





دانشکده مهندسی مکانیک

گروه جامدات

کنترل بازخورد مقاوم با انتگرال علامت خطا برای موتورهای احتراق داخلی

عباس جمالی بحری

استاد راهنما:

دکتر حبیب احمدی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ماه ۹۴



فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای عباس جمالی بحری به شماره دانشجویی ۹۲۰۴۴۹۴ رشته مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان کنترل بازخورد مقاوم با انتگرال علامت خطا برای موتورهای احتراق داخلی که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۷/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: بسیار خوب امتیاز: ۱۸/۵)  دفاع مجدد  مردود

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
- ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
- ۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)
- ۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)
- ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاداراهنمای اول	دکتر حبیب احمدی	استادیار	
۲- استاداراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر امیر جلالی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر اردشیر کریمی محمدی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی یامداد	استادیار	

رئیس دانشکده:

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

## تقدیر و تشکر

منت خدای عزوجل که طاعتش موجب قرب است و به شکراندرش مزیت نعمت. هر نفسی که فرو رود ممد حیات است و چون برآید مفرح ذات است در هر نفس دو نعمت است و بر هر نعمتی شکری واجب.

استاد گرامی جناب آقای دکتر حبیب احمدی

با سلام

دل‌سوزی، تلاش و کوشش حضرت‌عالی در تعلیم و تربیت و انتقال علم و تجربه‌های ارزشمند در کنار برقراری رابطه صمیمی و دوستانه با دانشجویان و ایجاد فضایی دل‌نشین برای کسب علم و دانش و درک شرایط دانشجویان حقیقتاً ستودنی است. اینجانب بر خود وظیفه دانسته که در کسوت شاگردی از زحمات و خدمات ارزشمند شما استاد گرانقدر تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از زحمات پدر و مادرم که در همه‌وقت پشتیبان و همراه من بوده‌اند، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

از خداوند متعال که لطف او شامل حال بنده‌ی حقیر شده است برای تمام عزیزانی که مرا در این راه یاری کرده‌اند، آرزوی توفیق و سلامتی مسئلت دارم.

عباس جمالی بحری

# تعهد نامه

اینجانب عباس جمالی بحری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل بازخورد مقاوم با انتگرال علامت خطا تحت راهنمایی دکتر حبیب احمدی 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.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

## چکیده

در این پایان‌نامه روش کنترلی مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای کنترل سیستم موتورهای احتراق داخلی از نوع دیزل که مجهز به سیستم توربوشارژ هستند، ارائه شده است. در طراحی کنترلرهای مبتنی بر مدل، شناخت دقیق از مدل دینامیکی سیستم حائز اهمیت بوده که این امر در عمل به واسطه حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم دشوار می‌باشد. یکی از راه‌های مرسوم مقابله با عدم قطعیت‌های مدل، استفاده از کنترلر مود لغزشی می‌باشد که علی‌رغم مزایای این کنترلر که شامل سادگی در طراحی نیز می‌باشد وجود پدیده چترینگ یکی از معایب آن می‌باشد. لذا در این تحقیق برای حل این مشکل و همچنین بهبود خطای حالت ماندگار از روش کنترلی جدیدی بر مبنای انتگرال مقاوم علامت خطا استفاده می‌شود. در کنترلر پیشنهادی جمله‌ای جهت جبران نامعینی‌های موجود در سیستم تعریف و نحوه استخراج آن ارائه می‌شود. این ترم نامعینی‌های موجود در سیستم را تخمین خواهد زد و باعث میل نمودن خطا به سمت صفر می‌شود. برای استخراج قانون کنترلی مناسب که باعث پایداری حلقه بسته سیستم شود تابع لیاپانوف مناسب پیشنهاد شده و با تحلیل لازم پایداری سیستم بررسی شده است. در ادامه با توجه به تحلیل‌های انجام شده پایداری مجانبی سیستم با توجه به قانون کنترلی پیشنهادی اثبات شده است. شبیه‌سازی با اعمال کنترلرهای مختلف از جمله کنترلر پیشنهادی انجام و نتایج نشان می‌دهد که در انتهای مسیر، روش ارائه شده تلاش کنترلی کمتری نسبت به روش‌های دیگر داشته و این در حالی است که با وجود تلاش کنترلی کمتر، خطای ردیابی در حالت ماندگار در روش فوق کاهش یافته است.

**کلمات کلیدی:** کنترل مقاوم، کنترل مود لغزشی، کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا، موتور دیزل

توربوشارژ، عدم قطعیت

## فهرست مطالب

۱	مقدمه.....	۱
۱-۱	پیشگفتار.....	۱-۱
۲-۱	مروری بر موتورهای دیزل.....	۲-۱
۱-۲-۱	موتورهای دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ.....	۱-۲-۱
۲-۲-۱	موتورهای دیزل مجهز به سیستم EGR و VGT.....	۲-۲-۱
۳-۱	مروری بر کنترل موتورهای دیزل.....	۳-۱
۴-۱	مدل سازی دینامیکی موتورهای درونسوز.....	۴-۱
۱-۴-۱	روش مقدار متوسط.....	۱-۴-۱
۲-۴-۱	روش سیلندر به سیلندر.....	۲-۴-۱
۵-۱	روش های کنترلی برای موتورهای دیزل مجهز به توربوشارژ.....	۵-۱
۱-۵-۱	روش کنترلی خطی ساز پسخورد.....	۱-۵-۱
۲-۵-۱	روش کنترلی مود لغزشی.....	۲-۵-۱
۳-۵-۱	کنترل مبتنی بر روش انتگرال مقاوم علامت خطا.....	۳-۵-۱
۲	مدل سازی دینامیکی موتور دیزل.....	۱۹
۱-۲	مقدمه.....	۲۰
۲-۲	مدل فیزیکی موتور دیزل.....	۲۰
۱-۲-۲	قوانین بقای جرم و انرژی برای موتور دیزل.....	۲۱
۲-۲-۲	دینامیک کسر گازهای خروجی.....	۲۳
۳-۲-۲	معادله های توان توربین و کمپرسور.....	۲۴
۳-۲	مدل ساده شده ی موتور دیزل برای طراحی کنترل کننده.....	۲۵



۲۵.....	معادله‌های دینامیکی برای موتور دیزل مجهز به EGR و VGT	۱-۳-۲
۲۹.....	طراحی کنترل‌کننده فیدبک خطی‌ساز و مود لغزشی برای موتور دیزل	۳
۳۰.....	مقدمه.....	۱-۳
۳۱.....	خطی‌سازی پسخورد.....	۲-۳
۳۱.....	خطی‌سازی ورودی-حالت.....	۱-۲-۳
۳۳.....	خطی‌سازی ورودی-خروجی.....	۲-۲-۳
۳۵.....	قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد برای سیستم موتور دیزل.....	۳-۲-۳
۳۷.....	شبیه‌سازی قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد برای مدل موتور دیزل.....	۱-۳-۲-۳
۴۲.....	کنترل مود لغزشی.....	۳-۳
۴۳.....	قانون کنترل مود لغزشی برای سیستم موتور دیزل.....	۱-۳-۳
۴۴.....	استخراج قانون کنترلی مود لغزشی برای سیستم موتور دیزل.....	۱-۱-۳-۳
۴۵.....	تحلیل پایداری برای روش کنترل مود لغزشی.....	۲-۱-۳-۳
۴۶.....	شبیه‌سازی کنترل مود لغزشی برای موتور دیزل.....	۳-۱-۳-۳
۵۱.....	کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتور دیزل.....	۴
۵۲.....	مقدمه.....	۱-۴
۵۳.....	استخراج قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتور دیزل.....	۲-۴
۵۵.....	تحلیل پایداری بر اساس قانون کنترلی مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا.....	۳-۴
۵۸.....	شبیه‌سازی قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتور دیزل.....	۴-۴
۶۵.....	نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....	۵
۶۶.....	مقایسه عملکرد قوانین کنترل استفاده شده برای موتور دیزل.....	۱-۵
۶۷.....	نتیجه‌گیری.....	۲-۵
۶۸.....	پیشنهادها.....	۳-۵

۶۹.....	پیوست	۶
۷۱.....	مراجع	۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ طرح کلی از یک موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژر ..... ۶
- شکل ۲-۱ طرح یک سیستم موتور دیزل مجهز به EGR و VGT ..... ۸
- شکل ۳-۱ پیکربندی سیستم خروجی موتور مجهز به VGT ..... ۹
- شکل ۴-۱ ساختمان کنترلی ساده‌شده یک موتور دیزل مجهز به توربوشارژر ..... ۱۰
- شکل ۱-۲ دیاگرام کلی از موتور دیزل توربوشارژر مجهز به EGR و VGT ..... ۲۰
- شکل ۱-۳ دیاگرام بلوکی خطی‌سازی ورودی-حالت ..... ۳۲
- شکل ۲-۳ دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته با استفاده از روش خطی‌سازی ورودی-خروجی ..... ۳۵
- شکل ۳-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۳۸
- شکل ۴-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۳۸
- شکل ۵-۳ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۳۹
- شکل ۶-۳ خطای ردیابی فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۳۹
- شکل ۷-۳ خطای ردیابی فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۴۰
- شکل ۸-۳ خطای ردیابی توان کمپرسور با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۴۰
- شکل ۹-۳ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۴۱
- شکل ۱۰-۳ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۴۱
- شکل ۱۱-۳ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون خطی‌سازی پس‌خورد ..... ۴۲
- شکل ۱۲-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۶
- شکل ۱۳-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۷
- شکل ۱۴-۳ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۷
- شکل ۱۵-۳ خطای ردیابی برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۸
- شکل ۱۶-۳ خطای ردیابی برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۸
- شکل ۱۷-۳ خطای ردیابی برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۹
- شکل ۱۸-۳ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۴۹
- شکل ۱۹-۳ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۵۰

- شکل ۳-۲۰ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی ..... ۵۰
- شکل ۴-۱ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۵۹
- شکل ۴-۲ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۵۹
- شکل ۴-۳ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۰
- شکل ۴-۴ خطای ردیابی فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۰
- شکل ۴-۵ خطای ردیابی فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۱
- شکل ۴-۶ خطای ردیابی توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۱
- شکل ۴-۷ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۲
- شکل ۴-۸ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۲
- شکل ۴-۹ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون کنترل RISE ..... ۶۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ مقادیر پارامترهای استاتیکی موتور دیزل..... ۲۷
- جدول ۱-۳ مسیر مطلوب برای ردیابی متغیرهای حالت سیستم ..... ۳۷
- جدول ۱-۵ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از خطی‌سازی پس‌خورد.. ۶۶
- جدول ۲-۵ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از روش مود لغزشی ..... ۶۷
- جدول ۳-۵ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از روش RISE ..... ۶۷

## علائم اختصاری

$AF$	نسبت هوا به سوخت
$N$	سرعت موتور
$p_1$	فشار مانیفلد ورودی
$p_2$	فشار مانیفلد خروجی
$p_a$	فشار محیط
$T_1$	دمای مانیفلد ورودی
$T_2$	دمای مانیفلد خروجی
$T_e$	دمای گاز خروجی از موتور
$T_c$	دمای هوا در مجرای خروجی کمپرسور
$T_{egr}$	دمای گاز بازخورانی وارد شده به مانیفلد ورودی
$m_1$	جرم گاز در مانیفلد ورودی
$m_2$	جرم گاز در مانیفلد خروجی
$F_1$	کسر گاز سوخته در مانیفلد ورودی
$F_2$	کسر گاز سوخته در مانیفلد خروجی
$V_1$	حجم مانیفلد ورودی
$V_2$	حجم مانیفلد خروجی
$P_c$	توان کمپرسور
$P_t$	توان توربین
$\omega_{tc}$	سرعت توربوشارژر
$J_{tc}$	ممان اینرسی توربوشارژر
$W_f$	نرخ سوخت موتور مورد نیاز توسط راننده
$W_c$	دبی جرمی هوای کمپرسور
$W_t$	دبی جرمی گاز توربین
$W_e$	دبی جرمی کل در موتور
$W_{egr}$	دبی جرمی بازخورانی گاز سوخته
EGR	کسر جریان بازخورانی گاز سوخته
$\eta_c$	بازده آیزنتروپیک کمپرسور
$\eta_t$	بازده آیزنتروپیک توربین

$\eta_m$

بازده مکانیکی توربوشارژر

$C_v$

ظرفیت گرمایی ویژه در حجم ثابت

$C_p$

ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت

$\gamma$

نسبت ظرفیت گرمایی ویژه

R

ثابت جهانی گاز





# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ پیشگفتار

امروزه استفاده از موتورهای دیزل در خودروهای سواری به شدت افزایش یافته است، به همین دلیل طراحی موتورهای مذکور باید به نحوی باشد که پاسخگوی نیازهای خودرویی باشد. ناگفته پیداست که طراحی موتورهای دیزل مورد استفاده در خودرو متفاوت از موتورهای دیزل مورد استفاده در سایر صنایع است. امروزه کنترل‌کننده‌ها، گسترش زیادی یافته‌اند که کاربرد آن‌ها در موتورهای احتراق داخلی نیز بسیار مورد توجه بوده است. پارامترهای مؤثر زیادی در این سیستم‌ها وجود دارد که کنترل دقیق آن‌ها می‌تواند تأثیر زیادی در بهبود عملکرد این سیستم‌ها داشته باشد و می‌تواند منجر به افزایش راندمان، کاهش آلایندگی و کاهش مصرف سوخت شود.

موتورهای دیزل، سیستم‌های نوینی به‌شمار می‌آیند که تحقیقات وسیعی در خصوص طراحی سیستم‌های مدیریت هوشمند آن‌ها نیز در حال انجام است. یکی از روش‌هایی که باعث کاهش آلایندگی و افزایش بازدهی در موتورهای دیزل می‌شود، استفاده از سیستم بازخورانی گازهای خروجی<sup>۱</sup> و همچنین سیستم موقعیت‌یابی میل بادامک و نیز توربین‌های با هندسه متغیر<sup>۲</sup> است. هدف اصلی برای موتورهای دیزل مجهز به محرک‌های بازگردانی گازهای خروجی و توربوشارژرها با هندسه متغیر، تأمین کردن مقدار هوا و همین‌طور کسر مناسب بازگردانی گازهای خروجی است. ناکافی بودن مقدار هوا منجر به افزایش ذرات ریز منتشر شده و احتمالاً پیدایش دود در فضا می‌شود و این در حالی است که کسر بازگردانی گازهای خروجی نیز باعث افزایش انتشار ناکس<sup>۳</sup> است. در روش بازخورانی گازهای خروجی، دود خروجی موتور به‌منظور کاهش دمای موتور از راه سیستم ورودی با استفاده از توربوشارژر به موتور بازگردانده می‌شود. کاهش دمای موتور باعث کاهش سرعت شعله و کاهش آلایندگی موتور می‌شود. مقدار و زمان‌بندی بازگردانی دود خروجی در شرایط مختلف، نیاز به یک سیستم کنترل دقیق دارد. با تغییر میزان دود بازگردانده شده به موتور، نسبت هوا به سوخت موتور هم در شرایط مختلف تغییر می‌کند. در موتورهای دیزل مدرن، کنترل نرخ بازگردانی گازهای خروجی و نسبت هوا به سوخت<sup>۴</sup> برای تولیدکنندگان اهمیت دارد. برای تحقق نیازهایی از جمله، تنظیم مقدار گازهای خروجی به داخل مانیفولد ورودی و برخورد این

---

<sup>1</sup> Exhaust Gas Recirculation (EGR)

<sup>2</sup> Variable Geometry Turbine (VGT)

<sup>3</sup> NO<sub>x</sub>

<sup>4</sup> Fuel-Air Ratio (AFR)

گازها با پرّه‌های توربین، ابزارهای سخت‌افزاری مانند شیر بازگردانی گازهای خروجی و شیر توربوشارژ با هندسه متغیر معرفی شده‌اند و الگوریتم‌های کنترلی متناسب در این خصوص طراحی شده است. هدف اصلی کنترل مسیر هوا، تنظیم کردن نسبت هوا به سوخت و نرخ کسر بازگردانی گازهای خروجی در مانیفولد ورودی با طراحی شیرهای آن‌ها است. پیش از این، طراحی پارامترهای کنترل‌کننده‌های مشتقی انتگرالی تناسبی<sup>1</sup> با سختی و زمان‌بر بودن برای نقطه کار در موتور همراه بود. الگوریتم‌های کنترل غیرخطی به نظر می‌رسید که راه امیدوارکننده‌ای را برای کارایی کنترل مسیر هوا فراهم کرده‌اند، اما هنوز نیاز برای بهبود کارایی این کنترل‌کننده‌ها احساس می‌شود. یکی از روش‌های کنترل غیرخطی، کنترل به روش خطی‌سازی است که برای مدل دینامیکی غیرخطی موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ، مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله کنترل‌کننده‌هایی که مبتنی به روش خطی‌سازی می‌باشند، می‌توان به فیدبک خطی‌ساز به روش ورودی و خروجی، اشاره کرد. با این حال، مشکل اصلی در طراحی کنترل‌کننده‌ها برای موتور دیزل، وجود پارامترهای دارای عدم قطعیت و سیگنال‌های اندازه‌گیری خطا در مدل دینامیکی موتور دیزل بوده که در عملکرد کنترل آن نیز مؤثر واقع می‌شود. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در حوزه‌ی طراحی کنترل‌کننده‌ها برای موتورهای دیزل با وجود عدم قطعیت و اغتشاشات در مدل دینامیکی موتور دیزل انجام گرفته است. از جمله کنترل‌کننده‌هایی که برای جبران عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات در مدل موتور دیزل استفاده شده، کنترل به روش مود لغزشی است. کنترل به روش مود لغزشی خود، یکی از روش‌های کنترل مقاوم است که در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات در مدل دینامیکی می‌تواند پایداری مجانبی را برای سیستم مورد نظر فراهم آورد.

## ۱-۲ مروری بر مفاهیم مورد نیاز در موتورهای دیزل

رودلف دیزل مبدع طرح موتورهای دیزل می‌باشد. وی در ابتدای امر در این اندیشه بود که موتوری طرح نماید تا نسبت به موتورهای بنزینی و بخاری آن زمان، بازده بیشتری داشته باشد. با این فکر، درصد طرح موتوری برآمد که بتواند هوای خالص را در زمان تراکم، تحت فشار زیاد قرار داده، از گرمای هوای متراکم شده احتراق خودبه‌خود استفاده نماید. لازمه‌ی این تئوری آن بود که فشار زیادی در انتهای زمان تراکم، حاصل گردد تا گرمای زیادی در محفظه احتراق به‌وجود آورد، با تزریق سوخت در لحظه‌ی مناسب، احتراق خودبه‌خود ایجاد شود.

---

<sup>1</sup> Proportional Integral derivative

درواقع این طرح که ایده‌ی جدیدی نسبت به موتورهای موجود آن زمان بود، توانست تحوّل در صنعت پدید آورد. تا آن موقع، تولید قدرت به روش موتورهای بنزینی یا بخاری رایج بود-در نوع بنزینی که عمومیت بیشتری دارد، بنزین قبل از ورود به سیلندر با هوا مخلوط شده، سپس این مخلوط تا اندازه‌ای که به خودسوزی نیفتد، تحت فشار تراکم قرار می‌گیرد-درنهایت با جرقه‌ی شمعی که در داخل سیلندر زده می‌شود، عمل احتراق تکمیل می‌گردد. ولی در موتور دیزل فقط هوای خالص آن قدر تحت فشار تراکم قرار می‌گیرد تا به حالت سوزان برسد به‌طوری‌که با تزریق سوخت «اُتمیزه» عمل احتراق خودبه‌خود تحقق پذیرد.

رودلف دیزل اولین موتور دیزل خود را در سال ۱۹۸۲ میلادی در برلین به ثبت رساند. لازم است بدانیم که اولین موتور ساخته‌شده‌ی او با گرد زغال‌سنگ کار می‌کرد. تا آن‌که بعداً توانست سوخت مایع را جایگزین آن نماید.

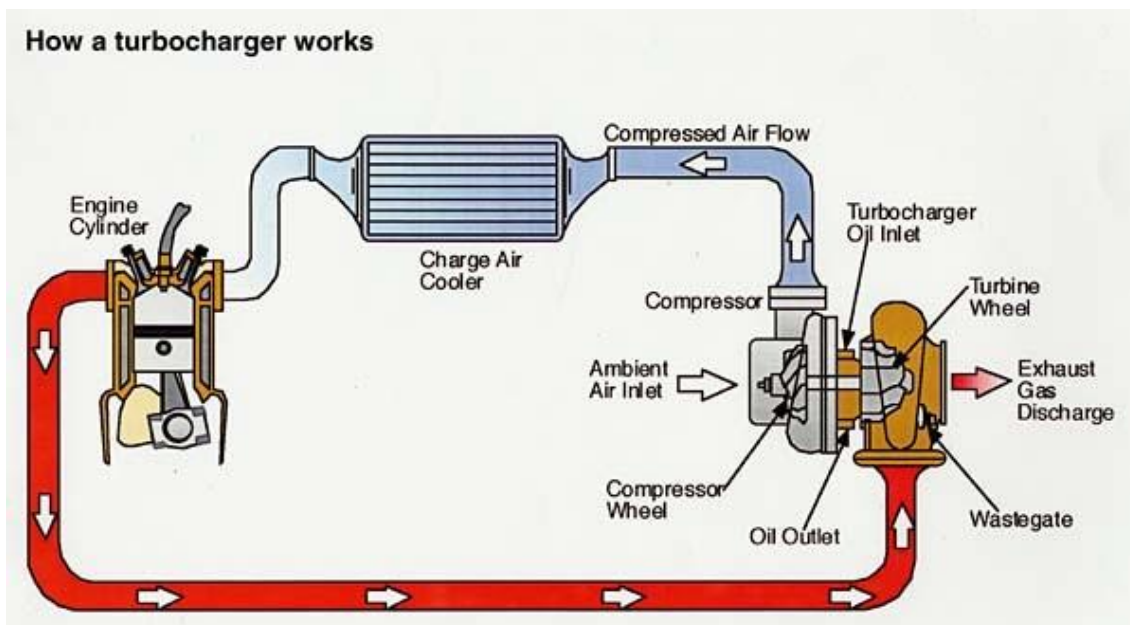
در آن زمان سیستم دیزل در موتورهای با دور سریع متداول نبود، اما در سایر موارد به‌سرعت کاربرد پیدا نمود، با این حال نیاز به استفاده از موتور دیزلی در سواری‌ها و موتورهای کوچک به شدت احساس می‌شد. بزرگ‌ترین مشکل برای دستیابی به این امر، مسئله‌ی سوخت مایع و نحوه‌ی تزریق سوخت در موتور بود تا آن‌که در اواخر سال ۱۹۲۲ روبرت بوش تصمیم گرفت این معضل را حل نماید. وی اطلاعات تئوری و تکنیکی لازم را فرا گرفته بود و به‌علاوه در زمان او مهندسی تولید، پیشرفت قابل‌توجهی نموده بود؛ بنابراین روبرت بوش با گروه خود در سال ۱۹۲۳، توانست چندین پمپ انژکتور بسازد و در اواسط همان سال آزمایش‌های لازم را روی موتور دیزل با پمپ انژکتور انجام دهد. پمپ‌های اختراعی او توانست مسئله‌ی سرعت زیاد موتورهای دیزلی را حل نماید و اختراع رودلف دیزل را تکامل بخشد، به‌طوری‌که امروزه برخی از خودروهای دیزلی قادرند با سرعت ۳۶۰ کیلومتر در ساعت حرکت کرده، فقط ۱۳٫۶۱ لیتر سوخت در یک‌صد کیلومتر مصرف نمایند و یا با سرعت ۲۵۰ کیلومتر در ساعت، فقط ۶٫۱ لیتر سوخت در صد کیلومتر مصرف کنند.

تقریباً یک قرن بعد از اختراع موتور به‌وسیله‌ی رودلف دیزل اهمیت آن در صنایع امروزی به حدّی مشهود گردیده که هر کارخانه‌ی سازنده‌ی اتومبیل اروپایی، حداقل یک خط تولید خود را به آن اختصاص داده است. این استقبال را می‌توان در مصرف کم، ارزانی سوخت، بازدهی بیشتر، امکان مصرف سوخت نامرغوب‌تر، قدرت بیشتر و احتراق کامل‌تر موتور دیزل نسبت به موتورهای بنزینی دانست.

## ۱-۲-۱- موتورهای دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ

برای دستیابی به بازدهی بیشتر در موتورهای احتراق داخلی، سیستم توربوشارژ در سال ۱۹۰۵ توسط آلفرد بوچی، یک مهندس مکانیک سوئیسی اختراع شد. توربوشارژ در واقع مکنده پر قدرت هواست که جریان هوای ورودی به موتور را فشرده می‌کند و باعث می‌شود تا هوای بیشتری وارد سیلندرهاى موتور شود. بدیهی است، هر قدر هوای بیشتری وارد سیلندرهاى موتور شود، احتراق در سیلندر با حالت بهینه-تری انجام می‌شود. به‌طور کلی، یک موتور مجهز به سیستم توربوشارژ، انرژی بیشتری در مقایسه با یک موتور فاقد توربوشارژ تولید می‌کند. توربوشارژ در حقیقت نسبت قدرت به وزن موتور را افزایش می‌دهد. بدین‌صورت که از جریان خروجی اگزوز، یک توربین را که به یک پمپ هوا متصل است، می‌چرخاند. توربین متصل به توربوشارژ با سرعت دورانی بیش از ۱۵۰۰۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد که برآورد شده است این سرعت ۳۰ برابر بیشتر از دور موتور است.

توربوشارژ از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: (۱) توربین و (۲) کمپرسور. همان‌طوری که گفته شد، توربوشارژ به خروجی اگزوز متصل است. گازهای خروجی از اگزوز، توربین را می‌چرخاند. از آنجایی که توربین نیز توسط یک محور به کمپرسور متصل است، کمپرسور می‌چرخد و با مکش هوای بیرون، هوای فشرده شده را وارد پیستون می‌کند. هر قدر حجم گاز ورودی به داخل توربین بیشتر باشد، سرعت دورانی توربین نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه، هوای فشرده بیشتری نیز وارد سیلندر موتور می‌شود. پس از این‌که مخلوط سوخت و هوا در داخل سیلندر متراکم شد، احتراق انجام می‌شود و انرژی مورد نیاز تولید می‌شود. این انرژی در حقیقت از فشار گاز پس از احتراق به‌دست‌آمده است که با توجه به اظهار نظر محققان، فشاری برابر با ۳۰ اتمسفر دارد. انرژی حاصل از فشار گاز پس از احتراق را می‌توان به‌صورت مفید استفاده کرد. گفتنی است، در موتورهایی که مکش هوا به‌صورت معمولی و بدون حضور توربوشارژ صورت می‌گیرد، انرژی حاصل از فشار گاز پس از احتراق به‌سادگی تلف می‌شود، اما سیستم توربوشارژ به‌گونه‌ای طراحی شده است که از این انرژی و نیروی حاصل از آن برای چرخاندن پره‌های توربین استفاده می‌کند. شکل ۱-۱ طرح کلی از یک موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱ طرح کلی از یک موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ

برای حصول احتراق بهتر و کامل تر و در نتیجه کسب راندمان بالاتر، باید هوای بیشتری وارد سیلندر موتور شود. این هوا باید به صورت فشرده و خشک به درون سیلندر موتور فرستاده شود. حال اگر خنک کاری هوای ورودی به داخل سیلندر موتور به خوبی صورت نگیرد، نتیجه مطلوب نخواهد بود؛ زیرا با افزایش فشار و سرعت دوران، دما افزایش می‌یابد. افزایش دما نیز باعث عدم تراکم مولکول‌های هوا می‌شود و در نتیجه نسبت مناسبی از هوا وارد سیلندر موتور نخواهد شد. به عبارت دیگر، هرچه دما بیشتر شود، تراکم هوا کاهش خواهد یافت. هوایی که توسط توربوشارژ، فشرده و وارد سیلندر می‌شود، بسیار گرم است. این هوا پس از ورود به سیلندر و فشرده شدن توسط پیستون، باز هم گرم‌تر می‌شود. مشکل اساسی در این مرحله این است که حال اگر سوخت به داخل سیلندر پاشیده شود، پیش از وقوع احتراق، این عمل توسط هوای داغ ورودی انجام می‌شود که به آن احتراق زودرس یا خودسوزی می‌گویند. این پدیده با بد کار کردن موتور همراه است که به اصطلاح به آن لگدزدن موتور نیز گفته می‌شود. برای جلوگیری از وقوع چنین پدیده‌ای، استفاده از سیستم خنک‌کننده الزامی است. از این رو باید هوا را تا حد امکان خنک کرد. بدین منظور از یک نوع رادیاتور که معمولاً از جنس آلومینیوم است، استفاده می‌شود. هوایی که توسط توربوشارژ متراکم می‌شود، از این سیستم خنک‌کننده عبور کرده و دمای آن تا حد مطلوب کاهش می‌یابد. سپس هوای متراکم و خنک، وارد سیلندر می‌شود و پدیده احتراق به‌طور کامل و بهینه صورت می‌گیرد.

کمپرسور، پرده‌های مخصوصی دارد که در واقع وظیفه مکش هوا و متراکم کردن آن را به عهده دارد. این پرده‌ها با دوران کردن، هوا را به داخل توربوشارژر می‌مکند و هوا از مرکز تیغه‌ها وارد توربوشارژر می‌شوند. سپس هوا توسط کمپرسور متراکم می‌شود و با فشار بسیار زیاد به خارج کمپرسور هدایت می‌شود.

پرده‌های توربین در برخورد با گاز آگروز به چرخش درمی‌آیند و در این مرحله توربین شروع به چرخش می‌کند. چرخش توربین سبب چرخش کمپرسور می‌شود و بدین طریق سیستم فعال می‌گردد. توربین و کمپرسور در یک محفظه حلزونی شکل قرار دارند. هر چه اندازه این محفظه کوچک‌تر باشد، فشار گازهای خروجی از آگروز بالاتر است و حرکت دورانی توربین سریع‌تر خواهد شد. هرچه محفظه توربین بزرگ‌تر باشد، مدت زمان بیشتری نیاز است تا حرکت دورانی توربین به حداکثر دور برسد. گاهی محفظه‌ها تا حد سرخ شدن گرم می‌شود که برای خنک کردن آن‌ها از آب، روغن، یا ترکیبی از هر دو استفاده می‌شود. یکی دیگر از قسمت‌های مهم توربوشارژر، خروجی آن است. دود آگروز پس از چرخاندن توربین باید از محفظه توربین خارج شود که این کار از طریق این دریچه صورت می‌گیرد. خروجی توربوشارژر با توجه به محفظه توربین، انواع مختلفی دارد که می‌توان آن را به دو دسته کلی تقسیم کرد: (۱) نوع فلانچی که به توربوشارژر پیچ می‌شود و (۲) نوع کمربندی که توسط دو عدد واشر و یک بست مخصوص به توربوشارژر متصل می‌گردد.

جهت تنظیم فشار داخلی توربوشارژر و جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد آن، از یک سوپاپ استفاده شده است. بسیاری از توربوشارژرها یک گذرگاه فرعی<sup>۱</sup> دارند که باعث می‌شود در توربوشارژهای کوچک، میزان چرخش آن‌ها از حد مجازی تجاوز نکند. در واقع گذرگاه فرعی، فشار داخل توربین هوا را کنترل می‌کند و اگر فشار بالاتر از حد مجاز شود، سوپاپ باز شده و مقداری از هوا به خارج از محفظه توربین، هدایت می‌شود. از این طریق، فشار همواره در سطح مطلوبی باقی می‌ماند.

## ۲-۲-۱ موتورهای دیزل مجهز به سیستم EGR و VGT

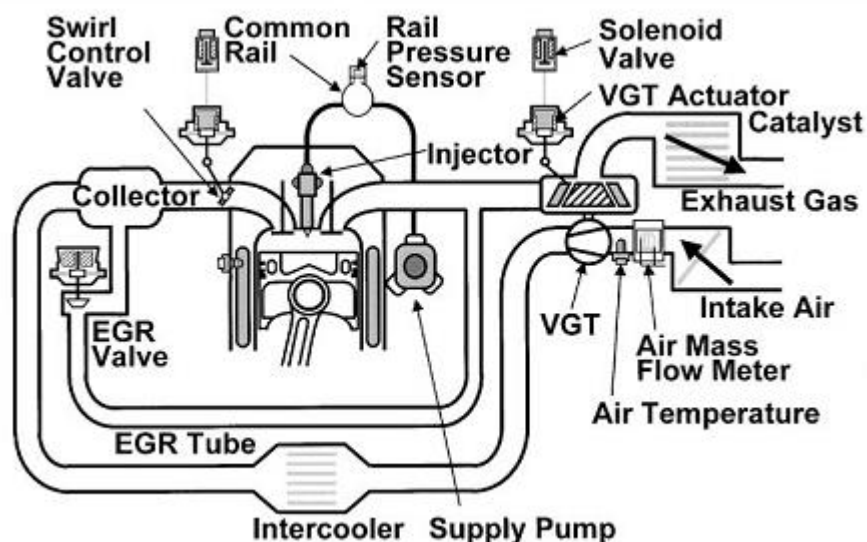
به‌منظور کاهش دود و همین‌طور نیتروژن اکسید منتشر شده توسط موتور، تنظیم و مدیریت بین محرکه‌های EGR و VGT که همان شیرهای اتصال از مانیفولد خروجی به مانیفولد ورودی هستند، بسیار حائز اهمیت است. شیر بازگردانی گاز خروجی بین مسیر مانیفولد خروجی و مانیفولد ورودی تعبیه شده که

---

<sup>۱</sup> Bypass

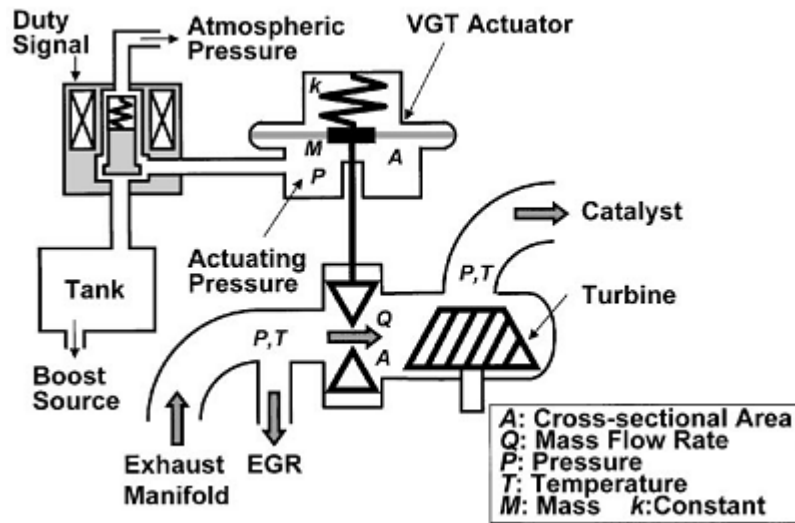
به وسیله‌ی آن می‌توان مقدار جریان جرمی گاز خروجی بازگردانی شده به موتور تنظیم شود و در نهایت، مخلوط جریان‌ها، دمای احتراق و نیتروژن اکسید کاهش یابد و به نیازی که سوئمنند برای محیط‌زیست است، دست پیدا کرد.

یک توربوشارژر با هندسه متغیر شامل کمپرسور و توربین است که توسط یک شفت به یکدیگر مرتبط شده‌اند. هوا با فشردگی بالا برای ورود به سیلندرها تأمین می‌شود که این جرم هوای بزرگ‌تر می‌تواند با مقدار سوخت و محصول بیشتر سوزانده شود و گشتاور بزرگ‌تری تولید شود. همان‌طور که بیان شد، انرژی گازهای خروجی توسط توربین به انرژی مکانیکی تبدیل می‌گردد و باعث چرخش شفت متصل شده از توربین به کمپرسور می‌شود. شفت با چرخش خود، سبب به حرکت درآوردن کمپرسور می‌شود. کمپرسور چگالی هوای موجود برای موتور را افزایش می‌دهد و در نتیجه توان موتور و گشتاور خروجی از موتور بیشتر می‌شود. در توربین با هندسه متغیر، از پرده‌های هدایتگر استفاده می‌شود، به این صورت که با تنظیم وضعیت پرده‌های توربین و برخورد گازهای خروجی با پرده‌ها، انرژی انتقال‌یافته از توربین به کمپرسور بیشتر شود و هوای بیشتری وارد مانیفولد ورودی شود. شکل ۱-۲ طرح یک سیستم موتور دیزل مجهز به سیستم بازخورانی گازهای خروجی و توربوشارژر با هندسه متغیر را نشان می‌دهد. شکل ۱-۳ پیکربندی سیستم خروجی با یک سیستم مجهز به VGT را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۲ طرح یک سیستم موتور دیزل مجهز به EGR و VGT [۱]

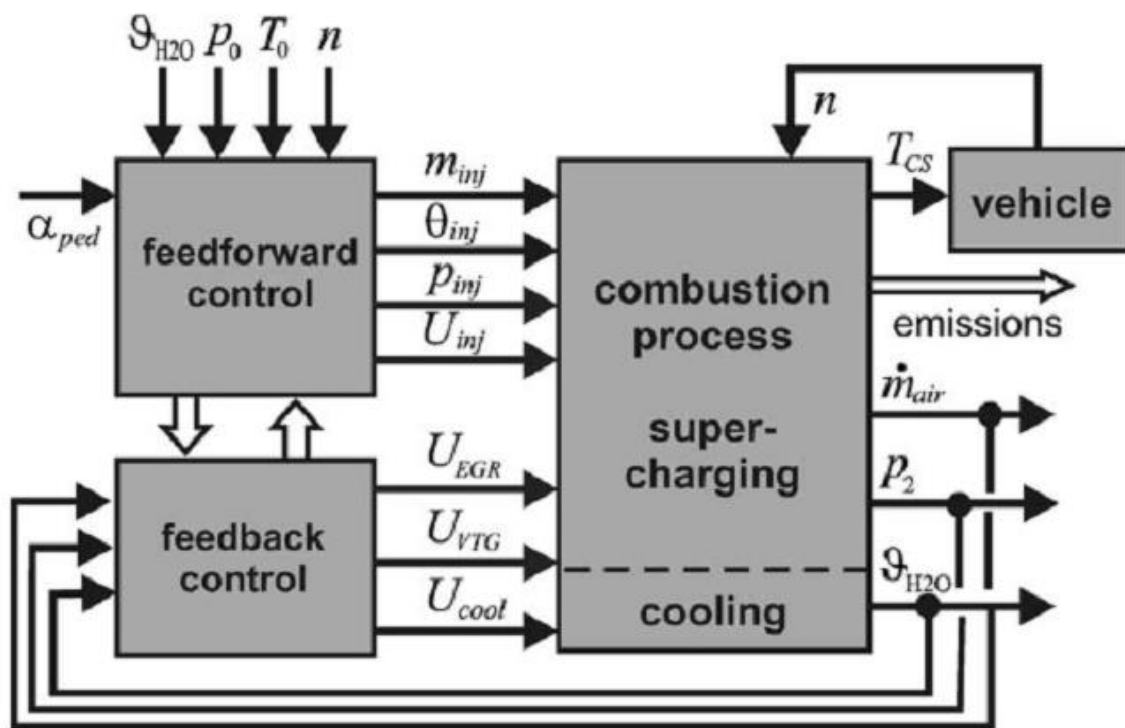




شکل ۳-۱ پیکر بندی سیستم خروجی موتور مجهز به VGT [۱]

### ۳-۱ مروری بر کنترل موتورهای دیزل

هر روز بر شمار اجزای عملگر موتورهای درون سوز افزوده می شود. پارامترهای کنترلی موتورهای دیزل تا سال ۱۹۸۷ تنها منحصر به جرم سوخت پاششی و زاویه شروع پاشش بود. اما امروزه پارامترهای کنترلی همچون وضعیت شیر بازگردانی گازهای سوخته، هندسه متغیر توربین و فشار ریل سوخت، افزایش یافته است. هدفی که در کنترل موتورهای دیزل، محققان به دنبال آن هستند، تأمین گشتاور مورد نیاز با کمترین میزان مصرف سوخت و همچنین کاهش انتشار گازهای خروجی است. شکل ۳-۱، ساختمان کنترلی ساده شده یک موتور دیزل مجهز به توربوشارژر را نمایش می دهد.



شکل ۴-۱ ساختمان کنترلی ساده شده یک موتور دیزل مجهز به توربوشارژ [۲]

سیستم‌های کنترل موتور می‌تواند بر اساس ۵ تا ۱۰ پارامتر ورودی و ۵ تا ۸ پارامتر خروجی طراحی شوند، که این خود منجر به یک سیستم کنترلی چند ورودی-چند خروجی پیچیده خواهد شد. از آنجاکه اکثر توابع کنترلی به صورت پیش‌خور طراحی می‌گردد، لازم است تا مدل‌های بسیار دقیق مورد استفاده قرار گیرد [۲].

سیستم‌های کنترلی پیش‌خور در موتورهای دیزل در کنترل‌های مربوط به فشار توربوشارژ به‌وسیله‌ی دریچه تنظیم فشار محفظه توربوشارژ<sup>۱</sup> و نیز سیستم کنترل دمای سیال خنک‌کاری مورد استفاده قرار گیرند. همچنین برخی سیستم‌های کنترل پیش‌خور برای اجزای جانبی موتور، نظیر سیستم کنترل فشار روغن و سوخت وجود دارد. تمامی کنترل‌های بیان‌شده باید در شرایط مختلف آزمایش‌شده و از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شود.

<sup>۱</sup> Wastegate

اکثر سیستم‌های کنترل پیش‌خور به‌صورت جداول جستجوی دوبعدی و یا جداول جستجوی یک‌بعدی در سیستم کنترل تعبیه می‌شوند. استفاده از جداول جستجو به علت ماهیت غیرخطی استاتیکی و دینامیکی موتور است. برخی توابع موجود در سیستم‌های کنترلی مبتنی بر مدل‌های فیزیکی است که با استفاده از ضرایب اصلاح، تعدیل گشته‌اند، لیکن برخی توابع تنها با استفاده از آزمون‌های سیستماتیک موتور روی دینامومتر میسر است [۲].

## ۱-۴ مدل‌سازی دینامیکی موتورهای درون‌سوز

به‌منظور طراحی یک الگوریتم کنترلی غیرخطی مبتنی بر مدل به یک مدل غیرخطی از موتور نیاز است. روش گشتاور متوسط یکی از روش‌های متداول در مسائل مربوط به کنترل موتور است. مدل‌های مورد استفاده می‌توانند به‌سادگی یک جدول جستجو و یا به پیچیدگی یک مدل احتراقی چند ناحیه‌ای سه‌بعدی باشند.

فلور و همکارانش برای مدل‌های خطی موتور از یک فرآیند شناسایی موسوم به‌دفعات دوتایی شبه‌اتفاقی<sup>۱</sup> استفاده نمودند که قادر بود یک تابع انتقال گسسته برای شبیه‌سازی عملکرد موتور ارائه دهد. روش ارائه شده توسط آن‌ها یکی از اولین روش‌های موفقیت‌آمیزی است که قادر بود عملکرد موتور دیزل را به شکل مناسبی شبیه‌سازی نماید. مدل‌های پیوسته خطی شده محلی که با استفاده از روش شناسایی فرکانسی یا اغتشاشات کم دامنه عمل می‌نماید نیز از روش‌های مرسوم برای ایجاد مدل‌های خطی از عملکرد موتور است.

روش‌های شبیه‌سازی غیرخطی مبتنی بر مدل را می‌توان به چند گروه کلی تقسیم‌بندی نمود: روش-های شبه پایستار<sup>۲</sup>، روش پر و خالی شدن<sup>۳</sup> و روش مشخصه. این مدل‌های مبتنی بر اصول ترمودینامیک، سالیان متمادی است که برای طراحی و تعیین کارآیی موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. البته مدل‌های معدودی برای مقاصد کنترلی موتورهای دیزل مورد استفاده قرار گرفته است. لیکن با پیشرفت فنآوری‌های کامپیوتری مدل‌های کنترل غیرخطی و نیز الگوریتم‌های مشاهده‌گر روزبه‌روز در حال توسعه می‌باشند. مدل‌سازی موتورهای دیزل مجهز به توربوشارژر با استفاده از روش شبه پایستار در اوایل دهه ۱۹۵۰ آغاز

---

<sup>1</sup> Pseudo Random Binary Sequences (P.R.B.S.)

<sup>2</sup> Quasi-Steady

<sup>3</sup> Fill and Empty method

شد. لدجر و وال‌اس‌لی با استفاده از کامپیوترهای هیبریدی، مدل موتورهای دیزل مجهز به توربوشارژ را توسعه دادند. وینتربور و همکارانش از روش پر و خالی شدن برای توسعه مدل دینامیکی موتور دیزل استفاده نمودند. آن‌ها از این طریق، نقصان مدل‌های شبه پایستار را در تخمین فشار چند راهه‌های موتور جبران نمودند و نتایج واقعی‌تری نسبت به مدل‌های شبه پایستار کسب نمودند. وات سون یک مدل شبیه‌سازی موتور دیزل را برای طراحی سامانه‌های الکترونیکی کنترل موتور دیزل گسترش داد. روش کامل مدل‌سازی روشی است که فرآیندهای جزئی احتراق داخل سیلندر را با استفاده از تحلیل‌های احتراق چند ناحیه‌ای و فرآیندهای مختلفی برای کاهش زمان شبیه‌سازی و نیز کاهش مخارج اجرای مدل‌سازی ابداع شده و در مورد استفاده قرار گرفته است. آقای لی از یک شبیه‌سازی سیکلیک برای یک موتور تک سیلندر دیزل استفاده نمود. در مدل وی، یک تابع درجه دوم معکوس برای پیش‌بینی رفتار فشار احتراق داخل سیلندر مورد استفاده قرار گرفت [۳].

اصولاً دو روش کلی برای مدل‌سازی کنترلی موتور وجود دارد که در ادامه به تشریح این روش‌ها پرداخته شده است:

الف) روش مقدار متوسط<sup>۱</sup>

ب) روش سیلندر به سیلندر

### ۱-۴-۱ روش مقدار متوسط

روش مقدار متوسط یکی از پرکاربردترین روش‌های مدل‌سازی دینامیکی موتور است. در این روش مقادیر مورد استفاده در مدل به صورت متوسط مقادیر حادث شده در ۵ الی ۱۰ سیکل متوالی موتور صورت می‌پذیرد. این مدل دارای تعداد زیادی معادله‌های جبری و نیز معادله‌های دیفرانسیل است. به منظور شناسایی پارامترهای مدل می‌توان از اطلاعات حالت پایا و گذرای موتور استفاده نمود. لیکن به منظور صحت سنجی مدل تنها از اطلاعات حالت گذرای موتور استفاده می‌نمایند.

از آنجاکه در این نوع مدل‌سازی تنها مقادیر متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا اغتشاش‌های پرفرکانس مدل نخواهد شد. اصولاً پهنای باند مدل‌سازی این روش کم است. مزیت این روش مربوط به

---

<sup>۱</sup> Mean value model (MVM)

معادله‌های ساده و محاسبه‌های سریع آن می‌باشد. این روش همچنین می‌تواند در فرآیند تطبیق توربوشارژ و موتور مورد استفاده قرار گیرد. یکی از نقاط ضعف این نوع مدل‌سازی وابستگی شدید آن به اطلاعات آزمایشگاهی است. اصولاً متغیر مستقل در این نوع مدل‌سازی زمان است. بسیاری از این پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص مدل‌سازی موتور مبتنی بر این دیدگاه است. این نوع مدل‌سازی برای طراحی کنترلرهای عمومی موتور نظیر کنترل میزان پاشش کلی پاشش‌گرها، کنترلر دور آرام و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۱-۴-۲ روش سیلندر به سیلندر

روش مدل‌سازی سیلندر به سیلندر موتور مبتنی بر روش پر و خالی شدن موتور است. در این روش اصولاً، یک مدل احتراق تک ناحیه‌ای برای شبیه‌سازی تئوری نرخ سوختن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت سیلندر به‌عنوان یک حجم کنترل با دما و فشار یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. فشار سیلندر با استفاده از مدل مبتنی بر زاویه لنگ تخمین زده می‌شود. همچنین به‌منظور کنترل سیلندر به سیلندر موتور، محاسبه پارامترهای غیرخطی و نیز کاربردی‌های عیب‌یابی از این نوع مدل‌سازی استفاده می‌شود. پهنای باند مدل‌سازی در این روش نسبت به روش مقدار میانگین بسیار بالا است.

حجم محاسباتی و نیز دقت مربوط به این مدل‌سازی به نسبت مدل‌سازی قبلی بسیار بالا است. مدل‌سازی توربین و چندراهه ورودی و خروجی در مدل‌سازی سیلندر به سیلندر همانند مدل‌سازی مقدار متوسط است. تفاوت این دو نوع مدل‌سازی در شیوه تخمین گشتاور (احتراق)، شبیه‌سازی جریان‌های سوپاپ‌های خروجی و ورودی و نیز مدل دینامیکی میل‌لنگ است [۳].

### ۱-۵ روش‌های کنترلی برای موتورهای دیزل مجهز به توربوشارژ

مشکل اصلی در طراحی یک استراتژی کنترلی مناسب، ماهیت متغیرهای غیرخطی مسئله و حضور قیدهایی بر روی ورودی و متغیرهای فرآیند هستند. روش‌های متنوع برای کنترل موتور دیزل اعمال شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کنترل پسگام<sup>۱</sup>، کنترل مقاوم اچ بی‌نهایت<sup>۲</sup> و کنترل مقاوم مود لغزشی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> Backstepping based control

<sup>۲</sup> Robust  $H_\infty$  control

<sup>۳</sup> Sliding mode control

و کنترل پارامترهای خطی متغیر<sup>۱</sup> اشاره کرد. یکی از متداول‌ترین روش‌های کنترل غیرخطی، روش کنترل مقاوم است که برای موتورهای احتراق داخلی مورد بررسی قرار گرفته است [۴].

کنترل نسبت هوا به سوخت برای اولین بار توسط فرد ریکسون و همکارانش روی موتورهای دیزل با طراحی یک کنترلر پسگام بررسی شد. روش طراحی پسگام که به‌طور محلی عملکرد مناسبی را حول نقطه کار به‌دست می‌آورد، باعث می‌شود جریان هوای موتور دیزل در اثر افزایش فشار، رفتار گذرای خوبی، نشان دهد [۵].

روش کنترلی اچ بی نهایت برای موتور دیزل را وان نیوستاد و همکارانش مورد بررسی قرار دادند. این روش کنترلی، کنترل مختصه‌های بازخورانی گازهای خروجی و توربوشارژ با هندسه متغیر را در سرعت-های بالای موتور دیزل مجهز به بازخورانی گازهای خروجی مورد مطالعه قرار می‌دهد در حالی که این مختصه‌ها در بیشتر روش‌های کنترلی در سرعت و توان‌های پایین از موتورهای دیزل، بررسی شده است [۶].

آقای احمدعلی سوفیان و همکارانش روش کنترل مود لغزشی را برای موتورهای دیزل استفاده کردند. در این روش با وجود اغتشاش‌هایی که در موتور دیزل وجود دارد، می‌توان عملکرد سیستم را افزایش داد. ایشان در کار خود به کاهش دادن نوسانات با فرکانس بالا در ورودی کنترلر توجه کرد که این موضوع برای کنترلر، حائز اهمیت است [۷].

آقای جانگ و همکارانش، توانستند روش کنترلی سازگار با پارامترهای خطی متغیر سیستم را در موتور دیزل استفاده کنند. این روش، طراحی و کاربرد بهره‌های مقاوم کنترلی را بر اساس مدل پارامترهای خطی متغیر مرتبه سوم ارائه می‌کند که برای مسیر هوای موتور دیزل توربوشارژ استفاده می‌شود. این روش وقتی که تخمین‌های اعمال شده در مدل سیستم حفظ می‌شود، بهره‌های کنترلی مقاوم را کالیبره می‌کند [۸].

---

<sup>1</sup> Linear parameter-varying control

## ۱-۵-۱- روش کنترلی خطی ساز پسخورد

خطی سازی پسخورد یک روش طراحی کنترلی غیرخطی است که در سال‌های اخیر علاقه تعداد زیادی از علاقه‌مندی تحقیقات را به خود جلب کرده است. ایده‌ی اصلی این روش، آن است که دینامیک سیستم غیرخطی (به‌طور کامل یا جزئی) به خطی تبدیل شوند، طوری که بتوان از روش‌های کنترل خطی استفاده کرد. این روش با روش خطی سازی قراردادی کاملاً متفاوت است (مثلاً خطی سازی ژاکوبین) که در آن خطی سازی پسخورد به وسیله‌ی تبدیل دقیق حالت و پسخورد آن به جای تقریب خطی دینامیک‌ها صورت می‌پذیرد [۹].

ایده‌ی ساده کردن شکل دینامیک‌های سیستم به وسیله نمایش حالت به‌طور کامل هم ناآشنا نیست. به‌عنوان مثال، در مکانیک، کاملاً شناخته‌شده است که شکل و پیچیدگی به مقدار قابل توجهی بستگی به انتخاب چهارچوب مرجع یا مختصات سیستم دارد. روش‌های خطی سازی پسخورد را می‌توان روشی در تبدیل مدل‌های اصلی سیستم به مدل‌های معادل به شکل ساده‌تر در نظر گرفت. بنابراین آن‌ها را می‌توان در توسعه‌ی کنترل‌کننده‌های غیرخطی تطبیقی یا مقاوم نیز استفاده کرد [۹].

خطی سازی پسخورد به‌طور موفقیت‌آمیزی در حل مسائل کنترل عملی به کار گرفته شده است. این مسائل شامل کنترل هلی‌کوپترها، هواپیماهای با عملکرد پیشرفته، ربات‌های صنعتی و ابزار زیست‌پزشکی است [۹].

## ۱-۵-۲- روش کنترلی مود لغزشی

در اوایل سال ۱۹۶۰ در روسیه، ساختار کنترلی به روش مود لغزشی به‌طور گسترده برای کنترل سیستم‌هایی که مدل دینامیکی آن‌ها غیرخطی، همراه با عدم قطعیت در پارامتر، مدل و اغتشاشات خارجی است، پایه‌گذاری شد. کنترل به روش مود لغزشی، عملکرد مناسبی در سیستم‌هایی، از جمله کنترل خودکار پرواز، موتورهای الکتریکی، فرایندهای شیمیایی و سیستم‌های فضایی داشته است. در رباتیک نیز به دلیل وجود اصطکاک، اغتشاش و عدم قطعیت در مدل، از این نوع کنترل‌کننده و ترکیب آن با کنترلر تناسبی مشتقی استفاده شده است. طرح روش کنترلی مود لغزشی برای موتورهای دیزل مجهز به سیستم توربوشارژر توسط آقای احمدعلی سوفیان و همکارانش ارائه شد. این روش که قابل اجرا برای سیستم‌های غیرخطی است، بیشترین محبوبیت را در بین روش‌های کنترل غیرخطی مقاوم دارد. اثبات پایداری در این روش بر اساس پایداری لیاپانوفی انجام می‌گیرد. ویژگی این روش آن است که در

حضور پارامترهای عدم قطعیت و دینامیک مدل نشده در سیستم می‌توان به پایداری مجانبی رسید. ویژگی دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، این است که برخلاف روش‌های کنترلی دیگر از جمله خطی-سازی به روش ورودی و خروجی، نیازی به ویژگی معکوس‌پذیری ماتریس برای سیستم وجود ندارد و یک استراتژی جدیدی برای مقابله با عدم قطعیت‌های سیستم است. برای کنترل سیستم‌ها، دو مسئله مهم و قابل توجه، می‌تواند بیان شود: ۱- رسیدن به پایداری برای سیستم ۲- تلاش کنترلی کمتر. به عبارت دیگر، کنترلی برای سیستم مناسب است که علاوه بر این که در حضور عدم قطعیت‌ها پایداری مجانبی را فراهم می‌کند، بتواند تلاش کنترلی را برای رسیدن به این پایداری، کاهش دهد. یک مشکل مرتبط با کنترل مود لغزشی، پدیده لرزش<sup>۱</sup> در سیگنال کنترل است که فرکانس بالای سیگنال ورودی در کنترل مود لغزشی باعث تحریک دینامیک‌های مدل نشده سیستم می‌شود و ضمن دشواری در پیاده‌سازی، باعث تلفات حرارتی شده و به قطعات مکانیکی آسیب می‌رساند. پدیده لرزش، به علت ناپیوستگی ذاتی که در قانون کنترلی مود لغزشی وجود دارد، ایجاد می‌شود. برای حل این مشکل در روش کنترلی مود لغزشی، از تابع اشباع<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن تابع اشباع، هرچند لرزش در تلاش کنترلی کاهش می‌یابد، اما خطای ردیابی نسبت به حالتی که از تابع اشباع در قانون کنترلی استفاده نشده است، افزایش می‌یابد. همان‌طوری که بیان شد، یکی از اهداف کنترل مناسب، یافتن ساختار کنترلی است که علاوه بر کاهش تلاش کنترلی، خطای ردیابی را نیز کاهش دهد [۱۰].

### ۱-۵-۳ کنترل مبتنی بر روش انتگرال مقاوم علامت خطا

اخیراً استراتژی کنترلی جدید، الهام گرفته از روش مود لغزشی، به نام کنترل انتگرال مقاوم تابع علامت خطا<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۴ توسط آقای ژین و همکارانش ارائه شد. طرح کنترلی انتگرال مقاوم علامت خطا، شامل عبارت بازخوردی انتگرال یگانه تابع علامت خطا و همین‌طور جمله‌ای جهت جبران اغتشاشات کراندار می‌باشد. آقای ژین و همکارانش این تکنیک را با ارائه دادن یک کنترلر ردیابی ناپیوسته برای یک دسته کلی از سیستم‌های مکانیکی غیرخطی که در آن‌ها عدم قطعیت در مدل وجود دارد، استفاده کرده‌اند. استراتژی کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا به‌طور گسترده به‌علت آنکه می‌تواند اغتشاشات و عدم قطعیت‌ها اضافه‌شده به سیستم را با فرض کراندار بودن مشتق زمانی اغتشاشات جبران کند، مورد

---

<sup>1</sup> Chattering

<sup>2</sup> Saturation

<sup>3</sup> Robust integral of the sign of the error



مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. مزیت قابل توجه در این روش کنترلی، این است که در حضور عدم قطعیت در مدل، می توان پایداری مجانبی را در شرایطی که پدیده لرزش سیگنال کاهش پیدا می کند، فراهم آورد. روش کنترلی انتگرال مقاوم علامت خطا تاکنون در کنترل ربات متحرک با راهبرد شبکه عصبی با استفاده از بازخورد انتگرال مقاوم علامت خطا [۱۲]، طراحی کنترلر بازخوردی انتگرال مقاوم علامت خطا برای ربات تک لینیکی با ناظر شبکه عصبی تطبیقی [۱۳]، کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا برای اندام تحتانی انسان نما دو درجه آزادی [۱۴]، استفاده شده است. همچنین، برای بهینه سازی روش انتگرال مقاوم علامت خطا، از الگوریتم های بهینه سازی همچون الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup>، ازدحام هوشمند<sup>۲</sup> و الگوریتم زنبورها<sup>۳</sup> استفاده شده است [۱۵] و [۱۶].

کنترلرهای زیادی برای سیستم موتور احتراق داخلی از نوع دیزل به کار گرفته شده است که توانسته عملکرد سیستم را افزایش دهد اما تاکنون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای سیستم موتور احتراق داخلی از نوع دیزل استفاده نشده است که این تحقیق به دنبال بررسی عملکرد کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا بر روی سیستم موتور دیزل و مقایسه آن با سایر کنترلرهای اعمال شده بر روی این سیستم است.

در این تحقیق حاضر، کنترل به روش انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتورهای دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ مورد بررسی قرار می گیرد. لذا در ادامه کار و در فصل دوم، مدل دینامیکی موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ ارائه می شود سپس در فصل سوم، طراحی کنترلرهای مقاوم مود لغزشی و همین طور خطی سازی پس خورد ارائه می شود. در فصل چهارم روش کنترلی جدید انتگرال مقاوم تابع علامت خطا برای موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژ توسعه می یابد و در فصل پنجم نتایج برای روش های کنترلی بیان شده، ارائه و تفاوت کنترلرها، مورد بررسی قرار می گیرد و در نهایت، در فصل آخر پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه می شود.

---

<sup>1</sup> Particle swarm optimization

<sup>2</sup> Swarm intelligent

<sup>3</sup> Bees algorithm



## فصل دوم

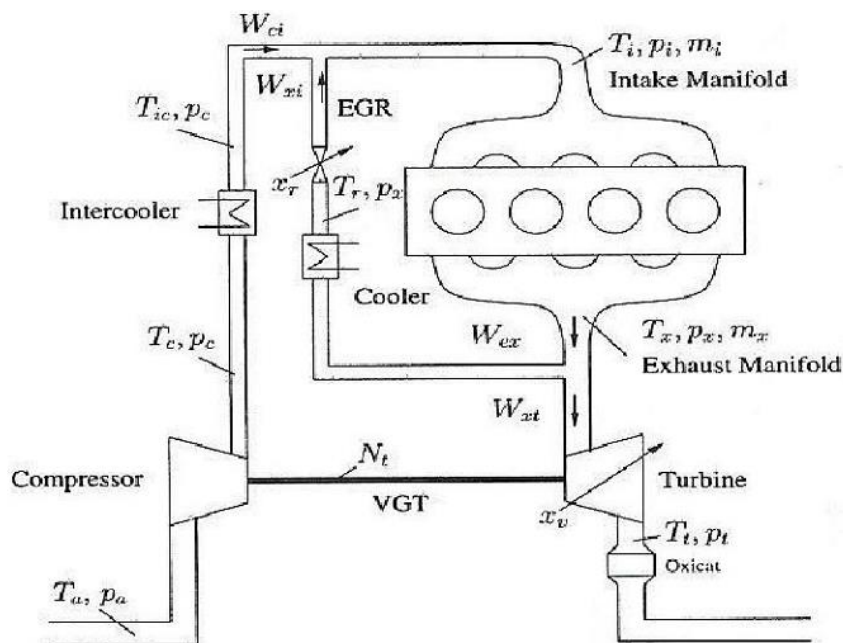
### مدل سازی دینامیکی موتور دیزل

## ۲-۱ مقدمه

در این فصل، مدل سازی موتور دیزل ارائه می شود. با استفاده از قوانین ترمودینامیکی از جمله قانون پایستگی جرم و انرژی و همین طور قانون گازهای ایده آل و برخی از آزمایش های تجربی می توان مدل ساده شده ای از موتور دیزل بیان کرد. در نهایت مدل به دست آمده، برای قوانین کنترلی که در ادامه در فصل های بعدی ارائه شده است، به کار گرفته می شود.

## ۲-۲ مدل فیزیکی موتور دیزل

با به کارگیری قوانین پایستگی جرمی و انرژی بین دو مدخل ورودی و خروجی از موتور، دینامیک توربوشارژ و دینامیک سنسورها، به دست می آید. شکل ۲-۱، طرح کلی از یک موتور دیزل توربوشارژ که مجهز به سیستم بازخورانی گاز خروجی و توربوشارژ با هندسه متغیر است را نمایش می دهد. مدل کامل موتور دیزل، شامل هفت متغیر حالت سیستم می شود که عبارتند از: فشار مانیفولد ورودی ( $p_1$ )، فشار مانیفولد خروجی ( $p_2$ )، کسر جرمی اکسیژن در مانیفولد ورودی ( $F_1$ )، کسر جرمی اکسیژن در مانیفولد خروجی ( $F_2$ )، سرعت توربوشارژ ( $\omega_{tc}$ ) و دو متغیر حالت که دینامیک محرکه را برای سیگنال های کنترل شرح می دهد.



شکل ۲-۱ دیگرام کلی از موتور دیزل توربوشارژ مجهز به EGR و VGT [۱۷]

## ۱-۲-۲ قوانین بقای جرم و انرژی برای موتور دیزل

بر طبق قانون پایستاری جرم، تغییرات جرم در حجم کنترل معادل با اختلاف دبی جرمی ورودی و دبی جرمی خروجی از حجم کنترل است. بنابراین دبی جرمی گاز در مانیفلد ورودی و خروجی به صورت رابطه (۱-۲) و (۲-۲) بیان می‌شود (روابط در این فصل از مرجع [۱۷] استخراج شده است):

$$\dot{m}_1 = W_c + W_{egr} - W_e \quad (۱-۲)$$

$$\dot{m}_2 = W_e - W_{egr} - W_t + W_f \quad (۲-۲)$$

در روابط (۱-۲) و (۲-۲)  $\dot{m}_1, W_c, W_{egr}, W_e, W_t$  و  $\dot{m}_2, W_f$  به ترتیب بیانگر دبی جرمی گاز توربین، دبی جرمی کل در موتور، دبی جرمی بازخورانی گازهای سوخته، دبی جرمی هوای کمپرسور، نرخ سوخت-رسانی توسط راننده، دبی جرمی گاز در مانیفلد ورودی و دبی جرمی گاز در مانیفلد خروجی هستند. بر اساس قانون اول ترمودینامیک که پایستاری انرژی را بیان می‌کند، دو معادله‌ایی که به ترتیب تغییرات فشار در مانیفلد ورودی و خروجی است، به صورت روابط (۳-۲) و (۴-۲) به دست می‌آید:

$$\dot{p}_1 = \frac{\gamma R}{V_1} (W_c T_c + W_{egr} T_{egr} - W_e T_1) \quad (۳-۲)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{\gamma R}{V_2} ((W_e + W_f) T_e - W_{egr} T_2 - W_t T_2) \quad (۴-۲)$$

در روابط (۳-۲) و (۴-۲)  $p_1, p_2, T_1, T_2, T_e, T_{egr}, \gamma, R, V_1$  و  $V_2$  به ترتیب بیانگر فشار مانیفلد ورودی، فشار مانیفلد خروجی، دمای مانیفلد ورودی، دمای مانیفلد خروجی، دمای گاز خروجی از موتور، دمای گاز بازخورانی وارد شده به مانیفلد ورودی، ثابت جهانی گاز، نسبت ظرفیت گرمایی ویژه، حجم مانیفلد ورودی و حجم مانیفلد خروجی هستند. در معادلات پایستاری انرژی بالا، انتقال حرارت به محیط ناچیز در نظر گرفته شده است.

دمای گاز درمنی‌فلد ورودی و خروجی، با توجه به قانون گازهای ایده‌آل طبق رابطه (۵-۲) محاسبه می‌شود:

$$p_i V_i = m_i R T_i \quad i = 1, 2 \quad (۵-۲)$$

دمای خروجی از موتور از رابطه (۶-۲) به دست می‌آید:

$$T_e = T_1 + T_r \quad (۶-۲)$$

دمای افزایش یافته به اندازه  $T_r$  می تواند بر اساس داده های استاتیکی موتور، به صورت تابعی از جریان سوخت، نسبت هوا به سوخت و کسر گازهای سوخته شده در مانیفولد ورودی  $F_1$  مدل سازی شود.

جریانی که از طریق شیر باز خورانی گازهای خروجی، توسط معادله جریان اریفیس<sup>۱</sup> (سوراخ) استاندارد رابطه (۷-۲)، مدل سازی می شود:

$$W_{egr} = \begin{cases} C_{egr}(\kappa_{egr}) \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \Psi\left(\frac{p_1}{p_2}\right) & \text{if } p_1 < p_2 \\ 0 & \text{if } p_1 = p_2 \\ C_{egr}(\kappa_{egr}) \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}} \Psi\left(\frac{p_2}{p_1}\right) & \text{if } p_1 > p_2 \end{cases} \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)  $C_{egr}$ ، سطح مقطع جریان مؤثر از شیر باز خورانی گاز است که به صورت تابعی از موقعیت شیر باز خورانی گاز  $\kappa_{egr}$  که بین صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می کند، در رابطه (۸-۲) بیان می شود:

$$C_{egr} = -1.5 \times 10^{-8} \kappa_{egr}^2 + 3.3 \times 10^{-6} \kappa_{egr} \quad (8-2)$$

$\Psi$ ، ضریب تصحیح نسبت فشار است که از رابطه (۹-۲) به دست می آید:

$$\Psi\left(\frac{p_i}{p_j}\right) = \begin{cases} \gamma^{1/2} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{((\gamma+1)/2(\gamma+1))} & \text{if } \frac{p_i}{p_j} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left( \left(\frac{p_i}{p_j}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p_i}{p_j}\right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right)} & \text{if } \frac{p_i}{p_j} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \end{cases} \quad (9-2)$$

مدل ساده شده ی معادله جریان اریفیس که از مرجع [۱۷] اقتباس شده، برای مدل کردن جریان توربین  $W_t$ ، طبق رابطه (۱۰-۲) استفاده می شود:

$$W_t = C_{vgt}(\kappa_{vgt}) \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \Psi_2\left(\frac{p_a}{p_2}, \kappa_{vgt}\right) \quad (10-2)$$

در رابطه (۱۰-۲)،  $C_{vgt}$  و  $\Psi_2$  به ترتیب بیانگر فشار محیط، سطح مقطع جریان مؤثر و ضریب تصحیح نسبت فشار هستند که هر دو به موقعیت پره توربین ( $\kappa_{vgt}$ ) که بین صفر تا ۱۰۰ درصد تغییر می کند، وابسته هستند (سطح مقطع جریان مؤثر، تابع خطی از موقعیت پره توربین ( $\kappa_{vgt}$ ) در نظر گرفته شده است).

<sup>1</sup> Orifice

دبی جرمی کل که از طرف موتور، در حال پمپ کردن است، تابع خطی از فشار مانیفلد ورودی و ضریب تناسبی  $k_e$  وابسته به سرعت موتور و دمای مانیفلد ورودی است که در رابطه (۱۱-۲) بیان شده است:

$$W_e = k_e(N, T_1)p_1 \quad (11-2)$$

در رابطه (۱۱-۲)  $N$  بیانگر سرعت موتور است و ضریب تناسبی  $k_e$  می‌تواند از داده‌های استاتیکی موتور به دست آید. این ضریب به فشار خروجی و دمای دیواره‌های سیلندر نیز وابسته است، اما این وابستگی بسیار ناچیز است و می‌توان از آن صرف نظر کرد.

## ۲-۲-۲ دینامیک کسر گازهای خروجی

در موتورهای احتراق داخلی، زمانی احتراق کامل انجام می‌شود که جرم کامل هوا با تمامی سوخت تزریق شده بسوزد و واکنش شیمیایی را بتوان به صورت استوکیومتری<sup>۱</sup> بیان کرد، ولی در واقعیت، گاز به طور کامل نمی‌سوزد و مقداری هوا به صورت اضافی باقی می‌ماند و گاز خروجی از طریق شیر بازخورانی گاز به داخل مانیفلد ورودی بازگردانده می‌شود. دینامیک کسر گازهای سوخته شده در مانیفلد ورودی و مانیفلد خروجی به ترتیب از روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) به دست می‌آید:

$$\dot{F}_1 = \frac{W_{egr}(F_2 - F_1) - W_c F_1}{m_1} \quad (12-2)$$

$$\dot{F}_2 = \frac{(W_e[15.6(1 - F_1) + (AF + 1)F_1]/(AF + 1)) - W_e F_2}{m_2} \quad (13-2)$$

در روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲)،  $F_1$ ،  $F_2$  و  $AF$  ترتیب بیانگر کسر گاز سوخته در مانیفلد ورودی، کسر گاز سوخته در مانیفلد خروجی و نسبت هوا به سوخت هستند. با استفاده از قانون دوم نیوتن، گشتاور توربین و کمپرسور به صورت نسبت توان آن‌ها به سرعت توربین بیان شده و می‌توان معادله حالت را برای سرعت توربین، از رابطه (۱۴-۲) به دست آورد:

$$\dot{\omega}_{tc} = \frac{1}{J_{tc}\omega_{tc}} (\eta_m P_t - P_c) \quad (14-2)$$

---

<sup>1</sup> Stoichiometric

در رابطه (۱۴-۲)  $P_c$  و  $P_t$ ،  $\omega_{tc}$ ،  $J_{tc}$ ،  $\eta_m$  به ترتیب بیانگر بازده مکانیکی توربوشارژر، ممان اینرسی توربوشارژر، سرعت توربوشارژر، توان کمپرسور و توان توربین هستند که در ادامه معادلات توان توربین و توان کمپرسور بیان می‌شود.

### ۳-۲-۲ معادله‌های توان توربین و کمپرسور

برای به‌دست‌آوردن توان توربین  $P_t$ ، با استفاده از مدل ساده‌شده‌ی معادله جریان پایا با فرض اینکه فرآیند آیزنتروپیک باشد، بیان توان توربین به‌صورت رابطه‌ی (۱۵-۲) خواهد بود:

$$P_t = W_t \Delta h = W_t c_p (T_2 - T_s) \quad (۱۵-۲)$$

در رابطه (۱۵-۲)،  $c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت،  $\Delta h$  اختلاف آنتالپی بین ورودی و خروجی و  $T_s$  دمای آیزنتروپیک در خروجی توربین است.

با استفاده از روابط ترمودینامیک، نسبت فشار عبوری از توربین و نسبت دمای آیزنتروپیک را می‌توان طبق رابطه (۱۶-۲ الف) به‌دست‌آورد:

$$\frac{T_s}{T_2} = \left( \frac{p_a}{p_2} \right)^\mu \quad (۱۶-۲ \text{ الف})$$

$$\mu = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \quad (۱۶-۲ \text{ ب})$$

برای یک توربین واقعی، توان از رابطه (۱۷-۲) به‌دست‌می‌آید:

$$P_t = W_t \Delta h = W_t c_p (T_2 - T_b) \quad (۱۷-۲)$$

در رابطه (۱۷-۲)  $T_b$  دمای خروجی از توربین است که با دمای  $T_s$  متفاوت است. به‌منظور اتلاف گرما، بازده آیزنتروپیک توربین  $\eta_t$  به‌صورت رابطه (۱۸-۲) بیان می‌شود:

$$\eta_t = \frac{T_2 - T_b}{T_2 - T_s} \quad (۱۸-۲)$$

به‌طورکلی، بازده آیزنتروپیک توربین به درصد باز بودن شیر توربوشارژر با هندسه متغیر، نسبت فشار عبوری از توربین و سرعت توربوشارژر بستگی دارد.

با جایگذاری روابط (۱۶-۲) و (۱۸-۲) در رابطه (۱۷-۲) توان توربین، برحسب نسبت فشار عبوری از توربین طبق رابطه (۱۹-۲) به‌دست‌می‌آید:



$$P_t = W_t c_p \eta_t T_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_2} \right)^\mu \right] \quad (19-2)$$

همانند روش بالا، می توان توان کمپرسور را نیز طبق رابطه (۲۰-۲) به دست آورد:

$$P_c = W_c c_p \frac{1}{\eta_c} T_a \left[ \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^\mu - 1 \right] \quad (20-2)$$

در رابطه (۲۰-۲)  $\eta_c$  بازده آیزنتروپیک کمپرسور است. همچنین دمای هوا در خروجی کمپرسور می تواند به صورت رابطه (۲۱-۲) بیان شود:

$$T_c = T_a \left[ 1 + \frac{1}{\eta_c} \left( \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^\mu - 1 \right) \right] \quad (21-2)$$

برخلاف دبی جریان جرمی توربین که از معادله جریان اریفیس به دست می آید، دبی جریان جرمی کمپرسور از مشخصه های اعمال شده توسط سازنده که به صورت تابعی از نسبت فشار و سرعت توربوشارژ است، تعیین می شود.

ضرایب گاز  $c_p$ ،  $c_v$  و  $\gamma$ ، به دلیل اینکه وابستگی ناچیز به دما و کسر گازهای سوخته دارند، در عمل به صورت یک ضریب ثابت رفتار می کنند.

## ۲-۳ مدل ساده شده ی موتور دیزل برای طراحی کنترل کننده

به منظور یافتن قانون کنترلی ساده و با توجه به این واقعیت که اندازه گیری متغیرهای حالت کسر جرمی اکسیژن دشوار است، سیستم به سه معادله دینامیکی کاهش پیدا می کند. در مدل ساده شده ی سیستم موتور دیزل، سه متغیر حالت سیستم، شامل فشارهای مانیفولد ورودی و خروجی و توان کمپرسور است. معادله ها به وسیله مشتق گرفتن از قانون گاز ایده آل و استفاده از پایستاری جرم و انرژی در حالی که دینامیک توربوشارژ توسط انتقال توان با ثابت زمانی  $\tau$  تقریب زده می شود، به دست می آید، این معادلات در بخش بعدی ارائه خواهند شد.

### ۲-۳-۱ معادله های دینامیکی برای موتور دیزل مجهز به EGR و VGT

با گرفتن مشتق زمانی از قانون گاز ایده آل که در رابطه (۲-۵) بیان شد، رابطه (۲۱-۲) به دست می آید.

$$\frac{dp_i}{dt} V_i + p_i \frac{dV_i}{dt} = \frac{dm_i}{dt} RT_i + m_i R \frac{dT_i}{dt} \quad i = 1, 2 \quad (21-2)$$

با توجه به اینکه تغییرات فشار و دما در حجم ثابت انجام می شود، رابطه (۲۱-۲) را می توان به فرم رابطه (۲۲-۲) بازنویسی کرد.

$$\dot{p}_i = \frac{RT_i}{V_i} \dot{m}_i + \frac{m_i R}{V_i} \dot{T}_i \quad i = 1, 2 \quad (22-2)$$

اکنون با در نظر گرفتن قانون پایستاری جرم طبق رابطه (۲-۱) و (۲-۲) و جایگذاری آن‌ها در رابطه (۲-۲) (۲۲)، روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) به دست می‌آید [۱۷].

$$\dot{p}_1 = \frac{RT_1}{V_1} (W_c + W_{egr} - W_e) + \frac{\dot{T}_1}{T_1} p_1 \quad (23-2)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{RT_2}{V_2} (W_e - W_{egr} - W_t + W_f) + \frac{\dot{T}_2}{T_2} p_2 \quad (24-2)$$

سنسورهای دما، برای ثابت زمانی که در کنترل موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعبیه می‌شود. این سنسورها قادر به اندازه‌گیری تغییرات لحظه‌ای دما نیستند و در نتیجه سیگنال‌های  $\dot{T}_1$  و  $\dot{T}_2$  را نمی‌توانند به راحتی مشاهده و اندازه‌گیری کنند. علاوه بر این، در حالتی که مقادیر در حالت پایا هستند، تغییرات آن‌ها نسبت به زمان قابل صرف نظر است. بهر حال روابط (۲۳-۲) و (۲۴-۲) را می‌توان به صورت روابط (۲۵-۲) و (۲۶-۲) بازنویسی کرد.

$$\dot{p}_1 = \frac{RT_1}{V_1} (W_c + W_{egr} - W_e) \quad (25-2)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{RT_2}{V_2} (W_e - W_{egr} - W_t + W_f) \quad (26-2)$$

همچنین با در نظر گرفتن توربوشارژ، توان منتقل شده از مرتبه اول با ثابت زمانی  $\tau$ ، به صورت رابطه (۲۷-۲) مدل می‌شود.

$$\dot{P}_c = \frac{1}{\tau} (\eta_m P_t - P_c) \quad (27-2)$$

با به دست آوردن معادلات (۲۵-۲)، (۲۶-۲) و (۲۷-۲) به عنوان دینامیک مسئله و در نظر گرفتن حالت‌ها و ورودی‌های سیستم، می‌توان قوانین کنترلی را برای مدل دینامیکی اخیر، به کار برد. همان طوری که در مدل دینامیکی به دست آمده مشاهده می‌شود با توجه به روابط (۲۵-۲)، (۲۶-۲) و (۲۷-۲) عبارت‌های غیر خطی وجود دارد؛ لذا مدل دینامیکی سیستم در حالت کلی غیر خطی است.

با مرتب کردن معادله (۲۰-۲)، می‌توان رابطه‌ی (۲۸-۲) را برای دبی جریان جرمی هوای کمپرسور به دست آورد.

$$W_c = \frac{\eta_c}{c_p T_a} \frac{P_c}{\left[ \left( \frac{p_1}{p_a} \right)^\mu - 1 \right]} \quad (28-2)$$

همان طوری که از معادله (۲۸-۲) ملاحظه می شود، دبی جریان جرمی هوای کمپرسور دارای نقطه‌ی تکین است و در نسبت فشار، برابر یک، مقدار دبی جرمی هوای کمپرسور به بی نهایت میل می کند و با توجه به رابطه (۲۵-۲)، دینامیک مسئله در این نقطه با مشکل مواجه می شود. به همین منظور یک مجموعه، طبق رابطه (۲۹-۲) برای تعیین محدوده‌ی فشار مانیفولد ورودی و خروجی و توان کمپرسور معرفی می شود و بیان گر آن است که هر مسیری که در این مجموعه آغاز شود در کل زمان در این مجموعه باقی می ماند [۱۷].

$$\Omega = \{(p_1, p_2, P_c): p_1 > 1\text{bar}, p_2 > 1\text{bar}, P_c > 0\} \quad (29-2)$$

مقادیر پارامترهای استاتیکی موتور دیزل که در فصل‌های بعدی برای شبیه سازی قوانین کنترلی مورد استفاده قرار می گیرد، طبق جدول ۱-۲ بیان می شود [۱۸].

جدول ۱-۲ مقادیر پارامترهای استاتیکی موتور دیزل [۱۸]

پارامتر	مقدار	واحد
$\eta_c$	0.61	—
$\eta_t$	0.76	—
$\eta_v$	0.87	—
$\eta_m$	0.98	—
$\tau$	0.11	s
$T_1$	313	k
$T_2$	509	k
$C_p$	1.0144	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$C_v$	0.7274	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$V_d$	0.002	$\text{m}^3$
$V_1$	0.006	$\text{m}^3$
$V_2$	0.001	$\text{m}^3$
$R$	0.287	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$T_a$	298	k
$T_{ref}$	298	k
$p_a$	101.3	kPa
$p_{ref}$	101.3	kPa

با توصیف مدل دینامیکی برای موتور دیزل مجهز به شیر EGR و VGT مطابق با روابط (۲۵-۲)، (۲۶-۲) و (۲۷-۲)، در فصل‌های بعدی به قوانین کنترلی مناسب برای این سیستم غیرخطی ارائه می شود.



## فصل سوم

طراحی کنترل کننده فیدبک خطی ساز و مود لغزشی  
برای موتور دیزل

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل به طراحی کنترل‌کننده‌ها به روش کنترل غیرخطی مناسب برای سیستم مورد مطالعه پرداخته می‌شود. همان‌طوری که در فصول قبل بیان شد، روش کنترل غیرخطی دارای انواع مختلفی است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش خطی‌سازی پس‌خورد، تطبیقی و مقاوم اشاره کرد. طراحی این کنترل‌کننده‌ها وابسته به مدل دینامیکی است. به عبارت دیگر کنترل‌کننده باید طوری طراحی گردند که خصوصیت‌ها و رفتار مدل دینامیکی در آن‌ها لحاظ شوند. ویژگی‌هایی که در مدل دینامیکی وجود دارد و روش‌های کنترلی را از هم متمایز می‌کند، وجود عبارت‌های غیرخطی و عدم قطعیت در مدل یا پارامترهای سیستم است.

به هر اندازه که مدل سیستم دقیق اما دارای عبارت‌های غیرخطی باشد، طراحی کنترل غیرخطی به روش خطی‌سازی رایج‌تر است لیکن این موضوع به آن معنا نیست که به‌کارگیری کنترلر مذکور حتماً برای سیستم منحصربه‌فرد است یا لزوماً سیستم را پایدار می‌کند. به‌رحال سیستم‌هایی که هم دارای عبارت‌های غیرخطی و هم عدم قطعیت هستند، بستگی به نوع عدم قطعیت در سیستم، طراحی کنترلر متفاوتی خواهند داشت. اصولاً عدم قطعیت در سیستم را به دو نوع تقسیم‌بندی می‌کنند: ۱- عدم قطعیت در پارامتر ۲- عدم قطعیت در مدل. سیستم اگر دارای عدم قطعیت در پارامتر باشد، استفاده از کنترلر تطبیقی برای کنترل سیستم مورد نظر مرسوم است. همچنین اگر سیستم مورد مطالعه، دارای عدم قطعیت در مدل باشد از روش کنترل مقاوم استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که هم روش کنترل تطبیقی و هم مقاوم، مبتنی بر روش خطی‌سازی پس‌خورد می‌باشند.

همانند تحلیل سیستم‌های کنترل غیرخطی، در طراحی کنترل‌کننده‌های غیرخطی یک روش کلی وجود ندارد. چیزی که موجود است یک مجموعه‌ی غنی از روش‌های متفاوت و مکمل است که هر کدام برای دسته‌های خاصی از مسائل کنترل غیرخطی بهترین کاربرد را دارا است [۱۹].

در بخش‌های بعدی در این فصل به انواع روش‌های خطی‌سازی پس‌خورد و مقاوم پرداخته می‌شود و همچنین قوانین کنترلی مناسب برای سیستم موتور احتراق داخلی طراحی می‌گردد.

## ۳-۲ خطی سازی پسخورد

همان طوری که در فصل قبل اشاره شد، اولین گام در طراحی سیستم کنترلی برای یک سیستم فیزیکی، به دست آوردن یک مدل معنادار از سیستم است، یعنی، مدلی که دینامیک‌های کلیدی سیستم را در محدوده‌ی عملکرد مورد علاقه دارا باشد. مدل سیستم‌های فیزیکی، به شکل‌های مختلفی است که می‌تواند با روش‌های مدل سازی و فرضیه‌ها به دست آید اما، بعضی از شکل‌ها خود را به شکل ساده‌تری به طراحی کنترل کننده متکی می‌کنند. روش خطی سازی پسخورد به روش‌های تبدیل مدل‌های اصلی سیستم به مدل‌های معادل به شکل ساده‌تر می‌پردازد.

خطی سازی پسخورد می‌تواند به صورت یک روش‌شناسی طراحی غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد. ایده اصلی در این روش، آن است که ابتدا یک سیستم غیرخطی به سیستم خطی به طور کامل یا جزئی تبدیل و سپس از روش‌های خطی قوی کاملاً شناخته شده استفاده و طراحی کنترل کامل می‌شوند. این روش در حل تعدادی از مسائل کنترل غیرخطی (معروف به قابل خطی سازی ورودی - حالت یا سیستم - های حداقل - فاز) قابل به کارگیری است و به طور خاص نیاز به اندازه‌گیری کل حالت است. اما، مقاوم بودن را در شرایطی که عدم قطعیت‌های پارامتر یا اغتشاش وجود دارد، تضمین نمی‌کند.

تکنیک خطی سازی پسخورد می‌تواند برای کنترلرهای مقاوم یا تطبیقی به عنوان یک ابزار ساده سازی مدل مورد استفاده قرار گیرد.

هنگامی که دینامیک‌های غیرخطی در مدل دینامیکی به صورت فرم متعارفی کنترل پذیر نباشند، در صورت امکان، بایستی با استفاده از یک تبدیل جبری، دینامیک‌ها را قبل از به کارگیری طراحی خطی - سازی پسخورد به شکل کنترل پذیر درآورد، یا اینکه به جای خطی سازی کامل دینامیک‌های اصلی، به خطی سازی جزئی اعتماد کرد. از این رو کنترل خطی سازی پسخورد را می‌توان به دو روش تقسیم بندی کرد: ۱- خطی سازی ورودی - حالت ۲- خطی سازی ورودی خروجی.

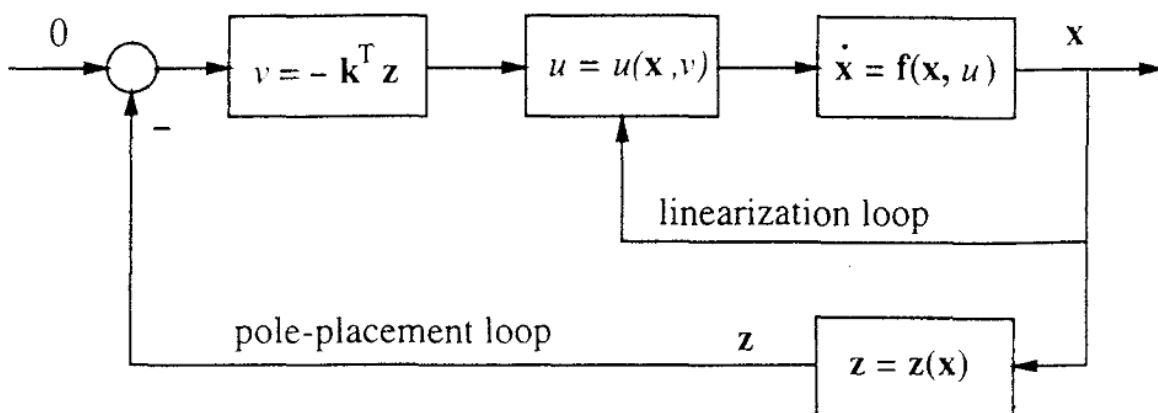
### ۳-۲-۱ خطی سازی ورودی - حالت

یک مدل از سیستم غیرخطی تک ورودی که دارای ورودی کنترلی  $u$  است، طبق رابطه (۳-۱) در نظر گرفته شده است.

$$\dot{X} = f(X, u) \quad (1-3)$$

در رابطه (1-3)  $X$  و  $f$  به ترتیب بیانگر متغیر حالت و تابع غیرخطی از متغیر حالت و ورودی هستند. روش خطی‌سازی ورودی-حالت، مسئله فوق را در دو مرحله حل می‌کند. اول یک تبدیل حالت به شکل  $z = z(X)$  و یک تبدیل ورودی به فرم  $u = u(X, v)$  را طوری می‌یابد که دینامیک سیستم غیرخطی به یک دینامیک خطی نامتغیر با زمان، معادل با شکل آشنای  $\dot{z} = Az + bv$  تبدیل شود. دوم، از روش‌های خطی استاندارد (مانند جایابی قطب‌ها) برای طراحی  $v$  استفاده می‌کند.

در شکل 1-3 دیاگرام بلوکی برای کنترل سیستم (1-3) با توجه به تعریف فوق ارائه شده است.



شکل 1-3 دیاگرام بلوکی خطی‌سازی ورودی-حالت [9]

در شکل 1-3 سیستم کنترل می‌توان دو حلقه را شناسایی کرد، حلقه‌ی داخلی که برای دستیابی به خطی‌سازی با توجه به رابطه‌ی ورودی-حالت است و حلقه‌ی خارجی که برای رسیدن به پایداری دینامیک-های حلقه بسته می‌باشد.

در روش خطی‌سازی ورودی-حالت باید دو مسئله مورد توجه قرار داد؛ اول اینکه آیا می‌توان سیستم غیرخطی را به سیستم خطی تبدیل کرد و همچنین، چگونه می‌توان تبدیل مناسب را برای سیستم‌هایی که قابل تبدیل هستند، پیدا کرد. در روش خطی‌سازی ورودی-حالت، سیستم به‌طور کامل خطی‌سازی می‌شود و لازمه این مسئله، داشتن مدل به‌طور دقیق است که حذف اثر قسمت‌های غیرخطی را به‌طور کامل انجام دهد که این امر مهم با وجود نامعینی‌ها در مدل سیستم بسیار مشکل است.



## ۲-۲-۳ خطی سازی ورودی خروجی

در روش خطی سازی ورودی خروجی برخلاف خطی سازی ورودی حالت، جزئی از سیستم خطی سازی می شود. در روش خطی سازی ورودی خروجی بایستی رابطه ای ساده بین ورودی و خروجی سیستم به دست آورد. برای توصیف بیشتر این روش، یک سیستم طبق رابطه (۲-۳) در نظر گرفته می شود.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (۲-۳-الف)$$

$$y(t) = h(x) \quad (۲-۳-ب)$$

در رابطه (۲-۳) هدف، وادار نمودن خروجی  $y(t)$  به ردیابی یک مسیر دلخواه  $y_d(t)$  است در حالی که حالت کامل کراندار حفظ شود و فرض می شود که  $y_d(t)$  و مشتق های آن تا یک مرتبه بالای نسبتاً کافی، معلوم و کراندار است. یک مشکل واضح در این مدل، این است که خروجی  $y(t)$  تنها به طور غیرمستقیم از طریق متغیر حالت  $x$  و معادلات حالت غیرخطی (۲-۳)، با ورودی  $u$  ارتباط دارد. لذا، به سادگی نمی توان دید که چگونه ممکن است ورودی  $u$  در کنترل رفتار ردیابی خروجی  $y(t)$  اثر نماید؛ اما اگر بتوان رابطه ای مستقیم و ساده بین خروجی سیستم  $y(t)$  و ورودی کنترل  $u$  به دست آورد، مشکل طراحی کنترل ردیابی کاهش پیدا می کند.

برای به دست آوردن رابطه ای مستقیم بین خروجی  $y(t)$  و ورودی  $u(t)$  آنقدر از  $y(t)$  مشتق گرفته می شود تا یک رابطه ای صریح از ورودی کنترل  $u$  در  $y(t)$  ظاهر گردد، تعداد دفعات مشتق گیری را با  $r$  نمایش داده و آنرا مرتبه نسبی می گویند؛ با توجه به تعریف مرتبه نسبی می توان دریافت که اگر بیش از  $n$  (مرتبه ای اصلی سیستم) بار مشتق گیری به کار گرفته شود، سیستم بالاتر از مرتبه  $n$  می بود؛ اگر هرگز ورودی کنترل  $u$  ظاهر نمی شد، سیستم کنترل پذیر نبود.

همان طوری که بیان شد، روش خطی سازی ورودی خروجی تنها قسمتی از دینامیک های حلقه بسته را به حساب می آورد. بنابراین، یک قسمت از دینامیک سیستم در خطی سازی ورودی خروجی مشاهده ناپذیر می شود. این قسمت از دینامیک، دینامیک داخلی نامیده می شود. اگر این دینامیک داخلی پایدار باشد (که منظور این است که حالت ها در حین ردیابی، کراندار باقی بمانند)، مسئله ای طراحی کنترل ردیابی به درستی حل شده است. در غیر این صورت، کنترل کننده ردیابی فوق بی معنی است؛ به دلیل آنکه ناپایداری داخلی موجب پدیده های نامطلوب مانند سوزاندن فیوزها با نوسانات شدید اجزای مکانیکی می شود. بنابراین، تأثیر طراحی فوق بر مبنای مدل مرتبه کاهش یافته وابسته به پایداری دینامیک های داخلی است.

در حالت کلی، بسیار مشکل است که مستقیماً پایداری دینامیک‌های داخلی را تعیین کرد، زیرا این دینامیک‌ها غیرخطی، ناخودگردان و متصل به دینامیک‌های خارجی حلقه-بسته‌اند. اگرچه یک تحلیل لیاپانوف یا شبه‌لیانوف ممکن است در سیستم مفید باشد اما کاربرد آن به‌خاطر مشکل پیدا کردن یک تابع لیاپانوف محدود می‌شود. بنابراین، به‌طور طبیعی باید راه‌های ساده‌تری برای تعیین پایداری دینامیک‌های داخلی یافت.

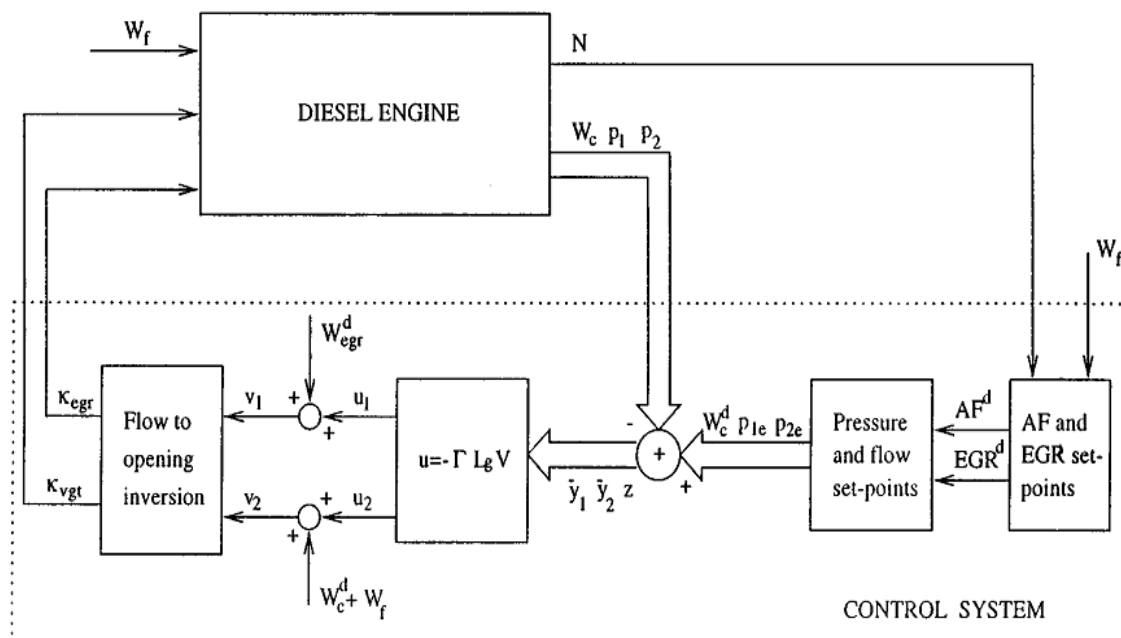
برخلاف سیستم‌های خطی که پایداری دینامیک‌های داخلی به‌سادگی به‌وسیله‌ی مکان صفرها تعیین می‌شوند، بسط اصطلاح صفرها به سیستم‌های غیرخطی کار ساده‌ای نیست. تابع تبدیل را که صفرهای سیستم خطی بر مبنای آن است، نمی‌توان در سیستم غیرخطی تعریف کرد. به‌علاوه، صفرها از خواص ذاتی سیستم‌های خطی هستند، در حالی که در سیستم‌های غیرخطی پایداری دینامیک‌های داخلی ممکن است به ورودی کنترل به‌خصوصی بستگی داشته باشد.

یک روش برای گام برداشتن به‌سوی حل این مشکل، این است که چیزی که اصطلاحاً دینامیک‌های-صفر نامیده می‌شود را در یک سیستم غیرخطی تعریف کرد. دینامیک‌های صفر، دینامیک داخلی سیستم تعریف می‌شود هنگامی که خروجی سیستم به‌وسیله‌ی ورودی آن صفر نگه‌داشته شود. دلیل تعریف و بررسی دینامیک صفر این است که راه ساده‌تری برای رسیدن به پایداری دینامیک داخلی پیدا شود.

به‌طور خلاصه دو نکته‌ی مفید را می‌توان در مورد دینامیک‌های-صفر سیستم غیرخطی متذکر شد. اول اینکه دینامیک‌های-صفر یک خاصیت ذاتی سیستم غیرخطی است که به نوع انتخاب قانون کنترل یا مسیرهای دلخواه بستگی ندارد. دوم، آزمایش پایداری دینامیک‌های-صفر بسیار ساده‌تر از آزمایش پایداری دینامیک‌های داخلی است، زیرا که دینامیک‌های-صفر تنها به حالت‌های داخلی مربوط می‌شوند (در حالی که دینامیک‌های داخلی به دینامیک‌های بیرونی و مسیرهای خواسته‌شده بستگی دارد).

همان‌طوری که در مدل موتور دیزل مشاهده شد به دلیل وجود عبارتهای غیرخطی پیچیده نمی‌توان سیستم را به‌طور کامل با تغییر متغیرهای حالت به فرم خطی تبدیل کرد. از این رو استفاده از خطی‌سازی به روش ورودی-حالت برای مدل موتور دیزل کار دشواری است. به این منظور با استفاده از روش خطی-سازی ورودی-خروجی، قسمتی از مدل موتور دیزل به فرم خطی تبدیل می‌شود. شکل ۳-۲ دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته را برای کنترل موتور دیزل توربوشارژر به روش خطی‌سازی ورودی-خروجی

نشان می‌دهد. استخراج قانون کنترلی و شبیه‌سازی روش خطی‌سازی ورودی-خروجی برای مدل موتور دیزل مجهز به سیستم توربوشارژر به‌طور کامل در مرجع [۱۷] آورده شده است.



شکل ۳-۲ دیاگرام بلوکی سیستم حلقه بسته با استفاده از روش خطی‌سازی ورودی-خروجی [۱۷]

### ۳-۲-۳ قانون کنترل خطی‌سازی پس‌خورده برای سیستم موتور دیزل

با در نظر گرفتن مدل دینامیکی موتور دیزل، قانون کنترلی به روش خطی‌سازی پس‌خورده دست می‌آید. به این منظور مدل دینامیکی موتور دیزل را می‌توان به فرم معادله حالت، طبق رابطه (۳-۳) بازنویسی کرد.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (۳-۳)$$

در رابطه (۳-۳)،  $x$  به‌عنوان متغیر حالت سیستم،  $u$  ورودی کنترلی و توابع  $f$  و  $g$ ، توابعی غیرخطی از متغیر حالت هستند که در روابط (۳-۴) تا (۳-۷) ارائه شده‌اند.

$$x = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ P_c \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (۴-۳)$$

$$u = \begin{bmatrix} C_{egr} \\ C_{vgt} \\ W_f \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (۵-۳)$$

$$f = \begin{bmatrix} \frac{RT_1}{v_1} \frac{\eta_c}{c_p T_a} \frac{P_c}{\left(\frac{p_1}{p_a}\right)^\mu - 1} - \eta_v \frac{p_1}{v_1} \frac{V_d}{120} N \\ \eta_v \frac{T_2 p_1}{T_1 v_2} \frac{V_d}{120} N \\ -\frac{P_c}{\tau} \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (6-3)$$

$$g = \begin{bmatrix} \frac{RT_1}{v_1} \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2p_1}{p_2} \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)} & 0 & 0 \\ -\frac{RT_2}{v_2} \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2p_1}{p_2} \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)} & -\frac{RT_2}{v_2} \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2p_a}{p_2} \left(1 - \frac{p_a}{p_2}\right)} & \frac{RT_2}{v_2} \\ 0 & \frac{\eta_m \eta_t c_p T_2}{\tau} \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_2}\right)^\mu\right) \frac{p_2}{\sqrt{RT_2}} \sqrt{\frac{2p_a}{p_2} \left(1 - \frac{p_a}{p_2}\right)} & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (7-3)$$

هدف کنترل، ردیابی  $x$  بر روی مسیر دلخواه  $x_d$  است که فرض می‌شود مشتق مرتبه بالاتر مسیر دلخواه، پیوسته و کراندار است. به این منظور بردار مسیر مطلوب، خطا و مشتق آن طبق روابط (۸-۳) تعریف می‌شود.

$$e = x - x_d \quad (8-3 \text{ الف})$$

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d \quad (8-3 \text{ ب})$$

$$x_d = \begin{bmatrix} p_{1d} \\ p_{2d} \\ p_{cd} \end{bmatrix} \quad (8-3 \text{ ج})$$

برای حذف عبارتهای غیر خطی کافی است ورودی کنترل را به صورت رابطه (۹-۳) تعریف کرد.

$$u = g(x)^{-1}(v - f(x)) \quad (9-3)$$

در رابطه (۹-۳)،  $v$  با استفاده از روش کنترل خطی می‌تواند طبق رابطه (۱۰-۳) به دست آید.

$$v = \dot{x}_d - k_p e \quad (10-3)$$

در رابطه (۱۰-۳)،  $k_p$  یک ثابت مثبت است.

با جایگذاری روابط (۹-۳) و (۱۰-۳) در معادله (۳-۳)، دینامیک خطا طبق رابطه (۱۱-۳) به دست

می‌آید.

$$\dot{e} + k_p e = 0 \quad (11-3)$$

با انتخاب  $k_p$  مثبت مناسب و حل معادله دیفرانسیل (۱۱-۳)، ردیابی مسیر انجام خواهد شد و خطا به سمت صفر میل می‌نماید.

### ۱-۳-۲-۳ شبیه‌سازی قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد برای مدل موتور دیزل

همان‌طوری که در بیان قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد مشاهده شد، پارامتر  $k_p$  یک ثابت مثبت است که مقدار آن برای شبیه‌سازی قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد، طبق رابطه (۱۲-۳) تعریف شده است.

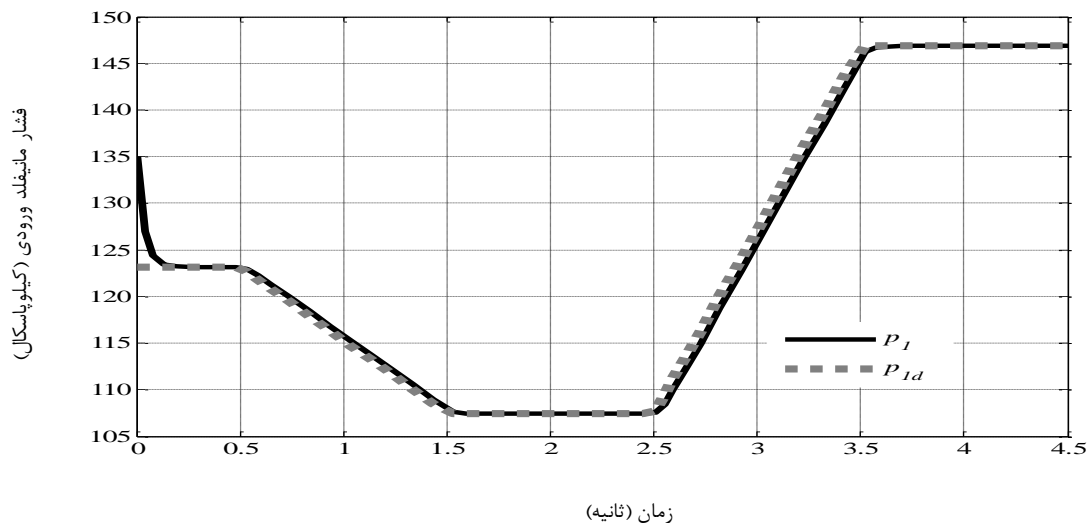
$$k_p = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 30 \end{bmatrix} \quad (12-3)$$

شبیه‌سازی در ۴،۵ ثانیه انجام شده و مسیر مطلوبی که متغیرهای حالت بایستی آن‌ها را ردیابی کنند، طبق جدول ۱-۳ بیان شده است (لازم به ذکر است که مسیر مطلوب باید طوری در نظر گرفته شود که مشتق آن محدود و پیوسته باشد). شرایط اولیه برای متغیرهای حالت سیستم به صورت  $p_1 = 130kpa$  و  $p_2 = 140kpa$  و  $P_c = 1000W$  است.

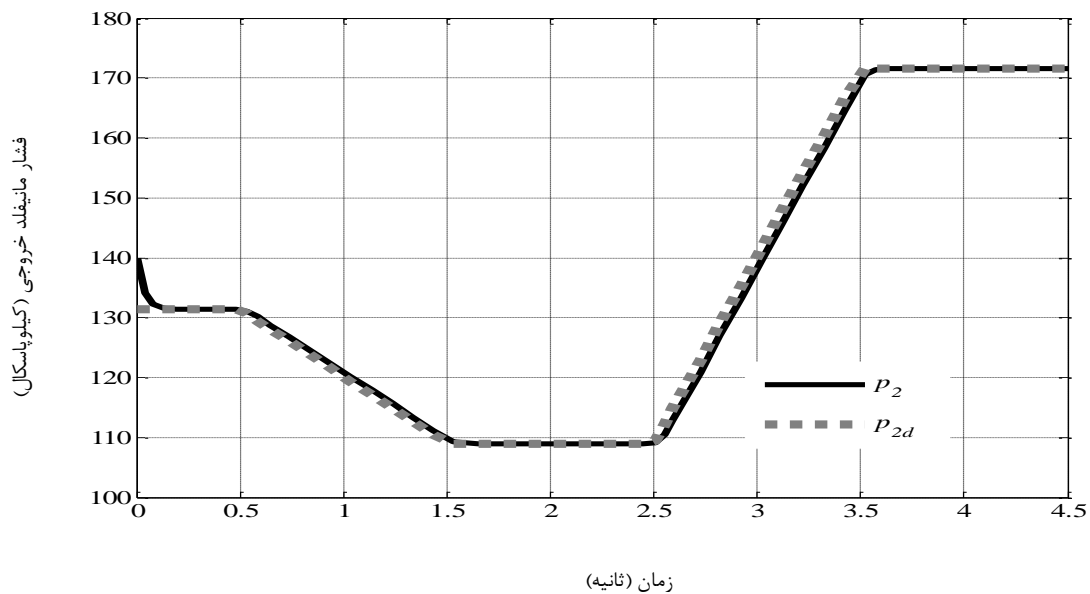
جدول ۱-۳ مسیر مطلوب برای ردیابی متغیرهای حالت سیستم

زمان (s) t	فشار مانیفولد ورودی مطلوب $(kpa) p_{1d}$	فشار مانیفولد خروجی مطلوب $(kpa) p_{2d}$	توان کمپرسور مطلوب $(W) P_{cd}$
بین 0 تا 0.5	123.17	131.37	932
بین 0.5 تا 1.5	$-15.73t + 131.035$	$-22.4t + 142.57$	$-692.4t + 1.2782 \times 10^3$
بین 1.5 تا 2.5	107.44	108.97	239.6
بین 2.5 تا 3.5	$39.42t + 8.89$	$62.62t - 47.58$	$2241.2t - 5.3634 \times 10^3$
بین 3.5 تا 4.5	146.86	171.59	2480

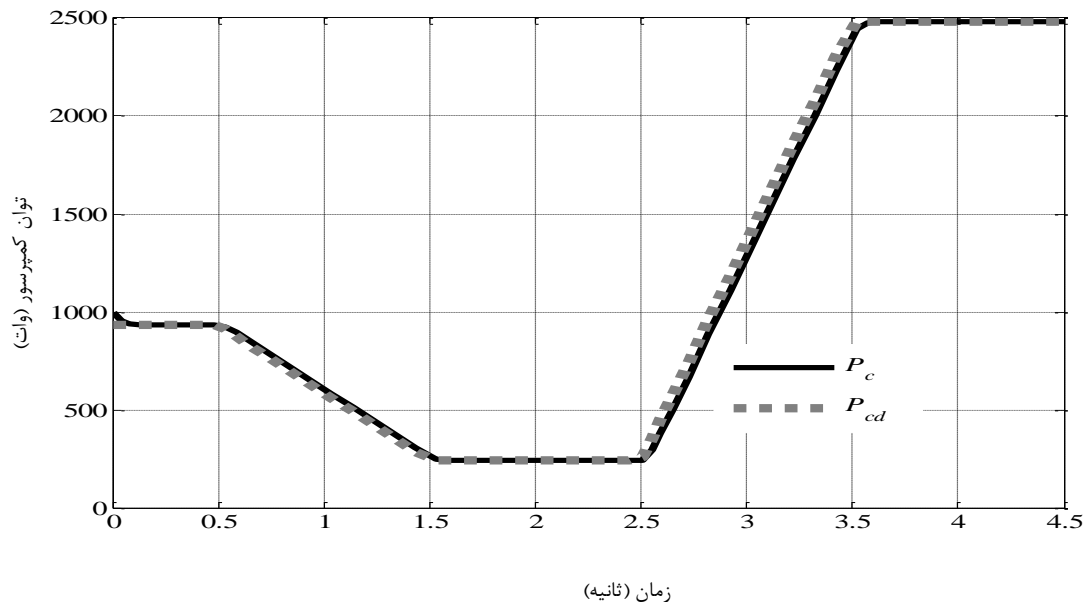
شکل‌های ۳-۳، ۴-۳ و ۵-۳ ردیابی متغیرهای حالت بر روی مسیر مطلوب را با استفاده از قانون کنترل خطی‌سازی پسخورد نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون خطی سازی پسخورد

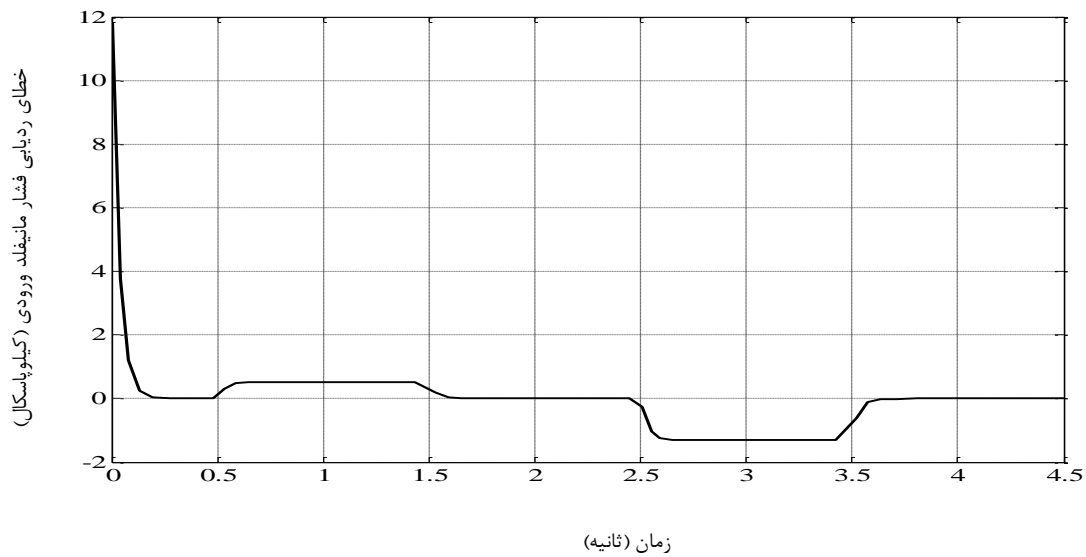


شکل ۴-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون خطی سازی پسخورد

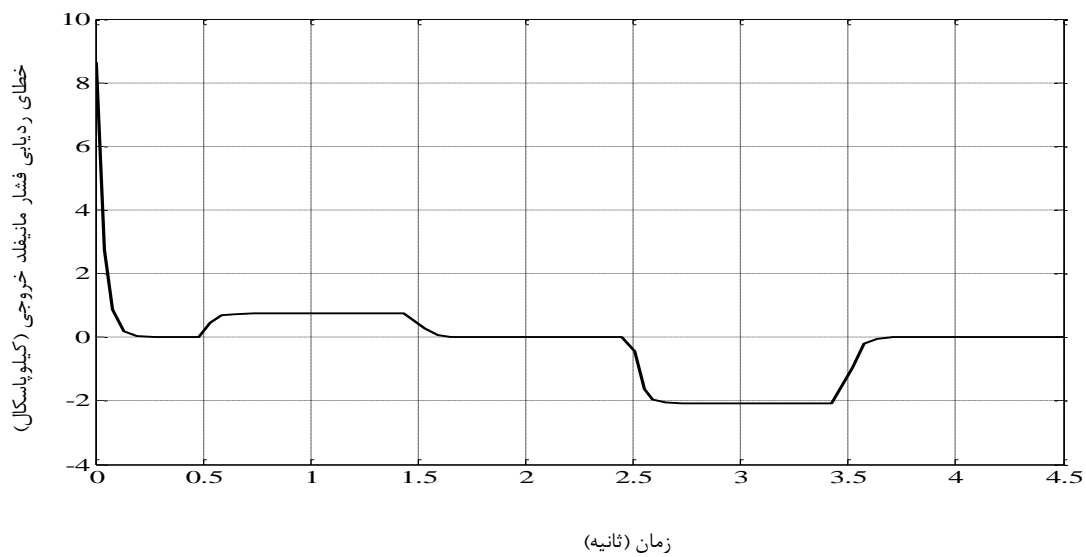


شکل ۳-۵ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون خطی سازی پسخورد

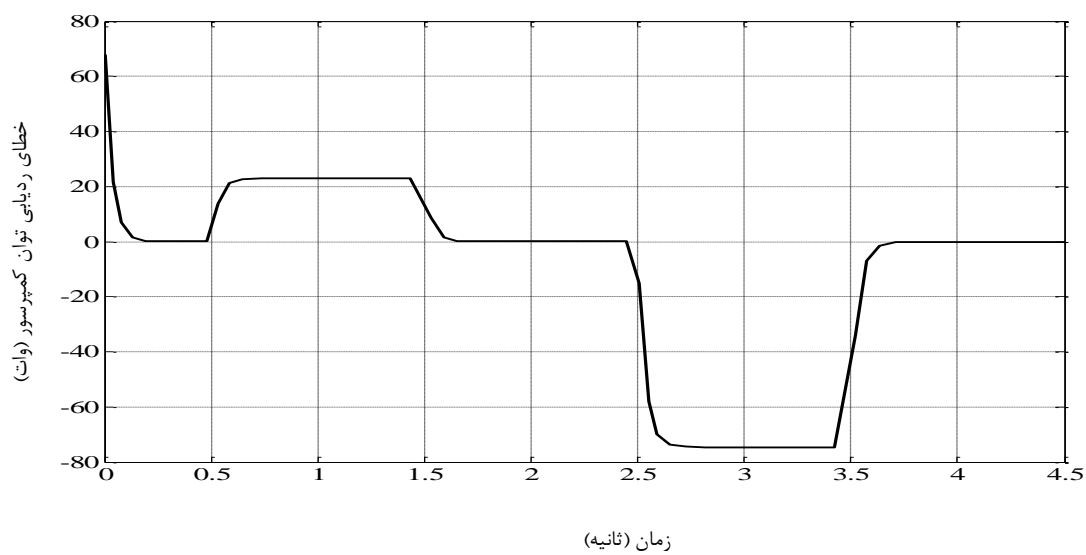
شکل‌های ۳-۶، ۳-۷ و ۳-۸ خطای ردیابی برای متغیرهای حالت با استفاده از قانون کنترل خطی سازی پسخورد نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶ خطای ردیابی فشار مانیفلد ورودی با اعمال قانون خطی سازی پسخورد



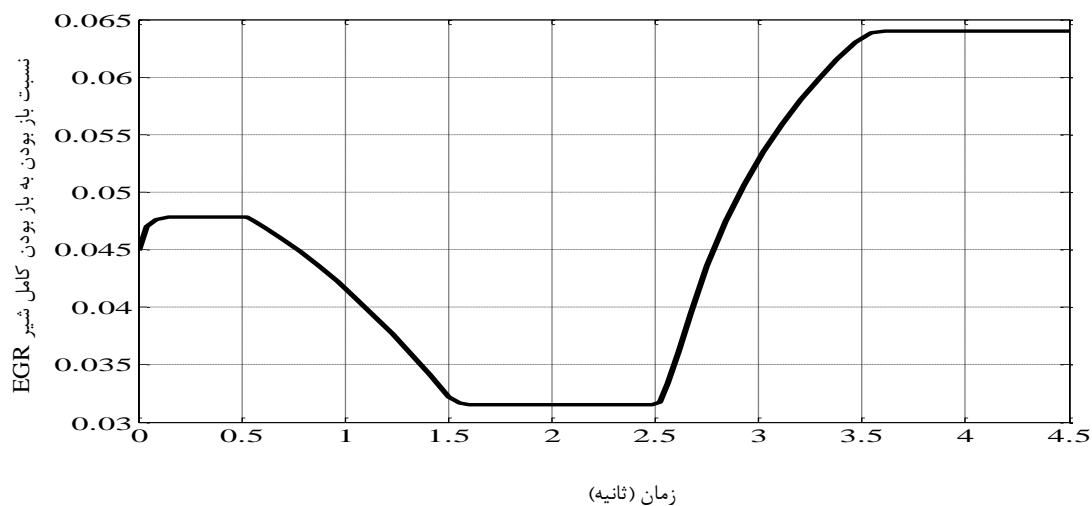
شکل ۳-۷ خطای ردیابی فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون خطی سازی پسخورد



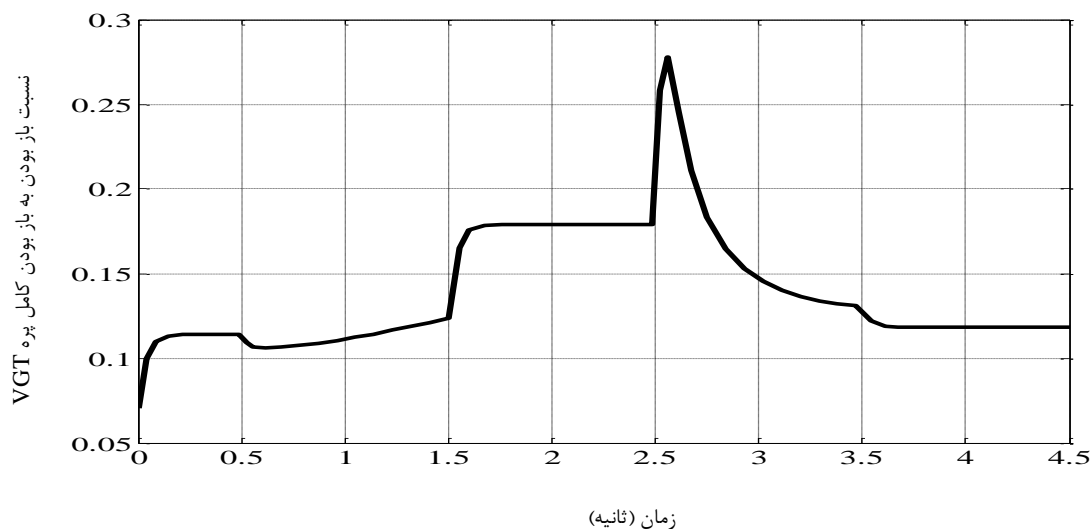
شکل ۳-۸ خطای ردیابی توان کمپرسور با اعمال قانون خطی سازی پسخورد



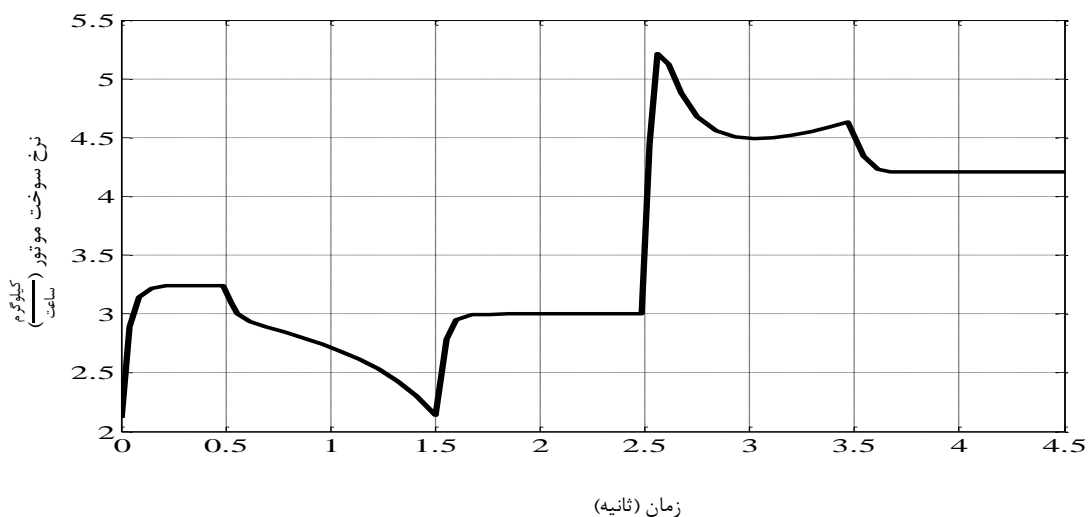
شکل‌های ۹-۳، ۱۰-۳ و ۱۱-۳ ورودی‌های کنترل برای سیستم موتور دیزل نمایش می‌دهد.



شکل ۹-۳ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون خطی سازی پس‌خورد



شکل ۱۰-۳ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون خطی سازی پس‌خورد



شکل ۳-۱۱ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون خطی سازی پسخورد

### ۳-۳ کنترل مود لغزشی

در کنترل کننده‌ی غیرخطی مبتنی بر مدل خاص (مانند روش اصلی کنترل خطی سازی پسخورد)، قانون کنترل بر اساس مدل اسمی سیستم فیزیکی طراحی می‌شود. اینکه سیستم کنترل در شرایطی که عدم قطعیت‌های مدل وجود دارد، چگونه عمل خواهد کرد، در مرحله‌ی طراحی روشن نیست. از سوی دیگر، در کنترل غیرخطی مقاوم (مانند کنترل مود لغزشی)، کنترل کننده بر اساس ملاحظات مدل اسمی و مشخصاتی از عدم قطعیت‌های مدل طراحی می‌شود. روش‌های کنترل غیرخطی مقاوم ثابت کرده‌اند که در سیستم‌های کنترل عملی متفاوتی بسیار مؤثر بوده‌اند. آن‌ها بهترین کاربرد را در دسته‌های خاصی از سیستم‌های غیرخطی داشته و عموماً به اندازه‌گیری حالت نیاز دارند.

در این بخش مجدداً به بررسی کنترل سیستم‌های غیرخطی پرداخته می‌شود که به‌طور کلی در بخش - های قبلی مورد مطالعه قرار گرفت، اما در این بخش فرض می‌شود مدل‌ها غیردقیق هستند. عدم دقت در مدل ممکن است ناشی از عدم قطعیت‌های پلان (مثلاً پارامترهای نامعلوم سیستم) یا به‌خاطر انتخاب هدف‌دار یک نمایش ساده‌شده از دینامیک‌های سیستم باشد (مثلاً مدل‌سازی اصطکاک به‌صورت خطی یا صرف نظر کردن معقول از حالت‌های ساختاری در یک سیستم مکانیکی سخت). از دیدگاه کنترلی، عدم دقت در مدل‌سازی را می‌توان به دو نوع اصلی طبقه‌بندی کرد: ۱- عدم قطعیت‌های ساختاری (یا پارامتری) ۲- عدم قطعیت‌های غیرساختاری (یا دینامیک‌های مدل نشده). نوع اول به عدم دقت در

جملاتی که واقعاً در مدل هستند مربوط می‌شود، در حالی که نوع دوم به عدم دقت در مرتبه‌ی سیستم (یعنی تخمین پایین‌تر).

یک روش ساده برای کنترل مقاوم و موضوع اصلی این بخش، چیزی است که اصطلاحاً روش‌شناسی کنترل مود لغزشی نامیده می‌شود. به‌طور شهودی، این روش مبتنی بر این نکته است که بسیار آسان‌تر است که سیستم‌های مرتبه‌ی اول را کنترل کرد (یعنی، سیستم‌های که معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی اول توصیف شده‌اند)، چه غیرخطی باشند چه نامعینی، تا اینکه سیستم‌های عمومی‌تر مرتبه  $n$ -ام (یعنی، سیستم‌هایی که با معادلات مرتبه‌ی  $n$  توصیف می‌شوند) را کنترل کرد. به‌همین خاطر، یک ساده کردن نمادی معرفی می‌شود که در حقیقت اجازه می‌دهد مسائل مرتبه  $n$ -ام با مسائل مرتبه‌ی اول معادل جایگزین شوند. آنگاه به‌سادگی می‌توان نشان داد که برای مسائل تبدیل شده، عملکرد کامل می‌تواند در اصل با وجود بی‌دقتی‌های دلخواه پارامتر به‌دست آید. اما چنین عملکردی، در ازای بهای بسیار زیاد تلاش کنترلی به‌دست می‌آید. این مسئله نوعاً با سایر منابع عدم قطعیت مدل‌سازی در تضاد است، مثلاً حضور دینامیک‌های صرف نظر شده که ممکن است تلاش زیاد کنترلی آن‌ها را تحریک کند. با توجه به این مطلب، بایستی قوانین کنترلی را طوری اصلاح کرد که با داشتن فعالیت کنترل قابل قبول به مصالحه‌ی بین عملکرد ردیابی و تلاش کنترلی مناسب دست یافت [۹].

### ۳-۳-۱ قانون کنترل مود لغزشی برای سیستم موتور دیزل

برای بیان قانون کنترلی مبتنی بر روش مود لغزشی برای مدل دینامیکی سیستم موتور دیزل که در رابطه (۳-۳) آورده شده است (در مدل دینامیکی (۳-۳) فرض می‌شود که عدم قطعیت، در مدل کردن تابع غیرخطی  $f$  است)، ابتدا ورودی سیستم و تخمینی از عدم قطعیت در مدل به‌ترتیب طبق روابط (۳-۱۳) و (۳-۱۴) تعریف می‌شود.

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = gu \quad (13-3)$$

$$\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \\ \hat{f}_3 \end{bmatrix} \quad (14-3)$$

هدف کنترل، در این وضعیت ردیابی متغیرهای حالت سیستم بر روی مسیر مطلوب طبق رابطه (۳-۸-ج) است که در جدول ۳-۱ بیان شده است ( لازم به ذکر است که در روش مود لغزشی نیز مشتق مسیر مطلوب بایستی پیوسته و کراندار باشد).

در رابطه‌ی (۳-۱۵) قانون کنترلی مود لغزشی برای ورودی کنترل در سیستم موتور دیزل بیان شده است.

$$v = \dot{x}_d - \hat{f} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (۳-۱۵)$$

در قوانین کنترلی فوق،  $\operatorname{sgn}$  تابع علامت است و بردار  $s$  سطح لغزش نام دارد و  $k$  یک ثابت در نظر گرفته شده است. در ادامه نحوه‌ی استخراج قوانین کنترلی مود لغزشی و تحلیل پایداری آن بیان خواهد شد.

### ۳-۳-۱-۱ استخراج قانون کنترلی مود لغزشی برای سیستم موتور دیزل

با توجه به مدل دینامیکی موتور دیزل که از مرتبه یک است، سطح لغزش مطابق با رابطه (۳-۱۶) تعریف می‌شود [۹].

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = e \quad (۳-۱۶)$$

در رابطه (۳-۱۶) بردار خطا است که می‌تواند از رابطه (۳-۱۷) به دست آید.

$$e = x_d - x \quad (۳-۱۷)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۳-۱۶) و استفاده از روابط (۳-۳)، (۳-۱۳) و (۳-۱۷)، رابطه (۳-۱۸) به دست می‌آید.

$$\dot{s} = \dot{x}_d - \dot{f} - v \quad (۳-۱۸)$$

برای قرار گرفتن روی سطح لغزش، بایستی  $\dot{s}$  برابر صفر شود؛ لذا کنترلر  $v_{eq}$  طبق رابطه (۳-۱۹) با فرض وجود نامعینی در سیستم تعریف می‌شود.

$$v_{eq} = \dot{x}_d - \hat{f} \quad (۳-۱۹)$$

در رابطه (۳-۱۹)، همان‌طوری که گفته شد،  $\hat{f}$  تخمینی از  $f$  است که فرض می‌شود  $|\hat{f} - f|$  کراندار باشد. برای جبران نامعینی‌های موجود در سیستم، قانون کنترلی (۳-۲۰) برای سیستم مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

$$v = v_{eq} - k \operatorname{sign}(s) \quad (۳-۲۰)$$

در رابطه (۳-۲۰)،  $k$  عبارتی است جهت جبران نامعینی‌های موجود در سیستم که به تابع کنترلر اضافه‌شده و حدود آن با توجه به بحث مربوطه در بخش اثبات پایداری که در ادامه می‌آید، محاسبه می‌شود.

### ۳-۱-۳-۳ تحلیل پایداری برای روش کنترل مود لغزشی

برای اثبات پایداری بر مبنای کنترلر مبتنی بر مود لغزشی، تابع لیاپانوفی مطابق با رابطه (۳-۲۱) برای سطح لغزش تعریف می‌شود [۹].

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (۳-۲۱)$$

با توجه به رابطه (۳-۲۱) مشاهده می‌شود که تابع لیاپانوف یک تابع مثبت می‌باشد. برای بررسی پایداری، بایستی مشتق تابع فوق بررسی شود؛ لذا با مشتق گرفتن از رابطه (۳-۲۱)، می‌توان رابطه (۳-۲۲) را نوشت.

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \quad (۳-۲۲)$$

برای اینکه مشتق تابع لیاپانوف، منفی شود، باید شرطی طبق رابطه (۳-۲۳) برقرار شود.

$$s^T \dot{s} \leq -\eta |s| \quad (۳-۲۳)$$

در نامعادله (۳-۲۳)،  $\eta$  ثابت اکیداً مثبت است. با استفاده از (۳-۲۰) و جایگذاری مقدار  $v$  از آن در رابطه (۳-۱۸) و جایگذاری نتیجه حاصل در رابطه (۳-۲۳)، نامعادله (۳-۲۴) به دست می‌آید.

$$k \leq -\eta - \operatorname{sign}(s) (\hat{f} - f) \quad (۳-۲۴)$$

با توجه به فرض کراندار بودن نامعینی سیستم می‌توان رابطه (۳-۲۵) را نوشت.

$$|\hat{f} - f| \leq \rho \quad (۳-۲۵)$$

در رابطه (۳-۲۵)،  $\rho$  کران بالای  $|\hat{f} - f|$  است. با استفاده از رابطه (۳-۲۵) مقدار  $k$  که شرط (۳-۲۴) را ارضا نماید، می‌توان طبق رابطه (۳-۲۶) انتخاب نمود.

$$k = -\eta - \rho \quad (26-3)$$

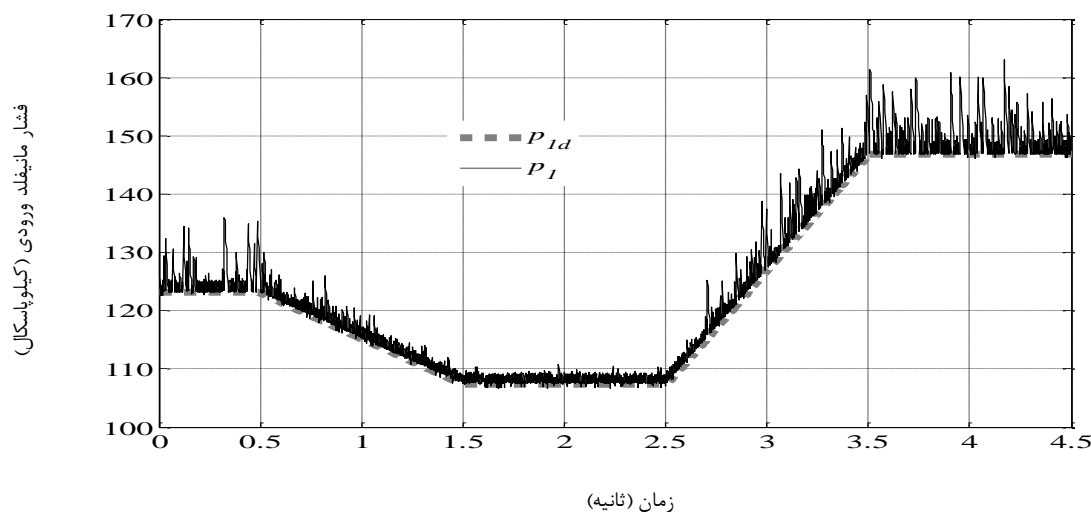
لذا با انتخاب  $k$  طبق رابطه (۲۶-۳)، شرط لغزش (۲۳-۳) برقرار شده و مقدار  $s$  تا رسیدن به سطح لغزش  $s = 0$  کاهش می‌یابد؛ بنابراین طبق رابطه (۱۶-۳) مقدار خطای ردیابی سیستم به سمت صفر میل خواهد نمود. لذا کنترلر مبتنی بر مود لغزشی تعریف شده طبق رابطه (۲۰-۳) باعث همگرایی مجانبی سیستم خواهد شد.

### ۳-۱-۳-۳ شبیه‌سازی کنترل مود لغزشی برای موتور دیزل

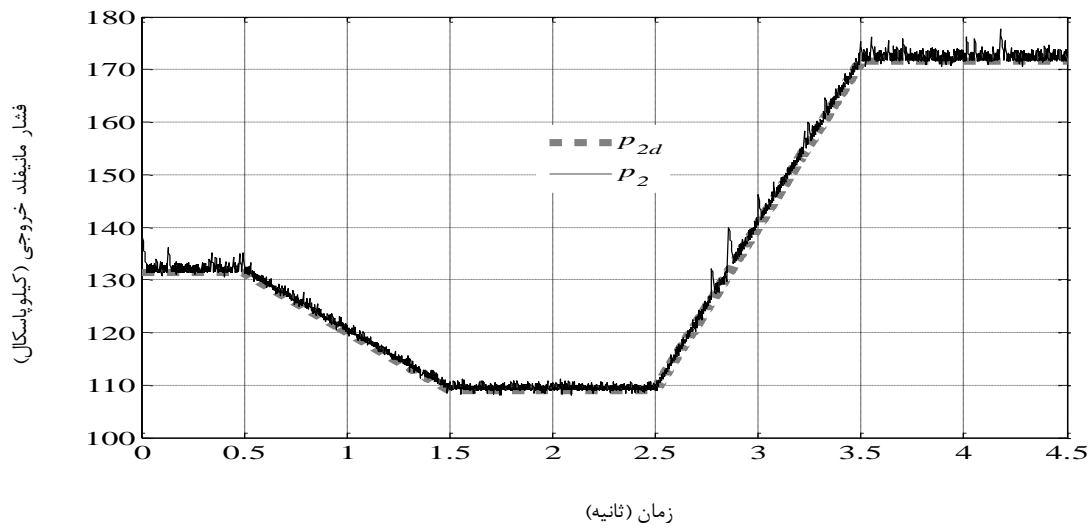
در این قسمت قانون کنترل مود لغزشی برای مدل دینامیکی موتور دیزل شبیه‌سازی می‌گردد. ثابت  $\eta$  برای این شبیه‌سازی به صورت یک ماتریس قطری طبق رابطه (۲۷-۳) تعریف می‌شود.

$$\eta = \begin{bmatrix} 700 & 0 & 0 \\ 0 & 300 & 0 \\ 0 & 0 & 1500 \end{bmatrix} \quad (27-3)$$

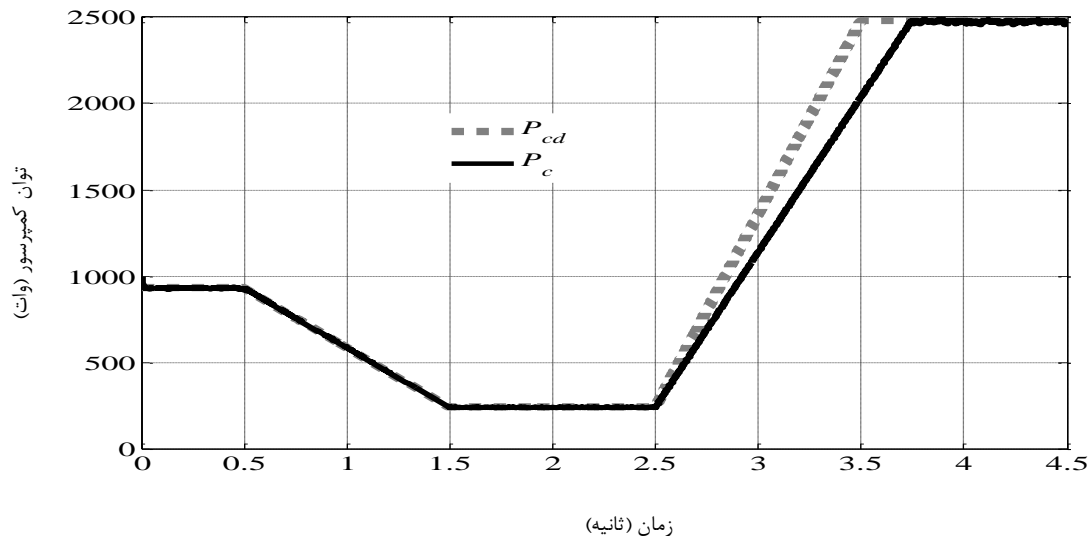
با توجه به قانون کنترل مود لغزشی، بایستی عدم قطعیت در مدل تخمین زده شود. در این شبیه‌سازی ۲۵ درصد عدم قطعیت در مدل لحاظ می‌شود و مدت اجرای این شبیه‌سازی ۴٫۵ ثانیه است و شرایط اولیه برای متغیرهای حالت سیستم به صورت  $p_1 = 130kpa$ ،  $p_2 = 140kpa$  و  $P_c = 1000W$  می‌باشد. شکل‌های ۱۲-۳، ۱۳-۳ و ۱۴-۳ ردیابی متغیرهای حالت بر روی مسیر مطلوب نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



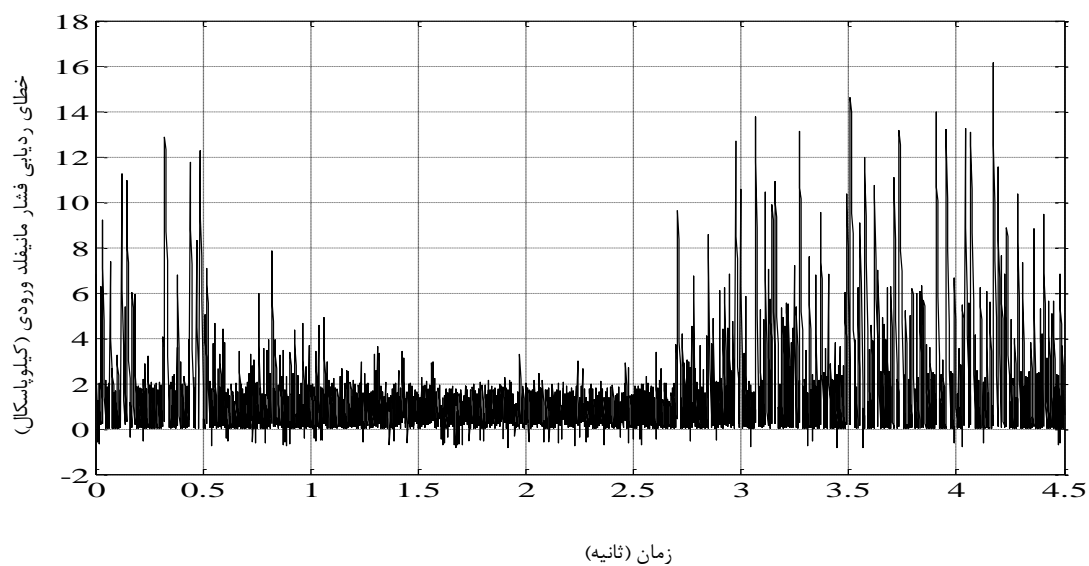
شکل ۳-۱۳ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



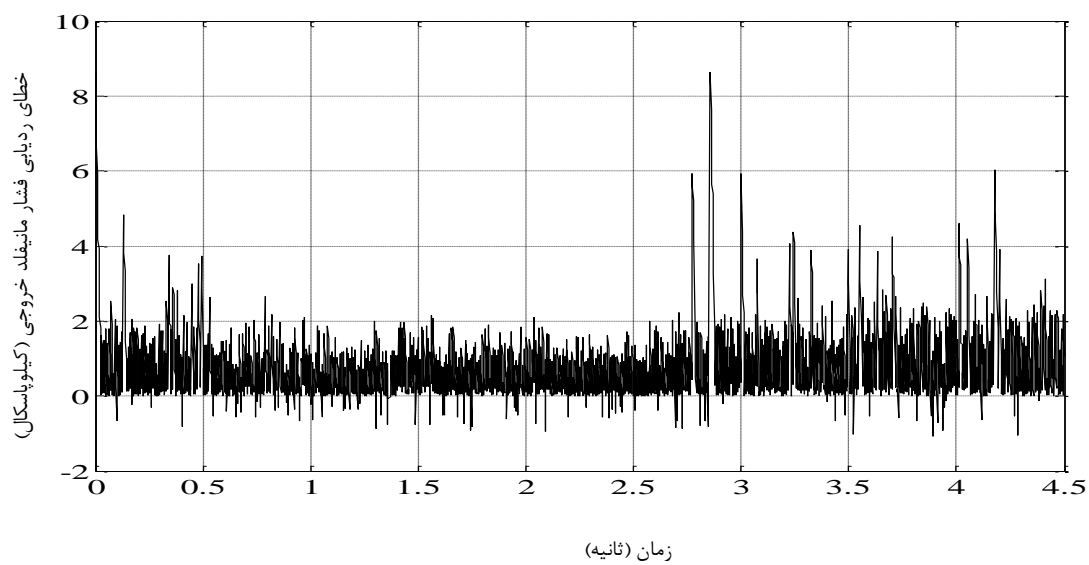
شکل ۳-۱۴ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی

شکل‌های ۱۷-۳ و ۱۶-۳، ۱۵-۳ خطای ردیابی را برای متغیرهای حالت مدل موتور دیزل نشان می-

دهد.

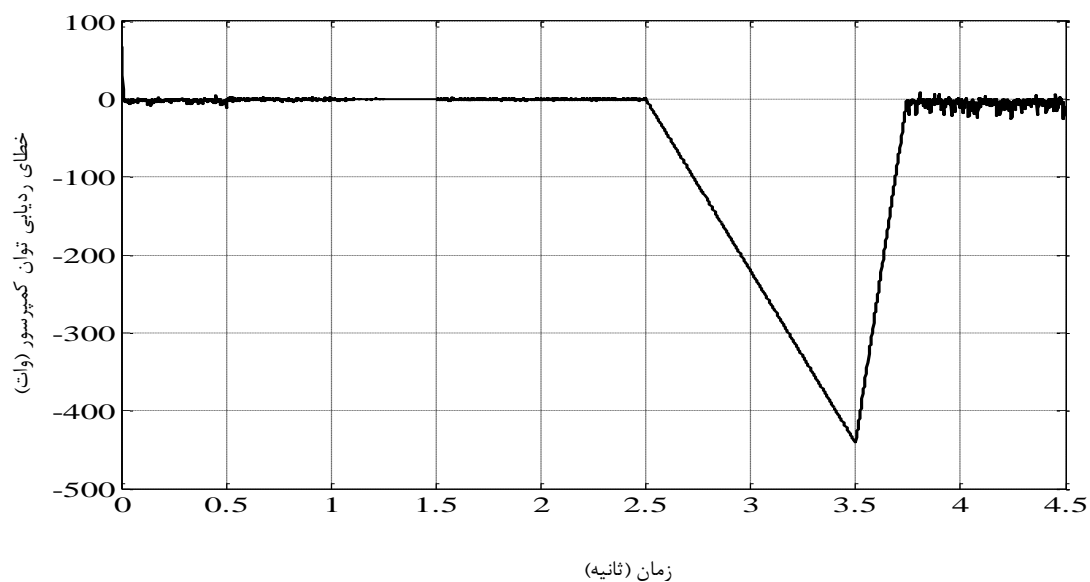


شکل ۱۵-۳ خطای ردیابی برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



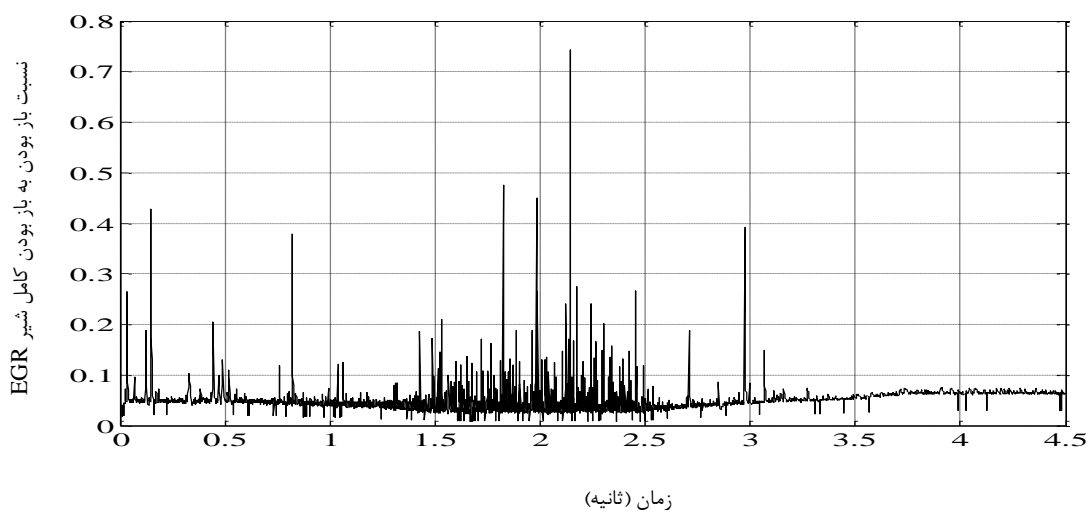
شکل ۱۶-۳ خطای ردیابی برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



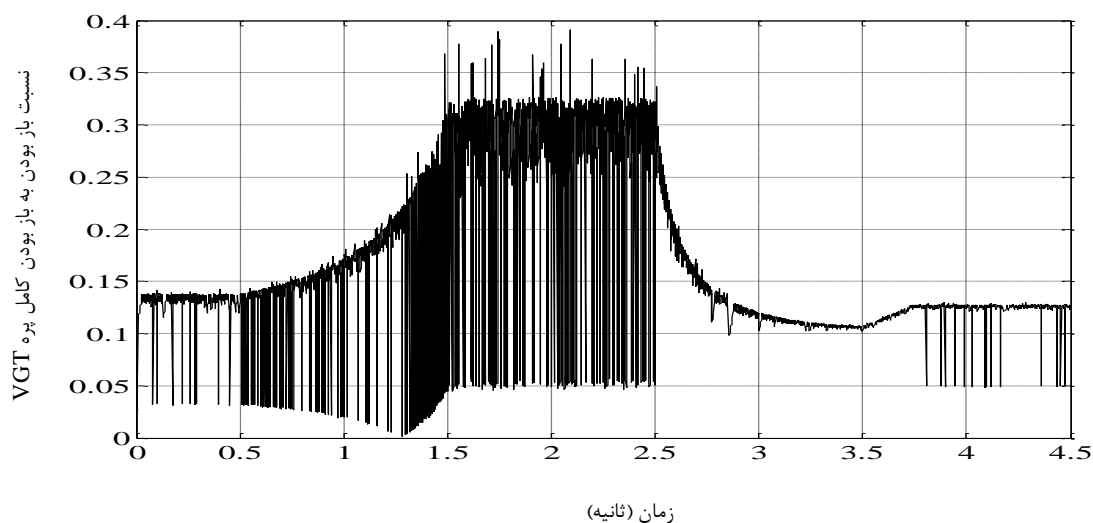


شکل ۳-۱۷ خطای ردیابی برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی

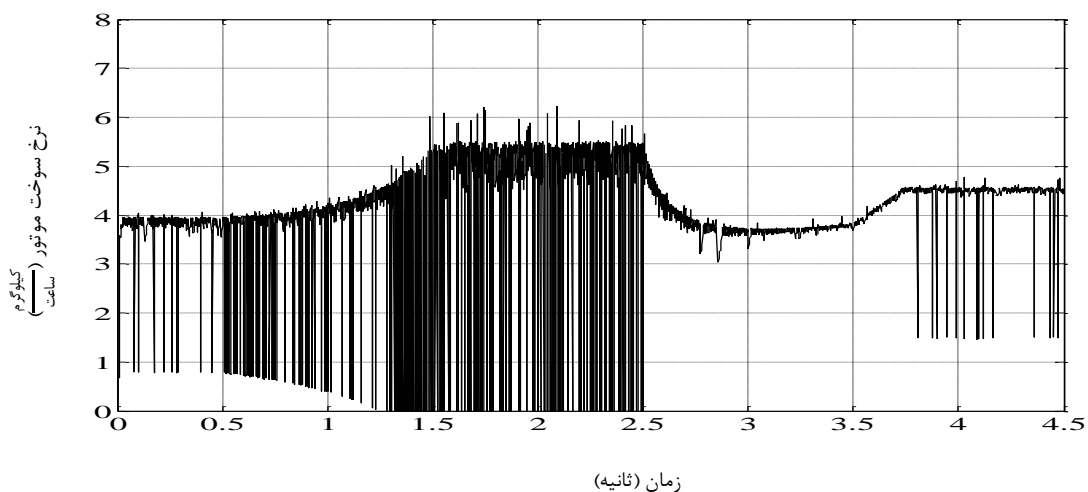
شکل‌های ۳-۱۸، ۳-۱۹ و ۳-۲۰ ورودی کنترل برای موتور دیزل با استفاده از قانون کنترل مود لغزشی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۸ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



شکل ۳-۱۹ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون کنترل مود لغزشی



شکل ۳-۲۰ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون کنترل مود لغزشی

همان طوری که مشاهده می شود به علت وجود عبارت تابع علامت در قانون کنترل مود لغزشی، هنگامی که متغیر حالت به سطح لغزش می رسد، روی سطح لغزش نوسان می کند و این نوسان ناشی از پدیده چترینگ در ورودی کنترل است که برای سیستم در فرکانس های بالا مناسب نمی باشد. روش های مختلفی برای کاهش این نوسانات ارائه شده است که از جمله ی آنها می توان به استفاده از تابع اشباع یا تابع تانژانت به جای تابع علامت اشاره کرد، اما کاهش پدیده چترینگ در این روش ها با افزایش خطای ردیابی همراه است.

## فصل چهارم

کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای

موتور دیزل

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل، یک مکانیزم کنترل پیوسته جدید برای جبران عدم قطعیت در سیستم غیرخطی چند ورودی و چند خروجی ارائه می‌شود. استراتژی این روش کنترل، بر اساس فرضیات محدود شده بر روی ساختار غیرخطی سیستم است. برای اثبات ردیابی مجانبی نیمه‌کلی برای سیستم، استدلال بر اساس پایداری لیاپانوف انجام می‌شود.

همان‌طوری که در فصل‌های قبل بیان شد، سیستم‌های دینامیکی غیرخطی که دارای عدم قطعیت هستند برای تئوری‌های کنترلی یک چالش مهم محسوب می‌شوند. کنترل این نوع از سیستم‌ها موضوعی است که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. یکی از اهداف کنترل مناسب، یافتن ساختار کنترلی است که علاوه بر کاهش و متناسب نمودن تلاش کنترلی، خطای ردیابی را نیز کاهش دهد. در این راستا، یکی از روش‌های کنترل مقاوم که در سال ۲۰۰۴ توسط آقای ژین و همکارانش به‌منظور کاهش دادن خطای ردیابی و کاهش یافتن تلاش کنترلی ارائه شد، روش مبتنی بر انتگرال علامت خطا است [۱۱]. بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که روش‌های کنترل مقاوم از جمله کنترل مود لغزشی به‌طور گسترده بر روی سیستم‌های مختلف اعمال و به‌طور مناسب استفاده شده است، اما روش جدید کنترلی مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا که از جمله روش‌های کنترل مقاوم با عملکرد بالا است، روی موتورهای DC، تجهیزات زیر آبی و محرک‌های هیدرولیکی اعمال شده و بر روی سیستم‌های دیگر در حال بررسی است [۲۰] و [۲۱]. با بررسی‌های صورت‌گرفته، مشخص شد این روش برای سیستم‌های مرتبه اول و خصوصاً برای دینامیک غیرخطی موتور دیزل ارائه نشده است که در تحقیق، روش فوق برای سیستم مورد مطالعه توسعه می‌یابد. در ادامه، استخراج قانون کنترل به روش انتگرال مقاوم علامت خطا برای سیستم موتور دیزل و پایداری آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. اهمیت ارائه این روش در رسیدن به پایداری مجانبی با تلاش کنترلی کمتر نسبت به سایر روش‌های کنترل غیرخطی از جمله کنترل به روش مود لغزشی است.

## ۲-۴ استخراج قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای

### موتور دیزل

برای ارائه قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا، ابتدا مدل دینامیکی موتور دیزل، همان -طوری که در رابطه (۳-۳) بیان شد، در نظر گرفته می‌شود.

برای تعریف قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا با توجه به اینکه مدل دینامیکی موتور دیزل از مرتبه یک است، بردارهای خطا  $e_1$  و فیلتر خطای ردیابی<sup>۱</sup>  $r$  به ترتیب طبق روابط (۱-۴) و (۲-۴) معرفی شده است [۲۲].

$$e_1 \triangleq x_d - x \quad (1-4)$$

$$r \triangleq \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1 \quad (2-4)$$

$x$  و  $x_d$  به ترتیب بردار متغیر حالت سیستم و بردار متغیر حالت در شرایط مطلوب است.  $\alpha_1$  ثابتی مثبت می‌باشد. با استفاده از متغیرهای تعریف شده در رابطه (۱-۴) و (۲-۴)، می‌توان معادلات سیستم (۳-۳) را به صورت رابطه (۳-۴) بازنویسی نمود.

$$r = \dot{x}_d - f(x) - g(x)u + \alpha_1 e_1 \quad (3-4)$$

با توجه به بیان معادله (۳-۴)، کنترلی طبق رابطه (۴-۴) برای سیستم مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود.

$$u = g^{-1}(\dot{x}_d - \hat{f}(x) + \alpha_1 e_1 + \mu(t)) \quad (4-4)$$

در رابطه (۴-۴)،  $\mu$  جهت جبران نامعینی‌های موجود در سیستم تعریف شده که در ادامه نحوه استخراج آن بیان می‌شود. با جایگذاری کنترل (۴-۴)، در معادله (۳-۴)، رابطه (۵-۴) به دست می‌آید.

$$r = D - \mu(t) \quad (5-4)$$

در معادله (۵-۴)،  $D$  عبارتی است از عدم قطعیت مدل که طبق رابطه (۶-۴) به دست می‌آید.

$$D = \hat{f}(x) - f(x) \quad (6-4)$$

از معادله (۵-۴)، می‌توان نتیجه گرفت که اگر  $r$  به سمت صفر میل نماید، آنگاه جمله  $\mu$ ، عدم قطعیت‌های مدل یعنی  $D$  را ردیابی خواهد کرد. بنابراین، عبارت کنترلی  $\mu$ ، باید طوری طراحی شود که  $r$

---

<sup>1</sup> Filter tracking error

به سمت صفر میل نماید. با مشتق‌گیری از معادله (۴-۵)، رابطه (۴-۷) برای دینامیک خطای سیستم به دست می‌آید.

$$\dot{r} = \dot{D} - \dot{\mu}(t) \quad (۴-۷)$$

بر اساس معادله (۴-۷) و تحلیل پایداری که در ادامه ارائه می‌شود،  $\mu$  به صورت رابطه (۴-۸) طراحی شده است.

$$\mu = (K_s + 1)e_1(t) - (K_s + 1)e_1(0) + \int_0^t [(K_s + 1)\alpha_1 e_1(\tau) + \beta \operatorname{sgn}(e_1(\tau))] d\tau \quad (۴-۸)$$

در رابطه (۴-۸)،  $\beta$  و  $K_s$  بهره‌های کنترلی ثابت و مثبت هستند و  $\operatorname{sgn}$  نیز تابع علامت می‌باشد. با مشتق گرفتن از رابطه (۴-۸)، رابطه (۴-۹) را می‌توان نوشت.

$$\dot{\mu} = (K_s + 1)r + \beta \operatorname{sgn}(e_1) \quad (۴-۹)$$

با جایگذاری معادله (۴-۹) در رابطه دینامیک خطای (۴-۷)، معادله (۴-۱۰) به دست می‌آید.

$$\dot{r} = -(K_s + 1)r - e_1 - \beta \operatorname{sgn}(e_1) + N \quad (۴-۱۰)$$

در رابطه (۴-۱۰)،  $N$  یک متغیر کمکی است که به صورت رابطه (۴-۱۱) می‌باشد.

$$N(x, \dot{x}, t) \triangleq \dot{D} + e_1 \quad (۴-۱۱)$$

برای تحلیل پایداری، متغیر کمکی  $N_d$  به عنوان مقدار مطلوب  $N$  به صورت معادله (۴-۱۲) تعریف شده است.

$$N_d \triangleq \frac{\partial D}{\partial x} \dot{x}_d \quad (۴-۱۲)$$

رابطه (۴-۱۳) را می‌توان برای خطای مربوط به  $N$  بیان کرد.

$$\tilde{N} \triangleq N - N_d \quad (۴-۱۳)$$

با توجه به کراندار بودن  $D$  و  $\dot{x}_d$  می‌توان کراندار بودن  $N_d$  را با توجه به رابطه (۴-۱۲) نتیجه گرفت؛ لذا روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵) به ترتیب برای کران  $N_d$  و  $\dot{N}_d$  تعریف می‌شود.

$$N_d \leq \xi_{N_d} \quad (۴-۱۴)$$

$$\dot{N}_d \leq \xi_{N_d^2} \quad (۴-۱۵)$$

در روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵)،  $\xi_d$  و  $\xi_{d2}$ ، ثوابت مثبت معلوم می‌باشند. در ادامه قانون کنترلی مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا معرفی و روند به‌دست آوردن آن و اثبات پایداری با اعمال این قانون کنترلی ارائه خواهد شد.

### ۴-۳ تحلیل پایداری بر اساس قانون کنترلی مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا

برای بررسی پایداری سیستم و استخراج قانون کنترلی مدنظر، تابع لیپانوف به‌صورت رابطه (۴-۱۶) پیشنهاد می‌شود [۲۲].

$$V(y, t) \triangleq \frac{1}{2} e_1^T e_1 + \frac{1}{2} r^T r + p \quad (۴-۱۶)$$

دو عبارت اول در رابطه (۴-۱۶) مثبت هستند و برای اینکه تابع لیپانوف مثبت باشد، جمله آخر یعنی  $p$  عبارتی مثبت تعریف خواهد شد؛ لذا با این شرط اخیر تابع لیپانوف تعریف شده طبق رابطه (۴-۱۶)، مثبت معین خواهد بود. عبارت  $p$  به‌صورت رابطه (۴-۱۷) بیان می‌شود.

$$p(t) \triangleq \beta \|e_1(0)\| - e_1(0)^T N_d(0) - \int_0^t L(\tau) d\tau \quad (۴-۱۷)$$

که در رابطه (۴-۱۷)،  $L$  مطابق با رابطه (۴-۱۸) تعریف می‌شود.

$$L(t) \triangleq r^T (N_d(t) - \beta \operatorname{sgn}(e_1)) \quad (۴-۱۸)$$

با توجه به انتخاب  $\beta$  طبق رابطه (۴-۱۹) مطابق با استدلالی که در پیوست ارائه شده است می‌توان مثبت بودن  $p$  را نتیجه گرفت.

$$\beta > \xi_{N_d} + \frac{1}{\alpha_2} \xi_{N_{d^2}} \quad (۴-۱۹)$$

برای پایدار بودن سیستم، بایستی رابطه (۴-۲۰) برقرار باشد.

$$\dot{V} < 0 \quad (۴-۲۰)$$

به عبارت دیگر،  $\dot{V}$  باید منفی معین باشد؛ لذا با مشتق گرفتن از تابع لیپانوف (۴-۱۶)، رابطه (۴-۲۱) به‌دست می‌آید.

$$\dot{V} = r^T \dot{r} + e_1^T \dot{e}_1 + \dot{p} \quad (۴-۲۱)$$

در رابطه (۲۱-۴)  $\dot{p}$  با مشتق گرفتن از رابطه (۱۷-۴) به دست می آید که در رابطه (۲۲-۴) بیان شده است.

$$\dot{p}(t) = -L(t) = -r^T(N_d(t) - \beta \text{sgn}(e_1)) \quad (22-4)$$

با جایگذاری روابط (۲-۴)، (۱۰-۴) و (۲۲-۴) در معادله (۲۱-۴) و ساده سازی، معادله (۲۳-۴) به دست می آید.

$$\dot{V} = r^T \tilde{N}(t) - (K_s + 1)\|r\|^2 - \alpha_1 \|e_1\|^2 \quad (23-4)$$

در رابطه (۲۳-۴)، اگر عبارت مثبت  $\|e_1\|^2$  اضافه شود، آنگاه معادله (۲۳-۴) به نامعادله (۲۴-۴) تبدیل می شود.

$$\dot{V} \leq r^T \tilde{N}(t) - (K_s + 1)\|r\|^2 - \alpha_1 \|e_1\|^2 + \|e_1\|^2 \quad (24-4)$$

با ساده سازی و مرتب نمودن رابطه (۲۴-۴) و تعریف پارامترهایی مطابق با روابط (۲۵-۴) و (۲۶-۴) می توان نامعادله (۲۷-۴) را نتیجه گرفت.

$$\lambda_3 \triangleq \min\{\alpha_1 - 1, 1\} \quad (25-4)$$

$$z = [e_1^T \quad r^T]^T \quad (26-4)$$

$$\dot{V} \leq \|\tilde{N}(t)\| \|r\| - K_s \|r\|^2 - \lambda_3 \|z\|^2 \quad (27-4)$$

برای برقرای رابطه (۲۷-۴) پارامتر کنترلی  $\alpha_1$  باید طوری انتخاب شود که شرط (۲۸-۴) برقرار باشد.

$$\alpha_1 > 1 \quad (28-4)$$

با توجه به رابطه (۱۱-۴) و با فرض کراندار بودن  $\tilde{N}(t)$  می توان رابطه (۲۹-۴) را نوشت.

$$\|\tilde{N}(t)\| \leq \rho(\|z\|)\|z\| \quad (29-4)$$

در رابطه (۲۹-۴)،  $\rho(\|z\|)$  یک تابع غیر کاهشی معکوس پذیر مثبت است. با در نظر گرفتن رابطه (۴-۲۹) می توان نامعادله (۲۷-۴) را به صورت رابطه (۳۰-۴) استنتاج نمود.

$$\dot{V} \leq -(K_s \|r\|^2 - \rho(\|z\|)\|r\|\|z\|) - \lambda_3 \|z\|^2 \quad (30-4)$$

با اضافه و کم نمودن جمله  $\frac{(\rho\|z\|)^2}{4K_s}$  به طرف راست نامعادله (۳۰-۴) و تشکیل اتحاد مربع سه جمله ای و سپس حذف آن به عنوان یک جمله منفی (با توجه به علامت منفی پشت اتحاد مربع)، همچنان نامعادله فوق برقرار بوده و می توان آن را به صورت رابطه (۳۱-۴) نوشت.



$$\dot{V} \leq -\left(\lambda_3 - \frac{\rho^2}{4K_s}\right)\|z\|^2 \quad (31-4)$$

رابطه (31-4) را می‌توان به صورت رابطه (32-4) بازنویسی کرد.

$$\dot{V} \leq -W(y) \quad (32-4)$$

در رابطه (32-4)،  $W(y)$  با توجه به نامعادله (31-4) طبق رابطه (33-4) تعریف می‌شود.

$$W(y) = \left(\lambda_3 - \frac{\rho^2}{4K_s}\right)\|z\|^2 \quad (33-4)$$

در رابطه (32-4)، با توجه به رابطه (16-4) می‌توان  $y$  را به عنوان بردار حالت‌های تعریف شده در تابع لیاپانوف به صورت رابطه (34-4) تعریف نمود.

$$y(t) \triangleq \begin{bmatrix} z^T(t) & \sqrt{p(t)} \end{bmatrix}^T \quad (34-4)$$

برای اینکه مشتق تابع لیاپانوف طبق رابطه (32-4) منفی باشد، بایستی عبارت  $W(y)$  تعریف شده در رابطه (33-4) مثبت باشد، لذا رابطه (35-4) با توجه به این شرط، بایستی برقرار باشد.

$$\|y\| \leq \rho^{-1} (2\sqrt{\lambda_3 k_s}) \quad (35-4)$$

در نتیجه با برقراری رابطه (35-4) مشتق تابع لیاپانوف منفی معین شده و با استفاده از تئوری پایداری لیاپانوف، می‌توان پایداری لیاپانوفی سیستم را نتیجه گرفت؛ لذا تابع لیاپانوف تعریف شده از بالا کراندار بوده و طبق رابطه (16-4) می‌توان نتیجه گرفت که  $e_1$  و  $r$  محدود هستند. با محدود شدن پارامترهای فوق می‌توان طبق رابطه (2-4) نتیجه گرفت که  $\dot{e}_1$  محدود است و با توجه به آن و با فرض محدود بودن مشتق اول مسیر مطلوب می‌توان محدود بودن  $\dot{x}$  را نتیجه گرفت. با توجه به کراندار بودن پارامترهای فوق، از رابطه (4-4)، (8-4) و (9-4) می‌توان استنتاج کرد که  $\mu$ ،  $\dot{\mu}$  و  $u$  نیز محدود هستند. با فرض محدود بودن  $\dot{D}$ ، از رابطه (7-4) می‌توان محدود بودن  $\dot{r}$  را نتیجه گرفت. در نتیجه با مشتق گرفتن از رابطه (33-4)، می‌توان محدود بودن  $\dot{V}$  را نتیجه گرفت و لذا با توجه به لم باربالات<sup>1</sup> می‌توان گفت که وقتی زمان به سمت بی‌نهایت میل می‌کند  $\dot{V}$  به سمت صفر میل خواهد نمود؛ لذا می‌توان طبق رابطه (4-4) و با شرط (33-4) استنتاج کرد که  $\|z\|$  به صفر میل کرده و با توجه به رابطه (26-4) می‌توان پایداری جانبی خطای سیستم را نتیجه گرفت. در نتیجه با توجه به استدلالی که ارائه شد، می‌توان گفت

---

<sup>1</sup> Lemma Brablat

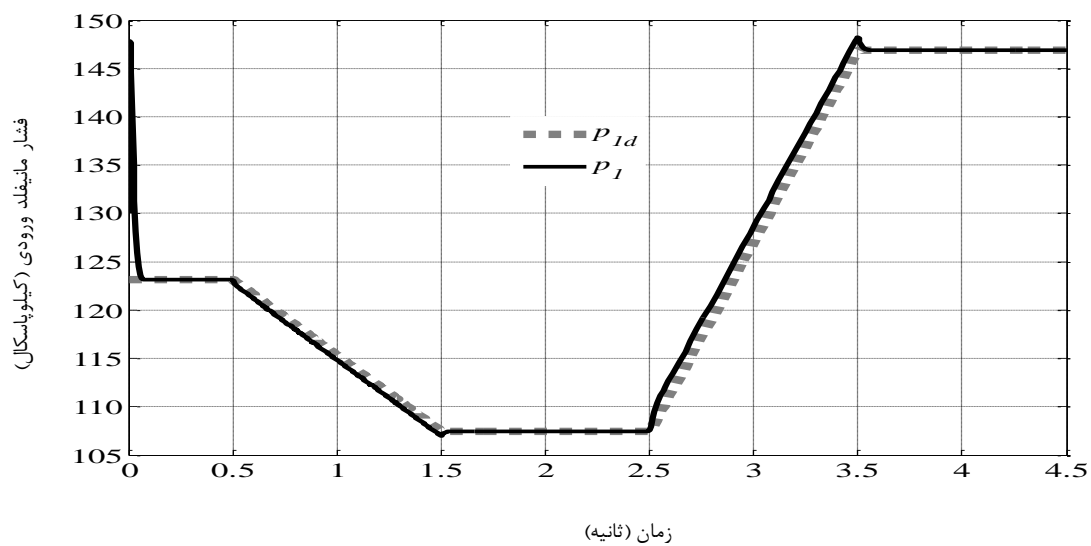
با اعمال کنترلر پیشنهادی (۴-۴) با لحاظ رابطه (۴-۸) به سیستم مورد مطالعه، پایداری مجانبی سیستم برقرار می‌باشد.

## ۴-۴ شبیه‌سازی قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتور دیزل

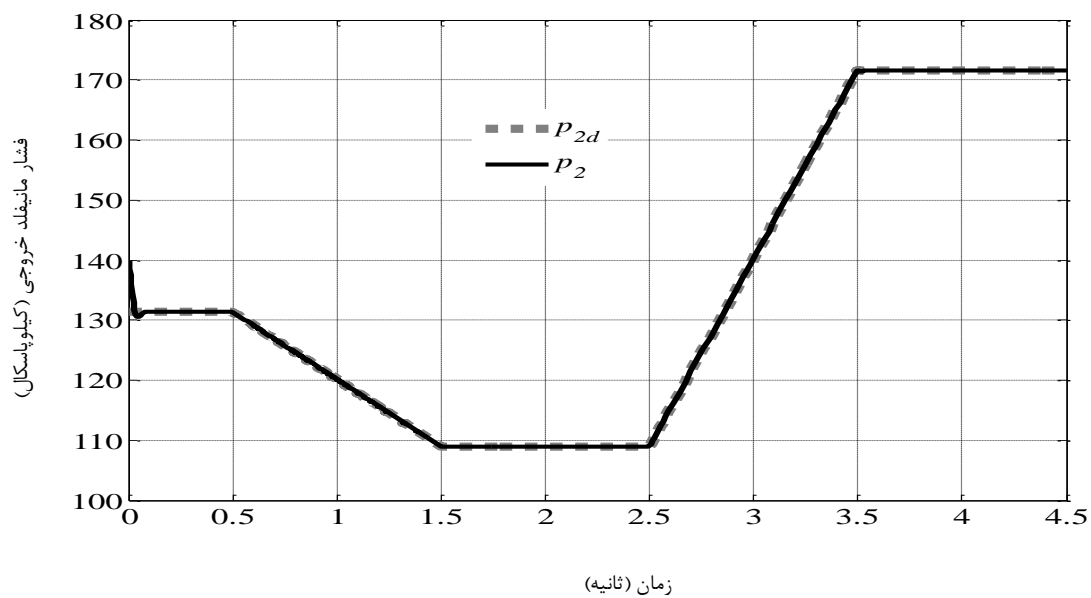
در این قسمت، شبیه‌سازی قانون کنترل مبتنی بر انتگرال مقاوم علامت خطا برای موتور دیزل انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی سیستم باید در نظر داشت که پارامترهای کنترلی که در قانون کنترل بیان شده است، طوری انتخاب شوند که تمامی شرایطی که در تحلیل پایداری ارائه شد، ارضا شود؛ لذا مقادیر عددی پارامترهای کنترل در روش انتگرال مقاوم علامت خطا برای این شبیه‌سازی به صورت رابطه (۴-۳۶) انتخاب می‌شود.

$$k_s = 200, \beta = 300, \alpha_1 = 50 \quad (۴-۳۶)$$

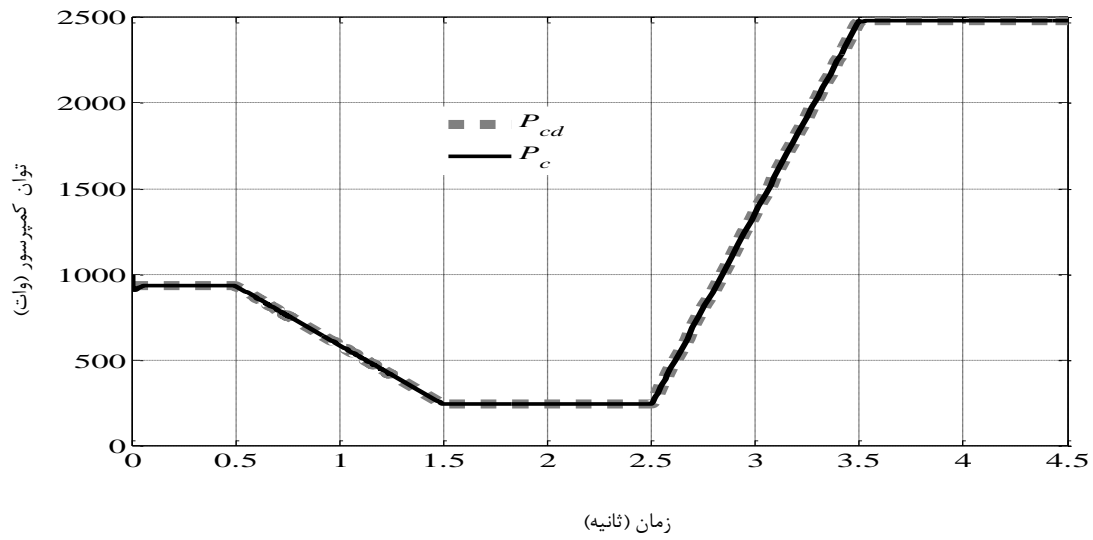
مسیر مطلوبی که برای متغیرهای حالت سیستم در نظر گرفته شده است، مسیری است که در جدول ۳-۱ در فصل قبل برای قوانین کنترل خطی‌سازی پس‌خورد و مود لغزشی بیان شد. در این شبیه‌سازی ۲۵ درصد عدم قطعیت در مدل لحاظ می‌شود و مدت اجرای این شبیه‌سازی ۴,۵ ثانیه است و شرایط اولیه برای متغیرهای حالت سیستم به صورت  $p_1 = 130kpa$ ،  $p_2 = 140kpa$  و  $P_c = 1000W$  می‌باشد. شکل‌های ۴-۱، ۴-۲ و ۴-۳ ردیابی متغیرهای حالت سیستم را بر روی مسیر مطلوب نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل RISE

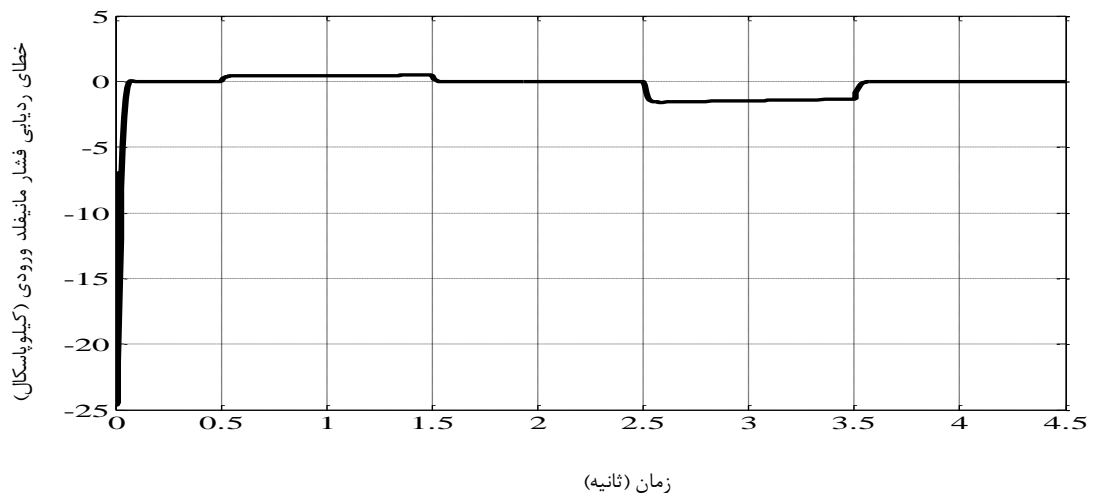


شکل ۲-۴ ردیابی مسیر برای فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل RISE

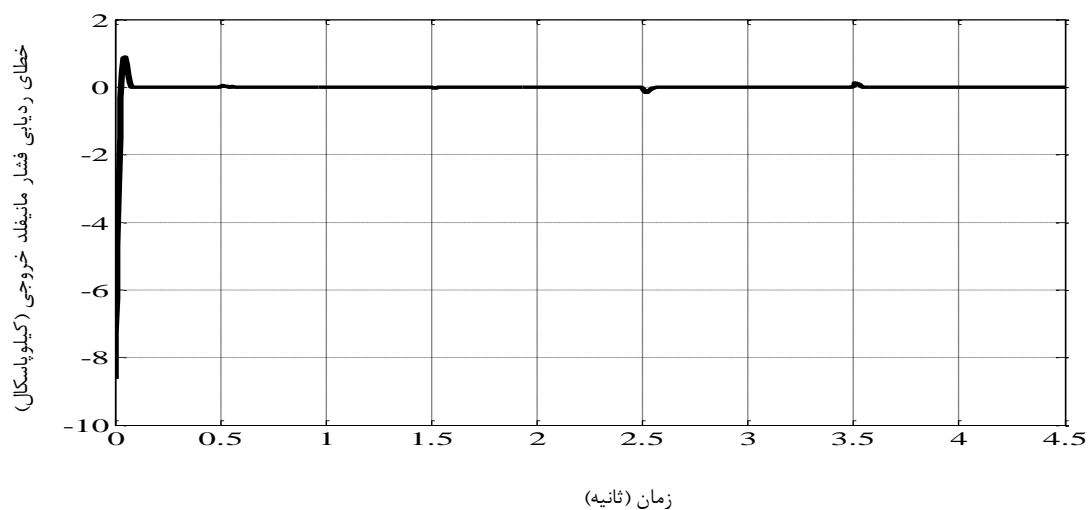


شکل ۳-۴ ردیابی مسیر برای توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل RISE

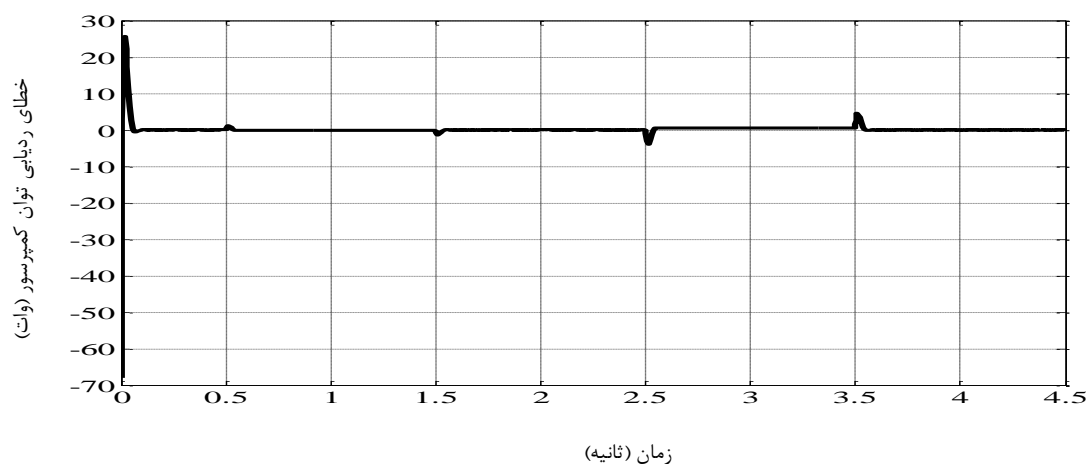
خطای ردیابی برای متغیرهای حالت سیستم نیز در شکل‌های ۴-۴، ۴-۵ و ۴-۶ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴ خطای ردیابی فشار مانیفولد ورودی با اعمال قانون کنترل RISE

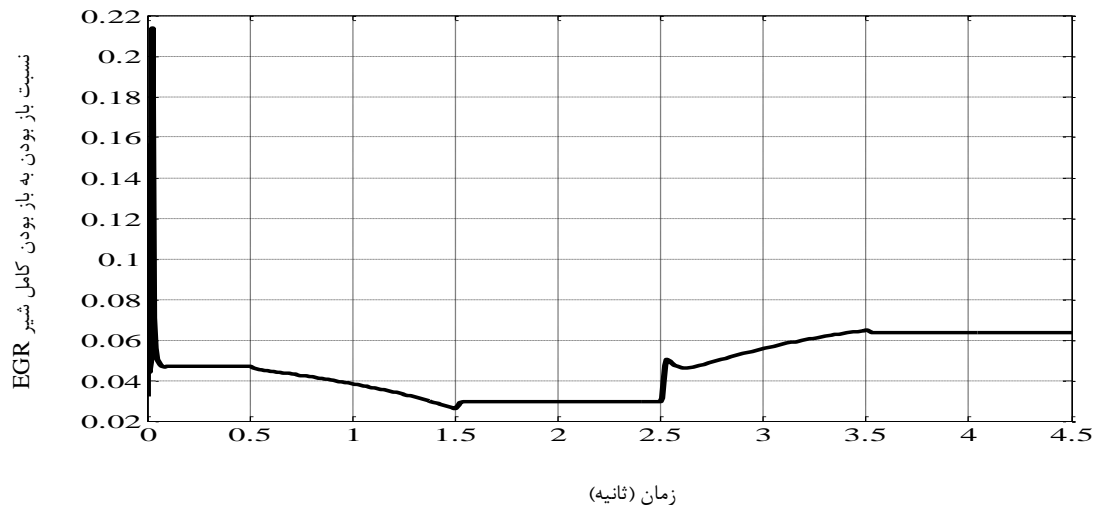


شکل ۴-۵ خطای ردیابی فشار مانیفولد خروجی با اعمال قانون کنترل RISE

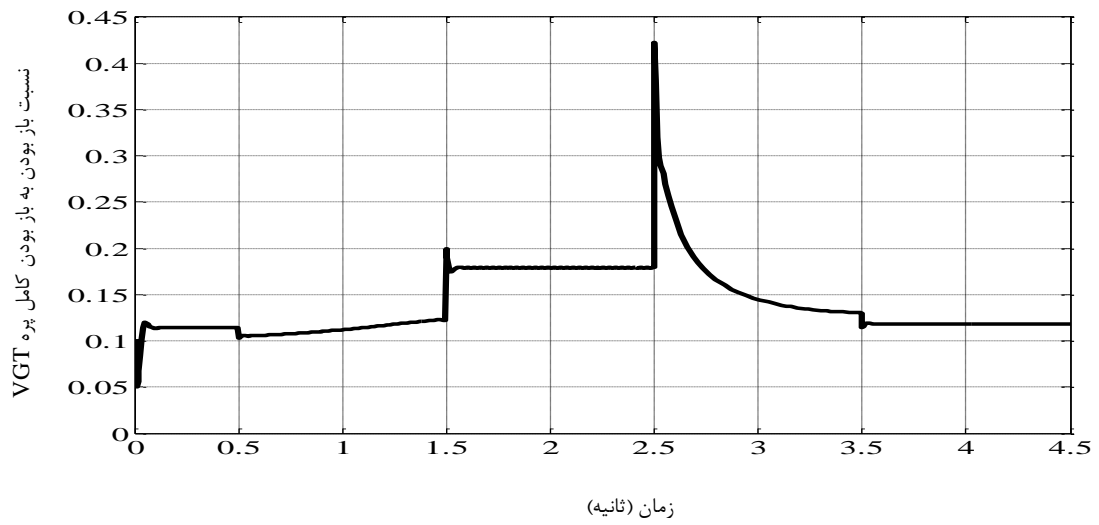


شکل ۴-۶ خطای ردیابی توان کمپرسور با اعمال قانون کنترل RISE

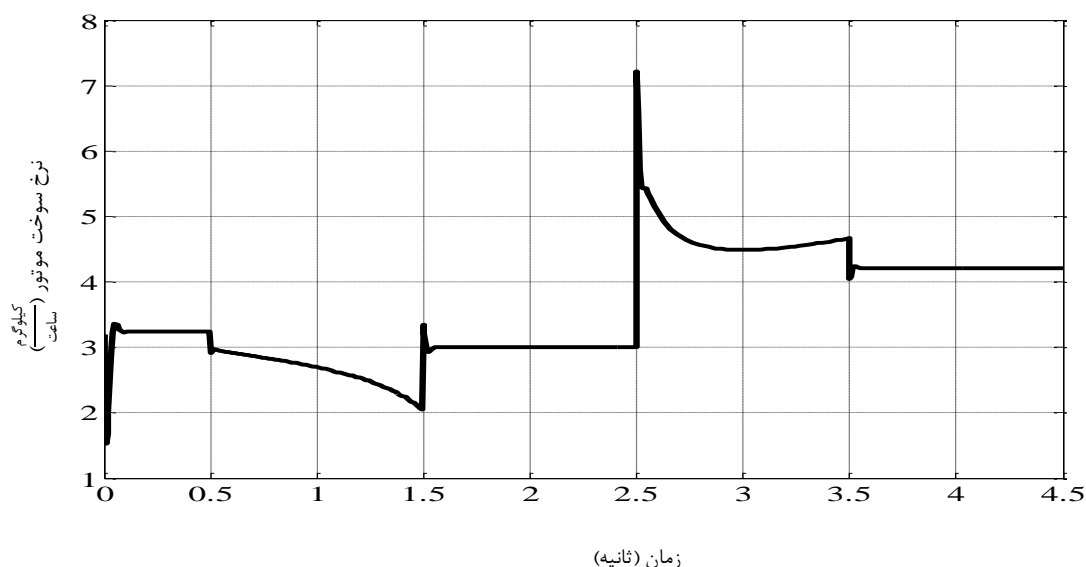
شکل‌های ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ ورودی‌های کنترل با استفاده از قانون کنترلی انتگرال مقاوم علامت خطا برای سیستم موتور دیزل نمایش می‌دهند.



شکل ۷-۴ ورودی کنترل موقعیت شیر EGR با اعمال قانون کنترل RISE



شکل ۸-۴ ورودی کنترل موقعیت پره VGT با اعمال قانون کنترل RISE



شکل ۴-۹ ورودی کنترل نرخ سوخت موتور با اعمال قانون کنترل RISE

همان طوری که از شکل‌های ۴-۱ تا ۴-۹ مشاهده می‌شود، قانون کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا توانسته است با استفاده از یک ساختار پیوسته در عبارت کنترل، عملکرد سیستم موتور دیزل را نسبت به حالتی که از قانون کنترل مود لغزشی استفاده شده بهبود ببخشد. خطای ردیابی با تلاش کنترلی قابل قبول توسط روش انتگرال مقاوم علامت خطا برای هر سه متغیر حالت سیستم موتور دیزل کاهش یافته است و با وجود اینکه عدم قطعیت در مدل به میزان ۲۵ درصد لحاظ گردید؛ با انتخاب قانون کنترلی مذکور پایداری سیستم به دست آمده است. نکته قابل توجه این است که در حالت ماندگار با کاهش تلاش کنترلی خطای ردیابی نیز کاهش یافته است اما این امر در ابتدای مسیر اتفاق نمی‌افتد. به عبارت دیگر، یک مشکل مهم در استفاده از قانون کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا این است که در ابتدای مسیر با وجود تلاش کنترلی بالا خطای ردیابی نیز زیاد است که برای یک سیستم نمی‌تواند مناسب باشد. به هر حال روش انتگرال مقاوم علامت خطا را می‌توان یک روش مناسب برای رسیدن به پایداری مجانبی در حضور عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات برای سیستم‌های مراتب بالای چند ورودی و چند خروجی در حالت ماندگار دانست.

در فصل بعد مقایسه روش‌های کنترلی به کار گرفته شده برای سیستم موتور دیزل و نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای کارهای آینده ارائه می‌شود.





## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقایسه عملکرد قوانین کنترل استفاده شده برای موتور دیزل

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازهایی که در فصل‌های قبلی انجام شد به مقایسه روش‌های کنترلی به کار گرفته شده برای سیستم موتور دیزل پرداخته می‌شود. در مقایسه روش‌ها باید عدم قطعیت سیستم را در نظر داشت.

همان‌طوری که در روش خطی‌سازی پسخورد که یک روش کنترل غیرخطی است، بیان شد، اساس طراحی قانون کنترل برمبنای مدل دقیق سیستم خواهد بود؛ لذا عدم قطعیت در این روش کنترل لحاظ نمی‌گردد.

جدول ۵-۱ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت در دو ثانیه انتهایی مسیر با استفاده از روش خطی‌سازی پسخورد را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از خطی‌سازی پسخورد

زمان (ثانیه)	خطای ردیابی $p_1$	خطای ردیابی $p_2$	خطای ردیابی $P_c$
2.5	-0.6224	-0.9887	-35.3852
3	-1.3139	-2.0872	-74.7054
3.5	-0.0708	-0.6379	-22.8290
4	$-1.3488 \times 10^{-4}$	$-2.1902 \times 10^{-4}$	-0.0078
4.5	$-3.1524 \times 10^{-7}$	$-5.0081 \times 10^{-7}$	$-1.7923 \times 10^{-5}$

روش مود لغزشی برای سیستم‌هایی که دارای عدم قطعیت هستند مناسب می‌باشند اما همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد، رسیدن به پایداری مجانبی برای سیستم با استفاده از روش مود لغزشی با تلاش کنترل زیاد صورت می‌پذیرد که برای سیستم مناسب نمی‌باشد. روش‌های مختلفی برای کاهش این پدیده یعنی لرزش در سیگنال ورودی، معرفی شده است اما این کاهش با افزایش خطا همراه است. جدول ۵-۲ مقادیر خطای ردیابی را برای سه متغیر حالت در دو ثانیه انتهایی مسیر با استفاده از روش مود لغزشی با لحاظ کردن ۲۵ درصد عدم قطعیت در مدل نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از روش مود لغزشی

خطای ردیابی $P_c$	خطای ردیابی $p_2$	خطای ردیابی $p_1$	زمان (ثانیه)
-0.0733	0.2159	-0.2715	2.5
-221.0517	5.9293	6.2855	3
-433.9416	1.4365	2.6282	3.5
-2.2228	1.2076	0.9140	4
-9.4072	1.0540	0.6307	4.5

روش کنترلی انتگرال مقاوم علامت خطا یک روش کنترل غیرخطی مقاوم محسوب می‌شود که با استفاده از یک ساختار پیوسته در عبارت قانون کنترل، پایداری جانبی برای سیستم را در حضور عدم قطعیت در مدل به دست می‌آورد. جدول ۳-۵ مقادیر خطای ردیابی را برای سه متغیر حالت در دو ثانیه انتهایی مسیر با استفاده از روش انتگرال مقاوم علامت خطا با لحاظ کردن ۲۵ درصد عدم قطعیت در مدل نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵ مقادیر خطای ردیابی برای سه متغیر حالت سیستم با استفاده از روش RISE

خطای ردیابی $P_c$	خطای ردیابی $p_2$	خطای ردیابی $p_1$	زمان (ثانیه)
-0.9325	-0.0294	-0.0441	2.5
0.4770	-0.0136	-1.4627	3
1.5347	0.0151	-1.3356	3.5
$-7.9132 \times 10^{-4}$	$7.3978 \times 10^{-4}$	$-8.8270 \times 10^{-4}$	4
$8.7638 \times 10^{-4}$	$9.4363 \times 10^{-4}$	$-7.5623 \times 10^{-4}$	4.5

با مقایسه کردن مقادیر خطای ردیابی به روش‌های کنترلی متفاوت می‌توان دید، هنگامی که عدم قطعیت در مدل وجود دارد، روش‌های کنترل مقاوم برای کنترل سیستم مناسب می‌باشد اما در بین روش‌های مقاوم، روشی مناسب‌تر است که با تلاش کنترلی کمتر، خطای ردیابی را کاهش دهد. روش انتگرال مقاوم علامت خطا، خطای ردیابی را با تلاش کنترلی کمتری نسبت به روش مود لغزشی کاهش می‌دهد و باعث افزایش عملکرد موتور دیزل می‌شود.

## ۲-۵ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، یک قانون کنترلی جدید به نام انتگرال مقاوم علامت خطا برای کنترل سیستم موتور دیزل مجهز به توربوشارژر ارائه شد. در طراحی کنترلرهای مبتنی بر مدل، شناخت دقیق از مدل دینامیکی سیستم حائز اهمیت بوده که این امر در عمل به‌واسطه حضور اغتشاشات و عدم قطعیت‌های موجود در

سیستم دشوار می‌باشد. یکی از راه‌های مرسوم مقابله با عدم قطعیت‌های مدل، استفاده از کنترلر مود لغزشی می‌باشد که در این تحقیق از این روش نیز استفاده شد و برای سیستم مورد مطالعه قانون کنترل مربوطه و اثبات پایداری آن انجام شد. علی‌رغم مزایای این کنترلر که شامل سادگی در طراحی نیز می‌باشد یکی از معایب آن وجود پدیده چترینگ می‌باشد. لذا در این مقاله برای حل این مشکل از روش کنترلی بر مبنای انتگرال مقاوم علامت خطا استفاده شد. برای استخراج قانون کنترلی مناسب و به‌دست آوردن شرایط مناسب برای پایداری سیستم، تابعی مثبت معین به‌عنوان تابع لیاپانوف ارائه شد. جهت بررسی عملکرد کنترلر پیشنهادی مبتنی بر انتگرال مقاوم خطا، شبیه‌سازی سیستم انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که کنترل انتگرال علامت خطا عملکرد ردیابی و تلاش کنترلر را که دو هدف اصلی، برای ردیابی مسیر هستند، با وجود اغتشاشات و عدم قطعیت در مدل در حالت ماندگار بهبود بخشیده است. مشکل مهمی که در استفاده از قانون کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا مشاهده شد، این است که در ابتدای مسیر با اینکه تلاش کنترل زیاد است، خطا ردیابی زیاد می‌باشد.

### ۵-۳ پیشنهادها

برای عملکرد بهتر روش انتگرال مقاوم علامت خطا در ابتدای مسیر می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای انتخاب بهره‌های کنترلی در قانون کنترل انتگرال مقاوم علامت خطا استفاده کرد. همچنین برای کاهش تلاش کنترلی در ابتدای مسیر نیز می‌توان از توابع اشباع یا تانژانت به‌جای تابع علامت استفاده کرد.

در کنترل سیستم موتور دیزل همان‌طوری که مشاهده شد، طراحی کنترل‌کننده با سه ورودی موقعیت شیر EGR، موقعیت پره‌های توربین VGT و نرخ سوخت رسانی انجام شد. در کارهای آینده می‌توان با افزایش تعداد ورودی‌های کنترلی، عملکرد موتور را بهبود بخشید. به‌عنوان مثال می‌توان علاوه بر سه ورودی کنترلی مذکور، ورودی دور موتور را نیز تحت کنترل قرار داد و قوانین کنترل را برای چهار ورودی کنترلی به سیستم موتور دیزل در نظر گرفت.

## ۶ پیوست

اثبات مثبت بودن عبارت  $p(t)$ :

با جایگذاری رابطه (۲-۴) در معادله (۱۸-۴) و انتگرال گیری از آن، رابطه (۱-۶) به دست می آید.

$$\begin{aligned} \int_0^t L(\tau) d\tau &= \int_0^t \alpha_1 e_1(\tau) \\ &\times \left( N_d(\tau) - \beta \operatorname{sgn}(e_1(\tau)) \right) d\tau \\ &+ \int_0^t \frac{d(e_1(\tau))}{d\tau} N_d(\tau) d\tau \\ &- \int_0^t \beta \frac{d(e_1(\tau))}{d\tau} \operatorname{sgn}(e_1(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (1-6)$$

بعد از ساده سازی طرف راست معادله (۱-۶)، معادله (۲-۶) به دست می آید.

$$\begin{aligned} \int_0^t L(\tau) d\tau &= \int_0^t \alpha_1 e_1(\tau) \\ &\times \left( N_d(\tau) - \frac{1}{\alpha_1} \frac{dN_d(\tau)}{d\tau} \beta \operatorname{sgn}(e_1(\tau)) \right) d\tau \\ &+ e_1(t) N_d(t) - e_1(0) N_d(0) \\ &- \beta |e_1(t)| + \beta |e_1(0)| \end{aligned} \quad (2-6)$$

با نوشتن کران بالای طرف راست معادله (۲-۶)، نامعادله (۳-۶) به دست می آید.

$$\begin{aligned} \int_0^t L(\tau) d\tau &\leq \int_0^t \alpha_1 |e_1(\tau)| \\ &\times \left( |N_d(\tau)| - \frac{1}{\alpha_1} \left| \frac{dN_d(\tau)}{d\tau} \right| - \beta \right) d\tau \\ &+ |e_1(t)| (|N_d(t) - \beta|) + \beta |e_1(0)| \\ &- e_1(0) N_d(0) \end{aligned} \quad (3-6)$$

از رابطه (۳-۶)، می توان استنتاج کرد که اگر  $\beta$  طبق رابطه (۱۹-۴) انتخاب شود، رابطه (۴-۶) برقرار خواهد بود.

$$\int_0^t L(\tau) d\tau \leq \beta |e_1(0)| - e_1(0) N_d(0) \quad (4-6)$$

برقراری رابطه (4-6) به طور مستقیم، مثبت بودن  $p(t)$  را طبق رابطه (4-17) نشان می دهد.

- [1] T. Shirakawa, H. Itoyama, and H. Miwa, (2001), "Study of strategy for model-based cooperative control of EGR and VGT in a diesel engine," *JSAE Review*, vol. 22, pp. 3-8.
- [2] k. Nikzadfar, (2009), "*Design turbocharged diesel engine idle speed control using fuzzy controller*," Iran University of Science and Technology Department of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology.
- [3] A. R. Noorpoor and K. Nikzadfar, (2009), "Modelling dynamic of Deisle Engine 1.6 Liter by Use Mean Value Model " *Proceedings of the Sixth International Conference on Internal Combustion Engines*.
- [4] M. Jung, (2003), "Mean-Value Modelling and Robust Control of The Air-path of a Turbocharged Diesel Engine," *University of Cambridge*.
- [5] J. Fredriksson and B. Egart, (2001), "Backstepping Control With Local LQ Performance Applied to a Turbocharged Diesel Engine," *In Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*.
- [6] M. Van Nieuwstadt, P. E. Moraal, I. V. Kolmanovsky, A. Stefanopoulou, P. Wood, and M. Criddle, (1998), "Decentralized and Multivariable Designs for EGR-VGT Control of a Diesel Engine," *In Proceedings IFAC Workshop, Advances in Automotive Control, Mohican State Park, Loudon Ville, Ohio, USA*, pp. 191–196.
- [7] N. Langlois, A. A. Sofian, N. doy, and Bada, (2012), "Sliding Mode Control for Turbocharged Diesel," *20th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* pp. 996-1001.
- [8] M. Jung and K. Glover, (2006), "Calibratable Linear Parameter-Varying Control of Turbocharged Diesel Engines," *In IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, pp. 45-62.
- [9] J. J. E. Slotine and W. Li, (1991), "*Applied Nonlinear Control*", Prentice Hall, Boston, USA.

- [10] P. R. Ouyang, J. Acob, and V. Pano, (2014), "PD With Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Robot," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* vol. 30, pp. 189–200.
- [11] B. Xian, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz, and J. Chen, (2004), "A Continuous Asymptotic Tracking Control Strategy for Uncertain Nonlinear Systems," *IEEE Transactions on Automatic control*, vol. 49, pp. 1206-1211.
- [12] T. Dierks and S. Jagannathan, (2009), "Neural Network Control of Mobile Robot Formations Using RISE Feedback," *IEEE Transactions on Systems*, vol. 39, pp. 332-347.
- [13] M. Malekzadeh, A. Khosravi, P. Sarhadi, and R. Ghaderi, (2014), "Rise Feedback Controller Design of Single-link Robot with an Adaptive Neural Network Observer " *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, vol. 4, pp. 126-137.
- [14] Y. Kawai, H. Kawai, and M. Fujita, (2013), "RISE Control for 2DOF Human Lower Limb with Antagonistic Bi-Articular Muscles," *IEEE Conference Publications*, pp. 109-114.
- [15] M. Yazdanzad, A. Khosravi, A. Ranjbar N., and P. Sarhadi, (2014), "Optimal Design of a RISE Feedback Controller for a 3-DOF Robot Manipulator Using Particle Swarm Optimization " *I.J. Information Technology and Computer Science*, vol. 8, pp. 25-31.
- [16] B. Hadi, A. Khosravi, A. Ranjbar N., and P. Sarhadi, (2014), "RISE Feedback Control Design for RLED Robot Manipulator Using Bees Algorithm " *Journal of Advances in Computer Research*, vol. 5, pp. 53-65.
- [17] M. Jankovic, M. S. jankovic, and I. Kolmanovsky, (2000), "Constructive Lyapunov Control Design for Turbocharged Diesel Engines," *IEEE Transactions Control Systems Technology* vol. 8, pp. 288-299.
- [18] M. Herceg, (2006), Diploma thesis, "*Nonlinear Model Predictive Control of a Diesel Engine with Exhaust Gas Recirculation and Variable Geometry Turbocharger*," Slovak University of Technology in Bratislava.
- [19] H. K. Khalil, (2002), "*Nonlinear Systems*" Upper Saddle River: NJ: Prentice-Hall.



- [20] J. Yao and D. Ma, (2014), "RISE-Based Precision Motion Control of DC Motors With Continuous Friction Compensation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 7067-7075.
- [21] N. Fischer, D. Hughes, P. Walters, E. M. Schwartz, and W. E. Dixon, (2014), "Nonlinear RISE-Based Control of an Autonomous Underwater Vehicle," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 30, pp. 845-852.
- [22] C. Makkar, (2006), "*Nonlinear Modeling Identification and Compensation for Frictional Disturbances*," University of Florida.



## **Abstract**

In this thesis, robust integral of the sign of the error method (RISE) is proposed to path tracking control for Turbocharged Diesel Engine (TDE) model. In designing controllers based on the model, a detailed understanding of the dynamic model is important that in application this disturbances and uncertainties in the system are difficult. One of the common methods to cope with model uncertainties is using the sliding mode control that despite advantages including simplicity in the design of the controller, there is disadvantages in result due to the chattering phenomenon. Therefore, in this thesis to solve this problem and to improve the steady-state error, a new control method based on robust integral of the sign of the error (RISE) is used. In the proposed controller for compensation uncertainties in the system, a dynamics term is defined and it derived for using in controller. This term will estimate the system uncertainties and it caused that the error is converged to zero. To derive the appropriate control law to stabilize the closed-loop system, suitable Lyapunov function is proposed and the necessary analysis system stability is done. In continue, the necessary analysis was carried out according to the asymptotic stability control system according to the proposed law has been proven. By applying different controllers such as proposed controller, simulation is performed and the results show that at the end of the path, the proposed approach is less control effort than other methods, and while there is less control effort, the steady-state tracking error is reduced in the proposed method.

## **Keywords**

Robustness control, sliding mode control, robust integral of the sign of the error, Turbocharged Diesel Engine, uncertainty



**University of Shahrood**  
**Faculty of Mechanical Engineering**

**Robust Integral of the Sign of the Error (RISE) Feedback Control  
for Internal Combustion Engines**

**Abbas Jamali Bahri**

**Supervisor:**

Dr. Habib Ahmadi

**January 2016**