

# نیروگاه هسته ای



## فهرست مطالب

### عنوان

### صفحه

مقدمه .....	۱
<b>فصل اول: مبانی راکتورهای هسته ای</b>	
<b>بخش اول: فیزیک اتمی و هسته ای:</b>	
اتم و هسته: .....	۵
ایزوتوپ ها: .....	۵
واکنشهای هسته ای .....	۶
واکنش زنجیره ای .....	۸
دسته بندی انواع راکتورها: .....	۹
چرخه نوترون در راکتورهای حرارتی:	
.....	۱۰
<b>بخش دوم: اصول فیزیکی ساختمان راکتورهای هسته ای:</b>	
تولید برق: .....	۱۳
راکتورهای برق هسته ای: .....	۱۶
راکتورهای آب سبک: .....	۱۷
راکتورهای آب تحت فشار .....	۲۱
راکتورهای آب جوشان: .....	۲۴
راکتورهای آب سنگین: .....	۲۵
راکتور کاندور: .....	۲۵
راکتور آب سنگین مولد بخار: ..	۲۶
راکتور کند شونده با گرافیت: ..	۲۶

- راکتورهاي ماگنوس: ..... ۲۷
- راکتور پيشرفت خنك شونده با گاز ۳۰
- راکتورهاي سريع زاینده: ..... ۳۰

## عنوان

### صفحه

#### **فصل دوم: مباني نیروگاههاي هسته اي:**

- نیروگاه هسته اي: ..... ۳۳
- راکتور هسته اي: ..... ۳۵
- انرژی هسته اي: ..... ۳۸

#### **فصل سوم: کنترل راکتور**

##### **بخش اول: اثرهاي سيستم کنترل راکتور**

- شکل زهر کنترل: ..... ۴۲
- سیستم هاي کنترل در راکتور ..... ۴۷
- بحراني کردن راکتور ..... ۴۹

##### **بخش دوم: کارگرداني راکتورها**

- زهرهاي حاصل از شکافت: ..... ۵۱
- تشکیل محصولات شکافت: ..... ۵۳

#### **فصل چهارم: ايمني هسته اي و حفاظت در برابر**

##### **تابش:**

- ایمني هسته اي: ..... ۵۵
- حفاظت در برابر تابش ..... ۵۶

#### **فصل پنجم: مواد مورد نیاز در راکتورهاي هسته**

##### **اي:**

## بخش اول: سوخت:

۶۰ ..... اورانیوم:

۶۰ ..... پلوتونیوم:

## بخش دوم:

۶۲ ..... سوخت هسته ای:

۶۲ ..... غنی سازی اورانیوم:

## عنوان

### صفحه

۶۳ ..... آبشار

۶۳ ..... فاکتور جداسازی:

۶۴ ..... قدرت جداسازی:

## بخش سوم:

۶۵ ..... روش های غنی سازی:

۶۵ ..... روش الکترومغناطیسی:

۶۶ ..... روش پخش گازی:

۶۹ ..... روش سانتریفوژ:

۷۰ ..... فرایند جت:

۷۱ ..... روش غنی سازی با لیزر:

۷۲ ..... هزینه غنی سازی:

۷۵ ..... ذخایر جهانی اورانیوم:

## فصل آخر: نتیجه گیری

### منابع و مأخذ

### اصطلاحات انگلیسی

## مقدمه :

برنامه استفاده از انرژی هسته برای تولید برق در ایران در سال ۱۳۵۳ آغاز شد و پس از مشکلات ناشی از جنگ تحمیلی، لزوم بازنگری برنامه های قبلی و مسائل اقتصادی که کشور ما با آن روبرو است دوباره در صدر برنامه های دولت قرار گرفته است. از طرف دیگر استفاده از انرژی هسته ای در جهان و ساخت نیروگاههای هسته ای در ۴۰ سال گذشته بطور پیوسته ادامه داشته و در حال حاضر ۱۷٪ از انرژی برق در جهان از انرژی هسته ای تأمین می شود. کشورهای در حال توسعه، چه آنهایی که منبع انرژی دیگری در اختیار ندارند و چه کشورهایی که همراه با منابع دیگر می خواهند از این تکنولوژی جدید نیز برای تولید انرژی برق استفاده کنند، با مسائل خاصی مواجه هستند. کمبود سرمایه، فقدان نیروی

انسانی کاردان، ضعف ارگان های تشکیلاتی و مقرراتی، عدم آمادگی صنایع محلی برای مشارکت و بالاخره موضوعات سیاسی در رابطه با انتقال دانش فنی و نظام منع گسترش سلاح هسته ای مهمترین موضوعات در رابطه با ساخت و بهره برداری از نیروگاههای هسته ای است.

پیش بینی مصرف برق، لزوم توسعه وسیع ظرفیت تولید موجود را نشان می دهد با توجه به اهمیت ذخیره انرژی و بهبود بازدهی استفاده از آن، انرژی هسته ای به عنوان گزینه ای اجتناب ناپذیر با نقشی مهم در برآوردن نیاز آینده انرژی برق در جهان تجلی می کند.

نیازهای فزاینده جهان به انرژی همراه با مسایل محیطی ناشی از گسترش روزافزون باکارگیری منابع سوخت فسیلی و نیز کاهش سریع این منابع، عواملی هستند که احتمالاً خط مشی های آتی انرژی

در کشورهای عضو آژانس را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

در منابع انگلیسی زبان بخصوص آمریکایی عبارت nuclear power یا قدرت هسته‌ای بجای انرژی هسته‌ای بکار می‌رود. چون معنای واقعی این عبارت انرژی هسته‌ای است و در ایران نیز رایج‌تر است، در این جا عبارت nuclear power به عبارت انرژی هسته‌ای بکار می‌رود.

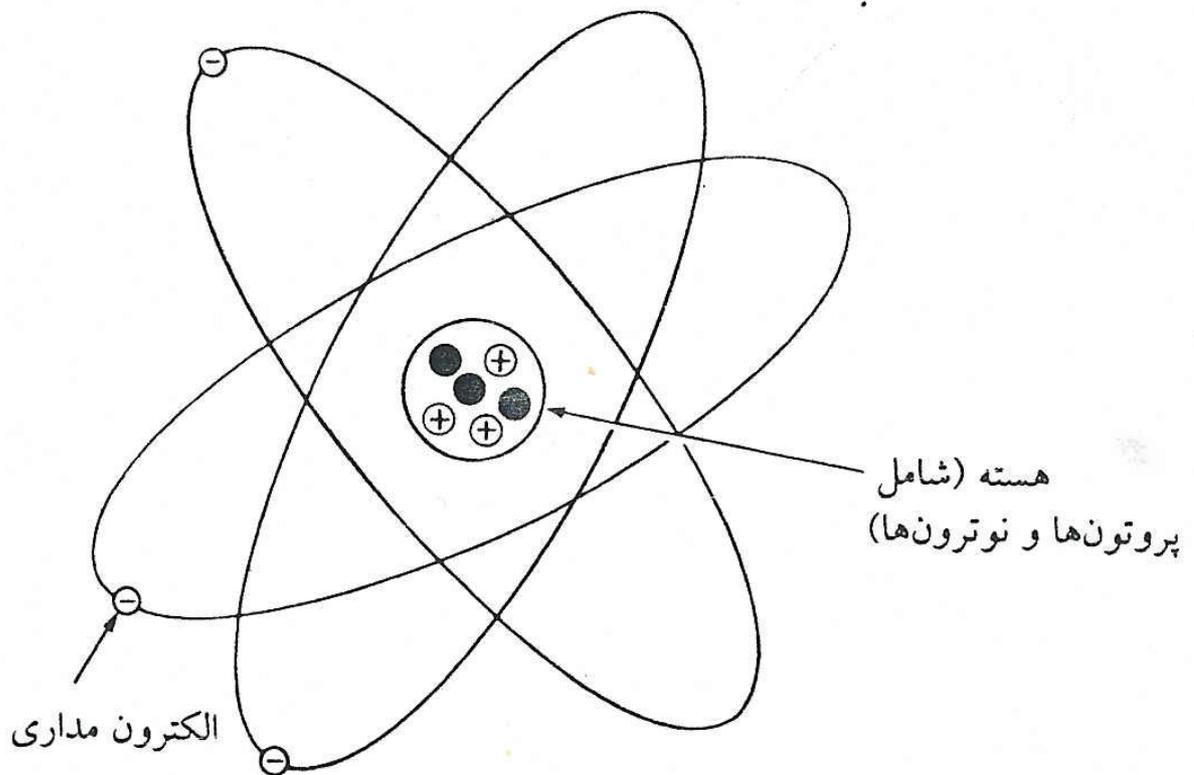
## فصل اول :

مبانی رآکتورهای هسته ای

## مبحث اول : فيزيك اتمى و هسته اى

- واكنشهاي هسته اى، پرتوزايى و ...

اين نوشته ها و اطلاعات پيرامون نظريه و نحوه كار رآكتورهاي هسته مى باشند.



ساختمان اتم

## اتم و هسته:

اتمهای تمام عناصر که زمانی که تصور می شد ذرات بنیادی طبیعت باشند، متشکل از سه ذره بنیادی ترپروتون، نوترون، و الکترون اند. آرایش این ذرات در درون اتم، به ویژه تعداد پروتون ها و الکترون ها، ماهیت شیمیایی عنصر را تعیین می کند. اتم از هسته ای تشکیل شده است، که تمام پروتون های با بار مثبت و نوترون های بدون بار در آن گرد هم آمده اند، و تعدادی الکترون با بار منفی، در مدارهایی حول آن می چرخند.

## ایزوتوپ ها:

اتمهایی که دارای عدد اتمی،  $Z$ ، یکسان ولی عدد نوترونی متفاوت  $N$  می باشند، ایزوتوپ های عنصر با عدد اتمی  $Z$ ، نامیده می شوند، تمام عناصر

کدام دارای یک یا چند ایزوتوپ پایدار هستند که به طور طبیعی یافت می شوند و سایر ایزوتوپ ها که پرتوزا یا ناپایدار هستند را می توان به روشهای مصنوعی تولید کرد.

خواص شیمیایی ایزوتوپ های مختلف یک عنصر شبه هم است، که عجیب هم نیست زیرا پیوندهای شیمیایی بین الکترون ها برقرار اند.

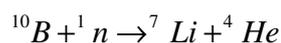
به عنوان مثال علامت  $^{16}_8O$  ایزوتوپی از اکسیژن را نشان می دهد که هسته آن دارای ۸ پروتون و ۸ نوترون است. هسته آن دارای ۸ پروتون و ۸ نوترون است. هسته ایزوتوپ  $^{17}_8O$  دارای ۸ پروتون و ۹ نوترون است.

هیدروژن عنصر مهمی در مهندسی هسته ای است. هیدروژن طبیعی متشکل از دو ایزوتوپ، ۹۸۵ و ۹۹

هیدروژن به نام تریتم هم وجود دارد که پرتوزاست.

### واکنشهای هسته ای:

تعداد واکنشهای هسته ای ممکن بسیار زیاد است، اما فقط تعداد کمی از آنها مورد توجه ما هستند. این واکنشها توسط برهم کنش ذرات سبک از قبیل نوترون ها، پروتون ها یا دوترون ها (هسته های دوتریم)، یا تابش گاما با هسته های اتمی پدید می آیند به عنوان مثال، می توان واکنشی را در نظر گرفت که در مهندسی هسته از اهمیت زیادی برخوردار است و از برهم کنش بین نوترون های انرژی- پایین و بور ۱۰ نتیجه می شود:



۱- بقای نوکلئون ها. تعداد کل نوکلئون ها قبل و بعد از واکنش ثابت است.

۲- بقای بار الکتریکی، حاصل جمع بارهای کل ذرات قبل و بعد از واکنش یکسان است.

۳- بقای تکانه خطی، چون در حین انجام واکنش هیچ نیروی خارجی اعمال نمی‌شود، تکانه ذرات قبل و بعد از واکنش ثابت است.

۴- بقای جرم و انرژی، اصل انیشتین نافذ است، و هر اتلاف جرمی در طی واکنش توأم با آزاد شدن انرژی است، یا بالعکس. حاصل جمع جرم و انرژی قبل و بعد از واکنش ثابت است.

### **واکنش زنجیره ای و اصول رآکتورهای هسته ای:**

دستیابی به دستگاهی که در آن یک واکنش کنترل

به صورت کنترل شده آزاد و مصرف می شود. دستگاہی که در آن واکنش زنجیره ای رخ می دهد رآکتور هسته ای نامیده می شود و بسته به نوع مواد ساختمانی آن و انرژی نوترون هایی که باعث شکافت می شوند، رآکتورها به انواع مختلفی تقسیم می شوند. بعضی راکتورهای هسته ای برای حصول به واکنش زنجیره ای نیازمند اورانیوم سختی شده هستند، از این رو فرآیند های غنی سازی را به اختصار توضیح خواهم داد:

کار بست بهینه منابع اورانیوم جهان برای تولید انرژی، یکی از جنبه های مهم نیروی هسته ای است، و بررسی این موضوع، به تشریح انواع راکتورها و چرخه های سوخت، که باعث خواهند شد نه تنها اورانیوم، بلکه توریسم نیز به عنوان

## واکنش زنجیره ای:

شرط لازم برای یک واکنش زنجیره ای پایدار و خود نگهدار آن است که دقیقاً یکی از نوترون های تولید شده در یک شکافت، منجر به وقوع شکافت دوم، و یکی از نوترون های این نسل، منجر به شکافت سوم، و الا آخر، شود. در چنین واکنشی، چگالی نوترون و آهنگ شکافت ثابت باقی می ماند. این شرط را می توان با ضریب تکثیر،  $K$ ، که به صورت نسبت تعداد نوترون ها در یک نسل به تعداد نوترون های نسل پیش از آن تعریف می شود، بیان کرد.

وقتی این ضریب دقیقاً برابر ۱ باشد، شرط واکنش زنجیره ای پایدار برقرار است و اصطلاحاً گفته می

زنجیره ای واگرا وجود دارد که طی آن چگالی نوترون و آهنگ شکافت، احتمالاً با یک آهنگ انفجاری نظیر آنچه در برب اتمی رخ می دهد، زیاد می شوند. اگر ضریب تکثیر کوچکتر از ۱ باشد، رآکتور «زیر بحرانی» است و واکنش زنجیره ای کاهش یافته و نهایتاً از بین می رود. رآکتور هسته ای، مجموعه ای است از مؤلفه های بسیاری که، در این مرحله، باید به چند مورد از مهم ترین آنها اشاره کنیم. مهم ترین قسمت هر رآکتور، سوخت است که شکافت در آن رخ می دهد و انرژی، به شکل حرارت، آزاد می شود. در حال حاضر اورانیوم بیشترین کاربرد را به عنوان سوخت هسته ای دارد. اما اهمیت ایزوتوپ  $^{239}\text{Pu}$  هم رو به افزایش است.

پرتوزاي شكافت مورد نياز هستند. همچنين در تمام رآكتورها، جز آنهايي كه در توان خيلي پايين كار مي كنند، خنك كننده اي لازم است كه با حرکت چرخشي و گذر از قلب رآكتور، حرارت آزاد شده در سوخت را به مبادله كن هاي گرمائي خارجي منتقل مي كند.

### **دسته بندي انواع رآكتورها:**

انواع مختلف رآكتورهايي را كه تا كنون در جهان ساخته شده اند مي توان خلاصه كرد و آنها را بر حسب نوع سوخت و مواد ساختاري ديگر، از جمله كند كننده، آنها دسته بندي نمود. سوخت اورانيوم را به شكلهاي مختلفي مي توان در رآكتور بكار برد. يك امكان، اورانيوم خالص است كه فلزي

شکل ناشی از تغییر فاز است. راه بدیل و خیلی متداول تر کاربرد اورانیوم، استفاده از اکسید اورانیوم (UO<sub>2</sub>) است، که پودری است که می توان آن را به صورت ساچمه هایی در آورد و در لوله هایی از جنس فولاد زنگ نزن یا آلیاژ زیر کو نیم انباشت و به شکل میله های سوخت در آورد. اکسید اورانیوم دارای نقطه ذوب بالایی، حدود 2700c، است و رآکتورهایی که این نوع سوخت را مصرف می کنند می توانند در دماهای سوخت بالاتری نسبت به رآکتورهایی که اورانیوم فلزی مصرف می کنند کار کنند.

### چرخه نوترون در رآکتورهای حرارتی:

در محاسبات دقیق ضریب تکثیر هر رآکتور با تمام

صورت جذب و خواه به صورت فرار از رآكتور،  
كاملاً به حساب آینده اگر بخشهاي مختلف عمر يك  
نوترون را جداگانه بررسی کنیم این کار ساده  
تر می شود، و ما این روش را بر يك رآكتور  
حرارتي با ابعاد متناهي که با اورانیوم می  
شود، و ما این روش را بر يك رآكتور حرارتي با  
ابعاد متناهي که با اورانیوم طبيعي یا غني شده  
تغذیه می شود اعمال می کنیم. که بدین شکل نشان  
داده شده است.

انواع اصلي رآكتورهاي هسته اي

کشور سازنده	نام	خنک کننده	کند کننده	سوخت
آمریکا	راکتور آب تحت فشار (PWR)	آب (نا-جوشان)	آب	اکسید اورانیم (کم غنا)
آمریکا	راکتور آب جوشان (BWR)	آب (جوشان)	آب	اکسید اورانیم (کم غنا)
بریتانیا	راکتور با خنک کننده گازی (GCR)	دی اکسید کربن	گرافیت	اورانیم (طبیعی)
بریتانیا	راکتور با خنک کننده گازی پیشرفته (AGR)	دی اکسید کربن	گرافیت	اکسید اورانیم (کم غنا)
بریتانیا، آلمان آمریکا	راکتور با خنک کننده گازی دما-بالا (HTGR)	هلیوم	گرافیت	اکسید اورانیم (کم غنی)
کانادا	راکتور آب سنگین تحت فشار (PHWR)	آب سنگین (نا-جوشان)	آب سنگین	اکسید اورانیم (طبیعی)
بریتانیا	راکتور مولد بخار با خنک کننده آب سنگین (SGHWR)	آب (جوشان)	آب سنگین	اکسید اورانیم (کم غنا)
روسیه	راکتور آب جوشان با کند کننده گرافیت (RBMK)	آب (جوشان)	گرافیت	اکسید اورانیم (کم غنا)
کشورهای مختلف	راکتور سریع زاینده	سدیم مایع	ندارد	اکسید اورانیم + اکسید پلوتونیم

فرض کنید در اثر شکافت حرارتی  $^{235}\text{n}$  ،  $\text{n}$  نوترون با انرژی متوسط  $2\text{mev}$  به وجود آیند پیش از اینکه این نوترون ها به انرژیهای زیر  $1\text{Mev}$  کند بشوند، احتمال دارد که چندی از آنها باعث شکافت در  $^{238}\text{u}$  شوند، که این شکافتها را شکافت سریع می نامیم. ضریب شکافت سریع،  $\epsilon$  را به صورت زیر تعریف تعداد نوترون هایی که به ازای هر نوترون حاصل از شکافت حرارتی به زیر  $1\text{mev}$  می رسند. اکنون،  $\epsilon\text{n}$  نوترون به زیر  $1\text{mev}$  می رسند و کند شدن آنها، عمدتاً در اثر برخوردهای پراکندگی با کند کننده. ادامه می یابد. در خلال فرآیند کند شدن، بعضی نوترون ها به خارج از رآکتور نشت می کنند، و بعضی در تشدیدهای  $^{238}\text{u}$  گیر می افتند.

## بخش دوم : اصول فیزیکی ساختمان رآکتورهای هسته

### ای

منظور از نیروگاه، چه نیروگاه هسته ای، چه نیروگاه با سوخت فسیلی (نفت یا زغالسنگ) مرکزی است برای تولید برق، پیش از آنکه مطالعه تفصیلی خود را درباره نیروگاه هسته ای آغاز کنیم مروری بر چگونگی تولید برق و وجوه مشابه و متفاوت نیروگاههای هسته ای و سوخت فسیلی خواهیم کرد. این مرور ما را با اجزای اصلی نیروگاه هسته ای آشنا خواهد کرد.

### تولید برق:

هدف از ایجاد نیروگاه هسته ای، مانند هر مرکز مولد برق دیگر تولید برق است. تولید برق کار

يك اتومبيل را زده است. در هر دوي اينها از انرژي الكتريكي ذخيره شده در يك باتري در موقع لزوم استفاده مي شود. ولي يك دستگاہ مولد برق را نمي توان از تعداد زيادي باتري متصل به هم تشكيل داد. دو دليل بسيار مهم وجود دارد كه چرا اين كار نمي تواند صورت پذيرد:

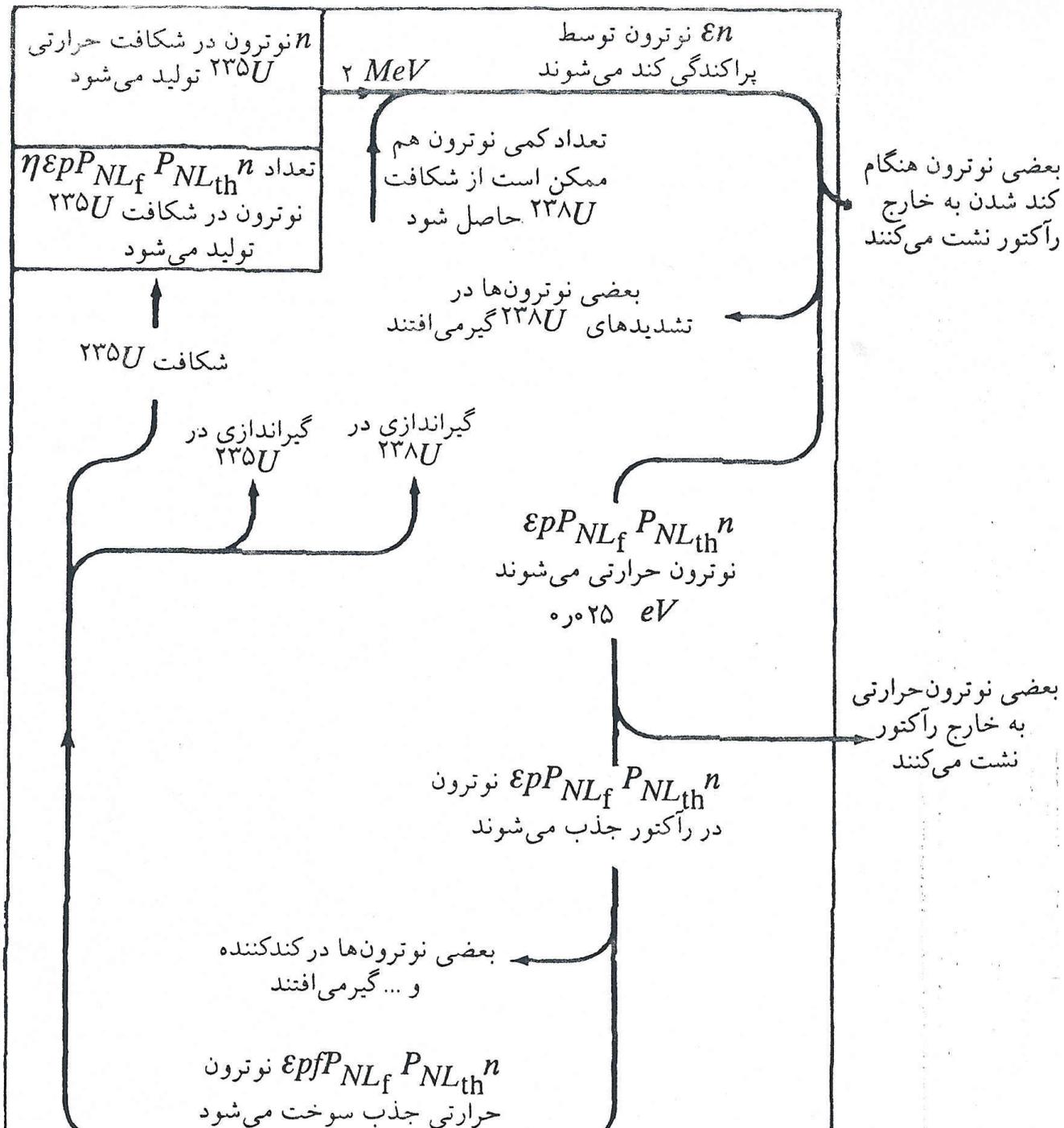
نخست اينكه باتري ها مقدار انرژي الكتريكي محدودی دارند و نمي توانند بدون آنكه مرتب پر شوند مدت طولاني دوام داشته باشند. علاوه بر اين براي پر کردن آنها نياز به منبع انرژي الكتريكي ديگري است. دوم اينكه باتريها نمي توانند انرژي الكتريكي به مقدار زياد در زمان كوتاهي تهيه كنند.

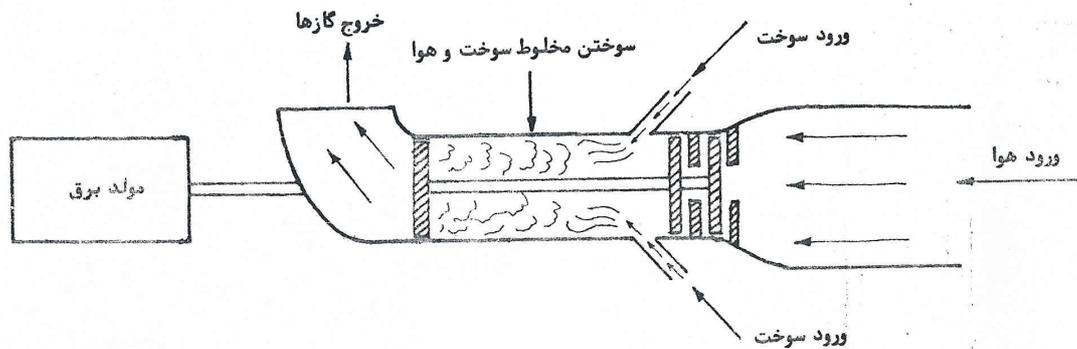
اگر باتري نمي تواند منظور يك مركز توليد برق

برق مورد نیاز خود بکار می‌برند. می‌دانید  
اساس کار یک دستگاه مولد برق (ژنراتور) اعم  
از مولد جریان مستقیم یا متناوب، حرکت نسبی یک  
هادی در میدان مغناطیسی است. ولی مولد یک عیب  
دارد و آن این است که مانند باتری نمی‌توانند  
انرژی الکتریکی ذخیره کنند، به عبارت دیگر برقی  
که مولد تولید می‌کند باید در حین تولید مصرف  
شود. در همه مولدها یک چیز مشترک است: همه آنها  
میان به منبع قدرت دارند تا استوانه حامل  
هادیها را، یا آهنربای مولد میدان مغناطیسی  
را بچرخاند یعنی حرکت مورد استفاده انواع مختلف  
دارند. چهار نوع از آنها که اغلب مورد استفاده  
قرار می‌گیرند عبارتند از توربین آبی، توربین  
بخار، توربین گازی، و موتورهای درون ساز (که

از توربین آبی استفاده می شود استفاده از  
توربین گازی برای بکار انداختن مولدهای برق  
روزافون است. اساس کار توربین های گازی مانند  
کار موتورهای جت است، سوخت می سوزد و گازهای  
حاصل از سوختن در توربین منبسط می شود.

## چرخه نوترون در راکتور حرارتی





### طرح ساده يك توربین گازی

توربین بخار وسیله متداولتری برای تأمین توان مکانیکی جهت چرخاندن القاء کن مولد برق در نیروگاه است. تفاوت يك نیروگاه بخار با نیروگاه های دیگر در چگونگی تولید بخار است.

راکتورهای برق هسته ای:

واکنش شکافت هسته آزاد شده اند در کند کننده سرعت خود را از دست می دهند تا به دمایی نزدیک به دمایی کند کننده برسند. بنابراین نوترونها در تعادل حرارتی با کند کننده قرار دارند. نوترونهاي حرارتي در مقایسه با نوترونهاي سریع، با احتمال بسیار بیشتری می توانند واکنش های شکافت بیشتری را القاء کنند، بنابراین این امکان استفاده از سوخت طبیعی یا شاید سوختهایی که تا حدود بسیار کمی غنی شده اند، فراهم می سازد.

این امر با طراحی راکتورهای سریع که در آن واکنش زنجیره ای با نوترونهاي سریع ادامه می یابد، در تضاد است. بنابراین، نیازی به کند کننده نیست اما سوخت مورد استفاده باید دارای

## راكتور آب سبك: (LWR) :

آب سبك،  $H_2O$  يك كندكننده قوي است و به سرعت

نمبره كل		(U <sub>235</sub> )		سخت		راكتورهاي سريعي را كه با شكافت سوخت	
ماه	سال	درصد از كل	انرژی برقی	قدرت كل	تعداد	قدرت كل	تعداد
بهره برداری سبك (تا آخر سال)	بهره برداری سبك (تا آخر سال)						
۷	۲۹	۳۶/۷۲	۲/۱	۶۹۲	۱	۹۳۵	۲
۴	۲۹	۳۶/۷۲	۲/۱	۶۹۲	۱	۳۷۶	۱
۷	۱۴۲	۵۷/۱۸	۴۱/۴	۱۳۴۵	۱	۵۷۱۲	۳
۹	۱۸۹	۴۲/۲۴	۱۸/۰۸	۱۸۰۸	۱	۳۵۳۸	۶
۹	۳۶۹	۱۵/۹۷	۸۷/۵۲	۱۸۷/۵۲	۲	۱۴۹۰۲	۲۱
۵	۴۲	۲۰	۱۲/۸۵	۱۸۲۴	۲	۱۶۴۸	۴
۴	۷۱	۲۸/۱	۱۸/۶۸	۱۸۱/۶۸	۲	۲۳۵۵	۴
۳	۵۳۰	۳۰/۲۹	۱۵۲/۸۰	۱۵۲/۸۰	۲	۲۲۲۸۲	۲۰
۷	۵۳۰	۳۰/۲۹	۱۵۲/۸۰	۱۵۲/۸۰	۲	۲۲۲۸۲	۲۰
۲	۴۶	۴۰/۷۶	۱۴/۱۸	۱۴/۱۸	۲	۱۷۲۹	۴
۱	۰	۰	۰	۰	۲	۲۱۴۶	۲
۱	۷۵۶	۳۳/۹۹	۲۹۸/۲۰	۲۹۸/۲۰	۲	۴۲۳۶۹	۵۳
۶	۲۱۱	۳۵/۷۷	۷۰/۳۳	۳۸۷۰	۵	۹۱۲۰	۱۱
۶	۲۲	۸۳/۴۴	۱۲/۶۷	۱۲/۶۷	۲	۲۳۷۰	۲
۱۱	۹	۵/۱۹	۷/۸۸	۷/۸۸	۱	۵۰۴	۲
۹	۵۱	۴/۷۹	۳/۹۰	۳/۹۰	۱	۱۲۵	۱
۳	۲۵	۰/۵۶	۰/۳۱	۳۰۰	۱	۱۲۵	۱
۶	۰	۱/۷۵	۰/۹۱	۶۵۰	۱	۶۵۰	۱
۶	۵۵۵	۳/۱۰	۳/۸۲	۳۳۷۸	۴	۱۹۸۴۳	۲۵





## راکتور آب تحت فشار: (PWR)

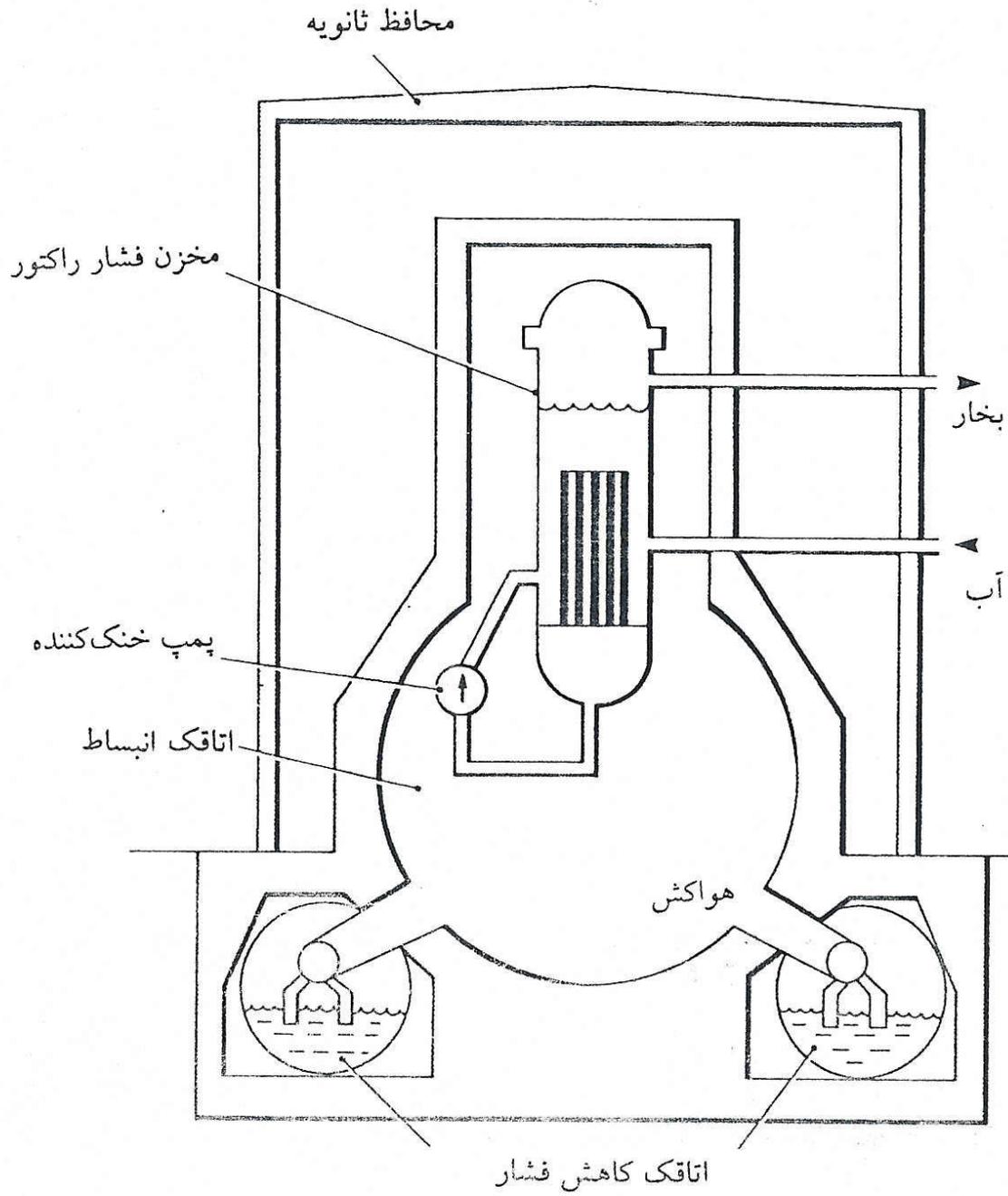
PWR از برگزیدن راکتورهای هسته ای حرارتی در جهان ناشی می گردد. مشخصات اصلی این نوع طراحی عبارت است از چگالی فشرده و بالای توان قلب راکتور که به کمک آن آب با فشار بالا (تقریباً ۱۵۸ بار) اما در دمای نسبتاً پایین پمپ شده و نقش دوگانه کند کنندگی/ خنک کنندگی را ایفا می کند. آب در مدار اولیه به حالت مایع حفظ می شود بجز در افزایش دهنده فشار که بالشتک بخار، امکان تنظیم فشار مدار را بر حسب نیاز با تغییر شرایط اشباع و بوسیله گرم کننده های الکتریکی یا آب فشانها فراهم می سازد.

سطوح داخلی مدار اولیه مستعد خوردگی با آب داغ با خلوص بالا است، و اجزای آن یا از فولاد ضد

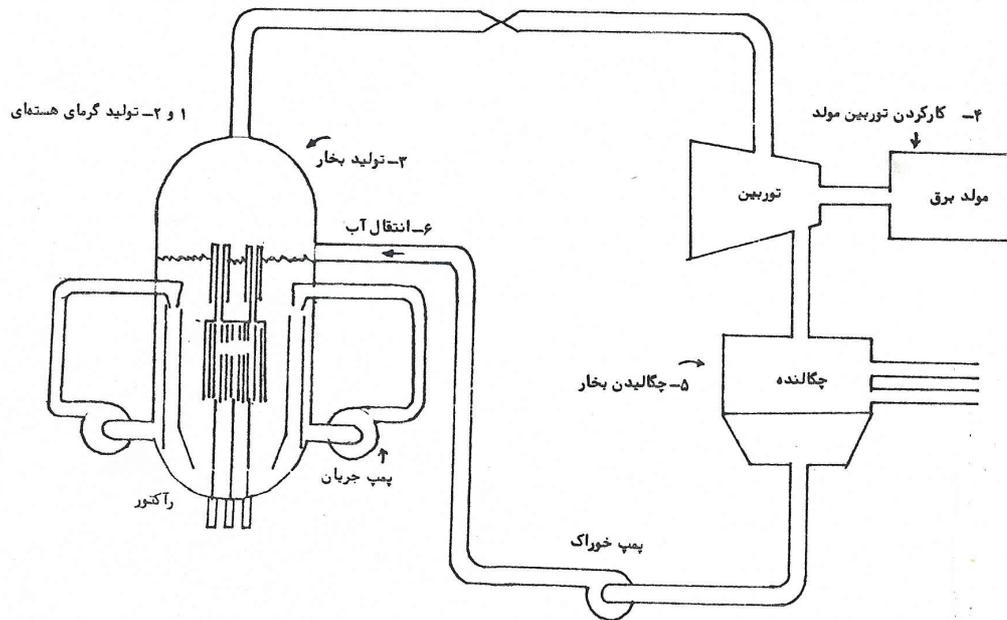
ساخته می شوند.

از شکل صفحه بعد می توان دید که طراحی از نوع

سیکل غیر مستقیم است.



يك ميله سوخت PWR از  $Uo_2$  ساخته شده كه اندكي غني شده است (حدود ۳ درصد). اين سوخت به شكل قرصهاي كلوخه شده درون لوله اي تحت فشار هليم و از جنس زير كالوي، با ابعاد تقريبي  $10\text{mm}$  قطر و  $3/5\text{m}$  طول، كار گذاشته شده است. يك مجموعه سوخت، آرايه مربع شكلي است كه بعنوان نمونه از  $17 \times 17$  ميله سوخت تشكيل شده است. در هر مجموعه، فاصله ها بوسيله تعدادي گريد در طول آرايه حفظ مي شود. يك قلب PWR، توان  $(\text{th})$  GW  $3/5$  نياز به حدود ۲۰۰ مجموعه سوخت،  $100$  تن  $Uo_2$ ، دارد.



طرح ساده راکتور با آب جوشان (B.W.R)

## راکتور آب جوشان (BWR) :

راکتور آب جوشان (BWR) دو تفاوت عمده با راکتور PWR دارد:

- در این راکتور، آب می تواند ضمن عبور از قلب راکتور بجوشد.
- بخار تولید شده مستقیماً به توربین هدایت می شود؛ یعنی، BWR یک طراحی سیکل مستقیم است و به یک مولد بخار واسطه ای نیازی نیست نتیجه اینکه فشار خنک کننده فقط اندکی بالاتر از فشار مورد نیاز توربین است، مثلاً در حدود ۸۰ بار، و درجه حرارت در حد  $300^{\circ}\text{C}$  می باشد فشار پائین تر خنک کننده، به مفهوم گالی توان پائین تری در قلب راکتور می باشد و معمولاً نصف راکتور PWR متقابلاً بزرگتر خواهد بود و با

با این حال، حجم مخزن فشار BWR در مقایسه با یک راکتور PWR از دو برابر هم بیشتر است. دلیل آن هم نیازی است که به جای دادن جدا کننده های بخار و خشک کننده ها در بالای قلب راکتور و تعبیه کردن تعدادی پمپ های جت در فضای بین قلب راکتور و دیوار مخزن، وجود دارد.

## راكتور آب سنگين : (HWR) :

تنها از نقطه نظر متخصص فيزيك هسته اي، استفاده از آب سنگين  $D_2O$  بعنوان يك كند كننده بهتر از استفاده از استفاده از آب سبك يا گرافيت است. زيرا سطح مقطع تسخير نوترون آن بسيار پايين مي باشد. توجه عملي آن اين است كه نفوذ و توزيع نوترون هاي حرارتي در فواصل طولاني و در كند كننده اي از جنس آب سنگين قابل قبول است. بنابراين فاصله گذاري بين سوخت مي تواند بزرگتر باشد كه امكان استفاده از يك مدار خنك كننده جداگانه در طراحي راکتور را فراهم مي سازد.

## راكتور كاندو (PHWR) :

راکتور کاندو و سابقه قابل اعتمادی با ضرایب بار بیش از ۹۰ درصد در دوره های طولانی از خود بجا گذاشته است. با اینحال، گرچه راکتورهای کاندو تقریباً در نصف دوجین از کشورهای مختلف مورد بهره برداری قرار گرفته است، اما تعداد قابل ملاحظه ای از آنها در کانادا واقع شده و در مورد امکان رقابت آن با طرح موفق PWR، چشم انداز امید بخشی بچشم نمی خورد.

### راکتور آب سنگین مولد بخار (SGHWR) :

در اینجا SGHWR بعنوان مثالی که با جدا سازی کند کننده و خنک کننده امکان ایجاد تغییراتی در طرح فراهم شده مطرح می گردد.

تنها راکتور SGHWR در حال بهره برداری، یک

مانند راکتور کاندو کند کننده، آب سنگین است که در يك کالاندريا قرار دارد. با اينحال لوله هاي کالاندريا، لوله هاي فشار هم محور عمودي بوده و خنك کننده از نوع آب سبک است. مانند BWR، خنك کننده مي تواند در قلب راکتور بجوشد و بخار توليد شده توربين را به حرکت وا دارد، بنابراین در اين طرح، واحد جداگانه مولد بخار در راکتور Candu حذف مي شود. لذا SGHWR يك طراحي سيکل مستقيم مي باشد.

### **راکتور کند شونده با گرافيت:**

با يك کند کننده گرافيتي، مي بايستي از يك مايع يا گاز بعنوان خنك کننده استفاده کرد. گرچه راکتورهاي کند شونده با گرافيت و خنك شونده

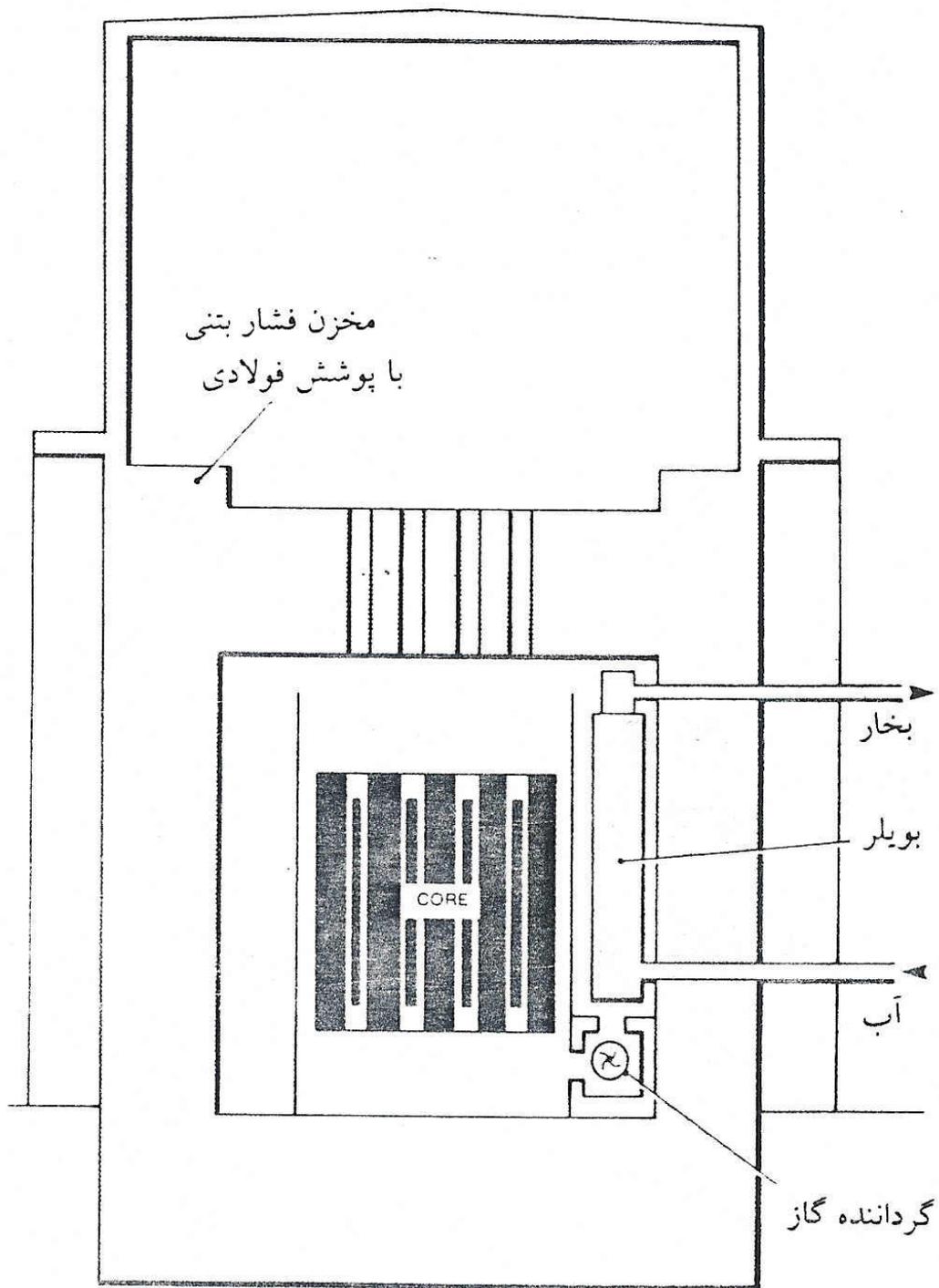
آنهاست.

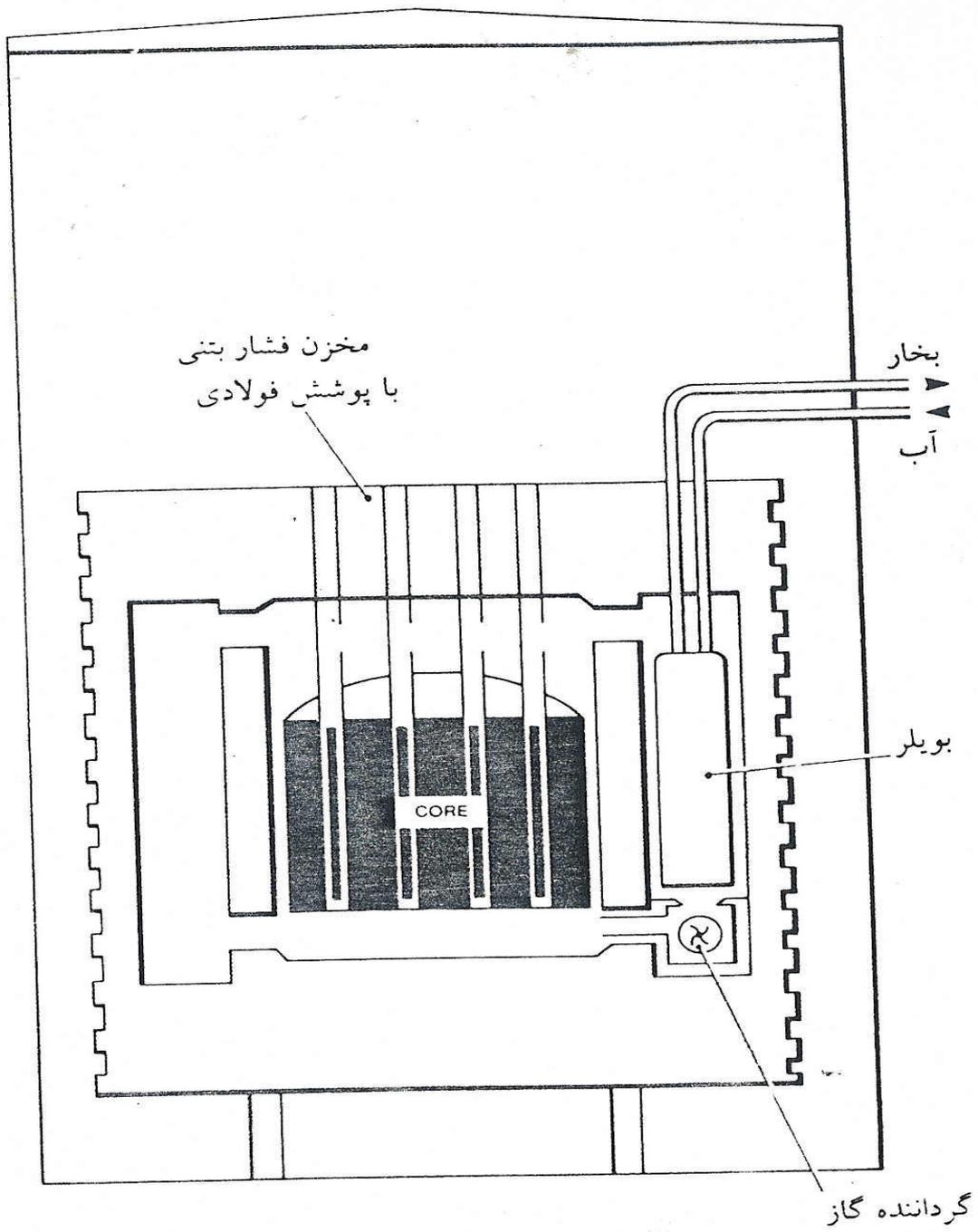
در حالیکه آمریکا و کانادا، به ترتیب در طراحی راکتورهای کند شونده با آب سبک و آب سنگین پیشقدم بوده اند، فرانسه و انگلستان اولین قدمهای خود را در خصوص راکتورهای کند شونده را گرانتیت برداشته و از دی اکسید کربن بعنوان خنک کننده استفاده کرده اند زیرا دی اکسید کربن از نظر شیمیایی نسبتاً بی اثر بوده و جذب نوترون آن نیز پائین می باشد. فرانسه این طراحی را به نفع یک برنامه گسترده PWR کنار گذاشت. اما انگلستان، بسختی درگیر راکتورهای خنک شونده با گاز گردید.

**راکتورهای ماگنوس:**

طبیعی فلزی که در غلافی از آلیاژ منیزیم قرار گرفته استفاده می‌کند. قلب راکتور استوانه‌ای شکل است و از صدها تن بلوک گرافیتی که در آن کانال‌های عمودی به قطر ۱۰۰mm ایجاد شده، ساخته شده است. در این کانال‌ها معمولاً هفت یا هشت عدد از عناصر سوخت، یکی بالای دیگری، انباشته شده است. برای دستیابی به یک سرعت انتقال حرارت دخواه از سوخت به کند کننده، جریان رو به بالای  $Co_2$  تحت فشار بوده و غلاف ماگنوس هم دارای سطحی وسیع به شکل پره‌هایی در طول آن می‌باشد. میله سوخت، در حدود ۲۵mm قطر و ۱m طول دارد.

۹ نیروگاه تجارتي دو قلوي ماگنوس در انگلستان ساخته شده است





## راكتور پيشرفته خنك شونده با گاز (AGR) :

نتيجه چگالي نسبتاً پايين توان و شرايط دما در طراحي ماکنوس، تأسيساتي با سرمايه گذاري اوليه بالا و بهره دهی حرارتي متوسط (در حدود ۳۰ درصد) است. بعلاوه ژنراتورهاي توربين ۶۶۰ مگاواتي «استاندارد» را که در نيروگاههاي زغال سنگي و نفتي بکار مي رودند، نمی توان مورد استفاده قرار داد.

راكتورهاي AGR در دما، فشار و چگالي توان بالاتر يعني  $640^{\circ}\text{C}$ ،  $40\text{ bar}$  و  $3\text{ MW/t}$  عمل مي کند و در نتيجه، قلب متراکم و کم حجم با بهره دهی ۴۰ درصد و استفاده از ژنراتورهاي  $660\text{ MW}$  براي هر راکتور ميسر شده است.

حرارتي شود، صرفنظر کردن از کند کننده و ایجاد واکنش زنجیره اي به وسیله نوترونهاي سريع است. جذابیت این طرح در این ویژگی است که میانگین محصول نوترون در واکنش شکافت با نوترونهاي سريع بیشتر از شکافت با نوترونهاي حرارتي است و بعلاوه تمام سطح مقطع هاي جذب کاهش مي یابد. نوترونهاي «اضافي» مي توانند به ميزاني که بیش از مصرف مواد شکننده براي ادامه واکنش زنجیره اي است، در تبدیل مواد بارور به شکننده، مورد استفاده قرار گیرند. یعنی، «زاینده» سوخت میسر گردیده و نهایتاً در مقایسه با يك راکتور حرارتي، امکان تولید تا حدود ۵۰ برابر انرژی بیشتر به ازاي يك مقدار مشخص سوخت اولیه، بوجود آمد.

راکتور سریع این وجه تمایز را داراست که اولین تولید کننده برق «هسته ای» بوده است.

در طراحی راکتورهای سریع ضروری است که این نکته در نظر گرفته شود که سوخت می بایستی به میزان بالایی غنی سازی شود (حدود ۲۰ درصد) و عدم وجود یک کند کننده نیز، موجب می گردد که حجم قلب راکتور کوچک و بنابراین چگالی بسیار بالایی از توان ایجاد گردد.

## فصل دوم:

مبانی نیروگاه‌های هسته‌ای

## نیروگاه هسته ای:

در حال حاضر، در همه نیروگاه‌های هسته ای از توربین بخار برای چرخاندن مولدهای برق استفاده می‌شود، ولی در این نوع نیروگاه، یک رآکتور هسته ای جای دیگ بخار نیروگاه با سوخت فسیلی را گرفته است. به جای تهیه کردن دائمی سوخت فسیلی، تزریق آن به کوره و سوختن آن به منظور ایجاد گرما، سوخت هسته ای گرمای لازم را برای تولید بخار ایجاد می‌کند و این سوخت فقط تقریباً در هر سال یکبار تعویض می‌شود. گرمای تولید شده در سوخت هسته ای به سیالی به نام «خنک کننده رآکتور» که در اطراف سوخت جریان دارد انتقال می‌یابد.

در اغلب رآکتورها سیال خنک کننده آب است. ولی

دارد که در آنها سیال خنک کننده آب است، یکی راکتور با آب جوشان (Boiling water reactor) با علامت اختصاری B.W.R و دیگری راکتور با آب تحت فشار (Pressurized water reactor) با علامت P.W.R در BWR، گرمای حاصل از سوخت هسته ای صرف جوشاندن آب خنک کننده راکتور می شود. در این حالت، بخار مستقیماً در راکتور تولید می گردد و این بخار برای چرخاندن توربین بکار می رود. در P..W.R آب خنک کننده راکتور تحت فشار زیاد قرار دارد و حالت جوش در آن نمایان نمی شود ولی، آب در ضمن اینکه از مجاور سوخت هسته ای می گذرد گرما میگیرد سپس با پمپ به درون مبادله کننده های بزرگ گرما به نام «مولد های بخار» فرستاده می شود. در آنجا این گرما، به دستگاه کاملاً

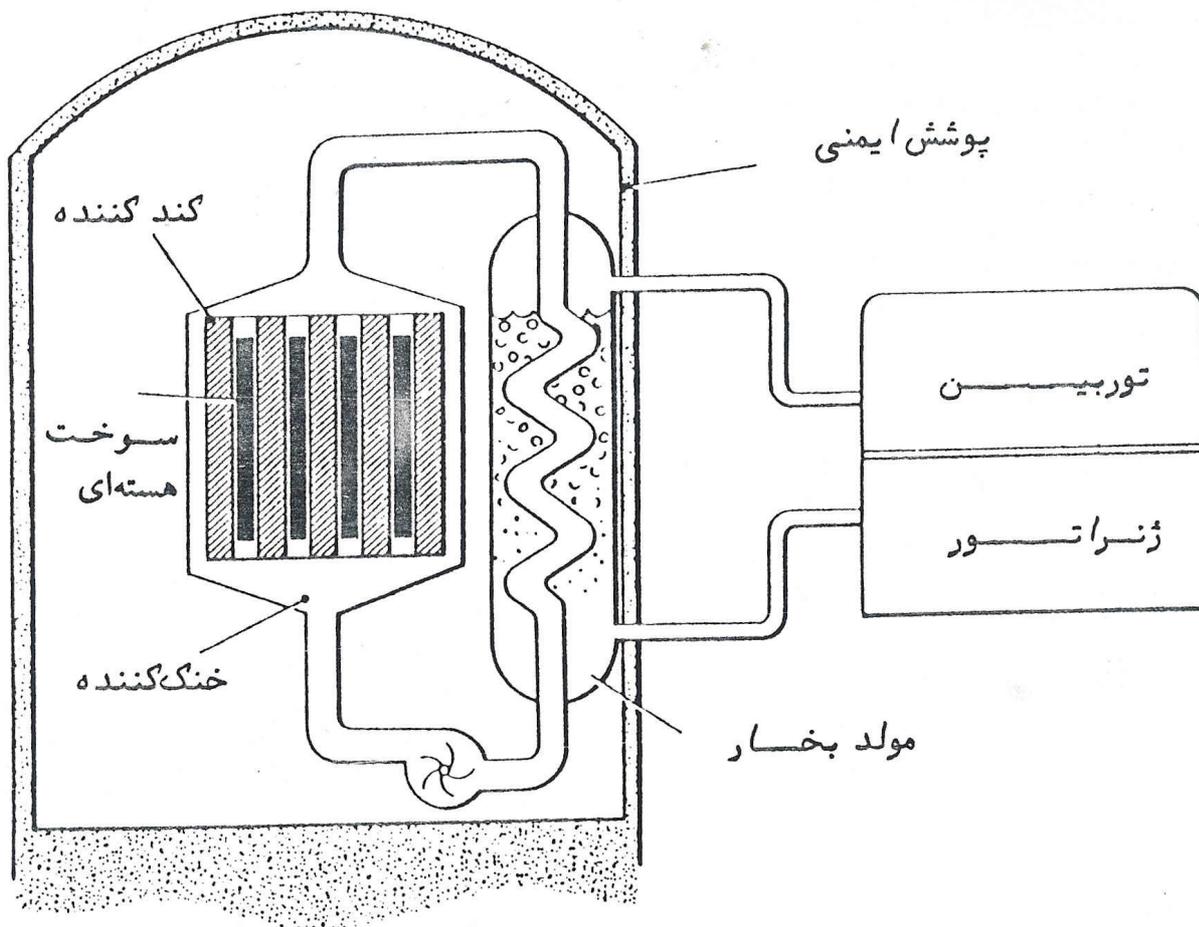
در فشار پائین تري است.

بنابراین وقتی که گرما می گیرد می جوشد و به

بخار که باید توربین را بچرخاند تبدیل می شود.

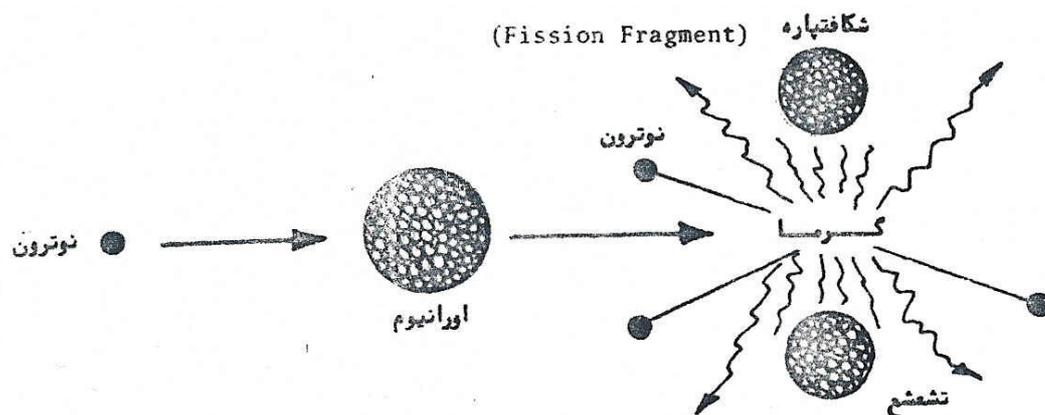
از تولید بخار به بعد، مراحل اصلی در یک

نیروگاه هسته ای وجود دارند.



کار اصلی راکتور هسته ای در نیروگاه هسته ای تولید گرما است، فرآیندی که در این راکتور سبب تولید گرما می شود «شکافت هسته» فیسفون = fission ( نام دارد.

میدانیم شکافت (فیسفون) فرایندی است که بوسیله آن یک هسته اتم سنگین به دو یا چند پاره کوچکتر شکافته می شود و ضمن این عمل مقدار زیادی انرژی بصورت گرما و تابش ساطع می گردد.



در نیروگاه هسته ای اغلب، فرآیند شکافت بوسیله هسته های اتمهای صورت می‌گیرد که نوترونهای کند را جذب می‌کنند. این هسته ها پس از جذب نوترون ناپایدار شده به دو یا چند جزء به نام «شکافتپاره» شکافته می‌شوند. علاوه بر شکافتپاره ها، دو یا چند نوترون در هر شکافت نیز آزاد می‌شود. این نوترونها ممکن است توسط هسته اتمهای دیگر جذب شده موجب شکافت بیشتر شوند. بدین طریق، یک عمل شکافت می‌تواند منجر به عمل شکافت دیگری بشود که آنهم بنوبه خود شکافت دیگری را به دنبال داشته باشد و علیهذا ... این کیفیت «واکنش زنجیری» (chain reaction) نامیده می‌شود.

انرژی که از شکافت یک هسته آزاد می‌شود

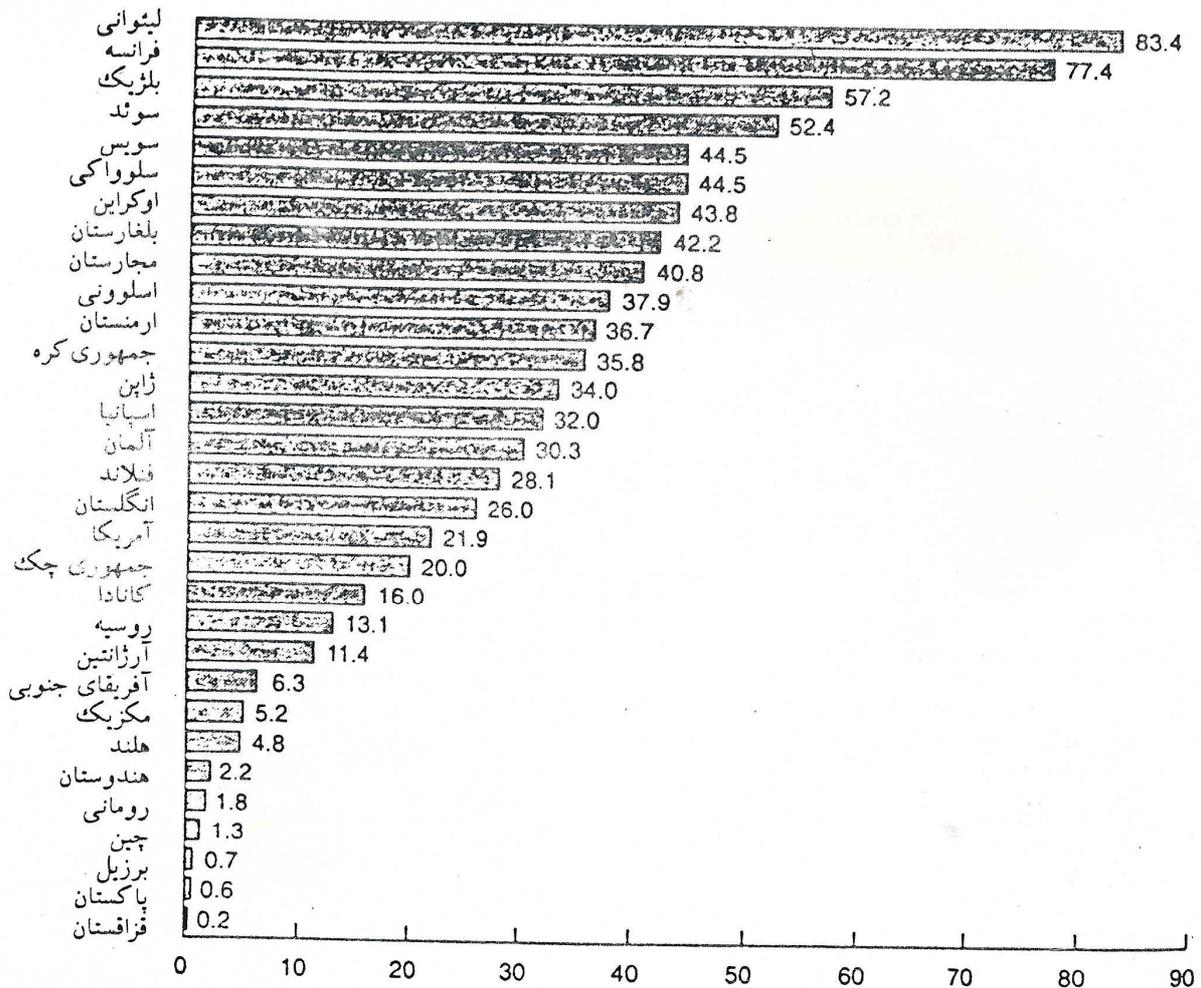
افتد. و انرژی لازم برای نیروگاه هسته‌ای را فراهم می‌سازد، انرژی آزاد شده از فرآیند شکافت به گرما تبدیل می‌شود، که آنهم در چرخه «آب- بخار» برای تولید بخار مورد استفاده واقع می‌شود.

برای تنظیم مقدار انرژی که در یک نیروگاه هسته‌ای آزاد می‌شود، باید تنها تعداد شکافتهایی را که اتفاق می‌افتد تنظیم کنیم.

موجود می‌باشند صورت می‌گیرد. موادی که به آسانی شکافت پذیرند «سوخت هسته‌ای» نامیده شوند. سوخت هسته‌ای که معمولاً بکار برده می‌شود اورانیوم است. وی اتمهای اورانیوم دارای انواع مختلفند ( $U_{233}$  اورانیوم با جرم اتمی ۲۳۳،  $U_{234}$  و  $U_{235}$  و  $U_{236}$  و  $U_{237}$  و  $U_{238}$ ) از میان انواع

(Pt239) نیز بعنوان سوخت هسته ای در نیروگاه

هسته ای بکار می رود.



سهم تولید انرژی هسته ای در سال ۱۹۹۶ در تایوان

(چین) ۲۹/۰۷ از انرژی برق بوسیله انرژی هسته ای تأمین

## انرژی هسته ای:

وضعیت کنونی و چشم اندازها این موضوع اینک به اثبات رسیده است که نیروگاههای هسته ای که از طراحی، ساخت و بهره برداری درستی برخوردارند، منبع انرژی الکتریکی قابل اعتماد، ایمن و از نظر زیست محیطی قابل قبولی هستند. در سال ۱۹۹۶، ۴۴۲ واحد راکتور هسته ای قدرت که در بیش از ۳۰ کشور تحت بهره برداری بودند، حدود ۱۷٪ برق جهان را تأمین کرده و مجموع تجربه بهره برداری از آنها به حدود ۸۱۳۵ راکتور-سال رسیده است. (یک راکتور نیرو همراه با تجهیزات مولدش را یک «واحد» می نامند، تعدادی از چنین واحدهایی ممکن است در یک محل مستقر شده و یک «نیروگاه» هسته ای را تشکیل دهد.

حدود نیمی از کشورهای دارای نیروگاههای هسته ای فعال، بیش از ۲۵٪ انرژی برق خود را از این نیروگاه ها بدست آورده اند.

در سال ۱۹۹۶، ۳۶ راکتور نیرو در ۱۴ کشور در

آمار آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و شورای جهانی انرژی (WEC)، طی ۱۰ تا ۱۵ سال گذشته، نیروگاه‌های هسته‌ای در دست بهره‌برداری، بهبودی پیوسته‌ای در عملکرد خود داشته و قدرت رقابت اقتصادی خود را نسبت به سایر منابع تولید انرژی برق به اثبات رسانیده‌اند.

## فصل سوم :

در این فصل زهرهای ویژه کنترل راکتور را مورد بحث قرار می‌دهیم و طرز استفاده از آنها را برای تغییر دادن راکتیویته به منظور افزودن یا کاستن توان بررسی می‌کنیم. زهرهای کنترل برای جبران کردن تغییرات راکتیویته ناشی از «پارامترهای عملی کننده» نیز بکار می‌روند، در پایان فصل خواهیم دید که چگونه از این زهرها به اشکال مختلف در کنترل راکتیویته قلب راکتور استفاده می‌شود. همچنین افزایش راکتیویته بوسیله زهرهای کنترل را حساب خواهیم کرد.

## بخش اول : اثرهاي سيستم كنترل راکتور:

در فرمول  $keff$ ، چهار فاکتور در اثر تغییر پارامترهاي مربوط به ساخت راکتر و تغییر پارامترهاي عمل کننده تغییر مي کنند. چندین پارامتر عمل کننده نیز در موقع کار کردن راکتور تغییر مي کنند. هنگام خاموش بودن راکتور هم نیز تغییراتي حاصل مي شود.

سيستم كنترل راکتور براي جبران کردن اين تغییرات چهار وظيفه اساسي دارد:

- ۱- نگهداشتن  $keff < 1$  هنگام خاموش بودن راکتور
- ۲- در آوردن  $keff > 1$  در وقت راه اندازي و افزودن توان راکتور
- ۳- نگهداشتن  $keff = 1$  هنگام کار کردن با توان

عادي

در راکتورهاي قدرت جديد، عمل کنترل با وارد کردن ماده جذب کننده به راکتور انجام مي گيرد. در درجه اول ميله هاي کنترل بکار مي روند. با وجود اين در بعضي از راکتورها «زهر محلول» بکار مي رود. (استفاده از زهر محلول وسيله متداولي براي کمک به کنترل است وقتي که ميله هاي کنترل در وضعيت اضطراري از «فاکتور بهره دهی حرارتي» (f) اثر مي کند.

زهر محلول، زهري همگون است که بر شکل شار (فلو) اثر مخالف ندارد. ولي ميله هاي کنترل زهر همگون نيستند و بهمين جهت در درجه اول بر فاکتور بهره دهی حرارتي اثر مي کند علاوه بر اين، ميله هاي کنترل بر روي «ضريب احتمال عدم نشت کلي» نیز مؤثرند.

زهرهاي کنترل به صورتهاي اساسي زير استعمال مي  
شوند:

۱- ميله هاي کنترل (control rods)

۲- زهرهاي مصرفي (Burnable poisons)

۳- زهرهاي محلول (soluble poison)

ميله هاي کنترل، هم در موقع راه اندازي راکتور  
و هم در وقت خاموش کردن آن مي‌توانند  
راکتیویته را به سرعت تغییر دهند و تغییرات  
راکتیویته ناشی از پارامترهاي عمل کننده را  
جبران کنند.

ميله هاي کنترل به دو شکل اساسي ساخته مي  
شوند:

۱- چلیپايي (صليب شکل)

۲- عنكبوت شکل

بین مجموعه های سوخت جای میگیرد.

مجموعه عنكبوت شکل، خوشه ای از چندین میله استوانه شکل باریک است. این میله ها که در حکم زهر هستند از میان لوله های هدایت کننده ای که در اطراف میله های سوخت تعبیه شده اند وارد مجموعه سوخت می شوند.

زهر مصرفی یا تحلیل رفتنی، (معمولاً بصورت ترکیبی از بور یا گادولینیوم) درون راکتور توزیع می شود. بعضی از سازندگان آنرا بصورت میله های زهر مصرفی جدا از هم جای می دهند.

در صورتیکه بعضی بعضی دیگر آنرا با سوخت مخلوط می کنند. این زهر، راکتیویته مثبت ناشی از زیادی راکتیویته سوخت را (که به جهت ادامه عملیات اضافه می شود) خنثی می کند. زهر مصرفی

می شود. بنابراین اصطلاح «تحلیل رفتنی» یا «مصرفی» در اینجا به مفهوم مصرف شدن (سوختن) در اثر جذب نوترون است. چون با تحلیل رفتن سوخت راکتور، راکتیویته کاهش می یابد، زهر مصرفی نیز مصرف شده راکتیویته را افزایش می دهد. اگر بارگیری و جای دهی زهر کاملاً درست باشند. دو اثر فوق الذکر دقیقاً یکدیگر را خنثی می کنند و راکتیویته بدون بکار انداختن دستگاه کنترل متحرک ثابت می ماند. برای اینکه زهرهای مصرفی مؤثر باشند باید بسیار دقیق تعیین شوند. اگر زهر تندتر از حد لزوم مصرف شود سیستم کنترل قادر نخواهد بود روی اضافه شدن زیادی راکتیویته عمل کند. چنانچه زهر بسیار کند مصرف شود، عمر قلب راکتور را تقلیل می دهد.

اندکی بور، بین بسته های سوخت قرار داده می شدند. در طرحهای جدیدتر، گادولینیوم با  $Uo_2$  مخلوط شده و در جاهای خاصی درون قلب راکتور قرار داده می شود. در راکتور با آب تحت فشار (PWR) کاربید بور ( $B_4C$ ) به شکل سوزنهایی در داخل بسته قرار داده می شود.

زهر محلول، معمولاً اسید بوریک، به عنوان زهر کنترل کمکی در مواردی بکار می رود که میله های کنترل گیر کنند (حادثه غیر مترقبه). اگر میله کنترل گیر کند، زهر محلول به راکتور تزریق می شود. این زهر نوترونها را جذب کرده باعث خاموش شدن راکتور می شود. زهر محلول در (PWR) (راکتور با آب تحت فشار) برای مقابله کردن با تغییرات پارامترهای عمل کننده نیز استعمال می

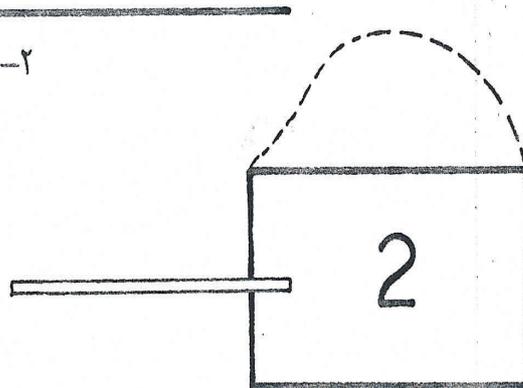
شده اند، با شکل فلوي هموارتر عمل کند.

۱- میله کنترل "تأملاً" خارج از رآکتور  
و شکل شار عادی است.

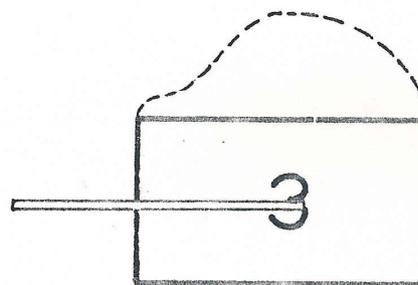
میله کنترل



۲- وقتی میله کنترل اندکسی وارد  
رآکتور شود، شار نوترون در مجاورت  
آن کاسته می شود و دور از آن بر-  
آمدگی پیدا می کند...



۳- هرچه میله کنترل بیشتر وارد رآکتور  
شود، در اطراف میله جذب نوترون  
بیشتر و شار کمتر، ولی دور از میله  
برآمدگی شار بیشتر و نشت فزون تر  
میگردد.



خلاصه آنکه میله های کنترل به سه طریق زیر در

قلب راکتور عمل می کنند:

۱- جذب کردن نوترون

۲- تغییر دادن شکل شار

۳- تغییر دادن نشت نوترون

## سیستم های کنترل در راکتور:

سیستم کنترل در هر راکتور، به منظور دستیابی به سه هدف است:

۱- ایجاد تغییرات کوچک در راکتیویته برای روشن کردن، تغییر توان به مقدار مورد نظر و خاموش کردن راکتور.

۲- جذب راکتیویته اضافی ذاتی، و جبران تغییرات خود به خود راکتیویته در اثر مصرف سوخت، مسمومیت ناشی از محصولات شکافت و آثار دمایی.

۳- ایجاد وسیله ای برای خاموش کردن سریع راکتور در مواقع اضطراری با وارد کردن مقدار زیادی راکتیویته منفی.

در بسیاری از راکتورها دو یا سه سیستم کنترل، یکی برای هر یک از هدفهای فوق، مورد استفاده

کند، و نباید شاردرون راکتور را نیز بیش از حد معمول مغشوش کند.

متداول ترین سیستم کنترل برای راکتورهای حرارتی، میله هایی است از جنس مواد جاذب نوترون همچون بور، کادمیم، یا هافنیم.

این میله ها توسط یک ساز و کار مکانیکی دقیقاً قابل کنترل به داخل قلب وارد و یا از آن خارج می شوند، این سیستم برای روشن کردن، تغییر توان، و خاموش کردن راکتور خوب است، اما برای جذب تمام راکتیویته ذاتی راکتور خیلی مناسب نیست، دلیل این امر آن است که در شروع عمر راکتور بخشی از بدنه همه یا تعدادی از میله های کنترل برای مدت طولانی در داخل قلب راکتور قرار می گیرند، نوترون ها بدون جهت جذب و شار داخل

داشت، و در برخی موارد بالاتر از آن خواهد بود.

این نوع میله های کنترل برای خاموش کردن اضطراری راکتور مناسب هستند. این میله ها که معمولاً ایمنی خوانده می شوند توسط گیرنده های الکترومغناطیسی بطور دائم خارج قلب نگه داشته می شوند، در مواقع اضطراری گیره ها آزاد می شوند و میله های فوق به درون قلب سقوط کرده و یا با سیستم های هیدرولیکی به درون آن رانده می شوند.

وسیله تکمیلی دیگر کنترل راکتیویته استفاده از سموم قابل سوخت است. مواد سمی قابل سوخت آنهایی هستند که دارای سطح مقطه جذب نوترون بالایی می باشند و با جذب نوترون موادی با سطح مقطع جذب

که در آن واکنش  $^{10}B(n,\alpha)^7Li$  ایزوتوپ  $^7Li$  با سطح مقطع جذب بسیار پایین تولید می کند. در روش کنترل با سم قابل سوختن، ترکیبی از بور مانند اسید بوریک با کند کننده مخلوط می شود تا راکتیویته اضافی راکتور نور را جذب کند. با تداوم کار راکتور،  $^{10}B$  در اثر جذب نوترون «مصرف می شود» و اثر راکتیویته منفی آن کاهش می یابد و در نتیجه مصرف سوخت را جبران می کند. تراکم بور در کند کننده را می توان با تزریق بور بیشتر، یا با عبور دادن کند کننده از یک برج تبادل یونی برای جدا کردن بور از کند کننده، کنترل کرد. مزیت این روش آن است که شار نوترون به علت وجود اسید بوریک در قلب مغشوش نمی شود، اما نمی توان از آن برای کنترل

بازهم مورد نیاز هستند. عموم قابل سوخت در راکتورهایی که با آب خنک می شوند و سوختگیری مجدد در آنها در زمان خاموشی راکتور انجام می شود به کار می روند، زیرا با استفاده از این روش دوره تولید توان راکتور (فاصله بین دو سوختگیری) بیشتر می شود.

### **مجرانی کردن راکتور:**

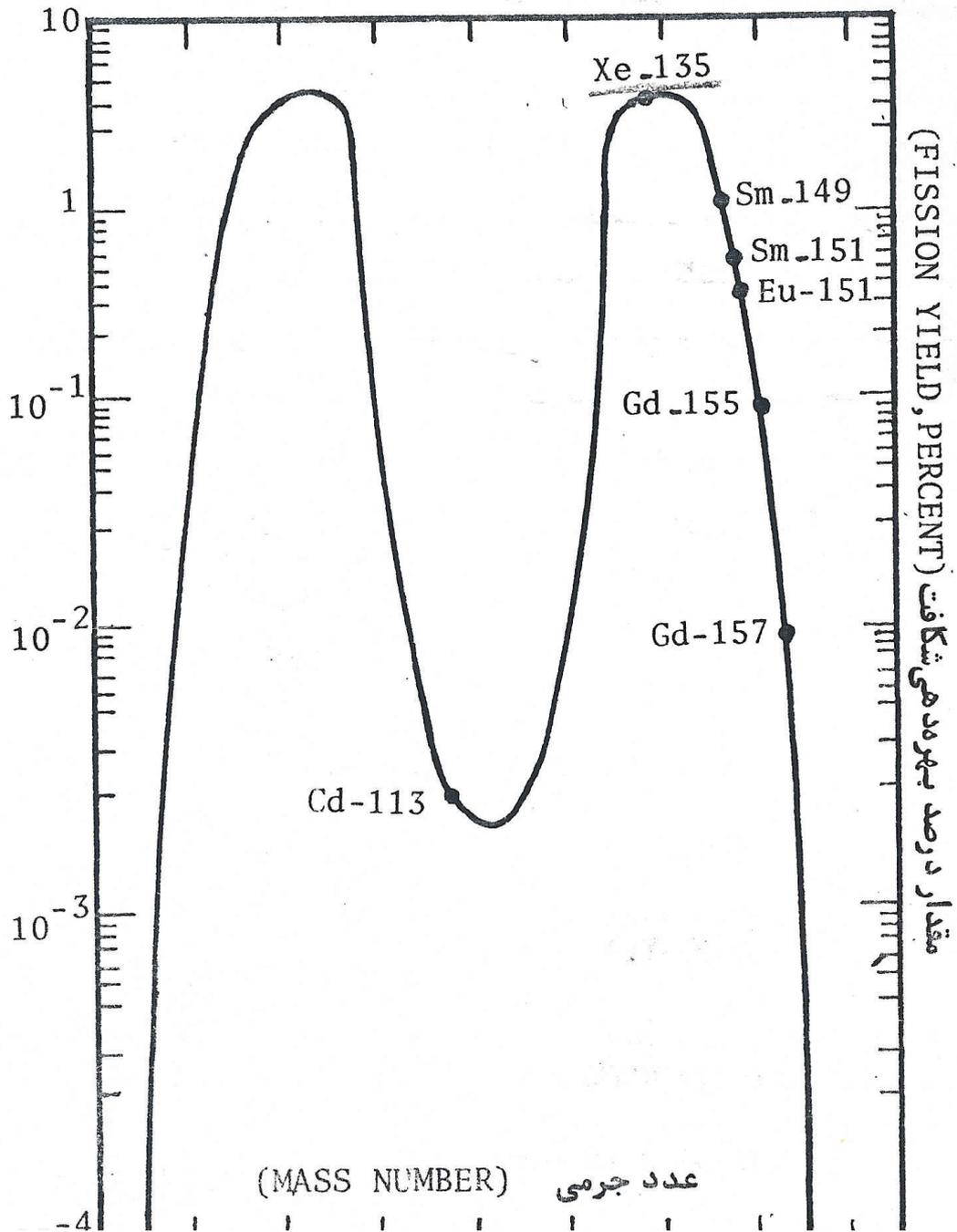
مجرانی کردن راکتور، عملی متداول است که بعد از هر خاموشی باید انجام شود. این کار باید با دقت خاصی انجام شود زیرا، در توانهای پایین، آثار پس خور دما در کمینة خود هستند. پس احتمال فراجست توان (در مقابل افزایش آرم توان) وجود دارد.

انجام می شود.

بنابراین، هدف اصلی در بحرانی کردن راکتور رساندن توان آن به حد لازم به صورتی آرام و قابل کنترل است. هدف دوم (بخصوص بعد از هر خاموشی برای سوختگیری مجدد) آن است که مطمئن شویم «ارتفاع تعادل بحرانی»- ارتفاعی از میله های کنترل که **Keff** را دقیقاً برابر واحد سازد- با مقداری که محاسبات کامپیوتری ارائه می دهند یکسان است. پس این آزمون دیگری است برای اطمینان از آنکه هر میله سوخت به درستی در محل مربوط در قلب قرار گرفته است.

بخش دوم : کارگردانی راکتورها

زهرهای حاصل از شکافت:



هنگامی که راکتور کار می کند در آن پاره های شکافت (که خاکستر اتمی نیز نامیده می شوند) و محصولات فروپاشی این پاره ها به وجود می آیند. هر یک از محصولات شکافت، تا اندازه ای همانند زهر نوترون عمل می کند، ولی چون سطح مقطع جذب اغلب آنها ضعیف است نوترونها را زیاد جذب نمی کنند. به همین جهت بیشتر آنها اثر قابل توجهی بر راکتیویته ندارند. ولی دو استثنای مهم در بین این محصولات شکافت وجود دارد، یکی زنیان  $^{135}\text{Xe}$  و دیگری ساماریوم  $^{149}\text{Sm}$  که سطح مقطع جذب آنها برای نوترونهای حرارتی بزرگ است. چون این زهرها در خود راکتور تولید می شوند، ضریب بهره دهی حرارتی (f) و در نتیجه ضریب تکثیر  $K_{eff}$  در اثر تولید آنها کاهش می یابند و

توان راکتور تغییر کند مقدار زهر تولید شده در راکتور نیز تغییر می کند، بنابراین عملهایی بر روی سیستم کنترل راکتیویته باید اجرا شود تا شرایط حالت پایدار را برقرار سازند، در این فصل ما اهمیت زیان و ساماریوم به عنوان زهرهای حاصل از شکافت و اثرهای آنها بر راکتیویته قلب راکتور را مورد بررسی قرار می دهیم.

### **تشکیل محصولات شکافت:**

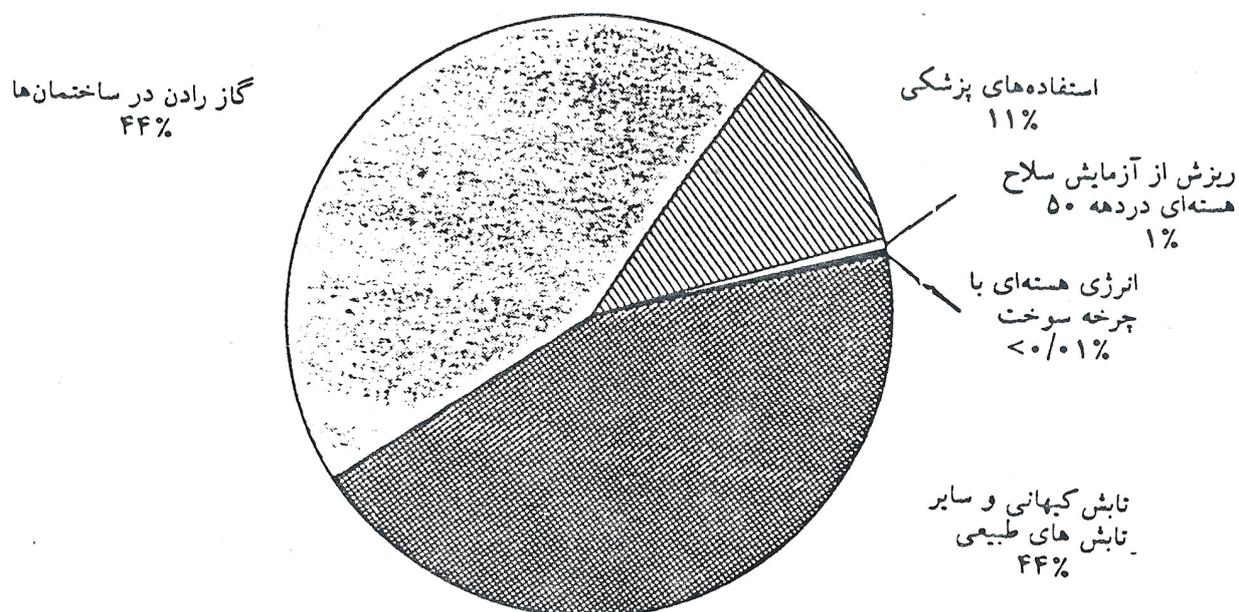
هنگامی که قلب راکتور در اولین دور راه اندازی می شود، با آنکه پارامترهای کوتاه- مدت مؤثر بر راکتیویته به تعادل می رسند، افت قابل

دانیم که تغییرات راکتیویته ناشی از  $Xe^{135}$ ،  
نزدیک به مقدار ماکزیم نمودار است که روی پیک  
دوم به ازای عدد جرمی (۱۳۵) جای گرفته است.  
بهره دعی زیاد  $Xe^{135}$  توأم با سطح مقطع جذب بسیار  
بزرگ ( $2/7 \times 10^6$  بارن) و رفتار وابسته به زمان  
این عنصر، علت‌های اثر مشهود آن بر عملیات  
راکتور می‌باشند.

## فصل چهارم :

ایمنی هسته‌ای و حفاظت در برابر تابش

## ایمی هسته ای:



## دز میانگین دریافت شده توسط مردم جهان (غیر از پرتوکاران)

تنها زمانی به یک نیروگاه هسته ای اجازه بهره برداری داده می شود که معیارهای کافی بمنظور جلوگیری از حوادث رعایت شده باشد، علاوه بر این باید بتوان در صورت بروز حادثه، برای محدود کردن گسترش و در عین حال فرونشانی عواقب آن، به

حادثه را کنترل کرد.

بنابراین باید پایین بودن احتمال بروز حوادثی که دارای عواقب بالقوه شدید هستند، از طریق ارزیابی های ایمنی، پژوهش های ایمنی، طراحی مطمئن با مواد مناسب، ساخت با کیفیت بالا، روش ها و دستورالعمل های کاری مناسب، گزینش و آموزش صحیح کارکنان و غیره به اثبات برسد. نظام ایمنی باید بررسی ها و ارزیابی ای مناسب را به انجام رساند. در صورتیکه کفایت تطبیق با معیارها ثابت نشود، مجوز بهره برداری از نیروگاه صادره نشده و یا مجوز موجود لغو خواهد شد. به این دلیل است که یک فرهنگ ایمنی هسته ای باید در تمام کشورهایی که دارای نیروگاه هسته ای هستند برقرار شده و در قوانین، مقررات و

با اعلام توافق جهت پیروی از پیمان ایمنی هسته ای که در اکتبر ۱۹۹۶ به اجرا در آمد، تعهد خود را نسبت به این موضوع نشان داده اند.

### **حفاظت در برابر تابش:**

#### **تأثیرات بهداشتی قرار گرفتن در معرض تابش:**

پرتوهای یونساز و مواد رادیو اکتیو از خصوصیات طبیعی و همیشگی محیط است و تابش سطح پایین بخشی از محیط پیرامون ما را تشکیل می دهد. شکل زیر درصد میانگین پرتوگیری جمعیت جهان را از تمام چشمه های تابش به غیر از مواردی که پرتوآکاران در معرض آنها قرار دارند نشان می دهد. تماس با تابش خطر احتمالی برای سلامتی را به همراه دارد، اما چون ما همواره در معرض تابش

راکتورهای هسته ای برای تولید نیرو و تحقیقات مقادیر مواد رادیواکتیو موجود برای استفاده پزشکی و صنعتی که البته است که اینگونه خطرات را می توان تحت کنترل نگهداشت.

پرتوگیری می تواند تأثیرات «قطعی» و «تصادفی» بر سلامتی انسان بگذارد. تأثیرات قطعی مانند حالت تهوع، قرمز شدن پوست یا سندروم های شدیدتر زمانی بروز می کند که دز از سطح آستانه فراتر رود. این علائم طی چند روز پس از پرتوگیری آشکار می شوند، تأثیرات تصادفی آنهایی هستند که وخامت آنها مربوط به دز نبوده، بلکه احتمال بروز آنها متناسب با دز اضافی، یعنی مقدار اضافی در نسبت به تابش زمینه است. مهم ترین تأثیر تصادفی تابش، بروز سرطان است که می تواند مدت



## فصل پنجم :

مواد مورد نیاز در رآکتورهای  
هسته ای

گسترش استفاده از انرژی هسته ای در پنجاه سال گذشته، کاربرد مواد بسیاری- مانند فلزات، آلیاژها، مایعات و گازها- را به همراه داشته است که در سالهای پیش از عصر اتم برای مهندسان نسبتاً ناشناخته بوده و به ندرت در مهندسی به کار می رفته اند. اکنون این مواد به خوبی در حال شناخته شدن هستند، و اگرچه پیش پا افتاده نیستند، اما بخشی از بازه گستره مواد را تشکیل می دهند که امروزه در مهندسی به کار می روند. منظور از این فصل، ارائه یک توصیف اجمالی و کیفی از مواد دارای اهمیت خاصی در مهندسی هسته ای، و توصیف خواص و نقش آنها در فن آوری هسته ای است.

خواص فیزیکی مواد، اهمیت ویژه ای در کاربرد

جوش، چگالی و رسانندگی گرمایی همه موارد آشنایی هستند که مهندسان به هنگام انتخاب مواد برای کاربردهای خاص به آنها توجه می کنند. سطح مقطع نوترون، که در انتخاب اغلب مواد مورد استفاده در قلب راکتور نقش اساسی دارد، (پیش از اختراع راکتورها) چندان شناخته شده نبود. بیشتر اجزای یک راکتور تحت دماها و تنشهای بالایی قرار می گیرند و رفتار آنها را تحت چنین شرایطی باید مورد بررسی قرار داد.

## مخس اول : سوخت

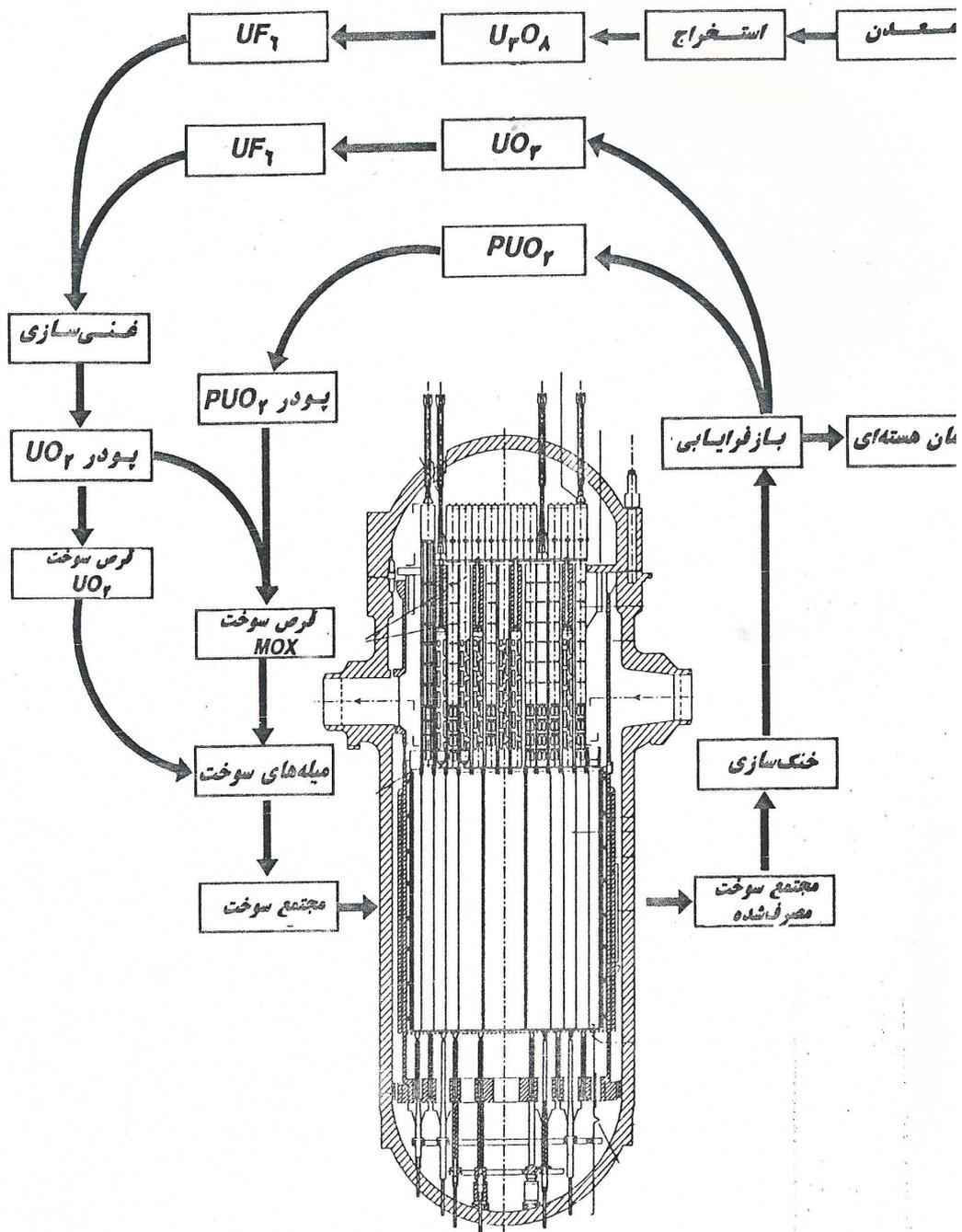
### اورانيوم :

در شكلهاي مختلف، متداول ترين ماده سوخت براي راکتورهاي هسته اي است. فلز نرم و قابل کششي است. در مقابل آسیب ناشي از تابش خيلي حساس است.

### پلوتونيوم :

چون فلز پلوتونيوم خالص تا رسيدن به نقطه ذوب،  $640^{\circ}C$  داراي تعداد زيادي فاز بلوري است، سوخت مناسبی براي راکتور نمي باشد. رسانندگي گرمایي آن نيز خيلي پائين، حدود  $4W/mk$  در دماي اتاق، است. فلز پلوتونيوم در هواي مرطوب خيلي فعال است، اما نمي توان آن را در هواي خشك و دماي پائين انبار كرد. پلوتونيوم به علت اينكه

نیز خطر بالقوه ای است. مخصوصاً اگر به صورت  
گرد و غبار در هوا وجود داشته باشد و از طریق  
تنفس وارد ریه ها شود.



بخش دوم : سوخت هسته‌ای:

غنی‌سازی اورانیوم:

در اورانیوم طبیعی که از فرایند تصفیه بدست می‌آید تنها ۰/۷۱۱ درصد ایزوتوپ  $^{235}\text{U}$  وجود دارد و بقیه آن را ایزوتوپ  $^{238}\text{U}$  و سایر ایزوتوپ‌ها تشکیل می‌دهند. برای تهیه سوخت اغلب راکتورها، از جمله راکتورهای آبی باید درصد ایزوتوپ ۲۳۵ به ۳-۴٪ برسد. بنابراین افزایش درصد این ایزوتوپ مورد نیاز است. فرایند افزایش ایزوتوپ ۲۳۵، غنی‌سازی اورانیوم (Uranium enrichment) نامیده می‌شود.

تاریخ غنی‌سازی اورانیوم از جنگ جهانی دوم آغاز می‌شود. برای تهیه اورانیوم بسیار غنی شده (بیش از ۹۰٪) که برای ساخت سلاح اتمی مورد نیاز

بکار گرفته شد و بعضی از آنها سریعاً توسعه یافتند.

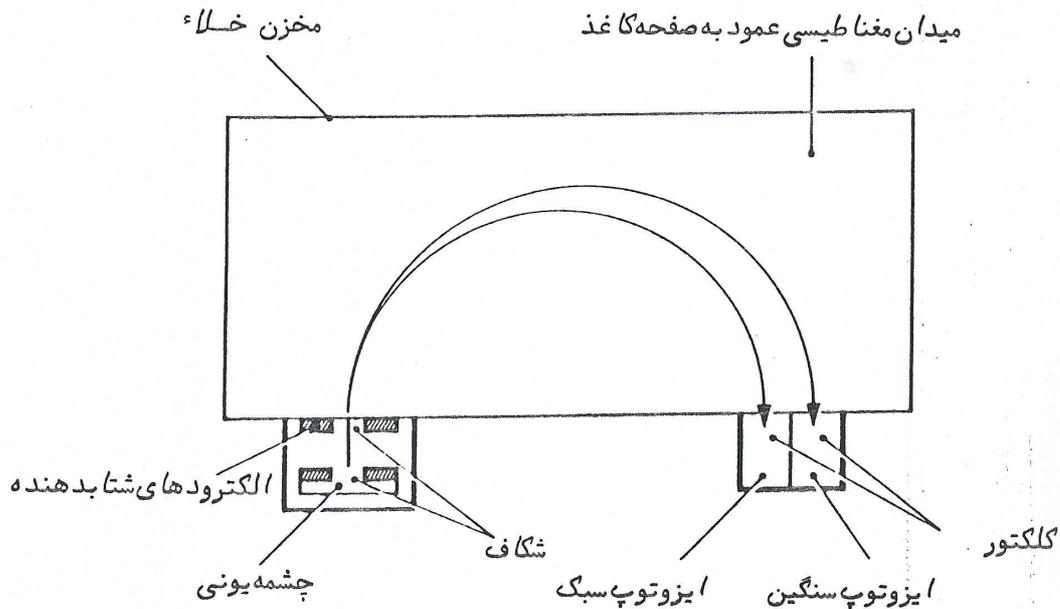
روش غنی سازی که بیش از همه در این سالها توسعه یافت، روش پخش گازی بود که اولین واحد صنعتی آن در ۱۹۴۳ در Oal ridge آمریکا ساخته شد. واحدهای بعدی در آمریکا، در انگلستان، در فرانسه، در شوروی سابق و در چین ساخته شدند.

تعریف اصطلاحاتی که در غنی سازی اورانیوم بکار می رود:

### آبشار (cascade) :

در اغلب فرایندها که به آن اشاره خواهد شد، در هر مرحله از جداسازی، تنها تفاوت جزئی در ترکیب ایزوتوپی، بدست می آید، برای غنی سازی

برای مثال جهت تولید اورانیوم غنی شده ۴٪ و اورانیوم پسمانده ۲۵٪ درصد باید در فرآیند پخش گازی ۱۲۰۰ مرحله مورد استفاده قرار گیرد.



اصول فرایند الکترومغناطیسی برای جداسازی ایزوتوپها

**فاکتور جداسازی: (separation factor):**

در روشهای جداسازی، فاکتور جداسازی یا  $\alpha$  به

تفاوت نسبت میان ایزوتوپها در دو طرف از  $N$  مربوطه است

## قدرت جداسازی: (separation power)

فاکتور جداسازی که در بالا تعریف شد با وجود اینکه نشان دهنده بازده یک مرحله جداسازی است ولی اطلاعی در مورد کمیت ماده ای که در این مرحله غنی می شود نمی دهد، چون این کمیت یکی از مشخصه های اساسی هر مرحله جداسازی است، به تعریف واحد دیگری بنام قدرت جداسازی نیاز داریم.

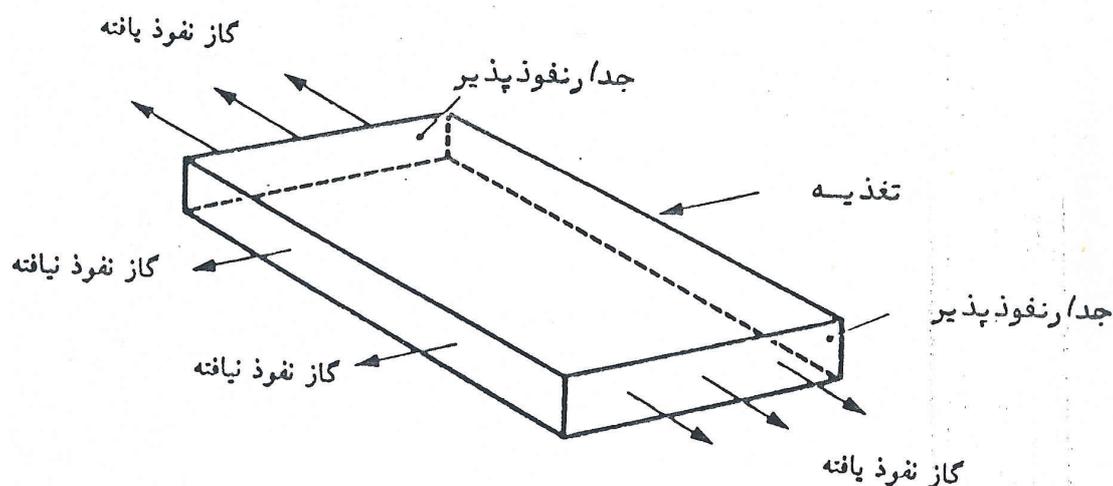
فرآیندهای جداسازی را می توان بعنوان عاملی برای برگشت از حالت عدم نظم به حالت نظم مورد بررسی قرار داده و از آهنگ تغییر آنروپی بعنوان معیاری برای تشخیص کارآیی یک واحد جدا کننده استفاده کرد.

## مخش سوم : روشهاي غني سازي

### روش الكترومغناطيسي:

اين روش بر پايه جدا کردن مسير هگزا فلئورانيوم  $UF_6$  بونيزه شده، در يك ميدان مغناطيسي قوي. قرار دارد. اين شكل نمايانگر روش غني سازي را که در دستگاہي به نام *calture* انجام مي گيرد نشان مي دهد. گاز  $Uf_6$  يونيزه شده ابتدا توسط الكترودهاي يك ميدان الكتريكي سرعت مي گيرد و سپس بوسيله يك ميدان مغناطيسي بسيار قوي که عمود بر صفحه کاغذ قرار دارد مسيرهاي دايره اي شکلي را در محفظه اي که از هوا خلاء شده طي مي کنند. مولکولهاي  $^{235}Uf_6$  که سبکتر هستند دايره کوچکتری را مي پيمایند. سپس ملکولهاي  $^{235}Uf_6$  ،  $^{238}Uf_6$  در کلكتورهاي جداگانه جمع آوري مي

به سرمایه گذاری لازم، پس از جنگ جهانی دوم، فقط در موارد استثنایی بکار گرفته شده است. از این روش برای جداسازی ایزوتوپها که در پزشکی و صنعت کاربرد دارند نیز استفاده می شود (مثل جدا کردن ایزوتوپهای روی در مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته ای کرج)



نفوذ گاز از یک جفت پرده نفوذ پذیر (Membrane)

گازها پر شده و با محیط در حال تعادل گرمایی است، انرژی جنبشی تمام مولکولهای گاز موجود در محفظه مساوی خواهد بود ولی سرعت مولکولهای سبکتر بیشتر از مولکولهای سنگین تر است. مولکولهای سبکتر از مولکولهای سنگین به جدار محفظه برخورد می کنند. اگر جدار محفظه دارای سوراخهای بسیار ریزی باشد، بطوری که ملکولها بتوانند تک تک از آن عبور کرده و جریان گاز بصورت توده امکان پذیر نباشد، گازی که از منفذها عبور می کند بیشتر ملکولهای سبک خواهد بود تا ملکولهای سنگین، این فرایند که بنام پخش گازی موسوم است در ابتدا در سال ۱۸۲۶ توسط گراهام کشف شد.

این فرایند در سال ۱۹۲۰ برای غنی سازی ایزوتوپ نئون ۲۲ و بعد برای غنی سازی هیدروژن از دوتریم

اورانیوم بسیار غنی شده از ایزوتوپ ۲۳۵ جهت مصارف نظامی توسعه سریع یافت. این فرایند با وجود بازده خوب صنعتی و اقتصادی نیاز به انرژی زیادی دارد.

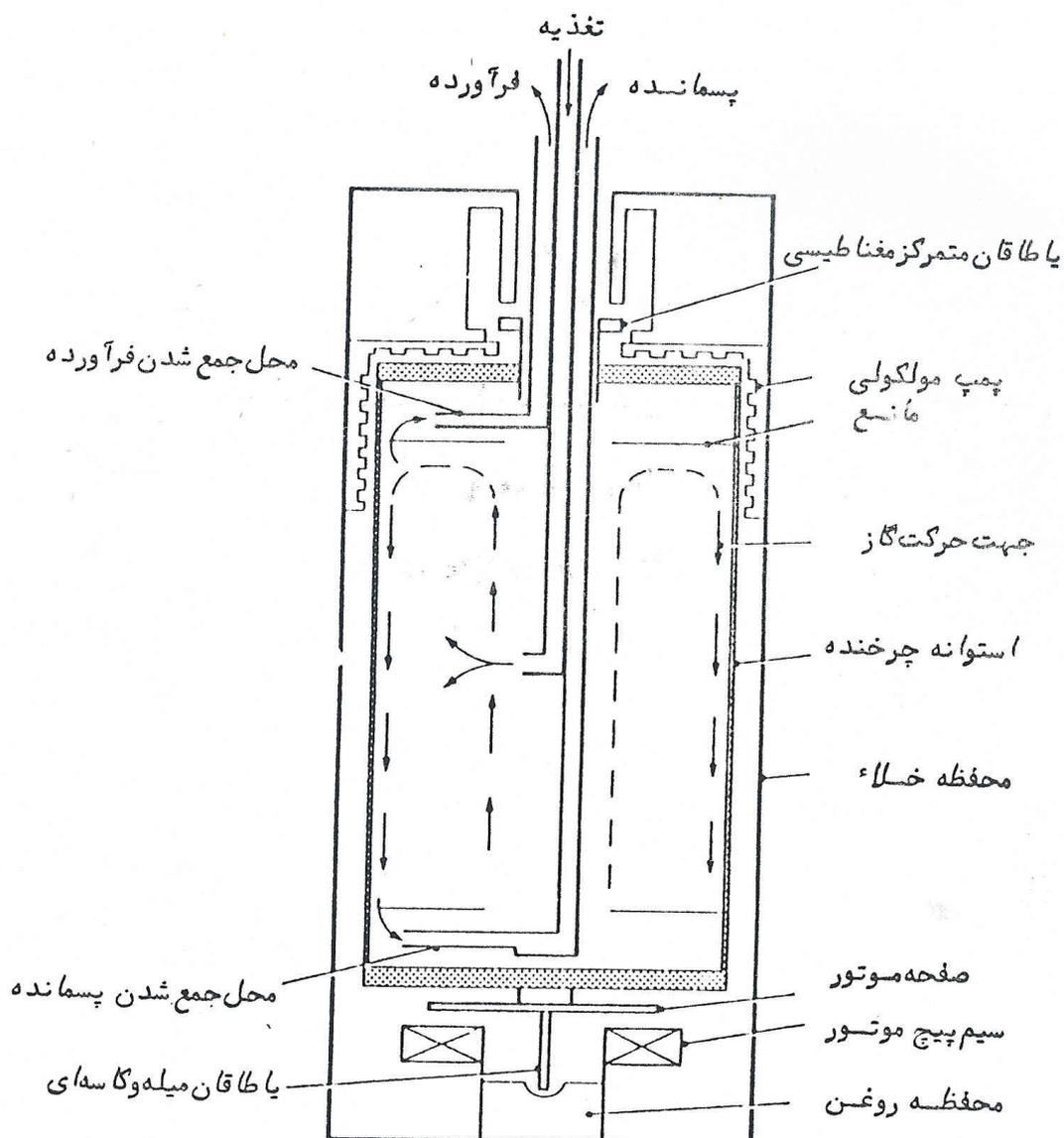
مبنای فیزیکی عبور ملکولها از جدار نفوذپذیر مشابه عبور از لوله های کارپیلر طولانی است. جریان ملکولها شامل دو قسمت است: یکی قسمت knudsen که موجب جداسازی می شود و دیگری قسمت poiseullie که برخورد ملکولها با یکدیگر را در مجرای نفوذی در نظر می گیرد.

ملکولهای سبک با سرعت کمی بیشتر از ملکولهای سنگین از جدار نفوذ پذیر لوله می گذرند. طبق قانون (knudsen)، آهنگ پخش هر یک از ایزوتوپها از جدار نفوذپذیر بصورت معکوس با توان دوم

مولکولها با یکدیگر برخورد داشته باشند بازده جداسازی کم می شود. شرط افزایش بازده و جلوگیری از برخورد مولکولها با یکدیگر آن است که قطر منفذ مسافت آزاد متوسط بیشتر نباشد.

تنها ترکیب مناسب اورانیوم که در دمای حدود ۶۰ درجه سانتیگراد بصورت گاز وجود دارد هگزا فلورور اورانیوم،  $Uf_6$  یا  $Hex$  است. مزیت دیگر این گاز آن است که فلور که جزئی از این ترکیب را تشکیل می دهد تنها از یک ایزوتوپ تشکیل شده است.

مسافت آزاد متوسط که از داده های چسبندگی محاسبه شده است، ۲۰ نانومتر (nm) در فشار یک اتمسفر و حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد است.



## جزئیات سانتریفیوژ Zippe و طرز حرکت گاز در آن

### روش سانتریفیوژ:

استفاده از سانتریفوژ برای جداسازی مواد با

تا از حرکات لرزشی و جریانات انتقال گرما جلوگیری شود. در سال ۱۹۳۰ سانتریفوژ با جریان همسو مورد استفاده قرار گرفت. که در آن ماده تغذیه از درون لوله ای که در مرکز درپوش بالایی سانتریفوژ قرار دارد، وارد می شد. ملکولهای سبک بیشتر به اطراف محور مرکزی و ملکولهای سنگین بیشتر به طرف دیواره سوق پیدا کرده و بوسیله مجراهایی از سانتریفوژ خارج می شوند. در جنگ جهانی دوم از سانتریفوژ برای غنی سازی اورانیوم استفاده بعمل آمد ولی بازده کم آن موجب کنار گذاشتن این روش شد.

سانتریفوژ با جریانهای همسو دو نقص بزرگ داشت: یکی اینکه فشار در نزدیک محور مرکزی پائین بود و خارج کردن ملکولها سبک تر با اشکال مواجه می

با جریان‌های مخالف توسعه یابد. در این سانتریفوژ ماده تغذیه (feed) از وسط محور چرخشی وارد شده و با حرکت در طول محور و جداره در دو جهت مختلف موجب ایجاد اختلاف غلظت ایزوتوپی در طول محور می‌شود. در نتیجه می‌توان ایزوتوپ‌های سبک و سنگین را در دو انتهای محور و در نزدیک جدار سانتریفوژ برداشت کرد. چون فشار در کنار جداره زیاد است بنابراین برداشت ایزوتوپ سبک‌تر مشکلی ایجاد نمی‌کند. با این سانتریفوژ، بازده جداسازی افزایش پیدا کرده و با ارتفاع سانتریفوژ متناسب است. ولی هنوز یک مشکل اصلی که سرعت زیاد سانتریفوژ است باعث محدودیت استقامت مواد و گرم شدن یاطاقان سانتریفوژ حل نشده بود.

در سال‌های ۱۹۶۰-۱۹۵۷، zipper و همکارانش موفق به

در انتهاي فوقاني محو، يك مغناطيس بشکل نوار دایره ای موجب می شد که محور از جای خود بلند شده و بصورت معلق، بدون هیچ اصطکاکي بچرخد. این سانتریفوژ هنوز اهمیت خود را حفظ کرده و با بکار گرفتن مواد با استقامت و خواص بهتر افزایش بازده و رقابت اقتصادی آن در سطح وسیع ممکن شده است.

جزئیات این سانتریفوژ در شکل نشان داده شده است:

### فرایند جت (jet Nozzle process)

در این فرآیند، ماده اولیه مرکب از ۵٪  $Uf_6$  و ۹۵٪ هیدروژن است. قطر دایره ۰/۱ میلیمتر. سرعت گاز در سطح دایره ۳ برابر سرعت صوت و فاکتور

استفاده قرار نگرفته است.

## روش غنی سازی با لیزر (Laser enrichment)

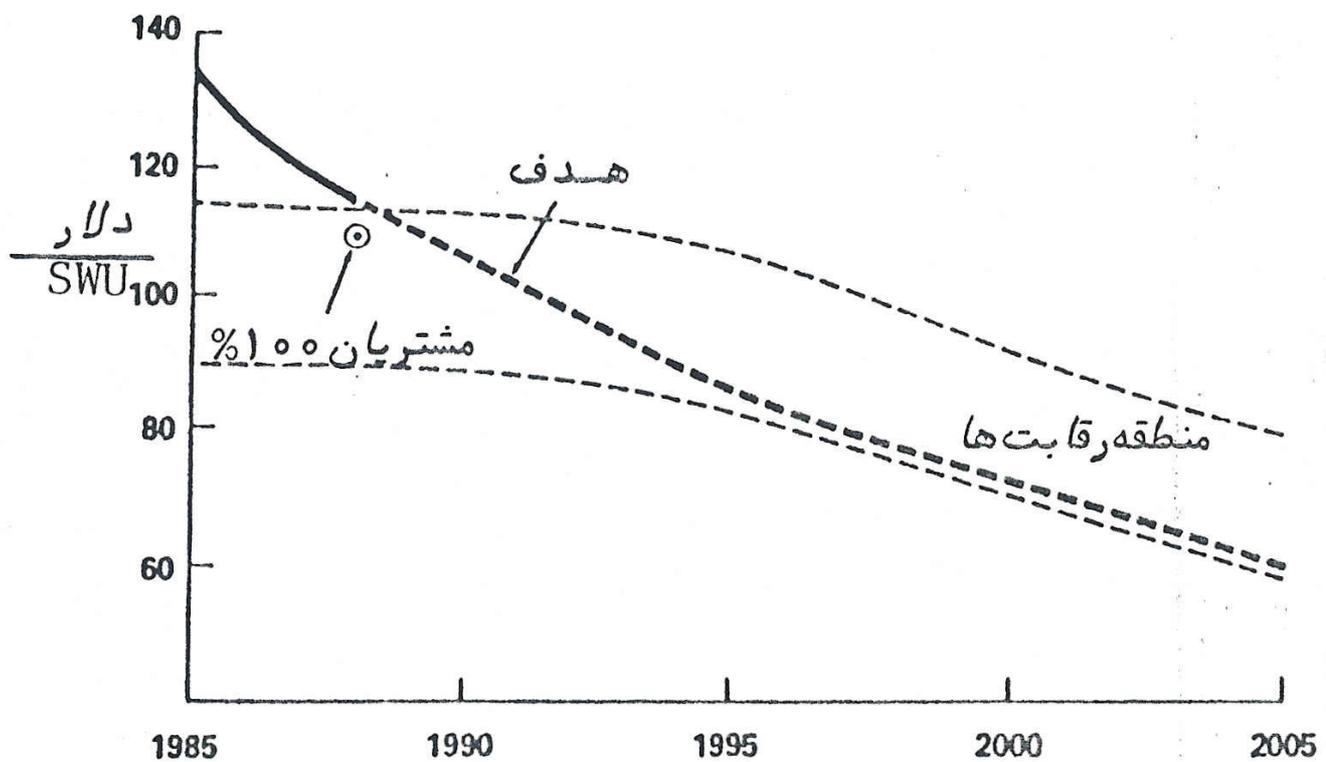
جابجایی‌هایی (shifts) در بنیاب اتمی و ملکولی ایزوتوپی‌های یک عنصر دیده می‌شود که به تفاوت جرم ایزوتوپها، اسپین هسته ای حجم هسته بستگی دارد. این جابجایی‌های بنیابی پایه روشهای فتوشیمی را برای جداسازی ایزوتوپها تشکیل می‌دهند، توسعه لیزر از دهه ۶۰ به بعد، توجه کشورهای جهان را به این روش جلب کرد، قابلیت تنظیم طول موج در لیزرهای رنگی (Dye laser) امکان استفاده از این روش را برای جداسازی ایزوتوپی‌های مختلف ایجاد کرد.

جداسازی ایزوتوپی‌های هیدروژن، بور، ازت، کلسیم،

ملکوی شناسایی شده و این جایابی اساس روش  
جداسازی با لیزر را تشکیل می دهد.

دو فرایند مختلف برای جداسازی ایزوتوپی لیزر  
توسعه پیدا کرده است:

جداسازی اتمی و جداسازی مولکولی



نوسانات قیمت غنی سازی

در سالهاي اخير هزينه غني سازي بعلت رقابت شديد توليد كنندگان و بالا بردن ظرفيت توليد كاهش داشته است. قيمت سرويس غني سازي كه در سال ۱۹۸۵ حدود ۱۰۵ دلار براي هر SWU بود در سال ۱۹۹۶ به ۸۵ دلار رسيده است. شكل زير پيش بيني حدود قيمت را براي سالهاي تا ۲۰۰۵ نشان مي دهد.

ذخائر اورانیوم برآورد شده اضافی در کشورهای مختلف

هزینه تولید اورانیوم (۱ کیلوگرم)					کشور
۰.۱۳ دلار ≤	۱۳۰ - ۸۰ دلار ≤	۸۰ دلار ≤	۸۰ - ۴۰ دلار ≤	۴۰ دلار ≤	
۳/۲۵	۱/۱۵	۲/۰۰			آرژانتین
۱۹۴/۰	۴۰/۰	۱۵۴			استرالیا
۱۰۰/۲۰	۰	۱۰۰/۲۰	۱۰۰/۲۰	۰	برزیل
۸/۴۰	۰	۸/۴۰	۶/۲۰	۲/۲۰	بلغارستان
۷۳/۰	۴۳/۰	۳۰/۰		۰	کانادا
۱۹/۴۵	۱۷/۷۹	۱/۶۶		۰	چک
۲/۱۴	۰/۱۹	۱/۹۵	—	—	فرانسه
۵/۸۶		۵/۸۶	۴/۵۰	۱/۳۶	گابن
۴/۰	۴/۰	۰	۰	۰	آلمان
۶/۰	۰	۶/۰	—	—	یونان
۱۵/۶۴	۱۴/۳۹	۱/۲۵		۰	مجارستان
۱/۶۷	۱/۶۷	—	—	—	اندونزی
۲۵۹/۳۰	۶۳/۴۰	۱۹۵/۹۰	۸۲/۷۰	۱۱۳/۲۰	قزاقستان
۲۱/۰	۰	۲۱/۰	۱۰/۰	۱۱/۰	مغولستان
۱۰۷/۵۲	۱۶/۷۰	۹۰/۸۲	۲۰/۲۷	۷۰/۵۵	نامیبیا
۶/۰		۶/۰		۶/۰	نیجر
۱/۸۶	۰	۱/۸۶	—	—	پرو
۱/۴۵	۰	۱/۴۵	—	—	پرتغال
۶/۰۴	—	—	—	—	رومانی
۵/۰	۰	۵/۰	—	—	اسلوانی
۷۵/۲۴	۱۹/۴۰	۵۵/۸۴	۱۶/۴۰	۳۹/۴۴	آفریقای جنوبی
۱۳/۴۶	۲/۷۷	۱۰/۶۹			اسپانیا
۵۰/۰	۳۰/۰	۲۰/۰		۰	اوکراین
۰/۵۴	۰/۰۵	۰/۴۹			ویتنام
۹۸۱/۰۲	۲۵۴/۵۱	۷۲۰/۴۷	>۲۴۰/۲۷	>۲۴۳/۷۵	جمع کل



ذخائر اورانیوم مطمئن با احتمال بالا در کشورهای

مختلف جهان (EAR)

هزینه تولید اورانیوم (۱ کیلوگرم)					کشور
۰۱۳ دلار ≤	۸۰ - ۱۳۰ دلار ≤	۸۰ دلار ≤	۴۰ - ۸۰ دلار ≤	۴۰ دلار ≤	
۵/۶۵	۲/۲۵	۳/۴۰			آرژانتین
۷۱۰	۷۷	۶۳۳			استرالیا
۱۶۲	۰	۱۶۲/۰	۱۰۵/۹۰	۵۶/۱۰	برزیل
۷/۹۳	۰	۷/۹۳	۵/۶۱	۲/۳۲	بلغارستان
۳۸۱/۰	۱۱۱/۰	۲۷۰/۰			کانادا
۳۱/۲۱	۱۹/۴۴	۱۱/۷۷			چک
۲۴/۹۵	۸/۹۱	۱۶/۰۴			فرانسه
۱۰/۰۱	۰	۱۰/۰۱	۳/۲۰	۶/۸۱	گابن
۳/۰	۳/۰	۰	۰	۰	آلمان
۱/۰	—	۱/۰	—	۱/۰	یونان
۰/۶۷	۰/۳۰	۰/۳۷		۰	مجارستان
۶/۲۷	۶/۲۷	۰	۰	۰	اندونزی
۵۹۸/۷۰	۱۵۹/۲۰	۴۳۹/۵۰	۱۱۸/۹۰	۳۲۰/۶۰	قزاقستان
۶۲/۰	۰	۶۲/۰	۵۱/۰۰	۱۱/۰	مغولستان
۱۹۱/۸۲	۳۱/۲۳	۱۶۰/۵۹	۸۲/۰۴	۷۸/۵۵	نامیبیا
۸۷/۱۰	۲۰/۲	۵۷/۴۰	۱۸/۷۰	۳۸/۷۰	نیجر
۱/۷۹	۰	۱/۷۹	—	—	پرو
۸/۹۰	۰	۷/۳۰	—	—	پرتغال
۵/۵۳	—	—	—	—	رومانی
۱/۸۰	۱/۸۰	۰	۰	۰	اسلوانی
۲۵۸/۵۶	۵۳/۸۵	۲۰۴/۷۱	۹۷/۱۷	۱۰۷/۵۴	آفریقای جنوبی
۱۱/۴۶	۲/۳۱	۹/۱۵		۰	اسپانیا
۸۱	۳۸/۴۰	۴۲/۶۰			اوکراین



## ذخایر جهانی اورانیوم

ذخایر جهانی اورانیوم معمولاً به دو بخش تقسیم

می شود:

ذخائر مطمئن با احتمال بالا:

Reasonably assured

Resources=RAR

ذخائر برآورد شده اضافی:

Estimated additional

Resources=EAR

## فصل آخر نتیجه گیری:

قدرتی که از واکنشهای اجرایی نیروی هسته ای ایجاد می شود ماده ای است که در عین حال که برای ادامه زندگی بشر نیاز است برای خود بشر نیز خطرناک است قدرت هسته ای که حیات را سامان می بخشد و در مقابل ویران می کند.

اگرچه هرچه انسان دست به کشفیات تازه ای در مورد علم و شکافتن رمز و سرهایی که خداوند درون آن قرار داده پی می برد با همان سرعت نیز نزدیک به روز قیمت می شود.

پروردگار را شکر می کنم که آنقدر پرده از اسرار طبیعت برای ما بر می دارد که ما را به سوی حقیقت دعوت کند و راه درست و عاقبت بخیر شدن را به ما نشان دهد.

قوي ترين تلسكوپها نيز هنوز در بعضي موارد  
ديده نمي شوند قدرت جهاني را براي هر کشوري  
پديد مي آورد ولي بايد آنرا در مسير شناخت الهي  
و رفع نيازهاي خود قرار دهيم.

## منابع و مرجع

### Reference

مباني راکتورهاي هسته اي ، دکتر قلمسیاه  
مباني نیروگاههاي هسته اي، دکتر دي. جي. نبت-

جي. آر. تامسون

سوخت هسته اي ، دکتر رضا خزانه

توليد قدرت هسته اي

دانشگاه علم و صنعت

ایران

(تجربیات نیروگاههاي پیشرفته)

انتخاب گزینه انرژی هسته اي براي توليد برق

دکتر رضا خزانه

the element of nuclear reactors.... Dr.Qalamsiah

the elements of nuclear power ... Dr. D.G.Bennet



Advanced powers experiences

the university of science and industry

## اصطلاحات :

Cascade

capen hurst

calutron

concurrent

counte current

crucitorm

capillary

dis order

de cay products

dye laser

dor set

enriched uranium

fuel

gasous diffusion

mean free path

$N$  = mole fraction

order

oak ridge

operational parameters

pressuriser

portsmouth

paducah

pierre latte

poiseuille

pores

reactor operation

stage

separation factor

separation power

shifts

total

tricastin

uranium tail

viscosity

win frith

Xenon

Zipper