 64] DUHOUX L., “Fermeture de la Rance déroulement des travaux et analyse des observations”, *La Houille Blanche*, no. 4, June 1964.
- [DUH 73] DUHOUX L., “Comportement en service des principaux ouvrages de génie civil de

- l'usine de la Rance*”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [EDF 09] EDF, *L’usine marémotrice de la Rance. 40 ans d’exploitation au service d’une production d’électricité inépuisable sans CO2*, EDF press release, November 2009.
- [ENF 97] *Enfant de la Lune. 30 ans d’énergie marémotrice en Rance*, collective work, Editions Textuel, 1997.
- [FAR 73] FARAL M., “Les différents types de protection contre la corrosion mis en oeuvre à *l’usine marémotrice de la Rance*”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [GAN 73] GANDON M., GUILLAUMIN M., DE LANLUIER M., “Exploitation de *l’usine de la Rance* Méthode et résultats”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [GIB 66] GIBRAT R., *L’Energie des Marées*, PUF, France, 1966.
- [GIB 73] GIBRAT R., “L’énergie marémotrice dans le monde. *L’usine marémotrice de la Rance et l’environnement*”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [HIL 82] HILLAIRET P., “Vingt ans après *La Rance*, une expérience marémotrice”, *La Houille Blanche*, no. 5-6, September 1982.
- [HOB 10a] HO BAE Y., OK KIM K., HO CHOI B., “Progress of the Sihwa tidal plant project in South Korea”, presentation at the International Ocean Energy, April, 2010.
- [HOB 10b] HO BAE Y., OK KIM K., HO CHOI B., “Lake Sihwa tidal power plant project”, *Ocean Engineering*, no. 37, 2010.
- [LAH 62] *La Houille Blanche*, special edition “*La Rance*”, no. 2, March-April 1962.
- [LAH 66a] *La Houille Blanche*, “*Revue Française de l’Energie*”, special edition “*La Rance*, une grande réalisation inédite”, no. 183, September-October 1966.
- [LAH 66b] *La Houille Blanche*, “*L’usine marémotrice de la Rance*”, collective work, Edition Regards Publicité, 1966.
- [LAM 97] LAMBERT M., “Bilan de la protection cathodique des ouvrages du barrage de la *Rance*. De la conception au résultat final”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la *Rance: l’énergie marémotrice*, April 1997.
- [LEB 73] LEBORGNE M., “Comportement des métaux à *l’usine marémotrice de la Rance*”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.

- [LEF 73] LEFRANÇOIS J., MAROLLEAU Y., “Fonctionnement de l'usine de la Rance. Comportement du matériel électromécanique”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [LEG 73] LEGRAND R., LAMBERT M., “Bilan de la protection cathodique à l'usine marémotrice de la Rance”, *La Houille Blanche*, no. 2-3, April 1973.
- [LEM 08] LEMPERIERE F., “Stockage d'énergie en mer – Intérêt, potentiel et coûts en France”, *Hydrocoop*, November 2008.
- [LEM 10] LEMPERIERE F., “L'énergie marémotrice en France”, *Hydrocoop*, April 2010.
- [MAS 82] MASSONNET P., BORDET F., PARENT J.F., “Énergie marémotrice: Aspects liés à l'environnement aquatique”, *La Houille Blanche*, no. 5-6, September 1982.
- [NAU 97] NAUDY A., “La rénovation des Groupes bulbes de l'usine marémotrice de la Rance”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [RÉT 89] RETIERE CH., “Energie marémotrice et environnement aquatique”, *La Houille Blanche*, no. 2, April 1989.
- [RÉT 97] RETIERE CH., BONNOT-COURTOIS C., LE MAO P., DESROY N., “Etat écologique du Bassin maritime de la Rance au terme de 30 ans de fonctionnement de l'usine marémotrice”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [RIC 92] RICE R.G., BAKER G.C., “Annapolis: the Straflo turbine and other operating experiences”, *Proceedings of the Symposium on Tidal Power, Institution of Civil Engineers, London, 1992.*
- [SAL 97] SALVI J., “Usine marémotrice de La Rance: reconstruction des alternateurs”, *La Houille Blanche*, no. 3, 30ème anniversaire de la Rance: l'énergie marémotrice, April 1997.
- [SCH 08] SCHNEEBERGER M. (VA TECH HYDRO-ANDRITZ), *Sihwa tidal – Turbines and generators for the world's largest tidal power plant, Presentation to the British Hydropower Association, September 2008.*



- [SET 10a] SEVERN EMBRYONICS TECHNOLOGIES SCHEMES (SETS), Rolls-Royce – Atkins: Concept design of a very low head dual generation tidal scheme for the Severn estuary, Department of Energy and Climate Change, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), February 2010.
- [SET 10b] SEVERN EMBRYONICS TECHNOLOGIES SCHEMES (SETS), Severn Tidal Fence Consortium: Final Report, Department of Energy and Climate Change, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), January 2010.
- [SET 10c] SEVERN EMBRYONICS TECHNOLOGIES SCHEMES (SETS), VerdErg: Final Report for SETS, Department of Energy and Climate Change, available at: [www.decc.gov.uk](http://www.decc.gov.uk), March 2010.
- [SEV 81] SEVERN BARRAGE COMMITTEE, Tidal power from the Severn Estuary (Vol. 1 & 2), Department of Energy, 1981.
- [SEV 89] SEVERN TIDAL POWER GROUP, Severn Barrage Project – Detailed Reports (Vol. 1 to 5), Department of Energy, 1989.
- [SUS 07] SUSTAINABLE DEVELOPMENT COMMISSION, Reports: Turning the Tide – Tidal Power in the UK Power, Tidal Power in the UK Power – Research Report 1: UK tidal resource assessment, Tidal Power in the UK Power – Research Report 2: Tidal technologies overview, Tidal Power in the UK Power – Research Report 3: Severn barrage proposals, Tidal Power in the UK Power – Research Report 4: Severn non-barrage options, Tidal Power in the UK Power – Research Report 5: UK case studies, available at: [www.sdcommission.org.uk](http://www.sdcommission.org.uk), 2007.
- [TID 82] TIDAL POWER CORPORATION, Fundy tidal power, update 1982, Halifax, Canada, 1982.
- [TID 85] TIDAL POWER CORPORATION, Fundy tidal power, Stage 1, Halifax, Canada, 1985.
- [VUL 82] VULSER M.R., “L'énergie marémotrice en France”, La Houille Blanche, no. 5-6, September 1982.
- [WIL 10a] WILSON S., Mersey Tidal Power – Feasibility Study: Stage 1 Options Report, EDF, Peel Energy, available at: [www.merseytidalpower.co.uk](http://www.merseytidalpower.co.uk), February 2010.
- [WIL 10b] WILSON S., Mersey Tidal Power – Feasibility Study: Stage 2 Options Report, EDF, Peel Energy, available at: [www.merseytidalpower.co.uk](http://www.merseytidalpower.co.uk), November 2010.

کتاب‌ها و مقالات کلی در رابطه با موضوع انرژی دامنه‌ی جزر و مدی

برای اطلاعات بیشتر در رابطه با انرژی و پروژه‌های دامنه‌ی جزر و مدی، می‌توانید از کتب زیر راهنمایی بگیرید:

- [BAK 91] BAKER A.C., *Tidal Power*, Peter Peregrinus Ltd, UK, 1991.
- [BOY 04] BOYLE G., *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, Oxford University Press, UK, 2004.
- [BUR 01] BURT N., REES A., *Guidelines for the Assessment and Planning of Estuarine Barrages*, Thomas Telford Ltd, UK, 2001.
- [COL 09] COLLECTIVE WORK COORDINATED BY IFREMER, *Energies renouvelables marines – Etude prospective à l’horizon 2030*, Editions Quae, France, 2009.
- [GHO 98] GHOSH S.N., *Tidal Hydraulic Engineering*, A.A. Balkema, Netherlands, 1998.
- [GRA 07] GRAFENBERGER P., LANG M., SCHLEMMER E., STREIBL B. (ANDRITZ VA TECH), “New bulb unit technologies for tidal power plants”, *Hydropower & Dams*, vol. 3, 2007.
- [HAL 09] HALCROW GROUP, MOTT MCDONALD, RSK GROUP, *Solway Energy Gateway – Feasibility Study*, Studies on the Solway available at: [www.solwayenergygateway.co.uk](http://www.solwayenergygateway.co.uk), December 2009.
- [INS 90] INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, *Development in Tidal Energy*, Thomas Telford Ltd, UK, 1990.
- [LEM 07] LEMPÉRIÈRE F., BLANC P. (HYDROCOOP), “Cost-effective large tidal plants could secure peak power in 15 countries”, *Hydropower & Dams*, vol. 3, 2007.
- [LEM 09] LEMPÉRIÈRE F., BLANC P. (HYDROCOOP), “An overview of tidal power potential and prospects”, *Hydropower & Dams, Marine Energy Supplement*, 2009.
- [MAC 07] MACKAY D., *Enhancing electrical supply by pumped storage in tidal lagoons*, Cavendish Laboratory, University of Cambridge, March 2007.
- [PAR 10] Parsons Brinckerhoff Ltd., *Studies on the Duddon, Duddon Estuary Tidal Energy Feasibility Study*, April 2010







# مفاهیم، مدل سازی و کنترل توربین -

## های جزر و مدی

### ۸-۱ مقدمه

از میان منابع تجدیدپذیر موجود، انرژی هیدروالکتریک به سبب مزایای فراوان آن به مدت چندین سال بسیار مورد توجه بوده است. قدرت و سرعت جریان های جزر و مدی قابل پیش بینی بوده و امکان پیش بینی آن ها قبل از وقوع باعث می شود تا تزریق این انرژی به شبکه های برق بسیار آسان تر باشد. مبدل های مستقیم دیگر منابع تجدیدپذیر نسبت به شرایط اقلیمی حساس می باشند. از طرف دیگر، ما همواره توان مرتبه اول یک توربین جزر و مدی را در مکان مفروض خواهیم شناخت که توسط اپراتورهای شبکه ی انرژی برای تأمین ایمن برق برای مصرف کنندگان خود قابل استخراج می باشد. با این حال، اثر مرتبه دومی وجود دارد که باید در نظر گرفته شود (اثر امواج اقیانوس). علاوه بر موضوعات اشاره شده، اضافه می شود که کشورهای غرب اروپا به ویژه انگلستان و فرانسه دارای سایت های نزدیک به ساحل بسیاری می باشند که با قیمت ارزان در حال بهره برداری از انرژی مذکور هستند [JOH 06, EU 96].

هدف از این فصل ارائه ی خلاصه ای از مفاهیم اصلی توربین های جزر و مدی، سپس تشریح جزئیات مدل سازی مفهوم پایه و در نهایت معرفی جزئیات کنترل/فرمان می باشد.

## ۲-۸ فناوری پیشرفته در زمینه‌ی توربین‌های جزر و مدی

### ۱-۲-۸ مفاهیم پایه و توپولوژی

#### ۱-۱-۲-۸ توربین‌های جزر و مدی در مقابل توربین‌های بادی

هدف از ساخت توربین جزر و مدی دریافت انرژی جنبشی از جریان‌های دریایی یا رودخانه‌ای است که در نهایت برای چرخاندن روتور مستغرق استفاده می‌شود. بنابراین توربین مذکور مانند یک توربین بادی که انرژی جنبشی از باد دریافت می‌کند، عمل می‌کند. تشابهی که میان این فناوری‌ها وجود دارد ابتدا در استفاده از طراحی مشابه نهفته است. شکل ۱-۸ (چپ) یکی از بزرگترین توربین‌های بادی موجود روی خشکی را نشان می‌دهد (مدل  $E-126$  که توسط شرکت آلمانی انرکن<sup>۱</sup> ساخته شده است). روتور آن  $126\text{ m}$  قطر داشته و دارای توان اسمی  $7\text{ MW}$  و وزن  $3750$  تن می‌باشد. شکل ۱-۸ (راست) توربین جزر و مدی ساخته‌شده توسط شرکت نروژی همرفست استروم<sup>۲</sup> را نشان می‌دهد. روتور آن  $12\text{ m}$  قطر داشته و توان  $300\text{ kW}$  را تولید می‌کند و با پایه‌ی خود  $107$  تن وزن دارد. از سال  $2003$  در کالسفاند ساند در شمال نروژ، نزدیک به شهر همرفست، به شبکه‌ی برق متصل بوده است. گفته می‌شود هر دوی این توربین‌ها "محور افقی" می‌باشند زیرا شفت چرخش پره‌ها افقی و موازی نیروی برخورد است. ما همچنین از "توربین‌های جریان محوری" صحبت می‌کنیم.



شکل ۱-۸ توربین بادی انرکن  $E126$  (چپ) و توربین جزر و مدی همرفست استروم (راست) با جریان محوری

شکل ۲-۸ مجاورت توربین بادی-۷-جزر و مدی را برای توربین به اصطلاح از نوع "محور عمودی" نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین به عنوان "توربین‌های جریان متقاطع" شناخته می‌شوند.

<sup>1</sup> Enercon

<sup>2</sup> Norwegian company Hammerfest Strom

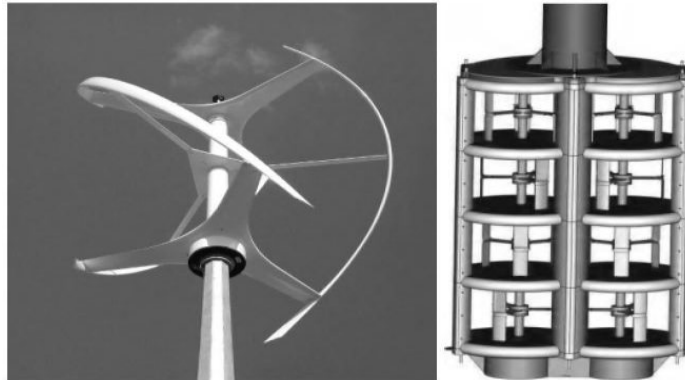
شوند، زیرا جریان برخوردی باید عمود بر محور چرخش باشد.<sup>۱</sup> تصویر سمت چپ بزرگترین توربین بادی جریان متقاطع در جهان را نشان می‌دهد که توسط آزمایشگاه آمریکایی سندیا ساخته شده و در گسپسی (کبک) در کپ-چت نصب گشته است. طول آن  $110\text{ m}$  و  $4\text{ MW}$  را تولید می‌کند. تصویر سمت راست توربین جزر و مدی آزمایشی شرکت نیو انرژی (کالگری، آلبرتا) را نشان می‌دهد که دارای قطر  $1.52\text{ m}$  است. این توربین در سال ۲۰۰۷ آزمایش شده است. در کنار ضریب مقیاس میان این دو توربین، تفاوت قابل توجهی در طراحی آن‌ها وجود دارد: پره‌های توربین بادی به لحاظ هندسی شکلی سهموی دارند، در حالیکه در توربین‌های جزر و مدی از پره‌های مستقیم استفاده می‌شود. شکل سهموی از این حقیقت ناشی می‌شود که در هوا نیروهای گریز از مرکز بر نیروهای آیرودینامیکی اعمالی بر پره‌ها غالب هستند. طراحی پره‌ها طوری برآورد شده است که نیروهای خمشی در امتداد خط وسط آن‌ها را خنثی کند. بنابراین، یک شکل طناب پرشی حاصل می‌شود که کلاف شکل<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. در توربین‌های بادی کوچک می‌توان با تقویت سازه از شکل کلافی خودداری کرد (شکل ۸-۳، چپ)؛ به شکل مارپیچی توجه شود که دارای تعدادی مزیت می‌باشد (بعدها بحث خواهد شد). شکل کلافی در آب استفاده نمی‌شود، زیرا نیروهای هیدرودینامیکی غالب می‌باشند (شکل ۸-۳، راست).



شکل ۸-۲ توربین بادی داریوس (چپ) و توربین جزر و مدی نیو انرژی (راست)، با جریان متقاطع و محورهای عمودی

<sup>۱</sup> بنابراین محور چرخش می‌تواند افقی باشد.

<sup>۲</sup> Troposkein



شکل ۸-۳ توربین بادی پیچشی (چپ) و توربین جزر و مدی هاروست-تیک (راست) با جریان متقاطع

### ۸-۲-۱-۲ لیستی از مشخصات برای قیاس

ما هنگام نصب وسایل بزرگ همچون "مزرعه" توربین‌های بادی یا جزر و مدی باید تعدادی از محدودیت‌ها را در نظر بگیریم که معمولاً به سه گروه تقسیم می‌شوند: اجتماعی، محیطی و اقتصادی.

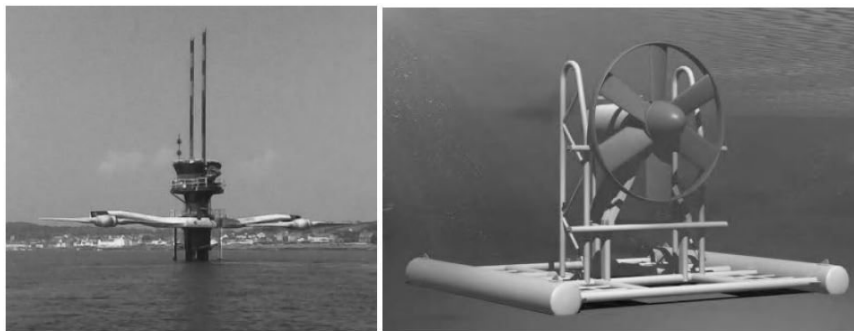
جنبه‌ی اقتصادی اساس یک پروژه‌ی صنعتی است. دو عنصر عمده برای وسیله‌ی تولید نیاز است تا توسعه داده شوند: وجود بازار و ظرفیت تولید برق با قیمت مقرون به صرفه. با این حال، این عوامل مرتبط بهم می‌باشند. برای انرژی بادی، انرژی فتوولتائیک و در حقیقت بیشتر اشکال تجدیدپذیر انرژی که می‌توان از آن‌ها الکتریسیته تولید کرد، هزینه‌ی تولید یک  $kWh$  همچنان بیشتر از شکل‌های متداول تولید انرژی همچون نیروگاه گاز، هیدرولیک یا هسته‌ای است. در این راستا و بدون در نظرگیری عوامل محیطی،  $kWh$  تولیدی همچنان مقرون به صرفه نیست. بدین دلیل در بیشتر کشورها توسعه‌ی انرژی باد با پیشنهاد مشوق‌هایی بر  $kWh$  (ضمانت‌شده برای مدت مشخص<sup>۱</sup>) ترجیح داده می‌شود. فنآوری توربین جزر و مدی هنوز به اندازه‌ی کافی به تکامل نرسیده است تا بتوان هزینه‌ی آن را به طور دقیق ارزیابی کرد. به دلیل اینکه فنآوری‌های مختلف بسیاری مطرح شده‌اند ما باید منتظر نتایج آزمایش‌های موجود باشیم تا اطلاعات بیشتری کسب کنیم. با این حال، احتمالاً سیستم‌هایی که در سایت‌های مشخصی بسیار کارآمد هستند (دریا یا رودخانه، دور افتاده یا برعکس، در معرض طوفان یا برعکس) در سایر مکان‌ها کارایی کمتری داشته باشند.

### ۸-۲-۱-۳ مزایا و معایب مرتبط با آن

<sup>۱</sup> در مورد فرانسه، پانزده سال.



اساساً توربین‌های جزر و مدی ۳ ویژگی دارند که می‌توان نسبت به توربین‌های بادی معرفی کرد: دقت آن‌ها، فشردگی آن‌ها و قابل پیش‌بینی بودن تولید آن‌ها. همچنان باید به یاد داشته باشیم که منابع جهانی انرژی باد به منابع جهانی هیدروالکتریک حتی نزدیک نیستند (تقریباً نسبت ۱۰۰۰).



شکل ۸-۴ توربین جزر و مدی *MCT* سیژن که از آب بیرون آمده (چپ) و سیلای مستغرق<sup>۱</sup> (راست)

اگرچه قدرتمندترین تأسیسات هیدروالکتریک در جهان (دو توربین،  $1.2 MW$ ) همچون توربین بادی فراساحلی بر روی یک ستون از آب بیرون آمده نصب شده است (شکل ۸-۴، چپ)، توسعه‌دهندگان بسیاری امروزه در حال مطرح کردن طرح‌های کاملاً مستغرق می‌باشند (شکل ۸-۴، راست). در این روش، زیبایی بصری دست کم از نقطه نظر انسانی، تضمین می‌شود. مطابق برآوردها، صدای مزرعه‌ی بادی زیر آب معادل صدای یک کشتی بزرگ است.

معادله‌ی [۸.۱]:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3 \quad (8-1)$$

نشان می‌دهد که توان  $P$  توربین متناسب با چگالی محیط  $\rho$  و توان سوم سرعت  $V$  است ( $C_p$  ضریب توان و  $S$  مقطع سطح جاروب‌شده توسط پره‌های توربین است).

با در نظرگیری شرایط مقابل:  $2 m/s$  و  $1000 kg/m^3$  برای آب و  $10 m/s$  و  $1.2 kg/m^3$  برای هوا نشان داده می‌شود که در آب می‌توان قدرت مشابهی با روتور کوچک‌تر با ضریب ۲.۶ نسبت به هوا تولید کرد. به عنوان مثال، با روتوری به قطر  $50 m$  در هوا  $1 MW$  به دست می‌آید و همین مقدار با روتور  $19 m$  با  $C_p$  یکسان در آب به دست می‌آید. این امر به تجهیزات سبک-

<sup>1</sup> Submerged Sabella

تری منجر شده که هزینه‌ی کمتری خواهند داشت. به عنوان مثال، توربین بادی  $E-126$  ( $7\text{ MW}$  و  $3750$  تن)  $1.9\text{ kW}$  بر تن تولید می‌کند، در حالیکه توربین جزر و مدی  $MCT$  سیژن ( $1.2\text{ MW}$  و  $390$  تن)  $3\text{ kW}$  بر تن تولید می‌کند و توربین همرفست استروم ( $kW$ )  $300$  و  $107$  تن)  $2.8\text{ kW}$  بر تن است.

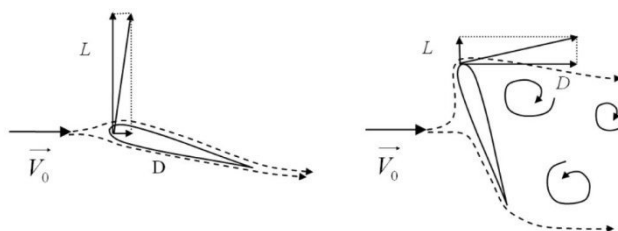
فشاردهی توربین جزر و مدی در کنار دلیل کاملاً هیدرودینامیکی، همچنین ناشی از این حقیقت است که شرایط عملیاتی آن کمتر دستخوش تغییرات می‌شود: در حقیقت یک توربین جزر و مدی برای بهره‌برداری از سرعت شبه‌بیشینه جریان طراحی شده است (وقایع استثنائی همچون سیل و جزر و مدهای عظیم باعث ایجاد سرعت‌های بسیار زیاد نمی‌شوند اما شدت زیاد جریان همانند بادهای بسیار قدرتمند بازبایی نخواهد شد)؛ در مقایسه، یک توربین بادی تنها از انرژی باد تا سرعت  $90\text{ km/h}$  استفاده می‌کند اگرچه سازه‌ی آن باید تحمل بادهای  $300\text{ km/h}$  را داشته باشد.

قابلیت پیش‌بینی تولید توربین جزر و مدی ناشی از این حقیقت است که جریان‌های جزر و مدی و رودخانه‌ای بسیار شناخته شده‌اند (با این حال، جریان‌های رودخانه به آب و هوا بستگی دارند) و طبیعت منظمی دارند که باد در آن تأثیری ندارد. جریان‌های رودخانه در طول روز ثابت هستند (به غیر از مواقع رخداد سیل) و جریان‌های جزر و مدی تا حدودی به صورت سینوسی در طول تقریباً  $12$  ساعت نوسان می‌کنند (در سواحل اروپایی آتلانتیک). بنابراین، مدیریت تولید برق در مقایسه با توربین‌های بادی بدون چشم‌پوشی از مسئله‌ی ذخیره‌ی انرژی آسان‌تر است: در رودخانه‌ها، خشکسالی و سیل وقایع هستند که مانع تولید می‌شوند؛ در انرژی جزر و مدی، آب راکد نیز به طور مشابه یک دوره‌ی بدون تولید است. به طور معکوس، و به طور مشابه برای تمامی روش‌های تولید برق، مسئله‌ی ذخیره‌سازی در حین توقف کار همچنان یک مشکل خواهد بود.

### ۸-۲-۲ توربین‌های بنا نهاده شده بر اساس نیروی لیفت

هر پره‌ای با پروفیل مفروض که در جریانی یکنواخت مستغرق باشد در معرض نیروی لیفت، با علامت  $L$ ، که مولفه‌ی آن عمود بر جریان ورودی است و در معرض نیروی درگ، با علامت  $D$ ، قرار می‌گیرد که مولفه‌ی آن در امتداد جریان است. تئوری پتانسیل سیال نشان می‌دهد که لیفت پدیده‌ای غیر ویسکوز (لزج) است. از طرف دیگر، درگ مکانیزم اصطکاک میان رشته‌های جریان را وارد می‌سازد که اتلاف (پراکندگی) نامیده می‌شود. این اتلاف به طور برگشت‌ناپذیری انرژی مکانیکی سیال (انرژی فشار + جنبش + ارتفاع) را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. بنابراین، مورد آخر بیانگر تلفات می‌باشد. هر چقدر اتلاف کمتری رخ دهد بازده روتور که انرژی

مکانیکی بازیابی شده از انرژی موجود در سیال را تولید می‌کند، بهتر خواهد شد. در نتیجه، به طور کلی برای توربین‌های به حرکت در آمده با نیروی لیفت نسبت به آن‌هایی که با درگ حرکت می‌کنند بازده بهتری حاصل می‌شود.



شکل ۵-۸ نیروهای لیفت ( $L$ ) و درگ ( $D$ ) واقع بر یک بال - تصویر جریان‌های ایجاد شده توسط لیفت (چپ) و درگ (راست).

شکل ۵-۸ (چپ) جریان باد را در مسیر با برخورد کم نشان می‌دهد. رشته‌های جریان به پروفیل نزدیک باقی می‌مانند و منطقه‌ی افت فشار در بالای آن (قوس بیرونی) و یک منطقه‌ی افت فشار در پایین آن (قوس درونی) ایجاد می‌کنند. این میدان فشار از لیفت ناشی می‌شود که بسیار قوی‌تر از درگ است. شکل ۵-۸ (راست) همان پروفیل را نشان می‌دهد که در مسیر با برخورد زیاد قرار گرفته است. رشته‌های جریان نمی‌توانند پروفیل را دنبال کنند و جدا می‌شوند. در وجه بالادست پروفیل فشار افزایش و در وجه پایین‌دست فشار کاهش پیدا می‌کند. در این مورد، نیروی درگ حاصل شده بسیار بیشتر از لیفت است. جریان به شکل ورتکس که پایین‌دست را توسعه می‌دهد آشفته بوده و به شدت پراکنده می‌باشد. یک تغییر عمودی در نمودار سمت چپ نتایج بهتری نسبت به حرکت به راست در نمودار سمت راست تولید خواهد کرد.

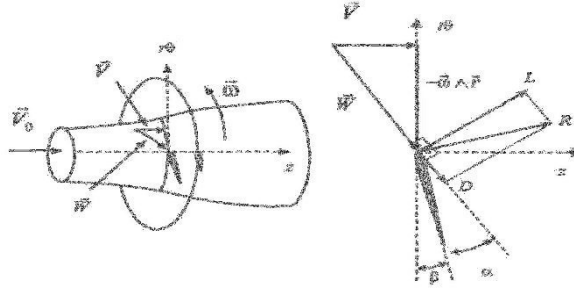
### ۸-۲-۲-۱-۱ توربین‌های جریان محوری

به منظور درک بهتر قاعده‌ای که توربین بر اساس آن کار می‌کند باید پرها به صورت برش خورده در یک جریان لوله‌ای نمایش داده شوند که شامل بردارهای سرعت می‌شود<sup>۱</sup> (شکل ۸-۶). بنابراین، پره سرعت نسبی بالادست  $\vec{W}$  را تجربه می‌کند که به صورت زیر داده می‌شود:

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{\omega} \wedge \vec{r} \quad (8-2)$$

<sup>۱</sup> به منظور ایجاد دقیق‌تر وضعیت دو بعدی، مولفه‌هایی که عمود بر این لوله هستند نادیده گرفته شده‌اند.

در جایی که  $V$  سرعت محوری میانگین در سطح روتور (کمتر از سرعت بالادست) و  $r$  شعاع بردار متصل‌کننده‌ی محور چرخش به نقطه‌ی مورد نظر است.

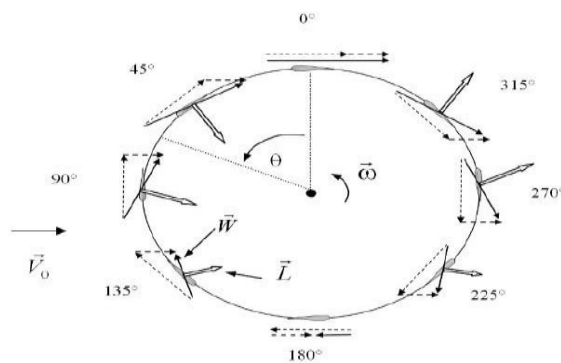


شکل ۶-۸ سطح مقطع پره‌ها به وسیله‌ی جریان لوله (چپ) و مثلث سرعت بر روی سطح مقطع (راست)

می‌توان بردار  $R$  را که از نیروهای وارد بر مقطع پره ناشی می‌شود به لیفت  $L$  و درگ  $D$  تفکیک کرد. زاویه‌ی  $\beta$  درجه‌بندی مقطع پره و  $\alpha$  زاویه‌ی جریان نسبی ورودی  $W$  است. شکل ۶-۸ نشان می‌دهد که گشتاور حاصل بر روی محور چرخش از تصویر لیفت بر روی محور  $\theta$  حاصل می‌شود که با تصویر درگ بر روی همان محور کاهش پیدا می‌کند. طراح روتور شامل جاگذاری مقطع پره در حالتی با بهترین برخورد بوده تا نیروی درگ در مقایسه با نیروی لیفت تا جای ممکن کوچک باشد.

### ۲-۲-۲-۸ توربین‌های جریان متقاطع

شکل ۷-۸ سطح مقطعی از توربین جریان متقاطع را بر روی صفحه‌ی عمود بر محور چرخش نشان می‌دهد. فرض شده است که جریان در آن صفحه محصور است.



شکل ۷-۸ مثلث‌های سرعت و نیرو در حین چرخش پره در توربین جریان متقاطع

بردار افقی خطچین نشان‌دهنده‌ی سرعت محوری موضعی در سطح مقطع پره می‌باشد (کمتر از  $V_0$ ). بردار دیگر خطچین نشان‌دهنده‌ی سرعت مخالف چرخش پروفیل است. جمع این بردارها، پیکان خط پر، سرعت نسبی  $W$  تجربه‌شده توسط پروفیل را نشان می‌دهند. تفاوت میان این مورد با روتور جریان محوری بدین صورت است که پروفیل دارای جریان نسبی است که شدت و جهت آن در حین چرخش متغیر است. بنابراین، جریان در محدوده‌های نسبی ساکن نیست. ضخیم‌ترین بردار نشان‌دهنده‌ی کرنش وارد بر مقطع پره می‌باشد. اگرچه جریان نسبی ساکن نبوده و در حال چرخش می‌باشد، با فرض اینکه این جریان ساکن و یکنواخت است محاسبات ساده‌سازی می‌شوند. در این زمینه، اگر ما همچنین فرض کنیم که درگ وجود ندارد نیروی وارد بر مقطع پره نیروی خطی عمود بر  $W$  خواهد بود. گشتاور وارد بر شفت با تصویر-سازی این نیرو بر  $\theta$  به دست می‌آید. به نظر می‌رسد که در حوالی  $90^\circ$  تا  $135^\circ$  و  $270^\circ$  تا  $315^\circ$  حداکثر و حوالی  $0^\circ$  تا  $180^\circ$  صفر باشد؛ هنگامی که ما نیروی درگ را در نظر بگیریم در واقعیت این دو موقعیت باعث ایجاد گشتاور منفی می‌شوند که نیروی ترمزی به توربین وارد می‌کنند. شکاف میان گشتاور حداکثر و کمینه با افزایش تعداد پره‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین ممکن است این شکاف با چرخاندن پره‌ها به شکل مارپیچ در امتداد محور  $Z$  کاهش پیدا کند. با تغییر علامت برخورد نسبی سیال روی پره میان شبه-دیسک‌های بالادست و پایین‌دست، مولفه شعاعی کرنش وارد بر مقطع پره نیز همین طور می‌شود. در نتیجه، پره در معرض نیروی خمشی قرار می‌گیرد که در شبه‌دیسک بالادست به سمت داخل بوده و در شبه-دیسک پایین‌دست به سمت بیرون می‌باشد. این بار متغیر که در هر چرخش تکرار می‌شود، شامل عامل خستگی چشمگیری می‌باشد.

### ۸-۲-۳ مفاهیم دیگر

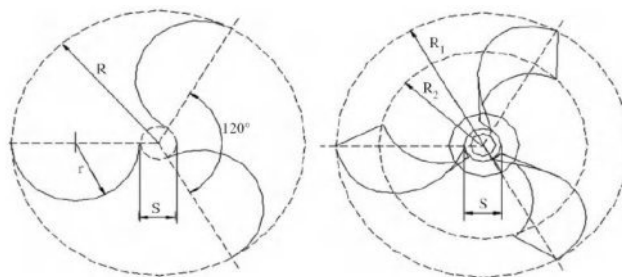
#### ۸-۲-۳-۱ توربین‌های ساونیوس و چرخ پره‌دار<sup>۱</sup>

توربین‌های ساونیوس که به افتخار مخترع آن در ۱۹۲۰ نامگذاری شده‌اند، به گروه توربین‌های جریان متقاطع تعلق دارند. آن‌ها با درگ کار می‌کنند که در تضاد با سیستم‌های دیگر است که با لیفت کار می‌کنند. به طور کلی آن‌ها از دو یا سه اسکوپ<sup>۲</sup> استوانه‌ای یا کروی عمود بر باد ساخته شده‌اند (شکل ۸-۸). گشتاور موتور از نیروی درگ جریان وارد بر هر اسکوپ حاصل می‌شود. اغلب آن‌ها - اگرچه نه لزوماً - عمودی قرار داده می‌شوند. از توربین ساونیوس برای کاربردهایی استفاده می‌شود که حاصل آن‌ها از اهمیت کمی برخوردار است. به عنوان مثال، بیشتر بادسنج‌ها ماشین‌های از نوع ساونیوس هستند، زیرا گشتاور حاصل آن هیچ نقشی ندارد و

<sup>1</sup> Savonius turbines and the paddle wheel

<sup>2</sup> Scope

از اصل آن برای چرخش تابلوهای تبلیغاتی مشخصی استفاده می‌شود. شناخته‌شده‌ترین کاربرد صنعتی آن هواکش فلترنر<sup>۱</sup> (®) می‌باشد که همچنان به صورت گسترده تولید می‌گردد. این وسیله با قرارگیری بر روی سقف خودروها، تهویه و خنک‌سازی آن‌ها را در حین حرکت تضمین می‌کند. در سرعت حدوداً  $90 \text{ km/h}$  این وسیله می‌تواند تقریباً  $3 \text{ m}^3$  از هوا را در هر دقیقه بیرون بکشد.



شکل ۸-۸ تصویر ترسیمی (نمای بالا) از توربین ساونیوس. چپ: توربین با سه پره مستقیم. راست: توربین با سه پره مارپیچ [SAH 06]

توربین ساونیوس به خاطر داشتن گشتاور اولیه زیاد، مقدار توان حداکثر که نسبتاً ضعیف است (به لحاظ مساحت جاروب‌شده) اما به دلیل اندازه، وزن و هزینه‌ی آن برای کاربردهای مشخصی منطقی به نظر می‌رسد، شناخته شده است. این توربین به دلیل داشتن ضریب عملکرد حدوداً ۱۵٪-۱۸٪ برای نسبت سرعت رأس  $\lambda$  نزدیک به یک، نمی‌تواند با توربین‌های دیگر رقابت کند [KHA 09]. با این وجود ممکن است هزینه‌ی کم آن، طراحی آن و تولید نسبتاً ساده‌ی آن باعث شود تا یک گزینه‌ی جالب برای واحدهای تولیدی کوچک با توان تقریباً  $100 \text{ W}$  باشد. نویسندگان [SAF 06] مطالعات دانشگاهی مختلف را به خوبی بررسی کرده‌اند. آن‌ها همچنین نشان می‌دهند که پیچاندن پرها عملکرد را بهبود می‌بخشد که باعث بهتر شدن نتیجه، کارکرد روان‌تر و بهبود شروع ماشین می‌شود. تا به امروز، توربین ساونیوس هیچ کاربردی در زمینه‌ی انرژی دریایی تجدیدپذیر نداشته است.

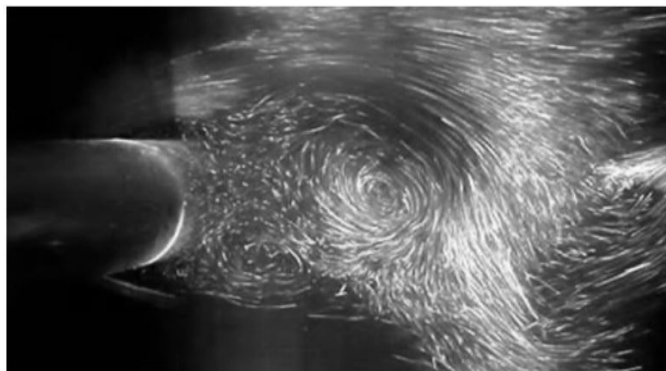
#### ۸-۲-۲-۲ سیستم‌های نوسانی

#### ۸-۲-۳-۲-۱ سیستم‌های VIV

این سیستم‌های دریافت انرژی از جریان‌های جزر و مدی، بر اساس استفاده از دینامیک ورتکس‌های متناوب ایجادشده در پشت استوانه بنا نهاده شده‌اند (شکل ۸-۹). این پدیده که به

<sup>۱</sup> Flettner®

عنوان *VIV* شناخته می‌شود (ارتعاش ناشی از ورتکس) به صورت گسترده در دینامیک سیالات و سازه‌ها مورد پژوهش قرار گرفته است.



شکل ۸-۹ تصویری از شکل‌گیری ورتکس در پشت استوانه توسط لیزر فلورسنت (دانشگاه عکاسی *MRELab* میشیگان)

این پدیده‌ای است که ما به دنبال آن بین بردن آن، به عنوان مثال، در محدوده‌ی مهندسی فراساحلی و معماری هستیم زیرا می‌تواند خطراتی به صورت ناپایداری‌های دینامیکی ایجاد کند. این پدیده نیروی لیفت نوسانی عمود بر سازه تولید می‌کند که به حرکت نوسانی یا ارتعاش (حرکت کوچک) عمود بر جهت جریان منجر می‌گردد. ممکن است در شرایط مشخصی سیستم سیال-سازه ناپایدار شده و به افزایش قابل توجه این حرکت منجر شود.

سیستمی وجود دارد که توسط دانشگاه میشیگان در حوضچه‌ی هیدرودینامیکی توسعه داده شده و آزمایش شده است: سیستم *VIVACE* (انرژی پاک آبی ارتعاشات ناشی از ورتکس)<sup>۱</sup> [BER 08]. اگرچه همچنان استدلال طراحان آن در رابطه با اینکه قابلیت استخراج انرژی از جریان‌های زیر دو گره را دارد اثبات نشده است، در حالی که سیستم‌های متداول توربین در این شرایط کار نمی‌کنند. این محدودیت کم امکان قاعده‌ی مهار انرژی جریان‌های جزر و مدی را فراهم خواهد کرد تا در بخش بزرگتری از جهان گسترش پیدا کنند، یعنی جاهایی که جریان‌ها کمتر از سه گره هستند.

#### ۸-۲-۲-۳-۲ هیدروفویل نوسانی

سیستم‌های نوسانی دیگر از نیروی لیفت ایجادشده توسط بال نوسانی استفاده می‌کنند که برخورد آن با سیستمی مناسب کنترل می‌گردد. هنگامی که جریان جزر و مدی از آن عبور کند

<sup>۱</sup> *Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy*

تحت اثر لیفت، بال به صورت عمود بر جریان حرکت می‌کند. تا درجه‌ی مشخصی از برخورد، زاویه‌ی برخورد به صورت فعال توسط سیستمی مناسب معکوس می‌شود؛ این حرکت به صورت گردشی دوباره تولید می‌شود. حرکت نوسانی بال، پیستون را به حرکت در می‌آورد که از طریق سیستم هیدرولیکی به ژنراتورهای الکتریکی متصل است.



شکل ۸-۱۰ ژنراتور هیدروالکتریک از نوع گلايدر استینگری<sup>۱</sup> [BEN 09-02]

پروژه‌ی استینگری (شکل ۸-۱۰) توسط شرکت محدود کسب و کار مهندسی ایجاد شده و پیشرفت زیادی کرده است. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی یک نمونه در سال ۲۰۰۲، توان میانگین استخراجی را در طول چندین چرخه‌ی حدوداً  $40-50$  kW به ازای جریان ۳-۵ گره با پیک حدوداً  $145$  kW نشان دادند. متأسفانه این پروژه از سال ۲۰۰۵ به حالت تعلیق در آمده است.

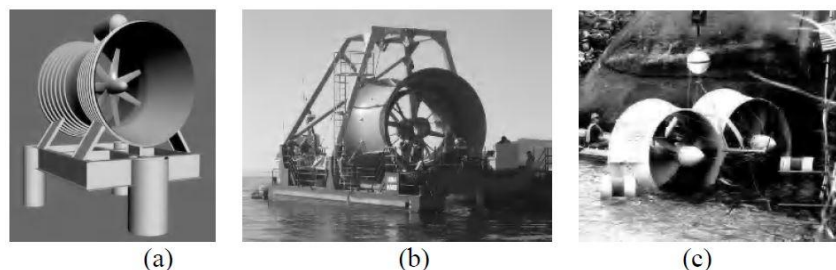
### ۸-۲-۴ داکت‌ها<sup>۲</sup>

داکت‌ها سازه‌های ثابتی هستند که به منظور افزایش توان روتور در اطراف قسمت خارجی آن قرار گرفته‌اند. فشردگی توربین‌های جزر و مدی باعث می‌شود که واردسازی این نوع وسیله آسان شود. در شکل‌های ۸-۱۱ و ۸-۱۲ تعدادی از توربین‌های جزر و مدی داکت‌دار به ترتیب با استفاده از جریان محوری و متقاطع نشان داده شده‌اند.

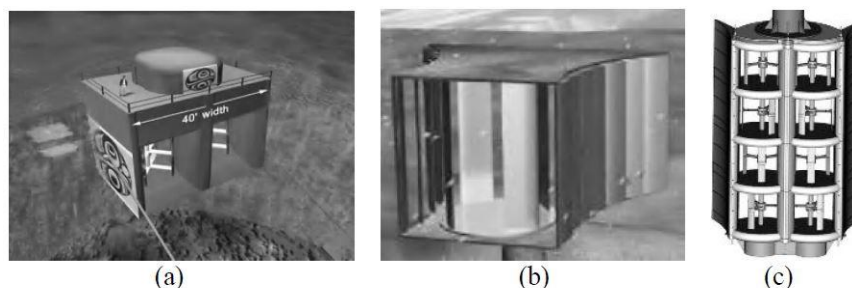
<sup>۱</sup> Stingray

<sup>۲</sup> Ducts





شکل ۸-۱ توربین‌های جریان محوری داکت‌دار: (a) لونار انرژی (UK)، (b) آلستوم/جریان-پاک (فرانسه)، (c) شرکت توان رایگان جریان (USA)



شکل ۸-۱۲ توربین‌های جریان متقاطع داکت‌دار: (a) انرژی آبی (کانادا)، (b) شرکت محدود انرژی جزر و مدی DHVT (استرالیا)، (c) هاروست-اتیک (فرانسه)

این داکت‌ها اثر دودکشی ایجاد می‌کنند که نرخ جریان عبوری از روتور را افزایش می‌دهد. درگ اعمالی از سوی سیال بر داکت به کاهش فشار جریان خروجی منجر می‌شود که در نهایت به پدیده‌ی دمش<sup>۱</sup> منتهی می‌گردد. می‌توان داکت‌ها را به دو دسته گروه‌بندی کرد که با منشأ فیزیکی درگ ناشی از جریان از هم متمایز می‌گردند:

- لوله‌های ونتوری به سبب انفصال کم و بیش اعلام‌شده‌ی جریان پایین‌دست داکت، درگی از نوع ویسکوز<sup>۲</sup> تولید می‌کنند. اکثراً این نوع از قسمت‌های مستقیم ساخته شده است که حدود بخش‌های داکت را با پروفیل ثابت، همگرا یا واگرا مشخص می‌سازد. آن‌ها اغلب متقارن می‌باشند.

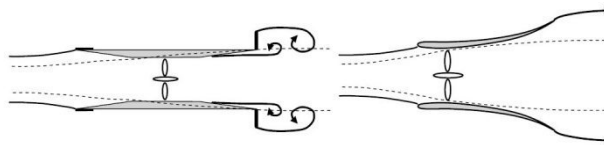
- دیفیوزرها، درگی از نوع اینرسی مرتبط به پدیده‌ی لیفت هیدرودینامیکی تولید می‌کنند. دیفیوزرها از پروفیل‌های بال‌ها ساخته شده‌اند که گاهی اوقات برای افزایش اثر دودکش به

<sup>۱</sup> Aspiration

<sup>۲</sup> این امر باعث اتلاف انرژی از طریق پراکندگی ویسکوز ورتکس‌های پایین‌دست می‌شود.

صورت آبشاری مرتب می‌شوند؛ چون سمت بالادست یا پایین دست گسترده است، آن‌ها همواره نامتقارن هستند.

در شکل ۸-۱۳ تصویری نشان داده شده است که اثر داکت‌های از نوع دیفیوزر - (چپ) و ونتوری - (راست) را توضیح می‌دهد. خط‌چین، جریان عبوری لوله از توربین را در غیاب داکت نشان می‌دهد در حالی که خط پر جریانی است که در واقع توسط توربین دارای داکت بهره‌برداری شده است. هنگامی که داکت‌ها اضافه شوند آن‌ها یک فشار اضافی در قسمت خارجی خود و یک فشار کاهش‌یافته در بخش داخلی خود ایجاد می‌کنند. این اثرات هر دو به افزایش نرخ جریان در توربین کمک می‌کنند. به دلیل اینکه توان با نرخ جریان عبوری از روتور به سرعت افزایش پیدا می‌کند، به افزایش چشمگیر جریان بالادست برای افزایش قابل توجه توان انتقالی نیازی نیست. ضریب توان  $C_p$  که نسبت به سطح  $S$  جاروب‌شده توسط توربین تعریف می‌شود [8.1]، ممکن است از حد نظری ۰.۵۹۳ ارائه‌شده توسط بتز (بخش ۸-۳-۱) فراتر رود. در ۱۹۷۰، پژوهشگران در شرکت هوافضایی گرومن (USA) با استفاده از توربین بادی سه‌پره‌ای مجهز به دیفیوزرهای آبشاری به ضریب توان ۱.۵۷، یعنی، ۲.۶۵ برابر حد بتز دست پیدا کردند.



شکل ۸-۱۳ داکت دیفیوزر (چپ) و داکت ونتوری (راست)

بگذارید ما دوباره به توربین‌های جریان محوری دارای داکت در شکل ۸-۱۱ نگاهی بیندازیم. توربین‌های (a) و (b) به ونتوری مجهز شده‌اند در حالیکه (c) دارای دیفیوزر می‌باشد. در رابطه با توربین‌های جریان متقاطع (شکل ۸-۱۲)، در (a) از ونتوری استفاده می‌شود در حالیکه (b) و (c) به دیفیوزر مجهز شده‌اند. پژوهش‌های مربوط به عملکرد توربین‌های جزر و مدی داکت-دار به لحاظ تعداد کمتر از مطالعات مربوط به توربین‌های بادی می‌باشند. بگذارید ما به طور ویژه به پژوهش انجام‌شده بر روی نمونه‌ی آزمایشی  $DHVT$  (توربین ونتوری دیویدسون هیل) جریان متقاطع،  $2.4 m \times 2.4 m$  اشاره کنیم (شکل ۸-۱۲b) که به  $C_{Pmax} = 0.6$  دست پیدا کرد (یعنی برابر حد بتز) [KIR 05].

### ۸-۲-۵ پتانسیل انرژی و انتخاب سایت

هنگام نصب توربین بسیار مهم است که سایت اجرای کار به دقت انتخاب شود. بنابراین، داشتن دانش مناسب از طبیعت جریان‌های دریایی ضروری می‌باشد. دو نوع جریان اصلی وجود دارد.

جریان‌های کلی که از تفاوت‌های میان دما و میزان شوری توده‌های مجاور آب ناشی می‌شوند. آن‌ها به دو گروه تقسیم می‌شوند: جریان‌های محلی، مرتبط با باد و جریان‌های منظم همچون گلف استریم.

جریان‌های به اصطلاح جزر و مدی (یا جریان‌های دامنه‌ی جزر و مدی) در نزدیکی سواحل یا در مصب رودها یافت می‌شوند. این جریان‌ها از حرکت اجسام سماوی منظومه‌ی شمسی سرچشمه می‌گیرند. آن‌ها از برهمکنش جاذبه‌ی زمین، ماه و خورشید ناشی می‌شوند و مستقیماً به حرکت‌های آب مربوط به جزر و مدها ربط دارند. آن‌ها در فراساحل چرخشی هستند اما با نزدیک شدن آن‌ها به ساحل مطابق جهت غالب به جریان‌های متغیر تبدیل می‌شوند. به طور کلی جریان‌های جزر و مدی به سبب توپوگرافی بستر دریا به ویژه اطراف دماغه‌ها، باریکه‌های میان جزایر و نواحی با بستر بالا آمده شتاب می‌گیرند. بازیگران صنعتی به ویژه به این مورد آخر علاقه‌مند هستند. در حقیقت، انتقال آسان الکتریسیته در این سایت‌های نزدیک به ساحل (کمتر از  $5\ km$ ) به سبب مجاورت با شبکه‌های انتقال انرژی تضمین می‌شود. منابع انرژی مربوط به این جریان‌های اقیانوسی در مقیاس جهانی بسیار زیاد می‌باشند. در حقیقت، پتانسیل جریان‌های اقیانوسی که به لحاظ فنی قابل بهره‌برداری می‌باشد نزدیک به  $100\ GW$  برآورد می‌شود.

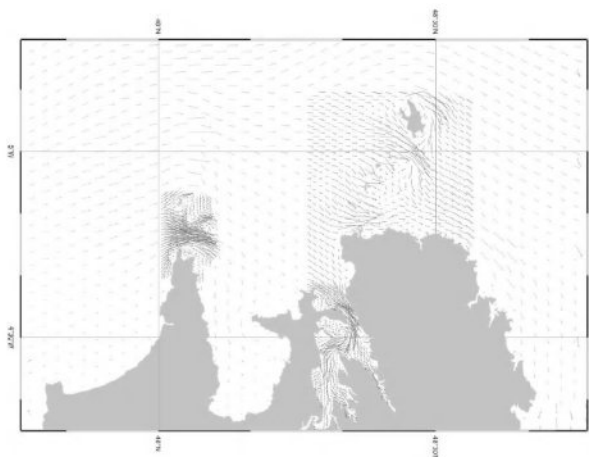
از مزایای انرژی هیدروسینتیکی قابل پیش‌بینی بودن آن می‌باشد و مستقل از تأثیر مرتبه اول تغییرات اقلیمی همچون نفوذ خورشید یا قدرت باد است. بنابراین موسسه‌ی اقیانوس‌شناسی اسکریپز (سن دیگو، USA)، مرکز اقیانوس‌شناسی ملی (سات همپتون، UK) و خدمات هیدروگرافی و اقیانوس‌شناسی دریایی<sup>۱</sup> (SHOM، برست، فرانسه) و سازمان‌های هیدروگرافی ملی جاهای دیگر می‌توانند چندین سال جلوتر در یک مکان مفروض نوسانات و جهت این جریان‌ها را با استفاده از پژوهش‌های مربوط به جزر و مد و عمق‌سنجی سایت پیش‌بینی کنند. داده‌های مربوط به جریان بر حسب موقعیت جغرافیایی و با استفاده از مش (شبکه‌بندی) فضایی ایجاد می‌شوند. در شکل ۸-۱۴ نمونه‌ای از نقشه‌ی جریان‌های دریای آبرویس<sup>۲</sup> به ازای زمان و ضریب جزر و مدی مفروض ارائه شده است.

بنابراین، برای هر مش فضایی محاسبه‌گر و هر ضریبی امکان نمایش بیضی جریان وجود دارد که جهات و دامنه‌های سرعت‌های جریان هر ساعت از جذر و مد واقع بر چرخه‌ی جزر و مدی مرتبط با ضریب مفروض را نشان می‌دهد (شکل ۸-۱۵). از این بیضی برای ارزیابی کیفیت

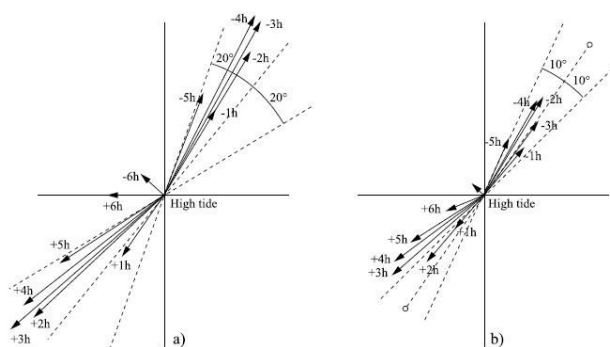
<sup>1</sup> Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

<sup>2</sup> Iroise

منابع به لحاظ جهت و دامنه‌ی جریان استفاده می‌شود. اگر جهت جریان بر محور اصلی منطبق نشود این می‌تواند به این معنا باشد که انواع مشخصی از توربین همچون توربین‌های محور افقی، جهت-ثابت تنها می‌توانند بخشی از پتانسیل منبع را استخراج کنند.



شکل ۸-۱۴ نقشه‌ی نشان‌دهنده‌ی جهت جریان‌ها به مدت یک ساعت از جزر و مد (اطلس آبرویس (SHOM/۵۶۰)



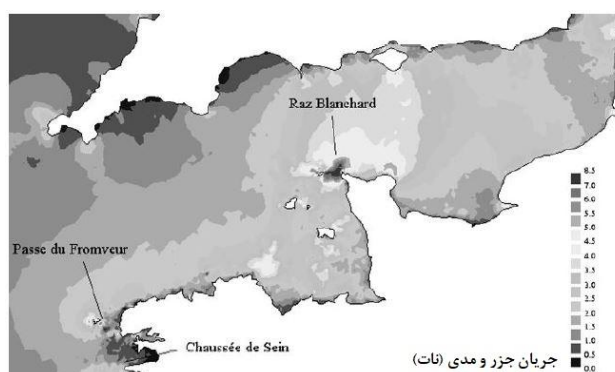
شکل ۸-۱۵ مثالی از بیضی‌های جزر و مدی به ازای ضریب جزر و مد حداقل و ضریب جزر و مد بهاری در مکانی در راز دسین<sup>۱</sup>

برای انرژی‌های جزر و مدی به مناطق مشخصی توجه ویژه‌تری می‌شود زیرا توپوگرافی آن‌ها در زیر آب باعث افزایش سرعت جریان می‌گردد. توان قابل استخراج به مکعب سرعت بستگی دارد

<sup>۱</sup> Raz de Sin

[8.1]، بنابراین انتخاب سایت‌هایی که تا جای ممکن سرعت جریان در آن جا زیاد است مزیت بسیاری دارد. به دلایل فنی و اقتصادی امروزه مقدار حداقل آستانه‌ی قابل استخراج برابر  $1 \text{ m/s}$  قرار داده شده است که تقریباً ۲ گره است [EU 96]. ممکن است این آستانه‌ی حداقل با ظهور فنآوری جدید کاهش پیدا کند. با این وجود به منظور اجتناب از افزایش هزینه‌ها باید مقدار جاری بیشینه را نیز در نظر گرفت، زیرا به توان اسمی سیستم مربوط می‌شود و در نتیجه در استنتاج مشخصات تأسیسات اهمیت زیادی دارد.

انتخاب مکان نصب توربین‌های جزر و مدی نیز مبتنی بر عمق آب است. مکان‌های لیست‌شده به عنوان جریان‌های مساعد قابل بهره‌برداری با اعماق مابین ۳۰ تا ۴۰  $m$  مشخص می‌شوند [EU 96]. ما باید تغییرات سطح و سرعت آب ناشی از خیزآب را نیز در نظر بگیریم که می‌تواند اثر تنظیمی بر سرعت و به طور کلی بر وضعیت دریا داشته باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد که بر حسب طبیعت بیضی جریان و طبیعت بستر دریا و عمق‌سنجی محلی، تا کنون از میان فنآوری‌های مختلف پیشنهاد شده و بررسی شده تعدادی از آن‌ها در برخی مکان‌ها نسبت به جاهای دیگر سازگاری بهتری دارند. در نتیجه می‌توان گفت که جستجو برای ترکیب بهینه‌ی سایت و نوع فنآوری از تحلیل چندین معیار و چندین هدف ناشی می‌گردد.



شکل ۸-۱۶ مکان‌هایی با پتانسیل زیاد در سرزمین فرانسه (برای مشاهده‌ی تصویر رنگی این شکل لطفاً به [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه کنید)

بنابراین ما قادر به تشخیص سه مکان مناسب در سرزمین فرانسه بوده‌ایم (شکل ۸-۱۶) [BEN 09a]: راز بلانچارد، که در آن ممکن است سرعت به ۱۲ گره برسد ( $6.2 \text{ m/sec}$ )؛ پاس دو فرامور نزدیک یوشانت با جریان‌های حدوداً ۹ گره ( $4.1 \text{ m/sec}$ )؛ و راز دسین<sup>۱</sup>، مکان جریان

<sup>۱</sup> Raz de Sein

شمال-جنوب که ممکن است تا ۸ گره برسد ( $m/sec$  ۳.۱). همچنین باید متذکر شویم که سایت‌های بسیاری در امتداد ساحل بریتانی جریان‌های مابین ۰.۵ تا ثانیه  $m/3$  دارند.

فرانسه به لحاظ پتانسیل با داشتن منبع هیدروسینتیک تقریباً  $6GW$  که در میان راز بلانچارد ( $3GW$ )، پاس دوفرامور ( $2GW$ ) و راز دسین ( $1GW$ ) توزیع شده است پس از انگلستان ( $10GW$ ) دومین کشور مساعد است.

مصرف برق سالانه‌ی فرانسه تقریباً  $450TWh$  است. با فرض قابلیت تولید سالانه معادل با مقدار پیک  $6GW$  در طول ۲۰۰۰ ساعت ما به تقریباً  $12TWh$  می‌رسیم. بنابراین، به طور نظری فناوری توربین جزر و مدی می‌تواند ۲-۳٪ از تقاضای سالانه‌ی فرانسه را فراهم کند. توجه کنید که این ارقام تنها نظری هستند (پتانسیل فنی) و در آن‌ها استحصال بهینه از تمامی سایت‌های بالقوه فرض می‌شود. همچنین باید توجه شود که به سبب انتشار جزر و مد، اگر این سه سایت با هم به بهره‌برداری برسند می‌توانند در طول چرخه‌ی جزر و مدی تولید کلی نسبتاً بدون اختلالی را فراهم کنند [BEN 08].

## ۸-۳ مدل‌سازی و کنترل توربین‌های جزر و مدی

### ۸-۳-۱ مدل‌سازی

#### ۸-۳-۱-۱ مدل‌های اولیه‌ی منابع

جریان‌های اقیانوسی قابل استحصال عمدتاً توسط جزر و مد و تا حدود کمی توسط پدیده‌های مربوط به تفاوت چگالی یا دما میان توده‌های آب ایجاد می‌شوند. جزر و مد مقادیر عظیمی از آب را بر حسب مکان با دوره‌ی حدوداً نصف روز (دو بار در روز با چرخه‌ی ۱۲ ساعت و ۲۴ دقیقه‌ای) یا یک روز (چرخه‌ی روزانه به مدت ۲۴ ساعت و ۴۸ دقیقه) به سمت دریا (جزر) یا به سمت ساحل (مد) حرکت می‌دهد. در اکثر مکان‌ها این پدیده ترکیبی از این دو چرخه‌ی عمده است. دامنه‌ی جزر و مدها و جریان‌هایی که آن‌ها تولید می‌کنند به موقعیت ماه و خورشید نسبت به زمین بستگی دارد. اثر ماه به لحاظ نیروی جاذبه تقریباً ۶۸٪ است و در مقابل برای خورشید ۳۲٪ می‌باشد. در مکان‌هایی که چرخه‌ی دو بار در روز غالب است دامنه‌های حداکثری جریان‌ها به ماه نو و ماه کامل مربوط می‌شوند (در طول جزر و مدهای به اصطلاح "بهاری"، خورشید، ماه و زمین عملاً در یک راستا قرار می‌گیرند و اثرات آن‌ها با هم ترکیب می‌شود). کمترین دامنه‌ها در ربع اول و سوم اتفاق می‌افتند (در طول جزر و مدهای به اصطلاح "حداقل"، هنگامی که خورشید و ماه تا حدودی اثرات همدیگر را خنثی می‌کنند). در مکان‌هایی که چرخه‌ی غالب از نوع روزانه است دامنه‌ی جزر و مدها به میزان انحراف ماه

بستگی دارد (ارتفاع آن نسبت به خط استوا). بنابراین، قدرتمندترین جزر و مدها به میزان انحراف زیاد مربوط می‌شوند و ضعیف‌ترین آنها نیز به انحراف صفر مربوط می‌شوند. این تغییرات دامنه به دوره‌های ۲ هفته‌ای، یک ساله یا بیشتر مربوط می‌شوند. این دامنه‌ها از چند ماه، یا چند سال جلوتر کاملاً قابل پیش‌بینی می‌باشند [HAM 93].

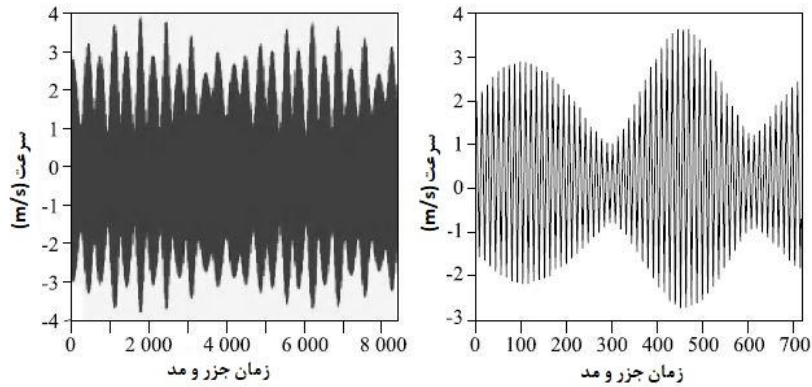
به طور کلی طبیعت منابع از پایگاه داده‌های اقیانوس‌شناسی توسط مش جغرافیایی با کیفیت مفروض استنتاج می‌شود. این امکان وجود دارد که برای هر مش فضایی داده‌های عمده‌ی مقابل را داشته باشیم: سرعت به عنوان تابعی از زمان برای جزر و مدهای بهاری، عمق، طول موج صد ساله و میانگین و فاصله از ساحل. دو مقدار اول می‌توانند به راحتی دوباره سرعت محتمل جریان را مطابق تاریخ و زمان بسازند. داده‌های دیگر اطلاعات ارزشمندی در رابطه با محدودیت‌های مرتبط با عملیات سایت و طبیعت آشفستگی‌های محتمل فراهم می‌کنند [BRY 04].

بنابراین، می‌توان با استفاده از فرمول زیر، داده‌های مرتبه اول (بدون در نظرگیری آشفستگی‌های مربوط به وضعیت دریا)، سرعت و جهت جریان‌های جزر و مدی را در یک نقطه و در یک ساعت جزر و مدی پیش‌بینی کرد [BEN 07]:

$$\vec{V}(tt, C) = \vec{V}_{me}(tt) \frac{(C - 45)(\vec{V}_{ve}(tt) - \vec{V}_{me}(tt))}{95 - 45} \quad (3-8)$$

در جایی که  $C$  ضریب جزر و مدی،  $tt$  زمان جزر و مدی، در لحظه‌ی محاسبات،  $\vec{V}_{ve}$  و  $\vec{V}_{me}$  سرعت‌های نسبی جزر و مدهای حداقلی و جزر و مدهای بهاری به ازای ضرایب ۴۵ و ۹۵ در این نقطه می‌باشند.

به منظور تشریح چگونگی استفاده از این نوع داده‌ها، تحول دامنه‌ی جریان‌های جزر و مدی در راز دسین با استفاده از این روش برای سال ۲۰۰۷ و مارس ۲۰۰۷ محاسبه شدند؛ نتایج در شکل ۸-۱۷ نشان داده شده‌اند.



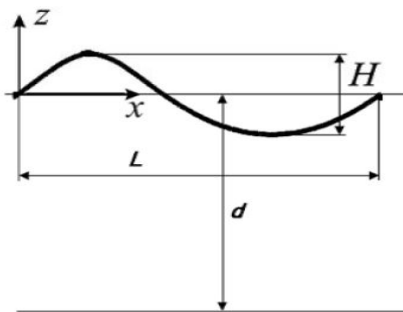
شکل ۸-۱۷ سرعت مدلسازی شده‌ی جریان در راز دسین در طول سال ۲۰۰۷ و ماه مارس ۲۰۰۷

به منظور اصلاح تکنیک مدلسازی منابع این امکان وجود دارد که، به عنوان مثال، اثر خیزآب را تخمین زد. این امر آشفتگی در نظر گرفته شده که عمیق‌ترین اثر را بر سرعت جزر و مدها دارد. مدل ساده‌ی مرتبه اول استوکس<sup>۱</sup> به ما این امکان را می‌دهد تا در آن مکان اثر خیزآب-های طولانی را بر سرعت سیال تقریب بزنیم. می‌توان به ازای دامنه‌ی تکفام، خیزآب تک‌جهته  $H$  با دوره تناوب  $T$ ، طول موج  $L$  و عمق  $d$  (شکل ۸-۱۸) در مکان تأسیسات توربین جزر و مدی مقدار سرعت پتانسیل  $\Phi$  را به عنوان تابعی از عمق  $z$  و از آنجا سرعت را با مشتق‌گیری فضایی از پتانسیل استنتاج کرد [BEN 10a].

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \text{grad } \phi \\ \phi = -\frac{HL}{2T} \frac{ch 2\Pi\left(\frac{z+d}{L}\right)}{sh\Pi\left(\frac{d}{L}\right)} \sin 2\Pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L}\right) \quad (۸-۴) \end{array} \right.$$

<sup>۱</sup> Stockes model





شکل ۸-۱۸ پارامترهای مدل استوکس

با توجه به این که این مدل مبتنی بر موج با سطح سینوسی و بدون آشفتگی در محیطی به لحاظ نظری یکنواخت و بدون اغتشاش است، نسبتاً دقیق نبوده، به عنوان مثال، برهمکنش‌های کوپل‌شده‌ی خیزآب و جریان را در نظر نمی‌گیرد.



### ۸-۳-۱-۲ روش ID-نظریه‌ی بتز

نظریه‌ی بتز اساس مدل‌های استفاده‌شده در طراحی روتورهای جریان محوری یا جریان متقاطع را شکل می‌دهد. در اینجا ما شناخته شده‌ترین مثال، به نام نظریه‌ی بتز را ارائه می‌دهیم که مطابق آن روتور به عنوان دیسک عامل<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شود که باعث گسستگی در فشار می‌شود. جریان مورد بحث یک بعدی (جریان یک لوله) و ساکن است؛ تنها تلفات انرژی جریان در روتور اتفاق می‌افتد. توجه کنید که در نظریه‌ی بتز مادامی که بتوان جهش فشار را به آن ربط داد، نه شکل سیستم مستغرق در این جریان و نه طبیعت آن، توربین یا شبکه‌ی ساده در نظر گرفته می‌شود.

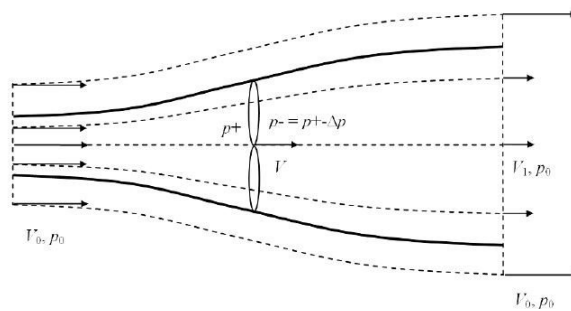
در شکل ۸-۱۹ خطوط جریان مربوط به مدل را ارائه می‌شود. به منظور ساده‌سازی، روتور در تصویر یک توربین جریان محوری است اما ممکن است توربین جریان متقاطع باشد که به شکل کلاف، مستطیلی و غیره است.

$V_0$ ،  $V$  و  $V_1$  به ترتیب سرعت‌های بالادست، توربین و پایین‌دست می‌باشند. توجه کنید که در آن سوی گرداب، در پایین‌دست، جریان دوباره به سرعت بالادست  $V_0$  می‌رسد. بنابراین، سرعت جریان لوله در ناحیه‌ی پایین‌دست دچار ناپیوستگی می‌شود. فشار در بالادست، در

<sup>۱</sup> Disc of action

جلوی روتور و عقب آن به ترتیب  $p_0$ ،  $P^+$  و  $P^-$  می‌باشند. جهش فشار از  $P^+$  به  $P^-$  با  $\Delta P$  نشان داده می‌شود. توجه کنید که در پایین‌دست، فشار گرداب به مقدار فشار خارجی،  $p_0$  باز می‌گردد زیرا خطوط جریان انحنای خود را از دست می‌دهند. در نهایت، با استفاده از فشار اصلاح‌شده  $P^* = P + \Delta gz$  می‌توان وزن سیال را به عبارت فشار اضافه کرد.

به منظور ساده‌سازی استفاده از آن در نوشتار،  $P^*$  با  $P$  نشان داده می‌شود. در نتیجه، این نظریه در مورد محور چرخشی در جهت دلخواه اعمال می‌شود.



شکل ۸-۱۹ نمودار ID جریان در مورد توربین جریان محوری

اعمال معادله‌ی برنولی در بالادست و پایین‌دست به ما می‌دهد:

$$(۸-۵) \Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2)$$

نیروی درگ  $F$  جریان روی روتور به صورت زیر می‌باشد:

$$(۸-۶) F = S \Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2)$$

در جایی که  $S$  سطح جاروب‌شده توسط روتور است (سطح دیسک عامل).

عبارت دوم  $F$  با استفاده از مقدار قضیه‌ی حرکت به دست می‌آید. در این نظریه برای یک محیط بسته تصریح می‌شود که دبی مقدار حرکت سیال خروجی-ورودی برابر کرنش‌های خارجی اعمالی به آن محیط است. در مورد محیطی که با بخش‌های بالادست و پایین‌دست و با جریان لوله محدود شده است ما به دست می‌آوریم:

$$(۸-۷) Q(\rho V_1) - Q(\rho V_0) = -F$$

که در آن  $Q$  دبی عبوری از لوله است. عبارت  $F$  اتلاف در مقدار حرکت محوری سیال است. توجه کنید که نیروهای فشاری حول کانتورهای محیط که باید در سمت راست معادله ظاهر شوند حذف شده‌اند. نشان داده می‌شود که اثر آن‌ها صفر است.

با استفاده از  $Q = SV$  ما به دست می‌آوریم:

$$(\lambda-1)V = \frac{1}{2}(V_0 + V_1)$$

سرعت دیسک روتور میانگین سرعت‌های بالادست و پایین‌دست است. به طور متداول، ضریب القایی  $a$  وارد می‌شود که یک پارامتر متغیر بوده و کندشدن سیال توسط توربین را نشان می‌دهد.

$$(\lambda-9) \begin{cases} V = (1-a)V_0 \\ V_1 = (1-2a)V_0 \end{cases}$$

با معرفی ضریب درگ  $C_F$  ما به دست می‌آوریم:

$$(\lambda-10) C_F = \frac{F}{0.5\rho SV_0^3} = 4a(1-a)$$

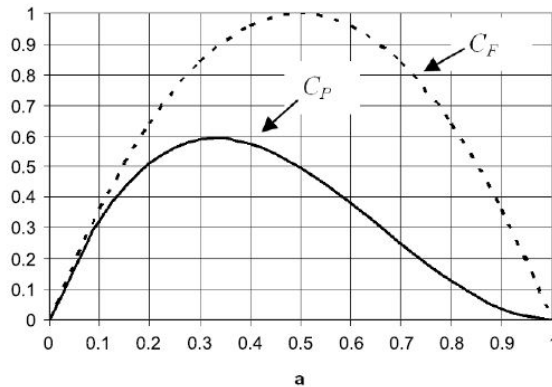
ما می‌توانیم با به دست آمدن توان  $P$  از طریق ضرب  $FV$ ، برای ضریب توان  $C_P$  از روشی مشابه استفاده کنیم:

$$(\lambda-11) C_P = \frac{FV}{0.5\rho SV_0^3} = 4a(1-a)^2$$

که در آن  $C_P$  نیز به عنوان بازده توربین شناخته می‌شود. این عبارت معیاری از توان مکانیکی  $P$  جذب‌شده توسط توربین است که بسیار مشابه توان جنبشی اعمالی جریان عبوری از بخش  $S$  بدون حضور روتور است. در شکل ۸-۲۰ تغییر  $C_F$  و  $C_P$  به عنوان تابعی از ضریب القایی  $a$  نشان داده می‌شود.

ضریب توان بیشینه به ازای  $a = 1/3$  به دست می‌آید و برابر  $16/27 \approx 0.59$  است. یک روتور تنها با عمل پره‌ها ایده‌آل می‌شود و در نتیجه به هیچ وسیله‌ای برای افزایش نرخ جریان عبوری (مانند داکت‌ها) مجهز نمی‌شود و می‌تواند ۶۰٪ از انرژی جنبشی جریان بالادست را بازیابی کند. این مقدار، حد بتز است. ضریب درگ مربوط به آن  $8/9 \approx 0.89$  است. به ازای  $a = 0.5$  ضریب درگ به مقدار بیشینه‌ی ۱ می‌رسد. در آن سوی  $a = 1/3$  درگ کاهش

پیدا می‌کند. در واقعیت، این پاسخ به لحاظ فیزیکی منطقی نمی‌باشد، زیرا سرعت  $V_1$  در گرداب منفی است. در عمل، هنگامی که  $a$  بیشتر از ۰.۴ باشد این نظریه بی‌اعتبار است.



شکل ۸-۲۰ ضرایب توان و درگ به عنوان تابعی از  $a$

### ۸-۳-۱-۳ مدل‌سازی کلکتور هیدرودینامیکی محور افقی

#### ۸-۳-۱-۳-۱ ایجاد معادله

در این نظریه‌ی ابتدایی، گلارت<sup>۱</sup> از فاکتورهای القای محوری و آزیموتی<sup>۲</sup> به ترتیب با علامت-های  $a$  و  $a'$  به عنوان مجهول استفاده می‌کند [GLA 35]. نظریه‌ی گلارت در معادله‌ی زیر با استفاده از متغیرهای  $h$  و  $k$  توصیف می‌شود که به صورت زیر می‌باشند [LEG 08]:

$$\begin{cases} k = 1 - 2a \\ h = 1 + 2a' \end{cases} \quad (\lambda-12)$$

جریان در سطح پره در لوله  $dr$  در شکل ۸-۲۱ نشان داده شده است. عبارت  $\beta$  علامت زاویه‌ی درجه‌بندی پروفیل با جهت  $\theta$  است،  $\alpha$  زاویه‌ی سرعت نسبی با خط کورد پروفیل (برخورد) است و  $\Phi$  زاویه‌ی سرعت نسبی با زاویه‌ی  $\theta$  است. بنابراین، ما به روابط زیر می‌رسیم:

$$(\lambda-13) \begin{cases} \phi = \alpha + \beta \\ \operatorname{tg} \phi = \frac{(1+k)}{\lambda(1+h)} \end{cases}$$

بار  $dR$  اعمالی به پره به مولفه‌ی لیفت  $dL$  و درگ  $dD$  به صورت زیر تفکیک می‌شود:

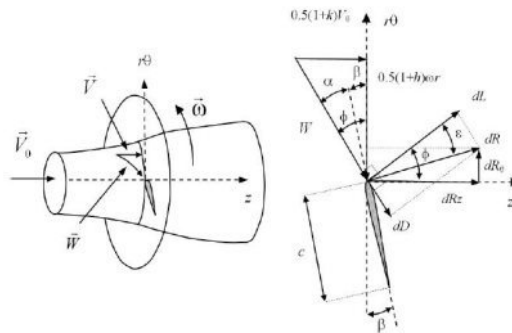
<sup>1</sup> Glauert

<sup>2</sup> Azimutal

$$\begin{cases} dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L dr \\ dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D dr \end{cases} \quad (\lambda-14)$$

در جایی که  $C_L$  و  $C_D$  ضرایب آماری لیفت و درگ پروفیل پره می‌باشند و  $c$  خط کورد با شعاع  $r$  است. تعداد پره‌ها با  $N$  نشان داده شده است. نیروی درگ  $dF$  و گشتاور  $dC$  المان  $dr$  روتور به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{cases} dF = \frac{N \rho W^2 c C_L dr \cos(\phi - \varepsilon)}{2 \cos \varepsilon} \\ dC = \frac{N r \rho W^2 c C_L dr \cos(\phi - \varepsilon)}{2 \cos \varepsilon} \end{cases} \quad (\lambda-15)$$



شکل ۸-۲۱ جریان در سطح پره در مجرای جریان  $dr$

ما می‌توانیم با اعمال مقدار قضیه‌ی حرکت در مجرای جریان  $dr$ ، عبارت دومی برای نیروی درگ  $dF$  و گشتاور  $dC$  را تعیین کنیم:

(۸-۱۶)

$$\begin{cases} dF = 2\pi\rho r dr V (V_0 - V_1) = \frac{4\pi\rho r dr W^2 \sin^2 \phi (1-k)}{(1+k)} \\ dC = 2\pi\rho r^3 dr V \omega(h-1) = \frac{4\pi\rho r^3 dr W^2 \sin \phi \cos \phi (h-1)}{(h+1)} \end{cases}$$

بنابراین ما برای درگ و گشتاور المان  $dr$  روتور دو عبارت داریم: اولین عبارت از ضرایب هیدرودینامیک بخش کلی پره حاصل می‌شود و عبارت دوم از مقدار قضیه‌ی حرکت ناشی می‌گردد. ما با مشخص‌سازی درگ و گشتاور به دست آمده با هر روش به عبارات زیر می‌رسیم:

$$\begin{cases} dC_L = \frac{\cos \phi \tan \phi^2 (1-k)}{1 + \tan \phi \tan \varepsilon (1+k)} \\ dC_L = \frac{4 \cos \phi \tan \phi (h-1)}{\tan \phi - \tan \varepsilon (h+1)} \end{cases} \quad (8-17)$$

که معادله اول جهت معرفی ضریب درگ و معادله دوم معرف کوپل خواهد بود.

$$\sigma = \frac{NC}{2\pi r} \quad \text{و } \sigma \text{ استحکام در شعاع } r \text{ است که با عبارت مقابل تعریف می‌گردد:}$$

روابط [8.17] اساس محاسبات ابعاد روتور را شکل می‌دهند. این کار در دو مرحله انجام می‌شود:

- مرحله‌ی تعریف هندسه‌ی روتور بهینه: ما المان توان  $dP$  فراهم‌شده توسط بخش  $dr$  روتور را محاسبه می‌کنیم:

$$dP = \frac{\pi \rho r dr V_0^3}{dP_{ref}} \frac{\lambda^2 (1+k)(h-1)}{C_p} \quad (8-18)$$

المان  $dP$  حاصل ضرب توان مرجع که تنها به سرعت بالادست بستگی دارد و ضریب توان محلی با شعاع  $r$ ،  $C_p$  است. ما روتوری را ایده‌آل در نظر می‌گیریم که پره‌های آن هیچ درگی نداشته باشند ( $\varepsilon = 0$ ). بنابراین  $h$  و  $k$  به هم مرتبط می‌باشند و ضریب  $C$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$C_p = \lambda^2 (1+k) \left[ \sqrt{1 + \frac{1+k^2}{\lambda^2}} - 1 \right] \quad (8-19)$$

با استنتاج  $C_p$  نسبت به  $k$  ما به ازای هر مقدار  $\lambda$  به مقادیر بهینه‌ی  $k$  و  $h$  برای روتور ایده‌آل می‌رسیم. ما برای زاویه‌ی درجه‌بندی  $\beta$  بخش‌های پره چنین عمل می‌کنیم: زاویه‌ی  $\Phi$  توسط [8.13] به دست می‌آید. زاویه‌ی برخورد به مقداری مربوط می‌شود که بهترین رابطه‌ی  $C_L / C_D$ ، یعنی، نازک‌ترین پرها را به دست دهد. این زاویه تنها به مشخصات

هیدرودینامیکی پروفیل کلی پره بستگی دارد. بنابراین زاویه‌ی درجه‌بندی  $\beta$  از رابطه‌ی [8.13] به دست می‌آید.

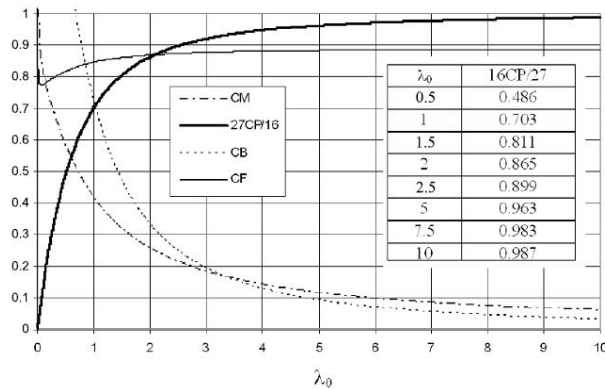
- مرحله‌ی محاسبه‌ی عملکرد توربین واقعی ( $\varepsilon \neq 0$ ): ضرایب درگ  $C_F$ ، ممان  $C_M$  و توان  $C_P$  و همچنین ضریب  $C_B$ ، که بخشی از سطح پره بر روی دیسک را شامل می‌شود، با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_F = \frac{2F}{\rho S V_0^2} = \frac{2}{\lambda_0^2} \int_{\lambda_{0min}}^{\lambda_0} (1-k^2) \lambda d\lambda \\ C_M = \frac{2C}{\rho S R V_0^2} = \frac{2}{\lambda_0^3} \int_{\lambda_{0min}}^{\lambda_0} (1+k)(h-l) \lambda^3 d\lambda \\ C_P = \frac{2P}{\rho S V_0^3} = \frac{2}{\lambda_0^2} \int_{\lambda_{0min}}^{\lambda_0} (1+k)(h-l) \lambda^3 d\lambda \\ C_B = \frac{B}{\pi R^2} = \frac{2}{\lambda_0^2} \int_{\lambda_{0min}}^{\lambda_0} \sigma \lambda d\lambda \end{array} \right. \quad (\lambda-20)$$

در جایی که  $B$  سطح پره‌ها، با  $\lambda_{0min} = \omega r_{min} / V_0$  و  $\lambda_{0min} = \omega R / V_0$  نسبت سرعت رأس در شعاع‌های حداقل  $r_{min}$  و حداکثر  $R$  روتور است (در  $\lambda_{0min} = 0$  اثر هاب در نظر گرفته می‌شود). توجه کنید که ما هر نسبت سرعت رأس را در نظر می‌گیریم تا به عملکردهای خارج از محدوده‌ی بهینه نیز دست پیدا کنیم. به دلیل اینکه هندسه‌ی پره‌ها ثابت است، برخورد  $\alpha$  با [8.13] به دست می‌آید. بنابراین  $C_L$  معلوم است و  $h$  و  $k$  با استفاده از [8.17] به صورت تکرار به دست می‌آیند.

در شکل ۸-۲۲ نتایج به دست آمده برای روتور ایده‌آل نشان داده شده‌اند. مقدار  $27C_P / 16$  به منظور نرمال‌سازی  $C_P$  نسبت به حد بتز، برابر  $16/27$  ارائه شده است. اثر هاب نادیده گرفته شده است ( $\lambda_{0min} = 0$ ). ما مشاهده می‌کنیم که در توربین‌های جریان محوری با نسبت سرعت رأس کم  $\lambda_0$  تلفات کمی در توان وجود دارد. این امر از این حقیقت ناشی می‌شود که گشتاور توربین قوی است (شامل چرخش زیادی در گرداب می‌شود). در این مورد، ممکن است جالب باشد که روتور دومی با چرخش معکوس به روتور اول متصل کنیم تا ممان جنبشی پایین‌دست را بازیابی کنیم. هنگامی که نسبت سرعت رأس افزایش پیدا کند سطح پره به سرعت کاهش پیدا می‌کند. بنابراین طرح روتور ایده‌آل شامل افزایش  $\lambda_0$  می‌شود تا بازده

هیدرودینامیک و در نتیجه توان را افزایش داد، در حالی که در همان زمان سطح پره کاهش پیدا می‌کند. این محدودیت از عملکرد مکانیکی پره‌ها ناشی می‌شود. در حقیقت، به دلیل اینکه درگ  $C_F$  به سختی با  $\lambda_0$  تغییر می‌کند، افزایش  $\lambda_0$  باعث می‌شود تا کرنش مشابهی به پره‌های نازک‌تر اعمال گردد.



شکل ۸-۲۲  $C_B$  و  $27C_P/16, C_M, C_F$

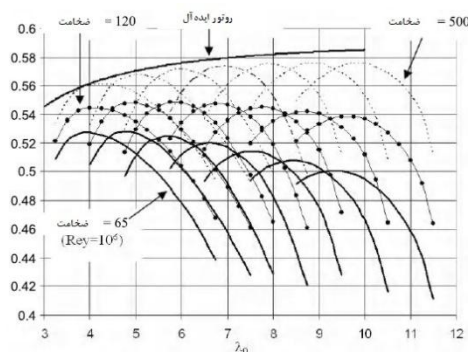
در شکل ۸-۲۳ ضرایب توان روتورهای واقعی نشان داده شده‌اند که پروفیل کلی پره‌ی آن‌ها  $NACA0018$  می‌باشد. اثر روتور در شعاع ۱۰٪ از شعاع حداکثری است. روتورهای مورد بحث در بازه‌ی ۴ تا  $10 \text{ in}$  با گام ۱ دارای نسبت سرعت رأس بهینه می‌باشند. منحنی‌های پره به نازکی حداکثر ۶۵ مربوط می‌شوند که با پروفیل  $NACA0018$  در رینولدز  $10^6$  بیان می‌شوند. منحنی‌های با خطوط نازک و خط‌چین به ترتیب به ضخامت ۱۲۰ و ۵۰۰ مربوط می‌شوند.<sup>۱</sup> توجه کنید که عدد ۱۲۰ حد بالای به دست آمده در پروفیل‌های به اصطلاح آرام (لمینار) است که سطح آن‌ها کاملاً صیقلی است.

به ازای ضخامت ۵۰۰ عملاً  $C_P$  با روتور ایده‌آل یکسان است؛ با این حال توجه کنید که این فاصله به دلیل اصطکاک با نسبت‌های سرعت رأس افزایش پیدا می‌کند. هر چقدر پره‌ها نازک‌تر باشند فاصله از  $C_P$  ایده‌آل بیشتر می‌شود. در ضخامت ۱۲۰،  $C_P$  بیشینه نسبتاً پایدار است. در این مورد، تلفات ناشی از اصطکاک با کاهش چرخش جریان پس از عبور از توربین جبران می‌گردند. در عمل، ضخامت به حدوداً ۶۵ نزدیک است. در این مورد، افزایش  $\lambda_0$  به تلفات توان منجر می‌شود. ما در مورد روتور ایده‌آل به دنبال سبک‌تر کردن پره‌ها و افزایش  $\lambda_0$  هستیم. این محدودیت از مقاومت پره‌ها و همچنین تلفات توان القایی ناشی می‌شود. در توربین‌های جزر و

<sup>۱</sup> منحنی‌های  $CDNACA0018$  برای این سطح از ضخامت شبیه‌سازی شده‌اند.



مدی محدودیت  $\lambda_0$  ناشی از مقاومت پره‌ها بیشتر از توربین‌های بادی خواهد بود، زیرا بارها در آب بیشتر از هوا هستند. بنابراین، روتور با نسبت‌های سرعت رأس کمتری خواهد چرخید و استحکام آن (تعداد پره‌ها) بیشتر خواهد بود.

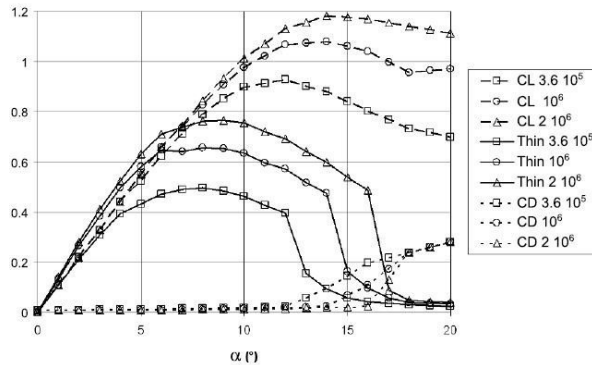


شکل ۸-۲۳ ضریب  $C_p$  روتورها با نسبت‌های مختلف سرعت رأس بهینه

#### ۸-۳-۱-۳-۲ تعیین برخورد (ورود) بهینه

هنگامی که رابطه‌ی  $C_L/C_D$ ، یعنی ضخامت بخش پره بیشینه باشد، بازده روتور حداکثر خواهد بود. در شکل ۸-۲۴،  $C_L$ ،  $C_D$  و ضخامت تقسیم‌شده بر ۱۰۰ پروفیل متقارن  $NACA0018$  به کار رفته در محاسبات قبلی، نشان داده شده‌اند. به سه عدد رینولدز توجه می‌شود:  $Rey=3.6 \cdot 10^6, 10^6, 2 \cdot 10^6$ .

به بهبود جزئی ضخامت با افزایش عدد رینولدز توجه کنید. مقادیر حداکثری ضخامت به ازای  $\alpha_{opt} = 8^\circ$  به دست می‌آیند و به ترتیب به ازای  $Rey=3.6 \cdot 10^6, 10^6, 2 \cdot 10^6$  برابر ۶۵، ۷۶ و ۷۶ هستند. اگر این پروفیل برای روتور استفاده شود به خاطر عملکرد بهینه باید بخش‌ها دارای برخورد  $\alpha_{opt}$  باشند. در حقیقت، این انتخاب به خط کورد با اندازه‌ی بیش از حد در هاب منجر می‌شود. در عمل باید  $\alpha$  در محل پروانه افزایش پیدا کند که لیفت را افزایش می‌دهد و در نتیجه خط کورد را کاهش می‌دهد. قوانین استفاده‌شده تنها اثر کوچکی در ضریب توان روتور دارند.

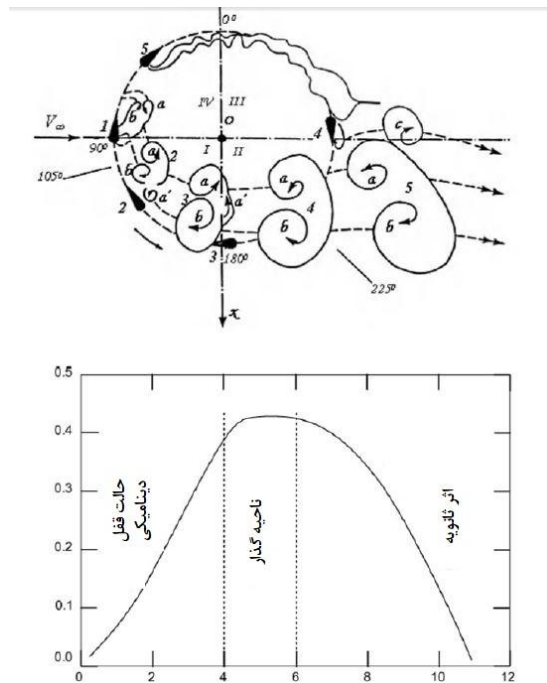


شکل ۸-۲۴ ضرایب هیدرودینامیکی  $NACA0018$  در  $Rey=3.6 \cdot 10^5, 10^6, 2 \cdot 10^6$

به طور کلی از پروفیل‌های قوس‌دار استفاده می‌شود زیرا آن‌ها نسبت به پروفیل‌های متقارن درجه‌ای بهتر از ضخامت را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، می‌توان به پروفیل  $NANA63-415$  اشاره کرد که به ازای عدد رینولدز  $3 \times 10^6$  در  $4^\circ$  ضخامت آن  $120$  است [ABB 59]. ضخامت به شدت به وضعیت سطح پروفیل حساس است. هنگامی که پروفیل کاملاً صیقلی باشد بخشی از لایه‌ی مرزی با برخورد کم لمینار باقی می‌ماند (ما از پروفیل لمینار صحبت می‌کنیم) که دسترسی به ضخامت عالی  $120$  را آسان می‌کند. به ازای زبری استاندارد، لایه‌ی مرزی آشفته می‌شود و ضخامت به  $67$  افت می‌کند. دوباره این مورد مشابه مقدار ضخامت پروفیل  $NACA0018$  (به ازای  $Rey=10^6$ ) است که در بالا بحث شد و پروفیل لمینار نیست.

#### ۸-۳-۴-۱ مدل‌سازی کلکتور هیدرودینامیکی جریان متقاطع

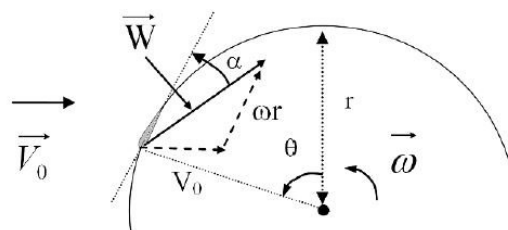
جریان در توربین‌های جریان متقاطع بسیار پیچیده‌تر از توربین‌های جریان محوری است. شکل ۸-۲۵ (چپ) نموداری از ساختارهای ورتکس را نشان می‌دهد که در طول آزمایشات روتور جریان محوری مشاهده شده‌اند. پره‌ها ساختارهای ورتکسی با چرخش معکوس را پرتاب می‌کنند که بزرگترین آن‌ها ( $a-b$  در شکل) تقریباً شعاع یکسانی با خود توربین دارند. این ورتکس‌ها از جدایش دینامیکی در پره‌های در حال چرخش ناشی می‌شوند. شکل سمت راست تغییر عادی ضریب توان را نشان می‌دهد که به نسبت سرعت رأس بستگی دارد. سه ناحیه مشخص می‌شود: ناحیه‌ی انفصال دینامیکی عمیق با سرعت کم، ناحیه‌ی اثرات ثانویه و ناحیه‌ی سرعت زیاد و گذار در اطراف سرعت بهینه.



شکل ۸-۲۵ ساختارهای ورتکسی (راست) [BRO 86]، نواحی تابع (چپ) [PAR 02]

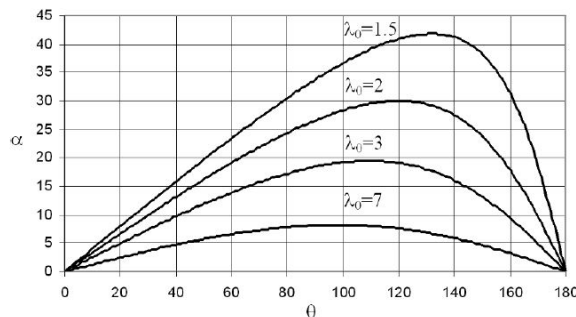
این نواحی به زاویه‌ی برخورد پروفیل پره‌ی در حال چرخش مربوط می‌شوند. برخورد هندسی پروفیلی که خط کورد آن مماس بر دیسک دوران است (شکل ۸-۲۶) به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda_0} \right) \quad (8-21) \\ \lambda_0 = \frac{\omega r}{V_0} \end{array} \right.$$



شکل ۸-۲۶ زاویه‌ی برخورد هندسی پروفیل

در شکل ۸-۲۷  $\alpha$  به عنوان تابعی از  $\theta$  به ازای نسبت‌های مختلف سرعت رأس  $\lambda_0$  ارائه می‌شود. برخورد حداکثر مابین  $\theta = 100^\circ$  و  $140^\circ$  قرار دارد و هنگامی که سرعت ویژه کاهش پیدا کند به سرعت افزایش می‌یابد. به ویژه، زاویه‌ی انفصال استاتیک رایج پروفیل،  $\alpha = 12^\circ$  به ازای  $\lambda_0 = 5$  حاصل می‌شود. به ازای نسبت سرعت رأس کمتر از ۵ رشته‌های سیال از پره جدا می‌شوند. در این ناحیه انفصال دینامیکی غالب می‌باشد. به طور معکوس، به ازای مقدار بیشتر از ۵، رشته‌های سیال از کانتور سیال پیروی می‌کنند. این ناحیه‌ی اثرات ثانویه است که در آن اصطکاک سیال روی پره‌ها (و بخش‌های چرخشی) غالب است. هنگامی که اثرات به طور متقابل همدیگر را خنثی کنند توان بیشینه در ناحیه‌ی گذار به دست می‌آید.



شکل ۸-۲۷ مقادیر زاویه‌ی برخورد هندسی به عنوان تابعی از موقعیت زاویه‌ای به ازای نسبت‌های مختلف سرعت رأس  $\lambda_0$

توربین‌های بادی در نسبت‌های سرعت رأس بهینه مابین ۶ و ۱۰ کار می‌کنند. بنابراین، آن‌ها تنها به صورت جزئی تحت اثر انفصال دینامیکی قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، توربین‌های جزر و مدی که پره‌های گسترده‌تری دارند در نسبت‌های سرعت رأس بهینه مابین ۲ و ۴ کار می‌کنند. بنابراین، آن‌ها به شدت تحت اثر انفصال دینامیکی قرار می‌گیرند. نقطه‌ی عملکرد بهینه ( $C_p$ ) بیشینه) در توربین‌های جزر و مدی به جریانی مربوط می‌شود که به شدت در بخش بزرگی از دیسک چرخش جدا می‌شود.

توجه کنید که این تحلیل به ما امکان می‌دهد تا گستره‌ی انفصال را مشاهده کنیم اما مشخص نمی‌کند که آیا اثرات دینامیکی قابل توجه هستند یا کوچک هستند. این امر بسیار ضروری می‌باشد، زیرا اگر اثرات دینامیکی جزئی باشند می‌توان برای هندسه‌های داریوس مدل‌ها را به صورت ثابت و ساده ساخت که همان اساس مدل گلارت را دارند که برای هندسه‌های محوری توسعه یافته است و به ویژه استفاده از جداول لیفت و درگ پروفیل‌ها توجیه می‌گردد. در غیر اینصورت، ما باید به مدلسازی عددی معادلات ناویر-استوکس متوسل شویم که کاری بسیار

دشوارتر است. به منظور سنجش مشخصه‌ی دینامیکی جریان ما نیاز داریم تا سرعتی را بررسی کنیم که در آن برخورد  $\alpha$  با حرکت پره‌ها تغییر می‌کند. به منظور انجام این کار لینویل و ویتکاک<sup>۱</sup> [LAN 86] فرکانس کاهش یافته  $F^*$  را تعریف کردند که از مطالعه‌ی پره‌های هلیکوپتر به دست آمده است:

$$(۸-۲۲) F^* = \frac{c}{2\omega r \alpha_{max}} \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{max}$$

مطابق [MAC 72] هنگامی که  $F^*$  بیشتر از ۰.۰۵ باشد اثرات دینامیکی شروع به ظاهر شدن می‌کنند. در این مورد، منحنی لیفت که به برخورد پروفیل بستگی دارد، نشان‌دهنده‌ی حلقه‌ی پسماند (هیستریسیس)<sup>۲</sup> می‌باشد.

با واردسازی  $\theta = \omega t$  در [8.21] ما به عبارات زیر می‌رسیم:

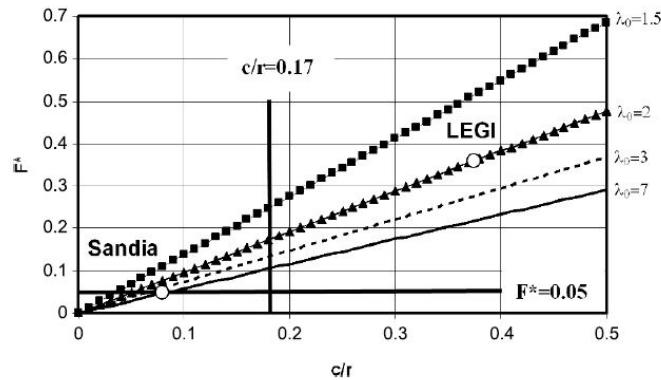
$$(۸-۲۳) \begin{cases} F^* = \frac{c}{2r\alpha_{max}(\lambda_0 - 1)} \\ \alpha_{max} = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda_0^2 - 1}} \right) \end{cases}$$

در شکل ۸-۲۸،  $F^*$  به ازای مقادیر  $\lambda_0$  مفروض بالا به عنوان تابعی از رابطه‌ی کورد بر شعاع ( $c/r$ ) نشان داده شده است. معمولاً  $c/r$  در توربین‌های جزر و مدی مابین ۰.۱۷ و ۰.۵ متغیر است. به ازای این مقادیر، در شکل نشان داده شده است که در نسبت‌های سرعت رأس بهینه مابین ۲ و ۴ در توربین‌های جزر و مدی جریان متقاطع ممکن است  $F^*$  بسیار بیشتر از ۰.۰۵ باشد. ما برای توربین جزر و مدی استفاده شده توسط LEGI برای مدل اولیه‌ی اتیک (شکل ۸-۱۲) به  $c/r = 0.37$  و مقدار بهینه  $\lambda_0 = 2$  می‌رسیم. نقطه‌ی نشان‌دهنده‌ی توربین توسط دایره‌ای در شکل نشان داده شده است. به ازای این مقادیر،  $F^*$  برابر ۰.۳۵ است که به معنای این می‌باشد که توربین در ناحیه‌ی انفصالی اعلام شده ( $\lambda = 2$ ) در حالت بهینه‌ی خود و به شدت در حرکت است ( $F^* = 0.35$ ). به طور مشابه توربین بادی دو پره‌ای داریوس به قطر  $m$  ۱۷ که در آزمایشگاه‌های سندیا توسعه یافته است [WOR 78] در شکل مشخص شده است. در آن  $c/r = 0.071$  و نسبت سرعت رأس بهینه‌ی آن  $\lambda_0$  برابر ۶ است. این توربین به ندرت در نسبت سرعت رأس بهینه‌ی خود و فراتر از آن در معرض انفصال دینامیکی قرار دارد. انفصال

<sup>1</sup> Laneville and Vittecoq

<sup>2</sup> Hysteresis

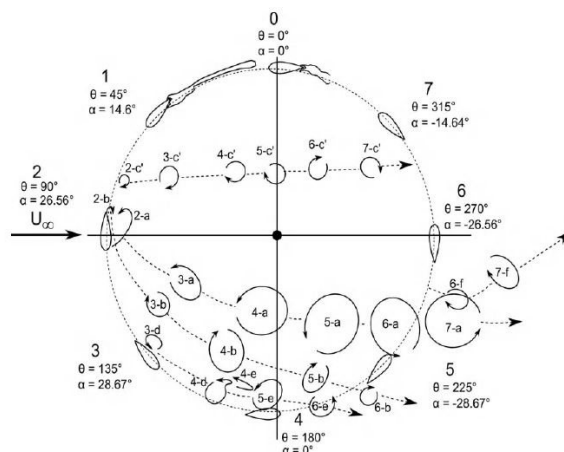
دینامیکی تنها در نسبت‌های سرعت رأس پایین‌تر اتفاق می‌افتند و حتی در آن موقع هم اثرات متحرک کوچک باقی می‌مانند.



شکل ۸-۲۸ فرکانس کاهش‌یافته به عنوان تابعی از  $c/r$  و  $\lambda_0$

در پایان، برای توربین بادی سنندیا همانند بیشتر توربین‌های بادی داریوس می‌توان با واردسازی اصلاحات به منظور در نظرگیری انفصال دینامیکی در نسبت‌های سرعت رأس پایین، از مدل‌های ساده‌ی ساکن استفاده کرد. از طرف دیگر، ما باید برای توربین‌های جزر و مدی جریان متقاطع از مدلی در سیال واقعی استفاده کنیم که با آن معادلات ناویر-استوکس حل می‌گردند. با این حال، این مسئله در حال دستیابی به نتایج با دقت کافی با هزینه‌ی محاسباتی قابل قبول می‌باشد.

در شکل ۸-۲۹ ساختارهای ورتکسی تولیدشده در مورد توربین بادی دو پره‌ای لینویل و ویتاکاک داریوس نشان داده شده‌اند [AME 09A]. از مدل عددی  $RANS$  (معادله‌ی ناویر-استوکس میانگین رینولدز) در ارتباط با مدل آشفتگی  $SST k-\omega$  استفاده شده است. افزایش طول واقعی پره‌ها ۱۰ و  $c/r$  برابر ۲ است. این توربین با نسبت سرعت رأس  $\lambda_0 = 2$  طراحی شده است که به رژیم انفصال دینامیکی شدید مربوط است. عدد کورد رینولدز برابر ۳۸۰۰۰ است. ساختارهای ورتکسی با استفاده از معیار  $Q$  شناسایی می‌شوند [HUN 88]. معیار  $Q$  به ما این امکان را می‌دهد تا نواحی را با سرعت زیاد ولی نرخ برش کم در میدان سرعت شناسایی کنیم؛ این به ما اجازه می‌دهد تا نواحی لایه‌ی مرزی را به خاطر ورتکس‌های حمل‌شده در جریان حذف کنیم.



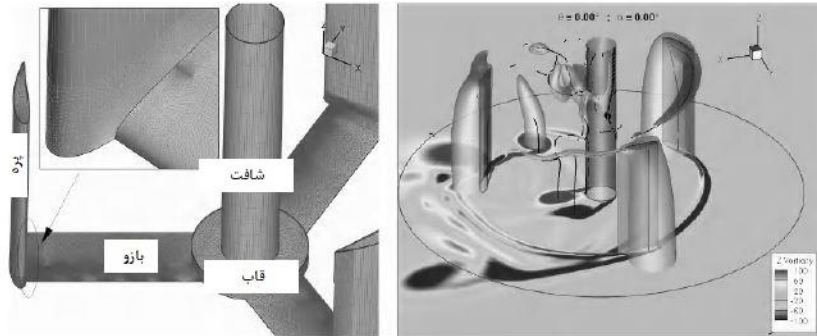
شکل ۸-۲۹ ساختارهای ورتکسی به دست آمده با استفاده از معیار  $Q[AME\ 09a]$

میدان سرعت محاسبه شده بسیاری ارزشمند است. ما ساختارهای ورتکسی توصیف شده توسط بروچر به خصوص ورتکس  $a-b$  با چرخش معکوس را می‌یابیم. چرخه‌های لیفت و درگ به دست آمده از طریق محاسبات به چرخه‌های واقعی نزدیک هستند. توربین جزر و مدی  $LEGI$  با استفاده از مدل مشابه در دو بعد و پیکربندی سه بعدی محاسبه شده است (شکل ۸-۳۰ چپ). به دلیل اینکه قطر آن برابر ارتفاع آن است ( $17.5cm$ ) اثرات سه بعدی در آن بسیار قوی‌تر از مورد توربین بادی لینویل هستند. در پیکربندی دو بعدی، ضریب میانگین توان بهینه به ازای مقدار تجربی تقریبی  $0.35$  حدوداً  $0.45$  است. از شبیه‌سازی در پیکربندی سه بعدی که انجام آن بسیار دشوار است ضریب توانی برابر  $0.35$  به دست آمده است. با این حال، ما نباید تصور کنیم که این شبیه‌سازی کامل است؛ در مورد مدل عددی و هم اندازه‌گیری عملکرد توربین جزر و مدی تردیدهایی وجود دارد. در رابطه با محاسبات در حالی که در مش از میلیون‌ها سلول استفاده می‌شود نیاز خواهد داشت تا اصلاح گردد. به علاوه در مدل آشفتگی ضعیف‌هایی وجود دارد: در این مدل نواحی لمینار لایه‌ی مرزی در پروفیل نشان داده نمی‌شوند و شامل ویسکوزیته‌ی عددی می‌باشد که ساختارهای ورتکسی را به سرعت از بین می‌برد.

شکل ۸-۳۰ (راست) سطوح ایزو-ورتیسیته‌ی دنبال محور چرخش را نشان می‌دهد جریان از راست به چپ بوده و توربین پاد ساعتگرد می‌چرخد. ما می‌توانیم به وضوح توسعه‌ی ورتکس  $a$  در وجه میانی پره‌های سمت راست را مشاهده کنیم. ما همچنین می‌توانیم مسیر این ورتکس‌ها را در حالی که از پره دور می‌شوند، در صفحه‌ی مقارن ببینیم. ورتکس قوس‌دار<sup>۱</sup> نیز به ویژه

<sup>۱</sup> Wing-tip vortex

قابل مشاهده است. در نهایت، ما می‌توانیم ورتکس‌های متفاوت کارمن را در پایین دست محور چرخش تشخیص دهیم.



شکل ۸-۳۰ توربین جزر و مدی *LEGI* (چپ)؛ مدل سه بعدی (راست) [*AME 09b*]

### ۸-۳-۱-۵ مدل‌سازی ژنراتور الکتریکی

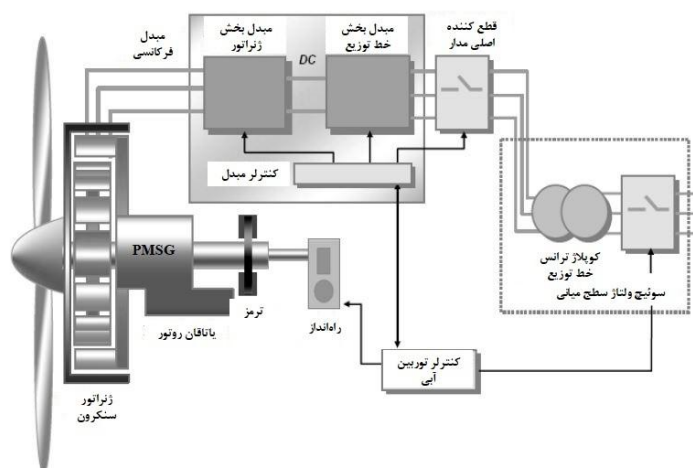
شباهت‌های بسیار زیادی میان انرژی بادی و جریان جزر و مدی وجود دارد که این دلیلی بر چرایی تمرکز این کتاب به طور عمده بر دو فناوری الکترومکانیکی مرجع استفاده شده در حوزه‌ی توان بادی است. در هر دو از ژنراتورهای القایی دو تغذیه‌ای و ژنراتورهای همگام (سنکرون) با مغناطیس دائم [*BEN 09b*] استفاده می‌شود که هر دو با سرعت متغیر عمل می‌کنند که این امر به ما امکان بهره‌برداری بهتر از عملکرد توربین را می‌دهد و همچنین اجازه می‌دهد تا در گستره‌ی وسیعی از سرعت‌های جریان دریایی با  $C_p$  حداکثر کار کنند.

به منظور کنترل سرعت در ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم (*PMSG*) از مبدل متناوب/پیوسته/متناوب استفاده می‌شود که اغلب از دو پل *IGBT* کنترل شده با *PMW* (یکی از آن‌ها به شبکه‌ی برق و دیگری به سیم‌پیچ‌های (کوئل‌های) ماشین متصل شده است) ساخته شده است (شکل ۸-۳۱). توانایی ساخت ماشین‌هایی با تعداد زیادی قطب این امکان را می‌دهد تا از محرک مستقیم استفاده شود و جعبه‌دنده مورد نیاز در ماشین‌ها کنار گذاشته شود.

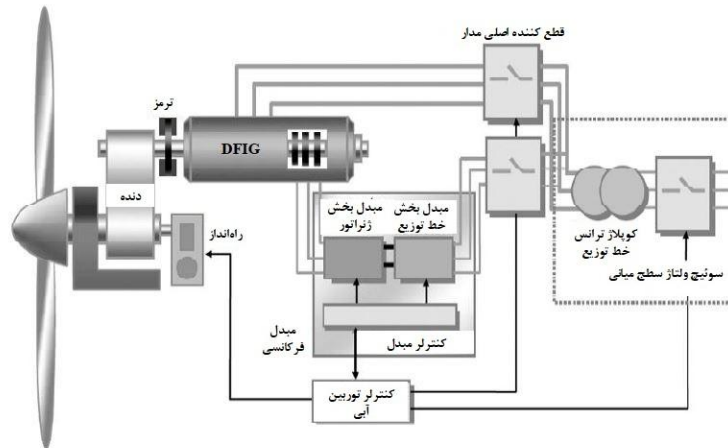
ممکن است از ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای (*DFIG*) برای سیستم‌های هیدروالکتریکی استفاده شود. در این مورد، سیم‌پیچ‌های استاتور مستقیماً به شبکه متصل شده‌اند، در حالی که سرعت ژنراتور از طریق مبدل متناوب/پیوسته/متناوب کنترل می‌شود که به شبکه‌ی برق و سیم‌پیچ‌های روتور ماشین متصل است (شکل ۸-۳۲). استفاده از چنین سیستم مبتنی بر *DFIG* در حوزه‌ی انرژی باد رایج است.



در حقیقت، مبدل‌های استفاده‌شده میان روتور و شبکه برای حدود ۳۰٪ از توان اسمی ژنراتور طراحی شده‌اند که مستلزم کاهش چشمگیری در دشواری و هزینه‌ی کلی تأسیسات است. از طرف دیگر، گردش ژنراتور به لحاظ سرعت به بازه‌ی  $\pm 50\%$  حوالی سرعت سنکرون ماشین محدود شده است [BEN 09a]. این امر در مورد PMSG صادق نیست چرا که امکان بازه‌ی گسترده‌تری از تغییر برای سرعت در گشتاور بیشینه تا سرعت اسمی فراهم می‌کند. بدین معنا که PMSG می‌تواند با سازگاری سرعت ژنراتور با سرعت جریان دریایی مطابق راهبرد پیگیری نقطه‌ی توان بیشینه (MPPT) از بازه‌ی وسیع‌تر، انرژی بیشتری نسبت به DFIG استخراج کند. حاصل انرژی استخراجی PMSG که در مقابل DFIG قرار دارد و به تفاوت گردش سرعت مربوط است بر حسب طبیعت مکان تأسیسات حدوداً ۱۵-۲۵٪ در طول سال است [BEN 10b].



شکل ۸-۳۱ توربین جزر و مدی با به کارگیری PMSG

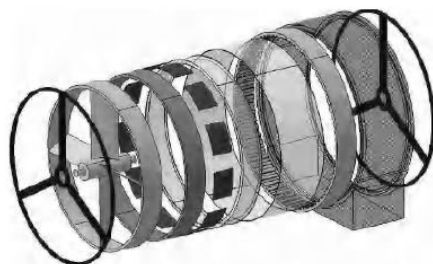


شکل ۸-۳۲ توربین جزر و مدی با به کارگیری *DFIG*

صرف نظر از تفاوت در تولید توان که به گرش بیشتر سرعت *PMSG* مربوط است، باید توجه شود که به نظر می‌رسد *DFIG* به لحاظ هزینه‌ی خرید نسبت به *PMSG* دارای مزیت جزئی باشد، زیرا کل ماشین و مبدل از قبل برای *DFIG* مقدار کمی می‌باشد که این موفقیت این سیستم‌ها را برای کاربردهای توان بادی توضیح می‌دهد. با این حال، زمینه‌ی خاص استفاده در دریا محدودیت‌های مختلفی را تحمیل می‌کند. توربین‌های جزر و مدی در مکان‌هایی در آب فرو خواهند رفت که محلی برای جریان‌های قوی هستند و دسترسی به آن‌ها دشوار است. بنابراین، به حداقل رساندن جنبه‌های نگهداری یک نگرانی اساسی است. یک *PMSG* متحرک مستقیم به نگهداری کمتری نسبت به *DFIG* نیاز دارد که شامل جعبه‌دنده‌ای می‌شود که باید در فواصل منظم خشک شود و سیستمی از پره‌ها و طوقه‌ها<sup>۱</sup> باید روتور را تغذیه کنند. به علاوه، مشاهده شده است که این سیستم‌ها در زمینه‌ی انرژی باد نرخ شکست بالایی دارند [AMI 09]. باید توجه شود که به منظور ساده‌سازی هرچه بیشتر انتقال الکترومکانیکی می‌توان مستقیماً یک ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم را در نازل حول توپین وارد کرد. بنابراین، پروانه‌ی توربین دارای پیچ مغناطیسی با مغناطیس‌های دائم است که در این مورد روتور ژنراتور می‌باشد. این راه حل سیستمی را فراهم می‌کند که از قبل فشرده‌تر و قوی‌تر از زنجیره‌ی محرک مرسوم است [DRO 10].

<sup>۱</sup> Collars

در شکل ۸-۳۳ نموداری از این نوع طراحی محرک ریم<sup>۱</sup> نشان داده شده است. این طراحی توسط شرکت اپن هیدرو<sup>۲</sup> اتخاذ شده و توسط EDF برای تأمین توربین‌های سایت آزمایشی پیامپول-بریپات و شرکت جریان پاک در همکاری با آلتوم هیدرو انتخاب شده است.



شکل ۸-۳۳ اصول ژنراتور یکپارچه دندانهای<sup>۳</sup>

در جدول ۸-۱ جنبه‌های قیاسی این دو سیستم در زمینه‌ی توربین‌های جزر و مدی ارائه شده-اند.

<i>PMSG</i>	<i>DFIG</i>
مزایا:	مزایا:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• افزایش مقاومت تسلیم</li> <li>• عدم وجود پره</li> <li>• امکان انتقال قدرت بصورت مستقیم و بدون نیاز به گیربکس به صورت</li> <li>• امکان ایجاد دوره‌های مختلف بر اساس محدوده‌های توان موجود</li> <li>• امکان افزایش توان واحد جرم(با استفاده از گیربکس)</li> <li>• کاهش تعمیرات موردنیاز</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سیستم کنترلی و الکترونیکی بر اساس کسری از توان نامی طراحی شده است</li> <li>• کاهش هزینه جمعی ژنراتور و توربین</li> </ul>

<sup>1</sup> Rim Driven design

<sup>2</sup> OpenHydro

<sup>3</sup> Rim-driven integral generator

معایب:	معایب:
<ul style="list-style-type: none"> <li>سیستم کنترلی طراحی شده برای توان نامی است</li> <li>بزرگ بودن اندازه ژنراتور کوپل مستقیم</li> <li>سیستم کنترلی پرهزینه</li> <li>بالا بودن قیمت آهنرباهای دائم</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>وجود تماس لغزشی بین رینگ و براش</li> <li>محدود بودن سرعت‌های کاری</li> <li>گیربکس و براش-رینگ نیازمند تعمیر و نگهداری خواهند بود.</li> </ul>

جدول ۸-۱ جنبه‌های قیاسی  $PMSG$ ها در مقابل  $DFIG$ ها

هدف از پاراگراف زیر ارائه ترکیبی از مدل‌ها (با الگوی خطی مغناطیسی) است که می‌توان از آن برای طراحی، کنترل و شبیه‌سازی ترکیب‌های مبدل-ماشین مربوط به این دو نوع ژنراتور استفاده کرد.

#### ۸-۳-۱-۵ ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای

مدل‌سازی  $DFIG$  از نظر کنترل آن به طور کلی با استفاده از تبدیل پارک<sup>۱</sup> (معتبر در استاتور و روتور) در قالب چرخشی مرجع  $d-q$  انجام می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_{s,r}) & \cos(-\theta_{s,r} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(-\theta_{s,r} - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(-\theta_{s,r}) & \sin(-\theta_{s,r} + \frac{2\pi}{3}) & \sin(-\theta_{s,r} - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_v \end{bmatrix} \quad (۸-۲۴)$$

این تبدیل به ما امکان می‌دهد تا بارها و جریان‌ها را مطابق به ترتیب معادلات [8.25] و [8.26] بیان کنیم. توجه کنید که از این پس به منظور سهولت در نوشتن، این معادلات در قرارداد موتور ارائه خواهند شد.

<sup>1</sup> Park transformation

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (۸-۲۵)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{array} \right. \quad (۸-۲۶)$$

در جایی که  $R$  مقاومت است،  $L$  و  $M$  به ترتیب بیانگر خود القایی و القای متقابل می‌باشند،  $\omega_s$  سرعت الکتریکی همگامی است و  $\omega$  سرعت الکتریکی روتور می‌باشد ( $\omega = p \cdot \Omega$ ) که  $p$  تعداد جفت قطب‌ها است).

بنابراین، عبارت گشتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p M (i_{sq} i_{rd} - i_{rq} i_{sd}) \quad (۸-۲۷)$$

در جایی که  $p$  تعداد جفت قطب‌های  $DFIG$  است.

در نهایت، معادله‌ی مکانیکی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_m - f \Omega \quad (۸-۲۸)$$

که در آن  $J$  اینرسی،  $\Omega$  سرعت چرخش،  $T_m$  گشتاور مکانیکی و  $f$  ضریب اصطکاک ویسکوز است. بنابراین مجموعه‌ی معادلات [8.25] تا [8.28] بیانگر مدلی هستند که رفتار الکترومکانیکی  $DFIG$  را توصیف می‌کند و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی یا ایجاد طرح‌های کنترلی استفاده کرد.

## ۸-۳-۱-۲ ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم

می‌توان ژنراتور سنکرون با مغناطیس دائم را نیز از نظر کنترل آن با استفاده از تبدیل پارک در قالب چرخشی مرجع  $d-q$  مدل‌سازی کرد [8.24]. بنابراین، برای بارها و جریان‌ها ما به ترتیب به معادلات [8.29] و [8.30] می‌رسیم.

$$\begin{cases} V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega_s \\ V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d i_d + \phi_m) \omega_s \end{cases} \quad (8-29)$$

$$\begin{cases} \phi_d = L_d i_d + \phi_m \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (8-30)$$

که در آن  $\phi_m$  جریان القایی تولیدشده توسط مغناطیس‌های دائم است. باید توجه شود که در  $PMSG$  با روتور روان (به عنوان مثال، ماشین‌های مغناطیسی آویزان در سطح)،  $L_d = L_q$  است.

عبارت کلی گشتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر می‌باشد:

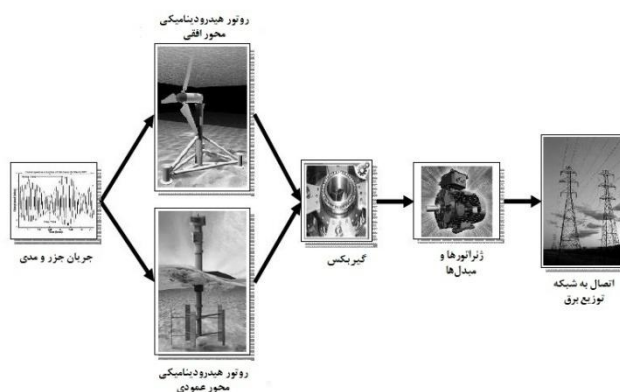
$$T_{em} = \frac{3}{2} p [\phi_m i_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (8-31)$$

مجموعه‌ی معادلات [8.29] تا [8.31] که ما باید به آن‌ها معادله‌ی مکانیکی [8.28] را نیز اضافه کنیم، مدلی را نشان خواهند داد که رفتار الکترومکانیکی  $PMSG$  را توصیف می‌کند و می‌توان از آن برای شبیه‌سازی یا ایجاد طرح‌های کنترلی استفاده کرد.

## ۸-۳-۲ کنترل عناصر توربین جزر و مدی

قطعاً می‌توان ژنراتور توربین جزر و مدی را با استفاده از روش‌های متداول  $PI$  یا  $PID$  کنترل کرد. با این حال، به دلایل آشکار استحکام و همچنین عدم دقت روش‌های مدل‌سازی و اختلالات شبکه‌ی برق، ما باید اطلاعات بیشتری درباره‌ی چگونگی اعمال حالت‌های پروازی<sup>۱</sup> (که بزرگتر می‌باشند) ارائه دهیم.

<sup>۱</sup> Gliding modes



شکل ۸-۳۴ عناصر مجموعه‌ی توربین جزر و مدی

قطعاً از این به بعد در روش‌های کنترلی ارائه‌شده زمینه‌ی انرژی دریایی، یعنی منابع و کلکتور محور افقی و محور عمودی در نظر گرفته خواهند شد (شکل ۸-۳۴). به علاوه، اثرات آشفستگی در منابع از طریق مدل استوکس در نظر گرفته می‌شوند [8.4].

همانند هر سیستم ژنراتوری که از قطعات با چیدمان آبشاری ساخته شده است می‌توان سیستم کنترلی را به چهار سطح زیر تفکیک نمود:

- کنترل به اصطلاح بسته، که به مولفه‌های انرژی‌دار می‌پردازد: اینورتورها/یکسوسازها<sup>۱</sup> (رکتیفایرها) - ژنراتورها - سیستم‌های حفاظتی؛
- کنترل به اصطلاح مولد مرجع، که شامل ایجاد قوانینی می‌شود که این عناصر مختلف باید از آن پیروی کنند: سرعت، جریان، ولتاژ، فرکانس‌ها؛
- لایه‌ی سازگاری زمان واقعی با عوامل خارجی همچون ارتعاشات در جریان‌های جزر و مدی، اغتشاشات در شبکه، الگوریتم ردگیری نقطه‌ی توان حداکثر؛
- نظارت، که راهبردهای مورد نظر را تعریف می‌کند و می‌تواند بسیار ساده (تمامی توان موجود تزریقی به شبکه‌ی برق) یا خیلی پیچیده، همچون استفاده از آن برای خدمات سیستم قدرت باشد.

دو حالت عملکردی وجود دارد:

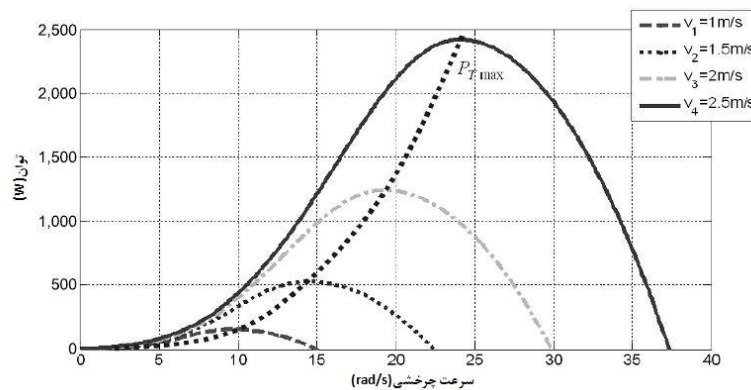
<sup>۱</sup> Rectifiers

- تزریق توان تولیدی با ظرفیت حداکثر ژنراتور (ردگیری نقطه‌ی توان حداکثر  $MPPT$ ) یا تأمین شبکه با روش تنظیمی، با یا بدون کنترل توان راکتیو؛
- کنترل ولتاژ (و فرکانس) با هدف تأمین توان در سایت‌های ایزوله.

### ۸-۳-۲-۱ استخراج توان حداکثر

مشخصات توان در مقایسه با سرعت جریان‌های جزر و مدی و سرعت چرخش توربین مشابه سرعت توربین بادی است. در اشکال ۸-۳۵ و ۸-۳۶ این مسئله در مورد ستون‌های توربین‌های جزر و مدی هاروست-اتیک به طور کامل نشان داده شده‌اند (شکل ۸-۳۱۲)  $[AND\ 09a]$ .

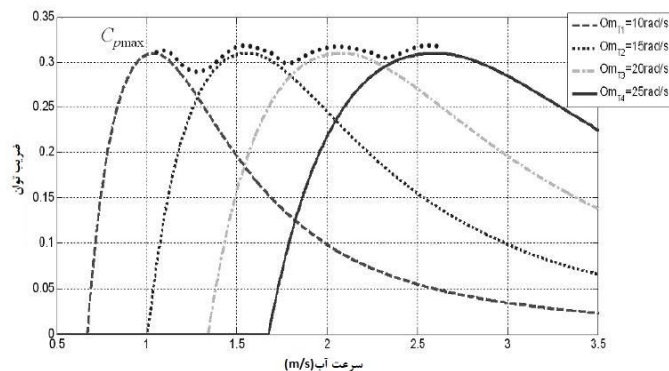
اکثراً در تفاوت در نظر جریان وجود دارد. بنابراین، الگوریتم‌های  $MPPT$  مشابه هستند؛ گستره‌ی وسیعی از میان روش‌های گرادیانی و آشفته کردن و مشاهده<sup>۱</sup> برای انتخاب وجود دارد. مسیر رسیدن به نقطه‌ی توان حداکثر با استهلاک وسیله‌ی ویسکوز ساده‌سازی می‌شود که در آن کلکتور هیدرودینامیکی دچار تحول می‌شود (شکل ۸-۳۷).



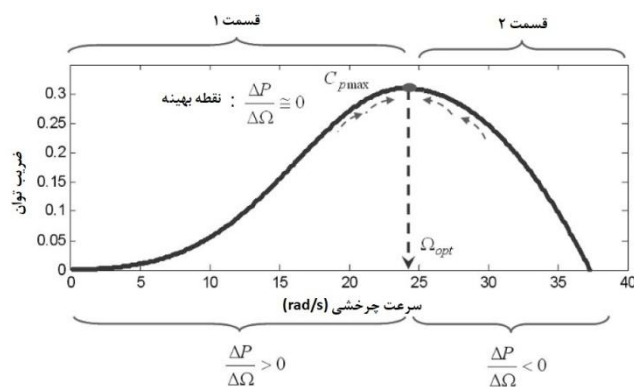
شکل ۸-۳۵ مشخصات توان ستون‌های توربین‌های جزر و مدی هاروست-اتیک مبتنی بر سرعت چرخش جریان‌های مختلف آب

<sup>۱</sup> Perturb and observe





شکل ۸-۳۶ ضریب توان وابسته به جریان آب به ازای سرعت‌های مختلف چرخش



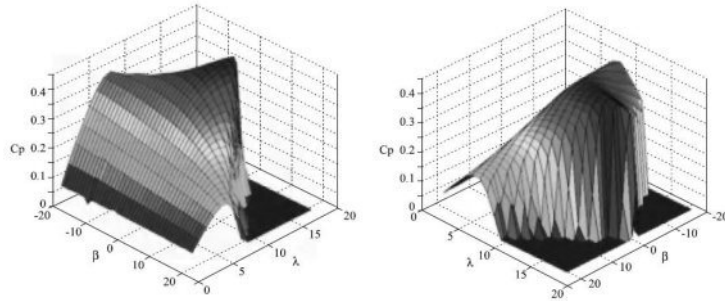
شکل ۸-۳۷ نمونه‌ای از مسیر نقطه‌ی توان حداکثری بر اساس گرادیان [AND 09a]

### ۸-۳-۲-۲ روش‌های کنترلی مرسوم

در بخش زیر، جهت‌گیری پره‌ها  $\beta$  در نظر گرفته نمی‌شود و ما تنها توربین‌های جزر و مدی با ژنراتورهای سرعت متغیر را بررسی می‌کنیم.

### ۸-۳-۲-۱ اصول کنترل بهینه‌ی توربین‌های جزر و مدی

بهینه‌سازی در این مورد شامل استفاده از منحنی مشخصه  $C_p(\lambda, \beta)$  می‌شود (شکل ۸-۳۸). به طور کلی، با جستجوی جدول مقدار بهینه‌ی  $C_p(\lambda, \beta)$  یافت می‌شود.



شکل ۸-۳۸ منحنی‌های مشخصه‌ی  $C_p(\lambda, \beta)$  [BEN 09a]

اساساً روش‌های کنترلی به فرضیه‌های مشخصی وابسته هستند که با پارامترهای مشخص مدل‌ها، متغیرهای قابل اندازه‌گیری و مدل توربین جزر و مدی در ارتباط می‌باشند. بر حسب ارزش مدل‌سازی توربین جزر و مدی و به ویژه مشخصه‌ی گشتاور آن می‌توان روش‌های زیر را در نظر گرفت.

#### **MPTT:**

این روش هنگامی مناسب است که  $\lambda_{opt}$  و  $C_{pmax} = C_p(\lambda_{opt})$  مجهول باشند. در این مورد، مبدأ سرعت طوری تنظیم شده است تا توربین به ازای سرعت مفروض جریان جزر و مدی در حوالی توان حداکثر کار کند.

ردگیری سرعت بهینه با استفاده از داده‌های مربوط به توربین

اگر نسبت سرعت رأس  $\lambda_{opt}$  مجهول باشد ممکن است از این روش استفاده شود. در این روش فرض می‌شود که توربین دارای حلقه‌ی تنظیم سرعت است تا به سرعت بهینه برسد:

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt}}{R} V(t) \quad (8-32)$$

که در آن  $R$  شعاع کلکتور هیدرودینامیکی است.

کنترل توان اکتیو:

از این روش هنگامی استفاده می‌شود که  $\lambda_{opt}$  و  $C_{pmax} = C_p(\lambda_{opt})$  معلوم باشند. می‌توان توان استخراجی از توربین را مطابق زیر نوشت:

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \Omega^3 \quad (\lambda-33)$$

با جاگذاری  $\lambda_{opt}$  و  $C_{pmax} = C_p(\lambda_{opt})$  ما به توان مرجع می‌رسیم:

$$\begin{cases} P_{Turbine_{opt}} = P_{ref} = K \Omega_{ref}^3 \\ K = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \end{cases} \quad (\lambda-34)$$

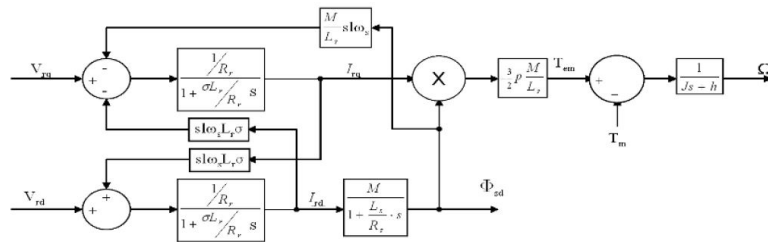
بنابراین فرض می‌شود که در این روش از حلقه‌ی تنظیمی توان استفاده می‌شود که مرجع آن [8.34] خواهد بود. از این روش به طور گسترده در زمینه‌ی انرژی باد استفاده می‌شود و ممکن است برای توربین‌های جزر و مدی نیز در نظر گرفته شود.

#### ۸-۳-۲-۲-۲ کنترل سرعت توربین جزر و مدی مجهز به DFIG

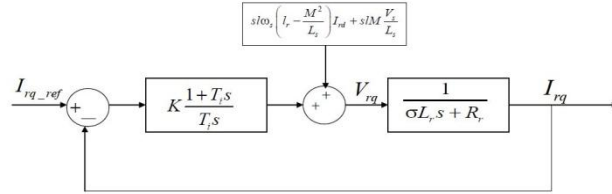
به منظور سادگی کار، ما به طور کلی از قالب مرجع  $d-q$  مربوط به میدان چرخشی استاتور و جریان استاتور قرار گرفته بر روی محور  $d$  ( $\phi_{sd} = 0$ ) استفاده می‌کنیم. به علاوه، با فرض اینکه این یک فرضیه‌ی واقعی برای ژنراتورهای استفاده‌شده در تبدیل انرژی باد است، می‌توان از مقاومت استاتور صرف نظر کرد. با استفاده از این ملاحظات به عنوان نقطه‌ی شروع، عبارت گشتاور [8.27] به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_s} \phi_{sd} I_{rq} \quad (\lambda-35)$$

در این شرایط، مدل پارک DFIG در شکل ۸-۳۹ تشریح شده است.

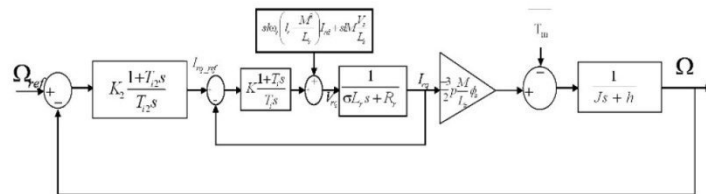


شکل ۸-۳۹ مدل پارک DFIG

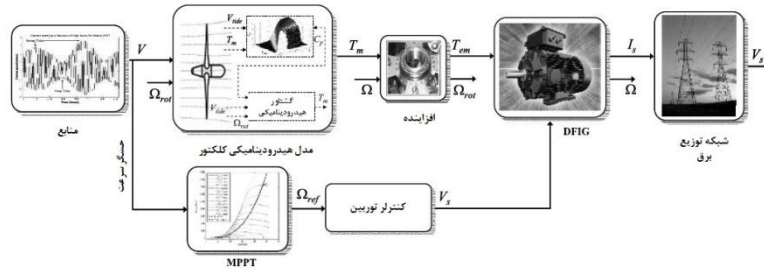


شکل ۸-۴۰ حلقه‌ی داخلی کنترل سرعت DFIG

این شکل نشان می‌دهد که می‌توان کنترل را توسط جریان روتور  $I_{rq}$  انجام داد. بنابراین به یک حلقه‌ی داخلی جریان نیاز است (شکل ۸-۴۰). به علاوه، با داشتن دینامیک در مقیاس‌های مختلف (الکتریکی و مکانیکی) بهتر است DFIG را به صورت آبخاری با حلقه‌ی جریان داخلی کنترل کرد. در نتیجه در یک حلقه‌ی خارجی به کنترل سرعت نیاز است (شکل ۸-۴۱).



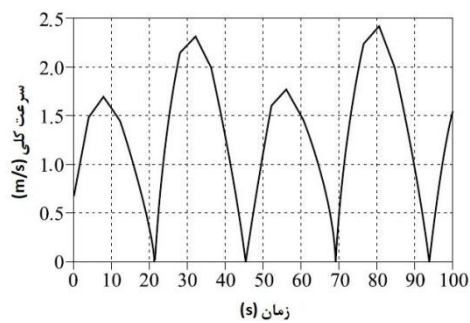
شکل ۸-۴۱ کنترل DFIG به صورت آبخاری



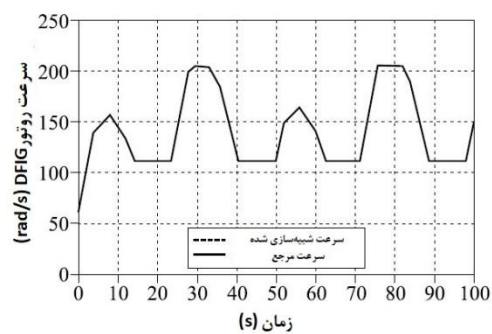
شکل ۸-۴۲ کنترل سرعت توربین جزر و مدی محور افقی به منظور کار در توان قابل بازیابی حداکثر

اصول کنترل سرعت توربین جزر و مدی محور افقی در شکل ۸-۴۲ نشان داده شده است. این اصول در توربین جزر و مدی آزمایشگاهی با قطر  $1.44\text{ m}$  و ظرفیت توان  $7.5\text{ kW}$  با جمع-آوری داده‌های جریان جزر و مدی از سایت راز دسین آزمایش شده‌اند [BEN 07]. بنابراین، برای پروفیل سرعت جریان جزر و مدی داده‌شده توسط شکل ۸-۴۳ و در نتیجه سرعت مرجع

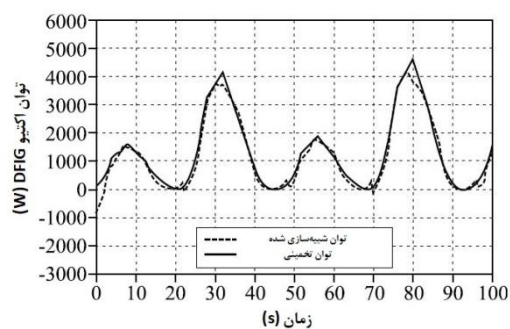
انتخابی با استفاده از راهبرد *MPPT*، در شکل‌های ۴۴-۸ و ۴۵-۸ عملکرد کنترلی نشان داده شده است.



شکل ۴۳-۸ پروفیل سرعت‌های جریان جزر و مدی



شکل ۴۴-۸ سرعت روتور *DFIG*



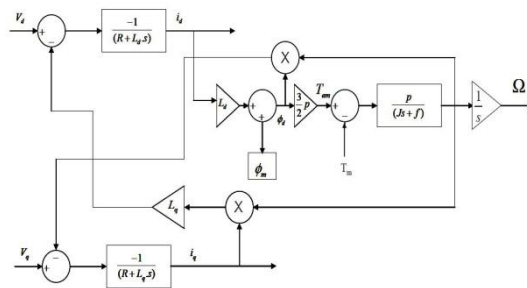
شکل ۴۵-۸ توان تولیدی توسط *DFIG*

۳-۲-۲-۳-۸ کنترل سرعت توربین جزر و مدی مجهز به *PMSG*

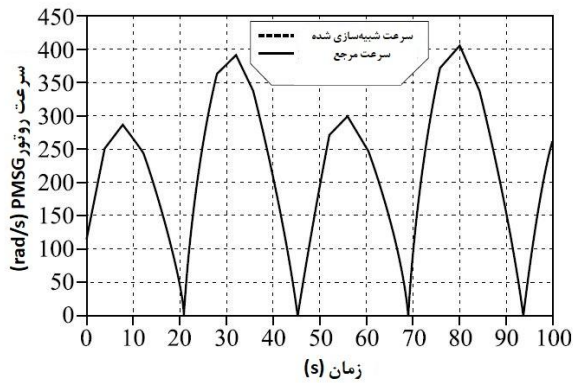
به طور متداول از قالب مرجع  $d-q$  متصل به میدان چرخشی استاتور استفاده می‌شود. همچنین عبارت گشتاور برای  $PMSG$  در جایی که  $L_d = L_q$  است به صورت زیر می‌باشد:

$$(۸-۳۶) T_{em} = \frac{3}{2} p \phi_m i_q$$

در این شرایط، مدل پارک  $PMSG$  در شکل ۴۶-۸ نشان داده شده است. ممکن است از راهبرد کنترلی مشابهی برای توربین جزر و مدی دارای  $PMSG$  استفاده شود. این امر مستلزم یک حلقه‌ی داخلی برای جریان  $i_{rq}$ ، و یک حلقه‌ی خارجی برای سرعت است.

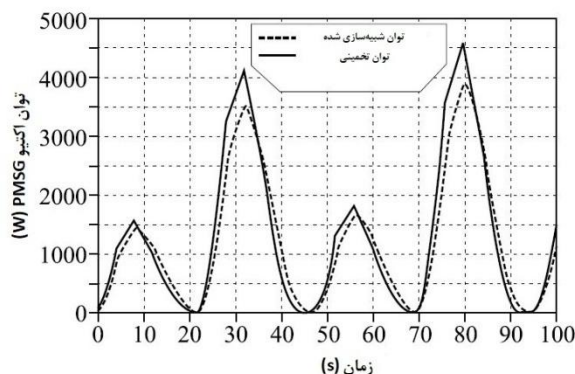


شکل ۴۶-۸ مدل پارک  $PMSG$



شکل ۴۷-۸ سرعت روتور  $PMSG$

در رابطه با توربین جزر و مدی محور افقی یکسان و داده‌های یکسان برای سایت راز دسین، در شکل‌های ۴۷-۸ و ۴۸-۸ عملکرد سیستم کنترلی به ازای مرجع سرعت تولیدی توسط  $MPTT$  (با پروفیل سرعت جریان جزر و مدی مشابه در شکل ۴۳-۸) نشان داده شده است.



شکل ۸-۴ توان تولیدی توسط PMSG

#### ۸-۳-۲-۴ تشریح سیستم کنترلی توربین جزر و مدی محور عمودی

در بخش زیر ما روش‌های دیگر کنترل توربین جزر و مدی محور عمودی - به ویژه، کنترل ولتاژ پیوسته‌ی باس<sup>۱</sup> را تشریح می‌کنیم. در این مورد توربین با اینورتر سمت ژنراتور برای تأمین شبکه‌ی ایزوله (حالت  $Vf$ ) و توسط اینورتر سمت شبکه برای تزریق برق به شکلی قدرتمند (حالت  $PQ$ ) کنترل می‌گردد [AND 08], [AND 09a], [AND 09b].

#### حالت $Vf$ :

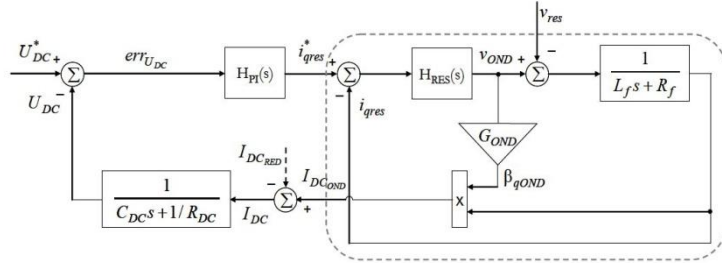
زنجیره‌ی جریان بالادست سرعت چرخش توربین  $\Omega$  را برای تنظیم توان استخراجی تغییر می‌دهد تا ولتاژ پیوسته‌ی باس  $U_{DC}$  را در مقدار کافی نگه دارد. با این حال، باید توجه شود که مطابق قانون باید مواظب باشیم تا در سمت چپ منحنی زنگی توربین<sup>۲</sup> بمانیم (شکل ۸-۳۷).

#### حالت $PQ$ :

در این مورد، ولتاژ  $U_{DC}$  توسط جریان پیوسته وارد به اینورتر سمت شبکه تنظیم می‌شود. ممکن است سیستم به چندین روش پیکربندی شود. در شکل ۸-۴۹، اصلاح‌کننده‌ی ولتاژ ( $HPI$ ) مستقیماً از مؤلفه‌ی فعال جریان تزریقی به شبکه،  $i_{qres}$ ، مرجع را تولید می‌کند. اینورتر در بهره‌ی  $G_{OND}$  تلفیق می‌شود، باس پیوسته توسط گشتاور فیلتر  $R_{DC}$ ,  $C_{DC}$  نشان داده می‌شود، جریان‌های  $I_{DC_{ond}}$  و  $I_{DC_{red}}$  ترتیب توسط اینورترهای سمت ژنراتور و سمت شبکه به دست می‌آیند و در نهایت  $L_f$  و  $R_f$  بیانگر فیلتر اتصال شبکه‌ای هستند که ولتاژ آن در اینجا با  $v_{res}$  نشان داده شده است.

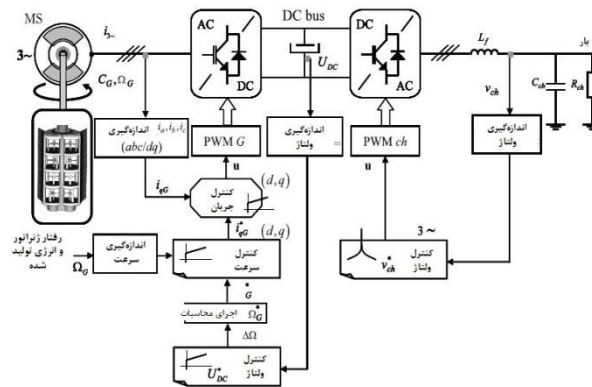
<sup>1</sup> Continuous bus voltage

<sup>2</sup> Turbines bell curve

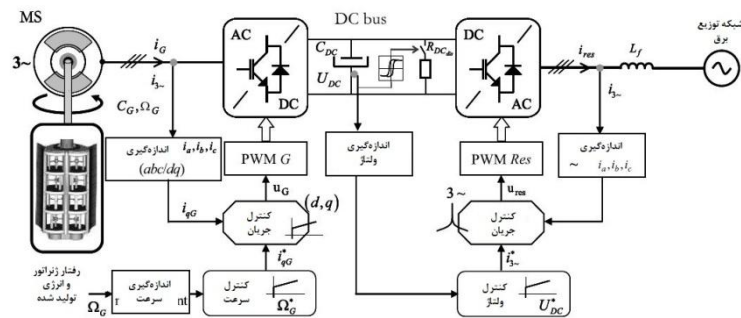


شکل ۸-۴۹ کنترل ولتاژ پیوسته‌ی باس با تزریق جریان فعال (اکتیو) به شبکه

در شکل‌های ۸-۵۰ و ۸-۵۱ خلاصه‌ای از دو حالت عملیاتی بالا ارائه شده است. ما می‌توانیم به وضوح تفاوت‌های کنترل ولتاژ باس DC اتلاف‌کننده<sup>۱</sup> را مشاهده کنیم که با حالت PQ ارائه شده و در صورتی فعال می‌شود که نتوان انرژی تولیدی را به شبکه انتقال داد.



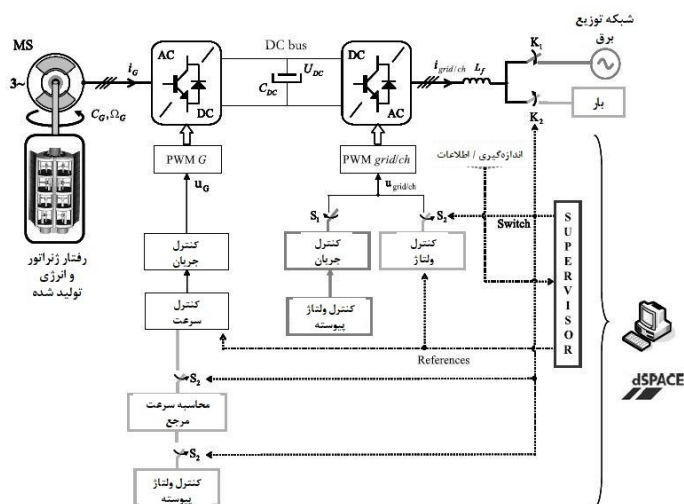
شکل ۸-۵۰ حالت V/f



شکل ۸-۵۱ حالت PQ

<sup>۱</sup> Dissipater





شکل ۸-۵۲ خلاصه‌ای از قوانین کنترلی و هدایت گذار PQ-Vf-PQ

همچنین این احتمال وجود دارد که این دو روش را با هم عوض کرد، زیرا بر خلاف توربین بادی، نظم جریان‌های جزر و مدی این اجازه را می‌دهد تا ماشین در حالت جزیره‌ای عمل کند و همچنین در مواقع خرابی شبکه، در کنار عناصر ذخیره‌ی انرژی، به عنوان منبع اضطراری<sup>۱</sup> عمل کند. این گذار به راحتی انجام می‌شود. با این حال، هنگامی که شبکه دوباره متصل است باید زمان تعویض<sup>۲</sup> انتخاب شود تا گذار<sup>۳</sup> را کنترل کنیم (شکل ۸-۲۵).

### ۸-۳-۲-۳- عناصر کنترل پیشرفته

در بالا از کنترل‌های به اصطلاح *PI* مرسوم استفاده شد تا بر سرعت توربین جزر و مدی مجهز به *DFIG* یا *PMSG* نظارت شود. این نوع رگلاتور به لحاظ سادگی خود با مراجع ثابت شناخته شده است. با این حال، در مورد توربین‌های دریایی، سیگنال‌های مرجع تولیدی با زمان تغییر می‌کنند و ممکن است جریان‌های جزر و مدی آشفته باشند. این امر به طور آشکار اثری منفی بر عملکرد کنترل *PI* دارد.

به علاوه، در هر فرمول‌بندی مسئله‌ی کنترلی، مدل ریاضی توسعه داده شده برای ایجاد قانون کنترلی به طور دقیق فرایند دنیای واقعی را منعکس نمی‌کند. ممکن است این تفاوت‌ها، به

<sup>۱</sup> Safety supply

<sup>۲</sup> Switch

<sup>۳</sup> Transients

عنوان مثال، از دینامیک که مدل‌سازی نشده است، تغییرات در پارامترهای سیستم یا به طور کلی‌تر روش مدل‌سازی رفتارهای پیچیده‌ی فرآیند ناشی شوند. با این وجود، قوانین کنترلی حاصل علی‌رغم تمامی این خطاها باید قادر به برآورد اهداف از پیش تعریف‌شده باشند. این امر باعث شده است تا مزیت ویژه‌ای در ایجاد کنترل‌های به اصطلاح قوی باشد که قادر به غلبه بر این مسئله هستند.

در حقیقت، محدودیت‌های روش اصلاح‌گرهای خطی از نوع  $PID$  خیلی زود آشکار گشت. اصلاح‌گرهای خطی تحت قانون بُد<sup>۱</sup> قرار دارند که بر آن‌ها تحمیل می‌کند که اثرات دامنه و اثرات فازی کوپل شده و مخالف باشند. به عنوان مثال، هر پیشروی در فاز که اثری سودمند است لزوماً با افزایشی در رابطه‌ی دینامیکی همراه می‌شود. در حقیقت، احتمالات جبران و استفاده از بهره‌ی افزایشی متعاقباً کاهش پیدا می‌کنند.

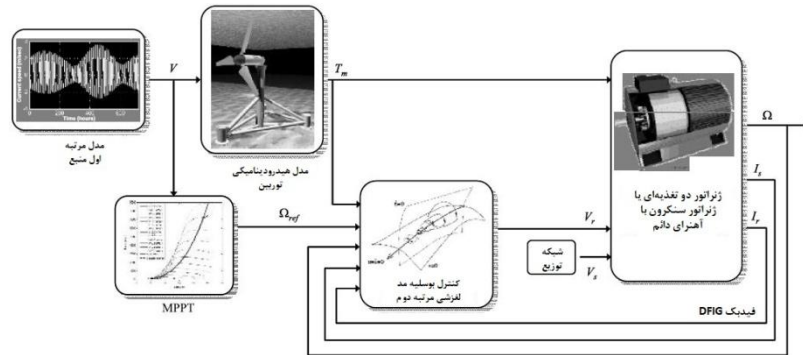
به منظور غلبه بر این معایب، ما می‌توانیم روش‌های غیرخطی، همچون اتخاذ روش‌های پایداری مطلق و همچنین کنترل حالت لغزشی را در نظر بگیریم. این مورد آخر در نظریه‌ی سیستم‌های با ساختار متغیر یافت می‌شود. قوانینی کنترلی با روش‌های لغزشی نوشته می‌شوند تا سیستم را نزدیک به سطح لغزشی نگه دارند.

دو مزیت عمده برای چنین روشی وجود دارد. اولاً، ممکن است نتایج رفتار دینامیکی با انتخاب سطحی مناسب مشخص گردند. ثانیاً، پاسخ سیستم در حلقه‌ی بسته به طور کامل در مقابل نوع خاصی از عدم قطعیت تأثیر ناپذیر است که باعث می‌شود این روش در جستجوی روش‌هایی برای ایجاد سیستم‌های کنترلی قوی برای سیستم‌های هیدروالکتریک یک گزینه‌ی احتمالی باشد. در این زمینه، کارهای انجام‌شده بر روی توربین‌های جزر و مدی محور افقی دارای  $DFIG$  یا  $PMSG$  به وضوح مزایا و پیشرفت‌های حاصل‌شده با استفاده از مرتبه‌ی بالاتر (مرتبه‌ی دوم) روش‌های لغزشی را نسبت به رگلاتورهای  $PI$  نشان می‌دهند،  $[FRI\ 02]$ ،  $[BEN\ 10b]$ ،  $[BEN\ 11]$ .

به منظور تولید سیستم کنترلی با سرعت متغیر بر اساس  $MPPT$  ما باید با استفاده از سرعت چرخش  $\Omega_{ref}$  گشتاور الکترومغناطیسی مرجع  $T_{em-ref}$  را تولید کنیم (شکل ۸-۵۳).



<sup>1</sup> Bode's law



شکل ۸-۵۳ مروری بر کنترل سرعت توربین جزر و مدی با *DFIG* یا *PMSG* از طریق حالت‌های لغزشی مرتبه بالا

$$T_{em-ref} = T_m + h\Omega - \alpha(\Omega - \omega_{ref}) + j\dot{\Omega}_{ref} \quad (\lambda-37)$$

به علاوه، سطوح لغزشی  $s_1$  و  $s_2$  تعریف شده‌اند تا کنترل سرعت چرخشی و توان راکتیو تضمین گردد. کنترل *DFIG* از طریق معادلات زیر توصیف شده است:

$$(\lambda-38) \begin{cases} I_{qr-ref} = -\frac{L_s}{pM} \frac{T_{em-ref}}{\phi_{sd}} \\ I_{dr-ref} = -\frac{I}{M} \phi_{sd} \end{cases}$$

$$(\lambda-39) \begin{cases} S_1 = I_{dr} - I_{dr-ref} \\ S_2 = I_{qr} - I_{qr-ref} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \frac{L_s}{M^2 - L_r L_s} \left( V_{dr} + R_r I_{dr} - \omega_r (L_r I_{qr} + M I_{qs}) - \frac{M}{L_s} V_{ds} - \frac{M R_s}{L_s} I_{ds} + \frac{M}{L_s} \omega_s (L_s I_{qs} + M I_{qr}) \right) - I_{dr-ref} \\ \quad \quad \quad \dot{S}_1 = \varphi_1(t, x) + \gamma_1(t, x) \dot{V}_{dr} \\ \dot{S}_2 = \frac{L_s}{M^2 - L_r L_s} \left( V_{qr} + R_r I_{qr} + \omega_r (L_r I_{dr} + M I_{ds}) - \frac{M}{L_s} V_{qs} - \frac{M R_s}{L_s} I_{qs} - \frac{M}{L_s} \omega_s (L_s I_{ds} + M I_{dr}) \right) - I_{qr-ref} \\ \quad \quad \quad \dot{S}_2 = \varphi_2(t, x) + \gamma_2(t, x) \dot{V}_{qr} \end{cases}$$

( $\lambda-40$ )

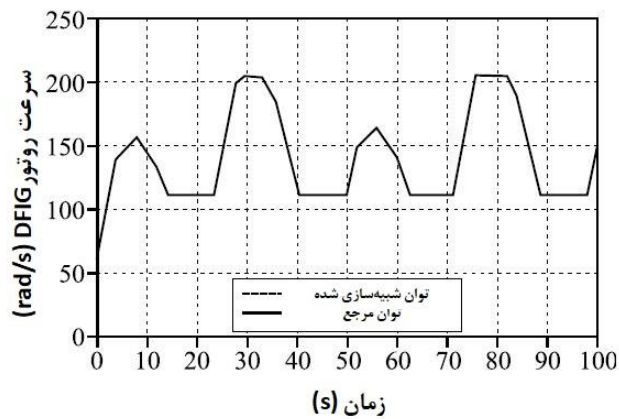
در معادلات [8.41] تا [8.43] به نوبت کنترل *PMSG* توصیف می‌شود.

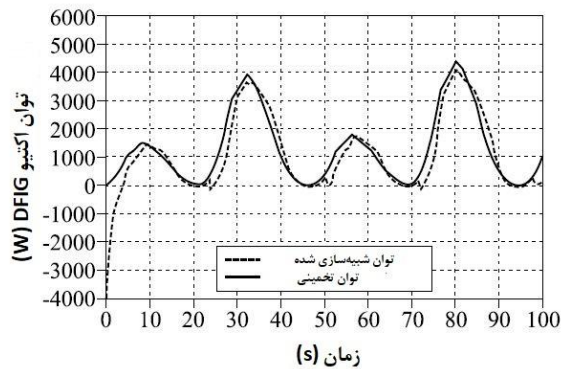
$$\begin{cases} I_{qr-ref} = 0 \\ I_{dr-ref} = \frac{2}{3} \frac{T_{em}}{p\phi_f} \end{cases} \quad (\lambda-41)$$

$$\begin{cases} S_1 = I_{dr} - I_{dr-ref} \\ S_2 = I_{qr} - I_{qr-ref} \end{cases} \quad (۸-۴۲)$$

(۸-۴۳)

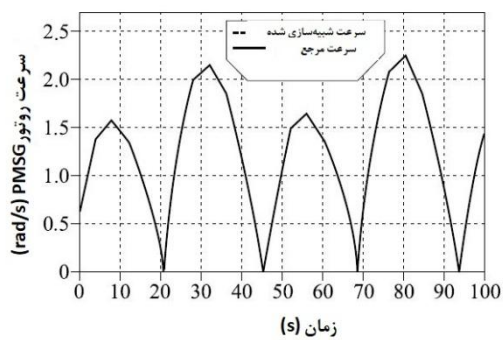
این دو سیستم کنترلی بر روی توربین جزر و مدی آزمایشگاهی یکسانی با قطر  $1.44 m$  و توان  $7.5 kW$ ، با داده‌های جریان جزر و مدی گردآوری شده از سایت راز دسین آزمایش شده‌اند [BEN 07]. بنابراین، به ازای مرجع سرعت تولیدشده با استفاده از  $MPPT$ ، در شکل‌های ۸-۸ و ۸-۵۵ عمکرد  $DFIG$  تشریح شده است (با پروفیل سرعت جریان جزر و مدی یکسان با پروفیل مفروض در شکل ۸-۴۳).

شکل ۸-۵۴ سرعت روتور  $DFIG$

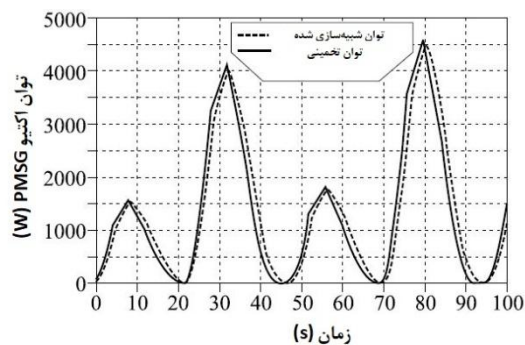


شکل ۸-۵۵ توان تولیدی توسط DFIG

در شکل‌های ۸-۵۶ و ۸-۵۷ به ترتیب عملکرد سیستم کنترلی در مورد PMSG نشان داده شده است.



شکل ۸-۵۶ سرعت روتور PMSG



شکل ۸-۵۷ توان تولیدی توسط PMSG

## ۸-۴ کتاب‌شناسی

- [ABB 59] ABBOT H., VON DOENHOFF, A.E., *Theory of Wing Sections*, Dover Publications, New York, 1959
- [AME 09a] AMET E., MAITRE T., PELLONE, C., ACHARD J.L., “2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a Darrieus turbine”, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 131, 111103-1, November 2009.
- [AME 09b] AMET E., *Simulation numérique d’une tidal turbine à axe vertical de type Darrieus*, PhD Thesis, Polytechnic Institute of Grenoble and the Bucharest University of Construction Technique, May 2009.
- [AMI 09] AMIRAT Y., BENBOUZID M.E.H., AL-AHMAR E., BENSACKER B., TURRI S., “A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems”, *Elsevier Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 3, no. 9, pp. 2629-2636, December 2009.
- [AND 08] ANDREICA M., BACHA S., ROYE D., Exteberria-Otadui I., “Micro-hydro water Current turbine control for grid connected or islanding operation”, *Proceedings of the 2008 IEEE PES*, pp. 952-962, Rhodes, Greece, June 2008.
- [AND 09a] ANDREICA M., *Optimisation énergétique de chaînes de conversion tidal turbines, modélisation, commandes et réalisations expérimentales*, PhD Thesis, Polytechnic Institute of Grenoble, July 2009.
- [AND 09b] ANDREICA M., BACHA S., ROYE D., MUNTEANU I., BRATCU A.I., GUIRAUD J., “Stand-alone operation of cross-flow water turbines”, *Proceedings of the 2009 IEEE ICIT*, pp. 1-6, Churchill, Australia, February 2009.
- [BEN 07] BENELGHALI S., BALME R., LE SAUX K., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., HAUVILLE F., “A simulation model for the evaluation of the electrical power potential harnessed by a marine current turbine”, *IEEE Journal on Oceanic Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 786-797, October 2007.
- [BEN 08] BENELGHALI S., DROUEN L., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., ASTOLFI J.A., HAUVILLE F., “Les systèmes de génération d’énergie électrique à partir des courants de marées”, *Revue 3EI*, no. 52, pp. 73-85, March 2008.

- [BEN 09a] BENELGHALI S., *On multiphysics modeling and control of marine current turbine systems*, PhD Thesis, University of Brest, December 2009.
- [BEN 09b] BENELGHALI S., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., "Marine tidal current electric power generation technology – a review", *Electromotion*, vol. 16, no. 3, pp. 155-166, July-September 2009.
- [BEN 10a] BENELGHALI S., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., "Modeling and control of a marine current turbine driven doubly-fed induction generator", *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 1, pp. 1-11, January 2010.
- [BEN 10b] BENELGHALI S., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., "Comparison of PMSG and DFIG for marine current turbine applications", *Proceedings of ICEM'10*, pp. 1-6, Rome, Italy, September 2010.
- [BEN 10c] BENELGHALI S., BENBOUZID M.E.H., AHMED-ALI T., CHARPENTIER J.F., "Highorder sliding mode control of a marine current turbine driven doubly-fed induction generator", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 402-411, April 2010.
- [BEN 11] BENELGHALI S., BENBOUZID M.E.H., CHARPENTIER J.F., AHMED-ALI T., MUNTEANU I., "Experimental validation of a marine current turbine simulator: application to a PMSG-based system second-order sliding mode control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 118-126, January 2011.
- [BER 08] BERNITSAS M.M., RAGHAVAN K., BEN-SIMON Y., GARCIA E.M.H., "VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 130, no. 4, 2008.
- [BRO 86] BROCHIER, G., FRAUNIE, P., BÉGUIER, C., PARASCHIVOIU, I., "Water channel experiments of dynamic stall on darrieus wind turbine blades", *Journal of Propulsion*, vol. 2, no. 5, pp. 445-449, September-October 1986.
- [BRY 04] BRYDEN I.G. et al., "Choosing and evaluating sites for tidal current development", *Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 218, no. 8, pp.

- 567-578, 2004.
- [DRO 10] DROUEN L., *Machines électriques intégrées à des hélices marines: Contribution à une modélisation et conception multi-physique*, PhD Thesis, ENSAM ParisTech, December 2010.
- [EU 96] EU COMMISSION, *The exploitation of tidal marine currents*, Report EUR16683EN, 1996.
- [FRI 02] FRIDMAN L., LEVANT A., "Higher order sliding modes", Chapter 3 in *Sliding Mode Control in Engineering*, Marcel Dekker, Inc., pp. 53-101, 2002.
- [GLA 35] GLAUERT, H., *Airplane propellers*, in DURAND W.F. (ed.), *Aerodynamic Theory*, vol. 4, Division L, Julius Springer, Berlin, pp. 169-360, 1935.
- [HAM 93] HAMMONS T.J., "Tidal power", *Proc. IEEE*, vol. 3, no. 8, pp. 419-433, March 1993.
- [HUN 88] HUNT, J.C.R., WRAY A.A., MOIN, P., "Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows", *CTR-S88*, pp. 193-208, 1988.
- [JOH 06] JOHNSTONE C.M. et al., "EC FPVI co-ordinated action on ocean energy: a European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 191-196, 2006.
- [KHA 09] KHAN M.J., BHUYAN G., IQBAL M.T., QUAICOE J.E., "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review", *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823-1835, October 2009.
- [KIR 05] KIRKE B., *Developments in ducted water current turbines*, [http://www.cyberiad.net/library/pdf/bk\\_tidal\\_paper25apr06.pdf](http://www.cyberiad.net/library/pdf/bk_tidal_paper25apr06.pdf), 2005.
- [LAN 86] LANEVILLE A., VITTECOQ P., "Dynamic stall: The case of the vertical axis wind turbine", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 108, pp. 140-145, 1986.
- [LEG 08] LE GOURIERES D., *Les éoliennes: Théorie, Conception et Calcul Pratique*, Moulin Cadiou, France, 2008.
- [MAC 72] MC CROSKEY W.J., "Dynamic stall on airfoils and helicopters



*rotors*”, AGARD

*Paper, no. R595, 1972.*

[PAR 02] PARASCHIVOIU I., *Wind Turbine Design with Emphasis on the Darrieus Concept,*

*Polytechnic International Press, Montreal, Canada, 2002.*

[SAH 06] SAHA U.K., JAYA RAJKUMAR M., “*On the performance analysis of Savonius rotor*

*with twisted blades*”, *Renewable Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1776-1788, September 2006.

[WOR 78] WORSTELL M.H., *Aerodynamic Performance of the 17-m Diameter Darrieus Wind*

*Turbine*, Sandia Report AND78-1737 l, September 1978



## پیمپول بریهات<sup>۱</sup>: توسعه‌ی اولین

### مجموعه‌ی جزر و مدی در فرانسه

#### ۹-۱ مقدمه و مفهوم

در این فصل مراحل مختلف توسعه‌ی اولین مجموعه‌ی جزر و مدی در آب‌های فرانسه پوشش داده می‌شوند. اهداف پروژه و مقادیر آماری مشخصه مورد بحث قرار می‌گیرند.

ما فرآیند انتخاب سایت، نصب ماشین‌ها و اتصال دوباره‌ی آن‌ها به زمین را در این جا توضیح می‌دهیم. فعالیت‌های شناسایی در اینجا خلاصه شده‌اند و نتایج و کاربرد آن‌ها در پروژه تأکید شده است. در این فصل انتخاب فنآوری توجیه شده و ما توصیف مختصری از پاسخ انتخابی و توسعه‌های ویژه‌ی پروژه‌ی پیمپول بریهات را ارائه می‌دهیم. سپس ما طرح مزرعه را ارائه می‌دهیم و معیارهای مختلف مورد نظر برای بهبود عملیات آن را از لحاظ مسائل مختلف بررسی می‌کنیم. ما روش تزریق انرژی تولیدشده به شبکه و نظارت بر اثرات محیطی تأسیسات را توصیف می‌کنیم. ما همچنین فرآیندهای مدیریتی را بررسی می‌کنیم و درس‌های آموخته از تجربه را مورد بحث قرار می‌دهیم.

در نتیجه‌گیری بازخورد اولیه خلاصه‌بندی می‌شود و به وضعیت از دید توسعه‌ی صنعتی توجه می‌شود.

---

<sup>1</sup> Paimpol-Brehat

در این فصل به طور هدفمند تحلیل اقتصادی ارائه نمی‌شود، زیرا پروژه یک نمونه‌ی اولیه بدون سود است (در مرحله‌ی پیش از توسعه‌ی صنعتی) و همچنین به دلیل اینکه در فصل ۴ از این کتاب این جنبه‌ها با جزئیات مورد بحث قرار گرفتند.

در سال ۲۰۰۸، EDF تصمیم گرفت تا یک مزرعه‌ی نمایشی احداث کند که هدف آن آغاز بهره‌برداری از انرژی جریان جزر و مدی در آب‌های فرانسه و کمک به دستیابی به اهداف فرانسه در زمینه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر در ۲۰۲۰ است. به دنبال ۴ سال تحقیق و توسعه و مشاوره‌ی گسترده با کاربران دریا و انجمن‌های محیط زیستی، این مزرعه در سال ۲۰۱۲ با یک دوره‌ی آزمایشی در ۲۰۱۱ عملیاتی شده است.

هدف اصلی این پروژه اجرا و آزمایش چهارچوب کاری کلی برای توسعه‌ی چنین پروژه‌ای در هر دو مرحله‌ی ساخت و عملیات است و می‌توان آن را مطابق زیر مطرح کرد:

- آزمایش مجموعه‌ی جزر و مدی با اندازه‌ی واقعی، فراتر از نمونه‌ی اولیه با یک ماشین؛
- تأیید ابزارهای شبیه‌سازی EDF (شامل اثرات ویک و محاسبات مربوط به انرژی قابل تولید)؛
- مطالعات محیطی و نظارت؛
- بهبود کارهای مربوط به نصب فراساحلی؛
- توسعه‌ی کانالی برای مشورت به منظور تضمین مقبولیت پروژه توسط تمامی افراد ذی نفع؛
- توسعه‌ی چهارچوب کاری اداری، قانونی و مالی.

از ابتدا (فازهای پیش از توسعه) این هدف در نظر گرفته شده بود تا پروژه کمترین اخلال در محیط زیست (به ویژه گوناگونی زیستی) و فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی داشته باشد.

پروژه‌ی پیمپول بریهات شامل یک مزرعه‌ی بادی با ۴ ماشین (با ظرفیت نصب  $0.85MW$  در هر ماشین)، مبدل فراساحلی مخصوص زیر دریا، کابل انتقال انرژی به طول  $15km$  - که می‌تواند جریان پیوسته‌ی  $10kV$  را هدایت کند - و یک ایستگاه فرعی تجهیزات بر روی خشکی می‌باشد.

### ۹-۱-۱ انتخاب سایت

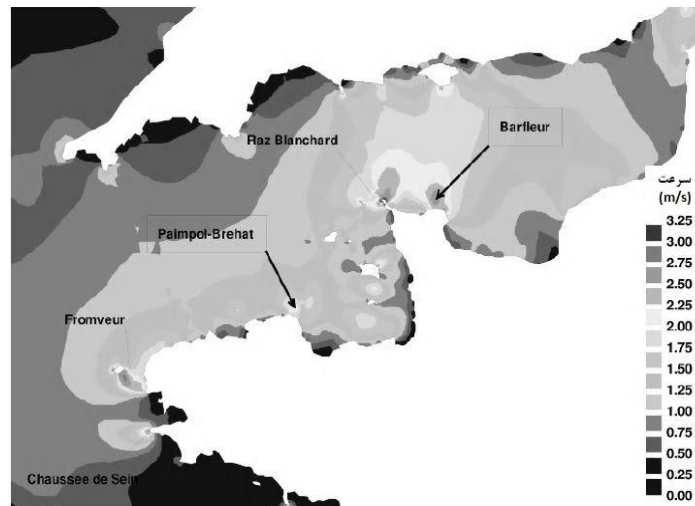
سازمان تحقیق و توسعه‌ی EDF و مرکز مهندسی هیدرو<sup>۱</sup> پژوهش‌ها و برآوردهای امکان‌پذیری انجام دادند تا پتانسیل انرژی جریان جزر و مدی را در آب‌های فرانسه محاسبه کنند. این پژوهش‌های مقدماتی باعث شد تا دو سایت با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار گیرند - یکی در کانتین (بارفلور) و دیگری در شمال بریتانی (بریپات). در ژوئیه‌ی ۲۰۰۸، پیرو این مطالعات امکان‌پذیری و تماس‌های اولیه با افراد ذی‌نفع، EDF تصمیم گرفت تا توسعه‌ی سایت پیمپول بریپات را، عمدتاً به دلیل پذیرش آن و همچنین به منظور بهره‌مند شدن از کمک‌های مالی پیشنهادی دولت محلی بریتانی در اولویت قرار دهد.

بسیار مهم است که توجه کنید که مقبولیت بسیار زیاد پروژه با مشاوره‌ی مداوم از تمامی سهامداران از مرحله‌ی اولیه امکان‌پذیر شده بود. کمیته‌ی شیلات<sup>۲</sup> یکی از بازیگران اصلی در رابطه با پروژه است و تبادلات و توافقات حاصل‌شده با آن برای موفقیت پروژه از اهمیت بالایی برخوردار بود. کمیته‌ی شیلات در رابطه با طرح اولیه نقش بسیار مهمی در رابطه با موقعیت مزرعه (تأسیسات، عمق) و مسیر عبور کابل‌ها برای انتقال توان به خشکی داشت. درخواست‌های بازیگران دیگر (پروش‌دهندگان صدف، خدمات ایالتی مسئول محیط زیست، انجمن‌های زیست‌محیطی، ساکنین کنار دریا، دریانوردان آماتور، مقامات محلی و غیره) نیز به منظور هدایت طرح پروژه در نظر گرفته شدند.

مزرعه در ۱۵ km ساحل (۸ km دور از جزیره‌ی بریپات) در منطقه‌ی سخت‌پوستان با ماهیگیری محدود (فقط ماهیگیری با چوب مجاز است) قرار دارد که بسیار مورد قبول کمیته‌ی ماهیگیران محلی است.

<sup>۱</sup>Centre d'Ingénierie Hydraulique

<sup>۲</sup>The Comité des Pêches

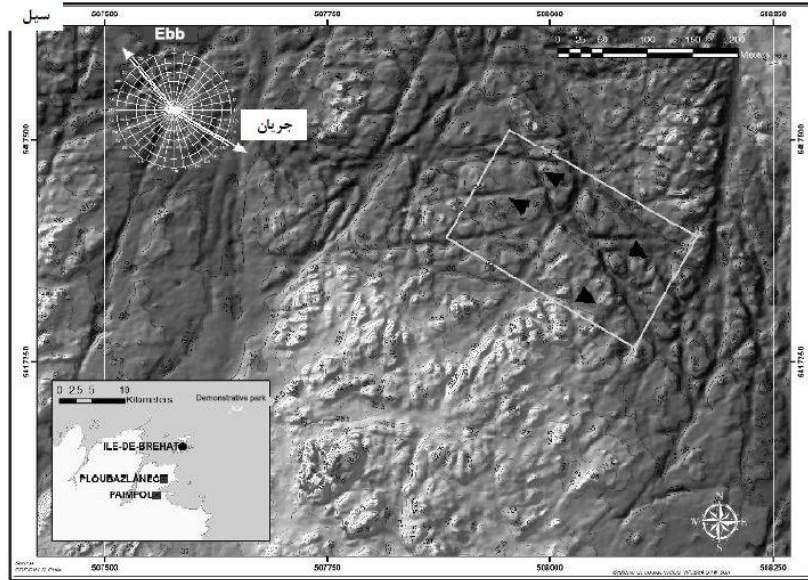


شکل ۹-۱ موقعیت پروژه ی پیمپول بریهات (منبع: EDF)

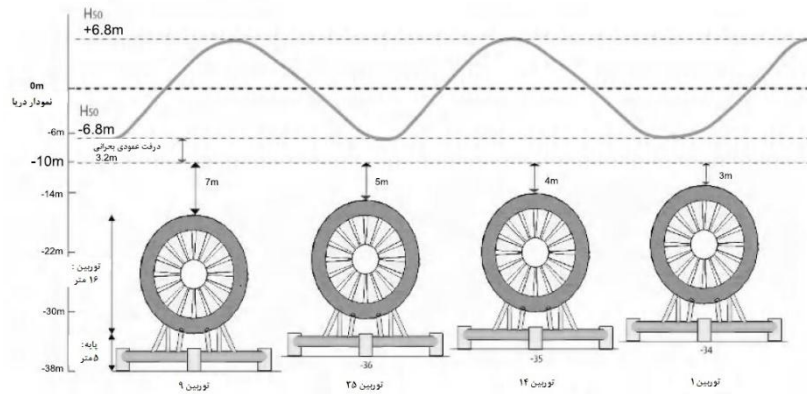
## ۹-۱-۲ انتخاب محلی

نصب ماشین‌ها با این سوال که چگونه آن‌ها را به بهترین حالت قرار داد، یکی از جنبه‌های حساس پروژه بود که در آن محدودیت‌های زیر مطرح گشتند:

- سرعت جریان (استحکام و جهت)؛
  - به حداقل رساندن اثرات ویک؛
  - بهبود توان تولیدی؛
  - محدودیت‌های دریانوردی و به ویژه تور عمودی مورد نیاز برای قایق‌های ماهیگیری؛
  - برجستگی جزئی و تفرانس زاویه‌ای (رول و پیچ) تکیه‌گاه‌های ماشین‌ها؛
  - دقت در عملیات نصب ماشین‌ها بر روی بستر دریا.
- پیکربندی بهینه با استفاده از مدل عددی بستر دریا و مدل دو بعدی جریان (TELEMAC) توسعه داده شده توسط EDF مشخص شده است.



شکل ۹-۲ موقعیت پروژه در بستر عمق‌نما (منبع: EDF). مثلث‌ها بیانگر توربین‌ها و مستطیل‌ها بیانگر (تقریباً  $m$  ۱۵۰ در  $m$  ۲۵۰) محیط منطقه‌ی دریای پوشیده‌شده برای اسکان می‌باشند.



شکل ۹-۳ پیاده‌سازی ماشین‌ها (منبع: EDF)

### ۹-۱-۳ انتخاب مکانی برای مسیر ساحلی و کابل‌ها در آینده

تعدادی از سایت‌های روی خشکی برای اتصال مزرعه‌ی نمایشی به ساحل، روی جزیره‌ی بریهات و زمین اصلی، در پوینته دلاکوئست<sup>۱</sup> و در سطح خلیج لونی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده بودند.

<sup>۱</sup> Pointe de l'Arcouest

<sup>۲</sup> Anse de Launay

نمی‌توان انتخاب میان این گزینه‌ها را صرفاً بر اساس تحلیل اقتصادی انجام داد زیرا عدم دسترسی به اطلاعات مشخصی در زمان انجام پژوهش و دشواری برآورد جنبه‌های غیرفنی (همچون مذاکره‌ی حق عبور یا دستیابی به اجازه برنامه‌ریزی لجستیک) باعث شده بود تا انجام تحلیل فنی-اقتصادی مرسوم غیر ممکن باشد.

بنابراین انتخاب بهترین سایت بر اساس برآورد کیفی محدودیت‌ها و دشواری‌ها و در کنار برآورد هزینه‌ها برای جنبه‌های مناسب انجام شد.

مسائل زیست‌محیطی و مربوط به منظره برای احداث بر روی خشکی و مسیر عبور کابل نیز برای نواحی زیادی از دریای آزاد (ZNIEFF<sup>۱</sup> دریایی<sup>۱</sup> یا گسترش مناطق ساحلی ماسه‌ای-گلی پناهگاه گونه‌های حفاظت‌شده) و همچنین نزدیک ساحل، به خصوص برای گونه‌های گیاهی روی خشکی همچون کلم دریایی<sup>۲</sup> باید در نظر گرفته می‌شدند. بنابراین، بخش بزرگی از نواحی ساحلی کم و بیش از محافظت سازمانی بهره‌مند می‌شوند که باید این امر در نظر گرفته می‌شد (سایت‌های طبقه‌بندی‌شده مطابق قانون ۲ مه ۱۹۳۰، فضاها<sup>۳</sup> جذاب<sup>۳</sup> مطابق ماده L146-6 از قانون برنامه‌ریزی<sup>۴</sup>).

در رابطه با املاک دریایی، با نزدیک شدن کابل‌ها به ساحل ممکن است با کاربردهایی که از قبل موجود بودند همچون مزارع صدف یا اسکله‌ها یا دیگر چیزهایی که در بستر دریا قرار می‌گیرند، همچون کابل‌های الکتریکی، لوله‌های آب آشامیدنی، لوله‌های فاضلاب و غیره تداخل داشته باشند.

در رابطه با املاک روی ساحل، برای مسیر عبور کابل میان خط ساحل و پایگاه به اجازه از مالکان زمین، عمومی یا خصوص، نیاز است. این کابل‌ها مستلزم حق عبور هستند که باعث دشوارتر شدن مذاکره می‌شود. همچنین به طبیعت خاص جزیره‌ی بریهات توجه کنید که از تعداد زیادی خشکی کوچک تشکیل شده است که صاحبان آن‌ها تمایل چندانی به چنین مذاکراتی ندارند. اطراف خلیج لونی با ساکنین اولیه و ثانویه‌ی پولدار احاطه شده است (این ناحیه به عنوان سوربن کوچک<sup>۵</sup> نیز شناخته می‌شود).

پیش‌بینی تأسیسات ایستگاه فرعی تجهیزات نیز ضروری می‌باشد و برای نگه داشتن مبدل‌ها، ترانسفورماتور و خلیج‌های رابط تولید به شبکه حدود  $140 \text{ m}^2$  برآورد شده است. یکپارچگی

<sup>۱</sup> ZNIEFF - مناطق طبیعی با جاذبه‌ی بوم‌شناختی جانوران و گیاهان

<sup>۲</sup> Sea kale

<sup>۳</sup> Espaces Remarquables

<sup>۴</sup> Code de l'Urbanisme

<sup>۵</sup> La Petite Sorbonne



معماری با محیط آن یک نگرانی عمده بود، به طوری که ساخت‌وساز بر روی کمربندی به طول ۱۰۰ m بر روی خشکی ممنوع بود. بنابراین به منظور تسهیل ساخت ایستگاه فرعی و مسیر عبور کابل‌ها، بر یافتن زمین شهری با همکاری شهرداری‌های بخش‌های مورد بحث تأکید شده بود چرا که این افراد بسیار طرفدار پروژه بودند و پشتیبانی با ارزشی در طبقه‌بندی سایت‌های بالقوه و تأمین اسناد ضروری (قانون منطقه‌بندی، نقشه‌ی شبکه‌ها و غیره) فراهم کردند.

دو درخواست رسمی به منظور پژوهش برای اتصال  $2.5MW$  به شبکه مطرح شده بود (یکی در جزیره‌ی بریهات و دیگری در خلیج لونی). این مقدار، حد توان مقرر شده برای پژوهش ساده می‌باشد. فراتر از این مقدار، تمامی گستره‌ی مشخصات ماشین‌ها که تا آن زمان شناخته نشده بودند، باید فراهم می‌گشتند. نتایج نشان داد که چنین توانی در تمامی سایت‌ها امکان‌پذیر است، اما انتظار می‌رفت که به دلیل مشکلات یکنواختی ولتاژ، ظرفیت شبکه‌ی برق و دشواری‌هایی در ایجاد تقویت ضروری، مشکلات عمده‌ای برای سایت جزیره‌ی بریهات در سطوح بالاتر توان رخ دهد. بنابراین این نتایج با مشخصات مزرعه‌ی نمایشی سازگار نبودند که در آن تصریح شده بود باید امکان گسترش آن در آینده و افزایش توان در نظر گرفته شوند.

طبیعت بستر دریا در نزدیکی ساحل به لحاظ هزینه و مزاحمت‌هایی که از کارها ناشی شده بودند تأثیر زیادی بر روی کارهای مورد نیاز برای خاک کردن کابل‌ها داشت. به این دلیل، بسترهای صخره‌ای عامل عمده‌ای در عدم تأیید سایت‌ها بود.

در ورای معیارهای اشاره‌شده در بالا، هزینه‌ی ناشی از فاصله‌ی میان مزرعه توربین‌ها و شبکه‌ی توزیع نیز باید در نظر گرفته می‌شد. این هزینه با سنجش بخش‌های زیر آب (از توربین‌ها تا نقطه‌ی بارگیری) و بخش‌های زمینی (از نقطه‌ی بارگیری تا ایستگاه فرعی و سپس از ایستگاه فرعی تا نقطه‌ی اتصال به شبکه‌ی توزیع) محاسبه گشته است.

با استفاده از نتایج این پژوهش، خلیج لونی، گزینه‌ی شمالی، بهترین گزینه برای نقطه‌ی بارگیری در نظر گرفته شد. معیارهای زیر مطابق انتخاب مسیر عبور کابل‌ها در نظر گرفته شده‌اند:

۱- به حداقل رساندن طول کلی کابل‌ها.

۲- بهترین مکان در آبراه‌های زیر دریا و خط‌القعرها<sup>۱</sup> برای اجتناب از هر نقطه‌ی بلند همچون برآمدگی‌های صخره‌ای.

<sup>۱</sup> Thulweg

این روش از کار بر روی جداول دریایی و سپس انجام پژوهش‌های عمق‌سنجی، مسیریابی محل عبور کابل‌ها بر روی نقشه‌های دقیق تشکیل شده است و باتوجه معیارهای بالا اعمال می‌گردند و دقت فراوان در نواحی که منجر به توقف کار می‌شوند، اجتناب می‌گردد. جریان‌های جزر و مدی (در بالا و پایین آمدن آب) عمود بر قسمت زیادی از طول کابل‌ها بودند و کرنش ناشی از آن نگران کننده بود، اما به لحاظ پایداری مخرب نبود. پژوهش‌های پایداری بر اساس مسیر قطعی کابل‌ها، با در نظرگیری طبیعت کابل‌ها، جریان‌ها و اثرات امواج انجام شدند.

پس از اینکه *EDF* تقاضایی مبنی بر دریافت اجازه‌ی اسکان در قسمت عمومی از دریا را ارائه داد به آن‌ها اطلاع داده شد که مسیر اولیه‌ی مطرح‌شده برای کابل‌ها از ناحیه‌ی مرجانی حفاظت‌شده<sup>۱</sup> عبور می‌کند. این امر باعث شد تا مسیر در ۲۰۰۹ اصلاح شود، و به عملیات شناسایی عمق‌سنجی دیگری با هدف دور زدن این منطقه منجر شود.

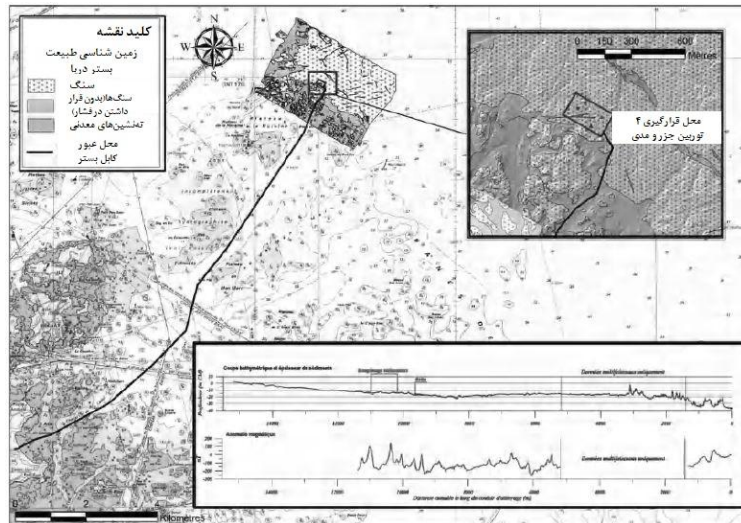
به علاوه، مسیر پیشنهادی از سایت رجیستر در ناحیه‌ی جزیره‌ی سنت ریوم می‌گذشت. با توجه به عدم تأثیرگذاری نوع (ناحیه هیچگاه افشا نشد و کابل‌ها در هر صورت جاگذاری شدند) تصمیم گرفته شد تا این سایت دور زده نشود که به لحاظ اقتصادی گزینه‌ی بهتری بود.

#### ۹-۱-۴ اکتشاف

شرکت *EDF* از ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ کمپین شناسایی جامعی به عنوان بخشی از پژوهش‌های امکان‌پذیری اجرا کرد. این اکتشاف به عنوان بخشی از مطالعات مقدماتی ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ تکمیل شد. در زیر لیستی از پژوهش‌های انجام‌شده ارائه گشته است:

- اندازه‌گیری سرعت جریان با استفاده از *ADCP*ها (سرعت‌سنج صوتی اثر داپلر)؛
- مطالعات عمق‌سنجی، جغرافیایی/ژئوفیزیکی (مغناطیس‌شناسی، انحراف لرزه‌ای، جمع‌آوری نمونه‌های مواد)؛
- مجموعه‌ی اندازه‌گیری‌ها و نمونه‌های محیط زیست (شامل ارزیابی‌های سونار زیر آب)؛
- بازرسی بصری توسط غواصان؛
- اندازه‌گیری سرعت جریان در بستر؛
- مطالعات ژئوتکنیکی: ارزیابی مکان ایستگاه فرعی واقع بر خشکی.

<sup>1</sup> Protected maerl



شکل ۹-۴ نمودارهای عمق‌سنجی و زمین‌شناختی (منبع: EDF)

بررسی‌های انجام‌شده در دریا اطلاعات بسیار خوبی از طبیعت منطقه‌ی پروژه فراهم کردند. عمق سایت تأسیسات ماشین‌ها در بازه‌ی ۳۵ m- تا ۴۰ m- قرار می‌گیرد (نسبت به صفر جداول دریایی). به طور کلی، منطقه‌ی تأسیسات هموار است، اما بلندی‌های جزئی ۱-۲ m وجود دارد. در امتداد طول کابل‌ها بستر دریا تقریباً ناهموار است، اما همچنان می‌توان بلندی‌های زیر آب را دور زد. سراسر زمین یکنواخت است که در ناحیه‌ی ماشین‌ها از گرانیب بدون رسوبات ساخته شده است و به طور موضعی در امتداد مسیر کابل‌ها با رسوبات پوشیده شده است. با نزدیک شدن کابل‌ها به ساحل، از یک منطقه‌ی پیوسته ماسه‌ای عبور می‌کنند.

نتایج اکتشاف در دریا امکان‌پذیری نصب ماشین‌ها و دفن کابل‌ها را در نزدیکی ساحل تأیید کرد (کابل‌ها بر روی بستر در امتداد بقیه‌ی طول خود قرار می‌گیرند). احساس شد که اثرات محیطی پروژه ناچیز بوده و می‌توان آن‌ها را کنترل و با روش مناسب به حداقل رساند.

## ۹-۲ انتخاب فناوری‌ها

### ۹-۲-۱ روش متدولوژی برای توربین‌ها

مسئله‌ی تأمین خدمات یا مواد "رایج" بر مبنای روش سنتی مبتنی بر تعریف مشخصات کارکردی یا فنی انجام می‌شود و سپس مناقصه‌ای اعلام می‌شود که به دنبال آن تأمین‌کننده‌ای که بهترین یا ارزانه‌ترین پیشنهاد را دارد، به کار گرفته می‌شود.

به دلیل اینکه این بخش اخیراً ایجاد شده است و فنآوری مهار انرژی جریان‌های جزر و مدی در مرحله‌ی تکمیلی قرار ندارد این روش انتخابی توربین‌ها با موانع عمده‌ای روبه‌رو شده است: در تعریف مشخصات و انتخاب پیمانکار احداث.

به لحاظ مشخصات، اولین محدودیت‌هایی که پیش می‌آیند آن‌هایی هستند که در کار اولیه‌ی انجام‌شده، در رابطه با ارزیابی پتانسیل انرژی (اندازه و توان ماشین‌ها)، مقبولیت عمومی (فنآوری کاملاً غرق‌شده) یا پژوهش‌های زیست‌محیطی اولیه (نبود آلاینده‌ها، اثر کم بر روی گیاهان و جانوران و غیره) مطرح می‌گردند.

سپس محدودیت‌های صنعتی و آن‌هایی که به محیط دریایی مرتبط هستند، شروع به آشکار شدن می‌کنند: هزینه و موجود بودن تجهیزات دریایی (شناورهای کاری، برای جاگذاری یا بلند کردن ماشین‌ها) و محدودیت‌های مربوط به دسترسی به سایت و تجهیزات (که بر روی راهبردهای نگهداری، مدت زمان میان عملیات‌های نگهداری، قابلیت اطمینان و غیره تأثیر دارند).

بسیار زود آشکار گشت که هیچ فنآوری برای برآورد معیارهای اشاره‌شده در بالا وجود ندارد و باید حد وسطی میان آن‌ها ایجاد شود. با این حال، نبود تجربه‌ی قبلی در EDF، یا حتی پروژه‌های مشابه انجام‌شده توسط دیگر تأمین‌کنندگان انرژی باعث شد تا اولویت‌بندی این معیارها غیر ممکن شود.

بنابراین روش‌های تصمیم‌گیری، همچون ترسیم جدولی از معیارهای مختلف، مقدار برجسته و سنجیده و مالی این معیارها به لحاظ به حداقل رساندن هزینه‌ی کلی در طول عمر مزرعه، اتخاذ شدند. متأسفانه، این روش‌ها به واسطه‌ی عدم تکامل توربین‌های جریان جزر و مدی و ناشناخته بودن روش‌های وارد در نصب و اجرای آن‌ها در مقیاس صنعتی، ناکارآمد بودند. به عبارت دیگر، اگر یک نمونه‌ی اولیه‌ی مفروض به اندازه‌ی کافی برای نصب در مقیاس واقعی در دریا توسعه داده نمی‌شد (که در زمان انجام پژوهش رایج نبود) وسایل و پاسخ‌های اتخاذی برای آن تأسیسات موقت، باعث نمی‌شد تا از محدودیت‌های مربوط به تأسیسات (و هزینه‌ی) چندین ماشین در مقیاس قبل صنعتی، اجتناب شود. همچنان در فنآوری‌ها عدم قطعیت وجود داشت. چرا که همچنان در مرحله‌ی توسعه در آزمایشگاه بودند. بنابراین، این امکان وجود نداشت تا انتخابی قطعی بر اساس تنها هزینه انجام داد.

در رابطه با پیمانکاران ساختمانی، محدودیت‌های مشابه مشخصات فنی در انتخاب نمایندگانی وجود داشت که احتمالاً پیشنهادی برای عرضه داشتند. در حقیقت، نبود مراجع یکسان و تعداد

کم پیمانکاران ساختمانی که تجربه‌ی خوبی با فنآوری مشابه داشتند به این معنا بود که امکان ترسیم لیستی هدفمند از گزینه‌های احتمالی وجود نداشت، به علاوه عدم قطعیت مالی و فنی در رابطه با توسعه‌ی ماشین سازگار با محدودیت‌های مزرعه در پیمول بریهاات وجود داشت.

در نهایت، تعدادی از مطالعات و تفکرات نیز همچنان به موازات در EDF در حال انجام می‌باشند که به طور ویژه به انتخاب سایت پروژه، سایت روی خشکی برای کابل‌ها و وسایل انتقال انرژی به خشکی مربوط می‌شوند که این امر باعث می‌شود تا نتوان به طور قطعی و دقیق لیستی از مشخصات مورد نیاز برای پیشنهاد قراردادی (همچون عمق، حداکثر سرعت جریان، طبیعت بستر دریا و غیره) و بنابراین نتوان مشاوره‌ی رسمی انجام داد.

در نتیجه، پاسخ انتخابی از ساخت پایه دانشی تشکیل شده بود که تا جای ممکن کامل بود و با مقایسه‌ی متقابل از روش تکرار، حذف یک پیمانکار در مقایسه با دیگران، استفاده می‌کرد، زیرا جمع "شهودی" محدودیت‌های مربوط به فنآوری آن‌ها و وضعیت صنعتی آن‌ها از دیگر رقابت‌کنندگان بیشتر بود.

مشکلات پیش‌آمده در این روش به کار و زمان مورد نیاز برای گردآوری این داده‌ها مربوط می‌شود (به لحاظ تعداد زیاد توسعه‌دهندگان ماشین در دنیا) که به نظر می‌رسد با زمان بسیار کم مورد نظر برای بررسی پروژه سازگار نباشد. به علاوه، اغلب این اطلاعات محرمانه بودند یا به مقدار مشخصی از کار نیاز داشتند تا داده‌ها را برای اعمال در پروژه‌ی پیمپول بریهاات استخراج کرد.

بنابراین برای تمرکز کارها بر روی فنآوری‌های بسیار مناسب که پژوهش‌های دقیق را تضمین می‌کردند به انجام طبقه‌بندی مقدماتی نیاز بود. این پیش‌انتخاب بر اساس پژوهش‌های فنی قبلی که توسط بخش توسعه و تحقیق EDF انجام شده بودند قرار داشت و انتخاب به فنآوری‌های اروپایی محدود شده بود (تا برای سرمایه‌گذاری اروپایی مطلوب باشد و روابط تجاری آینده را به لحاظ تخصص در سایت، آزمایش نمونه‌ی اولیه و قرارهای کاری تسهیل کند) که این فنآوری‌ها به اندازه‌ی کافی توسعه داده شده بودند تا با نیازهای پروژه به لحاظ مقیاس زمانی توسعه و قابلیت‌های فنی سازگار باشند.

مدیریت EDF به منظور سهولت در دسترسی به داده‌های مورد نیاز توسعه‌دهندگان تصمیم گرفت تا پیشنهادی را از تیم پروژه دنبال کند که شامل اجرای فرآیند خرید رسمی به عنوان "پیش‌مشاوره" می‌شد (در غیاب فراخوان به مزایده در شکلی صحیح) که به طور علنی و واضح تعهد EDF را برای این پروژه نشان خواهد داد و بحثی را در زمینه‌ای رسمی مطرح می‌کند.

بنابراین اطلاعات بیشتری در دسترس بودند و در نهایت داده‌های جمع‌آوری شده به چندین گروه تقسیم شدند که گروه‌های اصلی آن‌ها به شرح ذیل می‌باشند:

- شایستگی پیمانکار به ویژه در ارتباط با موارد زیر:
- برآورد ظرفیت مالی آن‌ها برای توسعه‌ی توربین‌های جریان جزر و مدی (وضعیت مالی اخیر، کیفیت سرمایه‌گذاران و غیره)،
- برآورد ظرفیت فنی آن‌ها برای توسعه‌ی توربین‌ها (میزان نیروی کار، مهارت، شرکا و غیره)،
- راهبرد سیاسی، توافق‌هایی با تأمین‌کنندگان دیگر انرژی، انگیزه برای کار با EDF، علاقه به مزرعه‌ی نمایشی و غیره؛
- قابلیت فنآوری به ویژه در ارتباط با موارد زیر:
- سهم فنآوری آزمایش شده در مقایسه با فنآوری‌های جدید،
- روش‌های مهندسی استفاده‌شده (سیستم کیفیت، گواهی، جواز و غیره)،
- مشخصات کامل فنی ماشین‌ها (نمونه‌ی اولیه، فنآوری صنعتی و توسعه‌ی فنآوری)؛
- قابلیت فنآوری در پرداختن به محدودیت‌های پروژه‌ی پیمپول بریهات:
- مشخصات فنی،
- وسایل ساخت و نصب،
- محدودیت‌های اتصال،
- سازگاری با مسائل زیست‌محیطی سایت،
- سازگاری مجوز برنامه‌ریزی و بودجه با پروژه‌های صنعتی دیگر پیمانکار؛
- معیارهای اقتصادی به ویژه در ارتباط با:
- عملکرد ماشین‌ها،
- برآورد پتانسیل تولید،
- محدودیت‌های مربوط به نگهداری،

- هزینه‌های نصب و عملیات.

### ۹-۲-۲ نگاهی مقایسه‌ای به فنآوری‌ها

با استفاده از راهبرد اشاره‌شده در بالا و لیست توسعه‌دهندگان بررسی‌شده توسط بخش تحقیق و توسعه‌ی *EDF*، در انتخاب اولیه، ۵ فنآوری تولید شد که باید به دقت آن‌ها را بررسی کنیم:

- همرفست استروم (نروژ)، با ۴ سال تجربه در دریا در شرایط بسیار یکسان با شرایط پمپول بریهای (عمق، سرعت جریان) و از قبل موضوع بررسی فنی مثبت توسط *EDF* بوده است.

- لونار انرژی (انگلستان)، که طراحی آن از نقطه نظر نگهداری آسان جالب توجه بود و اخیراً برای پروژه‌ای بزرگ در کره‌ی جنوبی قرارداد بسته بود ( $300MW$ ).

- *MCT* (انگلستان)، که برای *EDF* شناخته شده است زیرا به مدت چندین سال از طرف *EDF* انرژی حمایت مالی می‌شد و در نتیجه تعهد کاری داشته است. این فنآوری یکی از اولین توربین‌های جریان جزر و مدی بود که تا به حال به شبکه‌ی برق متصل شده است و یکی از قدرتمندترین‌ها در زمان انجام پژوهش بود.

- *OpenHydro* (ایرلند)، که طراحی ساده و بسیار جالب عرضه کرد و دارای تجربه‌ی اولیه از انجام آزمایش در دریا با اتصال به شبکه‌ی برق می‌باشد.

- *TGL* (انگلستان)، که طراحی جالب در زمینه‌ی نگهداری عرضه کرد و شرکای صنعتی بسیاری شامل رولز رویس دارد.

جدولی برای این پنج پیمانکار ترسیم شده است که تمامی اطلاعات و مشخصات ماشین‌ها را مبتنی بر داده‌های جمع‌آوری‌شده در حین رخدادهای اولیه و بررسی‌های فنی و سپس در حین رخدادهای رسمی گردآوری می‌کند و هدف آن پر کردن جاهای خالی و دستیابی به اطلاعات محرمانه است که در غیر اینصورت در دسترس قرار نمی‌گرفتند (دست‌آوردها، هزینه‌ها، توصیف اجزای مشخص و غیره).

این ۵ فنآوری به صورت خلاصه در زیر ارائه شده‌اند:

همرفست استروم

ماشین توسعه داده شده توسط همرفست از تجربه ی بسیار زیادی بهره مند است، زیرا نمونه ی اولیه ی  $300kW$  به مدت ۴ سال کار کرده و به شبکه متصل بود. همرفست از حمایت استاتویل<sup>۱</sup> برای تمامی تجهیزات فراساحل برخوردار بود.



شکل ۵-۹ شماتیکی از توربین همرفست استروم (منبع: Euroviews)

متأسفانه همچنان ماشین نصب شده به تنظیمات بسیاری نیاز دارد تا بتوان آن را با تأسیسات صنعتی با توان بالا و به ویژه با شرایط سایت بریهات سازگار کرد. با این حال، شبهاتی در رابطه با ظرفیت مالی و فنی همرفست برای انجام این تنظیمات باقی ماند (تیم کوچک توسعه). بنابراین هیچ توسعه ی عمده ای انجام نشده بود تا اینکه نمونه ۴ سال قبل در آب قرار داده شد و جدا از نمونه ی  $1MW$  که برنامه ریزی شده است تا در  $EMEC^2$  در اسکاتلند نصب گردد هیچ اشاره ای به پروژه ی در مقیاس صنعتی در آینده نشده است.

### لونار انرژی

نمونه ی اولیه ی لونار انرژی دارای طرحی جالب با توربین داکت دار بود که اجازه می داد تا مقدار زیادی از انرژی به لطف اثر ونتوری و طرح نگهداری بسیار دقیق مهار شود و محفظه ای قابل خروج دارد که شامل تمامی اجزای مکانیکی است و امکان انجام نگهداری در خشکی را فراهم می کند.

<sup>۱</sup> Statoil

<sup>۲</sup> EMEC - مرکز انرژی دریایی اروپا





شکل ۹-۶ شماتیکی از توربین‌های لونا انرژی (منبع: LunarEnergy)

متأسفانه لونا انرژی هیچ آزمایش واقعی در دریا انجام نداده بود که این امر باعث عدم قطعیت بسیاری می‌شد تا حدی که این ماشین خاص که دارای پمپ و موتور هیدرولیک به عنوان وسیله‌ی گیربکس میان چرخ و ژنراتور است باید تنظیم می‌شد. در رابطه با سیستم رابط میان قطعات ثابت و متحرک و همچنین طرح سه‌پایه (با اینکه اندازه‌ی محدودی داشت ولی به شدت سنگین بود) سوالات جدی مطرح بود. این وضعیت پیشرفت با مقیاس زمانی مورد نظر برای پروژه به ویژه با تقاضاهای اداری با مشخصات دقیق سازگاری نداشت.

این معایب با رقابت برای پروژه‌ی بزرگ کره‌ی جنوبی ( $300MW$ ) که به وضوح اولویت بیشتری نسبت به پروژه‌ی پیمپول بریها داشت، ترکیب شده بود.

#### MCT-

فناوری MCT تجربه‌ی بسیار زیادی با نمونه‌ی سیفلو<sup>۱</sup>  $300kW$  داشت که در طول دوره‌ی ۳ ساله در دریا مورد پژوهش قرار گرفته بود و همچنین تجربه‌ی زیادی با نصب نمونه‌ی سیژن  $1200kW$  در مه ۲۰۰۸ داشت که انتظار می‌رفت در ماه بعد به شبکه‌ی برق متصل شود. این تجربه‌ی زیاد به این معنا بود که MCT تیمی با مهارت کافی داشت و می‌توانست راهبردی واقع‌گرایانه برای توسعه ترسیم کند.

علی‌رغم این موضوع، همچنان شبهاتی درباره‌ی ثبات مالی شرکت، و تعدادی مشکل غیر قابل حل همچون نبود توسعه‌ی کوتاه‌مدت مدل کاملاً مستغرق و بدون نیاز به حفاری (معیارهای انتخابی عمده EDF) و سود محدود از نقطه نظر پیمانکار در مزرعه‌ای با فقط ۴ ماشین وجود داشت.

<sup>۱</sup> SeaFlow



شکل ۷-۹ شماتیکی از زمین توربین های MCT (منبع: MCT)

#### **OpenHydro-**

همانند MCT، OpenHydro مقدار مشخصی تجربه داشت زیرا نمونه ی متصل به شبکه ی توزیع به مدت ۲ سال در سایت آزمایشگاهی EMEC در معرض آزمایش بود.



شکل ۸-۹ شماتیکی از توربین های OpenHydro (منبع: OpenHydro)

ارزش عمده ی این فناوری در طرح ساده ای بود که تعداد قطعات مورد نیاز برای نگهداری را به کمترین حالت کاهش می داد. ماشین هیچ تقویت کننده ای، سیستم خنک کننده، گیربکس مکانیکی یا وسیله ی الکترونیکی توان و غیره نداشت. سیستم پایه ی جاذبه ای که توسط لنج مخصوص شرکت قرار داده شده بود به موجود بودن کشتی های سنگین مخصوص بالابری محدود نشده بود. در نهایت، حفره ی مرکز ماشین برای سایت پیمپول بریئات با ارزش بود چراکه پستانداران دریایی از آن عبور می کردند.

به طور برعکس، اتصال این ماشین‌ها به شبکه‌ی برق مستلزم پاسخی ویژه بود تا آن‌ها را به هم و به ساحل به فاصله‌ی  $15\text{ km}$  از آن متصل کند و در آن آلترناتورها با ولتاژ و فرکانس مختلف کار کنند.

### TGL

همانند لونا انرژی، TGL تجربه‌ی واقعی نداشت که این امر باعث شد تا شبهاتی در مورد طرح کلی نسبتاً پیچیده به وجود آید (پایدارسازی با ستون‌های حفاری شده، سیستم اتصال الکتریکی زیر آب، سیستم هدایت برای کنترل موقعیت توربین و غیره) و به وجود سیالات مختلف و دشواری‌هایی در نصب ناسل شناور منجر شد.



شکل ۹-۹ شماتیکی از توربین‌های TGL (منبع: TGL)

اگرچه TGL از حمایت شریک بزرگ صنعتی و مالی خود رولز رویس بهره‌مند بود اما نصب نمونه‌ی اولیه که تنها برای سال بعد برنامه‌ریزی شده بود با مقیاس زمانی پروژه تناقض داشت. خطرات زیست‌محیطی (حفاری، خطر آلوده‌سازی و غیره) نیز ظاهراً بسیار بزرگ بودند.

در نهایت TGL تنها با این شرط به پروژه‌ی پیمپول بریهاات علاقه داشت که حق تصمیم‌گیری درباره‌ی توربین‌های جریان جزر و مدی در فرانسه را داشته باشد که EDF نمی‌توانست به هیچ وجه تضمین کند.

### ۹-۲-۳ نتیجه‌گیری

به دنبال تحلیلی دقیق مسائل نگهداری و قابلیت اطمینان وابسته به طرح توربین‌ها، خطرات مربوط به نصب آن‌ها، محدودیت‌های زیست‌محیطی ویژه در اطراف سایت پیمپول بریهاات و

ظرفیت توسعه دهندگان برای پذیرش مجوز برنامه ریزی و توسعه ی مد نظر، در اواخر ۲۰۰۸ فنآوری *OpenHydro* انتخاب شد.

### ۹-۲-۴ انتخاب توپولوژی اتصال

مسئله ی اتصال توربین های جریان جزر و مدی به شبکه ی توزیع یکی از مسائل دشوار است، زیرا پاسخ های بالقوه ی بسیاری وجود دارد و محدودیت های بیشمار نیز باید برای یافتن پاسخی بهینه در نظر گرفته شوند.

اتصال ۸ توربین به شبکه ای در فاصله ی  $15\text{km}$  از آن با کم کردن هزینه ها و خطرات مربوط به خود ماشین ها و همچنین نصب و نگهداری آن ها چالشی عمده است.

در حقیقت، مزرعه ی نمایشی کنترل شده توسط *EDF* از چهار توربین *OpenHydro* ساخته شده است که در فرکانس های مختلف ولتاژ متفاوتی تولید می کنند (اما همچنان مشخصات دقیق آن ها تعریف نشده بود و ممکن بود بر حسب مقدار بهینه تغییر کند) و باید این مزرعه قابلیت تبدیل شدن به مرکز آزمایشی با ۴ توربین اضافی کمی را داشته باشد که مشخصات آن ها به طور کامل در زمان انجام پژوهش ها نامشخص بود.

از طرف دیگر، شبکه ی توزیع  $20\text{kV} - 50\text{Hz}$  محدودیت های تغییرناپذیری در ظرفیت دریافت، پایداری ولتاژ، هارمونی، جذب توان راکتیو و غیره وسیله ی اتصال داشت.

بنابراین، به تعدادی از قطعات میان ماشین ها و شبکه نیاز بود تا ولتاژ را تقویت کرد، آن را در فرکانسی دقیق تبدیل کرد، به منظور محدود کردن هارمونیک آن را فیلتر کرد و تولید یا دریافت توان راکتیو را مدیریت کرد. مشکلاتی تماماً در یافتن بهترین مکان برای این قطعات، به طور مستقیم در خود ماشین ها، یا در ایستگاه فرعی فراساحلی یا زمینی قرار داشت، مزایا و معیاب ذاتی هر پاسخ و همچنین توپولوژی ارتباط نیز باید در نظر گرفته می شدند که ممکن بود (یا برعکس) قرارگیری قطعات مشخصی را در کنار هم میسر کند.

اتصال مجزای هر ماشین به زمین که برای یک نمونه گزینه ای معتبر بود به دلیل فاصله و هزینه ی منابع، قرار دادن و ایجاد ثبات در کابل های زیر دریا نمی توان آن را برای بیش از ۲ ماشین در نظر گرفت.

بنابراین پاسخ های باقی مانده دربارهِ اتصال ماشین ها به صورت خطی یا به شکل ستاره به یک ایستگاه فرعی مشترک بودند.

اولین پاسخ-اتصال ماشین ها به صورت خطی مشکلات بسیاری را ایجاد می کرد:

ابتدا این اتصال مستلزم توسعه‌ی کابل‌ها و رابط‌ها بود تا توان حداکثر انتقال پیدا کند؛ بنابراین؛ رابط‌های با ولتاژ و توان بالا. ثانیاً، به این معنا بود که قطعات اشاره‌شده در بالا باید در هر ماشین نصب می‌شدند که شامل توسعه‌های ویژه‌ای بود و با استفاده از ساده‌ترین و قابل اطمینان‌ترین ماشین‌های ممکن تناقض داشت. در نهایت، این اتصال مشکلاتی در نگهداری توربین‌ها به وجود می‌آورد: در جاگذاری و جاگذاری مجدد ماشین‌های مجهز به ۲ کورد اتصال<sup>۱</sup>، مشکلات مربوط به پیوستگی رابط‌های سرویس (کنترل از راه دور شبکه، کنترلرهای کابلی اضطراری و تأمین اجزای الکتریکی کمکی) و خاموش کردن بخشی از مزرعه به منظور انجام کار نگهداری بر روی توربین‌ها، که اثراتی در موجود بودن و قابلیت اطمینان کل مزرعه داشتند.

پاسخ دوم- اتصال ماشینی به یک ایستگاه مشترک به صورت ستاره‌ای - می‌توان آن را برای ایستگاه فرعی واقع بر روی زمین بالای آب، ایستگاه فرعی شناور یا ایستگاه فرعی زیرآب در نظر گرفت. اولین گزینه (ایستگاه فرعی واقع در زمین خارج از آب) در سایتی مرتفع به فاصله‌ی چند کیلومتر محتمل بود، اما معایب یکسانی با پاسخ اتصال خطی دارد (مسلماً با کابل‌های تکی که طول آن‌ها کمتر خواهد بود اما به هر حال زیاد است) و همچنین مستلزم تعداد زیادی کار پرهزینه برای فونداسیون است و فلسفه‌ی تأسیسات کاملاً غیر قابل دید را نقض می‌کند. علاوه بر موضوع مقاومت در برابر شرایط دریا و خستگی کابل‌های رابط، علی‌رغم طبیعت ابتکاری ایستگاه واقع بر سازه‌ی شناور، ملاحظات یکسانی برای این گزینه اعمال شدند.

با این حال، این پاسخ مزایایی همچون احتمال اتصال انواع مختلفی از نمونه‌ها به سیستم در زمانی دیگر، کشیدن اجزای تبدیل و کنترل توان بهینه با مبدل‌های واسط را دارد.

در نهایت، توپولوژی اتصال انتخابی باید طوری باشد که مستقیماً خروجی آلترناتور هر ماشین را به مبدل  $AC/DC$  از نوع  $AFE$  متصل کند و نقطه‌ی کارکرد بهینه هر ماشین را مدیریت کند. این وسایل نصب‌شده در ایستگاه فرعی تبدیل "زیر آبی" به یک جعبه تقسیم مشترک<sup>۲</sup> متصل می‌شدند و سپس مبدل  $DC/DC$  جریان پیوسته را به  $10kV$  تقویت می‌کرد تا به "ایستگاه فرعی منبع" در خشکی انتقال داده شود. جریان ورودی به این ایستگاه فرعی به  $50 Hz$  تبدیل می‌شد و ولتاژ به  $20 kV$  افزایش داده می‌شد تا امکان تزریق آن به شبکه‌ی توزیع فراهم شود.

انتخاب مسیر عبور در جریان پیوسته به دلیل طبیعت شبکه‌ی توزیع که مزرعه باید به آن متصل باشد و محدودیت‌های فضای مواد جبرانی در "ایستگاه فرعی تبدیل" اساساً به مسائل مدیریت توان راکتیو بستگی دارد.

<sup>1</sup> Umbilical cords

<sup>2</sup> Common busbar

## ۹-۲-۵ انتخاب راهبرد اتصال

با تعریف توپولوژی اتصال، ضروری بود تا وسایل اتصال کابل اصلی به "ایستگاه فرعی تبدیل" و توربین‌ها به ایستگاه فرعی را تعریف و توصیف کرد. باز هم در اینجا پاسخ‌های محتمل بسیاری وجود داشت اما تعدادی از مسائل کاربرد آن‌ها را محدود می‌کردند.

برای اتصال توربین‌ها به ایستگاه فرعی در نظر گرفته شده بود تا از رابط‌هایی استفاده شود که در هوای آزاد ("جفت خشک"<sup>۱</sup>) یا در آب ("جفت تر"<sup>۲</sup>) استفاده شود و همچنین از یک یا دو رابط در هر اتصال استفاده کرد. این مسائل به جابجا کردن تجهیزات (نصب در بستر دریا و بازیابی) با یا بدون طول معینی از کابل‌ها و مشکلات قرار دادن کابل‌ها با توجه به کشش و موقعیت آن مربوط می‌شدند.

این روند در ماشین دارای یک کابل با وجود جریان‌های قوی در منطقه - حتی در جزر و مد کم - و مشکلات قرار دادن تجهیزات با دقت مورد نیاز، پیچیده بود. با این حال، این عملیات نسبتاً رایج بود و تیم‌ها می‌توانستند از تجربه‌ی قبلی استفاده کنند.

با این حال، قرار دادن ایستگاه فرعی تبدیل در سر جای خود در بستری با ده‌ها کابل از قبل قرار گرفته گزینه‌ی ساده‌ای نبود و باید پاسخی ویژه برای آن یافت می‌شد. در حقیقت، هر کابلی باید در بستر دریا قرار داده می‌شد در حالی که به کشش مشخص - کمتر از حدود مکانیکی و مقدار حداقل به منظور اجتناب از خراب شدن اما به اندازه‌ی کافی زیاد تا از گیر کردن جلوگیری شود - و مسیر دقیق اتصال ماشین باید توجه شود. برای وسایل متعارف تأسیسات به شناوری نیاز است که به اندازه‌ی کابل‌ها جرثقیل داشته باشد و مکرراً بار را جابجا کند.

پاسخ دیگری که شامل پیچیدن کابل‌ها به دور ایستگاه فرعی تبدیل قبل از قرار دادن در آب بود به صورت گسترده مورد پژوهش قرار گرفته بود و برای تأسیسات اولیه پاسخ جالبی به نظر می‌رسید اما برای عملیات نگهداری مستلزم در آوردن تمامی کابل‌های روی بستر بود تا آن‌ها را قبل از قرار دادن در آب دوباره بر روی ایستگاه فرعی نصب کرد.

در نهایت، پاسخی که انتخاب شد شامل قرار دادن هر کابل به صورت مجزا از نقطه‌ای ثابت بود، پایه‌ای ثابت که کابل‌ها را می‌توان به آن متصل کرد، و قبل از اینکه اتصالات را وصل کنیم و کل سیستم را در آب قرار دهیم، دوباره آن را با جرثقیل به لنجی که ایستگاه فرعی تبدیل را

<sup>1</sup> Dry mateable

<sup>2</sup> Wet mateable

قرار می‌دهد، برگرداند. با فرض اینکه تمامی کابل‌هایی که به توربین وارد می‌شوند تماماً در یک جهت قرار دارند و صفحه‌ای همگن را شکل می‌دهند می‌توان با توجه به محدودیت‌های کششی، آن‌ها را دستکاری کرد. در خود ماشین‌ها نیز (که طول مشخصی از کابل بیرون‌زده در آن قرار داده شده) عملیات اتصال شامل گرفتن یک یا دو انتهای کابل می‌شود که رابطی برای اتصال آن‌ها دارد و سپس آن‌ها را به آب دوباره بازگرداند.

### ۹-۲-۶ پیشرفت‌های فنی

در هر مرحله از پروژه به میزان مشخصی از پیشرفت و طرح پاسخ‌های ابتکاری نیاز است تا به طبیعت ابتکاری فناوری‌ها، محیط خطرناک دریایی، مجهولات و خطرات وارد در پاسخ‌های مفروض و بودجه‌ی محدود پرداخت.

در رابطه با خود توربین‌ها با نصب پاسخ‌های جدید در مدل‌های کوچک با قطر  $6m$ ، آزمایش‌شده در *EMEC* اسکاتلند توسط تولیدکننده و نمونه‌ای به قطر  $10m$ ، آزمایش‌شده در خلیج فاندی کانادا، پیشرفت‌های بسیاری حاصل شده است. اساساً هر قسمت بررسی می‌گردد تا قابلیت اطمینان آن، بازده و هزینه و همچنین مسائل مربوط به تولید، اثرات زیست‌محیطی یا عملیات نگهداری در آینده در دریا یا خشکی بهبود یابند.

در سطح مکانیکی، چالش‌های عمده به رفتار یاتاقان‌های پلیمری خارجی که نیروی محرک چرخ را جذب می‌کنند - با هدف کاهش اصطکاک و فرسایش - و امکان‌پذیری تولید مربوط می‌شوند تا به ابعاد حفره‌ی آب توجه شود که در مقایسه با اندازه‌ی روتور به شدت کاهش پیدا کرده است.

مشکلات اصلی در رابطه با قطعات الکتریکی به توسعه‌ی سیم‌پیچ‌های ضد آبی (زیرا آن‌ها در تماس مستقیم با آب دریا خواهند بود) مربوط می‌شد که توانایی کار با قابلیت اطمینان بالا و سطح بالا را داشتند.

جنبه‌های هیدرولیکی نادیده گرفته نشدند و اجزای دخیل در بازده هیدرولیکی توربین‌ها موضوع فرآیند ابتکاری بهینه‌سازی مبتنی بر محاسبات مدل‌سازی سه‌بعدی بودند. در حقیقت، روش انتخابی بر پایه‌ی تعیین پارامترهای هندسی و جستجوی مقدار بهینه‌ی همه‌ی پارامترها و استفاده از الگوریتم پیدایشی و تابع "هدف" توان حداکثری که قابل تولید می‌باشد، قرار دارد. این روش سال‌ها موضوع پژوهش در آزمایشگاه‌های دانشگاهی همچون دانشگاه فنی ملی آتن یا *INP* (موسسه‌ی فناوری) گرنوبل بوده است و توسط تولیدکنندگان توربو ماشین‌ها به کار می‌رود. با این ویژگی‌ها این تنها روشی است که هندسه‌ای استثنائی مانند توربین‌های

*OpenHydro* فراهم می‌کند و مرکز باز آن‌ها باید اصلاح شود. با استفاده از این روش، سطوح بهینه‌ی توان و تولید بررسی می‌گردند که نتایج به شکل داده‌های هندسی برای پره‌ها می‌باشند و به ابعاد و نتوری‌های داخلی و خارجی وابسته می‌باشند. بنابراین، مقدار طول پره‌ها با استفاده از مجموعه‌های صحیح پارامترهای فراهم‌شده از شبیه‌سازی‌ها و ارائه‌شده به عنوان منحنی‌های گرایش بهینه‌سازی شدند تا هزینه را محدود و قدرت آن را افزایش دهند. نیروی درگ با هدف کاهش وزن تکیه‌گاه و عملاً تلفات صفر در توان خروجی حداکثر در نظر گرفته شده است.

در رابطه با ایستگاه فرعی تبدیل که در نوع خود اولین در جهان است، مشکل آن در یافتن اجزای بیشمار با فنآوری پیشرفته در فضای کوچک است تا وزن تعادلی آن محدود شود در حالی که خنک‌کاری سیستم و دسترسی به آن برای نگهداری تضمین گردد. این فنآوری به دلیل مشکلات دسترسی به سایت و هزینه‌ی نگهداری یا عملیات تعمیر باید به طور بی‌نظیری قابل اعتماد باشد. سیستم‌های حفاظت و اتصال به زمین با مشخصات ویژه‌ی ماشین‌های متصل به یک جعبه تقسیم DC سازگار شده‌اند و تعداد قطعات اضافی به صورت فراوان نصب‌شده در ماشین‌ها بررسی گشته‌اند تا میزان دسترسی ثابت تضمین گردد. در نهایت، *EDF* مدلی بسیار دقیق از کل سیستم تخلیه تولید کرد تا مراحل مختلف عملیات و اشکالات محتمل را شبیه‌سازی کند و در نتیجه انتخاب‌های فنی انجام‌شده را تأیید کند.

اگرچه در خشکی توجه ویژه‌ای به حذف آلودگی نويز در منطقه‌ای بسیار آرام شده بود اما طراحی ایستگاه فرعی منابع متداول بود.

## ۹-۳ مشخصات فنی پروژه و توان قابل تولید

### ۹-۳-۱ مزرعه‌ی توربین‌ها

مزرعه‌ی نمایشی پیمپول بریهات در فاز اول از ۴ توربین جریان جزر و مدی *OpenHydroOCT-16* ساخته خواهد شد.

مشخصات خارجی اصلی این ماشین‌ها عبارتست از ارتفاع ۲۰ m و ابعاد ۲۷\*۲۵ m به ازای وزن کلی نزدیک به ۹۰۰ تن که ۴۵۰ تن از آن برای وزن تعادل است تا پایداری توربین‌ها در تمامی شرایط جریان‌ها تضمین گردد. ونتوری خارجی برای بخش هیدرولیکی به قطر خارجی ۱۶ m و طول تقریبی ۱۷ m است در حالی که مخروط سوراخ مرکزی به قطر ۶ m و دارای اریفیس‌ی به قطر ۴ m است.

به لحاظ الکتریکی روتور مغناطیس دائم به قطر ۱۶m شامل ۲۸۸ قطب خواهد بود که با سیم-پیچ‌های استاتور برهمکنش خواهند داشت که حفره‌ای کوچک ۱۰mm دارند و آب دریا از آن



عبور می‌کند. خروجی آلترناتور که ولتاژ و فرکانس آن با سرعت جریان جزر و مدی تغییر می‌کند به ۶۹۰ V محدود خواهد شد.

با این مشخصات انتظار می‌رود که توان در سرعت  $2.9 \text{ m/s}$  حدوداً  $85 \text{ kW}$  باشد که انتظار می‌رود برای جزر و مدهای بی‌نظیر بهاری در سطح محور توربین بیانگر سرعت حداکثر جریان (میانگین ۱ دقیقه) باشد. در این توان سرعت چرخش توربین بیشتر از  $12 \text{ rpm}$  نخواهد بود.

### ۹-۳-۲ محاسبات توان قابل تولید

#### مدل هیدرودینامیکی

شرایط جریان در سایت‌های آزمایشی با استفاده از مدل محلی هیدرودینامیکی ساخته شده با نرم‌افزار *TELEMAC-2D* تعیین می‌گردند که معادلات سنت-ونانت<sup>۱</sup> دو بعدی را حل می‌کند. برهمکنش میان میدان جریان و توربین‌ها در نظر گرفته می‌شوند و اثرات ویک مدل‌سازی می‌گردند. روش انتخابی برای برآورد مهار انرژی توسط هر توربین از نظر اثرات ویک توربین‌های دیگر (یعنی تلفات انرژی سیال به دلیل حضور توربین‌ها) شامل مدل‌سازی حضور توربین در جریان به وسیله نیروی می‌شود که با حرکت سیال مخالفت می‌کند و باعث از دست رفتن توان آن می‌شود.

فرضیه‌ها و تقریب‌های اصلی برای مدل انتخابی مطابق ذیل می‌باشند:

- استفاده از ضرایب توان *CP* و درگ *Cd* که ثابت هستند و دور از سایت به سرعت بستگی ندارند؛

- تمامی توربین‌های مزرعه عمود بر جهت جریان غالب هستند (فرض می‌شود که کم و بیش در سایت ثابت باشند) بنابراین محورهای چرخش آن‌ها در امتداد جهت جریان غالب قرار می‌گیرند؛

- در محاسبه نیروی محرک ناشی از جریان روی پره‌های توربین‌ها - و در نتیجه برابر و مخالف نیروی اعمالی به میدان جریان - تنها مولفه‌ی سرعت جریان دور دست در نظر گرفته می‌شود و روی محور چرخش روتورها تصویر می‌شود. به طور مشابه، در محاسبه توان قابل استخراج تنها مولفه‌ی سرعت جریان "دور دست" روی محور چرخش روتورها در نظر گرفته می‌شود. ما همچنین فرض می‌کنیم که نیروی ناشی از جریان روی پره‌های توربین‌ها مطابق محور چرخش جهت‌گیری می‌کند؛

<sup>1</sup> Saint-Venant

- می توان سرعت جریان را در سطح روتور از سرعت میانگین عمودی (محاسبه شده از طریق مدل هیدرودینامیکی *TELEMAC-2D*) و با اعمال پروفیل سرعت نظری که از قانون توان  $1/7$  پیروی می کند و در آن محور چرخش توربین  $13m$  بالای بستر دریا قرار دارد، استنتاج کرد:

$$V_{13m} = \frac{8}{7} V_{moy} \left( \frac{13}{H} \right)^{1/7}$$

که در آن  $H$  ارتفاع موضعی آب - یا عمق است (به متر).

متغیرها مطابق زیر نمایش داده می شوند:

-  $p$  توان فراهم شده برای روتور ژنراتور توربین است؛

-  $V$  تصویر جبری جریان در جهت عمود بر توربین است؛

-  $S$  سطح ورودی و نتوری است،

-  $\rho$  چگالی آب است؛

-  $C_p$  ضریب توان است؛

-  $C_d$  ضریب درگ (شامل توربین و پایه ی آن) است؛

-  $V_c$  سرعت شروع است.

توان استخراجی توربین با رابطه ی زیر مشخص می گردد:

$$P = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta_{gen} \eta_{mec} \rho C_p S |V|^3 & \text{if } |V| > V_c \\ 0 & \text{if } |V| < V_c \end{cases}$$

محاسبات توان قابل تولید

روش به کار رفته برای ارزیابی توان سالانه قابل استخراج شامل استفاده از فرمول - *Remenieras and Smaghe* یا "روش شماتیک جزر و مدها" می شود.

ما تولید هر توربین را به ازای سه شرط جزر و مدی زیر محاسبه می کنیم:

- حداقل جزر و مد متوسط (ضریب ۴۵)؛

- جزر و مد متوسط (ضریب ۷۰)؛

- جزر و مد متوسط بهاری (ضریب ۹۵).

به ازای هر نوع از این جزر و مد‌ها ما جمع انرژی الکتریکی استخراجی از ژنراتور هر توربین را با عملیات زیر محاسبه می‌کنیم:

- ما در طول شبیه‌سازی به ازای هر فاصله‌ی زمانی در محاسبه و برای هر توربین توان آنی فراهم‌شده برای روتور ژنراتور را محاسبه می‌کنیم و از آن ما انرژی فراهم‌شده برای روتور ژنراتور هر توربین را با ضرب توان آنی در مقدار فاصله‌ی زمانی استنتاج می‌کنیم؛

- با افزودن مقادیر انرژی تولیدشده در هر فاصله‌ی زمانی محاسبه در حین جزر و مد مورد بحث ما به انرژی کلی فراهم‌شده برای روتور ژنراتور هر توربین می‌رسیم؛

- با ضرب نتیجه در بازده ژنراتور  $\eta_{gen}$  و بازده مکانیکی  $\eta_{mec}$  ما به انرژی تولیدشده توسط هر توربین در حین جزر و مد مورد بحث می‌رسیم. بازده ژنراتور و بازده مکانیکی برابر بازده توربین *OpenHydro 16 m* قرار داده می‌شوند؛

- با اضافه کردن نتایج به دست‌آمده برای ۴ توربین مزرعه، ما انرژی الکتریکی خروجی ژنراتورها را برای کل مزرعه به دست می‌آوریم.

انرژی E تولیدی در طول یک سال را می‌توان با استفاده از مقادیر انرژی تولیدی در شرایط جزر و مد میانگین بهاری، جزر و مد میانگین و حداقل جزر و مد متوسط با استفاده از فرمول کلی *Remenieras and Smagghe* تخمین زد (نه مختص سایت):

$$E = 0.3E_{95} + 0.4E_{70} + 0.3E_{45},$$

که:

- E95 بیانگر انرژی است که اگر تمامی جزر و مد‌ها برابر جزر و مد میانگین بهاری باشند در یک سال تولید خواهد شد (ضریب ۹۵)؛

- E70 بیانگر انرژی است که اگر تمامی جزر و مد‌ها برابر جزر و مد میانگین باشند در یک سال تولید خواهد شد (ضریب ۷۰)؛

- E45 بیانگر انرژی است که اگر تمامی جزر و مدها برابر حداقل جزر و مد میانگین باشند در یک سال تولید خواهد شد (ضریب ۴۵).

این محاسبات با استفاده از فرمول بالا و با علم بر اینکه به طور متوسط در یک سال ۷۰۵.۸ جزر و مد وجود دارد انجام شده‌اند.

توان قابل تولید در یک چرخه ی جزر و مدی شماتیک و یک سال واحد برای هر موقعیت محتمل توربین‌ها در پیکربندی مزرعه تعیین می‌گردد (با در نظرگیری تلفات ناشی از ویک). برآوردها - شامل بازده ژنراتور و بازده مکانیکی - در خروجی ژنراتور مشخص می‌باشند (در این مقادیر موجود بودن و تلفات الکتریکی در نظر گرفته نمی‌شوند).

نتایج حاصل شده اختلاف زیاد میان مقادیر توان قابل تولید را آشکار می‌سازند که به موقعیت نسبی ماشین‌ها وابسته هستند و تولید بهینه ی تخمینی سالانه ی مزرعه ی شامل ۴ توربین ممکن است به  $2500 MWh$  برسد. ما مشاهده می‌کنیم که تولید مابین شرایط جزر و مد متوسط بهاری و میانگین جزر و مد حداقل به شدت افت می‌کند که موضوع عجیبی نمی‌باشد، زیرا توان متناسب با مکعب سرعت است و هنگامی که سرعت کمتر از نقطه ی شروع  $0.5 m/s$  باشد هیچ توانی تولید نمی‌گردد. انرژی تولید شده در طول جزر و مد عادی بیانگر ۴۷٪ انرژی تولیدی در حین جزر و مد متوسط بهاری است و تولید در حین حداقل جزر و مد متوسط بیانگر ۱۳٪ تولید در حین جزر و مد متوسط بهاری است.

درصد تلفات ناشی از ویک برای هر طرح مزرعه ی آزمایش شده مابین ۴ تا ۱۳٪ برای طرح‌های مختلف آزمایش شده ارزیابی شده‌اند.

### ۹-۳-۳ نظارت محیطی

نظارت محیطی دارای دو هدف عمده می‌باشد: ابتدا، هدف آن دستیابی به دانشی بهتر از رفتار هیدرولیکی ماشین‌ها و برهمکنش‌های آن‌ها (تأیید مدل هیدرودینامیکی موضعی با اندازه‌گیری اثرات ویک) و ثانیاً، تعیین اثرات محیطی تأسیسات است (به ویژه تأیید اینکه اثر قابل توجهی بر ساکنین و گونه‌های محلی ندارد).

### نظارت بر هیدرودینامیک موضعی

این کار شامل تأیید عملکرد هیدرودینامیکی اولین ماشین در جای خود، تأیید مدل‌های عددی ویک حول ماشین و در فاصله‌ای دورتر (حدود ۳۰۰ متر) و در نهایت ارزیابی اثرات مزرعه از نقطه نظر هیدرودینامیکی می‌شود. این نظارت با استفاده از حسگرهای متصل به ماشین و

نزدیک آن (بالادست و پایین دست) انجام می‌شود: آن‌ها سرعت جریان را در اعماق مختلف، ارتفاع آب، امواج (در هر دو طرف مزرعه) و طبیعت سیال (درجه‌ی شوری، دما) را اندازه‌گیری می‌کنند. جمع‌آوری داده در دو مرحله انجام خواهد شد: در ۲۰۱۱ با نصب اولین توربین آزمایشی برای فرو رفتن به زیر آب به مدت ۳ ماه و سپس در ۲۰۱۲ پس از نصب ۴ ماشین نهایی که مزرعه را شکل می‌دهند.

### نظارت بر اثرات محیطی در دریا

با مطالعه‌ی اثرات محیطی این نتیجه حاصل شد که توربین‌ها تنها اثر کوچکی بر مشخصات فیزیکی زیستگاه گونه‌های دریایی و بر خود این گونه‌ها دارند: این زیستگاه‌ها از پایه‌ی صخره‌ای ساخته شده‌اند و با لایه‌ای نازک از هیبرویدها پوشیده شده و جوامع اسفنجی و کرم‌های کمیاب در آن حضور دارند؛ جانوران جنبه‌ی شامل سخت‌پوستان بزرگ (سایت در منقطه‌ی سخت-پوستان واقع شده است) و گونه‌های ماهیان هستند که با هیدرودینامیک قدرتمند سازگار شده‌اند؛ در نهایت، گاهی اوقات پستانداران دریایی به سایت رفت و آمد می‌کنند (دلفین معمولی، پورپوس، فوک خاکستری و غیره). با این حال، به سبب عدم حفاری، نواحی سطحی محدود که عملاً ماشین‌ها با بستر دریا در تماس هستند، سرعت چرخش کم و مرکز خالی که باعث می‌شود تا ماهیان و پستانداران دریایی از آن عبور کنند و یا سایر مسائل مشابه، نوع ماشین انتخابی به طور قابل توجه اثر وارد بر تمامی این جوامع بیولوژیکی را کاهش می‌دهد. بنابراین، خطر بالقوه‌ی شناسایی شده برای مزرعه‌ی آینده به سبب صدای تولیدی توسط چرخش توربین‌ها و عملیات مبدل به افزایش سطح نویز مربوط می‌شود. این انتشار نویز ممکن است باعث ایجاد مزاحمت برای ماهیان یا پستانداران دریایی شود.

این دلیلی است که چرا تصمیم گرفته شد تا این اثر سنجیده شود در حالی که در همان زمان شدت باند فرکانس نویز تولیدی توسط ماشین‌ها و فاصله‌ای که در آن، نسبت به نویز محیط قابل دریافت می‌باشند، اندازه‌گیری شوند و اثرات آن‌ها بر رفتار پستانداران دریایی مورد ارزیابی قرار گیرد که در نتیجه با استفاده از روش‌های غیر فعال صوتی کشف و شناسایی شدند.

برنامه‌ی نمونه‌گیری برای اندازه‌گیری در غیاب ماشین‌ها (حالت اولیه) و سپس با وجود ماشین آزمایشی و سپس با وجود مزرعه در نظر گرفته شده است. بدین منظور دو روش زیر مورد استفاده قرار گرفتند:

- اندازه‌گیری نویز در دو عمق مختلف (۱۰ و ۲۰ m زیر سطح) به طور پیوسته در امتداد شعاع‌های قرار گرفته در هر دو طرف مزرعه‌ی آینده در فاصله‌ی حدود ۳ km در شرایط جزر و

مدی مفروض انجام شده است: این اندازه‌گیری‌ها به ما امکان ارزیابی نویز پیرامون در سایت را دادند که بعداً با سطوح نویز مزرعه‌ی توربین قرار گرفته، مقایسه خواهند شد. از این گذشته، اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که سایت مزرعه در تمامی بازه‌های فرکانسی نویز زیادی دارد (بر حسب فرکانس، ۱۰-۲۵ dB بلندتر از سطح نویز سایت کنترلی مجاور است). این سطوح نویز به جریان مربوط می‌شوند: نویز هیدرودینامیکی، صداهای مربوط به انتقال رسوبات و صداهای مربوط به "آشفستگی" در سطح؛

- ثبت پیوسته در طول چندین ماه با حسگرهای C-pod که در اطراف مرزهای مزرعه‌ی آینده (بالادست و پایین) قرار گرفته‌اند؛ این حسگرها باعث می‌شوند تا حضور پستانداران آبی تشخیص داده شود.

از طرف دیگر، باید تأیید می‌شد که بر پوشش بیولوژیکی بستر دریا در نزدیکی ماشین‌ها اثری ندارد، زیرا ممکن است گونه‌ها به تغییر قابل توجه در شدت جریان حساس باشند. مسئله در اینجا دستیابی به اطلاعات کیفی با استفاده از پروتکل‌های استاندارد بود که به نظر می‌رسید اجرای آن دشوار باشد؛ در حقیقت، از نظر شدت جریان و عمق، شانس انجام فعالیت غواصان نامشخص و همواره دشوار و به صورت بالقوه خطرناک است. بنابراین تصمیم گرفته شد تا این نظارت با استفاده از عکس‌های دوربین‌های متصل به تکیه‌گاه‌های ماشین‌ها انجام شود: این وسیله در کنار ماشین‌های آزمایشی در ۲۰۱۱ آزمایش خواهند شد و احتمالاً از نظر نتایج بهبود پیدا کنند یا تقویت شوند. در نهایت، به احتمال زیاد جانوران ریز در تکیه‌گاه‌های توربین‌ها سکونت خواهند کرد: این امر با آزمایش اولین ماشین هنگامی که پس از مرحله‌ی آزمایش در ۲۰۱۱ از آب خارج شود مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

#### نظارت بر اثرات محیطی در جایی که کابل‌ها به ساحل می‌رسند.

کابل‌ها در رسوبات ریز نواحی ساحلی در اطراف خلیج لونی دفن خواهند شد؛ اگرچه ممکن است اثرات آن به دلیل کاهش ضروری مساحت (در کل چند صد متر مربع) به صورت فضایی محدود باشد، اما بر روی بخش کوچکی (۰.۱٪) از بسترهای پوشیده از علف دریایی و علف ریز دریایی تأثیر خواهند داشت. بنابراین تصمیم گرفته شد تا دو روش برای بازیابی این علف‌ها استفاده شود (انتشار فرعی و کاشتن) تا بر کارایی این روش‌ها نظارت شود و درس‌هایی از این تجربه آموخت که ممکن است در موقعیت‌های دیگر مفید واقع شوند.

به علاوه، سوالاتی درباره‌ی اثرات نهایی وارد بر جانوران درون میدان‌های الکترومغناطیسی تولیدشده به وسیله‌ی کابل‌ها مطرح گشت. بنابراین، تصمیم گرفته شد تا بر ویژگی‌های مختلف

رسوبات زیستی نظارت شود که کابل‌ها در مقایسه با سایت‌های مجاور از آن‌ها عبور می‌کنند. این کار شامل نمونه‌گیری از رسوبات در فواصل مختلف از کابل‌ها، در فواصل زمانی مختلف بعد از کارها و مطالعه‌ی جانوران در این بازه‌ها خواهد شد. این برنامه‌ی نظارت ۱ تا ۲ ساله درک خوبی از سرعت سکونت مجدد جانوران در رسوبات و اثرات ناشی از کابل‌ها (یا عدم اثر آن‌ها) فراهم خواهد کرد.

### اندازه‌گیری‌های دیگر در حال انجام در طول پروژه

اندازه‌گیری‌های مختلفی به عنوان بخشی از پروژه در نظر گرفته شده بودند. یکی از مهمترین تصمیم‌هایی که به صورت مستقیم بر فعالیت‌های ماهیگیری تأثیر می‌گذاشت، حمایت مالی برنامه برای احیای جمعیت خرچنگ (لابستر) به منظور افزایش تولید بود که توسط هیئت شیلات محلی پیمپول انجام شد. این برنامه شامل تولید ماده‌های بالغ (که به عنوان *V-notching* شناخته می‌شود) می‌شود تا بتوان آن‌ها را برای تولید تخم‌های بیشتر و با دوام‌تر رها کرد. این علامت‌گذاری توسط خود افراد مجرب انجام می‌شود. با قضاوت بر اساس نتایج مشابه آزمایش انجام شده در ایرلند، تفاوت چشمگیری در نرخ گرفتن خرچنگ‌ها، ۴ تا ۵ سال پس از اجرای برنامه مشاهده می‌شود.

## ۹-۴ روند اجرایی

### ۹-۴-۱ زمینه و روند قابل اعمال

پروژه پیمپول بریجات در نوع خود اولین در آب‌های فرانسه است. امروزه هیچ چهارچوب کاری قانونی وجود ندارد که نصب تجهیزات تولید انرژی تجدیدپذیر از جریان‌های دریایی را کنترل کند.

بنابراین این چهارچوب کاری با کمک خدمات ایالتی و وزارت بوم‌شناسی، سازمان انرژی پایدار و وزارت دریایی<sup>۱</sup> و با استفاده از رویه‌ی موجود و قوانینی به عنوان مبنا ایجاد شد. پنج رویه‌ی مختلف در این پروژه قابل اعمال می‌باشند. چهار تا از آن‌ها به تحقیق عمومی<sup>۲</sup> نیاز دارند.

مطابق ماده‌ی R 123-4 از آیین‌نامه‌ی محیط زیست<sup>۳</sup> این چهار تحقیق عمومی به صورت مشترک انجام شدند. برای هر رویه لیست تحقیقی ایجاد شد.

این چهار پروسه با قوانین صحیح تحقیق عمومی زیر ارائه می‌گردند.

<sup>1</sup> Energy and Sustainable Development and the Ministry of the Sea

<sup>2</sup> Public inquiry

<sup>3</sup> Code de l'Environnement

### صدور مجوز مطابق قوانین دریایی

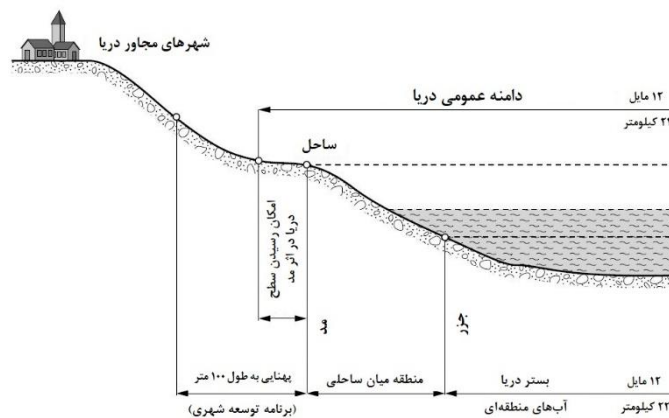
این مجوز کار انجام شده در محیط دریایی، از دریایی آزاد تا ساحل را پوشش می دهد. این مجوز به فرد تقاضا دهنده اجازه می دهد تا ماشین ها را نصب کرده و کابل ها را بر روی بستر قرار دهد یا زیر خاک دفن کند.

تحقیق عمومی مورد نیاز این پرونده با استفاده از قوانین مربوط به مجوزهای درخواستی تحت قوانین دریایی ایجاد می شوند. این قانون در ماده R 214-6 و مواد پیرو آیین نامه ی محیط زیست تدوین شده اند و با اثرات بالقوه ی چنین کارهای تأسیساتی بر روی محیط زیست توجیه می گردند. در رابطه با مجوز درخواستی پرونده تحت قوانین دریایی لیستی تحقیق عمومی ایجاد شد و امکان انجام مشاهدات مربوط به این کارها را در دریا فراهم می کند.

### مجوز کسب فضا در محدوده ی عمومی دریا

هدف از این پرونده دستیابی به مجوزی برای کسب فضا در محدوده ی عمومی دریا در تمام مدتی است که مزرعه در حال فعالیت می باشد. این مجوز عناصری دارد که امکان تنظیم شرایط این قرارگیری را فراهم می کنند.

محدوده ی عمومی دریا از مرز بالایی ساحل، یعنی، خط بیشترین جزر و مدها در غیاب اغتشاشات استثنایی اقلیمی تا مرز آب های ساحلی، یعنی، تا ۱۲ مایل دریایی (حدود ۲۲ km) امتداد یافته است.



شکل ۹-۱۰ مرزهای محدوده ی عمومی دریا (PMD) (منبع: MEEDDM)



تحقیق عمومی مورد نیاز برای این پرونده توسط فرمان شماره‌ی 308-2004 در ۲۹ مارس ۲۰۰۴ در رابطه با امتیاز استفاده از محدوده‌ی عمومی دریا در خارج از بنادر ایجاد شده است. این تحقیق به مردم این امکان را می‌دهد تا اطلاعاتی درباره‌ی وسایل‌شغال محدوده‌ی عمومی دریا به دست بیاورند و مشاهداتی را درباره‌ی این موضوع در دفتر ثبت مربوط به پرونده انجام دهند.

### مجوز برنامه‌ریزی

هدف این پرونده ایجاد و ساخت تأسیسات در محدوده‌ی دریا و روی خشکی است. این پرونده کل محدوده‌ی پروژه را پوشش می‌دهد و به تمامی تأسیساتی که بخشی از آن هستند، یعنی، چهار توربین جریان جزر و مدی، مبدل فراساحلی، کابل اصلی اتصال ایستگاه فرعی منابع روی خشکی می‌پردازد.

این پروژه موضوع مطالعات معماری بوده است که هدف آن‌ها تضمین کیفیت ساخت، هماهنگی که به محیط اطراف وارد می‌کنند و احترام به چشم‌اندازهای طبیعی یا شهری و میراث است. توجه ویژه‌ای به تأسیسات روی خشکی و به ویژه به ساختمان ایستگاه فرعی منبع انرژی شده است. این پروژه همچنین از طرف معمار ارشد فرانسوی<sup>۱</sup> نظر مطلوبی دریافت کرده است.

به تحقیق عمومی در دو مورد نیاز است، زیرا کابل اصلی اتصال از فضاهایی عبور می‌کند که تحت قانون نواحی ساحلی محافظت می‌شود:

- نواحی ویژه‌ی کنار ساحل لونی و کمر بند ساحل ریگی؛

- نوار ۱۰۰ m کنار ساحل.

در قانون برنامه‌ریزی که الزامات قانون نواحی ساحلی را تکرار می‌کند تصریح شده است که دست‌اندازی چنین تأسیساتی در نواحی محافظت‌شده باید موضوع تحقیق عمومی باشد.

پرونده‌ی کاربرد برای مجوز برنامه‌ریزی به مردم اجازه می‌دهد تا از آن مطلع شوند و بازدیدهایی در رابطه با نگرانی خود درباره‌ی عبور کابل‌ها از این نواحی حفاظت‌شده انجام دهند.

پرونده‌ی تحقیق عمومی مطابق با آیین‌نامه‌ی محیط زیست

هدف از این پرونده ارائه تحقیق عمومی درباره‌ی عملیاتی‌هایی که احتمالاً بر محیط زیست تأثیر بگذارند (قانون *Bouchardeau*).

<sup>1</sup> Architecte des Bâtiments de France

ماده ی L 123-1 از آیین نامه ی محیط زیست در کار انجام شده در بستر دریا اعمال می شود و تصریح می کند که باید تحقیق عمومی درباره ی اثرات بالقوه ی وارد بر محیط زیست انجام شود. لیستی از تحقیق عمومی ویژه در دسترس عموم قرار گرفته است. بازدیدهای مربوط به نتایج زیست محیطی بالقوه پروژه در این لیست ثبت می شوند.

#### اظهارات مطابق با "قانون انرژی"

این رویه که مستلزم تحقیق عمومی نیست با فرمان شماره ی 2000-844 در ۷ سپتامبر ۲۰۰۰ تنظیم شده و برای ماده ی ۶ قانون شماره ی ۲۰۰۰-۱۰۸ در ۱۰ فوریه ی ۲۰۰۰ در رابطه با مدرن سازی و توسعه ی خدمات عمومی الکتریسیته استفاده شده است.

در آن تصریح می شود که برای هر تأسیسات دارای یک یا چند واحد تولید برق باید مجوز تضمین شود یا اعلام گردد. هنگامی که توان ماشین ها کمتر از  $4.5MW$  باشد باید به وزیر انرژی اعلام شود. پروژه ی پیمپول بریهات در این دسته قرار می گیرد.

#### فرآیندهای مربوط به نصب توربین آزمایشی

طبیعت آزمایشی پروژه به این معناست که قبل از اینکه از تأسیسات بهره برداری شود باید توربین در شرایط واقعی مورد آزمایش قرار گیرد. هدف از این کار تأیید انتخاب های فنی و احتمالاً بهبود عملکرد و شرایط نصب است تا خطرات صنعتی و محیطی را محدود کرد. این ماشین آزمایشی به شبکه ی برق متصل نخواهد بود.

توربین آزمایشی حداکثر سه ماه در سایت آتی بهره برداری از ماشین ها در آب فرو خواهد رفت (در طول سال قبل از نصب نهایی چهار توربین).

احتمالاً این ماشین آزمایشی قبل از کسب مجوز نهایی در آب قرار داده شود. بنابراین برای اجتناب از خطر دو درخواست مجزا برای مجوز موقت ارائه شده است.

پرونده های پیشتر اشاره شده شامل مطالعه ی اثر می شوند. این کار مطابق آیین نامه ی محیط زیست و معیارهای عرضه ی پروژه به مطالعات اثر، به ویژه در رابطه با اثر حمل و نقل، ساخت و ساز و کارهایی که هزینه ی کلی آنها بیشتر از  $€1,900,000$  است (که مورد بحث ما می باشد) مورد نیاز می باشد. این مطالعه ی اثر همچنین شامل ارزیابی اثرات، مطابق قانون *Natura2000* می باشد. این مطالعه برای ارزیابی به مسئولین قانونی در مسائل محیط زیست ارائه شده است.

با طرح این مسئله، دو رویه‌ی مجزا که به آزمایش مربوط هستند مطابق زیر می‌باشند:

- درخواستی مبنی بر تصرف موقت مکان تحت "قانون دریایی"؛

- درخواستی مبنی بر تصرف موقت محدوده‌ی عمومی دریا.

### ۹-۴-۲ بازخورد

هنگامی که پرونده‌های مختلف ارائه شدند، دوره‌ی دستورالعمل و دست‌یابی به مجوز دو سال از فوریه‌ی ۲۰۰۹ طول کشید. این زمان نسبتاً کوتاهی در مقایسه با دیگر کارهای توسعه‌ی وسایل تولید، به ویژه در فراساحل است (به عنوان مثال، توان بادی) و برخلاف اندازه‌ی خدمات مورد استفاده و نیاز به ارائه‌ی پرونده به اداره‌ی محیط زیست می‌باشد (دو ماه تأخیر بیشتر).

با این وجود، باید بیان شود که این روند بسیار دشوار است. ساده‌سازی این رویه به لحاظ تعداد و محتوا با استفاده از دسته‌بندی درخواست‌ها در کنار هم، در کنار احتمال تحقیق عمومی مشترک (که برای پروژه این کار انجام شد) مطلوب خواهد بود.

استفاده از مجوز برنامه‌ریزی برای کل محیط پروژه نامعقول است (تأسیساتی که زیر خاک قرار گرفته‌اند یا روی بستر دریا قرار می‌گیرند باید از این روند مستثنی شوند) فرمان کاربرد *ad hoc* در قانون دوم *Grenelle* هنگامی که اجرایی شده است باید باعث شود تا این روند کنار گذاشته شود.

امروزه با در نظرگیری اینکه مرزهای بخش‌های دریایی تعریف نشده‌اند، این ایده‌ی تحقیقات درباره‌ی محیط کمتر روشن‌سازی شده است.

در نهایت، باید اشاره شود که دست‌یابی به اطلاعات عمومی برای سایت‌ها بسیار دشوار است و نبود آن مستلزم شناسایی گسترده در بخشی از توسعه‌دهنده است.

### ۹-۵ نتیجه‌گیری و چشم‌اندازها

این اولین پروژه‌ی جریان جزر و مدی که در آب‌های فرانسه اجرا می‌شود در مفهوم خود و در طول عملیات برنامه‌ریزی شده پروژه‌ی پیش-صنعتی است اما از نظر جنبه‌ی مشخصی همچون توسعه‌ی ماشین‌های بزرگ و مبدل فراساحلی زیر آبی و فرآیندهای اجرایی می‌توان آن را یک نمونه‌ی اولیه در نظر گرفت.

شرکت *EDF* امیدوار است تا با این پروژه به پیدایش انرژی جریان جزر و مدی در فرانسه کمک کند و اهداف بلندپروازانه‌ی زیر را دنبال می‌کند:

- دستیابی به بازخورد فنی پیرو انتخاب فناوری‌های ویژه؛
  - انجام آزمایش موفقیت‌آمیز با اندازه‌ی واقعی بر روی مزرعه‌ای که از سیستم تبدیل فراساحل زیر آبی استفاده می‌کند؛
  - تأیید مدل‌های عددی (اثر ویک، توان قابل تولید)؛
  - بهینه‌سازی تأسیسات فراساحل و عملیات نگهداری؛
  - تأیید روش‌های استفاده‌شده در چهارچوب کاری مقبولیت؛
  - قرار دادن سیستم نظارت محیطی مناسب؛
  - تعیین نیاز به بهبود یا ساده‌سازی فرآیندها.
- تعداد مشخصی از اهداف تا کنون تحقق پیدا کرده‌اند و اهداف دیگر در حال تحقق می‌باشند اما همچنان خطرات ذاتی در توسعه‌ی فنی و عملیات نصب وجود دارد.
- بازخورد اولیه از پروژه‌ی جریان جزر و مدی در پیمپول بریهات:
- تأیید می‌شود که می‌توان کارهای توسعه را با موفقیت انجام داد و عملکرد ماشین‌ها در زمان کوتاه و زمان عادی تقویت خواهد شد؛
  - بر دشواری دستیابی به آستانه‌ی سود دهی در چند سال بعد تأکید می‌شود. ممکن است سایت‌هایی با پتانسیل انرژی بیشتر نسبت به بریهات حتی امروز هم به لحاظ مالی جذاب باشند، اما آن‌ها دارای خطرات فنی قابل توجهی می‌باشند که ابتدا مستلزم تسلط فنی بر فعالیت‌ها در دریا می‌باشند. پروژه‌ی پیمپول بریهات به این هدف کمک خواهد کرد؛
  - نشان می‌دهد که کار فراساحل همواره با خطر همراه خواهد بود و به شدت به شرایط دریا وابسته است که این امر تاثیر بسزایی بر *OPEX* و عدم دسترس‌پذیری دارد.

## ۹-۶ کتاب‌شناسی

[BED 05] BEDARD R., PREVISIC M., SIDDIQUI O., HAGERMAN G., ROBINSON M., EPRI survey and characterization, tidal in stream energy conversion (TISEC) devices, Technical report EPRI – TP – 004 NA, EPRI,

2005.

[BRU 10] BRUN P., TERME L., BARILLIER A., "Paimpol-Bréhat: Development of the first tidal current array in France", ICOE 3rd International conference on Ocean Energy, Bilbao, 6 October 2010.

[PHA 09] PHAM CT., MARTIN V., "Tidal current turbine demonstration farm in PaimpolBréhat (Brittany): tidal characterization and energy yield evaluation with TELEMAC", 8<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden 2009.

[REM 56] REMENIERAS G., SMAGGHE P., "Sur la possibilité d'utiliser l'énergie des courants marins au moyen de machines analogues aux aérogénérateurs", Actes des 4e Journées de l'Hydraulique, Paris, June 1956.





## بازخورد پروژه‌ی توربین جریان جزر

### و مدی سابلا<sup>۱</sup>

#### ۱-۱۰ مقدمه

دریاها منشأ جریان‌هایی هستند که مقادیر عظیم آب را حرکت می‌دهند. به عنوان مثال، گلف استریم در خارج از ساحل فلوریدا دارای دبی جریان ۳۰ میلیون  $m^3$  بر ثانیه است. در کانال انگلیس در هر جزر و مد حدود  $30 \cdot km^3$  آب پر و خالی می‌شود.

در امتداد ساحل فرانسه، به ویژه جریان‌های جزر و مدی در نواحی مشخصی که آب کم‌عمق است - نزدیک ساحل یا با وجود جزایر - سرعت زیادی دارند. به عنوان مثال، فرامور استریت در جنوب جزیره‌ی یوشانت یا راز بلانچارد در خارج از ساحل پوینته دلا هاگو از این نقطه نظر نواحی مورد توجه می‌باشند.

حضور این منبع باعث توسعه‌ی فناوری توربین آبی شده است و به این نوع سایت دریایی سازگار شده است [DAV 04]. این فناوری سابلا نامگذاری شده است زیرا مشابه جانوران دریایی هستند که از گلبرگ خود در آب برای گرفتن پلانکتون حمل‌شده توسط جریان استفاده می‌کنند.

---

<sup>۱</sup> Sabella



## ۱۰-۲ طراحی توربین‌های سابلا

طرح این توربین حاصل روش در حال پیشرفت است که ارزش بازگو کردن را دارد.

### ۱۰-۲-۱ طرح اولیه

از ابتدای کار تشخیص داده شد که جریان‌های نزدیک ساحل اساساً دو جهتی هستند، در یک جهت یا در جهت مخالف حرکت می‌کنند و به ندرت با بخش بزرگ متقاطع همراه می‌شوند. ایده این بود که چندین توربین را در غشایی کنار هم و عمود بر جریان قرار داد. روتورها متقارن بودند و بر حسب زمان و جزر و مد قادر به چرخش در هر دو جهت بودند. هر روتور دارای تسمه‌ای بود که از وسایل متمرکز کننده و تبدیل انرژی پشتیبانی می‌کرد (شکل ۱۰-۱ را ببینید). بسیار زود آشکار گشت که نگهداری از این نوع وسیله دشوار خواهد بود.



شکل ۱۰-۱ شماتیکی از اولین طرح توربین جریان جزر و مدی: روتور بر روی تیغه‌های مکانیکی نگه داشته می‌شود که در این جا دیده نمی‌شوند، زیرا درون داکت‌ها قرار گرفته‌اند (© Sabella SAS)

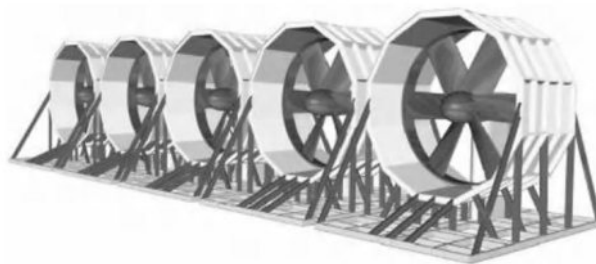
### ۱۰-۲-۲ طرح دوم

مدل بعدی مبتنی بر یک یا چند فناوری مرسوم بود که در آن هر روتور دارای ژنراتوری بودند که در مرکز آشیانه قرار گرفته بود.

تحلیلی از نواحی مختلف ساحل فرانسه که به طور بالقوه برای توربین‌های جریان دارای مزیت بودند نشان داد که بسیار ضروری است که اثر امواج فراساحل را که با اثر جریان‌های جزر و

مدی ترکیب می‌شوند، در نظر گرفت [BIS 06]. بارهای اعمالی به هر پره، هنگامی که می‌چرخند یا ساکن هستند، موجب خستگی در اجزای مختلف می‌شوند. بسیار حیاتی است که انحراف پرها را در اثر هر چرخش و عبور هر موجی محدود کرد. برای پایان دادن به این موضوع، روتور دارای ۶ پره می‌باشد که رئوس پرها می‌توانند با حلقه‌ای تقویتی متصل شوند که به کل روتور، صلبیت می‌بخشد و در نتیجه حالت‌های مختلف ارتعاش را از بین می‌برد. (شکل ۱۰-۲ را ببینید).

برخلاف طرح قبلی، حلقه‌ی خارجی دیگر در تماس با وسایل مکانیکی نیست - متمرکز کردن و تبدیل حرکت به برق توسط محور چرخش حاصل می‌شوند.



شکل ۱۰-۲ طرح دوم با روتورهای داکت‌دار. روتور روی محور مرکزی نگه داشته می‌شود. پرها با حلقه‌ی اتصال رئوس آن‌ها تقویت می‌شوند. داکت در تماس با تسمه نبوده و در عوض فضای خالی میان آن دو وجود دارد (Sabella SAS©)

ما در شکل ۱۰-۲ مشاهده می‌کنیم توربین‌ها دارای داکتی بودند که اثر غشا را تقویت می‌کردند و دریافت انرژی را بهبود می‌بخشیدند. قطر داخلی داکت بیشتر از قطر خارجی روتور با حلقه‌ی خود بود.

بسیار مهم است که برای سایت‌های فرانسه طوفان را نیز در نظر گرفت که تماماً در معرض دریای آزاد قرار دارند، در مقابل آن بسیاری از سایت‌های بریتانیا توسط جزایر در مقابل امواج اقیانوسی محافظت می‌شوند.

در هنگام طوفان، امواج به اندازه‌ای می‌رسند که احتمالاً تولید با کیفیت قابل قبول از طریق جریان غیر ممکن خواهد بود. بنابراین مسئله در هنگام چنین اتفاق‌هایی تضمین بقای تأسیسات می‌باشد.

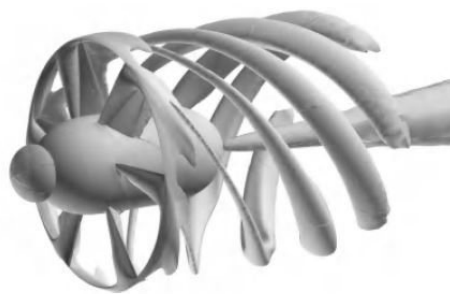
بارهای هیدرودینامیکی واقع بر سازه را می‌توان محاسبه کرد. اگرچه جریان تنها تنش‌های افقی متناسب با سطح قطعات مستغرق اعمال می‌کند اما امواج باعث ایجاد تنش‌های اضافی افقی و عمودی می‌شوند که به حجم آب بستگی دارند و سازه را محدود می‌کنند. به عنوان مثال، این حجم شامل تمامی فضای داخلی محدوده‌ی هاب می‌شود. علاوه بر نیروهایی که باعث لغزش و واژگونی سازه می‌شوند، نیروهای متناوب لیفت پدیدار می‌شوند. بنابراین فونداسیون‌های جاذبه-ای باید به طور قابل توجه سنگین‌تر ساخته شوند تا از واژگونی تأسیسات یا جابجایی توسط امواج قدرتمند جلوگیری شود.

با توجه به نتایج محاسبات به نظر می‌رسید که با حذف داکت‌ها و نگه داشتن حلقه‌ی اتصال پره‌های روتور، کار آسان‌تر، رازان‌تر و ایمن‌تر شود.

### ۱۰-۲-۳ طرح سوم

مطالعات پیشتر اشاره شده به طراحی اخیر منجر شدند که در آن روتور بدون داکت است و از ۶ پره‌ی متقارن ساخته شده‌اند که توسط حلقه‌ای محکم می‌شوند [BOR 08].

همچنین جالب توجه است که حضور حلقه باعث کاهش شکل‌گیری ورتکس‌های رأس می‌شود که بازده را کاهش می‌دهند. این اثر مطلوب مشابه اثر جستجو شده در هوانوردی از طریق افزودن بال‌های کوچک به انتهای بال‌ها است. محاسبات هیدرودینامیکی به ما امکان تجسم این پدیده‌ها را می‌دهند (شکل ۱۰-۳ را ببینید).

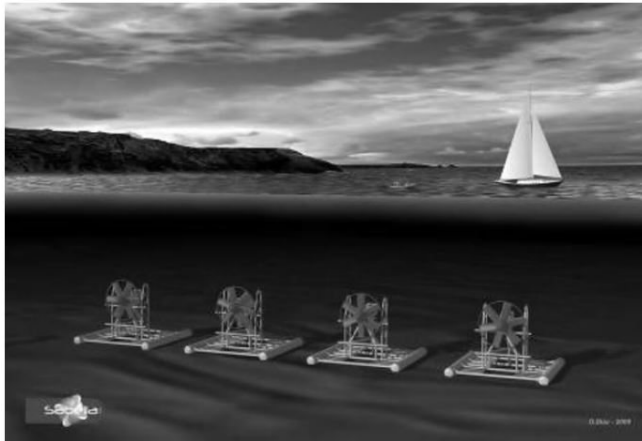


شکل ۱۰-۳ تجسم عددی ورتیسیت‌های جریان حول روتور سابلا. به ورتکس‌های مارپیچی توجه کنید که شکل-گیری آن‌ها با حلقه‌ی حول پره‌ها محدود گشته است (© Sabella SAS)

قطر روتورها بر اساس عمق موضعی آب انتخاب می‌گردد، با این محدودیت که نباید خیلی به سطح نزدیک باشند تا بتوان تا حد مشخصی از آن‌ها در برابر اثر امواج در هنگام طوفان محافظت شود.

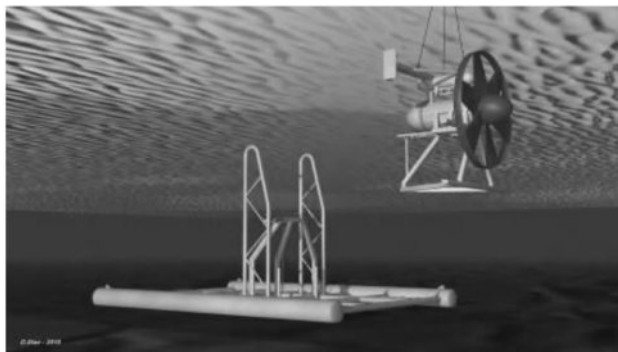


هر توربین به طور مجزا از توربین‌های مجاور خود در محل قرار داده می‌شود (شکل ۴-۱۰ را ببینید). تأسیسات از فونداسیون جاذبه‌ای قرار گرفته در بستر و با تکیه‌گاه سازه و خود توربین که به تکیه‌گاه متصل گشته، تشکیل شده است. بنابراین فرآیند نصب ساده می‌باشد. به منظور نگهداری تنها کافی است تا توربین‌ها را دوباره بالا آورد، در حالی که پایه در بستر باقی بماند.



شکل ۴-۱۰ طرح سوم برای توربین‌های آبی سابلا (© Sabella SAS)

برای قرار دادن یک توربین آبی یا بلند کردن آن از یک شناور مخصوص با موقعیت‌گیری دینامیکی و یک وسیله‌ی جابجایی متصل به جرثقیلی که جهت توربین را در جریان ثابت حفظ می‌کند، استفاده می‌شود (شکل ۵-۱۰). به هیچ غواصی برای انجام این عملیات نیاز نیست که این امر به طور قابل توجه ایمنی کارها را افزایش می‌دهد.



شکل ۵-۱۰ شمایی از قرارگیری توربین آبی بر روی تکیه‌گاه خود با استفاده از یک وسیله‌ی جابجایی که به جرثقیل روی کشتی متصل شده است (© Sabella SAS)

از آنجایی که طرح سازه‌ها از ملاحظات مکانیکی و فنی ناشی می‌شوند، طرح پایه‌ها عمدتاً به طبیعت بستر دریا وابسته می‌باشد. بنابراین ممکن است شکل یک پایه از یک سایت به سایت دیگر بسیار متفاوت باشد.

## ۴-۱۰ پروژه‌ی نمایشی سابلا D03

### ۱۰-۳-۱۰ ارائه‌ی پروژه

توربین جریان جزر و مدی فناوری جدیدی است و نمی‌توان مطالعات نظری را به آزمایش‌های موجود ارجاع داد. به این دلیل به نظر موسسان فناوری سابلا آزمایش کل طرح در دریا ضروری می‌باشد. به منظور محدود کردن ریسک‌های مالی آن تصمیم گرفته شد تا توربین نمایشی به قطر ۳ m ساخته شود بنابراین، اسم Sabella D03 به پروژه داده شد. بخشی از هزینه‌ی نمونه-ی اولیه (شکل ۱۰.۶ را ببینید) توسط ADEME (آژانس فرانسوی مدیریت محیط زیست و انرژی) فراهم شده و از آوریل ۲۰۰۸ تا مه ۲۰۰۹ در مصب رودخانه‌ی اودت<sup>۱</sup> در فینیستیر نصب شده است [BOR 10].

پروژه برای رساندن انرژی الکتریکی به شبکه در نظر گرفته نشده بود؛ در هر صورت جریان کند بنودی<sup>۲</sup> اجازه‌ی تولید قابل توجه را نمی‌داد. هدف آن تأیید اعتبار طرح انتخابی، آزمایش پارامترهای کاربردی مختلف و مقایسه‌ی نتایج با پیش‌بینی‌ها بود.



شکل ۱۰-۶ عکسی از نمونه‌ی اولیه‌ی Sabella D03 در بنودی قبل از اینکه به آب فرو برده شود. به ستون‌های راهنما بر روی پایه توجه کنید که بازوهای متقاطع توربین بر روی آن قرار داده خواهند شد (© Sabella SAS)

<sup>1</sup> River Odet estuary

<sup>2</sup> Benodet

پایه ی توربین آبی Sabella D03 یک فریم  $4270\text{ kg}$  به ابعاد  $8/3$  متر در  $6/2$  متر است که قرار بود روی بستر صاف قرار گیرد که در حین اکشتاف مقدماتی در دهانه سایت شناسایی شده بود. این پایه با  $4$  بلوک بتنی، هر کدام به وزن  $2.5$  تن متعادل می شود.

توربین دارای روتوری به قطر  $3\text{ m}$  و  $6$  پره ی متقارن بود که با تابی مناسب طراحی شده و با مواد کامپوزیت ساخته شدند. حلقه ی تقویتی پرها را به همدیگر متصل می کرد. ژنراتور با مغناطیس های دائم در آشیانه قرار گرفته بودند که می توانستند در صورت تمایل به مجموعه ای از مقاومت ها متصل شوند تا توان انتقالی را تغییر دهند. آب بندی مسیر عبور شفت با سیستمی تقویت شده است که تضمین می کند مقدار کمی فشار اضافی در روغن داخلی وجود دارد که این امر هر گونه خطر نفوذ آب به آشیانه را از بین می برد. این فنآوری در تجهیزات زیر دریایی تکمیل و به خوبی کنترل شده است. هیچ نشستی در آب یا روغن مشاهده نشده است. یک کابل اندازه گیری و کنترل از راه دور توربین را به ساحل متصل می کند.

توربین در بخش پایین دست کانال ترابری،  $19\text{ m}$  پایین تر از کمترین سطح جزر و مدها قرار داده شده است. کشتی ها اجازه ندارند تا در آنجا لنگر بیندازند، بنابراین نیازی به علامت گذاری نبود. کشتی های نسبتاً بزرگ معمولاً از روی توربین بدون هیچ مانعی عبور می کردند.

یک لنج کاری مجهز به جرثقیل برای کار نصب مورد استفاده قرار می گیرد. غواصانی برای تضمین اجرای یکنواخت عملیات در بستر به کار گرفته می شوند، زیرا ابزارهای مخصوص اشاره شده در بالا برای این نمونه ساخته نشده بودند.

توربین در جای خود قرار داده شد و  $3$  بار درحین آزمایش (هر بار بدون مشکل) بالا برده شد که این امر صحت طرح سازه ی تکیه گاه با ستون های راهنما را تأیید کرد. توربین به تکیه گاه خود قفل می شود و به سادگی با وزن خود در آن جا باقی می ماند.

آزمایش بیانگر محدود کردن استفاده از غواصان بود. آن ها نمی توانند هنگامی که جریان قوی است کار کنند. همچنین، دید کم مانع بزرگی برای عملیات بود. این امر موجب تقویت این عقیده شد که عملیات های روی توربین های آبی آتی باید بدون غواصان انجام شوند و به جای آن ها از ابزارهای رباتیک مجهز به دید صوتی استفاده شود.

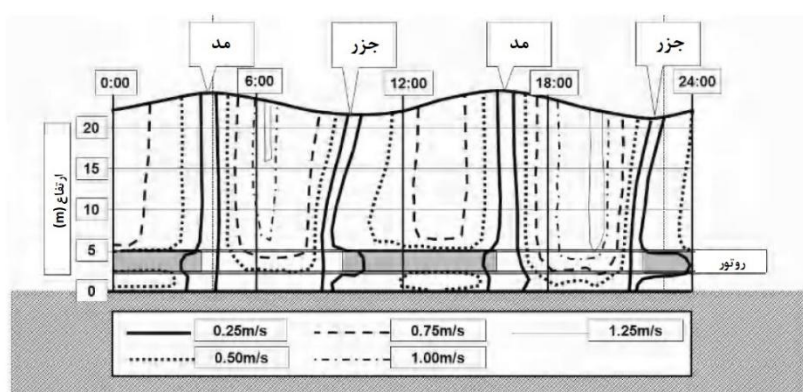
### ۱۰-۳-۲ نتایج اندازه گیری ها

سرعت چرخش روتور مابین  $0$  تا  $24\text{ rpm}$  متغیر بود که مطابق با سرعت خارجی حلقه مساوی با  $3.3$  برابر جریان می باشد. سرعت چرخش در هر دو جهت برابر بود. حضور آشیانه و سازه ی تکیه گاه در یک طرف روتور هیچ تأثیر قابل توجهی در بازده توربین نداشت. این امر ناشی از

این حقیقت می‌باشد که سطح تصویر شده توسط این مولفه‌ها تنها کسر کوچکی از سطح جاروب شده توسط روتور هستند.

عملکرد توربین با مقایسه‌ی توان انتقالی در سرعت جریان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور اندازه‌گیری آن، یک جریان‌سنج صوتی داپلر (*ADCP*) در چند متری روتور در سمت بالادست رود نصب شد. این کار به ما امکان می‌دهد تا سرعت جریان ورودی به روتور را در حین جزر مشخص کنیم و ویک خروجی در حین مد را مشاهده کنیم.

در شکل ۷-۱۰ مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در طی ۲۴ ساعت در طول کانال آب نشان داده شده‌اند. به ویژه توجه کنید که جریان به طور همزمان در کل ستون در لحظه‌ی سکون آب در جزر و مد بالا متوقف می‌شود. به طور برعکس، در جزر و مد پایین، جریان در بستر تقریباً یک ساعت قبل از سطح برعکس می‌شود. این اثر اغلب در دهانه‌ی رودخانه‌ها مشاهده می‌شود. کاهش سرعت ویک در شکل قابل رؤیت است.

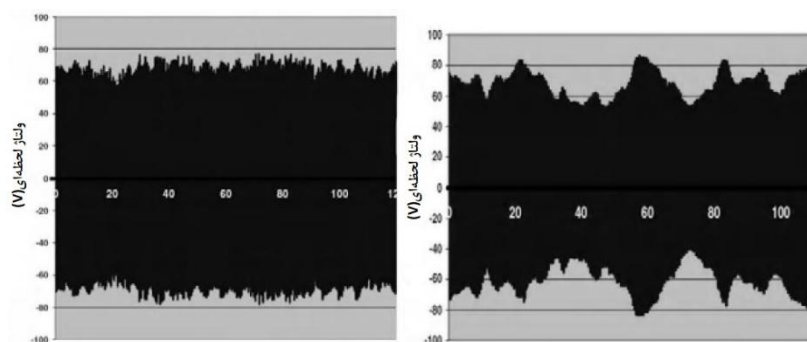


شکل ۷-۱۰ پروفیل عمودی سرعت جریان در طی ۲۴ ساعت. نواحی سایه خورده، بیانگر ویک توربین هستند که تنها در حین برخاستن جزر و مد قابل رؤیت بود زیرا وسایل اندازه‌گیری در بالادست روتور قرار داده شده بودند. سرعت به طور قابل توجه در ویک کاهش پیدا می‌کند. پروفیل سرعت در جزر و مدهای مختلف یکسان نیست، زیرا ضرب جزر و مد متغیر است و در نتیجه جریان آب و عمق نیز متغیر می‌باشند. جریان رودخانه و باد وارد بر دهانه از دیگر عواملی هستند که در طول زمان تغییر می‌کنند

سرعت جریان در نزدیکی بستر کاهش پیدا می‌کند. بر این اثر در اینجا تأکید می‌شود، زیرا سایت یک دره‌ی نسبتاً باریک است که در بستر آن و همچنین دیواره‌های جانبی اصطکاک وجود دارد. در شکل ۷-۱۰ نشان داده شده است که روتور در منطقه‌ای می‌باشد که تحت تأثیر اصطکاک قرار گرفته است و این امر کار تفسیر نتایج را دشوار می‌سازد.

همانطور که در شکل ۱۰-۸ نشان داده شده است، ما قادر بودیم تا با ثبت جریان الکتریکی تولیدی ژنراتور تغییرات سریع را نشان دهیم. در حین مد، جریان نسبتاً منظم است، در حالی که در جزر نوساناتی ظاهر می‌شوند. این امر به حضور برآمدگی صخره‌ای در بالادست سایت نسبت داده می‌شود که گردابه‌هایی را ایجاد می‌کند و هنگامی که جریان به پایین رودخانه می‌آید به توربین می‌رسند.

ما با آزمایش اندازه‌گیری‌ها قادر خواهیم بود تا تأیید کنیم که بازده روتور با محاسبات انجام‌شده مطابقت دارد. با این حال، اندازه‌های واقعی با خطاهایی همراه هستند، به ویژه دلیل آن دشواری تعیین دقیق سرعت آب در روتور و نوسانات جریان است.



شکل ۱۰-۸ داده‌های ثبت‌شده‌ی ولتاژ بدون بار در طول ۱۲۰ ثانیه. چپ: مد. راست: جزر. این اندازه‌ها بدون بار الکتریکی در ژنراتور برداشت شده‌اند. ولتاژ با سرعت چرخش و تقریباً با جریان آبی در روتور متناسب است.

### ۱۰-۳-۳ مشاهدات

اندازه‌گیری‌های انجام‌شده نشان دادند که ضریب عملکرد روتور تقریباً ۰.۴۵ است (مقدار بر اساس شبیه‌سازی عددی تخمین زده شده است). بگذارید ما به خاطر داشته باشیم که مقدار نظری حداکثر ضریب عملکرد روتور مطابق قانون بتز ۰.۵۹ است. تفاوت میان مقادیر نظری و واقعی عمدتاً با این حقیقت قابل توضیح می‌باشد که پره‌های توربین در اینجا متقارن هستند و این با پروفیل ایده‌آل تفاوت زیادی دارد که می‌توان از آن در جریان تک‌جهتی استفاده کرد.

جریان آب با خود مقادیر زیادی از مواد زائد در میان بستر و سطح (عمدتاً جلبک<sup>۱</sup>) حمل می‌کند. هر بار با انجام غواصی در آب مشاهده می‌شد که مواد زائد به پره‌ها و تسمه‌ی روتور چسبیده‌اند. با این حال، هنگامی که جهت چرخش معکوس شود دوباره جدا می‌شوند. بنابراین، خار و خاشاک روی هم جمع نمی‌شوند.

<sup>۱</sup> Algal flotsam



به منظور جلوگیری از سائیده شدن سرعت چرخش کم می‌شود. اندازه‌گیری نویز به ما این امکان را می‌دهد تا تأیید کنیم که هیچ نویز در بازه‌های فرکانسی منتشر نمی‌شود زیرا ممکن است باعث آزار ماهیان یا پستانداران دریایی شوند. تنها صداهای مادون صوت با فرکانس کم در رابطه با عبور پره‌ها شناسایی شده‌اند.

این ماهیان به سرعت با نمونه سازگار شده‌اند و مشاهده می‌شود که تعداد زیادی از آن‌ها به آن نزدیک شده‌اند (شکل ۹-۱۰ را ببینید). به طور واضح تأسیسات به عنوان صخره‌ی دریایی مصنوعی عمل کرده است. با این حال، ماهیان زیر سطح روتور (ماهی پات، پالاک، راس) یا بالای آن (ماهی بریم) بودند. هیچ ماهی مشاهده نشده است که از وسط روتور بگذرد. تمامی گونه‌هایی که در منطقه رفت و آمد می‌کنند به حضور جریان‌های قوی و جزر آب عادت دارند و در نتیجه می‌توانند روتور را به عنوان یک مانعی دیگر در میان چیزهای دیگر درک کنند.



شکل ۹-۱۰ شنای ماهیان در اطراف توربین Sabella D03 (Sabella SAS) ©

رسوبات دریایی کل سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. خزها و کرم‌ها به سرعت شروع به تجمع روی سازه می‌کنند. در طول زمان صدف‌های ماسل در بالاترین قسمت سازه به طور قابل توجه رشد می‌کنند. به وسیله‌ی پوشش ضد رسوب از روتور محافظت می‌شود که ثابت شده است بسیار موثر می‌باشد. پره‌ها تمیز باقی می‌مانند که برای حفظ بازده هیدرودینامیکی خوب، ضروری می‌باشد.

گل و لای آب دهانه‌ی رود بسیار زیاد است. رسوبات گل ساخته شده بر روی تمامی حجم‌های مرده در سطح خارجی، به عنوان مثال، زیر روکش‌های محافظت‌کننده ظاهر می‌شوند. این

رسوبات بر عملکرد ماشین تأثیری نداشتند. با این وجود، این پدیده در طرح آینده ی ماشینها در نظر گرفته خواهد شد تا از هر گونه مشکل بالقوه اجتناب شود.

#### ۴-۱۰ نتایج

پروژه ی Sabella D03 پاسخ‌هایی برای سوالات بشمار فراهم کرد و باعث شد تا به نتایج زیر برسیم:

- پره‌های متقارن به این معنا می‌باشند که می‌توان از جریان‌های جزر و مدی در هر دو جهت با روتور ثابت در فضا بهره‌برداری کرد.
- طرح انتخابی برای توربین جریان جزر و مدی و سازه‌ی تکیه‌گاه آن کار پایین آوردن آن و بالا بردن آن با کشتی مجهز به جرثقیل را ساده می‌کنند.
- دید ضعیف ایجاب می‌کند تا توانایی انجام کار بدون کمک غواصان را داشته باشیم.
- آشفستگی در جریان بر تولید انرژی تأثیر دارد.
- این آشفستگی باعث خستگی پره‌ها می‌شود؛ یک حلقه‌ی تقویتی خارجی این اثر را محدود می‌کند.
- تأسیسات به عنوان صخره‌ی دریایی مصنوعی عمل می‌کند؛ ماهیان توسط روتور که خیلی کند می‌چرخد آزار نمی‌بینند.
- مواد زائد شناور بر روی روتور انباشته نمی‌شوند.
- می‌توان با استفاده از رنگ مخصوص از رسوبات دریایی واقع بر روتور اجتناب کرد.
- گل و لای وارد هر مکان را کدی می‌شوند.

#### ۵-۱۰ کتاب‌شناسی

- [BIS 06] BISCHOFF V., DAVIAU J.F., GUÉNA F., MAJASTRE H., RUER J., TARTIVEL C., "Design and operational features of a tidal stream turbine", Proceedings of the OWEMES Conference, Civitavecchia, Rome, April 2006.
- [BOR 08] BORNENS C., DAVIAU J.F., DECRIN M.K., GAILLARD L., GROSDÉMANGE D., GUÉNA F., MAJASTRE H., RUER J., "The Sabella Turbine", Proceedings of the 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), Brest, France, October 2008.
- [BOR 10] BORNENS C., DAVIAU J.F., GAILLARD L., GUERRIER A.,

---

*RUER J., “The Sabella Turbine – tests results and further development”, 3rd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2010), Bilbao, Spain, October 2008.*  
*[DAV 04] DAVIAU J.F., GUENA F., MAJASTRE H., RUER J., “Divers aspects de l’exploitation de l’énergie des courants marins”, Conférence SeaTech Week, Brest,*  
*[http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/energies\\_proceeding.htm](http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/energies_proceeding.htm), 20-21 October 2004.*



## مبدل‌های انرژی باد

مدت‌ها قبل از اینکه دانشمندان توصیفی منطقی مبتنی بر معادلات مکانیک سیالات ارائه دهند، بشر با مشاهده‌ی پدیده‌های طبیعی، از توان امواج اقیانوس آگاه شده بود. این آگاهی از دریانوردی و تجربه‌ی "امواج شدید" نادر یا از تجربه‌ی آسیب ناشی از امواج طوفان و سونامی‌ها در ساحل حاصل شده است. اولین نوشته‌ی ثبت‌شده از تمایل به استخراج این انرژی که ما قادر به یافتن آن بوده‌ایم، مجوز فرانسوی به تاریخ ۱۷۹۹ با عنوان "وسایل مختلف استفاده از امواج اقیانوس به عنوان نیروی محرک"<sup>۱</sup> توسط مسرز. جرارد، پدر و پسر است. ما می‌توانیم نشانه‌هایی از تلاش‌های دیگر برای بهره‌برداری از انرژی امواج را در قرن ۱۹م در کالیفرنیا پیدا کنیم که در آن شرکت توان موجی تراکم هوا در سانفرانسیسکو "موتور موجی" طراحی‌شده توسط مخترع آمریکایی ترنس دوفی را زیر پل موقت ساخت. با آغاز قرن ۲۰م، مهندس فرانسوی پاول گرسر ایده‌ی فرآیند تبدیل انرژی موجی را مطرح کرد که او آن را سیفون رم بارومتری<sup>۲</sup> نامید و سفارش ساخت ایستگاهی آزمایشی را بر روی ساحل داد تا چیزی را که او "رانش‌های تولید-شده توسط دریا" نامید، مهار کنند. متأسفانه، بحران اقتصادی ۱۹۲۹ و به دنبال آن جنگ جهانی دوم از اتمام "آزمایشگاه هیدرودینامیک دریایی" او جلوگیری کرد و خرابه‌های آن همچنان روی دماغه‌ی سنت مارتین در پایین فانوس دریایی بیریتز قابل مشاهده است.

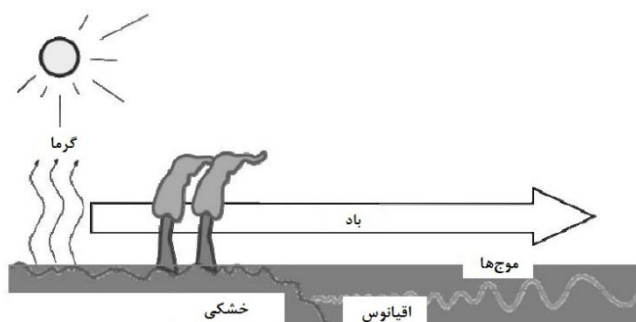
جهان تا اولین بحران نفت ۱۹۷۳ انتظار کشید تا دانشگاه‌ها دوباره شروع به بررسی مسئله‌ی مهار انرژی موجی کنند. مقاله‌ی پروفیسور اس.سالتر [SAL 74] از دانشگاه ادینبورگ که در ژورنال نیچر با عنوان ساده‌ی "توان موجی" در ۱۹۷۴ به انتشار رسید، نقطه‌ی عطفی بود که علاقه‌ی علمی را دوباره برانگیخت. این پژوهش درباره‌ی ماشین‌های تبدیل انرژی موجی بود که

<sup>۱</sup> Pour divers moyen d'employer les vagues de la mer comme moteurs

<sup>۲</sup> béliet-siphon barométrique

در آن زمان عمدتاً در کشورهای اروپایی و ژاپن متمرکز شده بودند [CLE 02] و شامل بررسی توسعه‌ی چنین فناوری‌هایی در اواخر قرن ۲۰م در اروپا بود. از آن موقع به بعد تعداد پروژه‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است و کارهای پژوهشی به قاره‌ها گسترش یافته‌اند. خلاصه-ای به روز از فناوری‌های اصلی استفاده‌شده را می‌توان در [FAL 10] پیدا کرد.

### ۱-۱۱ معرفی منبع انرژی موجی



شکل ۱-۱۱ مکانیزم‌های ساخت امواج

امواج محصول جانبی باد هستند که خود آن به تنهایی محصول جانبی انرژی خورشید است. باد در سطح بالایی آب در دریای آزاد حرکتی ایجاد می‌کند که به سطح شکل موجی می‌دهد. این امواج در ابتدا بسیار کوچک هستند و سپس با ادامه‌ی وزش باد اندازه‌ی آن‌ها افزایش پیدا می‌کند و امواج مختلف با هم ترکیب می‌شوند و امواج بزرگتر را شکل می‌دهند؛ در این عمل تبادل انرژی رخ می‌دهد. مادامی که عمق آب بیشتر از طول موج باشد، آن‌ها به شکل امواج جاذبه‌ای با کمی اتلاف انرژی منتشر می‌شوند. بنابراین امواج در اقیانوس آزاد ایجاد شده و هنگامی که به ساحل برسند در آب‌های کم‌عمق انرژی آن‌ها از بین می‌رود. در اینجا توجه کنید که ما درباره‌ی خیزآب<sup>۱</sup> و موج به طور مترادف صحبت می‌کنیم؛ تفاوت میان این دو عبارت در توپولوژی طیفی مربوط به وضعیت دریا (توزیع آن‌ها به لحاظ فرکانس و جهت) نهفته است اما هیچ ربطی به بحث ما ندارد.

انرژی انتقالی امواج در بخش‌های یکسان، برابر با انرژی جنبشی میدان سرعت ذرات آب و انرژی پتانسیل تغییر شکل محیط سیال اطراف موقعیت خود در صفحه‌ی سطح است. بنابراین، انرژی مکانیکی محسوب می‌شود.

<sup>۱</sup> Swell

توان موجی با جریان انرژی عبوری از سطح عمودی قائم بر جهت انتشار خود تعریف می‌شود. بنابراین می‌توان آن را به صورت  $W \cdot m^{-2}$  بیان کرد. با این حال، معمولاً این مورد رایج نبوده و ترجیح داده می‌شود که توان موجی را با  $W \cdot m^{-1}$  (وات بر طول جبهه‌ی موج)، انتگرال‌گیری عمودی از توان بر سطح از بستر اقیانوس تا سطح آن (به لطف این حقیقت که اگر سینماتیک جریان در سطح مشخص باشد مقدار آن در اعماق معلوم خواهد شد) تعیین کرد. در عمق بینهایت، ۹۵٪ از انرژی موج در عمقی برابر نصب طول موج آن می‌باشد. معمولاً طول موج مابین ۶۰ تا ۱۶۰ m قرار دارد.

توان موج (که با وات بر طول جبهه‌ی موج بیان می‌شود) جریان انرژی عبوری از سطح عمود بر جهت انتشار امواج بر واحد زمان است. محاسبه‌ی انرژی مکانیکی ستون عمودی آب که دارای پایه‌ای از مساحت سطح واحد می‌باشد و سپس ضرب آن در سرعت گروهی موج برای تعیین این جریان انرژی سودمند است. انرژی مکانیکی ستون آب، جمع انرژی پتانسیل و جنبشی خود می‌باشد. برای انتشار چنین موجی بدون اتلاف نشان داده شده است که مقدار میانگین این دو نوع انرژی برابر می‌باشند و مطابق زیر در مورد موج با تغییر شکل سینوسی نوشته شده است [GUY 01]:

$$\langle E_k(t) \rangle = \langle E_p(t) \rangle = \frac{E_m}{2} = \frac{\rho_w g H^2}{16} \quad (11-1)$$

که در آن  $\rho_w$  چگالی آب دریا است (که به شوری آب بستگی دارد،  $\approx 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )،  $g$  جاذبه است و  $H$  ارتفاع از رأس تا حداقل تغییر شکل است. هنگامی که عمق آب نامحدود است، سرعت گروهی (یعنی سرعت انتشار انرژی) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V_g(T) = \frac{gT}{4\pi} \quad (11-2)$$

که در آن  $T$  دوره‌ی تناوب موج سینوسی است.

بنابراین، توان بر طول جبهه‌ی موج سینوسی برابر است با:

$$P_w = E_m V_g = \frac{\rho_w g^2}{32\pi} H^2 T = 980 H^2 T \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (11-3)$$

معادله‌ی [11.3] برای موج تک‌جهتی و سینوسی معتبر است.

## ۱۱-۱-۱۱ در نظر گرفتن طبیعت طیفی خیزآب

خیزآب در دریا پیچیده تر از موج تک جهتی و تکفام است (شامل تنها یک فرکانس). ممکن است آن را با منطبق کردن امواج مولفه‌ی خود بر یکدیگر نشان داد و در نتیجه مطالعه‌ی خیزآب در دریا شامل مطالعه‌ی طیف آن می‌شود.

مشخص سازی طیفی خیزآب یک زمینه‌ی مهم از مطالعه‌ی علمی است. در اینجا قصد ما ارائه‌ی جزئیات این زمینه نیست و صرفاً می‌خواهیم برخی اطلاعات مربوط به موضوع را فراهم کنیم.

چگالی طیفی توان آن با  $S_{\eta}(f)$  نشان داده می‌شود. توان بر طول جبهه‌ی موج خیزآب مطابق [SAU 09] بیان می‌شود:

$$P_w = \rho g \int_0^{\infty} S_{\eta}(f) v_g(f) df \quad (11-4)$$

ما  $m_n$  را ممان طیفی از درجه‌ی  $n$  از  $S_{\eta}(f)$  تعریف می‌کنیم:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_{\eta}(f) df \quad (11-5)$$

می‌توان در عمق بینهایت آب معادله‌ی [11.4] را با استفاده از فرمول [11.2] ساده سازی کرد و می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$P_w = \frac{\rho_w g^2}{4\pi} m_{-1} \quad (11-6)$$

بنابراین انرژی دوره‌ی  $T_e$  مطابق زیر تعریف می‌گردد:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (11-7)$$

طول عمده‌ی موج  $H_s$  با واریانس  $m_0$  به صورت زیر رابطه دارد:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (11-8)$$

بنابراین فرمول [11.6] به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$P_w = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} H_s^2 T_e = 490 H_s^2 T_e \text{ (W} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (11-9)$$



طیف‌های استاندارد تعریف شده‌اند که به ما امکان نزدیک شدن به طیف اندازه‌گیری شده در مکان و در نتیجه دستیابی به مدل طیفی ساده می‌دهند که می‌توان از آن برای بازتولید عددی سیگنال استفاده کرد. بنابراین، طیف  $ISSC$  (کمیته‌ی بین‌المللی سازه‌ی کشتی  $MIC$ ) [99] مطابق زیر نوشته می‌شود:

$$S_{ISSC}(f) = \frac{5}{16} H_s^2 \frac{f_p^4}{f^5} e^{-\frac{5f_p^4}{4f^4}} \quad (11-10)$$

فرکانس حداکثر  $f_p$  به فرکانسی مربوط می‌شود که در آن  $S_{ISSC}(f)$  بیشینه است. می‌توان آن را با رابطه‌ی زیر به دوره‌ی تناوب انرژی مربوط کرد:

$$f_p = \left(\frac{3}{5}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{T_e} \quad (11-11)$$

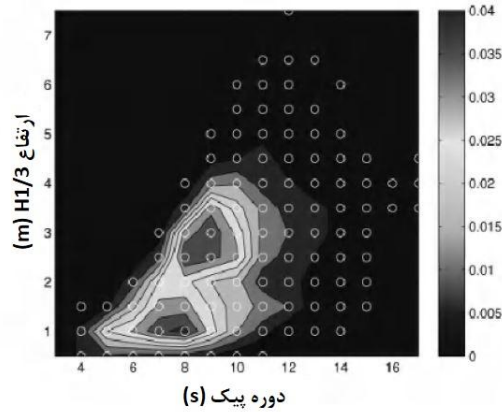
پارامترهای دوتایی  $(H_s, f_p)$  (یا  $(H_s, T_p)$  با  $T_p = 1/f_p$  به نام دوره‌ی حداکثر) وضعیت دریا را تعریف می‌کنند. در عمل، طیف‌های خیزآب در مدت حدوداً یک ساعت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، وضعیت دریا که با در نظرگیری مشخصات پراثری آن به صورت آماری در طول زمان پایدار است، مشخصه‌ای از خیزآب در مدت این دوره‌ی زمانی است.

توجه کنید با این ساده‌سازی باید سطح منبع پراثری وضعیت دریا مطابق دو پارامتر آماری ارتفاع و دوره‌ی تناوب امواج تعریف گردد، در حالی که برای شکل‌های دیگر انرژی مکانیکی تجدیدپذیر، به عنوان مثال، توان بادی، تنها یک پارامتر کافی است (به عنوان مثال، سرعت باد).

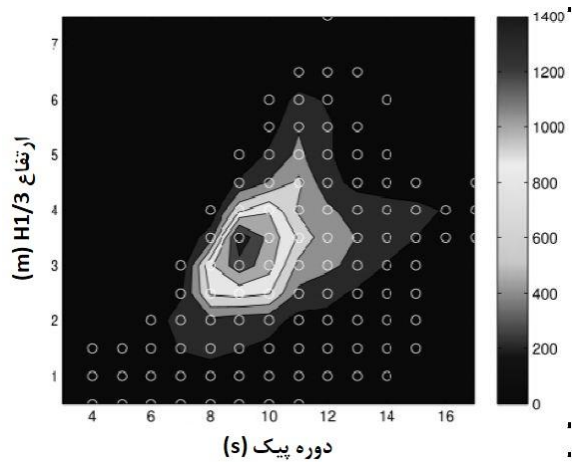
### ۱۱-۱-۲ نمودار رخداد وضعیت‌های دریایی

شناورهای اندازه‌گیری موج که در دریا نصب شده‌اند به ما امکان تولید نمودارهای احتمال رخداد وضعیت‌های دریایی را در نقاط مختلف از ساحل فرانسه می‌دهند. در شکل ۱۱-۲ نمونه‌ای از داده‌های جمع‌آوری شده در نزدیکی ساحل یو در خلیج بیسکی و در شکل ۱۱-۳ توان موجی متوسط سالانه هر وضعیت دریا نشان داده شده است که با استفاده از سنجش توان بر طول جبهه‌ی موج (معادله‌ی [11.9]) از طریق احتمال رخداد هر وضعیت دریا (شکل ۱۱-۲) به دست می‌آیند. اگرچه در مورد سایت جزیره‌ی یو دو احتمال برای پیک وضعیت دریا  $(H_s = 1, T_p = 8s)$  و  $(H_s = 3, T_p = 9.5s)$  وجود دارد که بیشترین پتانسیل پراثری را تقریباً  $(H_s = 3.5, T_p = 9s)$  نشان می‌دهد.

در فرانسه آرشیو ملی داده های موج در جای مناسب<sup>۱</sup> (CANDHIS) دارای شبکه ای از شناورهای اندازه گیری موج می باشد آرشیوی از اندازه گیری های وضعیت های دریایی می سازد.



شکل ۱۱-۲ احتمال رخداد وضعیت های مختلف دریایی (سایت جزیره ی یو) (برای مشاهده ی ورژن رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه کنید)

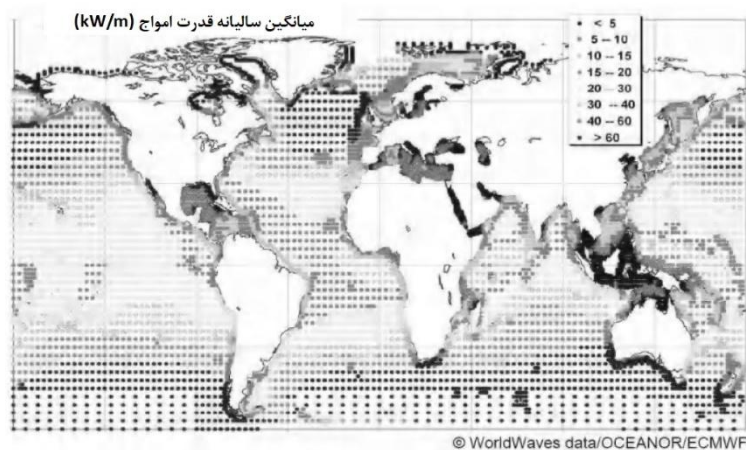


شکل ۱۱-۳ توان متوسط سالانه ی موج ( $W/m$ ) بر حسب وضعیت دریا ( $H_s, T_p$ ) در جزیره ی سایت یو. توان امواج که با احتمال رخداد سنجیده می شوند (برای مشاهده ی ورژن رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه کنید)

<sup>۱</sup> The Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ

## ۱۱-۳ توزیع جغرافیایی

شکل ۱۱-۴ توزیع جهانی توان متوسط سالانه‌ی موج را با واحد  $kW/m$  نشان می‌دهد. مقدار بیشینه در اطراف دماغه‌ی هورن<sup>۱</sup> با حدود  $100 kW/m$  یافت می‌شود. توجه کنید که مناطق بزرگی در جهان دارای چگالی توان موجی بیشتر از  $20 kW/m$  هستند که به طور کلی به عنوان آستانه‌ی سودآوری برای مبدل‌های انرژی موجی قابل قبول است. برخی از نواحی محافظت‌نشده در جنوب آتلانتیک، جنوب استرالیا و ساحل سمت اقیانوس آرام آمریکای جنوبی یافت می‌شوند. با این حال، اختلاف فصلی منابع انرژی امواج در نیمکره‌ی شمالی بسیار برجسته‌تر می‌باشند.



شکل ۱۱-۴ توزیع جهانی منبع انرژی موجی [CRU 08] (برای مشاهده‌ی ورژن رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه کنید)

اولین مبدل‌های انرژی موجی در اروپا توسعه یافتند که محرک اصلی آن‌ها بریتانیا بود. بریتانیا به همراه ایرلند در معرض بیشترین منبع انرژی موجی در آن منطقه از جهان قرار دارند. توان متوسط سالانه‌ی موج در ساحل آتلانتیک اروپا در بازه‌ی ۱۵ تا  $80 kW \cdot m^{-1}$  قرار دارد. در فرانسه این مقدار در خلیج بیسکی  $40 kW \cdot m^{-1}$  است. مطابق شورای انرژی جهان [THO 04]، پتانسیل جهانی که به لحاظ اقتصادی قابل دسترسی است در بازه‌ی ۱۴۰ تا  $750 TWh$  قرار دارد.

<sup>۱</sup> Cape Horn

## ۱۱-۲ دسته بندی مبدل های انرژی موجی

معیارهای بسیاری وجود دارد که می توان از آنها برای انجام دسته بندی استفاده کرد. اولین مورد به شکل وسیله مربوط می شود [DRE 09]. بنابراین، ما می توانیم سه نوع هندسه را مشاهده کنیم:

- "جذب کننده های نقطه ای" وسایل متقارن محوری هستند که نسبت به طول موج کوچک می باشند.

- "ترمیناتورها" به صورت افقی بسیار بزرگ می باشند. محور اصلی آنها عمود بر جهت انتشار امواج است.

- "تضعیف کننده ها (اتنیتورها)" نیز به لحاظ افقی بزرگ هستند. آنها در جهت انتشار امواج کار می کنند. سیستم پلامیس نمونه ای از اتنیتورها است.

دومین روش محتمل دسته بندی به موقعیت ماشین ها مربوط می شود که ممکن است مطابق ذیل باشد:

- سیستم های "روی ساحل" به طور کلی به ساحل یا سازه ی مصنوعی (به عنوان مثال، موج شکن) متصل می باشند. نگهداری و وصل آنها به شبکه ی برق نسبتاً آسان است، زیرا به کارگذاری کابل های توان زیردریایی نیاز ندارد. با این حال، منبع انرژی موجی موجود با کمتر شدن عمق کاهش می یابد.

- ممکن است نواحی "نزدیک ساحل" (حدود ۰.۵ تا ۲ km در دریا) دارای مزیت عمق نسبتاً کم باشند (حدود 1/4 طول موج) که اجازه می دهد تا مبدل های انرژی موجی مستغرق در بستر نصب شوند (اما نسبتاً نزدیک به ساحل). این ویژگی باعث می شود تا بتوان انرژی را از طریق سیال پر فشار به ساحل انتقال داد. منبع انرژی موجی آن بیشتر از روی ساحل می باشد، اما کمتر از اقیانوس آزاد است. با این حال، مطالعات نشان داده است که کاهش پتانسیل انرژی نسبتاً کم است (حدود ۱۰٪ از منبع دور از ساحل) و احتمال وضعیت های وخیم دریایی نیز کاهش می یابد که محدودیت های استحکام تأسیسات را در مرحله ی طراحی بر می دارد [FOL 09].

- "فراساحل" به چند کیلومتری ساحل گفته می شود. به طور کلی عمق در این فاصله بیشتر از 1/3 طول موج است و منبع انرژی موجی کاهش پیدا نمی کند. انتقال انرژی به ساحل تنها به شکل الکتریسیته در ولتاژ تقریباً ۱۰ kV قابل انجام می باشد تا تلفات مسیر کاهش پیدا کند.

بسیار ضروری است که مبدل‌های انرژی موجی را به یکدیگر متصل کرد تا تنها یک کابل توان زیر دریایی داشت که از مزرعه به ساحل برود.

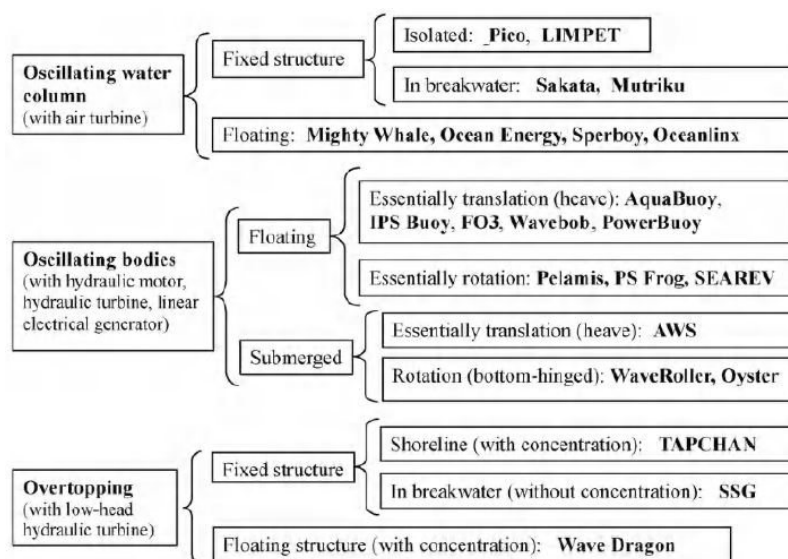
دسته‌بندی آخری که ما در ادامه‌ی این بخش استفاده خواهیم کرد، مبتنی بر اصول تبدیل هیدرومکانیکی استفاده‌شده توسط ماشین‌ها است. بنابراین ما می‌توانیم فراتر از تعداد کمی از فرآیندهای قابل دسته‌بندی سه نوع اصلی عمده‌ی تبدیل را مشخص کنیم:

- وسایل روگذر: نوع A؛

- ستون نوسانی آب (OWC): نوع B؛

- اجسام نوسانی روی یا زیر سطح: نوع C.

آخرین مورد دسته‌بندی که امروزه مناسب‌ترین مورد می‌باشد، توسط فالکو در مطالعه‌ی اخیر خود اتخاذ شده است و نموداری از آن در شکل ۱۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۵ دسته‌بندی مطرح‌شده توسط فالکو [FAL 10]

هر کدام از این قواعد تبدیل هیدرومکانیکی، انرژی موجی ورودی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند. این انرژی مکانیکی صفر خواهد بود مگر اینکه حرکت مکانیکی با سیستم تبدیل انرژی کاهش پیدا کند<sup>۱</sup>. به منظور انجام این استهلاک یا شکست بازیافتی، این قواعد تبدیل

<sup>۱</sup> این امر به طور کلی برای "انتقال نیرو" با حروف PTO نشان داده می‌شود.

هیدرومکانیکی که در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهند گرفت باید به زنجیره‌ی تبدیل مکانیکی-الکتریکی مرتبط شوند. ما می‌توانیم این قواعد تبدیل مکانیکی-الکتریکی را به ۵ گروه تقسیم کنیم:

- چرخش پیوسته، می‌توان کار تبدیل را با استفاده از ژنراتور در حال چرخش به همراه یکنواخت‌سازی انرژی در بخش‌های چرخان (نوع ۱) یا اگر ممان اینرسی و سرعت چرخش به اندازه‌ی کافی برای ذخیره‌ی انرژی جنبشی چرخشی بزرگ نباشد بدون یکنواخت‌سازی انجام داد (نوع ۲).

- جابجایی چرخشی یا نوسانی حول یک موقعیت خنثی. می‌توان از طریق سیستم تبدیل هیدروپنوماتیک یا اولئو-پنوماتیک<sup>۱</sup> کار تبدیل را انجام داد (نوع ۳). به این معنا که می‌توان از ذخیره‌ی پنوماتیکی استفاده کرد. همچنین می‌توان به طور مستقیم پس از انطباق مکانیکی حرکت (گیربکس رَک و پینیون، جعبه‌دنده، بال اسکرو و غیره) با ژنراتور الکتریکی (نوع ۴) یا صرفاً با محرک مستقیم (نوع ۵) کار تبدیل را انجام داد.

بنابراین، ما سیستم دسته‌بندی دو ورودی را پیشنهاد می‌کنیم که از یک طرف مبتنی بر اصول تبدیل هیدرومکانیکی ( $A$ ،  $B$  و  $C$ ) است و از طرف دیگر مبتنی بر اصول تبدیل مکانیکی-الکتریکی است (انواع ۱ تا ۵). در شکل ۱۱-۶ تصویری از ۱۵ احتمال به دست آمده نشان داده شده است. ما از عبارات زیر استفاده خواهیم کرد:

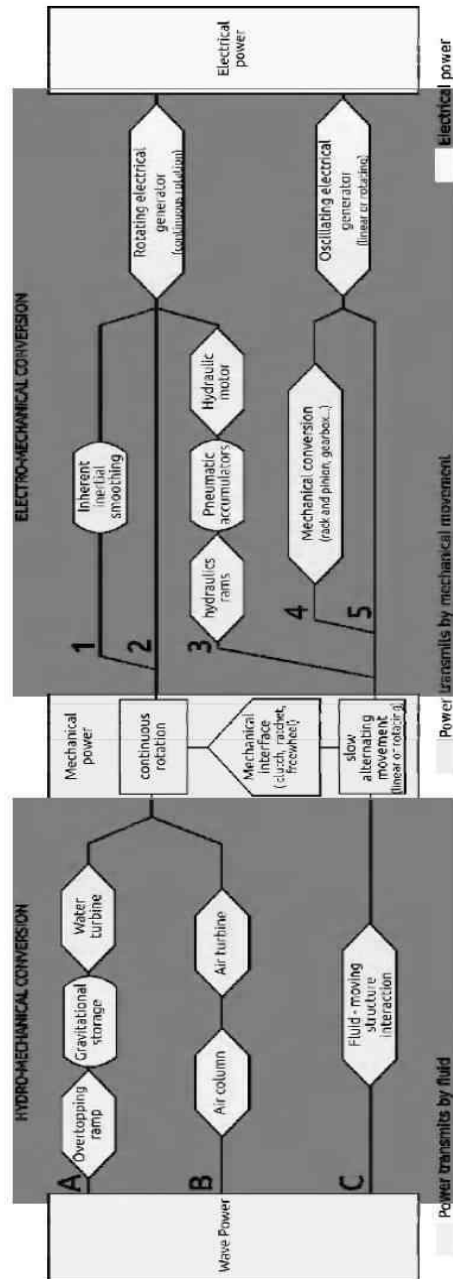
- مبدل‌های غیر مستقیم انرژی موجی برای سیستم‌هایی با سیستم تبدیل غیر مستقیم هیدرومکانیکی از نوع  $A$  یا  $B$ ؛

- مبدل‌های مستقیم انرژی موجی برای سیستم‌هایی با سیستم تبدیل مستقیم هیدرومکانیکی نوع  $C$ ؛

- مبدل‌های انرژی موجی با تبدیل غیر مستقیم مکانیکی-الکتریکی برای سیستمی با تبدیل مکانیکی الکتریکی از نوع ۱ تا ۴.

- مبدل‌های انرژی موجی با تبدیل مستقیم مکانیکی-الکتریکی برای سیستم‌هایی با تبدیل مکانیکی-الکتریکی از نوع ۵.

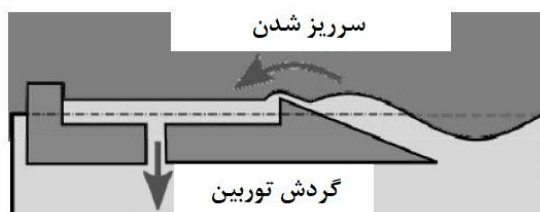
<sup>1</sup> Oleo-pneumatic



شکل ۱۱-۶ نمودار سازمانی دسته‌بندی پیشنهادی مطابق با اصول تبدیل هیدرومکانیکی (A، B یا C) و تبدیل مکانیکی-الکتریکی (انواع ۱-۵)

## ۱۱-۲-۱ سیستم های روگذر: نوع A

## ۱۱-۲-۱-۱ اصول پایه



شکل ۱۱-۷ اصول سیستم های روگذر

این وسایل به منظور ایجاد کانال و تمرکز امواج طراحی شده اند تا ارتفاع آنها را افزایش دهند و سپس به آنها اجازه می دهند تا بر روی شیبی دچار شکست شوند تا حوضچه ای را که سطح میانگین آن بالاتر از دریا است پر کنند (شکل ۱۱-۷). سپس آب حوضچه دوباره به دریا باز می گردد و توربین های با هد پایین متصل به ژنراتورهای الکتریکی را به حرکت در می آورد. همانند توربین های هوا در سیستم های نوسانی ستون آب (شکل ۱۱-۱۱)، استفاده از فنآوری سرعت متغیر به معنای بالا ماندن انرژی حاصل شده در گستره وسیعی از دبی جریان و ارتفاع هد است [KAN 00]. یکی از مزایای این نوع مبدل انرژی موجی بر اساس اصلی که بر پایه ی آن کار می کند داشتن منبعی از انرژی است (ذخیره ی انرژی پتانسیل جاذبه) که می توان از آن برای تضمین یکنواختی توان تولیدی استفاده کرد. با این حال، این سیستم ها دارای مشکل آستانه ی شروع می باشند، زیرا هنگامی که امواج ورودی انرژی کافی برای شکست در بالای سرایشی نداشته باشند، هیچ انرژی تولید نمی گردد. به علاوه، هنگامی که این تأسیسات روی ساحل قرار گرفته باشند کارایی آنها عمدتاً به سطح جزر و مد بستگی خواهد داشت.

معمولاً سیستم مبدل انرژی مکانیکی-الکتریکی (شکل ۱۱-۶ را ببینید) که در این نوع سیستم ها یافت می شود از نوع ۲ است.

## ۱۱-۲-۱-۲ مثال ها

تاچن (مخفف کانال تیپرد، شکل ۱۱-۸) در سال ۱۹۸۵ در تافت استالن (نروژ) ساخته شده است و تا قبل از اینکه به دنبال طوفان ۱۹۹۱ از کار بیفتد به مدت ۶ سال کار کرد. کیفیت پر کردن حوضچه ی آن به ارتفاع متوسط دریا نسبت به ارتفاع حوضچه بستگی دارد. باریک شدن

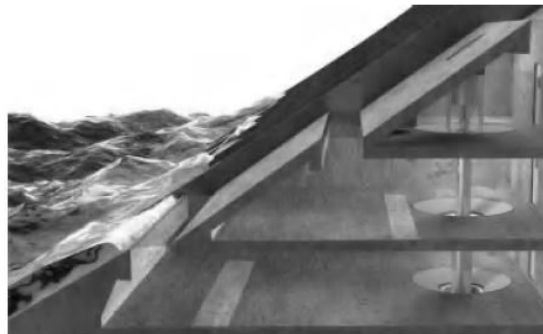


کانال در تاپچن باعث افزایش ارتفاع امواج و پر شدن حوضچه‌ی واقع در چند متری بالای سطح دریا می‌شود.



شکل ۸-۱۱ تاپچن [FAL 93]

طرح ژنراتور *Sea-Wave Slot-cone* (SSG) شکل (۹-۱۱) شرکت نیروی انرژی موج، شامل استفاده از چند سراسیمبی و حوضچه می‌باشد که در ارتفاع‌های مختلف واقع شده‌اند. این طرح بهره‌برداری از ارتفاع‌های مختلف موج را به ازای سطوح مختلف آب تسهیل می‌کند (اثر جزر و مد). توربین *MST* (چند مرحله‌ای) فقط یک ژنراتور الکتریکی را به حرکت در می‌آورد.



شکل ۹-۱۱ ژنراتور *Sea-Wave Slot-cone* [MAR 09]

مبدل انرژی موجی *Wave Dragon* (شکل ۱۱-۱۰) یک وسیله‌ی مهارشده‌ی شناور می‌باشد. می‌توان ارتفاع شناوری آن را با استفاده از وزنه‌ی تعادل بر حسب وضعیت دریا تنظیم کرد. دو بازوی بازتاب خیزآب را متمرکز می‌کنند و ارتفاع رأس امواج را افزایش می‌دهند که سپس در حوضچه دچار شکست می‌شوند. آب حوضچه توربین‌های با هد پایین (کاپلان) را به حرکت در می‌آورد. ترجیح داده می‌شود که به جای یک توربین از چندین توربین با توان کم استفاده شود (در این مورد، ۱۶ تا ۲۴)، زیرا این کار بهره‌ی انرژی را بر حسب دبی موجود افزایش می‌دهد. ژنراتورهای الکتریکی با سرعت متغیر بهره‌ی کلی انرژی را بیشتر افزایش می‌دهند.

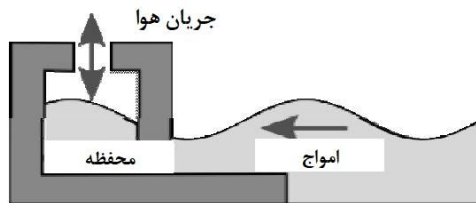


شکل ۱۰-۱۱ سیستم شناور فراساحلی *Wave Dragon*. بالا: مجموعه با بازوهای بازتابی. پایین چپ: سراسیمی موج شکن و حوضچه آبریز. پایین راست: بخش‌هایی که امکان تنظیم ارتفاع شناوری را فراهم می‌کنند [KOF 06, CRU 08]

مدل با اندازه‌ی واقعی (۱:۱)، همچنان در سال ۲۰۱۱ در فاز توسعه می‌باشد) بالی به طول  $m$  ۳۰۰ خواهد داشت (فاصله‌ی میان رئوس بازوها)، به طول  $m$  ۱۷۰ و ارتفاع  $m$  ۱۷ که از آن  $m$  ۳-۶ بالای سطح دریا خواهد بود. وزن کلی آن ۳۳۰۰۰ تن با ظرفیت  $m^3$  ۸۰۰۰ برای حوضچه خواهد بود. توان حداکثر آن  $7MW$  با بهره‌وری سالانه  $20GWh$  بر اساس منبع متوسط  $kW/m$  ۳۶ خواهد بود. بنابراین، عدد معادل ساعت‌های تولید در توان کامل حدوداً ۲۸۰۰ خواهد بود. نمونه‌ای با مقیاس کاهش یافته (۱:۴.۵)، یا  $27m \times 57$  و  $237t$  در طول  $3 \frac{1}{2}$  سال در یک منطقه‌ی حفاظت‌شده‌ی دریای دور از دانمارک (*Nissum Bredning*) مورد آزمایش قرار گرفته است [KOF 06, CRU 08].

## ۱۱-۲-۲ سیستم‌های نوسانی ستون آب: نوع B

## ۱۱-۲-۲-۱ قاعده‌ی پایه



شکل ۱۱-۱۱ قاعده‌ی کلی سیستم‌های نوسانی ستون آب

مبدل‌های انرژی موجی نوسانی آب از تغییرات فشار هوای محفظه بهره‌برداری می‌کنند (شکل ۱۱-۱۱). این محفظه دارای یک روزنه‌ی اولیه است و به طور پیوسته در آب فرو می‌رود تا اینکه حرکت‌های امواج بر ستون آب داخل محفظه تأثیر بگذارند. حرکت عمودی متناوب سطح آزاد داخلی به عنوان یک پیستون عمل کرده و باعث اولین افزایش فشار و سپس کاهش فشار هوای به دام افتاده در محفظه می‌شود. با باز شدن روزنه‌ی دوم، هوا به بیرون جریان پیدا می‌کند. بنابراین، مطابق اصل طبیعی "مکش"<sup>۱</sup> (که می‌توان آن را در برخی سواحل صخره‌ای یافت) هوا به بیرون رفته و سپس جذب می‌گردد. توربین‌های هوا طوری طراحی گشته‌اند که جهت چرخش آن‌ها مستقل از جهت جریان هوا است (توربین‌های تکانه‌ای، توربین‌های ولز<sup>۲</sup> یا *Dennis-Auld*) و به مبدل ژنراتورهای الکتریکی متصل هستند این جریان‌های متناوب هوا را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند.

سرعت نسبتاً زیاد این توربین‌ها به این معنا می‌باشد که می‌توان با علم بر اینکه استفاده از فناوری سرعت متغیر بازده تبدیل انرژی را در وضعیت‌های دریایی مختلف بهبود می‌بخشد، از ژنراتورهای چرخشی "متداول" با سرعت چرخش اسمی  $1500\text{rpm}$  یا  $3000\text{rpm}$  استفاده کرد. می‌توان از انرژی جنبشی دوران که از طریق ممان اینرسی قطعات در حال چرخش ذخیره می‌شود و ممکن است به یک فلاپویل اضافی متصل گردد برای یکنواخت‌سازی نوسانات توان مکانیکی ورودی استفاده کرد. مقدار اینرسی ( $100 \sim 1000\text{kg.m}^2$ ) و سرعت چرخش (تقریباً  $1500\text{rpm}$ ) تنها به مدت کوتاهی به این نوع وسیله اجازه‌ی تنظیم می‌دهند. با این حال، بهره‌برداری از این انرژی مستلزم توانایی کنترل گشتاور اعمالی ژنراتور و در نتیجه هدایت

<sup>1</sup> Blowholes<sup>2</sup> Wells

آن با استفاده از مبدل توان الکتریکی در سطح روتور در یک ژنراتور دو تغذیه‌ای (دو ورودی) یا در استاتور در مبدل با توان کامل است. سیستم‌های مبدل انرژی مکانیکی-الکتریکی برای این نوع مبدل انرژی موجی از نوع ۱ و ۲ خواهند بود (شکل ۱۱-۶).

ممکن است محفظه روی خط ساحلی (روی ساحل) یا روی سکوی شناور (فراساحل) واقع شده باشد. ممکن است از بتن (روی ساحل) یا فولاد (فراساحل) ساخته شود اما شکل و مشخصات آن باید برای تبدیل مقدار حداکثر انرژی موجی محتمل بهینه‌سازی شود. در حقیقت، حرکت ستون آب که نیروی هیدرواستاتیکی برگشتی به آن وارد می‌سازد، یک نوسان مکانیکی رزونانسی است و در نتیجه دارای فرکانس طبیعی می‌باشد که در مرحله‌ی طراحی، ما تلاش می‌کنیم تا آن را بر فرکانس غالب امواج روی سایت منطبق کنیم.

#### ۱۱-۲-۲-۲ مثال‌ها

از اواسط ۱۹۸۰ به بعد و ابتدا در خط ساحلی، نمونه‌های بسیاری برای سیستم‌های نوسانی ستون آب ساخته شده است. ما می‌توانیم به ستون *Kvaerner*، در توفت استالن نروژ، در سایت مشابه "تاپچان" (۱۹۸۵) (شکل ۱۱-۱۲ را ببینید) اشاره کنیم. نمونه‌ی ساخته‌شده با توان پیک  $500 kW$  دارای سطح کپتیشن  $50 m^2$  است (سطح داخلی حفره). توربین هوای ولز به ژنراتور الکتریکی سنکرون متصل شده است. بخش پایینی ستون از بتن و بخش بالایی از فولاد ساخته شده بود. در حین طوفان پایه‌ی بتنی نگه داشته می‌شود، اما بخش فولادی کنار گذاشته می‌شود. پروژه‌های ساخت دوباره مطرح شده بودند اما این برنامه‌ها هیچگاه به نتیجه نرسیدند. با در نظرگیری هزینه‌های زیاد و بازدارنده‌ی مهندسی معماری که در ساخت این نوع سیستم‌ها وارد می‌شوند، نمونه‌های دیگر در مکان‌هایی ساخته شدند که در آنجا خاکریزهای مصنوعی وجود دارد (به ویژه در هند (ویژینجام)، ژاپن (ساکاتا)، پرتغال (دورو) یا اسپانیا (موتریکو)).

<sup>1</sup> *Captation surface*



شکل ۱۱-۱۲ ستون *Kvaerner* در نیروژ [FAL 93]



شکل ۱۱-۱۳ نیروگاه *LIMPET* در اسکاتلند [BEL 02]

در اوایل ۲۰۰۰، نیروگاه *LIMPET* (مبدل انرژی دریایی نصب شده در خشکی) در آیلی اسکاتلند (شکل ۱۱-۱۳) ساخته شد و توسط شرکت *Wavegen* به شبکه‌ی برق بریتانیا متصل گشت. نمونه‌ی اولیه با توان اسمی  $75\text{ kW}$  در سال ۱۹۹۱ در همان سایت نصب گشت. مدل بعدی  $500\text{ kW}$  به طول  $21\text{ m}$  بوده و دارای سطح کپتیشن  $169\text{ m}^2$  است. این مدل برای سازگاری هیدرودینامیکی بهتر و همچنین کاهش کرنش واقع بر سازه‌ی محفظه (ساخته شده از فولاد-*Bi*، ماده‌ی ترکیبی از فولاد و بتن با مقاومت بالا) به سه کیسون تقسیم شده است.

دو توربین ولز با چرخش در جهت مخالف هم با جریان هوا به حرکت در می آیند. آن ها به قطر  $2.6m$  بودند و سرعت اسمی آن ها  $1050rpm$  بود. از فلاپویل ها برای پایداری سرعت آن ها و در نتیجه تولید الکتریسیته استفاده شده بود. در ابتدا این ایده وجود داشت که از ماشین های القایی با حلقه لغزان استفاده شود که می توان مقاومت روتوری آن ها را با استفاده از تریستورها<sup>۱</sup> تغییر داد تا با هزینه کمتری گسترده سرعت های امکان پذیر را افزایش داد و همچنین از استاتور که مستقیماً به شبکه متصل است، استفاده کرد. با این حال، شرکت *Wavegen* ترجیح داد تا هزینه اضافی یک مبدل توان الکتریکی طراحی شده برای توان کامل و متصل به استاتور را بپذیرد. با در نظرگیری اینکه ماشین های با حلقه لغزان از قبل خریداری شده بودند، آن ها را با روتور دارای مدار اتصال کوتاه استفاده کردند *[BEL 02]*. زمان شروع ژنراتور توربو با اضافه شدن ممان اینرسی ناشی از فلاپویل ها ( $1300 kg.m^2$ ) ۱۴ دقیقه بود (شروع موتور توسط جریان حداکثر شبکه ای محلی،  $125 A$  محدود شده بود).

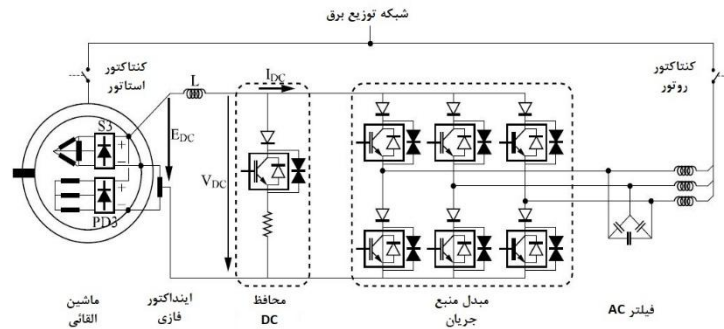


شکل ۱۱-۱۴ نیروگاه پیکو در آزور *[NEU 07]*

درست قبل از شروع هزاره، نیروگاه مشابهی در جزیره ی پیکو در آزور ساخته شد (شکل ۱۱-۱۴). این نیروگاه، پروژه ای آزمایشی با توان اسمی  $400kW$  و سطح کپتیشن  $144 m^2$  در اروپا بود و ابتدا به توربین ولز با سرعت ثابت و سپس به توربین با سرعت متغیر (از ژنراتور القایی دو تغذیه ای با حلقه لغزان استفاده می کند) مجهز گشت. ماشین دارای چهار جفت قطب بوده (سرعت همگام  $750rpm$ ) و تنها در حالت ژنراتور در وضعیت رژیم هایپر-سنکرون با بازه ی متغیر سرعت از  $750$  تا  $1500 rpm^{-1}$  کار می کند. سیم پیچ استاتور برای توان اسمی  $200kW$

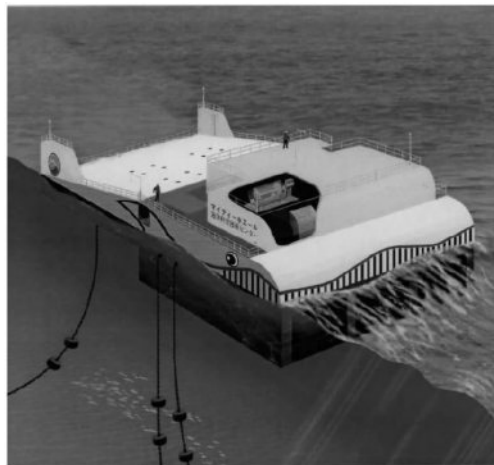
<sup>1</sup> Thyristors

سیم پیچ روتور و مبدل توان الکتریکی آن طراحی شده است، بدین معنا که تأسیسات قابلیت تبدیل توان حداکثر  $400\text{ kW}$  در  $1500\text{ rpm}$  را دارد.



شکل ۱۱-۱۵ نمودار الکتریکی سیستم تولید انرژی در نیروگاه برق پیکو [RAM 99]

سیستم‌های نوسانی دیگر ستون آب برای کاربردهای فراساحل به صورت شناور طراحی شده‌اند. تحت مدیریت پروفیسور یوشیو ماسودا، *JAMSTEC* (مرکز علوم و فناوری دریایی ژاپن) در سال ۱۹۷۶ شناوری آزمایشی به نام *Kaimei* با ۴ محفظه‌ی مجزا ساخت تا طراحی را در دریا مورد آزمایش قرار دهد. آزمایش‌ها در ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ انجام شدند. آن‌ها به ساخت *Mighty Whale* (شکل ۱۱-۱۶)، نمونه‌ی شناور  $50\text{ m}$  در  $30\text{ m}$  برای عمق  $12\text{ m}$  و جابجایی  $4830\text{ t}$  اقدام کردند که در ۱۹۹۸ عملیاتی شد. توان اسمی کلی آن  $110\text{ kW}$  بود. سه توربین ولز به قطر  $11.7\text{ m}$  سه ژنراتور القایی ( $1 \times 50\text{ kW}$  و  $2 \times 30\text{ kW}$ ) را با سرعت متغیر ( $300\text{ rpm}$ - $1800$ ) به حرکت در می‌آورند.



شکل ۱۱-۱۶ نمونه‌ی *Mighty whale* ساخت *Jamstec* (منبع: *JAMSTEC*)

شرکت استرالیایی *Oceanlinx* (تا آپریل ۲۰۰۷ به عنوان *Energetech* شناخته می‌شد) در فراساحل یک سیستم نوسانی ستون آب (شکل ۱۱-۱۷) را با توربین به ثبت رسیده‌ی "*Denniss-Auld*" با سرعت متغیر نصب کرد. این سیستم برای تأمین الکتریسیته با توان حداکثر  $1\text{ MW}$  و نمک‌زدایی آب طراحی شده است. این دو روش تولید برای سایت‌های منزوی همچون جزایر بسیار جذاب می‌باشند. همچنین چندین پروژه در زمینه‌ی خط لوله، به ویژه در جزایر هاوایی وجود دارد. می‌توان از این وسایل شناور به عنوان "موج شکن‌ها" برای محافظت از سایت‌های ساحلی همچون بنادر یا مزارع پرورش ماهی استفاده کرد.



شکل ۱۱-۱۷ سیستم *Oceanlinx*[PRE 04]

### ۱۱-۲-۳ سیستم‌های جسم نوسانی: نوع C

#### ۱۱-۲-۳-۱ اصول پایه

هنگامی که یک جسم شناور طویل (مانند کشتی) در معرض خیزآب قرار می‌گیرد، متحمل حرکت‌هایی مطابق ۶ درجه آزادی خود می‌شود: ۳ جابجایی (سرج، هیو و سووی) و سه نوسان (پیچ، رول و یاو). سرج و سووی و هیو به ترتیب حرکت‌های جابجایی نسبت به محور طولی، محور عرضی و محور عمودی هستند. رول، پیچ و یاو به ترتیب حرکت‌های دورانی نسبت به محورهای طولی، عرضی و عمودی هستند.

با این سیستم‌ها، این اصول شامل استفاده از خیزآب برای به حرکت در آوردن یک یا چند جسم می‌شود. ممکن است حرکت مابین دو جسم نسبی باشد (مرجع داخلی، شکل ۱۱-۱۸ را

<sup>1</sup> Breakwaters

<sup>2</sup> Surge, heave and sway

<sup>3</sup> Pitch, roll and yaw



ببینید) یا مابین یک جسم ثابت و جسم متحرک باشد (مرجع خارجی، شکل ۱۹-۱۱ را ببینید). فنآوری‌های بسیاری وجود دارد که مبتنی بر این اصل می‌باشند. می‌توان آن‌ها را مطابق درجه یا درجه‌های آزادی استفاده‌شده گروه‌بندی کرد. بنابراین، ما به صورت زیر تقسیم می‌کنیم:

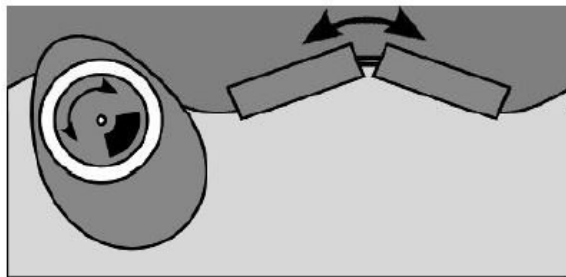
- سیستم‌هایی که از یک یا چندین شناور سرج استفاده می‌کنند؛

- سیستم‌هایی که از پیچ (شناور یا متصل به بستر) استفاده می‌کنند؛

- سیستم‌های ترکیبی هیو و پیچ؛

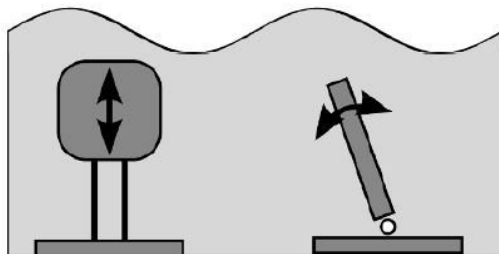
- سیستم‌های ترکیبی هیو و یاو.

حرکت‌های حاصل‌شده کند و متناوب می‌باشند. از آن‌ها برای به حرکت در آوردن سیستم تبدیل انرژی استفاده می‌شود که حرکت‌ها را دمپ<sup>۱</sup> می‌کنند. به دلیل فرکانس پایین حرکت موج، سرعت‌های جابجایی و دوران کم می‌باشند و نیروی لازم برای استخراج انرژی بسیار زیاد است. انرژی مکانیکی در سرعت امواج و بدون هیچ وسیله‌ی ذخیره‌ی بالادست استخراج می‌شود. بنابراین، ما این سیستم‌ها را مبدل‌های مستقیم انرژی موجی (DWECSها) می‌نامیم، اگرچه این اسم نباید با چیزی که سیستم تبدیل مکانیکی-الکتریکی مربوط به وسایل را مشخص می‌کند، اشتباه گرفته شود (که ممکن است برای بخش خود مستقیم یا غیر مستقیم باشد).



شکل ۱۱-۱۸ سیستم‌های نوسانی با مرجع داخلی

<sup>۱</sup> Damp



شکل ۱۱-۱۹ سیستم‌های نوسانی با مرجع خارجی

در رابطه با سیستم تبدیلاترزی مکانیکی-الکتریکی، هنگامی که نیروی مربوط به دمپ حرکت یا حرکت‌ها به سیستم هیدرو (oleo) پنوماتیکی اعمال شود، بیان می‌گردد که تبدیل غیر مستقیم است (نوع ۳، شکل ۱۱-۶ را ببینید). سپس الکتریسیته از طریق سیستم تبدیل انرژی تولید می‌گردد که معمولاً شامل رم‌های هیدرولیکی (به عنوان پمپ عمل می‌کنند)، انباشتگرهای فشار بالا/فشار پایین، موتورهای هیدرولیکی و غیره می‌شود و بنابراین می‌تواند مقدار مشخصی از انرژی واسط را ذخیره سازد (به شکل فشار پنوماتیکی).

هنگامی که خود ژنراتور الکتریکی حرکت مکانیکی را دریافت کند (بدون هیچ مرحله‌ی تبدیل میانی) ما از تبدیل انرژی مکانیکی-الکتریکی با محرک مستقیم صحبت می‌کنیم (نوع ۵). ممکن است گاهی اوقات ترجیح داده شود که از مرحله‌ی انطباق مکانیکی حرکت استفاده شود تا حرکت متناوب خطی را به حرکت متناوب دورانی تبدیل کرد (نوع ۴). بنابراین، دیگر تبدیل مستقیم نبوده اما مشابه سیستم‌های نوع ۵ می‌باشد و توان الکتریکی تولیدی همچنان از ذخیره‌ی بالادست انرژی استفاده نمی‌کند. در نتیجه، توان الکتریکی در سرعت امواج استخراج می‌شود و بنابراین مشخصات نوسانی مشابهی با خود امواج دارد (بخش ۱۱-۴ را ببینید).

#### ۱۱-۲-۳-۲ مثال‌هایی از سیستم تبدیل مکانیکی-الکتریکی غیر مستقیم

شرکت *Aquamarine Power Ltd.* (تأسیس شده در سال ۲۰۰۵) که با دانشگاه کوئین در بلفست کار می‌کند و سیستم اویستر<sup>۱</sup> (شکل ۱۱-۲۰) را توسعه داند که به زیرمجموعه‌ی "فلپ‌ها"<sup>۲</sup> یا "وسایل سرچینگ" تعلق دارد. این سیستم‌ها از حرکت افقی آب بهره‌برداری می‌کنند که در آب کم‌عمق بیشتر است. بنابراین، این وسایل به خوبی با مناطق نزدیک ساحل سازگار شده‌اند. سیستم اویستر شامل پنلی است که با امواج نوسان می‌کند؛ این پنل به پایه متصل شده که آن هم به بستر مهار شده است. حرکت آن فشار سیال (آب) را با استفاده از دو

<sup>۱</sup> Oyster

<sup>۲</sup> flaps

پیستون افزایش می‌دهد این سیال از طریق یک مجرای هیدرولیکی به توربین هیدروالکتریکی (پلتون<sup>۱</sup>) وارد می‌شود که در ایستگاهی روی خشکی واقع شده است [WHI 07]. اگر یکی از دو پیستون خراب شود، کاهش نصف گشتاور دمپ تنها به ۲۵٪ کاهش توان تولیدی منجر می‌گردد [HEN 10].

اولین ورژن اویستر ۱، به ابعاد  $18 \times 11 \text{ m}$  و توان اسمی  $315 \text{ kW}$  در وضعیت دریایی  $40 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$  در سایت EMEC (اسکاتلند) آزمایش شد و به شبکه‌ی برق متصل گشت [Col 08]. توان پیک ورژن دوم آن (اویستر ۲)  $800 \text{ kW}$  است ( $26 \text{ m} \times 16$ ). وزن آن ۱۹۴ تن بوده که ما باید به آن حدود ۱۰۰ تن وزن تعادلی (آب دریا) اضافه کنیم تا بتوانیم نیروی پس‌زنی هیدرواستاتیک پنل نوسانی را تعدیل کنیم. تا سپتامبر ۲۰۱۱، یک ماشین اویستر ۲ در بیلیا کرو اسکاتلند نصب گشته است؛ برنامه‌هایی برای نصب دو ماشین دیگر در همان سایت در طی چند سال آینده وجود دارد تا مزرعه‌ای با توان اسمی کلی  $2.4 \text{ MW}$  ساخته شود [CAM 10, AQU 11].



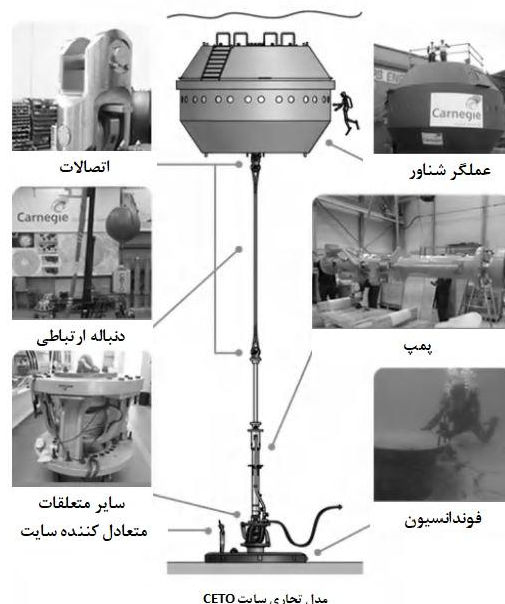
شکل ۱۱-۲۰ سیستم اویستر [CAM 10]

یک CETO (نوسانگر استوانه‌ای انتقال انرژی، شکل ۱۱-۲۱ را ببینید) به عنوان "جذب‌کننده‌ی نقطه‌ای"، یعنی سیستم سرچینگ شناخته می‌شود (که در معرض حرکت‌های عمودی قرار دارد). این سیستم نسبت به طول موج خیزآب ورودی کوچک بوده (شناور به قطر حدوداً  $7 \text{ m}$  است) و برای به طور کامل غرق شدن در آب و متراکم کردن آب با حرکت‌های متناوب خود طراحی شده است. این آب پرفشار از طریق شبکه‌ای از کانال‌ها به خشکی منتقل می‌گردد و مقداری از آن در تراوش معکوس برای تولید آب بدون نمک و حرکت توربین پلتون برای تولید برق استفاده می‌شوند. شرکت انرژی‌های نو EDF<sup>۲</sup> که در ژانویه‌ی ۲۰۰۸ به حق انحصاری

<sup>1</sup> Pelton

<sup>2</sup> EDF Energies Nouvelles

استفاده از این فنآوری در نیمکره‌ی شمالی و جزیره‌ی لاریونیون دست پیدا کرد (شرق ماداگاسکار) امیدوار است تا در ۲۰۱۵ بر روی سواحل این جزیره  $20-30 MW$  راه اندازی کند.



شکل ۱۱-۲۱ سیستم  $CETO [CAR II]$

در سیستم پلامیس ساخت شرکت توان موجی پلامیس، ۴ سیلندر به قطر  $4 m$  که با مفاصل دو درجه‌ی آزادی (مفصل یونیورسال) به هم متصل شده‌اند، حرکت می‌کنند. حرکت‌های نسبی میان قطعات مختلف توسط رم‌های هیدرولیک جذب می‌گردد که به عنوان پمپ عمل می‌کنند. انرژی در انباشتگرهای پنوماتیکی ذخیره می‌گردد (تانکرهای پر شده با گاز و تحت فشار روغن مدار هیدرولیکی). این انباشتگرهای فشار بالا و پایین به این معنا می‌باشند که در وضعیت دریایی مفروض می‌توان برای موتورهای هیدرولیکی توزیع شده در سیستم، جریان تقریباً ثابتی از سیال را تأمین کرد و در نتیجه بر خلاف این حقیقت که منبع الکتریسیته اساساً نوسانی می‌باشد، منبعی نسبتاً پایدار تولید کرد. همچنین آن‌ها برای خاموش کردن هیدرودینامیکی تحت اثر امواج شدید طراحی شده‌اند و در نتیجه از آسیب بالقوه اجتناب می‌شود.

در اولین نمونه‌ی آن به نام  $PI$ ، شش موتور هیدرولیکی مابین سه بخش مبدل توزیع شده بودند (یکی برای هر مفصل) و هر کدام یک ژنراتور القایی  $125 kW$  را به حرکت در می‌آوردند. در آن یک مبدل حرارتی روغن-آب اضافه شده است تا توان اضافی تولیدی در دریاهای آزاد یا (اگر اتصال به شبکه از بین برود) تمام آن را تخلیه کند. باس ولتاژ متناوب  $690 V$  از سیستم

می‌گذرد و به ترانسفورماتور افزایشی وارد می‌شود. برای ولتاژ سمت شبکه مقدار  $11kV$  در مرحله‌ی نمونه‌سازی انتخاب شده است.



شکل ۱۱-۲۲ سیستم پلامیس (چپ: مدل  $PI$  و راست:  $P2$ ) [PEL Ltd]

مزرعه‌ای متشکل از ۳ ماشین پلامیس (مدل  $PI$ ، شکل ۱۱-۲۲ را ببینید) در تابستان ۲۰۰۸ در شمال پرتغال نصب گردید. بنابراین توان کلی آن حدوداً  $2.25MW$  است. برآورد تولید سالانه‌ی آن  $2.7GWh$  بر  $750kW$  واحد به ازای منبع متوسط سالانه  $55kW/m$  (معادل  $3600$  ساعت در توان کامل) است. جدول توان الکتریکی تولیدی سالانه بر حسب وضعیت دریا در شکل ۱۱-۲۳ نشان داده شده است. بنابراین ما می‌توانیم با استفاده از این نمودار و یکی از احتمالات رخداد وضعیت دریا به میزان بهره‌وری سالانه دست پیدا کنیم. امروزه پروژه‌های بسیاری برای مزارع از این نوع در حال ساخت می‌باشند (به ویژه در اسکاتلند و گرن وال).

دوره توانی (Ppows)

	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0
0.5	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty	empty
1.0	empty	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	empty	empty	empty
1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
2.0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
3.0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
3.5	-	270	354	415	438	440	324	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
4.0	-	-	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
4.5	-	-	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
5.0	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
5.5	-	-	-	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
6.0	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
6.5	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	481
7.0	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
7.5	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	690	625

حد اکثر ارتفاع موج (Hsig, m)

شکل ۱۱-۲۳ جدول توان الکتریکی پلامیس  $PI$ [PEL]

در مدل تجاری آن  $P2$ ، ابعاد پلامیس به طور جزئی با قطر  $4m$  و طول  $180m$  بزرگتر می-باشند. دارای یک مفصل اضافی می-باشد و با فرض ۵ بخش استوانه‌ای در نتیجه از ۳ به ۴ مفصل فعال، تغییر می-کند. با این حال، توان اسمی آن‌ها یکسان است. وزن آن حدوداً  $1300$  تن است. اخیراً نمونه‌ای از  $P2$  در جزایر آرکنی مورد آزمایش قرار گرفته است (شکل ۱۱-۲۲).



شکل ۱۱-۲۴ تصویری با جزئیات بیشتر از بخش تبدیلی مفصل پلامیس  $P2[PEL]$

### ۱۱-۲-۴ عملکرد هیدرودینامیکی مبدل های انرژی موجی: پهنای (عرض)

#### دریافت و نسبت پهنای دریافت

پهنای دریافت  $B_W$  در مهار انرژی امواج به عنوان رابطه‌ی توان دریافتی مبدل انرژی موجی به جریان انرژی انتقالی توسط امواج بر طول جبهه‌ی موج  $P_W$  تعریف می‌گردد.

$$B_W = \frac{P_{abs}}{P_W} \quad (11-12)$$

این رابطه تا طول داده‌شده یکنواخت می‌باشد. می‌توان آن را به عنوان عرض جبهه‌ی انرژی موجی دریافتی سیستم تعبیر کرد.

ما می‌توانیم با تقسیم پهنای دریافت بر بعد مربوطه  $B$  اندازه‌ی عملکرد هیدرودینامیکی  $\eta$  را به دست آوریم:

$$\eta_l = \frac{B_W}{B} = \frac{P_{abs}}{P_W B} \quad (11-13)$$

می‌توان آن را به عنوان بازده اولیه‌ی سیستم تعبیر کرد.

باید مطابق اصولی که مبدل انرژی موجی بر آن اساس کار می‌کند بعد مناسب را انتخاب کرد. در اکثر مواقع، از عرض سیستم، یعنی اندازه‌ی آن عمود بر جهت انتشار امواج استفاده می‌شود. این مسئله همواره به این شکل نمی‌باشد. به عنوان مثال، در مورد پلامیس، انرژی با عبور امواج در امتداد سیستم دریافت می‌شود، بنابراین بعد استفاده‌شده طول آن خواهد بود.

بگذارید ما متذکر شویم که  $\eta_I$  معیاری از ظرفیت سیستم برای دریافت انرژی موجی (نه تولید الکتریسیته) است. به همین خاطر ما باید تلفات به وجود آمده در اجزای دیگر سیستم تبدیل صفحات مشترک مکانیکی، مبدل‌های الکترومکانیکی و سیستم‌های توان الکترونیکی، کابل‌های برق، احتمالاً تجهیزات ذخیره‌سازی و غیره) را در نظر بگیریم.

در جدول ۱۱-۱ (برگرفته از [BAB II]) خلاصه‌ای از عملکردهای دینامیکی گروه‌های مختلف مبدل‌های انرژی موجی (مطابق دسته‌بندی فالکو [FAL 10]، شکل ۱۱-۵ را ببینید) نشان داده شده است. این جدول با استفاده از داده‌های منتشرشده در کتب موجود گردآوری گشته است.

ما مشاهده می‌کنیم که عملکردهای هیدرودینامیکی بر حسب قاعده‌ی اساسی طراحی آن‌ها با ضریب ۴ تغییر می‌کنند. می‌توان گفت که به طور متوسط، عملکرد هیدرودینامیکی مبدل‌های پیشرفته انرژی موجی مابین ۳۰ و ۳۰٪ قرار دارد. به طور معمول، یک مبدل انرژی موجی می‌تواند حدود یک چهارم انرژی موج ورودی را دریافت کند.

موضوع	زیر موضوع	میانگین عملکردی هیدرودینامیکی	مینیمم	ماکسیمم	سایز متداول (متر)	ابعاد مرجع
ستون تناوبات آب		33%	20%	45%	30	عرض
سیستم سرریز شدن		13%	4%	23%	300	عرض
سیستم تحریک شده با امواج	یک شناور معلق کوچک	9%	3%	14%	5	عرض
	یک شناور معلق بزرگ	29%	19%	42%	20	عرض
	سیستم انتها ثابت با پروانه های مرتعش	41%	25%	65%	20	عرض
	سیستم معلق با پروانه های مرتعش	20%	14%	36%	25	عرض
	سیستم معلق با ترکیب سرخ/هیو/بیچ	17%	6%	27%	30	عرض
	هیو/بیچ	6%	5%	7%	150	طول

جدول ۱۱-۱ خلاصه ای از عملکردهای هیدرودینامیکی گروه هایی از مبدل های انرژی موجی. برگرفته از [BAB 11]

### ۱۱-۳ مبدل های مستقیم انرژی موجی به همراه تبدیل مستقیم

#### الکترومکانیکی (نوع C5)

همانطور که در بالا مشخص شد ما سیستم های نوع C5 را مبدل های مستقیم انرژی موجی به همراه تبدیل مستقیم الکترومکانیکی یا به طور ساده "محرک مستقیم" می نامیم. در آن ها هیچ مرحله ای برای تبدیل انرژی وجود ندارد که در آن بتوان تأسیسات ذخیره ی حائل را قبل از تبدیل مکانیکی-الکتریکی کنترل کرد، تا تولید برق یکنواخت شود. واژه های آن همچنان در ادبیات انگلیسی قطعی نمی باشند. گاهی اوقات ما در استفاده از زبان دچار اشتباه می شویم، به عنوان مثال به کارگیری "مبدل انرژی موجی با محرک مستقیم" برای سیستم هایی که مبدل-های مستقیم انرژی موجی می باشند اما سیستم تبدیل آن ها با محرک غیر مستقیم کار می کند (نوع C4) [AGA 08] و همچنین نادرستی عبارت "مبدل مستقیم انرژی" برای مبدل های انرژی موجی با محرک مستقیم که در نتیجه به عنوان "مبدل های انرژی موجی با محرک مستقیم" مشخص گشته است [LEI 06].



به طور خلاصه، سیستم‌های روگذر در دسته‌ی C5 جای ندارند، زیرا در آن انرژی پتانسیل جاذبه‌ای وزن آب در حوضچه به عنوان وسیله‌ی ذخیره‌ی انرژی بهره‌برداری می‌شود. همچنین سیستم‌های نوسانی ستون آب نیز از آن حذف می‌گردند که در آن می‌توان انرژی جنبشی چرخشی ذخیره‌شده در بخش‌های چرخان توربین را به عنوان سیستم ذخیره‌ی میانی، یا سیستم‌های اجسام متحرک توسط امواج با سیستم تبدیل هیدروپنوماتیکی استفاده کرد، که در آن‌ها از انباشتگرهای با فشار بالا و پایین برای تنظیم فشار مدارهای هیدرولیکی استفاده می‌شود. ممکن است این انباشتگرها به عنوان انبار انرژی عمل کنند. در تمامی این مبدل‌های انرژی موجی، انرژی اولیه (امواج) لزوماً به روش نوسانی دریافت می‌شود اما انرژی (الکتریکی) مفید فراهم‌شده با مرحله‌ی ذخیره‌ی انرژی هموار می‌شود.

از طرف دیگر، توان الکتریکی مفید در مبدل‌های محرک مستقیم انرژی موجی با ریتم انرژی موجی ورودی تولید می‌گردد و در نتیجه، همانند امواج نوسان می‌کند. این امر، اتصال این نوع مبدل‌های انرژی موجی را به شبکه‌ی برق نسبت به مبدل‌های انرژی موجی غیر مستقیم دشوارتر می‌سازد.

با این حال، سیستم مبدل محرک مستقیم در زمینه‌ی انرژی موجی دارای معایبی می‌باشد. به عنوان مثال، یک ژنراتور محرک مستقیم متصل به مبدل توان الکترونیکی نسبت به سیستم هیدروپنوماتیکی شامل مراحل تبدیل انرژی و قطعات متحرک مکانیکی بسیار کمتری است. بنابراین بازده کلی تبدیل آن (از موج به شبکه) به طور قابل توجه افزایش می‌یابد.

در رابطه با تعداد زیادی از چرخه‌های مکانیکی (تقریباً ۱۰۰ میلیون در مدت زمان عمر سیستم) و منبع خستگی، قابلیت اطمینان افزایش پیدا می‌کند. خطرات خرابی به طور گسترده به سمت سیستم تبدیل الکتریکی (ماشین و مبدل) تغییر پیدا می‌کند که کنترل و رفع خرابی-های از نوع الکتریکی آسان‌تر می‌باشد. از همه مهمتر، این امر برای نگهداری مورد نیاز است که به طور گسترده کاهش پیدا می‌کند. نکته‌ی آخر حتی برای مبدل‌های انرژی موجی فراساحل ضروری‌تر می‌باشد، زیرا به دلیل فراوانی منابع، آن‌ها در محیط دریایی پر از تنش نصب می‌گردند و فرصت سالانه برای انجام فعالیت‌ها در آن به شدت محدود می‌باشد (از نقطه نظر انرژی تنها چند روز در محبوب‌ترین سایت‌ها). در حقیقت، باید به یاد داشته باشیم که ماشین‌ها در فراساحل مهار می‌گردند و دسترسی تکنسین‌ها به آن‌ها به شدت دشوار خواهد بود. بنابراین، به حداقل رساندن نگهداری پیشگیرانه و تعمیر، معیاری ضروری در توسعه‌ی این فناوری‌های فراساحلی می‌باشد.

به علاوه، احتمال کنترل سیستم تبدیل انرژی محرک مستقیم بسیار بیشتر است. در حقیقت، کنترل دقیق دمپ جبرانی حرکت در سیستم تبدیل انرژی هیدروپنوماتیکی دشوار می‌باشد. این امر مستلزم تنظیم سطوح فشار در انباشتگرهای *HP/LP* است تا آن را به روشی غیر از قانون اصطکاک یا با قفل کردن/خلاص کردن<sup>۱</sup> مدار هیدرولیکی دریافت کرد. این امکان وجود دارد که در سیستم تبدیل انرژی مستقیم، شامل یک مبدل توان الکترونیکی فعال بتوان گشتاور دمپ را در هر لحظه و قبل از برآورد قانون دمپ، کنترل کرد، به شرط اینکه نقطه‌ی کاری در محدوده‌ی عملیاتی مجموعه‌ی ماشین-مبدل نگه داشته شود.

چند تیم پژوهشی بین‌المللی از طرف انجمن مهندسی برق به طور ویژه بر روی مبدل‌های محرک مستقیم انرژی موجی کار می‌کنند. جنبه‌های فناوری یکی از مشکلات اساسی یا راهبردی مبدل‌های محرک مستقیم انرژی موجی می‌باشند. ما می‌توانیم به کار دانشگاه آپسالا و تیم به رهبری ام.لیهون<sup>۲</sup> [*LEI 06*]، اچ.پولینر در دانشگاه دلفت و دانشگاه‌های دورام و ادنیبورگ با ام.ای. مولر [*MUE 02*] و امروزه دانشگاه ایالت آرگان با تیم به ریاست تی.کی.ای. برکن و ای. ون جوان اشاره کرد.

آزمایشگاه مکانیک سیالات فرانسه (*LMF* در فرانسه) در دانشگاه مرکزی نانت<sup>۳</sup> و آزمایشگاه *SATIE* در دانشگاه نرمال سوپریور کاشن<sup>۴</sup> به مدت چندین سال با هم به طور نزدیک بر روی مدل "تمام الکتریکی" سیستم *SEAREV* کار کرده‌اند (نوع *C5* با ژنراتور چرخان محرک مستقیم که حرکت سیستم پاندولی را دمپ می‌کند).

### ۱۱-۳-۱ کار در دانشگاه‌های دورام و ادنیبورگ (UK)

بیکر و مولر<sup>۵</sup> کسانی بودند که در اوایل ۲۰۰۰ "مبدل محرک مستقیم انرژی موجی" (*DDWEC*) را [*BAK 01*] آن‌ها یک *DDWEC* را به عنوان مبدل انرژی موجی تعریف می‌کنند که قطعه‌ی متحرک آن به طور مستقیم به ژنراتور الکتریکی متصل شده است. به دلیل اینکه بیکر و مولر سیستم‌های نوسانی ستون آب را قرار ندادند (که برای آن‌ها ژنراتور نیز به طور مستقیم به قطعه‌ی متحرک متصل شده است)، در دسته‌ی *DDWEC* ها، یک *DDWEC* لزوماً مطابق با سیستم دسته‌بندی مطرح‌شده در بالا از نوع مبدل انرژی موجی *C5* می‌باشد.

<sup>1</sup> latching/declutching

<sup>2</sup> M.Leijon

<sup>3</sup> the École Centrale de Nantes

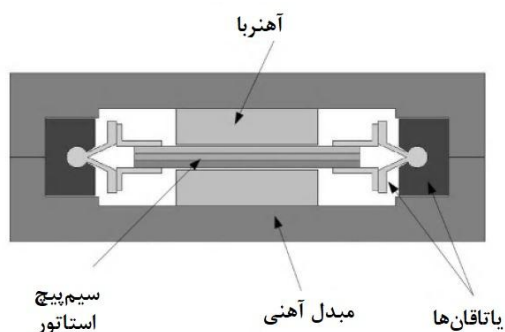
<sup>4</sup> École Normale Supérieure de Cachan

<sup>5</sup> Baker and Mueller

آن‌ها بر مشکلاتی تأکید می‌کنند که ممکن است مبدل‌های انرژی موجی با سیستم تبدیل انرژی غیر مستقیم به سبب چندین مرحله‌ی تبدیل در آن‌ها (که به خرابی و همچنین تلفات انرژی منجر می‌گردد) با آن مواجه شوند. به گفته‌ی آن‌ها، مهندسان اولیه که بر روی مهار توان موجی کار کردند در آن زمان هیچ انتخابی به جز طراحی سیستم‌های پیچیده میانی مابین حرکت کند متناوب و چرخش سریع نداشتند تا بتوانند از ژنراتورهای الکتریکی مرسوم استفاده کنند. ظهور سیستم توان الکترونیکی موثر و مقرون به صرفه به این معنا بود که می‌توان پاسخ‌هایی را در نظر داشت که مطابق آن ماشین الکتریکی به طور مستقیم به حرکت متناوب وصل خواهد شد. در نتیجه، در آن مراحل کمتری برای تبدیل وجود خواهد داشت و احتمال خرابی کمتر خواهد بود. با این حال، سرعت عملیاتی ژنراتور به طور قابل توجه کاهش پیدا می‌کند و این امر مستلزم اعمال نیروی بیشتر است. ۱۰ سال پس از آن (۲۰۱۱)، تبدیل مستقیم مکانیکی-الکتریکی یکی از مناسب‌ترین پاسخ‌ها در زمینه‌ی انرژی موجی است.

مطالعات بیشماری برای طرح‌های ژنراتورهای خطی غیر مرسوم انجام شده است که هدف آن‌ها تبدیل مستقیم انرژی موجی است. در تئوری بیکر [BAK 03] توپولوژی‌های مختلف ماشین‌های خطی مقایسه می‌شوند: مغناطیس دائم سطح، جریان عرضی، فناوری مقاومت مغناطیسی ورنیر در استاتور و در نهایت فناوری سیم‌پیچ لوله‌ای در هوا.

امروزه، پیرو کار مک دونالد [MCD 08a, MCD 08b] بر روی سازه‌ی مکانیکی ژنراتورهای با سرعت پایین و گشتاور بالا برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، هودگینز و دیگران [HOD 09] ثابت کردند که سازه‌ی ماژولی برای ماشین سیم‌پیچی در هوا دارای مزیت می‌باشد. هر ماژول (شناخته‌شده به عنوان C-GEN) به شکل C بوده و دارای دو مغناطیس در مقابل هم است. می‌توان این ماژول‌ها را به هم متصل کرد تا ماشین چرخان کامل تولید کرد. همچنین می‌توان آن‌ها را با هم ترکیب کرد تا یک ژنراتور خطی شکل داد که در این مورد ماژول‌های C شکل روی هم قفل می‌شوند (شکل ۱۱-۲۵ را ببینید) تا به طور مکانیکی نیروهای ربایش وارد بر سازه کاسته شوند. آزمایش‌های در حال انجام است تا مزیت کاربرد آن در تبدیل انرژی موجی را نشان دهند.

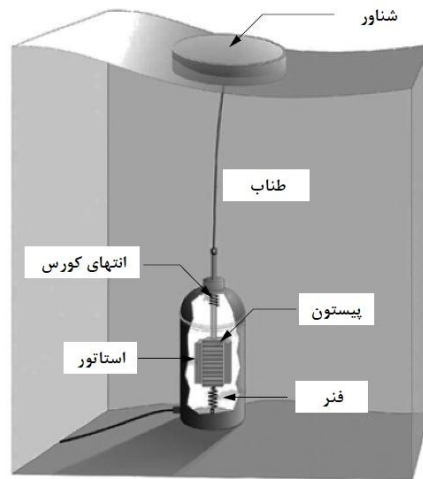


شکل ۱۱-۲۵ تصویر مازول C-GEN (تصویر از جلو) برای ژنراتور خطی [HOD 10]

### ۱۱-۳-۲ کار در دانشگاه آپسالا (سوئد)

اولین مطالعات در دانشگاه آپسالا به ساخت *SEABASED AB* در ۲۰۰۱ منجر گشت، که امروزه شرکت اصلی *SEABASED Group* است و در آغاز یک شرکت مبتکرانه و هلدینگ ثبت شده بود [BER 02]. این شرکت سپس با همکاری نزدیک با تیم متز لیهون از آزمایشگاه آنگستروم در دانشگاه آپسالا بر روی مبدل انرژی موجی از نوع "جذب کننده ی نقطه ای" کار کردند (شکل ۱۱-۲۶). یک شناور توسط طنابی به محرک ژنراتور خطی مغناطیس دائم متصل می گردد (مغناطیس ها روی محرک آویزان شده اند). شناور از حرکت های امواج پیروی می کند و حرکت نوسانی آن به محرک ژنراتور منتقل می گردد. با وزن ژنراتور در ارتباط با فنر، طناب محکم نگه داشته می شود. ولتاژ تولیدی با استفاده از پل دیودی وارد به باس DC یکسو می شود. همچنین استفاده از مدار تشدید کننده برای افزایش تولید برق مورد مطالعه قرار دارد [BOS 11].

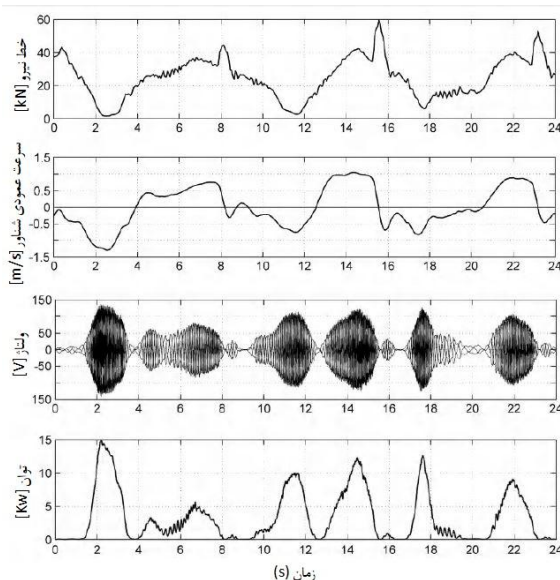




شکل ۱۱-۲۶ شمایی از قاعده‌ی کار مبدل انرژی موجی که در دانشگاه آپسالا مورد مطالعه می‌باشد [DAN 06]

Main parameters of L1	
Nominal power at 0.7 m/s	10 kW
Voltage, line-to-line, rms at 0.7 m/s, $V_d$	200 V
Generator resistance, $R_G$	$0.44 \pm 1.5\% \Omega$
Generator inductance, $L_S$	11.7 mH
Air gap	3 mm
Size of magnet block	$6.5 \times 35 \times 100 \text{ mm}^3$
Pole width, $w_p$	50 mm
Number of stator sides	4
Vertical stator length	1264 mm
Vertical translator length	1867 mm
Translator resp. stator width	400 mm
Translator weight	1000 kg

شکل ۱۱-۲۷ مشخصات اصلی نمونه‌ی L1[BOS 11]



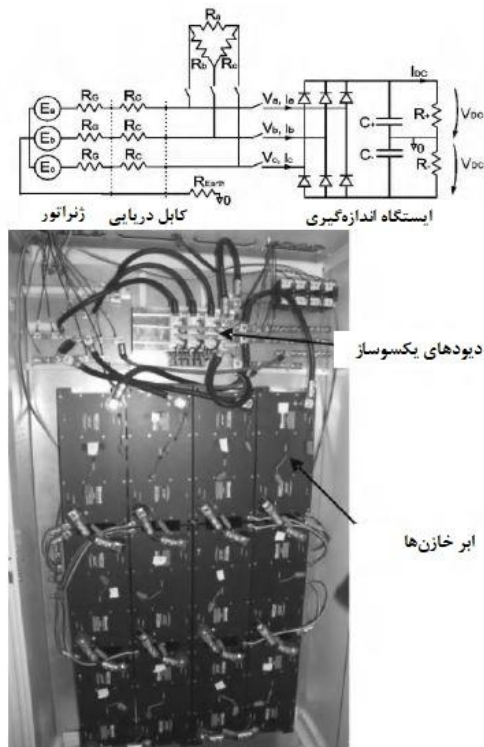
شکل ۱۱-۲۸ داده‌های جمع‌آوری شده از نمونه‌ی  $LI$  در سایت لیسکیل<sup>۱</sup> که بار مقاومت ۲.۲ اهمی را تغذیه می‌کند [LEI 08].

در سال ۲۰۰۲ پروژه‌ای آزمایشی (پروژه‌ی لیسکیل) با این هدف از میان پروژه‌های دیگر آغاز شد که قابلیت انجام تبدیل الکتریکی مستقیم انرژی موجی را نشان دهد. اولین نمونه‌ی  $LI$  در مارس ۲۰۰۶ نصب شد. چند ماه پس از راه‌اندازی طناب پاره شد و دوباره در مارس ۲۰۰۷ متصل شد. سپس ژنراتور خطی که مشخصات آن در شکل ۱۱-۲۷ داده شده است، در خروجی به بارهای کاملاً مقاومتی متصل شد. داده‌های آزمایشگاهی برای بار ۲.۲ اهمی با اتصال مثلثی در شکل ۱۱-۲۸ نشان داده شده‌اند. اولین نمودار به کشش طناب مربوط می‌شود. به پیک در زمان‌های مشخص توجه کنید که به پل قطعه‌ی متحرک روی موانع انتهایی شکل گرفته توسط فنرها مربوط است. همچنین در نمودار چهارم، ما می‌توانیم نوسان معمولی تولید مبدل محرک مستقیم انرژی موجی را در دوره‌های تناوب مربوط به نصف دوره‌های تناوب امواج مشاهده کنیم.

در آپریل ۲۰۰۷، ژنراتور به بار  $DC$  متصل گشت که از ردیفی از ابرخازن‌ها و بار مقاومتی از مسیر دیود یکسوساز تشکیل شده است (شکل ۱۱-۲۹ را ببینید) [BOS 9, BOS 10]. ظرفیت کلی مجموعه‌ی ابرخازن‌ها ۱۲.۱۷ فاراد است ( $F$ ). این مجموعه متشکل از دوازده

<sup>۱</sup> Lysekil

ماژول مکسول<sup>۱</sup> در یک ردیف می‌باشد (ظرفیت ولتاژ/اسمی  $48 F / 160 V$ ) که بیانگر توان اسمی حدوداً  $600 Wh$  می‌باشد. بنابراین، ژنراتور تنها هنگامی که نیروی محرک الکتریکی ( $EMF$ ) در باس  $DC$  به سطح یکسانی با ولتاژ برسد و در نتیجه هنگامی که سرعت به اندازه‌ی کافی زیاد باشد، ژنراتور کار خواهد کرد. در نتیجه، دمپ حاصل شده به شدت غیرخطی خواهد بود.



شکل ۱۱-۲۹ ستاپ جبرانی قرار داده شده روی نمونه‌ی  $LI[BOS 10]$  (چپ) و ردیفی از ماژول‌های ایرخازن که در ایستگاه اندازه‌گیری روی خشکی نصب شده‌اند  $[BOS 09]$

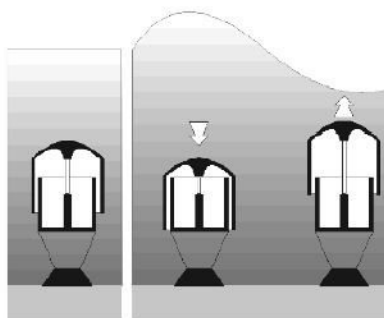
### ۱۱-۳-۳ کار در دانشگاه صنعتی دلفت (هلند)

در دانشگاه صنعتی دلفت، اچ. پولیندر با استفاده از مغناطیس‌های دائم سطحی برای سیستم  $AWS$  (سوینگ ارشمیدسی موج) با انجام پژوهش ژنراتور خطی را طراحی کرد  $[POL 00, POL 02, POL 04]$ . ایده‌ی اصلی  $AWS$ <sup>۱</sup> شامل بهره‌برداری از مولفه‌ی عمودی هیو امواج با

<sup>۱</sup> Maxwell

امروزه سیستم  $AWS-III$  توسط  $AWS Ocean Energy$  توسعه داده شده و بسیار متفاوت از طرح اولیه است که توسط  $Teamwork Technology$  توسعه داده شده بود.

استفاده از پیستون مستغرق بود. واحد تولید از پیستون استوانه‌ای، بخش متحرک جرثقیل، ساخته شده است که تحت اثر امواج در امتداد بخش استوانه‌ای دیگر متصل به بستر دریا می‌لغزد (شکل ۱۱-۳۰ را ببینید). پیستون متحرک به صورت مستقیم ژنراتور خطی را به حرکت در می‌آورد.



شکل ۱۱-۳۰ اصول کار [POL 05a] AWS



شکل ۱۱-۳۱ چپ: نمونه‌ی آزمایشی AWS قبل از فرو برده شدن در آب [POL 04]. راست: ژنراتور خطی مغناطیس دائم. بخش‌های استاتیکی (سیم‌پیچ‌ها) در بیرون قرار دارند. دو قطعه‌ی متحرک با مغناطیس‌هایی روی آن‌ها در سمت چپ واقع شده‌اند (بخش روشن) [POL 07]

مدل آزمایشی AWS که در سال ۲۰۰۴ خارج از ساحل پرتغال آزمایش شد به ژنراتوری مجهز شده بود که برای توان پیک  $2MW$  و توان اسمی  $1MW$  طراحی شده بود (سرعت اسمی:  $7m$  و  $2.2m.s^{-1}$ ). قطر پیستون  $9m$  و ارتفاع آن  $20m$  بود. وزن کلی این مدل آزمایشی به  $1700$  تن می‌رسد که باید  $5000$  تن وزن تعادلی (شن) به آن اضافه می‌شد. برآورد تولید سالانه در سایت آزمایشی پرتغال  $1.64GWh$  بود که معادل ساعت/سال  $1640$  در توان اسمی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۱-۳۱ قابل مشاهده می‌باشد ژنراتور خطی به دو قسمت یکسان تقسیم شده است. هر قسمت از یک محرک دو طرفه و در نتیجه استاتور دو طرفه



ساخته شده است تا نیروهای عمودی ربایش را جبران سازند و کرنش وارد بر سازه‌ی مکانیکی را کاهش دهند.

### ۱۱-۳-۴ مبدل انرژی موجی SEAREV (CNRS)، دانشگاه مرکزی نانت، دانشگاه نرمال

#### سوپیور کاشن)

قاعده‌ی کاری مبدل انرژی موجی SEAREV در آزمایشگاه مکانیک سیالات (LMF) در دانشگاه مرکزی نانت توسعه داده شده است. از سال ۲۰۰۴، این آزمایشگاه با همکاری با آزمایشگاه SATIE در دانشگاه نرمال سوپیور کاشن (بریتانی) به جای پاسخ اولیه‌ی الیو-پنوماتیکی، در حال پژوهش بر روی پاسخ تبدیل الکترومکانیکی تشکیل شده از ژنراتور الکتریکی محرک مستقیم متصل به مبدل الکتریکی بوده است [RUE 07, AUB 11].

مبدل SEAREV در دسته‌ی سیستم‌های اجسام نوسانی قرار می‌گیرد (نوع C). این مبدل از یک شناور بسته تشکیل شده است که توسط خیزآب به حرکت در می‌آید. درون آن، یک چرخ پاندولی (با جرم خارج از مرکز) نسبت به شناور نوسان می‌کند. در مدل تمام-الکتریکی (نوع C5) از یک ژنراتور الکتریکی محرک مستقیم (به عنوان مثال، ماشین سنکرون با مغناطیس دائم) استفاده می‌شود تا انرژی مکانیکی چرخ پاندولی را به الکتریسیته تبدیل کرد و در نتیجه حرکت نسبی میان شناور و چرخ دمپ شود (شکل ۱۱-۲۳).

این سیستم دارای مشخصات اولیه‌ای است که آن را از مبدل‌های دیگر انرژی موجی متمایز می‌سازد:

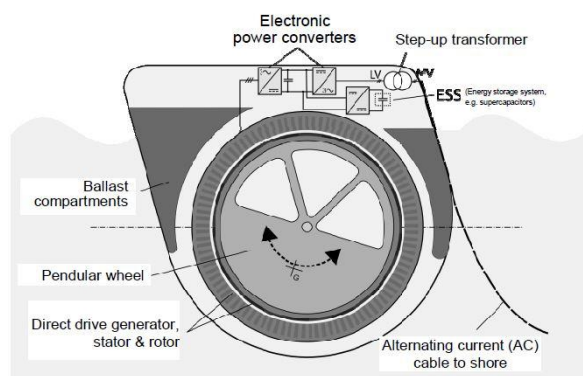
- تمامی قطعات متحرک، تمامی اجزای فنی و قطعات دیگر که در مقابل محیط دریایی آسیب‌پذیر می‌باشند درون یک شناور کاملاً بسته محافظت می‌شوند. این ویژگی در مقابل سیستم‌هایی که در آن مفاصل میان قطعات متحرک مختلف (اکسل‌ها، لغزان‌ها و غیره) در معرض اثرات دریا (خوردگی، رسوب زیستی و غیره) قرار دارند، یک مزیت قطعی می‌باشد.

- چرخ پاندولی آزادانه حول محور دوران خود می‌چرخد. هیچ مانعی در انتها دامنه‌ی حرکت را محدود نمی‌کند. بنابراین، سیستم در مقابل وضعیت‌های وخیم دریایی کمتر آسیب‌پذیر می‌باشد. این ویژگی همچنین به ما امکان می‌دهد تا هنگامی که سرعت چرخش زیاد شود توان تبدیلی را در مقدار مشخصی تراز کنیم (با کاهش گشتاور چرخ بدون خطر آسیب رساندن به سیستم سرعت می‌گیرد). نمی‌توان در سیستم‌های مبتنی بر جابجایی (به عنوان مثال،

سرچینگ) به این ظرفیت رسید، زیرا باید در آن‌ها وسایل محدودکننده‌ی بازه‌ی حرکت قرار داده شوند (فنرها، دمپرها، موانع<sup>۱</sup> و غیره).

- بنابراین، سیستم مرجع داخلی امکان استفاده از خطوط مهار شل (به جای کشیده) را فراهم می‌کند. در نتیجه، تغییرات جزر و مدی در سطح دریا هیچ اثری بر عملیات سیستم نخواهد داشت.

- این طرح به ما امکان می‌دهد تا از ژنراتور چرخان محرک مستقیم استفاده کنیم. این سیستم تبدیل با اتصال به مبدل توان الکترونیک، کنترل تقریباً لحظه‌ای گشتاور دمپ را تسهیل می‌کند. بنابراین، اجرای کنترل دمپ پیشرفته در آن بسیار راحت‌تر از سیستم اولئو-پنوماتیک است.



شکل ۱۱-۳۲ نمودار قاعده‌ی کاری سیستم SEAREV در مدل تمام-الکترونیک آن

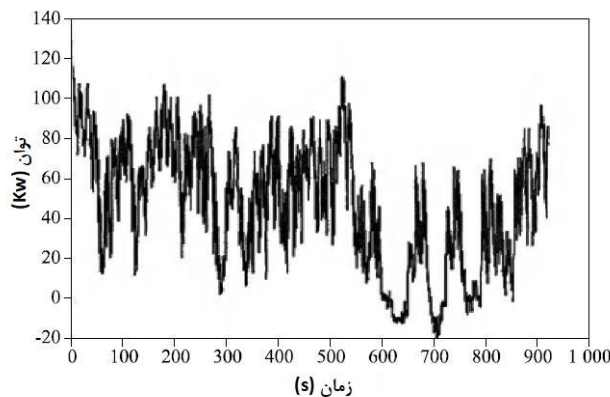
تا به امروز (۲۰۱۱)، تنها یک نمونه با مقیاس ۱۲/۱ توانسته است تا تبدیل انرژی الکترومکانیکی را به صورت واقعی انجام دهد، در حالیکه هدف از ساخت مدل‌های کوچک‌تر دیگر آزمایش قابلیت ماندگاری در دریا و یکپارچگی خطوط مهار است. بنابراین، هندسه‌ی سیستم با مقیاس واقعی همچنان نهایی نشده است اما به صورت منطقی اعداد تقریبی مقابل را ارائه می‌دهیم: ابعاد  $30\text{ m} \times 10\text{ m}$ ، جابجایی حدود ۲۰۰۰ تن (۲۰۰ تن برای هر جسم شناور، ۳۰۰ تن برای فلاویول پاندول، مابقی وزنه‌ی تعادل است، اساساً از آب دریا تشکیل شده است)، امکان تولید حداکثر حدود  $600\text{ kW}$  (توان متوسط در قدرتمندترین وضعیت دریا). توان میانگین سالانه به شدت به منبع انرژی موجی در سایت تأسیسات بستگی دارد. در چنین سیستم تبدیل الکترونیک می‌توان با استفاده از کنترل لحظه‌ای گشتاور دمپ، توان آنی را در

<sup>۱</sup> Stops

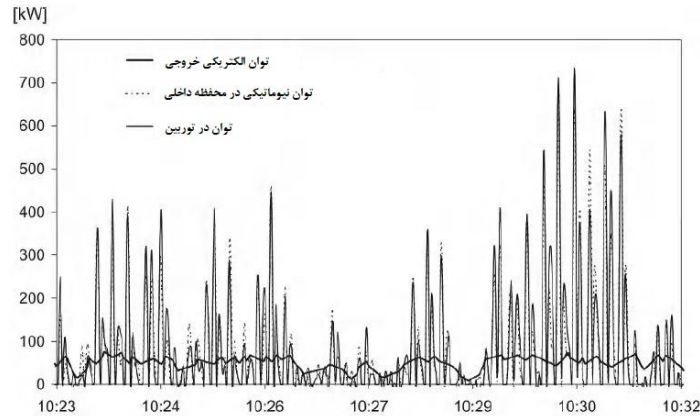
مقداری مشخص نگه داشت (به نام تراز کردن توان). مقدار نهایی آن با سنجش هزینه‌ی سیستم تبدیل (به صورت مستقیم به توان پیک آن مربوط می‌شود) و قابلیت تولید انرژی (که با تراز مقدار توان افزایش پیدا می‌کند) مشخص می‌شود.

### ۱۱-۴ نوسانات توان تولیدی مبدل‌های انرژی موجی

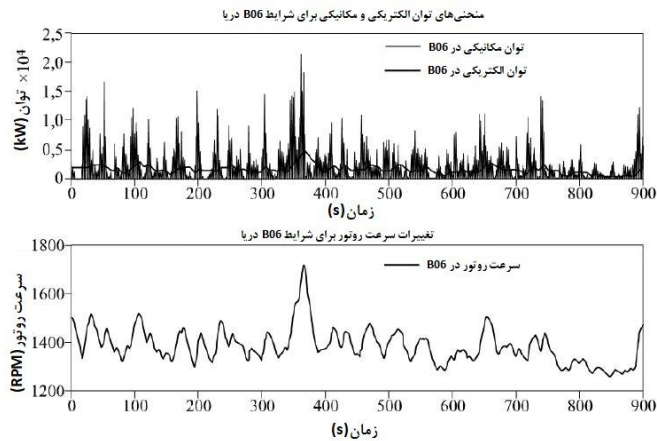
به نظر می‌رسد که بررسی نوسانات توان تولیدی مبدل‌های انرژی موجی علی‌رغم اینکه ناشران مشخصی این مسئله را حدود ۲۰ سال قبل مطرح کردند اما همچنان امروزه دارای مشکل علمی می‌باشد. به عنوان مثال، [SAL 89] را در نظر بگیرید: "[...] ترکیب ۶۴ وسیله‌ی مختلف [...] همچنان ورودی غیر قابل قبولی برای شبکه‌ی جزیره‌ی کوچک خواهد بود. با این حال، حدود صد ثانیه از ذخیره‌سازی از یک وسیله در هر طیف موج متداول خروجی کاملاً پایداری تولید خواهد کرد." این "دستورالعمل" که قطعاً مناسب می‌باشد، ممکن است ناشی از تجربه یا ابتکار ناشر باشد اما در آن زمان با انجام تحلیل دقیق‌تر پشتیبانی نشده است. به منظور شفاف‌سازی ایده‌های خودمان درباره‌ی نیاز به پرداختن به این مسئله در مورد تولید توسط مبدل‌های انرژی موجی، ما لیستی مبتنی بر کتب موجود، تعدادی از پروفیل‌های اندازه-گیری شده در مکان یا شبیه‌سازی شده، توان تولیدی توسط مبدل‌های انرژی موجی مختلف، گردآوری کرده‌ایم. در شکل‌های ۱۱-۳۳ تا ۱۱-۳۹ چنین پروفیل‌هایی نشان داده شده‌اند. نمونه‌ی اول (شکل‌های ۱۱-۳۳ تا ۱۱-۳۵) به سیستم‌های نوسانی ستون آب مربوط می‌شود (نوع BI). در این سیستم‌ها به لطف انرژی جنبشی چرخشی ذخیره‌شده قطعات پیوسته چرخان، منبع انرژی نسبتاً ثابت در مقایسه با توان ورودی پنوماتیک قابل تولید می‌باشد. با این حال، این وسیله‌ی ذخیره‌سازی باید برای یکنواخت‌سازی موثرتر کنترل شود.



شکل ۱۱-۳۳ OWC: نمونه‌ای از پروفیل توان تولیدی نیروگاه LIMPET[ALC 01] (احتمالاً برای ثابت نگه داشتن مقدار سرعت کمینه در مدت زمان آرام، در نقاط مشخصی توان منفی شود)



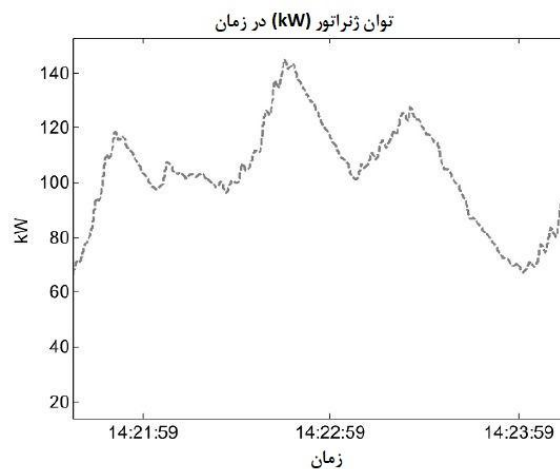
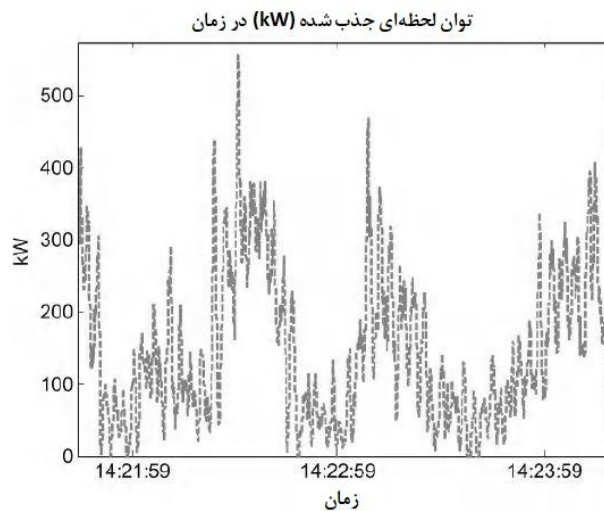
شکل ۱۱-۳۴ OWC: نمونه‌ای از پروفیل توان تولیدی در نیروگاه پیکو. از ممان اینرسی قطعات چرخان برای یکنواخت‌سازی توان پنوماتیکی و توان مکانیکی ورودی استفاده می‌شود [CRU 08]



شکل ۱۱-۳۵ OWC: پروفیل‌های شبیه‌سازی‌شده‌ی توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی تولیدشده توسط نمونه‌ساز نوسانی ستون آب و سرعت چرخش توربین (وضعیت دریا  $(H = m, T_p = 7.5s)$  [DUQ 09])

در دسته‌ی دیگر، پلامیس (نوع C3) نمونه‌ای مبدل مستقیم انرژی موجی با سیستم تبدیل الکتریکی غیر مستقیم است که شامل انباشتگرهای هیدروپنوماتیکی می‌باشد که توان ورودی را

دریافت می‌کنند. بنابراین، توان الکتریکی تولیدی (شکل ۱۱-۳۶) بسیار یکنواخت است. به علاوه، ماژول‌های تبدیل که در امتداد تمام طول پلامیس توزیع شده‌اند باعث ایجاد اثر تکثیر<sup>۱</sup> می‌شوند که به یکنواخت‌سازی توان الکتریکی کمک می‌کند.

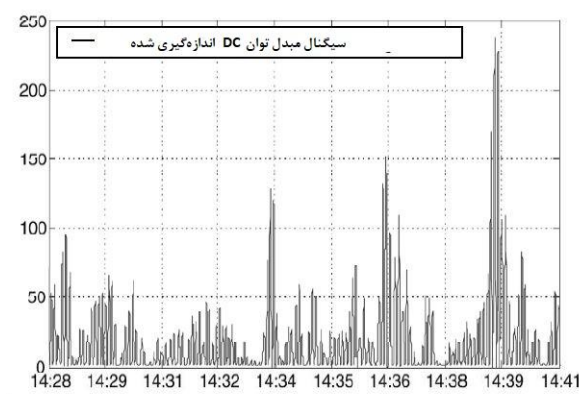


شکل ۱۱-۳۶ پروفیل‌های توان هیدرولیکی ورودی اندازه‌گیری شده و توان الکتریکی تولید شده توسط نمونه‌ی پلامیس در ۲۰۰۸/۰۷/۰۸ [CRU 08]

سیستم *AWS* (شکل ۱۱-۳۷ را ببینید)، *Seabased* (شکل ۱۱-۲۸ را ببینید) و *SEAREV* (شکل ۱۱-۳۸ را ببینید) توان الکتریکی فراهم می‌کنند که نوسانات آن به طور

<sup>۱</sup> Proliferation effect

دقیق نوسانات امواج ورودی را بازتاب می دهند (فرکانس پالس توان الکتریکی دو برابر فرکانس غالب امواج است). در این مبدل های انرژی موجی محرک مستقیم، تنها می توان با استفاده از سیستم ذخیره سازی انرژی، توان الکتریکی تولیدی را یکنواخت کرد. ظاهراً ابرخازن ها برای ذخیره سازی روی آن به بهترین شکل سازگار می باشند. در یکنواخت سازی کوتاه مدت به ذخیره سازی مقدار زیادی از انرژی نیاز نیست اما توان مورد نیاز قابل توجه می باشد (زمان تخلیه مشخص تقریباً  $10\text{ s}$ ، که به دوره تناوب عادی امواج مربوط می شود) و قابلیت چرخه ای آن باید بالا باشد. مطالعه ای مقدماتی طرحی با در نظرگیری پیری<sup>۱</sup> در [AUB 10] بیانگر امکان پذیری اقتصادی در مدت چرخه ای زمانی چنین سیستم ذخیره سازی به کار گرفته شده در مبدل انرژی موجی SEAREV می باشد. اگر یک سیستم ذخیره سازی ثابت (به عنوان مثال، بر روی خشکی) مد نظر باشد، ذخیره سازی با فلاپویل اینرسی وسیله ای فنی دیگر است که ممکن است در نظر گرفته شود.

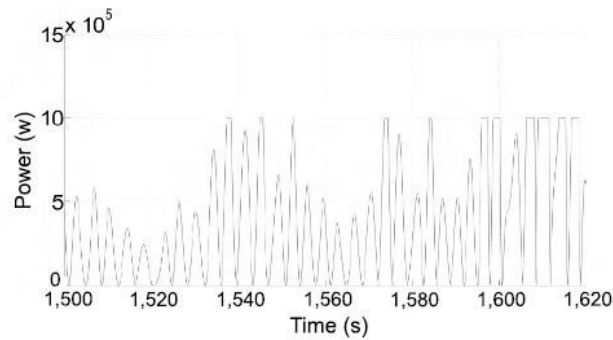


شکل ۱۱-۳۷: DWEC: پروفیل توان الکتریکی تولیدی AWS در بار مقاومتی  $2.75 \Omega$  [CRU 08]

بنابراین ذخیره سازی انرژی یک روش یکنواخت سازی تولید الکتریکی مبدل انرژی موجی است. با این حال، جمع آوری تولید مجزای چندین مبدل انرژی موجی توزیع شده در یک مزرعه موضوعی دیگر است. در مقیاس مزرعه ای مبدل های انرژی موجی پراکنده شده در طول چندین  $km^2$  از اقیانوس، با این راهبرد نسبت به هر پروفیل مجزا تولید کلی "یکنواخت تری" منتقل می شود. در حقیقت، علاوه بر پراکندگی مکانی واحدهای تولیدی، اجزای فرکانسی خیزآب بر حسب نسبت پراکندگی امواج جاذبه در سرعت های مختلف منشر می شوند. ترکیب این دو اثر

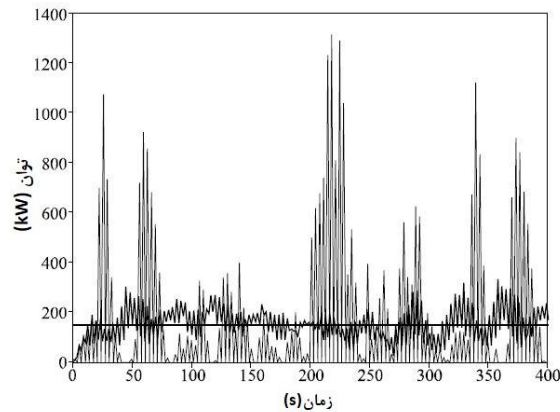
<sup>1</sup> Ageing

باعث می‌شود تا پراکندگی (انحراف استاندارد) توان تولیدی مطابق قانون  $\sqrt{N}$  (که در آن  $N$  تعداد مبدل‌های انرژی موجی است) ثابت نگه داشته شود.



شکل ۱۱-۳۸ DWEC: مثال شبیه‌سازی‌شده‌ی پروفیل (برگرفته از ۲ دقیقه از کل مدت زمان ۱ ساعت) توان الکتریکی تولیدی وسیله‌ی "تمام-الکتریک" SEAREV با وضعیت دریا  $(H_s = 3, T_p = 9.5s)$  و توان اتصال کوتاه<sup>۱</sup> ۱ MW

مثالی در شکل ۱۱-۳۹ از نتایج شبیه‌سازی [TIS 08] توان تولیدی مزرعه‌ای با ۷ واحد SEAREV نشان داده شده است که چیدمان نسبی آن‌ها بهبود داده شده است. واحدهای مختلف در اینجا به لحاظ هیدرودینامیکی مستقل در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱۱-۳۹ پروفیل توان تولیدی یک واحد SEAREV (خاکستری)؛ و پروفیل توان تولیدی توسط مزرعه‌ای با ۷ SEAREV (تقسیم‌شده بر ۷) (سیاه رنگ). توان میانگین تولیدی در هر واحد با خط مستقیم افقی مشخص شده است. وضعیت در نظر گرفته‌شده برای دریا:  $[TIS 08] 2.5 m, 9 s$

<sup>۱</sup> Clipping power

## ۱۱-۵ کتاب شناسی

- [AGA 08] AGAMLOH E.B., WALLACE A., VON JOUANNE A., "A novel direct-drive ocean waveenergy extraction concept with contact-less force transmission system", *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 520-529, March 2008.
- [ALC 01] ALCORN R., BEATTIE W., "Power quality assessment from the LIMPET WavePower Station", *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2001, p. 17-22.
- [AQU 11] AQUAMARINE POWER, <http://www.aquamarinepower.com>, September 2011.
- [AUB 10] AUBRY J., BYDLOWSKI P., MULTON B., BEN AHMED H., BORGARINO B., "Energy storage system sizing for smoothing power generation of direct wave energy converters", *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao, October 2010*.
- [BAB 11] BABARIT J., HALS J., "On the maximum and actual capture width ratio of wave energy converters", *Abstract accepted for publication in Proc. of the 9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, 5-9 September 2011*.
- [BAK 03] BAKER N.J., *Linear generators for direct drive marine renewable energy converters*, Durham University, PhD Thesis, 2003.
- [BAK 01] BAKER N.J., MUELLER M.A., "Direct drive wave energy converters", *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 4, p. 1-7, 2001.
- [BEL 02] QUEENS UNIVERSITY OF BELFAST, *Islay Limpet Wave Power Plant, Publishable report*, 2002.
- [BER 02] BERNHOFF H., LEIJON M., *A wave-power unit and the use of a wave-power unit for production of electric power, a method of generating electric power and a system of components for manufacturing a linear generator for a wave-power unit*, Patent WO/2003/058055, Swedish Seabased Energy AB, 2002.
- [BOS 09] BOSTROM C., LEJERSKOG E., STALBERG M., THORBURN K., LEIJON M., "Experimental results of rectification and filtration from an offshore wave energy system", *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1381-1387, May 2009.
- [BOS 10] BOSTROM C., LEJERSKOG E., TYRBERG S., SVENSSON O., WATERS R., SAVIN A., BOLUND B., ERIKSSON M., LEIJON M., "Experimental results from an offshore waveenergy converter", *Journal of*



- Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 132, 2010.
- [BOS 11] BOSTROM C., *Electrical systems for wave energy conversion*, PhD Thesis, University of Uppsala, 2011.
- [CAM 10] CAMERON L., DOHERTY R., HENRY A., DOHERTY K., HOFF J.V., KAYE D., NAYLOR D., BOURDIER S., WHITTAKER T., "Design of the next generation of the Oyster wave energy converter", 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao, pp. 1-12, 2010.
- [CAR 11] CARNEGIE WAVE ENERGY LIMITED, <http://www.carnegiecorp.com.au/>, April 2011.
- [CLÉ 02] CLÉMENT A.H., MCCULLEN P., FALCAO A.F., FIORENTINO A., GARDNER F., HAMMARLUND K., LEMONIS G., LEWIS T., NIELSEN K., PETRONCINI S., PONTES M.T., SCHILD P., SJÖSTRÖM B.O., SORENSEN H.C., THORPE T., "Wave energy in europe: current status and perspectives", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 5, pp. 405-431, 2002.
- [COL 08] COLLIER D., WHITTAKER T., CROWLEY M., "The construction of Oyster a nearshoresurging wave energy converter", 2nd International Conference on Ocean Energy, Brest: 2008.
- [CRU 08] CRUZ J., *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*, Springer Verlag, 2008.
- [DAN 06] DANIELSSON O., *Wave energy conversion. linear synchronous permanent magnet generator*, PhD Thesis, University of Uppsala, 2006
- [DRE 09] DREW B., PLUMMER A R., SAHINKAYA M.N., "A review of wave energy converter technology", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 223, pp. 887-902, December 2009.
- [DUQ 09] DUQUETTE J., O'SULLIVAN D.L., CEBALLOS S., ALCORN R., "Design and construction of an experimental wave energy device emulator test rig", 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala: 2009, pp. 443-452.
- [FAL 10] DE O. FALCAO A.F., "Wave energy utilization: a review of the technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp 899-918, 2010.
- [FAL 93] FALNES J., "Research and development in ocean-wave energy in Norway", *International Symposium on Ocean Energy Development*, Muroran, pp. 27-39, 1993.
- [FOL 09] FOLLEY M. WHITTAKER T.J.T., "Analysis of the nearshore

- wave energy resource”,  
*Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1709-1715, July 2009.
- [GUY 01] GUYON É., HULIN J.-P., PETIT L., *Hydrodynamique physique*, EDP Sciences, 2001.
- [HEN 10] HENRY A., DOHERTY K., CAMERON L., WHITTAKER T., DOHERTY R., “Advances in the design of the Oyster Wave Energy Converter”, *Royal Institution of Naval Architects (RINA) Marine and Offshore Renewable Energy Conference*, 2010.
- [HOD 09] HODGINS N., MCDONALD A.S., SHEK J.K.H., KEYSAN O., MUELLER M.A., “Current and future developments of the C-GEN Lightweight Direct Drive Generator for Wave & Tidal Energy”, *8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, pp. 352-359, 2009.
- [HOD 10] HODGINS N., KEYSAN O., MCDONALD A.S., MUELLER M.A., “Linear generator for direct drive wave energy applications”, *ICEM 2010*, 2010.
- [KNA 00] KNAPP W., HOLMÉN E., SCHILLING R., “Considerations for water turbines to be used in wave energy converters”, *4th European Wave Energy Conference*, Aalborg, 2000.
- [KOF 06] KOFOED J., FRIGAARD P., FRIIS-MADSEN E., SORENSEN H., “Prototype testing of the wave energy converter wave dragon”, *Renewable Energy*, vol. 31, February 2006, pp. 181-189.
- [LEI 08] LEIJON M., BOSTROM C., DANIELSSON O., GUSTAFSSON S., HAIKONEN K., LANGHAMER O., STRÖMSTEDT E., STÅLBERG M., SUNDBERG J., SVENSSON O., TYRBERG S., WATERS R., “Wave Energy from the North Sea: experiences from the Lysekil research site”, *Surveys in Geophysics*, vol. 29, pp. 221-240, October 2008.
- [LEI 06] LEIJON M., DANIELSSON O., ERIKSSON M., THORBURN K., BERNHOFF H., ISBERG J., SUNDBERG J., IVANOVA I., SJOSTEDT E., AGREN O., “An electrical approach to wave energy conversion”, *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1309-1319, July 2006.
- [MAR 09] MARGHERITINI L., VICINANZA D., FRIGAARD P., “SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device”, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 1371-1380, May 2009.
- [MCD 08] MCDONALD A.S., *Structural analysis of low speed, high torque electrical generators for direct drive renewable energy converters*, PhD Thesis, University of Edinburgh, 2008.
- [MCD 08] MCDONALD A.S., HODGINS N., CROZIER R., MUELLER M.A., “Integrated design of electrical generators for wave and tidal current

- energy converters*”, 2nd International Conference on Ocean Energy, Brest, 2008, pp. 1-7.
- [MIC 99] MICHEL W. H., “Sea spectra revisited”, *Marine Technology*, vol. 36, no.4, pp. 211-227, 1999.
- [MUE 02] MUELLER M.A., “Electrical generators for direct drive wave energy converters”, *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, p. 446, 2002.
- [NEU 07] NEUMANN F., BRITO-MELO A., DIDIER E., SARMENTO A., “Pico OWC Recovery Project: recent activities and performance data”, 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [PEL] PELAMIS WAVE POWER, <http://www.pelamiswave.com/>, April 2011.
- [POL 00] POLINDER H., GARDNER F., VRIESEMA B., “Linear PM generator for wave energy conversion in the AWS”, 8th International Conference on Electrical Machines, Espoo, 2000.
- [POL 02] POLINDER H., DAMEN M.E.C., GARDNER F., “Modelling and test results of the AWS linear PM generator system”, 9th International Conference on Electrical Machines, Bruges, 2002.
- [POL 04] POLINDER H., DAMEN M.E.C., GARDNER F., “Linear PM Generator System for wave energy conversion in the AWS”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 583-589, September 2004.
- [POL 05] POLINDER H., DAMEN M.E.C., GARDNER F., “Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator”, *European Transactions on Electrical Power*, vol. 15, pp. 245-256, May 2005.
- [POL 07] POLINDER H., DAMEN M.E.C., GARDNER F., “Linear Generator Systems for wave energy conversion”, 7th European Wave and Tidal Energy Conference, 2007.
- [PRE 04] PREVISIC M., BEDARD R., HAGERMAN G., SIDDIQUI O., *System level design. performance and costs, San Francisco California Energetech Offshore Wave Power Plant*, 2004.
- [RAM 99] RAMOS C., DA SILVA P.M., CARVALHO A., “Current source inverter for a 400 kW ocean waves induction generator”, *European Conference on Power Electronics and Applications*, vol. 855, 1999.
- [RUE 07] RUELLAN M., *Méthodologie de dimensionnement d'un système de récupération de l'énergie des vagues*, PhD Thesis, École Normale Supérieure de Cachan, 11 December 2007.

- [SAL 74] SALTER S., "Wave power", *Nature*, vol. 249, p. 720-724, June 1974.
- [SAL 89] SALTER S., "World progress in wave energy-1988", *International Journal of Ambient Energy*, vol. 10, p. 3-24, January 1989.
- [SAU 09] SAULNIER J.B., *Climatologie fine des systèmes de vagues pour l'étude des systèmes houlomoteurs*, PhD Thesis, École Centrale de Nantes, 4 December 2009.
- [THO04] THORPE T., "Wave energy", Chapter 15 of *Survey of Energy Resources*, World Energy Council, p. 401-417, 2004.
- [TIS 08] TISSANDIER J., BABARIT A., CLÉMENT A.H., "Study of the smoothing effect on the power production in an array of SEAREV wave energy converters", 18th International Offshore and Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, USA, 2008, pp. 1-7.
- [WHI 07] WHITTAKER T., COLLIER D., FOLLEY M., OSTERRIED M., HENRY A., CROWLEY M., "The development of Oyster a shallow water surging wave energy converter", 7<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.





# ۱۲

## تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس از بعد

### تاریخی

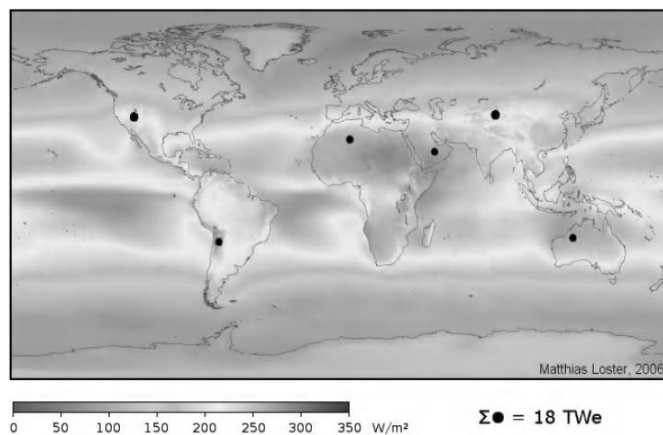
#### ۱۲-۱ منبع حرارتی اقیانوس‌ها

منبع حرارتی اقیانوس‌ها توسط لایه‌بندی ثابت دمای آب بر حسب عمق، تولید می‌شود. می‌توان از اختلاف دمای  $20^{\circ}C$  یا بیشتر میان آب در سطح و در عمق با استفاده از ماشینی که گرما را به توان مکانیکی تبدیل می‌کند، بهره‌برداری کنیم. این شرایط در مساحت بسیار عظیم  $100 km^2$  میلیون در مناطق گرمسیری امکان‌پذیر است. وجود آب سرد در زیر مناطق گرمسیر در سال ۱۷۵۱ کشف گردید و این اکتشاف به هنری الیس، کاپیتان کشتی مخصوص تجارت برده در خارج از ساحل آفریقا نسبت داده می‌شود [ELI51]. توضیح دقیق فرآیند استفاده از این انرژی با اشاره به مبدأ قطبی آب‌های عمقی سرد، توسط بنیامین تامسون و کنت رامفورد در اواخر قرن ۱۸م تشریح شده است [RUM 68].

#### ۱۲-۱-۱ منشاء منابع حرارتی

اولین نکته‌ای که باید به آن اشاره کرد جریان انرژی عبوری از سطوح اقیانوس‌ها است. تشعشع خورشیدی (امواج کوتاه در طیف‌های مرئی) مهم‌ترین المان در آن می‌باشد و همچنین بیانگر منبع خورشیدی انرژی ورای خود سیاره است. به صورت طبیعی و شهودی می‌توان مناطق گرم را به مناطق آفتابی مرتبط دانست. چنین گرایی در شکل ۱۲-۱ تشریح شده است. این شکل شار خورشیدی متوسط (۲۴ ساعت از روز) را نشان می‌دهد که بر روی سطح جهان در مدت

سه سال اندازه‌گیری شده است (۱۹۹۱-۱۹۹۳) [LOS 06]؛ بنابراین، اثر ابرها نیز در نظر گرفته می‌شود. با این حال، اگر منابع حرارتی خورشیدی تنها عامل تأثیرگذار باشد دمای سطح زمین به صورت پیوسته افزایش پیدا می‌کند. به دلیل اینکه این دماها اساساً ثابت هستند، باید برای جبران آن حرارت تبادل شود. بنابراین ما باید برای سیستم‌های فرعی خاصی همچون آن-هایی که توسط اقیانوس‌ها ساخته شده‌اند، تمامی پدیده‌های سطحی وارده (شرایط مرزی) را در نظر بگیریم و سپس اثر آن‌ها را بر مکانیزم‌های جابجایی داخلی ارزیابی کنیم (توزیع و جابجایی افقی)<sup>۱</sup>

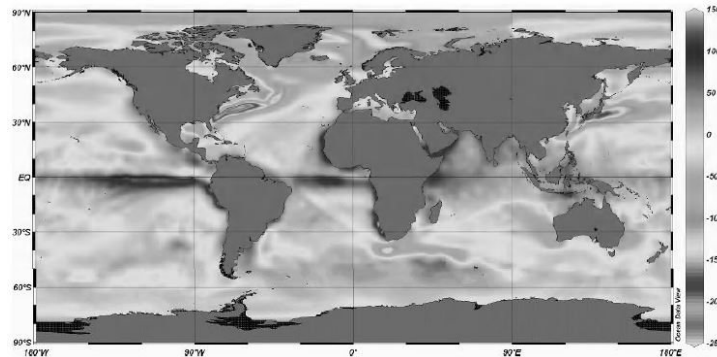


شکل ۱۲-۱ شار خورشیدی متوسط وارد بر سطح زمین از ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۳ ( $W/m^2$ ) [LOS 06]؛ با ضریب تبدیل ۸٪، جمع نقاط سیاه بیانگر تولید سالانه‌ی برق به اندازه‌ی تقریباً  $160,000 TWh$  ( $\approx 18 TW$ ) (برای مشاهده‌ی نسخه‌ی رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

یکی از عواملی که باید در نظر گرفته شود، تشعشع مادون قرمز با طول موج بلند است که توسط زمین تولید می‌گردد و به دلیل ساختار مشخص گازهایی در اتمسفر، مستعد اثر گلخانه-ای است. یک عامل مهم دیگر در رابطه با اقیانوس‌ها از تبادل بخار آب در سطح ناشی می‌شود. هنگامی که شدت تبخیر زیاد باشد، مثلاً هنگامی که جریان‌های گرم سطحی (گلف استریم، کوروشیو) به عرض جغرافیایی نسبتاً بالایی می‌رسند که هوا سردتر است، حرارت بسیار زیادی در اقیانوس تلف می‌شود. در نهایت، تبادل حرارتی جزئی میان اقیانوس‌ها (و خشکی) و اتمسفر رخ می‌دهد. تبادل خالص متوسط سالانه در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>Diffusion and advection



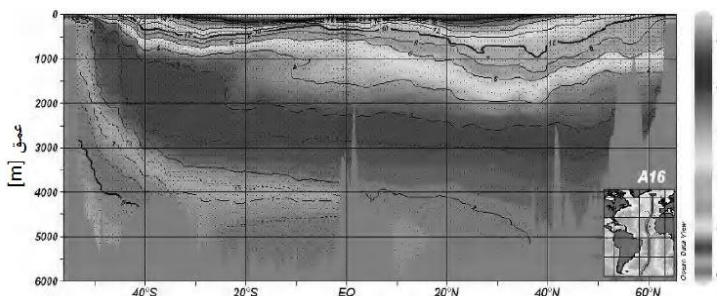


شکل ۱۲-۲ خلاصه‌ای از شار حرارتی خالص متوسط سالانه از اتمسفر به اقیانوس ( $W/m^2$ ) (داده‌ها برگرفته از [DAS 94] و با استفاده از نرم‌افزار [SCH 09] به صورت ترسیمی گردآوری شده‌اند (برای مشاهده‌ی نسخه‌ی رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

توجه شود که به طور کلی عرض‌های جغرافیایی در نواحی گرمسیر تبادل گرمایی خالص مثبتی دریافت می‌کنند، اما ارتباط تئوری میان جریان گرمایی و مناطق گرم کمتر مشهود است. در حقیقت، انتقال گرما به اقیانوس تنها یکی از نیروهای محرک عمده را نشان می‌دهد که توده‌های آب اقیانوس را حرکت می‌دهند. نیروهای محرک دیگر که به شارهای گرمایی سطح بستگی دارند از اصطکاک باد بر روی سطح آب ناشی می‌شوند. در مقایسه بزرگتر، این جریان‌های اقیانوسی بزرگ هستند که در نهایت با توزیع فضایی و تغییر در مدت زمان مشخصات آب دریا، تعیین‌کننده می‌باشند. معمولاً این تصویر که از آن برای توصیف حرکت اساسی این چرخه در مقیاس جهانی استفاده می‌شود، حرکت "تسمه نقاله" نامیده می‌شود. توده‌های آب سرد شور در سطح نواحی قطبی بسیار خاص شکل می‌گیرند؛ پدیده‌های ویژه بسیاری در این مکانیزم نقش دارند که یکی از آن‌ها شکل‌گیری کوه یخی می‌باشد.

بنابراین،  $NADW$  (آب‌های عمیق آتلانتیک شمالی) با دمای  $2-3^{\circ}C$  و شوری تقریباً  $35$  بخش بر هزار ( $ppt$ ) در دریاهای نروژ و گرینلند شکل می‌گیرد. این آب با غلظت نسبتاً بالا، در دریاچه‌ی آتلانتیک با عمق متوسط  $2500 m$  خالی و پر می‌شود. تولید متوسط  $NADW$  تقریباً  $15 Sverdrups$  است ( $1 Sv = 1 \text{ million } m^3/s$ ). توده‌ی دیگر،  $AADW$  (آب‌های عمیق قطب جنوب) با دمای نزدیک به  $0^{\circ}C$  و شوری حدوداً  $34.7 ppt$  حتی غلیظ‌تر می‌باشد. این آب‌ها با حدود  $20 Sv$  در حوالی لبه‌ی کوه یخی در دریای ودل در امتداد ساحل قطب جنوب شکل می‌گیرند. در آتلانتیک،  $AADW$  از زیر  $NADW$  با عمق متوسط  $4000 m$  به سمت خط استوا می‌رود (شکل ۱۲-۳ را ببینید). در غیر این حالت، این جریان به دو شاخه‌ی اصلی تقسیم می‌گردد که یکی از آن‌ها به جریان عمیق جنوبگان ( $ACC$ ) تبدیل شده و دیگری در امتداد

ساحل شرقی آفریقا نشست می‌کند. آب‌ها در حین این جابجایی‌ها به شدت با هم مخلوط می‌شوند، به ویژه نسبت به شاخه‌ی دوم که بر اقیانوس هند تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱۲-۳ دمای آب در طول بخش شمالی جنوبی اقیانوس آتلانتیک [SCH 07] (برای مشاهده‌ی نسخه‌ی رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید)

گردش جهانی توصیف‌شده در بالا به عنوان گردش ترموهالین (دماشوری)<sup>۱</sup> (*THC*) شناخته می‌شود، زیرا به تفاوت دما و شوری توده‌های آبی وابسته است. جریان‌هایی صرفاً در راستای بقای جرم، در سطوح اقیانوس‌ها شکل می‌گیرند تا آب چگال نشست‌کرده‌ای همچون *NADW* و *AADW* را جبران کنند.

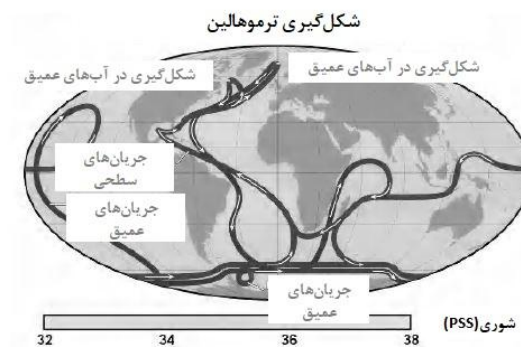
در شکل ۱۲-۴ نقشه‌ی ساده‌ی این "نسمه نقاله‌ی" عظیم نشان داده شده است. با این حال، جریان‌های سطحی بسیار پیچیده‌تر هستند، زیرا به شدت به اثر باد تولیدی توسط المان‌های گردبادهای اتمسفری و حضور قاره‌ها (فرازجوشی‌ها<sup>۲</sup>) وابسته می‌باشند. بنابراین، این پدیده‌های سیاره‌ای عامل ایجاد منابع حرارتی قابل بهره‌برداری در بیشتر مناطق گرمسیر اقیانوس می‌باشند. به طور ساده‌تر، موجود بودن محلی آب‌وهوای گرم و آب به اندازه‌ی کافی سرد در اعماق، تماماً به گردش جهانی این سامانه وابسته است.

ارزیابی منبع قابل بهره‌برداری از طریق تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس (*OTEC*) اغلب نسبت به شارهای حرارتی در سطح اقیانوس مورد بحث قرار می‌گیرد. به ویژه، مقدار مربوط به تشعشع خورشیدی اغلب برای نشان دادن اینکه منبع *OTEC* بسیار بیشتر از نیاز کلی انرژی بشر است، استفاده می‌شود. در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است که حتی اگر از جنبه‌ی شهودی گرمایش خورشیدی استفاده شود، این روش اساساً اشتباه می‌باشد، زیرا هر ارجاعی به شارهای گرمایی سطحی باید دست کم مبتنی بر جمع کل این جریان‌ها باشد. همانطور که در بالا اشاره شد،

<sup>1</sup>Thermohaline

<sup>2</sup>Upwellings

انتقال گرما به سطح اقیانوس در نهایت تنها بیانگر نیروی محرک است. نرخ استخراج ماندگار انرژی حرارتی اقیانوسی مطابق شکل ۱۲-۴ بر اساس ظرفیت اقیانوسها در تولید آب سرد محدود می‌شود.



شکل ۱۲-۴ نقشه‌ای ساده از گردش جهانی ترموهالین (THC)

([http://www.globalwarmingart.com/images/b/b0/Thermohaline\\_circulation.png](http://www.globalwarmingart.com/images/b/b0/Thermohaline_circulation.png))

(برای مشاهده‌ی نسخه‌ی رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه

نمایید)

به دلیل این‌که در فناوری‌های OTEC مقدار قابل توجهی از آب دریا استفاده می‌شود و می‌توان با THC به طور دقیق دبی جریان را مشخص کرد، این روش صریح‌تر است. کوستا و جکویر<sup>۱</sup> [COU 81] به این نکته پی بردند و بر اساس THC جهانی  $30 Sv$ ، به این نتیجه رسیدند که منبع جهانی OTEC به اندازه‌ی  $10 TW$  برق ( $10^{12} W$ ) است که به تولید سالانه‌ای معادل با تقریباً  $90000 TWh$ ، تفسیر می‌شود. بهتر است بدانید که مقدار کلی مصرف ابتدایی انرژی سالانه‌ی بشر تقریباً  $140000 TWh$  است، در حالی‌که کل برق تولیدی تقریباً  $20000 TWh$  می‌باشد. بنابراین ما با منبع بالقوه‌ی عظیمی سروکار داریم. ممکن است مطالعات اخیر درباره‌ی احتمال بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی اقیانوس تأثیر منفی بر طبقه‌بندی حرارتی اقیانوسها داشته باشند [NIH 05, NIH 07a]. اگر این مطالعات تأیید شوند، چنین اثری به تقریباً نصف منبع جهانی OTEC مربوط می‌شود ( $45,000 TWh \approx$ ). همچنین اثری که تضعیف یا معکوس شدن THC ناشی از گرمایش آب و هوا بر آستانه‌ی OTEC قابل بهره‌برداری در آتلانتیک خواهد داشت مورد ارزیابی قرار گرفته است [NIH 07b]. چنین مطالعاتی از نظر پیچیدگی پدیده‌های در خطر و همچنین نبود تجربه در زمینه‌ی تولید انرژی در مقایسه

<sup>1</sup>Cousteau and Jacquier

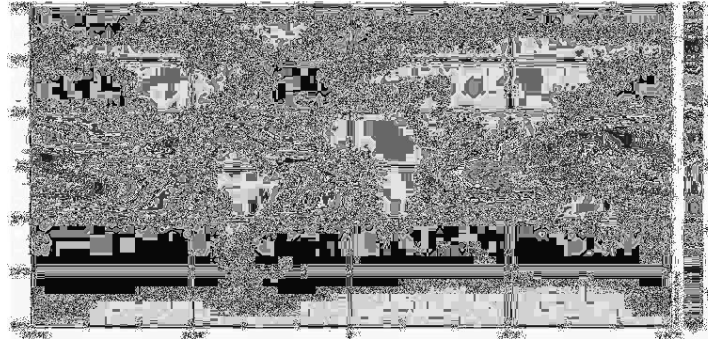
بزرگ با استفاده از *OTEC*، به شدت فرضی می‌باشند و نیازمند ضرورت پژوهشی بسیار دقیق‌تر در آینده هستند.

### ۱۲-۱-۲ توزیع و تنوع منبع حرارتی

در شکل ۱۲-۵ تفاضلات میانگین سالانه در دمای مابین اعماق ۲۰ و ۱۰۰۰m نشان داده شده- اند که با فناوری‌های امروزی *OTEC* سازگار می‌باشند. این داده‌ها مربوط به مقادیر آب و هواشناسی می‌باشند (با مشاهدات بلندمدت به دست آمده‌اند) که در اطلس اقیانوس‌های جهان ۲۰۰۵<sup>۱</sup> گردآوری شده‌اند [LOC 06]. مناطقی که عمق آب در آن‌ها کمتر از ۱۰۰۰m است با رنگ سیاه نشان داده شده‌اند، در حالیکه در مکان‌هایی که تفاوت دمایی کمتر از  $15^{\circ}C$  است با رنگ خاکستری روشن (عرض جغرافیایی بالا) به نمایش در آمده‌اند. این بازه‌ی محدود، تفاضلات دمایی قابل بهره‌برداری توسط سیستم‌های *OTEC* را بهتر نشان می‌دهد. عرض‌های جغرافیایی داخل مناطق گرمسیری مابین  $30^{\circ}S$  و  $30^{\circ}N$  به طور گسترده منطقه‌ی *OTEC* را مشخص می‌سازند. با این حال، در امتداد سواحل غربی آفریقا و آمریکا، موارد استثنائی بسیاری برای این قانون وجود دارد که در آن‌ها جریان‌های سرد به معنای عدم موفقیت منابع حرارتی محلی است. نکته‌ی مهم دیگر اثر جریان‌های دریای سرخ در امتداد ساحل غربی شبه‌جزیره‌ی عربی است. در حالی که توزیع فضایی منبع *OTEC* به طور عمده منعکس‌کننده‌ی توزیع دمای سطح اقیانوس‌ها است. اثر دما بر عمق همچنان، به عنوان مثال، از تفاضلات دمایی در اقیانوس هند (در حالی که به طو کلی کمتر از مقادیر در عرض جغرافیایی یکسان در غرب اقیانوس آرام هستند) قابل مشاهده می‌باشد. مکان‌هایی که حوضچه‌های عمیق اما نسبتاً بسته از طریق برآمدگی کم‌عمق دریا به اقیانوس‌های بزرگ متصل می‌گردند، جزء موارد حدی ایزوله محسوب می‌شوند؛ بنابراین با آب سرد قطبی این حوضچه‌ها پر نمی‌شوند. دریای سرخ و دریا‌های "داخلی" فیلیپین و بورنیو (دریا‌های سولو و میندانائو) نمونه‌هایی از مناطقی هستند که در آنجا آب در عمق به اندازه‌ی اقیانوس‌های بزرگ سرد نیست.

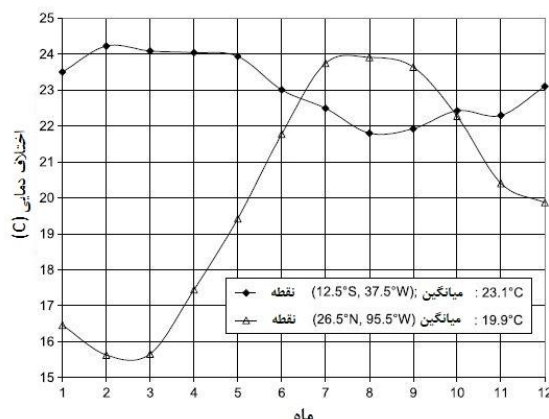


<sup>1</sup>World Ocean Atlas 2005



شکل ۱۲-۵ تفاضلات دمایی میانگین سالانه مابین اعماق  $20\text{ m}$  و  $1000\text{ m}$  ( $^{\circ}\text{C}$  بازه‌ی مابین ۱۵ و ۲۵) (شکل ۱، [NIH 10]) برای مشاهده‌ی نسخه‌ی رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip) مراجعه نمایید

با فرض اینکه بازده ترمودینامیکی سیستم‌های *OTEC* تا چه حد به تفاضلات دمایی موجود وابسته می‌باشد، داشتن آگاهی مناسب از تغییرات منبع *OTEC* در طول زمان بسیار ضروری است. حتی برای تغییرات جزئی بسیار ضروری است که قادر به تعریف مشخص سطح مبنای میزان الکتریسیته‌ای باشیم که نیروگاه *OTEC* توان تولید آن را دارد. این سطح دقیقاً نشانه‌ی فاکتورهای ظرفیت قابل مقایسه با فاکتورهای نیروگاه‌های حرارتی مرسوم (با استفاده از سوخت‌های هسته‌ای یا فسیلی) است که باعث می‌شود تا *OTEC* یک منبع بسیار مطلوب برای انرژی تجدیدپذیر باشد. در شکل ۱۲-۶ تفاضلات میانگین ماهانه مابین اعماق  $20\text{ m}$  و  $1000\text{ m}$  در دو سایت، یکی دور از ساحل کورپوس کریستی ( $26.5^{\circ}\text{N}, 95.5^{\circ}\text{W}$ ) در خلیج مکزیک و دیگری دور از ساحل سالوادور ( $12.5^{\circ}\text{S}, 37.5^{\circ}\text{W}$ ) در برزیل، نشان داده شده‌اند. در حالی که ممکن است میانگین سالانه‌ی منبع *OTEC* در هر دو مورد رضایت‌بخش باشد، تغییرات فصلی  $8^{\circ}\text{C}$  در آب‌های شمالی خلیج مکزیک باعث می‌شود تا تولید الکتریسیته به مدت چهار ماه از سال دشوار باشد.



شکل ۱۲-۶ تفاضلات ماهانه‌ی دما مابین اعماق  $20\text{ m}$  و  $1000\text{ m}$  در سایت‌های خارج از ساحل کورپوس کریستی (خلیج مکزیک) و سالوادور (برزیل)؛ داده‌ها برگرفته از اطلس اقیانوس‌های جهان هستند [LOC 05]

## ۱۲-۲ قواعد اصلی تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس

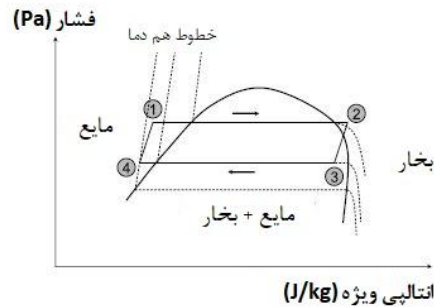
### ۱۲-۲-۱ یخچال معکوس

تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس به مفهوم کلی موتور حرارتی بستگی دارد، یعنی ماشینی که مابین دو منبع حرارتی به شکل چرخه‌ای کار می‌کند. لایه‌های سطحی و عمقی اقیانوس‌های مناطق گرمسیر در مورد *OTEC* منبع گرمایی و انباره گرماگیر (سینک گرم)<sup>۱</sup> مورد نیاز برای چنین موتوری را فراهم می‌کنند. این فناوری در ساده‌ترین شکل خود که به عنوان موتور چرخه‌ی رانکین شناخته شده است به یک سیال کمکی (یا "کاری") نیاز دارد تا هنگام دریافت گرما از منبع گرم (آب سطحی) در تبخیرکننده<sup>۲</sup> بتواند در دمای محیط به جوش بیاید. بنابراین بخار تولیدی هنگام عبور از توربین دچار افت فشار (و دما) می‌شود و کار مکانیکی آن بیانگر توان ناخالص چرخه‌ی *OTEC* است. سیال کاری هنگام خروج از توربین با انتقال حرارت به سینک سرد (آب در عمق) در کندانسور (چگالنده) دچار میعان می‌شود. برای تکمیل این فرآیند چرخه‌ای، سیال کاری مایع از کندانسور به سمت تبخیرکننده پمپاژ می‌شود که مقدار نسبتاً کمی از انرژی را مصرف می‌کند. در شکل ۱۲-۷ چرخه‌ی ترمودینامیکی مربوطه نشان داده شده است که به صورت کیفی مطابق فشار و آنتالپی ویژه سیال کاری رسم شده است. در شکل ۱۲-۸ این حلقه در نیروگاه معمول *OTEC* تشریح شده است که تقریباً  $2\text{ MW}$  (خالص)

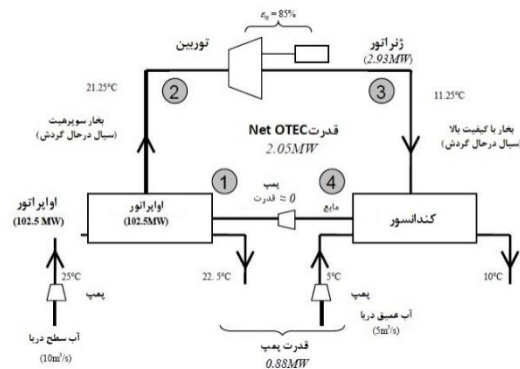
<sup>1</sup>Heat sink

<sup>2</sup>Evaporator

تولید خواهد کرد. باید توجه شود که در توان خالص تولیدی، توان زیاد پمپاژ که برای مبدل-های حرارتی با آب دریا مورد نیاز می‌باشد، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷-۱۲ چرخه‌ی ترمودینامیکی بسته OTEC که به صورت کیفی مطابق با فشار و آنتالپی ویژه سیال کاری رسم شده است



شکل ۸-۱۲ نمودار گرما و جریان نیروگاه معمول OTEC

می‌توان طرح اولیه‌ی OTEC را به Jacques-Arsène d'Arsonval در ۱۸۸۱ نسبت داد [DAR 81]. این ایده توسط مهندسان آمریکا [CAM 13] و ایتالیا [BOG 22] بازنگری شد و آن‌ها شروع به مشخص‌سازی عناصر اصلی نیروگاه چرخه‌ی بسته OTEC کردند. جای تعجب نیست که فناوری OTEC تا حدود زیادی از صنعت تبرید ناشی می‌شود [TOM 05].

در حقیقت، با در نظرگیری دماهای معمول سیستم OTEC واضح است که با دماهای کارکرد یک یخچال متداول یکسان می‌باشند. انرژی مکانیکی در مورد یخچال برای نگهداری ساختگی اختلاف دمایی مصرف می‌شود (به طور کلی با استفاده از موتور الکتریکی) که در غیر اینصورت وجود نخواهد داشت. چرخه‌ی بسته OTEC برعکس این فرآیند است که به موجب آن اختلاف طبیعی دما باعث تولید انرژی مکانیکی می‌شود که سپس توسط ژنراتور به الکتریسیته تبدیل

می‌گردد. می‌توانستیم پیش‌بینی کنیم که سیالات کاری در صنعت تبرید برای فن‌آوری‌های *OTEC*، دست کم به ازای فاصله‌ی دمایی یکسان (تبرید معتدل) مناسب می‌باشند. آمونیاک یک نمونه‌ی رایج از این نوع سیالات است که کیفیت اصلی آن در حالت اشباع خود به اندازه‌ی کافی فشار آن در بازه‌ی دمایی مورد بحث تغییر می‌کند: به عبارت دیگر، منحنی اشباع این سیالات به صورت موضعی دارای شیب تند می‌باشد.

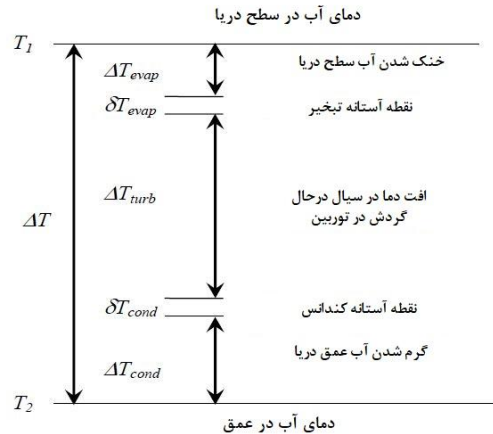
### ۱۲-۲-۲ تفاضلات دمایی کوچک

چرخه‌های ترمودینامیکی *OTEC* علی‌رغم طراحی ساده‌ی آن‌ها به دلیل تفاضلات دمایی جزئی (حدود  $20^\circ\text{C}$ ) که در آن بازه کار می‌کنند، دارای یک مشکل منحصر به فرد می‌باشند. برای نیروگاه‌های حرارتی ایده‌آل که به صورت بازگشت‌پذیر میان منابع با دماهای مطلق  $T_1$  و  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) تبادل گرما می‌کنند، با ضرب مقدار گرمای دریافتی از منبع گرم در بازه کارنو  $\eta_C = 1 - T_2/T_1$ ، توان مکانیکی بیشینه تولیدی توسط توربین مشخص خواهد شد. در واقعیت، باید میان سیال کاری و منابع حرارتی (خارجی) تفاضلات دمایی وجود داشته باشد تا امکان تبادل گرما (در مدت زمان محدود) وجود داشته باشد. بنابراین، این تبادلات نباید بازگشت‌پذیر باشند.

تحلیل بسیار ساده‌ی نیروگاه‌های حرارتی ایده‌آل که برای آن تبادل گرمایی با منابع حرارتی خارجی به تفاضلات دمایی غیر قابل چشم‌پوشی بستگی دارد، نشان می‌دهد که بازده چنین سیستم‌هایی که به آن‌ها بازگشت‌پذیر داخلی<sup>۱</sup> گفته می‌شود، برابر است با  $\eta_C = 1 - \sqrt{T_2/T_1}$  ([CHA 57], [NOV 57], [DEV 85]). واضح است که این بازده کمتر از  $\eta_C$  است. برای یک چرخه‌ی بسته رانکین *OTEC* (همانطور که در بالا تعریف شد) بازده‌های کارنو حدود ۶-۷٪ کمتر است. هنگامی که دماهای  $T_1$  و  $T_2$  به هم نزدیک باشند، می‌توان به راحتی نشان داد که  $\eta_E \approx 0.5\eta_C$  است. به عبارت دیگر، همانطور که در شکل ۱۲-۸ نشان داده شده است، تفاضل دمایی موثر که افت دمای سیال کاری در توربین را تعریف می‌کند، تنها نصف  $\Delta T = T_1 - T_2$ ، یعنی حدود  $10^\circ\text{C}$  است.

<sup>۱</sup>Endoreversible





شکل ۹-۱۲ تشریح نردبان دماهای OTEC

نکته‌ی قبلی حاکی از مفهوم نردبان دماهای OTEC است که به موجب آن گام‌های نامساوی میان  $T_1$  و  $T_2$  به فرآیندهای مورد نیاز برای تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس مربوط می‌شوند. این مفهوم در شکل ۹-۱۲ ترسیم شده است. باید متذکر شویم که یکبار دیگر تحلیل نیروگاه‌های حرارتی بازگشت‌پذیر داخلی این امکان را به ما می‌دهند تا به راحتی نه تنها این حقیقت که  $\Delta T_{turb} \approx 0.5\Delta T$  (همانطور که در بالا دیده شد) را دریابیم، بلکه توزیع تفاضلات دمایی  $(\Delta T_{evp} + \delta T_{evp})$  و  $(\Delta T_{cond} + \delta T_{cond})$  بر حسب نسبت دبی جریان گرم و سرد و همچنین توان ناخالص آیزنتروپیک را نیز مشخص می‌سازد [DEV 85]. به ویژه توان ناخالص آیزنتروپیک بیانگر تناسب میان توان ناخالص بیشینه نیروگاه OTEC و مربع تفاضل اولیه دما  $\Delta T$  است. در این شرایط با  $\Delta T \approx 20^\circ C$ ، تغییر  $1^\circ C$  در منبع حرارتی به تغییر نسبی در توان ناخالص خروجی حدود ۱۰٪ مربوط است. این نکته به صورت آزمایشگاهی در بخش بعدی تشریح شده است (شکل ۱۲-۲۷ را مشاهده کنید). به دلیل اینکه دبی جریان آب دریا دچار تغییر نمی‌شود (عملگر منفعل) یا به سختی تغییر می‌کند (عملگر بهینه‌ساز) هنگامی که  $\Delta T$  تغییر کند، تلفات توان مربوط به پمپاژ آب دریا، کم و بیش ثابت است. این امر بیانگر بخش قابل توجهی از توان ناخالص (۲۰٪-۳۰٪) است. بنابراین حساسیت توان خالص خروجی به تغییر  $1^\circ C$  ممکن است تا ۱۵٪ باشد. بنابراین، ضروری است که نیروگاه‌ها در نواحی‌ای قرار گیرند که در آن‌ها منبع ثابت باشد و حداکثر تغییرات در طول یکسال بیشتر از  $4^\circ C$  نباشد (دامنه‌ی  $2^\circ C$ ). خوشبختانه، این شرط در منطقه‌ی عظیم اقیانوسی قابل حصول است.

مهمترین نتیجه‌ی تفاضل‌های دمایی کوچک موجود نسبت به حساسیت ذاتی نیروگاه‌های *OTEC* به منبع حرارتی، بیشتر به طراحی مبدل‌های حرارتی و شرایط دبی جریان آب سرد و گرم مربوط است. در حقیقت، هر مگاوات (*MW*) الکتریسیته خالص به مبدل‌هایی مربوط می‌شود که مساحت سطح آن‌ها چند هزار متر مربع است. اگرچه تیتانیوم در قرن ۱۹۸۰ به عنوان ماده‌ی ایده‌آل در نظر گرفته شده بود، امروزه در فعال‌ترین دوره در زمینه‌ی *OTEC* پذیرفته شده است که هزینه‌ی این فلز مانع استفاده از نیروگاه‌های بزرگ *OTEC* در مقیاس بزرگ می‌باشد. گزینه‌ی محتمل دیگر آلومینیوم است و انواع مشخصی از آن در برابر خوردگی در محیط دریایی مقاوم هستند. در هر صورت، به طور کلی مبدل‌های گرمایی شامل پرهزینه‌ترین اجزای نیروگاه *OTEC* می‌باشند. همچنین ضروری است که (به عنوان مثال) با پرداختن به آب دریا یا واردسازی سیستم‌های فعال تمیزکاری دوره‌ای تضمین کرد که عملکرد آن‌ها به صورت معکوس توسط کثیفی زیستی تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد.

می‌توان در *OTEC* به اصطلاح چرخه-باز منحصر به فردی را برای این قانون یافت. این سیستم توسط جرجیس کلاد و پائول بوچروت طراحی شده و در ۱۹۲۶ (فرانسه) و ۱۹۳۲ (آمریکا) به ثبت رسیده است [CLA 26, CLA 32]. سیال کاری (آب) به طور پیوسته از طریق جوشاندن حدود ۰/۵٪ از آب گرم دریا تولید می‌شود. در این مورد، تبخیرکننده شامل محفظه‌ی ساده‌ای می‌شود که خلاء نسبی حدود ۳ *kPa* حفظ می‌شود. به طور مشابه، بخار آب با چگالی پایین که محرک توربین است، مدام با آب سرد دریا در کندانسور مخلوط می‌گردد. این کار شامل محفظه‌ی ساده‌ای می‌شود که در خلاء نگه داشته شده است. ما می‌توانیم مشاهده کنیم که (با ارجاع به شکل ۱۲-۸) در حقیقت این چرخه "باز" است، زیرا شاخه‌ای که در آن سیال کاری در حالت مایع خود از کندانسور به تبخیرکننده پمپ می‌شود، حذف گشته است. قطعاً حذف مبدل‌های حرارتی مرسوم مورد نیاز که معمولاً با سیال کاری در صنعت تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرند، گزینه‌ی مطلوبی است. با این حال، در رابطه با توربین‌های بزرگ، سیستم نگهداری خلاء و نیروگاه‌های *OTEC* که به لحاظ فیزیکی بزرگتر هستند، هزینه‌ها افزایش می‌یابد.

هر چرخه‌ی *OTEC* که انتخاب شود، شرایط از نظر آب دریا بسیار مهم (و اساساً یکسان) می‌باشند. به منظور شفاف‌سازی این گفته، هر مگاوات الکتریسیته خالص به  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  آب سرد دریا نیاز دارد. به دلیل این‌که آب گرم دریا بیشتر در دسترس می‌باشد، به طور کلی بهینه‌سازی سیستم‌های *OTEC* در سطح اقیانوس به دبی جریان بیشتر در آب گرم دریا منجر می‌شود. البته تمام آب خروجی باید در عمق مناسبی تخلیه شوند. بدون بررسی ممکن است تصور کنیم که لوله‌های "با سایز معمولی" به چنین دبی جریان آب دریا کمک خواهند کرد. متأسفانه، توان

پمپاژ تقریباً به معکوس قطر لوله به توان پنجم بستگی دارد (به ازای دبی جریان مفروض). بنابراین، ما باید لوله‌هایی را در نظر بگیریم که به اندازه‌ی کافی بزرگ باشند تا از وضعیت نامعقول تمام توان تولیدی توسط نیروگاه *OTEC* مورد مصرف در پمپاژ آب دریا جلوگیری شود. همچنین افزایش سرعت سیال باعث افزایش خطر له کردن لوله‌ی آب سرد (*CWP*) و کایتاسیون می‌گردد. بنابراین، برای نیروگاه *OTEC* ۱۰۰ به یک *CWP* با قطر بیش از  $m$  ۱۰ نیاز است. بنابراین، *CWP* به طول حدوداً یک کیلومتر در نیروگاه‌های بزرگ *OTEC* بیانگر چالشی فنی است. بر اساس این حقیقت همچنین پیشنهاد می‌شود که *OTEC* در آینده در فراساحل، بر روی سکوهای شناور، قرار داده شود. استدلال‌های دیگر نیز به نتیجه‌ای مشابه منتهی می‌گردند که آشکارترین آن‌ها در جایی است که خود منبع انرژی حرارتی قرار گرفته است (شکل ۱۲-۵).

بنابراین، تفاضلات دمایی کوچک در فناوری‌های *OTEC* مستلزم سرمایه‌گذاری زیاد در اجزای بزرگ می‌باشند (نسبت به توان الکتریکی تولیدی). حتی امروزه، از میان این اجزاء، *CWP* که از سکوی فراساحل آویزان می‌شود، یک چالش فنی واقعی است. تاریخچه‌ی توسعه‌ی *OTEC* به وضوح نشان می‌دهد که این بخش، مشکل‌سازترین عنصر طراحی است.

### ۱۲-۳ جورجیس کلاد، پیشگام

نمی‌توان تاریخچه‌ی *OTEC* را از بزرگترین بازیگر آن، جورجیس کلاد (۱۸۷۰-۱۹۶۰) جدا کرد. کلاد، مهندس شیمی بسیار خلاق، فرآیندهای بنیادین صنعتی بسیاری همچون ذخیره‌ی استیلین، مایع‌سازی هوا و لامپ نئون را توسعه داد. او همچنین خود را به عنوان یک تاجر ماهر (به عنوان مثال، تأسیس شرکت *Air Liquide* به همراه پائول دلورمه در ۱۹۰۲) نشان داد. این موفقیت‌ها باعث شهرت و ثروتمندی او شدند. خاطرات خود کلاد، زندگی این مرد فوق‌العاده را تشریح می‌کنند [CLA 57]، [BAI 10].

### ۱۲-۳-۱ شروع یک ماجراجویی

کلاد با مطالعه تحت *Jacques-Arsène d'Arsonval* متقاعد شد که انرژی حرارتی اقیانوس پتانسیل بسیاری دارد. همانطور که در بالا اشاره شد، او در همکاری با پائول بوچروتیک چرخه‌ی باز *OTEC* را طراحی کرد که به موجب آن مبدل‌های گرمایی اساساً به محفظه‌های ساده‌ی خلاء تبدیل شدند. توصیف مختصر و برجسته از این نسخه‌ی *OTEC* در مقاله‌ای دو صفحه‌ای در ۱۹۲۶ در *Le Génie Civil* منتشر شد [CLA 26]. کلاد با قوت گرفتن از وضعیت خود در جوامع علمی و صنعتی و در حالی که مرد عمل بود، هیچ قصدی برای ارائه‌ی سخنرانی یا حتی

دستیابی به حقوق انحصاری نداشت. او مصمم بود که ایده‌ی خود را در این زمینه آزمایش کند، یعنی، زمانی که در مهندسی اقیانوس عملاً به او توجهی نشده بود.

همچنین باید توجه شود که تعداد بسیاری از جنبه‌های فنی فرآیندهای *OTEC* در ابتدا درک نشده و موجب مناقشات شدیدی شده بودند. به عنوان مثال، برخی از مردم معتقد بودند که توان مورد نیاز برای پمپاژ آب دریا مانع این کار خواهد بود، در حالیکه در حقیقت ما به دنبال سیستم ساده‌ای از "شناورهای متصل" هستیم که در آن‌ها ستون‌های مربوطه‌ی آب در داخل و خارج *CWP* دارای وزن نسبتاً یکسانی می‌باشند. همچنین در مورد خطر گرمایش آب دریا در عمق زیاد در حین انتقال آن به سطح شبه‌هاتی وجود داشت. احتمالاً منتقدان کلاد به عزم او یا سرسختی او کمک کردند تا ثابت کند که حق با اوست.

اولین مرحله‌ی جدی آزمایش ماجرای *OTEC* دور از اقیانوس‌های گرمسیر، در ۱۹۲۸ در رودخانه‌ی میوز اگری (بلژیک) آغاز شد. کلاد با استفاده از تفاوت دمایی  $20^{\circ}C$  میان آب رودخانه و جریان فولاد مذاب مجاور، یک نیروگاه چرخه-باز ساخت که توان ناخالص  $60 kW$  را با دبی جریان آب سرد و گرم  $200 L/s$  ( $0.2 m^3/s$ ) تولید می‌کرد.

### ۱۲-۳-۲ نیروگاه روی خشکی در کوبا

سپس، کلاد باید ایده‌ی خود را در محیط دریایی آزمایش می‌کرد. او توانست سرمایه‌گذاران را قانع کند و با یافتن مکانی مطلوب در خلیج ماتانزاس در کوبا در حالی که روی قایق خود بود، او متعهد به انتقال تأسیسات از اوگری شد. او با مشکلات بسیاری در قرار دادن لوله‌های آب سرد مواجه شد که از طریق آن‌ها آب به نیروگاه *OTEC* در دریا منتقل می‌گردید. در آن زمان به دلیل نبود تجربه در این نوع عملیات، اغلب این مخترع سرسخت باید بدون وسایل کافی کار را انجام می‌داد و مجبور شد تا دو سال شکست پرهزینه را متحمل شود تا اینکه بتواند در نهایت برق تولید کند. بی‌شک داستان او از سختی‌های بسیار خود در کوبا *[CLA 30, CLA 31]* و *[PIT 82]* مشتمل بر اتفاقات مهیج در راستای تاریخچه *OTEC* تا به امروز است.

کلاد با ترس از اینکه "مسئله‌ی" گرمایش آب در عمق زیاد هنگامی که از طریق *CWP* پمپ می‌شود مانع از دستیابی او به تفاوت دمایی کافی گردد، به طور آگاهانه برای تأسیسات خود، لوله‌های با اندازه‌ی بزرگتر انتخاب کرد ( $2 m$ ، سپس به قطر  $1.6 m$ ) و پیش‌بینی نمود که دبی جریان حدوداً  $1 m^3/s$  خواهد بود که عملاً تنها از یک پنجم آن استفاده خواهد شد. او همچنین پذیرفت که با یک لوله‌ی به طول  $2 km$  به دلیل عمق موضعی تنها به عمق  $600 m$  یعنی به آب عمقی خواهد رسید که به طور قابل توجه کمتر سرد است. از همان ابتدا بالانس انرژی پروژه‌ی او دچار انحراف شده بود، که بعداً هرگونه تفسیر نتایج به دست آمده را دشوار

می‌ساخت. در اواخر ۱۹۲۰، یکی از پیامدهای مهم انتخاب لوله‌های بزرگ "قرارگیری تیر در ارتفاع زیاد" از نظر طراحی آن و نصب آن بر روی بستر دریا بود. مشخص شد که بخش‌های فولاد آج‌دار که توسط لبه‌هایی به هم متصل نگه داشته شده بودند و آب‌بندهای لاستیکی، مقاومت خوبی در مقابل له‌شدگی و در امتداد طول آن، انعطاف‌پذیری کافی فراهم می‌کردند و این دو معیار نسبتاً با هم در تضاد بودند.

کلاد ابتدا سعی کرد تا بخش‌های لوله را به طور موقت توسط شناورهایی در خلیج ماتانزاس بر روی یک سطح مونتاژ کند. هر شرایطی که کمتر از "حد انتظار" بود، پس از اینکه چندین متر از لوله از دست رفت او از راه حل خود دلسرد شد. سپس او تلاش کرد تا از آب‌های نسبتاً محافظت‌شده در نزدیکی رودخانه کانیمار استفاده کند تا کار مونتاژ را انجام دهد. در ابتدا برای انجام عملیات به ایجاد ساحل شنی به عرض  $200\text{ m}$  در دهانه‌ی رودخانه نیاز بود. هنگامی که این کار پس از چند ماه طاقت‌فرسا کامل شد به دلیل گیرکردن بخش میانی *CWP* شناور بر روی بستر شنی باقی‌مانده، کار به درستی انجام نشد. نبود قایق‌های یدک‌کش اجاره‌ای در آن زمان به این شکست بسیار کمک کرد. جریان رودخانه که بی‌شک برآورد نشده بود، در حقیقت، باعث خسارت غیر قابل جبران در *CWP* شد و آن را مانند آکاردئون به سمت بخش گیرافتاده فشار داد. از آن به بعد به دلیل هزینه‌ی تحمیلی، کلاد مجبور شد تا بیشتر ریسک مالی پروژه‌ی خود را در نظر بگیرد.

حکومت کوبا از لحظه‌ای که کلاد به کوبا رسید با او بسیار همکاری کرد. مهندس کوبایی گراسیا وسکوئز، که برای این پروژه پیشنهاد شده بود، یک پاسخ ابتکاری برای مسئله‌ی توسعه‌ی *CWP* در دریا پیشنهاد کرد. در مسیر عمود بر ساحل یک راه‌آهن ساخته شد که به واگن‌هایی مجهز شده بود که می‌توانست بر روی آن‌ها بخش‌های *CWP* را به خشکی متصل کرد و به خوبی در یک راستا قرار داد. سپس *CWP* مجهز به حوضچه‌های شناور در دریا شناور می‌گردید و به بالای مکان نهایی خود کشیده شده و به تدریج با سوارخ کردن یک به یک حوضچه‌ها در مکان خود قرار می‌گیرد. چنین عملیاتی را می‌توان به سرعت انجام داد و برخی از خطراتی قبلاً با آن‌ها مواجه شدیم، برطرف می‌گردند. باید توجه شود که امروزه، این روش تقریباً به صورت معمول در صنعت فراساحل به کار برده می‌شود. بنابراین، لوله‌ای جدید به قطر  $1.6\text{ m}$  در ژوئن ۱۹۳۰ ساخته شده و مونتاژ گردید (بخشی از آن در شکل ۱۲-۱۰ نشان داده شده است). متأسفانه، هنگام استفاده از لوله در دریا یک خطای مخرب انجام شد (برخلاف دستورالعمل‌های مفروض): کار فرو بردن در آب به جای انجام از ساحل به سمت دریای آزاد، از انتهای فراساحل انجام شد. به دلیل این سناریوی "برعکس"، امکان کنترل (محدود کردن) بارهای وارد بر بخش‌های ثابت-شناور لوله با انجام غرق‌سازی وجود نداشت. به طور کلی، تنظیم (افزایش)

کشش *CWP* با استفاده از قایق یدک‌کش قرار گرفته در دریا بر کنترل تأثیر می‌گذاشت تا از انحنای اضافی در امتداد طول اجتناب شود. در نهایت، *CWP* آسیب‌دیده در ماتانزاس در بستر اقیانوس غرق شد.

کلاد پس از یأس اولیه و قابل درک - حتی با اینکه کنایه‌هایی را درباره‌ی "خرابکاری" شنیده بود - دوباره ثابت کرد که او فردی "با پشتکار" است و سرسختی او به آسانی تحت تأثیر این فلاکت قرار نگرفت. دوباره کلاد با صرف مقدار قابل توجهی سرمایه از منابع خود موفق به آماده کردن تیم خود برای ساخت و استفاده از *CWP* در مدت دو ماه شد (شکل ۱۲-۱۱ را ببینید). در نهایت همه چیز برای تولید الکتریسیته توسط *OTEC* مهیا بود. در ۲۰ اکتبر ۱۹۳۰ با تفاوت دمایی  $14^{\circ}\text{C}$  و در حالیکه توربین به اندازه‌ی کافی تطبیق نیافته بود، پیک توان ناخالص نیروگاه به  $22\text{ kW}$  رسید. واضح است که به ویژه به دلیل اندازه‌ی بیش از حد *CWP*، شرایط مورد نیاز سیستم به لحاظ انرژی از ظرفیت تولیدی آن بیشتر بود. در رابطه با مصرف انرژی آن هیچ اندازه‌گیری دقیقی انجام نشده (یا فاش نشده) است که باعث می‌شود ارزیابی دقیق آن دشوار گردد. بنابراین، از همان آغاز محافل علمی و فنی واکنش نشان ندادند و کلاد باید از پروژه و نتایج به دست آمده از پشتکار خود دفاع می‌کرد [CLA 30].



شکل ۱۲-۱۰ بخشی از *CWP* به قطر  $1.6\text{ m}$  بر روی ریل خود



شکل ۱۱-۱۲ لوله‌ی به قطر  $1.6\text{ m}$  و طول  $2\text{ km}$  که دور از ساحل ماتانزاس شناور است و در آستانه‌ی قرارگیری توسط غوطه‌وری کنترل شده می‌باشد

### ۱۲-۳-۳ پایان یک رویا در برزیل

با یادگیری سریع از پروژه‌ی "آزمایشی" ماتانزاس، کلاد پی‌برد که راه‌اندازی نیروگاه‌های OTEC "بزرگ" در خشکی بسیار دشوار می‌باشد. بنابراین به این نتیجه رسید که سیستم‌های شناور OTEC مزایای بسیاری خواهند داشت. به ویژه، CWP که به طور عمودی معلق است در معرض مشکلات ناشی از عمق ویژه آن قرار نمی‌گیرد، بنابراین با این مفهوم به کمترین طول نیاز خواهد داشت. در نتیجه، کلاد ساخت نمونه‌ای از این طرح را بر عهده گرفت. به دلیل نبود صنعت فراساحل در آن زمان، نیروگاه برق شناور دچار مشکلات بسیاری می‌شد که غلبه بر آن-ها به اندازه‌ی آشکاری مزایای طرح سخت بود. این موانع که بی‌شک اکثر مخترعین مشتاق را دلسرد می‌کردند در عوض محرک خلاقیت کلاد بودند.

کلاد دریافت که شهر ریودوژانیرو به مقادیر زیادی یخ صنعتی در حین تابستان نیاز دارد و همچنین سایتی وجود دارد که برای نصب نیروگاه OTEC در چند صد متری یا چند کیلومتری بندر مناسب می‌باشد، بنابراین او تصمیم به ساخت کارخانه‌ی شناور گرفت که برای این بازار بالقوه به کار گرفته خواهد شد. او با بهره‌گیری از وضعیت اسفبار اقتصاد جهانی به دنبال رکود اقتصادی، یک کشتی ۱۰۰۰۰ تنی، *Le Tunisie*، را نسبتاً ارزان خریداری کرد که سپس آن را به نیروگاه شناور OTEC با توان اسمی ناخالص  $1.8\text{ MW}$  (با اختلاف دمای  $20^{\circ}\text{C}$ ) تبدیل کرد که با استفاده از کمپرسور آمونیاک توانایی تولید ۱۰۰۰ تن یخ در هر روز را دارد (شکل ۱۲-۱۲). این یخ دوباره توسط گروهی از کشتی‌ها (کوسترها) به خشکی آورده می‌شود. کلاد با علم بر اینکه اتصال صلب میان CWP و نیروگاه شناور در دریاهاى آزاد موجب خطراتی خواهد شد، او میان کشتی و شناور کروی از طریق لوله‌ی انعطاف‌پذیر حرکت‌پذیر یک رابط ایجاد کرد که از آن CWP عمودی آویزان خواهد شد. CWP با استفاده از آسانسور حمل کالا که بر روی شناوری به قطر  $9\text{ m}$  قرار داده شده است، با مونتاژ بخش‌هایی به طول  $6\text{ m}$  از فولاد آج‌دار

ساخته شده بود. مجموعه‌ی کامل شده به طول  $650\text{ m}$  بوده و در نهایت شناور در عمق  $15\text{ m}$  قرار داده شد تا در دریاهاى آزاد تا حدودی از آن محافظت شود [CLA 34].



شکل ۱۲-۱۲ نیروگاه شناور OTEC Tunisia که در دایرک مجهز می‌گردد

طرح "پیشرو" پروژه که به گروهی از ۷ کشتی کمکی و تیم قدرتمند ۸۰ نفره نیاز داشت بدین معنا بود که کلاد نمی‌توانست آن را با وسایل باقی‌مانده از ۱۹۳۵ آن را به موقع تمام کند. از میان عواملی که این شرکت را به شکست کشاندند می‌توان به مسافت بیش از  $100\text{ km}$  از ساحل، شرایط آب و هوایی متغیر و اغلب نامساعد، عدم کنترل کافی کیفیت ساخت، اما از همه مهمتر نبود تجربه در مهندسی اقیانوس اشاره کرد که کلاد امروزه می‌توانست در اختیار داشته باشد [CLA 57]. بنابراین، رویای کلاد برای OTEC در برزیل با یک شرکت دیگر که در مشکلات شریک شده بود، به پایان رسید. بار دیگر نیز این مخترع در آن زمان ظرفیت خود را برای درک زمینه‌هایی که تاکنون کشف نشده‌اند، ثابت کرد. در زمینه‌هایی فناوری و اقتصادی که برای به نتیجه رسیدن نقشه‌های بلندپروازانه‌ی او (صنعت‌گر آرمان‌گرا) به اندازه‌ی کافی توسعه نیافته بودند یا مطلوب نبودند، او آغازگر بهره‌برداری از منبع OTEC بود.

## ۱۲-۴ رنسانسی در اواخر قرن ۲۰م؟

بحران‌های نفتی ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹، یعنی، افزایش شدید قیمت نفت خام در آن زمان‌ها، به دلیل گستره‌ی وسیع وابستگی جوامع صنعتی به این ماده‌ی خام با ارزش پیامدهای سیاسی و اقتصادی بسیاری را به دنبال داشتند. اثرات ماندگار این بحران‌ها شامل بهره‌برداری از رسوبات هیدروکربن بیشمار فراساحل و توسعه‌ی برنامه‌های هسته‌ای بلندپروازانه و غیر نظامی شده بود. همچنین انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به دنبال این وضعیت تقویت شدند (اگرچه به صورت



موقت): مادامی ادامه پیدا کردند که اشتیاق اولیه از تشخیص نیاز به یافتن یک جایگزین برای نفت ناشی شد و هنگامی که قیمت‌ها دوباره ثبات پیدا کردند این اشتیاق به حالت قبل بازگشت. به مدت دو دهه دوباره به طور ویژه، علاقه در زمینه‌ی OTEC احیا شد و دوباره آغاز فعالیت در برخی از کشورها (ایالات متحده، فرانسه، ژاپن) به طور واضح رشد نمود. اگر ما به آزمایشاتی که در دریا انجام شده‌اند به جای مطالعات "روی کاغذ" نگاه کنیم، عمدتاً آمریکا به چشم می‌خورد. در این بخش به طور خلاصه پروژه‌های اصلی انجام‌شده در دریا توصیف می‌گردند که به پیشرفت دانش ما در زمینه‌ی فناوری‌های OTEC کمک کرده‌اند. رفتاری دقیق‌تر و لیست کامل‌تری از فعالیت‌های مربوط به OTEC در آن زمان خارج از چشم‌انداز این کتاب قرار دارند؛ منابع مناسبی برای خوانندگان علاقه‌مند وجود دارد که می‌توانند دنبال کنند [AVE 94].

### ۱۲-۴-۱ پروژه‌ی کوچک OTEC<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۷۷، گروهی از شرکت‌های بخش خصوصی با همکاری دولت ایالت هاوایی یک پروژه‌ی بزرگ را آغاز کردند. این پیش‌قدمی بیانگر مقدار مشخصی از بی‌قراری بخشی از گروه‌های علاقه‌مند دریاره‌ی تعهد بدون اشتیاق دولت فدرال آمریکا بود. شرکت‌های عمده که در این کار نقش داشتند شامل شرکت لاکهید مارتین، شرکت دیلینگهم و شرکت آلفا لاول بودند. نیروی دریایی ایالات متحده ۳۲ لنج (به اسم جدید Mini-OTEC) را برای استفاده به عنوان سکوی نیروگاه فراساحل OTEC با چرخه‌ی بسته قرض داد (شکل ۱۲-۱۳ را ببینید). سایت انتخاب‌شده برای پروژه در خارج از Keahole Point، در بخش غربی ساحل جزیره‌ی هاوایی واقع شده بود. در چرخه‌ی بسته انتخابی از آمونیاک به عنوان سیال کاری استفاده شد و مبدل‌های گرمایی با صفحه‌ی تیتانیومی در سکو نصب گشتند. لوله‌ی آب سرد که به طول ۶۷۰ m و قطر ۰/۶ m است از سکو آویزان می‌گردد. انتخاب HDPE (پلی‌اتیلن با چگالی بالا) باعث آسان‌تر شدن عملیات نصب در دریا گردید، زیرا نشانگر انعطاف‌پذیری معقول لوله بود. بخش CWP به جای اتصال به صورت مستقیم به سکو، به سطح شناور متصل شده بود. آب‌های عمیق دریایی نیز تحت فشار از طریق لوله‌ی انعطاف‌پذیر به سمت کندانسور پمپ می‌گشتند. این امر مشابه انتخاب کلاد برای Le Tunisie است.

اگر توربوژنراتور کوچک با شتاب پایین بازده بیشتری داشت، توان ناخالص خروجی ۵۰ kW قابل دستیابی بود؛ پمپ‌ها نیز عملکرد بالایی نداشتند و با اندازه‌ی مفروض سیستم و سرعتی که این پروژه اجرا می‌شد (یک سال و نیم از ایده به سمت عملیات!) همچنان توان خالص حدوداً

<sup>۱</sup>The Mini-OTEC Project

تولید می‌گشت که امروزه برای نیروگاه شناور *OTEC* همچنان (در ۲۰۱۱) یک رکورد محسوب می‌شود. آزمایش‌های *Mini-OTEC* در حدود دوره‌ی چهار ماهه به ازای ۶۰۰ ساعت عملیات انجام شده‌بود.



شکل ۱۲-۱۳ سکوی *Mini-OTEC* دور از ساحل غربی جزیره‌ی هاوایی (منبع: Luis Vega)

### ۱۲-۴-۲ پروژه‌ی *OTEC-1*

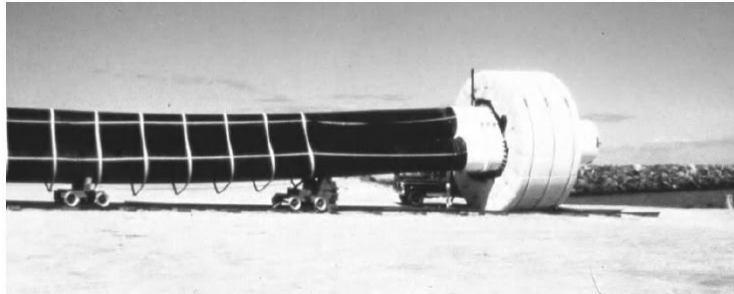
نیروگاه شناور *OTEC* تحت حمایت سازمان انرژی ایالات متحده (*DOE*) طراحی گشته است و در نوامبر ۱۹۸۰ در  $40\text{ km}$  ساحل شمال غرب جزیره‌ی هاوایی به کار گرفته شده است. این نیروگاه با توان اسمی  $1\text{ MW}$  فاقد توربین بوده و بنابراین اساساً آزمایشی از مبدل‌های گرمایی و تمام زیرساخت پمپاژ آب سرد و گرم دریا برای پیکربندی فراساحل *OTEC* است. به نظر سناتور هاوایی، اسپارک ماتسونگا، این پروژه با نام *OTEC-1* مهمترین زمینه در انرژی دریایی است که تا به حال در ایالات متحده اجرا گشته است. علی‌رغم اشتیاق آشکار سیاستمداران آن منطقه، سال ۱۹۸۰ با انتخاب ریاست جمهوری آمریکا، رونالد ریگان، نقطه‌ی عطفی بود، زیرا او فردی بود که کاملاً مخالف پیگیری تلاش‌های رئیس جمهور اسبق جیمی کارتر در زمینه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر بود.

سکوی مورد استفاده در این آزمایش یک حوضچه‌ی "کلوله‌ی نفتالینی" نیروی دریایی ایالات متحده بود (*Chespachet*) که همانند مورد قبلی خود *Le Tunisie* حدود نیم قرن پیش، برای این وضعیت دوباره مجهز شد. یک استخر مرکزی برای پمپاژ آب سرد از داخل آب در وسط کشتی ساخته شد. مبدل‌های حرارتی با دیواره‌های فولادی و لوله‌ی تیتانیومی که برای  $3\text{ MW}$  توان حرارتی طراحی شده‌اند (به طور نظری قادر به تولید  $1\text{ MW}$  الکتریسته خالص)

نیز بر روی کشتی نصب شدند. آمونیاک به عنوان سیال کاری انتخاب شده بود. این کشتی با نام جدید مبدل انرژی اقیانوسی، از سانفرانسیسکو به سایت پروژه در هاوایی برده شد. مهار تک نقطه‌ای آن در آب به عمق حدوداً  $1400m$  در زمان خود یک رکورد بود.

سه لوله‌ی *HDPE* به قطر  $1.2m$  بر روی خشکی به هم متصل شده بودند تا یک کانال به طول تقریبی  $700m$  شکل دهند. در یک انتها، یک حلقه‌ی شناور اسفنجی ترکیبی به قطر  $6m$  و ضخامت  $3m$  نصب گشت، در حالیکه در انتهای دیگر حدود  $30$  تن وزن تعادلی تضمین می‌کرد که *CWP* پس از اتصال به سکو به صورت درست قرار می‌گیرد. بخش *CWP* با استفاده از روندی مشابه که توسط وسکوویز حدود پنجاه سال پیش در کوبا مطرح شد، به کار گرفته شد: *CWP* بر روی ریل‌هایی عمود بر ساحل مونتاژ و به سمت آب کشیده شد (شکل ۱۲-۱۴). سپس قبل از اینکه با پایین آوردن وزنه‌های تعادلی به طور کنترل‌شده در موقعیت عمودی قرار گیرد، به سایت آزمایشی فراساحل به صورت شناور کشیده شد. بنابراین با کمک غواصان متخصص به طور بسیار دقیق به کشتی متصل گشت. بایگانی فیلم برجسته‌ی این عملیات مهندسی در اقیانوس که در زمان خود پیشگام بود به صورت عمومی در وبسایت‌هایی در دسترس است [MAC 80].

پروژه‌ی *OTEC-1* به جای دو سالی که در ابتدا پیشنهاد شده بود در مدت چند ماه تا مارس ۱۹۸۱ به پایان رسید. کاهش بودجه‌ی سنگین در آن زمان به این معنا بود که نمی‌توان خدمه را بر روی کشتی مبدل انرژی اقیانوس نگه داشت و همچنین عملیات ژنراتورهای دیزلی نصب‌شده بر روی کشتی به منظور جبران نبود توربین *OTEC* را ادامه داد. از زمانیکه پروژه *OTEC-1* توسط *US DOE* آغاز شد در محافل توسعه‌دهنده‌ی *OTEC* باعث مناقشات بحث برانگیز بسیاری شد. در کنار عدم توانایی پروژه در تولید برق این انتقاد اساسی وجود داشت که طرح آن مبتنی بر تعدادی از عناصر بود که نمی‌توانستند آن‌ها را برای تأسیسات بزرگ *OTEC* به کار ببرند. به عنوان مثال، نمی‌توان لوله‌کشی پلی‌اتیلن را برای نیروگاه‌های بزرگ با توان خالص بیشتر از  $1MW$  در نظر گرفت (حتی برای *OTEC-1*، به سه دسته لوله نیاز بود). پس از اینکه بودجه‌بندی دچار وضعیت بعدی شد، باعث شد تا چنین مناقشاتی به ویژه منطقی به نظر برسند. با این حال، *OTEC-1* توانست برخی حقایق را محقق سازد و به برخی از اهداف دست پیدا کرد.



شکل ۱۲-۱۴ دسته‌ی متشکل از سه لوله‌ی *HDP* به قطر  $1.2\text{ m}$  و طول تقریبی  $700\text{ m}$  قبل از قرارگیری در بندر *Kawaihae* با استفاده از روش توسعه‌یافته توسط مهندس وسکوویز بر روی ریل‌ها نصب می‌گردد (منبع: *Luis Vega*)

توسعه‌ی زیرساخت فراساحل و عملیات مبدل گرمایی در چرخه‌ی بسته موفقیت‌های بسیار بزرگی محسوب می‌شدند. نبود هر گونه مشکل در مدت آزمایش تأیید کرد که موارد فنی از نظر طراحی تجهیزات و ارزیابی عملکرد آن به درستی انتخاب شده‌اند. پروژه‌ی *OTEC-1* امکان اندازه‌گیری انتقال گرما و ارزیابی وسایل مانع رسوبات زیستی در لوله‌های مبدل را فراهم کرد. عملکرد *CWP* در دریا و همچنین اتصال آن به سکو نیز مورد آزمایش قرار گرفتند. بنابراین، هنگامی که جریان‌ها با اتصال گیمبل<sup>۱</sup> میان سکو و *CWP* بیشترین زاویه‌ی نسبی را ایجاد کردند، مهار مبدل انرژی اقیانوسی جدا شد و سپس سیستم *OTEC* بدون هیچ مشکل خاصی و بدون انحراف شروع به کار کرد؛ توجه کنید که این پیکربندی بدون شک برای نیروگاه‌های آتی *OTEC* ارجحیت خواهد داشت که دور از ساحل قرار خواهند گرفت و به جای انتقال الکتریسیته از طریق کابل زیر دریایی، سوختی قابل حمل تولید خواهند کرد. ترکیب آب سرد و گرم به طور مستقیم با دبی  $10\text{ m}^3/\text{s}$  از یک اریفیس در زیر بدنه‌ی کشتی و بدون لوله تخلیه می‌شود؛ اندازه‌گیری‌هایی (قطعاً به صورت محدود) برای تعیین ستون ابری انجام می‌گیرد [*PAD 81*]. برای این انتها از تزریق رنگ (رودامین) به آب خروجی و نشانه‌ی حرارتی سیالات خروجی ( $18^\circ\text{C}$ ) استفاده شده است. وسایل اندازه‌گیری فلوتورسانس و همچنین ردیاب‌های عمق‌سنجی-گرماسنجی با فرض دسترسی محدود به وسایل، به صورت نسبتاً رضایت بخشی ستون ابری را شناسایی می‌کنند. بنابراین محاسبات نظری شکل آن و تکامل آن تا حدودی تأیید می‌شوند. در نهایت، پس از اینکه پروژه‌ی *OTEC-1* به پایان رسید، *CWP* در حین پاییز ۱۹۸۲ بازسازی شد [*TRA 83*].

<sup>۱</sup>Gimbal connection

### ۱۲-۴-۳ پروژه‌ی آزمایشی OTEC واقع بر خشکی در نائورو

در سال ۱۹۸۱ با تعهد دولت محلی، دو شرکت ژاپنی، شرکت توکیو الکتریک و شرکت توشیبا مسئولیت نصب و آزمایش سیستم آزمایشی ساحلی OTEC را در صخره‌های مرجانی نائورو بر عهده گرفتند. نائورو یکی از ایزوله‌ترین جزایر در جهان است که مساحت آن کمی بیشتر از  $2 km^2$  بوده و بر روی خط استوا در غرب اقیانوس آرام قرار گرفته است. در آن زمان این کشور دارای منابع معدنی (فسفات) فراوان بود. دریاچه‌ای به عرض ۱۰۰ تا ۳۰۰ m مابین ساحل و آیسنگ مرجانی این جزیره را فرا گرفته است؛ بستر دریا دارای شیب تند  $40^\circ$  تا  $50^\circ$  بود. برای این جزیره توان اسمی ناخالص  $100 kW$  انتخاب شده بود و هدف آن اتصال نیروگاهی به شبکه-ی برق جزیره به منظور تولید خالص حدوداً  $15 kW$  بود.

لوله‌ی CWP/HDPE به قطر  $0.1m$  در بستر دریا قرار داده شده بود. طول  $945m$  آن برای رسیدن به عمق حدوداً  $650 m$  کافی بود. این لوله به سادگی با قرار دادن حلقه‌های مهار در فواصل منظم مهار شده بود. طول عمر چنین سیستمی که فقط برای چند ماه برنامه‌ریزی شده بود، کافی در نظر گرفته شده بود. سیال کاری چرخه‌ی ترمودینامیکی آن فلوروکربن بوده: فریون (R-22) که نسبت به آمونیاک علی‌رغم عملکرد ضعیف‌تر آن ایمن‌تر به نظر می‌رسد (توجه کنید که این محصول امروزه تحت ضوابط پروتکل مونترال ممنوع می‌باشد) از یک پمپ گریز از مرکز تک‌مرحله‌ای با ظرفیت  $23.7m^3$  (آب سرد) و  $27.9m^3$  (آب گرم) در هر دقیقه برای رساندن آب به مبدل‌های گرمایی نیروگاه استفاده شده بود. به منظور بهبود انتقال گرما از روکش ذرات ریز مسی برای لوله‌های تیتانیومی دو مسیره<sup>۱</sup> استفاده شده بود. تبخیرکننده به صورت افقی قرار داده شده، در حالیکه کنداسنور دو مسیره به صورت عمودی نصب می‌گردد. لوله‌های تیتانیومی با شیار ماریچج برای کنداسنور انتخاب می‌گردند؛ لایه‌ی چگالیده در فواصل زمانی منظم در امتداد لوله‌ها تخلیه می‌گردد تا از انباشت آن که انتقال گرما را کاهش می‌دهد، جلوگیری شود. توربین ضربه‌ای دو مرحله‌ای با سرعت چرخشی  $3000 rpm$  به ژنراتور سنکرون سه مرحله‌ای متصل می‌گردد که با هوا خنک می‌شود.

فیلم بایگانی‌شده‌ی این پروژه که در زمان خود پیشگام بود به طور عمومی در وبسایت‌هایی موجود است [BJE 07]. این نیروگاه آزمایشی مطابق پیش‌بینی‌های مهندسان در اواخر ۱۹۸۱ به مدت چندین ماه کار کرد. انجام آزمایشات بر روی مبدل‌های گرمایی در حین نیمه‌ی اول ۱۹۸۲ ادامه یافت. CWP با نزدیک شدن آزمایشات به مراحل پایانی توسط طوفان دچار آسیب شد. تولید توان ناخالص به حداکثر  $120 kW$  رسید که از این مقدار  $31.5 kW$  به شبکه انتقال

<sup>1</sup>Two pass

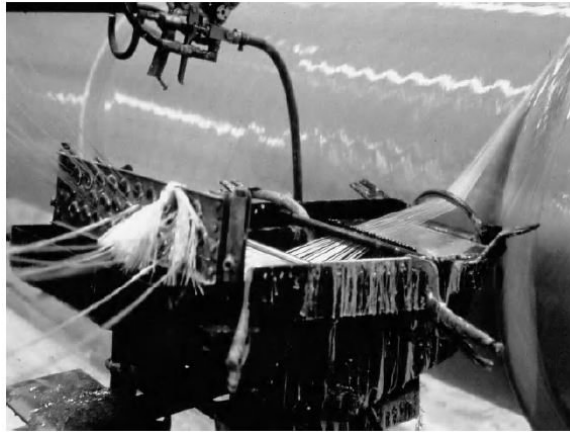
داده شد. این مقادیر در آن زمان برای *OTEC* رکورد محسوب می‌شدند. تنها اتصال نیروگاه به شبکه یک دست‌آورد بود. تولید پیوسته (۲۴ ساعت از روز) به مدت ۱۰ روز ادامه داشت. عملکرد مبدل‌های گرمایی به دقت برآورد شده بود:  $4.1kW / m^{-2} / ^\circ C^{-1}$  برای تبخیرکننده و  $2.9kW / m^{-2} / ^\circ C^{-1}$  برای کندانسور. آزمایش‌های بسیاری به منظور تأیید رفتار دینامیکی نیروگاه و وابستگی آن به منبع حرارتی انجام گشت. در شکل ۱۲-۱۵ تمبر پستی انتشاریافته توسط جمهوری نائورو برای بزرگداشت آزمایش نیروگاه آزمایشی *OTEC* در ۱۹۸۱-۱۹۸۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲-۱۵ تمبرهای پستی بزرگداشت نیروگاه ساحلی *OTEC* طراحی شده توسط شرکت برق توکیو الکتریک و شرکت توشیبا در ۱۹۸۱ (جمهوری نائورو)

#### ۱۲-۴-۴ آزمایش لوله‌ی معلق آب سرد (NOAA)

اداره‌ی ملی اقیانوسی و اتمسفری ایالات متحده (*NOAA*) با هدف ساده‌سازی فنی *CWP*‌های معلق با قطر زیاد یک برنامه‌ی پژوهشی بلندپروازانه را آغاز کرد. پس از مطالعات نظری و آزمایشگاهی بسیار در حوضچه‌های مدل‌سازی، این پژوهش با انجام آزمایش در ۱۹۸۳ دور از ساحل هنولولو در دریا به اوج خود رسید و هدف آن اثبات ساخت و توسعه‌ی *CWP* به قطر  $2.4m$  و طول  $400m$  برای نیروگاه‌های  $50-100kW$  *OTEC* با مقیاس  $1/3$  بود. برای آن از ساختار فشرده با لایه‌ای از رزین پلاستیکی انتخاب شد که با ریزکره‌های شیشه‌ای (فوم ترکیبی) قرار گرفته میان دو ورقه‌ی پلاستیکی فیبر شیشه تقویت‌شده (*FRP*) سبک می‌شود. در شکل ۱۲-۱۶ یک مرحله از فرآیند تولید نشان داده شده است. چنین ساختاری کنترل دقیق شناوری و صلبیت لوله را آسان‌تر خواهد کرد و همچنین امکان توزیع مطلوب بار را فراهم می‌کند؛ این مواد در مقابل خوردگی نیز مقاوم هستند. این برنامه‌ی پژوهشی (در آن زمان) محدوده‌های تقریبی فناوری‌های *CWP* مناسب برای نیروگاه‌های تجاری *OTEC* را مشخص ساخت.



شکل ۱۲-۱۶ کاربرد اولین لایه (داخلی) فیبر شیشه‌ی بافته‌شده؛ به حلقه‌های تقویتی توجه کنید که مقاومت در برابر له‌شدگی را افزایش می‌دهند (منبع: Luis Vega)

با این حال، کاهش شدید بودجه‌ی پروژه که در آغاز اولین دوره‌ی ریاست جمهوری دونالد ریگان اتفاق افتاد بود باعث شد تا شرکای اصلی دربارهی محدود شدن طول  $CWP$  به  $120m$  توافق کنند. در شکل ۱۲-۱۷ یکی از  $10m$  بخش  $10m$  ارسالی از ایالت واشنگتن نشان داده شده است که در حال تخلیه در بندر هنولولو می‌باشد. ارچه این تغییر بر پاسخ دینامیکی  $CWP$  تأثیر گذاشت اما همچنان هدف اصلی آن اندازه‌گیری آن پاسخ با استفاده از کرنش‌سنج‌های قرارگرفته در امتداد لوله و تعیین بارهای انتقالی توسط سکوی کوچک تحت اثر حرکت‌های ناشی از موج آن بود. به سبب اتصال مضاعف گیمبل  $CWP$  و سکو (شکل ۱۲-۱۸ را ببینید) تنها حرکت‌های انتقالی (سرج، هیو، سوی) به بارگذاری موثر  $CWP$  کمک کردند. بنابراین، برای این هدف سیستم ورودی-خروجی موجود برای تنظیم نرم‌افزار پیش‌بینی پیشرفته به اندازه‌ی کافی به صورت تجربی مشخص شده است [VEG 88]. این آزمایش حدود سه هفته در خارج از ساحل هنولولو با وضعیت دریایی آرام تا متوسط به طول انجامید. در شکل ۱۲-۱۹ تجهیزاتی نشان داده شده است که در حال انتقال به سایت آزمایشی می‌باشند. در حقیقت این محاسبات، رفتار آماری سکو و  $CWP$  را به خوبی منعکس کردند. محققان همچنین باید به وضعیت غیرعادی سکوی بسیار کوچک می‌پرداختند که نسبت به  $CWP$ ، برای ارتعاشات طولی مورد آخر اثر زیادی بر پاسخ دینامیکی مورد قبلی داشتند. همچنین داده‌هایی در رابطه با ضرایب درگ و جرم اضافی لوله با این اندازه (اعداد رینولدز زیاد) حاصل می‌شوند.





شکل ۱۲-۱۷ بخش  $12\text{ m}$  CWP به قطر  $2.4\text{ m}$  در حال قرارگیری بر روی اسکله در بندر هنولولو؛ بخش‌های یکسان  $10\text{ m}$  به هم متصل شده و یک لوله را شکل می‌دهند (منبع: Luis Vega)



شکل ۱۲-۱۸ با استفاده از گیمبل مضاعف، رول و پیچ سکو بر CWP تأثیر نمی‌گذارد (منبع: Luis Vega)



شکل ۱۲-۱۹ CWP که به طور موقت در پشت سکوی آویزان به صورت افقی نگه داشته شده است (شناور دوم) و به سمت بندر هنولولو کشیده می‌شود (منبع: Luis Vega)

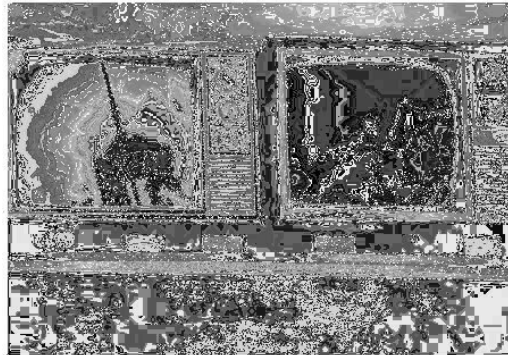


### ۱۲-۴-۵ انجام آزمایش برای نصب بخشی از لوله‌ی آب سرد در بستر دریا

در ماه می ۱۹۸۴، قسمتی از *CWP* استفاده شده در پروژه‌ی بالا در معرض آزمایشی غیر عادی قرار گرفت. هدف از این آزمایش اثبات قابلیت فنی نصب لوله‌های بزرگ (و در نتیجه صلب) بر روی بستر دریا بود. چنین *CWP*هایی برای نیروگاه‌های بزرگ ساحلی *OTEC* واقع در نزدیکی بستر دریا با شیب زیاد مناسب می‌باشند. اگرچه به نظر می‌رسید که کاربرد چنین پروژه‌ای تا حدودی منحصر باشد، آژانس‌های دولت ایالات متحده که در این کار دخیل بودند، علی‌رغم افزایش بودجه به صورت بازدارنده برای جستجوی مرزهای فنی تا جای ممکن مصمم بودند. به دلیل اینکه نیروگاه *OTEC* مورد بحث به صورت بخش‌های مجزا خواهد بود در مورد توسعه‌ی متوالی آن سوالاتی مطرح شد. به ویژه، باید ثابت می‌شد که می‌توان بخشی را که از قایق بر روی سطح پایین آورده شده است به بخش‌هایی که از قبل در بستر قرار گرفته‌اند، متصل کرد. با تبدیل *CWP* قرار گرفته به یک عنصر ماده و فراهم کردن یک رابط نر برای بخشی از *CWP* که باید نصب شود، این مسئله ساده‌تر شد. عمق در نظر گرفته شده نیز محدود شده بود تا کار مستندسازی عملیات با استفاده از غواصان متخصص و دوربین‌های *CCTV* ساده‌تر و بهتر شود. در شکل ۱۲-۲۰ بخش از *CWP* نشان داده شده است که باید با قرارگیری در آب نصب گردد و در شکل ۱۲-۲۱ (با صفحه تصویرهای کنترلی در میان گذاشته شده) فاز نهایی قرارگیری آن بر روی شیب زیرآب به اندازه‌ی تقریباً  $30^{\circ}$  نشان داده شده است. هنگامی که بخش *CWP* در محل قرار گرفت، به منظور تعیین ضرایب درگ و لیفت برای چنین لوله‌ای در شرایط واقعی اندازه‌گیری‌هایی انجام شدند. چنین اطلاعاتی به ویژه برای تأیید چنین شرایط مهاربندی مفید خواهد بود.



شکل ۱۲-۲۰ بخش  $12\text{ m}$  از *CWP* به قطر  $2.4\text{ m}$  توسط تیم *NOAA* در حال قرارگیری در آب است؛ رابط نر، در پیش‌زمینه مشخص است و به یک انتها متصل است (منبع: *Luis Vega*)



شکل ۱۲-۲۱ صفحه‌تصویرهای کنترلی که قرارگیری بخش *CWP* را بر روی بستر دریا نشان می‌دهند. بخش ماده (از قبل نصب شده) در راست صفحه‌تصویر سمت راست قرار گرفته است (منبع: *Luis Vega*)

### ۱۲-۴-۶ آزمایش تولید توان خالص

در ۱۹۸۰، سازمان انرژی ایالات متحده تصمیم به ساخت یک تأسیسات آزمایشی چرخه باز بر روی سایت آزمایشگاه انرژی طبیعی اداره‌ی هاوایی<sup>۱</sup> (*NELHA*) گرفت. سایت *NELHA* که در نزدیکی فرودگاه کاپلوا-کنا در امتداد ساحل غربی (در جهت مخالف باد) جزیره‌ی هاوایی واقع شده است، مقدار فوق‌العاده‌ای از نور خورشید را دریافت می‌کند و بستر دریا در آنجا امروزه به دلیل فعالیت شدید آتشفشانی شیب زیادی گرفته است. چنین ترکیب عوامل اقلیمی و عمقی به ویژه برای نصب نیروگاه‌های ساحلی مناسب می‌باشند. آب به استثنای دریا‌های آزاد در زمستان معمولاً در امتداد این ساحل آرام است و در مقابل باد استوایی حوالی نقطه‌ی کیهول محافظت می‌شود. علی‌رغم اینکه جریان‌های محلی می‌توانند به سبب طوفان‌های گردابی غالب به سرعت تقریباً ۳ گره دریایی برسند، این شرایط برای عملیات نصب فراساحل مطلوب می‌باشند.

سازمان *DOE* این پروژه را آزمایش تولید توان خالص (*NPPE*) نامید. این اسم با همکاری ایالت هاوایی که مسئولیت سرمایه‌گذاری و نصب سیستم‌های ورودی آب دریا را بر عهده داشتند در نظر گرفته شده بود. در حقیقت، این زیرساخت باید به صورت دائمی بنا می‌شد و می‌توانست نیازهای بسیاری از کاربران را در آینده تأمین کند، در حالیکه *NPPE* یک آزمایش طولانی خواهد بود، اما با این حال موقت بود. لوله‌های آب دریا که در محل قرار داده شدند، امروزه همچنان کار می‌کنند (۲۰۱۱). این یکی از جنبه‌های برجسته‌ی این پروژه‌ی *OTEC* است.

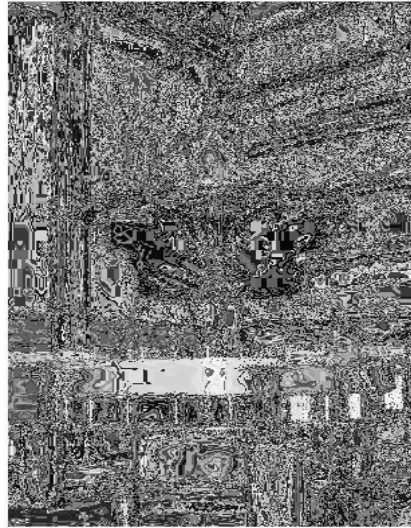
<sup>۱</sup> *Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority*



شکل ۱۲-۲۲ تصویر هوایی از سه بخش لوله‌ی آب سرد به قطر ۱ m و طول کلی ۱۹۱۶ m در بندر *Kawaihae* هاوایی قبل از اینکه به سایت *NELHA* کشیده شده و نصب گردند (منبع: *Luis Vega*)

لوله‌ی *HDPE* برای تأمین آب سرد (حدود  $6^{\circ}\text{C}$ ) از عمق ۶۴۷ m انتخاب شد. خط *CWP* به عمق ۱ m و طول ۱۹۱۶ m پس از انتقال سه بخش مونتاژی در بندر *Kawaihae* به سایت طراحی شده، مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۲-۲۲ را ببینید). ما می‌توانیم مشاهده کنیم که بر روی یکی از بخش‌هایی که برای کم‌عمق‌ترین آب‌ها در نظر گرفته شده است (تا نیروگاه را به ساحل متصل کند) و در نتیجه در معرض بیشترین بارها قرار دارد، از حلقه‌های بتنی برای مهار آن استفاده شده است (نقاط سفید کوچک). هنگامی که بخش فراساحل *CWP* نصب شود می‌توانیم ببینیم که یک منحنی زنجیری برعکس با شناوری مثبت است. این طراحی منحصر به فرد باعث می‌شود تا از بسترهای دریایی نامنظم در اعماق مورد بحث اجتناب شود، اگرچه این کار به قیمت لنگرهای سنگین در هر دو انتهای منحنی زنجیری تمام می‌شود. توان کلی پمپاژ *NPPE* است. آب به اصطلاح سطحی در دمای  $24-28^{\circ}\text{C}$  از طریق لوله‌ی *HDPE* به قطر ۱ m با ظرفیت کلی  $0.61\text{m}^3/\text{s}$  از عمق ۲۱ m (۱۶۴ m دور از ساحل) پمپ می‌گردد.

طراحی نیروگاه حاصل همکاری دو آزمایشگاه عمومی (موسسه‌ی پژوهشی سولار انرژی - *SERI* و آزمایشگاه ملی آرگون) و شرکت غیرانتفاعی خصوصی واقع در هونولولو (مرکز بین‌المللی پژوهش مدرن اقیانوس آرام - *PICHTR*) بود [BHA 90]. انتخاب توربین بخار فشار پایین با جریان ورودی شعاعی و جریان خروجی محوری (شکل ۱۲-۲۳ را ببینید) برای این کار ضروری بود. معماری موجود این ماشین برای سفارش در ایالات متحده (شرکت صنعتی مکانیکی - *MIT*) مهندسان مسئول را مجبور کرد تا به جای انتخاب شکل "تلفنی" که برای توربین محوری ارجحیت دارد، ساختار خلاء گنبدی شکل را انتخاب کنند.



شکل ۱۲-۲۳ توربین فشار پایین در حال مونتاژ: بخش پایینی، ورودی شعاعی (به قطر  $3\text{ m}$ ) و بخش بالایی خروجی محوری را (به قطر  $2.1\text{ m}$ ) نشان می‌دهد (منبع: *Luis Vega*)

در شکل ۱۲-۲۴ تصویر هوایی نیروگاه آزمایشی *OTEC* نشان داده شده است که در آن مبدل‌های گرمایی و توربین در ساختمان استوانه‌ای بتنی قرار گرفته‌اند. در داخل آن فشار  $3\text{--}2\text{ kPa}$  مورد نیاز برای به جوش آوردن آب سطحی و سپس چگالش بخار آب تولیدی توسط پمپ‌های خلاء در سقف سازه، نزدیک به ژنراتور برق، ثابت نگه داشته می‌شود. اتاق کنترل در نزدیکی آن می‌باشد. ورود و خروج آب دریا در لوله‌هایی اتفاق می‌افتد که توسط رنگ سفید آن‌ها قابل شناسایی می‌باشند (به سبب فشار داخلی کم در حین عملیات، بخش‌هایی از این لوله‌ها که به صورت مستقیم به ساختمان متصل شده‌اند از *FRP* ساخته شدند). به سبب پایین باقی ماندن دبی جریان مورد بحث، سیال‌های خروجی به روش تراوش از دیواره‌ی متخلخل گدازه‌ای حوضچه‌ی کوچک نگهداری به دریا بازگردانده می‌شوند (در تصویر قابل رؤیت نمی‌باشد).



شکل ۱۲-۲۴ تصویر هوایی نیروگاه آزمایشی OTEC چرخه باز (در پایین تصویر)؛ مبدل‌های حرارتی و توربین درون ساختمان بتنی جا داده شده‌اند (منبع: Luis Vega)

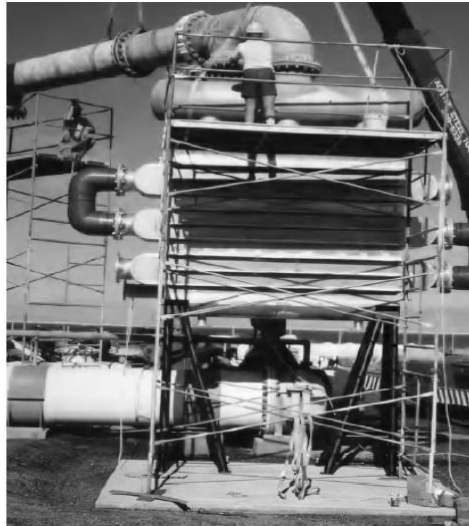
یکی از مزایای برجسته‌ی OTEC چرخه باز، سادگی (و در نتیجه هزینه‌ی کم) مبدل‌های گرمایی مستقیم است. به عنوان مثال، در شکل ۱۲-۲۵ برخی از لوله‌های پلی‌وینیل کلراید (PVC) نشان داده شده‌اند که آب سطح دریا را به محفظه‌ی خلاء انتقال می‌دهند که در آنجا ۰.۵٪ از آن بخار می‌گردد.

نیروگاهی که مابین سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۸ عملیاتی شد و (در ۲۰۱۱) به لحاظ طول عمر برای فناوری‌های OTEC یک رکورد می‌باشد. همچنین برای تولید توان ناخالص (۲۵۵kW) و خالص (۱۰۳kW) دارای رکورد می‌باشد [VEG 95]. علاوه بر تولید برق، با استفاده از دستگاه کندانسور آلومینیومی نصب‌شده به موازات فرآیند، حدوداً ۱۰٪ بخار آب تولیدی، نمک‌زدایی آب دریا نیز مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۱۲-۲۶ را ببینید).



شکل ۱۲-۲۵ سه لوله‌ی PVC استفاده شده برای انتقال آب سطحی دریا به محفظه‌ی تبخیر روشن در حین عملیات (منبع: Luis Vega)

می‌توان نتایج بسیار زیادی از این تجربه استنباط کرد. اولین نتیجه مربوط به هماهنگ کردن نیروگاه‌های OTEC چرخه باز با شبکه‌ی برق می‌شود. هنگامی که ژنراتور NPPE به شبکه‌ی محلی در جزیره‌ی هاوایی متصل شد، نوساناتی در حدود  $50\text{ kW}$  در توان مشاهده شد (یعنی، ۲۰-۲۵٪ از توان ناخالص). سپس مدل ریاضی، طبیعت استثنایی این سیستم را تأیید کرد: اینرسی چرخشی زیاد توربین نسبت به صلیبیت کوپلینگ الکتریکی از یک ژنراتور کوچک به سبب اغتشاشات فرکانس شبکه مشکل جدی رزونانسی ایجاد کرد [NIH 97]. به منظور غلبه بر این اغتشاشات و در نتیجه حفظ هماهنگی، توربوژنراتور در تلاش برای تنظیم سرعت چرخش خود برق مصرف یا تولید می‌کند. این مشکل با استفاده از وارد سازی ارتباط سیالی میان توربین و ژنراتور برطرف شده است و پاسخی به درستی توسط مدل تأیید شده است (حتی قبل از اینکه اجرا شود). با این حال، در نیروگاه‌های تجاری احتمالاً از یک رکتیفایر-اینورتور توان الکترونیکی (AC-DC-AC) برای هماهنگی نیروگاه با شبکه استفاده خواهد شد.



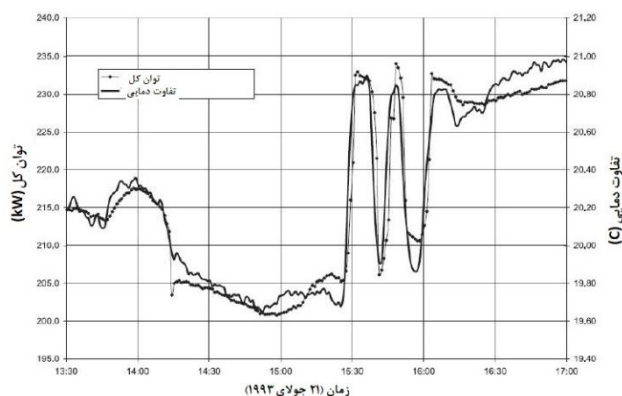
شکل ۱۲-۲۶ یونیت نمکزدایی، یک کندانسور آلومینیوم نصب شده به صورت موزی (منبع: Luis Vega)

تجهیزات استفاده شده برای پروژه عمدتاً بر اساس مشخصات داده شده توسط فروشندگان به کار برده شدند. پمپ‌های گریز از مرکز خلاء به صورت قابل توجه منحصر به فرد می‌باشند، زیرا وسایل جابجایی مثبت کمتر پیشرفته این سیستم تراکمی پنج مرحله‌ای نسبتاً خوب عمل کردند. خیلی زود بلبرینگ‌های سرامیکی وسایل گریز از مرکز با گریس روانساز خود خراب شدند. به منظور جلوگیری از محکم شدن شفت که باعث افزایش بیش از حد اختلاف دما میان حلقه‌های یاتاقان‌های داخلی و خارجی می‌شود به ترکیبی از سرعت‌های چرخشی زیاد ( $26000\text{rpm}$  -  $43000\text{rpm}$ ) و عملیات کمپرسورها در خلاء نیاز بود. برای وسایلی که در  $26000\text{rpm}$  کار می‌کردند این مسئله با استفاده از یاتاقان‌های کوچک‌تر و گریس موثرتر حل شد. در بیشترین سرعت چرخشی، یاتاقان‌های مغناطیسی شناور به صورت موفقیت‌آمیز برای مدت ۲۰۰۰ ساعت مورد آزمایش قرار گرفتند (تا اواخر پروژه).

از میان درس‌های کلی دیگر، تجهیزات دقیق قادر به اندازه‌گیری دما و فشار در نقاط مختلف از چرخه به منظور تشخیص هر گونه مشکل بالقوه پیشنهاد می‌گردد. همچنین، تا جای ممکن باید از اجزای فلزی که احتمالاً در محیط دریایی دچار خوردگی می‌شوند، اجتناب شود یا دست کم باید شرایطی فراهم گردد تا به صورت منظم از این اجزا نگهداری شود. روتور فولادی توربین OTEC فشار پایین پس از تقریباً ۱۰۰۰ ساعت عملیات به بالانس مجدد نیاز داشت، زیرا پوشش محافظ خود را از دست داده بود و شروع به زنگ زدن کرده بود. فلزات آهنی باید تحت عملیات گالوانیزه‌سازی داغ قرار گیرند. به علاوه، هر موتور الکتریکی باید به صورت کامل توسط

یک فن ایزوله و خنک شود. این پروژه مزایای مبدل‌های گرمایی بسیار ساده را نشان داد که برای چرخه‌ی باز *OTEC* مناسب می‌باشند. در حقیقت، طبیعت پرآشوب جوشش آب دریا در فشار پایین باعث به وجود آمدن برخی از مشکلات می‌شود که به تنظیماتی نیاز خواهند داشت. به عنوان مثال، به دلیل شکست بالای گاز در لوله‌های ورودی آب دریا در تبخیرکننده، تلفات فشار افزایش یافته مشاهده شد؛ این وضعیت با اصلاح لوله‌ها با شعله‌هایی<sup>۱</sup> در انتها رفع می‌گردد.

در نهایت، عملیات پیوسته‌ی طرح آزمایشی باعث شد تا برخی جنبه‌های نظری فنآوری‌های *OTEC* تأیید گردند. به ویژه تغییرات توان ناخالص وابسته به نوسانات دمای آب دریا به خوبی مستندسازی شدند. برای منبع حرارتی  $20^{\circ}\text{C}$  (آب سطحی  $26^{\circ}\text{C}$ ، آب عمیق  $6^{\circ}\text{C}$ ) و برای هر تفاوت دمایی  $1^{\circ}\text{C}$  با تولید اسمی ناخالص  $210\text{ kW}$  تغییری حدوداً  $20\text{ kW}$  (۱۰٪) در توان ناخالص ایجاد شد. در شکل ۱۲-۲۷ این مورد با گرداب گرم بزرگ در خارج از ساحل *Keahole Point* که باعث افزایش ناگهانی حدوداً  $1^{\circ}\text{C}$  در دمای سطح آب می‌شود، به خوبی توضیح داده شده است؛ ما می‌توانیم توانایی نیروگاه *OTEC* برای پیروی از تغییرات نسبتاً سریع منبع حرارتی را مشاهده کنیم.



شکل ۱۲-۲۷ تغییر توان ناخالص مطابق با تغییر در دمای میان آب‌های سطحی و عمقی (*NPPE*، ۲۱ ژوئیه ۱۹۹۳)

#### ۱۲-۴-۷ موانع بر سر راه پروژه‌ی هند-ژاپن

با نزدیک شدن قرن ۲۰م، آخرین ابتکار برای توسعه‌ی *OTEC* اتخاذ شد. موسسه‌ی ملی فنآوری اقیانوسی (*NIOT*) واقع در چنای (هند) و دانشگاه ساگا (ژاپن) توافقی را نهایی کردند که هدف آن آزمایش یک نیروگاه شناور با توان ناخالص  $1\text{ MW}$  خارج از ساحل هند بود [*IOE*]

<sup>۱</sup>Flares



[00]. این پروژه‌ی نسبتاً کوچک احیای توسعه‌ی OTEC را بر عهده داشت، حتی در صورتی که انتخاب‌های فنی انجام شده تا حدودی محافظه‌کارانه باقی ماندند- به عنوان مثال HDPE CWP به قطر  $1\text{ m}$  و وسیله‌ی مهار مشابه به پروژه‌ی Mini-OTEC.

آزمایش‌هایی که قرار بود به مدت سه سال در دریا انجام شوند، هیچگاه صورت نگرفتند. در اوایل ۲۰۰۱ و ۲۰۰۳ مطابق گزارش منتشر شده‌ی وزارت امور مالی دولت هند پنج سال پس از آن، توسعه‌ی CWP دوبار با شکست مواجه شد [CON 08]. رسانه‌ها همچنان با وجود اعلام عملیاتی شدن نیروگاه OTEC در بهار ۲۰۰۳ خوش‌بین بودند [OTE 03, FIN 03]. در واقعیت، بودجه‌ی اضافی که در آن زمان NIOT نیاز داشت توسط وزارت امور مالی تأمین نشد و پروژه به صورت رسمی پیرو هزینه‌هایی معادل تقریباً ۱۵ میلیون دلار (۶۱ کرور - ۶۱۰ میلیون روپیه) در سال ۲۰۰۵ لغو شد. این عقب‌نشینی‌ها یادآور مسائلی بود که باعث رنجش کلاد در هفت دهه پیش شد. آن‌ها با نسبت دادن به برنامه‌ریزی نامناسب و نبود منبع برای تخصص ضروری نشان دادند که توسعه‌ی آتی OTEC باید مبتنی بر منابع کافی باشد و تحت هیچ شرایطی نباید با خطرات مربوط به خود عملیات گسترده فراساحل سازش شود.

با این حال محققان NIOT در ۲۰۰۷ توانستند از اجزای اصلی پروژه‌ی منسوخ OTEC در آزمایش نمک‌زدایی استفاده کنند [IND 07, EVE 07]. کشتی ۷۰ متری Sagar Shakti بدین منظور تغییر داده شد. فرآیند مورد بحث بر اساس چرخه‌ی باز OTEC و بدون توربین، به لحاظ ترمودینامیکی نسبت به تولید برق به کار و تجربه‌ی کمتری نیاز دارد زیرا در نبود توربین، کل منبع حرارتی در مبدل‌های گرمایی موجود می‌باشند (شکل ۱۲-۹ را ببینید). این بدین معنا بود که می‌توان آزمایش را در آب‌های نسبتاً کم‌عمق ( $700\text{ m}$ ) و با CWP کوتاه-تر انجام داد. بدین روش،  $1000\text{ m}^3$  آب شیرین در هر روز، یعنی حدود ۱٪ دبی جریان آب سطحی دریا تولید شد ( $1140\text{ kg/s}$ ). آب شیرین دوباره توسط کیسه‌های شناور بدون منفذ با ظرفیت ۲۰۰۰۰۰ لیتر به ساحل کشیده می‌شد.

بنابراین پروژه‌ی تکمیل‌شده در هند به خوبی برای تاریخ سرشار از مشکل توسعه‌ی OTEC مناسب بود. به نظر می‌رسد اهمیت این پروژه بسیار بزرگتر از Mini-OTEC باشد اما دبی جریان آب آن حدود یک پنجم OTEC-1 است، که این مورد قابل بحث است.

## ۱۲-۵ بازتاب‌ها

فناوری *OTEC* برای تولید توان الکتریکی تقریباً پیوسته با استفاده از منابع گسترده حرارتی تجدیدپذیر که در اقیانوس‌های نواحی گرمسیر ذخیره شده‌اند، پتانسیل خوبی دارد. در این اثنا توجه داشته باشید که منطقه‌ی جغرافیایی منابع *OTEC* در "قطب جنوب" بی‌شک (ناگفته) از نقطه‌نظر کشورهای ثروتمند و توسعه‌یافته که تمایل به سرمایه‌گذاری برای بهره‌برداری از آن را داشته باشند، دارای اشکال است. فناوری *OTEC* مبتنی بر دریافت جریان سطحی، به عنوان مثال همانند سیستم‌های توان بادی و موجی، نبوده و در نتیجه به صورت فضایی فشرده است (به قیمت دبی جریان زیاد آب دریا). به دلیل بازده‌های ترمودینامیکی که برای چرخه‌های *OTEC* رایج می‌باشند، این مشکل خود را در اقتصاد کلان مورد انتظار نشان می‌دهد. بنابراین، تنها تکیه بر قدرت بازار برای ساخت طرح‌های آزمایشی بزرگ که به اندازه‌ی کافی متقاعد کننده باشند و همچنان برای امکان‌پذیری اقتصادی بسیار کوچک باشند، دشوار خواهد بود. تنها با تمرکز بر تلاش عمومی قادر به انجام این کار خواهیم بود.

بهره‌برداری از *OTEC* به غلبه بر موانع عمده نیاز دارد که برخی از آن‌ها از کار کلاد در ۸۰ سال پیش به خوبی شناخته شده می‌باشند. یادداشت ویراستار در انتهای مقاله‌ی منتشر شده توسط کلاد در ۱۹۲۶ این موضوع را بسیار آشکار می‌سازد:

"همچنان، هر چقدر هم که ممکن است تئوری فراهم شده باشد، ممکن است فردی کنجکاو باشد که آیا از نقطه‌نظر صنعتی، بهره‌برداری فرآیند به مشکلات بسیار زیادی برخورد خواهد کرد و آیا در تحلیل نهایی، سرمایه‌ی مورد نیاز برای سرمایه‌گذاری در این شرکت بسیار زیاد خواهد بود" [CLA 26].

باید توجه شود که کلاد با بودجه و وسایل فنی محدود در اختیار خود تلاش کرد تا این سوالات را تا جای ممکن به صورت قانع‌کننده پاسخ دهد. این باعث شد تا او دائماً برای حل مشکلاتی که تازه بودند (عمدتاً در مهندسی اقیانوس) تلاش کند و هنگامی که نیاز شد اساساً طرح خود را تغییر داد (به عنوان مثال، از مفهوم نیروگاه روی خشکی به نوع شناور آن تغییر داد). در نهایت پی برده شد که چنین چالشی بسیار دشوار خواهد بود. به طرز عجیبی بر خلاف پیشرفت‌های فنی بسیار زیاد در زمینه‌ی مهندسی فراساحل، کارهایی که در اواخر قرن ۲۰م انجام شده بود نیز با تمایل مالی و سیاسی ناکافی مواجه شدند که باعث کاهش پیشرفت کار شد. باز هم محققان سخت‌کوش و تصمیم‌گیران تلاش کردند تا جای ممکن گستره‌ای از زمینه‌ی مطالعه‌ای را با منابع محدود پوشش دهند (چرخه‌ی باز و بسته، نیروگاه‌های آزمایشی کوچک واقع در خشکی و شناور، *CWP*‌های استفاده شده در بستر دریا و آزمایش *CWP*‌های

معلق و غیره). با این حال، این راهبرد "پراکندگی" باعث شکست قطعی (شناسایی نشده) شد: سوالات اساسی مورد پرسش در ۱۹۲۶ همچنان باید به طور قطعی پاسخ داده شوند.

در آغاز قرن ۲۱م، در انجمن OTEC اتفاق آراء وجود داشت که همچنان باید کارهای آزمایشی بسیاری انجام گردند. امروزه، کارهایی (نسبتاً درست) بر ساخت طرح‌های آزمایشی متمرکز شده‌اند که دارای اندازه‌ی کافی برای ثبت رکوردی عملی از یک طرف در تولید توان خالص در بلند مدت (یعنی بیشتر از چند سال) و از طرف دیگر برای اثبات نهایی توجیه‌پذیری اقتصاد کلان طرح‌ریزی شده برای نیروگاه‌های بزرگ OTEC می‌باشند. بنابراین، جهان باید تا موقعی که بتوان در این پروژه‌های سرمایه‌گذاری کرد، منتظر باشد.

## ۱۲-۶ کتاب‌شناسی

- [AVE 94] AVERY W.H., WU C., *Renewable Energy from the Ocean – A guide to OTEC*, Oxford University Press, New York, 1994.
- [BAI 10] BAILLOT R., *Georges Claude: le génie fourvoyé*, EDP Sciences et Histoire, 2010.
- [BHA 90] BHARATHAN D., GREEN H.J., LINK H.F., PARSONS B.K., PARSONS J.M., ZANGRANDO F., *Conceptual Design of an Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion Net PowerProducing Experiment (OC-OTEC NPPE)*, Report SERI/TP-253-3616, Solar Energy Research Institute of Energy, 1990.
- [BJE 07] BJELKEMAN-PETTERSON T., *OTEC in Nauru, a film in two parts available on YouTube: [http://www.youtube.com/watch?v=\\_mGOcqofERM](http://www.youtube.com/watch?v=_mGOcqofERM), posted in 2007 and <http://www.youtube.com/watch?v=HWVWD80ENdM>.*
- [BOG 22] BOGGIA C., DORNIG M., "Una nuova sorgente di energia", *L'elettrotecnica*, vol. 9, no. 33, 1922.
- [CAM 13] CAMPBELL B.J., "A neglected source of power in nature", *Engineering News*, vol. 70, no. 6, p. 250-251, 1913.
- [CHA 57] CHAMBADAL P., *Les Centrales Nucléaires*, Armand Colin, Paris, p. 1-58, 1957.
- [CLA 26] CLAUDE G., "L'utilisation de l'énergie thermique des mers", *Le Génie Civil*, vol. 89, no. 24, p. 542-543, 1926.
- [CLA 30] CLAUDE G., "Power from the tropical seas", *Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 12, p. 1039-1044, 1930.

- [CLA 31] CLAUDE G., “Vers la conquête de l’énergie des mers”, *Revue Scientifique*, vol. 69, no. 6, p. 161-172, 1931.
- [CLA 32] CLAUDE G., BOUCHEROT P., *Method and Apparatus for Obtaining Power from Sea Water*, US Patent 2006985, United States Patent and Trade Mark Office, Washington DC, 1932.
- [CLA 34] CLAUDE G., “L’état actuel de mes travaux sur l’énergie des mers”, *Annaes da Academia Brasileira de Sciencias*, vol. 6, no. 4, p. 233-242, 1934.
- [CLA 57] CLAUDE G., *Ma vie et mes inventions*, Chapter XII (p. 129-154) deals specifically with OTEC, Plon, Paris, 1957.
- [CON 08] CONTROLLER AND AUDITOR GENERAL OF INDIA, Chapter 7, Report no. CA 3 of 2008, [http://www.cag.gov.in/html/reports/civil/2008\\_3SD\\_CA/chap\\_7.pdf](http://www.cag.gov.in/html/reports/civil/2008_3SD_CA/chap_7.pdf), p. 39-48, 2008.
- [COU 81] COUSTEAU J.Y., JACQUIER H., “Énergie des mers: plan-plan les watts”, Chapter 9 of *Français, on a volé ta mer*, R. Laffont, Paris, 1981.
- [DAR 81] D’ARSONVAL J.-A., “Utilisation des forces naturelles. Avenir de l’électricité”, *Revue Scientifique*, vol. 17, p. 370-372, 1881.
- [DAS 94] DA SILVA A., YOUNG A.C., LEVITUS S., *Atlas of Surface Marine Data 1994*, Technical Report 6, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.DASILVA/.SMD94/halfbyhalf/climatology/.netheat/>, 1994.
- [DEV 85] DE VOS A., “Efficiency of some heat engines at maximum-power conditions”, *American Journal of Physics*, vol. 53, no. 6, p. 570-573, 1985.
- [ELL 51] ELLIS H., HALES S., “A letter to the Rev. Dr. Hales, F.R.S. from Captain Henry Ellis, F.R.S. dated Jan. 7, 1750-1751, at Cape Monte Africa, Ship Earl of Halifax”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 47, p. 211-216, 1751.
- [EVE 07] EVEREST TRANSMISSION, *First ever floating barge mounted Low Temperature Thermal Desalination plant by Indian scientists*, [http://www.everestblowers.com/technical-articles/littd\\_2.pdf](http://www.everestblowers.com/technical-articles/littd_2.pdf), 2007.

- [FIN 03] THE FINANCIAL EXPRESS, Internet journal, [www.financialexpress.com/news/otecpilot-plant.../84500/](http://www.financialexpress.com/news/otecpilot-plant.../84500/), 10 June 2003.
- [IND 07] THE INDIC VIEW, Internet journal, <http://indicview.blogspot.com/2007/04/niots-otecbased-desalination-plant.html>, 21 April 2007,
- [IOE 00] INSTITUTE OF OCEAN ENERGY, [http://www.ioes.saga-u.ac.jp/english/about-indiaotec\\_e.html](http://www.ioes.saga-u.ac.jp/english/about-indiaotec_e.html), University of Saga, Japan, November 2000:
- [LOC 05] LOCARNINI R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., *World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature*, NOAA Atlas NESDIS 61, US Government Printing Office, Washington, 2006.
- [LOS 06] LOSTER M., [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar\\_land\\_area.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_land_area.png), 2006.
- [MAC 80] MACDONALD B., *Ocean Energy Launch 1980*, a film in two parts available on YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=8aQXg5M5DiM> and <http://www.youtube.com/watch?v=9yRWNQ4OJDo>.
- [NIH 97] NIHOUS G.C., "Synchronous power output fluctuations for an experimental opencycle OTEC plant", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 4, p. 282-288, 1997.
- [NIH 05] NIHOUS G.C., "An order-of-magnitude estimate of ocean thermal energy conversion (OTEC) resources", *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 127, no. 4, p. 328-333, 2005.
- [NIH 07a] NIHOUS G.C., "A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion (OTEC) resources", *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 129, no. 1, p. 10-17, 2007.
- [NIH 07b] NIHOUS G.C., "An estimate of atlantic ocean thermal energy conversion (OTEC) resources", *Journal of Ocean Engineering*, vol. 34, p. 2210-2221, 2007.
- [NIH 10] NIHOUS G.C., "Mapping available ocean thermal energy conversion resources around the main Hawaiian Islands with state-of-the-art tools", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 2, no. 043104, p. 1-9, 2010.
- [NOV 57] NOVIKOV I.I., "The efficiency of atomic power stations", *Journal of Nuclear Energy II*, vol. 7, p. 125-128, 1958; translated from Russian, *Atomnaya Energiya*, 3, p. 409-412, 1957.
- [OTE 03] OTEC News, internet column,

- [http://www.otecnews.org/archive/2003\\_05\\_01\\_dusty.html](http://www.otecnews.org/archive/2003_05_01_dusty.html), 29 May 2003.
- [PAD 81] PADDOCK R.A., Ditmars J.D., *Comparison of limited measurements of the OTEC-1 plume with analytical model predictions*, Argonne National Laboratory, Report ANLOTEC-EV-1, 1981.
- [PIT 82] PITTMAN W.E. JR., "Energy from the oceans: George Claude's magnificent failure", *Environmental Review*, vol. 6, no. 1, p. 2-13, 1982.
- [RUM 68] RUMFORD B.T., *The complete works of Count Rumford, Volume 1: The Nature of Heat*, Belknap Press, Cambridge, Massachusetts, 1968.
- [SCH 07] SCHLITZER R., *eWOCE – Electronic Atlas of WOCE Data*, <http://www.ewoce.org/>, 2007.
- [SCH 09] SCHLITZER R., *Ocean Data View*, <http://odv.awi.de>, 2009.
- [TOM 05] TOMAYKO J.E., "Solar sea power: over a century of invention, Proceedings of the International Solar Energy Conference", Orlando, p. 565-572, Florida, August 2005.
- [TRA 83] TRACY D.E., Vadus J.R., "Salvage and recovery of the OTEC-1 cold water pipe", *Proceedings of the Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, May 1983.
- [VEG 88] VEGA L.A., Nihous G.C., "Response of an OTEC pipe suspended from a surface vessel", *Proceedings of the PACON '88 Conference*, p. 5-23, Honolulu, Hawaii, July 1988.
- [VEG 95] VEGA L.A., "The 210 kW open-cycle OTEC experimental apparatus: status report", *Proceedings, Oceans '95 Conference*, San Diego, 1995.



## تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس: پاسخ -

### های بررسی شده

#### ۱۳-۱ روش صنعتی برای تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس

پس از ۸۰ سال کار، همچنان تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس یک سیستم آزمایشی هست. با این حال، با شروع قرن ۲۱م، برخی عوامل باعث تحقق رویای ژول ورن<sup>۱</sup> شدند.

پس از دومین بحران نفتی، علاقه به تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس (OTEC) کاهش پیدا کرد. بسیاری از شکل‌های مهندسی در زمینه‌ی نفت فراساحل و سکوهایی با قابلیت بازیابی نفت خام در عمق چند هزار متری توسعه یافته بودند.

بنابراین، فناوری‌های مهار، نصب و فناوری‌های پمپاژ به سرعت گسترش یافتند و امروزه به حدی از پختگی فنی رسیدند که باعث غبطه خوردن جی.کلاد (به فصل ۱۲ مراجعه نمایید) خواهند شد.

به‌طور مشابه، پیشرفت سیالات مبرد و افزایش تعداد وسایل بازیابی انرژی و گرما باعث تکامل تولیدکنندگان مبدل‌ها، پمپ‌ها و توربین‌ها شده‌اند.

تمامی موارد به این معنا می‌باشند که مونتاژ این سیستم‌ها ساده‌تر بوده و عملکرد آن‌ها نسبت به ۲۰ سال پیش بسیار بیشتر است.

---

<sup>۱</sup> Jules Vern



علاوه بر تلاش در مقابل تغییرات اقلیمی، آخرین بحران نفتی و وقایع اخیر در ژاپن دوباره بیانگر مزایای توسعه‌ی پاسخ‌های جایگزین تولید انرژی برای سوخت‌های فسیلی (به‌ویژه زغال) و انرژی هسته‌ای، در نواحی گرمسیر و جزایر بودند. فناوری OTEC برای تولید پایه‌ای برق در تمامی این نواحی دارای فرصت هست.

در سال ۲۰۰۷، DCNS که در زمینه‌ی ساخت کشتی‌ها و سیستم‌های انرژی بیش از ۱۵۰ سال تجربه داشت تصمیم گرفت تا چالش OTEC را بر عهده بگیرد و پاسخی را طرح ریزی کند که در ابتدا مورد توجه مناطق خارج از فرانسه<sup>۱</sup> و همچنین هر کشوری بود که تمایل به بهره‌برداری از این وسایل تولید داشتند تا از وابستگی به سوخت‌های فسیلی اجتناب کنند.

ما در بخش زیر سیستم‌های مختلف تبدیل انرژی را که امکان‌پذیر می‌باشند، طرح‌های مختلف سکوی مربوط به آن‌ها و ملاحظات محیطی را ارائه می‌دهیم.

## ۱۳-۲ سیستم تبدیل انرژی در مرکز OTEC

### ۱۳-۲-۱ چرخه‌های ترمودینامیکی

همان‌طور که ما در فصل قبل دیدیم، سه نوع سیستم OTEC وجود دارد که مبتنی بر چرخه‌ی باز، چرخه‌ی بسته و چرخه‌ی ترکیبی می‌باشند. اکنون ما باید با جزئیات بیشتری آن‌ها را بررسی کنیم.

### ۱۳-۲-۱-۱ چرخه‌ی باز

این چرخه با پمپاژ آب دریا از سطح (که در طول سال میانگین گرفته می‌شود) در اندازه‌هایی که ما می‌خواهیم بررسی کنیم در دمای  $26^{\circ}\text{C}$  هست. این آب به تبخیرکننده منتقل می‌شود که در آنجا به‌منظور تسهیل تبخیر، (با فشار بسیار پایین) دچار خلأ می‌شود، زیرا تبخیر در فشار نسبتاً منفی در دمای کمتری اتفاق می‌افتد و شوری بخار گرفته می‌شود. با این حال، تنها ۰.۵٪ از آب واردشده به تبخیرکننده فلش<sup>۲</sup> تبخیر می‌شود و مابقی آب با دمای تقریباً  $21^{\circ}\text{C}$  به دریا بازگردانده می‌شود. بخار توربین به کندانسور منتقل می‌شود که در آنجا از آب سرد پمپاژ شده از اعماق در دمای تقریباً  $5^{\circ}\text{C}$  استفاده می‌شود تا با چگالش بخار، آن را به آب شیرین تبدیل کنند که می‌توان آن را مصرف کرد. افت اندک آنتالپی میان تبخیرکننده فلش و کندانسور برای به حرکت درآوردن توربو ژنراتور کافی است تا برق تولید کند.

<sup>1</sup> France's Overseas Territories

<sup>2</sup> Flash evaporator

### ۱۳-۲-۱ چرخه‌ی بسته

۳ نوع چرخه‌ی بسته وجود دارد که از منبع گرم و منبع سرد استفاده می‌کنند که به دماهای موجود آب دریا مربوط می‌گردد. آن‌ها به صورت زیر می‌باشند:

- چرخه‌ی رانکین = سیال کاری: ترکیب خالص و ارگانیک؛

- چرخه‌ی کالینا = سیال کاری: ترکیبی از آمونیاک و آب؛

- چرخه‌ی یوهارا<sup>۱</sup> = سیال کاری: ترکیبی از آمونیاک و آب و خروجی توربین.

### ۱۳-۲-۳ چرخه‌ی ترکیبی

این چرخه، چرخه‌های باز و بسته را باهم ترکیب می‌کند، ما می‌توانیم به موارد زیر اشاره کنیم:

- اول از همه، چرخه‌ی بسته، با چرخه‌ی عبور سیال کاری از تبخیرکننده، توربو ژنراتور و کندانسور، تولید برق است؛

- چرخه‌ی باز که با استفاده از مبدل گرمایی دوفازی برای چگالش بخار آب خروجی از تبخیرکننده فلش، آب قابل آشامیدن تولید می‌کند.

### ۱۳-۲-۴ مزایا و معایب این چرخه‌ها

نکاتی در مورد چرخه‌ی باز:

- تولید آب آشامیدنی (شیرین) و همچنین برق؛

- مساحت سطح کمتر دیواره‌ها در تبخیرکننده و در نتیجه رسوب زیستی کمتر (به فصل ۲ مراجعه نمایید)؛

- توربین بزرگ‌تر به دلیل فشار کم، حجم زیاد بخار آب در توربین - در نتیجه فرآیند بسیار پرهزینه؛

- مقدار زیادی از هوا باید به منظور دستیابی به خلأ بالا خارج شود.

نکاتی در مورد چرخه‌ی بسته - استفاده از سیال کاری واسطه دلالت دارد بر:

<sup>1</sup> Uehara cycle

- توربو ژنراتورهای کوچک که ناشی از حجم کم ورودی می‌باشند و در نتیجه به هزینه‌ی کمتر منتهی می‌شوند؛

- از طرف دیگر، مبدل‌های بزرگ دوجداره قراردادارند، بنابراین رسوب زیستی زیادی به وجود می‌آید.

نکاتی در مورد چرخه‌ی ترکیبی:

- دارای مزیت هست زیرا الکتریسیته و آب شیرین تولید می‌کند؛

- هزینه‌ی نصب آن بیشتر است و به‌اندازه‌ی دو برابر مصالح نیاز دارد.

تنوع تولید به‌طور عمده به نصب نیروگاه *OTEC* بر روی ساحل یا فراساحل بستگی دارد.

علاوه بر الکتریسیته، نیروگاه *OTEC* برحسب نوع آن ممکن است ارزشمند باشد:

- زیرا با استفاده از چرخه‌ی باز و ترکیبی، آب شیرین تولید می‌کند؛

- زیرا می‌توان با استفاده از آب سرد دریا که از کندانسورها خارج می‌شود و توزیع آن زیرساخت اطراف را خنک کرد و از آن برای خنک کردن ساختمان‌ها یا اتاق‌ها استفاده نمود؛

- در کشت آبی، به دلیل استفاده‌ی مجدد از آب سرد کندانسور برای پرورش ماهیان، به دلیل سرشار بودن آب عمقی از مواد مغذی؛

- در کشاورزی، به دلیل اینکه لوله‌های آب دریا خاک را خنک می‌کنند و هوای مجاور چگالش می‌یابد که رطوبت هوا را افزایش و باعث افزایش رشد می‌شود؛

- در زیست‌توده، برای تولید سوخت‌های زیستی (جلبک‌ها) که به‌عنوان سوخت نیروگاه‌های حرارتی به کار می‌روند.

با روشی که در نظر گرفته‌شده است (بهره‌برداری از تفاوت دمای میان آب سطحی و عمقی)، این انرژی را تنها می‌توان از مناطق گرمسیر استخراج کرد؛ هر جای دیگر، تفاوت دمایی میان سطح و بستر به‌اندازه‌ی کافی برای دستیابی به بهره‌ی بالا و بنابراین توان کافی برای پمپاژ آب سرد از عمق زیاد به ماشین حرارتی زیاد نیست (به یاد داشته باشید که خروجی یک ماشین همچون ماشین مذکور اساساً به تفاوت دمای منبع گرم و منبع سرد بستگی دارد) (فصل ۱۲ را ببینید).

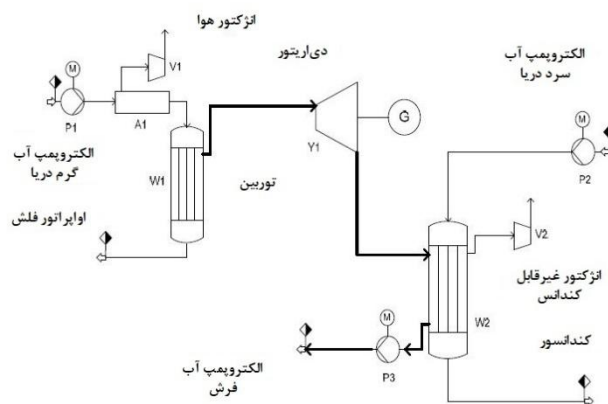
۱۳-۲-۱-۴ چرخه‌ی باز

آب گرم دریا در این چرخه توسط الکتروپمپ از سطح پمپاژ شده ( $P1$ ، در شکل ۱۳-۱) و با استفاده از مکنده  $A1$  و پرتابگر هوا  $V1$  هوای آن تخلیه می‌گردد و سپس در  $W1$  تبخیر می‌شود که در آن بخشی از آب دریا به بخار فشار پایین تبدیل می‌گردد. بخار از توربین  $Y1$  عبور کرده و از طریق آلترناتور جریان الکتریکی تولید می‌کند.

بخاری که توربین را به گردش درمی‌آورد سپس از کندانسور  $W2$  عبور می‌کند و سپس محصول میعان از طریق الکتروپمپ‌های  $P3$  به مصرف‌کنندگان آب شیرین توزیع می‌گردد.

نقش مکنده‌ی هوا، بیشتر هوای پراکنده شده به دلیل گرادیان افت فشار، در فشار جزئی قابل توجه در آب دریا آزاد می‌گردد. بخار آب که به مکنده‌ی هوا منتقل شده است کاهش خواهد یافت، زیرا فشار داخل این وسیله نسبت به فشار اشباع در سطح بالایی نگه‌داشته می‌شود.

بزرگ‌ترین مشکل چرخه‌ی باز، تفاوت جزئی فشار حول توربین است:  $2.8kPa$  در مقابل  $270kPa$  برای چرخه‌ی بسته با استفاده از آمونیاک به‌عنوان سیال کاری و حجم ویژه‌ی زیاد که باید برای توربین استفاده شود. در حقیقت، برای بهره‌ی کم چرخه ناشی از تفاوت جزئی دما و همچنین حجم ویژه‌ی زیاد به توربین بسیار بزرگ نیاز است.



شکل ۱۳-۱ نمودار چرخه‌ی باز

یک نیروگاه  $210kW$  چرخه باز OTEC در هاوایی مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۱۲-۳ تصویری از سایت آزمایشی نشان داده شده است تا اندازه‌ی توربین و تبخیرکننده فلش تشریح شود.



شکل ۱۳-۲ تصویر هوایی از نیروگاه آزمایشی چرخه باز OTEC

قطر ورودی بخش شعاعی توربین همان طور که در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است،  $3\text{ m}$  هست.



شکل ۱۳-۳ مونتاژ توربین فشار پایین

یکی از معایب دیگر چرخه‌ی باز، نیاز به پمپ خلأ به منظور خارج کردن گازهای پخش شده در آب دریا که با بخار آزاد می‌شوند. این گازها در کندانسور شکل می‌گیرند (زیرا آن‌ها غیرقابل چگالش می‌باشند) و فوراً بازده آن را کاهش می‌دهند. ممکن است مورد نیاز برای به حرکت درآوردن این پمپ‌ها به شدت توان خالص انتقالی توسط تأسیسات را کاهش دهد.

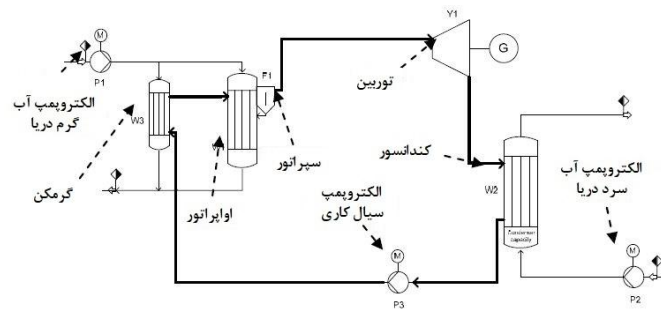
## ۱۳-۲-۱-۴ چرخه های بسته

## چرخه ی رانکین

انرژی مورد نیاز در این چرخه برای تغییر حالت سیال کاری توسط سیال گرم که از الکتروپمپ  $P1$  می گردد، از تبخیرکننده  $W1$  و گرم کن  $W3$  می گذرد که باعث تبخیر سیال کاری می شود و سیال کاری سرد فراهم می شود که توسط الکتروپمپ  $P2$  می گردد که باعث مایع شدن سیال کاری از طریق کندانسور  $W2$  می شود.

انرژی حاصل شده در هنگام این تغییر حالت توسط توربین استفاده می شود. به منظور محافظت از پره های توربین ضروری است که یک حائل استاتیکی میان تبخیرکننده (که بخار خیس تولید می کند) و توربین قرار داده شود. این حائل بخار خشک تولید می کند که وارد توربین می شود.

بنابراین، این فرآیند به دمای ورودی سیال گرم و سیال سرد و همچنین ظرفیت سیال کاری برای تغییر حالت مربوط می شود.



شکل ۱۳-۴ نمودار چرخه ی بسته ی رانکین

ممکن است سیالات مختلفی در چرخه ی رانکین مورد استفاده قرار گیرند. اگر سیال آلی (شامل کربن، هیدروژن، برای مثال مبتنی بر  $HCFC$  ها) استفاده شود، ما از یک چرخه ی رانکین آلی صحبت می کنیم ( $ORC$ ). اگر سیالات غیرآلی باشند (مثلاً،  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$ ) هنگامی که از بخار آب استفاده شود، ما صرفاً از چرخه ی رانکین بدون هیچ نشانه ی دیگری صحبت می کنیم و در غیر این صورت سیال را مشخص می کنیم.

آمونیاک یک سیال کاری بالقوه هست. در حقیقت، به سبب خواص ترمودینامیکی آن در حدود  $15^\circ C$  و در فشار ۷ بار تغییر حالت می دهد (از مایع به گاز). تعادل صحیح میان مشخصات آمونیاک و دو سیال فرآیندی با استفاده از آب دریا محقق می شود که ممکن است دمای

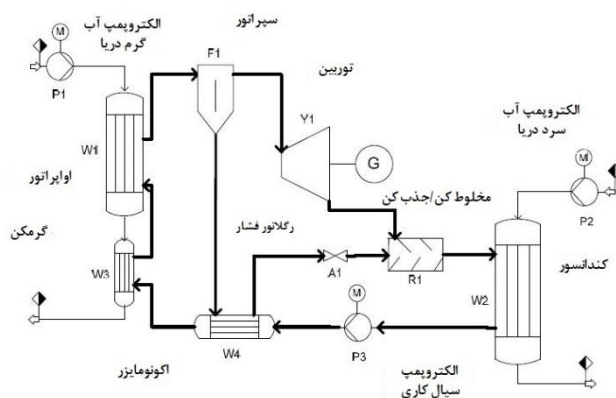
سطحی آن در مناطق گرمسیر به بیش از  $26^{\circ}\text{C}$  برسد و بنابراین، به‌عنوان سیال گرم استفاده می‌شود و آب دریا در اعماق زیاد در مناطق جغرافیایی مشابه که ممکن است دمای آن در عمق مابین  $m$  ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ به کمتر از  $6^{\circ}\text{C}$  برسد.

ارتباط میان توان خالص و توان ناخالص نشانه‌ای از ظرفیتی است که در آن از جریان‌های آب پمپ‌شده به بهترین صورت و با کمترین تلفات بار استفاده می‌شود. برای مثال، در چرخه‌ی بسته این رابطه حدود ۷۰٪ خواهد بود.

### چرخه‌ی کالینا

در چرخه‌ی کالینا از ترکیب آب و آمونیاک به‌عنوان سیال کاری استفاده می‌شود. همانند چرخه‌ی رانکین توصیف‌شده در بالا، آب گرم دریا از طریق  $PI$  پمپ شده و برای گرمایش سیال کاری از طریق  $W3$  و تبخیر از طریق  $W1$  استفاده می‌شود.

برخلاف چرخه‌ی رانکین، این تبخیر عمداً ناقص انجام می‌شود. بخار ترکیب آب-آمونیاک از حالت مایع ترکیب آب-آمونیاک در حائل  $FI$  جدا می‌گردد (حالت ترمودینامیکی ترکیب هنگامی که از تبخیرکننده خارج می‌شود مستقیماً کاربرد حائل را مشخص می‌سازد و دبی جریان را در دو شاخه‌ی چرخه و ترکیب‌هایی از بخار و مایع را تعیین می‌کند) و سپس از توربین  $TI$  عبور می‌کند که برای تولید جریان به یک آلترناتور متصل است.



شکل ۱۳-۵ نمودار چرخه‌ی کالینا

نسبت به چرخه‌ی رانکین یک مبدل اضافی به نام اکونومایزر<sup>۱</sup>،  $W4$ ، به آن اضافه می‌گردد تا به بهره‌برداری حداکثر از منابع انرژی دست پیدا کند. در این اکونومایزر، ترکیب مایع آب-آمونیاک

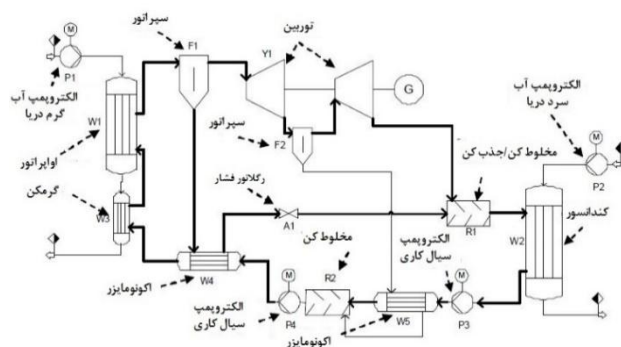
<sup>۱</sup> Economizer

خروجی در حائل  $F1$  انرژی خود را به ترکیب مایع آب-آمونیاک منتقل می کنند که از طریق  $W2$  چگالش می یابند. پمپ  $P3$  ترکیب را به فشار عملیاتی اکونومایزر می رساند.

ترکیبی که انرژی خود را از طریق  $W4$  آزاد کرده است سپس تجزیه شده و در  $RI$  با بخار ورودی از توربین  $Y1$  ترکیب/جذب می شود. علاوه بر فشارهای تبخیر و چگالش ترکیب، دو مقدار مقابل به ویژه تأثیر زیادی بر عملکرد چرخه دارند: ترکیب سیال کاری (نسبت آمونیاک به آب) و تیتراسیون (% سیال کاری در حالت گازی) در خروجی تبخیرکننده.

### چرخه یوهارا

چرخه یوهارا به سبب افت میان ۲ مرحله ی توربین  $Y1$  و در نتیجه افزایش سطح فشار، نسبت به چرخه ی کالینا آزادی بیشتری دارد.



شکل ۱۳-۶ نمودار چرخه ی یوهارا

این چرخه نیز از ترکیب آب و آمونیاک به عنوان سیال کاری استفاده می کند. همانند چرخه های رانکین و کالینا که در بالا توصیف گشتند، آب گرم دریا از طریق  $PI$  پمپاژ شده و برای گرمایش سیال کاری از طریق  $W3$  و تبخیر آن از طریق  $W1$  مورد استفاده قرار می گیرد.

همانند چرخه ی یوهارا، تبخیر عمداً ناقص انجام می شود. بخار ترکیب آب-آمونیاک از حالت مایع ترکیب آب-آمونیاک در حائل  $F1$  جدا می گردد (حالت ترمودینامیکی ترکیب هنگامی که از تبخیرکننده خارج می شود مستقیماً کاربرد حائل را مشخص می سازد و دبی جریان را در دو شاخه ی چرخه و ترکیب هایی از بخار و مایع را تعیین می کند) و سپس از توربین  $Y1$  عبور می کند که برای تولید جریان به یک آلترناتور متصل است.



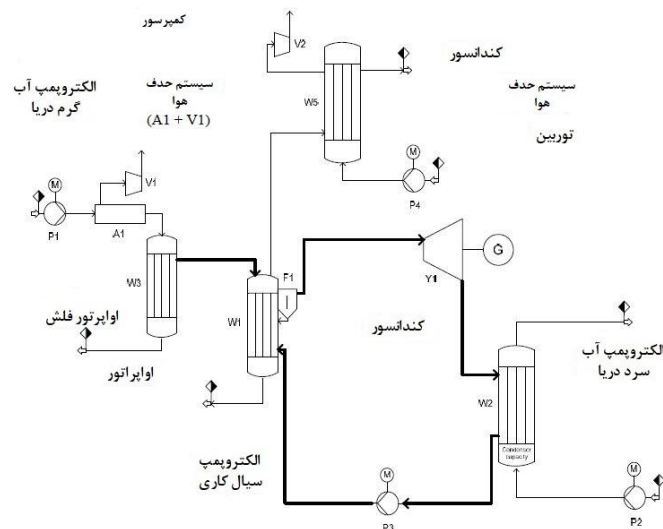
همانند چرخه‌ی کالینا به منظور دستیابی به بهره‌برداری حداکثر از منابع انرژی یک اکونومایزر،  $W4$  اضافه می‌گردد. در این اکونومایزر، ترکیب مایع آب-آمونیاک خروجی از حائل  $F1$  انرژی خود را از  $P4$  به ترکیب مایع آب-آمونیاک آزاد می‌کند.

سپس ترکیبی که انرژی خود را از  $W4$  آزاد کرده است تجزیه شده و در  $RI$  با بخار ورودی از توربین  $Y1$  ترکیب/جذب می‌شود.

در چرخه‌ی یوهارا نسبت به چرخه‌ی کالینا، یک صفحه دنده<sup>۱</sup> به توربین  $Y1$  افزوده می‌شود. حائل  $F2$  ترکیب مایع آب-آمونیاک را به اکونومایزر انتقال می‌دهد که سپس با سیال ورودی از کندانسور  $W2$  ترکیب می‌شود.

### ۱۳-۲-۱-۴-۳ چرخه‌ی ترکیبی

چرخه‌ی ترکیبی  $OTEC$  یکی از مشتقات چرخه‌ی باز است. این چرخه ترکیبی از چرخه‌های بسته و باز است که هدف آن تولید الکتریسیته و آب تازه است. چرخه‌ی ترکیبی، بهترین جنبه‌های چرخه‌ی باز و بسته را باهم ترکیب می‌کند.



شکل ۱۳-۷ نمودار چرخه‌ی ترکیبی

تولید الکتریسیته و آب تازه به معنای پتانسیل بیشتر تأسیسات است.

<sup>۱</sup> Racking

در چرخه‌ی ترکیبی پانچال و بل<sup>۱</sup>، آب گرم دریا در تبخیرکننده فلش  $W3$  به صورت خلأ تبخیر می‌شود (همانند چرخه‌ی باز). هوای آب دریا از قبل با استفاده از سیستم حذف هوای  $A1$  و  $V2$  تخلیه می‌شود.

بنابراین، بخار تولیدی در  $W3$  (حدود ۰.۵٪ از ورودی آب گرم) از تبخیرکننده  $W1$  گذر کرده و انرژی خود را به سیال کاری منتقل می‌کند (حدود ۹۵٪ از بخار آب در  $W1$  چگالش می‌یابد). می‌توان بخار استفاده‌شده را با  $W5$  تقطیر کرد تا محصول چگالش را بازیابی کنیم. سیال مورد استفاده برای چگالش بخار آب می‌تواند آب سرد دریا یا آمونیاک باشد.

آمونیاک در  $W1$  گرما داده‌شده و تبخیر می‌شود و سپس همان‌طور که در بالا توصیف شد از چرخه‌ی رانکین پیروی می‌کند.

### ۱۳-۲-۲ اجزای عمده‌ی "سیستم انرژی"

اجزای عمده‌ی سیستم انرژی امکان انجام کارهای زیر را فراهم می‌کنند:

- انتقال انرژی گرمایی به سیال کاری (مبدل‌ها)؛

- پمپاژ آب گرم و سرد دریا (پمپ‌ها - گران‌ترین اجزا می‌باشند).

### ۱۳-۲-۲-۱ مبدل‌ها

مبدل‌های گرمایی  $OTEC$  برحسب نوع چرخه به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌گردند: مبدل‌های گرمایی با تماس مستقیم برای چرخه‌های باز و مبدل‌های سطحی برای چرخه‌های بسته.

### ۱۳-۲-۲-۱-۱ مبدل‌های با تماس مستقیم

به‌طور کلی این مبدل‌ها در کاربردهای  $OTEC$  محفظه‌های بزرگ خلأ در فشار مطلق تقریبی  $300\text{ mbar}$  می‌باشند.

برای کاربرد تبخیر، تغییر حالت سیال - خود آب گرم سطحی دریا - با افت ناگهانی فشار<sup>۲</sup> انجام می‌شود که باعث می‌شود تا سیال با گرمای خود به‌طور جزئی تبخیر شود.

عمل چگالش با آوردن مایع (همچنین آب دریا که از اعماق برداشت شده است) سردتر از بخار به محفظه در فشار خلأ انجام می‌شود. مسلماً فشار کندانسور کمتر از تبخیرکننده است. بخار ورودی از توربین در "تماس" با مایع دچار چگالش می‌شود.

<sup>1</sup> Panchal and Bell hybrid cycle

<sup>2</sup> Flash detente

## ۱۳-۲-۲-۱-۲ مبدل‌های سطحی

دسته‌ی مبدل‌های سطحی تمامی مبدل‌هایی را در برمی‌گیرد که در آن‌ها سیالات بدون اختلاط به یکدیگر گرما منتقل می‌کنند؛ بنابراین، دیواری حائل میان سیالات گرما را هدایت می‌کند. این دیوار معمولاً از فلز ساخته شده است اما موارد دیگری نیز موجود می‌باشند که از پلاستیک یا مواد کامپوزیتی ساخته شده‌اند.

برای کاربردهای *OTEC* ما می‌توانیم از میان دو دسته‌ی فرعی عمده این مبدل‌ها انتخاب کنیم: مبدل‌های پوسته و لوله و مبدل‌های صفحه‌ای.

## ۱۳-۲-۲-۱-۳ مبدل‌های پوسته و لوله

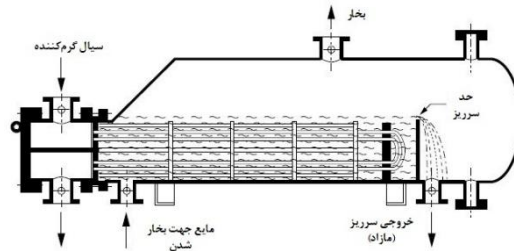
به‌طور متداول، برای مبدل‌های پوسته و لوله، آب درون لوله‌هایی به گردش درمی‌آید. این وسایل را می‌توان در موقعیتی افقی یا عمودی نصب کرد.

یک مبدل پوسته و لوله از اجزای مشخصی ساخته شده است که هیچ مشکلی در پیکربندی آن‌ها وجود ندارد و عبارتند از:

- پوسته، یک محفظه‌ی استوانه‌ای که توانایی تحمل فشار داخل وسیله را دارد؛
- پلینوم‌ها (جعبه‌های آب)، نواحی ورود، تخلیه و/یا توزیع سیال در داخل لوله‌ها؛
- لوله‌ها، در امتداد طول آن‌ها تبادل گرما صورت می‌گیرد؛
- ورقه‌های لوله، ورقه‌های فلزی نازک سوراخ شده که در آن لوله‌ها قرار می‌گیرند.
- همواره داخل کندانسور "پر" از بخار سیال کاری است.
- دو گزینه برای تبخیرکننده محتمل هست:

- سیل‌وار (*Flooded*): دسته‌ی لوله‌های داخل پوسته در سیال کاری غرق می‌شود. این کار در موقعیت افقی نسبت به موقعیت عمودی بهتر است، زیرا در کمترین نقطه‌ی دسته، فشار هیدرو استاتیک را محدود می‌کند. با این حال گزینه سیل‌وار موردی است که شامل بیشترین سیال کاری می‌شود؛

- جریان رو به پایین (*Falling film*): در هر دو حالت افقی و عمودی سیال کاری بسیار کم هست. روش توزیع سیال کاری برای موقعیت مبدل اتخاذ شده است. اصول کلی آن مبتنی بر جریان رو به پایین سیال است که در امتداد دیواره‌ی مبدل تبخیر می‌شود.



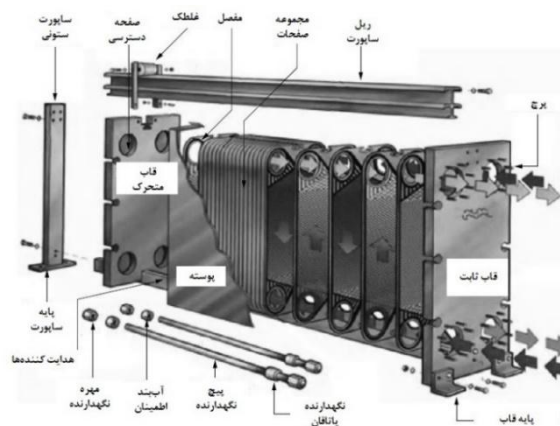
شکل ۱۳-۸ تصویر تبخیرکننده لوله‌ای از نوع کتری (منبع: [www.azprocede.fr](http://www.azprocede.fr))

### ۱۳-۲-۲-۱۳-۴ مبدل های صفحه‌ای

طرح فناوری‌های صفحه‌ای معمولاً نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله فشردتر است و به مقدار کمتری از سیال نیاز است. می‌توان آن‌ها را به دو دسته‌ی مقابل تقسیم نمود: مبدل‌های صفحه-ای با سطح اولیه و مبدل‌های صفحه‌ای با سطح ثانویه.

#### مبدل‌های صفحه‌ای با سطح اولیه (از نوع آلفا لاول)

این مبدل‌ها از صفحات برجسته با اشکال مختلف ساخته شده‌اند (معمولاً به شکل  $V$ ، این زاویه در هر صفحه متفاوت است). می‌توان این صفحات را با شبه جوش (یکی از هر دو کانال عبور) یا با جوش کامل به هم متصل کرد.



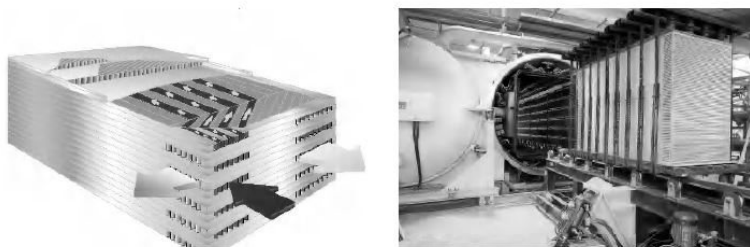
شکل ۱۳-۹ تصویری از اصول کلی مبدل صفحه‌ای و مفاصل آن (منبع: <http://local.alfalaval.com/fr-fr>)

به‌طور کلی تلفات فشار نسبتاً زیاد هست. به‌علاوه، تمیز کردن وسایل با استفاده از روش‌های مکانیکی سخت هست.



### مبدل‌های صفحه‌ای با سطح ثانویه (نوع *Fives Cryo*)

مسیر عبور سیالات را می‌توان در صفحات ایجاد کرد یا با استفاده از امواج برجسته میان دو صفحه‌ی تخت تولید کرد. ما به دلیل وجود "فین‌های" واصل میان صفحات برای هر مسیر عبور سیال، از مبدل‌های سطح ثانویه صحبت می‌کنیم.



شکل ۱۳-۱۰ تصویری از قواعد کلی مبدل‌های صفحه‌ای با سطح ثانویه و یک مبدل قبل از اینکه در کوره جوش بخورد (تصویر و عکس توسط *Fives Cryo* فراهم شده است)

مبدل‌های صفحه‌ای ثانویه به روشی دائمی به هم متصل می‌شوند (لحیم‌کاری، جوش نفوذی و غیره) که این امر باعث می‌گردد همانند مبدل‌های با سطح اولیه با مشکلات یکسانی مواجه شوند. با این حال ممکن است افت فشار همانند گزینه لوله‌ای به‌اندازه‌ی کافی کم باشد.

#### ۱۳-۲-۲-۱-۵ پمپ‌ها

پمپ‌های آب مورد نیاز برای به حرکت درآوردن آب گرم و سرد دریا از اجزای اصلی سیستم می‌باشند، زیرا دبی جریان پمپاژ بسیار بالا است. به‌منظور تولید  $10\text{ Mwe}$  خالص به حدود  $100000\text{ m}^3/\text{h}$  آب گرم و سرد نیاز است. برای هر پمپ دبی جریان  $25000\text{ m}^3/\text{h}$  منطقی است اما برحسب معماری طرح ممکن است به دبی جریان بیشتری نیاز باشد.

به‌منظور انجام این کار در ایستگاه‌های پمپاژ از پمپ‌های محور افقی یا محور عمودی استفاده می‌شود. پمپ‌های افقی دارای مزیت نگهداری آسان از پاروها، مسیر شفت و پروانه با جداسازی محفظه‌ی بالای پمپ مطابق شکل ۱۳-۱۱ می‌باشند.

پمپ‌های عمودی دارای مزیت کرنش‌های کمتر در پاروها نسبت به پمپ‌های افقی می‌باشند.



شکل ۱۱-۱۳ پمپ افقی با دبی جریان زیاد (منبع: Flowserve)

این پمپ‌های عمودی همچنین در ورژن به اصطلاح جداشدنی موجود می‌باشند که باعث می‌شود نگهداری راحت‌تر شود تا فعالیت‌هایی در قطعات سایشی انجام شود و همان‌طور که در شکل ۱۳-۱۳ تشریح شده است تنها محفظه‌ی شفت و قطعه‌ی شامل پروانه از بدنه‌ی پمپ خارج می‌شوند.



شکل ۱۲-۱۳ سطح مقطع پمپ آب دریا (منبع: Flowserve)



شکل ۱۳-۱۳ هیدرولیک پمپ (منبع: Flowserve)



شکل ۱۴-۱۳ روتور شعاعی توربین (منبع: Cryostar) (به منظور مشاهده نسخه رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www.iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

### ۱۳-۲-۱-۶ توربو آلترناتورها

فناوری به کاررفته در توربین بسیار متفاوت از چرخه‌ی باز و بسته است، زیرا دبی جریان (به لحاظ حجمی) بخار آب که باید در چرخه‌ی باز به گردش درآید، بسیار زیاد است. برای تعریف توربین‌های مورد استفاده در چرخه‌های باز، تصویری در شکل ۱۳-۳ نشان داده شده است.

توربین‌های مورد استفاده در چرخه‌های بسته *OTEC* به صورت شعاعی می‌باشند (شکل ۱۳-۱۴ را ببینید)، یعنی جریان به صورت شعاعی به توربین نزدیک می‌شود و در امتداد محور شفت توربین به جریان درمی‌آید.

به منظور بهینه‌سازی بازده تأسیسات، پاروهای در جهات متغیر بر روی استاتور قرار داده شده‌اند تا جریان ورودی به بخار آمونیاک را راهنمایی کنند.

یکی از نکات اساسی، نگهداری از آببندی توربین به منظور اجتناب از نشت بالقوه سیال کاری در آن نواحی است. این آببندی را می‌توان با استفاده از یک واشر مکانیکی دوتایی یا با سیستم آببندی مانع همچون نیتروژن تضمین کرد. راه‌حل استفاده از نیتروژن به‌خوبی آببندی را تضمین می‌کند، درحالی‌که باعث کاهش تزریق نیتروژن بیشتر به مدار حامل سیال کاری می‌شود، زیرا نیتروژن مانع فرآیند چگالش می‌گردد. با این حال، وسایلی وجود دارد که می‌توانند این سیال مانع را بازیابی کنند و (دوباره) سیال کاری را به چرخه وارد کنند.

با فرض اینکه هدف یک چرخه‌ی OTEC تولید برق است، از یک ژنراتور سنکرون برای تبدیل انرژی مکانیکی موجود در انتهای شفت توربین به انرژی برق استفاده می‌شود.

در شکل ۱۳-۱۵ آلترناتور همگام ۴ قطبی نشان داده شده است که یک شبکه‌ی سه فازی  $6.6kV$ ،  $50 Hz$  را تغذیه می‌کند.



شکل ۱۳-۱۵ آلترناتور استاندارد، جفت‌های دوقطبی (منبع:

<http://www.hyundaiideal.com/products/generators.php>

برای وضعیت استاندارد یک ژنراتور سنکرون متصل به شبکه‌ی  $AC$  سه فازی به نظارت پیوسته بر پارامترهای اساسی تنظیم شده توسط استخراج‌کننده نیاز است تا پایداری شبکه تضمین گردد:

- سطح ولتاژ: پیش‌بینی می‌شود که ژنراتور انتخابی بتواند سطحی از ولتاژ  $HT AC$  را تولید کند که توسط رگلاتور خودکار ولتاژ ( $AVR$ ) که در جریان تحریک (در روتور) کار می‌کند در رژیم ثابت با  $\pm 1\%$  تنظیم شود. این  $AVR$  همچنین قبل از اتصال تعادل را برقرار می‌کند و



ضریب توان را پس از اتصال به شبکه تنظیم می‌کند و همچنین توان راکتیو را میان  $N$  آلترناتور (اغلب بر روی سکو) توزیع می‌کند.

- سطح فرکانس: در اروپا  $50\text{ Hz}$ ، در ایالات متحده  $60\text{ Hz}$ . در کارکرد ژنراتور، فرکانس جریان تولیدی توسط ماشین سنکرون توسط رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$f = \frac{p \cdot N}{60}$$

که در آن  $f$  فرکانس الکتریکی به واحد  $\text{Hz}$ ،  $N$  سرعت چرخش به  $\text{rpm}$  و  $p$  تعداد جفت‌های قطبی است.

- یک ماشین سنکرون با دو جفت قطبی که در فرکانس  $50\text{ Hz}$  به شبکه‌ی  $Ac$  متصل شده است، سرعت چرخش  $1500\text{ rpm}$  خواهد داشت (سرعت سنکرون) که از نظر سرعت زیاد آن مستلزم نصب سرعت‌گیری در خروجی توربین (حدود  $5000\text{ rpm}$ - $6000$ ) است.

- شدت اتصال کوتاه ( $SCI$ )، بیشترین شدتی است که توسط شبکه تجربه شده و هنگامی که خرابی سه‌فاز با اتصال کوتاه جامد در خشکی اتفاق بیفتد (سه فازها به‌طور هم‌زمان به خشکی بازگردانده می‌شوند) توسط آلترناتور تولید می‌گردد.

هرکدام از اجزای الکتریکی متصل به ایستگاه فرعی توزیع آلترناتور طوری طراحی گشته‌اند که این مقدار بیشینه را تحمل کنند. به‌طور کلی، ترجیح داده می‌شود که  $SCI$  بیشترین مقدار را داشته باشد، زیرا:

- اگر شبکه دچار اتصال کوتاه شود، افت ولتاژ را محدود می‌کند؛

- اغتشاشات الکتریکی ساطع شده از سمت صنایع بزرگ را در شبکه‌ی برق کاهش می‌دهد.

### ۱۳-۲-۳ سیالات

چرخه‌ی باز به‌صورت مستقیم با آب دریا به‌عنوان سیال کاری عمل می‌کند.

باین‌حال، چرخه‌ی بسته به سیال کاری غیر از آب دریا نیاز دارد و انتخاب آن برای موفقیت پروژه حیاتی هست. - اما سؤالات بسیاری مطرح می‌گردد. آیا این سیال می‌تواند با هزینه‌ای معقول به تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس به الکتریسیته کمک کند؟ آیا این سیال برای مردم، محیط‌زیست یا تأسیسات خطرناک است؟ آیا می‌توان به‌راحتی به این سیال دسترسی پیدا کرد؟

معیارهای انتخاب سیال شامل موارد ذیل می‌شود:

- خواص ترمودینامیکی، اندازه‌ی مبدل‌های گرمایی و توربین آن مستقیماً به پارامترهای مختلف سیال بستگی دارد:
- ضریب هدایت حرارتی آن،
- چگالی آن در حالت‌های مایع و گازی - دبی حجمی باید تا جای ممکن کوچک باشد. این مقدار بر فشردگی سیستم انرژی تأثیر دارد،
- ویسکوزیته‌ی دینامیکی آن که باید کم باشد،
- ظرفیت حرارتی آن به ازای واحد جرم،
- کشش سطحی آن، در جهت جدایش مایع و گاز،
- آنتالپی تبخیر که باید زیاد باشد - تفاوت آنتالپی ورودی و خروجی توربین باید تا جای ممکن زیاد باشد،
- فشار ورودی و خروجی توربین (ترجیحاً) باید مثبت باشد تا ریسک آلودگی اتمسفری سیال کاهش پیدا کند؛
- آیا برای انسان‌ها خطرناک است (آیا قابل انفجار، سمی و غیره است؟)؛
- گستره‌ی اثر آن بر محیط‌زیست، شامل اثر بالقوه‌ی گلخانه‌ای، پتانسیل آسیب به لایه‌ی اوزون و همچنین سمی بودن آن برای جانداران آبی (آیا استفاده‌ی آن قانونی است یا در طول زمان محدود شده است؟ در معرض چه قوانینی قرار دارد؟)
- معیارهای مالی خود آن: هزینه‌ی دستیابی و مالکیت سیستم توسعه داده‌شده برای سیال مفروض چقدر خواهد بود؟ آیا پاسخ‌های صنعتی معتبر وجود دارد؟
- معیارهای انتخاب یک مبرد زیاد می‌باشند و برآورد همه‌ی آن‌ها آسان نیست.

### ۱۳-۲-۳-۱ خانوادگی سیالات

- سیالات مورد بحث، آن‌هایی می‌باشند که در صنعت تبرید مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- می‌توان مبردهایی را که تحت پروتکل مونترال معتبر می‌باشند به سه دسته‌ی اصلی زیر تقسیم نمود:
- مبردهای غیرآلی: آمونیاک، دی‌اکسید کربن، آب؛

- هیدروکربن‌ها؛

- هالوکربن‌ها.

۱۳-۲-۳-۱ هیدروفلوروکربن‌ها (HFC ها) و ترکیبات آن‌ها [ED 969]؛

سه نوع از آن‌ها وجود دارد:

- CFC ها (کلرو فلوروکربن‌ها)، باید به یاد داشته باشیم که آن‌ها به دلیل خطرناک بودن برای لایه‌ی اوزون ممنوع می‌باشند (پروتکل مونترال)؛

- HCF ها (هیدرو کلرو فلوروکربن‌ها) اخیراً به آن‌ها مجوز داشته شده است اما قرار است تا سال ۲۰۱۵ متوقف شوند زیرا آن‌ها نیز برای لایه‌ی اوزون مضر می‌باشند؛

- HFC ها (هیدرو فلوروکربن‌ها) سومین نسل از هیدروکربن‌ها هستند که استفاده از آن‌ها ممنوع نیست. از آن‌ها در صنایع پیشرفته استفاده می‌شود و برای لایه‌ی اوزون ضرری ندارند. پروژه‌ای تنظیمی برای HFC های مشخصی در حال بررسی هست.

بنابراین، در اینجا ما باید تنها به HFC ها بپردازیم که می‌توان آن‌ها را به دو دسته‌ی عمده تقسیم نمود: HFC های خالص و ترکیبات HFC.

می‌توان خود HFC های خالص را برحسب تعداد مولکول‌های کربن پیوند خورده با پایه‌ی فلوریدی به دو گروه مقابل تقسیم نمود: اتان یا متان.

ترکیبات HFC را نیز می‌توان به دو گروه عمده تقسیم نمود:

- ترکیبات آزئوتروپیک (آزئوتروپ‌ها) که بدون تغییر دما تغییر حالت می‌دهند؛

- و ترکیبات زئوتروپیک (زئوتروپیک‌ها) که با تغییر دما تغییر حالت می‌دهند.

۱۳-۲-۳-۲ هیدروکربن‌ها

این‌ها ترکیباتی هستند که شامل تنها هیدروژن و کربن هستند - ما می‌توانیم از میان آن‌ها به پروپان، بوتان، سیکلو پروپان و پروپیلن اشاره کنیم. آن‌ها به‌شدت قابل اشتعال می‌باشند و در نتیجه اغلب در تأسیسات کوچک و با مقدار کم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

آن‌ها برای کاربردهایی در تأسیسات OTEC با توان بالا که از مقدار زیادی سیال کاری استفاده می‌کنند، توصیه نمی‌شوند.

## ۱۳-۲-۳-۱ ترکیبات غیرآلی

آن ها آب، آمونیاک و دی اکسید کربن می باشند:

- از آمونیاک به مدت یک قرن به طور گسترده استفاده شده است. با این حال، به شدت سمی بوده و امروزه قوانین سخت گیرانه ای در رابطه با این سیال به ویژه در فرانسه وضع شده است؛

- در زمان هایی (تا حدود ۱۹۳۰) از دی اکسید کربن به عنوان مبرد برای موارد بسیاری به کار گرفته شده است. این ماده شامل فشار عملیاتی زیاد می شود که با طراحی مبدل های بزرگ سازگاری ندارد.

۱۳-۲-۳-۲ اشتعال پذیری و سمی بودن - در رابطه با قوانین *Seveso*

برای اینکه سیالات جدید وارد بازار شوند، ابتدا باید پژوهش هایی در زمینه ی اشتعال پذیری و سمی بودن آن ها انجام شود.

دسته بندی سیالات مبرد مطابق معیارهای ایمنی و امنیتی توسط تعدادی از انجمن های استاندارد سازی، شامل انجمن استاندارد سازی فرانسه<sup>۱</sup> (*AFNOR*) انجام می شود.

## ۱۳-۲-۳-۱ دسته بندی مبتنی بر قابلیت اشتعال

امروزه تقریباً ۴۰٪ از سیالات مبرد دسته بندی شده به شدت قابل اشتعال می باشند که باید قبل از اینکه آن ها را انبار کرد و یا در مقیاس صنعتی به کاربرد، این مورد را در نظر گرفت.

درک مشکلات مربوط به قابلیت اشتعال سیال شامل درک کامل علامت هایی همچون حد پایین اشتعال (انفجار)، دمای اشتعال خود به خودی یا نقطه ی اشتعال می شود که به صورت مستقیم به آن ها مربوط هستند.

حد پایین اشتعال (*LFL*) و حد پایین انفجار (*LEL*) گاز یا بخار در هوا، کمترین غلظت بر واحد حجم در ترکیب است که بیشتر از آن ممکن است مشتعل شود.

در رابطه با حد پایین اشتعال، دمای پایین اشتعال (*LFT*) وجود دارد که برای آن فشار بخار اشباع باعث می شود پس از مخلوط کردن گاز با هوا، *LFL* حاصل شود.

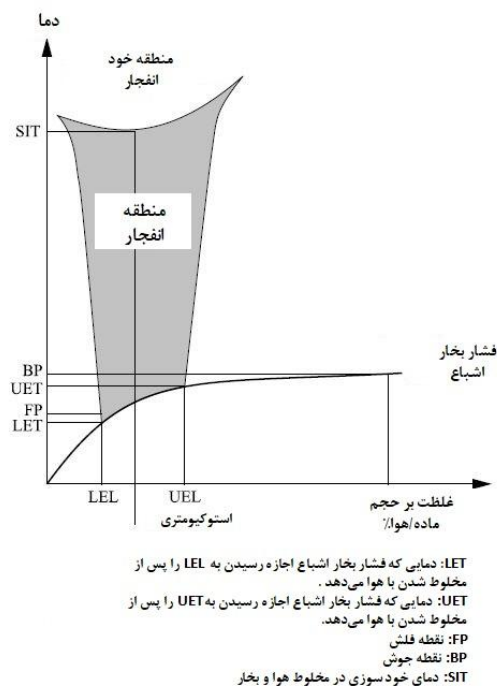
حد بالای اشتعال (*UFL*) یا حد بالای انفجار (*UEL*) گاز یا بخار "بیشترین غلظت بر واحد حجم ترکیب است که کمتر از آن ممکن است مشتعل شود" و در رابطه با آن دمای بالای

<sup>۱</sup>française de normalisation

اشتعال ( $UFT$ ) وجود دارد. دمای خود به خودی اشتعال گاز یا بخار، کمترین دمای سطح گرم هست که در آن (در شرایط ویژه) گاز یا بخار شعله‌ور می‌شود.

نقطه‌ی اشتعال، کمترین دمایی است که در آن ترکیب بخارها و هوا در شرایط عادی فشار قابل اشتعال می‌باشند.

بنابراین از تعریف علامت‌های اشاره‌شده در بالا می‌توان یک بازه‌ی انفجاری رسم کرد.



شکل ۱۳-۱۶ بازه‌ی انفجاری (منبع: INRS، ترکیب‌های انفجاری گازی و مایع)

مرجع  $[NF E 34-430]$  نشان می‌دهد که طبقه‌بندی سیالات مطابق قابلیت اشتعال آن‌ها به حد پایین اشتعال در دما و فشار محیط مربوط می‌شود. ما می‌توانیم این سه گروه سیال را از هم مجزا کنیم:

- گروه ۱: سیالات مبرد که با هر غلظتی در هوا، در حالت بخار قابل اشتعال نیستند؛
- گروه ۲: سیالات مبردی که حد پایین اشتعال آن‌ها هنگامی که با هوا ترکیب شوند، بیشتر یا برابر  $۰.۳۵\%$  حجم بر واحد حجم (تبدیل به جرم بر حجم،  $۰.۱۰ kg/m^3$ ) است.

- گروه ۳: سیالات مبردی که حد پایین اشتعال آنها هنگام ترکیب شدن با هوا کمتر از ۳.۵٪ حجم بر واحد حجم (یا  $0.1 \text{ kg/m}^3$ ) است.

### ۱۳-۲-۲-۲ دسته بندی مطابق سمی بودن (سمیت)

به منظور جلوگیری از آلودگی و بیماری های مربوط به کار به سبب برخورد نامناسب با محصولات شیمیایی در محیط کار، عبارت های هشدار آمیز بر روی برچسب های ایمنی سیالات مورد استفاده نمایش داده می شوند.

"عبارت های مربوط به ریسک" ("عبارت های R") نوشته هایی هستند که خطرات ذاتی در استفاده از این سیالات، لمس آنها، خوردن آنها، استنشاق آنها یا آزاد کردن آنها به محیط زیست را نشان می دهند.

مثال هایی از آنها به صورت زیر می باشند:

- R23: استنشاق آن سمی است؛

- R34: باعث سوختگی می شود؛

- R12: به شدت قابل اشتعال؛

- R50: به شدت برای جانداران آبی سمی است.

در حالی که R23 و R34 اغلب در ظرف های حاوی اکثر سیالات مبرد یافت می شوند، R12 و R50 مستلزم شرایط سخت جابجایی و انبار کردن می باشند.

جابجایی ترکیبات شیمیایی نیازمند تعریف سطوحی از قرارگیری در هوا دارد که نباید از غلظت اتمسفری پیشی بگیرد.

استانداردهای [NF EN 378-1] و [NF E 35-430] مبتنی بر علامت مقدار حدی (LV) می باشند که بیانگر غلظت ترکیبی در هوا است که یک فرد می تواند بدون خطر تغییر سلامت خود در طول زمان مشخصی تنفس کند، اگرچه تغییرات فیزیکی بازگشت پذیر گاهی اوقات نادیده گرفته می شوند (ناراحتی های چشمی، پوستی و غیره).

مقدار حدی میانگین اکسپوزر (در معرض هوا قرار گرفتن) (AVE) به منظور حفاظت از کارکنان در مقابل اثرات نهایی، برآورد شده در طول نوبت کاری ۸ ساعته در نظر گرفته شده اند.

این علامت مقدار میانگین اکسیژر ( $AVE$ ) مطابق سمیت سیالات مبرد در مرکز دسته‌بندی  $AFNOR$  آن‌ها قرار دارد:

سیالات مبرد باید برحسب سمیت آن‌ها برای یکی از دو گروه،  $A$  یا  $B$  انتخاب شوند:

- گروه  $A$ : سیالات مبردی که غلظت میانگین آن‌ها بر پایه‌ی ۸ ساعت در روز و در طول ۴۰ ساعت کار هفتگی در طول زمان هیچ اثر مخربی بر بیشتر کارکنان در معرض آن‌ها ندارد و مقدار آن برابر یا بیشتر از  $400 \text{ ml/m}^3$  ( $\text{ppm V/V}$ ) است؛

- گروه  $B$ : سیالات مبردی که غلظت میانگین آن‌ها بر اساس ۸ ساعت در روز و در طول ۴۰ ساعت کار هفتگی هیچ اثری بر بیشتر کارکنان در معرض آن‌ها ندارد و مقدار آن کمتر از  $400 \text{ ml/m}^3$  ( $\text{ppm V/V}$ ) است.

	میزان سمومیت کم	میزان سمومیت بالا	
آتش‌زا	A3	B3	پایینترین حد آتش‌زایی $\geq 19,000 \text{ kJ/kg}$ یا $0.10 \text{ kg/m}^3$ میزان دمای اشتعال
کمی آتش‌زا	A2	B2	پایینترین حد آتش‌زایی $> 19,000 \text{ kJ/kg}$ و میزان دمای اشتعال $> 19,000 \text{ kJ/kg}$
غیر آتش‌زا	A1	B1	عدم وجود پایینترین حد آتش‌زایی بر اساس تست اصلاح شده $ASTM E681-85$
	مسمومیت زایه شمار می‌رود $> 400 \text{ ppm}$ (طبق اطلاعات LEA-TWA و سایر اطلاعات مشابه)	مسمومیت زایه شمار می‌رود $> 400 \text{ ppm}$ (طبق اطلاعات LEA-TWA و سایر اطلاعات مشابه)	

جدول ۱۳-۱ طبقه‌بندی  $AFNOR$  سیالات مبرد برحسب سمیت و قابلیت اشتعال آن‌ها

می توانیم خودمان را از وضعیت  $AI$  برای سیال غیرقابل اشتعال با سمی بودن کم به وضعیت  $B3$  برای سیال با سمی بودن بالا و قابلیت اشتعال بالا تطبیق دهیم.

### ۱۳-۲-۳-۳ قوانین ICPE

یک موسسه ی طبقه بندی شده برای حفاظت محیطی ( $ICPE$ ، فرانسه) تأسیساتی است که باعث تعرض شده و تعاریف علامت های منتشر شده در "ژورنال رسمی"<sup>۱</sup> را برحسب محصولات و فرآیندهای استفاده شده فراهم می کند.

برحسب مقدار پارامتر مشخصه، می توان موسسه را به صورت زیر دسته بندی نمود:

- موسسه ی در معرض اظهارنامه ( $D$ ):

- موسسه تحت مجوز ( $A$ );

- موسسه با مجوز کاربرد عمومی ( $AS$ ).

تأیید عادی	تأیید سوسو با آستانه کم	تأیید عمومی	تأسیسات
مدارک جهت فرآیند			
			درخواست مجوز
$X$	$X$	$X$	ارزیابی اثر
$X$	$X$	$X$	ارزیابی ریسک
$X$	$X$	$X$	توجهات ایمنی و سلامت
$X$	$X$	$X$	شیوه فرارگیری المان های خطرناک در میدان های حساس
		$X$	پرونده معیارهای جلوگیری از اتفاقات خطرناک

<sup>۱</sup>Journal Officiel



	$X$	$X$	$X$	فهرست دوره‌ای از مواد خطرناک
	$X$	$X$		بروزرسانی ۵ سال یکبار ارزیابی ریسک
مدیریت ایمنی				
	$X$	$X$		سیاست‌های اصلی جلوگیری از سوانح
	$X$			مدیریت سیستم ایمنی
	$X$	$X$		طرح ریزی فرآیندهای داخلی
	$X$			طرح‌های مداخله خصوصی
متون کاربردی				
	$X$	$X$	$X$	حکم‌های ۱۶ جولای ۱۹۹۷
محدودیت‌های مالی				
	۶	۳	۳	TGAP (ضریب مالیات آلودگی)
	$X$			سپرده‌های مالی

جدول ۱۳-۲ پرونده‌های مربوط به شیوهی طبقه‌بندی موسسه‌ای

مقامات مسئول صدور مجوز طبقه‌بندی و انتقال معمولاً "بخشدار"<sup>۱</sup> محلی می‌باشند که در آن قرار است تأسیسات ساخته شود و مبنای تصمیمات خود را بر پایه‌ی بازرسی‌های انجام‌شده توسط مقامات محیط‌زیست آن مکان قرار می‌دهد (DRIREها، در فرانسه)

<sup>۱</sup>préfet

برای مثال، اگر سیال آزمایشی پژوهش انتخابی آمونیاک باشد، موسسه‌ی آن تحت بخش ۱۱۳۶ از فهرست علامت‌های مؤسسات طبقه‌بندی شده قرار می‌گیرد که "استفاده یا ذخیره‌ی آمونیاک" عنوان می‌شود.

با استفاده‌ی بیشتر از ۲۰۰ تن از آمونیاک، موسسه تحت مجوز کاربرد عمومی قرار می‌گیرد. آستانه‌های مختلف مجوز منجر به مجوز کاربرد عمومی شامل دو عنصر بالا می‌شود (مثال برای آمونیاک مفروض برای آمونیاک):

مابین ۱/۵ تن و ۵۰ تن، موسسه تحت مجوز ساده و مابین ۵۰ تن و ۲۰۰ تن تحت مجوز آستانه‌ی *Seveso* قرار می‌گیرد.

#### ۱۳-۲-۳-۱-۳ درباره‌ی جدول ۱۳-۲

علامت *Xs* بیانگر اسناد مورد نیازی هست که باید برای هر نوع روش مربوط به مقدار سیال تولید شوند. علامت *TGAP* مخفف مالیات عمومی بر فعالیت‌های آلوده‌سازی<sup>۱</sup> است.

جزئیاتی درباره‌ی نکات خاص:

(۱) پژوهش اثر زیست‌محیطی شامل موارد زیر می‌شود:

- تحلیل حالت اولیه‌ی سایت،
  - اثرات مستقیم و غیرمستقیم، دائم و غیر دائم شرکت بر محیط (آب، هوا، چشم‌انداز، جانوران، گیاهان و غیره)،
  - معیارهای مفروض برای محدود کردن یا جلوگیری از اغتشاشات و همچنین برآورد هزینه‌های وارده،
  - شرایط ترمیم سایت پس از بهره‌برداری،
  - تحلیل روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی اثرات محیطی شرکت.
- (۲) ارزیابی ریسک که توسط گروه استخراج‌کننده انجام می‌شود و هدف آن موارد ذیل است:
- تحلیل خطرات صنعتی در محیط‌زیست،
  - نشان دادن مدیریت این خطرات.

<sup>۱</sup> *taxe générale sur les activités polluantes*

۳) پرسش مشترک عمومی و مدیریت احداث. هدف از پرسش عمومی هماهنگ کردن ساخت‌وساز آتی در حوالی سایت با خطرات وارده است و در آن احتمال حوادث عمده نیز در نظر گرفته می‌شود. ساخت‌وساز در اطراف سایت‌های صنعتی باید بر اساس وقوع خطرات بالقوه سازمان‌دهی شود. در برنامه‌های محلی توسعه باید نواحی در معرض خطر (که توسط ارزیابی خطر مشخص گشته‌اند) نیز در نظر گرفته شوند.

۴) سازمان‌دهی عملیات نجات از قبل. صنعت‌گران باید وسایلی را فراهم کنند که اگر حادثه‌ای قرار است رخ دهد آن‌ها را برای این منظور به کار بگیرند. برنامه‌ی نجات که توسط صنعت‌گران طرح‌ریزی شده است با برنامه‌ی مقام محلی (بخشدار) تکمیل می‌شود، بدین معنا که اگر آسیب وارده فراتر از مرزهای سایت باشد (نقشه‌ی فعالیت خصوصی) می‌توان منابع شهری نجات را برای تقویت وسایل سازمان‌دهی کرد. این برنامه‌ها باید به صورت منظم مورد آزمایش قرار گیرند تا گروه‌های عملیاتی آموزش داده شوند و تضمین گردد که معیارهای از پیش تعیین‌شده با واقعیت بحران تطابق دارند.

۵) اطلاعات بازدارنده برای مردم. باید به مردم ساکن در ساحل توسط بهره‌بردار درباره‌ی خطرات ناشی از فعالیت و فرآیندهای ایمنی اطلاع داده شود تا در صورت وقوع حادثه در سایت از آن‌ها پیروی کنند. این اطلاعات دست‌کم هر ۵ سال باید دوباره فراهم شوند.

۶) تقویت سیستم نظارت. *DRIRE* باید دست‌کم سالی یک‌بار سایت‌های آستانه‌ی *Seveso* را بازرسی کند. توجه کنید که اگر سیال کاری وسایل *OTEC* در فهرست علامت‌های موسسه‌های طبقه‌بندی‌شده در حوزه‌ی مجوز یا مجوز کاربرد عمومی قرار گیرد، تحت مالیات عمومی آلودگی (*TGAP*) قرار می‌گیرد که برای هر موسسه‌ی آلوده‌کننده‌ی تحت مجوز اعمال می‌شود. مثال‌هایی از کاربرد بخشنامه‌ی *Seveso 96/82/EC* درباره‌ی کنترل خطرات حادثه‌آفرین عمده شامل مواد خطرناک در سیالات مبرد خاص:

- بخش ۱۴-۱۲: گاز قابل اشتعال مایع‌شده (ذخیره در تانکرهای تولیدی) به‌استثنای آن‌هایی که به‌طور صریح به بخش‌های دیگر فهرست علامت‌های موسسه‌های طبقه‌بندی‌شده مربوط می‌شوند. تحت این بخش، یک موسسه که با سیال مبرد از نوع *R407c*، *R404a*، *R410a* و *R413a* کار می‌کند تمامی آن‌ها برای دسته‌ی *AS* در آستانه‌ی ۲۰۰ تن گازهای قابل اشتعال مایع‌شده می‌باشند. مبردهای دیگر همچون *R125*، *R134a* و *R744* (دی‌اکسید کربن) که در معرض دسته‌بندی *AS* قرار ندارند ممکن است همان‌طور که در بخش زیر تشریح شده است، در معرض دسته‌بندی *A* (مجوز) قرار گیرند.

- بخش ۲۹۲۰: عمل تبرید و تراکم (نصب) در فشار مؤثر بیشتر از  $10^5 Pa$ . در ورای توان جذبی  $300 kW$  برای سیالات قابل اشتعال یا سمی، دسته بندی از نوع A هست. در موارد دیگر، آستانه در  $500 kW$  قرار دارد (مورد  $R125$  و  $R134a$ ).

در جدول ۱۳-۳ محصولات به صورت خلاصه آورده شده اند که احتمالاً به لحاظ قانونی برای OTEC مورد استفاده قرار گیرند.

نوع	سیال	قسمت دسته بندی شده مورد بررسی
غیرارگانیک	آمونیا	۱۱۳۶، استفاده از آمونیا
	آب	-
	کربن دی اکسید	-
هیدروکربن ها	همه	۱۴۱۹، با استفاده از پروپیلن ها ۱۴۳۲ و ۱۴۳۳ با استفاده از مایعات اشتعال پذیر
هالوکربن ها	HFCs	۱۱۸۵ با استفاده از هالوکربن ها
سایر	آلیفاتیک آمین ها اتراکسیدها	۱۴۲۰ بر CE ها با استفاده از مواد با آمین های اشتعال پذیر
	الکل ها	

جدول ۱۳-۳ سیالاتی که احتمالاً در رابطه با قوانین زیاد قابل استفاده می باشند.

### ۱۳-۲-۳-۴ معیارهای محیطی

مشکلات مربوط به انتشار گازهای گلخانه ای و تخریبی فزاینده ی لایه ی اوزون باعث می شود تا قوانین تصویب شده توسط پروتکل های کیوتو و مونترال سخت تر شوند.

می توان از دو پارامتر زیر برای تعیین کمی اثرات محیطی استفاده کرد:

- پتانسیل گرمایش جهانی (GWP)؛

- پتانسیل کاهش اوزون (ODP).

۱۳-۲-۳-۴-۱ تعریف *GWP*

ضریب *GWP* یک ترکیب به ما اجازه می‌دهد تا نحوه‌ی کمک آن به اثر گلخانه‌ای را درک کنیم. این یک مقیاس نسبی است که توسط آن اثر سیال بر گرمایش جهانی در مقایسه با دی‌اکسید کربن (که *GWP* آن ۱ در نظر گرفته می‌شود) ارزیابی می‌شود.

ارزیابی اثر بالقوه‌ی سیال بر اثر گلخانه‌ای مبتنی بر عوامل زیر است:

- گستره‌ی جذب تشعشع فرورسرخ آن؛

- موقعیت طیفی ناحیه‌ی جذب آن (مربوط به طول موج)؛

- چه مدت در اتمسفر دوام می‌آورد.

بنابراین، *GWP* زیاد به سیالی نسبت داده می‌شود که دارای پیوند جذب فرورسرخ وسیعی دارد و مدت زیادی در اتمسفر باقی می‌ماند.

توجه کنید که این ارزیابی مبتنی بر فاصله‌ی زمانی ۲۰، ۱۰۰ یا ۵۰۰ سال و غیره است. این علامت زمانی امکان در نظرگیری تغییر غلظت گاز را در طول ۲۰، ۱۰۰ یا ۵۰۰ سال در اتمسفر فراهم می‌کند.

این فاصله‌ی ارزیابی باید برای هر سیالی که می‌خواهیم اثرات گلخانه‌ای آن‌ها را مقایسه کنیم، یکسان باشد و هر بار که به مقدار *GWP* اشاره شود باید مشخص گردد، در غیر این صورت کاملاً بی‌معنا می‌شود: در حقیقت، گازی که طول عمر آن در اتمسفر نسبتاً کوتاه است دارای *GWP*<sub>20</sub> زیاد و *GWP*<sub>100</sub> کم است.

مرجع [NF E 35-430] سیالاتی را مشخص می‌سازد که ضریب *GWP* بالایی دارند:

$$> R143aGWP_{100} = 4,400 \quad > R507cGWP_{100} = 3,800$$

$$> R404aGWP_{100} = 3,800 \quad > R125GWP_{100} = 3,200$$

هدف پروتکل کیوتو و نهادهایی همچون موسسه‌ی بین‌المللی تبرید (*IIR*) محدود کردن استفاده از سیالات با *GWP* بالا یا حذف کامل آن‌ها است (مثالی برای *HFC* ها با *GWP* زیاد: برنامه‌ی حذف تدریجی به‌طوری‌که در سال ۲۰۳۰ مقدار معادل  $CO_2$  بازار *HFC* تنها ۱۵٪ سال ۲۰۱۰ خواهد بود)؛ بنابراین، منطقی است که این سیالات را از چهارچوب کاری وسیله‌ی *OTEC* خودمان حذف کنیم.

## ۱۳-۲-۳-۲-۴-۲ تعریف ODP

همانند  $GWP$ ،  $ODP$  با سیال مرجع که  $ODP$  آن برابر ۱ است، مقایسه می‌گردد: تری کلرو فلورو متان ( $R11$  یا فریون-۱۱).

این ضریب با اندازه‌گیری نرخ تخریب اوزون  $Tf$  با جرم مشخصی از سیال و جرم یکسان  $R11$  ارزیابی می‌گردد:  $T_{R11}$ .

بنابراین  $ODP$  به‌عنوان نسبت  $Tf/T_{R11}$  تعریف می‌گردد.

توجه کنید که  $ODP$  یک ترکیب را می‌توان برحسب دسته‌ای که به آن تعلق دارد، تخمین زد. در حقیقت، سیالات هیدرو فلوروکربن‌ها دارای  $ODP$  مابین ۰ و ۰/۲ می‌باشند، زیرا در ترکیب آن‌ها هیدروژن حضور دارد که باعث می‌شود آن‌ها در تروپوسفر (حدود  $10\text{ km}$  بالای سطح دریا) واکنش دهند که زیر لایه‌ی اوزون واقع شده است. با مقایسه درمی‌یابیم که ترکیب‌های برم به دلیل واکنش قوی برم با لایه‌ی اوزون، دارای  $ODP$  مابین ۵ و ۱۵ می‌باشند. استاندارد  $[NF E 35-430]$  تمامی میردهایی را که تا به امروز مطالعه شده‌اند، گردآوری می‌کند.

## ۱۳-۲-۳-۲-۵ سازگاری با روان‌سازها و مصالح

در کنار جنبه‌های ایمنی جابجایی و عملکرد ترمودینامیکی سیال مبرد، بسیار ضروری است که خواص فیزیکی-شیمیایی آن‌ها نیز در نظر گرفته شود.

این خواص شامل تعاملاتی با مدار می‌شود که در آن جنبه‌های زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- سازگاری مبرد با مواد مختلف که از طریق موارد زیر متصل می‌گردد:

- شبکه‌ی لوله‌ها؛

- مبدل‌های گرمایی؛

- سیستم‌های نگهداری (تانکرها، سیستم‌های رفتاری ستونی<sup>۱</sup> و غیره)؛

- مشکلات مربوط به آب‌بندی و سهولت شناسایی: از نظر قیمت مبرد و ناسازگاری مربوط به آلودگی اتمسفری، بسیار مهم است که مدار تا جای ممکن در مقابل نشت به سمت خارج مقاوم باشد؛

<sup>1</sup> Plume treatment systems

- مشکلات ایمنی: احتیاط ویژه در وسایل ایمنی تأسیسات.

### ۱۳-۲-۳-۶ مطالعه‌ی موردی: آمونیاک

#### ۱۳-۲-۳-۶-۱ سازگاری مصالح

محدودیت اصلی مربوط به استفاده از آمونیاک در فرآیند صنعتی، ناسازگاری آن با مس است. با این حال، در حضور آمونیاک، فرآیندهای فرسایش و واکنش‌های دیگر شیمیایی کند می‌باشند (برای مثال، موتورهای الکتریکی به عایق‌بندی زیادی نیاز ندارند).

#### ۱۳-۲-۳-۶-۲ عدم نشت و سهولت شناسایی

یکی از مزایای عمده‌ی استفاده از گاز آمونیاک سهولت شناسایی آن است. کوچک‌ترین نشت آمونیاک بلافاصله ( $\delta ppm$ ) بسیار قبل از اینکه به آستانه‌ی آشکارسازهای آمونیاک برسد، قابل‌استشمام هست.

#### ۱۳-۲-۳-۶-۳ آرایش‌های ویژه‌ی وسایل ایمنی

خطر اصلی مربوط به استفاده از آمونیاک در محیط دریایی، از دست دادن سیال در دریا است. به دلیل اینکه آمونیاک به‌عنوان  $R50$  طبقه‌بندی شده است (برای جانداران آبی بسیار سمی است) بی‌شک ضروری است که سیستم‌های نگهداری مایع را در مورد نگهداری یا وضعیت‌های خاص آب‌بندی کرد.

### ۱۳-۳-۱ یکپارچه‌سازی نیروگاه‌های OTEC

#### ۱۳-۳-۱-۱ نیروگاه‌های ساحلی و فراساحلی

یک نیروگاه OTEC ساحلی یا فراساحلی باید طوری تعریف گردد که تمامی محدودیت‌ها و خطرات مربوط به سیستم‌های مختلف OTEC را در برگیرد.

#### ۱۳-۳-۱-۱-۱ ترکیب نیروگاه OTEC

یک نیروگاه OTEC از سیستم‌های زیر تشکیل شده است:

- سکوی شناور (OTEC فراساحلی) یا نیروگاهی واقع بر خشکی (OTEC ساحلی) شامل سیستم‌های زیر می‌شود:

- سیستم تولید برق (برای مثال چرخه‌ی ساده‌ی انرژی از نوع رانکین با مبدل‌های لوله‌ای)،

- ایستگاه توزیع برق،
- پست فرماندهی،
- ناحیه ی تخلیه،
- ناحیه ی سکونت (اتاق جلسه، ساختمان های نظافت)،
- تجهیزات نگهداری،
- وجود تأسیسات زیاد (ورودی، وزنه ی تعادل برای سیستم های فراساحل، علامت دهی، ارتباطات و غیره)؛
- سیستم توزیع انرژی: در مورد *OTEC* فراساحل برحسب توان نیروگاه یک یا چند کابل الکتریکی در زیر دریا وجود دارد که برق را از سکو به ایستگاه فرعی واقع بر خشکی انتقال می دهند؛
- در هر شرایط آب و هوایی یک سیستم مهاربندی وجود دارد که نیروگاه *OTEC* فراساحل را در عمق  $1500\text{ m}$  در جای خود نگه می دارد.
- سیستم پمپاژ و آب خروجی دریا.

### ۱۳-۱-۲ خطرات فنی در *OTEC*

- مهمترین خطرات فنی در *OTEC* به دو دسته تقسیم می گردند:
- سیستم پمپاژ آب دریا: تجربه نشان داده است که خطرات اصلی در سیستم های *OTEC* فراساحل به نکات زیر مربوط می شوند:
- ایجاد ارتباط میان لوله ی ورودی آب دریا و سکو: اکثر تأسیسات *OTEC* فراساحل به دلیل گسیختگی یا خرابی لوله ی آب سرد (*CWP*) از کار می افتند،
- اندازه ی *CWP*؛
- امروزه، مشکل فنی عمده در توسعه ی نیروگاه های *OTEC* بزرگ (تا  $100\text{ MW}$  در هر نیروگاه) لوله ی ورودی آب سرد دریا (در عمق) و پارامترهای مرتبط آن می باشند که عبارتند از قطر، ماده، طول و فرآیند تولید. نیاز تشخیص داده شده برای نیروگاه های *OTEC* بزرگ یک لوله ی منحصر هست که قطری متغیر مابین ۳ و  $30\text{ m}$  دارد (برحسب توان). برای این کار، مزیت



محدود مواد استاندارد همچون *HDPE* (پلی اتیلن با چگالی بالا) آشکارتر شده است؛ بنابراین، برای توسعه *OTEC* به شدت به یک جهش فنی نیاز است.

همچنین در نواحی مورد بحث احتمال خطرات گردبادها وجود دارد. نیروگاه‌های *OTEC* برای نواحی مابین مدارهای رأس السرطان و مدار رأس الجدی طرح‌ریزی می‌شوند. بیشتر این نواحی در معرض شرایط اقلیمی وخیم (گردبادهای استوایی قابل توجه) قرار دارند. در نتیجه هدف، ایجاد یک نیروگاه *OTEC* قادر به تحمل شرایط طوفانی است (امواج، باد، جریان و غیره).

### ۱۳-۳-۱-۳ بازیگران بخش *OTEC*

امروزه دو شرکت وجود دارد که تمایل به توسعه‌ی فعالیت خود در بخش *OTEC* دارند:

- بیشتر آن‌ها شرکت‌های کوچکی هستند که چند دهه قبل توسط "افراد دوراندیش" در مجموعه‌های پژوهشی دانشگاه‌ها شکل گرفتند و به دلیل نداشتن توانایی صنعتی، آن‌ها با مشکلات بسیاری در پیمایش مسیر از مفهوم نظری به ساخت فیزیکی مواجه هستند. از میان آن‌ها ما می‌توانیم به *SSP*، *OCEES*، *DSI*، *Xenesys* و غیره اشاره کنیم؛

- کنسرسیومی با مهارت‌های ضروری گسترده و منابع مالی کافی، همچون لاکهید مارتین که به‌طور برجسته قراردادهایی را برای توسعه‌ی انرژی ایالات متحده یا *DCNS* در فرانسه کسب کرده‌اند.

### ۱۳-۳-۱-۴ خلاصه‌ی فعالیت‌های *DCNS*

شرکت *DCNS* در اواخر ۲۰۰۸ با انجام پژوهشی با سرمایه‌گذاری خود در سایت مارتینیک با عنوان "*ETM* مارتینیک" (*ETM* مخفف انرژی حرارتی اقیانوس<sup>۱</sup>) وارد زمینه‌ی *OTEC* فراساحل شد. هدف از این پژوهش اثبات امکان‌پذیری ساخت نیروگاه *OTEC* با استفاده از قطعات عمدتاً تجاری موجود بود که در نهایت مزرعه‌ی برق  $120\text{ MW}$  از نیروگاه‌های *OTEC* فراساحل ساخته شود و ارزش افزوده‌ی *DCNS* در این زمینه تحلیل شود.

پیرو این پژوهش، چندین مطالعه‌ی پیش‌طراحی برای نیروگاه‌های *OTEC* فراساحل مابین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ در سایت‌های مختلف (مارتینیک، ریونیون، تاهیتی) برای گستره‌ی مختلفی از توان ( $2.5\text{ MW}_e$ ،  $10\text{ MW}_e$  و  $50\text{ MW}_e$ ) و چرخه‌های مختلف ترمودینامیکی انجام شد.

<sup>۱</sup> *Énergies Thermiques des Mers*

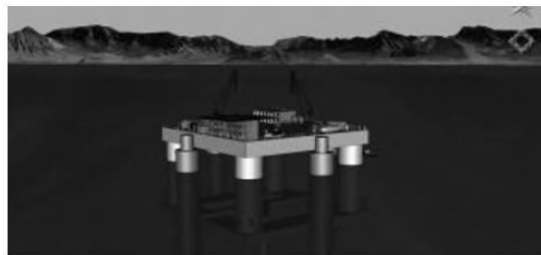
به‌عنوان بخشی از این پروژه‌ها، پژوهش‌هایی مقدماتی درباره‌ی سایت انجام شد تا شرایط اقلیمی در سایت مشخص گردد و در نتیجه درباره‌ی طراحی نیروگاه‌های فراساحل تصمیم‌گیری‌های اولیه انجام شود. در اوایل ۲۰۱۱، پژوهشی دقیق‌تر برای سایتی در چند کیلومتری ساحل بلوفانتین<sup>۱</sup> در ساحل کارائیب مارتینیک آغاز شد.

این پژوهش‌ها همچنین برای بهینه‌سازی قطعات مختلف سیستم‌های OTEC همچون سیستم تولید انرژی، سیستم توزیع برق، سیستم لوله‌کشی آب سرد دریا و غیره برای سیستم تولید انرژی، امروزه مجموعه‌ی آزمایشی روی خشکی به نام PAT ETM (نمونه‌ی اولیه روی خشکی)<sup>۲</sup> که در حال عملیات در سنت پیری و ریونیون است، آزمایش و بهینه‌سازی اجزای مختلف "سیستم انرژی" انجام شدند. این برنامه‌ی آزمایشی باید تا اواخر امسال تکمیل گردد (۲۰۱۱).

### ۱۳-۳-۱-۵ خلاصه‌ای از فعالیت‌های بازیگران دیگر

#### ۱۳-۳-۱-۵-۱ لاکهید مارتین

لاکهید مارتین از سال ۱۹۷۰ در زمینه‌ی OTEC در حال فعالیت بوده است. در حقیقت، این شرکت در ساخت نمونه‌ی اولیه‌ی Mini-OTEC در سال ۱۹۷۹ در خارج از هاوایی نقش داشته است. در سال ۲۰۰۸ میان دولت ایالات‌متحده، موسسه‌ی پژوهشی فناوری صنعتی (ITRI) در تایوان و لاکهید مارتین برای بررسی نیروگاه آزمایشی OTEC با توان خالص  $10\text{MW}_e$  تفاهم‌نامه‌ی همکاری منعقد گردید. این تفاهم‌نامه در اکتبر ۲۰۰۸ امضا شد و لاکهید مارتین همچنان در حال بررسی این نیروگاه آزمایشی  $10\text{MW}_e$  و نیروگاه بزرگ  $100\text{MW}_e$  OTEC است. نیروگاه آزمایشی OTEC در جزایر هاوایی و نیروگاه بزرگ OTEC در خارج از جزیره‌ی گوام (که در منطقه‌ی طوفان‌خیز قرار دارد) نصب خواهند شد.



شکل ۱۳-۱۷ پروژه‌ی OTEC لاکهید مارتین (منبع: لاکهید مارتین، ۲۰۰۹)

<sup>۱</sup> Bellofontaine

<sup>۲</sup> prototype à terre

## Xenesys ۲-۵-۱-۳-۱۳

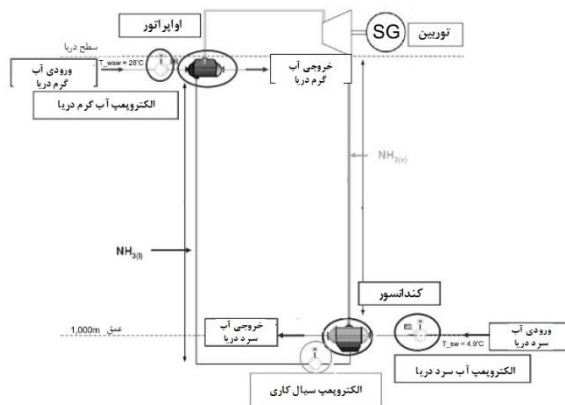
شرکت Xenesys در سال ۲۰۰۰ در پروژه‌ی "Sagar Shakti" سهام شد. از آن موقع به بعد این شرکت احتمال نصب نمونه‌ی اولیه در مجمع‌الجزایر پلینزی را بررسی کرده است. در آگوست ۲۰۰۸ شرکت Xenesys برای صنعتی کردن و تجاری سازی نیروگاه OTEC وارد یک فعالیت مشترک با شرکت نفت اقیانوس آرام (PPC) شد.



شکل ۱۳-۱۸ پروژه‌ی Xenesys سکوی بطری شکل (منبع: Xenesys)

## ۳-۵-۱-۳-۱۳ شرکت Deepwater Structure در ایالات متحده

این شرکت (در هیوستن) تابع شرکت ملی Oilwell Varco است. همان‌طور که در شکل ۱۳-۲۱ نشان داده شده است این شرکت مفهومی جدید در زمینه‌ی OTEC توسعه داده است.



شکل ۱۳-۱۹ طرح DSI (منبع: DCNS)

در این مورد، تبخیرکننده‌ها بر روی سکو و کندانسورها در بستر دریا قرار گرفته‌اند. به علاوه، سیستم پمپاژ آب سرد دریا با مدارهای آمونیاکی جایگزین شده است؛ بنابراین پمپاژ آب سرد

دریا به طور مستقیم در سطح کندانسور حاصل می شود. سیستم پمپاژ آب گرم دریا در سطح تبخیرکننده انجام می شود.

#### ۱۳-۳-۱-۵-۴ آزمایشگاه انرژی طبیعی دولت هاوایی در ایالات متحده (NELHA)

آزمایشگاه NEHLA یک پارک فناوری و علمی در Keahole Point، هاوایی است. در ابتدا این آزمایشگاه صرفاً در ساخت نیروگاه ساحلی OTEC نقش داشت و بودجهی آن از مالیات تأمین می شد. بعدها پژوهش آن به کاربردهای آب های عمیق دریا گسترش پیدا کرد.

#### ۱۳-۳-۱-۵-۵ موسسه ملی فناوری اقیانوسی در هند (NIOT)

موسسه NIOT در نوامبر ۱۹۹۳ توسط سازمان توسعهی اقیانوس دولت هند تأسیس شد. مأموریت این سازمان توسعهی فناوری هندی قابل اعتماد برای بهره برداری از منابع اقیانوس هند است. این موسسه در توسعهی نیروگاه شناور "Sagar Shakti" با همکاری ژاپنی ها در IOES (موسسهی انرژی اقیانوسی، Saga) مشارکت داشت. با موفقیت پروژهی Sagar Shakti، دولت هند در نظر گرفت که هزار نیروگاه OTEC در امتداد سواحل خود بسازد. بعدها NIOT برنامهی OSTI - دانش و فناوری اقیانوس برای جزایر - را بطور برجسته برای پژوهش رسوبات زیستی و کاربردهای محتمل آب های عمیق دریایی آغاز کرد.

#### ۱۳-۳-۱-۵-۶ موسسهی انرژی اقیانوسی، دانشگاه Saga، ژاپن (IOES)

این موسسه در مارس ۲۰۰۳ تأسیس شده است و به طور مستقیم تابع دانشگاه Saga (ژاپن) هست. اختراعات بسیاری توسط Saga به ثبت رسیده است (به طور قابل توجه، چرخه یوهارا در ۱۹۹۹). موسسهی IOES دارای تفاهم نامه های پژوهشی بسیاری همچون همکاری با NIOT برای پروژهی Sagar Shakti هست. به علاوه، Xenosys نیز در برنامهی پژوهشی OTEC در دانشگاه Saga سرمایه گذاری کرده است.

#### ۱۳-۳-۱-۵-۷ توان خورشیدی دریا، بین المللی، ایالات متحده (SSP)

شرکت SSP توسط جی. هیلبرت اندرسون، مهندس ارشد سابق یورک اینترنشنال تأسیس شده است. سرمایهی این شرکت عمدتاً توسط موسسهی سرمایه گذاری Abell Foundation تأمین می شود. شرکت SSP در اواخر ژوئن ۲۰۰۴ در کنفرانس انرژی اقیانوس<sup>۱</sup> ۲۰۰۴ خلاصه ای از

<sup>۱</sup> Energy Ocean

فعالیت‌های خود را ارائه داد که در آن به پروژه‌ی خود برای نیروگاه *OTEC* روی خشکی (که ساخت آن برای ۲۰۰۷ برنامه‌ریزی شده بود) اشاره می‌کرد. قرار بود این یک نیروگاه  $10\text{ MW}$  با بودجه‌ی ۱۲۰ میلیون دلار باشد که با چرخه‌ی باز،  $11000\text{ m}^3$  آب شیرین در روز تولید می‌کند.

### ۱۳-۳-۱-۶ مقایسه‌ی نیروگاه‌های فراساحلی و ساحلی

مزایای عمده‌ی طرح *OTEC* فراساحل در مقابل طرح ساحلی عبارتند از:

- اثر ناچیز بر روی خشکی؛
  - ناسازگاری کمتر، مقبولیت بیشتر؛
  - اتصالات الکتریکی در نقاط مختلف شبکه واقع بر خشکی تا در صورت ضعیف بودن شبکه، از موج برق اضافی و غیرقابل تحمل جلوگیری شود؛
  - کاهش سرمایه‌گذاری صنعتی (به‌ویژه محلی)؛
  - اعمال سیاست تولید برای ارتقای استفاده از سکوه‌های مشابه *OTEC* به‌صورت مجزا در مکان‌های دیگر، به‌طوری که برخی از آن‌ها به‌صورت موردی با سطح توان مورد نیاز سازگار شده‌اند (اثر زنجیری برای کاهش هزینه‌های کلی)؛
  - آمونیاک در فاصله‌ی زیاد از نواحی مسکونی ذخیره می‌شود؛
  - خط *CWP* کوتاه‌تر و مستقیم‌تر (نسبت به پاسخ ساحلی که ممکن است به کارهای هنرمندانه در کنار دریا نیاز داشته باشد)؛
  - احتمال فراز جوشی<sup>۱</sup> (افزایش سطح آب از اعماق) مستقیم در نواحی پرورش ماهی (به پژوهش‌های بیشتری برای تأیید احتمال این پیامد نیروگاه‌های *OTEC* نیاز است)؛
  - اثر بسیار کم بر منظره‌ی نواحی ساحلی (عبور لوله‌کشی آب دریا و سیستم خروجی)؛
  - اعمال کرنش کمتر بر *CWP* نسبت به نوع ساحلی آن.
- به‌طور مشابه، مزایای *OTEC* ساحلی در مقابل فراساحلی عبارتند از:

<sup>۱</sup> Upwelling

- سرمایه‌ی اولیه‌ی مورد نیاز برای نیروگاه ساحلی کمتر از نوع فراساحلی آن است. هزینه‌ی اضافی نسبی نیروگاه‌های فراساحلی به سرمایه‌ی مورد نیاز برای سکو (ساخت، انتقال، نصب) و اتصال آن به شبکه‌ی برق واقع در خشکی (کابل‌های زیر دریا، دفن کردن آن و غیره) مربوط می‌شود؛

- احتمال تولید هم‌زمان انرژی و تولید آب سرد برای خنک‌سازی ساختمان‌های واقع در خشکی. برآورده‌های اولیه برای نیروگاه‌های فراساحلی نشان داده است که بازگرداندن آب سرد از سکوه‌های شناور به خشکی بالانس انرژی را منفی خواهد کرد؛

- یک نیروگاه ساحلی اثر کمتری بر محیط دریایی دارد که به معنای کاهش مشکلات (واقعی یا فرضی) برای بازیگران دریایی است: ماهیگیران، دریانوردان تازه کار، حمل و نقل دریایی و غیره. برنامه‌ی احداث نیروگاه‌های فراساحلی باید بسیار زودتر از پروژه باهماهنگی این بازیگران انجام شود.

### ۱۳-۳-۲ پاسخ‌های مختلف برای سکو

#### ۱۳-۳-۱ انتخاب شناور

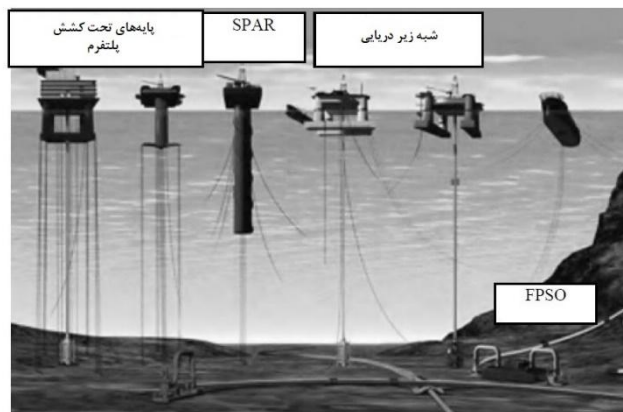
میان *OTEC* و صنعت نفت فراساحل موارد مشابه بسیاری وجود دارد؛ بنابراین، جالب است که آن‌ها را باهم مقایسه کنیم: نفت فراساحل در مقابل *OTEC* فراساحل.

یک نیروگاه فراساحلی *OTEC* دارای مشکلاتی هست که اغلب مشابه مشکلات سکوی نفتی فراساحلی می‌باشند، این مشکلات عبارتند از:

- نگهداری از سکوی واقع در آب‌های بسیار عمیق تحت هر شرایط آب و هوایی در طول عمر زیاد آن (حدود ۲۰ سال).

- انتقال سیال از بستر اقیانوس به سکو از طریق لوله‌ها: آب دریا در مورد *OTEC* و نفت خام در مورد صنعت فراساحلی نفت.

طبیعی است که با در نظرگیری تجربه‌ی صنعت نفت در نصب و نیروگاه‌های عملیاتی مهارشده در اعماق زیاد و در مدت زمان زیاد عمر آن‌ها، تلاش شود تا از فناوری‌های موجود ایده‌هایی گرفته شود و آن‌ها را با نیازهای خاص سکوه‌های فراساحلی *OTEC* انطباق داد. طرح‌های مختلفی از سکوه‌های فراساحلی مهارشده در شکل ۱۳-۲۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۳-۲۰ انواع مختلفی از سکوه‌های نفتی

تفاوت‌هایی با صنعت فراساحلی نفت وجود دارد:

یکپارچه‌سازی سیستم تولید انرژی با سکو که نیاز دارد برای افزایش بهره در آب فرو برده شود؛ بنابراین، برخلاف صنعت فراساحلی نفت، محدودیت‌های یکپارچه‌سازی سیستم تولید انرژی *OTEC* به این معنا هستند که نمی‌توان ادوات را بر روی عرشه نصب کرد و در عوض مستقیماً بر روی بدنه نصب می‌شوند؛

- تضمین جریان سیال با فشار کم از بستر دریا به سکو با دبی جریان متناسب؛

- مهار سکو در مکانی با عمق زیاد و دور از ساحل جزایر آتشفشانی: خاک آتشفشانی از رسوبات نسبتاً ریز تشکیل شده است؛

- مدل اقتصادی *OTEC* با نفت فراساحلی تفاوت بسیاری دارد؛ بنابراین، بسیار ضروری است که هزینه‌های غیر تکراری بهبود بخشیده شوند (به‌ویژه هزینه‌های احداث و نصب) و تا جای ممکن از قطعات در دسترس یا قطعاتی استفاده شود که در حال گذراندن روند تأیید می‌باشند.

۱۳-۲-۳-۱ *FPSO*: ذخیره‌ی تولید شناور و شناور تخلیه

#### دید کلی

یک *FPSP* شناوری است که هدف آن بازیابی، تصفیه جلوتر و ذخیره‌ی نفت خام است. می‌تواند یک شناور تک بدنه یا دو بدنه باشد که به یک تانکر تبدیل می‌شود. در شرایط عملیاتی عادی (بدون گردباد) ممکن است دو نوع از آن وجود داشته باشد:

- با لنگر ثابت، به نام لنج با مهار گسترده؛

- متصل به محور ثابت که می تواند حول آن تا  $360^{\circ}$  بچرخد و *FPSO* معلق نامیده می شود. این محور توسط خطوط مهار به بستر متصل شده است. از این پاسخ برای کمترین مقاومت در برابر عناصر اقلیمی و کاهش کرنش وارد بر لنگرها استفاده می شود.

نیروگاه های *OTEC* در اطراف کمربند استوایی نصب می شود و این نواحی به طور کلی در معرض گردباد قرار دارند. توجه کنید که در شرایط گردبادی، باد غالب هیچ جهتی ندارد. در این مورد ضروری است که یا سیستم قطع کننده ای در نظر گرفته شود که به کشتی امکان بازگشت به بندر را بدهد، از مصالح محافظت کند و در مورد *FPSO* معلق از برجک از خطر آلودگی زیست محیطی جلوگیری کند و یا تمام نیروگاه طوری طراحی گردد که در مورد نوع لنجی بتواند در مقابل شرایط گردبادی مقاومت کند.

#### مزایا و معایب

اتخاذ سکوی *FPSO* برای کاربردهای فراساحلی *OTEC* می تواند مزایای زیر را داشته باشد:

- سازگاری با محیط دریایی و خیم به دلیل وجود برجک که باعث می شود لنج در جهت امواج قرار گیرد و در شرایط و خیم از سیستم جدا شود؛

- سهولت نصب سیستم تولید انرژی؛

- سهولت لنگر انداختن،

- سهولت کار بر روی ماشین آلات.

با این حال همچنان دارای معایب مشخصی هست:

- *FPSO* معلق از برجک: جدا سازی برجک - این یک فرآیند دقیق است که به قایق های یدک کش و بندرگاه نیاز دارد. جزایر هدف *OTEC* عمدتاً بسته می باشند و همیشه برای کمک به این نوع سکو دارای بندر نمی باشند یا تمایلی به انجام این کار در شرایط وقوع گردباد ندارند؛

- لنج مهار: در نبود جهت باد غالب باید ابعاد سکو بهینه سازی شوند - به ویژه به لحاظ طول - تا مساحت سطح در معرض امواج و جریان کاهش پیدا کند و در نتیجه بارهای وارد بر مهار و هزینه ی آن کاهش یابد.



از نظر این معایب، *FPSO* های معلق از برجک برای *OTEC* تنها در نیروگاه‌های با توان بالا توجیه می‌گردند. از طرف دیگر به دلیل طول محدود آن، تنها می‌توان از طرح لنج مهار در نیروگاه‌های با توان کم و متوسط استفاده کرد.

### SPAR ۲-۱-۲-۳-۱۳

#### دید کلی

*SPAR* از عرشه‌ای واقع بر بدنه‌ی استوانه‌ای عمودی از جنس فولاد با قطر ده‌ها متر (حدود  $30m$ ) ساخته شده است و توسط خطوط مهار زنجیری متصل در اطراف و زیر بدنه به بستر متصل می‌گردد. آب‌خور عمودی<sup>۱</sup> کشتی حدود  $150m-200m$  است. این ارتفاع به کاهش سرج کمک می‌کند. حرکت‌های رول و پیچ به لطف فاصله‌ی میان مرکز جاذبه و نقطه‌ی شناوری محدود می‌گردند. به‌طور کلی برنامه‌ریزی شده است که در حین عملیات دوره‌ی تناوب طبیعی سرج *SPAR* حدود  $30s$  باشد تا از تشدید تحت اثر تحریک امواج اجتناب شود. هنگامی که قطر *SPAR* ها بسیار زیاد باشد (بیش از  $20m$ )، بدنه توسط حلقه‌هایی تقویت می‌شود.

به‌منظور نصب، *SPAR* در دو بلوک ساخته می‌شود: بدنه‌ی استوانه‌ای و عرشه. بدنه‌ی استوانه‌ای از سایت احداث به سایت عملیاتی "قرار گرفته" در لنج ترابری منتقل می‌شود. هنگامی که به سایت رسید، این لنج واژگون می‌شود تا در موقعیت عمودی قرار گیرد. عرشه بر روی لنج دیگری به سایت آورده می‌شود و سپس با استفاده از جرثقیلی بر روی بدنه‌ی استوانه‌ای قرار داده می‌شود.

برخی از انواع مختلف *SPAR* برحسب طبیعت سایت استخراج (شرایط اقلیمی، مشخصه‌ی میدان نفتی، وزن عرشه، طبیعت تجهیزات فرآیند و غیره) توسط صنعت نفت توسعه یافته‌اند: *SPAR* کلاسیک، *TRUSS SPAR* و *CELL SPAR*.

این نوع سکو معمولاً در خلیج مکزیک نصب می‌گردد. می‌توان از آن در آب با عمق متوسط یا عمیق استفاده کرد و دارای طول عمر حدوداً ۲۰ سال هست.

#### مزایا و معایب

مزیت عمده‌ی *SPAR* ها به آب‌خور عمودی زیاد آن‌ها مربوط می‌شود که به کاهش حرکت‌های سکو کمک می‌کند. این ویژگی به محدود کردن (تا جای ممکن) بارهای وارد بر اجزای حیاتی *OTEC* نیز کمک می‌کند: سیستم پمپاژ آب دریا و کابل‌های الکتریکی زیر دریا.

<sup>۱</sup>Vertical draft

با این حال، با فرض اینکه قطر بدنه به چند ده متر محدود شده است، این نوع سکو تنها برای نیروگاه های فراساحلی OTEC با توان کم مورد توجه هست. برای تأسیسات با توان بالا، محدودیت های یکپارچه سازی سیستم تولید انرژی با بدنه و همچنین محدودیت های نگهداری بسیار زیاد می شود.

### ۱۳-۳-۲-۳-۱ سکوهای نیمه مغروق<sup>۱</sup>

#### دید کلی

از سکوهای نیمه مغروق برای حفاری و تولید نفت و به طور فرعی برای کار احداث در دریا شود. سکوهای نیمه مغروق مورد استفاده برای تولید، به طور کلی برای یک میدان نفتی مشخص ساخته یا تغییر داده شده اند.

این نوع سکو از عرشه ای مستطیلی ساخته شده است که توسط ۴ ستون استوانه ای نیمه مغروق حمایت می شود و آن ها نیز توسط سکوی شناور موقت حمایت می شوند. این سکو با استفاده از خطوط مهار در جای خود نگه داشته می شود که تعداد این خطوط به عمق آب و وزن عرشه بستگی دارد. پارامترهای اصلی که هندسه ی سکوی نیمه مغروق را تعریف می کنند، مطابق ذیل می باشند:



استفاده می

- نوع سکوی شناور موقت؛

- تعداد ستون ها؛

- وزن و ترکیب عرشه با بدنه؛

- انتخاب مصالح ساختمانی برای بدنه.

این نوع از سکو به طور برجسته در خلیج مکزیک و دریای شمال نصب گشته است. می توان از آن در اعماق زیاد استفاده کرد و دارای طول عمر حدوداً ۲۰ سال هست.

#### مزایا و معایب

به لحاظ ساختار آن، عرشه توسط ستون های نیمه مغروق نگه داشته شده است و سطح در معرض امواج نسبت به طرح های از نوع لنجی یا FPSO ها کاهش پیدا کرده است، برای مثال در نتیجه، کرنش تولیدی توسط امواج در سطح اتصالات میان سکو و (از یک طرف) سیستم

<sup>۱</sup> Semi-submersible

پمپاژ آب دریا و خروجی و (از طرف دیگر) کابل‌های الکتریکی زیر دریا کاهش پیدا می‌کند. این وضعیت حتی هنگامی که اندازه و حرکت شناور زیاد باشد بیشتر صدق می‌کند؛ بنابراین، کاربرد این نوع شناور برای *OTEC* عمدتاً در نیروگاه‌های با توان بالا توجیه می‌گردد.

باین‌حال، همچنان سه اشکال برای آن وجود دارد:

- در صورتی که حادثه در جایی رخ دهد که وسایل تعادل خراب شوند، به سرعت سکو ناپایدار می‌شود؛

- اتخاذ این شناور برای مفهوم *OTEC* متضمن پیچیده‌سازی آرایش داخلی آن و بنابراین سازه‌ی آن است.

۱۳-۳-۲-۱-۴ *TLP*: سکوی پایه کششی<sup>۱</sup>

#### دید کلی

سکوی *TLP* توسط میله‌های فولادی بطور محکم به بستر متصل می‌گردد. این میله‌ها برای افزایش شناوری بدنه به صورت کشیده نگه‌داشته می‌شوند (کشش مثبت در هر شرایط اقلیمی)؛ بنابراین، *TLP* از حرکت امواج پیروی نمی‌کند. این نوع سکو به‌طور برجسته در خلیج مکزیک و خلیج گینه نصب گشته است. از این سکو در اعماق زیاد استفاده می‌شود و دارای طول عمر حدوداً ۲۰ سال هست.

برخی از انواع مختلف *TLP* برحسب طبیعت سایت استخراج (شرایط اقلیمی، مشخصه‌ی میدان نفتی، وزن عرشه، طبیعت تجهیزات فرآیند و غیره) توسعه یافته‌اند:

- سکوی نیمه مغروق با ۴ ستون دایره‌ای و عمق حداکثر تقریباً  $1500m$ ؛

- سکوی نیمه مغروق با ۴ ستون مربعی و عمق حداکثر تقریباً  $1500m$ ؛

- نوع *SeaStar* دارای سه شاخه با ستون مرکزی و عمق حداکثر تقریباً  $1000m$ .

#### مزایا و معایب

از مزایای عمده‌ی *TLP* به مشخصه‌ی اصلی آن مربوط می‌شود: *TLP* از حرکت امواج پیروی نمی‌کند.

این ویژگی بدین معناست که:

<sup>۱</sup> Tension Leg Platform

- نیازی به محدود کردن شرایط عملیاتی ادوات تولید الکتریسیته نیست؛
- می توان کرنش را در سطح اتصالات مابین سکو و سیستم پمپاژ آب دریا و خروجی (از یک طرف) و کابل های برق زیر دریا (از طرف دیگر) محدود کرد.
- معایب عمده ی آن به هزینه ی مهار و نصب آن ها مربوط می شود.

### ۱۳-۲-۲-۲ انتخاب سکو

- به منظور انتخاب مناسب ترین معماری سکو برای *OTEC* باید انواع مختلف سکوها را از نظر عملکرد آن ها با سیستم تولید توان ایزو، انرژی ایزو و سایت ایزو مقایسه کرد:
- مقاومت در برابر شرایط وخیم؛
- استقلال سکو؛

- مقاومت در برابر امواج: حرکت های سکو و اثر وارد بر سیستم های مستغرق همچون سیستم های پمپاژ آب دریا و خروجی یا کابل های صدور زیر دریا؛
- ساخت: سهولت، مدت زمان و هزینه؛
- نصب: سهولت، مدت زمان، وابستگی به تجهیزات نصب فراساحلی، هزینه ها؛
- هزینه های کلی پروژه.

### ۱۳-۲-۳-۳ چالش فنی: پمپاژ آب سرد دریا

- سیستم پمپاژ آب سرد دریا به عنوان چالش فنی اصلی سکوهای *OTEC* شناخته می شود.
- مراحل مطابق ذیل می باشند:

- طراحی؛
- ساخت؛
- انتقال، مونتاژ و نصب؛
- عملیات.

### ۱۳-۲-۳-۱ طراحی

قاعده‌ی کلی آن طراحی سیستم پمپاژ آب سرد دریا با هزینه‌ی امکان‌پذیر است به‌طوری‌که بتواند مقادیر زیادی از آب دریا را انتقال دهد (لزوماً به‌منظور جبران بازده کم) و تلفات گرمایی را محدود کند. به‌علاوه، قطر این لوله‌ها باید به‌اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا تلفات فشار کاهش پیدا کند.

تا به امروز، بزرگترین *CWP* فولادی که برای نیروگاه فراساحلی (*OTEC*) (Tunisie-1930) ساخته شده است به قطر  $2.5\text{ m}$  و طول  $700\text{ m}$  هست. سازه‌های امروزی کوچکتر بوده و از *HDPE* استفاده می‌کنند. این لوله‌های *HDPE* تا قطر  $1.5\text{ m}$  در بازار موجود می‌باشند. می‌توان آن‌ها را باهم دسته‌بندی کرد تا کل سطح مقطع مورد نیاز را انتقال داد.

طرح سیستم پمپاژ آب سرد دریا توسط معیارهای ذیل تعیین می‌شود:

- تعداد لوله‌ها: برحسب توان نیروگاه *OTEC*، می‌توان یک یا چند *CWP* نصب کرد. با این حال، به دلایل اشاره‌شده در بالا، بسیار ضروری است که آن‌ها را با یک لوله‌ی ورودی آورد؛

- طول: برحسب سایت استخراج، ممکن است طول آن تا  $1000\text{ m}$  باشد (برای مثال، برای ریونیون و مارتینیک  $1000\text{ m}$ ، برای تاهیتی  $800\text{ m}$ )؛

- قطر: با فرض اینکه تنها یک *CWP* وجود دارد، ممکن است قطر آن مابین  $3\text{ m}$  و حدود  $30\text{ m}$  تغییر کند (برحسب توان نیروگاه). هر چقدر قطر بزرگ‌تر باشد، خطر طراحی، انتقال و نصب بیشتر می‌شود؛

- مصالح: مصالح مورد استفاده نکته‌ی مهمی هست. این مصالح باید به لحاظ اقتصادی عملی باشند، استفاده‌ی از آن‌ها آسان باشد و باید در مقابل شرایط اقلیمی وخیم دوام بیاورند. رسوب زیستی (به فصل ۲ مراجعه نمایید) در این جا یک فاکتور طراحی نیست.

به‌علاوه، سیستم پمپاژ آب سرد دریا باید طوری طراحی گردد که شرایط اقلیمی وخیم را تحمل کند (امواج، جریان). در شرایط وقوع گردباد، امواج و جریان شدیدتر می‌شوند. ممکن است سرعت جریان به دلیل وزش باد در سایت تأسیسات به  $3$  گره هم برسد. سرعت این جریان سطحی با افزایش عمق کاهش پیدا می‌کند تا اینکه در  $50\text{ m}$  زیر سطح به مقدار صفر برسد؛ بنابراین، چند متر اول لوله‌کشی و اتصال آن‌ها به شناور نکات حیاتی می‌باشند. با نگاه به تجربه‌ی گذشته، مشکلات یافت شده در نمونه‌های قبلی در حقیقت تغییر شکل متراکم در سطح اتصال *CWP* شناور است که به شکست کامل یا جزئی سیستم منجر می‌شود.

برحسب فناوری و قطر، ممکن است تولید *CWP* مشکل باشد.

ممکن است لوله در مکان های زیر ساخته شود:

- در دریا، در سایت تأسیسات؛ بنابراین سکو باید چنان در مکان خود قرار گیرد که با نیروگاه ساخت یکپارچه شود؛

- در سکوی نزدیک به سایت تأسیسات، سپس به مکان نهایی خود کشیده می شود؛

- در بخش های واقع بر خشکی، سپس در سایت تأسیسات در دریا مونتاژ می گردد.

### ۱۳-۳-۲-۳-۳ انتقال، مونتاژ و نصب

برخی از گزینه های در نظر گرفته شده برای انتقال و نصب عبارتند از:

- مونتاژ بخش هایی از لوله به طول  $1000m$  (در بدترین سناریو) در محل ساخت و سپس انتقال به سایت تأسیسات. این پاسخ مستلزم محوطه ای بزرگ در نزدیکی سایت است. به علاوه، کشیدن لوله ای با چنین طول زیادی پر خطر است و بخش مهمی از طول عمر خستگی آن در حین این فاز استفاده می شود. همچنین کار کشش باید در شرایط اقلیمی آرام انجام شود.

- تهیه بخش های لوله و سپس مونتاژ آن ها در سکوی *OTEC*. این پاسخ مستلزم شرایط اقلیمی آرام و تنظیم سکوی *OTEC* برای فراهم کردن امکان مونتاژ و استقرار *CWP* است.

به طور مشابه، برحسب انتخاب های انجام شده برای انتقال و مونتاژ، می توان کار نصب را با روش های متفاوت انجام داد:

- پاسخ کشیدن: پس از کشیدن لوله به سایت باید آن را کج و سپس به شناور متصل کرد. این کار به شرایط اقلیمی آرام نیاز دارد؛

- مونتاژ بر روی شناور.

### ۱۳-۳-۲-۴ عملیات

برای فاز عملیاتی، باید خطرات زیر را ارزیابی کرد و در حین فرآیند طراحی آن ها را برطرف کرد:

- تداخل با لوله های ورودی و خروجی آب دریا. در زیر شناور *OTEC*، تعدادی لوله (ورودی آب سرد دریا، خروجی)، یک یا چند کابل برق زیر دریایی (برحسب توان نیروگاه) برای توزیع برق و

خطوط مهار وجود دارد. تمامی آن‌ها آزادانه در زیر سکو حرکت می‌کنند؛ بنابراین باید بسامد تماس میان این عناصر مختلف تحلیل شوند؛

- تغییر شکل جدی اتصال شناور لوله به دلیل حرکت‌های سکو که به اتلاف کلی در یک یا چند لوله (ورودی و خروجی) منجر می‌شود.

#### ۱۳-۳-۲-۳-۵ خلاصه

سیستم پمپاژ آب سرد دریا یک نکته‌ی مهم برای توسعه‌ی *OTEC* است؛ بنابراین، در اینجا مسئله‌ی ما توسعه‌ی روش تولید و مونتاژ یک لوله با قطر زیاد است که به غلبه بر خطرات زیر کمک کند:

- تداخل با لوله‌های ورودی و خروجی آب دریا؛

- استفاده از لوله در شرایط اقلیمی وخیم (از نوع گردبادی).

#### ۱۳-۳-۲-۴ مهارسازی (با کمک اصول)

با فرض اینکه نیروگاه‌های فراساحلی *OTEC* در معرض شرایط محیطی مشابه سکوهای نفتی قرار دارند، فناوری‌های مهارسازی یکسان خواهند بود (فناوری‌ها، قوانین).

سیستم مهارسازی بر اساس عمق آب، حرکت شناور، محدودیت‌های عملیاتی سیستم تولید انرژی، طبیعت بستر دریا، عمق‌سنجی و شرایط محیطی انتخاب می‌شوند؛ بنابراین، برای هر پروژه‌ی جدید باید مهارسازی دوباره بررسی شود.

#### ۱۳-۳-۲-۱-۴ سیستم‌های مختلف مهارسازی

سه نوع مهارسازی باهم در رقابت می‌باشند:

- مهارسازی زنجیری، به‌طور کامل از حلقه‌هایی ساخته شده است که تنها با وزن زنجیره پایداری آن تضمین می‌شود. این پاسخ با ابعاد شناور و عمق آب محدود می‌شود. برای مثال، با اعماق کمتر از  $200\text{ m}$  و شناورهای متحرک سنگین‌تر از  $10000$  تن به‌خوبی سازگار است. می‌توان از آن برای نیروگاه‌های *OTEC* با توان بالا استفاده کرد:

- مهارسازی کششی، به‌طور کامل از کابل‌هایی (لوله‌هایی) ساخته شده است که قاعده‌ی کلی آن ایجاد کشش در خطوط با استفاده از شناوری هیدرو استاتیک مازاد در شناور است. این پاسخ برای حذف حرکت‌های هیو، رول و پیچ در نظر گرفته شده است. این پاسخ به افزایش

سطح آب بسیار حساس است (به دلیل جزر و مدها یا فشار باومتری)؛ بنابراین باید از لنگرهای ستونی یا لنگرهای مکش استفاده شود (لزوماً جذب عمودی کشش در بستر). این نوع مهارسازی به *TLP* مرتبط است؛

- مهارسازی نیمه محکم، اساساً از کابلی (ماده‌ی فولادی یا مرکب) در امتداد تمام طول و بخش زنجیری در پایین (در بستر دریا) و در بالا (در سطح سکو) تشکیل شده است. خطوط به صورت نسبتاً عمودی متمایل می‌شوند و صلبیت آن‌ها توسط الاستیسیته‌ی کابل‌ها فراهم می‌گردد. این پاسخ برای آب بسیار عمیق به خوبی سازگار و اثبات شده است، زیرا وزن لنگر را به شدت کاهش داده و کار نصب را تسهیل می‌کند. یک نکته‌ی مهم دیگر آن محدودیت حرکت شناور است (کمک به صلبیت آن به لحاظ رول و پیچ).

### ۱۳-۳-۲-۴-۲ لنگرهای متفاوت

انتخاب بهترین لنگر برای بار مفروض به طبیعت بستر دریا (ماسه‌ای، خاک رس، صخره‌ای و غیره) بستگی دارد. برحسب نتایج نمونه‌سازی ژئوتکنیکی، در جدول ۱۳-۴ انواع مختلف و احتمالی برای لنگر توصیف شده‌اند.

در جدول ۱۳-۴ سیستم‌ها متفاوت نشان داده شده‌اند. می‌توان لنگرهای مرسوم را در سیستم‌های "کولی"<sup>۱</sup> ترکیب کرد. اکثر این سیستم‌ها به خوبی با مفهوم مهار پراکنده سازگار می‌باشند؛ بنابراین، هزینه‌های خرید و هزینه‌های راه‌اندازی به انتخاب سیستمی کمک می‌کنند که مشکلات خاصی را برای هر نوع بستر دریا مورد مطالعه حل می‌کند.

انواع لنگر	مشخصات	هزینه
لنگرهای متعادل مرسوم	لنگر به در بستر دریا قرار گرفته و طناب متصل به آن، در راستای خط گردابی بوجود آمده قرار دارد.	معمولی
لنگرهای جاذبه‌ای	با ایجاد اصطکاک با بستر دریا، بار را به صورت ثابت در راستای افقی نگه می‌دارد.	معمولی

<sup>۱</sup> Piggy back



بالا	با ایجاد یک اختلاف فشار در بستر دریا، بار را در جهت‌های افقی و عمودی ثابت نگه می‌دارد.	لنگرهای مکنده‌ای
بالا	توانایی ایجاد بار عمودی، همچنین امکان ایجاد بار افقی با استفاده از لنگرهای درگ	لنگرهای با بار عمودی
بالا	با دریل کردن سنگ‌های بستر دریا، امکان حفظ با در مسیر موردنظر را داراست.	لنگرهای دریلی

جدول ۱۳-۴ مشخصه‌های لنگر متفاوت (منبع: *DCNS/Principia*)

#### لنگرهای مرسوم

از این لنگرها ممکن است با بستر ماسه‌ای یا رسی با سفتی متوسط استفاده شود. اندازه‌های لنگرها به انقباض حداکثر قابل تحمل مربوط می‌گردد.

#### لنگرهای جاذبه‌ای (گرویتی)

لنگرهای جاذبه‌ای بسیار سنگین می‌باشند به طوری که ممکن است برای مثال از بتن ساخته شوند. طبیعت این لنگرها مطابق مقادیر ضرایب اصطکاک مواد بستر دریا مشخص می‌گردد. برحسب بارهای وارده، حجم و جرم لنگرها تعیین می‌شود.



شکل ۱۳-۲۱ Strevshark (منبع: Vryhof)

#### لنگرها مکشی و ستونی

لنگرهای مکشی تنها برای بسترهای ساخته شده از لایه‌ی ضخیم رس بسیار نرم کاربرد دارند. این کار به لنگر کمک می‌کند تا تحت اثر وزن خود جا داده شده و بخش بالایی لنگر را تحت فشار قرار دهد. این زمین‌شناسی بستر به‌طور بارز در اعماق زیاد در غرب آفریقا، دریای شمال و در دلتاهای مشخص رودخانه و مناطق رسوبی یافت می‌شود؛ بنابراین، به‌طور کلی آن‌ها برای استفاده در مناطق هدف *OTEC* همچون ریونیون، مارتینیک و تاهیتی که جزایر آتشفشانی هستند، مناسب نمی‌باشند. با این حال، ممکن است از ستون‌های متحرک نسبت به لنگرها در بازه‌ی وسیع‌تری از زمین‌شناسی‌های بستر استفاده شود. با این حال، این نوع لنگر با بسترهای صخره‌ای سازگاری ندارد.

#### ۱۳-۳-۲-۳-۴ طرح مهارگاه

کرنش‌های وارد بر مهار با استفاده از فرضیه‌های زیر تقریب زده می‌شود:

- نیروهای جریان، باد و امواج با دوره‌ی تناوب بازگشت ۱۰۰ ساله توسط بخش جلویی شناورها شدت می‌یابند؛

- در نگاه اول (روش پایستار)، باد، امواج و جریان تماماً در جهتی یکسان حرکت می‌کنند؛

- در نبود اطلاعات خاص سایت عملیاتی، به منظور در نظرگیری دریاهاى آزاد، زنجیره‌ها و کابل‌ها ضخیم‌تر از مقدار مورد نیاز ساخته شده‌اند. در نگاه اول، این اثر با افزایش ضریب درگ هیدرودینامیکی و اینرسی خطوط مهار در نظر گرفته می‌شود؛
- نیروهای هیدرودینامیکی مربوط به باد و جریان اعمال می‌شوند.
- مهارگاه باید طوری انتخاب شود که بالانس مخالف و کرنش را کاهش دهد و همچنین باید معیارهای زیر را برآورده کند:
- نباید هیچ نیروی عمودی بر لنگر وارد نشود؛
- کابل خط مهار نباید هیچگاه با بستر در تماس باشد.

### ۱۳-۴ نیروگاه OTEC در محیط دریایی

- برای در نظرگیری مناسب محیط دریایی در پروژه‌ی OTEC به انجام مطالعات محیطی و اقیانوسی مختلفی نیاز است که سؤالات خاصی در رابطه با شکل‌های دیگر انرژی دریایی مطرح می‌کنند:
- اندازه‌گیری در اعماق زیاد در سایت، گاهی اوقات به صورت مبتکرانه، برای دستیابی به داده‌های محیطی لازم برای طراحی و مطالعات اثر؛
  - مشکلات محیطی نامشخص: اثرات فراز جوشی<sup>۱</sup> در محیط کم‌توان<sup>۲</sup>، اثرات امواج داخلی، اثر نویز بر پستانداران دریایی؛
  - نبود علم حقوق: چه فرآیندی باید دنبال شود؟ کدام قوانین وجود دارد؟
- اکنون به هر یک از این نکات از دید مهندس پژوهش نگاه خواهد شد: مشکلات عمده در مفهوم پروژه‌های OTEC، اهداف و روش‌های پژوهشی.

### ۱۳-۴-۱ داده‌های محیطی که بر کارکرد OTEC تأثیر دارند

سیستم OTEC در طبیعت خود نیاز دارد تا به دماهای سطحی گرم و اعماق زیاد دسترسی داشته باشد تا امکان دسترسی به آب سرد (به‌طورکلی در حدود  $1500\text{m}$ ) واقع در نزدیکی ساحل فراهم شود و در نتیجه، طول کابل اتصال زیر دریایی محدود گردد (چند کیلومتر).

<sup>۱</sup> فرازجوشی: بالا آمدن آب عمقی که سرد و سرشار از مواد مغذی است.  
<sup>۲</sup> کم‌توان: کمبود مواد مغذی.

بنابراین، موقعیت ایده آل پروژه های OTEC در نواحی گرمسیر و در نزدیکی جزیره ی آتشفشانی هست که نتیجه ی آنی آن شیب زیاد در عمق و فرار گرفتن در معرض خطرات گردبادی (باد و امواج) و لرزه ای (سونامی ها) و همچنین انجام اندازه گیری ها در اعماق زیاد در سایت هست که برای پروژه های دیگر انرژی دریایی یا مهندسی ساحل غیر معمول است.

البته عملیات نیروگاه OTEC به دماها و همچنین پارامتر دیگر آب و هواشناسی و اقیانوس-شناسی بستگی دارد که از جنبه ی قابلیت دریا پیمایی سکوها (عمق، خطرات طبیعی، باد، امواج، جریان شناسی، طبیعت بستر دریا) یا کارکرد آن و بهبود "سیستم انرژی" آن هست (دما، ترکیب فیزیکی-شیمیایی آب).

### ۱۳-۴-۱-۱ داده های ورودی برای طراحی سکو

#### ۱۳-۴-۱-۱-۱ عمق سنجی

باید در طراحی نقاط مهار، شیب زیاد عمق یافت شده برای پروژه های OTEC در نظر گرفته شوند. برای اندازه گیری عمق به وسایلی نیاز است که به طور ویژه برای استفاده در اعماق زیاد طراحی گشته اند (کمپین اقیانوس شناسی با فناوری پیشرفته).

#### ۱۳-۴-۱-۱-۲ باد و امواج

خطر وجود گردبادهای باعث ایجاد محدودیت عمده در طراحی عناصر مختلف می شود (نقاط مهار، سکو، لوله و کابل). این کار مستلزم داشتن دانشی مناسب از شرایط اقلیمی اقیانوسی هست تا شاخص های آماری قابل اعتمادی در اختیار داشته باشیم و بتوانیم فرضیه های واقعی را استنتاج کنیم. شرایط خارج از وقایع شدید نیز باید به خوبی شناخته شوند تا نقاط مهار و لوله ها طوری طراحی گردند که در مقابل خستگی دوام بیاورند.

#### ۱۳-۴-۱-۱-۳ جریان ها

جریان ها باید از سطح تا بستر مورد بررسی قرار گیرند، زیرا لوله در امتداد تمام طول خود در معرض اثر آن ها قرار خواهد گرفت. از این نقطه نظر، بهتر است که مقادیر برشی جریان به جای مقادیر حدی آن در نظر گرفته شوند؛ بنابراین تغییرپذیری جریان ها نیز باید به طور دقیق بررسی گردد تا فرضیه هایی استنتاج شوند که می توان برای طراحی به آن ها اتکا کرد. این مطالعات از نظر فرآیندهای فیزیکی مختلف، پیچیده می باشند:

- جریان‌های کلی اقیانوس: ممکن است این جریان‌های مربوط به گرادیان‌های چگالی در امتداد ستون آب متغیر باشند؛ ممکن است پدیده‌های ورتکس با مقیاس متوسط نیز مشاهده شوند؛
- جریان‌های مربوط به باد: باد، جریان‌هایی را در سطح و زیر آن ایجاد می‌کند و فرقی نمی‌کند که باد غالب (بادهای شمال شرقی<sup>۱</sup>، برای مثال) یا باد حاصل از عبور گردبادها باشد؛
- جریان‌های جزر و مدی: جریان‌های جزر و مدی قوی متغیر و جزر و مدی ضعیف، جریان‌هایی را تولید می‌کنند که ممکن است برحسب مکان قرارگیری سایت در جهان، جریان‌های کلی بر آن‌ها غلبه کنند یا توسط آن‌ها پوشیده شوند؛
- جریان‌های مربوط به امواج داخلی: در یک محیط لایه‌ای (گرمسیری) و با شیب زیاد عمقی ممکن است پدیده‌ای به نام "امواج داخلی" در ستون آب مشاهده شود. این پدیده، نوسانات طبیعی توده‌های آبی است که باعث تغییرات دمایی و ایجاد جریان‌های افقی می‌شود که ممکن است به ترتیب بر سیستم انرژی (با تغییرات پتانسیل چند درجه‌ای در طول چند ساعت) و CWP (با جریان برشی در ستون آب) تأثیر بگذارند.

از نظر تنوع این فرآیندهای متفاوت (منشأ مختلف، تغییرپذیری مکانی و دمایی، پیش‌بینی متفاوت)، نمی‌توان به راحتی وقوع هم‌زمان آن‌ها را پیش‌بینی کرد. تأیید فرضیه‌ها از طریق مشاهدات (اندازه‌گیری‌ها در دریا) و مدل‌های عددی انجام می‌شود که حتی پس از آن هم حاشیه‌ی عدم قطعیت درباره‌ی نتایج وجود دارد.

#### ۱۳-۴-۱-۴-۱۳ طبیعت بستر دریا

طبیعت بستر دریا یک فاکتور تعیین‌کننده در طراحی نقاط مهار است که مطابق آن، کمپین ژئوفیزیکی باید در مساحت زیادی از دریا انجام شود و همچنین کمپین ژئوتکنیکی باید در نقاط مهار برگزیده و در امتداد مسیر کابل انجام شود. مشخصات ژئوتکنیکی بستر دریا باید به‌منظور بهبود انتخاب و طراحی لنگرها مشخص شود. مشکل ما در اینجا به اختصاصی بودن و هزینه‌ی قابل توجه این نوع اندازه‌گیری‌ها مربوط می‌شود که معمولاً به‌عنوان بخشی از پروژه‌های تحقیقاتی در صنعت نفت انجام می‌شوند.

#### ۱۳-۴-۱-۲-۱-۴-۱۳ داده‌های ورودی برای کارکرد سیستم انرژی

#### ۱۳-۴-۱-۲-۱-۴-۱۳ دمای آب دریا

<sup>1</sup> Trade Winds

دما در طی روزها، فصلها و سالهای مختلف بهطور قابل توجه تغییر می کند. به علاوه، تحول بلند مدت آن از تغییرات اقلیمی ناشی می شود؛ بنابراین، بسیار دشوار است که تنها آن را با یک یا چند مقدار (حدی یا غیر آن) جمع کرد. داده های ورودی سیستم انرژی باید شامل دست کم (برای آب گرم و سرد) موارد زیر باشند:

- مجموعه ای دماها در طول یک سال متوسط (برای محاسبه ای توان قابل تولید و تولید بهینه در طول بازه ای از دماهای غالب)؛

- منحنی های محاطی<sup>۱</sup> حداقل و حداکثر (برای طراحی سیستم انرژی که باید در آن بازه کار کند)؛

- برآورد نوسانات مربوط به امواج داخلی (برای محاسبات دینامیکی)؛

- برآورد تغییر دما در طول ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ سال (برای محاسبه ای توان قابل تولید در طول کل عمر تأسیسات).

این داده های ورودی تأثیر مستقیمی بر تولید الکتریسیته دارند: بنابراین، آن ها داده های حساسی می باشند. در نتیجه، داده های فراهم شده لزوماً از یک طرف تحت تأثیر منفی تغییرات زیاد و از طرف دیگر عدم قطعیت قرار خواهند گرفت (خطای مدل ها، عدم نمایش اندازه گیری ها و غیره).

#### ۱۳-۴-۱-۲ ترکیب فیزیکی-شیمیایی آب

ترکیب آب پمپاژ شده بر کارکرد نیروگاه از طریق خطر جمع شدن خز در مبدل ها یا رسوب زیستی<sup>۲</sup> تأثیر می گذارد که می تواند مانع ورود جریان به لوله ها و مبدل ها نیز شود. در نظرگیری این پارامترها با استفاده از فرضیه های کاملاً نظری آسان نیست. در پروژه های در حال پیشرفت، نمونه ای آب سطحی مورد تحلیل قرار گرفته است (به لیستی از تحلیل ها در بخش بعدی مراجعه کنید که به اثرات محیطی می پردازند) تا خطرات جمع شدن خزه ارزیابی شود (فرض شده بود که آن ها ناچیز باشند)؛ همچنین انجام آزمایش در آزمایشگاه برای تعیین وجود نیاز به الکتروکلرات برای محدود کردن رسوبات زیستی. این نکته حائز اهمیت هست، زیرا بدین معناست که می توان الکترو-کلرات را برای تنظیم کلر در خروجی لوله بهبود بخشید تا غلظت آن تقریباً صفر شود و مصرف الکتریسیته ای مربوط به آن را محدود کند.

<sup>۱</sup> Envelope curves

<sup>۲</sup> رسوب زیستی: رشد ارگانیسم هایی روی یا داخل سازه ای مستغرق (لوله، بدنه ی کشتی و غیره)، به فصل ۲ مراجعه نمایید.

### ۱۳-۴-۲ OTEC. شکلی از انرژی که به شرط نظارت دقیق بر مکان‌ها، به محیط

#### احترام می‌گذارد

چرخه‌ی عمر نیروگاه OTEC باعث ایجاد مسائل زیست محیطی می‌شود که باید با مطالعه و آزمایش برطرف گردند: اثرات آن در طول فاز ساخت، در طول فاز عملیاتی و در هنگام جمع کردن آن در انتهای طول عمر نیروگاه.

هدف ما در اینجا بررسی اثر نیروگاه OTEC نیست، بلکه تهیه‌ی لیستی از مشخصات مربوط به این نوع از انرژی دریایی است.

### ۱۳-۴-۲-۱ اثر بالقوه در حین فاز ساخت

اثرات سایت احداث که موقت می‌باشند (در طول زمان راه‌اندازی سایت) به قرار دادن نقاط مهارساز و کابل زیر دریا و اتصال دوباره به خشکی مربوط می‌شوند. صرف نظر از نقاط مهارساز، این اثرات در بخش زیادی با کار دیگر احداث دریایی "متداول"تر نسبتاً یکسان هستند: نویز، سازه‌ی بستر دریا و اختلال در کشتی‌رانی این منطقه (ماهیگیری، قایقرانی و غیره).

### ۱۳-۴-۲-۲ اثر بالقوه در حین فاز عملیاتی

فاز عملیاتی حدود ۲۵ سال طول می‌کشد و ممکن است اثرات دائمی بر آن محیط داشته باشد. در اینجا ما نباید اثرات "مرسوم" کار یک مزرعه‌ی انرژی دریایی را تکرار کنیم و در عوض باید بر اثرات خاص راه‌اندازی نیروگاه OTEC تمرکز کنیم. نبود دانش کافی درباره‌ی اثر بالقوه از نبود بازخورد حاصل از تجربه و عمدتاً به لحاظ اثر خروجی آب سرد، اثر آکوستیک، اثر<sup>۱</sup> FAD، اثر بر ماهیان و غیره به وجود می‌آید.

همانند هر توسعه‌ی دیگری، نیاز است تا هر اثر مجزا مطابق معیارهای مختلف مشخص گردند: احتمال، مدت زمان (موقت، دائم)، شدت، مساحت اثر و حساسیت محیط‌زیست به آن اثر. این کار مستلزم انجام اندازه‌گیری، مدل‌سازی، ارزیابی و آزمایش است و خود آن گاهی هدف پژوهش علمی است.

### ۱۳-۴-۲-۱-۱ خروجی آب سرد

از نقطه نظر محیطی، این موضوع اصلی پژوهش است، زیرا این مسئله به‌طور هم‌زمان دینامیکی، حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی است که ارزیابی آن را دشوار می‌سازد.

<sup>۱</sup> FAD - وسیله‌ی جمع‌آوری ماهیان (ما شما را همچنان به اثر "صخره‌ی مصنوعی" ارجاع می‌دهیم).

آب سرد با ترکیب متفاوتی نسبت به آب سطحی، از اعماق پمپاژ می‌گردد. پس از عبور از سیستم انرژی نمی‌توان آن را در همان عمق خارج کرد، زیرا برق بیشتری نسبت به تولید نیروگاه مصرف خواهد کرد؛ بنابراین، آب در نزدیکی سطح، مابین ۱۰۰ و ۱۵۰ متر (زیر نوار نوری)<sup>۱</sup> خارج می‌شود و بهتر است راه‌هایی در نظر گرفته شود که در آن‌ها اثر آن بر محیط طبیعی محدود می‌گردد:

- از نقطه نظر حرارتی (آب در دمای  $8^{\circ}C$  به آب‌های گرم فرستاده می‌شود)؛

- از نقطه نظر فیزیکی-شیمیایی (آب خروجی دارای ترکیب متفاوتی نسبت به آب اطراف است).

تحلیل‌های انجام شده برای آب در ارتباط با مدل‌سازی عددی، برای مطالعه‌ی سرنوشت ستون خروجی آب و ارزیابی اثر محیطی آن خروج به کمک گروهی از متخصصان ضروری هست. این تحلیل‌های ضروری شامل پارامترهای زیر می‌شوند:

- پارامترهای فیزیکی: دما، شوری، مواد معلق، گل‌آلودی؛

- اسیدی بودن/کربنات‌ها/معدنی کردن:  $pH$ ،  $CO_2$  حل شده،  $AT$  (قلیاسنجی تیتراسیون)، قلیاسنجی کامل تیتراسیون، کلریدها،  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$ ؛

- ماده‌ی آلی قابل اکسیده کردن و مواد مغذی:  $O_2$  حل شده، سطح اشباع  $CO_2$ ،  $C$ ،  $N$ ،  $P$  و  $COT$ ،  $NH_4^+$ ،  $NO_2^-$ ،  $NO_3^-$ ،  $PO_4^{3-}$ ،  $CO_3^{2-}$ ،  $SO_4^{2-}$  در ذرات و ماده‌ی حل شده؛

- عناصر فلزی کمیاب:  $Cu$ ،  $Cr$ ،  $Cd$ ،  $Sn$ ،  $Hg$ ،  $Ni$ ،  $Pb$ ،  $Zn$ ،  $Fe$ ،  $As$ ،  $Li$ ؛

- بیولوژی: کلروفیل و فیوفتین.

به‌طور کلی می‌توان گفت که:

- در آب عمیق، مواد مغذی شور (که باعث تحریک تولید اولیه می‌شود)<sup>۱</sup> زیادی وجود دارد تا حدودی اسیدی‌تر است و  $CO_2$  وارد آن می‌شود و گاهی اوقات سطح فلزات کمیاب آن تغییر می‌کند؛

<sup>۱</sup> نوار نوری - عمق زیر سطح دریا که در آن نور به اندازه‌ی کافی برای انجام فتوسنتز کافی است.  
<sup>۱</sup> این توسعه‌ی زیست توده‌ی گیاهی ممکن است بر زنجیره‌ی غذایی تأثیر بگذارد (توسعه‌ی اکوسیستمی در اطراف خروجی).



- خروجی، نسبت به آب اطراف چگال تر است و در معرض فعالیت‌های مختلف قرار خواهد گرفت: سقوط نسبتاً سریع برای رسیدن به عمق تعادلی آن؛ انتشار (مکانیکی) و نفوذ (حرارتی) در حین این سقوط، برحسب جریان‌ها و تفاوت‌های دمایی و شوری محیط اطراف؛

- بنابراین، اثرات بالقوه عمدتاً به تأمین نمک‌های مغذی (در نوار نوری این امر به باروری مصنوعی منجر خواهد شد که به نفع توسعه‌ی پیتو پلانکتون‌ها است) و اسیدی کردن آب‌های زیر سطحی مربوط می‌شوند که برحسب سرنوشت ستون آب در یا خارج از منطقه‌ی مرجانی به کلسیم زدایی مرجان‌ها منجر می‌شود. از نظر فاکتورهای عمده‌ی محیطی، این دو نکته همچنان مورد بررسی می‌باشند و برخی از عدم قطعیت‌ها همچنان باید روشن‌سازی شوند.

#### ۱۳-۴-۲-۲ اثر آکوستیک و ارتعاش

کار کلی نیروگاه *OTEC* به ناچار در رابطه با تولید انرژی و ارتعاشات مربوط به نقاط مهار و به‌ویژه لوله نویز تولید خواهد کرد که ممکن است رفتار جانوران دریایی را مختل کند (عمدتاً پستانداران را به طرف خود بکشد یا بترساند).

در نبود تجربه هیچ داده یا بازخوردی از پروژه وجود ندارد که به ما امکان تعیین شدت و فرکانس این نویزها را بدهد یا این نویز ساطع شده را به‌صورت واقعی شبیه‌سازی کنیم. با این حال، این بخشی از اندیشه‌هایی است که امروزه توسط متخصصان مربوط به زمینه‌ی آن (کارشناس صدا و *Caetologists*) در حال انجام است.

به‌منظور ارتقای دانش ما درباره‌ی اثر نویز در این نوع پروژه، طراحان در حال در نظرگیری مجهز کردن این نیروگاه‌ها با میکروفن‌های زیر آبی هستند تا در حین عملیات، نویز را اندازه بگیرند و از آن به‌عنوان بازخورد استفاده خواهند کرد. این پژوهش با فرکانس‌های قابل درک برای پستانداران دریایی در منطقه‌ی مورد بحث انجام خواهد شد.

#### ۱۳-۴-۲-۳ اثر *FAD* (وسیله‌ی گردآوری ماهیان) یا اثر "صخره‌ی مصنوعی"

حضور نیروگاه *OTEC* در دریای آزاد اثر جانبی خواهد داشت: جانوران چسبیده (برزیانگان)<sup>۱</sup> بر روی بدنه و نقاط مهار گسترش خواهند یافت که این امر به توسعه‌ی اکوسیستم مجاور منجر

<sup>۱</sup> Epifauna

خواهد شد. این اثر ممکن است برای ماهیگیران (علی‌رغم منطقه‌ی ممنوعه در اطراف نیروگاه، ممکن است منطقه‌ای حاصل‌خیز توسعه یابد که منطقه‌ای گسترده‌تر را در بر بگیرد) یا ممکن است *FAD*ها در کاربرد تجاری نزدیک عدم تعادل مفید باشد.

تعیین اثر *FAD* همانند هر پروژه‌ی دریایی، قبل از احداث نیروگاه دشوار است، زیرا به پارامترهای بیشماری بستگی دارد: پارامترهای فیزیکی (دما، جریان و غیره)، بیولوژیکی (حضور گونه‌ها، مواد مغذی و غیره) و انسانی (ماهیگیری، فعالیت‌های دریایی و غیره)؛ بنابراین، نمی‌توان تنوع زیستی و توده زیستی اکوسیستم خلق شده را با اطمینان پیش‌بینی کرد. پتانسیل تداخل با *FAD*های موجود نیز باید در نظر گرفته شوند (اثر بر ماهیگیری).

#### ۱۳-۴-۲-۴ اثر وارده بر ماهیگیری

ممکن است نیروگاه *OTEC* اثر دوگانه بر ماهیگیری داشته باشد:

- منطقه‌ی ممنوعه برای کشتیرانی (منطقه‌ی ورود ممنوع در اطراف نیروگاه)؛

- اثر *FAD* بر نیروگاه که ممکن است بر اساس دیدگاه، مثبت یا منفی باشد.

به لحاظ قوانین، منطقه‌ی ورود ممنوع تعریف شده در اطراف نیروگاه *OTEC* برای تضمین ایمنی در دریا باید توسط درخواست دهندگان مطرح شود و توسط *DRAM* (دستورالعمل منطقه‌ای برای کارهای دریایی<sup>۱</sup>) و *CNL* (کمیسیون محلی دریایی<sup>۲</sup>) تأیید یا رد شود. مناطق ممنوعه بر اساس حرکت‌های جانبی سکو تعریف خواهند شد.

#### ۱۳-۴-۲-۳ اثرات وارده هنگام وقوع حوادث

اثرات حادثه‌ای به وقایع استثنائی عمده (برخورد با کشتی، خرابکاری و غیره) مربوط می‌شوند و احتمال وقوع آن‌ها بسیار کم است؛ در فاز طراحی، هر کار احتمالی برای جلوگیری از آن‌ها و تلاش برای برطرف کردن اثرات مخرب آن‌ها انجام می‌شود (برای مثال، تضمین اینکه هیچ نشستی به محیط دریایی وجود ندارد).

#### ۱۳-۴-۲-۴ اثر برچیدن

<sup>۱</sup> Direction Régionale des Affaires Maritimes

<sup>۲</sup> Commission Nautique Locale

برچیدن تأسیسات چندین دهه پس از عملیاتی شدن نیروگاه طول خواهد کشید؛ بنابراین، توصیف اثر بالقوه‌ی آن دشوار خواهد بود، زیرا هیچ راهی برای شناختن روش‌های کاری و وسایل مورد استفاده در آینده وجود ندارد.

علاوه بر اثر خود کار تخریب (نویز، اغتشاش و غیره)، یکی از اثرات مهمی که باید در نظر گرفته شود، تخریب اکوسیستم ساخته شده بر روی نیروگاه و لنگرهاست (مسلماً در طی چند سال موجوداتی در این نواحی ساکن شده‌اند). به‌طور متناقض، کار تخریب باید با اندازه‌گیری‌هایی همراه شود تا اثر باز گرداندن سایت به مکان اصلی خود را جبران کنیم. در حال حاضر، مطرح کردن پاسخی برای آن دشوار است، زیرا احتمالاً هنگامی که باید اجرا شود در هر صورت مانع خواهد بود (بر اساس اکوسیستمی که توسعه می‌دهد و تکامل فناوری‌هایی که ممکن است برای کار برچیدن یا پاسخ‌های موقت قابل اعمال باشند).

### ۱۳-۴-۳ چهارچوب کاری قانونی که باید تقویت شود

قوانین بسیاری ممکن است اعمال شود و فرآیندها و پرونده‌های اجرایی مورد نیاز برای پروژه را تعریف کنند. لیست زیر به هیچ وجه جامع نیست، اما بخش‌های اصلی قانونی را ارائه می‌دهد که ممکن است بر ایجاد پرونده‌های تحقیق عمومی که باید قبل از هر پروژه‌ی OTEC فراهم شوند، اثر بگذارد.

از نظر نبود علم حقوقی در این زمینه، چهارچوب کاری قانونی OTEC همچنان باید تعریف گردد. به‌علاوه، قوانین به سایت تأسیسات بستگی دارند. در اینجا یک مثال برای پروژه‌ای در مناطق برون مرزی فرانسه در نظر گرفته شده است اما نمی‌توان خارج از آن یا حتی در کشورهای مستعمره‌ی خارج از فرانسه اعمال کرد، زیرا نکات خاص محلی دارند که باید مد نظر قرار گیرند.

### ۱۳-۴-۱-۳ قوانین مربوط به سازمان‌های طبقه‌بندی‌شده برای حفاظت محیط‌زیست (ICPEها)

همچنان عدم قطعیت مهمی باقی می‌ماند: آیا تأسیسات OTEC تحت قوانین ICPE قرار خواهد گرفت؟ اگر چنین شود، بخش‌های قابل اعمال به سیال کاری، وابسته خواهند بود. در مورد تأسیسات تحت مجوز ICPE، پروژه به انجام مطالعه‌ی اثر و ارزیابی خطر و همچنین تحقیق عمومی نیاز دارد.

## ۱۳-۴-۳ قوانین مربوط به آب

اگر تأسیسات *OTEC*، *ICPE* نباشد به یک سند وقوع نیاز دارد (که ممکن است جایگزین مطالعه‌ی اثر شود). بخش‌هایی وجود دارد که قابل اعمال بر پروژه می‌باشند.

موضوع	مورد جهت اظهار	موضوع جهت تأیید
۲. خروجی		
۲-۲-۲-۰- خروجی در دریا	ظرفیت < ۱۰۰,۰۰۰ مترمکعب بر روز	
۴. تأثیرات بر روی محیط زیست دریایی		
۴-۱-۲-۰- تمامی ساخت و سازها در بندر و سایر فعالیت‌هایی که با محیط زیست دریا در ارتباط هستند.	هزینه < €۱۶۰,۰۰۰	هزینه < €۱,۹۰۰,۰۰۰

جدول ۱۳-۵ بخش‌های قابل اعمال از لحاظ قوانین آبی

اگر پروژ دارای مجوز باشد، همان‌طور که مانند تأسیسات *OTEC* از نظر مقدار کار وارده است، پروژه با تحقیق عمومی همراه می‌شود.

## ۱۳-۴-۳ قوانین مربوط به حفاظت از طبیعت

در هر مورد، تأسیسات *OTEC* به انجام ارزیابی اثر نیاز دارد، به‌ویژه اگر قرار باشد که هزینه‌های کاری بیشتر از ۱.۹ میلیون یورو باشد (بخش‌های دیگر قانون نیز ممکن است وارد عمل شود).

۱۳-۴-۳-۴ درخواست اشغال فضا در محدوده‌ی عمومی دریا (*PMD*)

سیستم *OTEC* به درخواستی برای اشغال فضا در *PMD* نیاز دارد. به‌طور قابل توجه، این کار شامل توصیف شرایط برچیدن نیروگاه و بازگرداندن سایت به حالت اصلی خود در انتهای طول عمر نیروگاه هست. این درخواست تحت تحقیق عمومی قرار می‌گیرد.

### ۱۳-۴-۴ تفکرات

بررسی سایت و بررسی اثر مورد نیاز برای نیروگاه *OTEC* که قرار است نصب شود مستلزم انجام پژوهش دقیق مهندسی است و باید با استفاده از اندازه‌گیری، مدل‌سازی، آزمایش و ارزیابی در زمینه‌های چند انتظامی برخورد شود (برای مثال، آکوستیک، شیمی، بیولوژی و غیره).

علاوه بر مطالعات مقدماتی، وسایل نظارت محیطی نصب شده در نیروگاه‌های اولیه عملیاتی به تهیه‌ی بازخورد کمک خواهد کرد که این برای درک پدیده‌های کاری و همچنین برای بررسی اثر بالقوه‌ی استخراج *OTEC* در مقیاس جهانی ضروری است (ترکیب اثر چندین نیروگاه مختلف).

صرف نظر از سایت انتخاب شده، پروژه‌ی *OTEC* در مناطق خارج از فرانسه به درخواستی برای مجوز ساخت تأسیسات روی خشکی و ارائه‌ی پرونده‌ای برای تحقیق عمومی مجوز اشغال فضا در آب و همچنین مجوز عملیات نیروگاه نیاز خواهد داشت (برخی از بخش‌های مختلف قانون درخواست تحقیق عمومی را می‌دهد اما در واقعیت این‌ها تماماً برای ساده‌سازی روند باهم ترکیب می‌شوند).

این نکات همچنان باید در سطح ملی (حتی در سطح بین‌المللی، به لحاظ قوانین مربوط به نوع سکو و استانداردهای فنی برای آن) تأیید یا تصریح شوند: چه کسی می‌داند که چه زمانی قوانین مختص *OTEC* ارائه خواهند شد؟

### ۱۳-۵ نتیجه‌گیری

شرکت *DCNS* با در دست داشتن تجربه‌ی حاصل از پروژه‌های قبلی و ظرفیت پرداختن به پروژه‌های پیچیده، بر غلبه بر چالش‌های فنی اصلی (*CWP*، سیستم انرژی، چرخه، مبدل‌های سیال) و انسجام کلی پروژه‌های خود تمرکز کرده است.

همچنین *DCNS* به انتخاب نیروگاه آزمایشی فراساحلی مایل هست که با استفاده از چرخه‌ی بسته ظرفیت آن  $10-20\text{ MW}$  است و برای اثبات صرف اقتصادی تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با در نظرگیری اینکه فرانسه دارای سایت‌هایی هست که برای نصب اولین نیروگاه آزمایشی (مارتینیک، تاهیتی، ریونیون و غیره) دارای مزیت هست، یکی از این سایت‌های می‌تواند اولین *JWh* خود را از اوایل ۲۰۱۶ تولید کند.

## ۱۳-۶ کتابشناسی

- [ED 969] INRS, ED 969, *Les fluides frigorigènes, Technical Notes*, 2005.
- [NOR 98] NORMES FRANÇAISES (French Standards), *Froid – Classification et propriétés des fluides frigorigènes*, no. FD E 35-430, May 1998.
- [NOR 00] NORMES FRANÇAISES (French Standards), *Systèmes de réfrigération et pompes à chaleur – exigences de sécurité et d’environnement – Partie 1: Exigences de base, définitions, classification et critères de choix*, no. NBN EN 378-1, October 2000.



## سیستم‌های تبدیل برق

### ۱-۱۴ تاریخچه

اگرچه در گذشته راه‌حل‌های تبدیل انرژی پیش‌بینی شده‌اند، اما در آینده روش‌های بیشتری به دست خواهند آمد. در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، پیدایش تریتورها باعث تحولات بیشتری علاوه بر ایجاد سیستم‌های تبدیل پیشرفته‌ای که ما در اختیار داریم شد - به ویژه به ماشین‌های سنکرون با محرک اینورتورها منجر گشت: تأسیسات مشخصی با توان زیاد در اواسط دهه-۱۹۷۰ عملیاتی شدند و همچنان امروزه نیز عملیاتی هستند.

دهه‌ی ۱۹۸۰ با ورود قطعاتی به بازار که می‌توان با کنترل مسدودسازی ولتاژ را ایجاد کرد، شاهد توسعه‌ی منبع با ولتاژ زیاد بودیم: ابتدا *GTO*ها (تریتورهای خاموش شوند با گیت) و سپس *IGBT*ها (تریتورهای دو قطبی با گیت بسته). این قطعات، به ویژه *IGBT*ها (که نسبت آن‌ها در مقایسه با *GTO* ساده‌تر است)، پاسخ‌های ساده و ارزانی برای تأمین دارند: شکست کم در جریان (بنابراین تنها تلفات کمی در دمپرها یا قفسه‌ها رخ می‌دهد) و تأمین توان راکتیو برای ماشین‌های القایی.

با شروع دهه‌ی ۱۹۹۰، در سیستم‌های کنترلی راه‌حل‌های احتمالی توسط مدولاسیون پهنای پالس (*PMW*) ولتاژ (به ویژه برای کنترل شار و گشتاور ماشین‌های القایی) در نظر گرفته شده است.

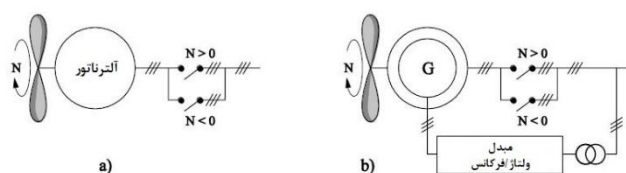
امروزه، پاسخ‌های تبدیلی بسیاری وجود دارد و مشکلات اصلی که طراحان با آن‌ها مواجه هستند شامل انتخاب بهترین‌ها، هم به لحاظ فنی و مالی است (بهترین ژنراتور، بهترین مبدل-ها، بهترین شرط توان تزریق شده به شبکه‌های توزیع)، با علم بر اینکه جمع مقادیر بهینه



همیشه معادل پاسخ کلی بهینه نیست. پاراگراف‌های زیر شامل نظراتی (به صورت موردی) درباره‌ی پاسخ‌های محتمل است.

## ۱۴-۲ حقایق کلی

استفاده از انرژی دریایی پدیده‌ای تازه نیست: حتی در آغاز قرن ۱۲م، آسیاب‌های جزر و مدی در سواحل بریتانی یافت می‌شدند. با این حال، اولین کاربرد پیشرفته از این انرژی به ۱۹۶۷ بر می‌گردد، هنگامی که نیروگاه برق جزر و مدی رنس عملیاتی شد: ۱۲ گروه حبایی با ظرفیت  $24\text{MW}$  برای هر کدام، یعنی توان کلی  $240\text{MW}$  در دسترس شبکه‌ی برق بریتانی، دو بار در روز مطابق جزر و مدها. علی‌رغم اشکالات نیروگاه رنس برای اکوسیستم، این تأسیسات همچنان عملیاتی است و تعدادی از پروژه‌های بزرگ و قوی‌تر در طی چند سال بعدی در کانادا ایجاد خواهند شد: خلیج فاندی (میان نیو برونزویک و نوا اسکوشیا)، جزیره‌ی ونکوور (بریتیش کلمبیا) و سنت لورنت (کبک). این تأسیسات قبلی به لحاظ الکترونیکی آلترناتورهای مرسوم با سرعت ثابت می‌باشند. برای به نتیجه رسیدن این نوع تأسیسات، با فرض به نتیجه رسیدن آن‌ها، ممکن است مانند نیروگاه رنس و همچنین مانند آلترناتورهای سرعت-متغیر، همچون آن‌هایی که با ژنراتورهای القایی دو تغذیه‌ای ( $DFIG$ ها) به کار می‌روند، متعارف باشند.



شکل ۱۴-۱ اولین پاسخ‌های قابل تصور

پاسخ  $A$ ) متعارف‌تر می‌باشد، ژنراتور سنکرون با تحریک سیم‌پیچ: تحریک ماشین به تنظیم ولتاژ و در نتیجه توان راکتیو منجر می‌شود، نرخ جریان و/یا جهت‌گیری پره‌ها، زاویه‌ی داخلی ماشین و در نتیجه توان اکتیو انتقالی به شبکه را کنترل می‌کنند. واضح است که بر اساس جهت چرخش، بسیار مهم است که درجه‌ی فازهای ماشین را اصلاح کرد.

پاسخ  $B$ ) کمتر متعارف است، ژنراتور القایی با دو تغذیه: از مبدل "کوچک" فرکانسی استفاده می‌کند (بخشی از توان استاتوری). ژنراتور یک ماشین القایی با سیم‌پیچ روتور است. در این رژیم، ممکن است سرعت متغیر باشد و فرکانس استاتیک ثابت و برابر فرکانس شبکه باشد. در حقیقت، مبدل ولتاژ/فرکانس کم و بیش سرعت چرخش میدان چرخشی را متعادل می‌کند: در سرعت سنکرون، مبدل جریان و ولتاژ را با مقادیر ثابت به روتور انتقال خواهد داد. در ژنراتور، هنگامی که سرعت کمتر از سرعت سنکرون باشد (مادون سنکرون)، مبدل، توان را به روتور

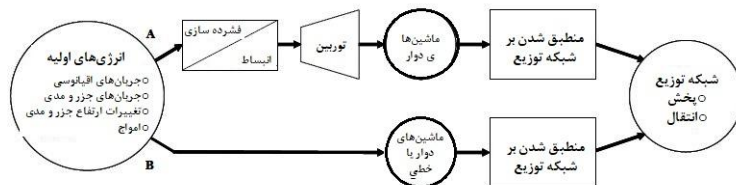
توزیع می‌کند؛ هنگامی که سرعت بیشتر باشد (فراسنکرون) توان را گرفته و به شبکه تزریق می‌کند. توجه کنید که:

- تغییر کمی در سرعت (حدود  $\pm 20\%$  از سرعت سنکرون) باعث بهینه‌سازی تبدیل می‌شود (نرخ جریان/توربین)؛
- ابعاد مبدل "کوچک" روتور متناسب با تفاوت پوشش داده شده‌ی سرعت است؛
- حالت فراسنکرون بیشتر مورد توجه می‌باشد، زیرا در این مورد، روتور و استاتور به شبکه برق می‌رسانند؛
- آلترناتور متعارف دارای دمپرهایی می‌باشد. پاسخ دو تغذیه‌ای هیچ دمپری ندارد و بنابراین مزیت بسیار دینامیکی بودن را دارد؛ برای مشکلات در پایداری شبکه‌های انتقال، دارای پاسخ‌های جالبی می‌باشد.

اشکال عمده‌ی این پاسخ در حضور جاروبک‌ها و حلقه‌های مورد نیاز برای تغذیه‌ی روتور قرار گرفته است.

این پاسخ که تنها در موارد کمی در گذشته استفاده شده است به طور گسترده در زمینه‌ی انرژی بادی توسعه یافته است. در دهه‌ی گذشته بسیاری از ماشین‌های با توان بالا ( $P > 100 MW$ )، به ویژه برای اتصال شبکه‌های آسنکرون ساخته شده‌اند (آمریکای شمالی).

پاسخ‌های که امروزه برای استخراج انرژی دریایی در نظر گرفته شده‌اند، بیشتر به واحدهای با توان کم (حدود  $1 MW$ ) نسبت به تأسیسات بزرگ با ظرفیت چند صد مگاوات که اغلب باعث ایجاد مشکلاتی برای اکوسیستم‌ها می‌شوند، گرایش دارند.

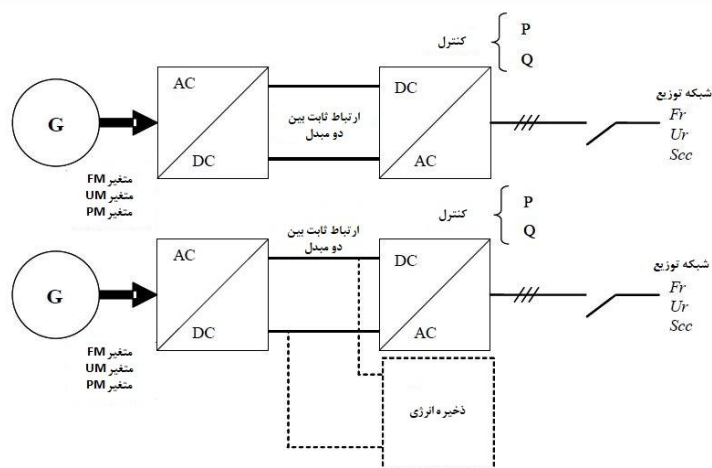


شکل ۱۴-۲ ساختار کلی: الف) تعیین انرژی اولیه قبل از تبدیل آن به برق (تراکم سیال)؛ ب) تبدیل الکتریکی

مستقیم

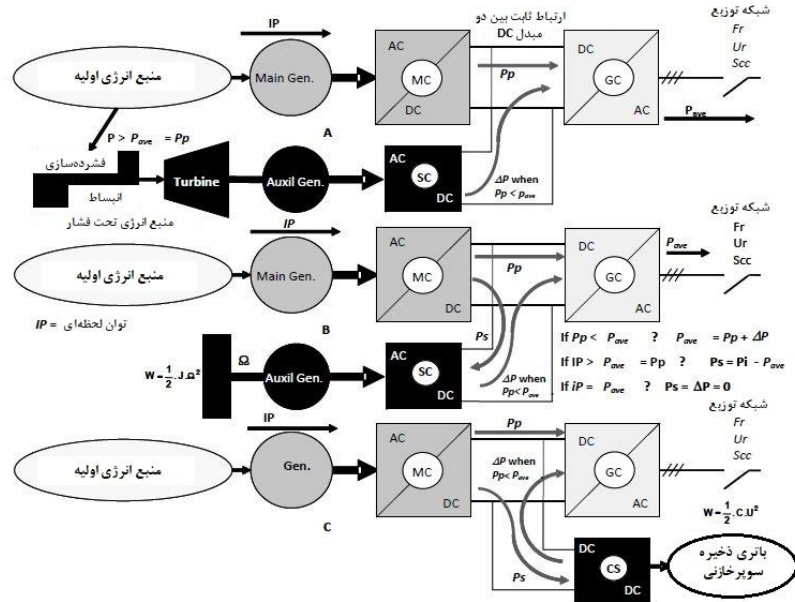
تعدادی از پاسخ‌های موجود برای تولید انرژی اولیه از جریان و امواج اقیانوسی برای شبکه‌های برق در دسترس می‌باشند. در شکل ۱۴-۲ دو دسته از پاسخ‌های محتمل نشان داده شده‌اند. پاسخ A که به عنوان غیر مستقیم شناخته می‌شود، انرژی را از طریق تراکم تعیین نگه می‌دارد تا سرعت ماشین در حال چرخش را بهبود ببخشد. در این مورد، می‌توان نسبتاً به راحتی آن را با شبکه و گاز فشرده، به طور کلی از طریق رابط سیالی (عملگرهای اولئوپنوماتیکی) سازگار

کرد که شامل وسایل ذخیره‌سازی می‌شوند و نقش اساسی در انرژی اولیه همچون امواج دریافتی توسط مکانیزم نوسانی دارند. پاسخ  $B$  که به عنوان مستقیم شناخته می‌شود، دارای ارتباط مستقیمی میان ماشین الکتریکی و دریافت کننده‌ی انرژی اولیه است - پروانه یا شناور توسط امواج به حرکت در می‌آید. به طور آشکار، در این مورد کار تبدیل به الکتریسیته دشوارتر است اما بازده کلی بهتر است. به علاوه اگر ذخیره‌سازی ضروری باشد، باید بخشی از کارهای مورد نیاز انطباق با شبکه را شکل دهد.



شکل ۱۴-۳ قاعده‌ی کلی تبدیل

قاعده‌ی کلی تبدیل در شکل ۱۴-۳ نشان داده شده است. در آغاز تبدیل یک ژنراتور  $AC$  قرار دارد (سنکرون یا القایی) که مقداری از توان متغیر با انرژی اولیه‌ی فرکانس و ولتاژ متغیر را انتقال می‌دهد.



شکل ۱۴-۴ انواع پاسخهای مربوط به ذخیره سازی (A, B و C از بالا به پایین)

برای در دسترس قرار دادن این انرژی در شبکه به انطباق فرکانس/ولتاژ نیاز است که توسط تبدیل  $AC/DC/AC$  انجام می شود. امروزه مبدل های مورد استفاده  $PWM$  (مدولاسیون پهنای پالس) در ولتاژ می باشند. کارکرد هر کدام از این مبدل های  $PWM$  مطابق ذیل می باشد:

- مبدل سمت ماشین: کارکرد اصلی آن مسلماً تبدیل توان ماشین و بهینه سازی استخراج انرژی، کنترل گشتاور و/یا سرعت در بهترین راه ممکن برای تغذیه ی باس  $DC$  است. با این حال، کاربردهای ثانویه ای دارد که برای عملیات و طراحی فنی-اقتصادی ماشین و مبدل اهمیت کمتری ندارند. این کاربردها برای محدود کردن ولتاژ و در مورد با سرعت بسیار زیاد، گشتاور یا در حقیقت توان می باشند.

- مبدل سمت شبکه: دو سناریوی تأمین شبکه ی موجود یا سلطه بر شبکه ی بسته را می توان برای آن فرض کرد. در مورد دوم، فرکانس در مقدار تنظیمی خود ثابت نگه داشته می شود و ولتاژ در حدود تجهیزات تنظیم می شود ( $P$  و  $Q$ ). برای تأمین شبکه ی موجود، مجموعه باید قادر به عمل به عنوان یک آلترناتور برای شبکه باشد. در محدوده ی قطعات نصب شده، توان اکتیو منتقل شده به شبکه همانند توان اکتیو در محدوده ی مقرر شده تنظیم می شوند، تا پایداری شبکه بهتر شود.

- گاهی اوقات ذخیره سازی ضروری می باشد. اگر انرژی اولیه از جریان های اقیانوسی حاصل شود، نیاز به استفاده از ذخیره سازی در این انرژی حداقل است و انرژی قابل پیش بینی می باشد.

تنها به تأمین انرژی در نبود جریان‌های جزر و مدی نیاز خواهد بود - به عنوان مثال، در آب ساکن. در این مورد، به چندین ساعت ذخیره‌سازی نیاز است که غیر منطقی می‌باشد. اگرچه ممکن است به مقدار مشخصی از ذخیره‌سازی به دلایل مربوط به نقش ماشین در افزایش جریان‌های خطای شبکه نیاز باشد. در این مورد، به ۵-۱۰ برابر توان ماشین برای چند ده ثانیه نیاز است. اگر انرژی اولیه از امواج حاصل شود، ممکن است تأمین انرژی با دوره‌ی تناوب امواج نوسان کند که در آن مورد به میزان مشخصی از ذخیره‌سازی برای تضمین پیوستگی منبع توان نیاز است: به ظرفیت ذخیره‌سازی دست کم ۱۰ ثانیه احتیاج است.

### ۱۴-۲-۱ تحلیل پاسخ‌های تبدیل

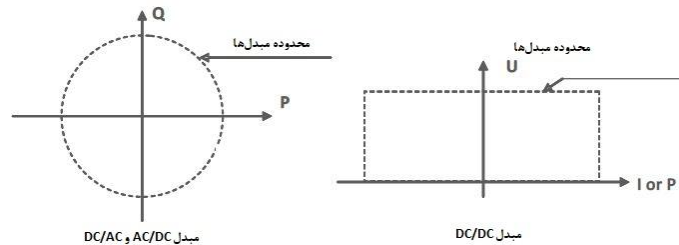
پاسخ  $A$ ، ذخیره‌سازی و تنها ذخیره‌سازی برخلاف قسمت  $A$  از شکل ۱۴-۴ با تراکم انجام می‌شود. تراکم و در نتیجه ذخیره‌سازی تنها هنگامی اتفاق می‌افتد که توان اولیه در مقایسه با توان میانگین مورد نیاز شبکه بیشتر باشد. ژنراتور کمکی توسط توربین یا ژنراتور اصلی در حال چرخش نگه داشته می‌شود. هنگامی که توان اولیه در مقایسه با تقاضای شبکه کمتر باشد، ژنراتور کمکی بر اساس دسترسی انرژی ذخیره شده توسط تراکم، مقدار مازاد را فراهم می‌کند.

- پاسخ  $B$ ، ذخیره‌ی اینرسی. تفاوت میان توان موجود و توان میانگین مورد نیاز شبکه برای انتقال به ماشین (ترجیحاً مورد سریع‌تر) استفاده می‌شود که باعث ایجاد اینرسی می‌گردد. از  $SC$  (مبدل ذخیره‌سازی) برای تغذیه‌ی ژنراتور کمکی استفاده می‌شود که به عنوان موتور عمل می‌کند. انرژی حداکثر ذخیره شده به ازای سرعت  $OM$  به دست می‌آید؛ هنگامی که به این سرعت برسد، تنظیم می‌شود - کل انرژی ژنراتور اصلی که از  $MC$  (مبدل ماشین) عبور می‌کند به شبکه ارسال می‌شود. اگر توان اولیه بیشتر از توان میانگین باشد،  $MC$  آن را کنترل می‌کند. هنگامی که توان اولیه کم باشد، انرژی جنبشی چرخشی ذخیره، مقدار مازاد را فراهم می‌کند.

- پاسخ  $C$ ، ذخیره‌ی الکتروشیمیایی. طرز کار آن به طور کلی با پاسخ  $B$  یکسان است. مزیت بزرگ این پاسخ استاتیکی بودن آن است که به معنای نیاز کمتر به نگهداری است اما طول عمر آن محدود است.

پاسخ  $B$  با در نظرگیری جامعیت توسعه داده شده است و عملاً درست می‌باشد اما اجرای آن به ویژه برای وسایل شناوری که توسط امواج به حرکت در می‌آیند (اثر ژيروسکوپ)، دشوار است. پاسخ  $C$  به ویژه با ظرفیت عالی خود مناسب‌ترین پاسخ برای صنعت است.

مبدل‌های الکترونیکی اشاره شده،  $AC/DC$ ، در فضای  $PQ$  برای چهار ربع می‌باشند. تبدیل  $DC/DC$  پیشنهادی برای ذخیره‌ی الکتروشیمیایی، به لحاظ جریان و در نتیجه توان برگشت-پذیر است (شکل ۱۴-۵).



شکل ۱۴-۵ ریح های کاری

### ۱۴-۲-۲ شرایط شبکه ها

#### ۱۴-۲-۲-۱ دسترسی به انرژی یا در نبود آن، قابل پیش بینی بودن آن

اکثر کشورها با مشکلاتی در گذراندن روزهای بحرانی مشخصی در سال رو برو هستند که باعث می شود آن ها با استفاده از سوخت های فسیلی (گاز، نفت) نیروگاه های برقی نصب کنند که به دوره های پیک کمک کند - نیروگاه هایی که پرهزینه هستند زیرا همیشه باید آماده به خدمت نگه داشته شوند، حتی هنگامی که از آن ها در چند روز بحرانی سال استفاده نشود. کنترل اکثر وسایل مهم تولید آسان نمی باشد - این گفته به ویژه در نیروگاه های برق هسته ای و تا حدود کمی هیدرو الکتریکی صادق است. نیروگاه های پمپاژ نیز در نظر گرفته شده اند (به عنوان مثال، مونتزیک در مسیف مرکزی، چیلاس در منطقه ی گرنوبل و غیره)، که در زمان مصرف کم به عنوان پمپ و در زمان تقاضای زیاد به عنوان توربین کار می کند اما این ذخیره سازی به کمیابی سایت هایی که برای این هدف مناسب هستند و همچنین به نتایج اکولوژی تغییر روزانه ی سطح دریاچه ها محدود شده است. داشتن دسترسی به منبع برق کمکی قابل توجه برای مدیران شبکه ضروری می باشد. همچنان باید این انرژی کافی باشد تا بازده مطلوب را انتقال دهد. ما می توانیم بگوییم که در فرانسه تقریباً ۸۰٪ از منبع انرژی هسته ای و ۱۲٪ آن هیدرو الکتریکی است و مابقی آن میان انرژی زغالی، نفتی، بادی و واردات توزیع می شود. سهم انرژی بادی مابین ۱٪ و ۲٪ متغیر می باشد که همچنان کوچک است. این منبع انرژی علاوه بر اینکه چند کاره است، پیش بینی آن دشوار بوده و در نتیجه استفاده از آن در سطوح بالا دشوار است (کشورهای مشخصی در شمال اروپا نسبت به فرانسه منبع انرژی بادی بیشتری دارند). انرژی های دیگر که از دریا نشأت می گیرند، به ویژه آن هایی که توسط جریان های جزر و مدی تولید می شوند، قابل پیش بینی بوده و احتمالاً در سطح ۳-۱۰٪ برای مدیران شبکه مورد توجه می باشند. این گفته به طور کامل منطقی است - برآورد شده است که می توان منبع سالانه  $25TWh$  از سایت های ساحل آتلانتیک فرانسه استخراج کرد (راز بلانچارد، پاس دو فروموئور و غیره).

#### ۱۴-۲-۲-۲ پایداری انرژی تولیدی

در حقیقت، ما در اینجا نوسانات کند و سریع برق را بررسی خواهیم کرد. با نوسانات سریع (مابین  $1\text{ Hz}$  و  $20\text{ Hz}$ )، احتمالاً جریان قطع و وصل شدن شود (تغییرات کم ولتاژ در  $10\text{ Hz}$ )، حدود  $0.1\%$  [COU 99a]. این نوع اختلال تحت قوانین شدید قرار دارد. نوسانات کم برق، حدود یک دقیقه، برای تنظیم شبکه‌ها نگران‌کننده می‌باشند: واضح است که در اینجا مقادیر توان زیاد شبکه مورد بحث می‌باشند. بنابراین مهم است که در سطح مزارع تولیدی، توان را یکنواخت یا مدیریت کرد و در نتیجه فراوانی مقادیر توان فراهم‌شده توسط ژنراتورهای مختلف را در نظر گرفت. به عنوان مثال، برای توربین‌های جریان جزر و مدی ما باید تفاوت زمانی میان جزر و مدها را در نظر بگیریم (میان یوشانت و دانکریک یک شکاف ۳۰ دقیقه‌ای وجود دارد). با در نظرگیری اینکه در این روش، "شکاف توان" در جزر و مد زیاد یا کم حدود دو ساعت است، ۳۰ دقیقه زیاد نمی‌باشد. با این حال، مقدار مشخصی از تولید در طول ۲۰ ساعت از روز در دسترس است که برای انرژی بادی چنین نیست. البته نوساناتی در دامنه‌ی جزر و مدها وجود دارد اما در توربین‌ها با محرک جریان‌های جزر و مدی می‌توان آن‌ها را پیش‌بینی و مدیریت کرد.

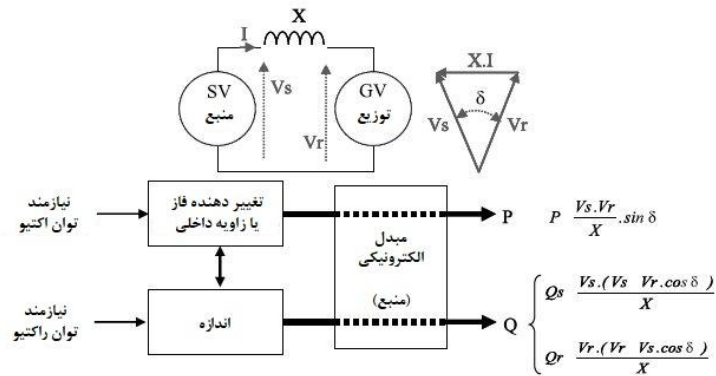
#### ۱۴-۲-۲-۳ کنترل گرادیان‌های توان

مقدار گرادیان‌های توان که در ابتدا به توان منابع - توربین‌های بادی و جریان جزر و مدی - و در ثانی به ظرفیت توان شبکه‌های واصل مربوط می‌شوند. به لحاظ جامعیت، ما باید به طبیعت ژنراتورهایی که این شبکه‌ها را تغذیه می‌کنند، نیز اشاره کنیم. نمی‌توان گرادیان‌ها را بدون اشاره به تغییرات فرکانس و ولتاژ تعریف کرد. هنگامی که توان به شبکه‌ی پایدار تزریق شود، در جایی که توان مصرفی برابر توان تولیدی است، توان منابعی که از قبل موجود می‌باشند باید به منظور اجتناب از سرج توان یا ناپایداری کاهش داده شود (انواع مختلفی از ناپایداری، به ویژه نوسانات مادون سنکرون وجود دارد [CRA 03b]: اگر  $1\text{ MW}$  به شبکه‌ی  $1\text{ GW}$  تزریق گردد، به هیچ گرادیبانی نیاز نیست اما اگر  $200$  یا  $300\text{ MW}$  تزریق شود، افزایش توان آنی نخواهد بود. اگر منشاء منبع از پیش موجود هسته‌ای باشد، برای واکنش به  $10$ ،  $20$ ،  $30$  (...) دقیقه و اگر حرارتی یا هیدرو الکتریکی باشد به چند دقیقه نیاز خواهد داشت. در رابطه با توان راکتیو، تأخیر زمانی بسیار کمتر است: تنها مسئله‌ی آن مدیریت جریان تحریک آلترناتورها است [CRA 03a,b].

کنترل گرادیان های توان اکتیو و راکتیو برای پایداری شبکه ها ضروری است. بنابراین، مقادیر تابعی از توان ژنراتورها، شبکه و ماهیت تولید هستند.

#### ۱۴-۲-۲-۴ پایداری در ولتاژ

تأمین و دریافت توان راکتیو، توابع مورد نیاز می باشند. در مورد آلترناتورهای شبکه، ضریبها توانی تحریک را مشخص می کنند. در مورد منبع استاتیکی، توان راکتیو با استفاده از دامنه ی ولتاژها (و توان اکتیو با استفاده از فاز، روشی مشابه زاویه ی داخلی برای آلترناتورها استفاده می شود) کنترل می شود: توان ظاهری عاملی ضروری در طراحی است.



شکل ۱۴-۶ تبادل توان میان منبع و شبکه. این فرمول های واقعی بعداً با جزئیات بیشتری بررسی خواهند شد  
[GYU 00]

به طور کلی شبکه ها توان راکتیو را دریافت می کنند - بنابراین باید قادر به تولید مقدار ثابتی از آن باشند، همانطور که اینکار با استفاده از آلترناتورهای شبکه قابل انجام است. با این حال، در این نوع تولید در دریا ممکن است طول عظیمی از کابل های خازنی به کار رود و در نتیجه باعث تولید طبیعی توان راکتیو شود که ممکن است بر تأسیسات تأثیر بگذارد: مبدل های مختلف شبکه ی مزرعه باید نقش خود را بازی کرده و احتمالاً بتوانند توان راکتیو را جذب کنند.

#### ۱۴-۲-۲-۵ کیفیت ولتاژ

قبل از اتصال یک یا چند توربین جریان جزر و مدی، کیفیت ولتاژ تغییر نمی کند و با استانداردهای معتبر مطابقت دارد. پس از اتصال، کیفیت ولتاژ در جهت گسترده تری باید در بازه ی استانداردهای اعمالی شبکه های توزیع و انتقال باقی بماند. جریان های تولیدی توسط تجهیزات تولید دریایی نباید شامل هارمونیک منظم یا نامنظم و یا میان-هارمونیک باشد که

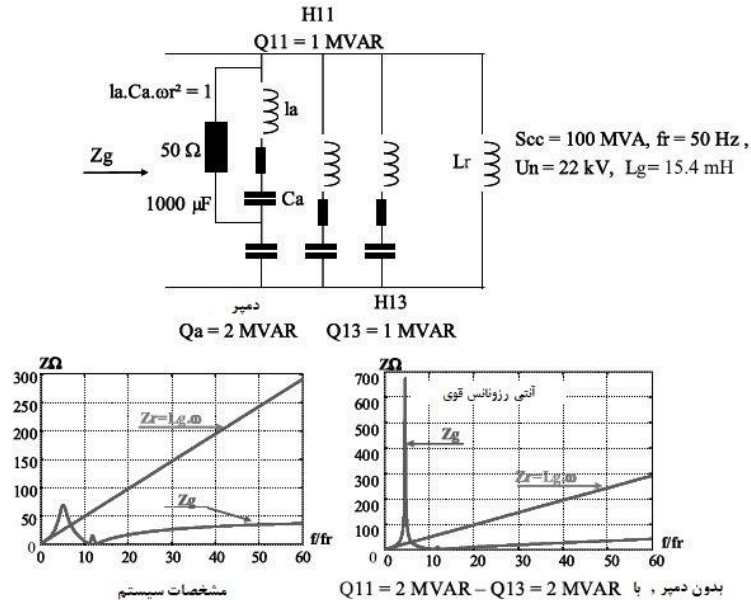


احتمالاً بر کیفیت ولتاژ تأثیر خواهند گذاشت. تقریباً تمامی مبدل‌های توان الکترونیکی، جریان هارمونیک تولید می‌کنند (حتی یک پل دیودی سه فاز هارمونیک ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و غیره تولید می‌کند). مبدل‌های کموتاسیون مورد استفاده در این مورد، از این واقعیت فیزیکی مستثنی نیستند، حتی اگر فرکانس‌های آن‌ها اساساً بالاتر باشد. بنابراین، ما باید از یک طرف دانش کاملی از هارمونیک تولیدی و از طرف دیگر دانش خوبی از شبکه‌ای داشته باشیم که ماشین‌ها یا مزرعه به آن وصل خواهند شد. در حقیقت، ما باید با منحنی امپدانس شبکه به عنوان تابعی از فرکانس  $Z = f(g)$  آشنا باشیم. ضرب  $ZIh$  (که در آن  $Ih$  دامنه‌ی مرتبه‌ی هارمونیک جریان مورد نظر است) به ما می‌گوید که آیا هارمونیک خطرناک است یا نه و احتمالاً از قوانین تبعیت نکند. این نوع محاسبات آسان نمی‌باشد:

- قطعاً مقدار پایه برابر جریان اتصال کوتاه ( $SCC$ ) در نقطه‌ی اتصال است. این جریان اتصال کوتاه بر حسب چیدمان شبکه تغییر می‌کند؛

- ممکن است در شبکه تعدیل رخ دهد (خازن) و ضد تشدید وجود داشته باشد که از آن‌ها حاصل می‌شوند. همچنین ممکن است فیلترها یا دمپ‌هایی (این مورد رایج نبوده و نسبتاً مطوب است) وجود داشته باشد. البته تمامی این عناصر شبکه در منحنی  $Z = f(g)$  قابل رویت می‌باشند. به شکل ۱۴-۷ مراجعه کنید؛

- به طور کلی توان نقطه‌ی اتصال توسط ترانسفورماتور فراهم می‌شود (ولتاژ اتصال کوتاه،  $Ucc$  حدود ۱۰٪). از طریق خط یا کابلی به این ترانسفورماتور ولتاژ متوسط یا بالا فرستاده می‌شود. خطوط و کابل‌ها نیز دارای رزونانس می‌باشند که باید در نظر گرفته شود. رزونانس خطوط و کابل‌ها به طور کلی مابین رده‌های ۵۰ و ۱۰۰ قرار دارد اما دمپ آن‌ها کم است که مستلزم مقدار مشخصی دقت است: حتی جریان‌های هارمونیک بسیار کم نیز ممکن است باعث ایجاد ولتاژ اضافی شوند. این خطر در این مورد قابل توجه نمی‌باشد، زیرا از قبل باید اقدامات احتیاطی در نظر گرفته شود چرا که توان توربین‌های جریان جزر و مدی و مبدل‌های انرژی موجی از کابل‌های میان ماشین‌ها و شبکه عبور می‌کند.



شکل ۱۴-۷ نمونه‌ای از ساختار فیلترسازی ( $Lr$ ) بیانگر ضریب القای شبکه در نقطه‌ی مورد بحث است)

#### ۱۴-۲-۲-۶ شارژ تغذیه‌ای

ممکن است شبکه‌ی انتقال تغذیه شود که در این مورد شارژ به صورت واضح قابل شناسایی نمی‌باشد. ممکن است شبکه‌ی توزیع تغذیه شود که در این مورد ما باید قبول کنیم که تا حدودی جریان نامتعادل است یا در آن مولفه‌ی منفی حضور دارد (افزایش اندازه‌ی قطعات مبدل‌ها). ما همچنین تغذیه‌ی تنها فرآیندهایی را می‌توانیم در نظر بگیریم که در آن‌ها احتمال ترمز وجود دارد - با برنامه و مدت زمان مشخص. ما می‌توانیم به عنوان مثال به نیروگاه‌های نمک‌زدا و احتمالاً نیروگاه‌های تولید هیدروژن اشاره کنیم.

#### ۱۴-۲-۲-۷ حفاظت

همانند هر آلترناتور در شبکه، این منابع فراساحلی باید بتوانند در حین دوره‌های گذار از شبکه‌ها پشتیبانی کنند یا به جریان‌های معیوب کمک کنند. این جریان‌ها به رژیم‌های گذرا در طول ۱۰۰ الی ۵۰۰ms مربوط می‌شوند. برای تجهیزات الکترونیکی مرسوم این مورد به صورت حرارتی ناچیز است اما برای IGBTها یا IEGTها (ترانزیستورهای گیت‌دار با تزریق تقویت-شده) ثوابت زمانی کوچک می‌باشند و این نکته اغلب به لحاظ طراحی حائز اهمیت می‌باشد. اولین ژنراتورهای توربین‌های بادی ماشین‌های القایی تعادلی بودند. پشتیبانی از شبکه در هنگام شکست همانند بازگشت به توان تولیدی کار دشواری بوده است، زیرا بسیار زمان‌بر بوده و اغلب

با نیازهای شبکه ناسازگار می‌باشد. بنابراین، منابع به شدت متغیر توان راکتیو (برای ده یا بیست توربین) - جبران‌سازهای سنکرون استاتیکی<sup>۱</sup> - باید معرفی شوند [GYU 00]. امروزه اکثریت توربین‌های بادی که به تازگی طراحی گشته‌اند مطابق شکل ۱۴.۱ و شکل ۱۴-۳ از تبدیل استفاده می‌کنند که می‌توانند وضعیت‌های خرابی را بسیار بهتر مدیریت کنند.

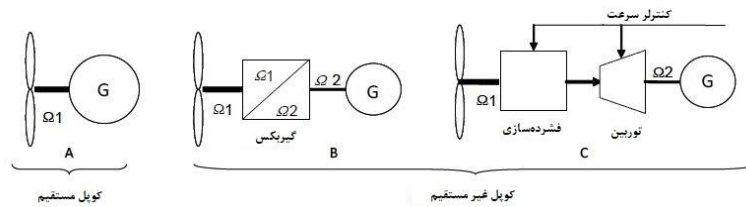
۱۴-۲-۳ ماشین‌ها و تبدیلات مربوطه

توان این ماشین‌ها به طور کلی مابین  $300\text{ kW}$  و  $1\text{ MW}$  قرار دارد. بیست سال پیش، توان توربین‌های بادی در این بازه بود؛ امروزه بزرگترین توربین‌های بادی دارای خروجی توان حدوداً  $5\text{ MW}$  می‌باشند. توربین‌های جریان جزر و مدی مبدل‌های انرژی موجی می‌توانند مسیر تحول مشابهی در طی دهه‌های بعدی طی کنند. در هر صورت، در چهارچوب کاری این فصل،  $1\text{ MW}$  یا  $5\text{ MW}$  به پاسخ‌های یکسان منجر می‌شوند. اولین دسته‌بندی که باید در گروه پاسخ‌های محتمل انجام شود، تمایز میان انتقالات مستقیم و انتقالات غیرمستقیم یا سرعت‌های کم و سرعت‌های زیاد است.

با محرک مستقیم، ژنراتور ( $G$ ) در مورد توربین‌های جریان جزر و مدی به صورت مستقیم به پروانه، یا در مورد مبدل‌های انرژی موجی به کلکتور انرژی موجی (به عنوان مثال، چرخ آونگی) متصل می‌گردد. بهینه‌سازی پروانه یا چرخ مستلزم دانستن سرعت‌های چرخشی (یا خطی) است. با دانستن سرعت‌های حداقل، متوسط و حداکثر (نسبت به جریان‌های جزر و مدی یا امواج) ما می‌توانیم موارد زیر را انتخاب کنیم:

- $A$  - محرک مستقیم. بنابراین ما ماشینی نسبتاً بزرگ با قطب‌های زیاد خواهیم داشت؛
- $B$  - محرک غیرمستقیم. می‌توان ماشین را با استفاده از جعبه‌دنده به منظور کاهش قطبیت ماشین (۴-۸ قطب) بهینه‌سازی کرد. ژنراتور  $B$  نسبت به ژنراتور  $A$  کوچک‌تر است اما حضور جعبه‌دنده به لحاظ وزن، قابلیت اطمینان، خطر محیطی (نفت) و غیره نامناسب است؛
- $C$  - محرک غیرمستقیم با ذخیره‌ی مستقیم توسط تراکم. این پاسخ در حقیقت با وجود پروانه استفاده نمی‌شود و تنها برای سیستم‌ها و سازه‌های نوسانی مورد توجه است که می‌توانند تحت امواج تغییر شکل پیدا کنند که به تراکم مربوط به حرکت یا تغییر شکل منجر می‌شود. بهینه‌سازی سرعت ژنراتور غیرقابل بحث‌ترین نکته است، زیرا با عمل در فشار ذخیره و/یا در توربین مرتبط، ما می‌توانیم سرعت و در نتیجه فرکانس ژنراتور را تنظیم کنیم. با این حال، اتصال غیرمستقیم این ژنراتور به شبکه به آسانی آنچه که به نظر می‌رسد نیست: برای فرکانس و فاز، عنصر محرک توربین است که متعارف می‌باشد اما اگر هیچ مبدل الکترونیکی وجود نداشته باشد به منظور تنظیم ولتاژ به یک ماشین سنکرون با تحریک قابل تنظیم نیاز است.

<sup>1</sup> Statcoms



شکل ۱۴-۸ روابط میان ژنراتورها / توربین های بادی یا آبی

سرعت و قطبیت بر فرکانس ژنراتورها تأثیر دارند. برای بهینه سازی مبدل استاتیکی به فرکانس مشخصی نیاز است. می توان این مبدل ها را با انواع مختلفی از قطعات - عمدتاً *IGBT* ها یا *IEGT* ها در نظر گرفت. این ها تماماً به یک دسته تعلق دارند. بگذارید متذکر شویم که *IGBT* در جابجایی (کموتاسیون) تلفات کم و در هدایت تلفات زیادی دارد؛ برعکس این موضوع در *IEGT* صادق است. به علاوه، ممکن است از آن ها به شکل بسته های تخت یا پرسی استفاده کرد (به شکل های ۹-۱۴ و ۱۴-۷۱ مراجعه نمایید).

فناوری شناخته شده به عنوان بسته ی تخت، مرسوم ترین و پرکاربردترین مورد می باشد (هزینه - ی کمتر و اجرای آسان تر). تنها خنک سازی سطحی آن و فنآوری داخلی باعث می شود که این قطعه به نوسانات تلفات حساس باشد که باعث گردش حرارتی می شوند. به سبب ثوات زمانی - حرارتی داخلی ما به پیری زود رس تا فرکانس  $15\text{Hz}$  اشاره می کنیم - بنابراین توان باید به منظور برآورد طول عمر رضایت بخش کاهش داده شود. بسته های پرسی، همانند تریستورها در هر دو سطح خنک می شوند و فنآوری آن ها بهتر است. با این حال، اجرای آن ها پیچیده می - باشد: درون بدنه ۱۰ یا ۱۲ *IGBT* یا مجموعه ی *IEGT* دیود وجود دارد که باید به روش یکنواخت پرس شده و خنک شوند. این کار به سیستم های تراکم و خنک سازی منجر می شود که بسیار پیچیده و حساس می باشند. بسته های پرسی می توانند نسبت به بسته های تخت، گردش حرارتی را بهتر تحمل کنند.

شکل ۱۴-۹ *IGBT* و *IGET*، فنآوری دو بدنه ای

بنابراین، به دلایل قابلیت اطمینان، برای ماشین‌های محرک مستقیم ما به دنبال جفت سرعت/قطبیت هستیم که احتمالاً بتواند فرکانس میانگین مابین ۲۰ تا ۳۰ Hz را انتقال دهد. برای ماشین‌های غیرمستقیم، ما به دنبال فرکانس کمینه کمتر از ۱۰۰ Hz می‌باشیم (این حد با فرکانس کلیدزنی PWM توجیه می‌شود که باید در محدوده‌ی ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ Hz قرار گیرد (به منظور محدود کردن تلفات کموتاسیون)).

#### ۱۴-۲-۳-۱ ماشین‌ها

به طور کلی، احتمال دو نوع ماشین وجود دارد: ماشین‌های خود القایی<sup>۱</sup> (موتورهای سنکرون مرسوم با سلف سیم‌پیچ یا ژنراتورهای سنکرون با مغناطیس دائم  $PMMSG$ ها) و ماشین‌های شار القایی (ژنراتورهای القایی).

#### ۱۴-۲-۳-۱-۱ ماشین‌های خود القایی

- ماشین‌های سنکرون با روتور سیم‌پیچ ( $WRSM$ ها) متعارف بوده، شناخته‌شده می‌باشند و در سرعت متغیر به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند (فرکانس متغیر)، در صنعت برای فن‌های بزرگ، پروانه‌های بزرگ کشتی، دستگاه نورد و البته توربین‌های بادی و غیره به کار می‌روند. تضعیف شبکه در سرعت‌های زیاد (بیشتر از سرعت اسمی) توسط کار مستقیم در جریان تحریک راحت‌تر می‌شود. با این حال، تحریک شامل داشت منبع،  $DC$  یا  $AC$  می‌شود تا بتوان جریان تحریک را کنترل کرد. دو پاسخ محتمل می‌باشد: وسایل مرسوم تغذیه‌ی روتور با جاروبک‌ها و حلقه‌ها یا بدون ژنراتور القایی و رکتیفایر چرخشی (این پاسخی است که با کاربردهای بزرگ اشاره‌شده در بالا، به غیر از دستگاه‌های نورد به دلایل مربوط به دینامیک عملیاتی، استفاده شده است):

- پاسخ جاروبک و حلقه. برای وسایل تولید مستقل با نگهداری کم، داشتن جاروبک‌ها باعث ایجاد مشکلات بزرگ می‌شود،

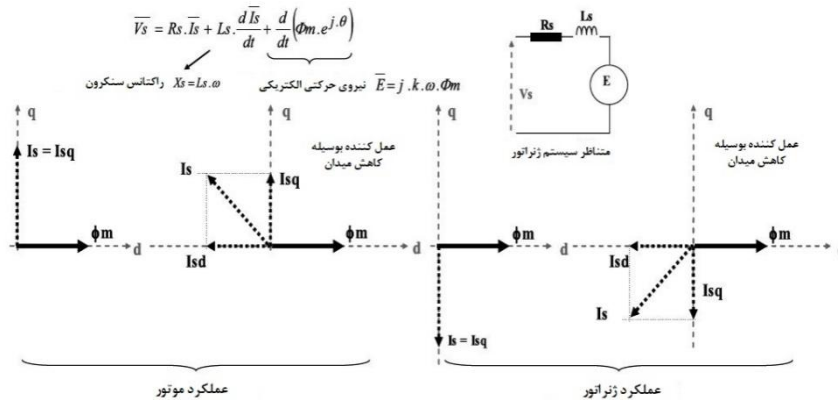
- پاسخ ژنراتور القایی. این پاسخ ممکن است هنگامی که هیچگاه جهت چرخش عوض نشود، کاملاً مناسب باشد؛ از طرف دیگر، ممکن است انتخاب قطبیت ژنراتور باعث مردود شدن عملیات شود. اگرچه واضح است که این ژنراتور معلق از شفت مشابه در ماشین سنکرون، فضای سیستم تبدیل را افزایش می‌دهد؛

- ژنراتورهای سنکرون با مغناطیس دائم ( $PMMSG$ ها). این فناوری در توان زیاد نسبتاً تازه است (بیشتر از چند  $MW$ ). ممکن است از ماشین‌های سنکرون در فرکانس تطبیق (آلترناتورها یا

<sup>۱</sup> Self-fluxing machines

جبران سازها) استفاده شود؛ به طور کلی ماشین های مغناطیسی به تبدیل استاتیکی مربوط می-شوند. توسعهی آن ها به الکترونیک توان مرتبط است و کمتر از سی سال گذشته شروع شده است. کاربرد رایج این ماشین ها در پروانه های کشتی های سطحی و زیر آبی ها است؛ آن ها به طور فزاینده ای در توربین های بادی مورد استفاده قرار می گیرند. به طور آشکار با وجود آهن-رباها، تضعیف میدان باعث بروز مشکلاتی می شود اما با طراحی مناسب این کار محتمل است و در کاربردهای بسیاری ضرورت ندارند (به ویژه در توربین های بادی و توربین های جریان جزر و مدی).

شار شکاف هوایی  $\Phi_m$  را نمی توان تنظیم کرد اما می توانیم به ازای سرعت یکسان ولتاژ را در حدود ماشین وارد کنیم و با عمل در جریان استاتیکی  $I_s$ ، واکنشی آرمیچری تولید کنیم. در حقیقت، ما می توانیم جریانی منفی در محور  $d$  تولید کنیم (در مقابل  $\Phi_m$ ).



شکل ۱۴-۱۰ تضعیف میدان [PMSG/VAS 98]

تضعیف میدان یا محدودیت ولتاژ به ازای سرعت های زیاد عمدتاً به نگرانی مالی مربوط می شود: در مورد ماشین مسئله عایق کاری است؛ در مورد مبدل مسئله طراحی قطعات مختلف ( $IGBT$  ها، خازن ها) در ولتاژ است. بنابراین، هنگامی که ماشین با سرعت های بیشتر از سرعت پایه در حال چرخش باشد حتی اگر تقاضا برای برق به صفر برسد، ما باید قادر به کنترل ولتاژ و در نتیجه تولید جریان منفی  $I_d$  باشیم. این موضوع بزرگ ترین محدودیت ماشین های با مغناطیس دائم است. این دلیلی است که چرا کارکرد تضعیف میدان می تواند برای اجرا در مبدل های انرژی موجی مشخصی دشوار باشد.

اگرچه مزیت های بسیاری برای ماشین های مغناطیسی وجود دارد:

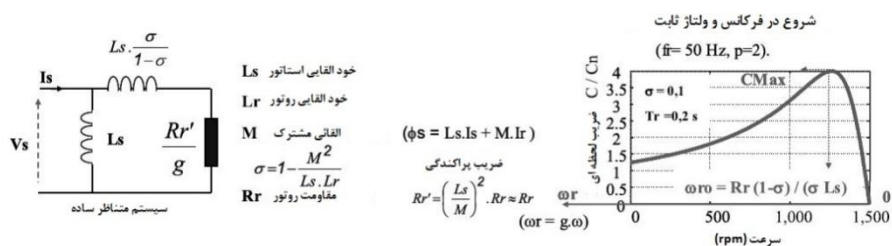
- ماشین ها خودکار بوده و محرک ندارند - به محض اینکه به حرکت در بیایند می توانند انرژی تولید کنند؛

- آن‌ها نسبت به ماشین‌های مرسوم بسیار فشرده‌تر هستند؛
- گشتاور اتصال کوتاه آن‌ها کم است؛
- با این حال، آن‌ها صرف نظر از اینکه چه نوع آهن‌رباهایی استفاده شود (ساماریم-کبالت یا نئودیم آهن بور) نسبتاً پرهزینه هستند و برای فشرده‌گی به عناصر کمیاب زمینی نیاز دارند.

#### ۱۴-۲-۳-۱-۲ ماشین‌های شار القایی

ماشین‌های القایی قفسه‌ای پرکاربردترین مورد برای توان مابین چند وات تا  $5MW$  می‌باشند. آن‌ها ساده، قوی و جذاب می‌باشند، اما شار درستی ندارند. این از طریق منبع آن‌ها، شبکه یا مبدل فرکانس تأمین می‌گردد؛ بنابراین برای آن‌ها باید توان راکتیو فراهم شود. تضعیف میدان در محدوده‌های مجاز از نظر پارامترهای الکتریکی ماشین محتمل می‌باشد.

در شکل ۱۴-۱۱ برخی از پارامترهای مهم بررسی شده‌اند و منحنی مرسوم گشتاور به عنوان تابعی از سرعت با هدف معرفی گشتاور حداکثر در هنگام شروع در ولتاژ و فرکانس ثابت، نشان داده شده است. گشتاور حداکثر نسبت به مربع شار توسعه یافته است. اگر ما تابع سرعت را به ازای سرعت‌های بیشتر از سرعت پایه در نظر بگیریم، در ولتاژ استاتوری ثابت، گشتاور قابل استفاده در  $I/\Omega$  (توان ثابت) کاهش پیدا می‌کند، در حالیکه گشتاور حداکثر با  $I/\Omega^2$  کاهش پیدا می‌کند. محدوده‌ی عملیاتی  $\Omega L$  هنگامی به دست می‌آید که گشتاور حداکثر و گشتاور اسمی قابل استفاده برابر باشند:  $\Omega L = \Omega n Cmax/Cn$  (به منظور انعطاف‌پذیری، نسبت  $\Omega L / \Omega n$  با  $S$  نشان داده شده است).



شکل ۱۴-۱۱ ماشین القایی: مشخصات الکتریکی و منحنی گشتاور به عنوان تابعی از سرعت یا پالس جریان‌های روتوری (با شار استاتوری ثابت)

ماشین‌های القایی مرسوم دارای انعطاف‌پذیری ۳-۴ می‌باشند که به راحتی با کاربردهای دفع-کننده<sup>۱</sup> سازگار هستند.

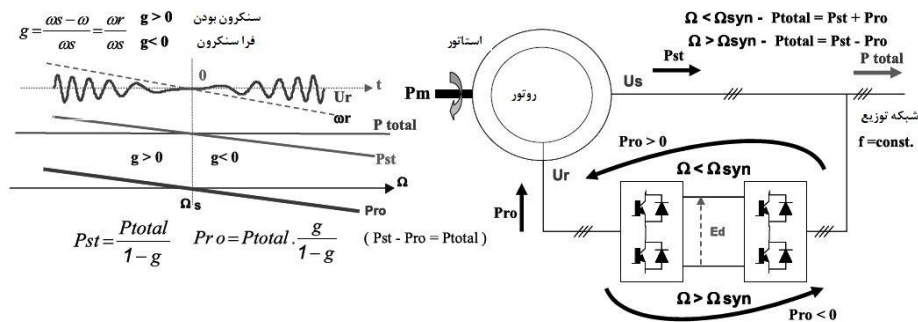
<sup>۱</sup> Defluxing

ماشین های القایی با روتور سیم پیچ: در اینجا ما از ژنراتورهای دو تغذیه ای صحبت خواهیم کرد. مزیت این پاسخ در کاهش ابعاد وسایل الکترونیکی توان قرار گرفته است. اساساً از آن برای تغییرات سرعت  $\pm 20\%$  در اطراف فرکانس سنکرون (همگام) استفاده می شود: بنابراین، توان مطابق با اندازه ی مبدل روتوری کاهش پیدا می کند. بنابراین این مبدل می تواند از طریق روتور، توان راکتیو مورد نیاز مغناطیسی کردن ماشین و شبکه را فراهم کند.

$$C = \frac{3p}{4} \varphi_s^2 \frac{1-\sigma}{\sigma L_s} \sin(2\phi_2) \quad \text{with} \quad \text{tg}(\phi_2) = \frac{\sigma L_s \omega_r}{R_r(1-\sigma)}$$

$$C_{Max} = \frac{3p}{4} \varphi_s^2 \frac{1-\sigma}{\sigma L_s} \quad (14-1)$$

از این پاسخ به صورت گسترده در توربین های بادی استفاده می شود. برای اینکار به جعبه دنده نیاز است تا به قطبیت های مطلوب (۴، ۶ یا ۸ قطب) دست پیدا کرد. بنابراین، این یک پاسخ با "سرعت زیاد" است. سرعت های کم نسبت به سرعت سنکرون (لغزش زیاد) ولتاژ روتوری را به گونه ای تغییر می دهند که اندازه ی مبدل دیگر مورد توجه نمی باشد. بنابراین واضح است که این ماشین ممکن است برای توربین های جریان جزر و مدی دارای مزیت هایی باشد اما هیچ مزیتی برای مبدل های انرژی موجی مستقیم ندارد که به سرعت متغیر نیاز دارند، در نتیجه از صفر عبور می کنند.



شکل ۱۴-۱۲ ژنراتور القایی دو تغذیه ای

این ماشین همانند ماشین القایی ساخته شده است و در دامنه و فرکانس متغیر تحریک می شود. فرکانس استاتور آن ثابت است؛ پالس میدان روتوری توسط تحریک در مقادری برابر با فرکانس شبکه ی منبع نگه داشته می شود. در رابطه با آلترناتور سنکرون مرسوم، این ماشین دارای مزیت دینامیکی زیاد می باشد (تغییرات سریع  $P$  و  $Q$  محتمل، به شرط اینکه سیستم کنترلی عملکرد بالایی داشته باشد)، زیرا دارای دمپر می باشد. این ماشین القایی با تحریک در فرکانس متغیر، در حقیقت به ماشین سنکرون تعمیم یافته تبدیل می شود.



مهمترین اشکال آن به این حقیقت مربوط می‌شود که روتور توسط جاروبک‌ها و حلقه‌ها تغذیه می‌شود. مسئله‌ی دشوار دیگر خود را در شکاف هوایی کوچک بروز می‌دهد. (برای ماشین‌های قفسه‌ای نیز صادق است) و این امر عمدتاً در مبدل‌های انرژی موجی رخ می‌دهد که با حرکت آن‌ها با امواج در معرض ارتعاشات و شوک قرار می‌گیرند.

در جدول ۱۴-۱ ماشین‌های مختلف اشاره شده با هم مقایسه می‌گردند

ژنراتور القایی با دو تغذیه (DFIG)	ژنراتور القایی قفسه‌ای	ژنراتور با رلوکتانس متغیر	ژنراتور سنکرون تبدیلی روتور حلقه لغزان	ژنراتور آهنربا دائم سنکرون	
<i>Gearbox</i> -	<i>Gearbox</i> -	--	-	++	فشرده سازی
-	-	+++ بدون در نظر گرفتن فاصله هوایی	-	++	مقاوم بودن
<i>I</i>	<i>0.86</i>	<i>0.8</i>	<i>I</i>	<i>0.95</i>	<i>cos φ</i>
+	-	-	++	++	انطباق با مبدل
++	-	--	+++	-	کاربرد در توزیع برق ایزوله
%۹۵	%۹۳	%۹۴	%۹۱	%۹۳	راندمان

جدول ۱۴-۱ دسته‌بندی کیفی ماشین‌ها

ژنراتورهای مقاومت مغناطیس متغیر دارای ساختارهای الکترومغناطیسی بسیار متفاوتی می‌باشند. با ساده‌سازی وضعیت، ما می‌توانیم به دو دسته اشاره کنیم: مقاومت مغناطیسی متغیر به اصطلاح سنکرون که همانند ماشین‌های سنکرون برانگیخته تغذیه می‌شوند و ژنراتورهای (استاتوری و روتوری) برجسته<sup>۱</sup> که در عوض در جریان‌های غیرمستقیم برای آندولاتورها<sup>۲</sup> در پل‌های نصفه نامتقارن تغذیه می‌شوند. اگرچه روتور دارای مغناطیس‌های دائم و یا سیم‌پیچ‌های

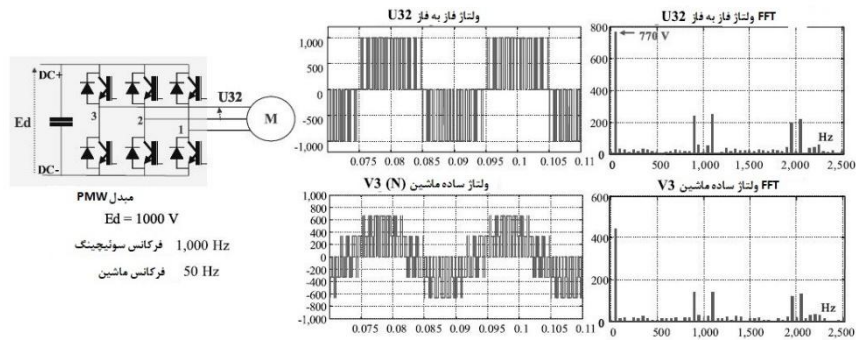
<sup>۱</sup> Doubly-salient

<sup>۲</sup> Ondulators

تحریک نمی‌باشد، اما مادامی که آن‌ها توسط آندولاتور مغناطیسی شوند که برای آن‌ها توان راکتیو را فراهم می‌کند (همانند ماشین‌های القایی) می‌توان از آن‌ها در حالت ژنراتوری استفاده کرد. هنگامی که تغییرات در ضریب القای صحیح آن‌ها زیاد باشد، عملکرد آن‌ها حتی بهتر می‌شود. ساختار آن‌ها ساده است (روتور دندانه‌ای بدون هیچ رسانا یا آهن‌ربایی) اما به جرم بیشتری نسبت به ماشین‌های سنکرون برانگیخته نیاز دارند تا عملکردهای یکسانی داشته باشند. ماشین‌های برجسته باعث می‌شوند تا بتوان به راحتی تعداد زیادی قطب داشت و محرک مستقیم با سرعت پایین را در نظر بگیریم، اما شکاف هوایی آن‌ها باید در مقایسه با گام قطبی کوچک باشد، زیرا ممکن است هنگامی که تنش مکانیکی زیاد باشد باعث ایجاد مشکلاتی شوند.

#### ۱۴-۲-۳-۲ تغذیه‌ی ماشین‌ها

در تمامی موارد با سرعت متغیر، آن‌ها توسط مبدل‌های  $PWM$  تغذیه می‌شوند. در شکل ۱۴-۱۲ شکل‌های موج ولتاژ نشان داده شده است که در پایانه‌های ماشین‌ها رایج می‌باشند. مبدل سه فاز مورد استفاده در این مثال متعارف می‌باشد. ولتاژ  $1000V$   $DC$  احتمالاً ولتاژ پایه و نظری حداکثر در ماشین  $707V_{rms}$  ولتاژ فاز به فاز را تولید کند (مادامی که رده‌ی سوم هارمونیک  $15\%$  در کنترل‌های  $PWM$  وجود داشته باشد).



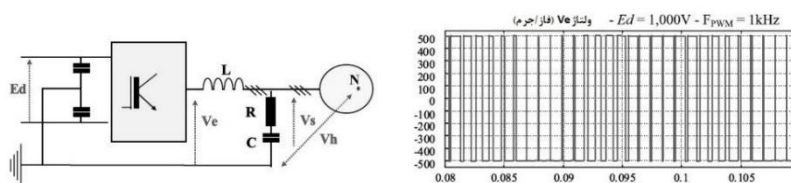
شکل ۱۴-۱۳ ولتاژهای ماشین

بنابراین، در محدوده‌های ماشین، یک سری از جبهه‌های صلب در فرکانس کلیدزنی وجود دارد (در اینجا  $1000Hz$ ) که عامل تحریک فرکانس‌های صحیح و در نتیجه ولتاژ اضافی در سیم‌پیچ است و باعث ایجاد جریان‌های خازنی میان رساناها و میان رساناها و جرم می‌شود که بر سیستم‌های عایق کاری تأثیر خواهد گذاشت. کموتاسیون  $IGBT$ ها  $dV/dt$ های با حدود  $V/\mu s$   $4000$  تولید می‌کند. استانداردهای مبتنی بر تجربه‌ی سازندگان ماشین‌ها نشان می‌دهد که

بیشترین مقدار قابل قبول  $dV/dT$  ها برای طول عمر مناسب عایق کاری حدود  $500 V/\mu s$  است و بنابراین نیاز فیلترسازی است.

#### ۱۴-۲-۳-۱ فیلترسازی ولتاژ ماشین

ما می‌توانیم فیلتر کامل را که به عنوان فیلتر "سینوسی" شناخته شده است، در نظر بگیریم اما انجام این کار پرهزینه و دشوار خواهد بود و در فرکانس متغیر کار خواهد کرد و برای کنترل اندازه‌ها به در نظرگیری آن نیاز خواهد بود. بنابراین، ما تنها این نکته‌ی اساسی را در نظر می‌گیریم که به محدودیت  $dV/dt$ s اعمالی میان فازهای ماشین و مسلماً جرم مرتبط است. ساختار نشان داده شده در شکل ۱۴-۱۴، رایج‌ترین ساختار می‌باشد: ما در اینجا از فیلتر  $dV/dT$  یا دمپر صحبت می‌کنیم.



شکل ۱۴-۱۴ فیلتر  $dV/dT$

به منظور متقارن کردن محدودیت‌های ولتاژ، در نقطه‌ی وسط حلقه‌ی پیوسته قرار دارد که در معرض جرم قرار دارد. این کار همچنین به بهبود سازگاری الکترومغناطیسی مجموعه‌ی ماشین/مبدل کمک می‌کند.

تنها با در نظر گرفتن فیلتر، یعنی با چشم‌پوشی از اثر ماشین، ما می‌توانیم عبارت زیر را بنویسیم:

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{I}{LC} \frac{I + RCs}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{I}{LC}} = \omega n^2 \frac{1 + \frac{2z}{\omega n}}{s^2 + 2z \omega n s + \omega n^2}$$

که در آن  $V_e$  بیانگر گام است. بگذارید ما به طور خلاصه قرار دهیم  $V_e = \Delta V$  و از بار خازن صرف نظر کنیم:



$$\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c \approx \Delta V \cdot \frac{R}{L}, \text{ hence } 2z \omega n = \frac{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c}{\Delta V} \quad \text{and} \quad \omega n = \frac{1}{2z} \frac{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c}{\Delta V} \quad \text{ergo}$$

$$\frac{Vs}{Ve} = \left[ \frac{1}{2z} \frac{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c}{\Delta V} \right]^2 \frac{1 + 4z \frac{\Delta V}{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c} s}{s^2 + \frac{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c}{\Delta V} s + \left[ \frac{1}{2z} \frac{\left[ \frac{dVs}{dt} \right]_c}{\Delta V} \right]^2} \quad (14-2)$$

این فرمول ساده و ترکیبی به ما امکان می دهد تا مجموعه ی پارامترها را پیش بینی کنیم.  
مثال طراحی:

-  $L$  باید کوچک باشد تا افت قابل توجهی در ولتاژ برای فرکانس پایه تولید نشود: به طور کلی این مقدار به ۲٪ ولتاژ اسمی برای جریان اسمی محدود شده است؛  
- برای ماشین القایی  $1MW$ :

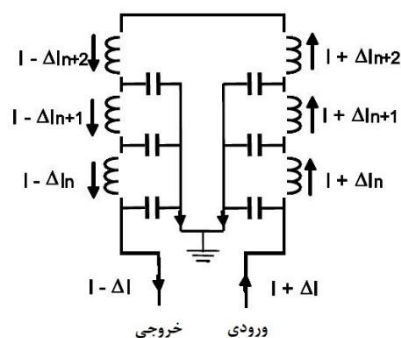
$Usn = 700V$ ,  $Cos \phi n = 0.91$ ,  $Fn = 20Hz$ ,  $Id = 7Isn$  (جریان داخلی مستقیم در شبکه)  $Iso = 0.3Isn$  (نبود بار یا جریان مغناطیسی) و  $\eta = 0.93$ . ولتاژ منبع پیوسته مبدل های  $Ed$  برابر  $1000V$  است و فرکانس قطع  $(PWM)$   $1000 Hz, fh$  است:

- از این نکته پیروی می کند که جریان اسمی برابر  $975 A$  بوده، ضریب القایی نشت  $mH$   $0.47$  است و بنابراین ما ضریب القای فیلتر را برابر با  $L = 10\mu H$  در نظر می گیریم،  
- اگر ما امیدوار باشیم که  $dV/dT$  به  $500 V/\mu s$  محدود شود به یک مقاومت  $5 \Omega$  به صورت سری با خازن نیاز خواهیم داشت. ما دمپ  $Z$  به اندازه ی ۱ را انتخاب می کنیم (تا ولتاژ اضافی تولید نشود) و بنابراین محاسبه ی خود پالس  $\omega n = 250krad / s$  است و از آن ما مقدار خازن  $C = 10\mu F$  را نتیجه می گیریم،  
- با دانستن  $C$  و شکل ولتاژ، به راحتی تلفات مقاومت دمپ با استفاده از فرمول  $P = CE d^2 fh$  محاسبه می گردد. ما به  $1.6kW$  دست پیدا می کنیم یا برای کل فیلتر سه فاز  $4.8kW$  را نتیجه می گیریم.  
مقادیر قطعات عدم ارتباط امیدانس ماشین را توجیه می کند.

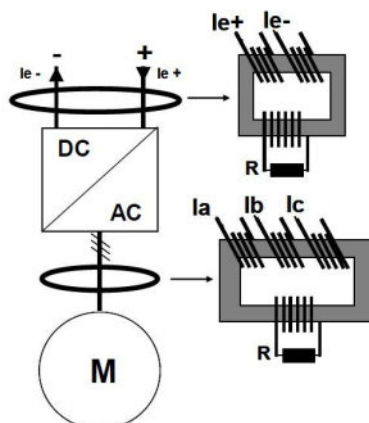
#### ۱۴-۲-۳-۲ جریان های تکیه گاهی

برای ماشین هایی که به صورت مرسوم توسط شبکه تغذیه می شوند، طراحان مدت زیادی است که چیدمان های تعداد قطب ها/تعداد شیارها را شناخته اند که باعث می شود یاتاقان ها توسط

جریان‌های مداری دچار اختلال نشوند [SMI 02; LIP 98]. به علاوه، اغلب پیشنهاد می‌شود که یاتاقان‌ها عایق‌کاری شوند. با این حال، منابع فرکانس متغیر (*PWM*) مدارهای جریانی تازه-ای را در فرکانس کلیدزنی یا چند تا از آن وارد کرده است. برای این فرکانس‌های زیاد، عایق‌کاری یاتاقان‌ها اهمیت ندارد. همچنین یک مانع خازنی وجود دارد؛ بنابراین هنگامی که فرکانس زیاد باشد این پاسخ حتی کارآیی کمتری خواهد داشت. این مسئله دشوار بوده و تنها شامل ماشین‌ها نمی‌شود، بلکه شامل تمامی سیم‌پیچ‌های در معرض محدودیت‌های فرکانسی می‌شود (ترانسفورماتورها و سلف‌ها). به منظور اینکه این موضوع را به طور کامل درک کنیم ضروری است که تمامی سیم‌پیچ‌های خطی را در ثوابت زمانی توزیع شده تلفیق کرد.



شکل ۱۴-۱۵ سطح مقطع سیم‌پیچ



شکل ۱۴-۱۶ رشته‌ی صفر<sup>۱</sup> یا بالانس هسته‌ای *CT*

در شکل ۱۴-۱۵ تصویر ساده‌ای از سطح مقطع سیم‌پیچ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Zero sequence

ما برای سه فاز، عبارات زیر را نتیجه می گیریم:

$$\sum I = [(Ia + \Delta Ia) - (Ia - \Delta Ia)] + [(Ib + \Delta Iab) - (Ib - \Delta Ib)] + [(Ic + \Delta Ic) - (Ic - \Delta Ic)]$$

$$\sum I = 2.\Delta Ia + 2.\Delta Ib + 2.\Delta Ic$$

که در آن  $\sum I$  جریان رشته‌ی صفر (حالت رایج) است که در سازه‌ی ماشین‌ها و در یاتاقان‌ها گردش می‌کند. به طور کلی، ممکن است این جریان‌ها تا تمام تأسیسات گسترش پیدا کنند و انطباق‌پذیری الکترومغناطیسی را بر هم بزنند.

به علاوه، این جریان‌های با فرکانس زیاد به ویژه به دلیل اثر سطحی<sup>۱</sup> پارازیتی می‌باشند. در حقیقت، جریان‌های با فرکانس زیاد در تجهیزات نفوذ نمی‌کنند؛ آن‌ها در سطح، در اعماق چند ده میلیمتری یا کمتر به گردش در می‌آیند.

بنابراین نسبتاً به خوبی درک می‌شود که اگرچه آن‌ها ضعیف هستند (چند آمپر)، ممکن است بر قطعات مکانیکی معین و به ویژه در یاتاقان‌ها اثرات فرسایشی داشته باشند.

در پاراگراف‌های قبلی ما به دو وسیله‌ی مهم اشاره کردیم: در مرکز قرار دادن یا متقارن‌سازی پتانسیل‌ها و کاهش  $dV/dT$ ‌ها. این موارد باید با وسایلی تکمیل گردند که بتوانند جلوی جریان‌های اشاره‌شده را بگیرند. این وسایل که در میان مهندسان الکترونیک به خوبی شناخته شده‌اند از ورودی‌های حساس توسط سلف‌های "دو سیمی در جریان" محافظت می‌کنند تا جریان‌های حالت رایج فیلتر شوند. در این جا مسئله محدودیت صدور است.

برای پایان آن ما از سلف‌های رشته‌ی صفر استفاده می‌کنیم که در ورودی و خروجی مبدل قرار گرفته‌اند و وسایل تولید اغتشاشات می‌باشند. قواعدی که بر اساس آن‌ها کارکرد ساده می‌شود: کابل‌های برق در مدار مغناطیسی سیم‌پیچی می‌شوند به طوریکه شار صفر باشد ( $Ia + Ib + Ic = 0$ )؛ بنابراین ضریب القای توزیع‌شده در فازها صفر است.

با این حال، هنگامی که بحث درباره‌ی جریان‌های رشته‌ی صفر باشد، ضریب القا صفر نبوده و دامنه‌ی آن‌ها را محدود می‌کند. در مدار مغناطیسی، ما باید یک سیم‌پیچ کمکی داشته باشیم که به عنوان دمپر عمل کند.

#### ۱۴-۲-۳ طراحی مبدل‌ها/ماشین برای توربین‌های جریان جزر و مدی

این طراحی به ماهیت انرژی اولیه مربوط می‌شود. در رابطه با توربین‌های آبی، ما باید میان آن-هایی که با جریان‌های جزر و مدی حرکت می‌کنند و آن‌هایی که با جریان‌های اقیانوسی به حرکت در می‌آیند (که بسیار ثابت‌تر بوده و همچنین عمیق‌تر و پیشرفته‌تر هستند) تمایز قائل شویم. ما همچنین در اینجا تنها به جریان‌های جزر و مدی - جزر و مد - توجه خواهیم کرد که احتمال بهره‌برداری سریع از آن‌ها بیشتر است. در هر منطقه از جهان، جزر و مد متفاوت

<sup>1</sup> Skin effect

است: در ساحل آتلانتیک فرانسه، جریان‌های جزر و مدی دو بار در روز با بی‌نظمی دو بار در ماه به طور کلی دامنه‌هایی جزر و مدی دارند که ضرایب حداکثر و حداقل آن‌ها مابین ۱ و ۲ متغیر است، و در اینجا نیازی به اشاره به جزر و مدهای استوایی نیست. به راحتی می‌توانیم درباره‌ی دامنه‌های جزر و مدی و درباره‌ی جریان‌های حاصل کمتر صحبت کنیم اما می‌توانیم رابطه‌ی میان دامنه‌های جزر و مدی و جریان‌ها به راحتی برای سایت مفروض تقریب بزنیم. به طور خلاصه، از لحاظ چند ضریب (شامل عمق)، می‌توان گفت که که جریان‌های جزر و مدی با مشتق دامنه‌ی جزر و مدی در طول زمان متناسب هستند.

این طرح به توربین آبی، اندازه (قطر) و توان آن، سرعت چرخش و عمق غوطه‌وری در آب بستگی دارد: این پارامترها که با سرعت جریان‌ها رابطه دارند، با هم نیز رابطه دارند [HAU 98; DAV04]

توان جنبشی سیال جاری از دیسکی به سطح مقطع  $S$  توسط رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V^3 \quad (14-3)$$

-  $\rho$  چگالی آب دریا است:  $1,025 \text{ kg} / \text{m}^3$ .

-  $S$  مساحت سطح پوشیده شده توسط پروانه به واحد  $\text{m}^2$  است،

-  $V$  سرعت جریان به واحد  $\text{m/s}$  است.

متأسفانه، این توان به طور کامل در دسترس نیست، زیرا سرعت بالادست سیال مخالف صفر بوده و نظریه‌ی آلبرت بتز (۱۹۲۰) نشان می‌دهد که توان حداکثر از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V^3 \cdot C \approx 141,3 \cdot D^2 V^3 \quad (14-4)$$

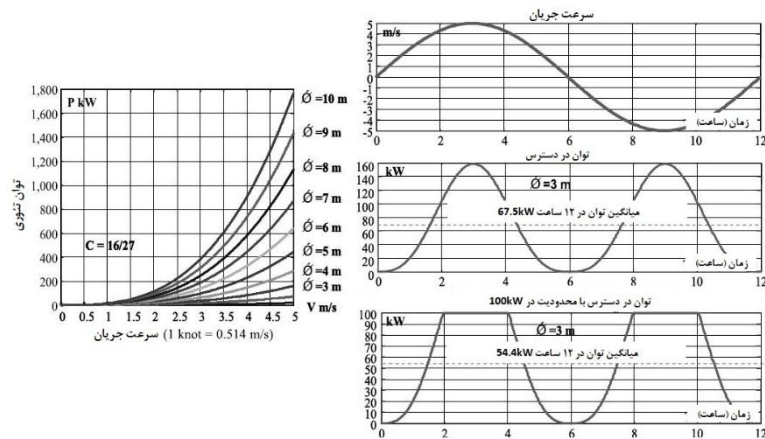
که در آن ضریب  $C$  برابر با ۱۶.۲۷ است (بازده هیدرودینامیکی حداکثر).

در تصویر واقع در سمت چپ شکل ۱۴-۱۷ به ازای قطرهای مختلف پروانه، ارزیابی از توان نظری به عنوان تابعی از سرعت جریان ارائه شده است. این توان در قطرهای یکسان و در مقایسه با توان حاصل از توربین‌های بادی بسیار زیاد است. این تفاوت از این حقیقت ناشی می‌شود که چگالی آب بسیار بیشتر از هوا است.

در تصویر واقع در سمت راست شکل ۱۴-۱۷، سرعت‌های جریان جزر و مدی نشان داده شده است که به شکل سینوسی تغییر می‌کنند (فرضیه‌ای که زیاد دور از واقعیت نیست). جریان مورد استفاده برای تولید این مدل قدرتمند است:  $5 \text{ m/s}$ . قطر پروانه  $3 \text{ m}$  است.

بدون محدودیت توانی، توان میانگین در طول ۱۲ ساعت برابر  $67.5 kW$  است، یعنی برابر ۴۲٪ از مقدار پیک است. با محدودیت توانی  $100 kW$ ، ما به مقدار میانگین  $54.4 kW$ ، یعنی ۵۴.۴٪ مقدار پیک ( $100 kW$ ) می‌رسیم.

بنابراین، برای طراحی سیستم الکتریکی، ممکن است محدودیت توان هنگامی که احتمال محدودیت توان مکانیکی وجود نداشته باشد (سرع متغیر پره در مورد توربین‌های آبی)، مفید واقع شود. تنظیم توان در این مورد یکی از کارکردهای مهم مجموعه‌ی ماشین و مبدل است.



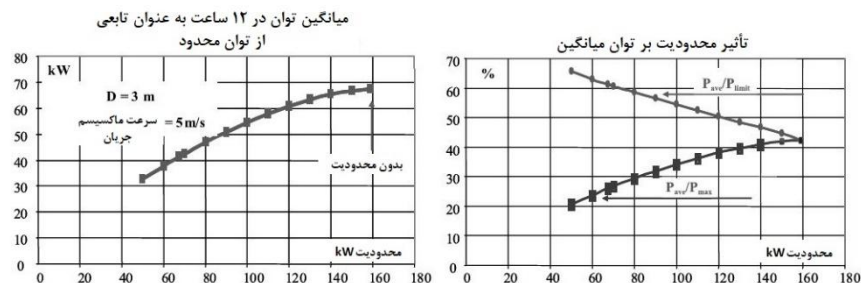
شکل ۱۴-۱۷ توان پروانه‌ای به قطر ۳ m در طول زمان

کار کردن در توان ثابت شامل کاهش گشتاور هنگام افزایش سرعت می‌شود. به منظور انجام این کارکرد می‌توانیم بر حسب احتمالات موجود در ژنراتور، دو راهبرد زیر را در نظر بگیریم:

- اگر شار القایی به صورت مستقیم کنترل شود (ماشین‌های سنکرون سیم‌پیچ)، ما می‌توانیم در ورای آستانه‌ی سرعت، شار القایی را کاهش دهیم که برای اندازه‌ی مبدل استاتیکی دارای مزیت می‌باشد؛

- اگر شار القایی کنترل نشود (ماشین‌های مغناطیسی و ماشین‌های القایی قفسه‌ای)، ما می‌توانیم در توان ثابت حداکثری و به ازای افزایش کمتر اندازه‌ی مبدل استاتیکی با استفاده از کنترلرهای مخصوص جریان‌ها و تغییر فاز آن‌ها در محدوده‌های مجاز به لحاظ مشخصات الکتریکی ماشین‌ها، به کارآیی مطلوب دست پیدا کنیم.

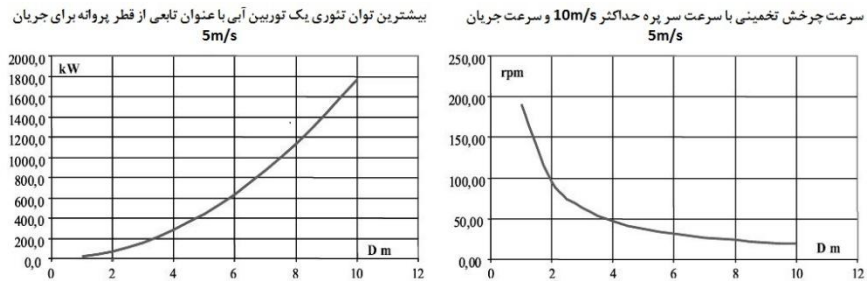




شکل ۱۴-۱۸ توان با محدودیت یا بدون آن

به منظور کاهش نوسان در توان ما می‌توانیم با تزریق توان از دست رفته با استفاده از وسیله‌ی ذخیره‌سازی، جلوی شکاف توان میان دو مقدار محدود را بگیریم. بگذارید مثال محدودیت  $67.5 \text{ kW}$  را در نظر بگیریم (با هدف داشتن توانایی برای تأمین توان ثابت برای شبکه). با انجام تمامی محاسبات با استفاده از فرضیه‌هایی بالا، ما در می‌یابیم که به ورودی انرژی  $600 \text{ MJ}$  نیاز خواهد بود. ذخیره‌سازی این مقدار انرژی امروزه به لحاظ مالی قابل تصور نمی‌باشد. بنابراین، ما باید با وجود محدودیت‌های جریان‌های به شدت قوی (به عنوان مثال، جریان‌های استوایی) و همچنین محدودیت‌هایی که ممکن است توسط مدیران شبکه اعمال شود، تزریق تمامی توان هیدروالکتریک به شبکه را در نظر بگیریم:

- وسایل الکترونیکی بر اساس مقدار توان حداکثر طراحی خواهند شد (ثوابت زمانی کم)؛
- اگر نوسانات موجود در توان بیشتر از مقیاس زمانی باشند که در مقایسه با ثوابت زمانی حرارتی ماشین‌ها به اندازه‌ی کافی کوچک هستند، ممکن است توان موثر به عنوان عامل تعیین‌کننده در نظر گرفته شود. با این حال، اگر نوسانات کندتر باشند، همانطور که در مورد چرخه‌های جزو و مدی این گونه است، باید توان بیشینه در طراحی در نظر گرفته شود.
- ماشین بر حسب ملاحظات گشتاور، سرعت چرخش و فرکانس طراحی می‌شود و سپس انتخاب قطر پروانه، توان، سرعت چرخش و گشتاور را تعیین می‌کند. با استفاده از قطر، ما می‌توانیم با فرض اینکه سرعت حداکثر رأس پره برابر  $10 \text{ m/s}$ ، تخمین تقریبی درباره‌ی سرعت چرخش بزنی  $[DAV 04]$  (این حد برای جلوگیری از ساییده شدن ضروری است)؛ شکل ۱۴-۱۹ را ببینید.



شکل ۱۴-۱۹، توان، سرعت چرخش

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Dm
1766.3	1430.7	1130.4	865.5	635.9	441.6	282.6	159.0	70.7	17.7	P kW
19.10	21.22	23.87	27.28	31.83	38.20	47.75	63.66	95.49	190.99	سرعت (rpm)
64	58	52	44	38	32	26	20	14	8	P
20.37	20.51	20.69	20.01	20.16	20.37	21.69	21.22	22.28	25.46	F Hz

جدول ۱۴-۲ احتمالاتی برای محرک مستقیم ماشین (اندازه)

در جدول ۱۴-۲ تعدادی از احتمالات مشخص، قطبیت/فرکانس، به عنوان تابعی از سرعت مطرح شده‌اند. انتخاب قطبیت بر اساس فرکانس حداکثر، برای توان حداکثر، ۲۰ Hz قرار دارد. به ازای قطرهای کوچک ۱ m و یا حداکثر ۲ m، می‌توانیم دو گزینه‌ی ماشین‌های القایی و ماشین‌های با مغناطیس دائم داشته باشیم. اگرچه به ازای قطرهای بیشتر، ماشین‌های با مغناطیس دائم سازگاری بهتری دارند. این ماشین‌ها به طور کلی ژنراتورهای حلقه‌دار با تعداد زیادی قطب حاصل از آن هستند. این مورد دارای اشکال داشتن ژنراتوری با قطر زیاد می‌باشد و احتمالاً بر روی پروانه‌ها سایه می‌اندازد و عملکرد تبدیل انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اگر این مشکل رخ دهد، ما احتمالاً باید به ژنراتورهای حلقوی صحیح فکر کنیم که به موجب آن آهن‌رباها روی کرونا<sup>۱</sup> و در انتهای پره‌ها آرایش می‌یابند و استاتور طوری بر روی کرونا<sup>۱</sup> خارجی قرار می‌گیرد که ژنراتور به صورت معقول قرار گیرد و باعث اختلال جریان نشود. این فناوری‌های با لبه‌ی محرک<sup>۲</sup> شامل یکپارچه‌سازی ماشین سنکرون مغناطیسی با چرخ هیدرولیکی می‌شوند. بنابراین، بخش‌های فعال ماشین در حوالی لبه‌ی چرخ (روتور مغناطیسی)

<sup>۱</sup> Corona<sup>۲</sup> Rim driven

و داخل یک لوله (کانال‌های استاتور سیال) قرار می‌گیرند. این مجموعه‌ی به ظاهر مناسب، به صورت صنعتی در حال تولید می‌باشد.

ما همچنین می‌توانیم ماشین‌های متعارف‌تر را نیز با جعبه‌دنده‌ی واقع در میان پروانه و ماشین در نظر بگیریم. در جدول ۱۴-۳ نسبت‌های ضرب، قطبیت و فرکانس‌های قابل تصور در این مورد نشان داده شده‌اند.

19.10	21.22	23.87	27.28	31.83	38.20	47.75	63.66	95.49	190.99	Rpm
40	36	32	38	32	28	32	24	16	8	افزایش دهنده
763.9	763.9	763.9	1036.8	1018.6	1069.5	1527.9	1527.9	1527.9	1527.9	سرعت (rpm)
4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	P
50.9	50.9	50.9	51.8	50.9	53.5	50.9	50.9	50.9	50.9	F Hz

جدول ۱۴-۳ ضرب/قطبیت، برای دست‌یابی به فرکانس‌های حدوداً  $50\text{ Hz}$

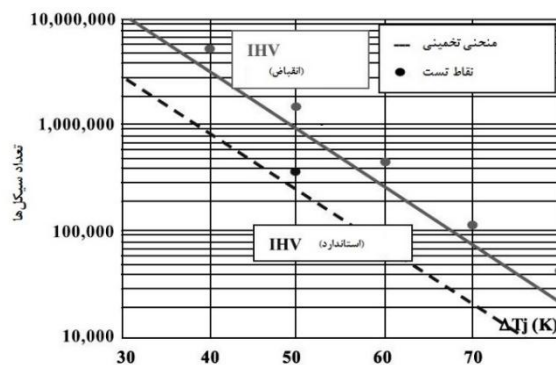
حتی هنگامی که قطبیت افزایش یابد، به ازای سرعت‌های کم، نسبت ضرب زیاد است. پاسخ ژنراتور القایی/جعبه‌دنده تنها برای توان‌های کمی که برای آن  $\Omega > 150\text{rpm}$  باشد، معقول است.

### ۱۴-۳ اینورترهای (متناوب‌سازهای) ولتاژ در مدولاسیون پهنای پالس

به منظور تکمیل خلاصه‌ی تعریف ما از این ماشین‌ها، ما باید به ولتاژ اشاره کنیم. ولتاژ به احتمالات مبدل‌های فرکانسی مرتبط است. حداکثر توان مفروض برای توربین‌های آبی مابین  $20\text{ kW}$  و  $2\text{ MW}$  قرار دارد، در حالیکه حداکثر توان توربین‌های بادی  $5\text{ MW}$  است (برای توان‌های بیشتر ممکن است در تولید پره‌ها، به لحاظ صلبیت، خمش، نوسانات و غیره مشکلات مکانیکی ایجاد شود).  $IGBT$ ‌های موجود در بازار ما را قادر می‌سازند تا ولتاژ بهینه را انتخاب کنیم.

به ازای توان‌های بیشتر، اکثر تولیدکنندگان بزرگ ماشین‌هایی با ظرفیت‌های مقابل می‌سازند:  $600\text{ V}$ ،  $1200\text{ V}$ ،  $1700\text{ V}$ ،  $3300\text{ V}$ ،  $4200\text{ V}$ ، حتی  $6500\text{ V}$ ، اما انتخاب درست به مقادیر تولیدی توسط این سازندگان در پاسخ به نیاز بازارهای مختلف بستگی دارد (هزینه و قابلیت اطمینان مبتنی بر تجربه). در آغاز دهه‌ی ۲۰۰۰، قطعات  $3300\text{ V}$  با شدت مابین  $200\text{ A}$  و  $2400$  به لحاظ فنی-اقتصادی به بهترین وجه در دسترس بودند (به دلیل بازار تراپری راه‌آهن). این شدت‌ها صرفاً نقاط مرجع می‌باشند؛ در حقیقت این دمای تقاطع است که در حین عملیات قطر داخلی جریان و در نتیجه تمامی تلفات‌ها (کموتاسیون و رسانش) و عملکرد سیستم‌های

خنک کاری را مشخص می سازد. به منظور دستیابی به قابلیت اطمینان، دما همواره حدود  $90-100^{\circ}\text{C}$  خواهد بود و به خاطر داشته باشید که دمای حداکثر بر حسب تولیدکننده،  $125^{\circ}\text{C}$  یا  $150^{\circ}\text{C}$  می باشد. بنابراین در دوره های گذار استثنایی اختلاف کوچکی وجود دارد. در بالا ما به مشکل سیکل حرارتی اشاره کردیم. در شکل ۱۴-۲۰ مشخصات تولیدکننده (EUPEC) در این نقطه برای فنآوری بسته ی تخت نشان داده شده اند.

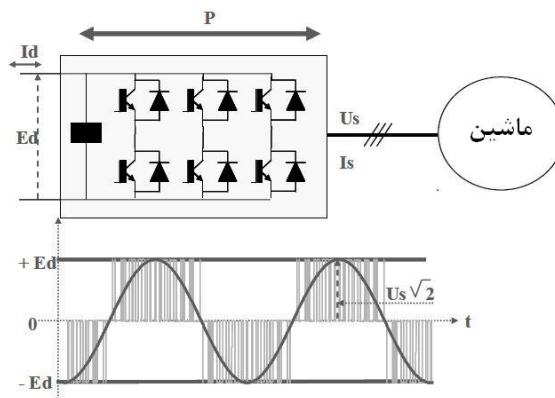


شکل ۱۴-۲۰ تعداد چرخه هایی که بر حسب دامنه ی نوسانات در دمای تقاطع قابل تحمل می باشند (برگرفته از سند EUPEC)

در اینجا مسئله ی ما تعداد چرخه های دمای تقاطع می باشد. به طور واضح، ژنراتوری که منبع مبدل (PWM) در فرکانس کم است (به عنوان مثال  $10\text{ Hz}$ ) در طول نصف دوره باعث ایجاد نوساناتی در دمای تقاطع خواهد شد. این تغییرات تنها می توانند با در نظرگیری تمامی ثوابت زمانی حرارت خود IGBT و خنک کننده ارزیابی شوند. این دلیلی است بر اینکه چرا به دنبال ماشینی با فرکانس بیشتر یا برابر  $20\text{ Hz}$  هستیم تا در محدوده ی مرسوم استفاده بمانیم: در  $20\text{ Hz}$ ، دامنه ی نوسانات دمایی کمتر می باشد و گردش کاهش می یابد. اگرچه، هیچ چیزی در مقابل فرکانس های کمتر قرار نمی گیرد، اما به دلیل گردش، IGBTها باید تنزل رتبه پیدا کنند (در نظرگیری قطر داخلی قوی تر برای جریان) تا تلفات کاهش یابد، مقاومت های حرارتی کاهش یافته و اینرسی حرارتی به منظور محدود کردن تغییرات دمایی تا سطحی که با طول عمر مورد نیاز ماشین سازگار باشد، افزایش یابد.

به ما به دلیل فرکانس ماشین به گردش حرارتی اشاره کرده ایم اما ما باید آن را به دلیل فرآیند نیز در نظر بگیریم. این گردش در رابطه با توربین های آبی مشخصاً قابل چشم پوشی است اما این گفته برای مبدل های انرژی موجهی درست نیست، زیرا در معرض دوره ی تناوب امواج قرار دارند (مابین ۴ تا  $10\text{ s}$ ). باید اظهار شود که دانش ما درباره ی مسائل گردشی از ترابری راه آهن

و به طور ویژه از کاربردهای مترو و تراموا نشأت می‌گیرد. به دلیل فاصله‌ی کم میان ایستگاه‌ها، قطارها در مترو همواره در حال شتاب‌گیری و سپس ترمز و توقف هستند (40s ~).



شکل ۱۴-۲۱ ولتاژ خروجی حداکثر، مدولاسیون حداکثر

برای یک مبدل (*PWM*) به عنوان منبع ولتاژ، همانطور که در بالا بیان شد، ولتاژ خروجی حداکثر برابر با ولتاژ پیوسته *ED* است. بنابراین:

$$Ed \geq Us \max.\sqrt{2}$$

ولتاژ اعمالی به یک *IGBT* در حالت بلوکه شده برابر *ED* است. در حقیقت، می‌توان ولتاژهای اضافی در کموتاسیون را در نظر گرفت که معمولاً به *IGBT*هایی منتهی می‌شوند که طور طراحی می‌گردند تا بتوانند دو برابر مقدار *Ed* را تحمل کنند (افزایش اندازه‌ی ولتاژ تابعی از توان ماشین‌ها است. در ماشین‌های با توان کم، فشردگی باس *IGBT* به معنای میزان کمتر افزایش اندازه‌ی ضروری است - به اندازه‌ی ۱.۵ - اما برای تجهیزات قوی‌تر این فشردگی کمتر می‌باشد، بنابراین ضریب القا بیشتر است که به افزایش اندازه‌ی دو برابری منجر می‌شود).

بنابراین، برای خروجی ولتاژ 400V،  $Ed = 566V$ ، ولتاژ انتخابی 1200V است. در جدول ۱۴-۴ این محاسبه نشان داده شده است که در آن ولتاژی انتخاب شده است که به توانی مربوط می‌شود که در آن جفت‌های جریان/ولتاژ با *IGBT*های موجود در بازار سازگار هستند.

اگر مقدار نیروی محرک الکتریکی از ولتاژ قابل تعدیل حداکثر بیشتر باشد، بنابراین سیستم کنترلی باعث کاهش تحریک خواهد شد تا به کنترل جریان ادامه دهد. برای ماشین‌هایی که در آن‌ها آهن‌رباها از سطح روتور آویزان می‌شوند، ممکن است شکاف هوایی زیاد در نظر گرفته شود که به معنای پایین بودن راکتانس همگام (سنکرون)<sup>۱</sup> است - بنابراین می‌توان کاهش تحریک ماشین را محدود کرد. بنابراین ضروری است که به طور صحیح گستره‌ی کاهش

<sup>۱</sup> Synchronous reactance

تحریک را به منظور مشخص سازی راکتانس همگام  $X_s$ ، شکل ۱۴-۱۰، محاسبه کنیم. برای  $X_s$  حداقل ۳۰٪ مطلوب می باشد.

برای مقادیر توان کمتر از  $1800 kW$ ، سازه‌ی دو سطحی شکل ۱۴-۱۳ مناسب است، حتی اگرچه به ازای قطرهای  $8 m$ ،  $9 m$  و  $10 m$ ، جریان‌ها برای قطعات با ظرفیت  $1200 A$  نسبتاً زیاد هستند. در این مورد بهتر است که دو  $IGBT$  موازی را به کار بیندازیم (این مورد رایج است). با  $IGBT$ های از نوع بسته‌ی تخت را بررسی کردیم: در ابتدا، این نوع ارزان‌تر بوده و به علاوه سیکل حرارتی پایین، استفاده از قطعات بسته‌ی پرسی را توجیه نمی‌کند که گران‌تر بوده و اجرای آن‌ها دشوارتر می‌باشد.

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Dm
1766.25	1430.66	1130.40	865.46	635.85	441.56	282.60	158.96	70.65	17.66	P kW
1100	1100	1100	1000	800	600	400	400	400	400	U <sub>s</sub>
1095.79	887.59	701.31	590.63	542.42	502.24	482.15	271.21	120.54	30.13	I <sub>s</sub>
1555.63	1555.63	1555.63	1414.21	1131.37	848.53	565.69	565.69	565.69	565.69	Ed calc.
1600	1600	1600	1500	1200	850	600	600	600	600	Ed CHOS.
3300	3300	3300	3300	2400	1700	1200	1200	1200	1200	U IGBT

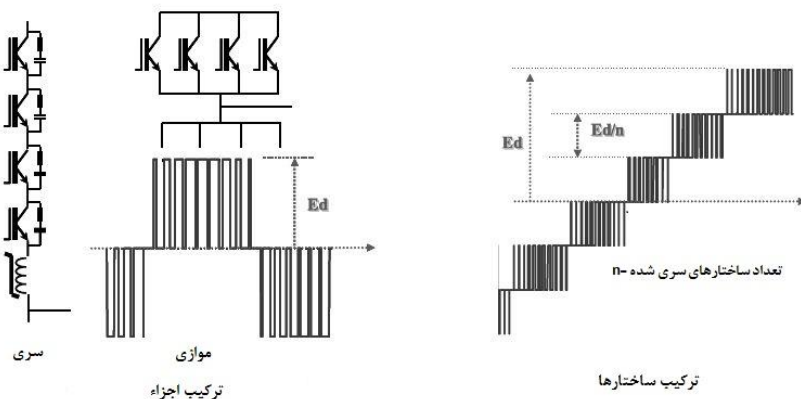
محدوده موجود برای جریان

IGTB 3300V-1200A

جدول ۱۴-۴ انتخاب ولتاژهای  $IGBT$  در تولید هیدروالکتریسته (با جریانی به سرعت  $5 m/s$ )

سازه‌های محتمل دیگری برای مبدل‌ها نیز وجود دارد. برای افزایش توان، ما می‌توانیم جریان‌ها یا ولتاژها را افزایش دهیم. با  $IGBT$  های  $3300V$ ، منبع ولتاژ پیوسته به محدوده‌ی  $1400V$  تا  $1600$  محدود می‌شود به این معنا که تأسیسات با ظرفیت بیشتر از  $1MW$  باید با قطعات موازی به کار گرفته شوند - که در ترابری روی لوکوموتیوها قابل انجام می‌باشد. با این حال، می‌توان  $IGBT$  ها را با استفاده از توپولوژی‌هایی نیز به صورت سری قرار داد که سازه‌ها را به جای قطعات در حالت سری قرار می‌دهند.

نمودار سمت چپ در شکل ۱۴-۲۲ ارتباط قطعات سری یا موازی را نشان می‌دهد. این امر ساده به نظر می‌رسد اما در حقیقت تا حدودی پیچیده است، زیرا تعادل ولتاژها یا جریان‌ها تنها به مشخصات آن‌ها (استاتیکی و دینامیکی) بستگی دارد و واضح است که این تعادل به فنآوری نیز بستگی دارد. قطعات در عمل به صورت سری قرار داده می‌شوند، ام این مجموعه پیچیده‌تر می‌باشد: به وسایل استاتیکی نیاز دارد (اسنابرها و سلف‌های اشباع‌پذیر<sup>۱</sup>) تا به تعادل ولتاژ کمک کنند - وسایلی که متأسفانه به تدریج خراب می‌شوند.

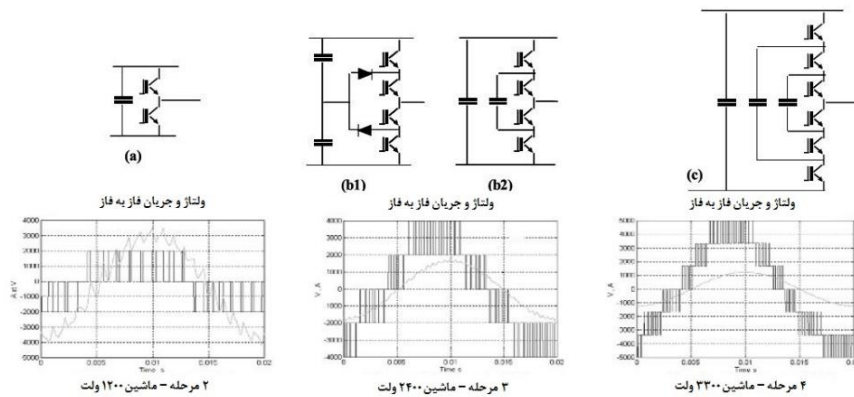


شکل ۱۴-۲۲ سازه‌های چند سطحی: افزایش توان مبدل‌ها

نمودار سمت راست در شکل ۱۴-۲۲ ارتباط سازه‌های سری را نشان می‌دهد. برای این سازه‌ها مزایایی وجود دارد که باید ذکر شوند. اولین مزیت مسلماً به تعدیل ولتاژها مربوط می‌شود: مجموعه‌های قرار گرفته در محل (به شکل ۱۴-۲۳ مراجعه کنید) تعادل طبیعی میان سازه‌های اشاره‌شده را تضمین می‌کنند، بنابراین از قطعات ابتدایی آن‌ها به روش مرسوم و ساده استفاده می‌شود. مزیت دوم آن‌ها به بارهای تغذیه‌شده - ژنراتورها یا ترانسفورماتورها - مربوط می‌شود که در نتیجه توسط ولتاژهای پیچیده‌تر تغذیه می‌گردد که این امر کار فیلترسازی و/یا کاهش  $dV/dT$  را ساده‌تر می‌کند (به شکل ۱۴-۱۴ مراجعه کنید).

<sup>1</sup> Snubbers and saturable inductors

در شکل ۱۴-۲۳، در وسط، سازه‌ی (b2) به عنوان سلول‌های همپوشانی چند سطحی با سه سطح شناخته می‌شوند. هر کلیدی با فرکانس کلیدزنی  $1\text{ kHz}$  کار می‌کند، اما به دلیل همپوشانی، فرکانس کلیدزنی مشاهده شده برای ماشین  $2\text{ kHz}$  است که به کاهش ناهمواری جریان منجر می‌گردد. باید توجه شود که در وضعیت (a)، دامنه‌ی مجموعه‌های ولتاژی در پایانه‌های ماشین برابر  $Ed$  است: در (b2) تنها  $Ed/2$  است که برای بارهای تغذیه شده محسوس می‌باشد ( $dV/dt$ های کمتر). به علاوه، باید توجه شود که تعادل ولتاژ در مرزهای خازن شناور ( $Ed/2$ ) طبیعی است.



شکل ۱۴-۲۳ تغذیه‌ی ژنراتور سنکرون  $5\text{ MW}$   $X = 20\%$  را نشان داده شده است. فرکانس کلیدزنی  $1\text{ kHz}$  اینورتور (تنها یک بازو نشان داده شده است). با انواع مختلف

سازه‌ی (b1) نیز سازه‌ی سه سطحی است. همچنین این سازه رایج‌ترین مورد می‌باشد که به عنوان NPC شناخته شده است (نقطه‌ی خنثی محکم شده)<sup>۱</sup>. این سازه نیز ممکن است نتایج یکسانی با توپولوژی (b2) داشته باشد اما اغلب به طور متفاوتی کنترل می‌شود - کلیدهای مرکزی با فرکانس کلیدزنی کمتری کار می‌کنند. اثرات وارد بر بارهای تغذیه شده کمترین مقدار می‌باشند، اما تلفات کموتاسیون کاهش می‌یابد.

سازه‌ی (c) یک ماشین از نوع سلولی همپوشانی چند سطحی با چهار سطح است. در این مورد ماشین دارای فرکانس کلیدزنی است که برابر سه برابر فرکانس IGBTها می‌باشد. بنابراین، ناهمواری در جریان کم می‌باشد که این مورد به ویژه در شکل ۱۴-۲۳ قابل مشاهده است. دوباره، ولتاژ در مرزهای خازن‌های شناور به صورت طبیعی نگه داشته می‌شود ( $Ed/3$  و  $2Ed/3$ ). یعنی مادامیکه جریان اکتیو وجود داشته باشد نیازی به کنترل این ولتاژها نیست. هنگامی که این نیاز وجود داشته باشد، یک فیلتر هماهنگ با اساس فرکانس کلیدزنی اولیه با مقاومت سری در خروجی AC قرار داده می‌شود. با عدم تعادل میان ولتاژها در پایانه‌های خازن-ها، اساس فرکانس کلیدزنی در خروجی ولتاژها پدیدار می‌شود و اگر جریان خروجی اینورتور

<sup>1</sup> Neutral Point Clamped



دارای مولفه‌ای اکتیو باشد، به طور طبیعی تعادل باز می‌گردد. در وضعیت بدون بار، در نبود جریان، جریان اکتیو با استفاده از فیلتر ستاره در خروجی اینورتور وارد شده و با فرکانس کلیدزنی پایه هماهنگ می‌گردد. اگر تعادلی وجود نداشته باشد، ولتاژهای خروجی در فرکانس کلیدزنی هیچ عبارتی نخواهند داشت (تنها  $3fc$  برای ماشین ۴ سطحی)؛ در مورد عدم تعادل، فیلتر دارای امیدانس جزئی می‌باشد: از سه مقاومت سری متصل به شاخه‌های فیلتر برای تأمین جریان اکتیوی استفاده می‌شود که دوباره تعادل را برقرار می‌کند [FOC 02; MEY 92; COU 99c].

#### ۱۴-۳-۱ اتصال DC

اتصال میان ماشین و مبدل‌های شبکه و میان وسایل، از نوع DC است که در فرکانس‌های مختلف کار می‌کند. با وجود کاهش مصالح، این یک نکته‌ی مهم می‌باشد: دو رسانا و چند خازن. وجود خازن‌ها ضروری می‌باشد و فناوری آن اهمیت کمتری ندارد.

از یک طرف، وجود آن‌ها به دلیل محدود کردن ولتاژهای اضافی ناشی از کموتاسیون‌های IGBTها ضروری است. بنابراین، این خازن‌ها باید تا جای ممکن به IGBTها نزدیک باشند تا اثر ضرایب القای خطی محدود شود. به طور کلی این اثر در میله‌هایی با سطح مقطع زیاد تولید می‌شود که تا جای ممکن سطح حلقه‌ی آن‌ها کوچک است (با عایق‌کاری ضروری مطابقت دارد). حضور خازن‌ها به منظور گردش جریان در فرکانس کلیدزنی بدون ناهمواری قابل توجه در ولتاژ ضروری می‌باشد. در حقیقت، از اتصال DC جریان‌های مختلفی عبور می‌کند و موقعیت خازن‌ها به مبداء آن جریان‌ها بستگی دارد.

جریان‌های تبدیل‌شده، ضریب توان در سمت AC مبدل‌ها و مولفه‌های منفی جریان‌های متناوب اهمیت بسیاری برای تعیین اندازه‌ی خازن‌ها در باس DC دارند. این مسئله در ادامه با جزئیات بیشتری بررسی خواهد شد.

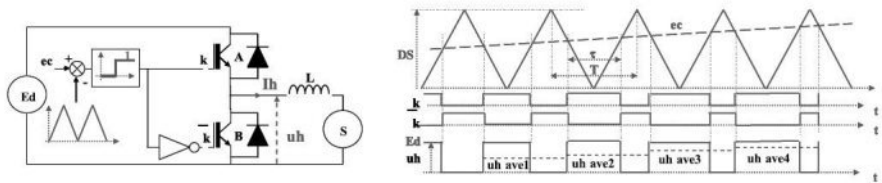
#### ۱۴-۳-۱-۱ علامت PWM

##### ۱۴-۳-۱-۱-۱ سازهای پایه

مدولاسیون پهنای پالس یک نکته‌ی اساسی است و با جزئیات بیشتر در اکثر نوشتجات موجود بررسی می‌گردد. به طور پایه، یک تابع ساده است: تبدیل ولتاژ/زمان یا مدت. در شکل ۱۴-۲۳ تا ۱۴-۲۶ قواعد کلی تبدیل به طور خلاصه ارائه گشته‌اند. سازه‌ی پایه (بازوی پل) از دو کلید با دستوره‌های تکمیلی ساخته شده است.

در حقیقت، هر کلید از دو قطعه ساخته شده است: یک کلید درست و یک IGBT به همراه دیود. با علامت جریان  $i_h$  نشان داده شده در شکل ۱۴-۲۴ واضح است که دیود  $A$  و  $B$  IGBT با

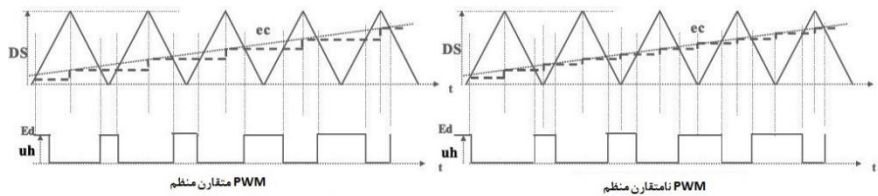
هم جریان را انتقال نمی دهند. این امر بازگشت ناپذیری جریان چاپر<sup>۱</sup> را در شکل ۱۴-۲۴ نشان می دهد.



شکل ۱۴-۲۴ قاعده‌ی کلی تبدیل ولتاژ/زمان  $PWM$  طبیعی

$$\frac{ec}{DS} = \frac{\tau}{T} \quad uh_{ave} = Ed \cdot \frac{\tau}{T} \quad uh_{ave} = ec \cdot \frac{Ed}{DS} \quad (14-5)$$

$PWM$  های طبیعی به طور عمده در آنالوگ‌ها مورد استفاده قرار می گیرند. از آن‌ها در موارد عددی استفاده نمی شود، زیرا در تعیین دوره‌های کموتاسیون به محاسبات تکراری منجر می شوند و به چرخه‌های بسیار زیاد ریزپردازنده‌ها نیاز خواهند داشت. در این مورد ترجیح داده می شود که قبل از مقایسه‌ی  $ec$  با جران دندانهای مرجع، نمونه‌سازی و بلوکه شود.

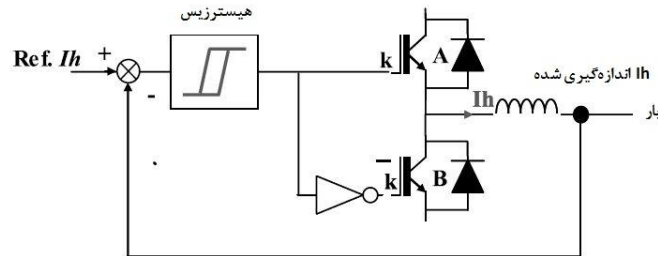


شکل ۱۴-۲۵  $PWM$  متقارن و نامتقارن

علی‌رغم نمونه‌برداری تکراری  $PWM$  نامتقارن نسبت به  $PWM$  متقارن، نتایج قابل مقایسه می باشند. آن‌ها حتی با نتایج حاصل از مدولاسیون طبیعی قابل مقایسه می باشند، زیرا فرکانس موج دندانهای به اندازه‌ی کافی بزرگتر از  $ec$  است.

ما همچنین می توانیم به کنترل هیستریزس اشاره کنیم که اغلب شامل کنترل جریان می شود (به شکل ۱۴-۲۶ مراجعه کنید). از این قاعده‌ی کنترلی در ماشین‌های با توان متوسط و زیاد استفاده نمی شود.

<sup>1</sup> Chopper

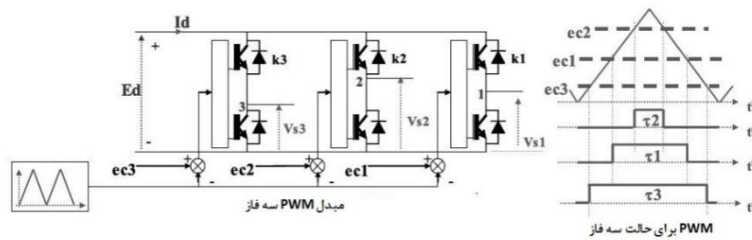


شکل ۱۴-۲۶ PWM هیستریزس با کنترل جریان

این حقیقت که فرکانس کلیدزنی متغیر است به محدودیت‌هایی در ژنراتورها و مبدل‌ها و مشکلاتی در فیلترسازی منجر می‌شود (مشکلاتی در تنظیم فرکانس‌های سازگار فیلترها و در مدیریت شبکه‌های اصلاحی رگولاتور).

#### ۱۴-۳-۱-۱-۲ PWM سه فاز

در حالت سه فاز، ما سه بازوی پل نشان داده شده در شکل ۱۴-۲۴ را با هم تلفیق می‌کنیم.

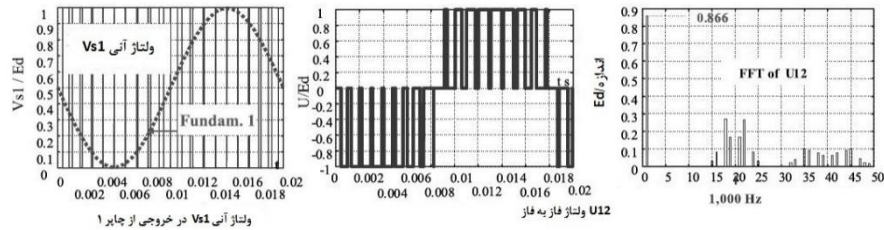


شکل ۱۴-۲۷ PWM سه فاز طبیعی دارای یک پل سه فاز

در شکل ۱۴-۲۷ نشان داده شده است که موج دندانه‌ای در فرکانس  $fm$  برای سه بازو یا سه فاز رایج است: در سمت چپ تصویر، تبدیل ولتاژ/زمان برای سه فاز نشان داده شده است. بنابراین، ولتاژهای  $eci$  ( $i = 1, 2, 3$ ) به شکل  $eci = DS / 2 + Ai(t)$  می‌باشند. در نتیجه، با مقادیر سینوسی (مدولاسیون‌های سینوسی) داریم:

$$\begin{bmatrix} ec1 \\ ec2 \\ ec3 \end{bmatrix} = \frac{DS}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + A \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (۱۴-۶)$$

$A$  دامنه‌ی ولتاژهای فرمان سه فاز است. به دلیل اینکه  $0 < eci < DS$ ، ما داریم  $0 < A < DS / 2$ .



شکل ۱۴-۲۸ مدولاسیون سینوسی حداکثر در  $PWM$  طبیعی

در مدولاسیون حداکثر  $A = DS / 2$ ،  $Vs / Ed$  بیشینه بوده و به ۱ بسیار نزدیک است، کلید بالایی چاپر اولیه تقریباً به صورت پیوسته جریان را هدایت می‌کند، در حالیکه کلید پایینی (که تکمیلی است) تنها به مدت کوتاهی جریان را از خود عبور می‌دهد. در این شرایط، ولتاژ فاز به فاز برابر است با:

$$u_{12} = v_{s1} - v_{s2} = Ed / 2 + Vs1(F) \sin(\omega t) - \left[ Ed / 2 + Vs2(F) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right] = Vs \sqrt{3} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

مقادیر حداکثر  $Vs1 = Vs2 = Vs3 = Vs$  به  $Ed/2$  محدود شده‌اند، بنابراین ولتاژ فاز به فاز ولتاژ  $u_{12}$  در سمت راست شکل ۱۴-۲۸ نشان داده شده است.

در آغاز، مبدل‌های  $PWM$  اساساً برای تغذیه‌ی ژنراتورهای القایی با فرکانس متغیر در نظر گرفته شده بودند. در شبکه پل دیودی وجود داشت که توسط ولتاژ فاز به فاز  $U_{rms}$  تغذیه می‌شود. بنابراین منطقی بود که در خروجی مبدل  $PWM$  به دنبال ولتاژهای یکسان باشیم تا ماشینی که با فرکانس شبکه تغذیه می‌شود به صورت عادی با نگه داشتن سیم‌پیچ اولیه خود، شار عبور دهد. میانگین ولتاژ پیوسته، بدون بار، در خروجی پل  $Graetz$ ، با  $U_{rms}$ ، ولتاژ فاز به فاز تغذیه برابر است با:

$$Ed0 = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U_{eff}$$

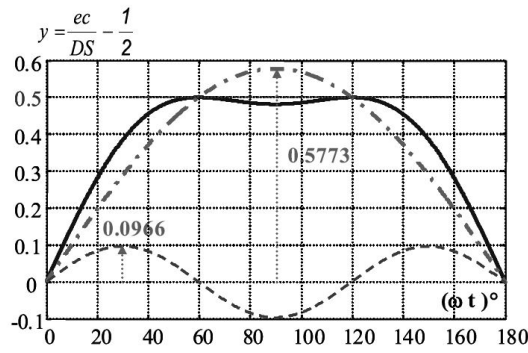
حداکثر ولتاژ مطلوب در خروجی مبدل بر اساس ولتاژ  $Ed0$ ، برابر است با:

$$U_{eff} = \frac{Ed0}{\sqrt{2}}$$

بنابراین نسبت میان ولتاژ شبکه و ولتاژ ماشین برابر است با  $\frac{\pi}{3}$ . همانطور که  $FFT$  ولتاژ پایه فاز به فاز در شکل ۱۴-۲۸ نشان داده شده است، هیچگاه به سطح مطلوب نمی‌رسد. روش افزایش ولتاژ میان فازهای خروجی مبدل‌ها از طریق واردسازی هارمونیک سوم به فرمان است (به شکل ۱۴-۲۹ مراجعه کنید).

هارمونیک سوم در ولتاژهای  $V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$  یکسان است - بنابراین هنگامی که ما ولتاژ فاز به فاز را محاسبه می‌کنیم، این هارمونیک مرتبه سوم به طور طبیعی حذف می‌شود. در شکل ۱۴-۲۹ نشان داده شده است که با هارمونیک سوم، تابع در  $0.5$  محدود باقی می‌ماند، در حالیکه ولتاژ پایه دارای دامنه‌ی  $0.577$  می‌باشد: دامنه‌ی  $H3$ ،  $0.0966$  است:

$$\frac{ec1}{DS} = 0,577 \sin(\omega t) + \frac{1}{2} + 0,0966 \sin(3\omega t) \quad 0 \leq \frac{ec1}{DS} \leq 1 \quad (14-7)$$

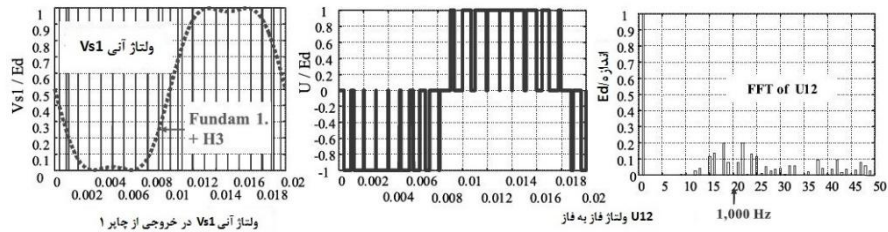


شکل ۱۴-۲۹ مکانیزم واردسازی هارمونیک سوم

بنابراین شکل فرمان به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{1}{DS} \begin{bmatrix} ec1 \\ ec2 \\ ec3 \end{bmatrix} = 1,154 \frac{A}{DS} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} + \left( \frac{1}{2} + 0,193 \frac{A}{DS} \sin(3\omega t) \right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad 0 \leq \frac{A}{DS} \leq \frac{1}{2}$$

(۱۴-۸)



شکل ۱۴-۳۰ مدولاسیون سینوسی حداکثر در  $PWM$  طبیعی با تزریق هارمونیک سوم

شکل ۱۴-۳۰ تأیید می‌کند که از نظر ولتاژ خروجی مبدل، ولتاژ خروجی فاز به فاز افزایش پیدا می‌کند،  $U_{Max} = Ed$  و در آن هارمونیک سوم پدیدار نمی‌شود [HAU 98]. احتمالات دیگری برای نزدیک کردن خروجی ولتاژ پیک به  $Ed$  وجود دارد. در تمامی آن‌ها از مشخصات هم‌قطبی<sup>۱</sup> استفاده می‌شود.

#### مدولاسیون بردار فضایی و بردار کنترلی

این روشی است که به بهترین شکل با کنترل ماشین‌ها و یا شبکه‌ها مطابقت دارد. بر خلاف روش‌های اشاره‌شده در بالا، این روش مبتنی بر مقایسه یا محاسبات مجزا برای هر فاز نمی‌باشد. بردار ولتاژ به صورت کلی محاسبه شده است و به مدت دوره‌ی تناوب مدولاسیون تبدیل شده است. این روش که از یک روش آنالوگ حاصل شده است، نسبت به روش‌های قبلی سازگاری بیشتری با کنترلرهای عددی دارد. انتشارات زیادی در رابطه با بردار کنترلی به زبان فرانسوی [HAU 98; LOU 04] و ادبیات انگلیسی وجود دارد [BOS 96; VAS 98]. فرمان بر اساس بردار مرجع صادر شده و توسط دامنه‌ی آن و موقعیت یا مختصات آن در صفحه‌ی  $\alpha, \beta$  تعریف می‌گردد. علاوه بر مزایایی که در بالا اشاره شدند، بردار کنترلی به طور ضمنی شامل تابع رشته‌ی صفر است که امکان دستیابی به اهداف دامنه را فراهم می‌کند.

#### ۱۴-۳-۱-۲ $PWM$ ترکیبی

$PWM$ ‌های اشاره‌شده تقریباً به نتایج یکسانی می‌رسند. این قضیه حتی هنگامی که نسبت فرکانس مدولاسیون  $m$  فرکانس خروجی زیاد باشد، بیشتر صدق می‌کند. به منظور اجتناب از ناهمواری‌های اضافی در جریان که به پالس‌های گشتاوری در ماشین‌ها یا نوسانات توانی در شبکه‌ها در هنگام داشتن بار مبدل‌ها منجر می‌شوند، به نسبت بزرگتر از ۱۰ نیاز است.

<sup>۱</sup> Homopolar

برای ماشین‌های با توان بالا، فرکانس کلیدزنی یا فرکانس مدولاسیون ( $fm$ ) هیچگاه بیشتر از  $1000\text{ Hz}$  نمی‌شود تا تلفات کموتاسیون در نیمه‌هادی‌ها محدود گردد و همچنین جریان‌های خازنی اضافی در تأسیسات و به ویژه در ژنراتورها یا ترانسفورماتورها تولید نشوند.

### ۱۴-۳-۲ جریان‌های DC

ما جریان مستقیمی پیدا می‌کنیم که با آن توان به طور موثر منتقل می‌شود و جریان‌های متناوبی پیدا می‌کنیم که کم و بیش فرکانس بالایی دارند و به خازن‌های محدود شده‌اند. جریان مستقیم با  $id$  نشان داده می‌شود و با فرض نبود تلفات در تبدیل و از طریق تساوی توان-ها در سمت DC و سمت AC به صورت مقابل نتیجه می‌گردد:

$$IdEd = UsIs \sqrt{3} \cos \phi$$

$$Id = Is \frac{Us}{Ed} \sqrt{3} \cos \phi \quad (14-9)$$

به طور کلی جریان در باس DC به شکل زیر می‌باشد:

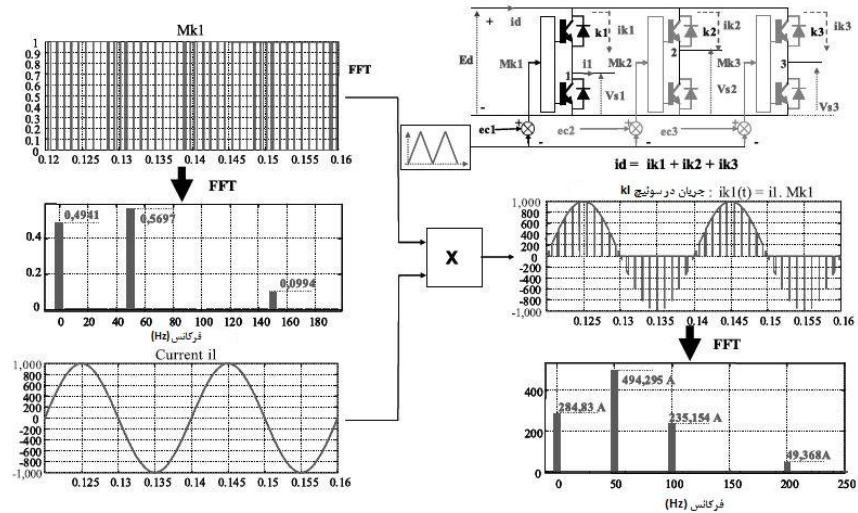
$$id = \frac{1}{Ed} (V_{1n} i_{s1} + V_{2n} i_{s2} + V_{3n} i_{s3}) \quad (14-10)$$

که در آن ولتاژهای فاز به نول و  $isi$  جریان‌های خروجی مبدل است که بار را وارد می‌کنند. بدون زمان تلف شده در فرمان کلیدهای تکمیلی، محاسبه‌ی  $id$  با استفاده از توابع *MATLAB* یا نرم‌افزار مشابه دیگر نسبتاً ساده می‌باشد.

### ۱۴-۳-۲-۱ جریان $id$ مقدار میانگین $Id$ و مولفه‌های با فرکانس پایین

همانطور که در شکل ۱۴-۳۱ نشان داده شده است، جریان مستقیم  $id$  جمع جریان‌ها در کلیدهای بالایی توپولوژی دو سطحی می‌باشد: بنابراین، منطقی است که شکل و رفتار جریان در کلیدهای  $k1$ ،  $k2$  و  $k3$  تحلیل کنیم.

به وسیله‌ی تابع مدولاسیون  $Mk$  به کلیدها فرمان داده می‌شود که از مقایسه‌ی میان موج دندان‌های و ولتاژ فرمان  $ec$  حاصل می‌شوند. این تابع مدولاسیون طیف مخصوص به خود را دارد: در شکل ۱۴-۳۱ تنها در فرکانس‌های پایین نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۳۱ ساختار جریان  $ikl$  جریان در کلید  $k1$   $Mk_{50} = 0.5697$

از این کلیدها در فرکانس پایه جریان عبور می‌کند که توسط IGBTها و با فرمان توابع  $Mk$  تغییر می‌کنند. جریان حاصل در کلیدها با مقدار دو برابر تعدیل می‌شود که این مقدار معادل با حاصلضرب  $ik(t) = Mk(t)i(t)$  است.

بر حسب  $FFT_{Mk}$  ما می‌توانیم برای فرکانس‌های پایین به نمایش فرکانسی برسیم.  $Mk = Mk_0 + Mk_{fs} \sin \omega t + Mk_{3fs} \sin 3\omega t + \dots$

بنابراین برای سه فاز داریم:

$$\begin{cases} Mk_1 = Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \\ Mk_2 = Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \\ Mk_3 = Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \end{cases}$$

مدولاسیون  $Mki$  بیانگر ولتاژها می‌باشند؛ این عبارت در  $3\omega t$  از تزریق هارمونیک سوم ناشی می‌شود، همان‌طور که در بالا توصیف شد. ما اکنون می‌توانیم عبارت‌هایی را برای جریان‌های فازی تعیین کنیم:



$$\begin{cases} ik_1 = I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) (Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t)) \\ ik_2 = I_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_2) \left( Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \right) \\ ik_3 = I_3 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_3) \left( Mk_0 + Mk_{fs} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) + Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \right) \end{cases}$$

با افزودن این جریان‌ها و جمع‌آوری عبارت‌ها در  $Mk_0$ ،  $Mk_{fs}$  و  $Mk_{3fs}$  ما قادر خواهیم بود تا برخی از آن‌ها را ساده‌سازی کنیم:

$$\begin{cases} Mk_0 \left( I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + I_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_2) + I_3 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_3) \right) = 0 \\ Mk_{3fs} \sin(3\omega t) \left( I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + I_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_2) + I_3 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_3) \right) = 0 \end{cases}$$

این عبارت‌های به طرز موثری در نبود مولفه‌ی رسته‌ی صفر سیستم  $I_1$ ،  $I_2$ ،  $I_3$  صفر هستند. بنابراین ما به عبارت‌های زیر می‌رسیم:

$$id = ik_1 + ik_2 + ik_3 = Mk_{fs} \begin{pmatrix} I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) \sin(\omega t) + I_2 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_2) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \dots \\ I_3 \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_3) \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix}$$

در نهایت با تمامی محاسبات انجام‌شده ما نتیجه می‌گیریم که:

$$id = \frac{Mk_{fs}}{2} (I_1 \cos(\varphi_1) + I_2 \cos(\varphi_2) + I_3 \cos(\varphi_3)) - \dots$$

$$\frac{Mk_{fs}}{2} \left( I_1 \cos(2\omega t - \varphi_1) + I_2 \cos(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_2) + I_3 \cos(2\omega t - \frac{8\pi}{3} - \varphi_3) \right)$$

ما مشاهده می‌کنیم که جریان  $DC$  و مولفه‌ی  $2fs$  ظاهر می‌شوند:

$$id = \frac{Mk_{fs}}{2} (I_1 \cos(\varphi_1) + I_2 \cos(\varphi_2) + I_3 \cos(\varphi_3)) \quad (11-14)$$

$Id$  جریان متوسط است:

$$id_{2fs} = -\frac{Mk_{fs}}{2} \left( I_1 \cos(2\omega t - \varphi_1) + I_2 \cos(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi_2) + I_3 \cos(2\omega t - \frac{8\pi}{3} - \varphi_3) \right) \quad (12-14)$$

$id_{2fs}$  مولفه‌های دو برابر  $fs$  است که تنها با وجود مولفه‌ی منفی در جریان‌های خروجی،  $i1$ ،  $i2$ ،  $i3$  ظاهر می‌شود.

به  $Mk_{fs} = 0.5697$  ازای مدولاسیون  $98.7\%$  توجه کنید (به شکل ۱۴-۳۱ مراجعه نمایید). در حقیقت:

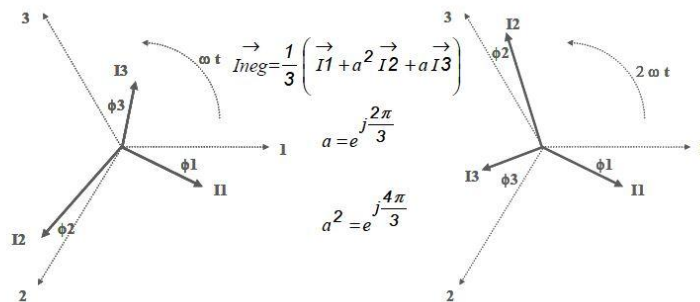
$$Mk_{fs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{Us_{peak}}{Ed} \quad (14-13)$$

بنابراین  $I_d = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{Us_{peak}}{Ed} (I_1 \cos(\varphi_1) + I_2 \cos(\varphi_2) + I_3 \cos(\varphi_3))$  عبارتی است

که به راحتی توسط تساوی توان‌ها حاصل می‌شود. در رابطه با مولفه‌ی  $2fs$ ، دستیابی به یک عبارت ترکیبی نسبت به آنچه که توسط فرمول [14.14] داده شده است، دشوار است. با این حال، در شکل ۱۴-۳۲ که نمایش برداری جریان‌های خروجی در پالس  $\omega t$  و جریان در پالس تغذیه‌ی  $2\omega t$  مستقیم است، ما می‌توانیم مشاهده کنیم که میان مولفه‌ی  $2\omega t$  و مولفه‌ی منفی جریان‌های متناوب خروجی رابطه‌ای وجود دارد.

بنابراین، بدون نیاز به اثبات پیچیده:

$$|I_{d_{2fs}}| = \frac{3}{2} Mk_{fs} |I_{inverse}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{Us_{peak}}{Ed} |I_{inverse}| \quad (14-14)$$

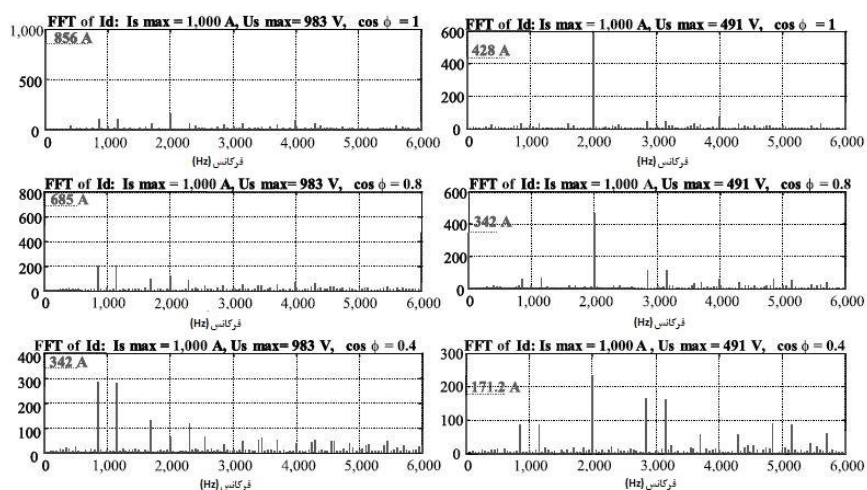


شکل ۱۴-۳۲ نمایش برداری جریان‌های خروجی و مولفه‌ی  $2fs$  در  $id$

#### ۱۴-۳-۲-۲-۳-۱۴ جریان $(id)$ ، مولفه‌های با فرکانس زیاد

محاسبه‌ی تحلیلی هارمونیک‌های مختلف  $id$  با فرکانس زیاد مسئله‌ای دشوار است. فرکانس ثابت  $fm$  توسط فرکانس دیگر  $fs$  مدوله می‌شود که به طور کلی متغیر است: مشکل بلندمدت در الکترونیته‌ی موجی که توابع بسل را وارد می‌سازد [ANG 65].

شکل ۱۴-۳۳ به  $FFT_{id}$  از  $Us_{max}$  و  $Us_{max}/2$  با  $fs=50Hz$  و  $cos\phi = 1, 0.8, 0.4 (Ed = 1,000V, fm = 1,000Hz)$  رده‌های ظاهر شده به آن‌هایی مربوط می‌گردند که در ولتاژ خروجی حضور دارند: اگر  $N$  علامت رده‌های ولتاژهای خروجی باشد، در  $id$  ما رده‌های  $N-1$  و  $N+1$  را پیدا می‌کنیم. دامنه‌ی این مرتبه‌ها تابعی از نرخ مدولاسیون و ضریب توان بار است (شکل ۱۴-۳۳ را ببینید)، بنابراین تابعی از اهمیت مولفه‌های مختلف جریان به منظور طراحی رابط  $DC$  است: خازن‌ها و باس‌ها.

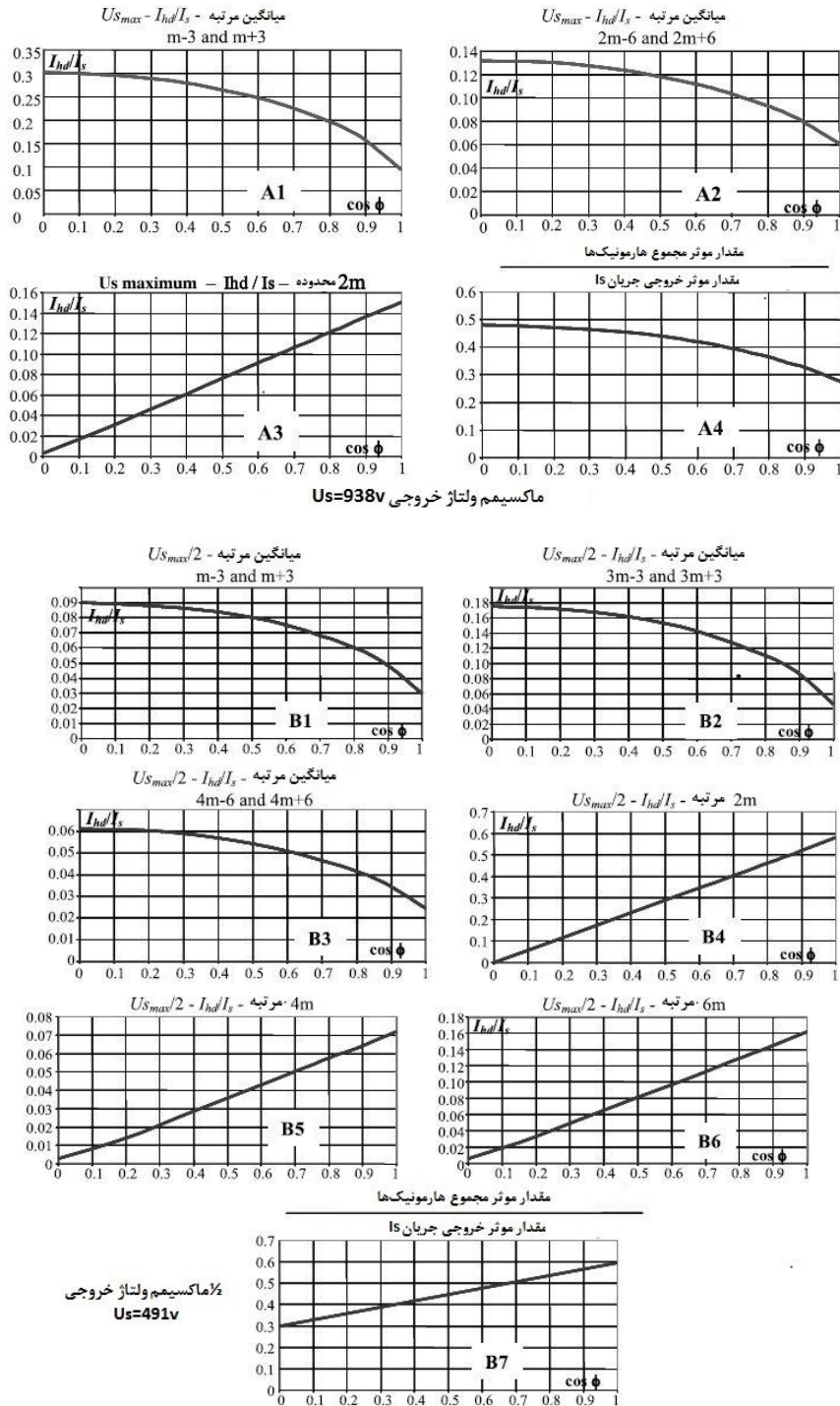


در شکل ۱۴-۳۳ نشان داده شده است که تعداد زیادی از طیف‌های جریان باس  $DC$  موجود می‌باشند. تغییر فاز جریان نسبت به موج پایه مبدل و خروجی ولتاژ، در حقیقت نسبت  $Us / Ed$  و مسلماً دامنه‌ی  $Is$  جریان خروجی تأثیر قابل توجهی بر طیف جریان دارند.

خطوط متفاوت توسط رده‌ی خود مشخص می‌گردند:  $Rank = \frac{fm \pm qfs}{fs} = m \pm q$  در

اینجا  $m$  زیروند مدولاسیون و  $q$  ضرایب کلی  $fs$  است. در شکل‌های ۱۴-۳۳ و ۱۴-۳۴  $fm = 1kHz$  و  $fs = 50Hz$ ، بنابراین  $m = 20 : m + 3$  به فرکانس  $1.150 Hz$  مربوط می‌شوند. در شکل ۱۴-۳۴ از نظر تناسب با جریان خروجی، مقادیر کاهش یافته‌ی  $idh/Is$  در نظر گرفته می‌شوند.





شکل ۱۴-۳۴ مولفه‌های اصلی طیف  $id$  در شرایط شکل ۱۴-۳۳. در شکل  $A4$  و  $B5$  با مقادیر کوچک  $RMS$  بر واحد، تنها ناهم‌واری در نظر گرفته می‌شود (جریان  $id$  مقدار میانگین در نظر گرفته نمی‌شوند)

توجه کنید که به ازای ولتاژ خروجی حداکثر، تمام طیف نسبتاً کاهش می‌یابد:  $A1$ ،  $A2$ ،  $A3$ ،  $A4$ ، به ویژه رده‌ی  $2m$ . به ازای نصف ولتاژ، این طیف بسیار غنی‌تر است:  $B1$ ،  $B2$ ،  $B3$ ،  $B4$ ،  $B5$ ،  $B6$ ،  $B7$  و به ویژه رده‌ی  $2m$  (به خصوص) برای ضریب واحد توان زیاد است.

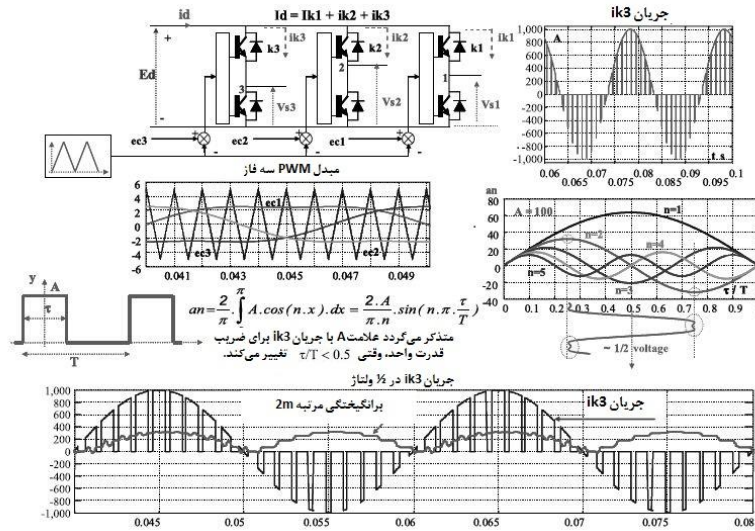
در شکل ۱۴-۳۵ پاسخی برای تفسیر این نتایج بدون نیاز به محاسبات بسیار پیچیده ارائه شده است: در نصف ولتاژ، به دلیل "تراز" ارائه‌شده توسط مولفه‌ی رشته‌ی صفر  $3fs$ ، زمان تولیدی هارمونیک  $2fm$  (حداکثر) قابل توجه می‌باشد.

جریان  $id$  مجموع جریان‌هایی می‌باشد که در کلیدهای  $k1$ ،  $k2$  و  $k3$  توپولوژی دو سطحی در گردش می‌باشند و در قسمت بالایی شکل ۱۴-۳۵ نشان داده شده است. این جریان‌ها از یک طرف توسط فرمان  $PWM$  ( $1kHz$  در این مورد) و از طرف دیگر توسط جریان  $is$  در فرکانس بار، دو بار مدوله می‌شوند.

انجام دو بار مدولاسیون تضمین می‌کند که رده‌ی  $2m$  همواره علامت یکسانی دارد، درحالی‌که عبارت  $an$  (سمت چپ مرکز شکل ۱۴-۳۵) از مدولاسیون مدت زمان ناشی می‌شود، تغییر علامت می‌دهد.

بنابراین، مرتبه‌ی  $2m$  سه جریان  $ik1$ ،  $ik2$ ،  $ik3$  به  $id$  افزوده می‌شوند. مطابق این توضیح مختصر، واضح است که مرتبه‌ی  $2m$   $id$  با ضریب توان کاهش می‌یابد. آشکار است که اگر ما هارمونیک سوم را در فرمان حذف کنیم، مدت زمان عبور  $\tau/T = 0.75$  و در نتیجه به صورت جزئی مرتبه‌ی  $2m$  را کاهش می‌دهیم (سمت راست مرکز شکل ۱۴-۳۴).

<sup>1</sup> Plateau



شکل ۱۴-۳۵ عنصر مورد نیاز برای درک شکل گیری مرتبه  $2m$

۱۴-۳-۲-۳ مقدار  $RMS$  جریان ناهموار در  $i_d$

$$id_{ond.eff} = \sqrt{\sum I_i^2 eff} \quad (14-15)$$

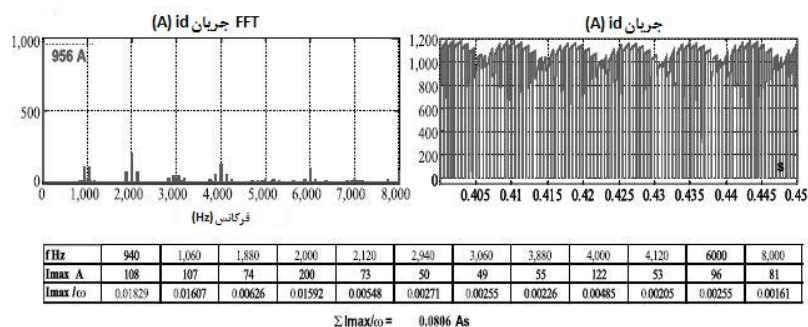
در این فرمول، جریان  $DC i_d$  در نظر گرفته نمی شود. این امر برای طراحی خازن های باس  $DC$  اساسی است. در شکل ۱۴-۳۴ در  $A4$  و  $B7$ ، بنابراین ما برای دو ولتاژ خروجی نسبت  $id_{ond.ms} / Is_{ms}$  را دنبال می کنیم. جریان  $RMS$  حاصل شده در  $B7$  برای نصف ولتاژ بیشتر از  $A4$  است. این مورد بیانگر کمک مهمی به رده  $2m$  است. شکل های ۱۴-۳۳، ۱۴-۳۴ و ۱۴-۳۵ از طریق محاسبات و با فرض نبود زمان تلف شده در فرمان کلیدهای کمکی، کلیدهای ایده آل (۱ هدایت، ۰ انسداد)، نبود ناهمواری در جریان  $i_s$  حاصل شده اند. در بخش بعدی، ما شبیه سازی هایی را انجام می دهیم که توپولوژی های  $IGBT$  را در نظر می گیرند (زمان های تلف شده ی نسبتاً زیاد،  $4 \mu s$ ).

۱۴-۳-۲-۴ شبیه سازی با بار مقاومتی متعادل در خروجی مبدل

مولفه‌های جریان با فرکانس زیاد به فرکانس کلیدزنی مربوط هستند. آن‌ها همچنین با طبیعت بار در ارتباط می‌باشند (به ویژه، ضریب توان).

$$E_d = 1,000V, f_m = 1,000Hz, f_s = 20Hz, U_{s,eff} = 684.5V, I_{s,eff} = 800A, E_{eff} = 683V$$

مقادیر موثر توسط SIMULINK تهیه شده اند و تمامی هارمونیک‌ها را در بر دارد.  $\cos \phi = 1, I_{d,eff} = 1,003A, I_{d,ond,eff} = 296A$

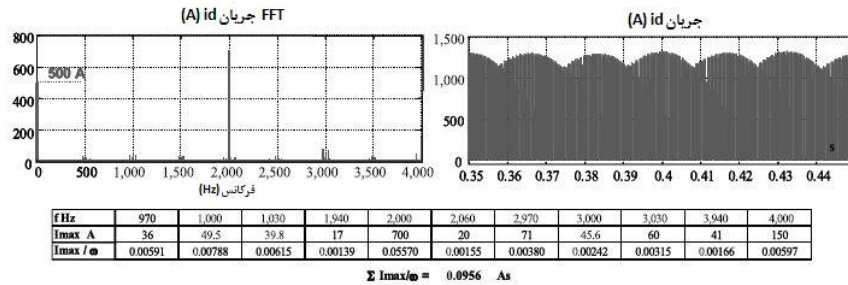


شکل ۱۴-۳۶ جریان  $i_d$  در باس DC با مبدل تولیدکننده‌ی بار مقاومتی

شبیه‌سازی شکل ۱۴-۳۶ یک FFT را آشکار می‌سازد که در آن جریان  $DCA$  ۹۵۶ بوده و در حقیقت به توانی مربوط می‌شود که با  $1000V$  در جریان است. با این حال، برای خطوط مختلف طیف، تحلیل مستلزم میزان مشخصی از احتیاط مرتبط با زمان تلف شده (نه به صورت بسط‌یافته اما در بالا اشاره شد) در فرمان کلیده‌های کمکی است.

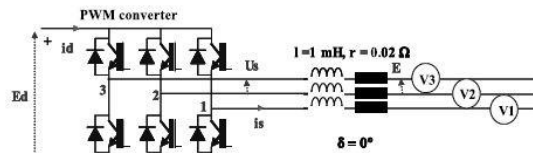
ما باید در این طیف خطوطی را در  $fm - 3fs, fm + 3fs, 2fm - 6fs, 2fm, 2fm + 6fs$  و  $4fm \dots$  پیدا کنیم. این شبیه‌سازی با  $fs = 20Hz$  انجام می‌شود؛ بنابراین به مبدل جانبی ماشین مربوط می‌شود. توجه کنید که مولفه‌های هارمونیک دارای مقادیری می‌باشند که کمی نسبت به مقادیر قابل محاسبه‌ی شکل ۱۴-۳۶ بیشتر هستند؛ این امر به سبب زمان تلف شده و ناهمواری جریان  $i_s$  در فازها رخ می‌دهد.

$E_d = 1,000V, f_m = 1,000Hz, f_s = 10Hz, U_{s,eff} = 336V, I_{s,eff} = 905A, E_{eff} = 341V, \cos \phi = 1$   
 مقادیر موثر توسط SIMULINK تهیه شده اند و تمامی هارمونیک ها را در بر دارد.  $I_{d,eff} = 753A, I_{d,ond,eff} = 570A$

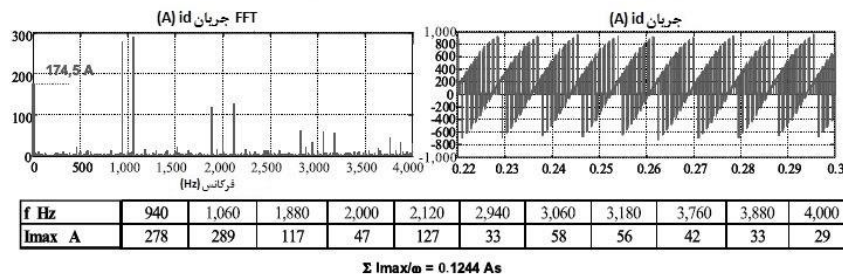


شکل ۱۴-۳۷ جریان  $i_d$  با مبدل تولیدکننده بار مقاومتی، نصف ولتاژ خروجی، نصف فرکانس

### ۱۴-۳-۲-۵ شبیه سازی با بار القایی تعادلی در خروجی مبدل



$E_d = 1,000V, f_m = 1,000Hz, f_s = 20Hz, U_{s,eff} = 693V, I_{s,eff} = 685A, E_{eff} = 540V_{eff}, \cos \phi = 0.218$   
 مقادیر موثر توسط SIMULINK تهیه شده اند و تمامی هارمونیک ها را در بر دارد.  $I_{d,eff} = 418A, I_{d,ond,eff} = 378A$



شکل ۱۴-۳۸ جریان  $i_d$  با مبدل تولیدکننده بار القایی زیاد

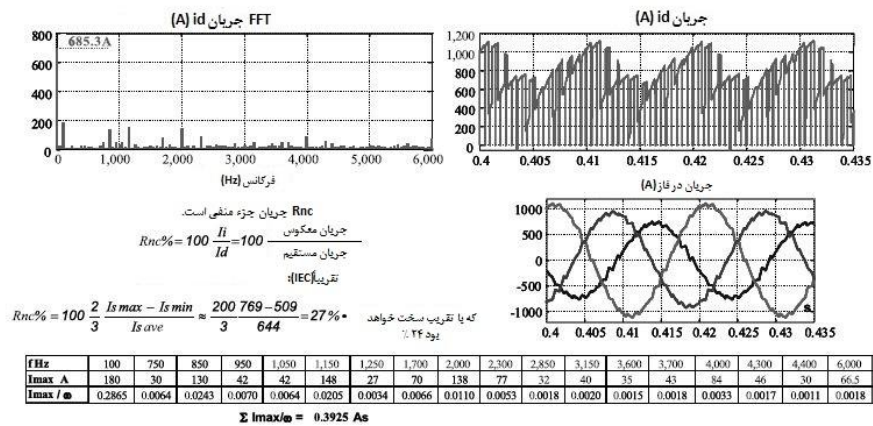
طیف فرکانسی در نصف ولتاژ متفاوت می باشد. این امر به ویژه به ناهمواری جریان (هارمونیک) بیشتر در  $I_s$  یکسان نسبت به ولتاژ کامل منجر می شود که دلیل آن ارتفاع رده ی  $m$  ۲ است. در شکل ۱۴-۳۸ شکل بسیار متفاوت جریان ارائه شده است و در آن خطوط جریان بیشتر می باشند که بیانگر محدودیت های سخت تر طراحی است.

### ۱۴-۳-۲-۶ شبیه سازی با بار نامتعادل در خروجی مبدل



$$E_d = 1,000V, f_m = 1,000Hz, f_s = 50Hz, U_{s_{eff}} = 684.5V, I_{I_{s_{eff}}} = 769A, I_{2_{eff}} = 654A, I_{3_{eff}} = 509A$$

مقادیر موثر توسط SIMULINK تهیه شده اند و تمامی هارمونیک‌ها را در بر دارد.  $I_{d_{eff}} = 744.6A, O_{d_{ond_{eff}}} = 291.2A$ .



شکل ۱۴-۳۹ جریان  $i_d$  با مبدل تولیدکننده‌ی بار نامتعادل

### ۱۴-۳-۳ طراحی رابط DC

جریان‌های قوی از رابط DC عبور می‌کنند - جریان DC و جریان‌های ارتباطی با فرکانس بالا که توسط کلید PWM تولید می‌گردند.

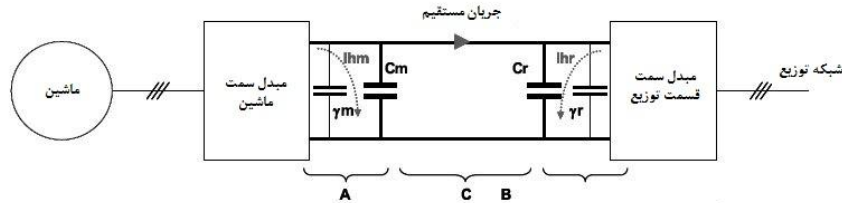
در نگاه اول، ما می‌توانیم هنگام طراحی جعبه تقسیم‌ها از مقادیر  $RMS$  راهنمایی بگیریم که هم برای توربین‌های آبی و هم مبدل‌های انرژی موجی کوتاه هستند (باید به خاطر داشته باشید که در بخش‌های خاص صنعتی ممکن است این جعبه تقسیم‌ها به طول چند ده متر باشند: برای مثال، صنایع فلزات و کاغذ).

ما در باس DC با دو نوع خازن مواجه می‌شویم (بزرگ و کوچک). خازن‌های کوچک ( $\gamma m, \gamma r$ )، به طور کلی کمتر از  $10 \mu F$  می‌باشند و از آن‌ها برای محدود کردن ولتاژ اضافی در هنگام کموتاسیون‌های IGBT استفاده می‌شود. آن‌ها نزدیک‌ترین قطعه به مولفه‌ها هستند (چند سانتی‌متر)؛ ما می‌توانیم تصور کنیم که آن‌ها به جای اینکه بخشی از باس باشند، بخش جدا نشدنی از مبدل‌های سمت ماشین (MS) و سمت شبکه (GS) هستند. همچنین مبدل‌های (MS و GS) بزرگتری نیز یافت می‌شوند که در آن‌ها جریان‌های هارمونیک اشاره‌شده در بخش‌های قبل محصور می‌باشند. مولفه‌های جریان‌های  $RMS$  حذف‌شده توسط مبدل سمت ماشین با  $I_{rms} m$  مشخص می‌شوند و آن‌هایی که توسط مبدل سمت شبکه حذف شده‌اند توسط  $I_{rms} r$  نشان داده می‌شوند.

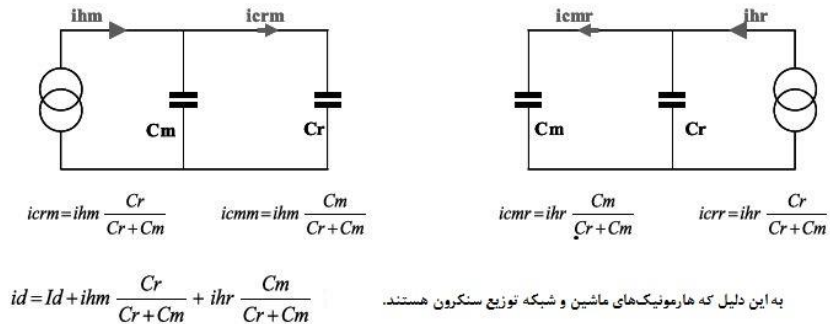
$$I_{busmachine} = \sqrt{Id^2 + I1rmsm^2 + I2rmsm^2 + I3rmsm^2 + I4rmsm^2 + \dots} = \sqrt{Id^2 + Idondrmsm^2}$$

$$I_{busgrid} = \sqrt{Id^2 + I1rmsm^2 + I2rmsm^2 + I3rmsm^2 + I4rmsm^2 + \dots} = \sqrt{Id^2 + Idondrmsm^2}$$

جریان های هارمونیک که توسط مبدل های سمت ماشین و سمت شبکه حذف گشته اند (  $I_{lim}$  و  $I_{jg}$  ) همگام می باشند، زیرا فرکانس ها معمولاً متفاوت می باشند؛ مقادیر مرتبه دوم  $RMS$  به این مقادیر افزوده می شوند. تنها یک مسئله قطعی است: ترجیح داده می شود که این جریان ها توسط کمترین امپدانس، یعنی بالاترین خازن محصور شوند، شکل ۱۴-۴۱ را ببینید. از این شکل ما جریان  $RMS$  در باس  $DC$  در ناحیه  $C$  از شکل ۱۴-۴۰ را نتیجه می گیریم.



شکل ۱۴-۴۰ رابط  $DC$  میان مبدل ها که باس  $DC$  نیز نامیده می شود



شکل ۱۴-۴۱ توزیع جریان ها در باس  $DC$

$$I_{deff} = \sqrt{Id^2 + \left(\frac{Cr}{Cr + Cm}\right)^2 Idondefm^2 + \left(\frac{Cm}{Cr + Cm}\right)^2 Idondefr^2} \quad (14-16)$$

می توان خازن های  $GS$  و  $MS$  را با قرار دادن در مرکز منطقه  $C$  در یک گروه قرار داد. در این مورد، ما برای منطقه  $A$  یک طرح و برای منطقه  $B$  یک طرح دیگر را پیدا می کنیم:

$$I_{deff_A} = \sqrt{Id^2 + Idondefm^2} \quad I_{deff_B} = \sqrt{Id^2 + Idondefr^2}$$

در یک ماشین فشرده، بهتر است تفاوت میان دو پاسخ در نظر گرفته نشود. با این حال، به دلیل فنآوری، اغلب توزیع  $MS-GS$  ارجحیت دارد.

$I_{max} / \omega$	$I_{max} A$	$fHz$
0.01829	108	940
0.01607	107	1060
0.00626	74	1880
0.01592	200	2000
0.00548	73	2120
0.00271	50	2940
0.00255	49	3060
0.00226	55	3880
0.00485	122	4000
0.00205	53	4120
0.00255	96	6000
0.00161	81	8000

جدول ۵-۱۴ هارمونیک‌های تولیدی توسط مبدل سمت ماشین با  $\cos \phi \approx 1$ ،  $f_s = 20Hz$  و  $I_{ms} = 800A$ . ولتاژ خروجی در مقدار حداکثر است.

در جدول ۵-۱۴ مقادیر حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۱۴-۳۶ دوباره تکرار می‌شوند. در شبیه‌سازی تمامی هارمونیک‌ها در نظر گرفته می‌شوند و به ما  $I_{ms} m = 296A$  را می‌دهد. این مقدار شامل اولین عنصر در طراحی خازن‌ها است. می‌توان این مقدار را تغییر داد یا تا مقیاسی کاهش داد؛ برای مثال، اگر ما بخواهیم برای جریان خروجی  $1,000A_{ms}$  یک خازن طراحی کنیم، ما به  $296 \times 1,000 / 800 = 370A$  می‌رسیم.

$I_{max} / \omega$	$I_{max} A$	$fHz$
0.00591	36	970
0.00788	49.5	1000
0.00615	39.8	1030
0.00139	17	1940
0.05570	700	2000
0.00155	20	2060

0.00380	71	2970
0.00242	45.6	3000
0.00315	60	3030
0.00166	41	3940
0.00597	150	4000

جدول ۶-۱۴ هارمونیک تولیدی توسط مبدل سمت ماشین با  $\cos \phi \approx 1$ ،  $fs = 10\text{Hz}$  و

$$Is_{ms} = 905A$$

در نصف ولتاژ خروجی

در جدول ۶-۱۴ مقادیر حاصل از شبیه سازی در شکل ۱۴-۳۷ دوباره تکرار می شوند. در شبیه سازی تمامی هارمونیک ها در نظر گرفته می شوند و به ما  $I_{ond_{ms}} m = 570A$  را می دهد. اگر ما بر اساس جریان  $1000IsA$  مقیاس آن را کاهش دهیم، به  $570x I, 000 / 905 = 630A$  دست می یابیم.

مقادیر  $370A$  و  $630A$  بیشتر از مقادیر حاصل از نتایج شکل ۱۴-۳۴ هستند، زیرا مقادیر  $RMS$  در شکل ۱۴-۳۴ از دامنه ی هارمونیک های با سطح بالا محاسبه می شوند (بنابراین، طیف آن محدود می گردد).

مقدار مشخص کننده ای که باید در طراحی در نظر گرفته شود ( $I_{ond_{ms}} m$ )، مقداری است که ما به ازای  $Is = 1000 A$  در نصف ولتاژ  $630 A$  به دست می آوریم.

$3I_{max} / \sum Is$	$I_{max} / \omega$	$I_{max} A$	$f\text{Hz}$
0.199	0.2865	180	100
0.033	0.0064	30	750
0.143	0.0243	130	850
0.046	0.0070	42	950
0.046	0.0064	42	1050
0.163	0.0205	148	1150
0.030	0.0034	27	1250
0.077	0.0066	70	1700
0.152	0.00110	138	2000
0.085	0.0053	77	2300
0.035	0.0018	32	2850
0.044	0.0020	40	3150
0.039	0.0015	35	3600
0.047	0.0018	43	3700
0.093	0.0033	84	4000
0.051	0.0017	46	4300

0.033	0.0011	30	4400
0.073	0.0018	66.5	6000

جدول ۷-۱۴ هارمونیک‌های تولیدی مبدل سمت شبکه،  $R_{nc} = 24\%$  نامتعادل

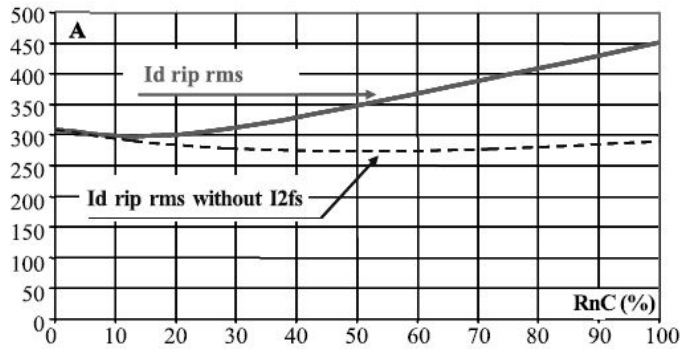
ادغام آن‌ها در سطح  $id$  با وجود عدم تعادل آسان نیست. در جدول ۷-۱۴ مقادیر شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل ۱۴-۳۹ دوباره تکرار می‌شوند. می‌توان  $Id$  (مقدار متوسط  $id$ ) را به راحتی بر اساس فرمول [14.16] بیان نمود. همچنین می‌توان گفت که هارمونیک  $2fs$ ، مشخصه‌ای از عدم تعادل است که به مولفه‌ی منفی مربوط می‌شود (به فرمول [14.14] مراجعه نمایید). با این حال، این تحلیل به لحاظ مقدار  $RMS Id$  ساده نیست: هرچه عدم تعادل بیشتر شود طیف غنی‌تر می‌شود؛ بنابراین ناهمواری مطابق افزایش هارمونیک  $2fs$  افزایش می‌یابد. درحالی‌که طیف کلی ممکن است غنی‌تر باشد، مقدار موثر طیف بدون  $I 2fs$  (با علامت  $lef spectrum$  در جدول نشان داده شده است) همان‌طور که در جدول ۷-۱۴ شکل ۱۴-۴۲ نشان داده شده است، به صورت جزئی تغییر می‌کند.

288.8	277.2	273.4	278.0	290.3	308.8	$I_{rms}$ طیف
490.0	392.0	294.0	196.0	98.0	0.0	$I 2fs$
577.4	461.8	346.4	230.9	115.5	0.0	$I_{negative}$
577.4	642.9	712.1	808.3	901.8	1000.0	$I_{positive}$
100.0	71.8	48.0	28.6	12.8	0.0	$R_{nc}$
451.1	392.0	343.5	310.6	298.4	308.8	$Id_{ripple rms}$
490.2	487.0	516.9	574.6	652.8	745.1	$Id_{rms}$
191.9	289.0	386.3	483.0	580.6	678.1	$Id$
0	200	400	600	800	1000	$I2$

جدول ۸-۱۴ محاسبه‌ی ناهمواری  $RMS$  در  $id$  برحسب عدم تعادل  $I1 = 1,000A$ ،  $\cos(\phi1) = 0.8$  با متغیر  $I2$  و  $\cos(\phi2) = 0.8$  در ولتاژ حداکثر تغییر می‌کند.  $I3$  و  $\phi3$  با صفر نگه داشتن جریان رشته‌ی صفر محاسبه می‌گردند.

برای این نوع عدم تعادل در شکل ۱۴-۴۲ نشان داده شده است که مقدار  $RMS$  ناهمواری ابتدا به صورت جزئی با کاهش  $I2$  تقلیل پیدا می‌کند و سپس به دلیل هارمونیک دوم به سرعت افزایش می‌یابد. در جدول ۸-۱۴ نشان داده شده است که با  $DC$  باید برای سیستم تعادلی (

$745A_{rms}$ ) طراحی شود، اما این خازن‌ها باید در جریانی موثر طراحی گردند که به نرخ مشخص مولفه‌ی منفی ( $R_{nc}$ ) مربوط می‌شود.



شکل ۱۴-۴۲ تغییر ناهموازی RMS در  $I_d$  برحسب عدم تعادل در جریان

#### ۱۴-۳-۴ فنآوری باس DC

باس DC باید بتواند مجموعه‌ی جریان‌ها،  $I_d$  و هارمونیک‌های مختلف را انتقال دهد. بنابراین، واضح است که مقادیر موثر محاسبه‌شده تعیین‌کننده می‌باشند. محاسبات ارزیابی تلفات ساده نیستند. این محاسبات برای جریان  $I_d$  دشوار نیستند اما برای جریان‌های هارمونیک این کار پیچیده‌تر است، زیرا مقاومت تابعی از فرکانس و هندسه‌ی باس است. به دلیل اثر پوشش، مقاومت با فرکانس تغییر می‌کند. فرمول‌های برگرفته از مدل کارسون [CAR 26] راه‌حل قابل قبولی ارائه می‌دهند (به [ANG 65] نیز مراجعه کنید). بطور کلی، این فرمول‌ها برای مهندسان مرتبط با آنتن‌ها شناخته‌شده می‌باشند.

این حقیقت که مقاومت با فرکانس افزایش می‌یابد، علی‌رغم تلفات ممکن است یک عامل مطلوب تلقی شود (این امر جریان‌های هارمونیک را کمی محدود می‌کند) اما از همه مهمتر، این تلفات دمپ را برای نوسانات باس‌های با فرکانس زیاد فراهم می‌کنند. علاوه بر جریان‌های هارمونیک تولیدی مبدل‌ها باید تشخیص داده شود که یک باس مانند خط عمل می‌کند و با خازن‌های توزیع‌شده و سلف‌های توزیع‌شده موجب نوسانات طبیعی می‌شود و اگر ما نتوانیم آن‌ها را به‌صورت کامل حذف کنیم این امر مورد توجه ما خواهد بود. بنابراین، یک باس "خوب" کمی سلف است تا دارای فرکانس صحیح زیاد، مقاومت کم در برابر جریان‌های با فرکانس کم (کاهش افت ولتاژ و تلفات) و مقاومت در برابر فرکانس‌های بسیار زیاد باشد (دمپ ضد تشدیدها در فرکانس زیاد).



شکل ۱۴-۴۳ ساختار باس DC

این اهداف با استفاده از باس‌های به اصطلاح تخت حاصل می‌شوند (شکل ۱۴-۴۳). دو بخش رسانا و بخش عایق به هم فشرده شده و در خلأ به هم چسبانده می‌شوند. تلمبه‌های عایق و چادرزنی باعث می‌شوند تا ما دو وجه را به هم متصل کنیم (ما به روش مدار چاپی نزدیک هستیم، اما با صدها آمپر).

### ۱۴-۳-۵ طراحی خازن‌ها

باس DC باید ثابت باشد. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده ما منبع کاملاً ثابت  $Ed$  را در نظر گرفتیم. اگر ولتاژ باس مذکور متغیر باشد، این امر بر محتوای هارمونیک اثر می‌گذارد و از همه مهم‌تر، هنگامی که ولتاژهای پیک خروجی به  $Ed$  نزدیک باشند، می‌تواند به اشکالاتی منجر شود. ناهمواری  $Ed$  ناشی از جریان‌های هارمونیک به واسطه‌ی خازن باس محدود می‌گردند،

$$C = MS + GS$$

$$u_{ond.} = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{\sum C} \int \left\{ \left( \sum_{im} I_{im} \sin(\omega_{im} t) \right) + \left( \sum_{jr} I_{jr} \sin(\omega_{jr} t) \right) \right\} dt$$

در فرمول [14.17]، جمع جریان‌های هارمونیک حاصل از ماشین با علامت  $im$  و جریان‌های سمت شبکه با علامت  $jr$  در نظر گرفته می‌شوند. در نظرگیری فاز این هارمونیک‌ها بسیار دشوار خواهد بود. بنابراین، ما خودمان را در نامطلوب‌ترین مورد قرار می‌دهیم که جمع حسابی است. بنابراین، با ارجاع به شکل‌های ۱۴-۳۶، ۱۴-۳۷، ۱۴-۳۸ و ۱۴-۳۹ ما می‌توانیم بنویسیم:

$$\Delta Ed_{ond.} = \frac{1}{\sum C} \left( \sum_{mi} \frac{I_{mi}}{\omega_{mi}} + \sum_{jg} \frac{I_{jg}}{\omega_{jg}} \right) \quad (14-17)$$

ما  $C$  رایج در دو مبدل را، یکی سمت ماشین و دیگری سمت شبکه، با  $Ed = 1,000V$  مشخص می‌کنیم. جریان‌های سمت ماشین  $I_{ms} = 707A_{ms}$  جریان‌های سمت شبکه،  $I_{g \max imal} = 707A_{ms}$  و نرخ مولفه‌ی منفی ۲۸.۶٪ است.

محاسبه‌ی  $\sum_{mi} \frac{I_{mi}}{\omega_{mi}}$ : شکل ۱۴-۳۷ به ما جریان پیک  $1279 A$  را با  $0.0956$  نشان می‌دهد. ما می‌توانیم آن را به مقیاس  $1000 A$  در آوریم

$0.0956 \times 1000 / 1279 = 0.0747$ . ما نصف ولتاژ خروجی (و نصف فرکانس) را در نظر می‌گیریم تا در شرایط ناهمواری حداکثر قرار گیریم.

محاسبه‌ی  $\sum_{jg} \frac{l_{jg}}{\omega jg}$  : به عنوان تابعی از توضیحات داده‌شده در جدول ۱۴-۵، طیف بدون هارمونیک دوم، به ازای جریان پیک حداکثری  $A = 10.87$  که در شکل ۱۴-۳۹ داده شده است، برابر  $0.106As = 0.3925 - 180 / (2\pi 100) = 0.106As$  است. با آوردن به مقیاس  $(A = 1000)$ :  $0.106 \times 1000 / 1087 = 0.095$ . این جمع  $Ih / \omega$  بدون هارمونیک دوم است. به ازای جریان پیک  $A = 1000$ ، اگر ما انتخاب کنیم که به تحمیل ویژگی پاسخ دهیم  $Rnc = 28.6\%$ ، در جدول ۱۴-۷ نشان داده می‌شود که  $Is 2f = 192A$  - بنابراین نتیجه به صورت مقابل است:  $0.095 + 192 / (2\pi 100) = 0.41As$

با در نظرگیری  $20V, \Delta Edrip$ ، برای مثال ما می‌توانیم مقدار خازن  $C$  را محاسبه کنیم:

$$C_1 = \frac{0.0747 + 0.41}{10} = 48.5mF$$

به مقدار زیاد مولفه‌ی منفی نتیجه توجه کنید. ما همچنین باید به خاطر داشته باشیم که ممکن است مقدار نهایی خازن بیشتر باشد: به دلیل جریان‌های که از آن عبور می‌کنند، ممکن است افزایش تعداد خازن‌های اولیه به صورت موازی ضروری باشد ...

ما با برخورد به مقدار  $H2$  (هارمونیک دوم) می‌توانیم دوباره تصمیم بگیریم: تا  $C$  را بدون در نظرگیری  $H2$  طراحی کنیم و مدار تشدیدکننده‌ی سری هماهنگ با  $H2$  را به موازات خازن برآیند قرار دهیم. در این مورد،  $C$  دارای مقدار زیر خواهد بود:

$$C_2 = \frac{0.0747 + 0.095}{10} = 16.97mF$$

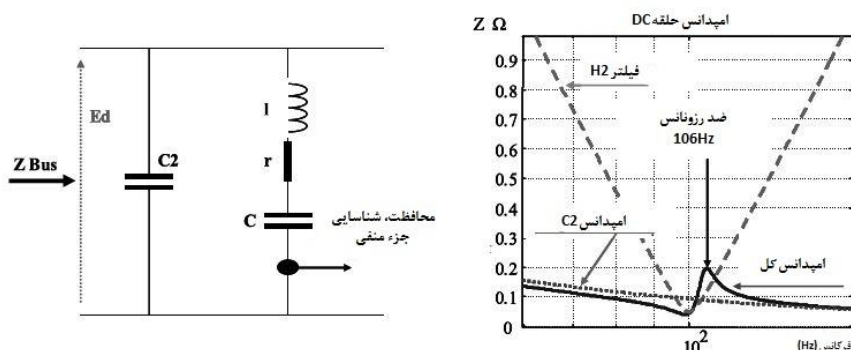
تعیین فیلتر  $DC$  هماهنگ با  $100 Hz$  ابتدا مستلزم انتخاب مقاومت سلف است: در تنظیم همساز، امپدانس فیلتر با مقاومت  $r$  سلف برابر است که جریان  $A = 192$  از آن عبور می‌کند. ولتاژ باید در حدود مقاومت از نظر چیزی که ما الان گفتیم کمتر از  $V = 10$  باشد. بطور صریح‌تر، امپدانس حاصل از  $C2$  و فیلتر باید هم‌ارز امپدانس  $C1$  باشند:

$$r = \frac{l}{\omega(C_1 - C_2)} = 50m\Omega$$

مقدار سلف با ملاحظات امکان‌پذیری مشخص می‌گردد که بر ضریب کیفیت  $Q = l\omega / r$  مبتنی می‌باشند. در  $100 Hz$ ، ضریب کیفیت ۲۰ واقع‌گرایانه می‌باشد، بنابراین

$$l = 20 \times 0.050 / (2\pi \cdot 100) = 1.59mH$$





شکل ۱۴-۴ امپدانس حلقه‌ی DC با فیلتر H2

بطور منطقی، این فیلتر دارای تشدید موازی بزرگتر از فرکانس همساز است:

$$\omega_{parallel} = \frac{I}{\sqrt{\frac{IC_2C}{C_2+C}}}$$

$C$  ( $1.6mF$ ) کوچک‌تر از  $C_2$  بوده و تشدید و ضد تشدید به یکدیگر نزدیک هستند (در اینجا شکاف تنها  $6Hz$  است). بنابراین، به‌کارگیری این فیلتر نسبتاً دشوار بوده و بطور واضح هنگامی که فرکانس خروجی  $\omega$  متغیر باشد، دشوارتر است (موردی با جریان اتصال کوتاه کم و کار به موازات گروه، آلترناتور دیزلی با کاهش فرکانس). به منظور بهبود ساختار چنین فیلتری، یعنی افزایش شکاف میان تشدید و ضد تشدید، ما می‌توانیم  $C$  را افزایش و  $I$  را کاهش دهیم.

انتخاب  $CI$  یا  $C_2+C$  فیلتر نتیجه‌ی انتخاب فنی-اقتصادی است: حجم/هزینه.

ارتباط میان مولفه‌ی منفی و هارمونیک دوم غیرقابل انکار است. با این حال، ممکن است مولفه-ی منفی یکسانی از روش‌های مختلف حاصل شود. در جدول ۱۴-۷ ما تنها دامنه‌ی جریان  $i_2$  را تغییر دادیم؛ ما می‌توانیم فازهای  $\phi I$ ،  $\phi 2$  را نیز تغییر دهیم. بنابراین، ما باید در برون‌یابی نتایج محتاط باشیم.

## ۱۴-۴ ذخیره‌سازی

برای توربین‌های آبی، کار ذخیره‌سازی ضروری نیست. با این حال، ممکن است به کنترل ولتاژ در باس ( $Ed$ ) در هنگام مراحل عبوری خاص، نسبتاً کوتاه با تعریف، مرتبط با حفاظت کمک کند: زمان‌های مورد بحث بیشتر از چند ثانیه نمی‌باشند. از طرف دیگر، برای مبدل‌های انرژی موجی مستقیم، به دلیل اینکه ماهیت امواج متغیر است، یک کار ضروری است که به زمان‌های

مربوط به دوره‌ی تناوب امواج می‌پردازد: باید ظرفیت‌های ذخیره‌سازی دست‌کم به اندازه‌ی ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شوند.

هنگامی که ما به دلیل قابلیت اطمینان و نگهداری، پاسخ‌های اینرسی را نادیده می‌گیریم (برای تأسیسات دریانوردی، مستغرق برای توربین‌های آبی یا متحرک برای مبدل‌های انرژی موجی)، وسایل مستعد ذخیره‌سازی استاتیکی می‌باشند: باتری‌ها و خازن‌ها.

ده سال پیش هنگامی که هیچ گزینه‌ی دیگری وجود نداشت، باتری‌های الکتروشیمیایی ابداع شدند. با این حال، آن‌ها دارای این اشکال بودند که فقط به صورت کند شارژ می‌شدند و تنها مقدار کمی از توان آنی را دریافت می‌کردند. بنابراین، ما به وسایل پیشرفته و تازه ذخیره‌سازی روی آوردیم: ابرخازن‌ها.

اکومولاتور	سوپر کندانسور	
شیمیایی	الکترواستاتیک	اصول کارکرد
۲۰۰۰-۱۰۰۰	مرتبط به پیش گرم سازی	تعداد سیکل‌ها
تحمّل ولتاژ	خطی بودن با جریان	$U=f(I)$
حدود ۸۰ درصد	بیش از ۹۵ درصد	راندمان
۱۵۰	۵۰۰۰-۱۰۰۰	چگالی توان $W/kg$
۱۵۰-۵۰	۴۰۶	چگالی انرژی $Wh/kg$

جدول ۱۴-۹ مقایسه‌ی مختصر میان ابرخازن‌ها و انباشت‌گرهای الکتروشیمیایی

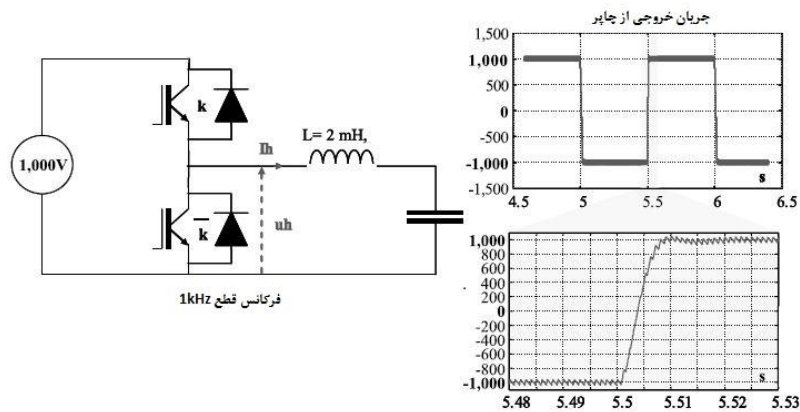
این جدول بیانگر وضعیت موجود در ۲۰۱۱ است. چندین تولیدکننده اعلام کرده‌اند که قصد دارند تا برای ابرخازن‌ها، ماشین‌هایی با چگالی انرژی ده برابری بسازند. ما می‌توانیم برای اینکه به خواننده در این مورد ایده بدهیم، خازن‌های  $700F, 2.5V$  را در بازار پیدا کنیم که قطر آن‌ها  $4cm$ ، طول  $5cm$  و حجم مفروض آن‌ها  $60cm^3$  است. ما برای درست کردن خازن  $1000V$ ، ۴۰۰ عدد از این خازن‌ها را به صورت سری قرار می‌دهیم. ظرفیت این خازن  $1.75F$  بوده و به دلیل مونتاژ حجم، فضای آن به اندازه‌ی  $50dm^3$  افزایش می‌یابد. انرژی ذخیره‌شده‌ی آن  $0.875MJ$  یا  $243Wh$  است.

با فرض توان تخلیه‌ی ثابت با علامت  $pd$ ، زمان تخلیه  $dt$  برابر است با:

$$dt = \frac{C}{2Pd} (U_0^2 - U_{min}^2) \quad (14-18)$$

درجایی که  $U_0$  ولتاژ شروع تخلیه است،  $U_{min}$  ولتاژ و پایان تخلیه از خازن  $C$  است. اگر  $U_0 = 980V$ ،  $U_{min} = 100V$ ،  $C = 1.75F$  و  $Pd = 100kW = ucic$  باشد، ما می‌توانیم  $pd$  را به مدت  $8/3s$  به ازای جریان حداکثری در انتهای تخلیه‌ی  $1000A$  فراهم کنیم.

بنابراین، واضح است که برای آزادسازی انرژی ذخیره در خازن باید ولتاژ در حدود آن تغییر کند. نمی‌توان این خازن را به‌طور مستقیم به باس‌های DC متصل کرد؛ انرژی باید از چاپر کمکی عبور کند.



شکل ۱۴-۴۵ چاپرهایی برای تطابق ذخیره‌سازی با باس DC به واسطه‌ی ابرخازن‌ها

در نمودار شکل ۱۴-۴۵ ضریب القای  $L$  میان خروجی چاپر و خازن نشان داده شده است. این ضریب القا از نقطه‌نظر تئوری منطقی است - نمی‌توان دو منبع ولتاژ (چاپر و خازن منبع ولتاژ می‌باشند) را بدون داشتن امپدانس یکسان میان آن‌ها به هم متصل کرد. در سطح فنی، ابرخازن‌ها - همانند بسیاری از قطعات دیگر - نمی‌توانند با ناهمواری بسیار زیاد در جریان مقابله کنند. بنابراین، از طریق ضریب القا، این ناهمواری به فرکانس کلیدزنی کاهش می‌یابد (در اینجا  $1\text{ kHz}$ ). این ناهمواری در نصف ولتاژ به حداکثر می‌رسد ( $\tau/T = 1/2$ ): اندازه‌ی مناسب آن (اگرچه تولیدکننده ابرخازن‌ها عدد دیگری را مشخص می‌کند) برابر  $\Delta I_c / I_{c_{average}} = 25\%$  است. در نتیجه، مقدار ضریب القا به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$L = \frac{Ed}{\Delta I_c} \frac{1}{2fm} \quad (14-19)$$

به ازای  $\Delta I_c = 1,000 \times 0.25 = 250\text{A}$ ،  $Ed = 1,000\text{V}$  و  $fm = 1\text{kHz}$  خواهیم داشت  $L = 2\text{mH}$ .

ما می‌توانیم عملکرد دینامیکی چاپر را در سمت راست تصویر مشاهده کنیم. حلقه‌ی جریان سریع برای حفاظت از مبدل برق بهترین گزینه است. این حلقه‌ی جریان باید داخلی در نظر گرفته شود؛ بدین معنا که منبع جریان چاپر مفروض از یک یا چند حلقه‌ی تنظیمی محیطی ناشی می‌گردد (برای مثال،  $Ed$ ). بنابراین به منظور جلوگیری از کاهش سرعت حلقه‌ی محیطی باید حلقه‌ی داخلی سریع باشد.

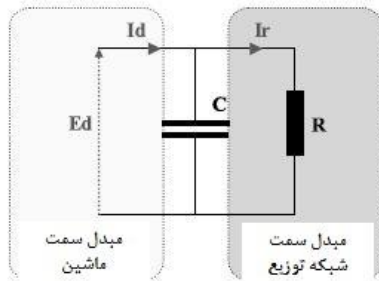
این مجموعه‌ی ذخیره‌سازی مطابق بخش  $C$  شکل ۱۴-۴ در تمامی شماهای کلی وارد شده است. حضور این مبدل باعث افزایش هارمونیک‌های  $fm, 2fm, \dots$  در باس  $DC$  می‌شود. این گفته باید در طراحی باس و خازن آن در نظر گرفته شود.

### ۱۴-۵ کنترل ولتاژ $Ed$

تنظیم ولتاژ  $Ed$  برای کارکرد منابع  $PWM$  در ولتاژ ضروری است. در اینجا مسئله نگهداری از خازن‌های باس است که صرف نظر از خالی یا پر بودن ماشین‌ها، با ولتاژ ثابت شارژ می‌گردند. این کارکرد به واسطه‌ی برداشت بخش کوچکی از انرژی فعال از مبدل‌های مختف انجام می‌شود (اگر یک مبدل موجود باشد، مبدل سمت ماشین یا مبدل سمت شبکه، یا مبدل ذخیره‌سازی).  
 - اگر  $Ed$  با استفاده از مبدل سمت ماشین کنترل گردد، بنابراین در نبود ذخیره‌سازی برای مبدل انرژی جریان جزر و مدی، شروع مجدد تقریباً در هر شش ساعت باید قبل از فاز پیش-شارژ خازن‌های حلقه انجام شود؛  
 - می‌توان از ظرفیت ذخیره‌سازی کوچکی برای پر کردن این شکاف توانی استفاده کرد: این دستگاه برای تأمین شبکه‌ی واقع در جزیره به منظور نگهداری ماشین‌های کمکی در حالت خودکار مطلوب است. اگر ظرفیت کمکی  $5kW$  و خودکاری به مدت یک ساعت فرض شود، به باس  $1kV$  و خازن  $0.63F$  نیاز خواهد بود.

### ۱۴-۵-۱ پایداری

شاید کنترل ولتاژ  $Ed$  در محدوده‌ی مجموعه‌ی موازی  $R-C$  ساده به نظر برسد. در حقیقت، این کار ساده است، اما چند حالت ویژه در رابطه با مقاومت وجود دارد. مبدل سمت شبکه که با مقاومت  $R$  در سمت مستقیم تقریب زده شده است، می‌تواند توان ثابتی را انتقال دهد: بنابراین  $P = EdId$  و  $P = EdId + Id dE = 0$ ، در نتیجه،  $Ed / Id = -\Delta Ed / Id = -rb$ ، ما مقاومت دینامیکی منفی خواهیم داشت. به عبارت دیگر، به دلیل توان ثابت هنگامی که ولتاژ کاهش یابد، جریان افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۴-۴۶ حلقه‌ی جریان مستقیم

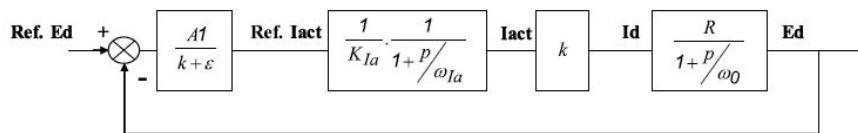
بنابراین، ارزیابی امپدانس باس ساده می‌گردد:

$$Z_b = \frac{R}{1+RCs} = \frac{-r_b}{1-r_bCs}, R = -r_b$$

عبارت حاصل‌شده‌ی  $r_b$  بیانگر قطب مثبت و پیچیدگی جزئی آن است:

$$Z_b = \frac{-r_b}{1-r_bCs} = \frac{1+r_bCs}{1-r_bCs} \cdot \frac{-r_b}{1+r_bCs} \rightarrow \frac{-r_b}{1+r_bCs} \text{ for } \omega > \omega_0 = \frac{1}{r_bC}$$

بنابراین، برای پالس‌های بیشتر از  $\omega_0$ ، ما عبارت مرسوم را داریم که استفاده از آن راحت است. ما رگولاتور  $PI$  را انتخاب می‌کنیم (یا  $PI$  با صفر). از میان آن‌ها ما رگولاتور اول را تشریح می‌کنیم که متناسب است.



شکل ۱۴-۴۷ حلقه‌ی کنترلی ولتاژ  $Ed$  باس  $DC$

- ضریب انتقال میان جریان اکتیو و جریان مستقیم  $k$  است:

$$k = \frac{I_d}{I_{actif}} = \frac{U\sqrt{3}}{2Ed} \text{ و } \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ متغیر است.}$$

- بهره‌ی اولین رگولاتور ولتاژ  $AI$  است؛ این بهره بر  $k$  تقسیم می‌شود تا بهره‌ی حلقه ثابت بماند (عبارت  $\varepsilon$  فقط برای جلوگیری از تقسیم بر صفر وارد شده است)؛

$$\text{بیانگر رفتار سیستم } I_{active} \text{ در حلقه‌ی بسته است. ما اتحاد با سیستم}$$

$$-\frac{1}{K_{Ia}} \cdot \frac{1}{1+s/\omega_{Ia}}$$

مرتبه اول را می‌پذیریم.

شکل ۱۴-۴۷ به ما اجازه می‌دهد تا بهره‌ی سیستم را در حلقه‌ی باز بنویسیم.

$$G_{BO} = \frac{A}{k + \varepsilon} \frac{I}{K_{la}} \frac{I}{1 + s/\omega_{la}} k \frac{I}{1 + s/\omega_0} \approx \frac{A_1 R}{K_{la}} \frac{I}{\left(1 + s/\omega_{la}\right) \left(1 + s/\omega_0\right)}$$

$$\text{for } \omega_0 < \omega_{la} \quad G_{BO} = \frac{A_1 R}{K_{la}} \frac{I}{\left(1 + s/\omega_0\right)}$$

$$G_{BO} = \frac{A_1 R}{K_{la}} \frac{I}{\left(1 + s/\omega_0\right)} \text{ for } \omega_0 < \omega < \omega_{la} \quad G_{BO} = \frac{A_1 R}{K_{la}} \frac{P/\omega_0}{\left(1 + s/\omega_0\right)} \rightarrow G_{BO} = \frac{A_1 R \omega_0}{K_{la} s}$$

$$\omega_{cbo} = \frac{A_1 R \omega_0}{K_{la}} = \frac{A_1}{K_{la} C} \text{ پالس قط حلقه‌ی بسته برابر است با:}$$

بنابراین، به منظور دستیابی به تابع مطلوب ما باید قادر به قرار دادن  $\omega_{cbo}$  مابین  $2\omega_0$  و  $\omega_{la}/2$  باشیم؛ ضرایب ۲ برای داشتن حاشیه فاز به اندازه کافی بزرگ حضور دارند:  $\omega I_a$  - باید زیاد باشد، یعنی، با رگولاتور جریان  $I_{active}$  به خوبی اجرا شود. مقدار  $\omega I_a$  تقریباً  $rad/s$  ۶۰۰ است؛

- مقدار  $\omega_0$  باید به اندازه‌ی کافی کوچک باشد. در این مورد،  $Ed = 1kV, Id = 1kA, R = 1\Omega, C = 48mF, \omega_0 = 20.8rad/s$  در این مورد می‌توان  $\omega_{cbo}$  را مابین پالس‌های  $rad/s$  ۴۱.۶ و  $rad/s$  ۳۰۰ قرار داد. بنابراین، پالس قطع مناسب در حلقه‌ی باز برابر  $rad/s$  ۱۱۱ است. این حدود با تساوی زیر حاصل می‌شوند:

$$\rightarrow 2\omega_0 = \omega_{la}/2 \text{ i.e. } \omega_0 < \frac{\omega_{la}}{4} \text{ or } \frac{4}{R\omega_{la}} < C < 6.6mF \text{ در اینجا}$$

به‌طور کلی:

$$C > \frac{4P}{Ed^2 \omega_{la}} \quad (14-20)$$

فرمول [14.20] توان را به کنترل مرتبط می‌کند. مقدار یافت‌شده‌ی  $C$  بر اساس ناهمواری  $Ed$  ( $V$  ۱۰) بسیار بیشتر از حد پایداری است. می‌توان محاسبات مشابهی با وجود فیلتر  $H2$  انجام داد. شبیه‌سازی انجام می‌شود (شکل ۱۴-۴۸ را ببینید). برای بارگذاری حلقه‌ی ولتاژ و درک پایداری آن، مراحلی در مرجع ولتاژ اضافه شده‌اند.

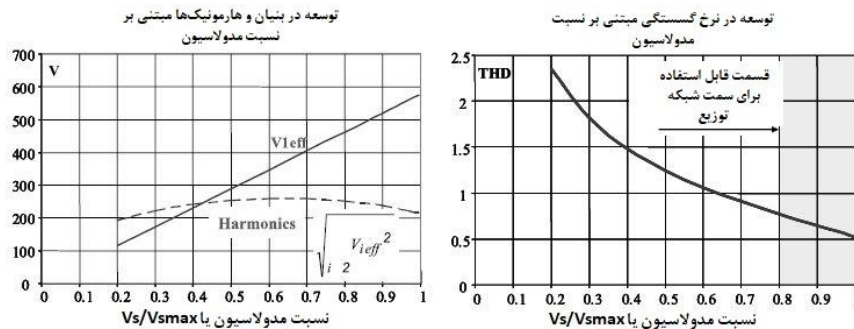


است. ولتاژ خروجی توسط طیف فرکانسی خود و به طور کلی توسط  $THD$  (اعوجاج هارمونیک کلی) خود تعریف می گردد:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_{ieff}^2}}{U_{ieff}} \quad (14-21)$$

بنابراین، در نبود فیلتر،  $THD$  به ۰.۶ نزدیک است. هارمونیک های اصلی در سطح طیفی عبارت اند از:

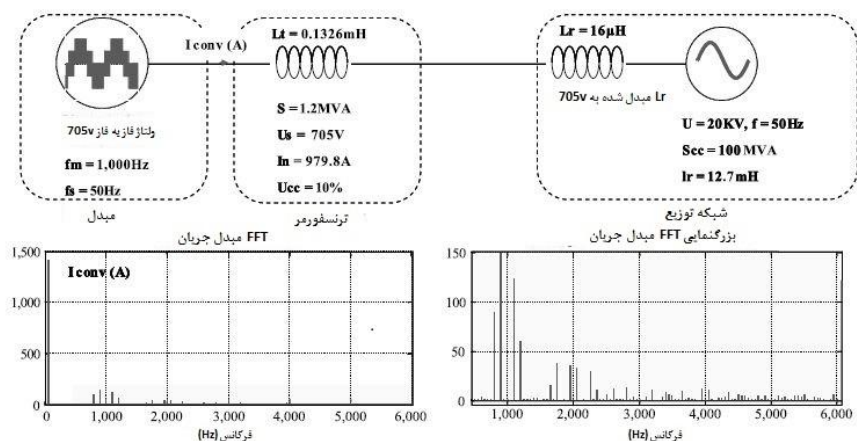
$$fm - 4fs, fm - 2fs, fm + 2fs, fm + 4fs : 2fm - 5fs, 2fm - fs, 2fm + fs, 2fm + 5fs : 3fm - 2fs, 3fm + 2fs : 4fm - fs, 4fm - fs, 4fm + fs \dots$$



شکل ۴-۴۹ مشخصه کلی ولتاژ ساده که در آن  $Ed = 1,000 V$

همان طور که در بالا ما  $fm=I$  را ثابت نگه داشتیم، با  $fm$  به عنوان فرکانس مدولاسیون و فرکانس خروجی برابر فرکانس شبکه،  $of = 50 Hz$  است. بهتر است قبل از  $60 Hz$  فیلترسازی شروع شود. تصور ساختگی جریان پیچیده است و هارمونیک از هارمونیک های ولتاژ ناشی می شود، اما ضرایب متفاوت القای جریان شامل وسایل طبیعی فیلترسازی می شوند. در دنیای واقعی، شکل ۱۴-۵۰ نشان دهنده ی طیف مرتبط با ولتاژ است.

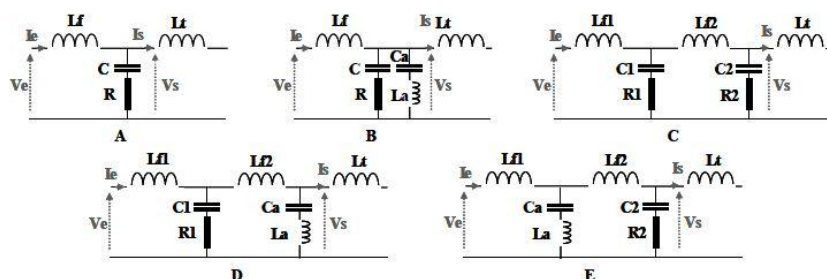




شکل ۱۴-۵ تحلیل محتوای هارمونیک جریان در نبود فیلتر. نمودار در ولتاژ مبدل نشان داده شده است

#### ۱۴-۶-۱ فیلترهای محتمل

ما می‌توانیم به فیلترهای محتمل بسیاری اشاره کنیم. در شکل ۱۴-۵۱ برخی از آن‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۴-۵۱ برخی از فیلترهای محتمل شبکه به نام فیلترهای سینوسی

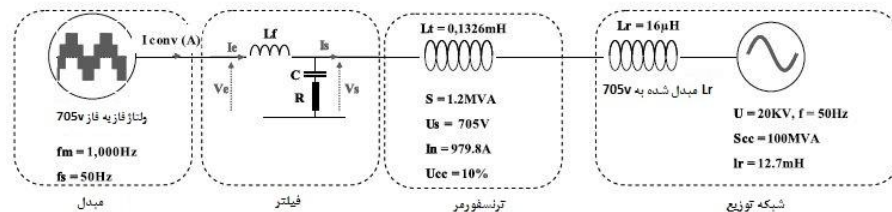
واضح است که برای مبدل دو سطحی که فرکانس کلیدزنی آن برابر  $f_m = 1 \text{ kHz}$  است، از دید شکل‌های ۱۴-۴۹ و ۱۴-۵۰، به فیلتری موثر در ورای  $40f_m$  یا  $800 \text{ Hz}$  نیاز است. خروجی کلیدزنی فرض شده با مبدل چهار سطحی و  $f_m = 1 \text{ kHz}$  برابر  $3f_m = 3 \text{ kHz}$  است، بنابراین فیلتر باید در ورای  $2800 \text{ Hz}$  موثر باشد که بسیار آسان‌تر است ... در هر فیلتری، عناصر سری محل افت ولتاژ در پایه هستند که بر طراحی اثر می‌گذارد. این مورد در عناصر از نوع انشعابی<sup>۱</sup> (موازی) که جریان را مصرف می‌کنند، نیز صادق است.

<sup>۱</sup> Shunt-type

عناصر سری که به طور طبیعی القایی هستند نیز ناهموازی را در جریان خروجی مبدل محدود می کنند. بنابراین، میان عناصر سری به شدت القایی برای محدود کردن افت ولتاژ در پایه و عناصر القایی تر برای روان سازی جریان در قطعات مبدل سازگاری وجود دارد. در نمودار شکل ۱۴-۵۱، ضریب القای  $Lt$  حاصل جمع ضرایب القای نشت ترانسفورماتور است. بنابراین، این ضریب القا بخشی از فیلترهای مختلف را شکل می دهد. می توان نشت ترانسفورماتور را به خوبی از ولتاژ اتصال کوتاه  $U_{cc}$ ، یعنی حدود ۱۰٪ برای توان اسمی انتقالی برآورد کرد. در مورد اخیر، برای اتصال سیستم به شبکه از کابل استفاده می شود. می توان کابل ها را با ضرایب القا و خازن های پراکنده نشان داد؛ بنابراین احتمال یک یا چند تشدید وجود دارد که مهم است حتی با جریان های ضعیف تحریک نشوند. بنابراین، ضروری است که فیلترسازی در فرکانس های زیاد قابل توجه باشد: گزینه ی مطلوب فیلتری با رفتار مرتبه دوم در فرکانس های زیاد  $f > 2,500 \text{ Hz}$  خواهد بود.

#### ۱۴-۱-۶-۱ حقایق کلی در رابطه با فیلترسازی

به عنوان مثال اول بگذارید ما فیلتر  $A$  از شکل ۱۴-۵۱ را در نظر بگیریم. همان طور که در شکل ۱۴-۵۲ نشان داده شده است، نمی توان این فیلتر را بدون شناخت کلی مدار بررسی کرد.



شکل ۱۴-۵۲ نمودار برآورد عملکرد فیلتر

با این حال، قبل از اینکه به جنبه های فیلترسازی بپردازیم، لازم است به برخی ملاحظات درباره ی فرکانس پایه توجه کنیم.

با فرض اینکه هدف از تأسیسات، انتقال توان باشد بهتر است که مقدار بالایی  $Lf$  را محدود کنیم تا انتقال توان در شرایط خوبی صورت گیرد. در فرکانس پایه، خازن فیلتر اثر ناچیزی بر امپدانس میان دو منبع، شبکه و مبدل دارد. ما عبارت  $X = (Lf + Lt + Lr)\omega$  را پیشنهاد می کنیم. در این شرایط، اگر  $Vc$ ، ولتاژ مبدل و  $Vr$ ، ولتاژ شبکه برابر باشند، انتقال توان فقط به زاویه ی .. میان دو منبع بستگی خواهد داشت:

$$P = \frac{3V^2}{2X} \sin(\delta) = \frac{U_{eff}^2}{X} \sin(\delta) \quad (۱۴-۲۲)$$

به ازای زاویه‌ی حداکثر  $\delta = 25^\circ$ ، توان اکتیو  $۱MW$  و  $Ed = 1 kV$ ، ما می‌توانیم ضریب القای حداکثر  $X_{max}$  را برآورد کنیم که امکان انتقال توان را فراهم می‌کند:

$$U_{eff} = \frac{Ed}{\sqrt{2}} \rightarrow P = \frac{E_d^2}{2X} \sin(\delta) \quad i.e \quad X_{max} = \frac{E_d^2}{2P} \sin(\delta) = 0.2113\Omega$$

این مقدار به ما ضریب القای حداکثر مابین منابع  $۰.۶۷۳ mH$  را می‌دهد. بنابراین، از نظر مقدار معادل ضریب القای ترانسفورماتور و شبکه، ضریب القای فیلتر باید کمتر از  $۰.۵۲۵ mH$  باشد. تمامی ساختارهای فیلترسازی دارای خازن‌های انشعابی می‌باشند. در شرایط خاصی امکان دارد که این خازن‌ها باعث افزایش ولتاژ شوند که بسیار مهم است با آن آشنا باشیم یا آن را محدود کنیم. این افزایش ولتاژ از ورود توان راکتیو خازن  $\Delta Q$  به جریان اتصال کوتاه  $SCC$  ناشی می‌گردد ([PAY 02] را ببینید):

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{\Delta Q}{S_{cc}}$$

در شرایط عادی هنگامی افزایش ولتاژ رخ می‌دهد که ولتاژ به مبدل اعمال شود درحالی‌که هنوز روشن نشده است. ولتاژهای  $AC$  فقط به مولفه‌های غیرفعال وابسته هستند. در مورد شکل ۱۴-۵۲، مولفه‌هایی که در  $(L_t + L_r)$  و  $C$  دخیل هستند. ولتاژ در محدوده‌ی  $C$  به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\rightarrow \frac{V_s}{V_r} = \frac{I}{1 - (L_t + L_r)C\omega^2} \quad \text{و داریم } V_s = V_r + \Delta V_r = V_r \left( 1 + \frac{\Delta V_r}{V_r} \right) \rightarrow$$

$$1 + \frac{\Delta V_r}{V_r} = \frac{I}{1 - 1 - (L_t + L_r)C\omega^2}$$

برای مثال، با قرار دادن  $\frac{\Delta V_r}{V_r}$  در ۴ درصد، ما نتیجه می‌گیریم که:

$$C_{Max} = \frac{I}{(L_t + L_r)\omega^2} \frac{\Delta V_r}{V_r} = \frac{0.04}{0.000148(314.16)^2} = 2.74mF$$

این مقادیر  $Lf$  و  $C$  چهارچوب فیلتر را تعیین می‌کنند.



۱۴-۱-۶-۲ فیلتر مرتبه دوم

۱۴-۱-۶-۲-۱ امپدانس مبدل

$$Z = L_f s \frac{s^2 + 2z_1 \omega_{n1} + \omega_{n1}^2}{s^2 + 2z_2 \omega_{n2} + \omega_{n2}^2} \text{ با } \omega_{n1} = \frac{1}{\sqrt{(L_t + L_r)C}}$$

$$\omega_{n1} = \omega_{n1} \sqrt{1 + \frac{L_t + L_r}{L_f}}$$

$$z_2 = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L_t + L_r}} \quad \text{and} \quad z_1 = z_2 \sqrt{1 + \frac{L_t + L_r}{L_f}}$$

۱۴-۱-۶-۲-۲ تابع انتقال فیلتر مرتبه دوم،  $V_s/V_e$ 

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{L_f C} \frac{I + RCs}{s^2 + 2z_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2} = \omega_{n1}^2 \frac{L_t + L_r}{L_t + L_r + L_f} \frac{I + RCs}{s^2 + 2z_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2}$$

(۱۴-۲۳)

$$\left( \frac{V_s}{V_e} \right)_{f \rightarrow 0} \rightarrow \frac{L_t + L_r}{L_t + L_r + L_f}, \left( \frac{V_s}{V_e} \right)_{\omega = \omega_0} \approx \frac{L_t + L_r}{L_t + L_r + L_f} \frac{1}{2z_1}, \left( \frac{V_s}{V_e} \right)_{\omega > \frac{1}{RC}, \omega_{n1}}$$

$$\rightarrow \omega_{n1} \frac{L_t + L_r}{L_t + L_r + L_f} \frac{RC}{s} \rightarrow \frac{R}{L_f s}$$

۱۴-۱-۶-۳-۲ تابع انتقال فیلتر مرتبه دوم،  $I_s/I_e$ 

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{(L_t + L_r)C} \frac{I + RCs}{s^2 + 2z_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2} = \omega_{n2}^2 \frac{I + RCs}{s^2 + 2z_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2}$$

(۱۴-۲۴)

$$\left( \frac{I_s}{I_e} \right)_{f \rightarrow 0} \rightarrow 1, \left( \frac{I_s}{I_e} \right)_{\omega = \omega_0} \approx \frac{1}{2z_2}, \left( \frac{I_s}{I_e} \right)_{\omega > \frac{1}{RC}, \omega_{n2}} \rightarrow \frac{R}{(L_t + L_r)s}$$

## ۱۴-۶-۱-۲-۴ فیلتر مرتبه دوم: کاربرد عددی

فرکانس کلیدزنی  $fm$  برابر  $1kHz$  و فرکانس پایه برابر  $50Hz$  است. ما در اینجا به توابع انتقال مرتبه دوم می‌پردازیم (ثابت زمانی  $RC$  کوچک است). روزنه‌ی تنظیم دو فرکانس صحیح مابین  $400Hz$  و  $600Hz$  قرار دارد. قرار دهید  $fn2 = 400Hz$  و  $\omega n2 = 2\pi 400 = 2,513.27r/s$

$$C = \frac{I}{(L_t + L_r)\omega_{n2}^2} = \frac{I}{(0.0001326 + 0.000016)(2513.27)^2} = 1.065mF$$

این مقدار بیانگر کاهش ولتاژ است:

$$Q = C\omega U^2 = 0.00106 \times 2\pi \times 50 \times 707 = 167.24KVA$$

به بیان دیگر ۱۴ درصد قدرت ایجاد شده ترانسفورمر.

قرار دهید  $fn1 = 550Hz$  (شکل ۵۳-۱۴) و  $\omega n1 = 2\pi 550 = 3,455rad/s$

$$L_f = \frac{L_t + L_r}{\left(\frac{\omega_{n1}^2}{\omega_{n2}^2}\right) - 1} = \frac{0.0001326 + 0.000016}{\left(\frac{550}{400}\right)^2 - 1} = 0.167mH$$

این مقدار بیانگر کاهش ولتاژ است:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{L_f \omega I_s}{V} = \frac{0.000167 \times 2\pi \times 50979.8}{408.187} = 12.6\%$$

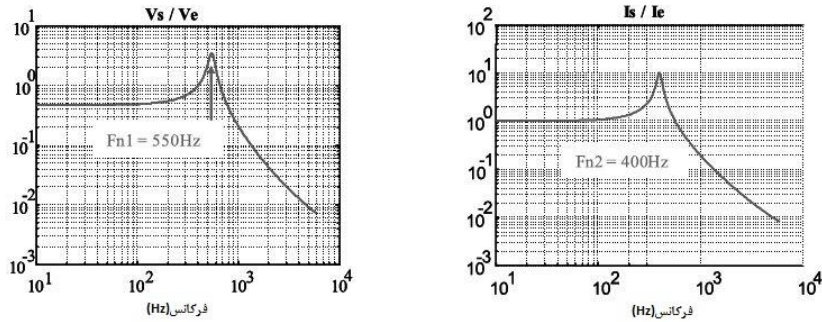
بگذارید  $fa$  فرکانس مرتبه اول صورت کسر باشد. بنابراین برای فرکانس‌های  $fm$  و  $fa$  فیلترسازی در مرتبه‌ی دوم باقی می‌ماند ( $80 \text{ rank} \rightarrow 4kHz$ ):

$$R = \frac{I}{C 2\pi fa} = \frac{I}{0.00165 \times 2\pi \times 4000} = 37.4m\Omega$$

دمپ فیلتر مرتبه دوم:

$$z_2 = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L_t + L_r}} = \frac{0.0374}{2} \sqrt{\frac{0.001065}{0.0001326 + 0.000016}} = 0.050$$

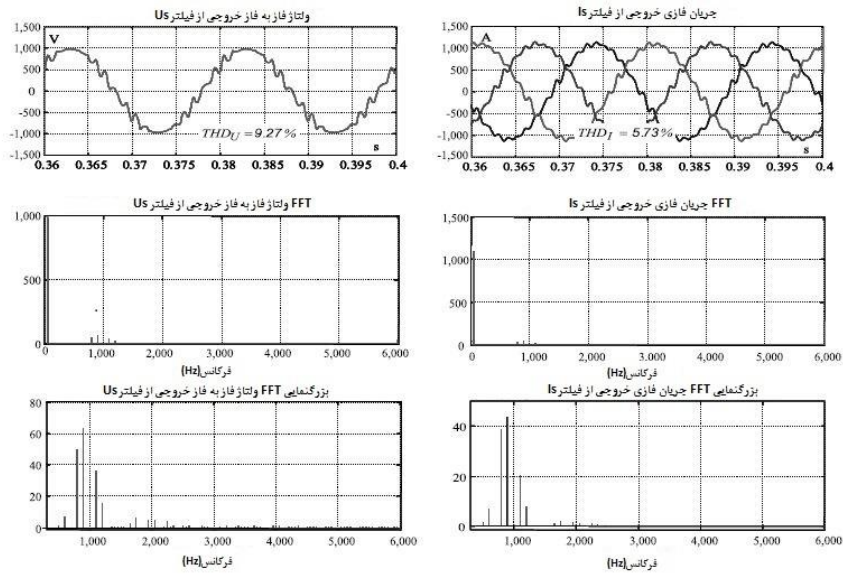
$$z_1 = z_2 \sqrt{1 + \frac{L_t + L_r}{L_f}} = 0.050 \sqrt{\frac{0.001065}{0.0001326 + 0.000016}} = 0.0687$$



شکل ۱۴-۵۳ فیلتر مرتبه دوم، پاسخ های فرکانسی

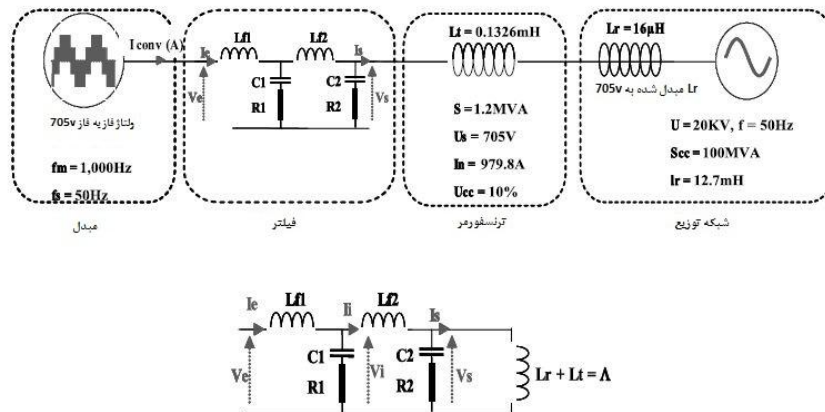
به طور واضح، می توان برای طراحی روشی دیگر را اتخاذ کرد. ما می توانیم مقدار دمپ را تعیین و از آن  $R$  را نتیجه بگیریم. برای مثال، فرض  $z1=0.687$  و  $z2=0.5$  به  $R=0.374\Omega$  زیرا  $f_a=400\text{ Hz}$  منجر می شود. بنابراین، فیلترسازی به طور قابل توجه کاهش می یابد، زیرا فرکانس های اولیه که در حال حذف شدن هستند، (حدود  $1\text{ kHz}$ ) با فیلتر مرتبه اول فیلتر خواهند شد.

۱۴-۶-۱-۲-۵ فیلتر مرتبه دوم، نتایج فیلترسازی



شکل ۱۴-۵۴ نتایج فیلترسازی، سلول ساده مرتبه دوم با خازن انشعایی

نتایج حاصل رضایت بخش نیستند:  $THD$  های ولتاژ و جریان ۹.۲۷٪ و ۵.۷۳٪ غیرقابل قبول می باشند. چیزی که جست و جو شده است،  $THD$  های کمتر از ۲٪ است. بنابراین افزایش مرتبه‌ی فیلتر ضروری می باشد.



شکل ۱۴-۵۵ نمودار ارزیابی فیلترسازی با دو سلول و خازن انشعابی (مرتبه چهارم)

#### ۱۴-۱-۶-۱ محاسبه‌ی فیلتر مرتبه چهارم

تابع انتقال، فیلتر مرتبه چهارم  $I_s/I_e$

$$\rightarrow \omega_{n2} = \frac{1}{\sqrt{(L_t + L_r)C_2}} \quad \omega_{n1} = \omega_{n2} \sqrt{1 + \frac{L_t + L_r}{L_{f2}}}$$

$$\rightarrow z_2 = \frac{R_2}{2} \sqrt{\frac{C_2}{L_t + L_r}} \quad z_1 = z_2 \sqrt{1 + \frac{L_t + L_r}{L_{f2}}}$$

ما به عبارت زیر دست پیدا می کنیم

$$\frac{I_s}{I_e} = \frac{\omega_{n2}^2 (1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}{(1 + R_1 C_1 s)(s^2 + 2z_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2) + L_{f2} C_1 s^2 (s^2 + 2z_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2)}$$

قرار می دهیم:

$$A = L_{f2} C_1, B = R_1 C_1 + 2L_{f2} C_1 z_1 \omega_{n1}, C = 1 + 2R_1 C_1 z_2 \omega_{n2} + L_{f2} C_1 z_1 \omega_{n1}^2$$

$$D = 2z_2 \omega_{n2} + R_1 C_1 \omega_{n2}^2$$

$$\frac{I_s}{I_e} = \frac{\omega_{n2}^2 (1 + R_1 C_1 s)(1 + R_2 C_2 s)}{s^4 A + s^3 B + s^2 C + s D + \omega_{n2}^2}$$

این عبارت بسیار پیچیده است. به منظور ساده سازی آن بگذارید ما فرض کنیم که  $R_1 = R_2 = 0$  و از آن فرض می شود که  $z_1 = z_2 = 0$

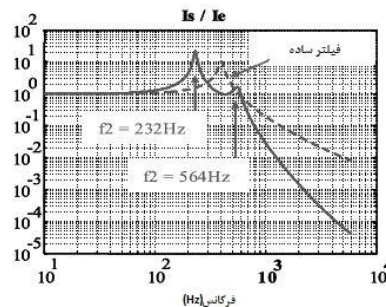
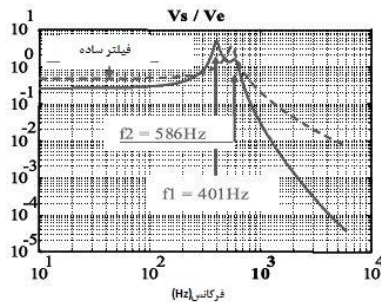
$$\frac{I_s}{I_e} = \frac{\omega_{n2}^2}{L_{f2}C_1} \frac{I}{s^4 + \frac{1+L_{f2}C_1\omega_{n1}^2}{L_{f2}C_1}s^2 + \frac{\omega_{n2}^2}{L_{f2}C_1}} = \frac{\omega_{n2}^2}{L_{f2}C_1} \frac{I}{(s^2 - s_1^2)(s^2 - s_2^2)}$$

$$s_{1,2}^2 = \frac{-\left(1 + \frac{L_{f2}C_1}{C_2(L_i + L_r)}\left(1 + \frac{L_i + L_r}{L_{f2}}\right)\right) \pm \sqrt{\left(1 + \frac{L_{f2}C_1}{C_2(L_i + L_r)}\left(1 + \frac{L_i + L_r}{L_{f2}}\right)\right)^2 + 2\frac{C_1}{C_2}\left(1 - \frac{L_{f2}}{L_i + L_r}\right)}}{2L_{f2}C_1}$$

(۱۴-۲۵)

با وجود این ساده سازی، همچنان محاسبه ی  $L_{f2}$  و  $C_1$  دشوار است. با این حال، این حقیقت که دو قطب  $S_1^2$  و  $S_2^2$  به صورت تحلیلی شناخته شده هستند، روش آزمون و خطای سریع با استفاده از نرم افزاری متداول مانند EXCEL یا برنامه های غیر معمول مانند MATLAB را تسهیل می گردد. ما این فرآیند آزمون و خطا را با استفاده از مقادیر فیلتر قبلی، ساختار تک خازن انشعابی،  $I_{f2} = I_{f1}$  و  $C_1 = C_2 = C$  آغاز می کنیم. هدف ما، قرار دادن دو قطب میان  $200\text{ Hz}$  و  $550\text{ Hz}$  است: هدف از  $550\text{ Hz}$  برای تضعیف زیاد در  $1\text{ kHz}$  و هدف از  $200\text{ Hz}$  یا بیشتر برای دور شدن از هارمونیک پایه و سوم است.

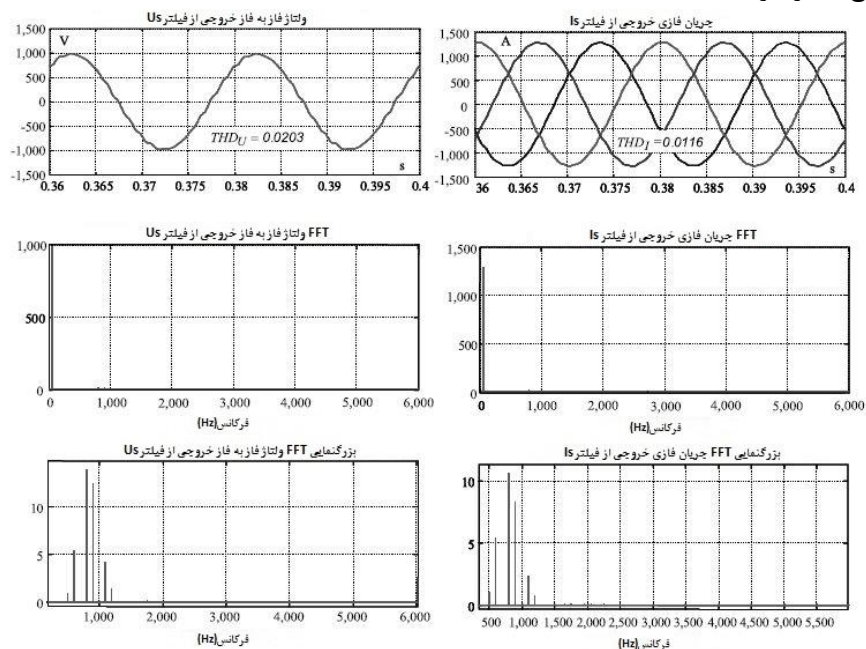
مقادیر منتخب برای مسیرهای موجود در شکل ۱۴-۵۶ مطابق مقابل می باشند: پارامتر  $L_{f1} = 0.167\text{ mH}$ ,  $C_1 = C_2 = 1\text{ mF}$ ,  $R_1 = 37.3\text{ m}\Omega$ ,  $R_2 = 37.3\text{ m}\Omega$  هیچ اثری بر تابع انتقال  $I_s/I_e$  ندارد و پس از چندین آزمایش و به دنبال  $V_s/V_e$  انتخاب شده است. توجه کنید که  $L_{f1} + L_{f2} < L_{max} = 0.4\text{ mH}$  است تا انتقال توان تضمین گشته و جمع خازن های  $C_1 + C_2 < C_{max}$  باعث افزایش ولتاژ در ورای محدوده های انتخابی نشود.



شکل ۱۴-۵۶ - توابع انتقال مجاز - مقایسه با فیلتر به اصطلاح ساده و مرتبه دوم

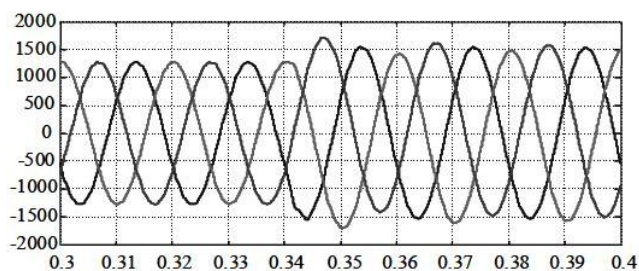


## نتایج فیلترسازی



شکل ۱۴-۵۷ نتایج فیلترسازی - با دو سلول خازن انشعابی

این فیلتر مجاز است، زیرا  $THD$  های حاصل در جریان و ولتاژ با تقاضای معمولی شبکه‌ها سازگار هستند. توجه کنید که فیلتر اول از مرتبه‌ی دوم تا حدود ۸۰ و مرتبه اول برای فرکانس‌های بیشتر است. مورد دوم از مرتبه‌ی چهارم تا ۸۰ بوده و مرتبه‌ی دوم برای فرکانس‌های بیشتر است. بنابراین فیلتر دوم از یک طرف برای کابل‌هایی که باعث تولید تشدید در ورای مرتبه‌ی ۵۰ می‌شوند و از طرف دیگر برای  $TIF$  (عامل سطوح مشترک تلفن، به  $IEEE Std 519-1992$  رجوع شود: این منحنی وزنی هارمونیک‌های جریان است که به فرکانس بستگی دارند) که تا مرتبه‌ی ۵۰ در نظر گرفته می‌شود، دارای مزیت است.



شکل ۱۴-۵۸ رفتار جریان‌ها پیرو گام زاویه‌ی داخلی در فرمان مبدل

با مشخص شدن فیلتر، بهتر است از طریق شبیه سازی تأیید شود که رفتار آن در رژیم گذرا رضایت بخش است. شکل ۱۴-۵۸ پیرو گام زاویه‌ی داخلی در مبدل حاصل شده است. پایداری حلقه‌ی باز محدود بوده اما قابل قبول است. می‌توان از طریق کنترل و واردسازی دمپ دینامیکی در قطب‌های زیر  $300\text{ Hz}$ ، این وضعیت را بهبود بخشید.

#### ۱۴-۱-۳-۲ ساختارهای دیگر فیلترسازی

این‌ها ساختارهای انشعابی تنظیم شده هستند که باعث بروز مشکلاتی، ابتدا در انتخاب فرکانس تنظیم و ثانیاً در گزینشگری می‌شوند. انتخاب میزانی برای فرکانس‌ها که بیشترین آشفتگی را در طیف‌های ولتاژ و جریان ایجاد کند، منطقی به نظر می‌رسد. برای مبدل دو سطحی، این فرکانس‌ها عبارت‌اند از:

$$fm - 4of, fm - 2of, fm + 2of, fm + 4of, 2fm - 5of, 2fm - of$$

بنابراین، ما به چندین ساختار انشعابی یا دو ساختار نیاز خواهیم داشت (یکی در  $fm$  دیگری در  $2fm$  با گزینشگری کم و در نتیجه به لحاظ فیلترسازی موثر نخواهد بود).

ساختارهای انشعابی به شکل زیر می‌باشند:

$$Z_a = R_a + j \left( L_a \omega - \frac{1}{C_a \omega} \right)$$

به همراه:

$$L_a C_a \omega_a^2 = 1, Q_a = \frac{L_a \omega_a}{R_a} = \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} \quad \text{ضریب کیفیت}$$

ما می‌توانیم بنویسیم:

$$Z_a = R_a \left( 1 + j Q_a \left( \frac{\omega}{\omega_a} - \frac{\omega_a}{\omega} \right) \right)$$

با اعمال  $\omega = \omega_a + \Delta\omega$  ما به عبارت زیر می‌رسیم:

$$\frac{\Delta Z_a}{R_a} \approx 2j Q_a \frac{\Delta\omega}{\omega_a} = 2j Q_a \frac{\Delta f}{f_a} \quad (14-26)$$

اگر  $fa = fm = 1\text{ kHz}$  و  $\Delta f = s = 200\text{ Hz}$  با  $Qa = 100$  در فرکانس  $fa$  باشند، ما به مقدار ۴۰ برای تغییر نسبی امپدانس دست پیدا می‌کنیم. گفتنی است که باریکه‌های کناری به خوبی فیلتر نمی‌شوند. بنابراین، این ساختارها فقط برای فرکانس‌های کلیدزنی زیاد یا تبدیل-

های چند سطحی مناسب هستند. فرکانس مفروض یک مبدل چهار سطحی برابر  $3fm$  خواهد بود.

#### ۱۴-۷ انتقال

انتقال انرژی به شبکه‌های حمل یا توزیع یک مشکل واقعی در سطح فنی و مالی است. در طول دهه‌ی گذشته مزرعه‌های بادی فراساحل بسیاری با توان بالا در حال ساخت و عملیاتی شدن بودند و تعداد مشخصی از فن‌آوری‌ها در زمینه‌ی اتصالات پدیدار شدند. این گفته تا حدودی برای توربین‌های آبی نیز صدق می‌کند.

امروزه توربین‌های بادی مورد استفاده در کاربردهای فراساحل توان واحدی مابین ۳ تا  $5MW$  دارند؛ مزارع توانی در حدود  $100MW$  دارند. توان واحد حداکثری توربین‌های آبی حدود  $1.5MW$  و میانگین آن در حدود  $500kW$  متمرکز شده است.

بازده تولید توربین‌های بادی به عمق بستگی ندارد، اما نصب آن‌ها به‌ویژه برای اعماق بیشتر از  $50m$  پرهزینه است (پاسخ‌های شناور قابل تصور می‌باشند، اما مهار آن‌ها بسیار دشوار است). در توربین‌های آبی، عمق باعث بروز مشکلاتی در راه‌اندازی می‌شود، اما با فرض اینکه سرعت جریان‌ها با افزایش فاصله از سطح کاهش می‌یابد [DAV 04]، عمق همانند توپولوژی بستر دریا در محل قرارگیری سازه، یک پارامتر کاربردی مهم است.

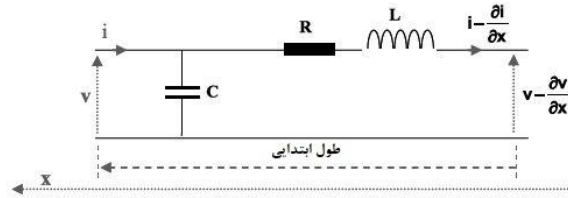
از یک طرف نوع اتصال به شبکه به توان بستگی دارد و از طرف دیگر به عمق غرق‌شدن بستگی دارد. مزارع بادی در جایی راه‌اندازی می‌شوند که باد بوزد؛ مزارع توربین آبی در جاهایی که جریان وجود داشته باشد. به‌طور کلی مناطقی که در آن جریان وجود دارد از مناطق میان جزیره و خشکی یا میان جزایر عبور می‌کنند. سایت‌های از این قبیل کمتر یافت می‌شوند و مزارع توربین آبی نسبت به مزارع توربین بادی قدرت کمتری خواهند داشت.

#### ۱۴-۷-۱ نکاتی در مورد کابل‌ها

با وجود اینکه کل فصل ۱۵ به کابل‌های انتقال اختصاص داد شده است، توسعه‌ی آن‌ها در این بخش به منظور پرداختن به اتصالات الکتریکی میان کابل‌های و عناصر دیگر در سیستم‌های انتقال ضروری است.

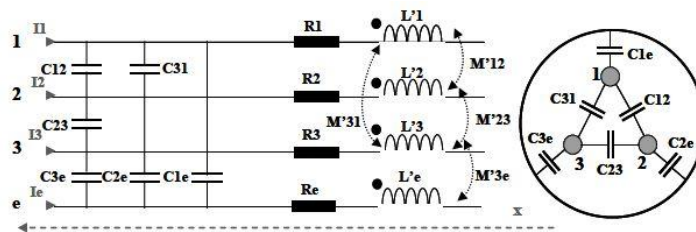
#### ۱۴-۷-۱-۱ مدل‌سازی مختصر

هدف از این مدل‌سازی قرار دادن مدل تک‌فازی معادل است که از امپدانس‌هایی بر واحد طول ساخته شده است (شکل ۱۴-۵۹ را ببینید).



شکل ۱۴-۵۹ مدل تک‌فازی کابل

به منظور دستیابی به این نتایج، فرض شده است که کابل در شکل ۱۴-۵۹ مایل است.



شکل ۱۴-۶۰ مدل سه‌فازی کابل سه‌فازی

- $L'_i$  ضرایب القای مخصوص هر کابل است و  $L'_e$  ضریب القای جداره یا زره است؛
  - $R_i$  مقاومت هر رسانا است،  $R_e$  مقاومت جداره یا زره است؛
  - $M'_{ij}$  ضرایب القای متقابل میان رساناها است،  $M'_{ie}$  ضریب القای متقابل میان جداره و رساناها است؛
  - $C_{ij}$  ظرفیت‌های خازنی میان رساناها است؛
  - $C_{ie}$  ظرفیت‌های خازنی میان رساناها و جداره است.
- مدل‌سازی القایی توسط سیستم [14.27] حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{1e}}{\partial x} \\ \frac{\partial V_{2e}}{\partial x} \\ \frac{\partial V_{3e}}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_1 - M'_{1e} & M'_{12} - M'_{2e} & M'_{13} - M'_{3e} \\ M'_{1e} - M'_{12} & L'_2 - M'_{2e} & M'_{32} - M'_{3e} \\ M'_{12} - M'_{1e} & M'_{32} - M'_{2e} & L'_3 - M'_{3e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial x} \\ \frac{\partial I_2}{\partial x} \\ \frac{\partial I_3}{\partial x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} - R_e I_e - L'_e \frac{\partial I_e}{\partial t}$$

(۱۴-۲۷)

مدل‌سازی خازنی ساده‌تر است (ما از تلفات دی‌الکتریک‌ها صرف نظر می‌کنیم):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial x} \\ \frac{\partial I_2}{\partial x} \\ \frac{\partial I_3}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{12} & 0 & C_{13} \\ C_{21} & C_{23} & 0 \\ 0 & C_{23} & C_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_{12}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{23}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{31}}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{1e} & 0 & 0 \\ 0 & C_{2e} & 0 \\ 0 & 0 & C_{3e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_{1e}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{2e}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{3e}}{\partial t} \end{bmatrix}$$

(۱۴-۲۸)

تقارن کابل بدین معناست که:

$$R_1 = R_2 = R_3 = r$$

$$L'_1 = L'_2 = L'_3 = L'$$

$$M'_{12} = M'_{2e} = M'_{3e} = M'_e$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{32} = C$$

$$C_{1e} = C_{2e} = C_{3e} = C_e$$

استفاده از کابل در نبود مولفه‌های هم‌قطبی در جریان و ولتاژ منجر می‌گردد به:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0, \quad V_{1e} + V_{2e} + V_{3e} = 0 \quad I_e = 0$$

مدل‌سازی القایی و خازنی به ترتیب به [14.29] و [14.30] تبدیل می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial V_{1e}}{\partial x} \\ \frac{\partial V_{2e}}{\partial x} \\ \frac{\partial V_{3e}}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L' - M' & 0 & 0 \\ 0 & L' - M' & 0 \\ 0 & 0 & L' - M' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial x} \\ \frac{\partial I_2}{\partial x} \\ \frac{\partial I_3}{\partial x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (۲۹-۱۴)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial x} \\ \frac{\partial I_2}{\partial x} \\ \frac{\partial I_3}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3C + C_e & 0 & 0 \\ 0 & 3C + C_e & 0 \\ 0 & 0 & 3C + C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial v_{e1}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{e2}}{\partial t} \\ \frac{\partial v_{e3}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (۳۰-۱۴)$$

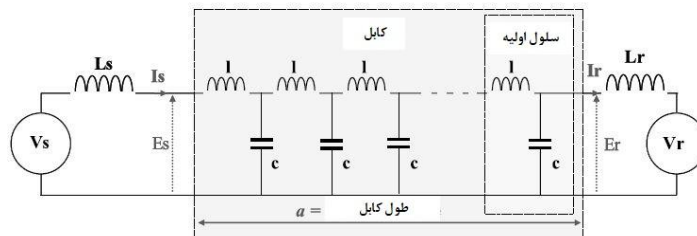
—  $L' - M' = l$  ضریب القای چرخه‌ای خطی<sup>۱</sup> است که توسط تولیدکنندگان داده می‌شود و معمولاً به واحد  $mH/km$  است. همچنین ضریب القای مستقیم برابر با ضریب القای منفی است؛

<sup>۱</sup> Cyclic lineic inductance

$C_e + 3C = c$  ظرفیت خطی داده شده توسط تولیدکنندگان و به واحد .. است. همچنین ظرفیت رشته‌ی صفر کابل است.

#### ۱۴-۷-۱-۲ انتقال توان

هدف از این بخش بررسی محدودیت‌های اتصال توسط کابل برای یک سیستم به لحاظ انتقال توان اکتیو (زاویه  $\delta$ ) و رفتار خازنی کابل‌ها است. بنابراین، می‌توان کابل را با سلول‌های اولیه  $l$ ،  $c$ ، ضریب القا و ظرفیت بر واحد طول نشان داد.



شکل ۱۴-۶۱ نمایش خطی به طول  $a$  [ESC 02; PAY 02b]

برای خطوط با ثوابت زمانی پراکنده، ما سیستم معادلات زیر را نتیجه می‌گیریم:

$$\begin{cases} E_s = E_r ch \left( a \sqrt{\frac{z}{z'}} \right) + I_r \sqrt{zz'} sh \left( a \sqrt{\frac{z}{z'}} \right) \\ I_s = \frac{E_r}{\sqrt{zz'}} sh \left( a \sqrt{\frac{z}{z'}} \right) + I_r ch \left( a \sqrt{\frac{z}{z'}} \right) \end{cases} \quad (31-14)$$

- امپدانس سری اولیه با  $z$  نشان داده می‌شود؛

- امپدانس موازی اولیه با  $z'$  نشان داده می‌شود.

با چشم‌پوشی از تلفات سری و موازی:  $z = j\omega l$ ,  $z' = -j \frac{l}{c\omega}$

$$\begin{cases} E_s = E_r ch(j\omega\sqrt{lc}) + I_r \sqrt{\frac{l}{c}} sh(j\omega\sqrt{lc}) \\ I_s = \frac{E_r}{\sqrt{\frac{l}{c}}} sh(j\omega\sqrt{lc}) + I_r ch(j\omega\sqrt{lc}) \end{cases} \quad (32-14)$$

طول با  $a$  نشان داده می‌شود. برای مثال، اگر  $l$  به واحد  $H/km$  داده شود،  $a$  به واحد  $km$  خواهد بود.

ما  $Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$  را به عنوان امپدانس مشخصه و  $\beta = \omega\sqrt{lc}$  را به عنوان ضریب انتشار در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} E_s = E_r \operatorname{ch}(a\beta) + I_r Z_0 \operatorname{sh}(ja\beta) \\ I_s = \frac{E_r}{Z_0} \operatorname{sh}(ja\beta) + I_r \operatorname{ch}(ja\beta) \end{cases}$$

یا:

$$\begin{cases} E_s = E_r \cos(a\beta) + jI_r Z_0 \sin(a\beta) \\ I_s = j \frac{E_r}{Z_0} \sin(a\beta) + I_r \cos(a\beta) \end{cases} \quad (۳۳-۱۴)$$

به شکل ماتریسی:

$$\begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(a\beta) & jZ_0 \sin(a\beta) \\ \frac{j \sin(a\beta)}{Z_0} & \cos(a\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

با معرفی ثوابت  $A, B, C$  و  $D$ :

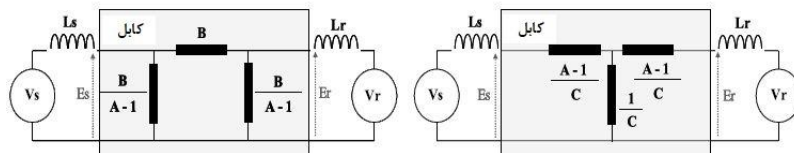
$$\begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

ما به دترمینان  $\Delta = I$  اشاره می‌کنیم که به‌ویژه باعث ساده‌سازی معکوس می‌شود:

$$\begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} E_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(a\beta) & -jZ_0 \sin(a\beta) \\ -\frac{j \sin(a\beta)}{Z_0} & \cos(a\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (۳۴-۱۴)$$

چیزی که در اینجا ما داریم، چهارقطبی است. می‌توان سیستم  $[14.34]$  را به شکل دو نمودار معادل در  $T$  یا  $\pi$  درآورد.

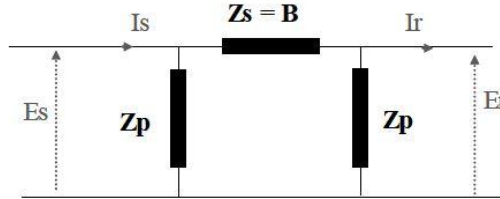


شکل ۱۴-۶۲ نمودارهای معادل

از نمودار به شکل  $\pi$  به‌صورت گسترده استفاده می‌شود:

$$A = \cos(a\beta) \quad B = jZ_0 \sin(a\beta) \quad C = \frac{j \sin(a\beta)}{Z_0}$$

$$Z_p = \frac{B}{A-1} = \frac{jZ_0 \sin(a\beta)}{\cos(a\beta)-1} = -j \frac{Z_0 \sin(a\beta)}{1-\cos(a\beta)}, \quad Z_s = jZ_0 \sin(a\beta)$$

شکل ۱۴-۶۳ نمودار به شکل  $\pi$  برای نمایش کابل

این نمودار که استفاده از آن ساده است، به خوبی با فرض نبود تلفات، کابل را نشان می‌دهد. ما می‌توانیم از آن، مجموعه‌ی اطلاعاتی را برای استفاده از کابل فرضی بدون تلفات تعریف کنیم.

محاسبه‌ی جریان‌های  $I_s$  و  $I_r$

$$I_s = \frac{E_s - E_r}{Z_s} + \frac{E_s}{Z_p} \quad \text{and} \quad I_s^* = \frac{E_s^* - E_r^*}{Z_s^*} + \frac{E_s^*}{Z_p^*}$$

$$I_r = \frac{E_s - E_r}{Z_s} + \frac{E_r}{Z_p} \quad \text{and} \quad I_r^* = \frac{E_s^* - E_r^*}{Z_s^*} + \frac{E_r^*}{Z_p^*},$$

محاسبه‌ی توان‌ها

بصورت کلی،  $S = P + jQ = 3EI^*$ ، برقرار بوده و متذکر می‌شویم که  $X^*$  مزدوج  $X$  است.

$$P_s + jQ_s = 3E_s \left( \frac{E_s^* - E_r^*}{Z_s^*} + \frac{E_s^*}{Z_p^*} \right) = 3 \left( \frac{\bar{E}_s^2 - E_s E_r^*}{Z_s^*} + \frac{\bar{E}_s^2}{Z_p^*} \right) = 3 \left( \bar{E}_s^2 \left( \frac{1}{Z_s^*} + \frac{1}{Z_p^*} \right) - \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r e^{j\delta}}{Z_s^*} \right)$$

$$P_s + jQ_r = 3E_r \left( \frac{E_s^* - E_r^*}{Z_s^*} + \frac{E_r^*}{Z_p^*} \right) = 3 \left( \frac{-\bar{E}_s^2 - E_r E_s^*}{Z_s^*} - \frac{\bar{E}_r^2}{Z_p^*} \right) = 3 \left( \bar{E}_r^2 \left( -\frac{1}{Z_s^*} - \frac{1}{Z_p^*} \right) + \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r e^{-j\delta}}{Z_s^*} \right)$$

زاویه‌ی مابین  $\bar{E}_r$  و  $\bar{E}_s$  با  $\delta$  نشان داده می‌شود.

ما با انجام تمامی محاسبات به عبارات زیر می‌رسیم:

ما می‌توانیم با محاسبات مشابهی،  $Pr$  و  $Qr$  را محاسبه کنیم:



$$P_s + jQ_r = 3j\bar{E}_s^2 \frac{\cos(a\beta)}{Z_0 \sin(a\beta)} - j3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{Z_0 \sin(a\beta)} Z_0 \cos(\delta) + 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{Z_0 \sin(a\beta)} \sin(\delta)$$

$$P_s = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{Z_0 \sin(a\beta)} \sin(\delta)$$

$$Q_s = \frac{3\bar{E}_s (\bar{E}_s \cos(a\beta) - \bar{E}_r \cos(\delta))}{Z_0 \sin(a\beta)}$$

(۱۴-۳۵)

$$P_r = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{Z_0 \sin(a\beta)} \sin(\delta)$$

$$Q_r = \frac{-3\bar{E}_r (\bar{E}_r \cos(a\beta) - \bar{E}_s \cos(\delta))}{Z_0 \sin(a\beta)} \quad (۱۴-۳۶)$$

توجه - با در نظر گرفتن  $\cos(a\beta) \approx 1$  و  $\sin(a\beta) \approx a\beta$ ، فرضیه‌ای که برای کابل‌های کوتاه مناسب است، عبارات زیر حاصل می‌گردند:

$$P_s = P_r = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{al\omega} \sin(\delta) = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{X} \sin(\delta)$$

$$Q_r = \frac{-3\bar{E}_r (\bar{E}_r \cos - \bar{E}_s \cos(\delta))}{X} \quad (۱۴-۳۷)$$

$$Q_s = \frac{3\bar{E}_s (\bar{E}_s - \bar{E}_r \cos(\delta))}{X}$$

با قرار دادن  $X = al\omega$  ما فرمول‌های مرسوم را پیدا می‌کنیم.

برای مثال، با ضریب القای خطی  $l=0.36 \text{ mH/km}$  و ظرفیت  $c = 0.226 \mu\text{F/km}$  ما به  $Z_0 = 40\Omega$  و  $\beta = 0.00283$  (در فرکانس ۵۰ هرتز) دست پیدا می‌کنیم. در این شرایط، به ازای  $a = 40 \text{ km}$ ،  $a\beta = 6.49^\circ$  است. در نتیجه، تقریب سینوسی در زاویه (به واحد رادیان) برای طول کابل  $40 \text{ km}$  در رابطه با انتقال توان اکتیو رضایت‌بخش است.

به ازای ولتاژهای  $Er = Es = 20,000/\sqrt{3} = 11547\text{V}$ ،  $Z_0 = 40\Omega$  و زاویه‌ی کوچک  $\delta = 1^\circ$  ما برای کابل  $40 \text{ km}$  با تقریب یا بدون آن به موارد زیر دست پیدا می‌کنیم:

$$P_s = P_r = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{Z_0 \sin(a\beta)} \sin(\delta) = 3 \frac{11547 \times 11547}{40 \sin(6.49^\circ)} \sin(1^\circ) = 1546 \text{ kW}$$

$$P_s = P_r = 3 \frac{\bar{E}_s \bar{E}_r}{al\omega} \sin(\delta) = 3 \frac{11547 \times 11547}{40 \times 0.00036 \times 314.16} \sin(1^\circ) = 1543 \text{ kW}$$

به ویژه، ما می‌توانیم با استفاده از این فرمول‌ها زاویه‌ی  $\delta$  را به ازای انتقال توان مفروض محاسبه کنیم. توجه کنید که فرمول ساده نیز قابل قبول است. این زاویه‌ی به زوایای حاصل از فیلتر، ترانسفورماتور و شبکه افزوده می‌شود. همچنین ما می‌توانیم توان‌های راکتیو دریافت‌شده توسط کابل‌ها را محاسبه کنیم تا طراحی مبدل سمت شبکه را تمام کنیم یا با یک سلف این مقدار دریافتی را متعادل کنیم. در شرایط مذکور ( $40\text{ km}$ )، تولید توان راکتیو کابل برای چنین حدی برابر  $555\text{ kVAR}$  (در  $20\text{ kV}$ ) است (شکل ۱۴-۶۴ را ببینید). در عمل توان راکتیو اساساً تابعی از از ظرفیت توزیع‌شده‌ی کابل است؛ بنابراین، به‌طور کلی به طول مرتبط است (شکل ۱۴-۶۴). این توان، طول کابل‌ها را محدود می‌کند؛ ما از طول بحرانی در جریان هنگامی که جریان خازن برابر جریان اسمی است، صحبت می‌کنیم.

در هنگام عملیات عادی، این توان راکتیو بر اساس مجذور ولتاژها میان منبع و دریافت‌کننده توزیع می‌گردد، اما ما باید فرض کنیم که ولتاژ به یکی از دو انتهای کابل اعمال می‌گردد. در این مورد، طول بحرانی به صورت زیر محاسبه می‌گردد ( $I_r = 0$ )، هنگامی که ولتاژ در سمت منبع اعمال شود):

$$0 = -\frac{j \sin(a\beta)}{Z_0} E_s + \cos(a\beta) I_s$$

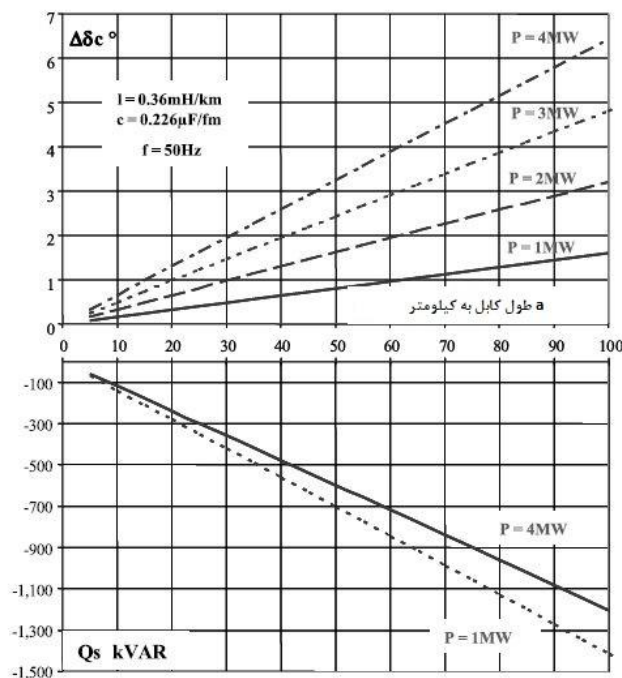
$$I_s = \frac{j \tan(a\beta)}{Z_0} E_s \quad \text{بنابراین}$$

طول بحرانی در جریان  $a = X_{cr} I$  به ازای  $I_s = I_{sn}$  حاصل می‌شود، مقدار اسمی  $I_s$  برابر است با:

$$\frac{Z_0 I_s}{E_s} E_s = \tan(a\beta) \rightarrow X_{cr} = \frac{1}{\beta} \arctan \frac{Z_0 I_{sn}}{E_s} = \frac{1}{\omega \sqrt{lc}} \arctan \frac{I_{sn}}{E_s} \sqrt{l}$$

با نگهداری داده‌های عددی در خطوط قبلی و فرض  $I_{sn} = 75\text{ A}$ ، ما به  $X_{cr} = 90\text{ km}$  می‌رسیم.

متمم زاویه‌ی  $\Delta\delta c$  فراهم‌شده توسط کابل اساساً برای توان مفروض به راکتانس کابل  $X = a l \omega$  بستگی دارد، درحالی‌که توان راکتیور به ازای ولتاژ مفروض تابعی از ظرفیت کابل‌ها است. در شکل ۱۴-۶۴ نشان داده شده است که توان راکتیو برای  $1\text{ MW}$  بیشتر از توان راکتیو برای  $4\text{ MW}$  است: این مسئله از توان راکتیو  $XI^2$  (علامت منفی) ناشی می‌گردد که به عنوان متعادل‌کننده عمل می‌کند.



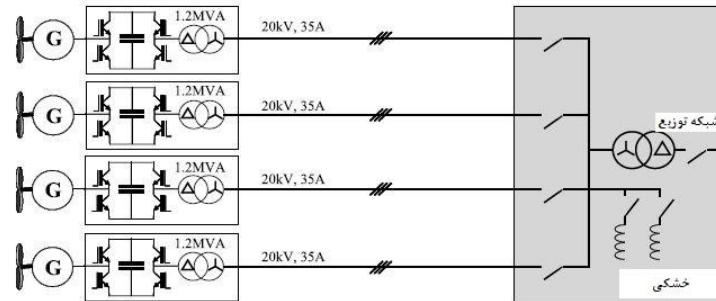
شکل ۱۴-۶۴ تغییر زاویه داخلی  $\delta$  میان ولتاژهای  $Es$  و  $Er$  به ازای توان‌های مختلف به طول کابل بستگی دارد. تغییر توان راکتیو، سمت  $Es$ ، به ازای انتقال با  $20\text{ kV}$  به طول کابل بستگی دارد

متمم زاویه داخلی  $\Delta\delta_c$  فراهم‌شده توسط کابل برای انتقال توان یک مقدار ضروری می‌باشد. به ازای توان یکسان، این مقدار به زاویه  $\delta$  ناشی از فیلترها، ترانسفورماتور و شبکه اضافه می‌گردد.

#### ۱۴-۷-۲ نمودارهای محتمل برای انتقال

##### ۱۴-۷-۲-۱ پاسخ اول برای ۱۰ توربین

مبدل‌های فرکانسی در چند متری ژنراتور در اعماق ۲۰-۵۰ متری غرق می‌شوند. آن‌ها به وسیله‌ی کابل‌های کوتاهی ( $U < 1\text{ kV}$ ) که مطابق آن‌ها در جریان طراحی گشته‌اند، به ماشین‌ها متصل می‌گردند. ماشین‌ها و مبدل‌ها با استفاده از رابط‌های زیر آبی متصل می‌شوند.



شکل ۱۴-۶۵ اتصالات مجزا، توان کم

طول میان مبدل‌ها و ایستگاه فرعی توزیع در خشکی نسبتاً قابل توجه می‌باشد. با انجام اتصالات به صورت مجزا، کار قرار دادن کابل‌ها ساده‌سازی می‌شود: در حقیقت، شرایط قرار دادن کابل یا کابل‌ها تعیین‌کننده است: پارامترها، که در بخش بعدی مورد بحث قرار خواهند گرفت باعث می‌شوند تا یک پاسخ مناسب یافت شود:

- طول کابل در هر قرقه؛

- تعداد کابل‌هایی که یک شناور حمل کابل می‌تواند به طور هم‌زمان در چاله‌ای یکسان قرار دهد؛

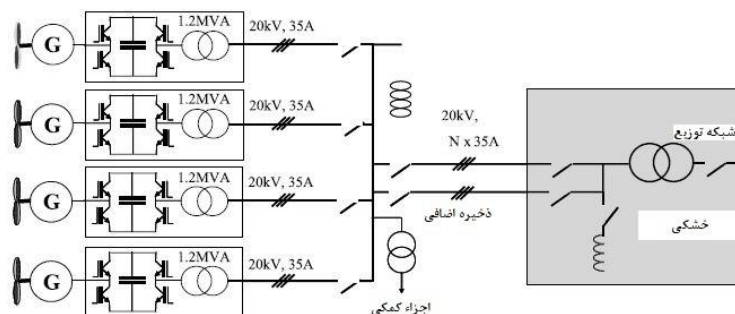
- طبیعت بستر دریا و عمق برای حفر چاله.

ممکن است قرار دادن کابل‌های کوچک دارای مزیت مالی باشد. در این مورد، مدارشکن‌ها برای هر توربین با فن‌آوری مرسوم در خشکی قرار می‌گیرند.

در شکل ۱۴-۶۵ به صورت دلخواه ولتاژ انتقال  $20\text{ kV}$  انتخاب شده است. به طور واضح، بهترین ولتاژ برحسب مکان و شرایط نصب کردن مشخص خواهد شد.

#### ۱۴-۷-۲-۲ برای تعداد بیشتری توربین

جمع کردن کابل‌ها (به طور کلی) به منظور داشتن تنها یک کابل برای بازگرداندن به خشکی می‌تواند مفید باشد. این پاسخ شامل قرار دادن سکو در جای خود برای نصب مدارشکن‌های محافظ، سلف‌های متعادل‌کننده‌ی ظرفیت‌های کابل‌ها و مواد ارتباطی می‌شود.



شکل ۱۴-۶۶ اتصال با جمع‌آوری در AC

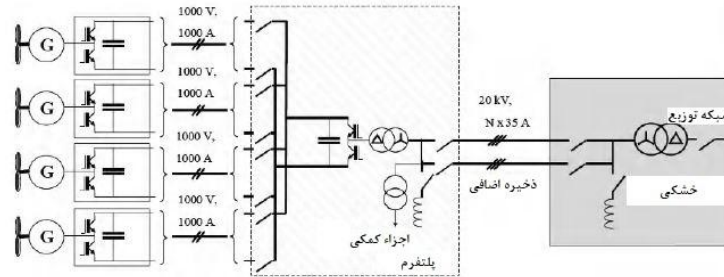
به ازای اعماق ۲۰-۵۰ متر، هزینه‌ی زیرساخت رله قابل چشم‌پوشی نخواهد بود. اگر این انتخاب صورت گیرد، سکو از یک یا چند سلف برای تعادل کابل‌ها پشتیبانی خواهد کرد. ما میان سکو و خشکی حالت اضافی را مطرح کرده‌ایم که فقط یک گزینه است.

#### ۱۴-۷-۲-۳ دسته‌بندی در DC

$N$  مبدل مستغرق سمت ماشین برای  $N$  توربین آبی و یک مبدل سمت شبکه در سکو. شاید ما فکر کنیم که در اینجا صرفه‌جویی انجام شده است. در واقع، این مبدل‌های مستغرق نیستند که بخش اصلی هزینه را شکل می‌دهند، بلکه کنترل غرق شدن بخش اصلی را شکل می‌دهد. بنابراین، با جمع‌آوری مبدل‌های سمت شبکه در کنار هم هیچ صرفه‌جویی قابل توجهی انجام نمی‌شود.

هنگامی که منطقی است مبدل‌های سمت ماشین، ولتاژ و جریان بهینه‌سازی شوند، این مسئله حتی بیشتر برجسته می‌گردد: برای مثال، ولتاژ  $1DCkV$  به ازای توان  $1MW$ .

در این مورد، یک مبدل سمت شبکه توانی  $N$  برابر  $1MW$  اما با ولتاژ  $kV$  خواهد داشت. در حقیقت، تولیدکنندگان مبدل‌های  $10MW$  را پیشنهاد می‌کنند، اما برای دستیابی به این توان‌ها، آن‌ها ولتاژ  $DC$  را افزایش می‌دهند. پاسخ دیگر، قرار دادن مبدل‌ها به صورت موازی در سکو است.

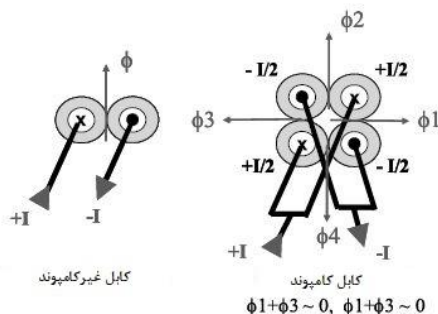


شکل ۱۴-۶۷ جمع‌آوری DC

به‌علاوه، در رابط میان بخش‌های مستغرق و سکو از کابل‌های DC فشار ضعیف ( $1kV$ ) با جریان قوی ( $1kA$ ) استفاده می‌شود که از تمام جهات (خود کابل‌ها و قرار دادن آن‌ها) نسبت به کابل-های AC گران‌تر هستند. گسترش باس DC در طول چند صد متر باعث بروز مشکلاتی می‌شود. افزایش ضریب القای میان مبدل سمت شبکه و مبدل‌های سمت ماشین باعث افزایش نوسانات یا افزایش ولتاژ می‌شود. بنابراین، اغلب نیاز است تا میان دو قطب، یعنی دمپ دینامیکی، وسایل دمپر (سری RC) قرار داده شوند. این مشکلات در فرآیندهای دیگر همچون متالورژی رایج می‌باشند، زیرا در آن‌ها تعداد زیادی از وسایل الکتریکی سرعت توسط باس‌های DC تغذیه می‌شوند که شاید به طول حدود صد متر برسند. در هر صورت، روش یکسان است: هدف به حداقل رساندن ضرایب القای خطی به وسیله‌ی هندسه و با جمع‌آوری رساناها است. در خطوط متالورژی ما از باس‌های عریض و تخت استفاده می‌کنیم؛ در این مورد، احتمالاً فقط جمع‌آوری رساناها باعث دستیابی به هدف به حداقل رساندن ضرایب القای خطی شود (شکل ۱۴-۶۸ را ببینید). بنابراین ما در اینجا درباره‌ی جبران‌سازی صحبت می‌کنیم، اگرچه روشی نسبتاً ناقص باشد.

شار مغناطیسی ناشی از محیط و ضریب القا به هم مرتبط می‌باشند ( $\Phi = LI$ ). در نتیجه، جبران‌سازی کابل‌های به حفاظت از محیط دریایی بسیار کمک خواهد کرد.

ما در بخش‌های قبلی به اثرات مولفه‌ی منفی در طراحی فیلتر برای باس DC اشاره کردیم. گویا در فیلتر باس DC مبدل آویزان از سکو باید ناهمترازی‌ها در نظر گرفته شود.



شکل ۱۴-۶۸ قاعده‌ی کلی کابل‌های جبران‌سازی

#### ۱۴-۷-۲-۴ تاسیسات با توان بالا و فاصله‌ی زیاد

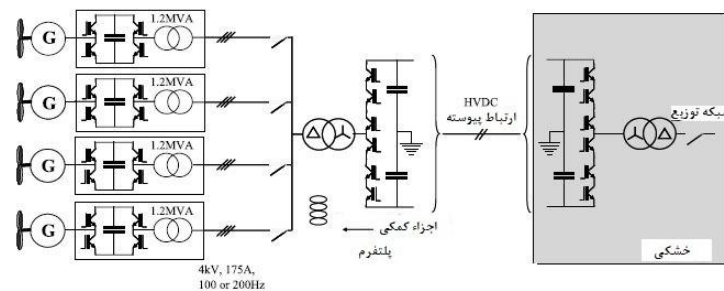
در این بخش به‌طور واضح به توان‌های بیشتر از  $50\text{ MW}$  و فواصل بیشتر از  $80\text{ km}$  پرداخته می‌شود. در نتیجه برق به شکل  $DC$  به خشکی منتقل می‌شود. بنابراین، مشکلات ناشی از افزایش زاویه‌ی داخلی و مصرف توان راکتیو کابل‌ها از بین می‌رود.

انتقال جریان مستقیم تحت نام کلی جریان مستقیم فشار قوی ( $HVDC$ ) قرار دارد. این پاسخ‌ها در ابتدا بر اساس تغذیه‌ی مبدل‌های جریان به وسیله‌ی تریستورها قرار داشتند که توان راکتیو را جذب می‌کردند. این پاسخ‌ها همچنان برای توان‌های زیاد ( $p > 500\text{ MW}$ ) به کار می‌روند. با این حال، برای توان‌های کمتر، از مبدل‌های ولتاژ ( $IGBT$ ،  $IEGT$ ) استفاده می‌شود که نسبت به منابع جریان انعطاف‌پذیرتر هستند؛ آن‌ها می‌توانند برحسب نیازهای شبکه، توان راکتیو را دریافت یا تأمین کنند. ضعف منابع ولتاژ در میزان تلفات آن‌ها نهفته است ( $IGBT$  و  $IEGT$  تلفات بیشتری نسبت به تریستورها دارند). در انتقال  $DC$ ، بر اساس قرارداده‌ها، تلفات به‌طور کلی مابین  $2000$  دلار تا  $5000$  دلار در هر  $kW$  برآورد می‌شوند. علی‌رغم این مشکلات مربوط به تلفات، انتقال  $DC$  توسط منابع ولتاژ با توان متوسط، به‌ویژه برای شبکه‌های جزیره‌ای که ظرفیتی برای تأمین توان راکتیو ندارند، ضروری می‌باشد.

در شکل ۱۴-۶۹، تبدیل در سمت راست توربین‌ها رایج می‌باشد: مبدل سمت ماشین و مبدل سمت شبکه. با این حال، به دلیل رابط  $DC$ ، فرکانس مبدل‌های سمت شبکه میزان نیستند. می‌توان با هدف کاهش وزن ترانسفورماتورهای مختلف تبدیلات توربین و سازه‌ی واسطه، آن را افزایش داد. با این حال، افزایش فرکانس به دلایل زیر تا حدودی محتمل است:

- با افزایش فرکانس خروجی باید فرانس کلیدزنی مبدل‌های سمت شبکه توربین‌ها افزایش یابد. متعاقباً تلفات کموتاسیون  $IGBT$ ها به شدت افزایش می‌یابد.

- معمولاً نسبت میان فرکانس پایه و کلیدزنی ۲۰ است. شاید با ادامه‌ی استفاده از *PWM* القایی به ۱۰ کاهش پیدا کند. با این حال، برای کاهش بیشتر باید کلیدزنی همگام (سنکرون) باشد. این نکته مسلماً درست است که کاهش فرکانس کلیدزنی، کار فیلترسازی را پیچیده‌تر می‌کند. - حتی اگر کابل‌های کوتاه در اتصال وجود داشته باشند، تعداد زیادی از آن‌ها وجود خواهد داشت و ممکن است مصرف توان راکتیو زیاد باشد: توان راکتیو با فرکانس متناسب است.



شکل ۱۴-۶۹ فاصله‌های طولانی - رابط میانی HVDC و "فرکانس زیاد"

این چند ملاحظه باعث افزایش متوسط فرکانس میانی می‌شوند: حداکثر  $100\text{ Hz}$  یا  $200\text{ Hz}$ . تبدیل ولتاژ با مبدل‌های منبع ولتاژ در مزارع هیدروالکتریکی یا بادی مورد ویژه‌ای نیستند. هنگامی که توان انتقالی زیاد باشد، ولتاژهای *DC* بیشتر هستند و در نتیجه جریان‌های اسمی با کلیدها سازگار باقی می‌مانند (مابین ۵۰۰ تا ۸۰۰ A) تا توان  $50\text{ MW}$  با جریان  $500\text{ A}$  منتقل شود. در این مورد ولتاژ باس حدود  $100\text{ kV}$  است، یعنی نسبت به خشکی  $\pm 50\text{ kV}$  است. مسلماً بهبود کابل بر انتخاب ولتاژ *DC* برای انتقال تأثیر می‌گذارد. به ازای ولتاژ  $100\text{ DC kV}$  با *IGBT* یا *IEGT* های  $4200\text{ V}$ ، تعداد قطعات در هر بازوی مبدل دو سطحی حدود ۵۰ عدد است.

بسیاری از پاسخ‌های تبدیل از نقطه‌نظر توپولوژی (سازه‌های دو سطحی با حضور قطعات سری یا سازه‌های چند سطحی) قابل تصور می‌باشند:

- سازه‌ی دو سطحی پاسخی است که به‌طور موفقیت‌آمیز توسط تولیدکنندگان مشخصی که در ساخت سریع قطعاتی همچون *IGBT* ها مهارت دارند، استفاده شده است؛ به ظاهر این پاسخ ساده است. اما به منظور کارکرد ایمن، این مجموعه باید با سلف‌های قابل اشباع در هر بازو (سلف‌ها در کسری از میکروثانیه با شروع هدایت بازو اشباع می‌شوند) و مدارهای موازی برای کمک به کموتاسیون در هر *IGBT* اولیه، تقویت شود. هنگامی که بازوها شروع به انتقال جریان کنند، وجود سلف‌های قابل اشباع برای اجتناب از پشتیبانی تمام ولتاژ توسط کندترین قطعه



ضروری خواهد بود. مدارهای کمکی کموتاسیون کار توزیع خوب ولتاژها (ساکن و پویا) را تسهیل می‌کنند. این تعادل ناشی از مولفه‌های غیرفعال توسط فرمان بسته‌ی *IGBT*ها تکمیل می‌شود. عیب ساختار دو سطحی رفتار آن در شبکه نهفته است که به مقدار زیادی فیلترسازی نیاز دارد.

- ساختار چند سطحی، ساختارهای سری دو سطحی دارای مزیت بسیار مهمی در دریافت جریان شبه سینوسی دارند که به‌طور قابل توجه کار فیلترسازی را ساده می‌کند. مسلماً به‌طور کلی مبدل پیچیده‌تر خواهد بود. این پاسخ اساساً فقط برای افزایش ولتاژ و در نتیجه توان قابل توجه است.

#### ۱۴-۷-۳ ارتباطات

اطلاعات باید به توربین‌های آبی منتقل شوند: خاموش کردن، شروع، منابع توان اکتیو و توان راکتیو. همچنین باید اطلاعات توربین‌ها برای ایستگاه کنترل مرکزی فراهم شود: سرعت جریان، سرعت چرخش (برای مقایسه‌ی این مقادیر به منظور شناسایی مشکلات مکانیکی یا هیدرولیکی بالقوه همچون فرسایش یا کثیفی پره‌ها ضروری است) و به‌طور کلی وضعیت تجهیزات (برای مثال، به لحاظ کارکرد، جریان‌ها و ولتاژ، وضعیت قطعات کمکی، وضعیت ایستگاه کنترل).

هزاران اطلاعات باید در هر دو جهت برای ژنراتور انتقال داده شوند تا توربین‌ها به خوبی عمل کنند.

می‌توان از طریق فیبرهای نوری داخل کابل‌های برق این ارتباطات را برقرار کرد. سیستم کلی محاسبه باید قادر به تسهیل تبادلات با زمان تقریبی  $10\text{ms}$  باشد؛ منظور ما *SCADA* است (نظارت و کسب اطلاعات). بدون این ارتباطات، انجام عملیات غیرممکن است؛ باید با قرار دادن قطعات اضافی در جای خود، به ویژه در فیبرهای داخل کابل‌های برق، قابلیت اطمینان تضمین گردد (اضافی).

#### ۱۴-۷-۴ جبران‌سازی

این بخش به جبران‌سازی توان راکتیو خازنی کابل اشاره دارد،  $Q_c = U^2 \omega ac$  که در آن  $c$  ظرفیت خطی به واحد  $F/km$  و  $a$  طول کابل به واحد  $Km$  است. برای یک فن‌آوری مفروض کابل، ظرفیت خازن بسیار کم با ولتاژ تغییر می‌کند (از  $20$  تا  $400\text{kV}$ ،  $c$  اساساً ثابت است). بنابراین، به ازای طول مفروض، توان راکتیو با مجذور ولتاژ متناسب است و وابستگی ناچیزی بر فن‌آوری کابل دارد. در نتیجه، می‌توانیم توان راکتیو را با انتخاب ولتاژ مناسب کاهش دهیم؛ ولتاژ کم از توان راکتیو کم و از طرفی از سطح مقطع زیاد چابک و در نتیجه کابل سنگین‌تر

ناشی می‌گردد که نصب آن دشوارتر خواهد بود. این انتخاب از نظر فنی-مالی دشوار است و بدون مشورت با سازنده‌ی کابل ممکن نخواهد بود.

بگذارید ما شبکه‌ی  $50\text{ Hz}$  با ولتاژ فاز به فاز  $20\text{ kV}$  و توان اتصال کوتاه  $100\text{ MVA}$  را در نظر بگیریم. اگر مال کابل  $40\text{ km}$  (بدون بار در انتهای دیگر) را که در شکل ۱۴-۶۴ به‌ویژه با  $C = \dots$  تعریف شده است، نصب کنیم، در حقیقت، ما سه خازن  $9\mu\text{F}$  و در نتیجه توان راکتیو  $1.13\text{ MVAR}$  را نصب کرده‌ایم.

در عملیات دائمی، این کار به لحاظ جریان اتصال کوتاه به افزایش تقریبی  $1.13\%$  ولتاژ در ورودی کابل مربوط می‌شود که قابل چشم‌پوشی می‌باشد. با این حال، اگر ما برای توربین‌های بادی یا آبی  $5$  کابل یکسان داشته باشیم، تغییرات ولتاژ  $5.65\%$  خواهد بود که کمی نگران‌کننده است... اگر این افزایش ولتاژ به مبدل‌های مستغرق منتقل شود، وضعیت بدتر خواهد شد (افزایش ولتاژ ناشی از کابل‌ها به راحتی با سیستم معادلات [14.34] که در آن ما می‌نویسیم  $Ir=0$  برای  $40\text{ km}$ ، قابل محاسبه است).

در تابع عادی مبدل‌های مستغرق، چند راهبرد قابل تصور می‌باشد:

شکل ۱۴-۶۵:

- می‌توان هر کابل را با توزیع جبران‌سازی میان شبه و مبدل‌ها  $Q = 565\text{ kVAR}$  متعادل کرد: در سمت شبکه با سلف‌ها، در سمت مبدل، با خود مبدل (اندازه را افزایش می‌دهد)،  
- در سمت شبکه ما می‌توانیم نصف جبران‌سازی (مدولی) را انجام دهیم، یعنی هر  $1/2$  کابل را جبران کنیم.

- شکل ۱۴-۶۶:

- می‌توان جبران‌ساز را در سکوی میانی نصب کرد. کابل‌های منتهی به مبدل‌ها کوتاه هستند اما ممکن است تعدادی زیادی از آن‌ها وجود داشته باشد. برای کابل واصل میان سکو و خشکی می‌توان جبران‌سازی را میان انتهای آن‌ها توزیع کرد. انتهای سکو به لحاظ کابل‌های منتهی به مبدل‌های مستغرق کمی بیشتر متعادل خواهد شد.

- شکل ۱۴-۶۷:

- فقط کابل باید متعادل شود. توزیع در هر دو انتها.

- شکل ۱۴-۶۹:

- اگر فرکانس میانی انتخابی زیاد باشد، تا حدودی به جبران‌سازی نیاز خواهد بود.

این محاسبات ساده هستند:  $L_c = \frac{3V^2}{kQ_c\omega}$ ،  $Q_{Lc} = \frac{3V^2}{L_c\omega} = kQ_c$ ، اما مشابه روشی که

ما ضریب القا را به شبکه اعمال کردیم، باید مواظب مولفه‌ی غیر متناوب جریان بسیار طولانی

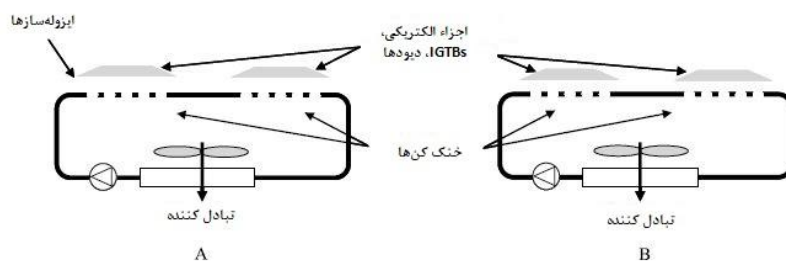
باشیم. برای جلوگیری از آن، مقاومت سری نباید خیلی کوچک باشد. حد میانی مناسب با تعیین ضریب القای جبران‌سازی با ضریب کیفیت  $Q$  از ۷ تا ۱۰ حاصل می‌شود.

## ۸-۱۴ فن آوری

همان‌طور که در بخش‌های قبل مطرح شد، ما با فن‌آوری مستغرق روبرو هستیم که برخی جنبه‌های مختص به خود را دارد: مجموعه‌ی قطعات در یک محفظه‌ی ضد آب قرار گرفته‌اند. از این جهت، برخی مشکلات، به‌ویژه در خنک‌کاری و نگهداری بروز پیدا می‌کنند.

### ۱-۸-۱۴ مدارهای خنک‌کاری

در مبدل‌های با توان مشخص به منظور بهینه‌سازی توان کلی (بدین معنا که تا جای ممکن توان با قطعات مفروض توان فراهم شود)، ممکن است از آب برای خنک‌کاری نیمه‌هادی‌ها استفاده شود. آب در مقایسه با هوا یا روغن یک سیال خنک‌کننده‌ی عالی است. با این حال، در هنگام استفاده از آن به برخی نکات باید توجه شود، یعنی، برخی محدودیت‌ها در این رابطه وجود دارد.



شکل ۱۴-۷۰ (A) مدار خنک‌کاری با مایع هم‌پتانسیل با توده؛ (B) مدار خنک‌کاری به همراه مایع با پتانسیل متغیر

در نمودار A، از مواد دی‌الکتریک جامد (معمولاً سرامیک‌ها) برای عایق‌کاری الکتریکی استفاده شده است؛ عملکرد فنی این پاسخ‌ها به واسطه‌ی هدایت حرارتی مواد دی‌الکتریک و همچنین سطوح مشترک سازه محدود می‌گردد. این پاسخ‌ها معمولاً حداکثر تا ولتاژهای چند  $kV$  می‌باشند. به کارگیری  $IGBT$ ‌های از نوع ماژولی به این پی‌کربندی مربوط می‌گردد. صفحه‌ی خنک‌کاری دارای عایقی تقریباً  $5kV$  است.

در نمودار B، سیال خنک‌کننده (آب) کار عایق را انجام می‌دهد. این پاسخ‌ها به ازای ولتاژهای زیاد (ده‌ها یا صدها  $kV$ ) استفاده می‌شوند یا به دلیل توان یا سیکل حرارتی، هنگامی که از بسته‌های پرسی (بدون عایق) استفاده شود.

## ۱۴-۸-۱-۱ خنک کاری غیر مستقیم با آب (A)

به لحاظ کارکرد و ولتاژهای اشاره شده در بخش های قبلی، بخش A بیشترین کاربرد را دارد. برای مثال در حمل و نقل ریلی، دست کم به لحاظ موتورهای کردن واگن ها، پاسخ A انتخاب می شود.

اجرای سیستم گردش آب در سیکل بسته مستلزم به تعداد مشخصی از قطعات است: پمپ، مبدل، توربین و البته قطعات خنک کاری (به نام جعبه های آب یا استخرها)، مخزن انبساط، سیستم های اتصالی. باید تضمین گردد که این مواد به لحاظ فیزیکی و شیمیایی سازگار هستند و در تمام طول عمر ماشین باقی خواهند ماند (حداقل ۱۵ سال) تا از خوردگی گالوانیزه جلوگیری شود. آلومینیوم ۶۰۶۰ و فولاد ضدزنگ ۳۱۶<sup>۱</sup> از جمله مواد سازگار می باشند. به موانعی در مقابل خوردگی نیاز است: فسفات، نیترات، سیلیکات، بورات. در نهایت، معقول است که خوردگی<sup>۲</sup> را با فرسایش<sup>۳</sup> محدود کرد و تمام مدار آب (قطر/جریان) را طوری طراحی کرد که سرعت آب کمتر از  $3\text{ m/s}$  باقی بماند. ممکن است اثرناپذیرسازی<sup>۴</sup> سطوح آلومینیومی نیز در  $80^{\circ}\text{C}$  در محلول کرومات، وندات یا استانات در غلظت ۱-۲ مول بر لیتر انجام شود.

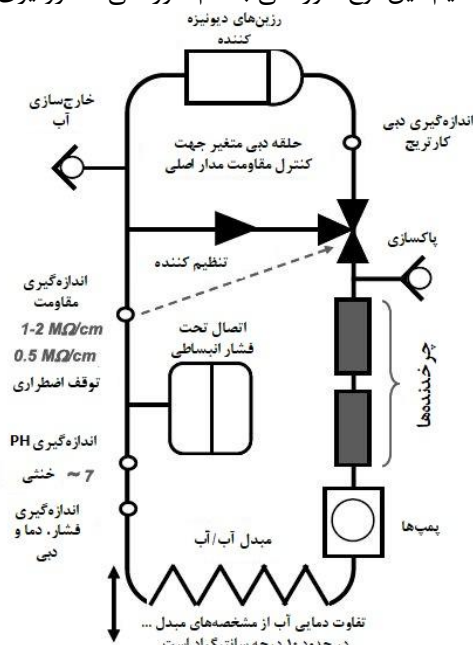
## ۱۴-۸-۱-۲ خنک کاری مستقیم به وسیله ی آب (B)

این پاسخ لزوماً هنگامی به کار می رود که وجوه خنک کاری نیمه هادی ها عایق کاری نشده باشند - هنگامی که آن ها دو کارکرد داشته باشند: در ابتدا به عنوان خنک کننده (یا تماس با خنک کننده ها) و در ثانی به عنوان رابط در توپولوژی. توجه کنید که با بسته های پرسی باید کارکرد آن ها انجام شود: خنک سازی، اتصال الکتریکی و تحت فشار قرار دادن قطعه (با افزایش فشار، در قطعه تغییر شکل کلی ایجاد می شود که به ویژه در IGBTها موردی اساسی است).

آب به طور ذاتی حتی هنگامی که شامل یون باشد سیالی رسانا است. کار عایق سازی به وسیله ی چرخش آب فاقد یون در لوله های دی الکتریک انجام می شود. بنابراین، مبدل ها، پمپ ها و مواد دیگر به پتانسیل مشخصی برده می شوند. مقاومت حداکثر آب برابر  $20\text{ M}\Omega\text{cm}$  است، به طور کلی، فقط در  $2\text{ M}\Omega\text{cm}$  کنترل می شود. خوردگی تابعی از چگالی جریان جاری از سطوح مواد رسانا در تماس با آب است. کاهش این چگالی جریان باعث می شود تا ما بتوانیم از رژیم به اصطلاح خورنده به رژیم ایمن برویم. مقدار آستانه  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  است: اگر ما مساحت سطح در تماس با آب را بدانیم می توانیم جریان های ناشی از آن را استنتاج کنیم. با

<sup>1</sup> Inox 316<sup>2</sup> Corrosion<sup>3</sup> Erosion<sup>4</sup> Passivation

به خاطر داشتن مقاومت آب و ولتاژ میان دو قطعه‌ی فلزی، ما می‌توانیم از طریق این جریان، طول لوله‌ها را کاهش دهیم. این نوع خوردگی به نام خوردگی الکترولیزی شناخته می‌شود.



شکل ۱۴-۷۱ مدار معمول آب فاقد یون

در شکل ۱۴-۷۱ می‌توانیم قطعات زیر را مشاهده کنیم:

- پمپ، مطابق دبی مطلوب و تلفات تخلیه از مدار آب طراحی می‌شود؛
- ماده‌ای که باید خنک شود؛
- مخزن انبساط برای جبران تغییرات حجم سیال و هر گونه نشت جزئی محتمل؛
- سوپاپ سه‌راه که به مقداری از آب مدار اصلی اجازه می‌دهد وارد رزین شوند و مقاومت مدار ثابت نگه داشته شود؛
- رزین‌های مبادله‌ی یون که اگر به درستی طراحی گردند می‌توانند به مدت دو سال دوام بیاورند (ماده‌ای که دمای آب کمتر از  $50^{\circ}C$  باشد)؛
- لوله‌ها. نباید بر عملکرد خوب ماده به لحاظ مقاومت آن به دلیل عملکرد ضعیف دی‌الکتریکی آن یا احتمال آلوده کردن آب توسط آن آسیب وارد شود. لوله‌های مورد استفاده " بدون آلودگی " <sup>۱</sup> هستند، زیرا در آن‌ها کربن وجود ندارد (Rilsan یا XLPE)؛
- مبدل، بخشی از سازه بوده و در تماس با آب دریا می‌باشد؛

<sup>۱</sup> Food grade

- وسایل اندازه گیری، برای کنترل سیستم خنک کاری به کار می روند. اندازه ی مقاومت هم اطلاعاتی درباره ی کیفیت آب خنک کاری می دهد و هم داده ی ورودی برای کنترل سوپاپ سه-راه است (کنترل مقاومت باعث می گردد تا طول عمر رزین ها افزایش یابد و در نتیجه فرکانس تداخلات کاهش یابد). اندازه ی دبی در کارتریج یون زدایی - هنگامی که دبی زیاد باشد (۲۰٪ دبی پمپ)، رزین ها بی اثر شده و در نتیجه باید جایگزین شوند (دبی عادی مابین ۱٪ تا ۵٪ قرار دارد)؛

- اندازه ی داده های هیدرولیکی، فشار، دبی، دمای آبی؛

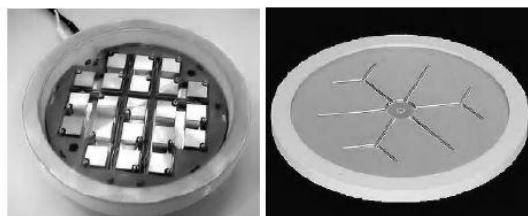
- اندازه ی PH. سیستم های خنک کاری معمولاً دارای PH تقریبی ۵ هستند که به مقدار خنثی نزدیک است.

تمامی این داده ها باید به خشکی بازگردانده شوند و برای سیستم کنترلی کلی به سیستم SCADA وارد شوند.

#### ۱۴-۸-۲ خنک کاری نیمه هادی ها

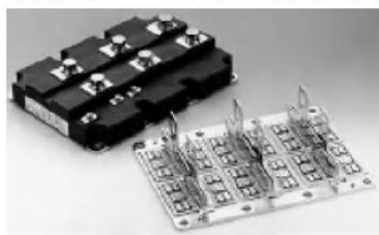
تلفات نیمه هادی ها نسبتاً زیاد است: در IGBT های بزرگ این تلفات مابین ۱ تا  $۱.۶kW$  قرار دارند. ما باید جمع تلفات هدایت و تلفات کموتاسیون را در نظر بگیریم. هدف از خنک کاری، نگهداری دمای نقطه ی انشعاب در مقادیر کمتر از دمای حداکثری است که توسط تولید کنندگان نیمه هادی ها مشخص شده است  $-T_J = LSS(W) \sum R_{th} + T_a$ . عبارت  $LSS$  تلفات به واحد  $W$ ،  $R_{th}$  جمع مقاومت های حرارتی به واحد  $^{\circ}C/W$ ،  $T_a$  دمای محیط اطراف (در اینجا دمای آب) به واحد درجه است. دمای حداکثر نقطه ی انشعاب بر حسب نیمه هادی ها در بازه ی ۱۲۰ تا  $150^{\circ}C$  متغیر است. در عملیات دائم این دما در ۱۰۰ یا  $110^{\circ}C$  نگه داشته می شود و مابقی آن برای رژیم های گذرا ذخیره می گردد.

ما می توانیم خنک کننده ی IGBT را در نظر بگیریم یا چندین قطعه روی یک خنک کننده با فرض ساختار عایق آن ها متصور شویم. در مورد دوم، به طور کلی دو IGBT فازی در ورای توان مشخصی، بر روی صفحه ی یکسانی قرار داده می شوند (در کاربردهای توان کم، کل وسایل با شش IGBT در صفحه ی یکسان قرار داده می شوند).



IGBT بسته-پرسی (زیمنس)

دیسک یک تریستور با محرک نوری HVDC (زیمنس)

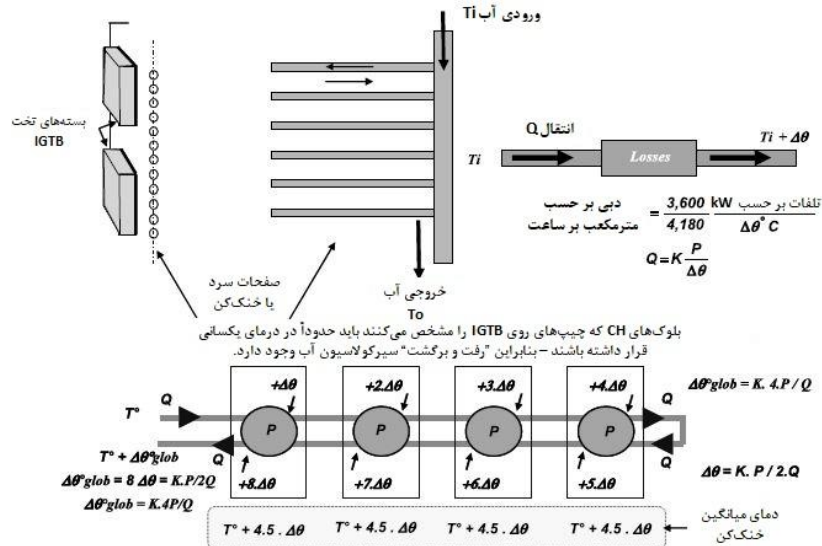


IGTB بسته-تخت (زیمنس)

شکل ۱۴-۷۲ دو نوع IGBT- بسته‌ی پرس‌ی و بسته‌ی تخت. به منظور ارزیابی بهتر تفاوت تریستور، از قطعه‌ی متداول‌تری به دلیل شکل گیت در HDVC استفاده شده است (قطر دیسک  $mm \sim 150$ ). این شکل شامل یک تریستور خاص است که برگرفته از زیمنس می‌باشد (OWEN، پارک‌های بادی، کارگاه فراساحل، نوامبر ۲۰۰۰) در شکل ۱۴-۷۳ قواعد اصلی خنک‌کاری از نوع خنک‌کننده‌ی صفحه‌ای نشان داده شده است. از قواعد بسیاری ممکن است استفاده شود اما اساساً سطوحی که صفحات IGBTها بر روی آن‌ها قرار داده شوند باید دست کم به لحاظ یکنواختی، زبری و غیره، کیفیت قابل مقایسه‌ای با سطوح خود صفحه‌ی خنک‌کاری داشته باشند. هنگامی که آن‌ها مونتاژ شوند، گشتاور پیچ در نظر گرفته شده و گریس تماسی میان صفحه‌ی خنک‌کاری و خنک‌کننده (مطابق پیشنهادات تولیدکنندگان) تزریق می‌شود. هدف از این کار نگهداری انتقال گرمای مناسب در طول زمان است.

کانال‌های خنک‌کاری باید تا جای ممکن به سطح نزدیک باشند تا مقاومت حرارتی میان ریزتراشه‌ها و آب کاهش یابد. قطعات IGBT با قرار دادن تراشه‌های موازی (تا ۱۲ عدد) تولید می‌گردند. برای قرار دادن کانال‌ها به درستی بسیار ضروری است که موقعیت این تراشه‌ها را بدانیم: آن‌ها باید در چهارچوب دو کانال قرار گیرند: یکی در آن‌جا و دیگری در پشت. بنابراین، آن‌ها کم و بیش در دمای یکسانی قرار می‌گیرند و این امر برای تقسیم جریان‌ها ضروری است. در شکل ۱۴-۷۳ دلایل انتخاب طرح "آن‌جا و پشت"<sup>۱</sup> نشان داده شده است.

<sup>1</sup> There and back



شکل ۱۴-۷۳ قاعده‌ی خنک‌کاری IGBT‌های از نوع بسته‌ی پرس‌ی بر روی صفحه‌ی سرد

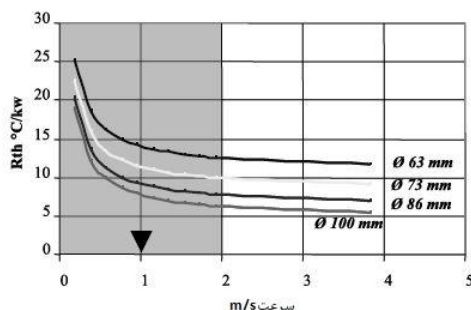
خود صفحه ممکن است اکستروژن شده باشد، اما با این روش، به دلایل مرتبط با اکستروژن آلومینیوم، نمی‌توان ضخامت فلز یا فاصله‌ی میان کانال‌ها و صفحه‌ی خنک‌کاری IGBT‌ها را کاهش داد. با این وجود، این روش بسیار پر کاربرد است.

در حقیقت، صفحه‌ی ایده‌آل دارای چندین کانال با قطر کوچک است: این کانال‌ها به صورت محکم در کنار هم قرار گرفته‌اند تا در زیر یک تراشه جا داده شوند. ما می‌توانیم با استفاده از فرمول ساده شکل ۱۴-۷۳، به ازای افزایش دمای مفروض (به طور کلی  $\Delta\theta$  حدود  $5-6^\circ C$  است) و با به خاطر داشتن تلفات حداکثر، دبی مورد نیاز را محاسبه کنیم. با در نظرگیری خوردگی، این جریان باید میان کانال‌های مختلف توزیع گردد: بهتر است که سرعت جریان در کانال‌ها فراتر از سرعت خطی  $1 \text{ m/s}$  (فرض قبلی) نشود. زیرا جریان در سطح رابط‌ها، ورتکس‌ها را برجسته می‌کنند و حتی با سرعت خطی  $1 \text{ m/s}$  ممکن است سرعت محلی از  $3 \text{ m/s}$  فراتر رود. برای محافظت در برابر خوردگی بهتر است که کل صفحه‌ی خنک‌کننده‌ها از نیکل باشد.

سنترینگ<sup>۱</sup> نیز یک روش دیگر برای تولید صفحات سرد است. بنابراین، کانال‌ها، لوله‌های فولاد ضد زنگ بسیار نازک هستند (ریزه‌کاری درست). آن‌ها در نزدیکی سطح ( $1 \text{ mm}$  یا کمتر) قرار داده می‌شوند و کل پود آلومینیوم و لوله‌ها ذوب می‌شوند. این روش نسبت به روش مبتنی بر اکستروژن بسیار موثرتر است.

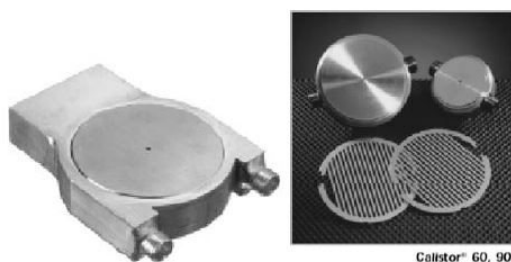
<sup>۱</sup> Sintering





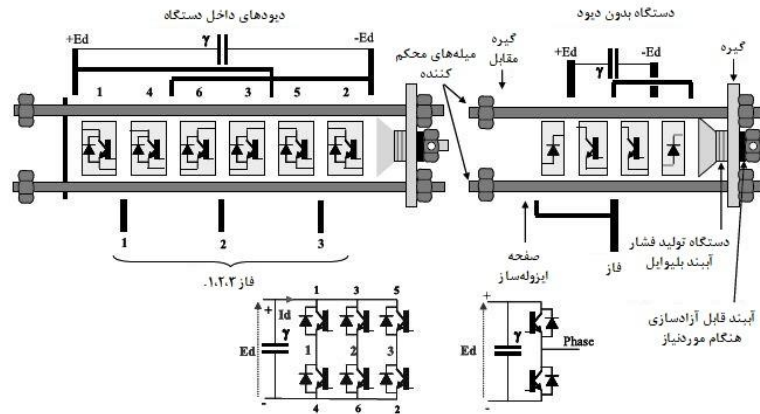
شکل ۱۴-۷۴ نمونه‌ای از تغییر در مقاومت حرارتی خنک‌کننده برحسب سرعت آب. در این تحول، بسته‌های پرسی از نوع دیودی به ازای چندین قطر مختلف بررسی می‌شوند

در شکل ۱۴-۷۴ به طور واضح نشان داده شده است که با فراتر رفتن از سرعت  $1\text{ m/s}$  آب تنها بهره‌ی کمی به لحاظ مقاومت حرارتی حاصل می‌شود. به علاوه، تلفات باری با سرعت افزایش می‌یابد و این برای کل مدار آب نامطلوب است (توان پمپ‌ها، فشار آزمایش). در  $IGBT$  های بسته‌ی پرسی یا  $IEGT$  ها، تمامی مشکلات اشاره‌شده در بالا و مشکل اضافی چفت کردن نیز ایجاد می‌شوند (نیروی چفت کردن برابر است با  $50\text{--}100\text{ kN}$ ). خنک‌کننده‌های مذکور در بخش اکتیو در رژیم جریان لمینار عمل می‌کنند. انجام محاسبات ساده است، اما عملکرد آن‌ها محدود می‌باشد. محاسبه‌ی جریان‌های گردابی بسیار دشوارتر است (مدل‌های مقیاس باید ساخته شوند و آزمایش انجام شود)، اما موثرتر می‌باشند. تولیدکنندگان خاصی روش قرار دادن سیخ‌هایی روی ورودی آب (شکل ۱۴-۷۵) را توسعه داده‌اند که در آن جریان همواره گردابی است و در نتیجه خنک‌کاری در آن با بازده بهتر و همگن خواهد بود.



شکل ۱۴-۷۵ خنک‌کننده‌های شبکه‌ای (برگرفته از سد فراز<sup>۱</sup>)

<sup>۱</sup> Ferraz



شکل ۱۴-۷۶ آرایش های محتمل برای قطعات پرسی، الکتریکی و مکانیکی

مقاومت حرارتی حاصل از این سیستم به ازای دبی  $1L/min$  در خنک کننده ی دو وجهی با قطعات دیودی  $82mm$  برابر  $4.5^{\circ}C/kW$  است (عملکرد خنک کننده ها همواره با استفاده از یک قطعه ی ساده (دیود) محاسبه می شود). تلفات بار  $250mbar$  است.

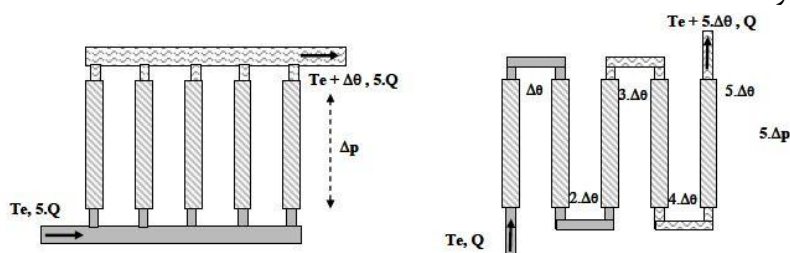
*IGBT* های بسته ی پرسی و بسته ی تخت از تراشه های اولیه ساخته شده اند که باید به صورت یکنواخت فشرده شوند. این تراشه ها به موازات هم قرار دارند. در بالا ما به خواص ویژه ی خورنده ی آلومینیوم اشاره کردیم. در مورد اخیر، برای کاهش تغییر شکل ناشی از فشار چفت سازی، مشخصات مکانیکی نیز مطرح می شوند. ما می توانیم مشاهده کنیم که برای داشتن لایه ی آب نزدیک به سطح به دلایل مربوط به حرارت و تغییر شکل ناپذیری مورد نیاز برای تحمل فشار، باید به سختی یک حد وسط انتخاب کنیم.

بخش بالایی شکل ۱۴-۷۶ دو نوع سوپاپ را برای مونتاژ قطعات نشان می دهد (باتری نیز نامیده می شوند). دو نوع *IGBT* بسته ی پرسی در بازار موجود است: در برخی از آن ها دیود درون محفظه قرار دارد و برخی دیگر فاقد دیود هستند. وسایل بدون دیود طبیعتاً دارای جریان بیشتری می باشند. با فرض اینکه وجود این دیودها ضروری است، بهتر است که آن ها را درون ستاپ قرار دهیم. نمودار بالا سمت راست بیانگر این مسئله است. سوپاپ چهار وسیله ی دیگر را با خود می آورد - دو دیود و دو *IGBT* (با این حال، اگر نیروهای فشاری سازگار باشند، تنها می توان از باتری ها یا سوپاپ ها استفاده کرد). در نمودار بالا سمت چپ، وسیله ای با دیودهایی در داخل آن نشان داده شده است. سوپاپ باعث می شود تا ۶ *IGBT* (و دیود) از توپولوژی سه فازی با یکدیگر در یک گروه قرار گیرند.

می‌توان فقط با دیودها یا تریستورها، سوپاپ‌ها را ساخت که با خود بیش از ۱۰ وسیله‌ی دیگر را می‌آورد. ساختار داخلی این قطعات نسبت به ساختار *IGBT*ها ظرافت کمتری دارند (صرفاً یک دیسک بزرگ است - به شکل ۱۴-۷۲ مراجعه کنید).

کلمپ مسطح یک قطعه‌ی مکانیکی اساسی در سوپاپ است. این یک وسیله‌ی مدرج پیش‌تنیده است که اغلب در آن از واشرهای بلویل<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. هنگامی که پیچ‌های میله‌ی مهار سفت شوند، سوپاپ تا زمان انتقال نیروی فشاری به میله‌های مهار تحت فشار قرار می‌گیرد. بنابراین واشرهای بلویل تحت فشار قرار گرفته و واشر تختی را رها می‌کنند. هنگامی که واشر رها شود، یعنی به خوبی چفت شده است.

باید ذکر گردد که برای خنک‌سازی مجموعه‌ی  $N$  نیمه‌هادی بسته‌ی پرسی در سوپاپ ما به  $N+1$  خنک‌کننده نیاز داریم. اگر  $LSS$  بیانگر تلفات قطعه باشد، تلفاتی که باید برای خنک‌کننده -ی داخلی در نظر گرفته شود برابر  $LSS$  خواهد بود، اما خنک‌کننده‌های خارجی تنها  $LSS/2$  را هدر خواهند داد.



شکل ۱۴-۷۷ پاسخ‌های حدی خنک‌سازی با در نظرگیری تنها پنج خنک‌کننده

بنابراین، پاسخ سمت راست در شکل ۱۴-۷۶ مناسب نیست. زیرا دیودها اساساً دارای تلفات کمتری نسبت به *IGBT*ها می‌باشند. در نتیجه، بهتر است که دیودها در داخل سوپاپ و *IGBT*ها در خارج آن قرار داده شوند.

در شکل ۱۴-۷۷ (چپ) خنک‌کننده‌ها به موازات مدار آب قرار گرفته‌اند. این کار زمانی امکان‌پذیر است که تلفات تغییر  $\Delta p$  هر خنک‌کننده نسبت به تلفات تخلیه‌ی لوله‌های موازی نسبتاً زیاد باشد تا دبی‌ها متعادل شوند. در این مورد،  $\Delta p$  کلی به یک خنک‌کننده و افزایش دما نیز به خنک‌کننده مربوط است. با این حال، دبی در تعداد زیادی خنک‌کننده، بیشتر است.

در شکل ۱۴-۷۷ (راست) خنک‌کننده‌ها به صورت سری با مدار آب قرار گرفته‌اند. در صورتی که افزایش دما،  $\Delta\theta$  در خروجی خنک‌کننده زیاد نباشد ( $\Delta\theta < 3^\circ\text{C}$ ) این تنها حالت قابل تصور خواهد بود و در غیر اینصورت بر خنک‌سازی قطعات دیگر در سوپاپ اثر نامطلوبی خواهد

<sup>1</sup> Belleville

داشت. در این ساختار خنک کاری، دبی کلی برابر دبی خنک کننده‌ی اولیه است، اما دما مطابق تلفات تخلیه افزایش می‌یابد.

به راحتی می‌توان مشاهده کرد که بهترین پاسخ برای بهینه‌سازی عملکرد کلی مدارهای خنک-کاری به لحاظ فشار، دبی و دما، از حد وسط میان آن‌ها ناشی می‌گردد. به طور کلی، پاسخ‌های ترکیبی به کار گرفته می‌شوند.

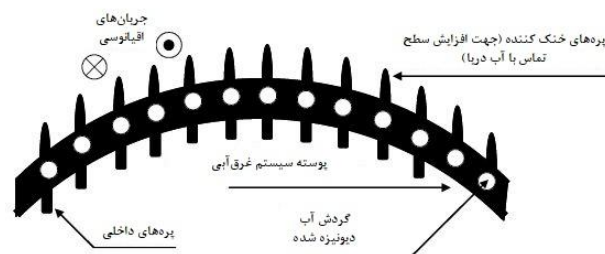
### ۱۴-۸-۳ مبدل

در ماشین‌های مرسوم، ما انواع مبدل‌ها را می‌یابیم: مبدل‌های آبی/هوایی و مبدل‌های آبی/آبی. برای مبدل‌های نوع دوم می‌توان از آب طبیعی "صنعتی" یا آب دریا به همراه فیلترهایی برای تخلیه‌ی ذرات معلق یا میکرو ارگانسیم‌ها استفاده کرد. این فیلترها باید به صورت منظم نگهداری شوند. اگرچه این پاسخ کارآمد است، احتمالاً در آینده به عنوان پاسخ در نظر گرفته نشود.

تجهیزات الکترونیکی درون یک محفظه‌ی زیر آبی در معرض جریان‌های جزر و مدی، قرار داده شده‌اند. ما می‌توانیم بدون نیاز به محاسبه، مشاهده کنیم که تلفات با افزایش تبدیل توان بیشتر خواهند شد و در نتیجه به قدرت جریان مرتبط هستند. بنابراین، منطقی است که بازده کلی سیستم خنک کاری را به جریان‌های اقیانوسی ربط بدهیم. در شکل ۱۴-۷۸ قاعده‌ی محفظه که به عنوان مبدل نیز عمل می‌کند، نشان داده شده است. لوله‌های آب فاقد یون برای تخلیه‌ی تلفات در سازه در نظر گرفته شده‌اند.

بازده سیستم خنک کاری به مساحت سطح در معرض جریان آب دریا مرتبط است. بدین دلیل فین‌هایی بر روی قسمت خارجی محفظه قرار داده شده‌اند (ما می‌توانیم به لحاظ صنعتی، لوله‌های آلومینیومی جوش خورده به محفظه را بدین منظور در نظر بگیریم).

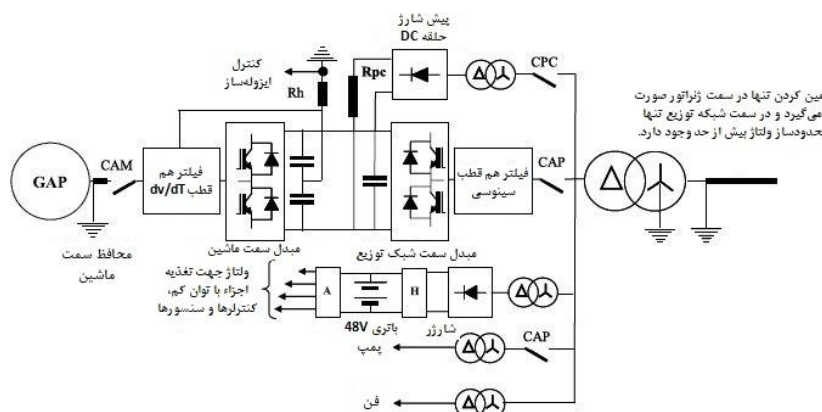
درون محفظه نیز فین‌هایی وجود دارد. دلیل این کار به این حقیقت مربوط می‌گردد که تمامی تلفات توسط آب فاقد یون خارج نمی‌شوند. حدود ۱۰٪ از تلفات در هوا هستند: جعبه تقسیم‌ها، خازن‌ها، کنترل الکترونیکی، فن‌ها و غیره. بنابراین، لزوماً یک سیستم تهویه‌ی داخلی وجود دارد که از این سه فین برای تخلیه‌ی این تلفات به دیوار استفاده می‌کند [BER 02].



شکل ۱۴-۷۸ محفظه و مبدل

جنس محفظه از آلومینیوم است. رایج‌ترین خوردگی در آن سوراخ شدن است، زیرا  $pH$  آب دریا حدود ۸.۳ است، یعنی در محدوده‌ای قرار دارد که برای آلومینیوم و آلیاژهای آن منجر به چنین خوردگی خواهد شد. اگر به لحاظ عایق‌سازی نقاط تماس ناهمگن، احتیاط رعایت نشود، احتمال خوردگی گالوانیزه در تمامی فلزات (شامل فولاد ضد زنگ) به استثنای روی، کادمیوم و منیزیم نیز وجود خواهد داشت [VAR 79]. از آلومینیوم به صورت گسترده در ساخت کشتی با رنگ‌های ضد رسوب مبتنی بر ترکیبات آلی قلع استفاده می‌شود.

#### ۴-۸-۱۴ نمودار توان



شکل ۱۴-۷۹ نمودار قاعده‌ی محتمل برای ماشین

بسیاری از بخش‌های این نمودار در بالا مورد بحث قرار گرفتند. با این حال، همچنان باید برخی از آن‌ها توصیف شوند:

- در نبود تولید (هنگامی که جریان اقیانوس ضعیف باشد)، خط کشیده است و ترانسفورماتور تغذیه می‌گردد. شارژ باتری کار می‌کند و منبع قطعات سطح پایین را نگه می‌دارد. قطعات سطح پایین برای کارکرد ماشین ضروری هستند. به ویژه هنگامی که ماشین در حال تولید نباشد، آن‌ها به روش سیستم ارتباطی، امکان نظارت بر وضعیت ماشین را که همواره باید در عملیات باشد، فراهم می‌کنند. از طریق نظارت و ارتباط، اطلاعات خوبی درباره‌ی سرعت جریان و سرعت چرخش پره‌های در حال دوران فراهم می‌شود. اگر وضعیت ماشین رضایت‌بخش باشد، ما می‌توانیم با تغذیه‌ی پمپ (CAP بسته) آن را راه بیندازیم و پس از چند دقیقه در این اثنی، مقاومت آب فاقد یون تا آستانه‌ی مورد نیاز افزایش پیدا می‌کند. می‌توان باس DC را با بستن رابط پلاستیکی چرخشی (CPC) شروع به پیش‌شارژ کرد.

- میان ماشین و مبدل آن به ویژه با وجود ژنراتور سنکرون دارای مغناطیس دائم به کنتاکتور<sup>۱</sup> (CAM) نیاز است. بدون این کنتاکتور، در هنگام خرابی در مبدل سمت ماشین، جریان تا موقع خراب شدن ماشین نگه داشته می شود.

- وسیله‌ی تشخیص خرابی عایق تا هر زمان که ماشین برق تولید کند، کار خواهد کرد. این وسیله مبتنی بر تشخیص جریان گردشی میان نقطه‌ی میانی باس و جرم است. به طور کلی، در ماشین‌های صنعتی که از این نوع جست‌وجوی رشته‌ی صفر استفاده می کنند، جریان قراردادی حداکثر به  $10A$  محدود شده است که از آن، اندازه‌ی مقاومت  $Rh$  در شکل ۱۴-۷۹ تعیین می شود: هنگامی که  $Ed=1kV$ ، جریان حداکثر برابر با  $Ihm=Ed/(2Rh)$  است، بنابراین  $Rh = 50\Omega$ . اندازه توان معمولاً بر اساس جریان  $3A$  انتخاب می شود و توان بعدسازی  $450W$  است. خرابی‌ها در اطراف  $1A$  شناسایی می شوند.

- بستن کنتاکتور CAP، آخرین مرحله در راه‌اندازی ماشین است، بدین معنا که می توان تولید را آغاز کرد. در ایستگاه کنترل قبل از بستن کنتاکتور، بالادست و پایین دست ولتاژهای کنتاکتور یکسان شده، فرکانس تنظیم می شود و تغییر فاز میان ولتاژهای شبکه و مبدل سمت ماشین به حداقل می رسند.

ترانسفورماتور خروجی نیز در محفظه قرار دارد و بیانگر تلفاتی است که باید تخلیه گردند: تلفات آهن به وسیله‌ی فن‌ها به هوا تخلیه می شوند. تلفات رساناها ممکن است با آب فاقد یون تخلیه شوند. به منظور برهم زدن تعادل مدار آب، سیم پیچ‌ها از آلومینیوم ساخته شده‌اند.

این قطعات در توربین‌های آبی، درون محفظه‌ی متسغرق در عمقی قرار گرفته‌اند که نباید بیشتر از  $50m$  باشد. محفظه در معرض فشار تقریبی ۵ بار است:

$$1bar = 10^5 pascals, 1pascal = 1N / m^2, 1bar \approx 10m$$

به منظور حذف کامل خطر نفوذ آب به محفظه وجود فشار اضافی ۰.۵ ضروری است (یعنی، در سطح، فشار داخل محفظه برابر ۵.۵ بار است). این فشار اضافی بر قطعات اثر می گذارد و به همین جهت باید بخشی از مشخصات خاص آن‌ها باشد.

<sup>1</sup> Contactor

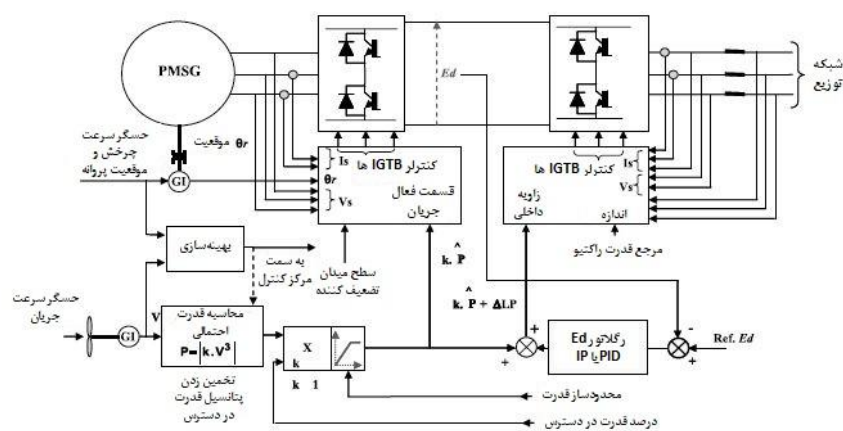


## ۱۴-۸-۵ اجزای سیستم کنترل

## ۱۴-۸-۵-۱ حقایق کلی

سیستم کنترل داخلی مبدل‌های سمت ماشین و سمت شبکه مشکل عمده‌ای ایجاد نمی‌کند. این سیستم به خوبی شناخته شده است و موضوع انتشارات بسیاری بوده است [LEO 85; BOS 96; VAS 98; DEF 02; LOU 04]. این سیستم اصطلاحاً رکتیفایر اکتیو است که به صورت گسترده در صنعت به کار می‌رود.

ما از سرعت محاسبه شده‌ی جریان اقیانوس و با در نظرگیری مشخصات توربین، مرجع توان محتمل را محاسبه می‌کنیم. این مرجع برای مبدل‌ها فراهم شده است. تنظیم توان یکسان در دو عملگر سری، فرآیندی فیزیکی نیست، اما هنگامی که ما ولتاژ  $Ed$  حلقه‌ی پیوسته را تنظیم کنیم، به صورت فیزیکی درمی‌آید. خروجی رگلاتور  $Ed$  به مرجع توان در مبدل سمت شبکه افزوده می‌شود. مسئله برای اپراتور (روی خشکی)، نمایش درصدی از توان اکتیو موجود برای تزریق به شبکه است.



شکل ۱۴-۸-۱ سیستم کنترل جانبی، موقعیت حسگرهای اصلی

اپراتور همچنین (در محدوده‌ی ثابت) برای جبران جزئی توان راکتیو مصرفی کابل یا مطابق نیازهای شبکه مسئول توان راکتیو است.

مقایسه‌ای محلی یا روی خشکی میان سرعت جریان اقیانوسی و سرعت چرخش پره‌های توربین انجام می‌شود. عملکرد ماشین ممکن است در طول زمان تغییر کند. در رابطه با هر پروانه

ممکن است سرعت‌های زیاد به سایش در انتهای پره‌ها و فرسایش پس از مدت زمان مشخصی منجر شوند که برای تطابق ضریب تبدیل  $k$  در شکل ۱۴-۸۰ باید در نظر گرفته شوند (اپراتور باید از این مسئله آگاه باشد).

در شکل ۱۴-۸۰ ما می‌توانیم دو کنترل پایه، سطح خنثی‌سازی ژنراتور و احتمال محدودیت توان را مشاهده کنیم. جریان‌های جزر و مدی، طی چرخه‌ی قمری و در طول یکسال متغیر می‌باشند. از نقطه نظر طراحی سیستم الکتریکی، داشتن ماشینی که با کمترین جزر و مد‌ها و جزر و مد‌های استوایی سازگار باشد، منطقی نیست. بنابراین، محدودیت‌هایی برای ولتاژ (خنثی‌سازی) و توان وجود دارد.

در توپولوژی تعریف‌شده در اینجا، هیچ چیزی مانع کارکرد حرکتی نمی‌شود: مجموعه، ماشین، حسگرها، سیستم کنترل و غیره. کارکرد حرکتی طوری مد نظر است که به شروع حرکت توربین با وجود ضعیف بودن جریان‌های اقیانوسی کمک کند. همچنین شاید مطلوب باشد که در نبود جریان، یک سیستم کنترلی محرک برای آزمایش داشت. در این مورد، مسئله‌ی ما نگهداری است.

#### ۱۴-۸-۵-۲ حسگرها

در ماشین، حسگر سرعت/موقعیت ضروری وجود دارد. این حسگر یک  $IG$  (مولد ضربه، شلیک در دو جهت  $90^\circ$  از یکدیگر برای تشخیص دو جهت چرخش) است که با زیاد بودن تعداد قطب‌ها (۱۲ بیت + ۱)، تعداد نقاط بیشتری خواهد داشت. کار آن، اندازه‌گیری سرعت پره‌ها قبل از شروع تولید است. در عملیات عادی، از آن برای تطبیق چرخ قطبی و موقعیت جریان‌ها در فازها انجام می‌شود.

بر روی محفظه‌ی مذکور یک حسگر سرعت جریان جزر و مدی وجود دارد (مادامی که محفظه به پره‌های توربین نزدیک باشد). از این حسگر برای برآورد مرجع توان استفاده می‌شود.

میان ماشین و مبدل‌های آن، حسگرهای ولتاژ و جریان وجود دارد (۲). جمع جریان‌ها در سه فاز صفر است). در شروع کار، جریان‌ها فرکانس بسیار کم و پیوسته‌ای دارند؛ بنابراین به حسگرهای  $U$  و  $I$  اثر هال<sup>۱</sup> و حلقوی شدن شار نیاز خواهد بود. ردیاب اثر هال در شکاف هوایی مدار مغناطیسی قرار داده می‌شود که متناسب با شار، ولتاژ تولید می‌کند. در سیم‌پیچ اول، ما

<sup>1</sup> Hall effect



جریان متناسب با مقدار اندازه‌گیری  $U$  یا  $I$  را به گردش درمی‌آوریم. در سیم‌پیچ دوم، ما جریان را از خروجی رگلاتوری که مرجع آن صفر بوده و بازگشت در آن، تصویر شار شکاف هوایی است، به گردش درمی‌آوریم. بنابراین، جریان خروجی رگلاتور، تصویر جریان اندازه‌گیری شده است. در نتیجه، ما حسگر به اصطلاح اثر هال با عایق گالوانیزه داریم که می‌تواند مقادیر محتمل پیوسته را اندازه‌گیری کند. حسگرهای میان ماشین و مبدل شامل موارد زیر می‌شوند:

- حسگر ولتاژ در حلقه‌ی پیوسته (اندازه‌گیری  $Ed$ ) - همچنین حسگر اثر هال؛

- حسگرهای جریان در خروجی مبدل سمت شبکه - ترانسفورماتورهای جریان کفایت می‌کنند؛

- حسگرهای ولتاژ در خروجی مبدل سمت شبکه، ۳ ترانسفورماتور بالقوه در بالادست کنتاکتور برای انجام اتصال. سیستم کنترل برحسب  $Ed$  و فرمان‌ها، باید از ولتاژهای داخلی آگاه باشد.

به حسگرهای دیگر در بخش‌های قبلی اشاره شده است - بسیاری از حسگرهای بدون اهمیت (آستانه‌های دما یا فشار) و برخی از حسگرها که اطلاعات قیاسی، به ویژه برای نظارت بر عملکرد صحیح سیستم خنک‌کاری فراهم می‌کنند.

## ۹-۱۴ نگهداری

به دلیل غرق بودن محفظه در آب، امکان انجام تعمیر در آن وجود ندارد؛ بنابراین، ارتباط فیبر نوری میان ماشین‌ها و خشکی بسیار حائز اهمیت است. بسیار مهم است که با وضعیت ماشین‌های مستغرق آشنا باشیم تا بتوانیم عملیات‌های مهم نگهداری و تعمیر را که شامل بلند کردن محفظه از بستر دریا می‌شوند، برنامه‌ریزی کنیم. این گفته به معنای استفاده از غواصانی برای قطع ارتباط کابل‌های مختلف است:

- ارتباط میان ماشین و محفظه؛

- ارتباط میان حسگر سرعت روی ماشین و محفظه؛

- انتقال کابل به خشکی. این کابل همچنین شامل فیبرهای نوری ارتباطی است.

توجه کنید که رابط‌های زیر آبی تا ولتاژ  $20kV$  نسبتاً رایج هستند (آن‌ها برای استفاده در صنعت نفت توسعه داده شده‌اند).

نگهداری در شرایط زیر آب، شامل تمیزکاری محفظه برای محدود کردن رشد میکرو ارگانیسم-های سطحی (باعث تغییر ظرفیت مبدل های گرمایی می شود) و احتمالاً تغییر رزین های فاقد یون است. بنابراین، رزین ها باید در دسترس باشند. مشکل ما در اینجا از این حقیقت ناشی می-گردد که عملیاتی از این نوع نباید بیشتر از ده دقیقه طول بکشد. برای پایین رفتن تا عمق ۵۰ یا ۶۰ m، غواصان باید برای فشار زدایی چندین بار توقف کنند. این عملیات تنها هنگامی قابل انجام است که جریان ها در جزر و مد زیاد یا کم، ضعیف باشند.

### ۱۴-۱۰ نتیجه گیری

در این فصل، ما برخی از جنبه های فنی و اساسی منابع ولتاژ را مورد بررسی قرار دادیم که توسط متخصصان این زمینه به خوبی شناخته شده اند. ما تنها به جزئیات نکاتی پرداختیم که در کتب موجود (به خوبی) پوشش داده نشده اند. به ویژه برای *PWM* ها، مؤلفین بسیاری به جزئیات شکل امواج خروجی پرداخته اند، اما تعداد کمی از آن ها محدودیت های موجود در منبع *DC* را توصیف کرده اند: این موضوع در اینجا (به حداقل رساندن حجم، مشخصات الکتریکی قطعات) برای طراحی صحیح منبع به همراه رکتیفایرهای اکتیو، شامل اتصالات *HVDC* ولتاژ، اهمیت بسیاری دارد.

ما با اشاره به برخی از پاسخ های محتمل (ژنراتورها، مبدل ها، سیستم های انتقال توان و غیره) وارد جزئیات پاسخ هایی شدیم که با توان های موجود در توربین های آبی سازگاری بسیار خوبی دارند. بهترین پاسخ، روشی است که در آن از قطعات فرعی رایج استفاده شود (کاهش هزینه-ها).

بزرگترین مشکل به اتصال قطعاتی همچون ژنراتور، مبدل و کابل های انتقال مربوط می شود. با این حال، بهتر است جویای ابداعات آتی باشیم.

ژنراتور و مبدل های الکتریکی به احتمال زیاد عناصری هستند که تحت فشار بازار، طراحی آن ها دچار تحول شود:

- ژنراتور حلقوی با مغناطیس دائم امروزه یک ایده ی قدیمی محسوب می شود و به دلیل عدم نیاز، در واقعیت توسعه داده نشده و صنعتی سازی نشده است؛

- توپولوژی های مابین  $500 kW$  تا  $2 MW$  برای مبدل به احتمال زیاد توسعه داده نخواهند شد: امروزه پاسخ های فراوانی موجود است - مبدل مرسوم دو سطحی، مبدل ۳ سطحی *NPC* (کلمپ نقطه ی خنثی)، مبدل های چند سطحی و حتی مبدل های به اصطلاح ماتریسی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> Matricial

که چند سال پیش به عنوان پاسخ کلی تبدیل پدیدار شد. مهم‌ترین تغییراتی که از مولفه‌ها ناشی خواهند شد: کاهش تلفات، افزایش دماهای نقطه‌ی انشعاب و غیره. در قطعات الکترونیکی پر قدرت می‌توان *IGET*‌ها را به عنوان ترقی در *IGBT*‌ها در نظر گرفت، زیرا تلفات هدایت آن‌ها بسیار کمتر است. متأسفانه، تلفات کموتاسیون آن‌ها بیشتر است که باعث می‌شود این وسیله به ماشین‌های پر قدرت با فرکانس کلیدزنی نسبتاً کم (به طور کلی کمتر از  $1500\text{ Hz}$ ) محدود گردد. کاهش تلفات، هدف اساسی پیشرفت است. کاهش تلفات کموتاسیون باعث افزایش راحت‌تر فرکانس کلیدزنی خواهد شد. نتایج این کار قابل توجه هستند و به احتمال زیاد به سود توپولوژی‌های چند سطحی باشند. زیرا اندازه‌ی خازن‌های شناور آن‌ها مستقیماً به فرکانس کلیدزنی مرتبط است. این امر به طور قابل توجه کار فیلترسازی ولتاژ خروجی را ساده می‌کند.

قطعات *SiC* (سیلیسیم کاربید) باعث ساده‌تر شدن خنک‌سازی قطعات می‌شوند. ما می‌دانیم هنگامی که اختلاف دمایی میان نقطه‌ی انشعاب و دمای محیط زیاد باشد، خنک‌سازی بازده بهتری خواهد داشت. با دانستن اینکه امروزه دماهای نقطه‌ی انشعاب با مولفه‌های جریان موجود حدود  $125^{\circ}\text{C}$  است، ما می‌توانیم به راحتی مزیت افزایش این دماهای حداکثری تا  $200^{\circ}\text{C}$  را متصور شویم. اگرچه فن‌آوری این کار هنوز تکمیل نشده است، (به ویژه به ازای ولتاژهای زیاد ( $U > 4\text{ kV}$ ) و جریان‌های قوی)، اما بازار *SiC* طی چند سال گذشته در حال رشد بوده است. در حقیقت، پیشرفت قطعات به درخواست بازار مرتبط است: پیشرفت جریان قطعات *SiC* فشار ضعیف ناشی از بازار نو ظهور خودروی الکتریکی است (از میان عوامل دیگر). این قطعات با توان بالا برای پیشرفت در انتظار بازاری پویا هستند که ممکن است بازار حمل و نقل راه‌آهن و البته بازار انرژی تجدیدپذیر باشد.

#### ۱۴-۱۱ کتاب‌شناسی

- [ABI 02] ABIGNOLI M., GOELDEL C., "Moteurs pas à pas", *Techniques de l'ingénieur*, no. D3(690), 2002.
- [ANG 65] ANGOT A., "Compléments mathématiques à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications", *Editions de la revue optique*, 1965.
- [BER 02] BERTIN Y., "Refroidissement des machines tournantes", *Techniques de l'ingénieur*, no. D3(460), 2002.
- [BOS 96] BOSE B.K., *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, New

- York, 1996.
- [CAR 26] CARSON J.R., "Wave propagation in overhead wires with ground return", Bell System Technical Journal, vol. 5, 1926.
- [COS 02] COSTA F., ROJAT G., "CEM en électronique de puissance. Réduction des perturbations-Simulation", Techniques de l'ingénieur, no. D3(292), 2002.
- [COU 99a] COURAULT J., DE PREVILLE G., SANHET J.-L., "Fluctuations de tension et flicker", Techniques de l'ingénieur, no. D4(315), 1999.
- [COU 99b] COURAULT J., LAPIERRE O., POULIQUEN J.-L., Industrial Interest of Multilevel Converters, EPE, electronic publication, 1999.
- [COU 99c] COURAULT J., Multi-Level-Frequenzumrichter von Alstom Power Conversion Spannungszwischenkreis-Umrichter für Industrieanwendungen, CREEBEL, Belfort, 1999.
- [COU 04] COURAULT J., Energy Efficiency – Transport and Distribution, Moscou, Paris, 2004.
- [CRA 03a] CRAPPE M., Commande et régulation des réseaux électriques, Hermès, Paris, 2003.
- [CRA 03b] CRAPPE M., Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques, Hermès, Paris, 2003.
- [DAV 04] DAVIAU J.-F., MAJASTRE H., RUER J., "Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins", SeaTech Week, 2004.
- [DEF 02] DE FORNEL B., "Alimentation des machines asynchrones", Techniques de l'ingénieur, no. D3(620), 2002.
- [ECR 00] ECRIN, Energie des mers, SAIPEM, Milan, 2000.
- [ESC 02] ESCANE J.-M., ESCANE P., "Modélisation des lignes et des câbles", Techniques de l'ingénieur, 2002.
- [FOC 02] FOCH H., FOREST F., MEYNARD T., "Onduleurs de tension. Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur, no. D3(177), 2002.
- [GYU 00] HINGORANI M.G., GYUGYI L., Understanding FACTS. Concepts and Technology of AC Transmission Systems, IEE PRESS Power Engineering Society, 2000.
- [HAU 00] HAU E., Windturbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics, Springer, Berlin, 2000.
- [HAU 98] HAUTIER J.-P., CARON J.-P., Modélisation et commande de la

- machineasynchrone, Technip, Paris, 1995.*
- [KOS 79] KOSTENKO M., PIOTROVSKI L., *Machines électriques, Moscou, Paris, 1979.*
- [LAJ 02] LAJOIE-MAZENC M., VIAROUGE P., “Alimentation des machines synchrones”, *Techniques de l’ingénieur, no. D3(630), 2002.*
- [LEO 85] LEONHARD W., *Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, Berlin, 1985.*
- [LIP 98] LIPO T.A., CHEN S., “Circulating current in inverter drives”, *IEEE Industry Applications Magazine, January-February 1998.*
- [LOU 04] LOUIS J.-P., *Modèles pour la commande des actionneurs électriques, Hermès Lavoisier, Paris, 2004.*
- [MEY 92] MEYNARD T.A., FOCH H., “Multilevel conversion: high voltage choppers and voltage source inverter”, *IEEE Power Electronics Conference, 1992.*
- [PAY 02a] PAYS M., “Câbles de transport d’énergie. Technologie, caractéristiques”, *Techniques de l’ingénieur, no. D3(520), 2002.*
- [PAY 02b] PAYS M., “Câbles de transport d’énergie. Applications”, *Techniques de l’ingénieur, no. D4(521), 2002.*
- [SMI 02] SAINT-MICHEL J., “Bobinage des machines tournantes à courant alternatif”, *Techniques de l’ingénieur, no. D3(420), 2002.*
- [SPA 01] SPAHIC E., HANSON J., FIELLER G., BAZEN G., “VSC HVDC for the reduction of wind power fluctuations”, *7th International Workshop on Large Scale Integration on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 2001.*
- [VAR 79] VARGEL C., *Le comportement de l’aluminium et de ses alliages, Dunod Technique, Paris, 1979.*
- [VAS 98] VAS P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford University Press, Oxford, 1998.*



# ۱۵

## کابل‌های دریافت و انتقال انرژی

### تولیدشده توسط فن‌آوری‌های

### فراساحلی

#### ۱-۱۵ مقدمه

در فصل ۱۴ جزئیات گزینه‌های انتقال انرژی از ژنراتورهای واقع در دریا به شبکه‌ها انتقال و توزیع بررسی گشتند. به مدت دهه‌ها، الکتریسیته توسط کابل‌های زیر آبی برای تأمین برق جزایر، صدهای متقاطع<sup>۱</sup> یا برای اتصال داخلی شبکه‌ها منتقل شده است.

اسناد بسیاری وجود دارد که اطلاعات دقیقی درباره‌ی کابل‌های ایزوله و کاربردهای زیر آبی آن‌ها ارائه می‌دهند [WOR 09, BAR 00, MOO 04]. به خوانندگان به شدت توصیه می‌شود که با این اسناد آشنا شوند. هدف از این فصل تکمیل اطلاعات قبلی است.

امروزه، توان الکتریکی با موفقیت برای سکوه‌های فراساحل واقع در حدود  $100\text{ km}$  شبکه فراهم شده است و مزارع بادی واقع در فواصل مشابه از ساحل به شبکه‌ی برق متصل گشته‌اند. این

---

<sup>۱</sup>Cross-sounds

دستاوردها نشان می‌دهد که مرزهای پاسخ‌های جریان متناوب دائماً در حال گسترش هستند و این گفته توسط بسیاری از گزارش‌های ارائه‌شده در آخرین جلسه‌ی *CIGRE* (شورای بین-المللی سیستم‌های الکتریکی عظیم<sup>۱</sup>) در سال ۲۰۱۰ تصدیق شده است *[COL 10, GRA 10, SKO 10, JER 10, LEE 10]*. دامنه‌ی مقادیر توان انتقالی و فواصل تحت پوشش همواره در حال افزایش می‌باشند. مقادیر ولتاژ اسمی حاصل دائماً در حال افزایش می‌باشند و پاسخ‌ها برای جریان‌های مستقیم و همچنین جریان متناوب با عایق نواری یا عایق ترکیبی برجسته موجود می‌باشند. بخشی از کابل‌ها که از عایق ترکیبی برجسته با مزایای بیشمار آنها استفاده می‌کند دائماً در حال رشد است. کابل‌های توصیف‌شده در پایین به این دسته تعلق خواهند داشت.

در *CIGRE*، کمیته‌ی پژوهشی *BI* مسئولیت نظارت بر توسعه‌ی کابل‌های عایق به ازای ولتاژهای زیاد و خیلی زیاد و برای کاربردهای مشخص، کابل‌های با ولتاژ متوسط را بر عهده دارند. چندین گروه کاری امروزه در حال بررسی جنبه‌های مختلف مشکلات فنی، فنی-اقتصادی و محیطی مربوط به توسعه‌ی گسترده‌ی سیستم‌های تولید برق هستند. تعدادی از این گروه‌های کاری به طور ویژه در حال بررسی مشکلات مربوط به انتقال انرژی تولیدی فراساحل هستند. کار آنها به زودی به نتیجه خواهد رسید و اطلاعات فراهم‌شده در این فصل را تکمیل خواهد کرد.

در این فصل، ما سیستم‌های کابل زیر آبی را برای اتصال داخلی شبکه مورد بحث قرار نخواهیم داد. درحالی‌که ما گاهی اوقات به مثال‌هایی از کابل‌های زیر آبی با عملکرد بسیار بالا اشاره می‌کنیم، بحث ما در اینجا به جمع‌آوری و انتقال انرژی تولیدی فراساحل محدود می‌شود.

## ۱۵-۲ حقایق کلی

همان‌طور که در بخش ۱۴-۵ اشاره شد، رایج‌ترین روش انتقال الکتریسیته از ژنراتورهای واقع در دریا به شبکه‌ی روی خشکی استفاده از کابل‌های زیر آبی است. گزینه‌های دیگر همچون استفاده از خطوط گازی عایق (*GIL*)ها بررسی شده‌اند *[KUN 08]*. با این حال، گزینه‌های دیگر در اینجا بررسی نخواهند شد.

بنابراین، یک سیم ژنراتور ثابت یا متحرک را به نقطه‌ی ثابت اتصال به شبکه‌ی روی خشکی متصل می‌کند. این سیم تقریباً به طور ثابت بخشی "استاتیکی" دارد که در بستر دریا قرار گرفته است و یک "بخش دینامیکی" دارد که در معرض کرنش مکانیکی شدید امواج و جریان-

<sup>1</sup>Conseil international des grands réseaux électriques



های اقیانوسی در ارتفاعاتی در بازه‌ی چند متر تا چند صد یا هزار متر قرار دارد [JER 10]. مشخصات کابل‌های دینامیکی بعداً در این فصل بررسی خواهند شد.

این دو بخش اتصالی که کاربردهای متفاوتی دارند ممکن است از یک نوع کابل ساخته شوند اما به طور کلی از کابل‌هایی استفاده می‌کنند که دارای طرح‌های مختلفی می‌باشند که برای کاربردهای مربوط به خود مناسب می‌باشند. برای مثال، به طور کلی کابل‌های ساکن زیر آبی دارای پوشش سربی ضد آب می‌باشند، در حالی که بخش‌های دینامیکی به دلیل مقاومت در برابر خستگی فلز، احتمالاً با استفاده از روش‌های مختلف، به طور کلی پرهزینه‌تر یا دشوارتر در طول مسافت طولانی ساخته شوند. اگر کرنش‌های مکانیکی بسیار زیاد باشند، ما باید قطعات دچار خستگی را در فواصل تکراری و برنامه‌ریزی شده تعویض کنیم یا اگر بررسی مطابق با برنامه مشخص کند که به چنین تعویضی نیاز است. در این شرایط، ما می‌توانیم به طور معقولی کاربردهای مورد نیاز بخش دینامیکی را دوباره در نظر بگیریم و به پاسخ‌های مقرون‌به‌صرفه توجه کنیم. در هر صورت، به گذاری میان بخش‌های ساکن و پویا نیاز است. بدین منظور از یک "مفصل گذار" استفاده می‌شود.

می‌توان از دو فن‌آوری مقابل برای انتقال انرژی و اتصال ژنراتورها به شبکه استفاده کرد: جریان متناوب و جریان مستقیم.

در این زمینه، طبیعی‌ترین پاسخ، اتصال ژنراتور برق به جریان متناوب است. خروجی ژنراتورها (در اینجا عبارت ژنراتور برای توصیف واحدهای تولیدی استفاده شده است که ممکن است برای خود ترانسفورماتور فزاینده باشند یا نداشته باشند) به طور کلی برحسب سطح توان، ولتاژ متوسط مابین  $1kV$  و  $50kV$  است. خروجی نزدیک‌ترین شبکه اغلب ولتاژ زیاد یا بسیار زیاد است. بنابراین، ولتاژ میان ژنراتور و شبکه باید تا حدی افزایش داده شود که به هم متصل گردند. این نقطه‌ی تبدیل می‌تواند در نزدیکی ژنراتور قرار گیرد که در این صورت توان با ولتاژ بالا انتقال می‌یابد (و جریان "کاهش" می‌یابد) یا در خشکی، نزدیک به شبکه که توان با ولتاژ متوسط منتقل می‌شود (و جریان "قابل توجه").

در مورد آخر، سطح مقطع رسانا بزرگ‌تر بوده، کابل سنگین‌تر است و هزینه‌ی مواد خام، تولید و نصب نیز بیشتر است؛ اتصال به شبکه به صورت جداگانه، هزینه‌ی بیشتری دارد.

در مورد قبلی، ترانسفورماتور باید در دریا قرار گیرد که هزینه‌ی راه‌اندازی تأسیسات را افزایش می‌دهد.

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۲۵

پاسخ دیگر جریان مستقیم است که استفاده از اتصالات طولانی تر را سهولت می بخشد. دو فن آوری تبدیل متفاوت پیشنهاد شده است: پاسخ مرسوم با عنوان  $LCC$  (مبدل خطی تعدیل- شده) که به مدت ۵۰ سال در مسافت های طولانی مقادیر قابل توجهی از برق را انتقال داده است (با استفاده از کابل های نواری) و امروزه  $VSC$  (مبدل منبع ولتاژ) مبتنی بر نیمه هادی ها ( $IGBT$  یا  $IGCT$  ها) که احتمال انتقال گسترده ای کمتری از مقادیر توان را دارند اما می تواند برای بخش زیادی پاسخگوی نیازهای برنامه ریزی شده در این کتاب باشند. بهینه سازی اتصال شبکه به لحاظ فنی-اقتصادی لزوماً شامل در نظرگیری پارامترهای زیادی می شود، همچون:

- مجاورت و ولتاژ اسمی شبکه؛

- فاصله ی میان ساحل و ژنراتور؛

- عمق؛

- جریان های اقیانوسی و کرنش های مکانیکی که بر کابل ها وارد می شوند.

کابل با این دیدگاه طراحی می شود که کارکرد کامل در شرایط مورد انتظار عملیات تضمین گردد.

بنابراین، بهتر است توابع کابل و ویژگی های خاص کابل های زیر آبی را دوباره یادآوری کنیم و ابزارهای طراحی را که مهندسان در اختیار دارند دوباره آزمایش کنیم. عبارت  $HVA$  برای مشخص سازی ولتاژ متوسط و  $HVB$  برای مشخص سازی ولتاژ زیاد و بسیار زیاد (بالای  $kV$ ) استفاده می شود (در فرانسه،  $HTA$  و  $HTB$ ).

با فرض اینکه قرار دادن کابل عملیاتی بسیار پرهزینه است، مسلماً هنگامی که تجهیزات تولید توانایی مونتاژ سه کابل با ابعاد مطلوب را داشته باشند، ساختار سه هسته ای برای کابل های زیر آبی  $AC$  ترجیح داده خواهد شد.

### ۱۵-۳ کاربردهای سیستم های کابلی با ولتاژ بالا (فشار بالا)

یک سیستم کابلی، مجموعه ای متشکل از رسانای عایق و تمامی مصالحی است که امکان اتصال آن به رسانای عایق دیگر یا شبکه را فراهم می کنند.

استانداردهای بین المللی اصلی مربوط سیستم کابلی به ترتیب عبارتند از:

-  $IEC 60502$  برای کابل هایی با ولتاژ مابین  $1kV$  و  $36kV$ ؛

- IEC 60840 برای کابل‌هایی با ولتاژ کمتر یا مساوی  $170\text{ kV}$ ؛

- IEC 62067 برای کابل‌هایی با ولتاژ بیشتر از  $170\text{ kV}$ .

این استانداردها با انتشارات زیر تکمیل می‌شوند:

- Electra 171 برای آزمایش مکانیکی کابل‌های زیر آبی [CIG 97]؛

- CIGRE TB 219 برای کابل‌های DC با ولتاژ کمتر یا مساوی  $250\text{ kV}$  [CIG 03a, CIG 03b]

کارهای استانداردسازی بین‌المللی مربوط به کابل‌های زیر آبی به انتشارات اشاره‌شده در بالا ارجاع داده می‌شوند و نسبت به جنبه‌های خاص کابل‌های زیر آبی تکمیل می‌گردند.

درک کامل اسناد استانداردسازی، که بیشتر و بیشتر در حال کاربردی شدن هستند مستلزم دانش خوبی از کاربردهای سیستم‌های کابلی است.

هدف بخش‌های زیر کمک به خواننده برای دستیابی به این دانش، با شروع از کابل AC تک-هسته‌ای "زمینی"، ادامه با کابل‌های AC تک‌هسته‌ای مستغرق، سه‌قطبی AC مستغرق و در نهایت اشاره‌ی کوتاه به کابل‌های DC است.

### ۱۵-۳-۱ سیستم کابلی برای انتقال جریان متناوب

#### ۱۵-۳-۱-۱ کابل تک‌هسته‌ای طراحی‌شده برای جریان متناوب

پیرو استدلال ما به دلیل سادگی، کابل تک‌هسته‌ای با عایق‌بندی ترکیبی یک رسانای عایق است. این کابل دو کاربرد اصلی مرتبط دارد:

- کاربرد رسانایی برای انتقال جریان  $I$ . این کاربر توسط فلز انجام می‌شود؛

- کاربرد عایق‌سازی به منظور تضمین تحمل مقاومت  $V$  میان رسانا و محیط خارجی با فرض پتانسیل زمین. این کاربرد توسط پلیمر اکستروودشده انجام می‌شود.

توان ظاهری انتقالی توسط رسانای عایق برابر ضرب  $V.I$  است.

این دو کاربرد اصلی با کاربردهای ویژه اضافی تکمیل می‌شوند که بعداً مورد بحث قرار خواهند گرفت.

در نگاه اول، می‌توان مسئله‌ی کاربرد کابل با عایق ترکیبی را نسبتاً راحت بیان نمود.

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۲۷

جریان عبوری از رسانای کابل به واسطه‌ی اثر ژول باعث گرم شدن آن می‌شود. این افزایش دما توسط هدایت حرارتی ساده به عایق منتقل می‌شود که هدف از آن تضمین ماندگاری در ولتاژ است. این عایق به سبب طبیعت خود تنها می‌تواند دمای کاری حداکثر را تحمل کند و نباید هیچ‌گاه از آن فراتر رود.

در یک محیط مفروض، جریان گرمای تولیدی توسط تلفات ژول اتلافی در رسانا از طریق مقاومت‌های حرارتی مختلف در لایه‌های متفاوت خود کابل، محیط اطراف آن و زمین به سمت محیط خارجی می‌رود.

توجه. - به منظور افزایش محدودیت‌های عملیاتی رسانای عایق، ما باید در جهات مختلف کار کنیم. برای مثال:

(۱) جست‌وجو برای مصالح عایق با مناسب‌ترین عملکرد الکتریکی و حرارتی، زیرا عایق الکتریکی مناسب معمولاً هدایت گرمایی خوب را خنثی می‌کند؛

(۲) کاهش تلفات ژول و در نتیجه مقاومت  $AC$  رسانا؛

(۳) کمک به جریان‌های گرمایی در جهت محیط خارجی با توجه به قیود مربوط به آن محیط.

امروزه، تجهیزات مرسوم در کارخانه‌های ساخت کابل این امکان را فراهم می‌کنند که رساناها برای کابل‌هایی ساخته شوند که سطح مقطع حدوداً  $1600\text{mm}^2$  دارند، اما سطح مقطع  $3000\text{mm}^2$  تا به امروز ساخته شده است.

به طور کلی، ما امروزه می‌توانیم کابل‌هایی را با عایق ترکیبی تا  $500\text{kV}$  پیدا کنیم که می‌توان با گستره‌ای از سطوح مقطع رسانا از  $800$  تا  $2500\text{mm}^2$  ساخت که قادر به انتقال مقادیر بسیار زیاد توان می‌باشند ( $1000\text{MVA}$ ). تا به امروز، بازخوردی که برای عملیات حاصل شده است، رضایت‌بخش بوده است [*CIG 07a, CIG 07b*].

در یک اتصال که از کابل با عایق ترکیبی استفاده می‌شود لزوماً شامل موارد زیر است:

(a) وسایل اتصال کابل به شبکه به نام پایانه‌ها. انواع مختلفی از پایانه‌ها برحسب اتصالات مفروض یافت می‌شود:

- اتصالات خطوط هوایی: پایانه‌های خارجی در زیر عایق چینی یا کامپوزیت؛

- اتصالات ایستگاه‌های فرعی: پایانه‌های ایستگاه‌های فرعی (*Metal-Clad*)(*MCS*)ها؛

- اتصالات ترانسفورماتورها: به طور کلی، بدین منظور پایانه‌هایی برای MCSها استفاده می‌شود تا امنیت تأسیسات تضمین گردد.

(b) خود کابل‌ها تا مرحله‌ی آخر گام‌به‌گام (به‌عنوان مثال، تولید، راه‌اندازی) به‌صورت "بخش-هایی" منتقل می‌شوند که طول آن‌ها به عوامل زیر بستگی دارد:

- محدودیت‌های فرآیند تولید؛

- شرایط جابجایی (در نظرگیری وزن، حجم)؛

- شرایط ذخیره‌سازی؛

- شرایط انتقال (وزن، حجم، سیکل‌های چرخش وسایل انتقال)؛

- شرایط راه‌اندازی (به‌عنوان مثال، نیروهای قرار دادن)؛

- مسائل الکتروتکنیکی خاص (ولتاژ و جریان‌ها در جداره‌ی<sup>۱</sup> کابل‌ها).

(c) وسایل مورد استفاده برای اتصال قطعات کابل (بخش‌ها) به‌صورت سری قرار گرفتند تا رسانای عایق‌شده در یک مرحله ایجاد شود. این وسایل "مفاصل" نامیده می‌شوند. اتصال دو قطعه‌ی کابل به وسیله‌ی مفصل "بندکشی"<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. می‌توان این "بندکشی" را تا حدودی در کارخانه انجام داد. بنابراین مفاصل به‌عنوان ساخت کارخانه شناخته می‌شوند.

هزینه‌ی رابط به ویژه تحت تأثیر هزینه‌ی بندکشی قرار دارد. بنابراین، بهتر است که به‌منظور کمینه کردن هزینه‌های تأسیسات، بخشی از هزینه را که به اندازه‌ی طول بخش‌ها مربوط می‌شود، بهبود بخشید (هزینه‌های جابجایی و ارسال، هزینه‌ی بندکشی).

بنابراین در مرحله‌ی طراحی ما به دنبال اندازه‌ای برای کابل هستیم که بتواند ظرفیت انتقال مورد انتظار را داشته باشد و همچنین به دنبال بررسی شرایط انتقال و راه‌اندازی هستیم تا اندازه‌ی رابط‌ها بهینه‌سازی شوند.

در نهایت، امکان‌پذیری فنی-اقتصادی عملیات اتصال باید تأیید شود. پیرو این مسئله، بهینه‌سازی اندازه مورد پژوهش قرار گرفته و هزینه‌های بندکشی، حمل‌ونقل و راه‌اندازی در نظر گرفته می‌شوند.

<sup>1</sup>Screens

<sup>2</sup>Jointing

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۲۹

بنابراین طراحی رابط، حاصل فرآیندی است که به صورت موردی انجام شده و تنها با داشتن دانشی عمیق درباره‌ی کارکردهای مورد انتظار و البته دانش مناسب درباره‌ی کارکردهای قطعات، کابل و تجهیزات ارتباطی که به عنوان "لوازم جانبی" نیز شناخته می‌شوند، به نتیجه می‌رسد. خواننده می‌تواند برای ابعاد کابل و لوازم جانبی به استاندارد فرانسوی *NF C 33-254* "کابل‌های عایق و لوازم جانبی آنها برای شبکه‌های انرژی"<sup>۱</sup> رجوع کنند که برای کابل‌های تک‌هسته‌ای با عایق ترکیبی برجسته و ظرفیت ولتاژ بیش از  $36\text{ kV}$  قابل اعمال می‌باشند *[UTE 08]*. استانداردهای ملی دیگر نیز موجود می‌باشند.

### ۱۵-۳-۱-۱-۱ کارکردهای کابل

بگذارید در ابتدا ما ساختار کابل با ولتاژ زیاد و خیلی زیاد را که در شکل ۱۵-۱ نشان داده شده است، یادآور شویم.

این کابل‌های تک‌هسته‌ای از مرکز تا بیرون شامل موارد زیر می‌باشند:

(a) رسانا، گاهی اوقات هسته‌ی کابل نامیده می‌شود؛

(b) جداره نیمه‌هادی روی هسته، اساساً رسانای نیمه‌هادی داخلی نامیده می‌شود؛

(c) عایق کابل؛

(d) جداره نیمه‌هادی روی لایه‌ی عایق، اساساً نیمه‌هادی خارجی نامیده می‌شود؛

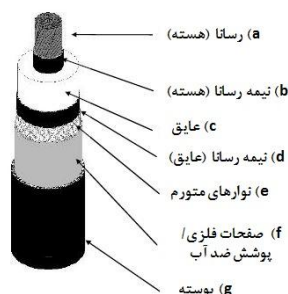
(e) نوار برجسته با هدف تضمین آب‌بندی در امتداد تمام طول و در صورت لزوم زیر جداره فلزی شامل ضربه‌گیر می‌شود؛

(f) جداره فلزی؛

(g) پوشش حفاظتی خارجی به نام پوشش بیرونی.

---

<sup>1</sup> *Cables isolés et leurs accessoires pour réseaux d'énergie*



شکل ۱۵-۱ سطح مقطع رایج کابل HVA

به منظور درک کامل مکانیزم‌های طراحی کابل، بهتر است نقش قطعات مختلف اشاره شده در بالا را یادآور شویم.

(a) رسانای کابل: رسانا حامل جریان الکتریکی است. به دلیل انعطاف پذیری و الکتروتکنیکی (در نظرگیری اثر پوشش و اثر مجاورت<sup>۱</sup>) به طور کلی جامد نیست اما با کابل کشی و مونتاژ سیم‌های فلزی حاصل می‌شود. هنگامی که جریان از آن عبور کند، رسانا به صورت شعاعی و محوری منبسط می‌شود. رسانا اساساً از مس یا آلومینیوم ساخته می‌شود.

(b) جداره نیمه‌هادی بر روی رسانا (به‌عنوان نیمه‌هادی داخلی نیز شناخته می‌شود): هدف از این جداره، یکنواخت سازی میدان الکتریکی در سطح رسانا و جلوگیری از هر گونه افزایش در میدان است که در آن رسانا به لحاظ هندسی یکدست نیست. میان رسانا و لایه‌ی عایق نیز عنصر واصل مکانیکی قرار دارد. این ماده که با کربن سیاه پر شده است، طوری فرمول‌بندی شده است که چسبندگی کامل با لایه‌ی عایق و چسبندگی عالی با رسانای کابل را تضمین کند.

(c) لایه‌ی عایق: این لایه عایق واقعی است و تکیه‌گاه مشخصی در قطر خارجی کابل دارد. لایه‌ی عایق در عملیات اکستروژن هم‌زمان (نیمه‌های داخلی/نیمه‌های خارجی) که با استفاده از یک سه سر متصل به سه اکسترودر انجام می‌شود، بر روی رسانای کابل قرار می‌گیرد.

(d) جداره نیمه‌هادی بر روی عایق (به‌عنوان نیمه‌هادی خارجی نیز شناخته می‌شود): این جداره شامل الکتروود استوانه‌ای دوم می‌شود که برای تضمین میدان الکتریکی شعاعی به کار می‌رود. گاهی اوقات دارای نقش اضافی حائل مکانیکی میان لایه‌ی عایق و جداره فلزی است. این ماده با کربن سیاه پر می‌شود و فرمول آن طوری است که چسبندگی به لایه‌ی عایق کنترل شود.

<sup>1</sup> kin effect and proximity effect

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوری‌های فراساحلی ۶۳۱

بنابراین، ما می‌توانیم رساناهای نیمه‌هادی خارجی "قابل جدا شدن" (ولتاژ متوسط) یا بالعکس، رساناهای بسیار چسبنده بسازیم.

$e$ ) قرار دادن نوارهای برجسته: این‌ها آب‌بندی در امتداد تمام طول کابل را تضمین کرده و به‌عنوان ضربه‌گیر در زیر جداره فلزی عمل می‌کنند.

$f$ ) جداره فلزی: این جداره دو کار الکتریکی انجام می‌دهد:

- اگر کابل خراب شود جریان اتصال کوتاه را حمل می‌کند، بدون اینکه باعث آسیب‌رسانی به ناحیه‌ی امن کابل و محیط شود،

- جمع‌آوری جریان خازن عبوری از خازن استوانه‌ای در  $(b)+c)+d$ .

جداره فلزی نیز دارای دو وظیفه است:

- کمک مکانیکی به حفاظت از عایق؛

- شامل مانع ضد آب شعاعی است.

$g$ ) پوشش حفاظتی خارجی (پوشش بیرونی): از آن برای جلوگیری از تماس میان جداره فلزی و محیط خارجی استفاده می‌شود. برای موارد زیر نیز به کار گرفته می‌شود:

- عایق الکتریکی جداره فلزی، در صورت لزوم؛

- حفاظت از آن در برابر خوردگی؛

- فراهم کردن حفاظت مکانیکی در هنگام تعمیر و راه‌اندازی، به ویژه در هنگام عملیات کشیدن.

بنابراین ما دو کاربرد اصلی برای آن می‌یابیم که قبلاً ذکر شدند:

- کار رسانایی، که توسط رسانا انجام می‌شود؛

- کار عایق‌سازی که توسط مجموعه‌ی لایه‌ی عایق در ارتباط نزدیک با دو لایه‌ی نیمه‌هادی انجام می‌شود و دارای دو کاربرد ثانویه (اگرچه اهمیت زیادی دارند) می‌باشند:

- کاربرد جداره هدایتی (فلزی): جریان خازنی، اتصال کوتاه،

- حفاظت مکانیکی (آب‌بندی، حائل مکانیکی، اصطکاک، سایش).



## کارکرد عایق کاری

دست‌یابی به سطح مفروض ولتاژ اسمی بر عایق کاری وابسته است.

بنابراین، این اولین کاربردی است که باید تضمین شود. در اینجا مسئله یافتن فلزی عایق است که در تمام طول عمر کابل (۴۰ سال یا بیشتر) قادر به تحمل ولتاژ عملیاتی و همچنین هر ولتاژ اضافی در شبکه باشد، بدون اینکه به طور قابل توجهی افزایش دمای ناشی از عبور جریان الکتریکی از رسانا و جریان اتصال کوتاه از رسانا و/یا جدار فلزی خراب شود. ماده‌ی عایق-کاری که امروزه اکثراً به کار می‌رود، پلی‌اتیلن شیمیایی شبکه‌ای<sup>۱</sup> است (شناخته شده به‌عنوان *XLPE*).

سال‌ها است که کاغذ آغشته اساس ماده‌ی عایق کاری مورد استفاده برای کابل‌های با ولتاژ متوسط و زیاد بوده است؛ و کاربردهای زیر آبی بسیاری تنها با کمک این روش عایق کاری و به سبب سهولت بندکشی امکان‌پذیر شده‌اند.

خواص الکتریکی عالی پلی‌اتیلن باعث شده است تا کابل‌های با ولتاژ زیاد به همراه عایق ترکیبی برجسته از ۱۹۶۰ به بعد توسعه یابند و در ۱۹۹۰ به ظرفیت  $500kV$  برسند.

پلی‌اتیلن با ثابت دی‌الکتریک<sup>۲</sup> کم، تلفات دی‌الکتریک بسیار کم نسبت به کاغذ آغشته، صلبیت دی‌الکتریک بسیار زیاد و دمای عملیاتی زیاد نسبت به کاغذ آغشته بسیار زود در فرانسه ماندگار شد.

پلی‌اتیلن به‌عنوان بخشی از خانواده‌ی پلی‌الفین، ماده‌ای ترموپلاستیکی است که با بسپارش (پلیمر سازی) اتیلن در حالت گازی خود تولید می‌شود. انواع مختلفی از آن وجود دارد که به روش پلیمر سازی وابسته می‌باشند. بنابراین، ما می‌توانیم به موارد زیر اشاره کنیم:

- پلی‌اتیلن با چگالی پایین (*LDPE*) که با بسپارش اتیلن در فشار زیاد تولید می‌شود. چگالی آن مابین ۰.۹۱ و ۰.۹۳ قرار دارد؛

- پلی‌اتیلن سنگین (*HDPE*) که با بسپارش اتیلن در فشار پایین یا متوسط تولید می‌شود. چگالی آن مابین ۰.۹۴ و ۰.۹۶ قرار دارد.

*LDPE* پرکاربردترین پلیمر در فرانسه بوده است و خیلی زود در سطوح مختلف ولتاژ رایج شد:

<sup>1</sup>Cross-linked

<sup>2</sup>Permittivity

- ۱۹۶۲ در ۶۳ کیلوولت
- ۱۹۶۸ در ۹۰ کیلوولت
- ۱۹۶۹ در ۲۲۵ کیلوولت
- ۱۹۸۵ در ۴۰۰ کیلوولت

استفاده از پلی اتیلن مستلزم استفاده از ضد اکسنده است.

پلی اتیلن شبکه‌ای از برقراری پیوند میان زنجیره‌های مولکولی طویل پلی اتیلن سبک برای تولید شبکه‌ای سه‌بعدی ساخته می‌شود که دارای مقاومت دمایی بیشتر است. این عملیات اتصال عرضی<sup>۱</sup> نامیده شده و با استفاده از پراکسید ترکیب شده با ضد اکسنده در پلی اتیلن انجام می‌شود و بازگشت‌ناپذیر است.

*XLPE* می‌تواند دماهای عملیاتی بیشتری نسبت به *LDPE* تحمل کند ( $90^{\circ}C$  در مقابل  $70^{\circ}C$ )، بنابراین ظرفیت مناسبی برای بارگذاری بیشتر دارد. واکنش شیمیایی بلافاصله پس از اکستروژن در لوله‌ی شبکه‌ای واقع در اتمسفر ساکن با فشار بالا انجام می‌شود (برای مثال، در نیتروژن با فشار حدود ۱۰ بار). واکنش باعث تولید محصولات جانبی می‌شود که پس از عملیات اکستروژن خارج می‌شوند.

ماده‌ی شبکه‌ای و شیمیایی دیگر *EPR* (لاستیک اتیلن-پروپیلن) است که دارای مشخصات جالبی همچون مقاومت در برابر تخلیه بار جزئی<sup>۲</sup> و بلوری شدن آب<sup>۳</sup> است.

این ماده بسیار انعطاف‌پذیر بوده و ممکن است در کاربردهای خاص زیر آبی مورد استفاده قرار گیرد اما به سبب ثابت دی‌الکتریک (۲.۹) و تلفات دی‌الکتریک زیاد آن، کاربرد آن به ولتاژهای کمتر یا مساوی  $150(170) kV$  محدود شده است.

کتب بسیاری [*WOR 09, BAR 00, MOO 04*] عملکرد این مواد را با هم مقایسه می‌کنند.

کابل‌های تک‌هسته‌ای دارای میدان شعاعی می‌باشند و لایه‌ی عایق در معرض مولفه‌ی مماسی میدان الکتریکی قرار ندارد. مقدار میدان الکتریکی در شعاع  $r$  از محور کابل، برابر است با:

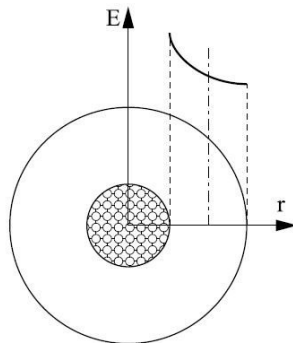
<sup>1</sup>Cross-linking

<sup>2</sup>Partial discharge

<sup>3</sup>Water treeing

$$E = \frac{U}{r \text{Log}(R_2/R_1)}$$

که در آن  $R_2$  شعاع روی عایق،  $R_1$  شعاع روی نیمه‌هادی داخلی و  $U$  ولتاژ اعمالی به رسانا است.



شکل ۱۵-۲ میدان الکتریکی در کابل تک‌فاز

در شکل ۱۵-۲ این میدان الکتریکی نمایش داده شده است. ما می‌توانیم مشاهده کنیم که مقدار میدان الکتریکی در نزدیکی رسانا حداکثر بوده و خارج از کابل حداقل است.

با این حال، این میدان الکتریکی خارجی بر میدان الکتریکی که ما در صفحه‌ی مشترک کابل و مواد رابط خواهیم یافت، اثر می‌گذارد: پایانه‌ها و مفاصل.

این صفحه‌ی مشترک به سبب ماهیت خود، نقطه‌ضعف سیستم محسوب می‌شود، زیرا چسبندگی مواد نسبت به عایق جامد بسیار کمتر است.

بنابراین، ما باید دانش خوبی از محدودیت‌های میدان الکتریکی داشته باشیم که بتواند به طور دائم توسط صفحه‌ی مشترک کابل و تجهیزات رابط و همچنین محدودیت‌های میدان الکتریکی مجاز در عایق کابل و به ویژه در نقطه‌ی تماس با نیمه‌هادی داخلی تحمل شود.

حداکثر میدان الکتریکی مجاز در ۱۹۶۲  $4 \text{ kV/mm}$  بوده و امروزه در کابل‌های  $500 \text{ kV}$  حدود  $16 \text{ kV/mm}$  است.

در همین اثناء، میدان الکتریکی خارجی نیز دچار تحول شده است و امروزه در کابل‌های  $500 \text{ kV}$  برابر  $7 \text{ kV/mm}$  است. این پیشرفت اغلب مبتنی بر موفقیت آزمایش‌های بلندمدت دشوار بوده است و پس از آن در معیارهای بین‌المللی در نظر گرفته شده است.

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۳۵

به منظور "یکپارچه سازی" تحولات فنی که در مدت کوتاهی قابل دستیابی می‌باشند، امروزه گرادیان‌های عملیاتی داخلی و خارجی به ترتیب کوچک‌تر از مقادیر آستانه‌ای  $16kV/mm$  و  $7kV/mm$  اتخاذ می‌شوند.

به علاوه، آزمایش‌هایی بر روی  $XLPE$  عایق به منظور گسترش مرزهای موجود در حال اجرا می‌باشند.

بنابراین، عناصر سیستم‌های کابلی شامل کابل و تجهیزات رابط، تحت آزمایش خوردگی در ولتاژ با اعمال سیکل‌های حرارتی بوده است تا امکان‌پذیری عملیاتی در گرادیان‌های  $kV/mm$  ۲۰ در سطح جدار درونی و  $8kV/mm$  در سطح جدار داخلی اثبات شود [ARG95].

این نتایج به توسعه‌دهندگان امکان خواهند داد تا طرح‌های بهتری برای لایه‌ی عایق ارائه دهند. می‌توان همچنان به جلو رفت و اصلاحات تازه‌ای در طراحی انجام داد و این کار غیرمنطقی نمی‌باشد. با این حال، به تأیید توسط آزمایش نیاز است. نتایج همچنین به این معنا خواهند بود که می‌توان با اطمینان برای مقادیر اتخاذی اخیر میدان الکتریکی، طول عمر کاری بسیار زیاد متصور شد.

### کاربرد رسانا

کاربرد رسانا متأثر از کاربرد عایق است که به نوبت خود تحت اثر آن قرار می‌گیرد. جریان گرما به سمت محیط خارجی به مقاومت حرارتی عایق بستگی دارد. این امر به دمای حاصل از عایق در نزدیکی رسانا منجر می‌گردد.

اندازه‌ی رسانای مورد نیاز برای انتقال جریان مفروض، اندازه‌ی عایق را مشخص می‌سازد و در آن مقادیر حدی گرادیان‌های خارجی و داخلی منتخب در نظر گرفته می‌شوند.

برای کابل‌های تک‌هسته‌ای روی خشکی با یادآوری قواعد بالا، ما می‌توانیم به صورت گسترده-ای ابعاد رسانا را مستقل از عایق تعیین کنیم.

ظرفیت انتقال مورد نیاز به آمپرپذیری در هر مدار مربوط می‌شود و گستره‌ی آن از چند صد آمپر برای انتقال انرژی دریایی تا چند هزار آمپر برای اتصالات داخلی بزرگ است.

همان‌طور که ما قبلاً دیدیم، برای چنین شدت‌هایی، اندازه‌ی سیستم اساساً به توان اتلافی توسط اثر ژول در رسانا و در نتیجه به مقاومت  $AC$  آن بستگی دارد. برای کاهش این مقاومت همچنان فضا وجود دارد.

بنابراین ضروری است که ماده‌ای برای رسانا انتخاب شود که دارای بهترین ویژگی‌های الکتریکی ممکن است. مس و آلومینیوم مستعدترین مواد برای این منظور هستند و هیچ رقیبی برای خود ندارند. انتخاب از میان این دو ماده بر اساس تحلیل فنی-اقتصادی صورت می‌گیرد که در آن هزینه‌ی مواد و نصب کابل‌ها، از میان عوامل دیگر، در نظر گرفته می‌شوند.

به منظور کاهش مقاومت رسانا، ما می‌توانیم سطح مقطع رسانا را که برای عبور جریان در نظر گرفته شده است، افزایش دهیم و فرض کنیم که به منظور انتقال آمپر دو برابری ما تنها نیاز داریم تا سطح مقطع را تا دو برابر افزایش دهیم. با این حال، مقدار مقاومت  $AC$  رساناهای عریض به شدت تحت تأثیر برخی پدیده‌های مختلف می‌باشد:

- اثر پوشش که به توزیع غیریکنواخت جریان درون بخش رسانا منجر می‌شود؛ چگالی جریان در سطح رسانا بیشتر از چگالی در مرکز است؛
- اثر مجاورت که ناشی از اثر میدان مغناطیسی حاصل از رساناهای مجاور است؛ چگالی جریان در نزدیکی سطح رساناهای مورد بحث بیشتر است؛
- وجود جریان‌های پارازیتی در بخش رسانای کابل.

این مشکلات که در مواد الکتریکی به خوبی شناخته شده‌اند، باعث می‌شوند تا مهندسان به دنبال سازه‌های مناسب باشند (برای مثال، میله‌ی آلترناتورها: *Robel Bar*).

در زمینه‌ی کابل‌ها، رساناها به سطح مقطع بیش از  $1000\text{mm}^2$  برای رساناهای مسی یا  $1600\text{mm}^2$  برای رساناهای آلومینیومی تقسیم می‌شوند. گروه کاری *CIGRE B1.03* در بروشور فنی ۲۷۲ [*CIG 05a, CIG 05b*] پژوهش کامل خود را درباره‌ی رساناهای با سطح مقطع زیاد منتشر کردند. همان‌طور که در آن بروشور فنی اشاره شده است، می‌توان از سیم‌های عایق با ظرفیت‌های آمپری بسیار زیاد برای کاهش مقاومت  $AC$  استفاده کرد.

انتشارات *IEC60287*، سند مرجع برای تعیین مقاومت  $AC$  رسانا است. بازبینی‌های انجام‌شده در این انتشارات به طور فزاینده‌ای پیشنهادات *IEC* درخواستی توسط *SC BICIGRE* را یکپارچه می‌سازد (*CIG 05b*).

#### کاربرد جداره

جداره فلزی که برای کاربردهای الکتریکی ضروری است - جمع‌آوری جریان خازن و حمل جریان‌های اتصال کوتاه - اساساً دو کاربرد دیگر نیز دارد:

- به‌عنوان مانع آب‌بند شعاعی؛

- به‌عنوان حفاظت مکانیکی.

اگرچه کابل‌هایی وجود دارد که بدون مانع آب‌بند طراحی شده‌اند، در رابطه با عبارت طرح خیس، پاسخ‌هایی که در فرانسه به کار گرفته شدند دارای مانع آب‌بند شعاعی می‌باشند (طرح خشک). امروز کاری که توسط *CIGRE WG B1.27 [CIG 10]* برای ایجاد پیشنهاداتی برای آزمایش کابل زیر آبی در حال انجام است، طرح خیس توجه را بررسی نمی‌کند و تنها بر کابل‌های مجهز به مانع آب‌بند متمرکز است.

ترکیب این کاربردهای مختلف ممکن است به محدودیت‌های شدید در ساخت منجر شود که در آن برای عبور جریان اتصال کوتاه، برای مثال، در مورد خرابی داخلی به مقداری فلز اضافی نیاز دارد تا در اطراف لایه‌ی عایق قرار گیرد (این مقدار برحسب فلز مورد بحث تغییر می‌کند). از طرف دیگر، کاربرد آن به‌عنوان مانع آب‌بند شعاعی، برای مثال، ممکن است توسط لایه‌ای نازک از فلز انجام شود یا بالعکس، ممکن است به ضخامت کمینه مشخصی (برای مثال، سرب) نیاز باشد.

انتخاب جدا فلزی باید مبتنی بر تحلیل دقیق مسئله باشد که در آن تمامی جنبه‌های آن و به ویژه جنبه‌ی مکانیکی و ترمومکانیکی و اثر محیط زیست نیز در نظر گرفته می‌شوند.

با به خاطر داشتن این موضوع، امروزه مطالعاتی در حال انجام می‌باشد که امکان‌پذیری انواع مختلفی از جدار فلزی را بررسی می‌کنند:

- جدار ترکیبی سرب/آلومینیوم: از پوشش سربی ساخته شده است که ضخامت آن به لحاظ فنی حداقل است و ممکن است با انتخاب مربوط به ماشین‌آلات کاهش یابد و توسط سیم‌های آلومینیومی برای انتقال جریان اتصال کوتاه تکمیل شود؛

- جدار آلومینیومی چین‌دار اکستروژنه، چین‌دار به این معناست که دارای یک ساختار موج-دار می‌باشد که هدف از آن ایجاد انعطاف‌پذیری کافی در کابل برای پیچاندن آن به دور قرقره‌ی کابل است؛

- جدار چندلایه‌ی تمام آلومینیومی: ورقه‌ای که در امتداد کابل قرار گرفته، در فصل مشترک چسبیده یا جوشکاری شده و به پوشش خارجی چسبانده شده است و غیره. این نوع جداره گاهی اوقات برای انعطاف‌پذیری بیشتر چین‌دار می‌باشد؛

- جدار چندلایی تمام مسی: ورقه‌ای که در امتداد کابل قرار گرفته، در فصل مشترک چسبیده یا جوشکاری شده و به پوشش خارجی چسبانده شده است و غیره. این نوع جداره گاهی اوقات برای انعطاف‌پذیری بیشتر چین‌دار می‌باشد؛

- جدار کامپوزیت آلومینیوم/آلومینیوم یا مس/آلومینیوم: ورقه‌ای از آلومینیوم (برای مثال به ضخامت  $50\mu m$ ) توسط سیم‌های آلومینیومی یا مسی تکمیل می‌شود و در امتداد کابل قرار گرفته و در صفحه‌ی مشترک چسبیده یا جوش خورده و به پوشش خارجی چسبانده شده است.

گروه کاری *CIGRE B1.25* اخیراً خلاصه‌ای از کارها و مشخصات این موضوع و پیشنهاداتی برای آزمایش انواع جداره‌های جدید را در بروشور فنی ۴۴۶ [*WOR 11a, WOR 11b*] را منتشر کرده است. با این حال، این مطالعات به کابل‌های روی خشکی محدود هستند.

جداره‌های کامپوزیتی اشاره‌شده در بالا موضوع بروشور فنی ۲۷۲ نیز بوده‌اند [*CIG 05a, CIG 05b*] و توسط *WG B1.03* فوق‌الذکر *CIGRE* منتشر گشته‌اند.

به منظور حمل جریان اتصال کوتاه در مورد خرابی اتصال، جدار فلزی باید با مقاومت الکتریکی حداقل و در نتیجه سطح مقطع به اندازه کافی زیاد رسانا و وسایل مقاوم در برابر کرنش‌های الکترو دینامیکی حاصل از اتصال کوتاه، "به صورت جامد" به زمین متصل شود.

ممکن است ما به انجام این اتصال به شبکه از چندین نقطه در امتداد اتصال، برای مثال از هر دو انتها علاقه‌مند شویم.

در حالت *AC*، به سبب مزیت قانون لنز، این امر به عبور جریان القایی از جدار کابل با اندازه‌ی یکسان با جریان جاری از رسانا منجر می‌شود. این جریان به تلفات ژول و در نتیجه به گرم شدن بخش خارجی کابل منجر می‌گردد. ظرفیت انتقال کابل تحت اثر آن قرار می‌گیرد.

برای جلوگیری از این مسئله، ما می‌توانیم بر اساس قاعده‌ی اتصال به زمین کابل در یک نقطه، از روش‌های ویژه‌ی اتصال جداره‌ها استفاده کنیم. در انتهایی که به زمین متصل نیست، ولتاژ القا می‌شود که با طول اتصال مورد بحث و جریان متناسب است. این ولتاژ در هنگام عملیات می‌تواند چند صد ولت باشد و در مورد اتصال کوتاه چند صد ولت (کیلوولت) باشد. بنابراین جداره‌ی فلزی باید به دقت از زمین عایق شود. پوشش حفاظتی خارجی این کار را انجام می‌دهد. در مورد کابل‌های زیر آبی، پاسخ‌های ویژه‌ای وجود دارد.

**کاربرد پوشش حفاظتی خارجی**

همانطور که در بالا اشاره شد، پوشش حفاظتی خارجی، جداره‌ی فلزی را عایق می‌کند و در هنگام عملیات و در هنگام روند قرارگیری کابل از جداره به صورت مکانیکی نگهداری می‌کند. بنابراین، پوشش باید دارای مشخصات الکتریکی و مکانیکی خوبی باشد.

ترکیب مشخصات الکتریکی و مکانیکی خوب (چقرمگی، مقاومت در برابر گسیختگی، سایش، رطوبت، آب‌وهوای بد و غیره) پلی‌اتیلن بدین معناست که می‌توان از آن برای پوشاندن کابل‌های انرژی استفاده کرد که باید سخت‌ترین شرایط محیطی را تحمل کنند. پلی‌اتیلن قابل اشتعال است، اما این مزیت را دارد که در آتش از خود گازهای خورنده منتشر نمی‌کند.

مشخصات اصلی پوشش پلی‌اتیلنی عبارتست از:

- نفوذناپذیری، آب‌بندی بسیار عالی؛
- خواص الکتریکی که موجب عایق‌سازی خوب جداره از زمین می‌شود؛
- مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی و دماهای عملیاتی رایج کابل؛
- مدول بالا برای ازدیاد کم طول، نبود شکنندگی در دمای کم؛
- ضریب اصطکاک کم که مزیت بزرگی در شرایط سخت نصب، برای مثال، برای کشیدن کابل‌ها به داخل لوله‌ها است.

از میان مواد دیگر که ممکن است برای پوشش به کار روند، *PVC*، *MDPE* و *HDPE* رایج‌ترین موارد می‌باشند که در صنعت کابل با ولتاژ زیاد به کار می‌روند.

#### *PVC (a)* (پلی‌وینیل کلرید)

تمامی شکل‌های *PVC* متخلخل بوده و در نتیجه به واسطه‌ی تغییرات دمایی به طور قابل توجه دچار تغییر نمی‌شوند. مهم‌ترین مزیت ترکیبات *PVC*، عدم انقباض در هنگام استفاده به‌عنوان ماده‌ی پوششی است. انقباض پوشش شامل کاهش طول می‌شود که می‌تواند به مشکلاتی در هر دو انتهای کابل، همچون کاهش حفاظت کابل در برابر خورشید، نفوذ آب و خوردگی جداره‌ها منجر شود. می‌توان با استفاده از ترکیبات *PVC* از چنین مشکلاتی خودداری کرد، زیرا دچار انقباض نمی‌شوند.

از میان مزایای دیگر، ما می‌توانیم به مقاومت بالای این ترکیبات در برابر آتش، مواد شیمیایی، موریانه‌ها، نفت و غیره اشاره کنیم.



- با این حال، استفاده از ترکیبات *PVC* چهار اشکال دارد که باید به آن‌ها اشاره شود:
- ثابت عایق سازی کم، بدین معنا که نمی‌توان در طول زیاد کابل پس از راه‌اندازی با ولتاژ پیوسته و زیاد ( $10kV-20$ ) آزمایش انجام داد؛
  - ضریب اصطکاک نسبتاً بالا که باید هنگام کشیدن کابل‌ها به درون لوله‌ها در نظر گرفته شود. نیروهای کششی به این ضریب اصطکاک وابسته می‌باشند؛
  - مقاومت نسبتاً متوسط در برابر سایش، بدین معنا که در هنگام قرار دادن کابل ممکن است پوشش دچار آسیب شود؛
  - شکنندگی نسبی در دماهای پایین.

#### ***MDPE (b)* (پلی اتیلن متوسط) / *HDPE* (پلی اتیلن سنگین)**

- این مواد با ساختار کریستالی بیشتر آن *LDPE* تمایل بیشتری به انقباض خواهند داشت که می‌توان با استفاده از وسایل مهار خاص از آن جلوگیری کرد.
- مزیت اصلی این مواد در ضریب اصطکاک کم آن‌ها و مقاومت بسیار خوب آن‌ها در برابر سایش قرار دارد که ممکن است برای تأسیسات مشخصی به ویژه در شرایط وخیم ضروری باشد.
- پلی اتیلن سنگین با مزیت ساختار نیمه کریستالی خود اشکال منقبض شدن را دارد. به ویژه، اگر وسایل مهار خاص به کار نرود، مشکلاتی به سبب انقباض، عمدتاً هنگامی که کابل‌ها پوشش داده نشده باشند، ایجاد می‌شوند (برای مثال، در لوله، در تونل و غیره).
- از نظر گفته‌های بالا به نظر می‌رسد که *LDPE* گزینه‌ی متعادل تری برای تضمین انجام کار حفاظت مکانیکی خارجی است.

#### **۱۵-۳-۱-۲ کابل تک‌هسته‌ای برای عملیات مستغرق *AC***

- همان‌طور که در بالا توصیف شد، می‌توان از کابل در هنگام غرق بودن، تا ولتاژ اسمی  $40kV$  یا بیشتر، برای مثال، برای عبور از رودخانه‌ها یا آبرده‌ها یا مسیرهای کوتاه در دریای کم‌عمق استفاده کرد. بنابراین، طول کابل مورد نیاز بر روی یک قرقه به سایت منتقل می‌شود.
- سپس کابل با استفاده از روش‌های مرسوم با قرار دادن آن با استفاده از وسایل شناور از کرجی به درون گودالی راه‌اندازی می‌شود.

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۴۱

در هنگام وقوع خطر به سبب فعالیت‌های نگهداری، یک راه جایگزین، قرار دادن لوله‌هایی بر روی زمین (بستر رودخانه، شاخه‌ی دریا) و سپس کشیدن کابل به داخل لوله است. بنابراین ماهیت پوشش از اهمیت زیادی برخوردار است.

در شکل ۳-۱۵ قرار دادن لوله‌های پلی‌اتیلن در آبدره‌ای در دانمارک قبل از اینکه کابل‌های  $400\text{ kV}$  کشیده شوند، نشان داده شده است [JEN 04]. لوله‌های خالی که به انتهای هم جوش خورده‌اند با بلوک‌های بتنی پر می‌شوند تا تضمین شود که فازها در فواصل منظم قرار می‌گیرند؛ سپس به تدریج با آب پر شده و به آرامی به بستر آبدره نشست می‌کنند. سپس کابل‌ها به داخل لوله‌های پر شده از آب کشیده می‌شوند.

در موارد دیگر، طول کابل مستغرق، عمق، شکل زمین یا روش نصب باعث می‌شود تا از پاسخ دیگری استفاده شود و در آن باید کابل به زره مجهز شود.



شکل ۳-۱۵ لوله‌های حفاظتی که قبل از کشیده شدن کابل  $400\text{ kV}$  به داخل آن‌ها، در آبدره‌ای در حال قرارگیری می‌باشد [JEN 04]

نقش زره اساساً حفاظت از کابل در مقابل آسیب خارجی و کاهش افزایش طول رسانا در هنگام عملیات قرارگیری یا بالا بردن است.

بنابراین، برخی از انواع محتمل زره که می‌توان به کار برد به کرنش‌های وارد بر کابل وابسته می‌باشند. در بخش ۴-۵-۱۵ جزئیاتی درباره‌ی طراحی زره کابل ارائه می‌شود.

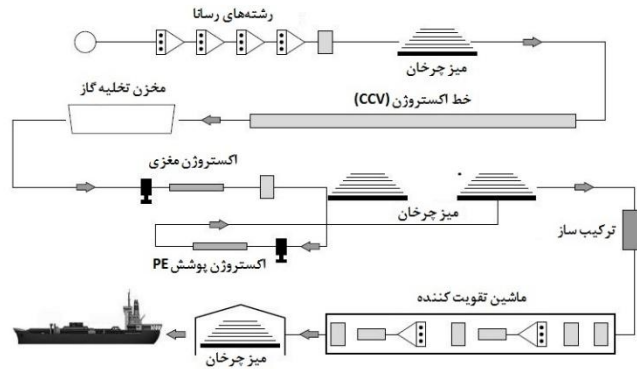
عملیات اصلی تولید کابل زیر آبی تک‌هسته‌ای برای عملیات AC به صورت زیر می‌باشد:

- سیم‌کشی رسانا؛

- قرار دادن رسانا یا قرار دادن بخش‌های از رسانا؛

- مونتاژ رسانا؛
  - عایق سازی کابل به وسیله ی اکستروژن سه گانه؛
  - گاز زدایی؛
  - قرار دادن بستر؛
  - پوشاندن (اکستروژن پوشش سربی یا جاگذاری پوشش چندلایی)؛
  - اکستروژن پوشش خارجی حفاظتی؛
  - پوشاندن با زره.
- در تولید کابل زیر آبی تک هسته ای طویل و قرار دادن آن روی بستر دریا، باید به محدودیت های زیر (از میان موارد دیگر) توجه کرد:
- حداکثر طول کابل سیم پیچ که قابل انتقال به سایت نصب می باشد، چقدر است؟
  - این کابل ها قبل از قرارگیری چگونه باید به هم متصل شوند؟
  - حداکثر طول کابل که می توان قبل از شروع عملیات تولید بعدی ساخت، چقدر است؟
  - اگر بتوان در این عملیات به طول بیشتری پرداخت، چطور باید این بخش های کابل قبل از عملیات بعدی به هم متصل شوند؟
- در زیر خلاصه ای از تمام مسئله ی کابل های زیر آبی طویل ارائه شده است:
- در فرآیند تولید کابل های زیر آبی، عملیات متوالی در سرعت های مختلف انجام می شود و کابل ها که همچنان در حال ساخت می باشند بر روی قرقه ها، تانکرها یا صفحه گردان ها ذخیره می شوند. ظرفیت ادواتی که این قرقه ها را دریافت می کند (*enrouleurs* و *dérouleurs*) یا ظرفیت تانکرها، طول کابل را در مرحله ی میانی تولید محدود می کنند. "بخش ها" قبل از اینکه روی شناور مخصوص کابل قرار گیرند، با استفاده از مفاصل به اصطلاح انعطاف پذیر که با عملیات تولید و قرارگیری کابل تطابق دارند، بندکشی خواهند شد.





شکل ۱۵-۴ نمودار روند رایج تولید کابل زیر آبی [GRA 10]

شکل ۱۵-۴ برگرفته از گزارش ارائه شده در جلسه‌ی آخر CIGRE (۲۰۱۰) است [GRA 10]، و نمونه‌ای است که برای آن خط اکستروژن قادر به عایق کاری بخش زیادی از طول کابل است. در اکثر موارد، کار عایق کاری به دلیل تمیزکاری فیلترهای مورد استفاده میان اکسترودرها و کلاهک‌های اکستروژن محدود می‌شود.

کار اکستروژن چند ده تنی، طول کابل را به چند ده کیلومتر محدود می‌کند. بنابراین می‌توان بخش‌های کابل عایق را قبل از اعمال سرب و پوشش به هم متصل کرد. در موارد دیگر، طول کابل پوشیده از سرب محدود می‌شود. در این موارد، بخش‌های کابل با حفاظت سربی و احتمالاً با پوشش باید قبل از پوشاندن زره به هم متصل شوند.

به‌طور خلاصه، ترکیب کابل زیر آبی تک‌هسته‌ای شامل موارد زیر می‌شود:

- بخش‌های زره‌دار کابل برای اتصال در سایت به وسیله‌ی مفاصل مخصوص: این بخش‌ها به ظرفیت حمل و نقل سایت راه‌اندازی یا محدودیت‌های قرارگیری وابسته می‌باشند؛
- بخش‌هایی از کابل به همراه مفاصل معروف به ساخت-کارخانه با قطر یکسان با کابل: تعداد مفاصل به ظرفیت تولید یا ظرفیت ذخیره‌سازی در مراحل مختلف تولید بستگی دارد: قرار دادن و مونتاژ رسانا، اکستروژن، حفاظت کردن، پوشاندن و نصب زره در سایت تولید کابل‌های تک-هسته‌ای.

۱۵-۳-۱-۳ کابل سه‌هسته‌ای برای کاربردهای مستغرق AC

عملیات قرار دادن کابل زیر آبی بسیار پرهزینه بوده و هرگاه امکان پذیر باشد، ترجیح داده می-شود که کابلی سه هسته‌ای طراحی، تولید و قرار داده شود. کابل سه هسته‌ای با عایق ترکیبی توانسته است ولتاژ  $245kV$  را انتقال دهد.

برخی از گزینه‌های عمده در دسترس می‌باشند:

- انجام متقابل کار آب‌بندی برای کابل‌های سه هسته‌ای و بنابراین اکستروود پوشش سربی بر روی مجموعه‌ای از سه کابل مونتاژی قبل از قرارگیری پوشش و زره حفاظتی. هر کابل دارای یک جدار فلزی خواهد بود. این گزینه تنها برای سطوح ولتاژ کم قابل استفاده می‌باشد؛

- پوشاندن مجزای هر کابل تک هسته‌ای با سرب، تجهیز هر کابل با پوشش (عایق‌سازی یا نیمه‌هادی)، مونتاژ سه کابل و سپس قرار دادن زره در بالای آن. این نوع کابل در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۵ کابل سه قطبی با آب‌بند تک هسته‌ای

نسبت چیزی که برای کابل‌های تک هسته‌ای تعریف شد، عملیات جدیدی برای روند تولید ارائه می‌گردد: مونتاژ فازها قبل از قرار دان زره.

این عملیات شامل محدودیتی تازه است که به ظرفیت ماشین مربوط می‌شود که به‌عنوان ماشین خط مونتاژ یا لایه‌گذاری شناخته شده است و اغلب شامل محدودیت طول بخش‌های تک هسته‌ای و افزایش تعداد مفاصل ساخت-کارخانه است که باید قطر یکسانی با کابل داشته باشند تا زره به راحتی قرار داده شود و زمان تولید آن باید با سیکل تولید ادغام شود.

ما می‌توانیم از مطالب بالا به اهمیت وسایل ارتباطی کابل‌ها و اثر آن‌ها در هزینه یا قابلیت اطمینان اتصالات زیر آبی پی ببریم. این مسئله در بخش‌های بعدی بررسی خواهد شد.

### ۱۵-۳-۲ سیستم کابل تک هسته‌ای برای کاربرد DC

ساخت یک کابل اکستروژده برای عملیات در حالت DC بسیار مشابه ساخت کابل برای حالت AC است. مبدل‌های تازه منبع ولتاژ (VSCها) که به لحاظ ولتاژ تک‌جهتی هستند و جریانی بازگشت‌ناپذیر دارند، تنش‌های الکتریکی ناشی از وارونی قطبیت یافت‌شده در اتصالات مرسوم LCC را کاهش می‌دهند. درحقیقت، در اتصالات VSC هیچ وارونی قطبیتی وجود ندارد. مشکلات ناشی از بارهای فضایی به دام افتاده در عایق کاهش می‌یابد. مواد مورد استفاده برای نیمه‌هادی‌ها و عایق کابل‌های DC مشخصات بسیار مشابهی با آن‌هایی دارند که برای کابل‌های AC به کار رفتند. درحالی‌که آزمایش‌های بررسی کیفیت، آزمایش‌های تعیین نوع و آزمایش‌های معمولی متفاوت از هم می‌باشند، روند تولید بسیار مشابه می‌باشد.

از اوایل ۱۹۸۰ آزمایش‌های بسیاری در فرانسه انجام شده است تا نشان دهند مادامی‌که میدان الکتریکی در محدوده‌ی  $20\text{ kV/mm}$  باقی بماند، کابل‌های DC اکستروژده پاسخ‌های مناسب هستند [BOU 95]. امروزه پژوهش‌های انجام‌شده توسط تولیدکنندگان یا آزمایشگاه‌های مختلف، این مقادیر را تأیید می‌کنند و در نتیجه بهتر است که هنگام طراحی کابل DC این محدودیت‌ها را به خاطر داشته باشیم. مقدار متوسط میدان الکتریکی  $16\text{ kV/mm}$  باعث نگهداری حاشیه امنیت مناسب می‌شود. مسلماً در عملیات DC نیازی به تقسیم کردن رساناها نیست، زیرا اثر هیچ اثر پوششی وجود ندارد.

### ۱۵-۳-۳ لوازم جانبی اتصال

وسایل مورد استفاده برای اتصال کابل‌ها لوازم جانبی اتصال (یا لوازم جانبی) یا تجهیزات اتصال نامیده می‌شوند:

- پایانه‌ها به کابل این امکان را می‌دهند تا به خط بالای آن، به جعبه تقسیم ایستگاه فرعی یا به تجهیزات پوشیده از فلز متصل شود (GIS: ایستگاه فرعی عایق با گاز)؛

- از مفاصل برای اتصال دو بخش کابل استفاده می‌شود. اگر کابل‌ها متفاوت باشند، مفاصل "مفاصل گذار" نامیده می‌شوند.

این وسایل با جزئیات بیشتر در بروشور فنی ۸۹ منتشرشده توسط CIGRE در ۱۹۹۵ توصیف می‌شوند [WOR 95] و همچنان امروزه نیز قابل استفاده می‌باشد. بروشور فنی ۱۷۷ به این بروشور اضافه شده است [WOR 01a, WOR 01b].

ممکن است در زمینه‌ی سیستم‌های کابل زیر آبی از عبارات خاصی برای توصیف کاربردهای مورد انتظار کابل‌های زیر آبی استفاده شود.

این دو عبارت به جای اینکه مخالف هم باشند به صورت متقابل یکدیگر را تکمیل می‌کنند. بنابراین، بسیار اهمیت دارد که لوازم جانبی اتصال اشاره‌شده را به درستی مشخص کرد که در تبادلات فنی مربوط به این مواد بررسی شدند یا مورد بحث قرار گرفتند. روند تأیید و بسط تأیید سیستم‌های کابلی مبتنی بر این عبارات است.

پایانه‌ها و مفاصل ضروری هستند و قابلیت اطمینان ذاتی آن‌ها باید دست کم برابر خود کابل باشد. باید توجه شود که پایانه‌ها نه تنها در معرض کرنش‌های حرارتی و الکتریکی هستند بلکه در معرض کرنش‌های محیطی - گاهی اوقات شدید - نیز می‌باشند (در مناطق آلوده یا نزدیک ساحل). به علاوه، به لحاظ الکتریکی، توزیع میدان الکتریکی بطور محسوسی با کابل تفاوت دارد، بنابراین وسایل باید طوری طراحی گردند که میدان الکتریکی کنترل شود. وسایل طراحی در بخش‌های بعدی ارائه خواهند شد.

### ۱۵-۳-۳-۱ پایانه‌ها

پایانه قطعه‌ای است که در انتهای سیستم کابلی قرار دارد و باعث می‌شود تا رسانا به قطعه‌ی الکتریکی دیگر وصل گردد.

پایانه‌ها را می‌توان به پنج گروه تقسیم نمود:

- پایانه ایستگاه فرعی پوشیده از فلز: پایانه‌ی GIS؛

- پایانه‌ی ترانسفورماتور؛

- پایانه‌ی خارجی؛

- پایانه‌ی داخلی؛

- پایانه‌ی موقت.

شرایط طراحی رایج در تمامی انواع پایانه‌ها عبارتند از:

- اتصال با جریان زیاد میان رسانا و تجهیزات خارجی؛

- عایق با سطح عملکرد برابر با آنچه که برای کابل مقرر شد؛

## فصل پانزدهم: کابل‌های دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن‌آوری‌های فراساحلی ۶۴۷

- عنصر پشتیبان برای کابل؛
- توانایی تحمل نیروهای ترمومکانیکی کابل و تنش‌های خارجی ناشی از باد، یخ و شرایط عملیاتی مدارهای خارجی؛
- اتصال با جریان زیاد در جداره فلزی کابل (پوشش یا سیم) که به جریان‌های اتصال کوتاه اجازه‌ی عبور از بخش متصل به زمین را می‌دهد؛
- عایقی از سرب رابط جداره‌ی فلزی با سطحی از عملکرد از پتانسیل زمین برابر با سطح پوشش بالایی کابل؛
- حفاظت از عایق کابل و پوشش فلزی از نفوذ آب اطراف یا نفوذ سیال دی‌الکتریک موجود در پایانه.
- هنگامی که پایانه با سیال دی‌الکتریک پر شد باید انبساط حرارتی سیال در نظر گرفته شود. در مورد مایع باید حجم انبساطی فراهم شود. به طور کلی این حجم، فضای پر شده از هوا یا گاز واقع در بخش بالایی عایق است. همچنین می‌تواند موارد زیر باشد:
- تانکر اضافی واقع در بالای عایق؛
- تانکر پرفشار خارجی؛
- انباشتگر مایع/گازی داخلی.
- با عایق‌کاری گازی لزومی ندارد که حجم انبساطی فراهم شود اما پایانه باید طوری طراحی شود که بتواند حداکثر فشار کاری را تحمل کند یا شامل شیر تخلیه باشد.
- در مابقی این فصل، در انرژی‌های فراساحلی تنها دو نوع پایانه مورد بحث قرار خواهند گرفت:
- پایانه‌های خارجی؛
- پایانه‌های GIS.

### ۱۵-۳-۱- پایانه‌های خارجی

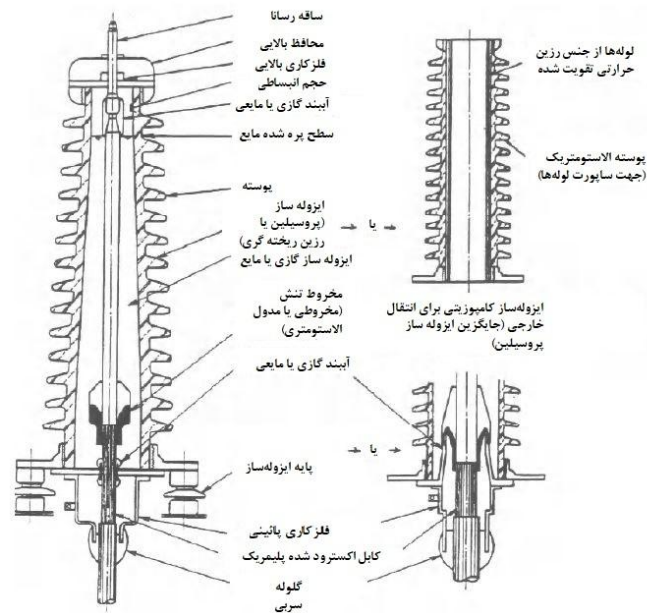
این پایانه‌ها به‌عنوان مرحله‌ی گذار با تجهیزات عایق هوا به کار می‌روند و در معرض شرایط کامل اقلیمی هستند. همان‌طور که در بالا اشاره شد، انواع مختلفی از پایانه‌های خارجی وجود دارد که با جزئیات بیشتر در بروشور فنی ۸۹ و بروشور فنی ۱۷۷ منتشر شده توسط



CIGRE توصیف شده‌اند و امروزه همچنان به کار می‌روند [WOR 95, WOR 01a, WOR 01b]

(a) پایانه‌ی خارجی با مخروط تنش و عایق

میدان الکتریکی در جایی که نیمه‌هادی تمام می‌شود توسط بلوک الاستومری پرس‌ی<sup>۱</sup> به نام مخروط تنش<sup>۲</sup>، شامل تیغه‌ی<sup>۳</sup> پلیمری نیمه‌هادی و عنصر عایق الاستومری برش‌یافته، کنترل می‌گردد. بنابراین کابل با مخروط تنش خود در یک عایقی که از مایع یا گاز پر شده است، قرار داده می‌شود.



شکل ۱۵-۶ پایانه‌ی خارجی به همراه مخروط تنش و عایق

(b) کامپوزیت پیش‌ساخته و پایانه‌ی خارجی عایق

مخروط تنش الاستومری پرس‌ی وارد قالب ترموست مخروطی می‌شود.

فشار در صفحه‌ی مشترک میان مخروط تنش و بدنه‌ی ترموست و میان مخروط تنش و کابل با استفاده از فنرهایی ثابت نگه داشته می‌شود.

<sup>1</sup>Premolded

<sup>2</sup>Stress cone

<sup>3</sup>Deflector

مخروط تنش و قالب مخروطی اساساً درزبندی کابل را تضمین می‌کنند. سپس کابل با مخروط تنش کامپوزیتی خود در عایق حاوی گاز یا مایع قرار داده می‌شود.



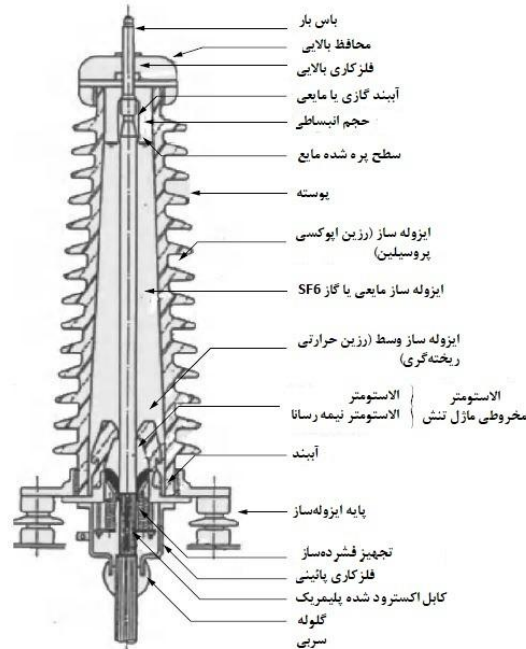
شکل ۷-۱۵ پایانه  $400\text{ kV}$  با عایق چینی

در هر دو نوع توصیف‌شده در بالا، عایق می‌تواند چینی (شکل ۷-۱۵) یا کامپوزیت باشد؛ در مورد کامپوزیت، به شکل استوانه یا مخروط صلب در می‌آید که در کارخانه روی آن پوسته‌های<sup>۱</sup> الاستومری قرار داده شده‌اند - پیش‌ساخته، قالب‌گیری ثانویه یا در هنگام فاز اکستروژن قرار داده شده است.

پاسخ "عایق کامپوزیتی" که به صورت گسترده به کار می‌رود دارای مزایای مهمی در رابطه با خطرات وارد بر محصولات و مردم در مورد انفجار ناشی از اشتباه داخلی در پایانه یا آسیب ناشی از شخص ثالث است.

آزمایش‌هایی با خرابی‌های از پیش تنظیم‌شده با  $31.5\text{ kA}$  و بالاتر در پایانه‌ی  $225\text{ kV}$  پرشده از نفت و دارای عایق‌های کامپوزیتی انجام شده است. این آزمایش‌ها نشان‌دهنده‌ی ارجحیت این عایق‌ها نسبت به عایق‌های چینی به لحاظ رفتار در مورد خطای داخلی بودند.

<sup>۱</sup>Sheds



شکل ۱۵-۸ پایانه‌ی خارجی با مخروط کامپوزیتی و عایق

### ۱۵-۳-۳-۱-۲ پایانه‌هایی برای ایستگاه‌های فرعی پوشیده از فلز/پایانه‌های GIS

این پایانه‌ها کابل را به ایستگاه فرعی پوشیده از فلز متصل می‌کنند (به‌عنوان GIS‌ها نیز شناخته می‌شوند). این ایستگاه‌های فرعی اساساً با گاز پرفشار  $SF_6$  پر می‌شوند.

دو دسته‌ی اصلی برای پایانه‌های GIS وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند:

پایانه‌هایی با عایق در محور کابل؛

- پایانه‌هایی بدون عایق در محور کابل. بنابراین ما بیان می‌کنیم که آن‌ها "بصورت مستقیم در گاز مستغرق" می‌باشند.

هنگامی که پایانه دارای عایق باشد از بخش GIS جدا می‌شود. بنابراین می‌توان داخل پایانه را با گاز یا مایع عایق پر کرد.

سال‌ها است که استفاده از نفت در پایانه‌های GIS در فرانسه ممنوع شده است تا از خطر آتش-سوزی جلوگیری شود.

به منظور اجتناب از وسایل پرهزینه‌ی نظارت بر فشار و با فرض اینکه آزمایش پایانه‌های کابلی پرشده از  $SF_6$  نشان‌دهنده‌ی عملکرد خوب آب‌بندی انتهای کابل‌ها است، معمولاً بخش داخلی عایق را از طریق آریفیس‌هایی، برای مثال واقع در عایق، به بخش  $GIS$  متصل می‌کنند. یکی از اهداف میان‌مدت  $GIS$ ‌ها جایگزینی  $SF_6$  با گاز است که با محیط زیست سازگاری بهتری دارد. پایانه‌های کابلی باید از این الگو پیروی کنند و نباید هیچ مشکل خاصی به وجود آورند.

دو دسته‌ی عمده که در زیر بررسی می‌شوند دارای یک مسئله‌ی مشترک می‌باشند - محیط عایق پایانه در ایستگاه فرعی گاز  $SF_6$  است - و در یک نقطه از هم متفاوت هستند:

- در مورد پایانه‌های با عایق، این عایق است که کابل را در قالب فلزی قرار داده و در آنجا محکم می‌کند تا از هرگونه حرکت طولی ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی جلوگیری شود؛

- در مورد پایانه‌هایی که عایق ندارند، این مولفه‌های  $GIS$  هستند که باید موقعیت کابل را تضمین کنند و از هرگونه حرکت ناشی از تنش‌های ترمومکانیکی جلوگیری کنند.

#### پایانه‌ی $GIS$ به همراه مخروط تنش و عایق

میدان الکتریکی که در آن نیمه‌هادی خارجی تمام می‌شود، توسط بلوک الاستومری پرسی به نام مخروط تنش، شامل تیغه‌ی پلیمری نیمه‌هادی و المان مقطعی الاستومری، کنترل می‌گردد. بنابراین کابل با مخروط تنش خود در عایقی قرار داده می‌شود که با  $SF_6$  پر شده است و فضای داخلی آن معمولاً به بخش  $GIS$  متصل است.

#### مخروط تنش کامپوزیتی پیش‌ساخته و پایانه‌ی عایق $GIS$

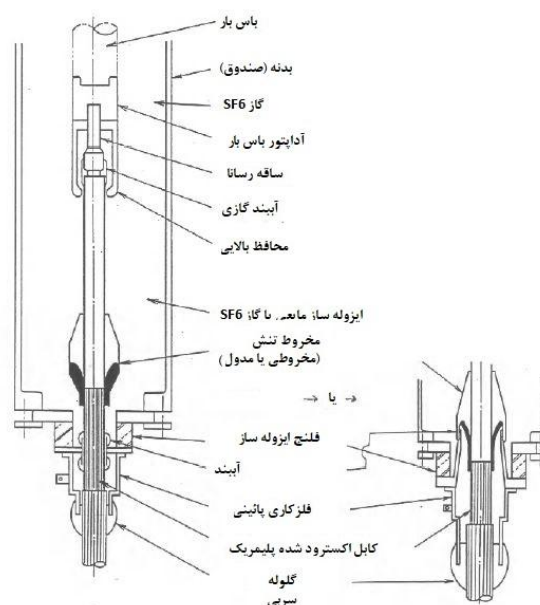
مخروط تنش الاستومری پرسی در قالب ترموست مخروطی جاسازی می‌شود. فشار صفحه‌ی مشترک میان مخروط تنش و بدنه‌ی ترموست و میان مخروط تنش و کابل با استفاده از فنرهایی ثابت نگه داشته می‌شود. کابل به همراه مخروط تنش کامپوزیتی خود در عایقی حاوی  $SF_6$  قرار داده می‌شود که فضای داخلی آن معمولاً به بخش  $GIS$  متصل است.

در نوعی دیگر از پایانه، عایق نقش دو چندان از نظر عایق حائل و بدنه‌ی عایق دارد.

#### پایانه‌ی مستقیم $GIS$ مستغرق

ما برای کنترل میدان الکتریکی از مخروط تنش یا مخروط تنش کامپوزیتی (با قالب مخروطی ترموست و فنر) استفاده می‌کنیم. مولفه‌های  $GIS$  باید کابل را قرار دهند و از هرگونه حرکت

ناشی از تنش‌های ترمودینامیکی جلوگیری کنند. در فرانسه، این نوع پایانه بصورت گسترده به کار می‌رود.

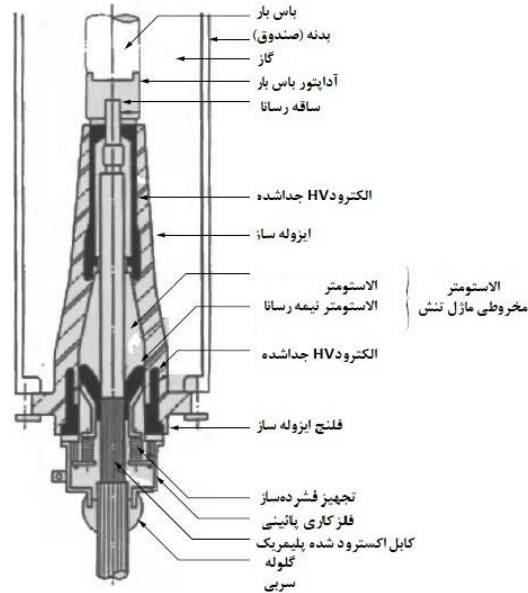


شکل ۹-۱۵ پایانه‌ی مستقیم GIS مستغرق

### پایانه‌ی GIS از نوع خشک

نوع تازه‌ای از پایانه‌ی GIS با عایق اما بدون سیال عایق داخل آن، کار اضافی اتصال توسط دوشاخه را تسهیل کرده است و امروزه در زمینه‌ی مهندسی با ولتاژ زیاد پدیدار شده است. این فن‌آوری جدید که در زمینه‌ی کاربردهای با ولتاژ متوسط بسیار متداول است، باعث می‌شود تا انتقال، نصب و استفاده از GIS را از انتقال و نصب کابل‌های متصل به آن جدا کنیم.

این فن‌آوری مزایای زیادی برای اتصالات تأسیسات فراساحل مجهز به GIS ها دارد.



شکل ۱۵-۱۰ پایانه‌ی GIS خشک

### ۱۵-۳-۲ مفصل

- یک مفصل، عنصر واصل عایق و کاملاً محافظت‌شده میان دو یا چند بخش از کابل است. می‌توان آن‌ها را به سه دسته‌ی زیر تقسیم نمود:
  - مفصل مستقیم با یا بدون قطعی در جداره؛
  - مفصل گذار؛
  - مفصل شاخه‌ای  $T$  (یا  $Y$ ).
- مفصل مستقیم، انواع مختلفی از مفصل مستقیم وجود دارد. شرایط طراحی رایج برای تمامی انواع مفصل عبارتند از:
  - اتصال با جریان زیاد میان رساناها؛
  - عایق مفصلی از استانداردهای عملکردی یکسانی با کابل پیروی می‌کند؛
  - اتصال با جریان زیاد در جداره فلزی (پوشش یا سیم‌ها) کابل‌ها اجازه می‌دهد تا جریان‌های اتصال کوتاه از میان آن‌ها عبور کنند؛

- عایق‌سازی قالب فلزی یا اتصال میان جداره‌های فلزی از پتانسیل زمین برای تطابق عملکرد عایق پوشش بالایی کابل؛
- حفاظت از عایق در برابر نشت آب؛
- حفاظت از بخش‌های فلزی مفصل در برابر خوردگی.
- مفاصل تک‌هسته‌ای با حائل جداره همچنین دارای موارد زیر می‌شوند:
- شکاف در جداره عایق؛
- کابل‌های اتصال، برحسب شکل مورد نظر، دارای اتصال ویژه‌ای برای پوشش‌های فلزی و/یا سیم‌های جداره هستند.
- ممکن است شکاف عایق اتصال کوتاه شود تا مفصلی حاصل شود که در شکل ثابت متصل به زمین قابل استفاده است.
- انواع مختلفی از مفاصل مستقیم با ولتاژ زیاد و خیلی زیاد موجود هستند:
- مفاصل نواری؛
- مفاصل متوالی؛
- مفاصل میدانی پرسی؛
- مفاصل پیش‌ساخته.
- هرکدام از این انواع مختلف، در جاهای دیگر جهان تا سطوح ۴۰۰ یا  $500kV$  بیشتر توسعه یافته‌اند.
- با این حال، امروزه درک شده است که مفاصل نواری با بیشترین ولتاژها سازگاری ندارند و در نتیجه می‌توان گفت که برای مسئله‌ی بندکشی کابل‌های  $VHV$  سه دسته پاسخ وجود دارد:
- مفاصل متوالی؛
- مفاصل میدانی پرسی؛
- مفاصل پیش‌ساخته.

### ۱۵-۳-۳-۲-۱ مفاصل متوالی

این نوع از مفاصل با استفاده از دو پایانه‌ی GIS با یا بدون عایق ساخته شده است که در برابر هم در انتها و در قالب فلزی قرار گرفته‌اند.

سه متغیر وجود دارد که باید تشخیص داده شوند:

(a) متوالی با دو عایق، از دو پایانه‌ی GIS با عایق‌هایی ساخته شده است. این نوع مفصل در کابل‌های  $400kV$  واحدهای کمکی نیروگاه‌های هسته‌ای فرانسه به کار می‌رود؛

(b) متوالی با یک عایق، از یک پایانه‌ی GIS با یک عایق و یک پایانه‌ی مستقیم GIS مستغرق ساخته شده است؛

(c) متوالی بودن عایق، از دو پایانه‌ی مستقیم GIS مستغرق ساخته شده است.

مفاصل از این نوع به دلیل اینکه به کنترل فشار نیاز دارند و قابل دفن شوند، باید برای کاربردهای مشخصی، برای مثال، مفاصل گذار (عایق‌های مختلف، بخش‌های مختلف و غیره) اختصاص داده شوند. احتمال اینکه از آن‌ها برای کابل‌های زیر آبی استفاده شود بسیار کم است و در موارد استثنایی در صفحه‌ی مشترک سیستم کابل زمینی برای بیشترین ولتاژها به کار می‌روند.

### ۱۵-۳-۳-۲-۲ مفاصل میدانی پرسی

این مفاصل به‌ویژه با اتصالات سیستم‌های کابل زیر آبی مشخص، مخصوصاً در کارخانه‌ی بندکشی به خوبی سازگار هستند. در مفاصل پرسی، ایجاد تأسیسات و جداره‌ها دوباره در سایت (کارخانه، کشتی) انجام می‌شود: ذوب، شکل دادن و احتمالاً شبکه‌زنی (اتصال عرضی)

انواع مختلف مفاصل میدانی پرسی به لحاظ روند مورد استفاده برای ایجاد دوباره‌ی عایق از هم متفاوت هستند.

#### (a) پرسی نواری

نوارهای الاستومری یا پلیمری بر روی کابل‌های آماده و متصل پیچیده می‌شوند. در اطراف این عایق دوباره ساخته‌شده، یک قالب گرمادیده قرار داده می‌شود؛ به لطف اثر ترکیبی دما کار شکل‌دهی انجام می‌شود، زیرا باعث می‌شود تا نوارها ذوب شوند و انبساط حرارتی آن‌ها باعث تولید فشار می‌شود. بطور کلی جداره‌های داخلی و خارجی در عملیات‌های مجزا ساخته می‌شوند.



*(b)* پرسی نواری شبکه‌دار

مشابه بالا اما با یک فاز اضافی پس از شکل‌دهی، در دمای بیشتر عنصر شیمیایی موجود در نوار فعال می‌شود و در نتیجه باعث تولید شبکه در عایق می‌شود. فشار خارجی (هیدرولیکی، پنوماتیکی یا مکانیکی) برای جلوگیری از شکل‌گیری حفره‌ها اعمال می‌شود.

*(c)* پرسی اکستروودی (برجسته)

کابل‌های آماده و متصل در قالب قرار داده می‌شوند. از یک اکسترودر برای تزریق ماده‌ی عایق به داخل قالب استفاده می‌شود. سپس عایق تحت فشار خنک می‌شود تا عایق بدون حباب‌های هوا حاصل شده و به عایق کابل متصل گردد.

*(d)* پرسی اکستروودی شبکه‌دار

همان‌طور که در شکل ۱۵-۱۱ نشان داده شده است با یک فاز اضافی پس از شکل‌دهی در دمای بیشتر عامل عرضی (شبکه‌ای) ماده‌ی عایق فعال می‌شود. فشار خارجی برای جلوگیری از شکل‌گیری حفره‌ها اعمال می‌شود.

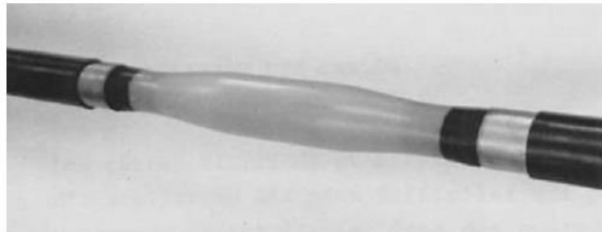


شکل ۱۵-۱۱ مفصل پرسی اکستروودی شبکه‌دار برای کابل زیر آبی

*(e)* پرسی تزریقی

مشابه کابل‌های پرسی اکستروودی می‌باشند اما ماده‌ی عایق در یک استوانه گرم دیده و ذوب می‌گردد؛ سپس با استفاده از پیستونی یا به صورت مستقیم با اعمال فشار مایع یا گاز به قالب تزریق می‌شود.

از حدود ۱۵۰۰ مفصل از این نوع در شبکه‌ی برق فرانسه تا  $225kV$  استفاده می‌شود.



شکل ۱۵-۱۲ مفصل LDPE پرسی ۲۲۵ kV

#### f) پرسی تزریقی شبکه‌دار

همانند بالا است اما پس از شکل‌دهی در دمای بیشتر برای فعال‌سازی عامل عرضی ماده‌ی عایق یک فاز اضافی دارد. فشار اضافی برای جلوگیری از شکل‌گیری حفره‌ها اعمال می‌گردد.

#### g) پرسی بلوکی

عایق به شکل دو نیمه‌ی مفصلی جدا از طول پرس شده است. این دو بلوک در اطراف کابل‌های آماده و متصل قرار داده می‌شوند؛ جوش میان بلوک‌ها و کابل توسط محفظه‌ی گرم انجام می‌شود.

#### h) پرسی سیاه شبکه‌دار

همانند بالا است اما یک فاز اضافی پس از شکل‌دهی در دمای زیاد، عامل شیمیایی ماده‌ی عایق را فعال می‌کند. فشار خارجی برای جلوگیری از شکل‌گیری حفره‌ها اعمال می‌گردد.

انواع مختلفی از مفاصل که در بالا توصیف شدند ممکن است در کابل‌های دریایی به کار گرفته شوند.

راه‌اندازی مفاصل پرسی علی‌رغم داشتن مزیت قطر عملی برابر با کابل که یک نکته‌ی ارزشمند غیرقابل انکار برای اتصالات زیرآبی در دریا یا رودخانه‌ها است، دشوار بوده و گاهی اوقات این عملیات زمان زیادی طول می‌کشد (چندین هفته) و این با تأخیر زمانی برای تعمیر مورد نیاز در مورد خرابی به هیچ وجه سازگار نیست، اما برای کارخانه‌ی بندکشی یک پاسخ است. می‌توان مفاصل پرسی تا  $500\text{ kVAC}$  یافت [FUK 99].

برای کنترل کیفیت تولید چنین مفاصلی باید بسیار دقت شود (اشعه‌های  $X$ ، آزمایش مستقل تخلیه‌ی جزئی و غیره).

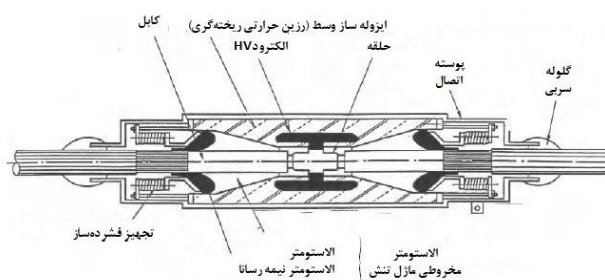
در طول چرخه‌ی عمر سیستم کابل زیر آبی این احتمال وجود دارد که پیرو برخی آسیب‌های مکانیکی، به سرعت به انجام تعمیر نیاز شود. برای انجام این عملیات‌های تعمیری، مناسب‌ترین مفاصل، مفاصل پیش‌ساخته می‌باشند که در زیر مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۱۵-۳-۲-۳ مفصل پیش‌ساخته

در یک مفصل پیش‌ساخته، بدنه‌ی عایق، یعنی ایجاد دوباره‌ی عایق در کارخانه انجام می‌شود و مورد آزمایش قرار می‌گیرد. روش‌های معمولی تولید، قالب‌گیری الاستومرها و "ریختن" رزین-های ترموستی می‌باشد. ما می‌توانیم میان مفاصل کامپوزیتی و مفاصل پرسی در یک، دو یا سه قطعه تمایز قائل شویم.

### مفصل کامپوزیتی پیش‌ساخته

دو مخروط تنش الاستومری که از قبل در کارخانه شکل یافته‌اند، در داخل بدنه‌ی عایق ساخته‌شده از رزین اپوکسی قرار داده می‌شود. با استفاده از سیستم تراکمی که معمولاً شامل فنرهای فلزی می‌شود، فشار صفحه‌ی مشترک میان مخروط‌های تنش و بدنه‌ی عایق و میان مخروط‌های تنش و کابل ثابت نگه داشته می‌شود.

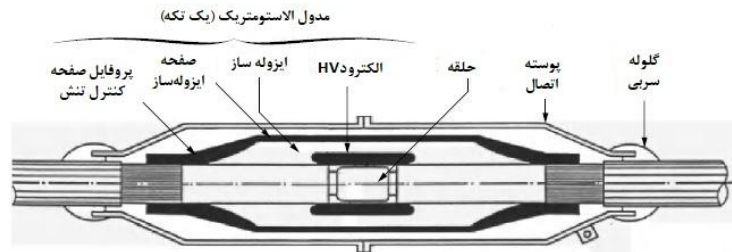


شکل ۱۵-۱۳ مفصل کامپوزیتی پیش‌ساخته

### مفصل پرسی یک تکه‌ای

یک روکش الاستومری که از قبل در کارخانه پرسی و علاوه بر خود عایق، شامل الکتروود HV، جداره‌های برشی تنش و احتمالاً گسستگی در جداره است. بطور کلی، فشار مورد نیاز در صفحه‌ی مشترک با عایق کابل به لطف حافظه‌ی الاستیکی روکش حاصل می‌شود.

از این نوع مفصل در شبکه‌ی ۲۲۵kV فرانسه از اواخر ۱۹۸۰ استفاده شده است.



شکل ۱۴-۱۵ مفصل پرسی یک تکه‌ای

#### مفصل پرسی دو تکه‌ای

مفصل پرسی دو تکه‌ای بسیار مشابه نوع قبلی است، اما همان‌طور که از اسم آن برمی‌آید، عنصر عایق کاری به دو استوانه‌ی هم‌مرکز تقسیم شده است.

#### مفصل پرسی سه تکه‌ای

در این مفصل پرسی سه تکه‌ای، استوانه‌ی داخلی شامل دو "آداپتور" است که هرکدام در هر طرف رابط رسانا قرار گرفته‌اند. استوانه‌ی خارجی همانند مفصل "پرسی دو تکه‌ای" به سمت بالا کشیده می‌شود.

### ۴-۱۵ تولید کابل‌های زیر آبی

#### ۱-۴-۱۵ مقدمه

هرگاه که امکان‌پذیر باشد باید کابل‌های زیر آبی برای شبکه‌های زیر آبی به صورت یکپارچه منتقل شوند. در پروژه‌های زیر آبی بسیار بزرگ، امروزه شناورهای حمل کابل طوری مجهز شده‌اند که بتوانند بخش‌های کابل به وزن حدود ۷۰۰۰ تن را تحمل کنند [EVE 09].

رابط‌های نزدیک کابل‌ها که هدف این خطوط می‌باشند، بطور کلی کوتاه‌تر هستند و در نتیجه شناورهای حمل کابل نیز کوچک‌تر می‌باشند. آن‌ها به چند هزار تن محدود شده‌اند. امروزه، امکان تولید بخشی از کابل اکستروژده شده از کار اکستروژن بسیار کم است. بنابراین، طول نهایی کابل باید به احتمال زیاد از بخش‌های متصل بصورت سری و با استفاده از مفاصل ساخت-کارخانه در یک یا چند مرحله از تولید ساخته شود: در پایان در انتهای کار اکستروژن و اگر اینطور نباشد، هنگامی که در هر عملیات میانی به حد ذخیره‌سازی برسیم.



شکل ۱۵-۱۵ شناور حمل کابل زیر آبی

در حقیقت، محدودیت میانی غیرقابل اجتناب کابل‌های اکستروژده شده از مقدار مواد عایق ناشی می‌شود که می‌توان بدون در خطر قرار دادن کابل در هنگام فعالیت اکستروژن، اکستروژد کرد. می‌توان حدود ۱۰۰ تن از ماده‌ی عایق اکستروژده شده را به‌عنوان نقطه‌ی مرجع مناسب در هر فعالیت در نظر گرفت. اگر این امکان وجود داشته باشد که طول مربوطه‌ی کابل عایق‌شده را ذخیره کرد، بهتر است که طول رسانای مورد نیاز فعالیت اکستروژن را با اتصالات متوالی رسانا تولید کرد.

یکی از مهمترین عملیات‌ها در چرخه‌ی تولید-انتقال-قرار دادن کابل‌های زیر آبی، ذخیره‌سازی است. ما با این ذخیره‌سازی در قرقه‌ها آشنا هستیم و آگاه می‌باشیم که این کار برای کابل‌های HV به چند کیلومتر و برای کابل‌های MV به ده‌ها کیلومتر محدود شده است.

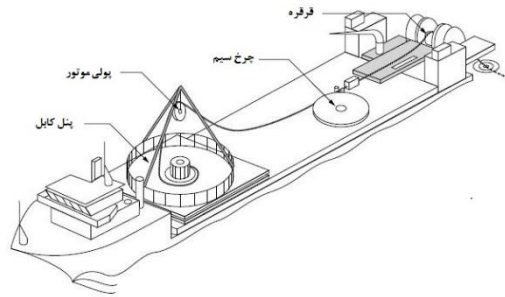
یک روش ذخیره‌سازی طول بیشتر کابل، استفاده از روش مارپیچ در صفحه، سید یا تانکر مارپیچ است. بطور کلی در این روش، کابل به شناور حامل منتقل خواهد شد که در آن عملیات معکوس در هنگام قرار دادن کابل در سایت انجام خواهد شد.

برای ذخیره‌سازی، کابل از سر مارپیچ واقع در بالای منطقه‌ی ذخیره‌سازی قرار داده می‌شود. هر دور این سر به چرخش  $360^{\circ}$  کابل حول محور خود مربوط می‌شود.

این موضوع باید در مرحله‌ی طراحی در نظر گرفته شود که شامل قطر حداقل برای چرخش است و ۶۰ برابر قطر کابل برآورد می‌شود.

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۶۱

در مرحله‌ی نهایی نمی‌توان کابل‌های دو زرهی معکوس را پیچاند. کابل‌های تک‌زرهی و دو زرهی تک‌جهته طوری پیچانده می‌شوند که زره در هنگام عملیات در حال باز شدن باشد. برای مثال، کابل زره‌دار در طرح K باید در جهت ساعتگرد پیچانده شود.



شکل ۱۵-۱۶ نمایش نموداری شناور حمل کابل



شکل ۱۵-۱۷ کارخانه‌ی معمولی کابل زیر آبی

بطور خلاصه، تأسیساتی که کابل‌های زیر آبی تولید می‌کنند باید در نزدیکی دریا قرار گیرند. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۱۵-۱۸ نشان داده شده است، کابل از مکان نهایی خود در انبار کارخانه به شناور حمل کابل منتقل می‌شود.



شکل ۱۵-۱۸ نمونه‌ی متداول از تأسیساتی که در آن کابل‌های زیر آبی ساخته می‌شود

### ۱۵-۴-۲ رسانا

در کارخانه‌های مشخصی این امکان وجود دارد که بخش‌هایی از رسانا به طول ۲۰ تا ۳۰ km را تولید کرد. معمولاً چند کیلومتر از رسانا بصورت کابل درمی‌آید و کنار هم قرار داده می‌شوند و سپس بر روی قرقه‌هایی جمع می‌شوند. آن‌ها باید قبل یا در هنگام عملیات توسط جوش یا لحیم به هم متصل شوند، درحالی‌که قطر رسانا ثابت نگه داشته می‌شود.

این عملیات‌ها بسیار پیچیده می‌باشند، زیرا عملکرد مکانیکی رسانا باید حفظ شود، به ویژه اگر جوش در هنگام عملیات قرار دادن کابل انجام شود.

رساناهای با سطح مقطع کوچک می‌توانند جامد باشند، اما بطور کلی بصورت "کابل" در می‌آیند و به شکل کلاف با لایه‌های هم‌مرکز و گاهی اوقات "مجزا"، متشکل از بخش‌های مونتاژی، ظاهر می‌شوند.

ماشین‌های مورد استفاده برای تولید کلاف‌ها عبارتند از ماشین‌های سیم‌کش که سیم مورد استفاده را "مدرج می‌کنند"، ماشین‌های کلاف‌پیچ که هسته‌های هم‌مرکز و بخش‌های محتمل را تولید می‌کنند و ماشین‌های مونتاژ (یا ماشین‌های لایه‌گذاری).

در عملیات انجام‌شده بر روی ماشین‌های کلاف‌پیچ و جمع‌آوری از فرآیندهای به اصطلاح "ناپیوسته" استفاده می‌کنند که ممکن است متوقف و دوباره شروع شوند.



شکل ۱۵-۱۹ تولید بخشی (سپکتور) از هسته‌ی مجزا



شکل ۱۵-۲۰ مونتاژ یک بخش برای تولید رسانای مجزا

ممکن است از مس یا آلومینیوم استفاده شود. هزینه‌های مواد خام در طول چند سال گذشته به شدت دچار نوسان بوده است و برای هر مورد خاص به تحلیل فنی-اقتصادی نیاز است.

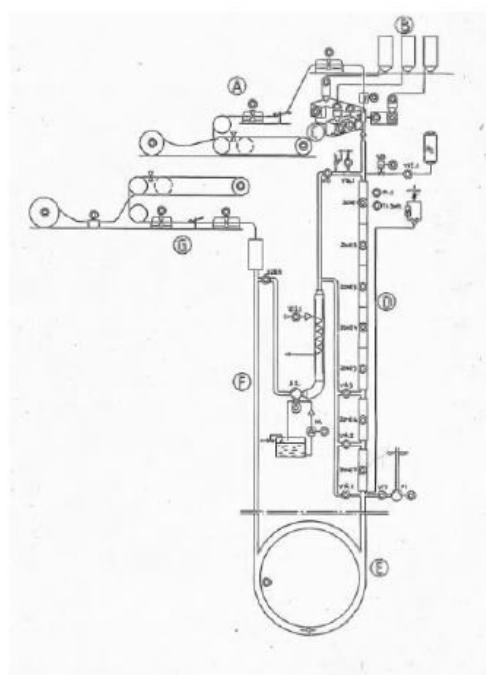
در بیشتر موارد، رسانا به عنوان "بلوک" (طولی) مشخص می‌گردد تا در صورت وقوع حادثه، انتشار آب در کابل محدود شود.

می‌توان برای سد کردن آب طولی از رشته‌های متورم یا نوارهایی با عمق نسبتاً کوچک یا از ژله‌ها یا خمیرهایی استفاده کرد که در هنگام تولید کلاف، لایه به لایه قرار داده شده و باعث دشوار شدن عملیات اتصال می‌گردند.



## ۱۵-۴-۳ عایق کاری

برخلاف عملیات‌های قبلی، عایق کاری کابل با استفاده از اکستروژن یک فرآیند کاملاً پیوسته است و قابل قطع شدن نمی‌باشد. در شکل ۱۵-۲۱ نموداری از خط اکستروژن عمودی نشان داده شده است. در کارخانه‌های پیشرفته، سه لایه (نیمه‌هادی داخلی، عایق، نیمه‌هادی خارجی) با استفاده از سه گانه‌ی اکستروژن بصورت هم‌زمان به یک کلاف اکستروژن می‌شوند (C).



شکل ۱۵-۲۱ نمودار خط اکستروژن عمودی در شفت

چند صد کیلو عایق در هر ساعت اکستروژن می‌گردند. همان‌طور که در بالا توصیف شد، کلاف‌ها به هم متصل می‌شوند. اگر طول کلی رسانا از قبل جمع نشود، اتصالات هم‌زمان با عملیات اکستروژن ساخته خواهند شد و انباشت‌گر کلاف باعث می‌شود تا این اتصالات بدون وقفه در عملیات عایق کاری ساخته شوند (A).

بهترین خطوط عایق کاری، خطوط عمودی یا زنجیری هستند. در لحظه‌ای که مواد خام دریافت شوند، به اکسترودرها خورانده شوند (B)، هنگامی که مواد اکستروژن شده فیلتر شوند به یک

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۶۵

برنامه‌ی کنترل کیفی دقیق نیاز است و دماها به منظور تضمین سطح کیفی مورد نیاز کنترل می‌شوند (D).



شکل ۱۵-۲۲ مجموعه‌ی اکسترودرها برای تولید کابل‌هایی تا  $500\text{ kV}$

### ۱۵-۴-۴ استفاده از جداره فلزی

همان‌طور که ما در بالا مشاهده کردیم، جداره‌ی فلزی ممکن است چندین شکل داشته باشد و اگر جداره از نوع کامپوزیتی باشد، ممکن است طی عملیات در جای خود قرار داده شود.

پرباربردترین روش، اکستروود پوشش (غلاف) سربی، به ویژه برای کابل‌های ساکن است. به کارگیری سرب به شدت جرم خطی کابل تک‌هسته‌ای را افزایش می‌دهد.

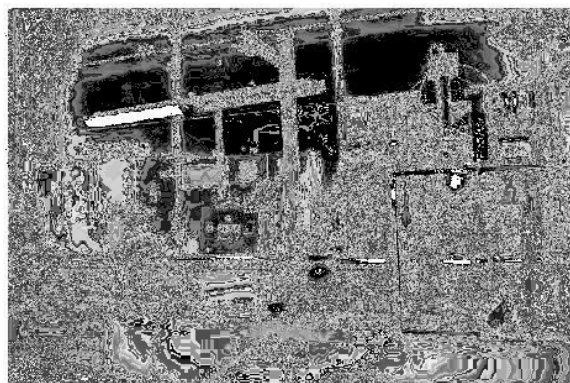
فرآیندهای پیشرفته باعث می‌شوند تا ما به ده‌ها کیلومتر کابل پیوسته با پوشش سربی دست پیدا کنیم.



شکل ۱۵-۲۳ روکش‌کاری سربی

### ۱۵-۴-۵ روش کاری

عملیات روش کاری با قرار دادن جداری فلزی همراه می‌گردد. در مورد کابل‌های تک‌هسته‌ای، این کار باعث می‌شود تا ما ده‌ها کیلومتر از کابل را بدون هیچ مفصلی تولید کنیم.



شکل ۱۵-۲۴ قرار دادن جداری آلومینیومی با جوشکاری لیزری

### ۱۵-۴-۶ مونتاژ یا لایه‌گذاری

سه فاز کابل سه‌هسته‌ای زیر آبی باید قبل از پوشاندن زره، مونتاژ گردند. این عملیات بر روی ماشینی به نام خط مونتاژ یا ماشین لایه‌گذاری انجام می‌شود.

برای اسمی‌های به اصطلاح مارپیچی، مونتاژکننده‌های عمودی و افقی وجود دارد.

برای کابل‌های سه‌هسته‌ای بسیار طویل، مونتاژکننده‌ی عمودی به ما این امکان را می‌دهد تا کابل‌های تک‌هسته‌ای به طول ده‌ها کیلومتر را برداریم و بر روی قرقره‌ها یا سبدها یا مخازنی در سکوی چرخان ذخیره کنیم. نقطه‌ی برخورد کابل‌ها (ماتریس جمع‌آوری) ثابت بوده و بر روی محور دوران سکوی چرخان در بالای سبدها واقع شده است. این سه کابل از نخریس عبور می‌کنند و کابل مونتاژشده قبل از دریافت و ذخیره‌سازی بر روی میز گردان از روی چرخ تراش عبور می‌کند.

برای کابل‌های سه‌هسته‌ای کوتاه‌تر از مونتاژکننده‌ی افقی استفاده می‌شود تا سه فاز دریافتی روی قرقره‌های (دهنده‌ها)<sup>۱</sup> نصب‌شده بر روی روتور ماشین مونتاژ گردند.

<sup>۱</sup>Givers

## فصل پانزدهم: کابل‌های دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوری‌های فراساحلی ۶۶۷

کابل‌های مونتاژشده در سبد یا میز گردان ذخیره می‌شوند. مفاصل ساخت کارخانه که بر روی سه فاز ساخته شده‌اند، هنگامی که قرقه‌ها خالی باشند به ما اجازه می‌دهند تا طول زیادی از کابل سه‌هسته‌ای مونتاژی را قبل از زره‌گذاری دریافت کنیم.



شکل ۱۵-۲۵ ماشین لایه‌گذاری عمودی به همراه قرقه‌های خود



شکل ۱۵-۲۶ کابل سه‌هسته‌ای  $90\text{ kV}$

کابل‌کشی یا اسمبلی SZ شامل مونتاژ عناصر مارپیچی شکل به واسطه‌ی معکوس کردن منظم جهت چرخش آن‌ها (به طور همزمان برای تمامی عناصر مونتاژشده) می‌شود. این اسمبلی به سبب ساختار خود ناپایدار است و باید عملیات چسباندن همراه شود.

از روش اسمبلی SZ به طور فزاینده‌ای استفاده می‌شود تا بر محدودیت‌های ناشی از عملکرد "گیرنده‌های چرخان" یا عناصر دیگر غلبه شود. کابل نشان داده شده در شکل ۱۵-۲۶ (کابل  $3 \times 240 \text{ mm}^2$  آلومینیومی  $90 \text{ kV}$ ) توسط اسمبلی  $SZ[LEP 95]$  کابل‌های عایق LDPE ساخته شده است.

### ۱۵-۴-۷ زره گذاری

عملیات زره گذاری در تولید کابل زیر آبی بسیار مهم است.



شکل ۱۵-۲۷ ماشین قدیمی زره گذاری

اصول کاری ماشین‌های زره گذاری بسیاری قدیمی است: یک قفسه‌ی چرخان سیم‌های روی قرقره‌ی پر را در قفسه‌ی اطراف کابل به شکل مارپیچ قرار می‌دهد. ماشین زره گذاری ممکن است شامل چندین قفسه‌ی چرخان باشد.

سرعت کشیدن کابل و سرعت چرخش قفسه‌ها با دشواری زیاد هماهنگ شده و مورد نظارت قرار می‌گیرند تا با سرعت مطلوب و به صورت منظم قرار داده شوند.

می‌توان با استفاده از دو ماشین زره گذاری متوالی به دو لایه از زره دست پیدا کرد.

در هنگام انجام همین عملیات تولید مشابه، طناب‌های آغشته به قیر قرار داده می‌شوند که مانع خوردگی زره خواهند شد.

### ۱۵-۴-۸ آزمایش روال<sup>۱</sup>

آزمایش روال یک عملیات تولید است. در بخش ۱۵-۶-۴ تا جایی که این آزمایش‌ها توسط استاندارد بین‌المللی توصیف شده‌اند، بررسی خواهند شد.

<sup>1</sup>Routine testing

## ۱۵-۵ قواعد کلی و ابزارهای طراحی کابل‌های زیر آبی

### ۱۵-۵-۱ طراحی الکتریکی

طراحی الکتریکی کابل زیر آبی شامل برخی از جنبه‌های مهم می‌شود:

انتخاب میدان‌های الکتریکی در رسانا و کل عایق. از جهت هزینه‌های ناشی از آسیب وارده بر کابل زیر آبی منطقی است که مقادیر متوسط برای میدان الکتریکی انتخاب شوند. برحسب ولتاژ و مقدار میدان الکتریکی انتخابی، استانداردهای بین‌المللی IEC آزمایش‌های تعیین‌شده و آزمایش‌های کیفیت‌سنجی اولیه را نشان می‌دهند.

طراحی جداری فلزی، با هدف حمل جریان اتصال کوتاه در هنگام وقوع آسیب. قوانین استاندارد طراحی در استاندارد بین‌المللی IEC60287 موجود می‌باشند.

### ۱۵-۵-۲ ظرفیت انتقال

طراحی نهایی کابل به اندازه‌ی رسانا و در نتیجه تعیین این بخش از کابل بستگی دارد تا ظرفیت انتقالی مورد نیاز در محیط کابل تضمین گردد.

محل قرارگیری دو پایانه‌ی اتصال به طور کلی محدودترین محیط است. بنابراین، ممکن است بخش زمینی کابل به سطح مقطع بیشتری برای رسانا نسبت به بخش کاملاً مستغرق نیاز خواهد داشت. در این شرایط، می‌توان از کابل متفاوتی برای بخش "واقع بر خشکی" استفاده کرد. دو کابل به وسیله‌ی مفصل مخصوص ("مفصل زمینی-آبی") به هم متصل می‌گردند. این گذار به طور کلی در محیط دریایی انجام می‌شود.

به طور مشابه، شرایط انتهای فراساحل نیز ممکن است برای تخلیه‌ی شار حرارتی نامناسب باشد، برای مثال در لوله‌هایی که کابل‌ها به داخل آن‌ها کشیده می‌شوند، هنگامی که از آن‌ها در تأسیسات فراساحل استفاده شود (*J-Tube*) که در آن دمای محیط از دمای آب بیشتر بوده و شرایط تخلیه‌ی شار حرارتی دشوار است. چنین به نظر می‌رسد که به واسطه‌ی فرمول‌های ارائه‌شده در استاندارد بین‌المللی IEC60287 برای کابل‌های سه‌هسته‌ای زره‌دار، تلفات ناشی از جریان‌های القایی در زره به نادرستی ارزیابی می‌شوند [BRE 10]. گروه کاری جدید CIGRE (WG B1.35) مسئول بررسی این نکته و مطرح کردن پیشنهاداتی برای IEC به منظور اصلاح فرمول‌ها است. گروه IEC و CIGRE در همکاری نزدیک با هم کار می‌کنند تا عناصر را به زودی وارد صنعت کنند که این امر باعث طراحی بهینه‌ی رابط زیر آبی و به ویژه آن‌هایی که حامل انرژی فراساحل هستند، می‌شود.

در نبود مدل‌سازی موثرتر، برای محاسبه‌ی دقیق ظرفیت انتقال به استفاده از روش‌های ریاضی همچون مدل‌سازی المان محدود نیاز است.

این کار شامل نمایش بسیار خوب هندسه، مش دقیق، دانش عالی از مشخصات فیزیکی مولفه‌ها در شرایط عملیاتی خود و ترکیب مدول‌های مختلف محاسبات (حرارتی، الکترومغناطیسی و غیره) می‌شود. با مقایسه‌ی نتایج محاسبات با نتایج آزمایشگاهی می‌توان پارامترها را دوباره تنظیم کرد.

مثال شکل ۱۵-۲۹ مش کابل سه قطبی را نشان می‌دهد.

کابل نشان داده‌شده در شکل‌های ۱۵-۲۸ و ۱۵-۲۹ موضوع مدل‌سازی المان محدود بوده است تا ظرفیت‌های انتقال مشخص‌شده توسط مدل‌سازی و ظرفیت‌های انتقال اندازه‌گیری‌شده در پیکربندی‌های مختلف با هم مقایسه شوند.

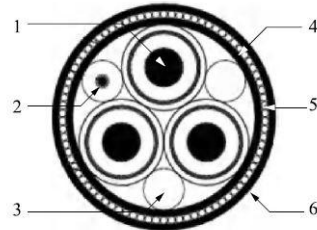
شبیه‌سازی‌هایی به ازای شدت‌های مختلف ( $200 A$ ،  $300 A$ ،  $400 A$ ) با پیکربندی‌های مختلفی انجام شده است:

- کابل در فضای باز؛

- کابل در استخر پر از آب؛

- در رژیم‌های پایا و گذرا.

از مدل‌های مختلف برنامه‌ی *Flux* دو بعدی برای این مدل‌ها استفاده شده است.

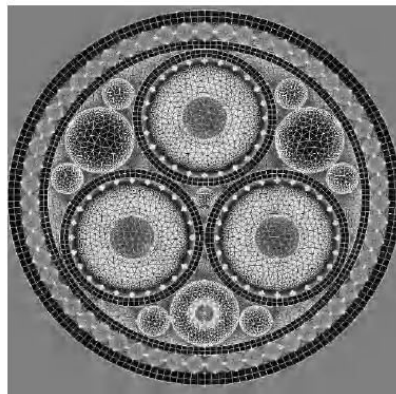


مشخصات کابل	
1	هسته‌های قدرت 18/30(36) kV 120 mm <sup>2</sup> رسانای مسی ایزوله ساز XLPE سیم با سطح مسی پوسته با سطح کامپوزیتی (آلومینیوم / ژاکت PE و نوار کوبلیمر)
2	المنت‌های فیبر نوری 48 SMF در لوله‌های مسی با ژاکت و محافظ استیل سیم
3	پرکننده‌ها (پرکننده‌های کوچکتر در شکل نمایش داده نشده‌اند)
4	لایه بستر
5	یک لایه از سیم استیل گالوانیزه (معمولاً ۰.۵x۵۷ میلی‌متر)
6	روکش نخی

شکل ۱۵-۲۸ کابل سه‌هسته‌ای زیر آبی 18/30kV (۳۶) 120 mm<sup>2</sup>

نتایج محاسبات با نتایج آزمایش به اندازه‌ی چند درصد اختلاف دارند و برای در نظرگیری گام اسمبلی و لایه‌ی زره کابل سه‌هسته‌ای اصلاحاتی در حال انجام است.

روش مشابهی در گزارش ارائه‌شده به جلسه‌ی مذکور CIGRE ۲۰۱۰ اثبات شده است [BRE 10]. کار CIGRE WG B1.35 باعث خواهد شد تا گام‌هایی به سمت مدل‌سازی بهتر و بهینه‌سازی هزینه‌ی سیستم‌های کابل سه‌هسته‌ای زیر آبی برداشته شود.





اطلاعات ساختاری			
ماده	ضخامت نامی	قطر نامی	
		41 mm	کابل تک هسته 120 mm <sup>2</sup>
		19,5 mm	فیبر نوری 1 x شکاف بزرگ
مس	0,60 mm	5,05 mm	لوله چغرمه
استیل 12 x galv.	1,7 mm	8,45 mm	محافظ دار
HDPE	5,5 mm	19,5 mm	زاکت
			پرکننده 2 x شکاف بزرگ
		4 mm	
پلی پروپیلن		19,5 mm	پوسته
LDPE	7,75 mm		پرکننده 6 x شکاف کوچک
		4 mm	نتی
پلی پروپیلن		8,5 mm	پوسته
LDPE	2,25 mm		
		86 mm	باقته شده
		91 mm	نتی
	2,5 mm		(3 mm) پلی پروپیلن
		101 mm	محافظ دار
	5 mm		استیل 55 x galv.
		108 mm	نتی
	3,5 mm		(4 mm) پلی پروپیلن

شکل ۱۵-۲۹ مشخصات هندسه‌ی کابل زیر آبی ارائه شده در شکل ۱۵-۲۸

### ۱۵-۵-۳ مشخصات فیزیکی مواد مورد استفاده

رسانای مس و سیم‌های مسی جداره [WOR 09]

مقاومت الکتریکی:

$$R(T) = R0(1 + a(T - T0))$$

$$R0 = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \cdot a = 3.93 \times 10^{-3} / ^\circ C \quad \text{at} \quad T = T0 = 20 ^\circ C$$

مقاومت حرارتی:  $2.7 \times 10^{-3} K \cdot m / W$  (تغییر کم دما)

عایق XLPE (XLPE)

مقاومت حرارتی:  $2.53 K \cdot m / W$  [BAR 00]

ثابت دی‌الکتریک: ۲.۵

زاویه‌ی مماس اتلاف: ۰.۰۰۱

آب‌بند ورقه آلومینیومی چسبانده شده در فصل مشترک و چسبانده شده به پوشش [WOR 09]

مقاومت الکتریکی:



$$R(T) = R0(1 + a(T - T0))$$

$$R0 = 2.82 \times 10^{-8} \Omega.m a = 4.03 \times 10^{-3} / ^\circ C \quad \text{at} \quad T = T0 = 20^\circ C$$

مقاومت حرارتی:  $4.05 \times 10^{-3} K.m / W$  (تغییر کم دما)

پوشش خارجی

ماده: PE

مقاومت حرارتی:  $3 K.m / W$  [MOO 04]

طناب‌ها: PP

مقاومت حرارتی:  $3.7 K.m / W$  در زمستان [COL 10]

مقاومت حرارتی:  $6 K.m / W$  در هوا [WOR 09]

ماده‌ی پرکننده

ماده: PE [MOO 04]

مقاومت حرارتی:  $2.98 K.m / W$

زره‌های سیمی

ضریب دی‌الکتریک نسبی: ۳۰۰

مقاومت حرارتی:  $0.02 K.m / W$  [WOR09]

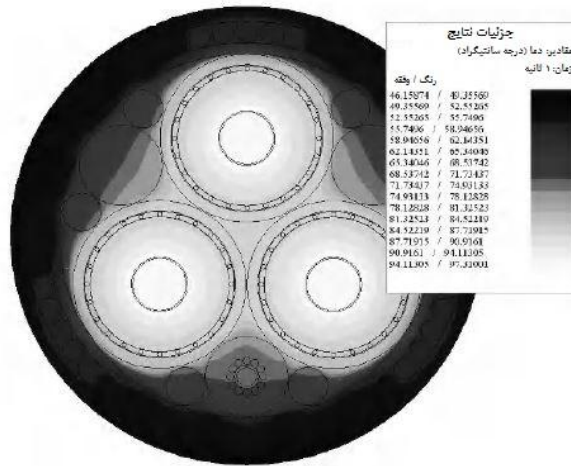
آب

مقاومت حرارتی:  $1.67 K.m / W$  [WOR09]

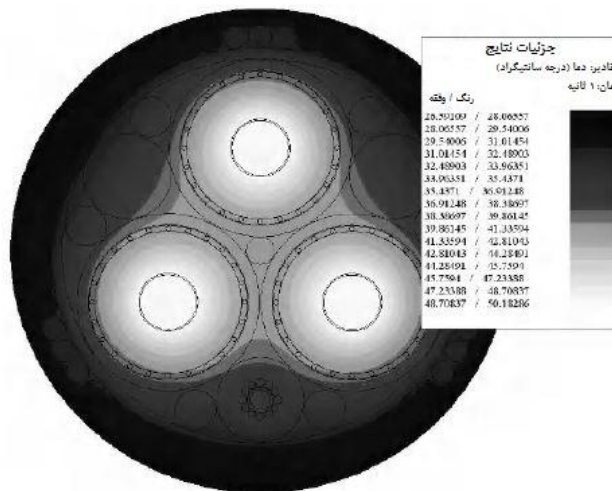
هوا

مقاومت حرارتی:  $40 K.m / W$  [WOR09]

در شکل‌های ۱۵-۳۰ و ۱۵-۳۱ نتایج مدل‌سازی المان محدود گرمایش کابل در هوا و در آب به ازای ظرفیت آمپر  $400 A$  نشان داده شده است.



شکل ۱۵-۳۰ مقادیر Iso دما: کابل در هوا با ۴۰۰ A (برای مشاهده‌ی ورژن رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www. iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)



شکل ۱۵-۳۱ مقادیر Iso دما: کابل در آب با ۴۰۰ A (برای مشاهده‌ی ورژن رنگی این تصویر لطفاً به سایت [www. iste.co.uk/multon/marine.zip/](http://www.iste.co.uk/multon/marine.zip/) مراجعه نمایید)

### ۱۵-۵-۴ زره

همان طور که در بالا مشخص گردید، ممکن است برحسب تنشهای وارد بر کابل، انواع مختلفی زره وجود داشته باشد.

(a) زره کابل تک هسته‌ای برای آب کم عمق

کابل در مورد آب کم عمق (کمتر از  $300m$ ) دارای یک لایه زره، یعنی لایه‌ی حول سیم‌های نیمه تخت با پایه‌ی فولاد است. می‌توان این لایه را برحسب عمق و میزان حفاظت به یک لایه-ی زیرین نواری مبتنی بر فولاد متصل کرد و در جهت مخالف به شکل کابل درآورد.

کارکرد اصلی زره، حفاظت از کابل در برابر آسیب خارجی و طبیعت نامنظم بستر دریا است:

- حفاظت در برابر ادوات ماهیگیری و لنگرهای کشتی‌ها؛

- حفاظت در برابر فروپاشی زیر آب؛

- حفاظت در برابر فرورفتگی و کاهش نیروهای برشی.

اغلب باید محافظ کابل تقویت شود و ضروری است که در زیر خاک دفن گردد. این عملیات باعث ایجاد تنش‌های جدید در کابل می‌شود، مثلاً هنگامی که از ماشین عبور کند دچار خمش می‌گردد، نیروهای جانبی عمده برای هدایت آن و پیچش خاص هنگامی که از ماشین به بستر گودال منتقل می‌شود.

(b) زره کابل تک هسته‌ای تقویت شده در آب عمیق

کابل در آب عمیق دارای دو لایه زره است، یعنی دو لایه‌ی گرد یا سیم‌های نیمه تخت مبتنی بر فولاد، یکی در جهت  $K$ ، به صورت کابل و دیگری در جهت  $Z$  که به شکل کابل در می‌آید (گام در چپ یا راست). می‌توان این دو لایه را به دو لایه‌ی نواری مبتنی بر فولاد متصل کرد.

کارکرد این دو زره، کنترل افزایش طول رسانا و به ویژه برای محدود کردن افزایش طول در هر دو جهت جوش رسانا در سطح مفصل است.

ممکن است نیروهای وارد بر کابل در هنگام عملیات قرار دادن و خارج‌سازی به ویژه (در خارج-سازی) به دلیل پدیده‌ی مکش کابل‌های دفن شده در اعماق بیشتر از  $200m$  به شدت زیاد شوند.

(c) زره کابل تک هسته‌ای در بستر نامنظم

نواحی به نام افت اغلب بیانگر شیب‌های تند، گاهی اوقات صخره‌ها و موانع بسته هستند که ممکن است باعث خرابی کابل‌ها شوند. بنابراین، طول عمر رابط زیر آبی به مقاومت مکانیکی کابل‌ها در رابطه با سایش، نیروهای برشی، انحنای تکیه‌گاه و ارتعاشات ناشی از امواج اقیانوسی مرتبط است.

در نتیجه نقش زره بهبود مقاومت مکانیکی کابل با افزایش صلبیت آن است. کارکرد چنین زرهی پیچیده است. در پاراگراف‌های زیر به کابل تک‌هسته‌ای تک‌زرهی و به ویژه به مدل‌سازی یک لایه‌ی زره از نظر کنترل افزایش طول رسانا پرداخته می‌شود. زره مضاعف، لایه‌ی زیرین پیوندهای مبتنی بر فولاد، مقاومت در برابر هجوم خارجی و موضوعات دیگر همچون رفتار کابل در بستر دریا در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرند. کارهای خاصی در دسترس است که با جزئیات دقیق به این موضوعات می‌پردازند و می‌توان به آن‌ها رجوع کرد.

یک زره از لایه‌ی دوار یا سیم‌های فولادی نیمه تخت ساخته شده است که روی هسته‌ی کابل زره‌دار قرار می‌گیرد. هسته‌ی کابل زره‌دار از مولفه‌های کابل زره‌دار، یعنی رسانا، سیستم عایق-کاری، جداره‌ی سربی، پوشش خارجی، لایه‌ی روی پوشش، احتمالاً لایه‌ای از نوارهای فولادی (همچنین به نام سیم‌های ضد پیچش) و لایه‌ی واقع بر نوارهای فولادی ساخته شده است.

ویژگی‌های خاص کابل‌های سه‌هسته‌ای با جزئیات در گزارش *BI-110* در جلسه‌ی ۲۰۰۶ *CIGRE* ارائه شده‌اند [*KAR 06*].

## ۱۵-۶ آزمایش‌های کابل‌های زیر آبی

آزمایش‌های کابل زیر آبی *AC* به ازای ولتاژهای مابین  $30kV$  تا  $500kV$  در حال انجام توسط گروه کاری *CIGRE* هستند (*WG B1.27*) و کار آن‌ها تا اواخر ۲۰۱۱ تکمیل و منتشر خواهد شد. ارائه‌ی جلوتر نتایج این گروه کاری در این جا کمی دشوار است. با این حال، در بخش‌های زیر رئوس کلی این پیشنهادات ارائه می‌گردند.

### ۱۵-۶-۱ آزمایش توسعه

به طور کلی، نمی‌توان با پیشنهادات و استانداردها تمامی موارد محتمل را پوشش داد. به علاوه، انواع جدید کابل و وسایل جانبی آن همچنان باید در معرض آزمایش قرار گیرند تا طرح، به کارگیری مواد انتخابی، روند تولید، شرایط نصب و رفتار بلند مدت کابل‌ها تأیید شود.

برای مثال، عناصر مهمی که باید بررسی گردند، عبارتند از:

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۷۷

- تنش‌های مکانیکی خاص: ارتعاشات، جریان‌های اقیانوسی، شکل حول *J Tube* (لوله‌ی به شکل *J* که کابل‌ها وارد آن می‌شوند) در مورد سکوی فراساحل؛

- تنش‌های ناشی از فشار در تأسیسات واقع در آب‌های عمیق: آب‌بندی، تغییر شکل‌های محتمل؛

- وسایل تعلیق؛

- کارایی آب‌بندها در طول زمان؛

- باید تمامی فیبرهای نوری وارد در کابل در نظر گرفته شوند؛

- تحلیل حرارتی-مکانیکی در مورد حفاری افقی.

این لیست به هیچ وجه جامع نیست و به پروژه‌ی مورد بحث بستگی دارد و همچنین باید آزمایش‌های اضافی به عنوان بخشی از فرآیند تأیید پاسخ فنی اتخاذی برای پروژه‌ی خاص مورد بحث انجام شوند.

### ۱۵-۶-۲ آزمایش تأیید اولیه (پیش‌تأیید)

هدف از آزمایش‌های پیش‌تأیید، اثبات ظرفیت تولیدکننده در تولید تجهیزات است. این آزمایش‌ها تنها باید یکبار انجام شوند. در آزمایش‌های پیش‌تأیید کابل‌های زیر آبی، آزمایش‌های پیش‌تأیید کابل‌های روی خشکی توصیف‌شده توسط استانداردهای *IEC60840* و *62067* و همچنین پیشنهادات گروه کاری *CIGRE B1.06* در نظر گرفته خواهند شد [*CIG 06a*, *CIG 06b*].

با این حال، برخی از ویژگی‌های خاص کابل زیر آبی مورد توجه می‌باشند:

- نیاز به مفصل "انعطاف‌پذیر"؛

- وجود زره؛

- طراحی مفاصل جفت که باید پوشش صلب داشته باشند؛

- طراحی رسانای کابل.

مراحل خاص آزمایش‌ها به منظور تأیید این نکات خاص ارائه خواهند شد.

### ۱۵-۶-۳ آزمایش نوع<sup>۱</sup>

هدف از آزمایش‌های نوع، تأیید عملکرد سیستم پیشنهادی برای کابل است. آن‌ها بر روی یک سیستم کامل انجام می‌شوند و شامل موارد زیر هستند:

- تأیید طراحی کابل؛
- آزمایش مکانیکی کل سیستم: کابل و مفصل ساخت کارخانه، مفصل یدکی؛
- آزمایش آب‌بندی طولی و شعاع کابل؛
- آزمایش الکتریکی کل سیستم (تخلیه‌ی جزئی، آزمایش ولتاژ، آزمایش تغییر ناگهانی برق)؛
- آزمایش غیرالکتریکی مواد.

### ۱۵-۶-۴ آزمایش روال

هدف از آزمایش‌های عادی، تأیید کیفیت قطعات تولیدی است (کابل‌ها و لوازم جانبی). عواقب خرابی کابل زیر آبی بسیار مشکل‌ساز تر از کابل‌های روی خشکی است، در آن مدت زمان عدم دسترسی بیشتر و هزینه‌های تعمیر بالاتر است و به طور کلی هیچ پاسخ فوری برای آن وجود ندارد. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد که در تولید کابل‌ها و لوازم جانبی اتصال دقت بسیاری شود.

نظارت لحظه‌ای در هر مرحله از تولید به محدود کردن میزان خرابی کمک خواهد کرد. این جنبه‌ها باید میان تأمین‌کننده و مشتری مورد بحث قرار گیرند.

برای کابل‌های AC به دلیل جریان خازنی ناشی از ظرفیت زیاد کابل‌ها نمی‌توان آزمایشی با فرکانس صنعتی  $50, 60\text{ Hz}$  انجام داد. بدین دلیل گستره‌ی بیشتری از فرکانس در نظر گرفته می‌شود ( $10, 500\text{ Hz}$ )، یعنی یک ماشین آزمایش می‌تواند طول زیادی از کابل را در فرکانس‌های حدود  $10\text{ Hz}$  و طول کمی از آن را در فرکانس‌های کمتر از  $500\text{ Hz}$  آزمایش کند.

آزمایش روال به طور کلی شامل موارد زیر خواهد بود:

- آزمایش الکتریکی تمامی قسمت‌های اکستروودشده: آزمایش تخلیه‌ی جزئی، آزمایش ولتاژ؛
- آزمایش بر روی تمامی مفاصل ساخت کارخانه: آزمایش تخلیه‌ی جزئی، نظارت با اشعه‌ی X، آزمایش ولتاژ؛

<sup>1</sup>Type testing

- آزمایش تمامی مفاصل یدکی: تا به توافق با مشتری رسید؛
- آزمایش تمامی پایانه‌ها، مطابق با استانداردهای معتبر *IEC*؛
- آزمایش بر روی کل طول کابل انتقالی مجهز به تمامی وسایل جانبی مکانیکی خود: آزمایش تخلیه‌ی جزئی، آزمایش ولتاژ.

### ۱۵-۶-۵ آزمایش بر روی نمونه‌ها

هدف از این آزمایش‌ها، تأیید کیفیت سیستم کابل تولیدی است. بر اساس استانداردهای بین‌المللی *IEC60840* و *62067*، آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌هایی از کل کابل انجام می‌شود. این کار شامل آزمایش‌هایی بر روی کابل و مفصل ساخت کارخانه و روی مفاصل یدکی است.

۱۵-۶-۶ آزمایش پس از نصب

آزمایش‌های انجام‌شده پس از نصب کل کابل مشابه آن‌هایی هستند که توسط استانداردهای بین‌المللی *IEC60840* و *62067*، یعنی آزمایش در  $U_0$  ۱.۷ به مدت ۳۰ دقیقه یا ۲۴ ساعت در  $U_0$  پیشنهاد شده‌اند.

همچنین پیشنهاد شده است که مشخصات الکتریکی کابل قبل از عملیاتی شدن آن (رژیم‌های پایا و گذرا) برای استفاده در آینده اندازه‌گیری شوند.

### ۱۵-۷ مشخصات کابل‌های DC

مواد مورد استفاده برای کابل‌های عایق *DC* شباهت زیادی با آن‌هایی دارند که در کابل‌های *AC* به کار می‌روند. قوانین طراحی نیز مشابه قوانین در کابل‌های تک‌فاز *AC* هستند. گرادپان متوسط  $16 \text{ kV/mm}$  مقدار معقولی برای طراحی کابل‌های *HVDC* با اتصال *VSC* به نظر می‌رسد.

### ۱۵-۸ مشخصات کابل‌های پویا

کرنش‌های مکانیکی وارد بر کابل‌های پویا کاملاً با کرنش‌های وارد بر کابل‌های ساکن متفاوت هستند.

آزمایش‌های توصیف‌شده در بالا برای کابل‌های پویا نیز اعمال می‌شوند، اما می‌توان آن‌ها را با آزمایش‌های خاص توسعه، برای مثال مقاومت خستگی جداره‌های فلزی و آب‌بندها تکمیل کرد.



ممکن است ساختارهای خاصی برای کابل‌های پویا، برای مثال استفاده از آب‌بند مس چین‌دار برای حفظ انعطاف‌پذیری، انتخاب شوند این ساختارهای باید به وسیله‌ی آزمایش‌های توسعه مناسب تأیید شوند. برخی از نمونه‌های چنین روش‌هایی در گزارشات مشخص ارائه‌شده در جلسه‌ی ۲۰۱۰ CIGRE یافت می‌شوند [JER 10].

### ۹-۱۵ مشخصات الکتریکی کابل‌های زیر آبی

آشنایی با مشخصات الکتریکی کابل‌ها در چندین مرحله از طول عمر کابل‌ها و به ویژه در کابل‌های زیر آبی ضروری است.

ما در مرحله‌ی "برنامه‌ریزی سیستم" نیاز به خطوط جدید، جریان و ولتاژها و نیاز به قطعات کمکی را مشخص می‌سازیم. در این مرحله، وضعیت‌های شکل  $N-I$  در نظر گرفته می‌شوند و تمامی گزینه‌های بالاسری و زیرزمینی ارزیابی و مقایسه می‌شوند. ما برای این پژوهش‌ها نیاز داریم تا مقادیر امپدانس مستقیم را در فرکانس صنعتی بدانیم.

در مرحله‌ی پژوهش اثر پاسخ انتخابی بر شبکه: در این پژوهش به جریان‌های اتصال کوتاه، مشکلات هارمونیک، پایداری و حفاظت توجه می‌شود. در این سطح، نیاز به مدل‌سازی از توالی "مثبت" تا مدل سه‌هسته‌ای و از فرکانس صنعتی تا چند کلیو هرتز فراهم می‌گردد.

کمی پس از آن، مرحله‌ی تعریف دقیق تجهیزات ضروری و فرآیندهای عملیاتی وارد می‌شود: کابل، پوشش‌ها، ابزار الکتریکی، جبران‌سازی و غیره. بنابراین ابزار محاسبه، برنامه‌ی بررسی رژیم‌های گذرا هستند که اتصالات ویژه‌ی جداره‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند. در نتیجه، به مدل‌های دقیقی برای فرکانس‌های زیاد نیاز است.

### ۱-۹-۱۵ فرمول‌های مرسوم

در کتب موجود، منابع کمکی بسیاری برای مدل‌سازی و محاسبه‌ی دقیق مشخصات الکتریکی کابل‌ها وجود دارد. به ویژه می‌توان به کارهای شلکناف<sup>۱</sup> [SHE 34] در ۱۹۳۴، پلاکزک<sup>۲</sup> در ۱۹۲۶ [POL 26] و امتانی<sup>۳</sup> در ۱۹۷۹ اشاره کرد [AME 81].

فرمول‌های ساده‌ای توسط ودپول و ویلکاکس<sup>۴</sup> در ۱۹۷۳ مطرح گشته‌اند [WED 73].

<sup>1</sup>Shelknuoff

<sup>2</sup>Pollaczek

<sup>3</sup>Ametani

<sup>4</sup>Wedepohl and Wilcox

## فصل پانزدهم: کابلهای دریافت و انتقال انرژی تولیدشده توسط فن آوریهای فراساحلی ۶۸۱

مدل سازی برای کابل های تک هسته ای هم محور با در نظر گیری رسانای بزرگ، بدون زره، با جداره ی سربی با فواصل زیاد در مقایسه با قطر، درست است. با این حال، تعدادی نکته است که باید تقویت شوند:

- مشخصات الکتریکی مواد خاص متغیر با فرکانس؛

- لایه های نیمه هادی مدل سازی نمی شوند؛

- اثرات مجاورت و اثر الکترومغناطیسی کابل های نزدیک در نظر گرفته نمی شوند.

به علاوه:

- ساختار رساناها متغیر است: هسته های مجزا، رساناهای سوراخ و غیره؛

- تلفیق جداره های مشخص با رساناهای لوله ای (مقاومت  $DC$  یکسان و قطر متوسط یکسان) در مورد لایه های سیم ها کاری اشتباه است؛

- زره ساخته شده از سیم ها یا نوارهای فولادی نباید مغناطیسی در نظر گرفته شوند.

### ۱۵-۹-۲ کار در حال پیشرفت در CIGRE

در این شرایط، به ویژه برای پرداختن به کابل های سه هسته ای زیر آبی ضروری است که با در نظر گیری تعیین دقیق مشخصات الکتریکی کابل، کار دقیق تری برای مدل سازی انجام شود.

در کمیته ی پژوهشی  $BI$ ، کابل های عایق<sup>۱</sup>، گروه کاری جدیدی شکل گرفته است. گروه کاری  $BI.30$  مسئولیت ارائه ی فرمول های جدید را بر عهده دارد. کار آنها در ۲۰۱۲ منتشر خواهد شد.

### ۱۵-۱۰ حصول پیشرفت در هنگام JICABLE 2011

بزرگترین کنفرانس بین المللی مختص کابل های عایق انتقال و توزیع به نام  $JICABLE$  هر ۴ سال یک بار از ۱۹۸۴ برگزار می شود.

در ۲۰۱۱، کنفرانس  $JICABLE$  از ۲۰ تا ۲۳ ژوئن در ورسای برگزار گردید. کارهای کمکی بسیاری ارائه شد که به کابل های زیر آبی مرتبط هستند و منابع جدیدی برای تکمیل آنها فراهم می کنند و در کتاب شناسی این فصل موجود هستند.

---

<sup>1</sup>Insulated Cables

به ویژه، ما می‌توانیم به ۱۲ کار ارائه‌شده در هنگام جلسات A6 (کابل‌های زیر آبی - سیستم‌ها)، A7 (کابل‌های زیر آبی - عملکردها) و D4 (کابل‌های زیر آبی - عملکرد کابل‌ها) اشاره کنیم:

- A.6.1 پروژه‌های اتصال شبکه‌های پارک‌های بادی فراساحل در دریای شمال آلمان؛

- A.6.2 رابط زیر آبی HVDC با ظرفیت بالا برای انگلستان؛

- A.6.3 کابل‌هایی برای کاربردهای آب عمیق؛

- A.6.4 به کارگیری کابل برق زیر آبی XLPE برای ولتاژ بسیار اضافی؛

- A.6.5 انتقال برق HVAC برای سکوی GJOA؛

- A.6.6 رفتار خورنده‌ی کابل‌های برق زیر آبی در محیط دریایی؛

- A.7.1 برنامه‌ی شناسایی پوشش فلزی کابل زیر آبی؛

- A.7.2 اثر شرایط زیر آبی بر عملکرد بلند مدت کابل‌های ACXLPE؛

- A.7.3 تلفات زره در کابل‌های سه‌هسته‌ای زیر آبی XLPE؛

- A.7.4 در عمق دفن بهینه‌ی کابل‌های برق زیر آبی

- A.7.5 توسعه و تأیید اتصال برق عمیق‌ترین قسمت آب؛

- A.7.6 مشخصه‌ی تلفات دی‌الکتریک کابل‌های زیر آبی فشار متوسط (MW) هیدرو-کبک در فاز ۱؛

- D.4.1 پوشاندن جامع در مقابل بخشی هسته‌های توان "طرح خیس" ( $Um < 36 kV$ ) برای کابل‌های چند هسته‌ای؛

- D.4.2 تحلیل ظرفیت انتقال کابل‌های زیر آبی  $110 kV$  زمین ژوشان؛

- D.4.3 پروژه‌ی هاوان-آنژوی: توسعه و نصب فیبر نوری AC سه هسته‌ای XLPE 154 kV جاگذاری‌شده در سیستم کابل برق زیر آبی؛

- D.4.4 تخلیه‌های افت آب و تخلیه‌ی الکتریکی سطحی در سطح مشترک جامد-جامد رابط-های کابل زیر آبی؛

- D.4.5 پروژه‌ی اوسلو فیورد: اولین پروژه با کابل‌های زیر آبی  $400 kV$  طولی XLPE؛

D.4.6 - تأیید کیفیت سیستم کابل زیر آبی  $345 \text{ kV XLPE}$

تمامی این کارهای بیانگر تحولی سریع در صنعت انتقال برق توسط کابل‌های زیر آبی بودند. جمع‌آوری و انتقال انرژی تولیدی مبدل‌های انرژی دریایی همانند اتصالات داخلی در مرکز نگرانی‌های بازیگران این بخش صنعتی قرار دارند.

### ۱۱-۱۵ کتاب‌شناسی

- [AME 80] AMETANI A., "Wave propagation characteristics of cables", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS 99, no. 2, March-April 1980.
- [ARG 95] ARGAUT P., FAVRIE E., "Recent developments in 400 and 500 kV XLPE Cables", *Jicable*, Paper A.1.1, 1995.
- [BAR 00] BARTNIKAS R., SRIVASTAVA K.D., *Power and Communication Cables*, IEEE, 2000.
- [BOU 95] BOURGEAT X., LUTON M.H., "Results of tests using DC high voltage on low density polyethylene insulation", *Jicable*, Paper E.5, 1995.
- [BRE 10] BREMMES J.J., EVENSET G., STOLEN R., *Power Loss and Inductance of Steel Armoured Multi-Core Cables: Comparison of IEC Values with "2,5D" FEA Results and Measurements*, Report B1-116, session CIGRE 2010.
- [CIG 03a] CIGRE WG 21.01, "Testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 250 kV", *Electra*, no. 206, 2003.
- [CIG 03b] CIGRE WG 21.01, *Recommendations for Testing HVDC Extruded Cable Systems for Power Transmission at A Rated Voltages up to 250 kV*, CIGRE TB 219, 2003.
- [CIG 05a] CIGRE WG B1.03, "Large cross sections and composite screen design", *Electra*, no. 220, 2005.
- [CIG 05b] CIGRE WG B1.03, *Large Cross Sections and Composite Screen Design*, CIGRETB, no. 272, 2005.
- [CIG 06a] CIGRE WG B1.06, "Revision of qualification procedures for high voltage and

- extra high voltage AC extruded underground cable systems*", *Electra*, no. 227, 2006.
- [CIG 06b] CIGRE WG B1.06, *Revision of Qualification Procedures for High Voltage and Extra High Voltage AC Extruded Underground Cable Systems*, CIGRE TB 303, 2006.
- [CIG 07a] CIGRE WG B1.07, "Statistics of AC underground cables in power networks", *Electra*, no. 235, 2007.
- [CIG 07b] CIGRE WG B1.07, *Statistics of AC Underground Cables in Power Networks*, CIGRE TB 338, 2007.
- [CIG 10a] CIGRE WG 21.02, "Recommendations for mechanical tests on submarine cables", *Electra*, no. 171, 1997.
- [CIG 10b] CIGRE SC B1, *Progress Report 2010*, [www.cigre-b1.org](http://www.cigre-b1.org), 2010.
- [COL 10] COLLA L. et al., *HVAC submarine cable links between Italy and Malta. Feasibility of the project and system electrical design studies*, rapport B1-104, session CIGRE 2010.
- [EVE 09] EVENSET G., LADEGAARD B., "Deep water cable solutions-cable system development and installation", 2009 Bergen Colloquium, paper 501, CIGRE SC B4.
- [FUK 99] FUKUNAGA S. et al., "Construction of long distance 500 kV XLPE cable line", *Jicable*, Paper A.1.6, 1999.
- [GRA 10] GRAMPA R. et al., *200 kV DC extruded cables crossing the San Francisco Bay*, report B1-105, session CIGRE, 2010.
- [JEN 04] JENSEN C., ARGAUT P., *New 400 kV Cable System in Jutland (Denmark)*, CIGRE, Alger, 2004.
- [JER 10] JEROENSE M. et al., *HVAC power transmission to the Gjoa Platform*, report B1-107, session CIGRE, 2010.
- [KAR 06] KARLSTRAND J. et al., "Three-core HV XLPE submarine cables for off-shore applications", Report B1-110, session CIGRE, 2006.
- [KUN 10] KUNZE D. et al., *Gas insulated lines-reliable power transmission towards new worldwide challenges in hydro and wind power generation*, report B3-210, session CIGRE, 2010.
- [LEE 10] LEE T.H. et al., *Development of the HVDC +- 250 kV MI*

- submarine cable system*  
in KOREA, report B1-114, session CIGRE, 2010.
- [LEP 95] LE PEURIAN S. et al., "Development and qualification of a submarine 90 kV cable system using extruded insulation for the electric supply of Guernsey island", *Jicable*, Paper A.2.4, 1995.
- [MOO 04] MOORE G.F., *Electric Cables Handbook*, Blackwell Publishing, Oxford, 2004.
- [POL 26] POLLACZEK F., "Über das feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen einfachtleitung", *Elektrische Nachrichten Technik*, vol. 3, no. 9, 1926.
- [SHE 34] SHELKUNOFF S.A., "The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields", *Bell system technical journal*, no. 13, 1934.
- [SKO 10] SKOG J.E. et al., *NorNed – world's longest power cable*, report B1-106, session CIGRE, 2010.
- [UTE 08] UTE, *Norme Française N FC 33-254, Cables isolés et leurs accessoires pour réseaux d'énergie*, AFNOR, August 2008.
- [WED 73] WEDEPOHL L.M., WILCOX D.J., "Transient analysis of underground power transmission systems. System-model and wave propagation characteristics", *Proc. IEEE*, vol. 120, p. 253-260, February 1973.
- [WOR 01a] Working Group 21.06, "Accessories for HV cables with extruded insulation", *Electra*, no. 194, 2001.
- [WOR 01b] Working Group 21.06, *Accessories for HV Extruded Cables*, CIGRE TB 177, 2001.
- [WOR 11a] Working Group B1.25, "Advanced design of metal laminated coverings: recommendations for tests. Guide for use operational feed-back", *Electra*, no. 254, 2011.
- [WOR 11b] Working Group B1.25, "Advanced design of metal laminated coverings: recommendations for tests. Guide for use operational feed-back", CIGRE TB 446, 2011.
- [WOR 95] Working Group 21.06, *Accessories for HV Extruded Cables*, CIGRE TB 89, 1995.
- [WOR 09] WORZYK T., *Submarine Power Cables*, Springer, Berlin, 2009.









## واژگان فارسی به انگلیسی

## الف

<i>Locks</i>	آب بند
<i>Draught</i>	آبخور
<i>Vertical draft</i>	آبخور عمودی
<i>Fjord</i>	آبدره
<i>Coating</i>	آبکاری
<i>Hydrolysis</i>	آبکافت
<i>Inland waters</i>	آبهای داخلی
<i>London Array</i>	آرایه لندن
<i>The Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ</i>	آرشیو ملی داده های موج در جای مناسب
<i>Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority</i>	آزمایشگاه انرژی طبیعی اداره ی هاوایی
<i>Routine testing</i>	آزمایش روال
<i>Roise laboratory</i>	آزمایشگاه رویز
<i>Type testing</i>	آزمایش نوع
<i>Azimutal</i>	آزیموتی
<i>Asynchronous</i>	آسنکرون
<i>Perturb and observe</i>	آشفتن کردن و مشاهده
<i>Nacelles</i>	آشیانه ها

<i>Alpha Ventus (Germany)</i>	آلفا وندوس
<i>Ondulators</i>	آندولاتورها
<i>Sacrificial anodes</i>	آندهای محافظ
<i>Aérologie</i>	آیرولوژی
<i>Iroise</i>	آیرویس
<i>Code de l'Environnement</i>	آیین نامه ی محیط زیست
<i>Réseau de Transport de l'Electricité</i>	اپراتور انتقال فرانسه
<i>OpenHydro</i>	آپن هیدرو
<i>Cross-linking</i>	اتصال عرضی
<i>Gimbal connection</i>	اتصال گیمبل
<i>Dissipater</i>	اتلاف کننده
<i>Kin effect and proximity effect</i>	اثر پوشش و اثر مجاورت
<i>Proliferation effect</i>	اثر تکثیر
<i>Passivation</i>	اثرناپذیرسازی
<i>Unbalanced effect</i>	اثر نامتوازن کننده
<i>Hall effect</i>	اثر هال
<i>Joint Probability</i>	احتمال پیوند
<i>Radar Altimeter</i>	ارتفاع سنج های راداری
<i>Significant wave height</i>	ارتفاع عمده ی موج
<i>Head hight</i>	ارتفاع هد
<i>Organisms</i>	ارگانیسم ها

<i>Wind rush</i>	ازدحام باد
<i>Ageing</i>	از کار افتادگی
<i>Doubly-salient</i>	استاتور-روتوری برجسته
<i>Statoil</i>	استاتویل
<i>Statcoms</i>	استاتیکی
<i>Française de normalization</i>	استانداردسازی فرانسه
<i>Straflo</i>	استرافلو
<i>“L’utilisation de l’Energie de marées</i>	استفاده از انرژی جزر و مد
<i>Stingray</i>	استینگری
<i>Encrusting sponges</i>	اسفنج های پوسته ای
<i>Scroby Sands</i>	اسکروبی سندز
<i>Brest harbor</i>	اسکله برست
<i>Scope</i>	اسکوپ
<i>Osmotic</i>	اسموزی
<i>Snubbers and saturable inductors</i>	اسنابرها و سلف های اشباع پذیر
<i>SCHNEIDER ELECTRIC</i>	اشنایدر الکتریک
<i>World Ocean Atlas</i>	اطلس اقیانوس های جهان
<i>Flash détente</i>	افت ناگهانی فشار
<i>Actimar</i>	اکتیمیار
<i>École Centrale De Nantes</i>	اکول سنترال دنانتز
<i>Economizer</i>	اکونومایزر

<i>Electromechanical</i>	الکترومکانیکی
<i>Allegans</i>	الگانز
<i>Cyclic lineic inductance</i>	الفای چرخ های خطی
<i>M.Leijon</i>	ام.لیهون
<i>Pour divers moyen d'employer les vagues de la mer comme moteurs</i>	امواج اقیانوس به عنوان نیروی محرک
<i>Storm surges</i>	امواج طوفان
<i>Spread of Water</i>	انتشار آب
<i>Characteristic Size</i>	اندازه ی مشخصه
<i>British Wind Energy Assosiation</i>	انجمن انرژی باد بریتانیا
<i>Eroupean Wind Energy Association</i>	انجمن انرژی بادی اروپا
<i>The Institut d'Excellence dans le domaine des Energies Décarbonées</i>	انجمن مزیت انرژی بدون کربن (IEED)
<i>Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées</i>	انجمن مطالعه جزر و مدها
<i>ECRIN: "Échange et coordination recherche-industrie"</i>	انجمنی برای ارتقای روابط صنعت و محقق بود که توسط CNRS و CEA بنا نهاده شده است
<i>Geotechnical Measurments</i>	اندازه گیری های ژئوتکنیکی
<i>Geophysical Measurments</i>	اندازه گیری های ژئوفیزیکی
<i>Energy Ocean</i>	انرژی اقیانوس
<i>Off shore Wind Energy</i>	انرژی بادی فراساحلی
<i>Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean</i>	انرژی پاک آبی ارتعاشات ناشی از

<i>Energy</i>	ورتکس
<i>Power Take Off</i>	انرژی توان برخاست
<i>Énergies Thermiques des Mers</i>	انرژی حرارتی اقیانوس
<i>Swell energy</i>	انرژی خیزآب
<i>France Energies Marines</i>	انرژی دریایی فرانسه
<i>Marine Renewable Energy</i>	انرژی های دریایی تجدیدپذیر (MRE)
<i>EDF Energies Nouvelles</i>	انرژی های نو EDF
<i>Enercon</i>	انرکن
<i>Anhydrides</i>	انیدریدها
<i>Oleo-pneumatic</i>	اولئو-پنوماتیک
<i>Oyster</i>	اویستر
<i>The Race Tidal Power Station</i>	ایستگاه برق جزر و مدی رنس
<i>Sub-Stations</i>	ایستگاه های فرعی
<i>Ifremer</i>	ایفرمر
<i>Inverter</i>	اینورتر

## ب

<i>Anemometer</i>	بادسنج
<i>Wind Vane</i>	بادنما
<i>Trade Winds</i>	بادهای شمال شرقی

<i>Self-elevating barge</i>	بارج بالابر
<i>Barnacles</i>	بارناکل ها
<i>Barotropic</i>	باروتروپیک
<i>Barometrical</i>	بارومتری
<i>Endoreversible</i>	بازگشت پذیر داخلی
<i>Rocker Arm</i>	بازوی فشار
<i>Winch</i>	بالابر
<i>Regionalization</i>	بخش بندی
<i>Préfet</i>	بخشدار
<i>Surface-piercing section</i>	بخش نفوذ به سطح
<i>Food grade</i>	بدون آلودگی
<i>Fitting</i>	برازش
<i>Normal Vector of the Surface</i>	بردار عمود بر سطح
<i>Epifauna</i>	برزیانگان
<i>Shearing</i>	برش
<i>Electrolysis of Sea Water</i>	برقکافت آب دریا
<i>Extrapolated</i>	برون یابی
<i>Stockes development</i>	بسط استوکس
<i>Water treeing</i>	بلوری شدن آب
<i>Belleville</i>	بلویل
<i>Bellofontaine</i>	بلوفانتین
<i>Jointing</i>	بندکشی

<i>Benodet</i>	بنودی
<i>Binnie &amp; Partners</i>	بنی و پانترز
<i>Anaerobic</i>	بی هوازی
<i>Beatrice (UK)</i>	بئاتریس
<b>پ</b>	
<i>Paimpol-Brehat</i>	پایمول-بریهایت
<i>Premolded</i>	پرسی
<i>The Mini-OTEC Project</i>	پروژه ی کوچک OTEC
<i>Bulbous profile</i>	پروفیل حبابی
<i>Periphyton</i>	پریفیتون
<i>Pollaczek</i>	پلاکزک
<i>Pelamis</i>	پلامیس
<i>Pelton</i>	پلتون
<i>Porpoises</i>	پورپوس ها
<i>Shed</i>	پوسته
<i>Dunnage</i>	پوشال
<i>Jackets</i>	پوش، جکت ها
<i>Sail Cloth</i>	پوشش های دریایی
<i>Pointe de l'Arcouest</i>	پوینت هدل اکوئست
<i>Pitch</i>	پیچ



<i>Cells, Piles</i>	پیل ها
<b>ت</b>	
<i>Radiometer</i>	تابش سنج
<i>Memory Function</i>	تابع حافظه
<i>Welsh Ground</i>	تالاب ولز گراند
<i>Evaporator</i>	تبخیر کننده
<i>Flash evaporator</i>	تبخیر کننده فلش
<i>Park transformation</i>	تبدیل پارک
<i>Public inquiry</i>	تحقیق عمومی
<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>	تحلیل اطلس باد و برنامه‌ی کاربردی
<i>Deconstruction</i>	تخریب
<i>Partial discharge</i>	تخلیه بار جزئی
<i>Power Law</i>	تخمین های توانی
<i>Plateau</i>	تراز
<i>Insulated gate bipolar transistor</i>	ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق
<i>Step-up transformer</i>	ترانسفورماتور فزاینده
<i>Thermocline</i>	ترموکلاین
<i>Thyristors</i>	تریستورها
<i>Random</i>	تصادفی
<i>Switch</i>	تعویض

<i>Geological Changes</i>	تغییرات زمین شناختی
<i>Pulse Width Module</i>	تغییر پهنای پالس
<i>Scatterometers</i>	تفرق سنج ها
<i>Radar Diffusometer</i>	تفرق سنج های راداری
<i>Speed Mutiplier</i>	تقویت کننده سرعت
<i>Unidirectional</i>	تک جهته
<i>Monochromatic</i>	تک فام
<i>Unimodal</i>	تک نمایی
<i>Consolidation</i>	تلفیقی
<i>Gusts</i>	تندبادها
<i>Clipping power</i>	توان اتصال کوتاه
<i>Installed power</i>	توان بهره برداری شده
<i>Reactive power</i>	توان غیرفعال، توان بازواکنش
<i>Power surges</i>	توان ناگهانی
<i>Turbo-alternator</i>	توربو-آلترناتور
<i>Upwind or downwind turbines</i>	توربین های بالادست یا پایین دست
<i>Low head turbines</i>	توربین های با هد پایین
<i>Darrieus turbines</i>	توربین های داریوس
<i>Savonius turbines and the paddle wheel</i>	توربین های ساونیوس و چرخ پره دار
<i>Synoptic statistical distributions</i>	توزیع آماری همدید (سینوپتیک)

<i>Gumble's Law</i>	توزیع گامبل
<i>Diffusion and advection</i>	توزیع و جابجایی
<i>Weibull distribution</i>	توزیع ویبول
<i>Center spar</i>	تیرک مرکزی
<i>Deflector</i>	تیغه
<i>Thiosulfate</i>	تیوسولفات

## ث

<i>Permittivity</i>	ثابت دی الکتریک
---------------------	-----------------

## ج

<i>Screens</i>	جداره ها
<i>Gulf Stream</i>	جریان خلیج
<i>Doppler effect current meters</i>	جریان سنج های اثر داپلر
<i>Wet mateable</i>	جفت تر
<i>Dry mateable</i>	جفت خشک
<i>Common busbar</i>	جعبه تقسیم مشترک
<i>Algal flotsam</i>	جلبک

## چ

<i>Chopper</i>	چاپر
----------------	------

<i>Panchal and Bell hybrid cycle</i>	چرخه ترکیبی پانچال و بل
<i>Single-effect emptying cycle</i>	چرخه تخلیه تک اثره
<i>Uehara cycle</i>	چرخه یوهارا

## ح

<i>Gliding modes</i>	حالت های پروازی
<i>Swaying movement</i>	حرکت بالا و پایین رفتن
<i>Bassin d'Essai des Carènes</i>	حوضچه آزمایش کارنز

## خ

<i>Service Hydrographique et Océanographique de la Marine</i>	خدمات هیدروگرافی و اقیانوس شناسی دریایی
<i>Fatigue</i>	خستگی
<i>Thulweg</i>	خط القعرها
<i>Mooring Lines</i>	خطوط مهار
<i>Bridgewater Bay</i>	خلیج بریج واتر
<i>Gulf of Kachchh – Kutch</i>	خلیج کاج
<i>Anse de Launay</i>	خلیج لونی
<i>Galvanic corrosion</i>	خوردگی گالوانیک
<i>Wave Surge</i>	خیز موج

## د

<i>Ducts</i>	داکت ها
<i>Epistemological</i>	دانش شناختی
<i>The École Centrale de Nantes</i>	دانشگاه مرکزی نانت
<i>École Normale Supérieure de Cachan</i>	دانشگاه نرمال سوپریور کاشن
<i>Dyke</i>	دایک
<i>Draft</i>	درفت
<i>Marinized</i>	دریا بومی سازی شد
<i>Sea-keeping</i>	دریامانی
<i>Sea of Okhotsk</i>	دریای اختسک
<i>North Sea and Norwegian Sea</i>	دریای شمال و دریای نروژ
<i>Biocides Directive</i>	دستورالعمل زیست کشها
<i>Direction Régionale des Affaires Maritimes</i>	دستورالعمل منطقه ای برای کارهای دریایی
<i>Defluxing</i>	دفع کننده
<i>Thermohaline</i>	دماشوری
<i>Cape Horn</i>	دماغه ی هورن
<i>Damp</i>	دمپ
<i>Aspiration</i>	دمش
<i>Tails of distributions</i>	دنباله های توزیع
<i>Cement grouting</i>	دوغاب سیمان
<i>Two pass</i>	دو مسیره

<i>Bimodal</i>	دو نمایی
<i>Free span</i>	دهانه آزاد
<i>Givers</i>	دهنده ها
<i>Disc of action</i>	دیسک عامل
<i>Morphodynamics</i>	دینامیک ریخت شناسی

## ر

<i>Dispersion relation</i>	رابطه ی پراکندگی
<i>Synthetic aperture radars</i>	رادارهای دهانه
<i>Synchronous reactance</i>	راکتانس همگام (سنکرون)
<i>Bio-fouling</i>	رسوب زیستی
<i>Zero sequence</i>	رشته صفر
<i>Wave Action</i>	رفتار موج
<i>Rance</i>	رنس
<i>Wound rotor</i>	روتور لغزان
<i>Orifice</i>	روزنه
<i>Mesh free methods</i>	روش های آزاد مش
<i>Roll</i>	رول

## ز

<i>Real-time</i>	زمان واقعی
<i>Biomass</i>	زیست توده

*Biocidal* زیست کش

## ژ

*Jacques Ruer* ژاک روئر

*Bathymetry* ژرفاسنجی

*Doubly-fed induction generator* ژنراتور القایی دو تغذیه ای

*Synchronous generator* ژنراتور سنکرون

*Permanent Magnet Sycronus Generator* ژنراتورهای با مغناطیس دائم

*Rim-driven integral generator* ژنراتور یکپارچه دندانه ای

*Journal Officiel* ژورنال رسمی

*Jules Vern* ژول ورن

## س

*Sabella* سابلا

*Energy and Sustainable Development and the Ministry of the Sea* سازمان انرژی پایدار و وزارت دریایی

*International Maritime Organization* سازمان بین المللی دریایی

*French armory department* سازمان زرادخانه فرانسه

*Jacket-type structure* سازه ی شابلونی

*Submerged Sabella* سبلائی مستغرق

*Water Column* ستون آب

*Barrage* سد

<i>Surge</i>	سرج (حرکت جلو و عقب)
<i>Cut-in speed of turbine</i>	سرعت شروع برش توربین
<i>Sea squirts</i>	سرنگ های دریایی
<i>Serial</i>	سریالی
<i>Captation surface</i>	سطح کپتیشن
<i>Oil rigs</i>	سکوهای حفاری نفت
<i>Semi-submersible</i>	سکوهای نیمه مغرق
<i>Tension Leg Platform</i>	سکوی پایه کشتی
<i>Saint Remy des lands</i>	سنت رمی دس لاندس
<i>Sintering</i>	سنترینگ
<i>Saint – Malo</i>	سنت مالو
<i>Saint-Venant</i>	سنت ونانت
<i>Ballast</i>	سنگریزه ها
<i>Heaviness or fatness of the distribution tail</i>	سنگینی یا چاقی دنباله توزیع
<i>La Petite Sorbonne</i>	سوربن کوچک
<i>Sway</i>	سوی (حرکت چپ و راست)
<i>Tripod/quadripd</i>	سه پایه ها/چهارپایه ها
<i>C-Power (Belgium)</i>	سی-پاور
<i>SeaGen</i>	سیژن
<i>Stall system</i>	سیستم استال
<i>Articulated gangplank system</i>	سیستم پل مفصلی



## ص

<i>Plume treatment systems</i>	سیستم های رفتاری ستونی
<i>SeaFlow</i>	سیفلو
<i>bélier-siphon barométrique</i>	سیفون رم بارومتری
<i>Raz de Sein</i>	سین راض
<i>Heat sink</i>	سینک گرم

## ش

<i>Cross-linked</i>	شبکه ای
<i>Large eddy simulations</i>	شبیه سازی های گرداب بزرگ
<i>Extreme conditions</i>	شرایط بحرانی
<i>Tidal Electric Company</i>	شرکت تایدل الکتریک
<i>Norwegian company Hammerfest Strom</i>	شرکت نروژی همرفست استروم
<i>Flares</i>	شعله ها
<i>Crevices</i>	شکاف ها
<i>Shelknuoff</i>	شلکناف
<i>Conseil Régional de Bretagne</i>	شورای منطقه ای بریتانی
<i>Conseil international des grands réseaux électriques</i>	شورای بین المللی سیستمهای الکتریکی عظیم
<i>Voltage dips</i>	شیب ولتاژ

<i>Cross-sounds</i>	صداهای متقاطع
<i>Risk premium</i>	صرف ریسکی
<i>Racking</i>	صفحه دنده
<i>Jeumont Industrie</i>	صنایع جئومونت

## ض

<i>Form factor</i>	ضریب شکل
--------------------	----------

## ط

<i>Rim Driven design</i>	طراحی محرک ریم
<i>Violent and brief squalls</i>	طوفان های بحرانی و کوتاه مدت
<i>Tyhoons</i>	طوفان های دریایی
<i>Collars</i>	طوقه ها
<i>Horizontal coherence lengths</i>	طول افقی هم فاز
<i>The Van der Hoven spectrum</i>	طیف وندروان
<i>Pierson-Moskowitz spectrum</i>	طیف پیرسون-مسکوویچ

## ع

<i>Uncertainties</i>	عدم قطعیت ها
<i>Righting action</i>	عمل قائم کردن
<i>The National Renewable Energy Plan of Action</i>	عملیات انرژی تجدیدپذیر ملی

## ف

<i>Feathering</i>	فدرینگ
<i>Ferraz</i>	فراز
<i>Upwellings</i>	فرازجوشی ها
<i>Erosion, Scouring</i>	فرسایش
<i>Betz's formula</i>	فرمول بتز
<i>Annual turnover</i>	فروش سالانه
<i>Formover</i>	فرومور
<i>Espaces Remarquables</i>	فضاهای جذاب
<i>Fellamanville</i>	فلامانویل
<i>Fly Wheel</i>	فلایویل
<i>Flaps</i>	فلپ ها
<i>Flettner®</i>	فلترنر®
<i>Inertial Measurements Technologies</i>	فناوری های مختلف اندازه-گیری اینرسی
<i>Inox 316</i>	فولاد ضدزنگ ۳۱۶
<i>Concrete gravity foundations</i>	فونداسیون های بتنی گرویتی
<i>Gravity foundations</i>	فونداسیون های گرویتی

## ق

<i>Reliability</i>	قابلیت اطمینان
<i>Seaworthiness</i>	قابلیت دربانوردی
<i>Bode's law</i>	قانون بُد
<i>Code de l'Urbanisme</i>	قانون برنامه ریزی
<i>Cut-out</i>	قطع
<i>latching/declutching</i>	قفل کردن/خلاص کردن

## ک

<i>Insulated Cables</i>	کابل های عایق
<i>Cables isolés et leurs accessoires pour réseaux d'énergie</i>	کابل های عایق و لوازم جانبی آنها برای شبکه های انرژی
<i>Depression</i>	کاهش
<i>Kurtosis</i>	کرتسیز
<i>Calcareous Worms</i>	کرم های آهکی
<i>Corona</i>	کرونا
<i>Troposkein</i>	کلاف شکل
<i>Sea kale</i>	کلم دریایی
<i>Croisic</i>	کرویسیک
<i>The Comité des Pêches</i>	کمیته شیلات
<i>Commission Nautique Locale</i>	کمیسیون محلی دریایی
<i>Contacteur</i>	کنتاکتور

<i>Cousteau and Jacquier</i>	کوستاوجکویر
<i>Chord</i>	کورد
<i>Umbilical cords</i>	کوردهای اتصال
<i>Piggy back</i>	کولی

## گ

<i>Gabion</i>	گابیون
<i>Transients</i>	گذار
<i>Temporal</i>	گذرا
<i>Wake</i>	گردابی
<i>Cyclones</i>	گردبادها
<i>Artificial cyclones</i>	گردبادهای مصنوعی
<i>Circulation</i>	گردش
<i>Gradator</i>	گردیتور
<i>Gravity</i>	گرویتی
<i>Silt</i>	گیل
<i>Glauert</i>	گلارت
<i>Signaling buoys</i>	گوی های شناور علامت دهی

## ل

<i>Lobbyist</i>	لابی ها
-----------------	---------

<i>Lot</i>	لات
<i>Barge</i>	لنج
<i>Anchorage</i>	لنگرگاه
<i>Lysekil</i>	لیسکیل
<i>Laneville and Vittecoq</i>	لینویل و ویتکاک

## م

<i>Matricial</i>	ماتریسی
<i>Helical</i>	مارپیچ
<i>Mussels</i>	ماسل‌ها
<i>Self-fluxing machines</i>	ماشین‌های خودالقایی
<i>Taxe générale sur les activités polluantes</i>	مالیات عمومی بر فعالیت‌های آلوده‌سازی
<i>Swell energy convertor</i>	مبدل انرژی خیزآب
<i>Wind Power Monthly</i>	مجله ماهانه توان بادی
<i>Power train</i>	محرک توان
<i>Phytosanitary products</i>	محصولات گیاهی
<i>French Environmental Roundtable</i>	محیط زیست فرانسه
<i>Stress cone</i>	مخروط تنشی
<i>Intervention</i>	مداخله
<i>Stockes model</i>	مدل استوکس

<i>Numerical hindcast models</i>	مدل های عددی پیش بینی موج
<i>The order of truncation <math>n</math></i>	مرتبه ی برش $n$
<i>EMEC</i>	مرکز انرژی دریایی اروپا
<i>Centre d'Ingénierie Hydraulique</i>	مرکز مهندسی هیدرولیکی
<i>Independence and Identically Distributed</i>	مستقل و به صورت یکسان توزیع شده (IDD)
<i>Electrotechnical Commission specifications</i>	مشخصات هیئت الکتروتکنیک
<i>River Odet estuary</i>	مصب رودخانه ی اودت
<i>Full Scale Test Sites</i>	مکان های آزمایش با اندازه ی واقعی
<i>Locus</i>	مکان هندسی
<i>Maxwel</i>	مکسول
<i>Blowholes</i>	مکش
<i>Architecte des Bâtiments de France</i>	معمار ارشد فرانسوی
<i>Blue Paper</i>	مقاله آبی
<i>Resistance to ageing</i>	مقاومت در برابر پیری
<i>Resistance to corrosion</i>	مقاومت در برابر خوردگی
<i>Net present value</i>	مقدار خالص کنونی
<i>Paimpol-Bréhat site</i>	مقر پایمول-بریهایت
<i>Beaufort scale</i>	مقیاس بیوفورت
<i>France's Overseas Territories</i>	مناطق خارج از فرانسه

<i>ZNIEFF</i>	مناطق طبیعی با جاذبه ی بوم شناختی جانوران و گیاهان
<i>Safety supply</i>	منبع اضطراری
<i>Turbines bell curve</i>	منحنی زنگی توربین
<i>Envelope curves</i>	منحنی های محاطی
<i>Sandwiched materials</i>	مواد فشرده شده
<i>Stops</i>	موانع
<i>Breakwaters</i>	موج شکن ها
<i>Airy Wave</i>	موج هوایی
<i>Mono-pile</i>	مونوپایل
<i>Monsoons</i>	موسمی
<i>Météo-France</i>	میتئو-فرانس
<i>Incident wave field</i>	میدان موج برخوردی
<i>Diffracted wave field</i>	میدان موج پراکنده
<i>Middelgrunden</i>	میدلگراندن
<i>Tendons</i>	میله کشش

## ن

<i>Protected maerl</i>	ناحیه مرجانی محافظت شده
<i>Temporal domain</i>	ناحیه ی گذرا
<i>Nasca Geosytemes</i>	ناسکاژئوسیستمس
<i>Nuclear aircraft carrier Charles de Gaulle</i>	ناوهسته ای هواپیمابر چارلز دگالی



<i>Nogent le Roi</i>	نجنه لروی
<i>Nordex</i>	نردکس
<i>Normand – Britton</i>	نرمند-بریتون
<i>Tip Speep ratio</i>	نسبت سرعت رأس
<i>Setup</i>	نصب
<i>Horseshoe</i>	نعل اسبی
<i>Neutral Point Clamped</i>	نقطه ی خنثی محکم شده
<i>Salts of tributyltin</i>	نمک های تریبوتیلین
<i>Prototype</i>	نمونه
<i>prototype à terre</i>	نمونه ی اولیه روی خشکی
<i>Shunt-type</i>	نوع انشعابی
<i>Bulb type</i>	نوع حبابی
<i>Wagon-type</i>	نوع واگن
<i>Dynamometers, Load Cells</i>	نیروسنج ها
<i>Froude-Krylov forces</i>	نیروهای فرود-کریلوف
<i>Hydrostatic restoring force</i>	نیروی بازگرداننده هیدروستاتیکی
<i>Resulting Generalized Force</i>	نیروی برانگیخته شده ی حاصله
<i>Diffraction Force</i>	نیروی تفرق
<i>Straining Force</i>	نیروی کرنشی

<i>Cathodic Reduction Reaction</i>	واکنش تقلیل کاتدی
<i>Val de Reuil</i>	وال دِ روئیل
<i>Wedepohl and Wilcox</i>	ودپولوویلکاکس
<i>Vertiwind</i>	ورتیویند
<i>Wing-tip vortex</i>	ورتکس قوس دار
<i>Verdant Power</i>	وردانت پاور
<i>Vermont</i>	ورمانت
<i>FAD</i>	وسیله جمع آوری ماهیان
<i>Continuous bus voltage</i>	ولتاژ پیوسته باس
<i>Winching</i>	وینچینگ
<i>Vindeby</i>	ویندبی
	۵
<i>Hub</i>	هاب
<i>CCCC Harbour</i>	CCCC هاربر
<i>Hypo-Hyper Synchron</i>	هایپو و هایپر سنکرون
<i>Hywind</i>	هایویند
<i>Hammerfest</i>	همرفست
<i>Homopolar</i>	هم قطبی
<i>Hydroelectric</i>	هیدروالکتریکی
<i>Hydrokinetica</i>	هیدروسینتیک
<i>Hydrographic</i>	هیدروگرافیک

*Hysteresis* هیسترسیس

*Heave* هیو (بالا و پایین رفتن)

*International Electro Technical Commission* هیئت بین المللی الکترونیک

## ی

*Fast bearing* یاتاقان سریع

*Yaw* یاو

*Stand by* یدکی

*Rectifiers* یکسوسازها

*Ushant* یوشانت







## واژگان انگلیسی به فارسی

### A

<i>Actimar</i>	اکتیمیار
<i>Allegans</i>	الگانز
<i>Aérologie</i>	آیرولوژی
<i>Ageing</i>	از کار افتادگی
<i>Airy Wave</i>	موج هوایی
<i>Algal flotsam</i>	جلبک
<i>Alpha Ventus (Germany)</i>	آلفا وندوس
<i>Ametani</i>	امتانی
<i>Anchorage</i>	لنگرگاه
<i>Anaerobic</i>	بی هوازی
<i>Anemometer</i>	بادسنج
<i>Anhydrides</i>	انیدریدها
<i>Annual turnover</i>	فروش سالانه
<i>Anse de Launay</i>	خلیج لونی
<i>Articulated gangplank system</i>	سیستم پل مفصلی
<i>Artificial cyclones</i>	گردبادهای مصنوعی
<i>Architecte des Bâtiments de France</i>	معمار ارشد فرانسوی
<i>Aspiration</i>	دمش

<i>Asynchronous</i>	آسنکرون
<i>Azimuthal</i>	آزیموتی
<b>B</b>	
<i>Ballast</i>	سنگریزه ها
<i>Barge</i>	لنج
<i>Barnacles</i>	بارناکل ها
<i>Barotropic</i>	باروتروپیک
<i>Barometrical</i>	بارومتری
<i>Barrage</i>	سد
<i>Bassin d'Essai des Carènes</i>	حوضچه آزمایش کارنز
<i>Bathymetry</i>	ژرفاسنجی
<i>Beatrice (UK)</i>	بئاتریس
<i>Beaufort scale</i>	مقیاس بیوفورت
<i>bélier-siphon barométrique</i>	سیفونر مبارومتری
<i>Belleville</i>	بلویل
<i>Bellofontaine</i>	بلوفانتین
<i>Benodet</i>	بنودی
<i>Betz's formula</i>	فرمول بتز
<i>Bimodal</i>	دو نمایی
<i>binnie &amp; Partners</i>	بنی و پاتنرز

<i>Biocidal</i>	زیست کش
<i>Biocides Directive</i>	دستورالعمل زیست کش ها
<i>Bio-fouling</i>	رسوب زیستی
<i>Biomass</i>	زیست توده
<i>Blowholes</i>	مکش
<i>Blue Paper</i>	مقاله آبی
<i>Breakwaters</i>	موج شکن ها
<i>Brest harbor</i>	اسکله برست
<i>Bridgewater Bay</i>	خلیج بریج واتر
<i>British Wind Energy Assosiation</i>	انجمن انرژی باد بریتانیا
<i>Bode's law</i>	قانون بُد
<i>Bulbous profile</i>	پروفیل حبابی
<i>Bulb type</i>	نوع حبابی

## **C**

<i>Cables isolés et leurs accessoires pour réseaux d'énergie</i>	کابل های عایق و لوازم جانبی آنها برای شبکه های انرژی
<i>Calcareous Worms</i>	کرم های آهکی
<i>Cape Horn</i>	دماغه ی هورن
<i>Captation surface</i>	سطح کپتیشن
<i>Cathodic Reduction Reaction</i>	واکنش تقلیل کاتدی
<i>CCCC Harbour</i>	هاربر CCCC



<i>Cells</i>	پیل ها
<i>Cement grouting</i>	دوغاب سیمان
<i>Centre d'Ingénierie Hydraulique</i>	مرکز مهندسی هیدرولیکی
<i>Center spar</i>	تیرک مرکزی
<i>Characteristic Size</i>	اندازه ی مشخصه
<i>Chopper</i>	چاپر
<i>Chord</i>	کورد
<i>Circulation</i>	گردش
<i>Clipping power</i>	توان اتصال کوتاه
<i>Coating</i>	آبکاری
<i>Code de l'Environnement</i>	آیین نامه ی محیط زیست
<i>Code de l'Urbanisme</i>	قانون برنامه ریزی
<i>Collars</i>	طوقه ها
<i>Contacteur</i>	کنتاکتور
<i>Commission Nautique Locale</i>	کمیسیون محلی دریایی
<i>Common busbar</i>	جعبه تقسیم مشترک
<i>Concrete gravity foundations</i>	فنداسیون های بتنی گرویتی
<i>Conseil international des grands réseaux électriques</i>	شورای بین المللی سیستم های الکتریکی عظیم
<i>Conseil Régional de Bretagne</i>	شورای منطقه ای بریتانی
<i>Consolidation</i>	تلفیقی
<i>Continuous bus voltage</i>	ولتاژ پیوسته باس

<i>Corona</i>	کرونا
<i>Cousteau and Jacquier</i>	کوستاوجکویر
<i>C-Power (Belgium)</i>	سی-پاور
<i>Crevices</i>	شکاف ها
<i>Croisic</i>	کرویسیک
<i>Cross-linked</i>	شبکه ای
<i>Cross-linking</i>	اتصال عرضی
<i>Cross-sounds</i>	صداهاى متقاطع
<i>Cut-in speed of turbine</i>	سرعت شروع برش توربین
<i>Cut-out</i>	قطع
<i>Cyclic lineic inductance</i>	القای چرخه ای خطی
<i>Cyclones</i>	گردبادها

## **D**

<i>Damp</i>	دمپ
<i>Darrieus turbines</i>	توربین های داریوس
<i>Deconstruction</i>	تخریب
<i>Deflector</i>	تیغه
<i>Defluxing</i>	دفع کننده
<i>Depression</i>	کاهش
<i>Diffacted wave field</i>	میدان موج پراکنده

<i>Diffraction Force</i>	نیروی تفرق
<i>Diffusion and advection</i>	توزیع و جابجایی
<i>Direction Régionale des Affaires Maritimes</i>	دستورالعمل منطقه ای برای کارهای دریایی
<i>Disc of action</i>	دیسک عامل
<i>Dispersion relation</i>	رابطه ی پراکندگی
<i>Dissipater</i>	اتلاف کننده
<i>Doppler effect current meters</i>	جریان سنج های اثر داپلر
<i>Doubly-fed induction generator</i>	ژنراتور القایی دو تغذیه ای
<i>Doubly-salient</i>	(استاتور و روتوری) برجسته
<i>Draft</i>	درفت
<i>Draught</i>	آبخور
<i>Dry mateable</i>	جفت خشک
<i>Ducts</i>	داکت ها
<i>Dunnage</i>	پوشال
<i>Dyke</i>	دایک
<i>Dynamometers</i>	نیروسنج ها

## **E**

*ECRIN: "Échange et coordination recherche-industrie"* انجمنی برای ارتقای روابط صنعت و محقق بود که توسط *CEA* و *CNRS* بنا نهاده شده است

*École Centrale De Nantes*

اکول سنترال دنانتز

<i>École Normale Supérieure de Cachan</i>	دانشگاه نرمال سوپریور کاشن
<i>Economizer</i>	اکنومایزر
<i>EDF Energies Nouvelles</i>	انرژی های نو EDF
<i>Electrolysis of Sea Water</i>	برقکافت آب دریا
<i>Electromechanical</i>	الکترومکانیکی
<i>Electrotechnical Commission specifications</i>	مشخصات هیئت الکتروتکنیک
<i>Envelope curves</i>	منحنی های محاطی
<i>EMEC</i>	مرکز انرژی دریایی اروپا
<i>Energy Ocean</i>	انرژی اقیانوس
<i>Encrusting sponges</i>	اسفنج های پوسته ای
<i>Endoreversible</i>	بازگشت پذیر داخلی
<i>Enercon</i>	انرکن
<i>Énergies Thermiques des Mers</i>	انرژی حرارتی اقیانوس
<i>Energy and Sustainable Development and the Ministry of the Sea</i>	سازمان انرژی پایدار و وزارت دریایی
<i>Epifauna</i>	برزیگان
<i>Epistemological</i>	دانش شناختی
<i>Erosion</i>	فرسایش
<i>Eroupean Wind Energy Association</i>	انجمن انرژی بادی اروپا
<i>Espaces Remarquables</i>	فضاهای جذاب
<i>Evaporator</i>	تبخیر کننده

<i>Extreme conditions</i>	شرایط بحرانی
<i>Extrapolated</i>	برون یابی
<b>F</b>	
<i>FAD</i>	وسیله ی جمع آوری ماهیان
<i>Fast bearing</i>	یاتاقان سریع
<i>Fatigue</i>	خستگی
<i>Feathering</i>	فدرینگ
<i>Fellamanville</i>	فلامانویل
<i>Ferraz</i>	فراز
<i>Fitting</i>	برازش
<i>Fjord</i>	آبدره
<i>Flaps</i>	فلپ ها
<i>Flares</i>	شعله ها
<i>Flash détente</i>	افت ناگهانی فشار
<i>Flash evaporator</i>	تبخیرکننده فلش
<i>Flettner®</i>	فلترنر®
<i>Fly Wheel</i>	فلایویل
<i>Food grade</i>	بدون آلودگی
<i>Form factor</i>	ضریب شکل
<i>Formover</i>	فرومور

<i>Froude-Krylov forces</i>	نیروهای فرود-کریلوف
<i>France Energies Marines</i>	انرژی دریایی فرانسه
<i>France's Overseas Territories</i>	مناطق خارج از فرانسه
<i>Française de normalization</i>	استانداردسازی فرانسه
<i>French armory department</i>	سازمان زرادخانه فرانسه
<i>French Environmental Roundtable</i>	محیط زیست فرانسه
<i>Free span</i>	دهانه آزاد
<i>Full Scale Test Sites</i>	مکان های آزمایش با اندازه ی واقعی

## **G**

<i>Gabion</i>	گابیون
<i>Galvanic corrosion</i>	خوردگی گالوانیک
<i>Geological Changes</i>	تغییرات زمین شناختی
<i>Geophysical Measurments</i>	اندازه گیری های ژئوفیزیکی
<i>Geotechnical Measurments</i>	اندازه گیری های ژئوتکنیکی
<i>Gimbal connection</i>	اتصال گیمبل
<i>Givers</i>	دهنده ها
<i>Glauert</i>	گلارت
<i>Gliding modes</i>	حالت های پروازی
<i>Gradator</i>	گردیتور
<i>Gravity</i>	گرویتی

<i>Gravity foundations</i>	فونداسیون های گرویتی
<i>Gulf of Kachchh – Kutch</i>	خلیج کاج
<i>Gulf Stream</i>	جریان خلیج
<i>Gumble's Law</i>	توزیع گامبل
<i>Gusts</i>	تندبادها

**H**

<i>Hall effect</i>	اثر هال
<i>Hammerfest</i>	همرفست
<i>Head hight</i>	ارتفاع هد
<i>Heat sink</i>	سینک گرم
<i>Heave</i>	هیو (بالا و پایین رفتن)
<i>Heaviness or fatness of the distribution tail</i>	سنگینی یا چاقی دنباله توزیع
<i>Helical</i>	مارپیچ
<i>Homopolar</i>	هم قطبی
<i>Horizontal coherence lengths</i>	طول افقی هم فاز
<i>Horseshoe</i>	نعل اسبی
<i>Hub</i>	هاب
<i>Hydroelectric</i>	هیدروالکتریکی
<i>Hydrokinetica</i>	هیدروسینتیکی
<i>Hydrolysis</i>	آبکافت

<i>Hydrographic</i>	هیدروگرافیک
<i>Hydrostatic restoring force</i>	نیروی بازگرداننده هیدروستاتیکی
<i>Hypo-Hyper Synchron</i>	هایپو و هایپر سنکرون
<i>Hysteresis</i>	هیسترسیس
<i>Hywind</i>	هایویند

## **I**

<i>Ifremer</i>	ایفرمر
<i>Incident wave field</i>	میدان موج برخوردی
<i>Independence and Identically Distributed</i>	مستقل و به صورت یکسان توزیع شده (IDD)
<i>Inox 316</i>	فولاد ضدزنگ ۳۱۶
<i>Inland waters</i>	آبهای داخلی
<i>Inertial Measurements Technologies</i>	فناوری های مختلف اندازه-گیری اینرسی
<i>Installed power</i>	توان بهره برداری شده
<i>Insulated Cables</i>	کابل های عایق
<i>Insulated gate bipolar transistor</i>	ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق
<i>International Electro Technical Commission</i>	هیئت بین المللی الکترونیک
<i>International Maritime Organization</i>	سازمان بین المللی دریایی



<i>Intervention</i>	مداخله
<i>Inverter</i>	اینورتر
<i>Iroise</i>	آیرویس

**J**

<i>Jackets</i>	پوش، جکت ها
<i>Jacket-type structure</i>	سازه ی شابلونی
<i>Jacques Ruer</i>	ژاک روئر
<i>Jeumont Industrie</i>	صنایع جئومونت
<i>Jointing</i>	بندکشی
<i>Joint Probability</i>	احتمال پیوند
<i>Journal Officiel</i>	ژورنال رسمی
<i>Jules Vern</i>	ژول ورن

**K**

<i>Kin effect and proximity effect</i>	اثر پوشش و اثر مجاورت
<i>Kurtosis</i>	کرتسیز

**L**

<i>Laneville and Vittecoq</i>	لینویل و ویتکاک
<i>La Petite Sorbonne</i>	سوربن کوچک
<i>Large eddy simulations</i>	شبیه سازی های گرداب بزرگ

<i>latching/declutching</i>	قفل کردن/خلاص کردن
<i>Load Cells</i>	نیروسنج ها
<i>Locks</i>	آب بند
<i>Locus</i>	مکان هندسی
<i>Lobbyist</i>	لابی ها
<i>London Array</i>	آرایه لندن
<i>Lot</i>	لات
<i>Low head turbines</i>	توربین های با هد پایین
<i>Lysekil</i>	لیسکیل
<i>“L’utilisation de l’Energie de marées</i>	استفاده از انرژی جزر و مد

## **M**

<i>Marine Renewable Energy</i>	انرژی های دریایی تجدیدپذیر (MRE)
<i>Marinized</i>	دریا بومی سازی شد
<i>Matricial</i>	ماتریسی
<i>Maxwel</i>	مکسول
<i>Mesh free methods</i>	روش های آزاد مش
<i>Météo-France</i>	میتئو-فرانس
<i>Memory Function</i>	تابع حافظه
<i>Middelgrunden</i>	میدلگرانندن
<i>M.Leijon</i>	ام.لیهون

<i>Monochromatic</i>	تک فام
<i>Mono-pile</i>	مونوپایل
<i>Monsoons</i>	موسمی
<i>Mooring Lines</i>	خطوط مهار
<i>Morphodynamics</i>	دینامیک ریخت شناسی
<i>Mussels</i>	ماسل ها
<b>N</b>	
<i>Nacelles</i>	آشیانه ها
<i>Nasca Geosytemes</i>	ناسکاژئوسیستمس
<i>Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority</i>	آزمایشگاه انرژی طبیعی اداره ی هاوایی
<i>Net present value</i>	مقدار خالص کنونی
<i>Neutral Point Clamped</i>	نقطه ی خنثی محکم شده
<i>Nogent le Roi</i>	نجنت لروی
<i>Nordex</i>	نردکس
<i>Normal Vector of the Surface</i>	بردار عمود بر سطح
<i>Normand – Britton</i>	نرمند-بریتون
<i>North Sea and Norwegian Sea</i>	دریای شمال و دریای نروژ
<i>Norwegian company Hammerfest Strom</i>	شرکت نروژی همرفست استروم
<i>Nuclear aircraft carrier Charles de Gaulle</i>	ناو هسته ای هواپیمابر چارلز دگالی

*Numerical hindcast models*

مدل های عددی پیش بینی موج

## **O**

*Off shore Wind Energy*

انرژی بادی فراساحلی

*Oil rigs*

سکوهای حفاری نفت

*Oleo-pneumatic*

اولئو-پنوماتیک

*Ondulators*

آندولاتورها

*OpenHydro*

آپن هیدرو

*Organisms*

ارگانیسم ها

*Orifice*

روزنه

*Osmotic*

اسموزی

*Oyster*

اویستر

## **P**

*Paimpol-Brehat*

پایمول-بریهایت

*Paimpol-Bréhat site*

مقر پایمول-بریهایت

*Panchal and Bell hybrid cycle*

چرخه ترکیبی پانچال و بل

*Park transformation*

تبدیل پارک

*Partial discharge*

تخلیه بار جزئی

*Passivation*

اثرناپذیرسازی

*Pelamis*

پلامیس

*Pelton*

پلتون

<i>Periphyton</i>	پریفیتون
<i>Permanent Magnet Sycronus Generator</i>	ژنراتورهای با مغناطیس دائم
<i>Permittivity</i>	ثابت دی الکتریک
<i>Perturb and observe</i>	آشفته کردن و مشاهده
<i>Phytosanitary products</i>	محصولات گیاهی
<i>Pierson-Moskowitz spectrum</i>	طیف پیرسون-مسکوویچ
<i>Piggy back</i>	کولی
<i>Piles</i>	پیل ها
<i>Pitch</i>	پیچ
<i>Plateau</i>	تراز
<i>Plume treatment systems</i>	سیستم های رفتاری ستونی
<i>Pointe de l'Arcouest</i>	پوینت هدل اکوئست
<i>Pollaczek</i>	پلاکزک
<i>Porpoises</i>	پورپوس ها
<i>Pour divers moyen d'employer les vagues de la mer comme moteurs</i>	امواج اقیانوس به عنوان نیروی محرک
<i>Power Law</i>	تخمین های توانی
<i>Power surges</i>	توان ناگهانی
<i>Power Take Off</i>	انرژی توان برخاست
<i>Power train</i>	محرک توان
<i>Préfet</i>	بخشدار
<i>Premolded</i>	پرسی

<i>Proliferation effect</i>	اثر تکثیر
<i>Protected maerl</i>	ناحیه مرجانی محافظت شده
<i>Prototype</i>	نمونه
<i>prototype à terre</i>	نمونه ی اولیه روی خشکی
<i>Public inquiry</i>	تحقیق عمومی
<i>Pulse Width Module</i>	تغییر پهنای پالس

## **R**

<i>Racking</i>	صفحه دنده
<i>Radar Altimeter</i>	ارتفاع سنج های راداری
<i>Radar Diffusometer</i>	تفرق سنج های راداری
<i>Radiometer</i>	تابش سنج
<i>Rance</i>	رنس
<i>Random</i>	تصادفی
<i>Raz de Sein</i>	سین راض
<i>Reactive power</i>	توان غیرفعال، توان بازواکنش
<i>Real-time</i>	زمان واقعی
<i>Rectifiers</i>	یکسوسازها
<i>Regionalization</i>	بخش بندی
<i>Reliability</i>	قابلیت اطمینان
<i>Réseau de Transport de l'Electricité</i>	اپراتور انتقال فرانسه

<i>Resistance to corrosion</i>	مقاومت در برابر خوردگی
<i>Resistance to ageing</i>	مقاومت در برابر پیری
<i>Resulting Generalized Force</i>	نیروی برانگیخته شده ی حاصله
<i>Righting action</i>	عمل قائم کردن
<i>Rim Driven design</i>	طراحی محرک ریم
<i>Rim-driven integral generator</i>	ژنراتور یکپارچه دندان‌ه ای
<i>Risk premium</i>	صرف ریسکی
<i>River Odet estuary</i>	مصب رودخانه ی اودت
<i>Rocker Arm</i>	بازوی فشار
<i>Roise laboratory</i>	آزمایشگاه رویز
<i>Roll</i>	رول
<i>Routine testing</i>	آزمایش روال

## S

<i>Sabella</i>	سابلا
<i>Sacrificial anodes</i>	آندهای محافظ
<i>Safety supply</i>	منبع اضطراری
<i>Sail Cloth</i>	پوشش های دریایی
<i>Saint – Malo</i>	سنت مالو
<i>Saint Remy des lands</i>	سنت رمی دس لاندس
<i>Saint-Venant</i>	سنت ونانت

<i>Salts of tributyltin</i>	نمک های تریبوتیلتین
<i>Sandwiched materials</i>	مواد فشرده شده
<i>Savonius turbines and the paddle wheel</i>	توربین های ساونیوس و چرخ پره دار
<i>Scatterometers</i>	تفرق سنج ها
<i>SCHNEIDER ELECTRIC</i>	اشنایدر الکتریک
<i>Scope</i>	اسکوپ
<i>Screens</i>	جداره ها
<i>Scroby Sands</i>	اسکروبی سندز
<i>SeaFlow</i>	سیفلو
<i>SeaGen</i>	سیژن
<i>Sea kale</i>	کلم دریایی
<i>Sea-keeping</i>	دریامانی
<i>Sea of Okhotsk</i>	دریای اختسک
<i>Sea squirts</i>	سرنگ های دریایی
<i>Seaworthiness</i>	قابلیت دریانوردی
<i>Self-elevating barge</i>	بارج بالابر
<i>Self-fluxing machines</i>	ماشین های خودالقایی
<i>Semi-submersible</i>	سکوهای نیمه مغرق
<i>Serial</i>	سریالی
<i>Service Hydrographique et Océanographique de la Marine</i>	خدمات هیدروگرافی و اقیانوس شناسی دریایی
<i>Setup</i>	نصب



<i>Scroby Sands (UK)</i>	اسکوربی سندز
<i>Scouring</i>	فرسایش
<i>Shearing</i>	برش
<i>Shed</i>	پوسته
<i>Shelknuoff</i>	شلکناف
<i>Shunt-type</i>	نوع انشعابی
<i>Signaling buoys</i>	گوی های شناور علامت دهی
<i>Significant wave height</i>	ارتفاع عمده ی موج
<i>Silt</i>	گِل
<i>Single-effect emptying cycle</i>	چرخه تخلیه تک اثره
<i>Sintering</i>	سنترینگ
<i>Snubbers and saturable inductors</i>	اسنابرها و سلف های اشباع پذیر
<i>Société d'Etudes pour l'Utilisation des Marées</i>	انجمن مطالعه جزر و مدها
<i>Speed Mutiplier</i>	تقویت کننده سرعت
<i>Spread of Water</i>	انتشار آب
<i>Stall system</i>	سیستم استال
<i>Stand by</i>	یدکی
<i>Statcoms</i>	استاتیکی
<i>Statoil</i>	استاتویل
<i>Step-up transformer</i>	ترانسفورماتور فزاینده

<i>Stingray</i>	استینگری
<i>Stockes development</i>	بسط استوکس
<i>Stockes model</i>	مدل استوکس
<i>Stops</i>	موانع
<i>Storm surges</i>	امواج طوفان
<i>Straflo</i>	استرافلو
<i>Straining Force</i>	نیروی کرنشی
<i>Stress cone</i>	مخروط تنشی
<i>Submerged Sabella</i>	سیبای مستغرق
<i>Sub-Staions</i>	ایستگاه های فرعی
<i>Surface-piercing section</i>	بخش نفوذ به سطح
<i>Surge</i>	سرج (حرکت جلو و عقب)
<i>Sway</i>	سوی (حرکت چپ و راست)
<i>Swaying movement</i>	حرکت بالا و پایین رفتن
<i>Swell energy</i>	انرژی خیزآب
<i>Swell energy convertor</i>	مبدل انرژی خیزآب
<i>Switch</i>	تعویض
<i>Synchronous generator</i>	ژنراتور سنکرون
<i>Synchronous reactance</i>	راکتانس همگام (سنکرون)
<i>Synoptic statistical distributions</i>	توزیع آماری همدید (سینوپتیک)
<i>Synthetic aperture radars</i>	رادارهای دهانه

**T**

<i>Tails of distributions</i>	دنباله های توزیع
<i>Taxe générale sur les activités polluantes</i>	مالیات عمومی بر فعالیت های آلوده سازی
<i>Tension Leg Platform</i>	سکوی پایه کشتی
<i>Temporal</i>	گذرا
<i>Temporal domain</i>	ناحیه ی گذرا
<i>Tendons</i>	میله کشش
<i>Tension leg platform</i>	سکوی پایه کشتی
<i>The Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ</i>	آرشیو ملی داده های موج در جای مناسب
<i>The Comité des Pêches</i>	کمیته شیلات
<i>The École Centrale de Nantes</i>	دانشگاه مرکزی نانت
<i>The Institut d'Excellence dans le domaine des Energies Décarbonées</i>	انجمن مزیت انرژی بدون کربن (IEED)
<i>The Mini-OTEC Project</i>	پروژه ی کوچک OTEC
<i>The National Renewable Energy Plan of Action</i>	عملیات انرژی تجدیدپذیر ملی
<i>The order of truncation <math>n</math></i>	مرتبه ی برش $n$
<i>The Race Tidal Power Station</i>	ایستگاه برق جزر و مدی رنس
<i>Thermocline</i>	ترموکلاین
<i>Thermohaline</i>	دماشوری
<i>The Van der Hoven spectrum</i>	طیف وندروان

<i>Thiosulfate</i>	تیوسولفات
<i>Thyristors</i>	تریستورها
<i>Thulweg</i>	خط القعرها
<i>Tidal Electric Company</i>	شرکت تایدل الکتریک
<i>Trade Winds</i>	بادهای شمال شرقی
<i>Transients</i>	گذار
<i>Tripod/quadripd</i>	سه پایه ها/چهارپایه ها
<i>Tip Speep ratio</i>	نسبت سرعت رأس
<i>Troposkein</i>	کلاف شکل
<i>Turbines bell curve</i>	منحنی زنگی توربین
<i>Turbo-alternator</i>	توربو-آلترناتور
<i>Two pass</i>	دو مسیره
<i>Tyhoons</i>	طوفان های دریایی
<i>Type testing</i>	آزمایش نوع

## **U**

<i>Uehara cycle</i>	چرخه یوهارا
<i>Umbilical cords</i>	کورد اتصال
<i>Uncertainties</i>	عدم قطعیت ها
<i>Unbalanced effect</i>	اثر نامتوازن کننده
<i>Unidirectional</i>	تک جهته

<i>Unimodal</i>	تک‌نمایی
<i>Upwellings</i>	فرازجوشی‌ها
<i>Upwind or downwind turbines</i>	توربین‌های بالادست یا پایین دست
<i>Ushant</i>	یوشانت
<b>V</b>	
<i>Val de Reuil</i>	وال دِ روئیل
<i>Verdant Power</i>	وردانت پاور
<i>Vermont</i>	ورمانت
<i>Vertical draft</i>	آبخور عمودی
<i>Vertiwind</i>	ورتیویند
<i>Vindeby</i>	ویندبی
<i>Violent and brief squalls</i>	طوفان‌های بحرانی و کوتاه مدت
<i>Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy</i>	انرژی پاک آبی ارتعاشات ناشی از ورتکس
<i>Voltage dips</i>	شیب ولتاژ
<b>W</b>	
<i>Wagon-type</i>	نوع واگن
<i>Wake</i>	گردابی
<i>Water Column</i>	ستون آب
<i>Water treeing</i>	بلوری شدن آب

<i>Wave Action</i>	رفتار موج
<i>Wave Surge</i>	خیز موج
<i>Weibull distribution</i>	توزیع ویبول
<i>Welsh Ground</i>	تالاب ولز گراند
<i>Wet mateable</i>	جفت تر
<i>Winch</i>	بالابر
<i>Winching</i>	وینپینگ
<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>	تحلیل اطلس باد و برنامه‌ی کاربردی
<i>Wind Power Monthly</i>	مجله ماهانه توان بادی
<i>Wind rush</i>	ازدحام باد
<i>Wind Vane</i>	بادنما
<i>Wing-tip vortex</i>	ورتکس قوس دار
<i>World Ocean Atlas</i>	اطلس اقیانوس های جهان
<i>Wound rotor</i>	روتور لغزان

## **Y**

<i>Yaw</i>	یاو
------------	-----

## **Z**

<i>Zero sequence</i>	رشته صفر
----------------------	----------

*ZNIEFF*

مناطق طبیعی باجاذبه ی بوم شناختی  
جانوران و گیاهان





### لیست نویسندگان

*Hamid Ben AHMED*  
*SATIE-CNRS*  
*ENS Cachan – Bretagne*  
*Rennes*  
*France*  
*Pierre ARGAUT*  
*CIGRE*  
*Héricy*  
*France*  
*Jacques André ASTOLFI*  
*IRENAV*  
*Ecole Navale*  
*Brest*  
*France*  
*Judicaël AUBRY*  
*SATIE-CNRS*  
*ENS Cachan – Bretagne*  
*Rennes*  
*France*  
*Cédric AUVRAY*  
*DCNS*  
*Brest*  
*France*

*Aurélien BABARIT*  
*Laboratoire de mécanique des*  
*fluides*  
*CNRS*  
*Ecole Centrale de Nantes*  
*France*  
*Seddik BACHA*  
*G2ELab – CNRS*  
*Joseph Fourier University*  
*Grenoble*  
*France*  
*Agnès BARILLIER*  
*Centre d'ingénierie hydraulique*  
*EDF*  
*Le Bourget du Lac*  
*France*  
*Mohamed BENBOUZID*  
*Laboratoire brestois de*  
*mécanique*  
*et des systèmes*  
*IUT de Brest*  
*France*  
*Julian BERROU*  
*DCNS*  
*Nantes*  
*France*

*Guy BESLIN*  
*Production d'électricité France*  
*GDF Suez*  
*Paris-La Défense*  
*France*  
*Thierry BOUCHET*  
*DCNS*  
*Nantes*  
*France*  
*Aurélien BOUHIER*  
*DCNS*  
*Nantes*  
*France*  
*Pierre BRUN*  
*Centre d'ingénierie hydraulique*  
*EDF*  
*Le Bourget du Lac*  
*France*  
*Jean Frédéric CHARPENTIER*  
*IRENAV*  
*Ecole Navale*  
*Brest*  
*France*  
*Alain CLÉMENT*  
*Laboratoire de mécanique des*  
*fluides*  
*CNRS*  
*Ecole Centrale de Nantes*  
*France*  
*Chantal COMPÈRE*  
*IFREMER*  
*Brest*  
*France*  
*Jacques COURAULT*  
*Independent consultant*  
*Veneux-les-Sablons*  
*France*

*Brayima DAKYO*  
*GREAH*  
*University of Le Havre*  
*France*  
*Peter DAVIES*  
*IFREMER*  
*Brest*  
*France*  
*Vincent DE LALEU*  
*Marine & Offshore Wind Energy*  
*R&D UK Centre*  
*EDF R&D*  
*London*  
*UK*  
*Michel GAUTHIER*  
*Club des Argonautes*  
*France*  
*Brice HERMANT*  
*DCNS*  
*Nantes*  
*France*  
*Virginie LELARGE*  
*DCNS*  
*Lorient*  
*France*  
*Mohamed MACHMOUM*  
*IREENA*  
*Polytech 'Nantes*  
*Saint-Nazaire*  
*France*  
*Thierry MAITRE*  
*LEGI – CNRS*  
*ENSE3*  
*Grenoble*  
*France*  
  
*Jean-Pierre MAZÉ*  
*ACTIMAR*  
*Brest*  
*Hakim MOUSLIM*  
*Laboratoire de mécanique des*  
*fluides*  
*CNRS*  
*Ecole Centrale de Nantes*

---

<i>France</i>	<i>Michel PAILLARD</i>
<i>Bernard MULTON</i>	<i>IFREMER</i>
<i>SATIE-CNRS</i>	<i>Brest</i>
<i>ENS Cachan – Bretagne</i>	<i>France</i>
<i>Rennes</i>	<i>Marc PREVOSTO</i>
<i>France</i>	<i>IFREMER</i>
<i>Raymond NERZIC</i>	<i>Brest</i>
<i>ACTIMAR</i>	<i>France</i>
<i>Brest</i>	<i>Jean-Marc ROUSSET</i>
<i>France</i>	<i>Laboratoire de mécanique des</i>
<i>Cristian NICHITA</i>	<i>fluides</i>
<i>GREAH</i>	<i>CNRS</i>
<i>University of Le Havre</i>	<i>Ecole Centrale de Nantes</i>
<i>France</i>	<i>France</i>
<i>Gérard NIHOUS</i>	<i>Jacques RUER</i>
<i>University of Hawaii</i>	<i>SAIPEM</i>
<i>Honolulu</i>	<i>Saint-Quentin en Yvelines</i>
<i>USA</i>	<i>France</i>
<i>Michel OLAGNON</i>	<i>Daniel ROYE</i>
<i>IFREMER</i>	<i>G2ELab – CNRS</i>
<i>Brest</i>	<i>ENSE3</i>
<i>France</i>	<i>Grenoble</i>
	<i>France</i>
	<i>Laurent TERME</i>
	<i>EDF</i>
	<i>Centre d'ingénierie hydraulique</i>
	<i>Le Bourget du Lac</i>
	<i>France</i>

# Handbook

# Marine Renewable Energy

by : Bernard Multon



Translated by:

Dr. Amin Najafi

Hashem Nowruzi

Aliasghar Moghaddas

