

بنام خداوند جان و





دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

## کنترل عصبی-فازی در یچه گاز الکترونیکی خودرو

نگارش : محمد قباخلو

استاد راهنما:

دکتر علی اکبرزاده کلات



با همکاری شرکت ایپکو

(تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو): دکتر رسول صالحی-بخش نگاشت و ECU

بهمن ۹۳



## دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :

گروه :

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم .....

تحت عنوان:

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به فرزانه عزیزم

## تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانم از زحماتی که استاد عزیزم دکتر اکبرزاده در طول انجام پایان نامه کشیدند و همواره گوشه شنوا برای سوالاتم داشتند تشکر نمایم.

همچنین از دکتر رسول صالحی در بخش نگاشت شرکت ایپکو که فرصت این تحقیق را برایم فراهم آوردند و در بخش های مختلف تحقیق پایان نامه راهنمایم بودند کمال تشکر را دارم.

و در پایان لازم است مراتب تشکر و قدردانی خویش را به اساتید و بزرگواران مخصوصاً دوست عزیزم مهندس مصطفی اخیانی که در طی مدت انجام این رساله، من را از توجیه ها و محبت های خود بی نصیب نگذاشتند، ابراز نمایم.

## تعهد نامه

اینجا نب ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته  
..... دانشکده ..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه  
..... تحت راهنمایی  
..... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

امروزه خودروسازان در سراسر جهان برای عملکرد بهینه قطعات حیاتی خودرو، سیستم‌های الکترومکانیکی را به جای سیستم‌های مکانیکی پیاده‌سازی می‌کنند. یکی از این قطعات در موتورهای احتراق داخلی جرقه‌ای، دریچه‌گاز الکترونیکی است. این دریچه به کمک موتور جریان-مستقیم مقدار ورود هوا به موتور را تنظیم می‌کند که این تنظیم منجر به کنترل نسبت هوا به سوخت می‌شود. سیستم دریچه‌گاز الکترونیکی به خاطر وجود عوامل اصطکاک، فنر و ... رفتار غیرخطی‌اش را به صورت دو حلقه هیستریزیس نشان می‌دهد.

در این پایان‌نامه ابتدا سیستم دریچه‌گاز الکترونیکی مدل‌سازی شده و سپس پارامترهای مدل با آزمایش‌هایی که در عمل انجام شده، شناسایی شده‌اند، در ادامه با انجام آزمایش‌هایی پارامترهای شناسایی شده، ارزیابی و برای بهبود عملکرد تنظیم شده‌اند تا مدل پیشنهادی، تایید نهایی شود و نماینده خوبی برای دینامیک سیستم واقعی باشد. بعد از این مرحله به بررسی خواسته‌های کنترلی از سیستم پرداخته و بر این مبنا کنترل‌کننده‌هایی طراحی کرده‌ایم تا خواسته‌های مورد نظر برآورده شوند. از روش کنترل-ولتاژ در مسیر پس‌خور با وارد کردن عدم قطعیت‌ها و کنترل معکوس با استفاده از شبکه‌های عصبی فازی پایه‌ای شعاعی در مسیر پیش‌خور برای یادگیری عدم قطعیت‌ها استفاده شده است.

کلمات کلیدی: شناسایی، مدل‌سازی، سیستم‌های غیر خطی، دریچه‌گاز الکترونیکی، شبکه عصبی-فازی، تابع مبتنی بر شعاع، کنترل معکوس، کنترل مبتنی بر ولتاژ.



۱	افصل اول : معرفی
۱-۱	مقدمه
۲-۱	دریچه گاز الکترونیکی
۷	۱-۱ کاربردهای دریچه گاز الکترونیکی
۷-۳-۱	تنظیم سرعت خودرو در سرعت مطلوب
۸-۳-۱	کاهش مقدار آلاینده ها
۸-۳-۱	۳-۳-۱ دیگر کاربردها:
۸-۴-۱	مروری بر کارهای انجام شده
۹-۴-۱	کنترل کننده PID و ترکیب PID با سایر روشها
۱۱-۵	ضرورت انجام تحقیق
۱۲-۶	۶-۱ ساختار پایان نامه
۱۳	افصل دوم : مدل سازی و شناسایی سیستم دریچه گاز الکترونیکی
۱۴-۲	۲-۱ مقدمه
۱۴-۲	۲-۲ آشنایی با دریچه گاز الکترونیکی
۱۸-۳-۲	۳-۲ مدل سازی دریچه گاز الکترونیکی
۲۲-۳-۲	۳-۲-۱ موتور جریان مستقیم
۲۶-۳-۲-۱	۳-۲-۱-۱ ولتاژ القایی برگشتی در موتور جریان مستقیم
۲۸-۳-۲-۲	۳-۲-۲ چرخنده ها
۳۲-۳-۲	۳-۲-۳ اصطکاک
۳۴-۳-۲	۳-۲-۴ فنرهای بازگشتی و متوقف کننده های مکانیکی

۳۴.....	۴-۳-۲-۱-افزاینده های بازگشتی
۳۹.....	۴-۳-۲-۲-مانعهای مکانیکی
۴۰.....	۴-۳-۵-جمع بندی معادلات و رسیدن به معادلات سیستم واحد
۴۱.....	۴-۲-۴-شناسایی سیستم دریچه گاز الکترونیکی
۴۱.....	۴-۲-۱-مقدمه
۴۳.....	۴-۲-۲-اثر اهمی مدار آرمیچر
۴۴.....	۴-۲-۳-اثر سلفی مدار آرمیچر
۴۶.....	۴-۲-۴-ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی
۴۸.....	۴-۲-۵-آزمایش بارهای استاتیک
۵۰.....	۴-۲-۵-۱-ناحیه بالای لیمپ هوم
۵۳.....	۴-۲-۵-۲-ناحیه پایین لیمپ هوم
۵۴.....	۴-۲-۶-ضریب اصطکاک ویسکوز
۵۹.....	۴-۲-۷-آزمایش ممان-اینرسی
۶۰.....	۴-۲-۸-تاییدیه شناسایی
۶۰.....	۴-۲-۸-۱-اعمال ورودی های یکسان به سیستم واقعی و شبیه سازی شده
۶۳.....	۴-۲-۸-۲-نمودار استاتیک موقعیت زاویه ای بر حسب گشتاور بار
۶۴.....	۴-۲-۹-تنظیم پارامترها
۶۵.....	۴-۲-۹-۱-تنظیم ثابت اصطکاک ایستایی
۶۶.....	۴-۲-۹-۲-تنظیم پارامتر گشتاور از قبل ذخیره شده در فنر
۶۷.....	۴-۲-۹-۳-تنظیم مقاومت آرمیچر
۶۸.....	۴-۲-۹-۴-تنظیم ثابت گشتاور موتور
۸۹.....	فصل سوم کنترل دریچه گاز الکترونیکی
۹۰.....	۳-۱-مقدمه
۹۰.....	۳-۲-بررسی سیستم از دید کنترل و خواسته های کنترل از سیستم

- ۹۰..... ۱-۲-۳ خواسته های کنترلی : .....
- ۹۲..... ۲-۲-۳ بررسی خواص سیستمی که قرار است کنترل شود .....
- ۹۵..... ۳-۳ مدل معکوس- کنترل پیشخور (کنترل معکوس مستقیم) .....
- ۹۷..... ۱-۳-۳ آماده سازی سیستم برای اجرای کنترل معکوس .....
- ۱۰۰..... ۲-۳-۳ انتخاب سیگنال تحریک (ورودی) .....
- ۱۰۱..... ۳-۳-۳ توابع پایه ای شعاعی و شبکه های عصبی-فازی .....
- ۱۰۱..... ۱-۳-۳-۳ شبکه های عصبی .....
- ۱۰۲..... ۲-۳-۳-۳ شبکه عصبی توابع پایه ای شعاعی .....
- ۱۰۷..... ۴-۳-۳ آموزش شبکه عصبی-فازی RBF .....
- ۱۱۲..... ۴-۳-۳ کنترل پیشخور-کنترل مبتنی بر ولتاژ .....
- ۱۱۲..... ۱-۴-۳ دینامیک جریان در مقابل دینامیک گشتاورهای مکانیکی سیستم .....
- ۱۱۳..... ۲-۴-۳ طراحی قانون کنترل .....
- ۱۱۴..... ۵-۳-۳ بررسی پایداری روش ها .....
- ۱۱۴..... ۱-۵-۳ کنترل پیشخور-مدل معکوس .....
- ۱۱۵..... ۲-۵-۳ کنترل پیشخور-مبتنی بر ولتاژ-آنالیز پایداری و ارزیابی عملکرد .....
- ۱۲۱..... ۶-۳-۳ اصلاحات روش پیشنهادی .....
- ۱۲۳..... ۷-۳ اغتشاش .....
- ۱۲۳..... ۸-۳ شبیه سازی و نتایج .....
- ۱۲۴..... ۱-۸-۳ ردگیری سینوسی: .....
- ۱۲۵..... ۲-۸-۳ ردگیری پله های افزایشی و کاهشی: .....
- ۱۲۷..... ۳-۸-۳ ردگیری شیب افزایشی و کاهشی .....
- ۱۲۸..... ۴-۸-۳ ردگیری پله-شیب .....

- ۱۳۰..... ۳-۸-۵ ردگیری سیگنال ترکیبی پله
- ۱۳۱..... ۳-۹ مقایسه PID با روش پیشنهادی
- ۱۳۱..... ۳-۱۰ پیشنهادات
- ۱۳۲..... ۴ مراجع

- شکل ۱-۱ طرحواره ای از ارتباط حسگرها و عملگرهای مختلف با مغز الکترونیکی خودرو ..... ۳
- شکل ۲-۱ طرحواره ای از نقش دریچه گاز الکترونیکی در کنترل دبی هوای ورودی ..... ۴
- شکل ۳-۱ اصول دریچه گاز مکانیکی [۶] ..... ۵
- شکل ۴-۱ دریچه گاز الکترونیکی شرکت بوش ..... ۵
- شکل ۵-۱: طرحواره‌های از مکانیسم کار دریچه گاز الکترونیکی [۹] ..... ۶
- شکل ۶-۱: استراتژی کنترل PID+جبران‌ساز پیشخور ..... ۱۰
- شکل ۷-۱: استراتژی کنترل خود تنظیم ..... ۱۱
- شکل ۱-۲: دریچه گاز الکترونیکی ساخت شرکت بوش ..... ۱۵
- شکل ۲-۲: طرحواره‌های از دریچه الکترونیکی [۱۹] ..... ۱۵
- شکل ۳-۲: مشخصه حسگرها [۱۱] ..... ۱۷
- شکل ۴-۲: دریچه گاز از دید ورودی-خروجی ..... ۱۷
- شکل ۵-۲: مشخصه غیرخطی (ناحیه های مرده و هیستریزیس) دریچه گاز الکترونیکی [۲۳] ..... ۱۹
- شکل ۶-۲: مدل سازی دریچه گاز الکترونیکی [۲۴] ..... ۲۱
- شکل ۷-۲ نمای داخلی دریچه گاز الکترونیکی ..... ۲۲
- شکل ۸-۲: استاتور موتور جریان مستقیم ..... ۲۳
- شکل ۹-۲ آرمیچر موتور و بقیه متعلقات (کوموتاتورها و جاروبک ها و فنر جاروبکها) ..... ۲۳
- شکل ۱۰-۲ اطلاعات موجود در برگه اطلاعات محصول در مورد موتور جریان مستقیم ..... ۲۴
- شکل ۱۱-۲:مدلسازی مدار آرمیچر [۲۴] ..... ۲۴
- شکل ۱۲-۲: خودرورقی مثالی برای درک ولتاژ القایی [۲۷] ..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲ چرخنده های دریچه گاز الکترونیکی ..... ۲۹
- شکل ۱۴-۲: نواحی کار دریچه گاز الکترونیکی و اثر لقی در ناحیه لیمپ هوم ..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲ شعاع چرخ دندهها و نحوه ی تماس چرخ دنده ها با هم [۲۹] ..... ۳۰
- شکل ۱۶-۲ به دست آوردن تعداد دندانه های چرخنده چهارم ..... ۳۱

- شکل ۲-۱۷: مدل دریچه گاز الکترونیکی [۲۴]..... ۳۲
- شکل ۲-۱۸: ناحیه مرده در دریچه گاز الکترونیکی به خاطر وجود اصطکاک ..... ۳۳
- شکل ۲-۱۹: فنرهای استفاده شده در دریچه گاز الکترونیکی ..... ۳۵
- شکل ۲-۲۰: طرحواره‌های از مکانیسم کاری فنرها [۱] ..... ۳۶
- شکل ۲-۲۱: نمایی واضح تر از شکل ۲-۲۰ در مورد نحوه کار دو فنر [۳۴]..... ۳۶
- شکل ۲-۲۲: مشخصه غیرخطی فنر - توجه شود که مبدا زاویه صفر نیست بلکه زاویه لیمپ هوم است که در آن گشتاور فنر صفر است [۲۳]..... ۳۸
- شکل ۲-۲۳: دو مانع مکانیکی در ابتدا و انتهای ناحیه کاری دریچه گاز الکترونیکی ..... ۳۹
- شکل ۲-۲۴: مشخصه مانعهای مکانیکی در ابتدا و انتهای ناحیه کاری دریچه گاز الکترونیکی ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۵: مدل کامل دریچه گاز الکترونیکی ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۶: مجموعه تجهیزات مورد استفاده برای شناسایی ..... ۴۲
- شکل ۲-۲۷: مقاومت آجری مورد استفاده برای به دست آوردن جریان ..... ۴۲
- شکل ۲-۲۸: جریان آرمیچر ..... ۴۴
- شکل ۲-۲۹: منحنی جریان-ولتاژ برای به دست آوردن مقاومت ..... ۴۴
- شکل ۲-۳۰: منحنیهای ولتاژ و جریان بر حسب زمان برای به دست آوردن اثر سلفی مدار ..... ۴۵
- شکل ۲-۳۱: منحنیهای موقعیت زاویه‌های صفحه فلزی و ولتاژ القایی برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی ..... ۴۶
- شکل ۲-۳۲: تقریب موقعیت زاویه‌های صفحه فلزی با سری فوریه ..... ۴۷
- شکل ۲-۳۳: منحنی سرعت زاویه‌های صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی ... ۴۷
- شکل ۲-۳۴: منحنیهای موقعیت صفحه فلزی و جریان آرمیچر بر حسب زمان در ناحیه ۱ ..... ۴۹
- شکل ۲-۳۵: منحنیهای موقعیت صفحه فلزی و جریان آرمیچر بر حسب زمان در ناحیه ۲ ..... ۵۰
- شکل ۲-۳۶: موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه (داده های به دست آمده) ..... ۵۱
- شکل ۲-۳۷: موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه (داده های به دست آمده) ..... ۵۱
- شکل ۲-۳۸: موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار و تقریبهای مورد استفاده در ناحیه ۱ ..... ۵۲
- شکل ۲-۳۹: موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار و تقریبهای مورد استفاده در ناحیه ۲ ..... ۵۳

- شکل ۲-۴۰ منحنیهای جریان، ولتاژ و حسگر نوری بر حسب زمان در حالت جدایی موتور از دریچه گاز و حرکت آزادانه موتور- در هر ۱۶ پالس نوری ۸ پالس الکتریکی داریم- [۲۴]..... ۵۵
- شکل ۲-۴۱ آرمیچر و کلافهای آن ..... ۵۶
- شکل ۲-۴۲ منحنیهای ولتاژ و جریان بر حسب زمان در حالت بی باری موتور ..... ۵۶
- شکل ۲-۴۳ تبدیل فوریه سریع سیگنال جریان در شکل ۲-۴۱ ..... ۵۷
- شکل ۲-۴۴: برآزش داده ها برای نمودار گشتاور بر حسب سرعت زاوی های صفحه فلزی ..... ۵۸
- شکل ۲-۴۵ منحنیهای گشتاور بار، شتاب زاویه ای و سرعت زاویه ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ممان اینرسی ..... ۶۰
- شکل ۲-۴۶ شبیه سازی دریچه گاز الکترونیکی در محیط سیمولینک متلب ..... ۶۱
- شکل ۲-۴۷ مقایسه موقعیت زاویه های صفحه فلزی در شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده در عمل ..... ۶۲
- شکل ۲-۴۸ مقایسه موقعیت زاویه ای صفحه فلزی در شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده در عمل ..... ۶۳
- شکل ۲-۴۹: مقایسه نمودار استاتیک موقعیت زاویه ای صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در واقعیت با شبیه سازی ..... ۶۴
- شکل ۲-۵۰ تغییر ثابت اصطکاک ایستایی برای تنظیم تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود. .... ۶۵
- شکل ۲-۵۱ تغییر پارامتر گشتاور از قبل ذخیره شده در فنر برای تنظیم تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود. .... ۶۶
- شکل ۲-۵۲ تغییر پارامتر مقاومت آرمیچر برای تنظیم تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود ..... ۶۷
- شکل ۲-۵۳ تغییر پارامتر ثابت گشتاور موتور برای تنظیم تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود. .... ۶۸
- شکل ۲-۵۴ صفحه فلزی در موقعیت کاملاً بسته ..... ۶۹
- شکل ۲-۵۵ صفحه فلزی در موقعیت لیمپ هوم ..... ۶۹
- شکل ۲-۵۶ معادلات دو حسگر که بر روی هم افتاده اند. .... ۷۰
- شکل ۲-۵۷ اعمال نیروی خارجی و نقطه تعادل ایجاد شده برای شناسایی ثابت گشتاور ..... ۷۲
- شکل ۲-۵۸ مدل اصطکاک دارای مشخصه های استاتیک، استریک، کولومب و ویسکوز [۲۹]..... ۷۴
- شکل ۲-۵۹ منحنیهای موقعیت زاویه ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی- اصلاح شده ..... ۷۶
- شکل ۲-۶۰ تقریب موقعیت زاویه ای صفحه فلزی با سری فوریه- اصلاح شده ..... ۷۶
- شکل ۲-۶۱ منحنی سرعت زاویه ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی- اصلاح شده ..... ۷۷

- شکل ۲-۶۲ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه ۱ (داده های به دست آمده) - اصلاح شده ۷۸...
- شکل ۲-۶۳ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه ۲ (داده های به دست آمده) - اصلاح شده ۷۹..
- شکل ۲-۶۴ برآزش داده ها برای نمودار گشتاور بر حسب سرعت زاویه ای صفحه فلزی - اصلاح شده ۸۰.....
- شکل ۲-۶۵ منحنیهای گشتاور بار، شتاب زاویه ای و سرعت زاویه ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ممائینرسی ..... ۸۱.....
- شکل ۲-۶۶ ولتاژ ورودی برای به دست آوردن منحنی استاتیک موقعیت زاویه ای بر حسب گشتاور بار..... ۸۲.....
- شکل ۲-۶۷ موقعیت زاویه ای صفحه فلزی ناشی از ورودی شکل ۲-۶۶..... ۸۲.....
- شکل ۲-۶۸ منحنی استاتیک موقعیت زاویه ای صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار - اصلاح شده ۸۳....
- شکل ۲-۶۹ منحنی استاتیک موقعیت زاویه ای صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار - اصلاح شده ۸۴..
- شکل ۲-۷۰ منحنی استاتیک موقعیت زاویه ای صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار - اصلاح شده ۸۴..
- شکل ۲-۷۱ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله ..... ۸۵.....
- شکل ۲-۷۲ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله ..... ۸۶.....
- شکل ۲-۷۳ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله ..... ۸۶.....
- شکل ۲-۷۴ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله ..... ۸۷.....
- شکل ۳-۱ بردن صفحه فلزی به حداکثر زاویه ممکن با گشتاور تولید شده توسط دست و سپس رها کردن آن ..... ۹۴.....
- شکل ۳-۲ مشخصه فنر ها در ناحیه لیمپ هوم..... ۹۵.....
- شکل ۳-۳ مشخصه لقی چرخ دنده ها ..... ۹۹.....
- شکل ۳-۴ شبکه عصبی در حالت کلی ..... ۱۰۲.....
- شکل ۳-۵ معماری شبکه عصبی **RBF** ..... ۱۰۳.....
- شکل ۳-۶ تبدیل فضای ورودی غیر خطی به فضای ویژگی خطی ..... ۱۰۴.....
- شکل ۳-۷ مشخصه مصرف برق در طول یک شبانه روز ..... ۱۰۵.....
- شکل ۳-۸ بیان ساعت های مصرف به صورت مجموعه های فازی - حداکثر مقدار توابع تعلق تعریف شده یک میباشد..... ۱۰۵.....
- شکل ۳-۹ سیگنال تحریک ورودی که شبکه عصبی باید بر این اساس، معکوس دینامیک سیستم را یاد بگیرد ... ۱۰۸...
- شکل ۳-۱۰ موقعیت زاویه ای صفحه فلزی ناشی از سیگنال تحریک ورودی ..... ۱۰۸.....



- شکل ۱۱۳- معماری شبکه عصبی مورد استفاده ..... ۱۰۹
- شکل ۱۲-۳ معیار عملکرد شبکه عصبی ..... ۱۰۹
- شکل ۱۳-۳ مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف) ..... ۱۱۰
- شکل ۱۴-۳ مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف) از نمایی نزدیکتر .. ۱۱۰
- شکل ۱۵-۳ اعتبار سنجی: مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف) ..... ۱۱۱
- شکل ۱۶-۳ اعتبار سنجی: مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف) ..... ۱۱۱
- شکل ۱۷-۳ اصلاح روش کنترلی پیشنهادی ..... ۱۲۱
- شکل ۱۸-۳ تغییر زاویه ناشی از اغتشاش گشتاور آئرو دینامیک ..... ۱۲۳
- شکل ۱۹-۳ ردگیری سینوسی مرجع ..... ۱۲۴
- شکل ۲۰-۳ خطای ردگیری ..... ۱۲۴
- شکل ۲۱-۳ تلاش کنترلی ..... ۱۲۵
- شکل ۲۲-۳ ردگیری پله‌های افزایشی و کاهشی ..... ۱۲۵
- شکل ۲۳-۳ خطای ردگیری ..... ۱۲۶
- شکل ۲۴-۳ تلاش کنترلی ..... ۱۲۶
- شکل ۲۵-۳ ردگیری شیب ..... ۱۲۷
- شکل ۲۶-۳ خطای ردگیری ..... ۱۲۷
- شکل ۲۷-۳ تلاش کنترلی ..... ۱۲۸
- شکل ۲۸-۳ ردگیری پله-شیب های مختلف ..... ۱۲۸
- شکل ۲۹-۳ خطای ردگیری ..... ۱۲۹
- شکل ۳۰-۳ تلاش کنترلی ..... ۱۲۹
- شکل ۳۱-۳ ردگیری سیگنال ترکیبی پله ..... ۱۳۰
- شکل ۳۲-۳ خطای ردگیری ..... ۱۳۰
- شکل ۳۳-۳ تلاش کنترلی ..... ۱۳۱

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱ تاثیر دریاچه گازالکترونیکی بر کاهش آلایندهها ..... ۸
- جدول اطلاعات مربوط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز ۱۲- ..... ۵۸
- جدول ۲۲- اطلاعات مربوط برای به دست آوردن زاویه های حداقل و لیمپ هوم ..... ۶۹
- جدول ۳۲- جدول اطلاعات مربوط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز ..... ۸۰
- جدول ۲-۴- مقادیر پارامترها قبل و بعد از تنظیم ..... ۸۷

## فصل اول : معرفی

## ۱-۱ مقدمه

پیشرفت علم الکترونیک و کارایی آن در قرن حاضر، خودروسازان را بر آن داشته‌است که سیستم‌های به طور کامل مکانیکی که تا دهه ی اخیر در ساخت خودرو استفاده شده است [۱] را با سیستم‌های الکترومکانیکی جایگزین کنند، تا کنترل بیشتر و بهتری بر عملکرد سیستم‌های مختلف در خودرو داشته باشند. از مهمترین این سیستم‌ها می توان به سیستم ترمز فعال<sup>۱</sup>، سیستم تعلیق و دریچه گاز اشاره کرد [۲].

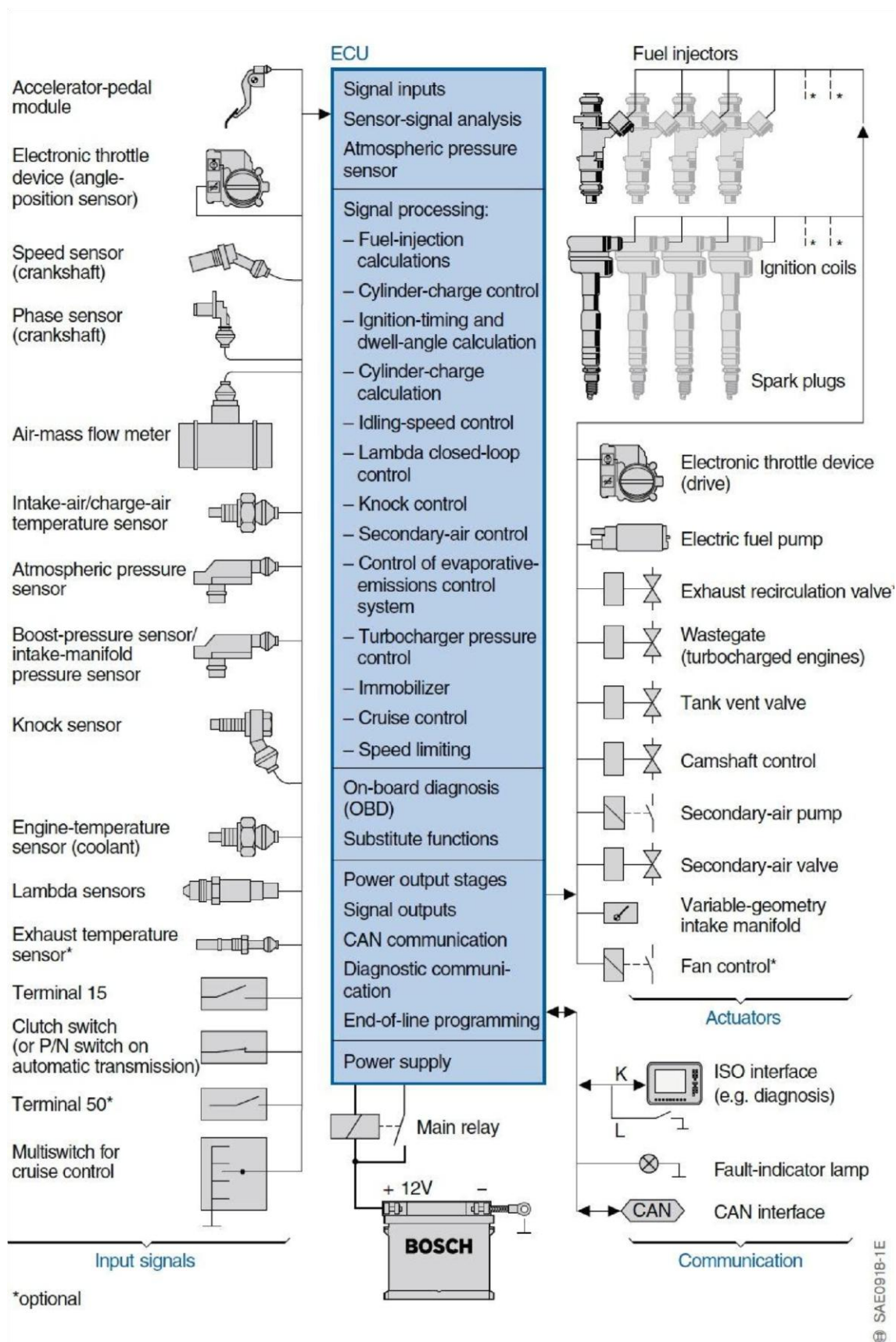
برای کنترل این سیستم‌های الکترومکانیکی در خودرو، نیاز به مغز فرمانروایی است تا اطلاعات مختلف از شرایط کاری و محیطی موتور که توسط حسگرها فرستاده شده را پردازش کند، و سیگنال‌های فرمان الکتریکی‌ای که موجب عملکرد بهینه‌ی این سیستم‌ها می شوند را تولید کند، این مغز برنامه‌پذیر در خودروها، واحد الکترونیکی کنترل<sup>۲</sup> نامیده می‌شود که در شکل ۱-۲ این فرآیند مشاهده می‌شود [۳].

از اهداف این جایگزینی ها می توان به افزایش سرعت عکس العمل محرک‌ها، بهبود حالت رانندگی، کاهش هزینه، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلاینده‌ی خودروها و راحتی مسافری اشاره کرد [۴].

---

<sup>۱</sup> -Active Brake System

<sup>۲</sup> -Electronic Control Unit (ECU)



شکل 1-1 طرحواره ای از ارتباط حسگرها و عملگرهای مختلف با مغز الکترونیکی خودرو

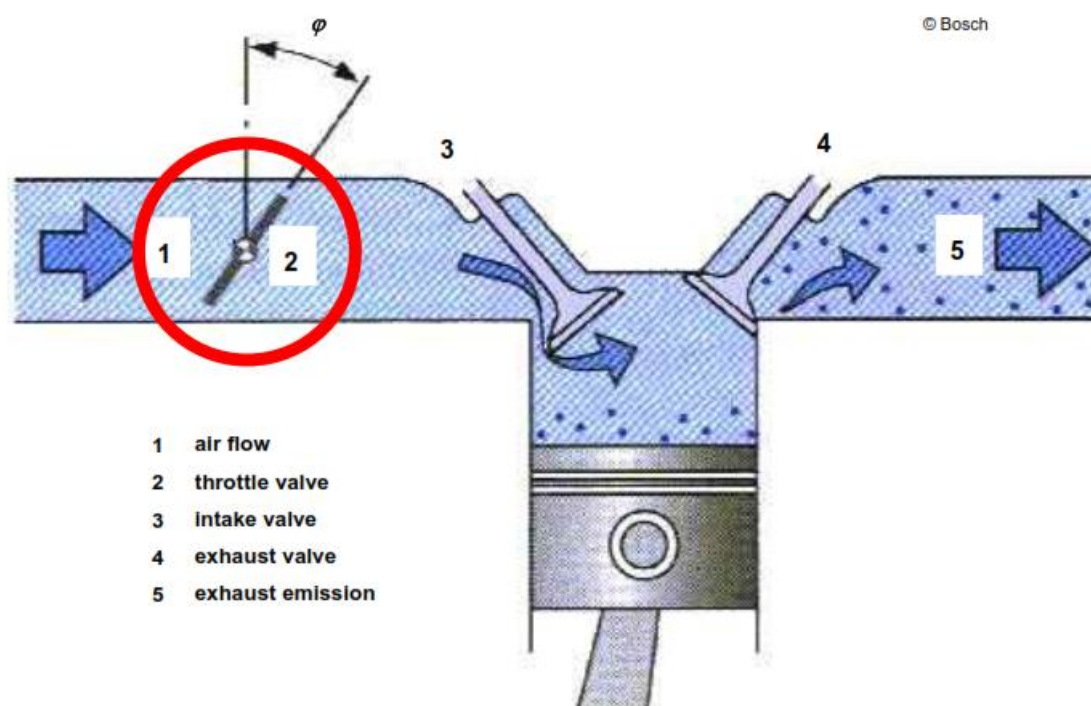
## ۲-۱ دریچه گاز الکترونیکی

در این بخش به ساختار دریچه گاز الکترونیکی و عملکرد رفتار آن می پردازیم.

فلسفه به وجود آمدن دریچه گاز:

در بعضی شرایط خودرو نیاز به حداکثر توان تولیدی ندارد، پس گشتاور و توان خروجی باید کنترل شوند، که این وظیفه را در خودروهای احتراق داخلی، دریچه گاز بر عهده دارد. دو نوع مکانیسم کنترلی برای این منظور استفاده شده است: ۱- دریچه مکانیکی ۲- دریچه گاز الکترونیکی [۵].

چون دریچه گاز الکترونیکی جایگزین دریچه گاز مکانیکی شده است، ابتدا به توضیح مکانیسم دریچه گاز مکانیکی می پردازیم.



شکل ۲-۱ طرحواره ای از نقش دریچه گاز الکترونیکی در کنترل دبی هوای ورودی

دریچه گاز به وسیله‌ی صفحه فلزی ای که در آن تعبیه شده، کنترل کننده دبی هوا به داخل

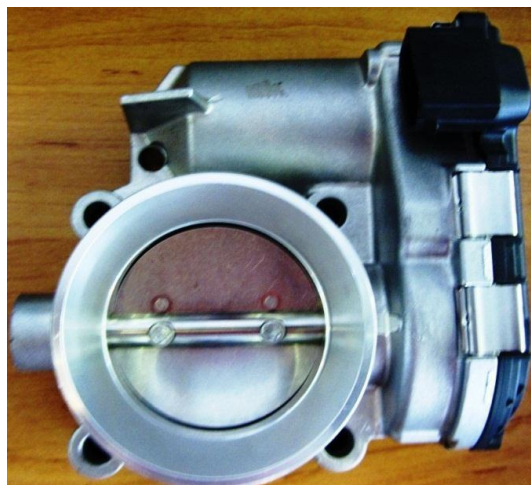
موتور است تا هوا با سوخت ترکیب شود و موتور طی فرآیندی که قسمتی از فرآیند در شکل ۲-۱

نشان داده شده تولید گشتاور کند.



شکل ۳-۱ اصول دریچه گاز مکانیکی [۶]

گشتاور تولیدی موتور با مقدار هوای ورودی نسبت مستقیم دارد [۷]، از این رابطه برای ایجاد پدال گاز در خودرو استفاده شده است، همان طوری که در شکل ۳-۱ مشاهده می کنید پدال گاز با رابطی مکانیکی به طور مستقیم به دریچه متصل شده و راننده هر چه بیشتر پدال گاز (پدال هوا) را فشار دهد، صفحه دریچه بیشتر باز شده و هوای بیشتری وارد موتور می شود و در نتیجه گشتاور بیشتری تولید می شود، این نوع کنترل، کنترل تناسبی نام دارد (فشار بیشتر بر روی پدال گاز: هوای بیشتر، فشار کمتر بر روی پدال گاز : هوای کمتر) [۸].

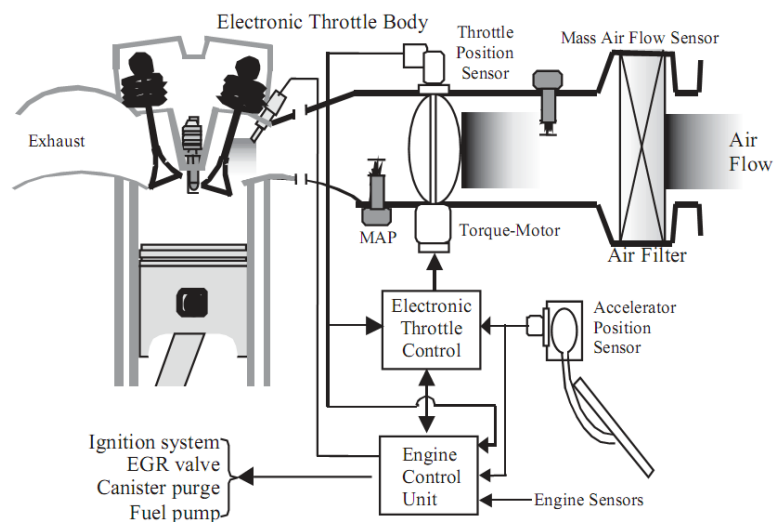


شکل ۴-۱ دریچه گاز الکترونیکی شرکت بوش

در دریچه‌گاز الکترونیکی این رابط مکانیکی بین دریچه و پدال گاز حذف شده است، در نتیجه برای باز و بسته کردن صفحه فلزی دریچه نیاز به محرکی داریم، این محرک در دریچه‌های گاز امروزی موتور جریان مستقیم است.

در ادامه نحوه‌ی کارکرد دریچه‌گاز الکترونیکی آمده است:

همان‌طور که در شکل ۵-۱ مشاهده می‌کنید، فرمان راننده به پدال گاز به وسیله‌ی حسگری که تغییر موقعیت پدال را حس می‌کند (پتانسیومتر) به صورت سیگنال الکتریکی به ECU مغز ماشین فرستاده می‌شود و ECU بر اساس: ۱- سیگنال دریافتی موقعیت پدال گاز (فرمان راننده) ۲- شرایط محیطی و کاری موتور که توسط حسگرهای مختلف به ECU فرستاده می‌شود، سیگنال مرجعی که صفحه فلزی دریچه گاز باید دنبال کند را می‌سازد، حال در بخش کنترل‌کننده دریچه‌گاز الکترونیکی که در ECU قرار دارد ورودی ولتاژ موتور جریان مستقیم طوری ساخته می‌شود تا صفحه فلزی دریچه سیگنال مرجع را دنبال کند. در دریچه‌گاز هم حسگر (پتانسیومتر) موقعیت صفحه فلزی قرار دارد که موقعیت صفحه فلزی را به ECU می‌فرستد، ECU با مقایسه موقعیت کنونی صفحه فلزی و سیگنال مرجع، ولتاژ موتور را توسط الگوریتم کنترل طوری تنظیم می‌کند تا خطا به حداقل برسد. [۷]



شکل ۵-۱: طرحواره‌ای از مکانیسم کار دریچه‌گاز الکترونیکی [۹]



## ۳-۱ کاربردهای دریچه گاز الکترونیکی

یکی از مزایای دریچه گاز الکترونیکی، توانایی کنترل دبی هوای ورودی است که منجر به کنترل نسبت هوا به سوخت و در نهایت کنترل گشتاور تولیدی موتور می‌شود، پس در هر عملکرد و شرایطی که نیاز به کنترل گشتاور موتور داشته باشیم، حتما باید ابتدا دریچه گاز الکترونیکی کنترل شود.

### ۳-۱-۱ تنظیم سرعت خودرو در سرعت مطلوب

در طی رانندگی با خودروهای مجهز به دریچه گاز مکانیکی، موقعیت صفحه فلزی دریچه گاز همواره به‌طور مکانیکی و با استفاده از پدال گاز، توسط راننده تنظیم می‌گردد. این کار در مسافرت‌های طولانی که طی آن راننده باید ساعتها با یک سرعت ثابت در بزرگراه‌های بین شهری خودرو را براند، کاری خسته کننده خواهد بود. استفاده از سیستم دریچه گاز الکترونیکی این امکان را فراهم می‌آورد که در چنین شرایطی تنظیم سرعت خودرو به‌طور خودکار به وسیله واحد کنترل موتور صورت گیرد [۱۰]، که در ادامه توضیح داده شده است:

ECU مقدار گشتاوری را که برای رسیدن به سرعت از پیش انتخاب شده (توسط راننده) نیاز است محاسبه کرده و بر این اساس موقعیت صفحه فلزی دریچه کنترل می‌شود تا گشتاور درخواستی تامین گردد، در این روش دیگر نیازی به فشردن پدال گاز توسط راننده نمی‌باشد [۷].



## ۲-۳-۱ کاهش مقدار آلاینده ها

در آزمایش‌هایی که توسط محققین شرکت دلفی [۱۱] بر روی دو موتور دارای دریچه گاز الکترونیکی انجام شده، کاهش ۱۵ درصدی در مقدار آلاینده‌های اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن‌ها گزارش شده است.

جدول ۱-۱ تاثیر دریچه گاز الکترونیکی بر کاهش آلاینده‌ها

Engine	Emission Test Type	Emission Result / Standard ( wtd. g / km )		
		HC	CO	NOx
3.5L V6	LEV-LDT2, 160k km E. equivalent	0.042 / 0.081	0.699 / 3.418	0.183 / 0.311
	US Federal Test Procedure (FTP)			
1.6L I4	ECE 2000, D4-80k km Equivalent	0.0197 / 0.066	0.169 / 0.58	0.030 / 0.058
	Or 1.2 DF, ECE + EUDC			

همچنین در آزمایش‌های دیگری که توسط محققین شرکت فورد [۱۲]، بوش [۱۳] و لوتوس [۱۴] انجام شده، تاثیر دریچه گاز بر کاهش مقدار آلاینده‌ها بررسی شده است.

## ۳-۳-۱ دیگر کاربردها:

در تحقیق شرکت بوش [۱۳] کاربردهای دیگری نیز بیان شده است: ۱- پدال گاز قابل برنامه‌ریزی، ۲- تنظیم نیروی کشش موتور، ۳- حفاظت و گرم کردن مبدل شیمیایی، ۴- تعویض دنده اتوماتیک با داشتن مصرف سوخت بهینه، ۵- کنترل نیروی کشش در موتورهای رقیق سوز، ۶- کنترل نیروی موتور در به کار نرفتن سیلندرها، ۷- عملکرد ضد تکان شدید.

## ۴-۱ مروری بر کارهای انجام شده

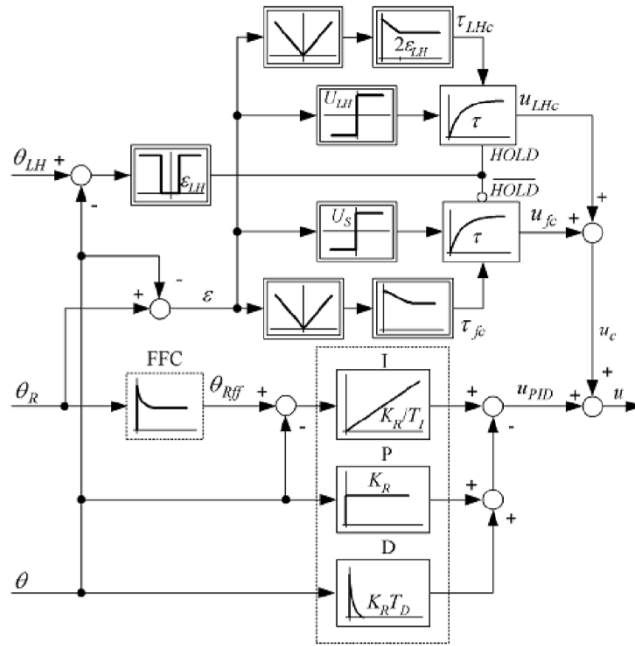
کنترل دریچه گاز الکترونیکی یک مسئله ردیابی در کنترل سیستم‌های غیرخطی محسوب می‌شود. تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل دریچه گاز الکترونیکی پیشنهاد شده است، که یکی از مهمترین روش‌ها در ادامه آمده است.

## ۱-۴-۱ کنترل کننده PID و ترکیب PID با سایر روش‌ها

روش کنترل PID یک راه حل اصلی است که مزیتش تنظیم پارامتر آسان قانون کنترل و یکی از معایبش طولانی بودن زمان تنظیم پارامترهاست، در [۱۵] نشان داده شده که کنترل کننده PID برای حالت کاری سیگنال بزرگ (تغییرات زاویه در سیگنال مرجع بیشتر از ۵ درجه) چون تاثیر عوامل غیرخطی اصطکاک و لیمپ‌هوم<sup>۱</sup> (ناحیه مرده) کم است، عملکرد نسبتاً مناسبی دارد (با این حال چون سیستم در هر صورت غیرخطی است، خطای حالت دائم برای بهره‌های متناسب، نسبت ثابت و مشخصی ندارد)، ولی برای سیگنال کوچک (تغییرات زاویه در سیگنال مرجع بیشتر از ۰,۳ درجه) تحت تاثیر عوامل غیرخطی عملکرد نامناسبی دارد، برای مثال در کنترل دور آرام موتور که تغییرات زاویه کمتر از  $\pm 0,5$  درجه است، خطای قابل قبولی ندارد. در ضمن چون سیستم در کل غیرخطی است به وسیله الگوریتم زمان‌بندی بهره، دو کنترل کننده PID، یکی برای ناحیه بالای لیمپ‌هوم و دیگری برای ناحیه زیر لیمپ‌هوم طراحی شده است. برای بهبود عملکرد در حالت سیگنال کوچک در تحقیقی که تحت حمایت شرکت فورد با همکاری دانشگاه زاگرب انجام شده است [۱۶]، برای حذف عوامل غیرخطی ابتدا این عوامل غیرخطی شناسایی و به صورت پیش‌خور (مدل معکوس) با خروجی کنترل کننده PID جمع و به ورودی سیستم درپچه گاز خورنده می‌شوند (شکل ۱-۶). بدین ترتیب اثر عوامل غیرخطی، با جبرانسازی‌ای که از محاسبات به دست می‌آید خنثی می‌شود، و سیستم تقریباً خطی می‌شود، البته این نتیجه در صورتی قابل دستیابی و معتبر خواهد بود که اثر نویز خیلی افزایش نداشته باشد.

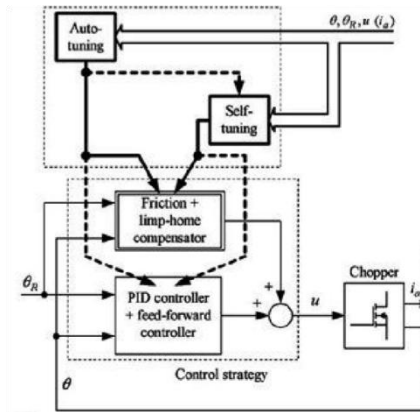
---

<sup>۱</sup> لیمپ هوم



شکل ۱-۶: استراتژی کنترل PID+جبران‌ساز پیش‌خور

چون این جبران‌سازی بر اساس شناسایی سیستم است، عملکرد کنترل خطی درجه گاز نسبت به تغییر پارامترهای درجه گاز حساس است. تغییرات پارامترهای درجه گاز ناشی از عوامل مختلفی است، که عبارتند از: ۱- اختلاف بین درجه‌های مختلف در هنگام ساخت، ناشی از اختلاف بین اجزای سازنده آنها ۲- تغییرات شرایط محیطی مانند دمای هوا ۳- استهلاک قطعات به مرور زمان. حال به منظور وفق پیدا کردن کنترل‌کننده خطی با تغییرات پارامترها، در [۱۷] و [۱۸] الگوریتم خود تنظیم همان‌طور که در شکل ۱-۷ مشاهده می‌شود، به سیستم کنترل خطی پیشین [۱۶] اضافه می‌شود، الگوریتم خود تنظیم می‌تواند هر بار که موتور احتراق داخلی خاموش می‌شود اجرا شده و سیستم کنترلی را از تغییرات پارامترها آگاه کند، و هم می‌تواند بلادرنگ (روشن بودن موتور)، پارامترهایی از سیستم را که ممکن است در سیکل کاری موتور تغییر کند (مانند مقاومت آرمیچر، موقعیت ناحیه مرده و ...) را تخمین زده و در اختیار کنترل‌کننده قرار دهد. نتایج عملی نشانگر آن است که سیستم کنترل تطبیقی خود تنظیم [۱۸] نسبت به سیستم کنترل PID با جبران‌سازی عوامل غیرخطی [۱۶] عملکرد بهتری دارد.



شکل ۷-۱: استراتژی کنترل خود تنظیم

در راه حل کنترل غیرخطی که شامل کنترل کننده PID و جبران کننده پس خور برای اثرهای اصطکاک و لیمپ هوم استفاده شده، واضح نیست که چطور پارامترهای جبران کننده را برای تضمین پایداری به دست آوریم و هم چنین برای تنظیم اولیه PID، شناسایی پارامترهای سیستم ضروری است.

از سال ۱۹۸۱ که تحقیق در مورد دریچه گاز الکترونیکی در شرکت فورد آغاز شده تا کنون ۲۰۱۵، بیش از ۲۵۰ مقاله و تز به دریچه گاز الکترونیکی پرداخته‌اند. بیشتر مقالات در کنفرانس‌های و مجلات SAE و Springer, Elsevier, IEEE<sup>۱</sup> چاپ شده‌اند.

## ۵-۱ ضرورت انجام تحقیق

دانشگاه‌های کشور در زمینه مدل سازی، شناسایی و کنترل در مهندسی برق، مکانیک و کنترل نیاز به یک سیستم غیرخطی محک<sup>۲</sup> دارند، تا دانشجویان -به خصوص ارشد- بتوانند از درس‌هایی که طی دوران تحصیل خود می‌گذرانند، در عمل -آزمایشگاه- استفاده کنند و فقط دید تئوری نداشته باشند و با آزمایشاتی که انجام می‌دهند، رابطه‌ی بین علم و عمل برایشان به وضوح مشخص شود و

<sup>۱</sup> Society of Automobile Engineer

<sup>۲</sup> -Benchmark

انگیزه‌های تحقیق و پژوهش و کاربردهای علمی درونشان زنده شود.

سیستم دریچه گاز الکترونیکی با توصیفات که در بخش‌های قبل شد، سیستمی کاملاً غیرخطی با اثرات اصطکاک، فنر و لقی چرخ‌دنده‌ها است که می‌تواند در درس شناسایی به عنوان شناسایی یک سیستم غیرخطی و در درس‌های کنترل تطبیقی، کنترل فازی، کنترل عصبی، کنترل مقاوم (و کنترل‌های دیگر که برای سیستم غیرخطی وجود دارند)، به عنوان سیستم عملی برای پیاده‌سازی این الگوریتم‌های کنترلی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۱-۶ ساختار پایان نامه

در فصل دوم عوامل غیرخطی موجود در دریچه گاز الکترونیکی توضیح داده شده، مدل دینامیکی سیستم به دست آمده و با استفاده از آزمایش‌های عملی پارامترهای سیستم شناسایی می‌شوند.

در فصل سوم مسئله و خواسته‌های کنترلی طرح می‌شوند و با استفاده از الگوریتم فازی-عصبی به کنترل پیش‌خور، و با استفاده از روش کنترل ولتاژ به کنترل پس‌خور دریچه گاز الکترونیکی می‌پردازیم، در ادامه هم نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم برای کارهای در پیش رو ارائه می‌گردد.

## **فصل دوم : مدل سازی و شناسایی سیستم دریچه گاز**

### **الکترونیک**

## ۱-۲ مقدمه

اولین قدم در کنترل عملی یک سیستم مدل سازی و شناسایی سیستم مورد نظر است، تا ۱- محقق دینامیک و رفتار سیستم را درک کند و ۲- در طی فرآیند طراحی الگوریتم کنترل، بتواند کیفیت الگوریتم خود را قبل از پیاده سازی در عمل با استفاده از محیط‌های شبیه سازی<sup>۱</sup> تست کند و مشکلات پیش آمده را برطرف کند. به همین خاطر هر چه مدل شناسایی شده به سیستم واقعی نزدیک تر باشد، طراحی کنترل کننده برای پیاده سازی در عمل آسان تر می شود و نیاز به اصلاحات اساسی کنترل کننده برای اینکه قابل پیاده سازی در عمل باشد، نیست.

مراحل انجام شناسایی: ۱- مدل دینامیکی سیستمی که قرار است کنترل شود، با استفاده از معادلات فیزیکی - برای مثال قانون دوم نیوتن - به دست می آید. ۲- برای هر یک از پارامترها، مدل مناسبی انتخاب و آزمایش‌های لازم برای تخمین هر یک از پارامترها انجام می شود. ۳- در این مرحله که مهمترین قسمت است، تاییدیه مدل می باشد، که معیارهای مختلفی برای بررسی آن وجود دارد، یکی از معمول ترین آن‌ها، اعمال ورودی یکسان به سیستم واقعی و سیستم شبیه سازی شده، و بررسی پاسخ‌هاست، که اگر پاسخ‌ها اختلاف قابل توجهی داشته باشند، با سعی و خطا و رفتن به مرحله دو سعی در رفع این اختلاف می کنیم تا مدل بتواند جایگزین خوبی برای سیستم واقعی در شبیه سازی شود.

## ۲-۲ آشنایی با دریچه گاز الکترونیکی

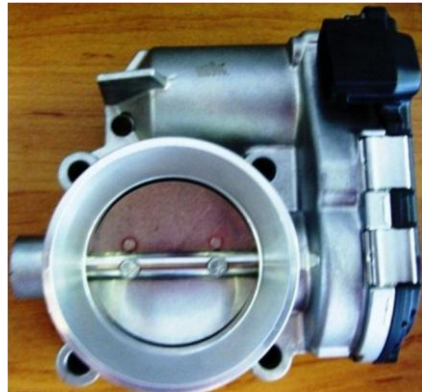
دریچه گاز الکترونیکی دارای یک صفحه فلزی گرد می باشد - همان طور که در شکل ۲-۱ مشاهده می شود، این صفحه درون قسمت استوانه‌ای مانند دریچه قرار دارد - این صفحه فلزی که بر

---

<sup>۱</sup> - برای مثال بخش Simulink در نرم افزار Matlab

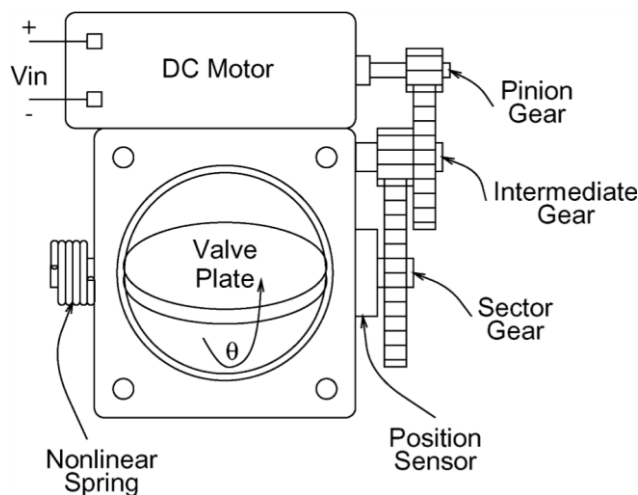


سر راه هوای ورودی به منیفولد است، دارای موقعیت زاویه‌ای قابل کنترل است. تغییر موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی موجب تغییر دبی هوای ورودی به منیفولد می‌شود. کنترل موقعیت صفحه فلزی به وسیله‌ی موتور جریان مستقیم، حسگر تشخیص دهنده موقعیت - پتانسیومتر - و میکرو کنترل کننده‌ای که در واحد کنترل الکترونیکی قرار دارد، امکان پذیر می‌شود [۱۶].



شکل ۱-۲: دریچه گاز الکترونیکی ساخت شرکت بوش

با توجه به شکل ۲-۲، دریچه گاز الکترونیکی دارای اجزای زیر می‌باشد:



شکل ۲-۲: طرحواره‌ای از دریچه الکترونیکی [۱۹]

۱- موتور جریان مستقیم: این موتور وظیفه تولید گشتاور برای چرخاندن صفحه فلزی در هر دو جهت باز شدن و بسته شدن را بر عهده دارد.

۲- جعبه دنده<sup>۱</sup> - که از دو جفت چرخ دنده تشکیل شده-: علت استفاده از چرخ دنده‌ها، افزایش گشتاور تولیدی توسط موتور است، تا بتوان بر گشتاورهای مقاوم سیستم غلبه کرد. افزایش گشتاور به ناچار کاهش سرعت را در بر دارد، ولی چون کنترل موقعیت صفحه فلزی مد نظر است، سرعت در درجه دوم اهمیت است.

۳- فنر پیچشی-بازگشتی<sup>۲</sup>: از این فنر به دلایل ایمنی در سیستم استفاده می شود، بدین ترتیب که اگر به هر دلیلی موتور الکتریکی از کار بیفتد -مانند قطع شدن تغذیه موتور، خراب شدن موتور الکتریکی و ...- گشتاور حاصل از فنر- که به دلیل جمع شدن در آن ذخیره شده است- صفحه فلزی را به حالت بسته انتقال دهد، البته واضح است که صفحه فلزی نباید به طور کامل بسته شود، چون در این صورت با از کار افتادن موتور الکتریکی، صفحه کاملاً بسته شده و خودرو به اصطلاح خفه می کند و نمی تواند به حرکت خود ادامه دهد- که در بعضی موارد مانند سرعت‌های بالای خودرو این اتفاق خطرناک است- به همین خاطر از فنر پلانگر<sup>۳</sup> برای جلوگیری از بسته شدن کامل صفحه فلزی استفاده می شود، این فنر صفحه فلزی را در یک موقعیت پیش فرض و ثابت که کمی بزرگتر از زاویه دور آرام<sup>۴</sup> می باشد نگه می دارد- تقریباً ۷,۵ درجه- و از بسته شدن کامل صفحه توسط فنر بازگشتی جلوگیری می کند [۲۰]. به این ترتیب اگر به هر دلیلی موتور الکتریکی از کار بیفتد، خودرو به حرکت خود با دور آرام ادامه می دهد تا به اولین تعمیرگاه برسد، به این اثر، اثر لنگان لنگان رفتن<sup>۵</sup> گفته می شود [۲۱]. پس وقتی خودرو خاموش است و در نتیجه موتور هم گشتاوری را انتقال نمی دهد، فنرها در حالت تعادل قرار دارند و زاویه تقریباً

---

<sup>۱</sup>- Gearbox

<sup>۲</sup>-Torsion (Return) Spring

<sup>۳</sup> Plunger Spring

<sup>۴</sup> Idle

<sup>۵</sup> Effect لیمپ هوم

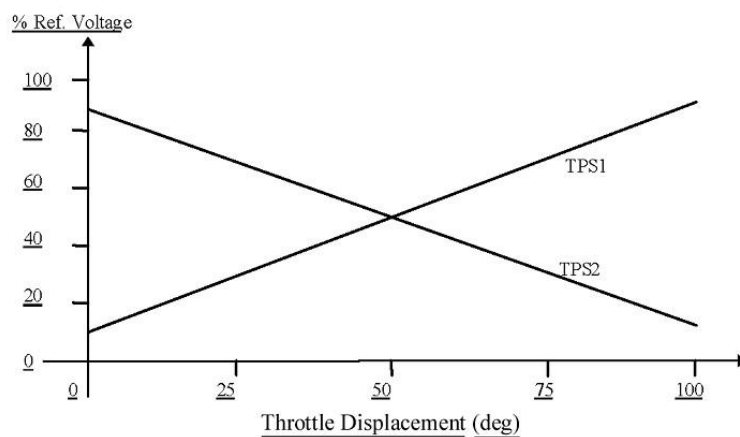


۷,۵ نقطه تعادل سیستم محسوب می‌شود.

۴- حسگرهای تشخیص موقعیت: از دو پتانسیومتر تشکیل شده است، همان‌طوری که در شکل

۳-۲ مشخص است، پتانسیومترها به صورت عکس هم کار می‌کنند به این ترتیب ولتاژهای

دو پتانسیومتر در واحد کنترل الکترونیکی با هم جمع می‌شوند- به طور معمول حاصل



شکل ۳-۲: مشخصه حسگرها [۱۱]

جمع مساوی ۵ ولت است- و اگر مقدار نامعقول ثبت شود، نشان‌دهنده‌ی معیوب بودن

پتانسیومترهاست- یا تداخل سیگنال تاثیرگذار بر روی ولتاژ حسگر- و واحد کنترل

الکترونیکی برای چک کردن پتانسیومترها به راننده اخطار می‌دهد [۲۲].

دریچه گاز الکترونیکی از دید ورودی-خروجی به صورت شکل ۴-۲ است.



شکل ۴-۲: دریچه گاز از دید ورودی-خروجی

که  $u$  سیگنال ورودی- کنترل- ولتاژ آرمیچر و  $\phi$  سیگنال خروجی - اندازه‌گیری- درجه می‌باشند.

## ۲-۳ مدل سازی دریاچه گاز الکترونیکی

سیستم دریاچه گاز الکترونیکی به شدت غیرخطی است، ابتدا برای درک بهتر سیستم‌های

غیرخطی به بررسی ویژگی‌های سیستم خطی می‌پردازیم:

سیستم‌های خطی دو ویژگی اصلی دارند: ۱- جمع آثار<sup>۱</sup> ۲- همگنی<sup>۲</sup>

۱- خاصیت جمع آثار همانطور که از اسمش پیداست به این معناست که پاسخ خروجی سیستم به

جمع ورودی‌ها برابر است با جمع پاسخ‌های سیستم به ورودی‌های مجزا.

۲- اگر ورودی در عددی ثابت ضرب شود خروجی هم در همان عدد ثابت ضرب می‌شود.

سیستم دریاچه گاز چون دارای مشخصات غیرخطی در ناحیه‌های کاری‌اش می‌باشد، بنابراین دو خاصیت

بالا در کل ناحیه کاری دریاچه گاز صدق نمی‌کنند.

برای درک رفتار غیرخطی در سیستم دریاچه گاز منحنی استاتیک بار-در بخش‌های بعدی

این منحنی با شناسایی پارامترها به دست می‌آید- در شکل ۲-۵ آورده شده، همان‌طور که از شکل

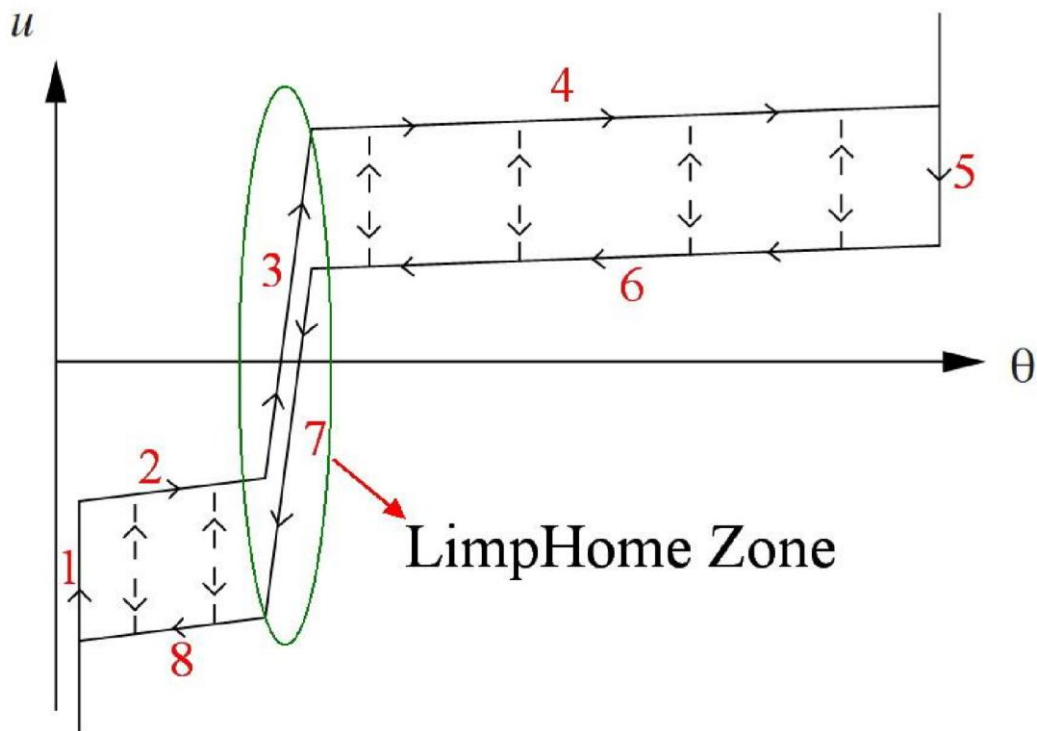
پیدا است ورودی ( $u$ ) و خروجی ( $\theta$ ) در کل ناحیه کار با هم رابطه‌ی خطی ندارند، در ادامه به تحلیل

این نمودار می‌پردازیم:

---

<sup>۱</sup> -Superposition

<sup>۲</sup> -Homogeneity



شکل ۲-۵: مشخصه غیر خطی (ناحیه‌های مرده و هیستریزیس) در پیچه گاز الکترونیکی [۲۳]

۱: در ابتدا صفحه فلزی در پیچه در موقعیت کاملاً بسته قرار دارد و با افزایش مقدار ولتاژ منفی هیچ تغییری در مقدار موقعیت صفحه فلزی ایجاد نمی‌شود.

۲: با افزایش بیشتر مقدار ولتاژ منفی صفحه فلزی در پیچه شروع به باز شدن می‌کند (نقطه تعادل سیستم بعد از باز شدن است) تا به ناحیه تعادل یا ناحیه لیمپ هوم برسد.

۳: در ناحیه لیمپ هوم با افزایش مقدار ولتاژ، افزایش خیلی کمی در مقدار خروجی داریم.

۴: بعد از ناحیه لیمپ هوم با افزایش کمی در مقدار ولتاژ، مقدار خروجی به مقدار بیشینه‌اش می‌رسد.

۵: بعد از اینکه خروجی به مقدار بیشینه‌اش رسید با افزایش ولتاژ، مانع مکانیکی خروجی را در همان حد نگه داشته و ناحیه اشباع به وجود می‌آید، حال شروع به کاهش مقدار ولتاژ می‌کنیم، باز هم تغییری در خروجی مشاهده نمی‌شود (چون در بسته شدن تنها عامل مخالف اصطکاک است، گشتاور

تولیدی کمی برای بسته شدن نیاز است).

۶: مقدار ولتاژ را باز هم کاهش می‌دهیم، صفحه فلزی شروع به بسته شدن می‌کند (جالب است که در بازه‌ی کوچکی از تغییر ولتاژ دریاچه از موقعیت کاملاً باز به ناحیه لیمپ هوم می‌رسد).

۷: در ناحیه لیمپ هوم باز هم مقدار ولتاژ را کاهش می‌دهیم، در این حالت باز هم صفحه فلزی بسته می‌شود ولی تغییرات مقدار خروجی بسیار کم است.

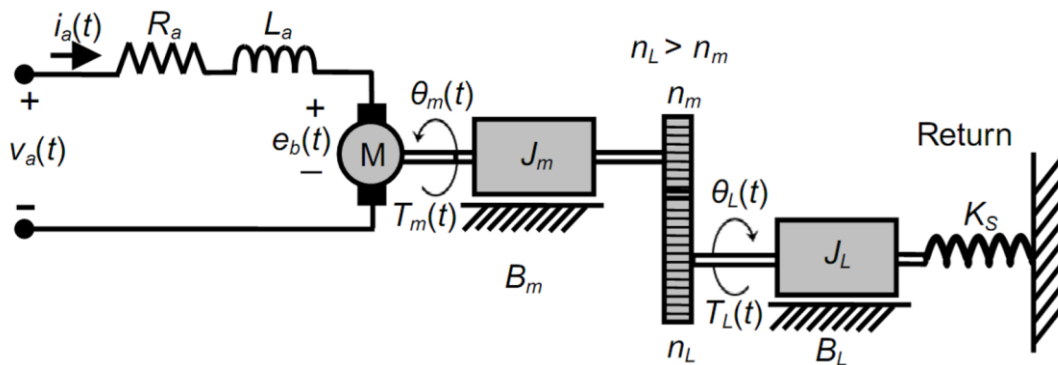
۸: با کاهش بیشتر مقدار ولتاژ از ناحیه لیمپ هوم خارج شده و صفحه فلزی با تغییرات شدید بیشتری نسبت به ناحیه لیمپ هوم به موقعیت کاملاً بسته‌اش می‌رسد.

این حالت‌های مختلف نشان می‌دهند که در کل رابطه‌ی خطی یکسانی بین ورودی و خروجی برقرار نیست، و سیستم دارای ناحیه مرده و اختلاف بین مسیر باز شدن و بسته شدن است که به اصطکاک برمی‌گردد، چون اصطکاک همیشه با حرکت مخالفت می‌کند بین باز شدن و بسته شدن دریاچه تفاوت وجود دارد و می‌توان در نمودار بالا نقش اصطکاک را ملاحظه نمود. مثلاً برای حالت ۴، اگر خط وسط بین باز و بسته شدن را مشخصه فنر بگیریم، در نتیجه برای باز شدن صفحه فلزی، گشتاور اصطکاک هم چون مثبت است با فنر جمع می‌شود و در مقابل گشتاور ورودی مخالفت می‌کند، ولی برای بسته شدن مقدار گشتاور اصطکاک منفی است و از گشتاور فنر کم می‌شود و در نتیجه گشتاور کمتری در مقایسه با باز شدن نیاز است. -در بسته شدن گشتاور فنر هم علامت با گشتاور با موتور است و به بسته شدن کمک می‌کند، در نتیجه گشتاورهای فنر و موتور فقط باید بر گشتاور اصطکاک غلبه کنند.-

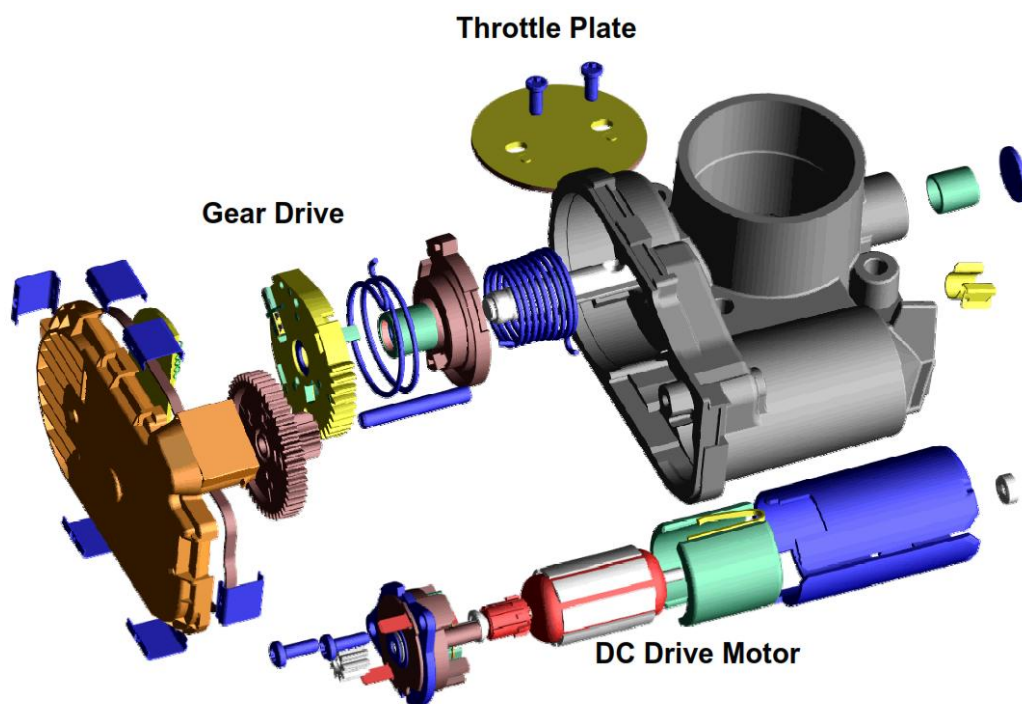
در باز شدن: -گشتاور موتور مثبت است-گشتاورهای فنر و اصطکاک با گشتاور موتور مخالفت می کنند.

در بسته شدن: -گشتاور موتور منفی است- گشتاور فنر به گشتاور موتور کمک می کند ولی گشتاور اصطکاک با گشتاور موتور باز هم مخالفت می کند.

حال برای مدلسازی دریاچه گاز الکترونیکی همان طور که از شکل ۲-۲ و شکل ۲-۶ و شکل ۲-۷ پیداست، ابتدا برای هر قسمت از این مجموعه، مدل ریاضی اش را به دست آورده و در انتها با ترکیب معادلات به مدلسازی کل مجموعه می رسیم.



شکل ۲-۶: مدل سازی دریاچه گاز الکترونیکی [۲۴]



Picture courtesy of Robert Bosch GmbH

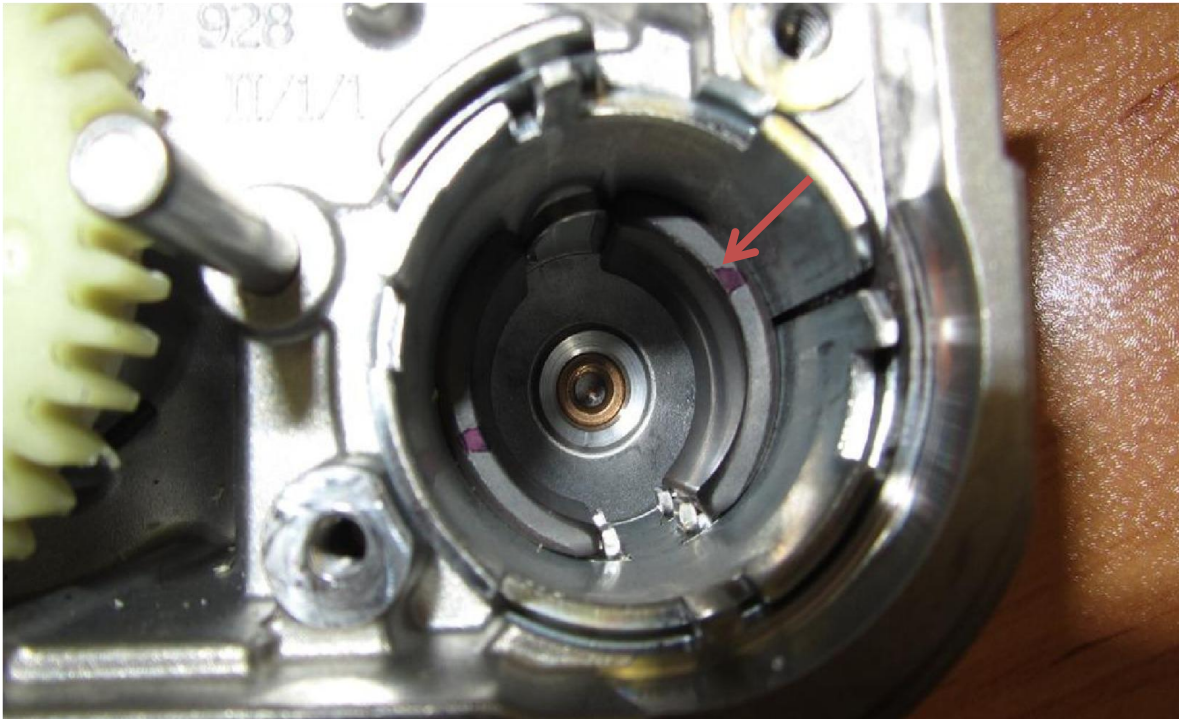
شکل ۷-۲ نمای داخلی دریچه گاز الکترونیکی

## ۱-۳-۲ موتور جریان مستقیم

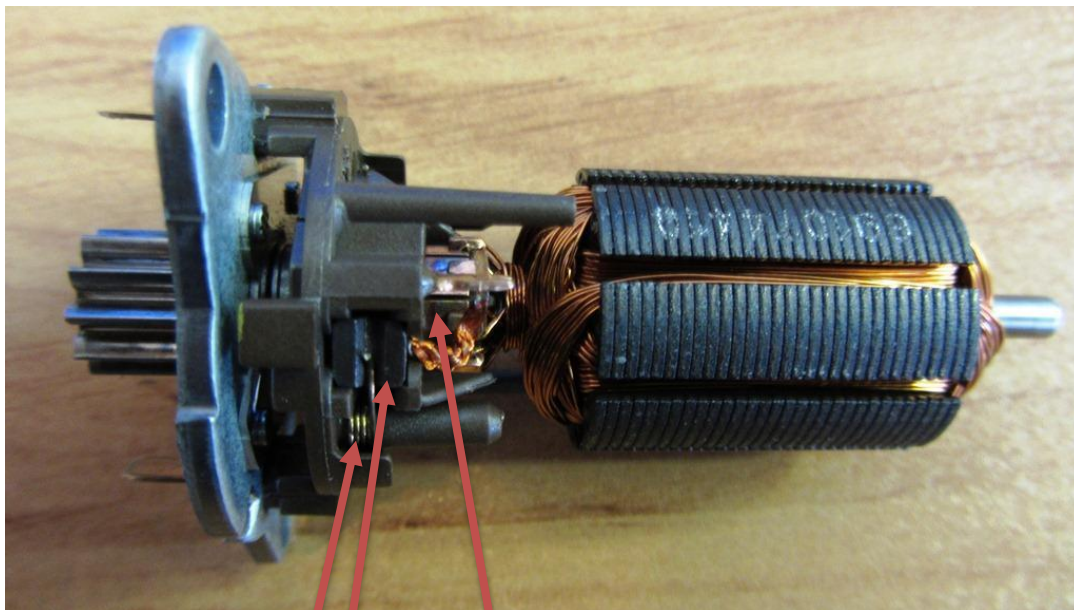
برای تولید گشتاور مورد نیاز برای باز و بسته کردن صفحه فلزی دریچه، دو انتخاب وجود دارد: ۱-موتور پله‌ای ۲-موتور جریان مستقیم. در دریچه گاز مورد بررسی بنابر دلایل زیر از موتور جریان مستقیم استفاده شده است: ۱- توانایی حرکت دقیق و سریع در مقایسه با موتور پله‌ای در زوایای مختلف و پیوسته. ۲- انعطاف‌پذیری بیشتر در طراحی کنترل‌کننده به خاطر نامحدود بودن تعداد موقعیت‌ها [۲۵].

موتور جریان مستقیم مورد استفاده از نوع میدان دائم دو قطبی و جاروبک‌دار است. استاتور و آرمیچر موتور جریان مستقیم در شکل ۸-۲ و شکل ۹-۲ نشان داده شده‌اند.





شکل ۸-۲: استاتور موتور جریان مستقیم



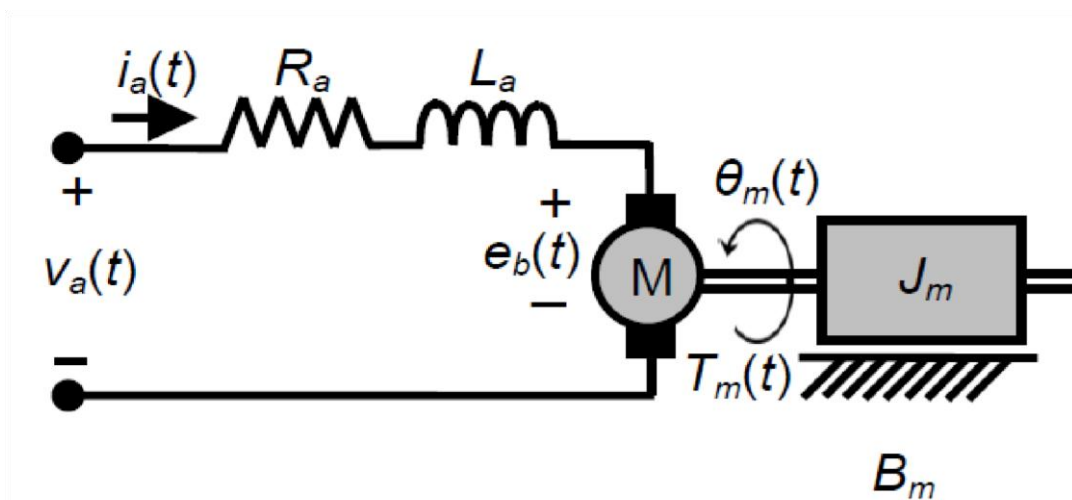
شکل ۹-۲ آرمیچر موتور و بقیه متعلقات (کوموتاتورها و جاروبک ها و فنر جاروبکها)

resistance	$1.5 \Omega \pm 0.3 \Omega$
inductance (at 120 Hz)	$0.9 \text{ mH} \pm 0.1 \text{ mH}$
no-load current	$< 0.8 \text{ A}$
no-load speed	$4500 \text{ min}^{-1}$
lockup stall (typical)	$210 \text{ Nmm}$
lockup current (typical)	$9.5 \text{ A}$
maximum constant current at 212°F (effective value)	$2.5 \text{ A}$
nominal current (no-load) (average value)	$< 1.5 \text{ A}$
maximum allowed generator current	$< 10.0 \text{ A}$ (must not be exceeded to protect the magnets)
conditions for learning the index point (UMA adaptation)	angular velocity $\omega \leq 1 \text{ V / sec} (\equiv 20^\circ / \text{sec})$ environmental temperature $T_U = 32^\circ \dots 212^\circ \text{F}$

شکل ۱۰-۲ اطلاعات موجود در برگه اطلاعات محصول در مورد موتور جریان مستقیم

با توجه به اطلاعاتی که در برگه اطلاعات محصول [۱] در پیچه گاز الکترونیکی در مورد موتور جریان مستقیم آمده است - شکل ۲-۱ - چون مقادیر پارامترها به خاطر پیروسی ساخت دارای عدم قطعیت می باشد، نیاز به شناسایی پارامترهای موتور جریان مستقیم داریم.

برای مدل سازی موتور جریان مستقیم از مدار شکل ۲-۱۱ استفاده شده است، که در آن  $R_a$  مقاومت الکتریکی آرمیچر،  $L_a$  اندوکتانس آرمیچر،  $V_a$  ولتاژ ورودی،  $i_a$  جریان آرمیچر،  $\theta_m$  زاویه محور روتور،  $e_b$  ولتاژ القایی ناشی از چرخش محور روتور،  $T_m$  گشتاور تولیدی موتور،  $B_m$  ضریب میراکنندگی یاتاقان های محور روتور - ثابت اصطکاک ویسکوز- و  $J_m$  اینرسی روتور است.



شکل ۱۱-۲: مدل سازی مدار آرمیچر [۲۴]

با نوشتن قانون اهم در مدار آرمیچر داریم:

$$V_a = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (1-2)$$

و

$$e_b = k_v \varphi \frac{d\theta_m(t)}{dt} = k_b \omega_m \quad (2-2)$$

که در آن  $k_b$  ثابت ولتاژ القایی در سمت موتور،  $\omega_m$  سرعت محور موتور و  $\varphi$  شار مغناطیسی در فاصله هوایی می‌باشند.

چون از آهنربای دائمی در استاتور استفاده شده است، پس شار مغناطیسی در فاصله هوایی ثابت و در نتیجه ولتاژ القایی تنها به سرعت محور موتور وابسته است.

موتور جریان مستقیم مبدل گشتاوری است که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. گشتاوری که بر روی محور موتور ایجاد می‌شود به طور مستقیم با شار میدان -استاتور- و جریان آرمیچر رابطه دارد.

$$T_m(t) = k_v \varphi i_a = k_m i_a \quad (3-2)$$

که  $k_m$  ثابت گشتاور موتور در سمت موتور است.

چون از آهنربای دائمی در استاتور استفاده شده است، پس شار مغناطیسی در فاصله هوایی ثابت و در نتیجه گشتاور تنها به جریان آرمیچر وابسته است.

حال می‌خواهیم رابطه‌ی بین گشتاور موتور و ثابت القایی را در موتورهای جریان مستقیم با میدان دائم به دست آوریم، برای این منظور توان مکانیکی تولید شده بر روی محور آرمیچر را می‌نویسیم.

$$P = e_b(t) i_a(t) \quad (4-2)$$

این توان همچنین برابر است با:

$$P = T_m(t)\omega_m(t) \quad (5-2)$$

که در دستگاه SI واحد  $T_m$ ، N-m و واحد  $\omega_m$ ،  $rad/sec$  است.

حال می‌خواهیم از روابط (۲-۲) و (۳-۲) توان را در رابطه‌ی (۴-۲) بدست آوریم، داریم:

$$P = e_b(t)i_a(t) = [k_b\omega_m(t)] \cdot [T_m(t)/k_m] \quad (6-2)$$

با مقایسه روابط (۲-۵) و (۲-۶) نتیجه می‌گیریم که:

$$k_b(V \cdot sec/rad) = k_m(N \cdot m/A) \quad (7-2)$$

پس اگر ثابت‌های گشتاور و ولتاژ القایی دارای واحدهای ارائه شده در رابطه (۷-۲) باشند با هم برابرند [۲۶]. البته این رابطه وقتی برقرار است که تلفات قابل صرف‌نظر کردن باشد، در ادامه این فصل با بررسی اعتبارسنجی مدل متوجه شدیم که نمی‌توان این دو ثابت را برابر قرار داد-

در ادامه برای درک مفهومی موتور جریان مستقیم به مفاهیم اصلی آن پرداخته‌ایم.

## ۲-۳-۱-۱ ولتاژ القایی برگشتی در موتور جریان مستقیم

برای درک ایده نیرو محرکه برگشتی در یک موتور جریان مستقیم، مثالی از یک خودرو الکتریکی یا ماشین تحویل شیر می‌زنیم که از تپه‌ای بالا و سپس پایین می‌آید، که در شکل ۲-۱۲ آمده است. به محض اینکه سیم‌پیچ در موتور شروع به چرخش می‌کند، **ولتاژ برگشتی بخاطر شاری که باعث کاهش آن می‌شود، در آن القا می‌شود**، این ولتاژ برگشتی موجب می‌شود تا جریان عبوری از سیم‌پیچ کاهش یابد.

حال اگر نیروی محرکه الکتریکی منبع ولتاژ -ولتاژ منبع- را  $E$ ، نیروی محرکه برگشتی را  $e$ ، مقاومت سیم‌پیچ را  $R$  و جریان عبوری از سیم پیچ را  $I$  بگیریم، داریم:

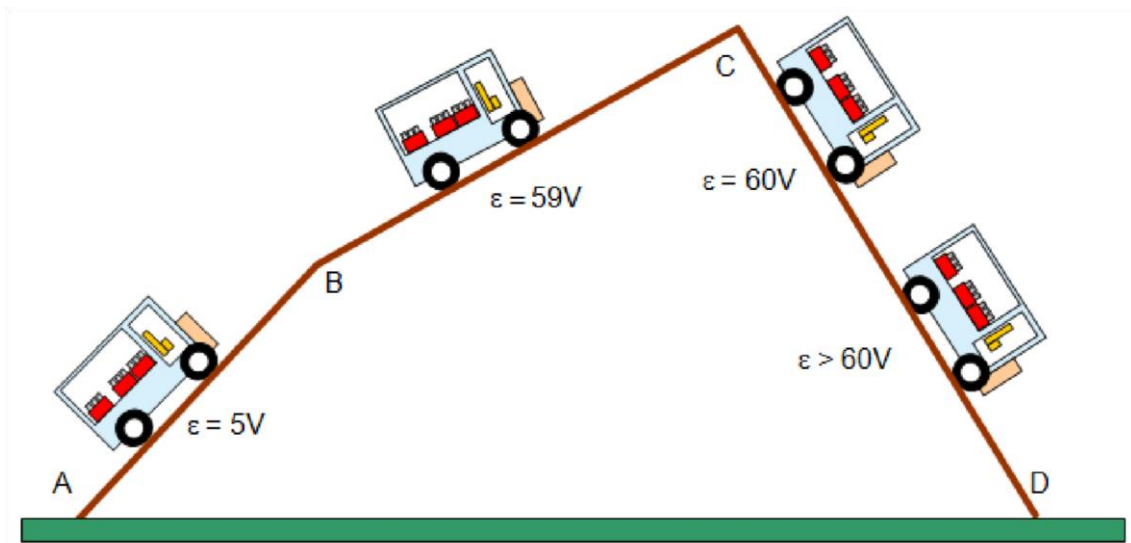
$$I = \frac{E - e}{R} \quad (8-2)$$

که  $e$  با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  - رابطه مستقیم دارد، سرعت زاویه‌ای بیشتر، ولتاژ برگشتی بیشتر در نتیجه جریان عبوری کمتری ایجاد می‌کند. برای مثال یک موتور عملی با ولتاژ منبع ۱۰۰ ولت، ولتاژ برگشتی ممکن است تا ۹۵ ولت افزایش یابد!

مقاومت سیم‌پیچ معمولاً کوچک است - در محدوده‌ی ۱ اهم-، و بنابراین زمانی که سیم‌پیچ نمی‌چرخد و در حالت سکون است، ممکن است جریان بسیار بزرگی از آن عبور کند. وقتی که سیم‌پیچ شروع به حرکت می‌کند و سرعتش افزایش می‌یابد، از آنجایی که ولتاژ برگشتی متناسب با سرعت زاویه‌ای سیم‌پیچ است، در نتیجه جریان عبوری از سیم‌پیچ کاهش می‌یابد. جریان راه‌اندازی ممکن است تا ۱۰۰۰ آمپر نیز برسد، بنابراین لازم است در هنگام شروع چرخش، مقاومت محافظی به طور سری با سیم‌پیچ قرار گیرد تا جریان را کاهش دهد و مانع سوختن سیم‌پیچ شود. این مقاومت سری وقتی که موتور به کار بیفتد، می‌تواند از مدار خارج شود. به همین علت است که هیچ وقت نباید موتور جریان مستقیم را وقتی در حالت کار و متصل به منبع ولتاژ است متوقف کرد، چون در این حالت ولتاژ برگشتی صفر می‌شود و جریان ناگهان افزایش می‌یابد و موجب سوختن سیم‌پیچ می‌شود.

شکل ۲-۱۲ خودرو برقی را نشان می‌دهد که با باتری ۶۰ ولتی به حرکت در آمده و به بالای تپه می‌رود. این مثال کمک می‌کند که درک کنیم وقتی موتور جریان مستقیم با سرعت‌های مختلف کار می‌کند، چه اتفاقی می‌افتد. زمانی که خودرو  $AB$  را بالا می‌رود، مانند این است که موتور جریان مستقیم با سرعت کم کار می‌کند، پس ولتاژ القایی برگشتی کم است - مثلاً ۵ ولت-، و این بدان معناست که جریان عبوری از موتور، بزرگ است و گشتاور بزرگی را تحویل می‌دهد. انرژی شیمیایی درون باتری به انرژی پتانسیل خودرو تبدیل می‌شود. خودرو به قسمت  $BC$  می‌رسد، شیب کمتر شده است، سرعت موتور جریان مستقیم افزایش می‌یابد و ولتاژ القایی بازگشتی برای مثال به ۵۹ ولت می‌رسد، در نتیجه جریان عبوری از موتور کم می‌شود. حال خودرو در سرپایینی  $CD$  قرار می‌گیرد، سرعت باز هم افزایش پیدا می‌کند و ولتاژ القایی به ۶۰ ولت می‌رسد و انرژی عرضه شده فقط برای

غلبه بر اصطکاک استفاده می‌شود. در ادامه حرکت سرعت باز هم افزایش پیدا می‌کند تا جایی که ولتاژ



شکل ۲-۱۳: خودرو برقی مثالی برای درک ولتاژ القایی [۲۷]

القایی بازگشتی از ۶۰ ولت هم بیشتر می‌شود و بنابراین موتور مانند دینام رفتار می‌کند و برق تولید می‌کند و انرژی تولید شده در باتری ذخیره می‌گردد. جریان، گشتاوری تولید می‌کند که خلاف جهت حرکت است، بنابراین به عنوان ترمز عمل می‌کند [۲۷]. بنابراین ولتاژ القایی برگشتی معادل با "اصطکاک الکتریکی" است که پایداری موتور و در نتیجه پایداری کل سیستم را بهبود می‌دهد [۲۶].

## ۲-۳-۲ چرخ‌دنده‌ها

می‌توان محور موتور را مستقیماً به محور صفحه فلزی متصل کرد، ولی به منظور افزایش گشتاور تولیدی توسط موتور از دو جفت چرخ‌دنده استفاده شده است که در شکل ۲-۱۳ نیز مشاهده می‌شود. از دلایل دیگر استفاده از چرخ‌دنده‌ها، می‌توان به کاهش اصطکاک<sup>۱</sup> - در نتیجه کاهش توان تولیدی

<sup>۱</sup> - اصطکاک ویسکوز رابطه مستقیم با سرعت دارد، در نتیجه چرخ‌دنده‌ها موجب افزایش گشتاور و کاهش سرعت می‌شوند، اصطکاک

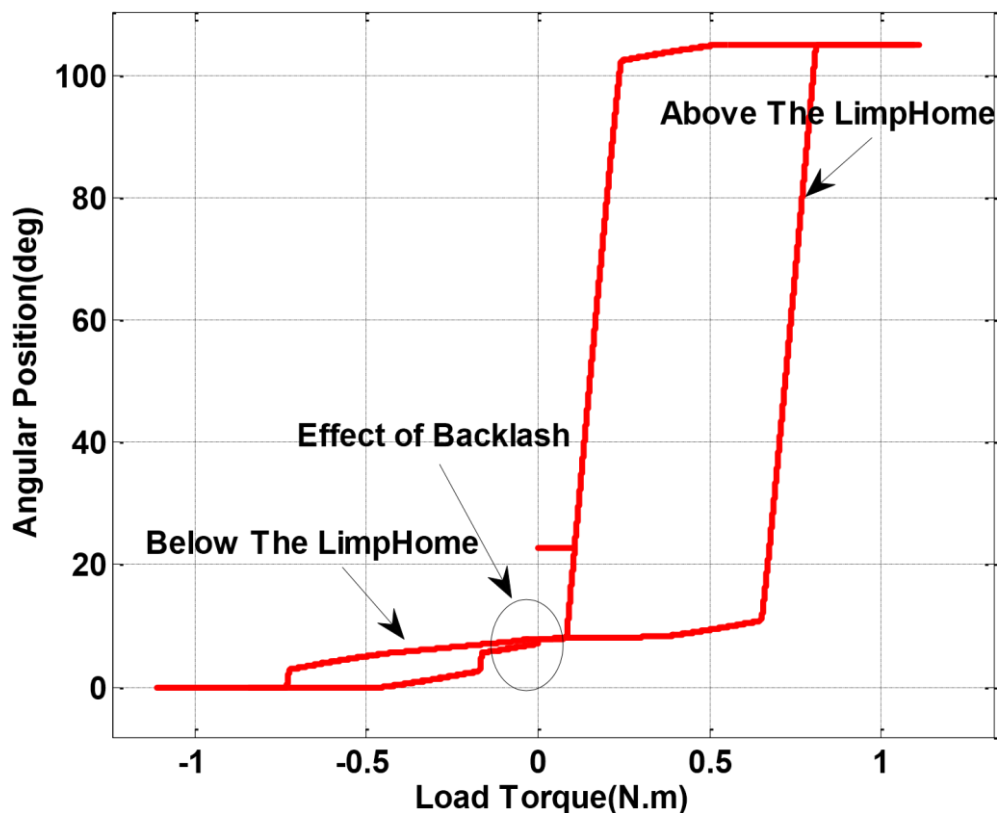
کاهش می‌یابد.

موتور- و کنترل دقیق تر دریچه گاز اشاره کرد [۲۵].

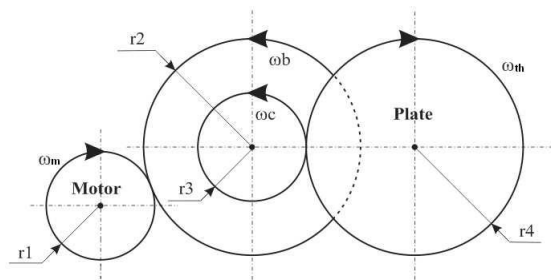


شکل ۲-۱۳ چرخ دنده های دریچه گاز الکترونیکی

برای اینکه چرخ دنده ها بتوانند به خوبی چرخش کنند، همیشه مقداری لقی به صورت استاندارد مطابق با ابعاد چرخ دنده ها توسط سازندگان اعمال می شود که تا حدودی در شکل ۲-۱۳ مشخص است. لقی هایی که در چرخ دنده های دریچه گاز وجود دارند، به سرعت توسط فنرهای بازگشتی متقابل تعبیه شده، جبران می شوند، فقط در ناحیه تعادل در همسایگی نقطه ای که گشتاور فنرها صفر است، لقی به وضوح مشاهده می شود، همان طوری که در شکل ۲-۱۴ مشاهده می شود، این ناحیه محل تلاقی دو منحنی هیستریزیس می باشد، وقتی دریچه در ناحیه ی بالای لیمپ هوم کار می کند، نقطه تعادلش با زمانی که دریچه گاز در ناحیه پایین لیمپ هوم کار می کند، متفاوت است، که مقدار این تفاوت همان لقی به وجود آمده در چرخ دنده ها است. اثر این لقی در معادلات فرمدل سازی شده در شبیه سازی وارد شده است. البته لقی در توقف خیلی سریع و ناگهانی موتور جریان مستقیم و بلافاصله چرخش در جهت عکس پیش می آید که در دقت حالت ماندگار و پاسخ گذرای سیستم تاثیر بسزایی ندارد [۲۸].



شکل ۲-۱۴: نواحی کار در پیچ‌گاز الکترونیکی و اثر لقی در ناحیه لیمپ هوم



شکل ۲-۱۵: شعاع چرخ دنده‌ها و نحوه ی تماس چرخ دنده‌ها با هم [۲۹]

حال تاثیر چرخ‌دنده‌ها در مدل‌سازی سیستم را بررسی می‌کنیم. چرخ‌دنده‌ها تبدیل‌هایی هستند که باعث افزایش گشتاور و کاهش سرعت در سمت بار با نسبت تبدیل  $N$  می‌شوند، این نسبت تبدیل را این‌گونه محاسبه می‌کنیم: دو جفت چرخ‌دنده درگیر داریم، پس دو نسبت تبدیل داریم که با محاسبه هر یک و ضرب آن‌ها در هم نسبت تبدیل کل به دست می‌آید:



برای سه چرخ دنده - که دایره کامل هستند - تعداد دندانه ها معلوم است، برای چرخ دنده چهارم - که به محور صفحه فلزی متصل است - همان طوری که از شکل ۱۶-۲ پیداست در ۹۰ درجه ۱۲ دندانه داریم پس در ۳۶۰ درجه ۴۸ دندانه خواهیم داشت.

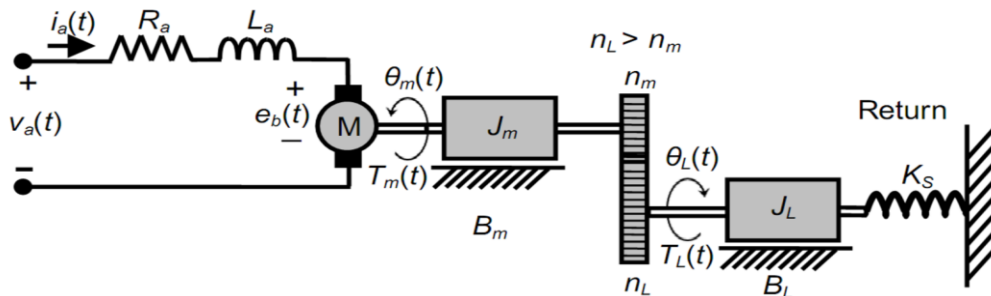


شکل ۱۶-۲ به دست آوردن تعداد دندانه های چرخ دنده چهارم

$$N = \frac{n_L}{n_m} = \frac{n_4}{n_3} * \frac{n_2}{n_1} = \frac{47}{10} * \frac{48}{10} = 22.56 \quad (9-2)$$

$n$  تعداد دندانه های هر چرخ دنده است.  $n_1$  تعداد برای چرخ دنده متصل به محور موتور ،  $n_2$  و  $n_3$  تعداد برای چرخ دنده واسط - بین محور موتور و محور صفحه فلزی - ،  $n_4$  تعداد برای چرخ دنده متصل به محور صفحه فلزی می باشند.

علاوه بر سرعت و گشتاور، چرخ دنده ها بر اینرسی و ثابت های مدل هم تاثیر گذارند. برای راحتی ما تمام پارامترها را به سمت بار منتقل می کنیم. با توجه به شکل ۱۷-۲ داریم:



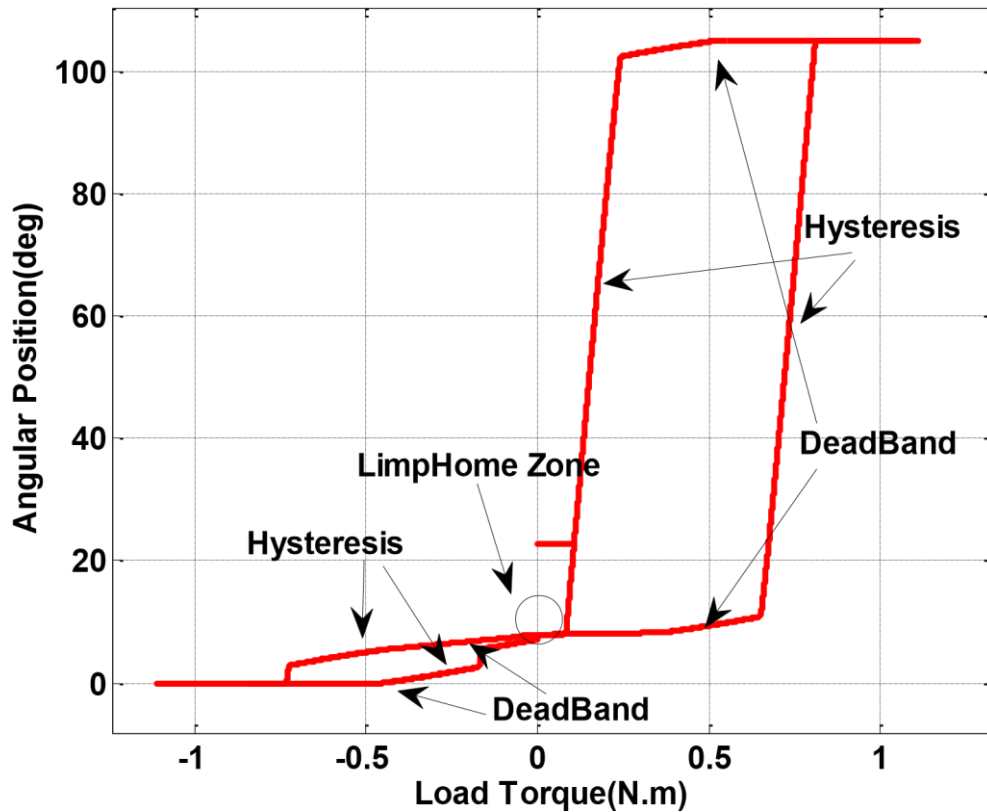
شکل ۲-۱۷: مدل درجه‌گاز الکترونیکی [۲۴]

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{\omega_m}{\omega_L} \\
 \bar{k}_b &= k_b N \\
 \bar{k}_m &= k_m N \\
 J_{eq} &= (N^2 J_m + J_L) \\
 B_{eq} &= (N^2 B_m + B_L)
 \end{aligned}
 \tag{۱۰-۲}$$

اندیس  $m$  پارامترهای سمت موتور. اندیس  $L$ : پارامترهای سمت بار. علامت  $(-)$  بر روی پارامترها یعنی پارامتر از سمت موتور به سمت بار منتقل شده است.  $J$  اینرسی و  $B$  ضریب اصطکاک ویسکوز است.

### ۲-۳-۳ اصطکاک

اصطکاک عاملی است که همواره با جهت حرکت مخالفت می‌کند -تابع علامت-، و می‌توان آن را به دو بخش غیرخطی تقسیم کرد: بخش اول، اصطکاک استاتیک -ایستایی یا کولمبی- که قبل از اینکه صفحه فلزی به حرکت درآید باید بر آن غلبه کرد. ما در مدل سازی این نوع اصطکاک را عددی ثابت در نظر گرفته‌ایم که وابسته به علامت جهت چرخش صفحه فلزی است -تابع علامت-، این نوع اصطکاک به دلیل خاصیت ذاتی تابع علامت در صفر گسسته است و بر هر دو حالت کاری سیگنال بزرگ و سیگنال کوچک تاثیر می‌گذارد، و چون قبل از حرکت وجود دارد موجب ایجاد شدن ناحیه مرده در اطراف لیمپ هوم می‌شود که در شکل ۲-۱۸ قابل مشاهده است. این اصطکاک ناشی از درگیری اولیه چرخ‌دنده‌ها برای شروع چرخش می‌باشد. این نوع اصطکاک به شرایط و حالات قبلی سیستم بستگی ندارد -بدون حافظه بودن- [۳۰، ۳۱].



شکل ۱۸-۲: ناحیه مرده در دریچه‌گاز الکترونیکی به خاطر وجود اصطکاک

وقتی صفحه فلزی به حرکت درآید دیگر اصطکاک استاتیک وجود ندارد، ولی اصطکاک دینامیک -ویسکوز- وجود دارد که وابسته به سرعت صفحه فلزی می‌باشد و بنابر شرایط محیطی -مانند دما و رطوبت- و نقطه‌ی کار تغییر می‌کند و قابلیت تکرارپذیری ندارد. این نوع اصطکاک بین یاتاقان‌ها و بین محفظه دریچه و تیغه دریچه پیش می‌آید. بیشترین تاثیر اصطکاک دینامیکی وقتی است که دریچه گاز در حال باز یا بسته شدن باشد. این نوع اصطکاک همان‌طور که از اسمش پیداست دارای دینامیک است و به حالات، شرایط قبلی و نقاط کار وابسته است -باحافظه بودن- [۳۰-۳۲].

معادلات ریاضی اصطکاک:

هنگام چرخش صفحه فلزی باید بر گشتاور اصطکاک سکون غلبه کرد که به شکل زیر است:

$$\omega_L = 0 \text{ then: } T_f = \pm T_s \quad (11-2)$$

به محض اینکه صفحه فلزی به حرکت درآید می‌توان از اصطکاک سکون صرف نظر کرد، گشتاور مربوط به اصطکاک کولومب و ویسکوز که متناسب با سرعت زاویه‌ای است بدین صورت است:

$$T_f = B_{eq}\omega_L(t) + T_c \operatorname{sgn}(\omega_L(t)) \quad (12-2)$$

که  $T_c$  اصطکاک کولمب،  $T_s$  اصطکاک سکون،  $\omega_L$  سرعت زاویه‌ای صفحه فلزی و  $\operatorname{sgn}$  تابع علامت است.

$$\operatorname{sgn}(\omega_L(t)) = \begin{cases} -1 & \text{if } \omega_L < 0 \\ 0 & \text{if } \omega_L = 0 \\ 1 & \text{if } \omega_L > 0 \end{cases} \quad (13-2)$$

و  $B_{eq}$  ثابت اصطکاک ویسکوز در سمت بار می‌باشد.

## ۴-۳-۲ فنرهای بازگشتی و متوقف کننده‌های مکانیکی

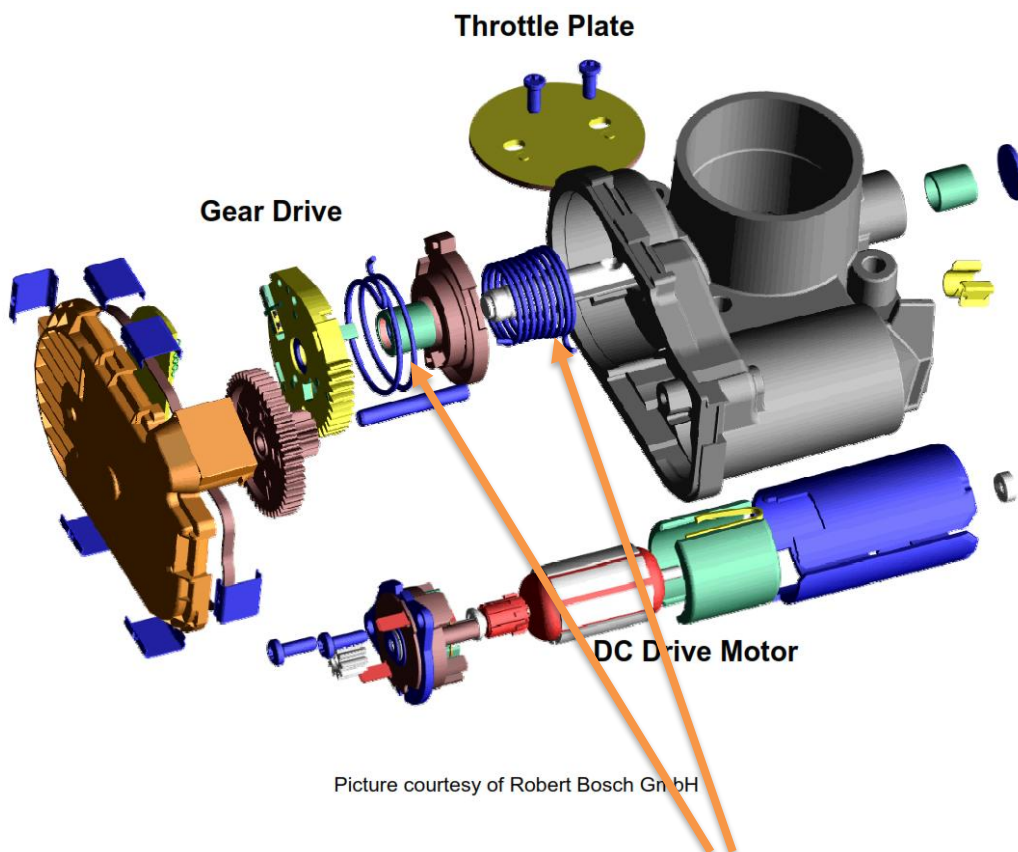
### ۱-۴-۳-۲ فنرهای بازگشتی

همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، فنرها به دو منظور استفاده می‌شوند:

۱- وقتی به هر دلیلی برق سیستم دریچه گاز قطع شود، فنرها صفحه فلزی را به یک موقعیت

اولیه که نزدیک به موقعیت بسته است، هدایت کنند.

۲- به منظور جبران‌سازی اثر لقی چرخ‌دنده‌ها.

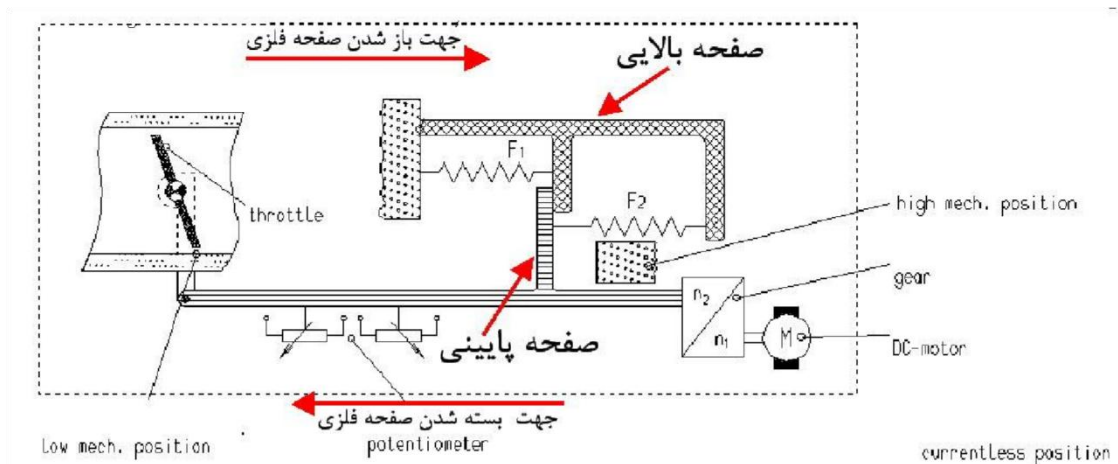


Picture courtesy of Robert Bosch GmbH

شکل ۱۹-۲ فنرهای استفاده شده در دریچه گاز الکترونیکی

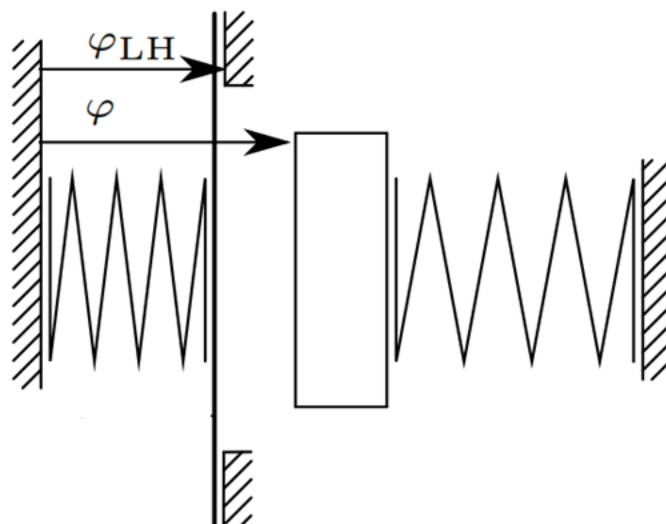
شرکت بوش که سازنده دریچه گاز می باشد از مکانیسم کار فنرها شکل ۲-۲۰ را در برگه اطلاعات محصول خود آورده است. در این مکانیسم فنرها سیستم را در موقعیت پیش فرض اولیه ای قرار می دهند، در این موقعیت صفحه فلزی دریچه گاز کمی باز است و موتور خودرو در کمترین توان ممکن تولیدی کار می کند.

در شکل ۲-۲۰ برای سادگی، حرکت دورانی سیستم با حرکت خطی تقریب زده شده است، حال توضیحی مختصر از مکانیسم کار سیستم فنرها می دهیم. وقتی صفحه پایینی در شکل ۲-۲۰



شکل ۲-۲۰ طرحواره‌ای از مکانیسم کاری فنرها [۱]

در جهت باز شدن صفحه فلزی حرکت می‌کند، صفحه بالایی را هم در امتداد خود به حرکت درمی‌آورد در این حالت تنها فنر  $F_1$  درگیر است. وقتی صفحه پایینی در جهت بسته شدن صفحه فلزی حرکت می‌کند، صفحه بالایی حرکتی ندارد و در این حالت تنها فنر  $F_2$  درگیر است. در ضمن وقتی که صفحه فلزی در حالت پیش‌فرض اولیه قرار دارد هر دو فنر درگیرند [۳۳]. برای مثال وقتی که گشتاور ایجاد شده توسط موتور باعث کشیده شدن فنر  $F_1$  می‌شود و صفحه فلزی دریچه باز می‌شود، اگر برق موتور را قطع کنیم انرژی پتانسیل ذخیره شده در فنر باعث می‌شود که صفحه فلزی به سرعت بسته شود، ولی چون بنابر دلیل ایمنی نمی‌خواهیم که



شکل ۲-۲۱ نمایی واضح تر از شکل ۲-۲۰ در مورد نحوه کار دو فنر [۳۴]

صفحه فلزی کاملاً بسته شود، فنر  $F_p$  (پلانگر) مانع بسته شدن کامل صفحه فلزی شده و صفحه در موقعیت کمی باز خواهد ماند. با این حساب در غیاب سیگنال قدرتی در پیچه گاز، دو فنر خود را به موقعیت اولیه تعادلی می‌برند که این مسئله باعث ایجاد گشتاور اولیه<sup>۱</sup> در مجموعه فنرها می‌شود [۲۰].

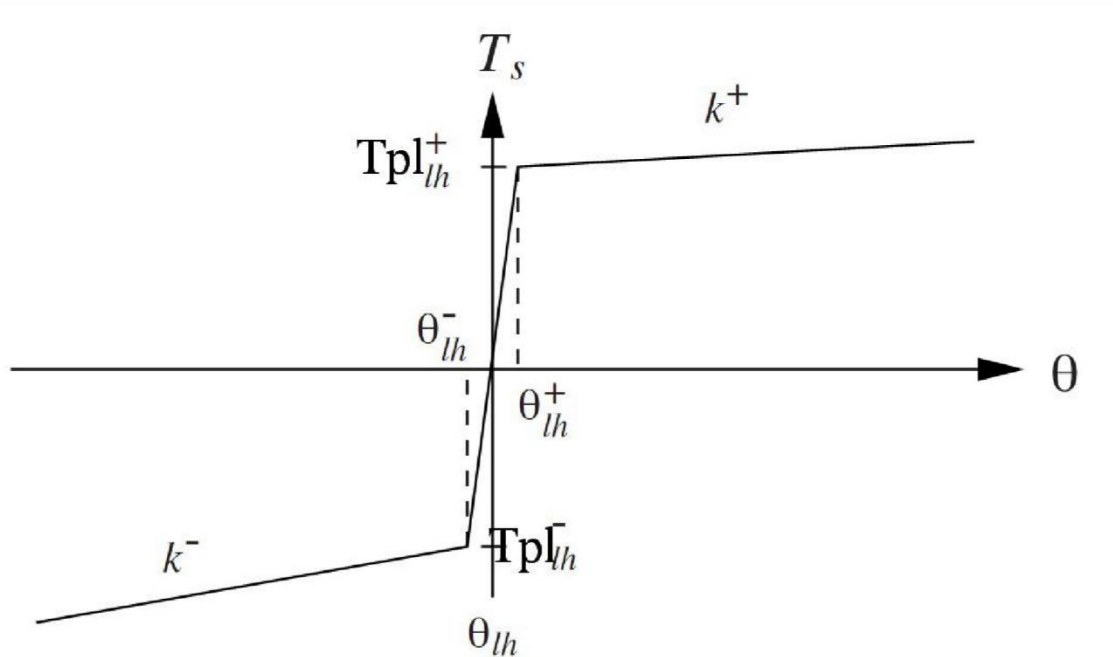
با توضیحاتی که داده شد و آزمایش مربوط به شناسایی مشخصات فنرها که در بخش شناسایی آمده است، معادلات ریاضی مجموعه فنرها به این صورت درمی‌آید:

$$\begin{cases} T_{pl_{lh}}^+ + k^+(\theta - \theta_{lh}^+) & \text{if } \theta > \theta_{lh}^+ \\ T_{pl_{lh}}^+ (\theta - \theta_{lh}) / (\theta_{lh}^+ - \theta_{lh}) & \text{if } \theta_{lh} < \theta < \theta_{lh}^+ \\ T_{pl_{lh}}^- (\theta_{lh} - \theta) / (\theta_{lh} - \theta_{lh}^-) & \text{if } \theta_{lh}^- < \theta \leq \theta_{lh} \\ T_{pl_{lh}}^- - k^-(\theta_{lh}^- - \theta) & \text{if } \theta \leq \theta_{lh}^- \end{cases} \quad (۱۴-۲)$$

که  $T_s$  گشتاور فنر،  $T_{pl}$  گشتاور اولیه فنر،  $lh$  ناحیه لیمپ هوم،  $k$  ثابت فنر،  $lh^+$  بالای ناحیه لیمپ هوم و  $lh^-$  پایین ناحیه لیمپ هوم می‌باشند. برای ثابت فنرها همان‌طور که از شکل ۲-۲۲ پیداست اینکه در چه ناحیه‌ای باشیم مهم است، در ناحیه‌های بالا و پایین لیمپ هوم ثابت فنرها به هم نزدیک‌اند، ولی در ناحیه لیمپ هوم ثابت مجموعه فنر خیلی بزرگتر است [۲۳].

---

<sup>۱</sup> - Preload



شکل ۲-۲۲: مشخصه غیرخطی فنر - توجه شود که مبدأ زاویه صفر نیست بلکه زاویه لیمپ هوم است که در آن گشتاور فنر صفر است [۲۳].

در مورد لقی چرخ دنده‌ها همان‌طور که از شکل ۲-۲۲ پیداست، در تمامی ناحیه‌های کاری، گشتاور تولیدی مجموعه فنر، لقی را به سرعت از بین می‌برند و باعث ایجاد درگیری بین چرخ‌دنده‌ها می‌شوند، تنها در زاویه لیمپ هوم که گشتاور فنر صفر است، لقی بوجود می‌آید که قابل نظر کردن است.



موقعیت زاویه‌ای دریچه گاز برای استفاده در خودرو باید بین ۰ تا ۱۰۵ درجه باشد، برای این منظور از دو مانع مکانیکی در ساختمان دریچه گاز استفاده شده است تا صفحه فلزی نتواند کمتر از ۰ درجه و بیشتر از ۱۰۵ درجه حرکت کند. این موانع در شکل ۲-۲۳ آورده شده‌اند. از نقطه نظر مدل‌سازی و شبیه‌سازی این موانع از دید موتور باید دارای گشتاورهای خیلی بزرگ باشند<sup>۲</sup> تا گشتاور تولیدی موتور نتواند بر آن‌ها غلبه کند و در نتیجه موقعیت صفحه فلزی به اشباع می‌رود، چون گشتاور تولیدی موتور محدود است. شیب این موانع تا حدودی نزدیک به شیب خط در ناحیه لیمپ هوم می‌باشد که در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است. در شبیه‌سازی با استفاده از جدول جستجو<sup>۳</sup>، شیب‌های مورد نیاز برای موانع را ایجاد کرده‌ایم.

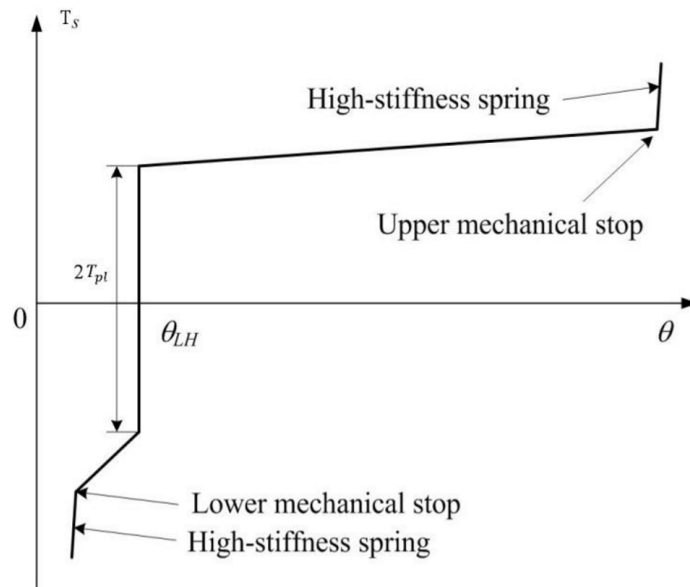


شکل ۲-۲۳ دو مانع مکانیکی در ابتدا و انتهای ناحیه کاری دریچه‌گاز الکترونیکی

<sup>۱</sup> Mechanical Stop

<sup>۲</sup> به نوعی فنر با ثابت بی‌نهایت (خیلی بزرگ)

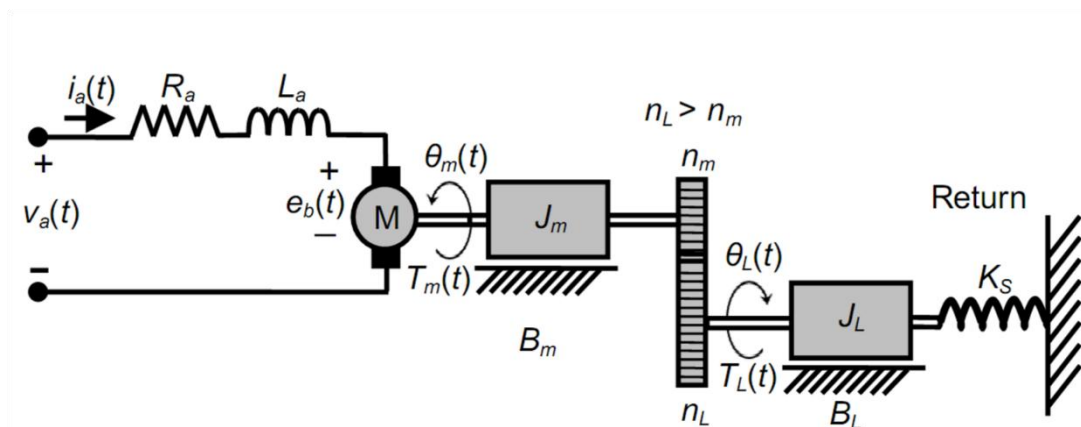
<sup>۳</sup> Lookup Table



شکل ۲۴-۲ مشخصه مانع‌های مکانیکی در ابتدا و انتهای ناحیه کاری در پیچ‌گاز الکترونیکی

## ۵-۳-۲ جمع‌بندی معادلات و رسیدن به معادلات سیستم واحد

حال که تمام قطعات در پیچ‌گاز الکترونیکی به صورت مجزا از هم مدل شدند، به ترکیب این مدل‌سازی پرداخته تا به معادله واحدی برای کل سیستم برسیم. با توجه به شکل ۲۵-۲ معادله تعادل گشتاور در سمت موتور به این صورت خواهد شد:



شکل ۲۵-۲ مدل کامل در پیچ‌گاز الکترونیکی

$$J_m \dot{\omega}_m(t) + B_m \omega_m(t) + \frac{T_L}{N} = k_m i_a(t) \quad (۱۵-۲)$$

که  $T_L$  گشتاور بار سیستم است و در زیر آورده شده است:

$$T_L(t) = J_L \dot{\omega}_L(t) + B_L \omega_L(t) + T_s + T_f \text{sgn}(\omega_L) \quad (۱۶-۲)$$

$T_s$  گشتاور فنر است که در رابطه (۱۴-۲) آورده شده است. حال با ترکیب معادلات (۱۵-۲) و (۱۶-۲) و انتقال پارامترهای موتور به سمت بار خواهیم داشت:

$$J_{eq} \dot{\omega}_L(t) + B_{eq} \omega_L(t) + T_s + T_f \text{sgn}(\omega_L) = \bar{k}_m i_a(t) \quad (۱۷-۲)$$

که از رابطه (۱۰-۲) داریم:

$$B_{eq} = (N^2 B_m + B_L) \quad ; \quad J_{eq} = (N^2 J_m + J_L) \quad ; \quad \bar{k}_m = k_m N$$

حال باید به شناسایی تمامی پارامترها در رابطه (۱۷-۲) پردازیم.

## ۴-۲ شناسایی سیستم دریچه گاز الکترونیکی

### ۱-۴-۲ مقدمه

در شناسایی سیستم دریچه گاز الکترونیکی ما از تجهیزات زیر استفاده کرده ایم:

- ۱- مجموعه دریچه گاز الکترونیکی ساخت شرکت بوش
- ۲- منبع ولتاژ به عنوان ورودی ولتاژ برای مدار آرمیچر موتور جریان مستقیم و تغذیه حسگر پتانسیومتر دریچه گاز الکترونیکی
- ۳- اسیلوسکوپ دیجیتال ولتاژ برای ثبت داده های آزمایشها
- ۴- کامپیوتر برای دیدن و تجزیه و تحلیل داده های ثبت شده توسط اسکوپ
- ۵- مقاومت آجری با اهم بسیار کم -۰٫۱ اهم و توان ۵ وات برای تحمل جریان عبوری<sup>۱</sup> - برای

---

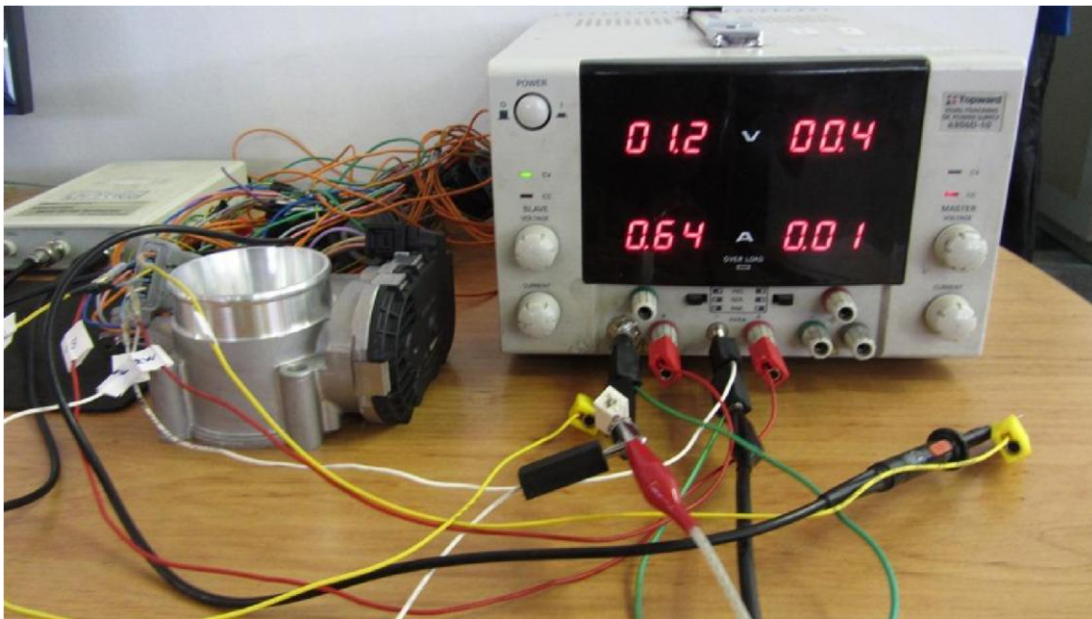
<sup>۱</sup> - با استفاده از فرمول  $P = RI^2$  حداکثر جریان عبوری برابر است با:  $I \approx 7.1A$  که چون حداکثر جریان آرمیچر ۶ آمپر است برای کارمان مناسب است.

اندازه‌گیری جریان آرمیچر. -توجه: چون مقاومت بسیار کوچک است، -تلورانسش ممکن است خیلی بزرگ باشد که با اندازه‌گیری مقاومت باید این مسئله را بررسی کرد- برای اینکه تلفات ولتاژی روی مقاومت خیلی کم باشد از مقاومت خیلی کوچک استفاده کرده‌ایم.

۶- کانکتورها برای اتصال قسمت برقی دریاچه گاز به منبع ولتاژ و اسیلوسکوپ

تجهیزات مورد استفاده در شکل ۲-۲۶ و شکل ۲-۲۷ نشان داده شده اند.

اسیلوسکوپ توانایی ثبت ولتاژ را دارد، پس برای اندازه‌گیری داده ها باید رابطه‌ای بین داده و ولتاژ فراهم کنیم.



شکل ۲-۲۶ مجموعه تجهیزات مورد استفاده برای شناسایی



شکل ۲-۲۷ مقاومت آجری مورد استفاده برای به دست آوردن جریان

داده هایی که برای عملیات شناسایی نیاز به آن‌ها داریم عبارتند از: ۱- ولتاژ آرمیچر ۲- جریان

آرمیچر ۳- موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی دریچه گاز.



حال به بررسی چگونگی ثبت داده‌ها می‌پردازیم:

۱- ولتاژ آرمیچر: چون خود از جنس ولتاژ است، نیازی به تبدیل ندارد.

۲- جریان آرمیچر: ولتاژ مقاومت آجری که به صورت سری در مدار آرمیچر قرار می‌گیرد،

توسط اسیلوسکوپ ثبت می‌شود، با تقسیم ولتاژ ثبت شده بر مقدار مقاومت، جریان آرمیچر

به دست می‌آید.

۳- موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی دریچه گاز: در دو حالتی که موقعیت زاویه‌ای معلوم است: ۱-

وقتی صفحه فلزی دریچه کاملاً بسته است. ۲- وقتی صفحه فلزی دریچه کاملاً باز است،

ولتاژ حسگرهای پتانسیومتر توسط اسیلوسکوپ خوانده شده، با داشتن دو نقطه از یک خط،

رابطه خطی بین ولتاژ پتانسیومتر و موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی دریچه به دست می‌آید.

## ۲-۴-۲ اثر اهمی مدار آرمیچر

برای به دست آوردن اثر اهمی مدار آرمیچر ابتدا شرایط زیر را فراهم می‌کنیم:

۱- با گذاشتن مانعی، صفحه فلزی دریچه را در موقعیت بسته‌اش ثابت نگه می‌داریم. با این کار

سرعت صفحه فلزی و در نتیجه ولتاژ القایی در رابطه (۲-۱۸) صفر خواهد شد.

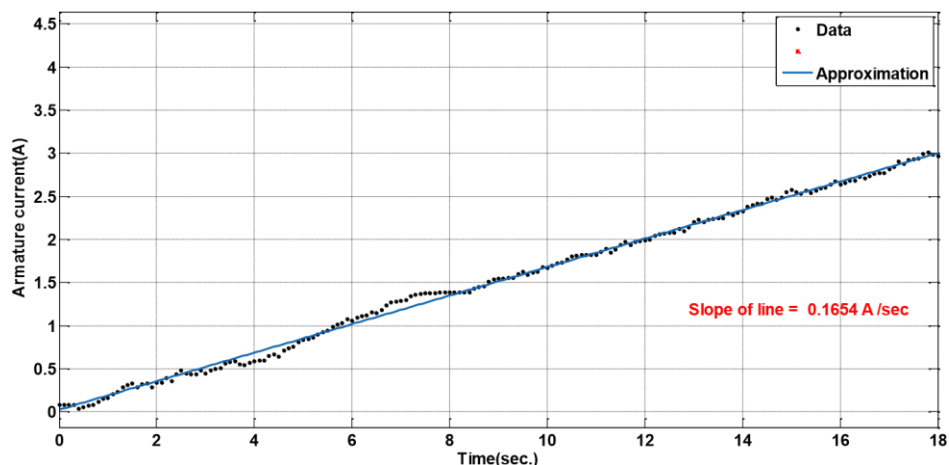
$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega_m(t) \quad (2-18)$$

۲- با اعمال ولتاژ به صورت شیب با تغییرات آهسته به مدار آرمیچر، جریان آرمیچر نیز به

آهستگی افزایش پیدا می‌کند، با توجه به شکل ۲-۲۸ تغییرات جریان نسبت به زمان برابر با

۰.۱۶۴۵ آمپر بر ثانیه است، مقدار اثر سلفی نیز بنابر ۲-۴-۳ برابر با ۱.۴ میلی‌هنری است، بنابراین

مقدار  $L_a \frac{di_a(t)}{dt}$  برابر با  $10^{-4} * 2.3$  است که در مقایسه با اثر اهمی قابل صرف نظر کردن است.



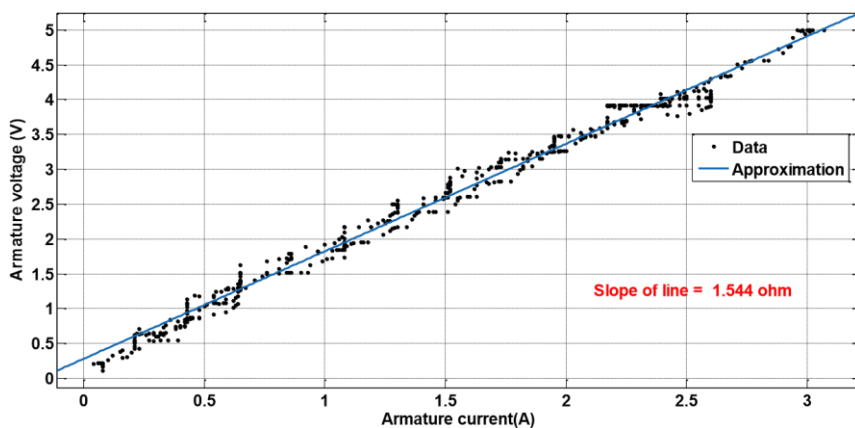
شکل ۲-۲۸ جریان آرمیچر

با شرایطی که ایجاد کرده‌ایم، تنها اثر باقیمانده اثر اهمی است که به راحتی قابل محاسبه است:

با اعمال ولتاژ به صورت شیب به مدار آرمیچر، مقدار جریان آرمیچر را به همراه آرمیچر ثبت

می‌کنیم، شیب خط نمودار ولتاژ بر حسب جریان، برابر با مقدار اهمی مدار آرمیچر می‌باشد، که این

مقدار با توجه به شکل ۲-۲۹ برابر با ۱.۵۴۴ اهم به دست آمده است.



شکل ۲-۲۹ منحنی جریان-ولتاژ برای به دست آوردن مقاومت

## ۳-۴-۲ اثر سلفی مدار آرمیچر

برای به دست آوردن اثر سلفی مدار آرمیچر ابتدا مانند آزمایش قبل، با گذاشتن مانعی صفحه

فلزی دریاچه را در موقعیت بسته‌اش ثابت نگه می‌داریم. با این کار سرعت صفحه فلزی و در نتیجه

ولتاژ القایی در رابطه (۱۸-۲) صفر خواهد شد. بنابراین رابطه (۱۸-۲) به صورت زیر درمی‌آید.

$$v_a(t) = R_t i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (19-2)$$

که شامل اهمی‌های مدار آرمیچر، سیم‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری می‌باشد.

معادله دیفرانسیل رابطه را با فرض ورودی پله و جریان اولیه صفر آمپر حل می‌کنیم:

$$i_a(t) = \frac{V_a}{R_t} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (20-2)$$

$\tau$  ثابت الکتریکی موتور است و داریم:

$$\tau = L_a / R_t \quad (21-2)$$

حال با اعمال ولتاژ پله به مقدار تقریباً ۱.۵ ولت به مدار آرمیچر، مقدار جریان و ولتاژ آرمیچر را

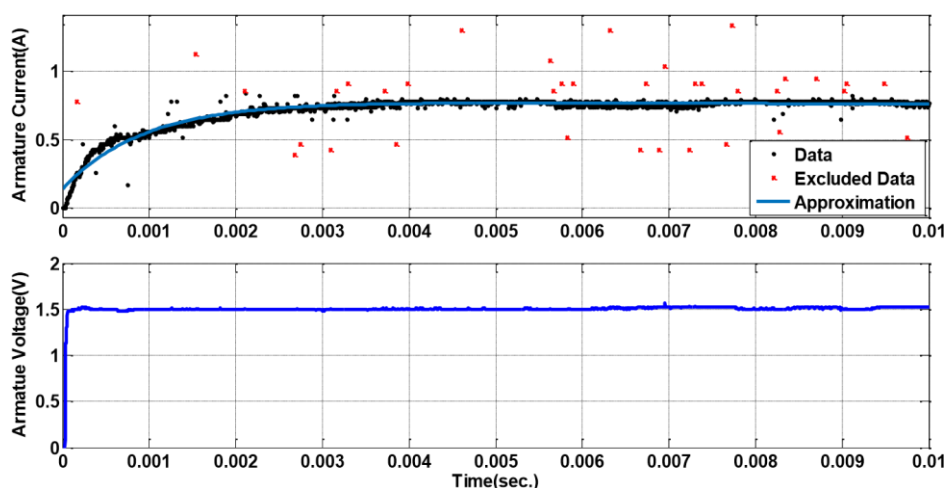
بر حسب زمان ثبت می‌کنیم، که در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است. ابتدا از روی شکل جریان

ثابت‌زمانی الکتریکی به این صورت به دست می‌آید:

مقدار حالت دائم جریان برابر با  $I_{ss} = 0.7676A$  خواهد بود که ۶۳ درصد آن برابر با  $0.4836A$ .

خواهد شد، حال زمان مربوط به این جریان همان ثابت‌زمانی الکتریکی مدار است که برابر

$10^{-4} * 714$  ثانیه است.



شکل ۲-۳ منحنی‌های ولتاژ و جریان بر حسب زمان برای به دست آوردن اثر سلفی مدار

با توجه به رابطه (۲۱-۲) برای به دست آوردن  $L_a$  نیاز به  $R_t$  داریم که از تقسیم جریان حالت دائم

بر ولتاژ حالت دائم برابر با ۱.۹۶۷۲ اهم خواهد شد. حال  $L_a$  به راحتی قابل محاسبه است:

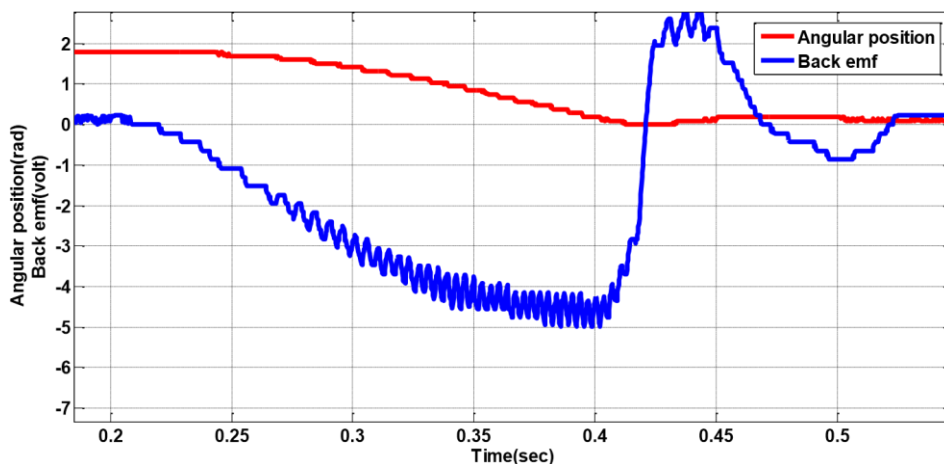
$$L_a = \tau * R_t = ۱.۴ * ۱۰^{-۳} H \quad (۲۲-۲)$$

## ۴-۴-۲ ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی

برای به دست آوردن ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی ابتدا مدار آرمیچر را باز می‌کنیم، سپس صفحه فلزی دریچه را به صورت دستی به حالت کاملاً باز برده و رها می‌کنیم، فنرهای بازگشتی موجب می‌شوند تا صفحه فلزی به سرعت به موقعیت اولیه‌اش برگردد. این بسته شدن سریع سبب تحریک مکانیکی شفت موتور به وسیله چرخ دنده‌ها خواهد شد که ولتاژ القایی بازگشتی را در ترمینال موتور ایجاد خواهد کرد:

$$e_b(t) = \bar{k}_b * \omega_L(t) \quad (۲۳-۲)$$

برای به دست آوردن ثابت در رابطه (۲۳-۲) ابتدا موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی را توسط اسیلسکوپ ثبت کردیم که در شکل ۳۱-۲ آورده شده است.

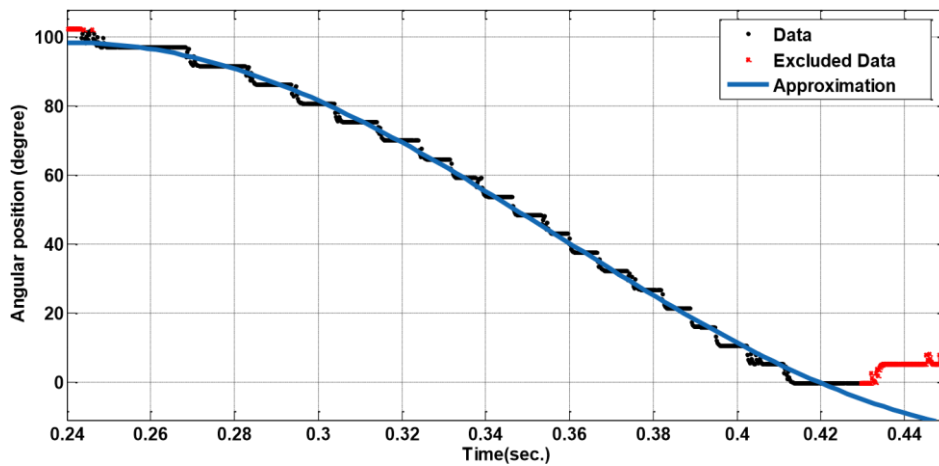


شکل ۳۱-۲ منحنی‌های موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی

حال برای به دست آوردن سرعت زاویه‌ای، از موقعیت زاویه‌ای مشتق می‌گیریم، چون نمودار موقعیت زاویه‌ای دارای ناپیوستگی‌هایی است باید موقعیت زاویه‌ای را طوری تقریب زد که پیوسته شده و بتوان از آن مشتق‌گیری کرد. برای این منظور موقعیت زاویه‌ای را در بازه زمانی ۰.۲۴ تا ۰.۴۱ ثانیه

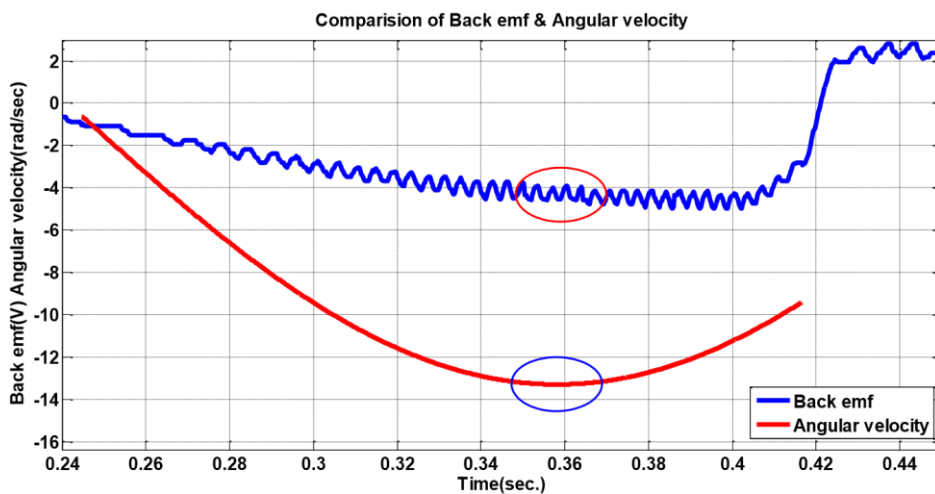


توسط سری فوریه تقریب زدیم<sup>۱</sup>، که در شکل ۲-۳۲ مشاهده می کنید.



شکل ۲-۳۲ تقریب موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی با سری فوریه

حال از موقعیت زاویه‌ای تقریب زده شده مشتق می‌گیریم، در شکل ۲-۳۳ سرعت زاویه‌ای و ولتاژ القایی آمده‌اند.



شکل ۲-۳۳ منحنی سرعت زاویه‌ای صفحه‌فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی

با توجه به رابطه (۲-۲۳) ولتاژ القایی برگشتی نسبت مستقیم با سرعت زاویه‌ای دارد، که این نسبت مستقیم برابر با  $k_B$  است. برای به دست آوردن این ثابت، با توجه به شکل ۲-۳۳ در بازه زمانی

<sup>۱</sup> با استفاده از بخش برازش منحنی نرم افزار متلب

۰.۳۵ تا ۰.۳۷ ثانیه از ولتاژ القایی و سرعت زاویه‌ای میانگین گرفته و بر هم تقسیم می‌کنیم.

$$\begin{aligned} e_b &= -4.936 \text{ volt} \\ \omega_L &= -12.77 \text{ rad/sec} \\ \bar{k}_b(t) &= 0.3865 \text{ volt.rad/sec} \end{aligned} \quad (24-2)$$

حال برای به دست آوردن ثابت نیروی محرکه الکتریکی در سمت موتور، ثابت به دست آمده را بر نسبت چرخ‌دنده‌ها تقسیم می‌کنیم:

$$k_b = \frac{\bar{k}_b}{N} = 0.0187 \text{ volt.rad/sec} \quad (25-2)$$

بنابر روابط (۲-۴) تا (۲-۷)، ثابت می‌شود که ثابت نیروی ضد محرکه الکتریکی با ثابت گشتاور موتور در موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم برابرند، پس:

$$\bar{k}_m = \bar{k}_b = 0.3865 \text{ N.m/A} \quad (26-2)$$

همان طوری که در شکل ۲-۳۳ مشاهده می‌شود، روش مورد استفاده کمی دور از واقعیت است، چون در تمام بازه‌ها، سرعت زاویه‌ای و ولتاژ القایی نسبت ثابتی ندارند.

## ۲-۴-۵ آزمایش بارهای استاتیک

هدف از انجام این آزمایش، شناسایی گشتاور اصطکاک، گشتاور ذخیره شده در فنر - که توسط فنرهای بازگشتی ایجاد می‌شوند - و ثابت‌های بازگشتی می‌باشد.

وقتی صفحه فلزی دریچه گاز خیلی آرام حرکت می‌کند داریم  $\omega_L(t) = \dot{\omega}_L(t) \approx 0$  بنابراین معادله تعادل گشتاور رابطه (۲-۱۷) به این صورت خواهد شد:

$$T_L(t) = K_s \theta_L(t) + T_{PL} + T_s \text{sgn}(\omega_L) = \bar{k}_m i_a(t) \quad (27-2)$$

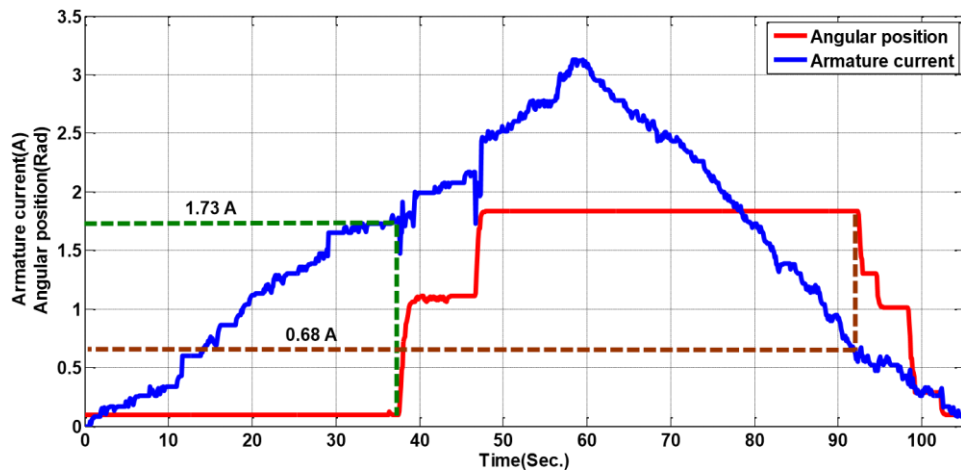
برای استفاده از رابطه (۲-۲۷) موتور جریان مستقیم با افزایش آهسته جریان آرمیچر تغذیه می‌شود، که این کار موجب چرخش آهسته صفحه فلزی می‌شود.

آزمایش بارهای استاتیک را برای دو ناحیه کاری دریچه گاز انجام می‌دهیم: ۱- ناحیه بالای

## لیمپ هوم ۲- ناحیه پایین لیمپ هوم

جریان آرمیچر و موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی برای ناحیه ۱ که توسط اسیلوسکوپ ثبت

شده‌است در شکل ۳۴-۲ نشان داده شده‌است.



شکل ۳۴-۲ منحنی‌های موقعیت صفحه فلزی و جریان آرمیچر بر حسب زمان در ناحیه ۱

از شکل ۳۴-۲ معلوم است که جریان بیشتری در جهت باز شدن صفحه فلزی در مقایسه با بسته شدن صفحه فلزی نیاز است، چون در جهت باز شدن، تمامی گشتاورهای سمت بار با گشتاور موتور مخالفت می‌کنند، در حالی که در جهت بسته شدن فنرهای بازگشتی به گشتاور موتور برای بسته شدن کمک می‌کنند.

جریان آرمیچر و موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی برای ناحیه ۲ که توسط اسیلوسکوپ ثبت شده‌است

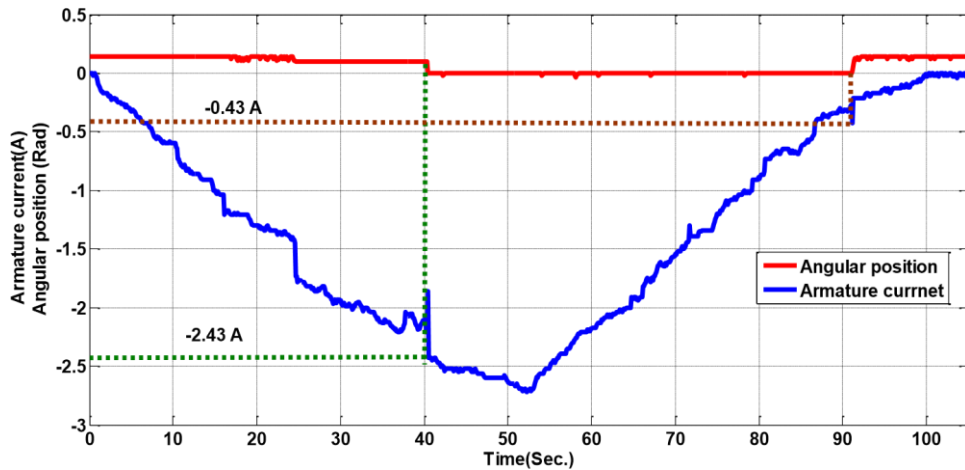
در شکل ۳۵-۲ نشان داده شده‌است.

از شکل ۳۵-۲ معلوم است که جریان بیشتری در جهت بسته شدن صفحه فلزی در مقایسه با باز

شدن صفحه فلزی نیاز است، چون در جهت بسته شدن، تمامی گشتاورهای سمت بار با گشتاور موتور

مخالفت می‌کنند، در حالی که در جهت باز شدن فنرهای بازگشتی به گشتاور موتور برای بسته شدن

کمک می‌کنند.



شکل ۲-۲۵ منحنی‌های موقعیت صفحه فلزی و جریان آرمیچر بر حسب زمان در ناحیه ۲

برای اینکه بتوانیم پارامترهایمان را شناسایی کنیم، جریان آرمیچر ثبت شده را در ثابت گشتاور موتور در سمت بار  $-k_m$  ضرب می‌کنیم تا گشتاور کل بار به دست‌آید [سمت راست رابطه (۲۷-۲)]. رابطه (۲۷-۲) را بازنویسی می‌کنیم:

$$T_L(t) = K_s \theta_L(t) + T_{PL} \pm T_s \quad (28-2)$$

وقتی صفحه فلزی باز می‌شود:  $sgn(\omega_L) = +1$  و وقتی صفحه فلزی بسته می‌شود:  $sgn(\omega_L) = -1$ . در هر صورت گشتاور اصطکاک همیشه با جهت گشتاور محرک مخالفت می‌کند.

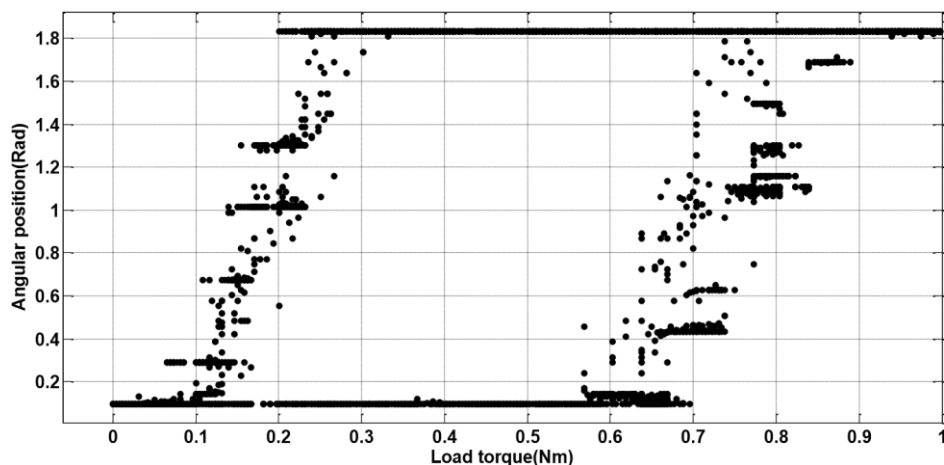
در رابطه (۲۸-۲)،  $T_L(t)$  و  $\theta_L(t)$  معلوم هستند، ما می‌توانیم با فرضیات ریاضی که مسئله را ساده می‌کنند، مقادیر پارامترهای مجهول در رابطه (۲۸-۲) را به دست‌می‌آوریم.

توجه: چون دریاچه گاز دارای دو ناحیه کاری می‌باشد، بنابراین مقادیر پارامترها را برای هر ناحیه به طور جداگانه به دست‌می‌آوریم.

## ۲-۴-۱-۵ ناحیه بالای لیمپ هوم

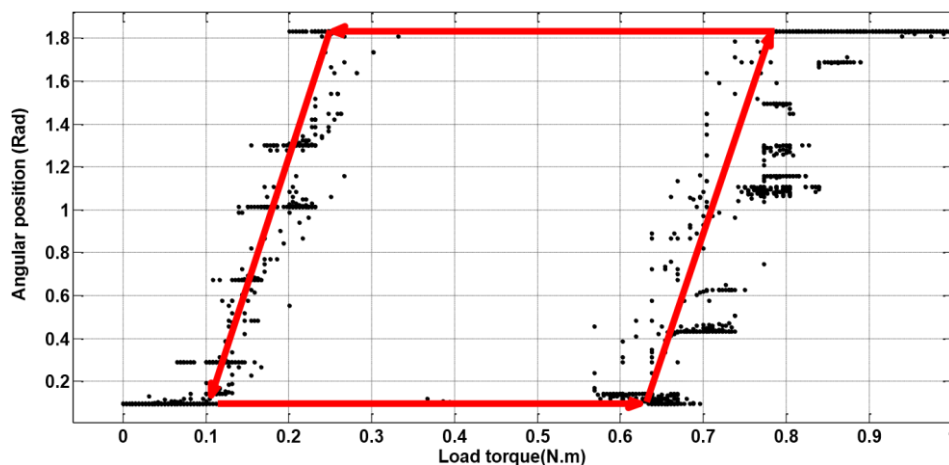
ابتدا با استفاده از داده‌های به دست‌آمده از سیستم واقعی، نمودار موقعیت زاویه‌ای صفحه فلزی

بر حسب گشتاور بار را رسم می‌کنیم.



شکل ۲-۳۶ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه (داده های به دست آمده)

شکل ۲-۳۶ مانند یک حلقه پسماند<sup>۱</sup> می باشد، برای مشخص شدن بهتر حلقه کاری دریچه گاز، مراحل کاری توسط فلش ها در شکل ۲-۳۷ نمایش داده شده اند.



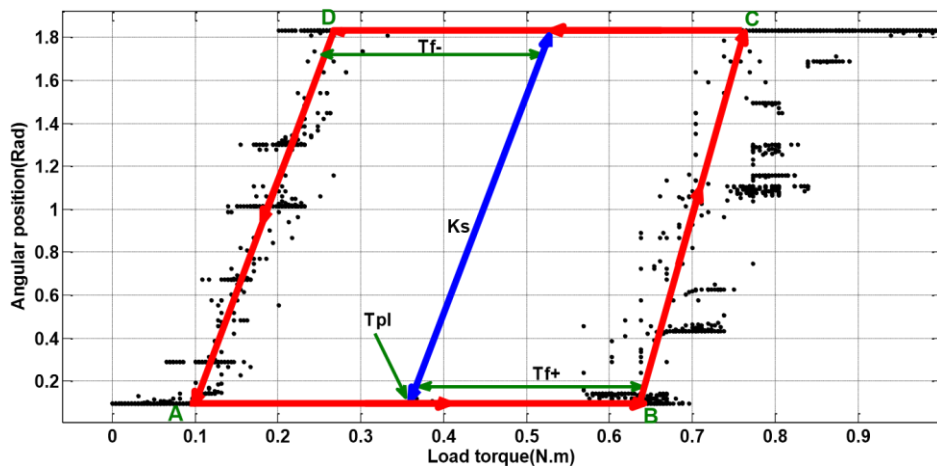
شکل ۲-۳۷ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه (داده های به دست آمده)

همانطور که در شکل ۲-۳۷ مشخص است و در گذشته بیان شد، دریچه گاز دارای ناحیه های مرده می باشد، در این ناحیه ها با افزایش جریان موتور و در نتیجه گشتاور موتور، تغییری در خروجی که همان موقعیت زاویه ای صفحه فلزی است، ایجاد نخواهد شد، این ناحیه های مرده ناشی از گشتاور اصطکاک، گشتاور ذخیره شده در فنر و گشتاور محدودکننده های مکانیکی می باشند، با افزایش بیشتر

<sup>۱</sup>-Hysteresis

گشتاور موتور، دریچه گاز از ناحیه مرده خارج شده و شروع به باز شدن می‌کند تا جایی که به مانع مکانیکی می‌رسد و نمی‌تواند بیشتر باز شود، و دریچه گاز وارد ناحیه مرده دوم می‌شود، حال با کاهش جریان و در نتیجه کاهش گشتاور موتور و پایان ناحیه مرده، دریچه گاز شروع به بسته شدن می‌کند و به موقعیت اولیه‌اش که فنرها در حالت تعادل‌اند، برمی‌گردد [از A تا D روی شکل ۲-۳۸].

ما سه پارامتر مجهول داریم، برای ساده شدن مسئله شناسایی، فرض می‌کنیم که گشتاور اصطکاک در جهت باز شدن و بسته شدن با هم برابرند، در نتیجه خطی که مشخصه فنر می‌باشد در وسط ناحیه‌های مرده قرار خواهد گرفت، که در شکل ۲-۳۸ مشخص است:



شکل ۲-۳۸ موقعیت صفحه‌فلزی بر حسب گشتاور بار و تقریب‌های مورد استفاده در ناحیه ۱

حروف نشان داده شده، در شکل ۲-۳۸، بیانگر این پارامترها هستند، که با استفاده از نمودار قابل محاسبه هستند.

$T_{s+}$  گشتاور اصطکاک سکون در جهت باز شدن،  $T_{s-}$  گشتاور اصطکاک سکون در جهت بسته شدن،  $K_s$  ثابت فنر-برعکس شیب خط وسط و  $T_{pl}$  گشتاور اولیه ذخیره شده در فنر-طول از مبدا خط وسط - می‌باشند.

$$T_{S+} = 0.5276 - 0.2474 = 0.2802 \text{ N.m}$$

$$T_{S-} = 0.6493 - 0.3691 = 0.2802 \text{ N.m}$$

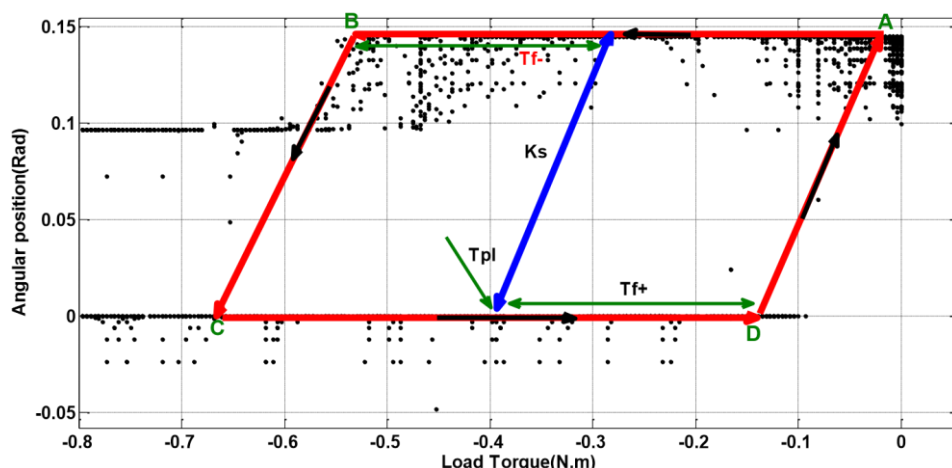
(۲۹-۲)

$$K_S = 0.0913 \text{ N.m/rad}$$

$$T_{pl} = 0.3691 \text{ N.m}$$

## ۲-۵-۴-۲ ناحیه پایین لیمپ هوم

روند انجام کار مانند بالای ناحیه لیمپ هوم است. مانند قبل با استفاده از داده های به دست آمده از سیستم واقعی، نمودار موقعیت زاویه ای صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار را رسم می کنیم و حلقه کاری و خط وسط را برای شناسایی مشخص می کنیم:



شکل ۲-۳۹ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار و تقریب های مورد استفاده در ناحیه ۲

همانطور که در شکل ۲-۳۹ با حروف A تا D مشخص شده است، دریچه گاز ابتدا در موقعیت اولیه اش قرار دارد، با افزایش مقدار جریان منفی و در نتیجه افزایش مقدار گشتاور منفی، دریچه گاز از ناحیه مرده خارج شده و شروع به بسته شدن می کند، تا به مانع مکانیکی برسد و کاملاً بسته شود، سپس با کاهش مقدار جریان منفی و در نتیجه کاهش مقدار گشتاور منفی، دریچه گاز با پشت سر گذاشتن ناحیه مرده باز شده و به کمک گشتاورهای موتور و فنر به موقعیت اولیه اش برمی گردد.

$T_{S+}$  گشتاور اصطکاک سکون در جهت باز شدن،  $T_{S-}$  گشتاور اصطکاک سکون در جهت بسته

شدن،  $K_S$  ثابت فنر-برعکس شیب خط وسط و  $T_{pl}$  گشتاور اولیه ذخیره شده در فنر-طول از مبدا

خط وسط - می باشند.

$$\begin{aligned} T_{s+} &= 0.4097 - 0.201 = 0.2087 \text{ N.m} \\ T_{s-} &= 0.4174 - 0.2087 = 0.2087 \text{ N.m} \\ K_s &= 0.1096 \text{ N.m/rad} \\ T_{pl} &= -0.4059 \text{ N.m} \end{aligned} \quad (30-2)$$

## ۲-۴-۶ ضریب اصطکاک ویسکوز

اصطکاک ویسکوز بار در مقابل ویسکوز موتور قابل صرف نظر کردن است، چون اصطکاک ویسکوز با سرعت رابطه مستقیم دارد، و سرعت توسط چرخ‌دنده‌ها - چرخ‌دنده‌ها به منظور افزایش گشتاور گذاشته شده‌اند که در نتیجه کاهش سرعت امری بدیهی است -  $1/20$  برابر می شوند که قابل صرف نظر است و ما فقط به شناسایی ضریب اصطکاک ویسکوز موتور می پردازیم.

$$B_{eq} = N^2 B_m + B_L \approx N^2 B_m \quad (N = 20.68) \quad (31-2)$$

توجه داشته باشید که حرکت صفحه فلزی به  $10.5$  درجه محدود شده است، ولی ضریب اصطکاک ویسکوز به سرعت زاویه‌ای وابسته است، بنابراین نیاز است که موتور آزادانه حرکت کند، برای این منظور رابطه‌ی بین موتور و شفت صفحه فلزی که توسط چرخ‌دنده‌ها فراهم شده است را قطع می کنیم. برای موتور جدا شده معادله گشتاور را می نویسیم، داریم:

$$J_m \dot{\omega}_m(t) + B_m \omega_m(t) + T_{fm} = T_m(t) \quad (32-2)$$

که  $T_{fm}$  گشتاور اصطکاک استاتیکی موتور است. برای هر سرعت زاویه‌ای ثابتی  $\dot{\omega}_m(t) = 0$  در نتیجه رابطه (۳۲-۲) به این شکل خلاصه می شود:

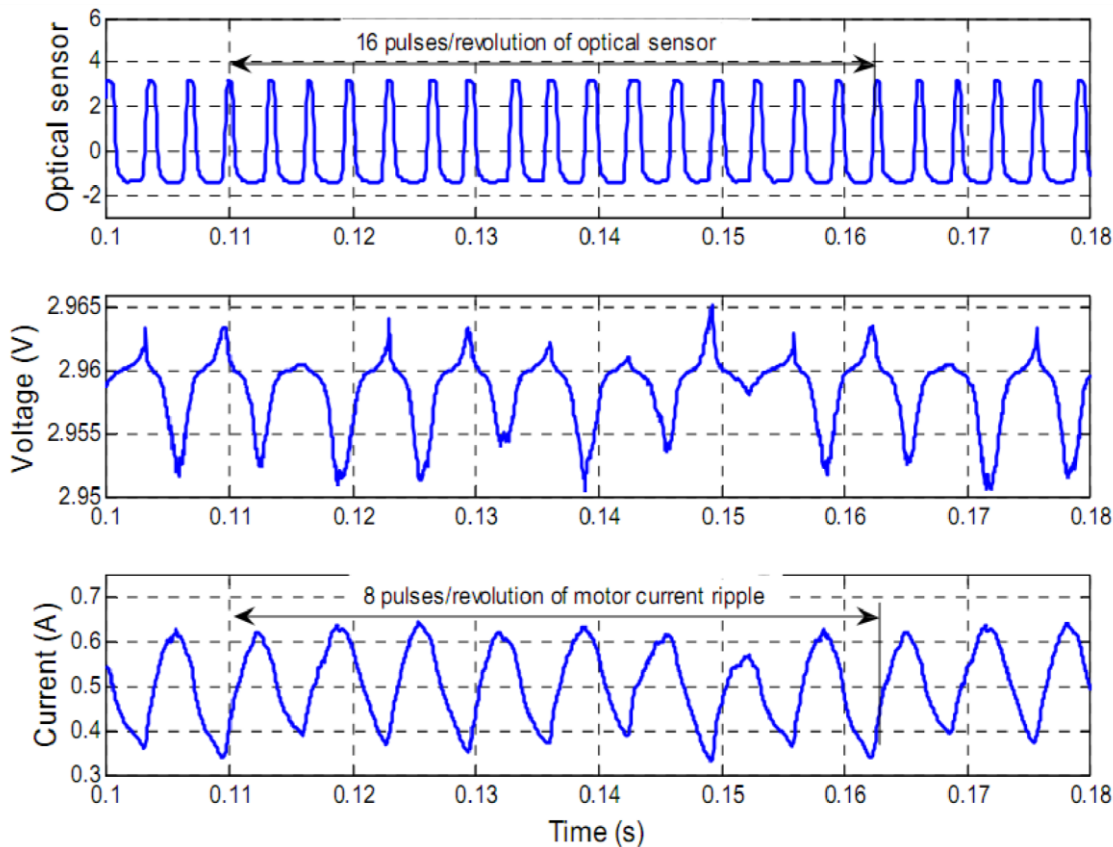
$$B_m \omega_m(t) + T_{fm} = T_m(t) \quad (33-2)$$

از رابطه (۳۳-۲) چنین برمی آید که اگر ما مقادیر لحظه‌ای سرعت زاویه‌ای موتور و گشتاور موتور را داشته باشیم، می توانیم مقادیر  $T_{fm}$  و  $B_m$  را به دست آوریم.

از آنجایی که نیاز به سرعت زاویه‌ای موتور داریم و موتور جریان مستقیم جدا شده مجهز به حسگر

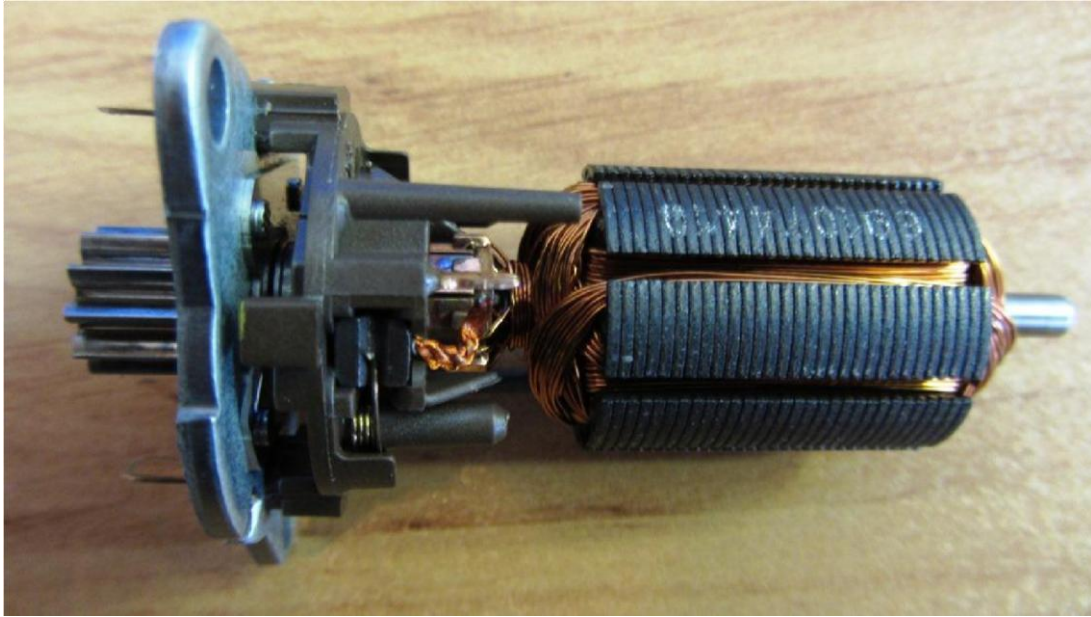


سرعت نمی‌باشد، پس حسگر نوری ۱۶ پالس در هر دور مکانیکی - را به شفت موتور الحاق می‌کنیم و موتور را برای حرکت یکنواخت تغذیه می‌کنیم. سیگنال‌های حسگر نوری، ولتاژ و جریان موتور در شکل ۲-۴۰ آورده شده‌اند.



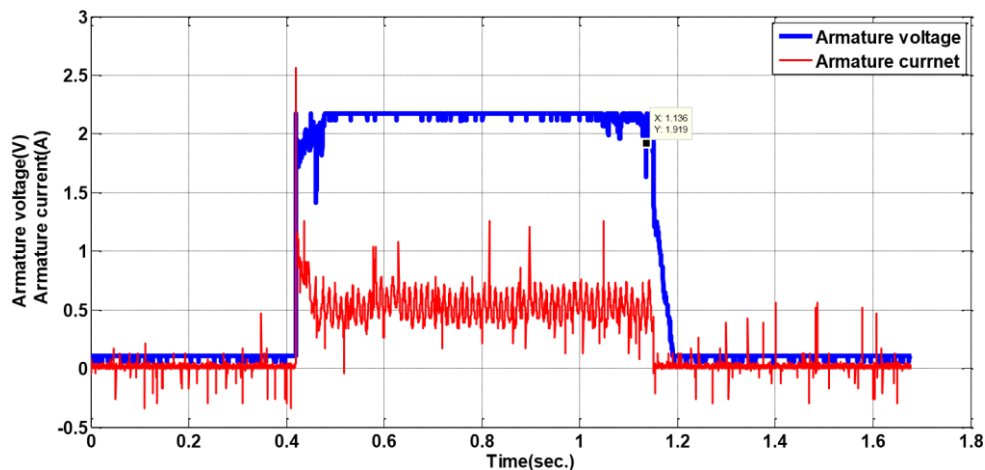
شکل ۲-۴۰ منحنی‌های جریان، ولتاژ و حسگر نوری بر حسب زمان در حالت جدایی موتور از درپچه‌گاز و حرکت آزادانه موتور - در هر ۱۶ پالس نوری ۸ پالس الکتریکی داریم - [۲۴]

همانطور که از شکل ۲-۴۰ پیداست، در هر دور مکانیکی که برابر ۱۶ پالس حسگر نوری است، ولتاژ و جریان موتور ۸ دور می‌زنند، این بدان معناست که فرکانس ولتاژ و جریان موتور ۸ برابر فرکانس مکانیکی است. به طریق دیگر و بدون انجام آزمایش هم می‌توان به این رابطه پی برد، با توجه به مطالب [۳۵] تعداد کلاف‌های موجود در آرمیچر موتور برابر با ۸ است (شکل ۲-۴۱)، در نتیجه فرکانس ولتاژ و جریان ۸ برابر فرکانس مکانیکی است. پس می‌توانیم با محاسبه فرکانس جریان و بدون استفاده از حسگر نوری، فرکانس مکانیکی را به دست آوریم - بدین خاطر که موتور کوچک است و الحاق حسگر نوری روی شفت موتور برای اندازه‌گیری مناسب نیست -



شکل ۲-۴۱ آرمیچر و کلاف‌های آن

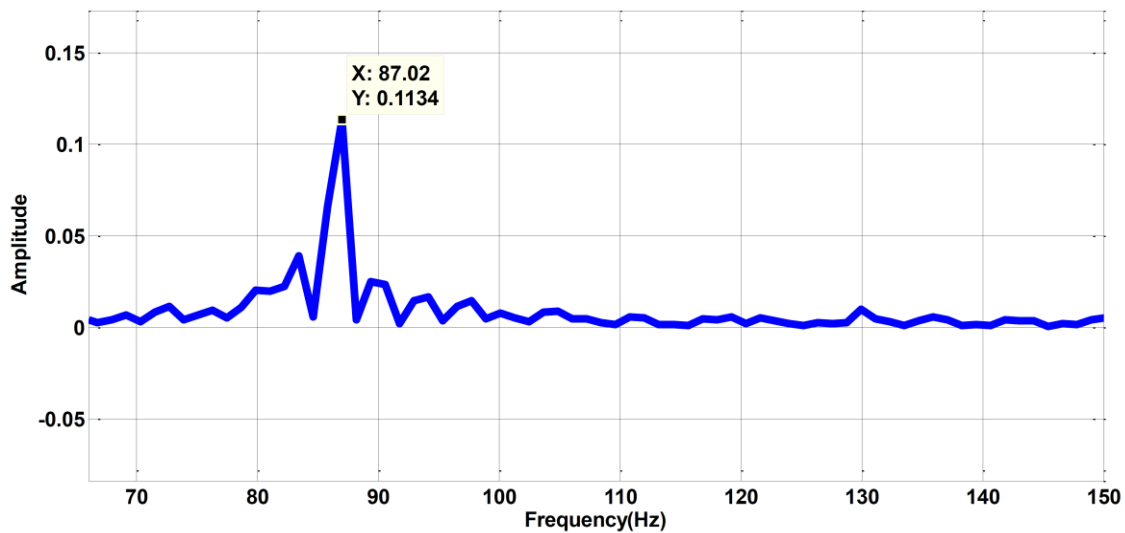
برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز و ورودی‌های پله ۲.۱۷۳، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ولت به مدار آرمیچر موتور جدا شده اعمال می‌شوند و مقادیر ولتاژ و جریان آرمیچر ثبت می‌شوند. برای نمونه شکل موج‌های ولتاژ و جریان به ازای ورودی پله ۲.۱۷۳ ولت در شکل ۲-۴۲ آورده شده است.



شکل ۲-۴۲ منحنی‌های ولتاژ و جریان بر حسب زمان در حالت بی‌باری موتور

شکل موج به ازای بقیه ورودی‌ها هم درست به این شکل است، با این تفاوت که دامنه‌ها و فرکانس‌ها متفاوت است، به همین خاطر از آوردن بقیه شکل‌ها صرف نظر شده است.

برای به دست آوردن فرکانس جریان و در نتیجه سرعت مکانیکی، از آنالیز تبدیل فوریه سریع<sup>۱</sup> در متلب استفاده شده است، برای مثال تبدیل فوریه سریع شکل موج جریان شکل ۲-۴۲، در شکل ۲-۴۲ آورده شده است.



شکل ۲-۴۳ تبدیل فوریه سریع سیگنال جریان در شکل ۲-۴۲

با توجه به شکل ۲-۴۳، فرکانس جریان برابر با  $f = 87.02$  هرتز می باشد، حال با توجه به اینکه فرکانس جریان، ۸ برابر فرکانس مکانیکی است، سرعت مکانیکی به دست می آید.

$$\omega_m(t) = 2\pi \left( \frac{f}{\lambda} \right) = 68.3453 \text{ rad/sec} \quad (2-34)$$

برای به دست آوردن گشتاور موتور از  $T_m = K_m i_a$  استفاده می شود که در آن  $K_m = 0.0187$  و  $i_a$  نیز از میانگین گیری از شکل موج جریان به دست می آید.

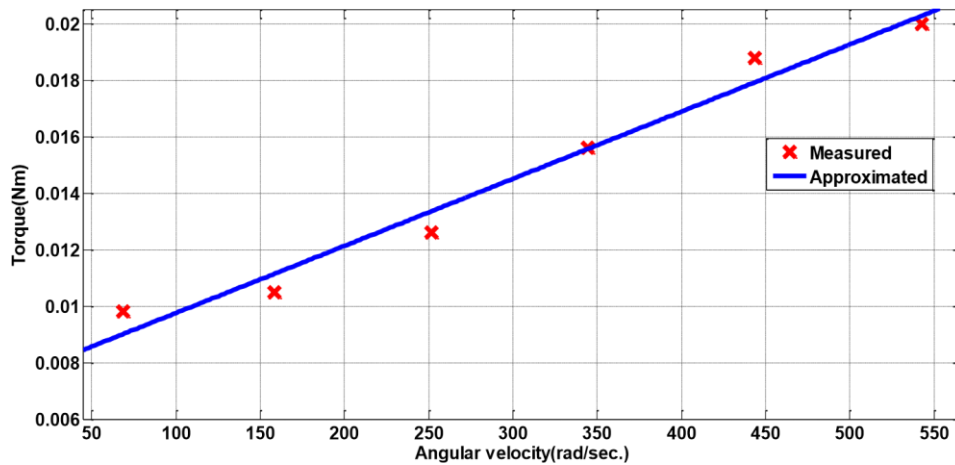
اطلاعات مربوطه در جدول اطلاعات مربوط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز ۱۲- آورده شده است :

<sup>۱</sup> -Fast Fourier transform

۲-۱ جدول اطلاعات مربوط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز

Step input Voltage (V)	FFT Frequency $f(Hz)$	Angular Velocity $w_m(rad/sec)$	Average measured current $i_a(A)$	Motor Torque $T_m(N.m)$
۲,۱۷۳	۸۷,۰۲	۶۸,۳۴۵۳	۰,۵۲۲۷	۰,۰۰۹۸
۴	۲۰۱,۵	۱۵۸,۲۵۷۷	۰,۵۶۱۸	۰,۰۱۰۵
۶	۳۲۰,۷	۲۵۱,۸۷۷۲	۰,۶۷۵۳	۰,۰۱۲۶
۸	۴۳۸,۷	۳۴۴,۵۵۴۲	۰,۸۳۴۳	۰,۰۱۵۶
۱۰	۵۶۵,۱	۴۴۳,۸۲۸۵	۱,۰۰۳۷	۰,۰۱۸۸
۱۲	۶۹۱,۴	۵۴۳,۰۲۴۳	۱,۰۷۱۹	۰,۰۲۰۰

حال با استفاده از بخش برازش منحنی<sup>۱</sup> نرم افزار متلب، گشتاور موتور را بر حسب سرعت زاویه‌ای برازش می‌کنیم.



شکل ۲-۴۴: برازش داده‌ها برای نمودار گشتاور بر حسب سرعت زاویه‌ای صفحه فلزی

شیب خط در شکل ۲-۴۴ برابر با ضریب اصطکاک ویسکوز است:

<sup>۱</sup> - Curve Fitting

$$B_m = 2.37 * 10^{-5}, B_{eq} = N^2 B_m = 0.0102 \text{ N.m.sec/rad} \quad (35-2)$$

## ۷-۴-۲ آزمایش ممان-اینرسی

در این آزمایش چرخ‌دنده‌ها را به جای خود برمی‌گردانیم و رابطه بین موتور و شفت صفحه فلزی را مجدداً برقرار می‌کنیم، مانند آزمایش ۳ صفحه فلزی را به صورت دستی از موقعیت کاملاً باز رها می‌کنیم، چون جریان آرمیچر صفر است، معادله تعادل گشتاور به این صورت خواهد شد:

$$T_{tot}(t) = J_{eq} \dot{\omega}_L(t) = -B_{eq} \omega_L(t) - K_s \theta_L(t) - T_{PL} - T_f \quad (36-2)$$

حال مقادیر لحظه‌ای  $e_b(t)$  و  $\theta_L(t)$  در حین خود بسته شدن سریع صفحه فلزی توسط فنر بازگشتی ثبت می‌شوند.

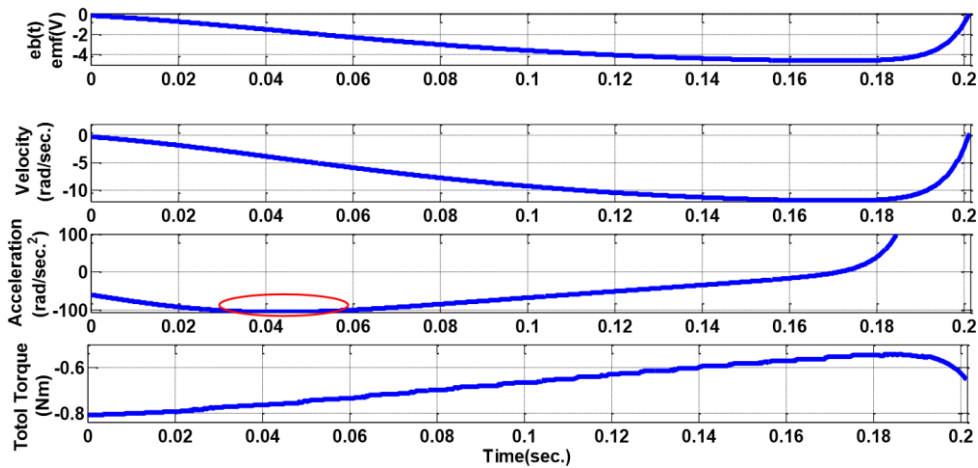
برای محاسبه سرعت و شتاب زاویه‌ای از رابطه (۳۷-۲) استفاده می‌کنیم:

$$\omega_L(t) = e_b(t) / \bar{K}_b, \dot{\omega}_L(t) = d\omega_L/dt \quad (37-2)$$

$T_{tot}(t)$  هم از سمت راست رابطه (۳۶-۲) قابل محاسبه است، چون  $T_{PL}$ ،  $T_f$  و  $K_s$  از آزمایش‌های قبلی به دست آمده‌اند - توجه شود که در این آزمایش، ناحیه کاری دریاچه گاز بالای ناحیه لیمپ هوم است و باید از آن مقادیر استفاده کرد-، مقادیر  $\theta_L(t)$  هم که در حین آزمایش ثبت شده‌اند و سرعت زاویه‌ای هم از رابطه (۳۷-۲) به دست می‌آید.

$e_b(t)$  ثبت شده توسط اسیلوسکوپ و مقادیری که با روابط (۳۵-۲) و (۳۷-۲) به دست آمده‌اند در شکل ۴۵-۲ نشان داده شده‌اند.

در نهایت اینرسی از  $J_{eq} = T_{tot}(t) / \dot{\omega}_L(t)$  قابل محاسبه است، برای این منظور در فاصله زمانی ۰.۰۴ تا ۰.۰۶ ثانیه مقادیر میانگین گشتاور کل و شتاب زاویه‌ای را به دست آورده و بر هم تقسیم می‌کنیم.



شکل ۲-۴۵ منحنی‌های گشتاور بار، شتاب زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای صفحه‌فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ممان اینرسی

$$J_{eq} = 1.88 * 10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (2-38)$$

این مقدار، ممان اینرسی کل مجموعه دریچه گاز می‌باشد.

## ۲-۴-۸ تاییدیه شناسایی

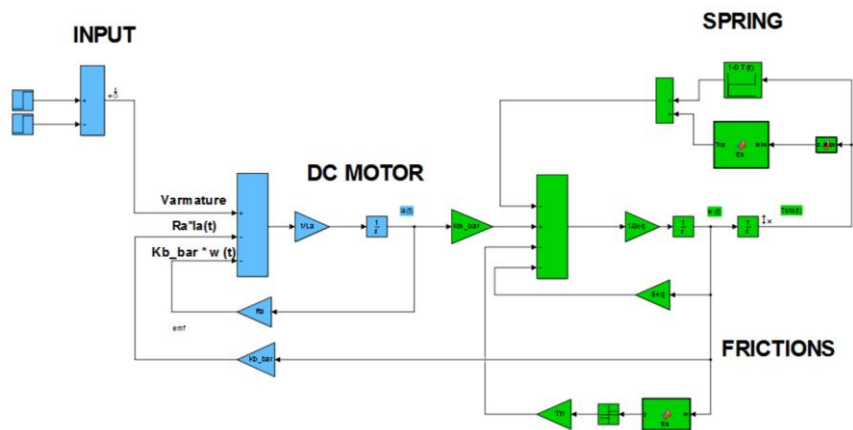
حال که شناسایی پارامترها به اتمام رسید، باید بررسی کنیم که آیا مقادیر پارامترهای شناسایی شده قابل قبول هستند یا خیر، ما این کار را به وسیله ۱- اعمال ورودی‌های یکسان به سیستم واقعی و سیستم شبیه‌سازی شده و مقایسه پاسخ‌ها. ۲- مقایسه نمودار استاتیک موقعیت زاویه‌ای بر حسب گشتاور بار در سیستم واقعی و سیستم شبیه‌سازی شده، انجام می‌دهیم.

شبیه‌سازی سیستم دریچه گاز الکترونیکی در شکل ۲-۴۶ آمده است.

### ۲-۴-۸-۱ اعمال ورودی‌های یکسان به سیستم واقعی و شبیه‌سازی شده

برای این منظور ابتدا شرایط شبیه‌سازی را نزدیک به عمل کنیم تا بتوانیم در شرایط یکسان، پاسخ‌های شبیه‌سازی را با واقعیت مقایسه کنیم. یکی از این شرایط این است: در واقعیت ورودی انتخابی را زمان اندکی به مدار آرمیچر اعمال می‌کنیم، که بعد از آن مدار آرمیچر، مدار باز خواهد شد، در شبیه‌سازی ولی این‌گونه نیست و بعد از اعمال ورودی، مدار آرمیچر اتصال کوتاه می‌شود - این

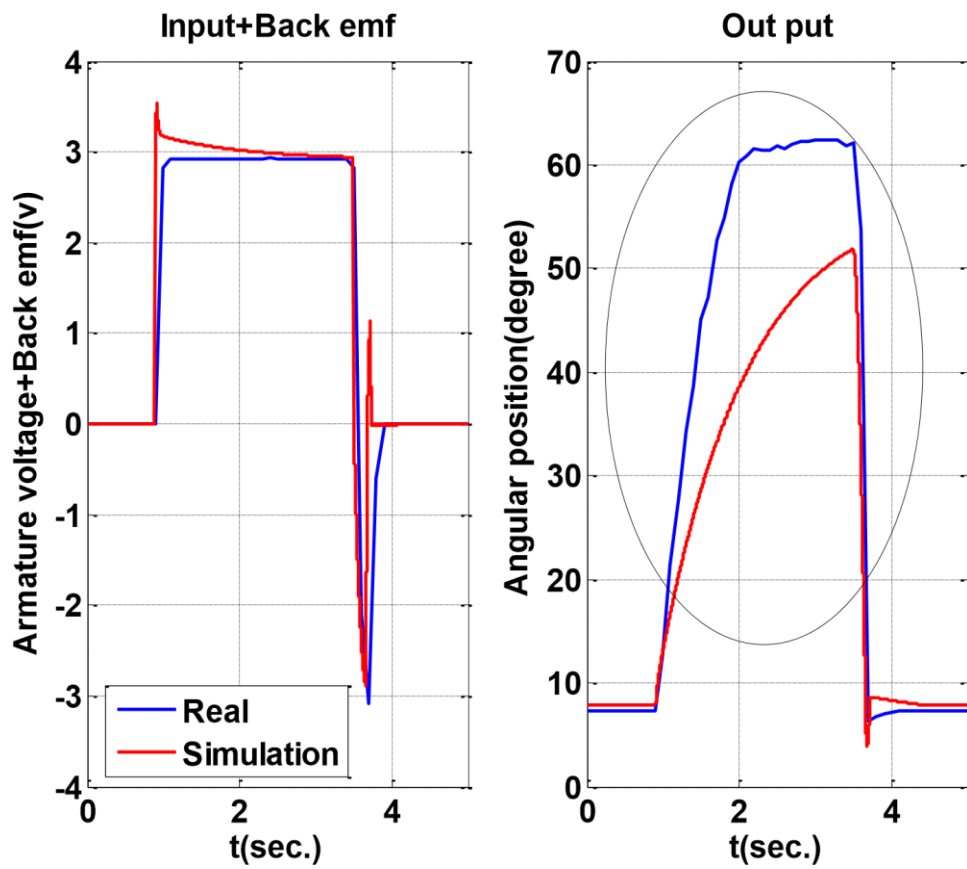
حالت باعث می شود که ولتاژ القایی ناشی از سرعت زاویه‌ای، در مدار آرمیچر جریان ایجاد کند. برای حل این مشکل، با نوشتن برنامه‌ای وقتی که ورودی نداریم، جریان آرمیچر را صفر می‌کنیم.



شکل ۲-۴۶ شبیه‌سازی دریچه‌گاز الکترونیکی در محیط سیمولینک متلب

ورودی انتخابی از نوع پالس مربعی و دامنه‌های متغیر است تا بتوانیم رفتار دریچه گاز را در ناحیه‌های مختلف کاری مشاهده و مقایسه کنیم.





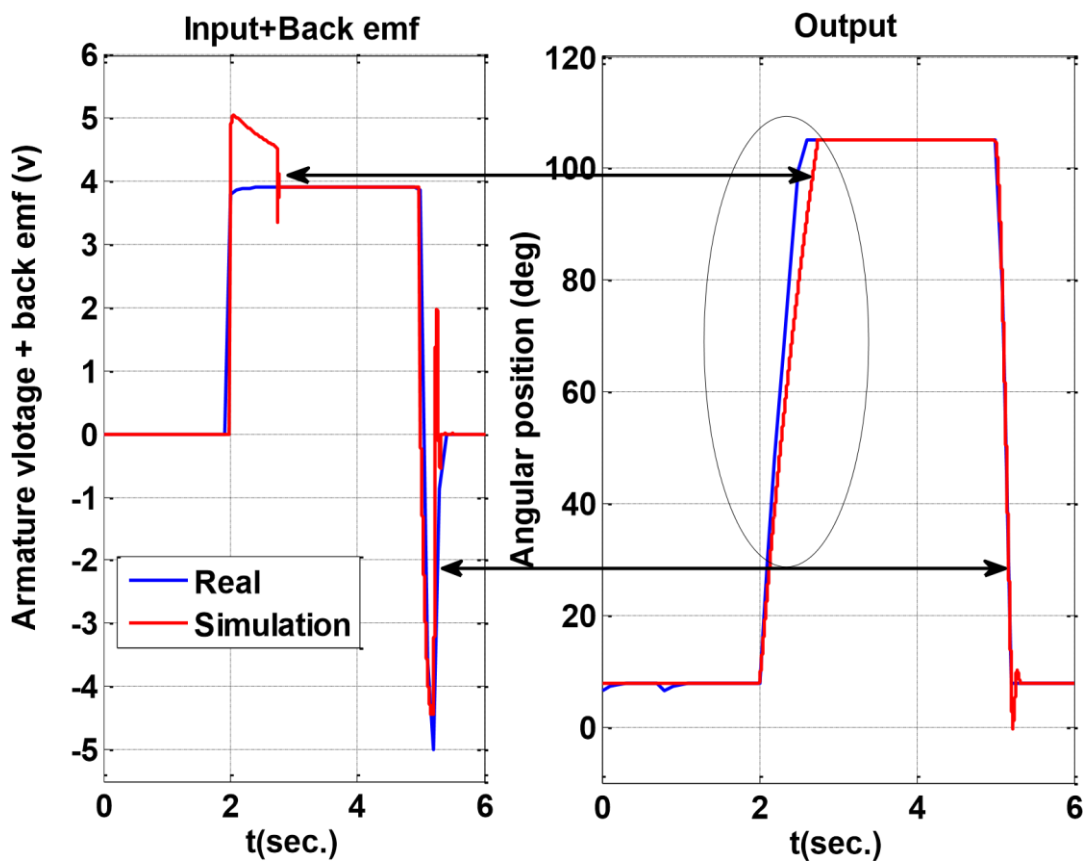
شکل ۲-۴۷ مقایسه موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی در شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در عمل

در این ناحیه مشاهده می‌شود که ۱- سرعت باز شدن در شبیه‌سازی کمتر از واقعیت است. ۲-

دامنه خروجی در شبیه‌سازی کمتر از واقعیت است.



-باز شدن کامل



شکل ۴۸-۲ مقایسه موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی در شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در عمل

در این ناحیه اختلاف کمی در سرعت باز شدن شبیه‌سازی نسبت به واقعیت وجود دارد.

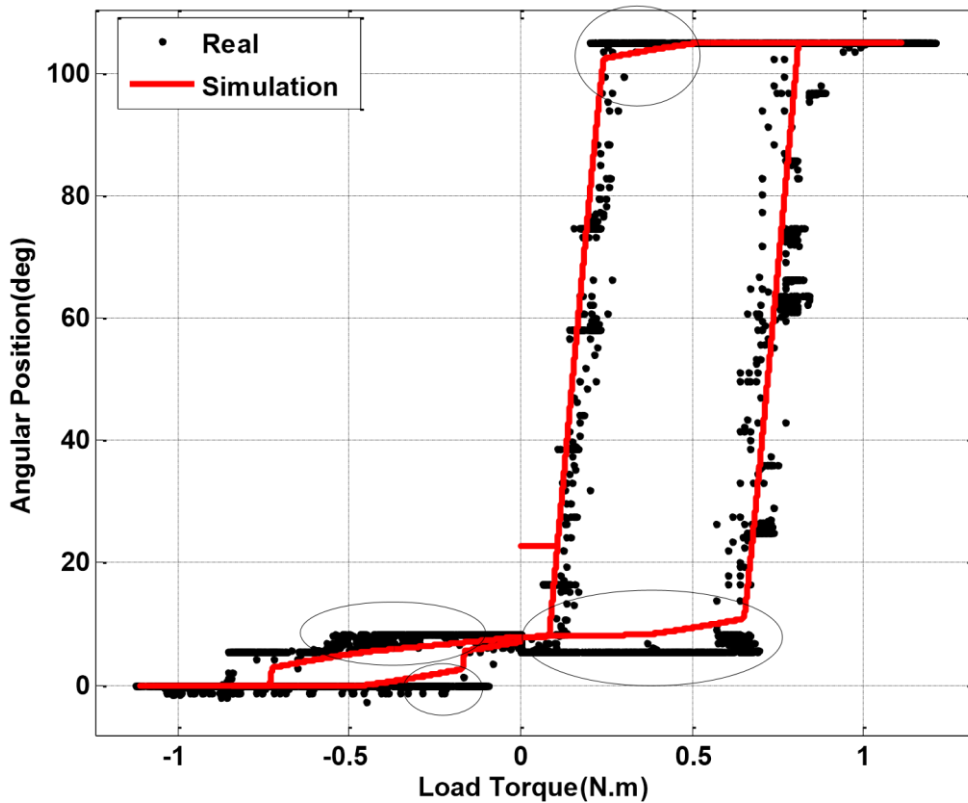
#### ۲-۸-۴-۲ نمودار استاتیک موقعیت زادی‌های بر حسب گشتاور بار

ورودی شیب - با سرعت ملایم پایین - را طوری انتخاب می‌کنیم که دریچه گاز تمامی نواحی کاری خود را طی کند، و سپس همان طوری که در بخش‌های قبل توضیح داده شد نمودار موقعیت زاویه‌ای بر حسب گشتاور بار را رسم می‌کنیم.

از نمودار رسم شده در شکل ۴۹-۲ هم مشخص است که ناحیه‌های مرده اختلاف بین شبیه

سازی و واقعیت وجود دارد.

Static Curve: I captured Armature Current and multiply to Torque constant :  $T=Kt \cdot I_a$



شکل ۲-۴۹: مقایسه نمودار استاتیک موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی بر حسب گشتاور بار در واقعیت با شبیه‌سازی

## ۹-۴-۲ تنظیم پارامترها

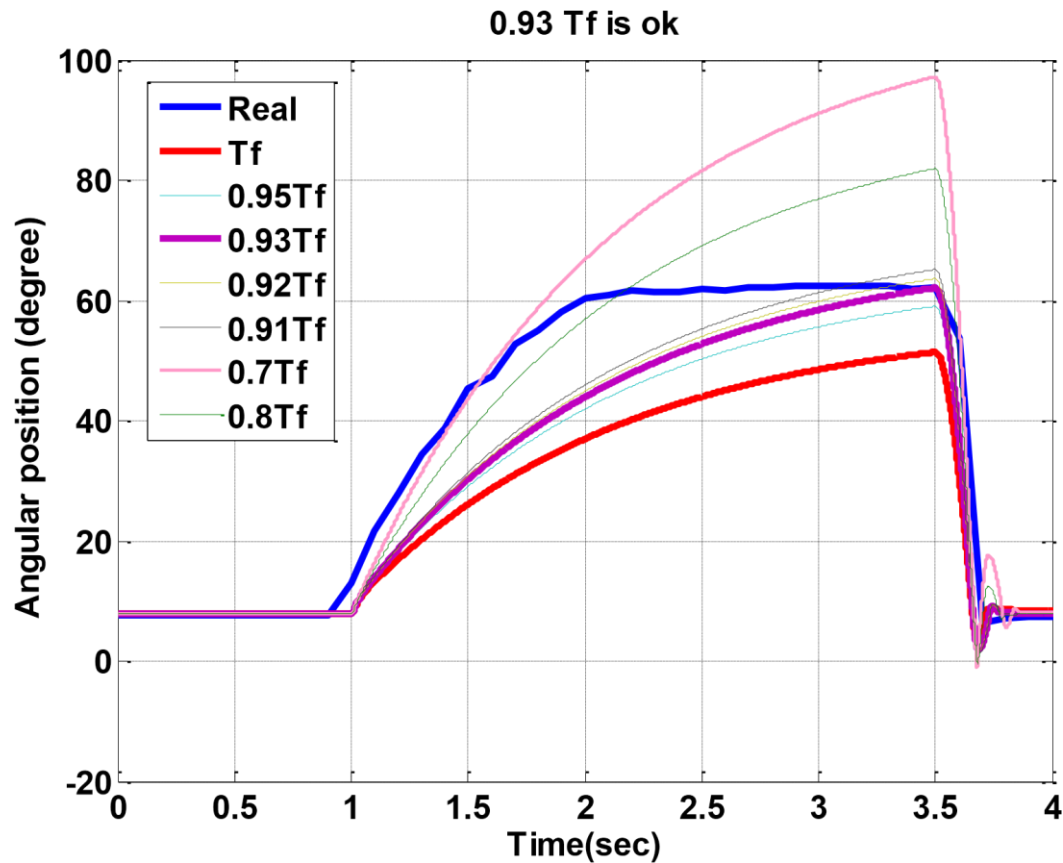
از توضیحاتی که در بخش قبل داده شد و اختلافاتی که بین شبیه‌سازی با واقعیت وجود دارد، متوجه می‌شویم که در بخش شناسایی پارامترها به خوبی شناسایی نشده‌اند - به علت عوامل غیرخطی موجود - و نیاز است که بعضی از پارامترها رو ضریب ۰.۱ تا ۰.۹۹ تغییر دهیم و تغییرات را مشاهده کنیم و هر جا که شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک‌تر شد، آن پارامترها را به عنوان پارامترهای استفاده شده در شناسایی در نظر بگیریم. این روند کاری تنظیم پارامترها نامیده می‌شود.

لازم به ذکر است به خاطر وجود دینامیک‌های مدل نشده، همیشه اختلاف بین شبیه‌سازی و واقعیت وجود دارد، لیکن این اختلاف نباید زیاد باشد.

از آنجا که بیشترین اختلاف‌ها در شکل ۲-۴۷ به چشم می‌خورد، پس اثر در تغییرات پارامترها را برای ورودی شکل ۲-۴۷ بررسی می‌کنیم. دو پارامتر مهمی که تاثیر مهمی در ناحیه مرده داشته و

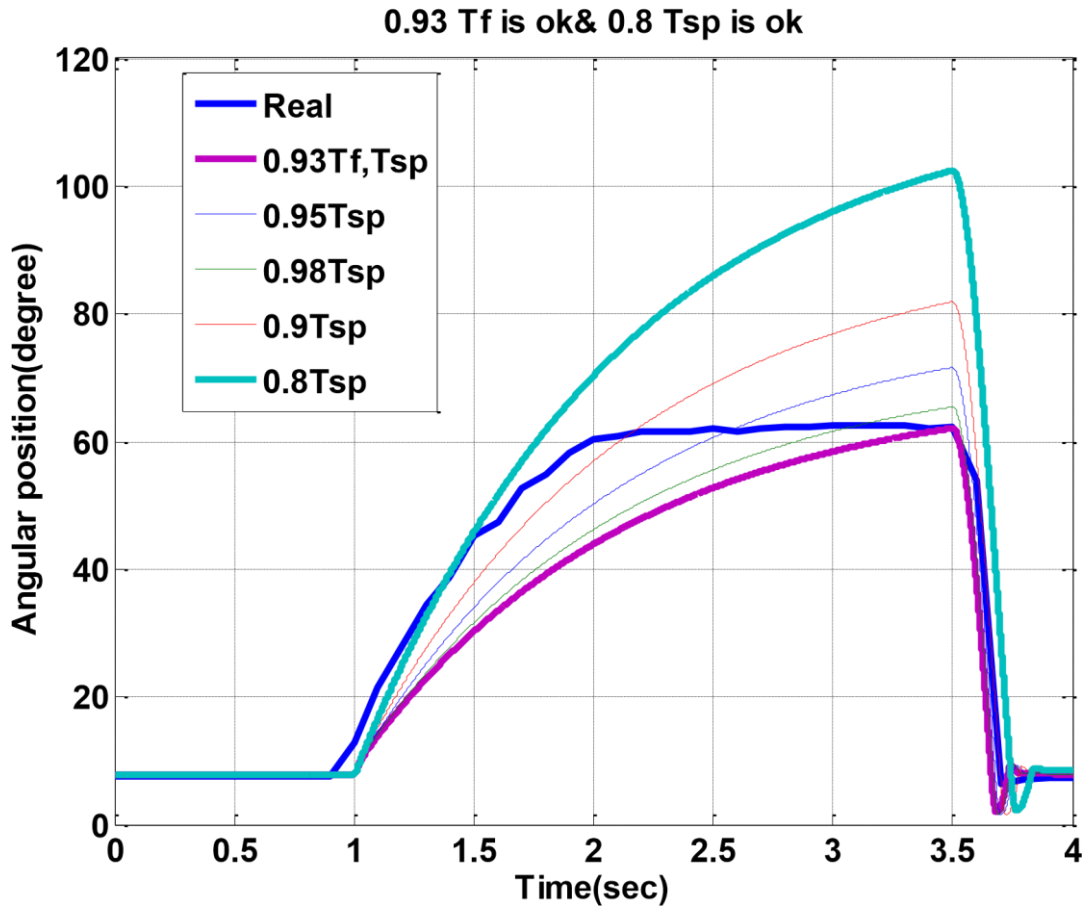
تأثیرات غیرخطی دارند به ترتیب ثابت اصطکاک ایستایی و گشتاور از قبل ذخیره شده در فنر می‌باشند پس ابتدا به تنظیم این دو پارامتر می‌پردازیم.

## ۱-۹-۴-۲ تنظیم ثابت اصطکاک ایستایی



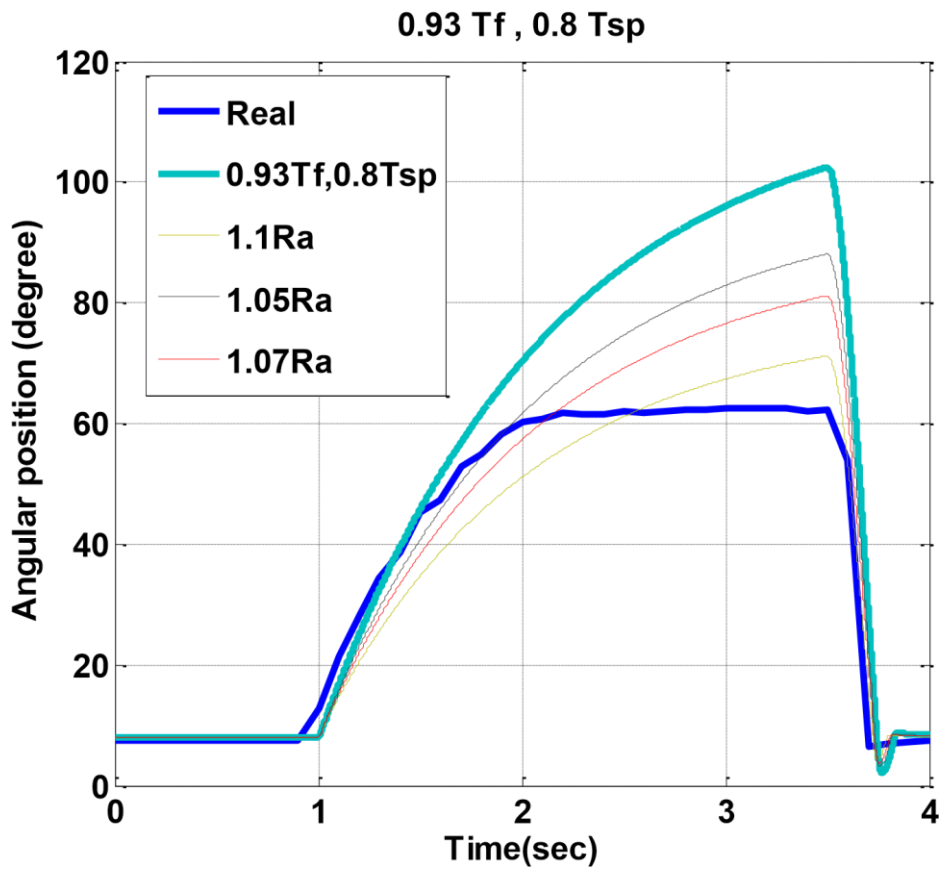
شکل ۵۰-۲ تغییر ثابت اصطکاک ایستایی برای تنظیم تا موقعیت صفحه‌فلزی به واقعیت نزدیک شود.

می‌بینیم که اگر اصطکاک ایستایی را به ۰.۹۵ مقدارش کاهش دهیم، مشکل دامنه حل می‌شود و خروجی شبیه سازی با واقعیت یکی می‌شود، حال م‌شکلی که باقی مانده اختلاف در سرعت باز و بسته شدن دریچه می‌باشد.



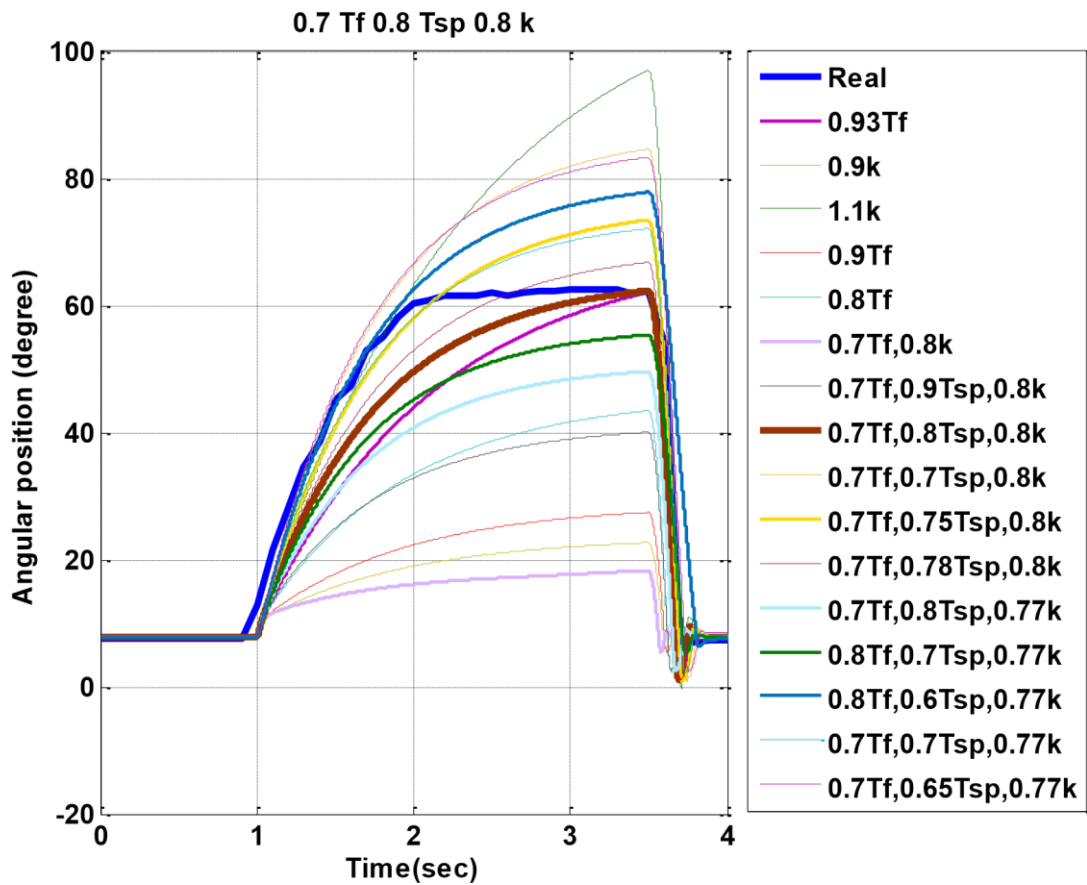
شکل ۵۱-۲ تغییر پارامتر گشتاور از قبل ذخیره شده در فنر برای تنظیم تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود.

با بررسی شکل ۵۱-۲، برای اینکه سرعت باز و بسته شدن دریچه به واقعیت نزدیک شود، گشتاور از قبل ذخیره شده در فنر را به ۰.۸ مقدارش کاهش می‌دهیم، مشکل جدیدی که ایجاد می‌شود، مشکل عدم تطابق دامنه خروجی در شبیه‌سازی با واقعیت است که این بار بالعکس دامنه شبیه‌سازی بزرگتر از واقعیت شده‌است.



شکل ۵۲-۲ تغییر پارامتر مقاومت آرمیچر برای تنظیمش تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود.

همان طوری که از شکل ۵۲-۲ برمی آید از تغییر مقاومت آرمیچر به نتیجه قابل قبولی نرسیدیم.



شکل ۲-۵۳ تغییر پارامتر ثابت گشتاور موتور برای تنظیمش تا موقعیت صفحه فلزی به واقعیت نزدیک شود.

از شکل ۲-۵۳ برمی آید که اگر گشتاور فنی و ثابت فنی را به ۰,۸ مقدارشان و گشتاور اصطکاک را

به ۰,۷ مقدارش کاهش دهیم پاسخ به واقعیت نزدیک تر خواهد شد.

در این مرحله با مطالعه گزارش فنی شرکت ایستیتاتو موتوری<sup>۱</sup> [۲۹] پی به سه اشتباه رایج که

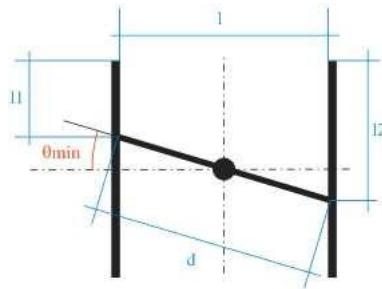
در بیشتر مقالات و تحقیقات وجود دارد بردیم:

۱- در محاسبه زاویه حداقل و حداکثر در دریچه گاز:

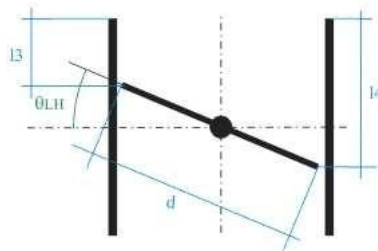
<sup>۱</sup>-Istituto motori

ما براساس برکه اطلاعات محصول دریچه گاز الکترونیکی و گزارشات مقالات مختلف حداقل زاویه را صفر درجه و حداکثر زاویه را ۱۰۵ درجه در نظر می‌گرفتیم که بر اساس محاسبات زیر اشتباه است:

با استفاده از نسبت‌های مثلثاتی، شکل‌های شکل ۵۴-۲ شکل ۵۵-۲ و جدول ۲۲- داریم:



شکل ۵۴-۲ صفحه‌فلزی در موقعیت کاملاً بسته



شکل ۵۵-۲ صفحه‌فلزی در موقعیت لیمپ هوم

جدول ۲۲- اطلاعات مربوط برای به دست‌آوردن زاویه‌های حداقل و لیمپ هوم

اندازه (سانتیمتر)	قسمت
۶	$l$
۲٫۷۵	$l_1$
۳٫۶۴	$l_2$
۲٫۵۴	$l_3$
۳٫۸۶	$l_4$

$$\tan(\theta_{min}) = \frac{l_2 - l_1}{l} \Rightarrow \theta_{min} = 8 \text{ deg.} \quad (39-2)$$

$$d * \sin(\theta_{LH}) = l_4 - l_3 \Rightarrow \theta_{LH} = 12.58 \text{ deg.} \quad (40-2)$$

ولتاژ حسگر در ناحیه لیمپ هوم ، ۰,۸۶ ولت می باشد که برابر با ۱۲,۴۵ درجه می باشد که و تاییدی بر محاسبه ی بالا می باشد.

که :

$$d = \sqrt{l^2 + (l_2 - l_1)^2}, \theta_{max} = 90 \text{ deg.} \quad (41-2)$$

به دست آوردن شیب خط حسگر:

در حداقل زاویه که ۸ درجه می باشد، حداقل ولتاژ حسگریک -در بیشتر جاها ۰,۴۱-۰,۴۳۴ ولت و در حداکثر زاویه که ۹۰ درجه می باشد حداکثر ولتاژ حسگر یک-در بیشتر جاها ۴,۶۷۳-۴,۷۸۲ ولت می باشد، بنابراین شیب خط حسگر قابل محاسبه می باشد:

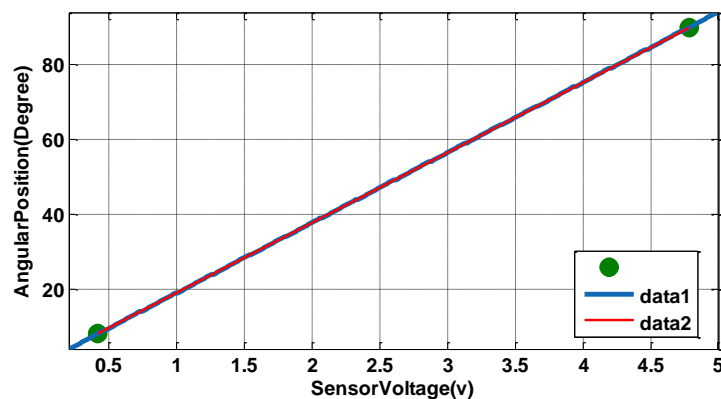
در بیشتر جاها:

$$\theta = 19.3442 V_s - 0.3954 \quad (42-2)$$

که  $V_s$  ولتاژ حسگر است.

در بعضی جاها:

$$\theta = 18.79 V_s + 0.1457 \quad (43-2)$$



شکل ۵۶-۲ معادلات دو حسگر که بر روی هم افتاده اند.



همان طور که از شکل پیدا است، هر دو معادله شبیه هم هستند، پس از یکی از معادلات بالا استفاده خواهیم کرد.

توضیحی در مورد ناحیه لیمپ هوم: در باز شدن دریچه گاز در بالای ناحیه لیمپ هوم داده هایی که توسط حسگر موقعیت ثبت شده است حاکی از زاویه های اولیه مختلف بوده است که ناشی از اثر لقی در ناحیه لیمپ هوم می باشد: اعداد ثبت شده:  $0,771$  ولت،  $0,774$  ولت،  $0,782$  ولت و  $0,869$  ولت

پس پهنای ناحیه لیمپ هوم در بالای آن از  $0,771$  تا  $0,869$  ولت است که اگر اعداد را در معادله خط حسگر قرار دهیم زاویه از  $14,3$  تا  $16,4147$  تغییر می کند.

در زیر ناحیه لیمپ هوم نیز در بسته شدن داده های مختلف ثبت شده است:

$0,653$  ولت،  $0,706$  ولت،  $0,739$  ولت،  $0,749$  ولت،  $0,753$  ولت. پس پهنای ناحیه لیمپ هوم در زیر آن از  $0,653$  تا  $0,753$  ولت است که اگر اعداد را در معادله خط حسگر قرار دهیم زاویه از  $12,3$  تا  $14,3$  درجه تغییر می کند.

با مقایسه دو مقدار زاویه در دو ناحیه بالا نتیجه می گیریم که پهنای کل ناحیه لیمپ هوم از  $(0,653)$  ولت  $12,3$  درجه تا  $(0,869)$  ولت  $16,4$  درجه است که  $4,1$  درجه می باشد.

پس سه ناحیه داریم:

۱- از  $16,4$  تا  $90$  درجه ۲- از  $12,3$  تا  $16,4$  درجه ۳- از  $8$  تا  $12,3$  درجه

با توجه به داده های به دست آمده، زاویه لیمپ هوم را در ۰,۷۶ ولت در نظر می گیریم که ۱۴,۳ درجه خواهد شد در نتیجه با تعریف کردن:

$$\theta_{LH} = 14.3 \text{ deg} , \quad \Delta\theta_{LH} = 16.4 - 14.28 = 14.28 - 12.3 \cong 2 \text{ deg}$$

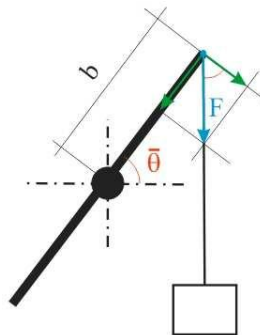
معادلات فنر به این شکل درخواهند آمد:

$$\begin{cases} T_{plh}^+ + k^+(\theta - (\theta_{LH} + \Delta\theta_{LH})) & \text{if } \theta > \theta_{LH} + \Delta\theta_{LH} \\ T_{plh}^+ + (\theta - \theta_{LH}) / (\Delta\theta_{LH}) & \text{if } \theta_{LH} < \theta < \theta_{LH} + \Delta\theta_{LH} \\ T_{plh}^- - (\theta_{LH} - \theta) / (\Delta\theta_{LH}) & \text{if } \theta_{LH} - \Delta\theta_{LH} < \theta \leq \theta_{LH} \\ T_{plh}^- - k^-(\theta_{LH} - \Delta\theta_{LH} - \theta) & \text{if } \theta \leq \theta_{LH} - \Delta\theta_{LH} \end{cases} \quad (44-2)$$

۲- برابر گرفتن ثابت ولتاژالقایی با ثابت گشتاور و صرف نظر از تلفات:

این اشتباه هم در بیشتر مقالات و تحقیقات صورت گرفته وجود دارد، در ادامه آزمایش مربوط به شناسایی ثابت گشتاور آورده شده است:

برای تخمین ثابت گشتاور همان طور که از شکل ۲-۵۷ پیداست، ابتدا یک نیروی خارجی معلوم و مشخص به نام  $F$  را به صفحه فلزی اعمال کرده و موقعیت زاویه ای صفحه فلزی را به وسیله کنترل انتگرالی کوچکی در مقدار معلوم  $\bar{\theta}$  ثابت نگه داشته و در این حالت مقدار جریان آرمیچر را اندازه گیری شده است.



شکل ۲-۵۷ اعمال نیروی خارجی و نقطه تعادل ایجاد شده برای شناسایی ثابت گشتاور

در حالت دائمی گشتاور تولیدی  $T$  موتور جریان مستقیم ، به مقدار نیروی خارجی اعمال شده وابسته است :

$$\bar{T} = N K_t \bar{I} = T_s(\bar{\theta}) + T_f(\cdot) + F b \cos(\bar{\theta}) \quad (45-2)$$

که در آن  $\bar{I}$  جریان حالت دائمی،  $T_s$  گشتاور فنر و  $T_f$  گشتاور اصطکاک هستند.

بنابراین با انجام دو آزمایش مجزا با اعمال نیروهای خارجی معلوم  $F_j$  و  $F_k$  ، موتور جریان مستقیم گشتاورهای  $T_j$  و  $T_k$  را فراهم خواهد کرد، پس داریم:

$$\bar{T}_j = N K_t \bar{I} = T_s(\bar{\theta}) + T_f(\cdot) + F_j b \cos(\bar{\theta}) \quad (46-2)$$

$$\bar{T}_k = N K_t \bar{I} = T_s(\bar{\theta}) + T_f(\cdot) + F_k b \cos(\bar{\theta}) \quad (47-2)$$

حال با کم کردن رابطه دوم از اول خواهیم داشت:

$$K_t = \frac{\Delta T}{N \Delta I} = \frac{|\bar{T}_j - \bar{T}_k|}{N |\bar{I}_j - \bar{I}_k|} \quad (48-2)$$

این آزمایش چندین بار با اعمال نیروهای مختلف  $F_j$  تکرار خواهد شد و در نهایت با معلوم بودن  $b = 0.03 \text{ m}$  و  $\bar{\theta} = 26.93 \text{ deg.}$  ، و میانگین گیری از ثابت گشتاورهای به دست آمده، ثابت گشتاور نهایی به دست خواهد آمد:

$$K_t = 12.37 * 10^{-3} \text{ N.m/A} \quad (49-2)$$

به دلیل عدم وجود امکانات و وقت کافی ما این آزمایش را انجام ندادیم، به همین خاطر ما از میانگین مقدار ثابت گشتاور به دست آمده و مقدار ثابت گشتاور ذکر شده در برگه اطلاعات محصول دریچه گاز استفاده کرده و با الگوریتم سیمپلکس در بخش بهینه سازی متلب<sup>۱</sup> این ثابت را

---

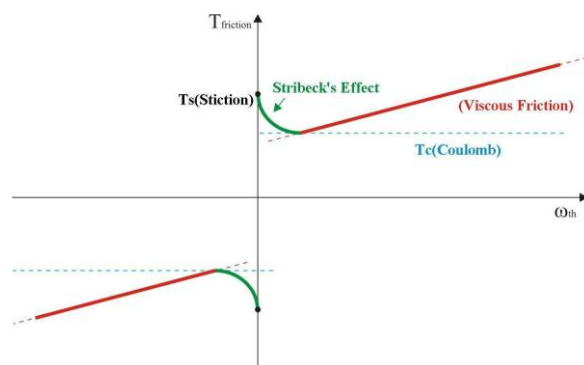
<sup>۱</sup> Response Optimization

برای دریچه‌گاز مورد استفاده تنظیم کرده‌ایم :

$$K_t = \frac{(0.01237 + 0.01)}{2} = 0.0112 \text{ N.m/A} \quad (50-2)$$

۳-مدل سازی اصطکاک : در بیشتر مقالات و کارهای تحقیقی انجام شده برای مدل سازی اصطکاک به خاطر سادگی و راحتی از مدل کولومب استفاده می‌کنند و ما هم ابتدا از این مدل استفاده کردیم، ولی به دلیل مشکلات پیش آمده در بخش تنظیم پارمترها، تصمیم گرفتیم که مدل اصطکاک را عوض کنیم، توضیحات مدل جدید در ادامه آمده است :

باز به دلیل سادگی از مدل کولومب استفاده کرده‌ایم، منتهی با این تفاوت که اثر استریبک<sup>۱</sup> را همان طور که از شکل ۲-۵۸ پیداست، به معادلات اضافه کرده‌ایم تا دقت افزایش پیدا کند:



شکل ۲-۵۸ مدل اصطکاک دارای مشخصه‌های استاتیکی، استریبک، کولومب و ویسکوز [۲۹]

$$T_f(\omega_L) = \left[ T_C + (T_S - T_C) e^{-\frac{\omega_L}{\omega_s}} \right] \text{sign}(\omega_L) + B_{eq} \omega_L \quad (51-2)$$

که  $T_S$  اصطکاک سکون،  $T_C$  اصطکاک کولومب،  $\omega_s$  سرعت زاویه‌ای استریبک،  $B_{eq}$  ثابت اصطکاک ویسکوز و  $\omega_L$  سرعت زاویه‌ای صفحه‌فلزی می‌باشد.  $\omega_s$  و  $T_C$  را هم از طریق الگوریتم

<sup>۱</sup> حالت گذرای بین سکون و حرکت

سیمپلکس در بخش بهینه‌سازی متلب به دست خواهیم آورد.

اشتباه رایج دیگر برابر گرفتن اصطکاک سکون با اصطکاک کولومب بود که در مدل جدید اصلاح شده است، اصطکاک سکون همیشه بزرگتر از اصطکاک کولومب است.

پس در کل: اصطکاک سکون زمانی پیش می‌آید که صفحه فلزی هیچ‌گونه حرکتی ندارد، اصطکاک لغزشی-کولومب+ویسکوز-زمانی پیش می‌آید که صفحه فلزی حرکت می‌کند و اصطکاک دیگری بین این دو حالت وجود دارد به نام اثر اصطکاک استریبک یا پیش‌لغزشی معروف است و حالت گذاری بین سکون و حرکت (لغزش) می‌باشد [۳۶].

حال به دلیل تغییرات حاصل شده-تغییر معادله خط حسگر، تغییر مدل اصطکاک و ثابت گشتاور موتور-، مجبوریم بعضی از داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها برای شناسایی را دوباره پردازش کنیم.

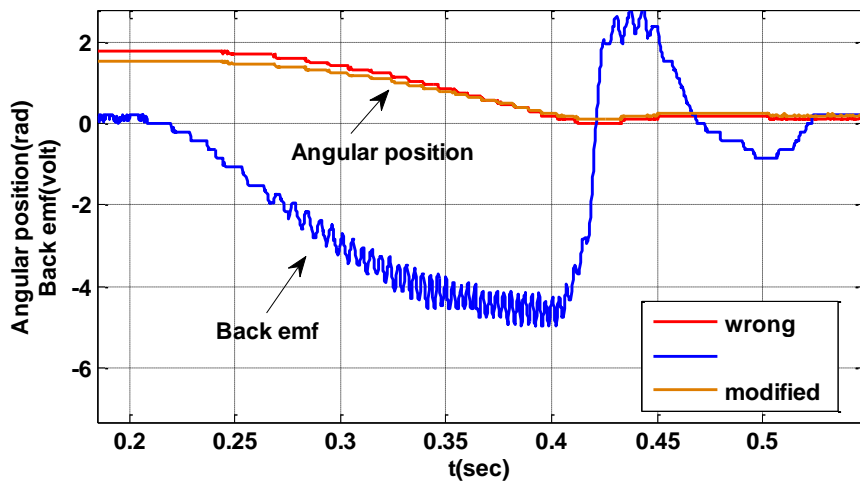
چون توضیحات کامل در قبل داده شده است به آوردن شکل‌ها و محاسبات اکتفا می‌کنیم.

در آزمایش اول و دوم که چون ربطی به زاویه دریچه‌گاز نداشته‌اند، پس عوض شدن معادله خط حسگر در آن‌ها تغییری ایجاد نمی‌کند.

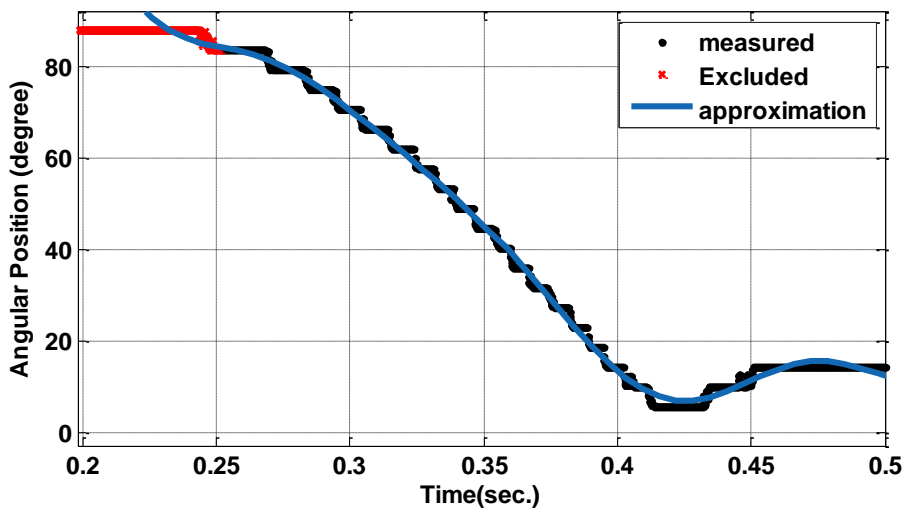


به آزمایش سوم می پردازیم:

در این آزمایش داده ها به این صورت تغییر می کنند :

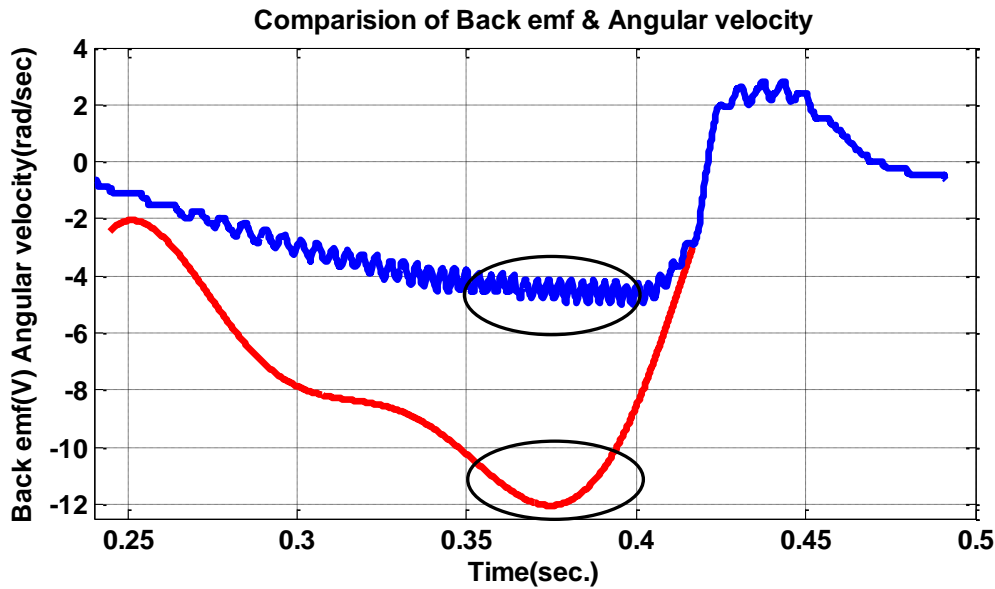


شکل ۲-۵۹ منحنی های موقعیت زاویه ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی و ولتاژ القایی ثابت و ولتاژ القایی-اصلاح شده



شکل ۲-۶۰ تقریب موقعیت زاویه ای صفحه فلزی با سری فوریه-اصلاح شده

برای اینکه بتوانیم از موقعیت زاویه‌ای مشتق بگیریم تا سرعت زاویه‌ای را به دست آوریم، نیاز است تغییرات گسسته موقعیت زاویه‌ای را با تابعی تقریب بنزیم که مشتق پذیر باشد، ما تقریب را با نرم افزار متلب انجام دادیم<sup>۱</sup>.



شکل ۲-۶۱ منحنی سرعت زاویه‌ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ثابت ولتاژ القایی-اصلاح شده

از هر دو کمیت سرعت زاویه‌ای و ولتاژ القایی در فاصله زمانی ۰,۳۵ تا ۰,۴ ثانیه میانگین گیری

می‌شود، و ثابت ولتاژ القایی قابل محاسبه است:

$$\text{میانگین ولتاژ القایی} : -۴,۴۶۵۴۵۷۳$$

$$\text{میانگین سرعت زاویه‌ای} : -۷,۸۱۹۴$$

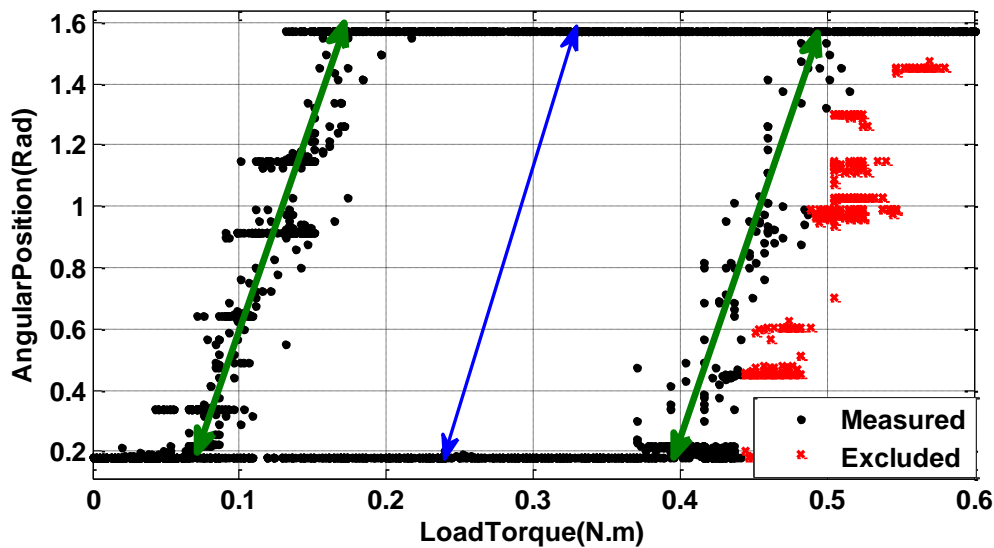
ثابت : ۰,۵۶۸۶ که نسبت به مقدار قبلی (۰,۳۸۶۵) حدوداً ۱,۵ برابر شده است.

<sup>۱</sup> Curve Fitting

### آزمایش چهارم:

این آزمایش به ثابت گشتاور موتور وابسته است، چون ثابت گشتاور در جریان ضرب شده و گشتاور تولیدی موتور را که یکی از داده های ورودی برای شناسایی این قسمت می باشد را تشکیل می دهد، پس هر چقدر ثابت گشتاور را به درستی به دست آورده باشیم، قابلیت اطمینان به پارامترهای به دست آمده در این بخش افزایش خواهد یافت.

۱- ناحیه بالا:



شکل ۲-۶۲ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه (داده های به دست آمده) - اصلاح شده

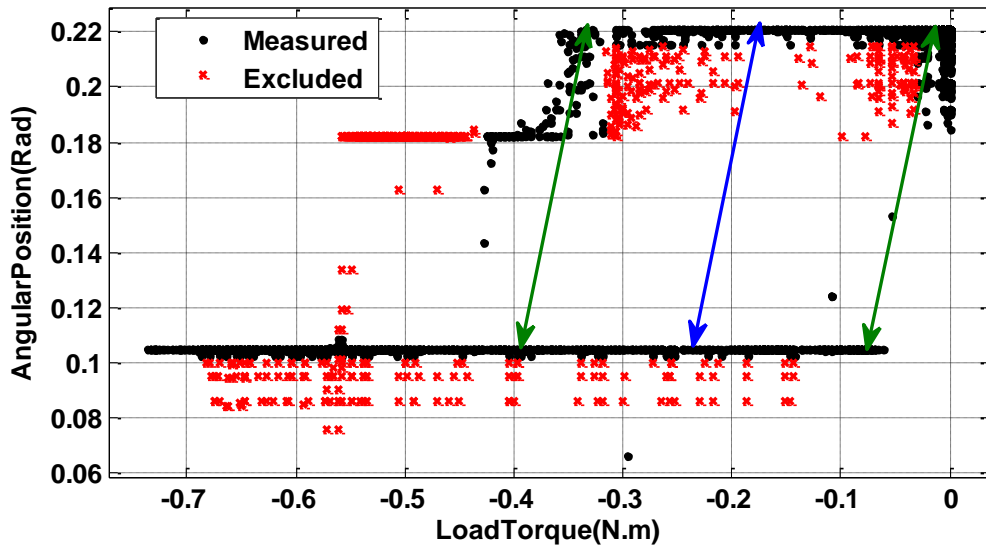
$$T_s = 0.157 \text{ N.m}$$

$$K_s = 0.0749 \text{ N.m/rad}$$

$$T_{pl} = 0.233 \text{ N.m}$$

(۵۲-۲)





شکل ۲-۶۳ موقعیت صفحه فلزی بر حسب گشتاور بار در ناحیه ۲ (داده های به دست آمده) - اصلاح شده

$$T_s = 0.1573 \text{ N.m}$$

$$K_s = 0.5634 \text{ N.m/rad}$$

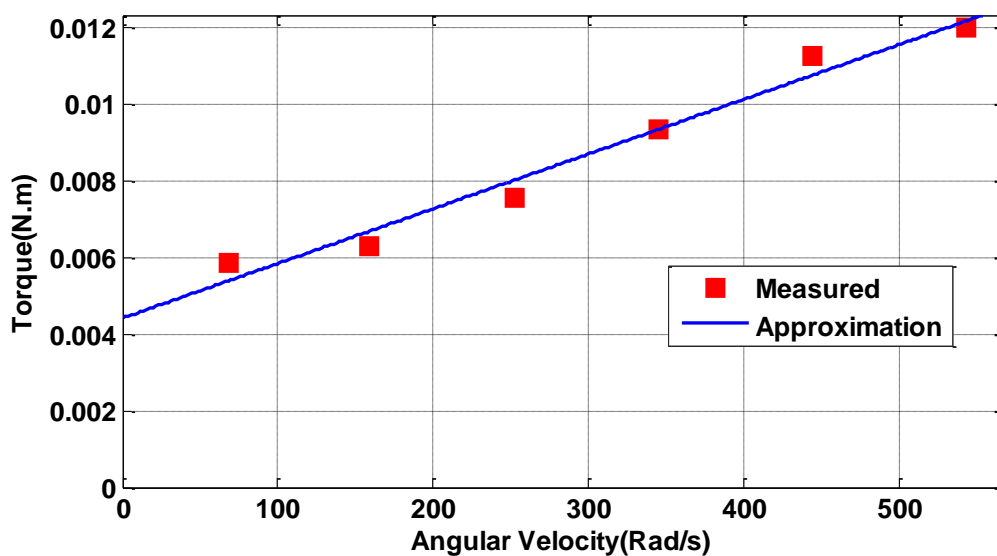
$$T_{pl} = -0.2363 \text{ N.m}$$

(۵۳-۲)

-تغییرات در آزمایش ۵- اصطکاک ویسکوز

جدول ۳۲- جدول اطلاعات مربوط برای به دست آوردن ضریب اصطکاک ویسکوز

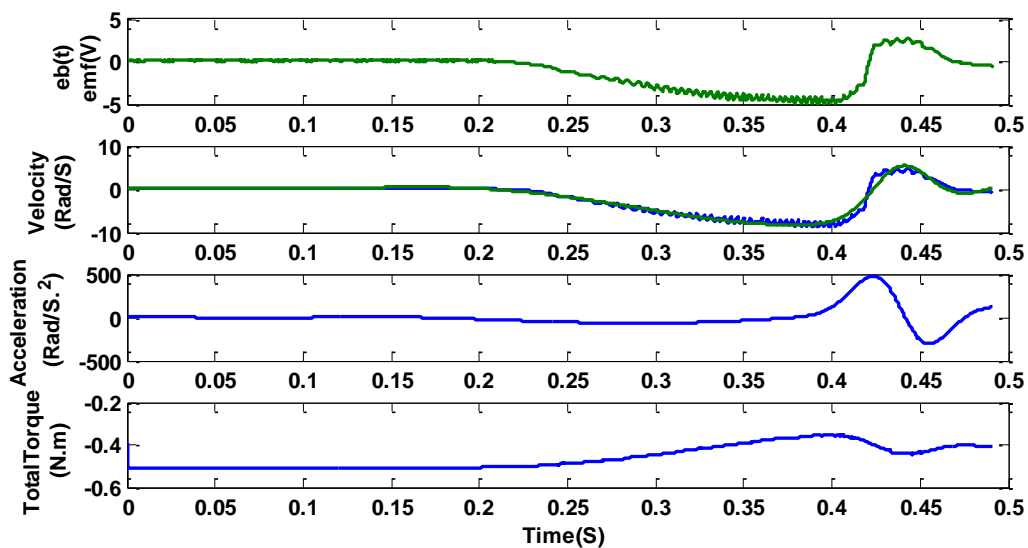
Step input Voltage (V)	FFT Frequency $f(Hz)$	Angular Velocity $\omega_m(rad/sec)$	Average measured current $i_a(A)$	Motor Torque $T_m(N.m)$
۲,۱۷۳	۸۷,۰۲	۶۸,۳۴۵۳	۰,۵۲۲۷	۰,۰۰۵۸۵
۴	۲۰۱,۵	۱۵۸,۲۵۷۷	۰,۵۶۱۸	۰,۰۰۶۲۹۲
۶	۳۲۰,۷	۲۵۱,۸۷۷۲	۰,۶۷۵۳	۰,۰۰۷۵۶۳
۸	۴۳۸,۷	۳۴۴,۵۵۴۲	۰,۸۳۴۳	۰,۰۰۹۳۴۴
۱۰	۵۶۵,۱	۴۴۳,۸۲۸۵	۱,۰۰۳۷	۰,۰۱۱۲۴۱
۱۲	۶۹۱,۴	۵۴۳,۰۲۴۳	۱,۰۷۱۹	۰,۰۱۲



شکل ۲-۶۴ برازش داده ها برای نمودار گشتاور بر حسب سرعت زاویه زاویه ای صفحه فلزی-اصلاح شده

$$B_m = 1.427 * 10^{-5}, B_{eq} = N^2 B_m = 0.0073 \text{ N.m.sec/rad}$$

تغییر در آزمایش ۶



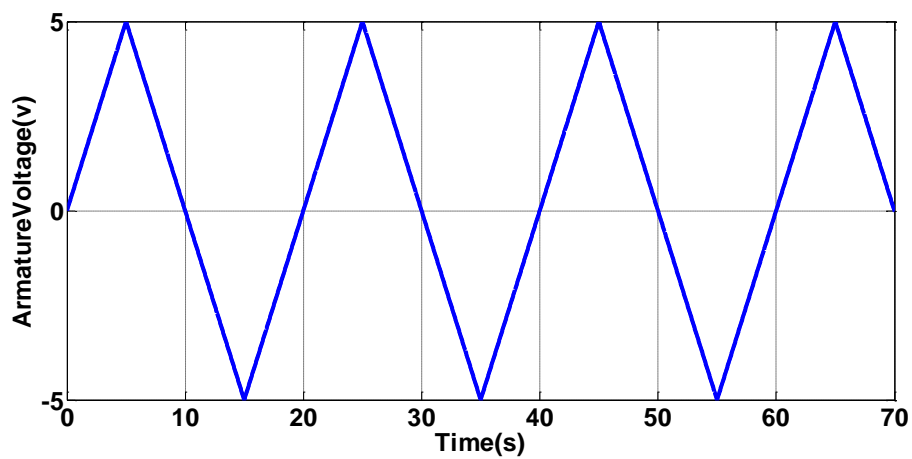
شکل ۶۵-۲ منحنی‌های گشتاور بار، شتاب زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای صفحه فلزی و ولتاژ القایی بر حسب زمان برای به دست آوردن ممان اینرسی

با روند محاسباتی مانند قبل به  $0.0012$  رسیدیم.

حال که تغییرات انجام شد، به اعتبارسنجی مدل می پردازیم.

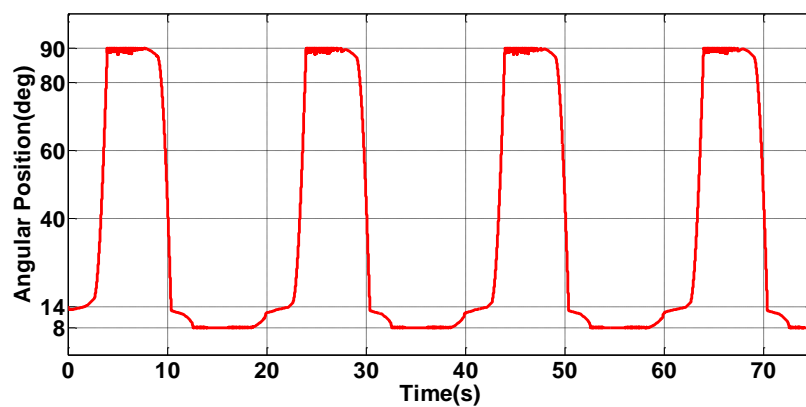
ابتدا برای اینکه یک مقایسه کلی داشته باشیم و پارامترهای شناسایی شده را یک محک عمومی بزنیم، نمودار استاتیک گشتاور-زاویه را بررسی می کنیم.

ورودی:



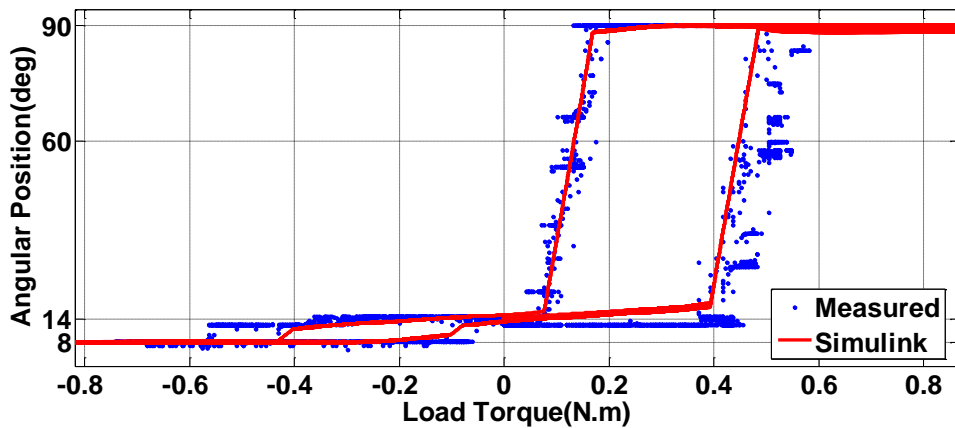
شکل ۲-۶۶ ولتاژ ورودی برای به دست آوردن منحنی استاتیک موقعیت زاویه ای بر حسب گشتاور بار

خروجی:



شکل ۲-۶۷ موقعیت زاویه ای صفحه فلزی ناشی از ورودی شکل ۲-۶۶

با پارامترهای به دست آمده داریم:



شکل ۶۸-۲ منحنی استاتیکی موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی بر حسب گشتاور بار - اصلاح شده

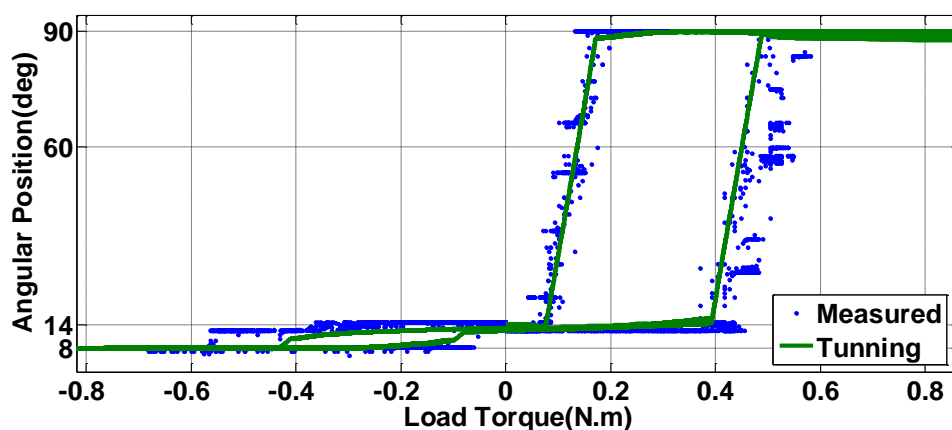
از شکل ۶۸-۲ برمی‌آید که گشتاور اصطکاک سکون، گشتاور اولیه فنر و ثابت فنر به درستی

شناسایی شده‌اند.

بر اساس ناحیه مرده ی شکل ۶۸-۲ از گشتاور ۰ تا ۰,۴ نیوتن-متر معلوم می‌شود که زاویه

لیمپ هوم و ناحیه لیمپ هوم را به درستی تشخیص نداده‌ایم و به اصلاح آن می‌پردازیم:

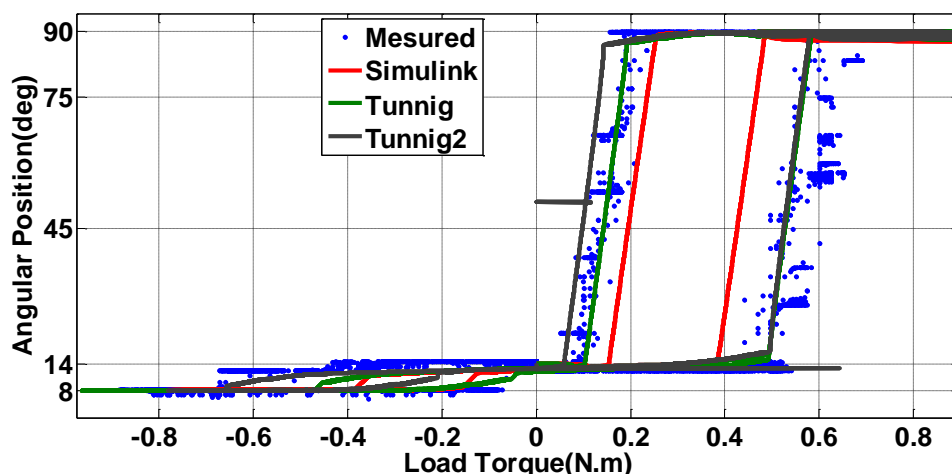
اگر  $\Delta\theta_{LH} = 1 \text{ deg}$  ,  $\theta_{LH} = 13 \text{ deg}$  در نظر گرفته شوند داریم:



شکل ۶۹-۲ منحنی استاتیک موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی بر حسب گشتاور بار- اصلاح شده ۲

می‌بینیم که ناحیه مرده نسبت به شکل ۶۱-۲ خیلی بهتر شده است.

با بررسی پاسخ‌های پله در ناحیه‌های مختلف کاری به این نتیجه رسیدیم که ثابت گشتاور نیاز به تنظیم دارد، و مقدار جدیدش  $0,0133$  خواهد بود، با مقدار جدید نمودار استاتیک نیاز به تنظیم مجدد دارد:



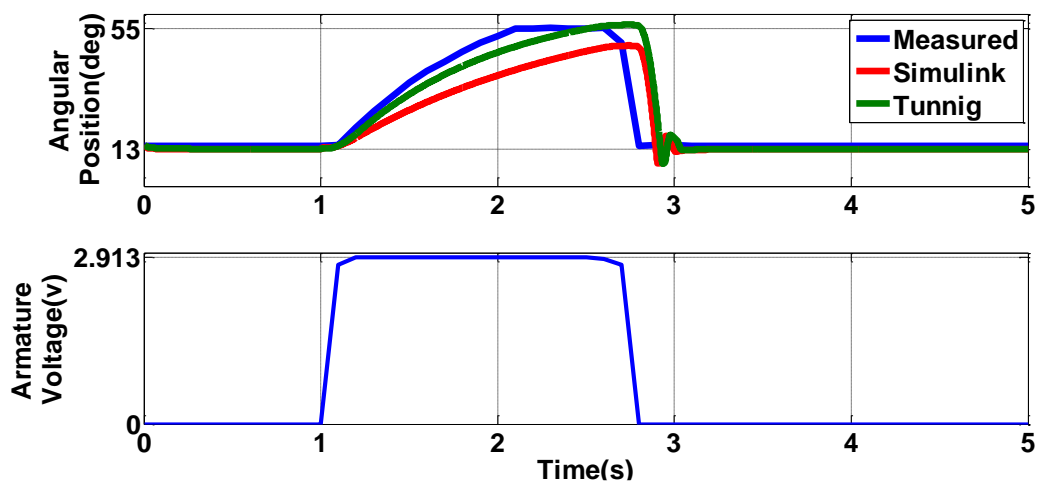
شکل ۷۰-۲ منحنی استاتیک موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی بر حسب گشتاور بار- اصلاح شده ۳

پارامترهای تنظیم شده: گشتاور اصطکاک سکون از  $0,157$  به  $0,22$  و گشتاور اولیه فنر از  $0,2333$  به  $0,27$  افزایش یافت.

در تنظیم پارامترها از بخش بهینه‌سازی شبیه‌سازی متلب استفاده کرده‌ایم و الگوریتم بهینه‌سازی هم سیمپلکس بوده‌است.

حال به بررسی پاسخ با ورودی‌های مختلف می‌کنیم:

۱- زاویه میانی - ناحیه بالای لیپ هوم

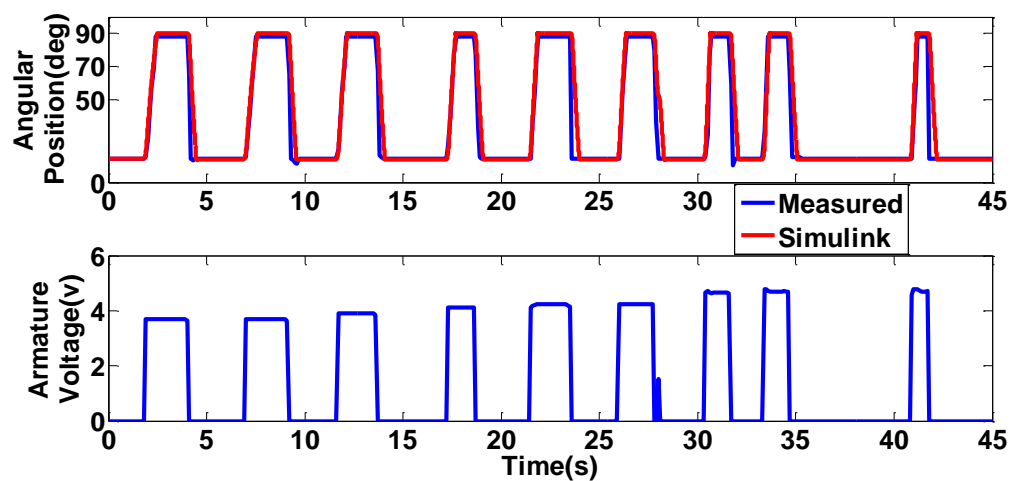


شکل ۲-۷۱ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله

۲- حداکثر زاویه-ناحیه بالای لیپ هوم:

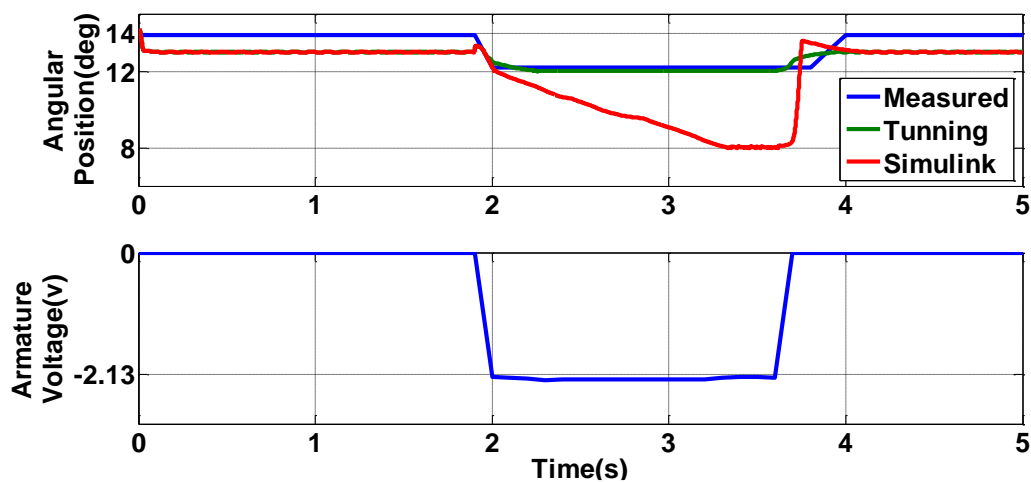
بعد از اینکه پارامترها را برای زاویه میانی تنظیم کردیم، حال از پارامترهای تنظیم شده برای

این مرحله استفاده می‌کنیم:



شکل ۷۲-۲ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله

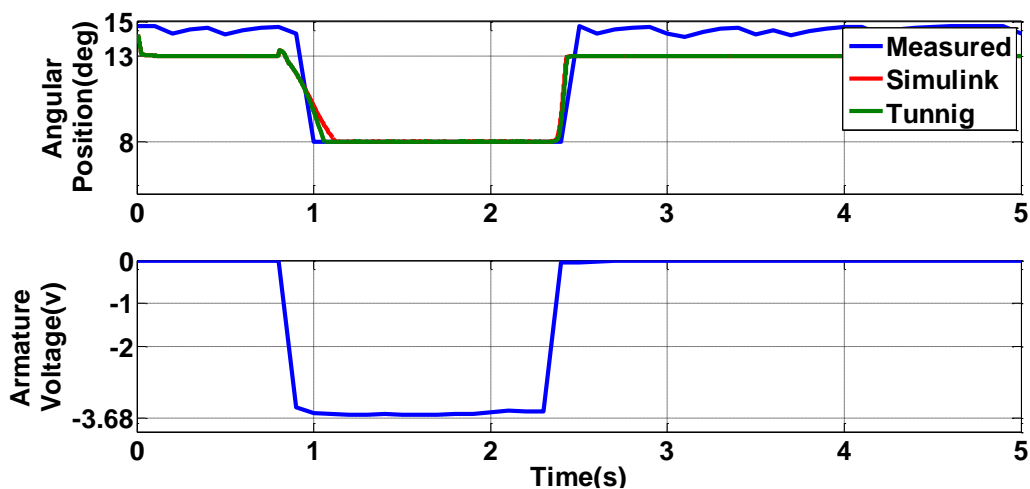
۳- زاویه میانی - ناحیه پایین لیمپ هوم :



شکل ۷۳-۲ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله



۴- حداقل زاویه- ناحیه پایین لیمپ هوم:



شکل ۲-۷۴ اعتبار سنجی مدل براساس پاسخ پله

بر اساس شکل‌های به دست آمده برای اعتبار سنجی مدل نتیجه می‌گیریم که پارامترها به خوبی

تنظیم شده اند، مقادیر پارامترها قبل و بعد از تنظیم در جدول ۲-۴ آورده شده‌اند:

جدول ۲-۴- مقادیر پارامترها قبل و بعد از تنظیم

پارامتر	قبل از تنظیم	بعد از تنظیم
اثر مقاومتی آرمیچر (اهم)	۱,۵۴۴	۱,۵۷
اثر سلفی آرمیچر (هانری)	۰,۰۰۱۴	۰,۰۰۱۴
نسبت چرخ دنده (بدون واحد)	۲۲,۵۶	۲۲,۵۶
ثابت گشتاور موتور (نیوتن.متر/آمپر)	۰,۰۱۱۲	۰,۰۱۳۳
ثابت ولتاژ القایی (ولت.ثانیه/رادیان)	۰,۰۲۵۲	۰,۰۱۶۵
ممان اینرسی (کیلوگرم.مترمربع)	۰,۰۰۱۲	۰,۰۰۱۲
گشتاور اصطکاک سکون (نیوتن.متر)	۰,۱۵۷	۰,۲۲
گشتاور اصطکاک کولومب (نیوتن.متر)	۰,۰۸	۰,۰۴۷۲
ثابت اصطکاک ویسکوز (نیوتن.متر.ثانیه/رادیان)	۰,۰۰۷۳	۰,۰۰۷۳
سرعت استریک (رادیان/ثانیه)	۱۵	۱۲,۸۹۷۵
گشتاور اولیه فنر در باز شدن: بالای ناحیه لیمپ هوم (نیوتن.متر)	۰,۲۳۳	۰,۲۷
گشتاور اولیه فنر در بسته شدن: پایین ناحیه لیمپ هوم (نیوتن.متر)	-۰,۲۳۶۳	-۰,۴۳
ثابت فنر بالای ناحیه لیمپ هوم	۰,۰۷۴۹	۰,۰۷۴۹
ثابت فنر پایین ناحیه لیمپ هوم	۰,۵۶۳۴	۰,۱



## فصل سوم کنترل در یچه گاز الکترونیکی

## ۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به بیان مسئله و سپس به روش‌های حل مسئله خواهیم پرداخت.

کنترل دریچه گاز الکترونیکی یک مسئله ردیابی در کنترل سیستم‌های غیرخطی محسوب می‌شود.

## ۳-۲ بررسی سیستم از دید کنترل و خواسته‌های کنترل از سیستم

### ۳-۲-۱ خواسته‌های کنترلی :

در زیر خواسته‌های کنترلی‌ای که از سیستم کنترل دریچه‌گاز الکترونیکی انتظار می‌رود بیان شده‌اند :

۱- خطای تنظیم موقعیت، در شرایط استاتیک و ماندگار، باید کمتر از ۰,۱ درجه باشد [۳۷, ۱۶] [۴]

۲- خطای ردگیری موقعیت، در شرایط دینامیک و گذرا، باید کمتر از ۷ درجه باشد [۳۷, ۴].

۳- با مقدار منبع ولتاژ بیشتر از ۹ ولت تا ۱۲ ولت، زمان باز شدن کامل صفحه‌فلزی از ۸ تا ۹۰ درجه باید کمتر از ۱۳۰ میلی‌ثانیه باشد [۳۷]. زمان نشست<sup>۱</sup> پاسخ پله برای سیستم کنترل موقعیت برای تمام نقاط کاری و برای هر تغییر در پله ی مرجع باید کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه باشد - این امر با میرایی ۰,۹ و فرکانس طبیعی بزرگتر از ۷۲، رادیان بر ثانیه، امکان‌پذیر خواهد شد [۳۸].

۴- در پاسخ پله‌ی سیستم نباید هیچ فراجهشی وجود داشته باشد، این شرط برای حالت کاری سیگنال بزرگ که ممکن است صفحه‌فلزی به موانع مکانیکی برخورد کند مهم است، با میرایی ۰,۹ صفحه‌فلزی

---

<sup>۱</sup> حداقل زمانی که موقعیت صفحه‌فلزی به محدوده‌ی ۵ درصدی حالت دائمی خود می‌رسد.

به موانع برخورد نخواهد کرد و در نتیجه استهلاک ناشی از تماس شفت با موانع به حداقل می‌رسد [۱۶]. هم‌چنین می‌توان با تعریف ورودی‌های مرجع کمتر از ۹۰ درجه و بیشتر از ۸ درجه از عدم برخورد صفحه‌فلزی با موانع مطمئن‌تر شد. هم‌چنین با این کار از افزایش ناگهانی و بیش از حد جریان آرمیچر که باعث آسیب زدن به بدنه دریچه‌گاز خواهد شد، جلوگیری کرده‌ایم [۳۹]. برخورد با موانع بالا و پایین، افزایش سریع جریان موتور را ایجاد می‌کند [۴۰]. راهکار دیگری هم وجود دارد: برای جلوگیری از آسیب دیدن قطعات مکانیکی و بدنه دریچه‌گاز می‌توان مقدار موقعیت زاویه‌ای صفحه‌فلزی را مانیتور کرد و هر جا که زاویه بیشتر از ۹۵ یا کمتر از ۰ درجه می‌شود، فرمان کنترلی صفر شود و صفحه‌فلزی به ناحیه لیمپ هوم برود تا از آسیب رساندن به قطعات جلوگیری شود [۳۶].

۵- سادگی استراتژی کنترل تا در میکروکنترل‌کننده‌های ارزان‌قیمت خودرو قابلیت پیاده‌سازی و کالیبره شدن داشته‌باشند [۱۶].

۶- مقاوم بودن سیستم کنترلی در مقابل تغییرات پارامتر سیستم هم ضروری است، چون بر اثر خطاهای تولید قطعه، شرایط بیرونی-دما و رطوبت-، و استهلاک و کهنگی سیستم، پارامترهای سیستم تغییر خواهند کرد [۱۶].

خواسته‌ها و کاربردهای مختلف از قبیل شتاب‌گیری، کاهش سرعت، درجا کار کردن موتور<sup>۱</sup> -دور آرام- و وسیله‌های کمکی، مانند کمپرسور AC و تغییر بار متناوب، یا شاید دینام، که به عنوان مورد نیازهای گشتاوری تفسیر شده‌اند تو سط ECU تبدیل به زاویه‌های مطلوبی-مرجعی- می‌شوند که دریچه‌گاز باید دنبال کند، و در مرحله بعد، این زاویه‌های مطلوب برای ارائه قابلیت‌رانندگی مناسب، به صورت گزینشی فیلتر می‌شوند. برای مثال اینکه زاویه مطلوب به صورت پله و خیلی سریع از مقداری به مقدار دیگر پرش کند برای قابلیت رانندگی اصلا مناسب نیست [۴۰] و باعث تکان‌های همیشگی در رانندگی

---

<sup>۱</sup> Idle

می‌شود به همین علت زاویه‌های مطلوب از فیلتری-مدل مرجع- عبور داده می‌شوند تا مثلاً این تکان‌های نامناسب و اتفاقات بد دیگر را شاهد نباشیم.

در روش‌های کنترل خطی با استفاده از حوزه‌های زمان و فرکانس<sup>۱</sup>، فرمان کنترلی را طوری طراحی می‌کنیم تا به خواسته‌های کنترلی مانند: مقدار فراجهدش، زمان نشست، میرایی و ... برسیم، پس هر خواسته فرمولی داریم که به طور ریاضی می‌توان به معادلات طراحی اضافه کرد و به خواسته‌ها دست یافت. برخلاف روش‌های کنترل خطی، در روش‌های کنترل غیرخطی برای خواسته‌هایمان فرمولی نداریم، و تنها هدفمان طراحی قانون کنترلی است که خطا و دینامیک‌های مربوط به آن را حداقل کند. برای این منظور که به خواسته‌هایمان برسیم نیاز به مدل مرجع و ورودی مرجع داریم، وقتی ورودی مرجع را از مدل مرجع عبور می‌دهیم، سیگنالی ساخته می‌شود که تمام خواسته‌های کنترلی در آن لحاظ شده است-سیگنال مطلوب-، در نتیجه وقتی قانون کنترل را طوری طراحی کنیم که خطا به صفر میل کند، به این معناست که خروجی به سمت سیگنال مطلوب میل کرده است و خواسته‌های کنترلی‌مان برآورده خواهد شد.

### ۲-۲-۳ بررسی خواص سیستمی که قرار است کنترل شود:

به طور خلاصه عوامل غیرخطی زیر در دینامیک سیستم تاثیر گذارند:

۱-۱- صطکاک ۲- گشتاور آئرو دینامیک ۳- گشتاور بازگرداننده تکه‌ای خطی فنرها: از آنجایی که ضریب سختی-سفتی- فنر پیش فرض همیشه از ضریب سختی فنر بازگشتی بزرگتر است، گشتاور کشسان منتهجه به صورت تابع تکه‌ای خطی از زاویه مجاز، به خاطر وجود متوقف کننده‌های مکانیکی، مدل می‌شود. ۴- ضربه‌ها به موانع ۵- لقی

<sup>۱</sup> مکان ریشه، بود، نایکویست، نیکولز و ..

کنترل در تمام ناحیه‌های دریچه‌گاز نیاز است:

۱- ناحیه زیر لیمپ هوم برای کنترل زاویه آیدل<sup>۱</sup>، برای مثال درجا کارکردن خودرو، ضروری است.

۲- ناحیه بالای لیمپ هوم که در حالت حرکت خودرو نیاز به کنترل آن داریم.

از نظر سیگنال مرجع دو حالت کاری داریم :

۱- حالت کاری سیگنال بزرگ : تغییرات زاویه در سیگنال مرجع بیشتر از ۵ درجه.

۲- حالت کاری سیگنال کوچک : تغییرات زاویه در سیگنال مرجع بیشتر از ۰,۳ درجه [۱۶]

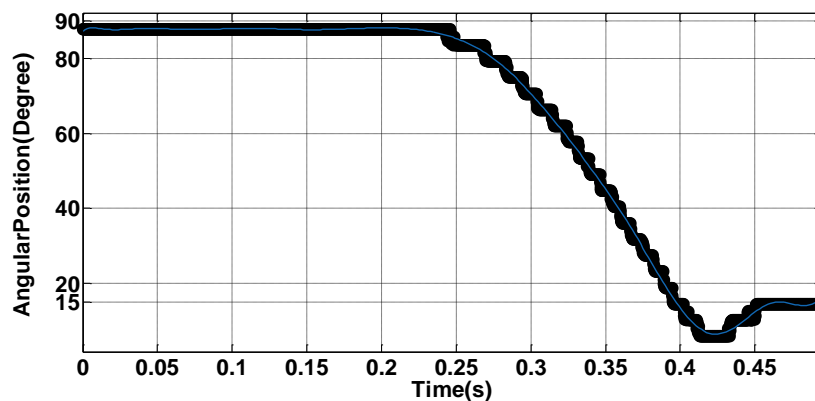
نقاط تعادل سیستم : در حالت بدون ورودی و با شرایط اولیه، چون سیستم غیرخطی است، پاسخ سیستم بستگی به مقدار شرایط اولیه دارد. برای شرایط اولیه پایین ناحیه لیمپ هوم بین ۸ تا ۱۲,۳ درجه نقطه تعادل عددی بین ۱۳,۴۱ تا ۱۴,۸۴ درجه و برای شرایط اولیه بالای ناحیه لیمپ هوم بین ۱۶,۵ تا ۹۰ درجه نقطه تعادل عددی بین ۱۲,۳۹ تا ۱۶,۴۷ می‌باشد، لازم به ذکر است که برای به دست آوردن نقطه تعادل از معادلات حالت سیستم نیاز به مدلسازی دقیق ناحیه لیمپ هوم می‌باشد که از حوصله این تحقیق خارج است و در اینجا برای به دست آوردن نقطه تعادل از داده های حسگر استفاده شده است.

می‌توان اینطور تحلیل کرد که به خاطر وجود ناحیه لیمپ هوم ، سیستم دارای نقاط تعادل چندگانه هست که همگی در همسایگی هم -بیشترین اختلاف بین نقاط تعادل ۴ درجه می‌باشد- و در

---

<sup>۱</sup> Idle Control

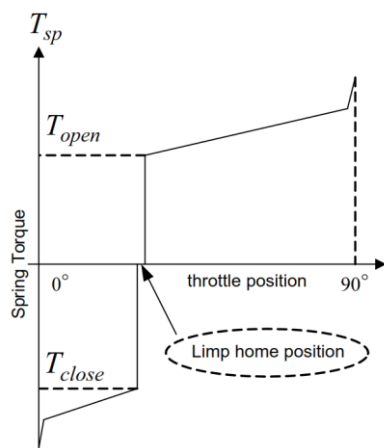
ناحیه لیمپ هوم که از ۱۲,۳ تا ۱۶,۴۸ درجه می‌باشد قرار دارند. این نقاط تعادل پایدار هستند چون وقتی صفحه‌فلزی دریچه را با مقداری گشتاور از ناحیه لیمپ هوم خارج می‌کنیم دوباره صفحه‌فلزی دریچه به ناحیه لیمپ هوم باز می‌گردد ولی ممکن است به آن نقطه تعادل اولیه برنگردد بلکه به نقطه تعادل دیگری در همسایگی نقطه تعادل اولیه برگردد. در شکل ۱-۳ صفحه‌فلزی را با گشتاور تولیدی توسط دستمان به حالت کاملاً باز برده و سپس رها کرده‌ایم، که به نقطه تعادلش بازگشته‌است.



شکل ۱-۳ بردن صفحه‌فلزی به حداکثر زاویه ممکن با گشتاور تولید شده توسط دست و سپس رها کردن آن

عامل تعیین کننده در نقاط تعادل فنرها هستند که وقتی گشتاور خارجی وجود نداشته‌باشد، صفحه‌فلزی را به ناحیه لیمپ هوم برمی‌گردانند، ولی وقتی که صفحه‌فلزی در ناحیه لیمپ هوم قرار می‌گیرد، همان‌طور که از شکل ۲-۳ پیداست در ناحیه کوچکی از لیمپ هوم گشتاور فنی وجود ندارد تا بتوانیم نقطه تعادل دقیق را از روی معادله فنر به دست آوریم.





شکل ۳-۲ مشخصه فنرها در ناحیه لیمپ هوم

### ۳-۳ مدل معکوس - کنترل پیش خور (کنترل معکوس مستقیم)

ساده ترین روشی که برای کنترل یک سیستم به ذهن می رسد این است که معکوس سیستم اصلی ای که قرار است کنترل شود را به عنوان کنترل کننده قبل از سیستم قرار دهیم، با این کار ورودی مرجع ای که قرار است دنبال شود را در خروجی سیستم خواهیم داشت. به طور کلی نگاشتی واحد بین ورودی-خروجی در سیستم ترکیبی ایجاد خواهد شد.

معایب :

- ۱- چون همیشه دینامیک های مدل نشده وجود دارند پس هیچ وقت نمی توان معکوس یک سیستم را به طور کامل به دست آورد.
- ۲- وجود اغتشاش باعث حساسیت در ورودی می شود.
- ۳- سیستم حتما باید پایدار باشد تا بتوان این روش را پیاده کرد، چون در سیستم معکوس قطب های سمت راست تبدیل به صفرهای سمت راست شده، و در نتیجه به خاطر استهلاک سیستم، هیچ وقت قطب و صفر روی همدیگر نمی افتند تا با هم خنثی شوند و در نتیجه

سیستم کلی ناشی از حاصلضرب دو سیستم ناپایدار - ناپایداری داخلی<sup>۱</sup> - می‌شود.

۴- سیستم حتما باید حداقل فاز با شدت تا بتوان این روش را پیاده کرد، چون صفرهای سمت راست در سیستم موجب قطب‌های سمت راست در سیستم معکوس می‌شوند و به همین دلیل شبکه نمی‌تواند آموزش ببیند.

۵- سیستم باید علی باشد.

۶- در این روش معیار بهینگی کمینه کردن خطای بین ورودی سیستم اصلی و خروجی کنترل کننده می‌باشد، در نتیجه در سیستم‌های غیرخطی این کار حتما به معنی بهینه کردن خروجی سیستم اصلی نمی‌باشد.

مزیت: سادگی - زیرا مانند روش کنترل تخصصی نیازی به طراحی شناسایی جدا و کنترل جدا نمی‌باشد، بلکه یک بلوک کار هر دو را انجام می‌دهد و در آن واحد با یک بلوک هم شناسایی معکوس و هم کنترل انجام می‌شوند. در این روش شبکه در یک مرحله زمانی آموزش می‌بیند و در همان مرحله زمانی هم خروجی کنترل کننده را به سیستم اعمال می‌کنیم. البته در روش مورد استفاده توسط ما شبکه به صورت برون خط<sup>۲</sup> آموزش می‌بیند و سپس از آن در مسیر پیش‌خور استفاده خواهیم کرد. با وجود معایبی که وجود دارد، ولی به خاطر سادگی روش از ترکیب این روش و روشی پس‌خوری استفاده خواهد شد.

این روش در کاربردهای رباتیک رایج است. ضعف مقاوم بودن بر اثر نبودن پس‌خور وجود دارد [۴۱]، در این جا این عیب با استفاده از روش کنترل ولتاژ در مسیر پس‌خور جبران می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Internal Instability

<sup>۲</sup> Off Line

### آماده سازی سیستم برای اجرای کنترل معکوس ۱-۳-۳

با استفاده از مدل سازی فصل دوم، معادلات حالت سیستم را به دست می آوریم:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_L &= \omega_L \\ \dot{\omega}_L &= -\frac{1}{J_{eq}} (B_{eq} \cdot \omega_L + T_f(\omega_L) + T_{sp}(\theta_L) - k_t \cdot i_a) \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\dot{i}_a = -\frac{1}{L_a} (k_b \omega + R i_a - u)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega_L \\ \dot{\omega} &= a_{\gamma 1}(\Delta\theta) + a_{\gamma 2} \omega_L + a_{\gamma 3} i_a - k \operatorname{sign}(\omega_L) \\ &\quad - \mu \operatorname{sign}(\Delta\theta) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$\dot{i}_a = a_{\gamma 2} \omega_L + a_{\gamma 3} i_a + b_{\gamma} u$$

که:

$$a_{\gamma 2} = -\frac{k_b}{L_a} a_{\gamma 3} = \frac{k_t}{J_{eq}} a_{\gamma 2} = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}} a_{\gamma 1} = -\frac{k_{s1}}{J_{eq}} \cdot \Delta\theta = \theta - \theta_{LH}$$

$$\mu = \frac{T_{pl}}{J_{eq}} \text{ و } k = \frac{T_c}{J_{eq}} \cdot b_{\gamma} = \frac{1}{L_a} a_{\gamma 3} = -\frac{R}{L_a}$$

اکنون اگر:  $\theta = y, \dot{y} = \omega_L$  و با استفاده از تقریب تابع علامت با تابع  $\arctan$  [۴۲]:

$$\operatorname{sign}(x) \cong \frac{2}{\pi} \arctan(kx) \quad (3-3)$$

$k$  ثابت مثبت به اندازه کافی بزرگ است که در شرط زیر صدق می کند:

$$k \geq \frac{1}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi(1-\varepsilon)}{2}\right) \quad (4-3)$$

$\gamma$ : پهنای باند باریک برای اینکه:  $|x| \geq \gamma > 0$  و  $\varepsilon$  خطای مطلوب برای تقریب است.

معادله (۳-۲) به شکل زیر در می آید:

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & (a_{12}a_{21} + a_{23}a_{32} - a_{33}a_{22})\dot{y} - a_{33}a_{12}a_{21}(y - y_0) \\ & + (a_{22} + a_{33})\dot{y} + a_{33}a_{12}k \operatorname{sign}(\dot{y}) \\ & + a_{33}a_{12}\mu \operatorname{sign}(y - y_0) - a_{12}k S_d(\dot{y}, \ddot{y}) \\ & - a_{12}\mu S_d(y - y_0, \dot{y}) + a_{12}a_{33}b_r u \end{aligned} \quad (5-3)$$

که  $S_d(\cdot)$  به این صورت تعریف می شود:

$$S_d(x, \dot{x}) = \frac{d}{dt} \operatorname{sign}(x) \quad (6-3)$$

در ادامه با استفاده از روش تقریب های مشتق مرتبه  $n$  که بدین قرارند:

$$\dot{y} = \frac{y(k+1) - y(k)}{T}, \quad \dot{u} = \frac{u(k+1) - u(k)}{T}, \quad (7-3)$$

$$\ddot{y} = \frac{y(k+1) - 2y(k) + y(k-1))}{T^2},$$

$$\ddot{y} = \frac{y(k+1) - 3y(k) + 3y(k-1) - y(k-2))}{T^3}$$

(که  $T$  دوره تناوب نمونه برداری است).

و جایگذاری آن ها در معادله (۳-۵) به سیستم گسسته زیر خواهیم رسید:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2), y(k-3)) + bu(k) \quad (8-3)$$

که  $u(k)$  ورودی کنترل و  $y(k)$  خروجی سیستم در مرحله زمانی  $k$  می باشند.

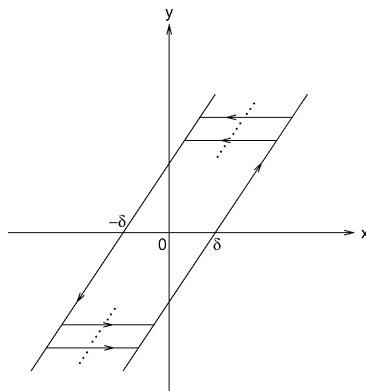
حال اثر لقی را به مدل اضافه می کنیم:

لقی چرخ دنده ها: دریچه گاز دارای سه چرخ دنده است که گشتاور را از سر موتور  $DC$  به محور

صفحه ی فلزی انتقال می دهند. بنابراین لقی های موجود بین چرخ دنده ها باعث به وجود آمدن ناحیه ای غیر خطی در مدل دریچه گاز می شود، ساده ترین راه برای مدل سازی این عامل غیر خطی، استفاده از تابع غیر خطی لقی بر حسب گشتاور ورودی است که به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$y = f_{bl}(x, \delta) \quad (9-3)$$

که در آن  $y$  و  $x$  به ترتیب گشتاور ورودی و خروجی،  $\delta$  پهناى ناحیه مرده ناشی از لقی است. مشخصه ی غیر خطی لقی چرخ دنده ها به صورت شکل ۳-۳ در نظر گرفته می شود که در آن دو تابع لقی روی هم افتاده اند و این کار به دلیل در نظر گرفتن اثر دو لقی ایجاد شده بر اثر دو جفت چرخ دنده است.



شکل ۳-۳ مشخصه لقی چرخ دنده ها

همانطور که در مقاله [۴۲] ذکر شده است لقی می تواند به عنوان یک رابطه غیر خطی بین  $u(k)$  و  $u(k-1)$  لحاظ شود و هم چنین با معادله ۳ که لقی به عنوان تابعی از خروجی محرک است، بیان شده است (دلالت بر این می کند که لقی نوعی اغتشاش خارجی است)، بدون از دست دادن عمومیت مدل سیستم که شامل رفتار غیر خطی لقی نیز هست، بوسیله این معادله معلوم می شود:

$$y(k) = F(y(k-1), y(k-2), y(k-3), u(k), u(k-1)) + v \quad (10-3)$$

که  $\nu$  به عنوان اغتشاش های خارجی مدل شده است و  $F(\cdot)$  هم یک نگاشت غیرخطی نامعلوم لحاظ شده است. پس از دید ورودی-خروجی با سیستم بالا روبرو هستیم و می توان ورودی را هم تابعی از  $(u(k-1), y(k-3), y(k-2), y(k-1), y(k))$  در نظر گرفت.

### ۲-۳-۳ انتخاب سیگنال تحریک (ورودی)

فرکانس های سیگنال ورودی باید طوری انتخاب شود که تمام مودهای دینامیکی سیستم را تحریک کند و دامنه ورودی هم باید طوری انتخاب شود که سیستم را به تمامی ناحیه های کاری ببرد تا رفتار غیرخطی در بالا و پایین ناحیه لیمپ هوم خودشان را نشان دهند<sup>۱</sup> [۴۰]. اگر نوع سیگنال تحریک خوب و مناسب انتخاب نشود، مدل معکوس، که شبکه عصبی قرار است آموزش ببیند، خیلی به ورودی حساس خواهد شد.

در مورد فرکانس تحریک ابتدا با استفاده از نمودار بد پهنای باند سیستم را به دست می آوریم<sup>۲</sup>، یا با استفاده از اعمال ورودی با فرکانس نزدیک به صفر<sup>۳</sup>، و مقایسه دامنه ها تا جایی که در فرکانسی، دامنه به ۰٫۷ مقدارش در فرکانس نزدیک به صفر برسد این کار را انجام می دهیم. فرکانس تحریک را از ۱، ۴۰ تا ۲۰ هرتز در نظر می گیریم<sup>۴</sup> [۳۸]. در مورد اندازه ورودی هم، اگر اندازه از ۱۲- تا ۱۲+ ولتاژ باتری ماشین، تغییر کند زاویه دریچه گاز از ۸ تا ۹۰ درجه تغییر خواهد کرد پس تمامی ناحیه کاری تحت پوشش قرار خواهد گرفت، البته در بحث شناسایی باید این نکته را در نظر گرفت که سیگنال ورودی باید طوری باشد که صفحه فلزی به دفعات زیاد به متوقف کننده های مکانیکی ابتدا و انتهای کار برخورد نکند، چون برخورد با موانع ایجاد نوسان می کند و در نتیجه ایجاد خطای زیادی در

<sup>۱</sup> زاویه دریچه گاز باید از ۸ تا ۹۰ درجه تغییر کند.

<sup>۲</sup> فرکانسی که ۳- دسی بل کاهش داریم

<sup>۳</sup> مقدار DC

<sup>۴</sup> اثر اصطکاک در فرکانس های پایین

<sup>۵</sup> در تئوری حداقل ۲ برابر پهنای باند در عمل ۴ تا ۵ برابر پهنای باند

بحث شناسایی می‌کند، به همین دلیل ولتاژ را بین ۶- تا ۶+ در نظر می‌گیریم.

### ۳-۳-۳ توابع پایه‌ای شعاعی و شبکه‌های عصبی-فازی

در این بخش به طور مختصر شبکه‌های عصبی و شبکه‌های عصبی تابع پایه شعاعی<sup>۱</sup> را توضیح خواهیم داد.

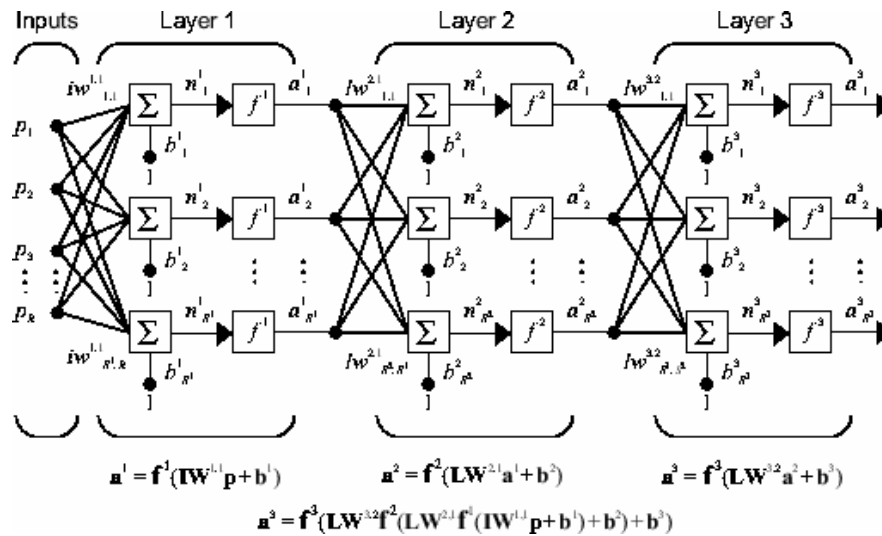
#### ۱-۳-۳-۳ شبکه‌های عصبی

در شکل ۳-۴ شمای کلی از یک شبکه‌عصبی عمومی آورده شده است، همان طور که از شکل پیداست، شبکه‌عصبی یک نگاشت، تبدیل، است که به وسیله چینش و معماری‌ای که در لایه‌ها داریم، از فضای ورودی به فضای خروجی منتقل می‌شویم. در این بین هر لایه برای خود تابع‌های فعال ساز و پارامترهایی دارد. ما برای شبکه‌عصبی بر اساس ۱- مسئله‌ای که قرار است حل شود و ۲- اینکه فضای ورودی ما قابلیت تفکیک‌پذیری خطی دارد یا خیر. معماری و تابع‌های فعال‌سازی پیشنهاد می‌دهیم، سپس در مرحله بعدی برای به دست آوردن پارامترهایی که در شبکه تعریف شده‌اند به آموزش شبکه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف (اعم از کلاسیک: مانند گرادیان نزولی و توسعه یافته‌های گرادیان نزولی<sup>۲</sup> و هوشمند: مانند ژنتیک-زنبور عسل-مورچه و...) می‌پردازیم تا معیار بهینگی که تابع هزینه‌ی تعریف شده است، بهینه شود.

---

<sup>۱</sup> Radial Basis Function

<sup>۲</sup> در اصل باید به صورت شدیدترین نزول بیان شود، ولی چون گرادیان نزولی رایج شده است ما هم از این واژه استفاده خواهیم کرد.



شکل ۳-۴ شبکه عصبی در حالت کلی

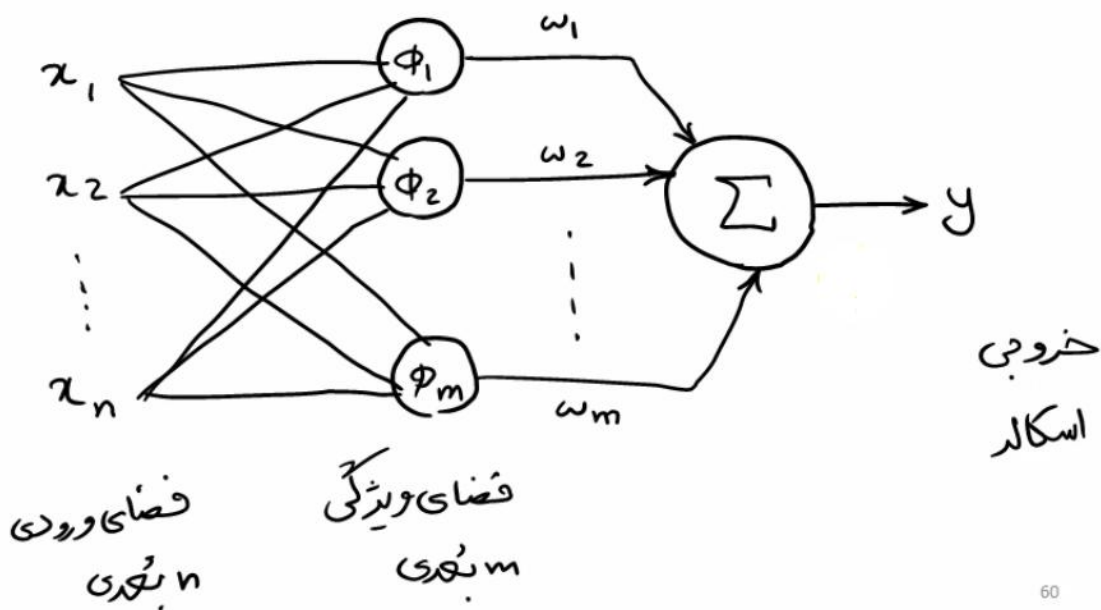
از توضیحاتی که داده شد معلوم می شود شبکه عصبی تنها معماری و چینی برای حل مسئله در اختیار ما می گذارد، ولی اینکه مسئله چه جور حل شود و پارامترها چگونه به دست آیند دیگر به شبکه عصبی مربوط نمی باشد ، بلکه هر روش بهینه سازی ای بنابر شرایط مسئله می تواند برای آموزش و به دست آوردن پارامترهای شبکه عصبی مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۳-۲ شبکه عصبی توابع پایه ای شعاعی

در شکل ۳-۵ معماری این نوع شبکه عصبی آورده شده است، فضای ورودی به وسیله تابع های پایه ای شعاعی به فضای ویژگی، مانند فاصله نقاط از مراکز، برده می شوند و سپس وزن هایی به هر یکی از ویژگی ها داده می شود<sup>۱</sup>، تا معیار بهینگی برای خروجی به دست آید.

<sup>۱</sup> مرحله ی آموزش شبکه





60

شکل ۵-۳ معماری شبکه عصبی RBF

تابع مبتنی بر شعاع، تابعی است که مقدار آن فقط به فاصله ورودی از یک نقطه مرکزی تعریف شده ارتباط دارد، یکی از تابع‌های معروف مبتنی بر شعاع تابع گوسی هست که در این جا هم ما برای طراحی شبکه از این تابع استفاده خواهیم کرد:

$$f(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11-3)$$

که  $r$  فاصله ورودی از مراکز و  $\sigma$  پراکندگی داده‌ها از مراکز می‌باشد.

در حالت کلی برای یک شبکه عصبی از نوع مبتنی بر شعاع، ۴ مسئله را در کنار هم داریم:

۱- انتخاب نوع تابع مبتنی بر شعاع

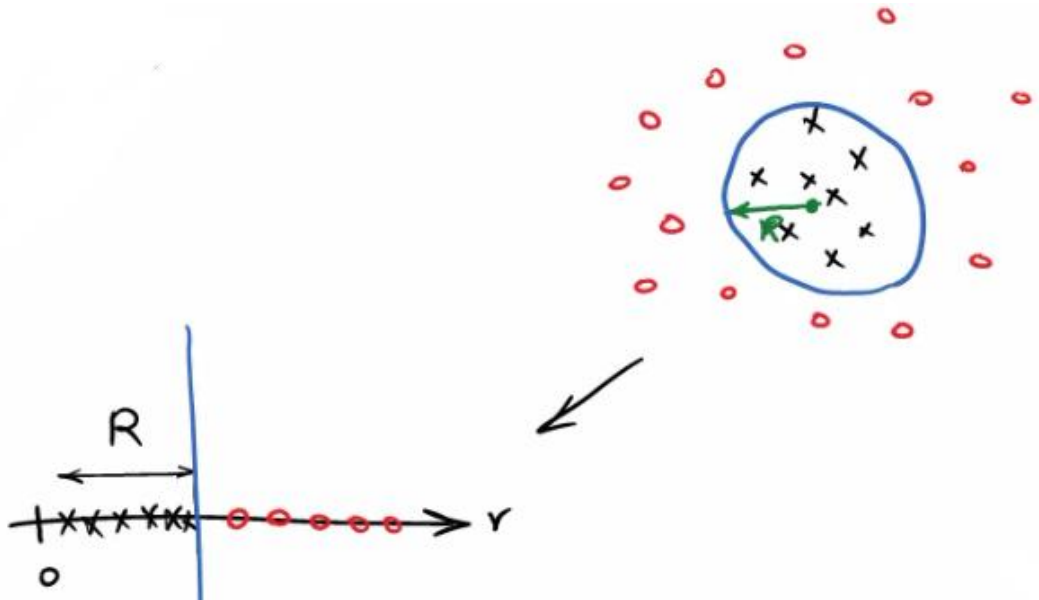
۲- چگونگی انتخاب مراکز لایه مخفی

۳- چگونگی انتخاب پراکندگی

۴- به دست آوردن وزن‌های لایه خروجی

پس با توجه به انتخاب‌های بالا، روش‌های مختلفی برای برخورد و حل مسئله وجود دارند.

همان طور که از شکل ۳-۶ پیدا ست، معمولاً وقتی که نتوان فضای م مسئله ورودی را تفکیک پذیری خطی کرد، سراغ توابع مبتنی بر شعاع می‌رویم تا با استفاده از ویژگی فاصله بتوانیم فضای غیر خطی ورودی را به فضای خطی ویژگی تبدیل کنیم :



شکل ۳-۶ تبدیل فضای ورودی غیرخطی به فضای ویژگی خطی

در ادامه ارتباط بین شبکه عصبی مبتنی بر شعاع و سیستم‌های فازی را با ذکر یک مثال توضیح خواهیم داد :

ابتدا به تعریف مختصر در مورد سیستم‌های فازی می‌پردازیم :

If (شرایط) Then (نتیجه‌ها)

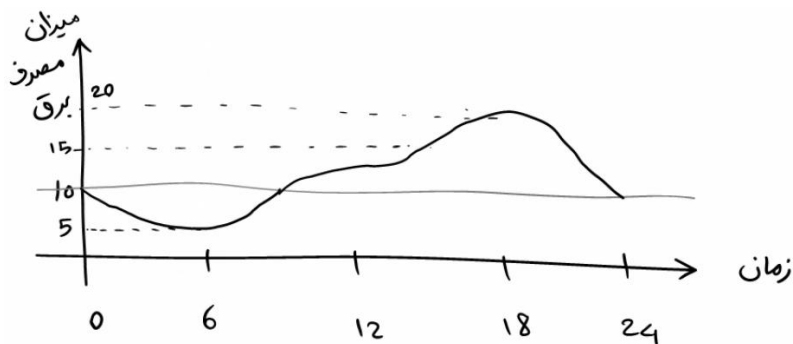
در قسمت شرایط ، شرایط به صورت متغیرهای فازی (زبانی فازی: هوا خیلی سرد است) بیان می‌شوند، ولی در قسمت نتیجه‌ها، نتایج به دو صورت بیان می‌شوند : ۱- اگر به صورت زبانی-فازی باشند، سیستم ممدانی نام گذاری می‌شود و ۲- اگر به صورت رابطه‌ی دقیق ریاضی بیان شوند، سیستم

تا کاگی-سوگنو-کانگ<sup>۱</sup> نامیده می شود.

حال به ارتباط TSK با RBF در قالب یک مثال خواهیم پرداخت:

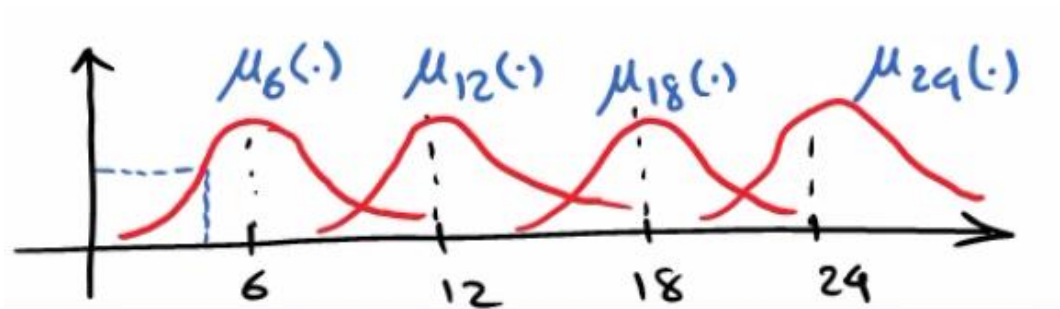
فرض کنید مشخصه مصرف برق در طول یک شبانه روز به صورت شکل ۳-۷ باشد و خواهیم

آن را به صورت فازی توصیف کنیم :



شکل ۳-۷ مشخصه مصرف برق در طول یک شبانه روز

اگر ساعات مصرف را به صورت فازی بیان کنیم، مطابق شکل ۳-۸ خواهیم داشت :



شکل ۳-۸ بیان ساعات های مصرف به صورت مجموعه های فازی-حداکثر مقدار توابع تعلق تعریف شده یک می باشد.

$\mu$  ها توابع تعلق مربوط به هر یک زمان های مصرف می باشد. (مانند توابع مبتنی بر شعاع دارای

پارامترهای مرکز و پراکندگی از مرکز هستیم)

<sup>۱</sup> TSK

حال قوانینِ فازی را طوری می‌نویسیم که سیستم TSK باشد<sup>۱</sup>:

$$\text{If } t \text{ is } \epsilon (\mu_{\epsilon}(t)) \text{ then } E(t) = 5 \quad (12-3)$$

$$\text{If } t \text{ is } 12 (\mu_{12}(t)) \text{ then } E(t) = 13$$

$$\text{If } t \text{ is } 18 (\mu_{18}(t)) \text{ then } E(t) = 20$$

$$\text{If } t \text{ is } 24 (\mu_{24}(t)) \text{ then } E(t) = 10$$

که  $t$  بیانگر زمان مصرف برق به ساعت و  $E$  بیانگر میزان مصرف به کیلووات است.

حال اگر بخواهیم میزان مصرف برق در بازه‌ی ۲۴ ساعته را با سیستم فازی TSK مدل کنیم،

خواهیم داشت:

$$E(t) = \frac{\mu_{\epsilon}(t)E_{\epsilon} + \mu_{12}(t)E_{12} + \mu_{18}(t)E_{18} + \mu_{24}(t)E_{24}}{\mu_{\epsilon}(t) + \mu_{12}(t) + \mu_{18}(t) + \mu_{24}(t)} \quad (13-3)$$

حال اگر توابع تعلق را طوری تعریف کنیم که در همه جا:

$$\mu_{\epsilon}(t) + \mu_{12}(t) + \mu_{18}(t) + \mu_{24}(t) = 1 \quad \text{باشد داریم:}$$

$$E(t) = \mu_{\epsilon}(t)E_{\epsilon} + \mu_{12}(t)E_{12} + \mu_{18}(t)E_{18} + \mu_{24}(t)E_{24} \quad (14-3)$$

که دقیقاً توصیف یک شبکه عصبی مبتنی بر شعاع گوسی می‌باشد: توابع تعلق همان توابع

گوسی شبکه عصبی و عبارات ریاضی دقیق  $E$  ها همان وزن‌های لایه خروجی شبکه  $RBF$  هستند<sup>۲</sup>.

پس متوجه شدیم که شبکه  $RBF$  و سیستم فازی  $TSK$  معادل هم هستند [۴۳].

<sup>۱</sup> یعنی خروجی دارای مقدار دقیق ریاضی باشد و نه مقداری فازی.

<sup>۲</sup> مجموع وزن‌دار یک سری تابع گوسی

### ۴-۳-۳ آموزش شبکه عصبی-فازی RBF

با توضیحاتی که در بخش ۱-۳-۳ در مورد ارتباط بین ورودی-خروجی، و در بخش ۲-۳-۳ برای انتخاب سیگنال تحریک، آورده شده است به آموزش شبکه عصبی RBF با استفاده از نرم‌افزار متلب می‌پردازیم:

دستور مورد استفاده برای آموزش شبکه عصبی به صورت زیر است:

$$net = newrb(P, T, G, S, MN, DF) \quad (۱۵-۳)$$

که P داده های ورودی شبکه هستند:

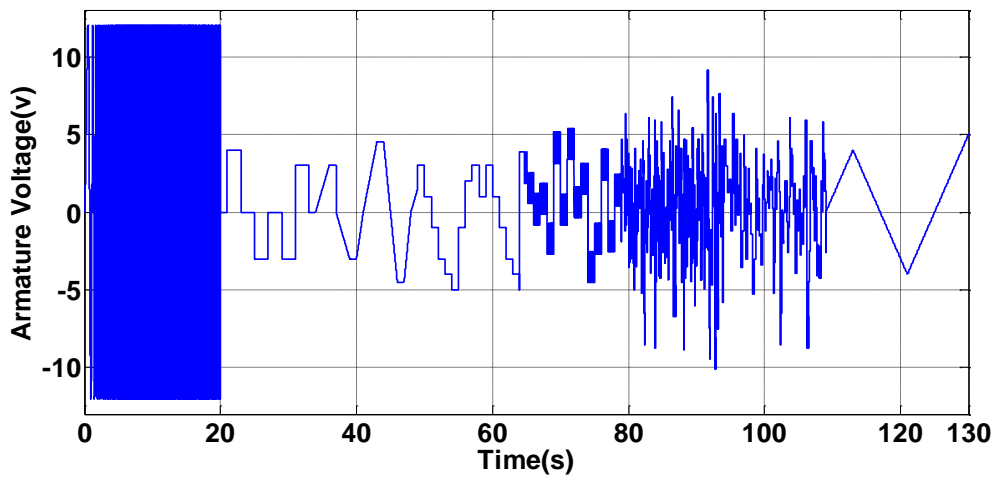
$$y(k), y(k-1), y(k-2), y(k-3), u(k-1)$$

و T تابع هدفی است که خروجی شبکه عصبی باید به آن برسد:

$$u(k)$$

و G میانگین مربعات خطا است که ایده آله صفر است، S پراکندگی تابع گوسی، MN حداکثر تعداد نرونی که قرار است آموزش ببینند و DF بیان کننده این است که معیار عملکرد، هر چند نرون یک بار نمایش داده شود.

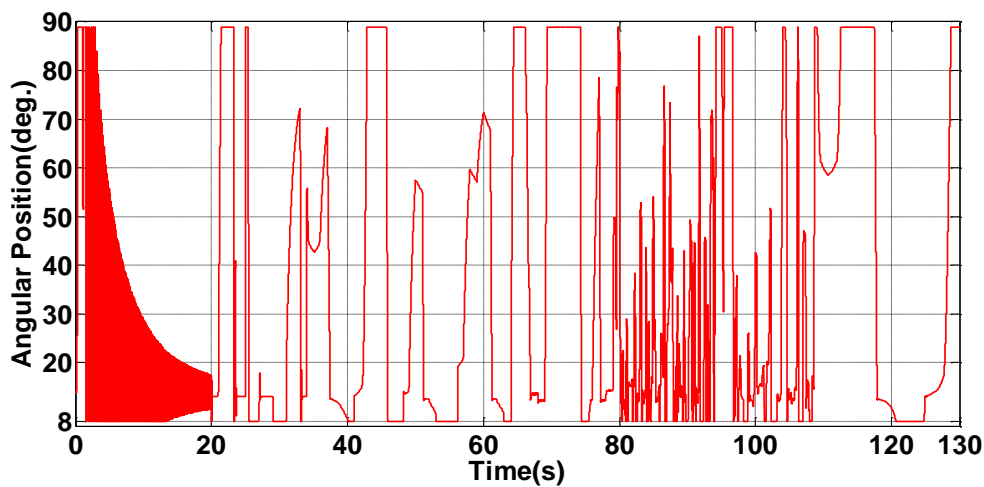
سیگنال تحریک مورد استفاده که شبکه عصبی باید یاد بگیرد در شکل ۳-۹ آورده شده است:



شکل ۹-۳ سیگنال تحریک ورودی که شبکه عصبی باید بر این اساس، معکوس دینامیک سیستم را یاد بگیرد

خروجی سیستم در چرخه گاز هم که با اعمال سیگنال تحریک ایجاد می شود در شکل ۳-۱

آورده شده است:



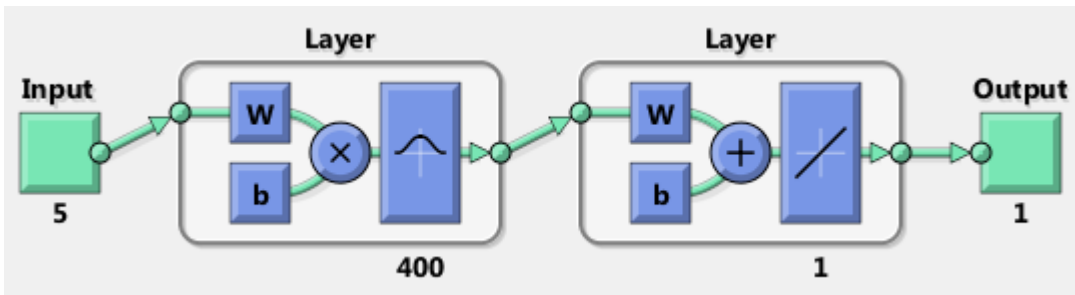
شکل ۱۰-۳ موقعیت زاویه صفحه فلزی ناشی از سیگنال تحریک ورودی

داده های ورودی برای شبکه عصبی با زمان نمونه برداری ۰,۰۱ ثانیه از سیستم شبیه سازی شده در چرخه گاز در نرم افزار متلب برداشته می شوند، با این احتساب چون ۱۳۰ ثانیه زمان برای اکتساب داده وجود دارد پس  $۱۳۰ * ۱۰۰ = ۱۳۰۰۰$  داده برای آموزش شبکه عصبی وجود دارد که هر داده متشکل

از ۵ مقدار  $y(k), y(k - 1), y(k - 2), y(k - 3), u(k - 1)$

به عنوان ورودی شبکه عصبی و یک مقدار  $u(k)$  برای هدف خروجی خواهد بود.

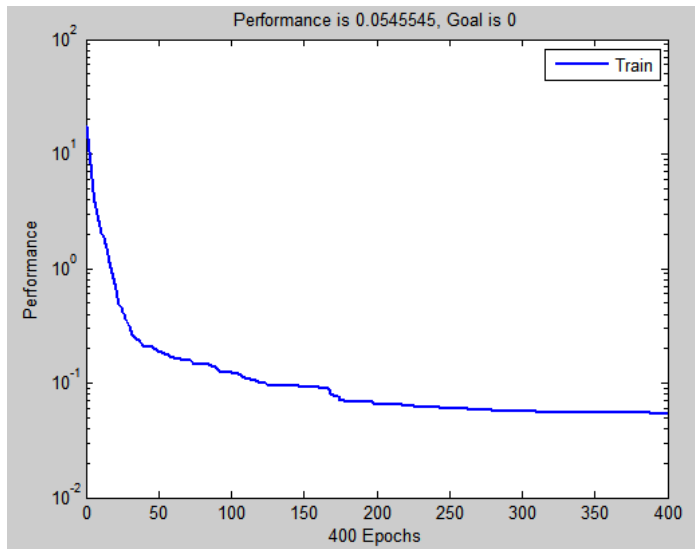
با آموزش شبکه برای تعداد نرون‌های مختلف به این نتیجه رسیدیم که تابع هزینه برای ۴۰۰ نرون (زمان آموزش خارج خط حدوداً: نیم ساعت) تا حدودی مناسب به دست می‌آید در شکل ۱۱۳- معماری شبکه عصبی مورد استفاده آمده است.



شکل ۱۱۳- معماری شبکه عصبی مورد استفاده

تابع هزینه هم در شکل ۳-۱۲ آمده است:

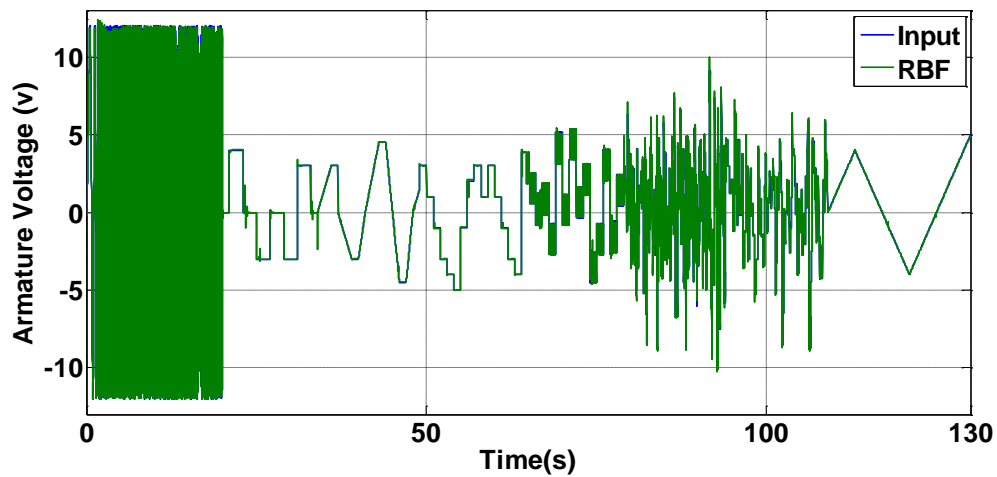
معیار عملکرد در این شبکه میانگین مربعات خطا بوده که به مقدار  $0,054$  همگرا شده است.



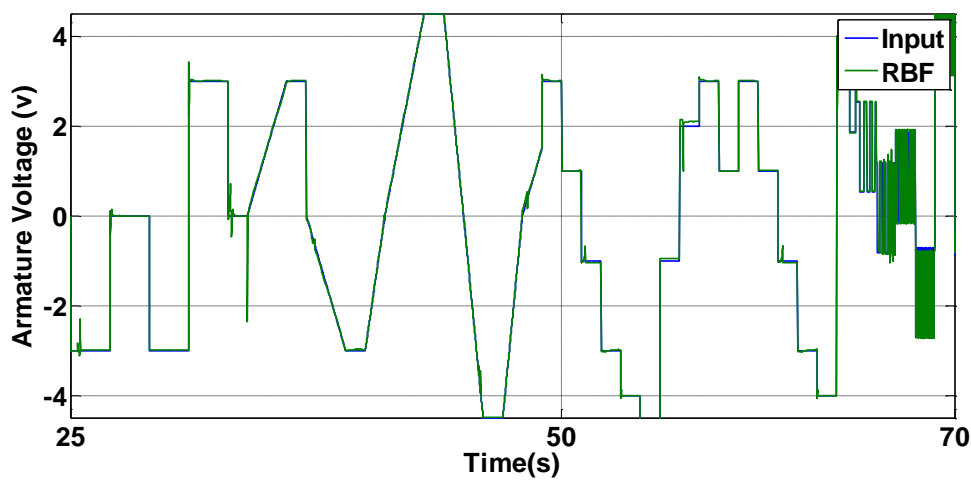
شکل ۳-۱۲ معیار عملکرد شبکه عصبی

مقایسه سیگنال تحریک ورودی با خروجی شبکه عصبی در شکل های شکل ۳-۱۳ و شکل

۳-۱۴ آورده شده اند.



شکل ۳-۱۳ مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف)



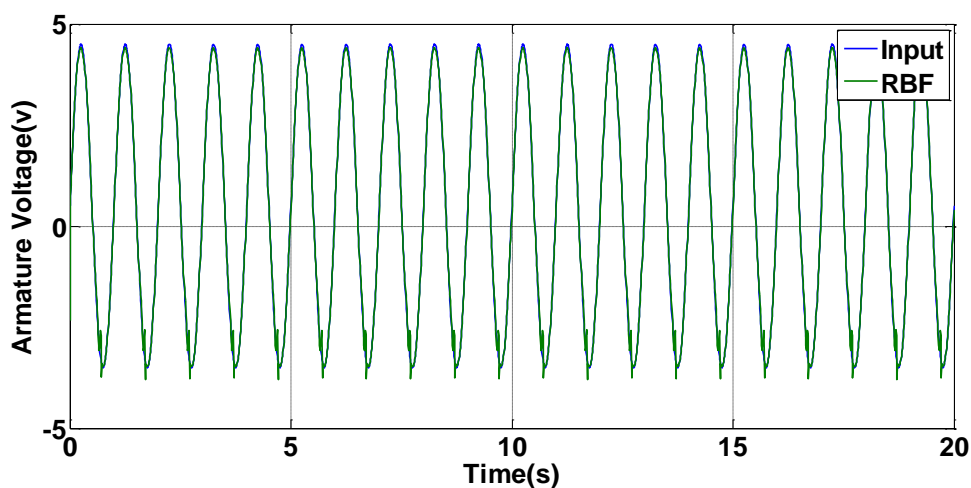
شکل ۳-۱۴ مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف) از نمای نزدیک تر

برای اعتبار سنجی شبکه عصبی، دو ورودی دلخواه به سیستم دریاچه گاز می دهیم و خروجی شبکه

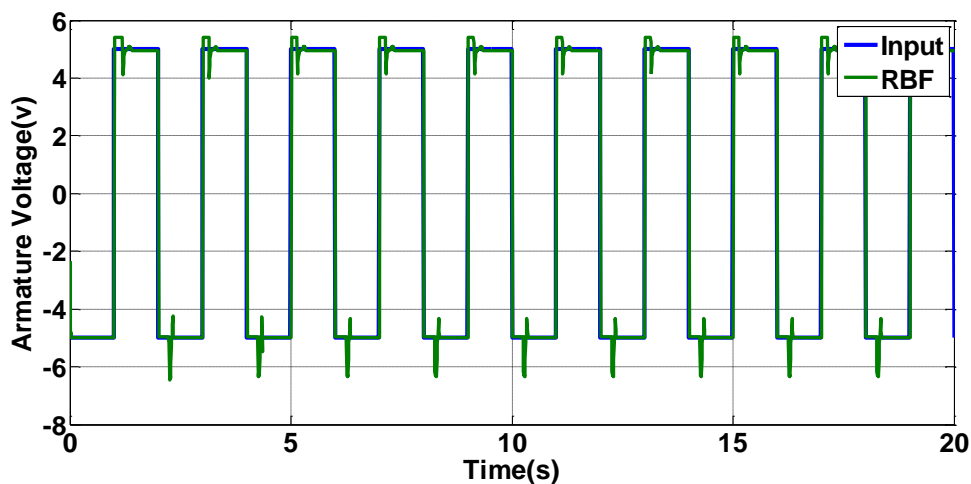
را با ورودی سیستم دریاچه گاز مقایسه می کنیم که در شکل های شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ آورده-

شده اند:





شکل ۳-۱۵ اعتبار سنجی: مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف)



شکل ۳-۱۶ اعتبار سنجی: مقایسه خروجی شبکه عصبی با سیگنال تحریک ورودی (هدف)

شبکه عصبی مورد نظر ما به صورت خارج خط آموزش می بیند و به دلیل تغییرات دینامیک های مدل نشده<sup>۱</sup> و عدم قطعیت های پارامتری، حتماً نیاز به روش کنترلی برخط<sup>۲</sup> داریم تا خطاهای ناشی از این موارد ذکر شده را از بین ببرد.

<sup>۱</sup> بیشتر این تغییرات ناشی از توابع به شدت غیرخطی ای هستند که اغتشاش های خارجی (غیرقابل اندازه گیری) و اثرات نویز (غیرقابل اندازه گیری)، این اثرات غیرخطی را تحریک می کنند.

<sup>۲</sup> OnLine

### ۳-۴ کنترل پس خور-کنترل مبتنی بر ولتاژ

بنابر ضعف شبکه عصبی که در بخش قبل توضیح داده شد، نیاز به روش کنترلی پس خوری داریم که ۱- خطای ناشی از دینامیک مدل نشده را کاهش دهد. ۲- ساده و دارای قابلیت پیاده سازی در عمل باشد. با بررسی های انجام شده و اینکه روش باید قابلیت رقابت با روش رایج کنترل PID را داشته باشد، از روش مبتنی بر ولتاژ که در مقاله [۴۴] ارائه شده است استفاده می شود که در ادامه توضیحات این روش آمده است.

### ۳-۴-۱ دینامیک جریان در مقابل دینامیک گشتاورهای مکانیکی سیستم

سیستم دریچه گاز الکترونیکی، سیستمی است که از دو بخش الکتریکی و مکانیکی تشکیل شده است که توسط چرخ دنده ها موتور به قطعات مکانیکی کوپل می شود، اگر معادله تعادل گشتاور را برای سیستم دریچه گاز الکترونیکی بنویسیم داریم :

$$J_{eq}\ddot{\theta}_L(t) + B_{eq}\dot{\theta}_L(t) + T_s + T_f + D(\varphi) = \bar{k}_m i_a(t) \quad (۱۶-۳)$$

که  $J_{eq}$  ممان اینرسی کل سیستم،  $B_{eq}$  ضریب اصطکاک ویسکوز کل سیستم،  $T_s$  گشتاور مجموعه فنر،  $T_f$  گشتاور اصطکاک کولموبی (با اثر استریک)،  $\varphi$  اغتشاش خارجی (ناشی از گشتاور آئرو دینامیک که در مقدار زاویه صفحه فلزی تاثیر می گذارد)،  $\theta_L$  موقعیت صفحه فلزی،  $\bar{k}_m$  ثابت گشتاور سمت بار،  $i_a(t)$  جریان آرمیچر هستند.

با نگاه دقیق و موشکافانه به معادله بالا متوجه می شویم که هر دینامیک مکانیکی (اعم از دینامیک خود سیستم و دینامیک های اغتشاش های وارد شده) همگی اثرشان را در دینامیک جریان نشان می دهند، در واقع با تغییر بار مکانیکی، جریان هم به همان نسبت تغییر می کند، و هیچ فرقی ندارد که این بار جزء دینامیک های خود سیستم باشد یا اینکه اغتشاش باشد، به هر حال بار موجود تاثیرش را در جریان نشان می دهد، لازم به ذکر است که موتور جریان مستقیم به تنهایی رفتار خطی دارد و بنابر بارهای که روی شفت می نشینند (اعم از اصطکاک، فنر، اغتشاش و...) کل سیستم غیر خطی

می‌شود.

پس وقتی ما بتوانیم جریان را اندازه‌گیری کنیم، در واقع به این معناست که ما اثرات تمامی دینامیک‌های مکانیکی موجود را اندازه‌گیری کرده‌ایم<sup>۱</sup>. باز هم به دلیل اهمیت موضوع تاکید می‌کنیم که فرقی ندارد که دینامیک مربوط به خود سیستم باشد یا اغتشاش باشد، همگی خودشان را در دینامیک جریان نشان می‌دهند.

حال به بررسی دینامیک موتور جریان مستقیم می‌پردازیم، داریم :

$$V_a = R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a(t) + k_b \dot{\theta}_m(t) \quad (۱۷-۳)$$

که  $V_a$  ورودی (ولتاژ آرمیچر)،  $R_a$  مقاومت آرمیچر،  $L_a$  خاصیت سلفی آرمیچر و  $k_b$  ثابت ولتاژ القایی سمت موتور می‌باشد. از معادله (۱۶-۳) معلوم می‌شود که دینامیک‌های جریان موجود در معادله‌ی (۱۷-۳) نماینده‌ی تمامی دینامیک گشتاورهای مکانیکی می‌باشند، انتگرال  $\theta_m(t)$  هم موقعیت زاویه‌ای است که قرار است کنترل کنیم، پس به همین سادگی تنها در معادله موتور، هم دینامیک‌های مکانیکی وجود دارند و هم ترمی که قرار است کنترل شود و هم ورودی کنترل که قرار است به سیستم اعمال شود.

این نکته نیز مهم است که عدم قطعیت‌های پارامتری موجود در معادله (۱۷-۳) خیلی کمتر از عدم قطعیت‌های پارامتری موجود در معادله (۱۶-۳) می‌باشد.

## ۲-۴-۳ طراحی قانون کنترل

اگر قانون کنترل را به این صورت تعریف کنیم :

$$U = V_a = R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a(t) + k_b [\dot{\theta}_m(t) + k_p (\theta_d - \theta_m)] \quad (۱۸-۳)$$

<sup>۱</sup> البته به شرطی که از درست بودن ثابت گشتاور موتور خیالمان راحت باشد.

که  $\theta_d$  مسیر ردگیری مطلوب است.

حال با اضافه کردن قانون کنترل به معادله (۳-۱۷) خواهیم داشت:

$$k_b[\dot{\theta}_d(t) - \dot{\theta}_m(t) + k_p(\theta_d - \theta_m)] = k_b[\dot{e}(t) + k_p e] \quad (۳-۱۹)$$

که  $e$  خطای ردگیری است.

هدف این است که  $k_b[\dot{e}(t) + k_p e] = 0$ ، حال اگر با استفاده از قاعده راث-هورویتز  $k_p$  مقداری مثبت و مناسب داشته باشد، به هدف مطلوبمان می‌رسیم.

یک بحث عملی وجود دارد که آیا در عمل به سیگنال جریان دسترسی داریم تا بتوانیم کنترل کننده را طراحی کنیم؟ متأسفانه جواب خیر است، ولی چون هدف و انگیزه این پایان‌نامه بررسی دریچه‌گازالکترونیکی به عنوان یک سیستم محک برای اجرای الگوریتم‌های کنترلی می‌باشد می‌توانیم با اضافه کردن حسگر جریان اثر هال<sup>۱</sup> به سیستم، این امر را محقق کرد.



### ۳-۵ بررسی پایداری روش‌ها

#### ۳-۵-۱ کنترل پیش‌خور-مدل معکوس

تا کنون برای مدل معکوس RBF تحلیل پایداری ای ارائه نشده‌است و تنها در [۴۲] به همگرایی توسط تابع لیاپانوف پرداخته شده‌است.

---

<sup>۱</sup> Hall effect current sensor (LTA ۰۰P/SP<sup>۱</sup>, LEM)

### ۲-۵-۳ کنترل پس‌خور-مبتنی بر ولتاژ-آنالیز پایداری و ارزیابی عملکرد

برای بررسی پایداری می‌دانیم که ECU برای حفاظت از موتور جریان مستقیم در برابر اضافه‌ولتاژ، ولتاژ ورودی به موتور را بین ۱۲- تا ۱۲+ محدود می‌کند که ما این مقدار را با  $u_{max}$  نشان می‌دهیم. حال اگر ولتاژ کنترل از  $u_{max}$  کمتر باشد، همان به عنوان قانون کنترل به موتور اعمال می‌شود (معادله (۳-۲۰)) و گرنه اگر از حد مجاز ولتاژ فراتر رود آنگاه عملکردی شبیه اشباع خواهیم داشت و قانون کنترل به صورت معادله (۳-۲۱) در خواهد آمد.

$$V_a(t) = U \text{ for } |U| < u_{max} \quad (۲۰-۳)$$

$$V_a(t) = u_{max} \operatorname{sgn}(U) \text{ for } |U| > u_{max} \quad (۲۱-۳)$$

برای اینکه دینامیک‌های خطای ردیابی مطلوب شوند و صفحه‌فلزی بتواند مسیرردگیری مطلوب را دنبال کند، فرض‌های زیر را در نظر می‌گیریم:

۱- مسیرهای ردگیری مطلوب  $\theta_d$  باید هموار باشند به این ترتیب که  $\theta_d$  و مشتقاتش تا مرتبه موردنیاز (در اینجا مرتبه ۱-ولی در کل برای سیستم درجه‌گاز تا مرتبه ۳) وجود و به طور یکنواخت محدود باشند.

۲- اغتشاش خارجی  $\varphi(t)$  محدود است :

$$|\varphi(t)| \leq \varphi_{max} \quad (۲۲-۳)$$

که  $\varphi_{max}$  ثابتی مثبت است.

توضیح اینکه در سیستم درجه‌گاز الکترونیکی، اغتشاش خارجی گشتاور آئرو دینامیک است که تاثیر در زاویه صفحه‌فلزی می‌گذارد که می‌توان این نوع اغتشاش را به نحوی از نوع ولتاژ فرض کرد.

اگر معادله مدار آرمیچر موتور جریان مستقیم را بنویسیم داریم :

$$V_a = R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a(t) + k_b \dot{\theta}_m(t) + \varphi(t) \quad (۲۳-۳)$$

حال طرفین معادله (۳-۲۳) را در جریان ضرب می‌کنیم تا توان را به دست آوریم:

$$V_a i_a(t) = R_a i_a(t)^2 + L_a \dot{i}_a(t) i_a(t) + k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) + \varphi(t) i_a(t) \quad (۳-۲۴)$$

در واقع موتور توان  $V_a i_a(t)$  را از باطری خودرو تحویل می‌گیرد تا توان مکانیکی که به صورت  $k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) = \tau \omega$  بیان شده است را فراهم کند. توان  $R_a i_a(t)^2$  در سیم‌پیچ هدر می‌رود و توان  $L_a \dot{i}_a(t) i_a(t)$  مشتق زمانی انرژی مغناطیسی  $(\frac{1}{2} L_a i_a(t)^2)$  است.

برای معادله (۳-۲۴) و برای  $t \geq 0$  با انتگرال گرفتن از طرفین، انرژی را به دست می‌آوریم:

$$\int_0^t (V - \varphi(t)) i_a(t) dt \quad (۳-۲۵)$$

$$= \int_0^t R_a i_a(t)^2 dt + \int_0^t L_a \dot{i}_a(t) i_a(t) dt + \int_0^t k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) dt$$

با فرض اینکه  $i_a(t) = 0$  داریم:

$$\int_0^t (V - \varphi(t)) i_a(t) dt = R_a i_a(t)^2 t + 0.5 \Delta L i_a(t)^2 + \int_0^t k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) dt \quad (۳-۲۶)$$

از آنجایی که  $R_a i_a(t)^2 t \geq 0$  و  $0.5 \Delta L i_a(t)^2 \geq 0$  پس داریم:

$$\int_0^t (V - \varphi(t)) i_a(t) dt \geq \int_0^t k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) dt \quad (۳-۲۷)$$

که امری بدیهی است، چون هیچ وقت بازدهی بیشتر از ۱۰۰ درصد نداریم (به خاطر تلفات)،

پس همیشه انرژی الکتریکی تحویلی بزرگتر از انرژی مکانیکی تولید شده می‌باشد.

در نتیجه حد بالای انرژی مکانیکی به صورت زیر خواهد شد:

$$\int_0^t k_b \dot{\theta}_m(t) i_a(t) dt = \int_0^t (V - \varphi(t)) i_a(t) dt \quad (۳-۲۸)$$

و داریم:

$$k_b \dot{\theta}_m(t) = (V - \varphi(t)) \quad (29-3)$$

بنابراین سرعت شفت موتور به این صورت محدود خواهد شد :

$$|\dot{\theta}_m(t)| \leq (|V| + |\varphi(t)|) / k_b \quad (30-3)$$

و از قانون‌های کنترل (11-3) (12-3) (13-3) خواهیم داشت که :

$$|V| \leq u_{max} \quad (31-3)$$

با جایگذاری معادلات (31-3) و (32-3) در معادله (30-3) خواهیم داشت :

$$|\dot{\theta}_m(t)| \leq (u_{max} + \varphi_{max}) / k_b \triangleq \dot{\theta}_{m,max} \quad (32-3)$$

که  $\dot{\theta}_{m,max}$  حداکثر سرعت شفت موتور است.

پس طراحی مان را جوری انجام می‌دهیم که  $\dot{\theta}_{m,max}$  از حداکثرش بیشتر نشود. تا به اینجا ثابت کردیم که با محدود بودن ولتاژ ورودی و اغتشاش خارجی، حداکثر سرعت شفت موتور نیز محدود خواهد ماند، حال چون در قانون کنترل برای رسیدن به خروجی مطلوب دینامیک‌های جریان را حذف می‌کنیم ( $i_a$  و  $\dot{i}_a$ ) باید بررسی کنیم که این دینامیک‌های داخلی هم محدود بمانند<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> لازم به ذکر است که ما دینامیک‌های سیستم که جزئی از خواص ذاتی سیستم هستند را نمی‌توانیم حذف کنیم، بلکه تنها اثر دینامیک‌ها را در خروجی از بین می‌بریم، به همین خاطر دینامیک داخلی نامیدیم.

از معادله (۳-۲۳) میتوانیم بنویسیم که :

$$R_a i_a(t) + L_a \dot{i}_a(t) = Z \quad (۳-۲۳)$$

که :

$$Z = V - k_b \dot{\theta}_m(t) - \varphi(t) \quad (۳-۲۴)$$

که  $V$  و  $\dot{\theta}_m(t)$  و  $\varphi(t)$  بر اساس معادلات (۳-۳۱)، (۳-۳۲) و (۳-۳۳) محدود هستند پس  $Z$  هم محدود می‌شود، و معادله (۳-۳۳) یک سیستم خطی مرتبه ۱ پایدار بر اساس معیار راث-هورویتز می‌باشد، از آنجایی که  $Z$  محدود است، برای سیستم خطی مرتبه ۱، خروجی  $i_a(t)$  نیز محدود خواهد شد و از معادله (۳-۳۳):

$$L_a \dot{i}_a(t) = Z - R_a i_a(t) \quad (۳-۳۵)$$

پس چون  $Z$  و  $i_a(t)$  محدود هستند پس  $\dot{i}_a(t)$  نیز محدود خواهد شد.

قانون‌های کنترل (۳-۱۸)، (۳-۲۰) و (۳-۲۱) در دو ناحیه  $|U| \geq u_{max}$  و  $|U| < u_{max}$  کار می‌کنند، بنابراین عملکرد ردیابی مسیر باید در هر دو ناحیه ارزیابی شود.

۱- ناحیه  $|U| < u_{max}$  :

در این ناحیه چون برای روش مدل معکوس پایداری را نتوانستیم بررسی کنیم در نتیجه تابع لیاپانوفی نداریم تا بخواهیم در کنار روش مبتنی بر ولتاژ بررسی‌اش کنیم، فقط می‌توانیم بر اساس بخش قبل بگوییم که متغیرهای سیستم محدود باقی می‌مانند.

۲- ناحیه  $|U| \geq u_{max}$  :

ولی در این ناحیه می‌توانیم عملکرد هر دو روش کنترلی را با هم بررسی کنیم، چون مجموع ورودی‌های هر دو روش باهم باعث شده‌اند تا ولتاژ به اشباع رود.



برای بررسی همگرایی خطای  $E$  ایجاد شده در ناحیه  $|U| \geq u_{max}$ ، تابع مثبت معین  $V$  به این صورت پیشنهاد می شود:

$$V = 0.5 k_b E^2 \quad (36-3)$$

که  $V(\cdot) = 0$  و  $V(E) > 0$  for  $E \neq 0$ ، مشتق زمانی  $V$  به این صورت محاسبه می شود:

$$\dot{V} = k_b E \dot{E}, \quad \dot{E} = \dot{\theta}_{md} - \dot{\theta}_m \quad (37-3)$$

$$\dot{V} = E (k_b \dot{\theta}_{md} - k_b \dot{\theta}_m) \quad (38-3)$$

حال با جایگزینی قانون کنترل (۲۱-۳) در (۳۳-۳) داریم:

$$R_a \dot{i}_a(t) + L_a \ddot{i}_a(t) + k_b \dot{\theta}_m(t) + \varphi(t) = u_{max} \operatorname{sgn}(U) \quad (39-3)$$

حال  $\theta_m$  را از معادله (۳۹-۳) به دست آورده و در معادله (۳۸-۳) وارد می کنیم، داریم:

$$\dot{V} = E (k_b \dot{\theta}_{md} + R_a \dot{i}_a + L_a \ddot{i}_a + \varphi(t) - u_{max} \operatorname{sgn}(U)) \quad (40-3)$$

فرض می کنیم اسکالر مثبت  $\mu$  وجود دارد به طوری که:

$$|k_b \dot{\theta}_{md} + R_a \dot{i}_a + L_a \ddot{i}_a + \varphi(t)| < \mu \quad (41-3)$$

برای همگرایی شرط  $\dot{V} < 0$  باید برقرار باشد، برای این منظور، کافی است تا:

$$u_{max} \operatorname{sgn}(U) = \mu \operatorname{sgn}(E) \quad (42-3)$$

اگر  $\mu \operatorname{sgn}(E)$  را جایگزین  $u_{max} \operatorname{sgn}(U)$  در معادله (۴۰-۳) کنیم، داریم:

$$\dot{V} = E (k_b \dot{\theta}_{md} + R_a \dot{i}_a + L_a \ddot{i}_a + \varphi(t) - \mu \operatorname{sgn}(E)) \quad (43-3)$$

از آنجایی که :

$$E \left( k_b \dot{\theta}_{md} + R_a i_a + L_a \dot{i}_a + \varphi(t) \right) \quad (44-3)$$

$$\leq |E| \left| k_b \dot{\theta}_{md} + R_a i_a + L_a \dot{i}_a + \varphi(t) \right| < |E| \mu$$

بنابراین :

$$E \left( k_b \dot{\theta}_{md} + R_a i_a + L_a \dot{i}_a + \varphi(t) \right) - \mu |E| < 0 \quad (45-3)$$

با استفاده از  $|E|$  به جای  $E \operatorname{sgn}(E)$  در معادله (43-3) خواهیم داشت :

$$\dot{V} = E \left( k_b \dot{\theta}_{md} + R_a i_a + L_a \dot{i}_a + \varphi(t) \right) - \mu |E| \quad (46-3)$$

با جایگزینی معادله (46-3) در معادله (45-3) ثابت می‌شود که  $\dot{V} < 0$ . بنابراین، خطای

ردیابی موتور همگرا شده‌است تا سیستم کنترلی به ناحیه کاری  $|U| < u_{max}$  برود.

پس همان طوری که در بالا گفته شد حتی اگر سیستم دریچه‌گاز الکترونیکی از ناحیه کاری

$|U| \geq u_{max}$  شروع کند، به ناحیه کاری  $|U| < u_{max}$  خواهد رفت.

معادله (42-3) بیان می‌دارد که :

$$u_{max} = \mu \quad (47-3)$$

بنابراین برای همگرایی خطای ردیابی  $E$ ، حداکثر ولتاژ موتور باید معادله (47-3) را ارضا کند.

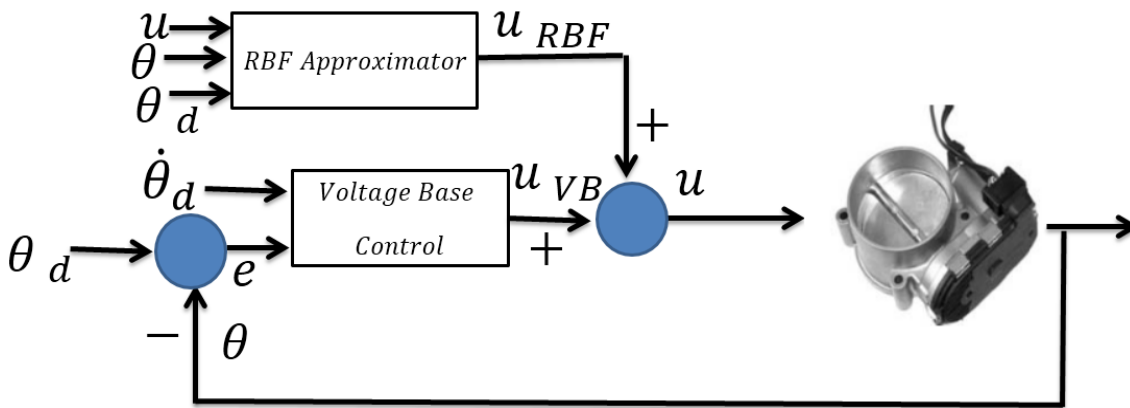
همان طوری که در بالا اشاره شده، وقتی از یک مقدار دلخواه  $E(0)$  در شرایط

$u_{max} = \mu$  شروع می‌کنیم، مقدار  $|E|$  کاهش خواهد یافت و موتور به ناحیه کاری  $|U| < u_{max}$

خواهد رفت که تمامی متغیرها محدود هستند [45, 46].

### ۳-۶ اصلاحات روش پیشنهادی

با توجه به عملکرد ضعیف کنترل معکوس و حساسیت شدید این روش به ورودی، ناچار به اصلاح روش پیشنهادی شده‌ایم. همان‌طور که از شکل ۳-۱۷ پیدا ست ابتدا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، کنترل‌پس‌خور مبتنی بر ولتاژ را انجام می‌دهیم و سپس برای بهبود عملکرد و از بین بردن عدم قطعیت‌ها، شبکه‌عصبی را طوری آموزش می‌دهیم که معکوس اثر اغتشاشات را یاد بگیرد و در نتیجه وقتی خروجی شبکه‌عصبی را به ورودی اعمال می‌کنیم اثر اغتشاشات را کاهش دهد.



شکل ۳-۱۷ اصلاح روش کنترلی پیشنهادی

اگر قانون کنترل را به صورت :

$$u = u_{VB} = \hat{R}i_a + \hat{k}_b[\dot{\theta} + \dot{\theta}_d - \dot{\theta} + k_p(\theta_d - \theta)] \quad (48-3)$$

پیشنهاد دهیم، که در آن  $\hat{R}$  مقاومت آرمیچر و  $\hat{k}_b$  ثابت ولتاژالقایی با در نظر گرفتن عدم قطعیت هستند.

و اگر معادله موتور را به این صورت در نظر بگیریم :

$$u = R i_a + k_b \dot{\theta} + \varphi(t) \quad (49-3)$$

که  $\varphi(t)$  اغتشاش خارجی است.

با جایگذاری قانون کنترل (۳-۴۱) در (۳-۴۹) خواهیم داشت :

$$u = L \dot{i}_a + (R - \hat{R})i_a + (k_b - \hat{k}_b)\dot{\theta} + \varphi(t) + \hat{k}_b(\dot{e} + k_p e) \quad (۳-۵۰)$$

که  $L \dot{i}_a$  دینامیک مدل نشده هست، اگر تمامی عدم قطعیت‌ها را  $\eta(t)$  بنامیم با دوباره نویسی رابطه (۳-۵۰) خواهیم داشت :

$$u = \eta(t) + \hat{k}_b(\dot{e} + k_p e) \quad (۳-۵۱)$$

از شکل ۳-۱۷ داریم:  $u = u_{VB} + u_{RBF}$  که  $u_{VB}$  ولتاژ کنترلی روش مبتنی بر ولتاژ و  $u_{RBF}$

خروجی شبکه عصبی می‌باشند، حال داریم:

$$\eta(t) - u_{RBF} = \hat{k}_b(\dot{e} + k_p e) \quad (۳-۵۲)$$

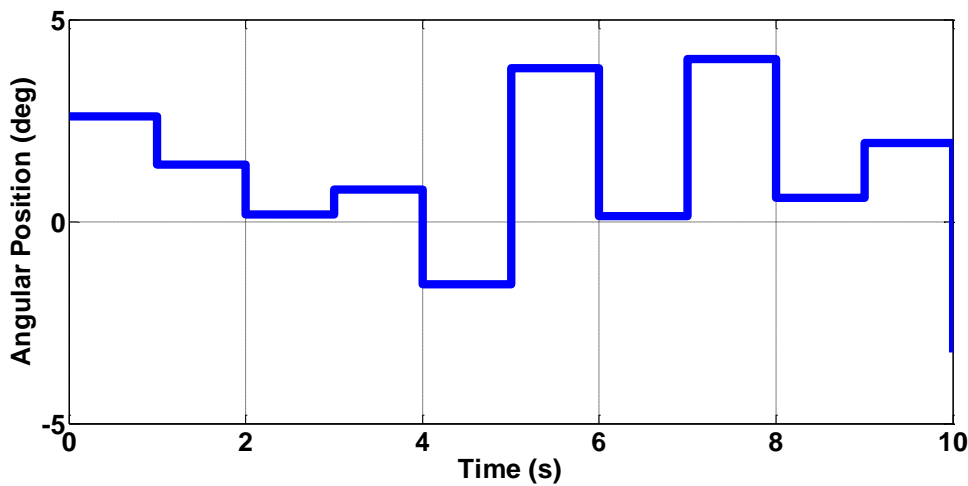
پس اگر  $u_{RBF}$  بتواند تقریب خوبی از  $\eta(t)$  باشد در نتیجه می‌توانیم هدف کنترلی  $\hat{k}_b(\dot{e} + k_p e)$  را به صفر میل دهیم<sup>۱</sup>.

برای آنالیز پایداری نیز بر اساس توضیحات ۳-۵-۲، متغیرهای حلقه داخلی محدود خواهند ماند، و اگر شبکه عصبی اغتشاشات کل را با دقت  $\epsilon$  تقریب بزند، حلقه خارجی نیز با تعریف تابع لیاپانوف مناسب پایدار خواهد شد.

<sup>۱</sup> با انتخاب مقدار مثبت مناسبی برای  $k_p$

### ۷-۳ اغتشاش

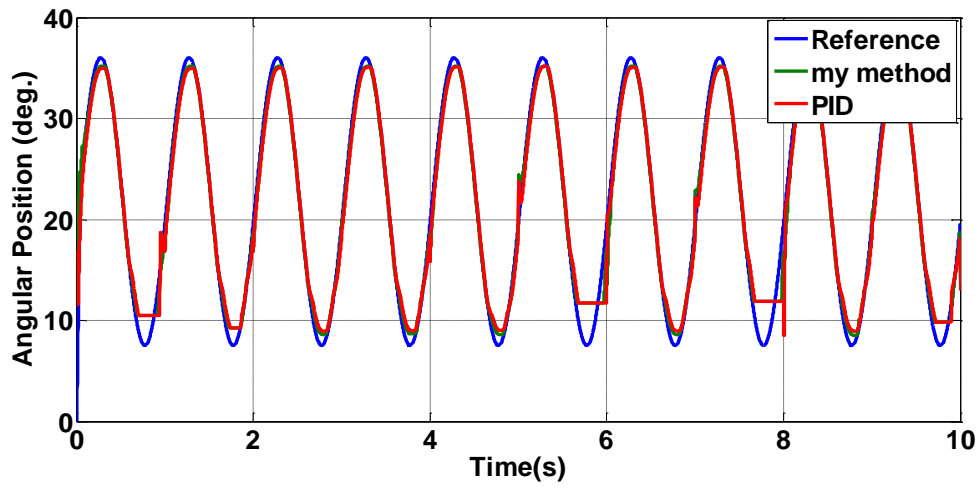
اغتشاش خارجی ای که وجود دارد، گشتاور آئرو دینامیک می باشد، اثر این گشتاور وقتی پدید می آید که جریان هوا از صفحه فلزی دریچه عبور کند. این گشتاور به موقعیت صفحه فلزی و نسبت فشار هوای محیط و ورودی وابسته است [۲۹]. وقتی این گشتاور به صفحه فلزی برخورد می کند تغییرات کمی در زاویه صفحه فلزی ایجاد می کند. ما این گشتاور را به صورت تصادفی و با دامنه حداکثر ۴ درجه، و فرکانس ۱ هرتز در نظر گرفته ایم، که در مشاهده می کنید:



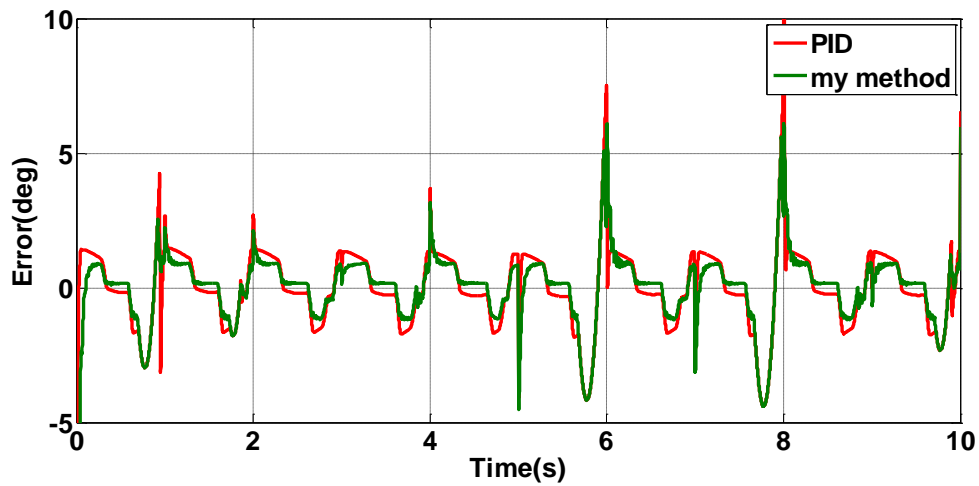
شکل ۱۸-۳ تغییر زاویه ناشی از اغتشاش گشتاور آئرو دینامیک

### ۸-۳ شبیه سازی و نتایج

در تمام شبیه سازی ها پاسخ با کنترل PID مقایسه شده است و همچنین اثر اغتشاش خارجی هم در تمام شبیه سازی ها وارد شده است.

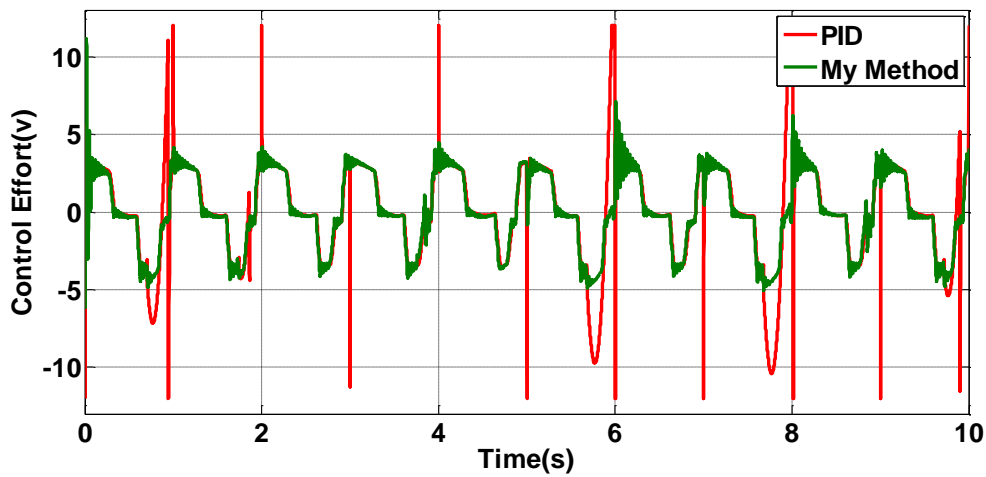


شکل ۳-۱۹ ردگیری سینوسی مرجع



شکل ۳-۲۰ خطای ردگیری

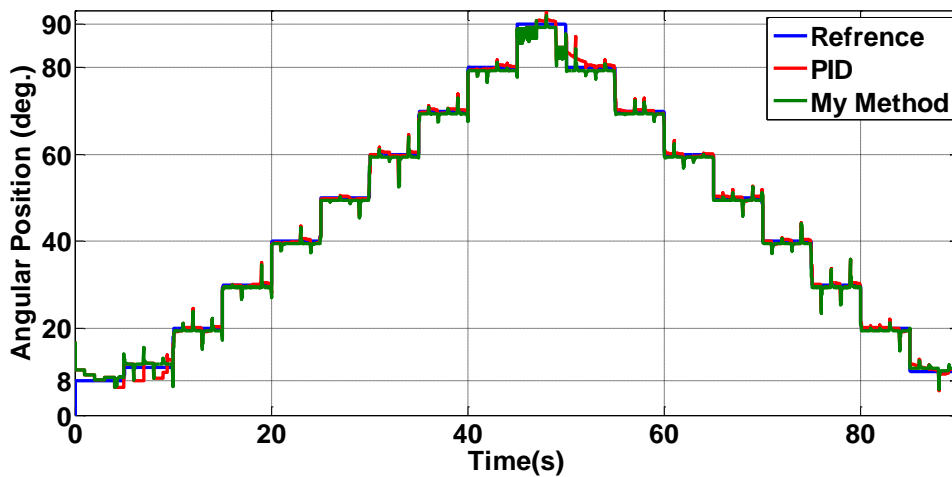
می بینیم که در هر دو روش در بعضی از قسمت‌ها به خاطر اغتشاش خطای زیادی در ردگیری اتفاق افتاده است.



شکل ۲۱-۳ تلاش کنترلی

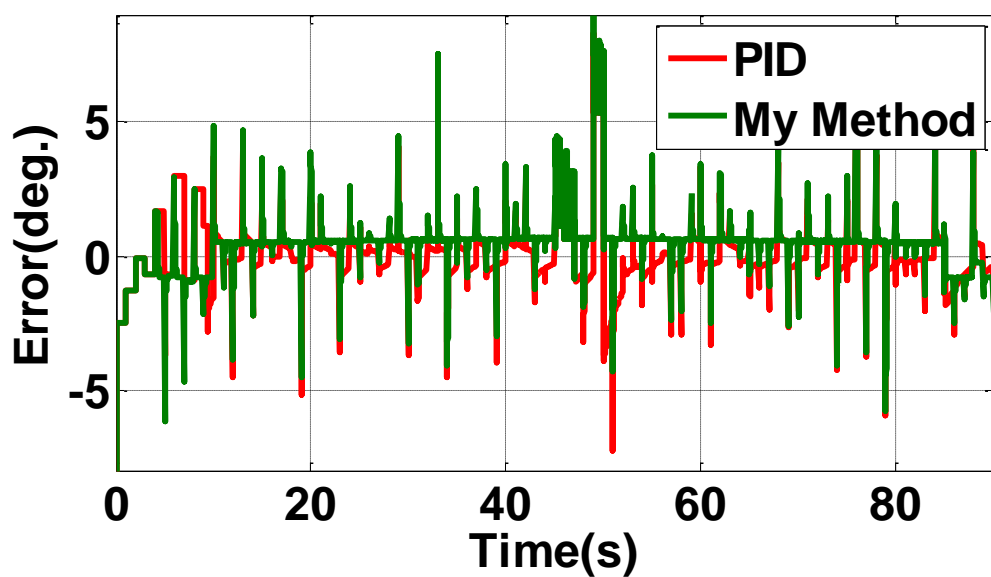
تلاش کنترلی روش PID دامنه بیشتری دارد در نتیجه استهلاک قطعات سریعتر خواهد بود از این نظر این روش دارای نقص است.

### ۲-۸-۳ ردگیری پله‌های افزایشی و کاهششی:

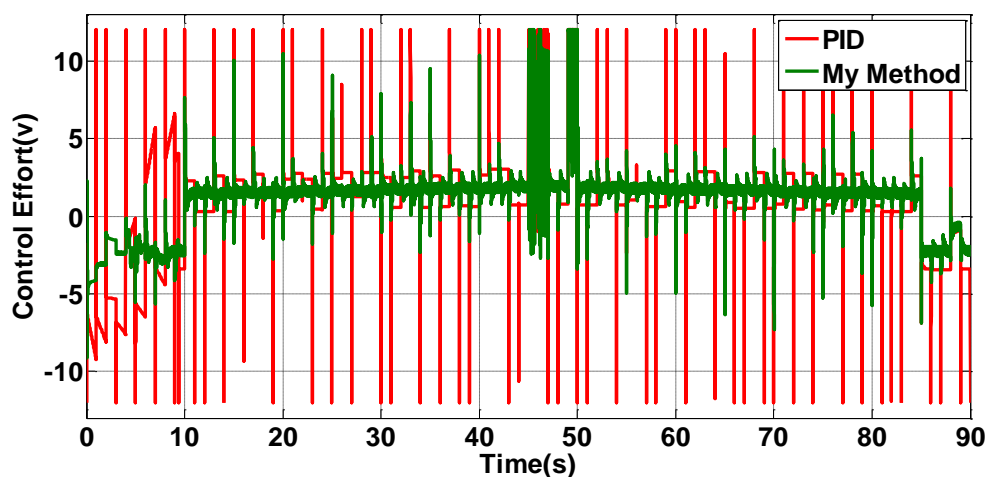


شکل ۲۲-۳ ردگیری پله‌های افزایشی و کاهششی

همان‌طور که می‌بینیم در بعضی نقاط روش PID نتوانسته است ردگیری مطلوبی داشته باشد.



شکل ۲۳-۳ خطای ردگیری

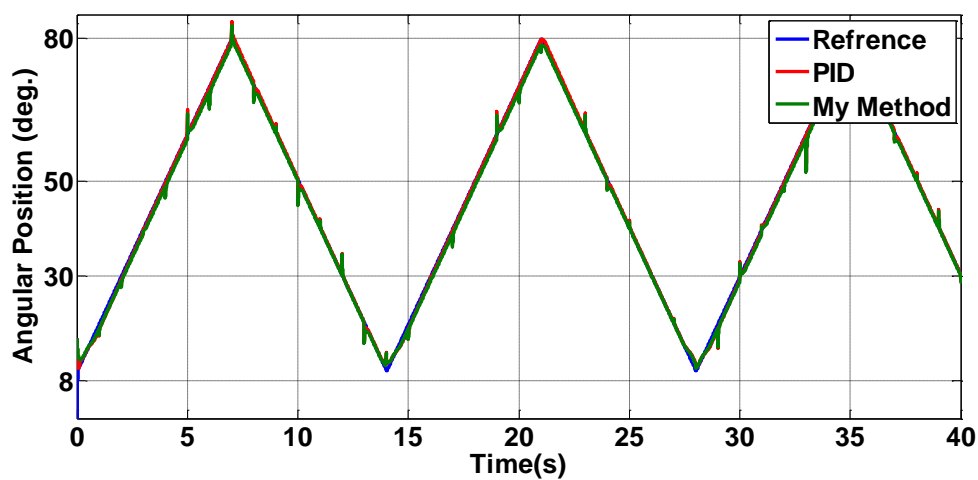


شکل ۲۴-۳ تلاش کنترلی

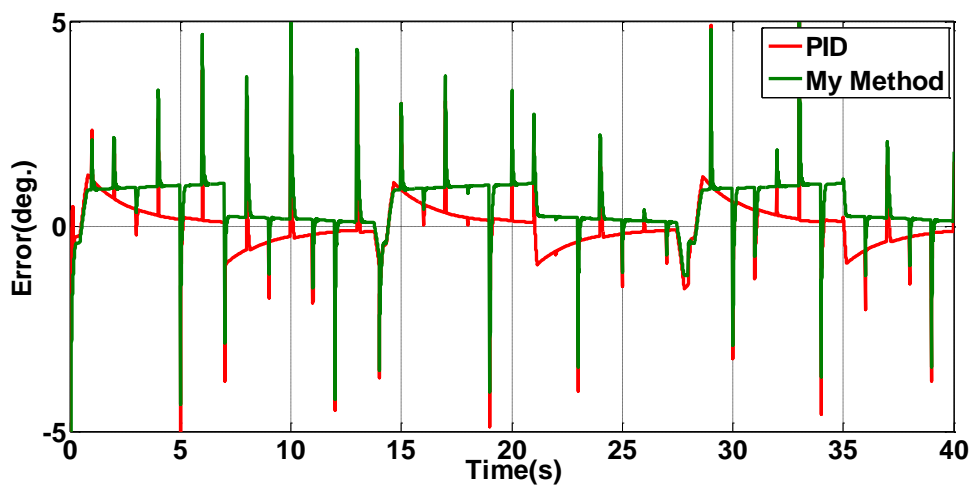
به خاطر اعمال اغتشاش روش PID دچار حالت بنگ-بنگ<sup>۱</sup> شده است، و سیگنال فرمان تولید شده توسط PID اصلا مناسب نبوده و قابل اجرا در عمل نیست چون توان زیادی مورد نیاز است و همچنین استهلاک سریع قطعات را خواهیم داشت.

<sup>۱</sup> Bang-Bang



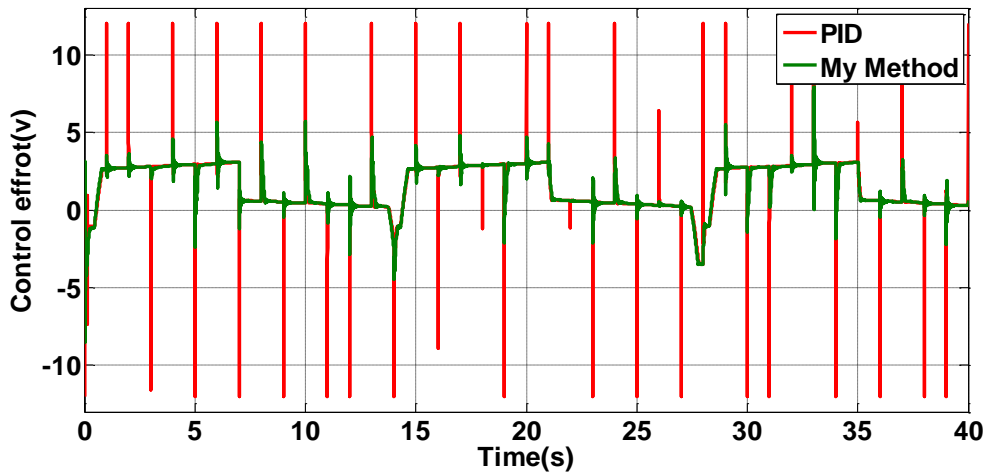


شکل ۳-۲۵ ردگیری شیب



شکل ۳-۲۶ خطای ردگیری

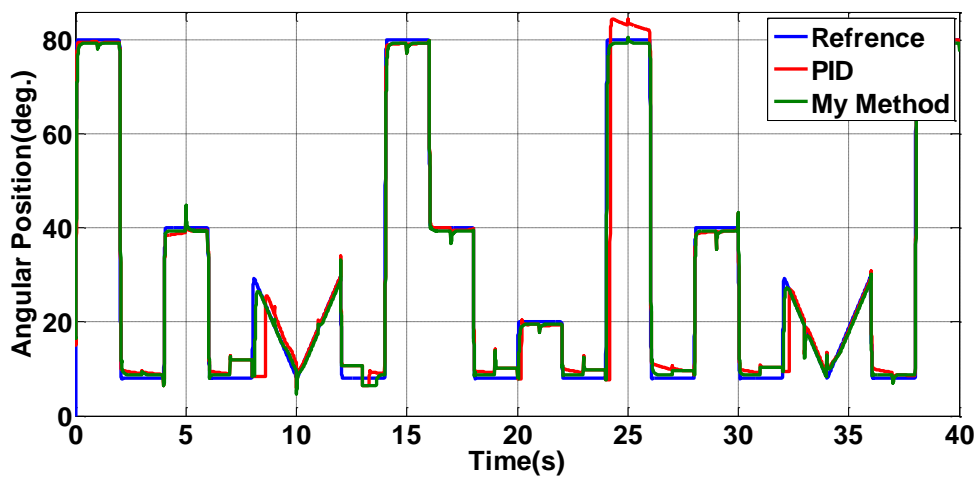
بازهم اثر اعمال اغتشاش خود را در ردگیری نشان داده‌است.



شکل ۳-۲۷ تلاش کنترلی

دوباره در سیگنال فرمان PID به خاطر وجود اغتشاش حالت بنگ-بنگ اتفاق افتاده است.

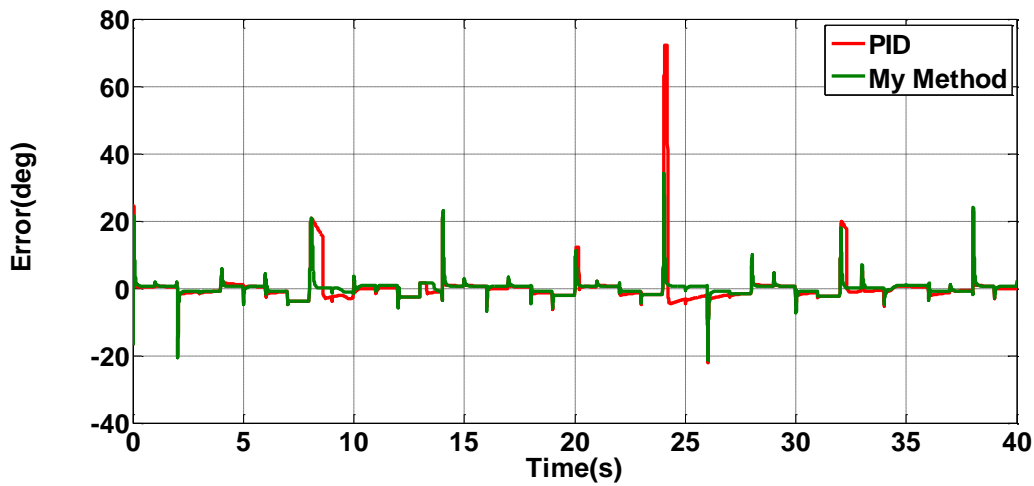
### ۴-۸-۳ ردگیری پله-شیب



شکل ۳-۲۸ ردگیری پله-شیب های مختلف

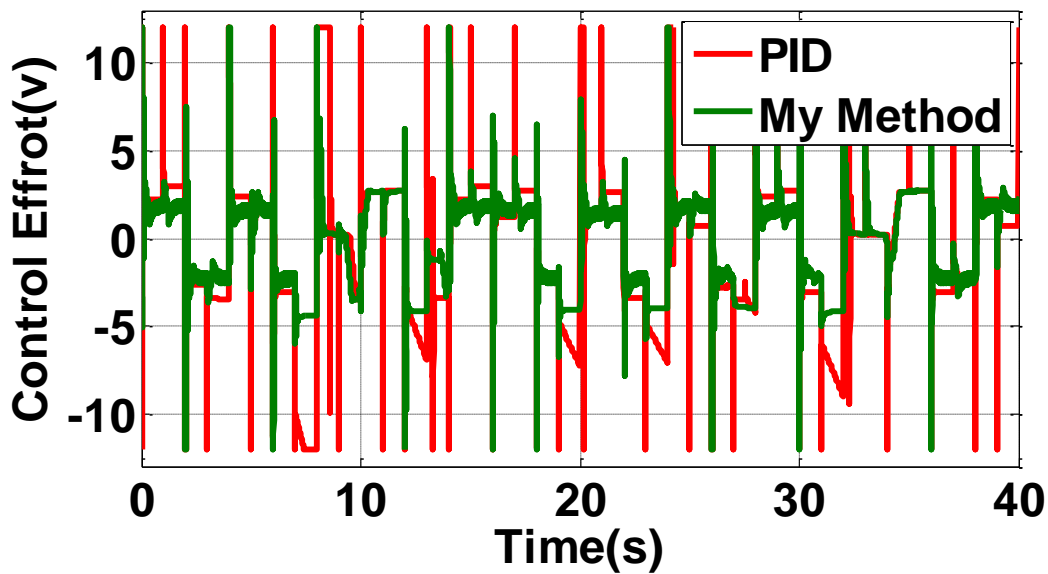
همان طوری که مشاهده می کنید روش PID در بعضی نقاط نتوانسته ردگیری خوبی

داشته باشد، در صورتی که روش پیشنهادی ردگیری نسبتاً مناسبی دارد.



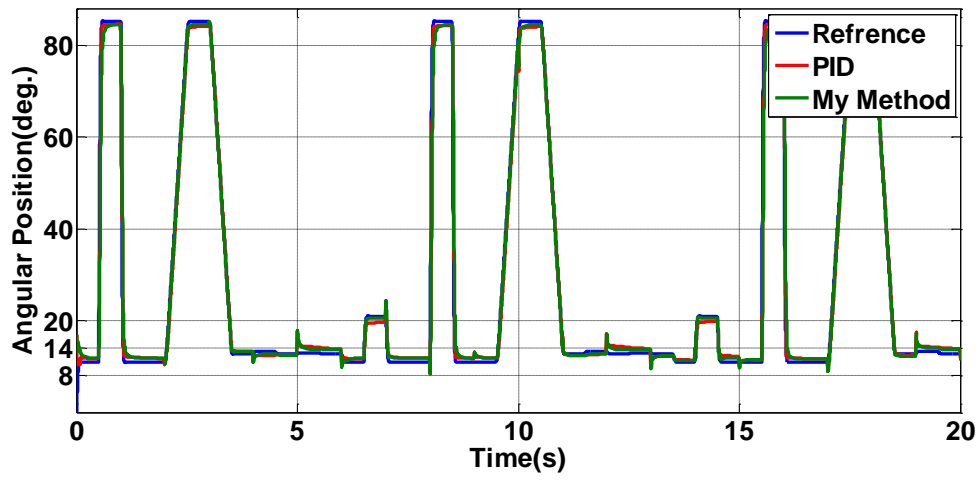
شکل ۲۹-۳ خطای ردگیری

می بینیم که در بعضی از نقاط خطا ردگیری در روش PID زیاد است.

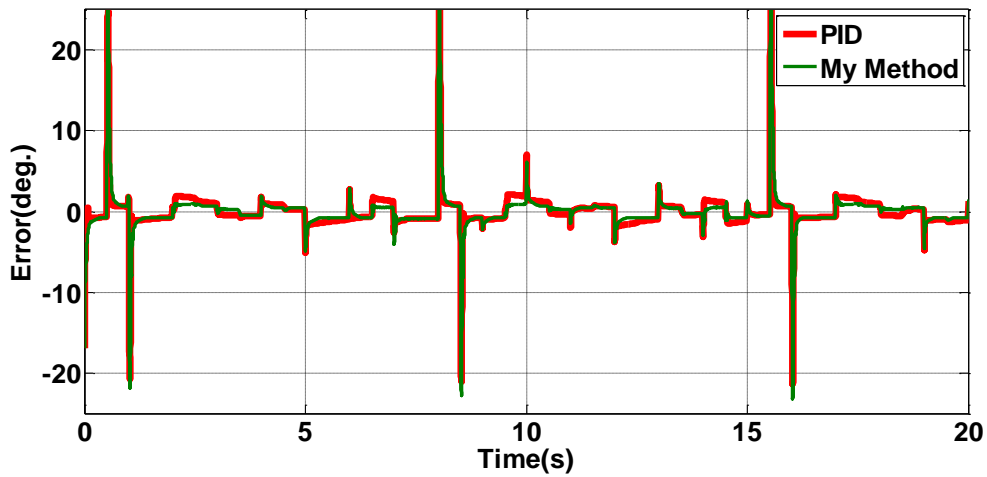


شکل ۳۰-۳ تلاش کنترلی

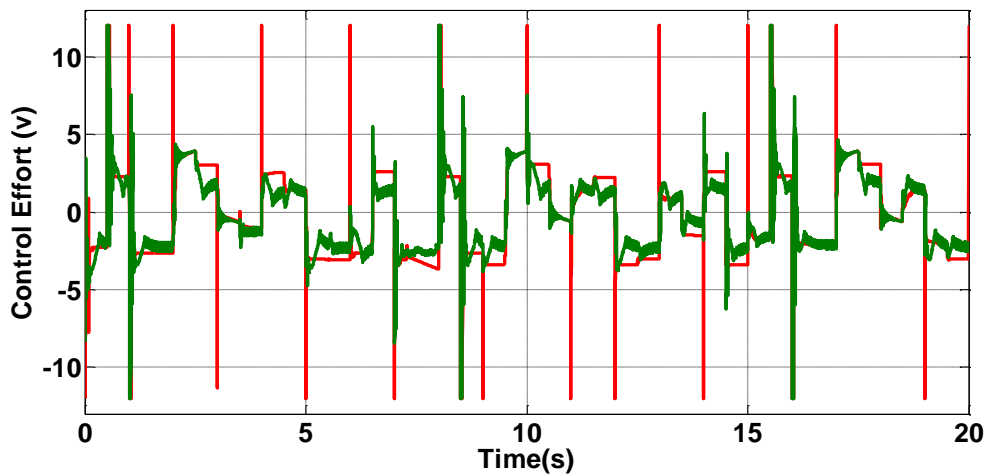
باز هم در سیگنال فرمان PID به خاطر وجود اغتشاش حالت بنگ-بنگ اتفاق افتاده است.



شکل ۳۱-۳ ردگیری سیگنال ترکیبی پله



شکل ۳۲-۳ خطای ردگیری



شکل ۳-۳ تلاش کنترلی

باز هم در سیگنال فرمان PID به خاطر وجود اغتشاش حالت بنگ-بنگ اتفاق افتاده است.

### ۹-۳ مقایسه PID با روش پیشنهادی

با بررسی شکل‌های بخش پیش این نتیجه‌ها را میگیریم:

۱- روش پیشنهادی در بعضی شرایط عملکرد ردگیری بهتری نسبت به PID دارد.

۲- تلاش کنترلی روش پیشنهادی از PID در بیشتر زمان‌ها کمتر است، روش PID به خاطر

حالت بنگ-بنگ توان زیادی مصرف می‌کند، که هم از لحاظ مصرف انرژی و هم از لحاظ استهلاک

قطعات مناسب نمی‌باشد، در صورتی که در روش پیشنهادی استهلاک قطعات به خاطر برخورد کمتر

با موانع کمتر خواهد بود.

### ۱۰-۳ پیشنهادات

۱- استفاده از کنترل آموزش تخصصی شبکه عصبی برای یادگیری F و G در پس خور سازی

خطی

۲- استفاده از الگوریتم LoLiMoT به جای RBFN استفاده شده در بخش مدل معکوس

- [١] Y ٢٨٩ K٠٠ ٠٢٥ BOSCH, "Datasheet," ٢٠٠٠
- [٢] **R. Bai and S. Tong, "Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control of the Electronic Throttle System in Modern Automobiles," *Mathematical Problems in Engineering* , ٢٠١٤**
- [٣] **H. Fuchs, B. Bauer, T. Schulz, M. Bäuerle, and K. Milos, "Electronic Control," in *Gasoline Engine Management*, K. Reif, Ed., ed: Springer Fachmedien Wiesbaden, ٢٠١٥, pp. ٢٣٣-٢١٢**
- [٤] **X. Jiao, J. Zhang, and T. Shen, "An Adaptive Servo Control Strategy for Automotive Electronic Throttle and Experimental Validation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. ٤١, pp. ٤٢٨٤-٤٢٧٥, ٢٠١٤**
- [٥] **M. Rostami and P. Amiri, "Designing of Automotive Engine Electronic Throttle Controller for EF ٧ Engine," ٢٠١٤**
- [٦] **[http://www.croberts.com/Throttle-control-systemdefects\\_files/image٠٠٢.jpg](http://www.croberts.com/Throttle-control-systemdefects_files/image٠٠٢.jpg), "Last visited:" ١٧,٠٨,٢٠١٤**
- [٧] **H. Fuchs, B. Bauer, T. Schulz, M. Bäuerle, and K. Milos, "Cylinder-charge control systems," in *Gasoline Engine Management*, K. Reif, Ed., ed: Springer Fachmedien Wiesbaden, ٢٠١٥ pp. ٤٩-٣٢**
- [٨] **S. Zhang, J. J. Yang, and G. G. Zhu, "LPV gain-scheduling control of an electronic throttle with experimental validation," in *American Control Conference (ACC)*, ٢٠١٤, ٢٠١٤, pp. ١٩٥-١٩٠**
- [٩] **R. Conatser, J. Wagner, S. Ganta, and I. Walker, "Diagnosis of automotive electronic throttle control systems," *Control Engineering Practice*, vol. ١٢, pp. ٣٠-٢٣, ٢٠٠٤**
- [١٠] **Y. Kadota, "Drive by wire fail safe control to fix the vehicle speed at a preset speed," ed: Google Patents, ٢٠٠٠**
- [١١] **D. McKay ,G. Nichols, and B. Schreurs, "Delphi electronic throttle control systems for model year ٢٠٠٠; driver features, system security, and OEM benefits. ETC for the mass market," SAE Technical Paper ٢٠٠٠**
- [١٢] **M. T. Şenog̃uz, H. A. Bozkurt, C. Karadeniz, and K. N. Adil, "Modeling and Testing of the Throttle Body Usage in a Diesel Engine to Improve NOx Emissions," SAE Technical Paper ٢٠٠٨**
- [١٣] **H.-M. Streib and H. Bischof, "Electronic throttle control (ETC): A cost effective system for improved emissions, fuel economy, and driveability," SAE Technical Paper ١٩٩٤**
- [١٤] **R. Tudor, "Electronic throttle control as an emission reduction device," SAE Technical Paper ١٩٩٣**
- [١٥] **J. Deur, D. Pavkovic, N. Peric, and M. Jansz, "Analysis and optimization of an electronic throttle for linear operating modes," in *Proc. of the ١٠<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference*, ٢٠٠٢**
- [١٦] **J. Deur, D. Pavkovic, N. Peric, M. Jansz, and D. Hrovat, "An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. ٤٠, pp.**

- ٨٣٤-٨٢١, .٢٠٠٤
- [١٧] **D. Pavkovic, J. Deur, M. Jansz, and N. Peric, "Self-tuning control of an electronic throttle," in *Control Applications, ٢٠٠٣. CCA ٢٠٠٣. Proceedings of ٢٠٠٣ IEEE Conference on*, ٢٠٠٣, pp. ١٥٤-١٤٩**
- [١٨] **D. Pavković, J. Deur, M. Jansz, and N. Perić, "Adaptive control of automotive electronic throttle," *Control Engineering Practice*, vol. ١٤, pp. ١٣٦-١٢١, .٢٠٠٦**
- [١٩] **Y. Pan, U. Ozguner, and O. H. Dagci, "Variable-structure control of electronic throttle valve," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. ٥٥, pp. ٣٩٠٧-٣٨٩٩, .٢٠٠٨**
- [٢٠] **C. Yang, "Model-based analysis and tuning of electronic throttle controllers," SAE Technical Paper, .٢٠٠٤**
- [٢١] **A. Di Gaeta and U. Montanaro, "Application of a robust model reference adaptive control algorithm to a nonlinear automotive actuator," *International Journal of Automation and Computing*, vol. ١١, pp. ٣٩١-٣٧٧, .٢٠١٤**
- [٢٢] **M. S. Wan, Z. M. Wu, B. L. Li, L. Y. Lv, N. Sun, and W. L. Ge, "Study and Analysis of Electronic Throttle Control System Applied in Hybrid Electric Vehicle," *Advanced Materials Research*, vol. ٩٤٥, pp. ١٦٤٢-١٦٣٧, .٢٠١٤**
- [٢٣] **A. Thomasson and L. Eriksson, "Model-based throttle control using static compensators and pole placement," *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*, vol. ٦٦, pp. ٧٢٧-٧١٧, .٢٠١١**
- [٢٤] **R. N. Loh, W. Thanom, J. S. Pyko, and A. Lee, "Electronic Throttle Control System: Modeling, Identification and Model-Based Control Designs," *Engineering*, vol. ٥, p. ٥٨٧, .٢٠١٣**
- [٢٥] **P. G. Griffiths, "Embedded software control design for an electronic throttle body," University of California, Berkeley, .٢٠٠٢**
- [٢٦] **F. Golnaraghi and B. C. Kuo, *Automatic control systems*: Wiley Publishing, .٢٠٠٩**
- [٢٧] **[http://www.schoolphysics.co.uk/age-16-19/Electricity"٢٠and"٢٠magnetism/Electromagnetic"٢٠induction/text/Back emf/index.html](http://www.schoolphysics.co.uk/age-16-19/Electricity%20and%20magnetism/Electromagnetic%20induction/text/Back%20emf/index.html), Last visited .٣٠,٩,٢٠١٤**
- [٢٨] **M. Vasak, M. Baotic, I. Petrovic, and N. Peric, "Hybrid theory-based time-optimal control of an electronic throttle," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. ٥٤, pp. ١٤٩٤-١٤٨٣, .٢٠٠٧**
- [٢٩] **U. M. A. di Gaeta, S. Santini, and M. di Bernardo, "Modeling and identification of an electronic throttle body," *Istituto Motori, National Research Council, Naples, Italy, Tech. Rep.*٢٠٠٩RR١٨٨٧, .٢٠٠٩**
- [٣٠] **S. Al-Assadi, J. Breitingner, and N. Murphy, "Model-Based Friction and Compensation in Electronic Throttle Control," SAE Technical Paper, .٢٠٠٦**
- [٣١] **J. Gagner and R. Bondesson, "Adaptive realtime control of a nonlinear throttle unit," *Master's thesis, Department of Automatic Control, Lund***

*Institute of Technology, ۲۰۰۰*

- [۳۲] M. di Bernardo, A. di Gaeta, U. Montanaro, and S. Santini, "Synthesis and experimental validation of the novel LQ-NEMCSI adaptive strategy on an electronic throttle valve," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. ۱۸, pp. ۱۳۳۷-۱۳۲۵, ۲۰۱۰
- [۳۳] A. F. Contreras, I. P. Quiroz, and C. C. de Wit, "Further results on modelling and identification of an electronic throttle body," in *Mediterranean Conference on Control and Automation, MED*, ۲۰۰۲
- [۳۴] S. Kopf, M. Feldt, M. Eichhorn, and U. Konigorski, "Automated Model-Based Controller Design for an Electronic Throttle," in *Advances in Automotive Control*, ۲۰۱۰ pp. ۲۲۱-۲۱۶
- [۳۵] P. C. Sen, *Principles of electric machines and power electronics*: John Wiley & Sons, ۲۰۰۷
- [۳۶] T. Lindell, "Model-based Air and Fuel Path Control of a VCR Engine," ۲۰۰۹
- [۳۷] C. Rossi, A. Tilli, and A. Tonielli, "Robust control of a throttle body for drive by wire operation of automotive engines," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. ۸, pp. ۱۰۰۲-۹۹۳, ۲۰۰۰
- [۳۸] G. C. Y. Chamaillard, "PI and RST controllers for throttle actuator," *IFAC Workshop on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling (ECOSM) -The Throttle Control Benchmark*, ۲۰۰۹
- [۳۹] "USER MANUAL NI ۹۷۵۹NI Powertrain Controls Electronic Throttle Driver Module," *National Instruments*, ۲۰۱۳
- [۴۰] S. Al-Assadi, "A Neural Network-Based Direct Inverse Model Application to Adaptive Tracking Control of Electronic Throttle Systems," SAE Technical Paper. ۲۰۱۴
- [۴۱] O. Omidvar and D. L. Elliott, *Neural systems for control*: Elsevier, ۱۹۹۷
- [۴۲] Y. Xiaofang, W. Yaonan, S. Wei, and W. Lianghong, "RBF networks-based adaptive inverse model control system for electronic throttle," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. ۱۸, pp. ۷۵۶-۷۵۰, ۲۰۱۰
- [۴۳] "[www.FaraDars.org](http://www.FaraDars.org)," *Neural Network-RBF Tutorial*.
- [۴۴] M. M. Fateh, "On the voltage-based control of robot manipulators," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. ۶, pp. ۷۱۲-۷۰۲, ۲۰۰۸
- [۴۵] M. M. Fateh, "Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy," *Nonlinear Dynamics*, vol. ۶۷, pp. ۱۵۳۷-۱۵۲۵, ۲۰۱۲
- [۴۶] M. M. Fateh and S. Khorashadizadeh, "Robust control of electrically driven robots by adaptive fuzzy estimation of uncertainty," *Nonlinear Dynamics*, vol. ۶۹, pp. ۱۴۷۷-۱۴۶۵, ۲۰۱۲



**Abstract:**

In this thesis practical Electronic Throttle system is studied. First, physical system is modeling in math equation , then parameters of modeling identified and modified by several experiments. In the following control demands reviewed and on this basis we design controllers that satisfy control demands. We use voltage base control in feedback and invers control by neural-fuzzy network in feedforward path.

Keywords: Identification , Modeling , Nonlinear System , Electronic Throttle , Neural-fuzzy network , Invers Control , Voltage Base Control .



**Shahrood University of Technology**

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

**Neural-Fuzzy Control of Electronic Throttle**

**Mohammad Ghobakhloo**

Supervisors:

**Dr. Ali Akbarzade kalat**

In association with :

**IPCO(Dr. Rasoul Salehi)**



Feb. ۲۰۱۵

