بسم الله الرحمن الرحيم

٤٩٢١٢

موضوع:

پایدارسازی خودرو برقی چند-چرخ-محرک

توسط:

فرزاد تهامی

رساله برای دریافت درجه دکترا (Ph. D)
در رشته مهندسی برق

از این رساله در تاریخ ۸۲/۷/۱۶ در مقابل هیأت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

محل امضاء

معاونت تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی:	دکتر جواد فیض
مدیر گروه مهندسی برق و کامپیوتر:	دکتر پرویز جبه‌دار مارالانی
سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه:	دکتر حمیدرضا جمالی
استاد راهنما:	دکتر شاهرخ فرهنگی
استاد مشاور:	دکتر رضا کاظمی
داور مدعو:	دکتر حسن مقبلی
داور مدعو:	دکتر مرتضی منتظری
داور داخلی:	دکتر جواد فیض
داور داخلی:	دکتر بهزاد مشیری
داور داخلی:	دکتر صادق واعظزاده

۱۳۸۲ /۸/ ۲۰

۴۹۲۱۲

دانشکده فنی

باسمه‌تعالی

صورتجلسه ارزیابی رساله دکترای مهندسی برق

جلسه دفاعیه از رساله دکترای مهندسی برق آقای مهندس فرزاد تهامی تحت عنوان : «پایدارسازی خودروی برقی چند-چرخ-محرک» در تاریخ ۸۲/۷/۱۶ تشکیل گردید. پس از دفاع نامبرده از رساله و پرسش و پاسخ، هیأت محترم داوران وارد شور گردید و رساله آقای مهندس فرزاد تهامی را با درجه .....عالی..... مورد ارزیابی قرار دادند.

۱- آقای دکتر شاهرخ فرهنگی	استاد راهنما
۲- آقای دکتر رضا کاظمی	استاد مشاور
۳- آقای دکتر صادق واعظزاده	داور
۴- آقای دکتر حسن مقبلی	داور
۵- آقای دکتر مرتضی منتظری	داور
۶- آقای دکتر جواد فیض	داور
۷- آقای دکتر بهزاد مشیری	داور

۱۳۸۲ /۸/ ۲۰

باسمه‌تعالی

صورتجلسه دفاعیه رساله دکتری
گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی

با عنایت به آئین‌نامه آموزشی دوره دکتری و مصوبه ۱۳۸۲/۲/۱۵ شورای تحصیلات تکمیلی دانشگاه، جلسه دفاعیه رساله دکتری آقای مهندس فرزاد تهامی به شماره دانشجویی ۸۱۰۱۷۶۲۵۴ در رشته مهندسی برق و کامپیوتر گرایش قدرت در تاریخ ۸۲/۷/۱۶ در محل آمفی‌تئاتر انستیتو الکتروتکنیک با عنوان «پایدارسازی خودروی برقی چند-چرخ-محرک» با حضور هیأت داوران تشکیل شد و براساس کیفیت رساله، ارائه دفاعیه و نحوه پاسخ به سؤالات، رأی نهایی به شرح ذیل اعلام گردید :

رساله مورد قبول می‌باشد ☐ رساله با اصلاحات مورد قبول می‌باشد ☑ رساله مورد قبول نمی‌باشد ☐

۱۳۸۲/۸/۲۰

تعداد واحد رساله: [ ] درجه رساله : [عالی]

توضیحات :

مشخصات هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضاء
۱- استاد راهنما : استادراهنمای‌دوم(حسب‌مورد)	دکتر شاهرخ فرهنگی	دانشیار	تهران	
۲- استاد مشاور :	دکتر رضا کاظمی	استادیار	خواجه نصیر	
۳- استاد مشاور دوم : (حسب مورد)	دکتر بهزاد مشیری	دانشیار	تهران	
۴- استاد مدعو خارجی :	دکتر حسن مقبلی	استادیار	صنعتی اصفهان	
۵- استاد مدعو خارجی :	دکتر مرتضی منتظری	استادیار	علم و صنعت ایران	
۶- استاد مدعو داخلی :	دکتر جواد فیض	استاد	تهران	
۷- استاد مدعو داخلی :	دکتر صادق واعظزاده	دانشیار	تهران	
۸- معاون یا (نماینده معاون) تحصیلات‌تکمیلی‌دانشکده(یاگروه)	دکتر حمیدرضا جمالی	دانشیار	تهران	

نام‌ونام‌خانوادگی‌مدیرگروه‌یاسرپرست‌تحصیلات‌تکمیلی‌گروه نام‌ونام‌خانوادگی‌معاون‌تحصیلات‌تکمیلی‌دانشکده

امضاء : تاریخ : امضاء : تاریخ :

دانشکده فنی دانشگاه تهران
تحصیلات تکمیلی

تقدیم به همسرم،
که بدون شکیبائی و دلسوزی او این کار به
سرانجام نمی‌رسید.

چکیده

خودروهای چند-چرخ-محرک نوع جدیدی از خودروهای برقی هستند که در آنها هر یک از چرخها به صورت جداگانه توسط یک موتور به حرکت در می‌آید. پیشرفتهای اخیر در این نوع سیستمهای محرکه مؤید تاثیر زیاد آن در خودروهای برقی و مرکب آینده می‌باشد. چرخهای موتوردار می‌توانند در خودروهای برقی خالص، مرکب سری و پیل سوختی به کار روند. این سیستم با حذف موتور مرکزی و سیستم انتقال قدرت، انعطاف‌پذیری زیادی در طراحی فضا برای تجهیزات خودروبرقی فراهم می‌آورد. علاوه بر مزایای متعدد این روش در ساخت خودرو برقی، با کنترل مستقل گشتاور چرخها، توانائی دیگری نیز برای این نوع خودرو فراهم می‌شود که کمک به راننده برای تصحیح مسیر و افزایش پایداری به هنگام حرکت در جاده‌های لغزنده است.

در این رساله، یک راهبرد جدید کنترلی برای افزایش پایداری خودروهای برقی چهار-چرخ-محرک ارائه می‌شود. این سیستم برای حفظ تعادل خودرو در شرایط اضطراری به راننده کمک می‌کند. سیستم کنترل شامل یک کنترل‌کننده فازی برای کنترل آهنگ چرخش و کنترل‌کننده‌های لغزش مجزا برای هر یک از چرخها می‌باشد. یک روش جدید برای ایجاد مرجع آهنگ چرخش توسط شبکه عصبی پیشنهاد شده است. همچنین به منظور کنترل لغزش چرخها، به روشی جدید، سرعت واقعی خودرو با استفاده از ترکیب داده حسگرها به وسیله یک تخمینگر فازی تخمین زده می‌شود.

شبیه‌سازیهای دقیق نشان می‌دهند که سیستم پیشنهادی، روشی بسیار مؤثر برای بهبود پایداری خودرو در مانورهای مختلف است. استفاده از منطق فازی موجب شده است که سیستم کنترل نسبت به تغییر پارامترهای خودرو و مشخصه جاده بسیار مقاوم باشد. علاوه بر این، سادگی سیستم کنترل پیاده‌سازی آنرا برای استفاده در خودرو بسیار مناسب می‌سازد.

برای صحه‌گذاری عملکرد واقعی سیستم کنترل یک خودرو برقی دو-چرخ-محرک طراحی شده و در حال ساخت است. اینورترهای کنترل برداری موتورها، دستگاه شارژر همراه خودرو و مبدل قدرت استاتیک (برای تأمین تغذیه سیستمهای تسهیلاتی خودرو) نیز طراحی و ساخته شده‌اند.

پیشگفتار

در حال حاضر خودروهای با موتور احتراقی مهمترین عامل آلودگی هوای شهرها هستند. وسایل نقلیه موتوری بطور متوسط عامل ۶۰٪ از مسائل مرتبط با ازون، ۸۰٪ از انتشار منو اکسید در هوا و تقریباً نصف انتشار دی اکسید کربن -که خود عامل پدیده گلخانه‌ای است- می‌باشند. از نظر مصرف انرژی، ۷۰٪ از نفت تولید شده در جهان صرف حمل و نقل می‌شود.

به دو دلیل مهم خودرو برقی مورد توجه قرار گرفته است. دلیل اول صرفه جوئی در مصرف منابع محدود سوختهای فسیلی و یا جایگزینی کامل آن در حمل و نقل، و دلیل دوم کمک به کاهش آلودگی محیط زیست.

از نظر تاریخی و فنی باتری همواره بزرگترین مانع توسعه خودرو برقی بوده است. نسبت انرژی به وزن یا حجم برای یک باتری سرب-اسیدی معمولی در حدود چهارصد برابر کمتر از بنزین است. باتری‌های مورد استفاده در خودروهای برقی گران هستند و هر چند سال یک بار باید تعویض شوند. علاوه بر این برای استفاده از خودرو برقی لازم است امکانات زیربنائی گسترده فراهم شود تا بتوان باتری خودرو را با سهولت، سرعت و در هر زمان پر کرد. با وجود پیشرفتهای زیاد در ساخت باتریهای جدید، به نظر می‌رسد که آینده خودرو برقی از آن پیلهای سوختی هیدروژنی[1] خواهد بود. پیلهای سوختی بطور مستقیم با اکسیداسیون هیدروژن، الکتریسیته تولید می‌کنند. هیدروژن می‌تواند به صورت فشرده در خودرو ذخیره شود و یا به کمک مبدلهائی از مواد دیگر نظیر الکل بدست آید. با این وجود تا استفاده گسترده از این خودروها هنوز راه زیادی مانده است.

در کشور ما نیز به دلیل مصرف بی‌رویه سوخت و نیز آلودگی بسیار زیاد هوای شهرهای بزرگ، برنامه‌ریزی برای رسیدن به فناوری خودروهای کم‌مصرف و برقی ضروری به نظر می‌رسد.

[1] Hydrogen Fuel-Cell

تقدیر و تشکر

بدینوسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از تمامی اساتید خود در دانشگاه تهران و به ویژه استاد راهنمای رساله جناب آقای دکتر فرهنگی که رهنمودهای ارزنده ایشان همواره راهگشای اینجانب بوده است اعلام می‌دارم. همچنین لازم می‌دانم از کلیه کارمندان دلسوز و وظیفه‌شناس گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی، خصوصاً سرکار خانم دانشیان تشکر نمایم.

از استاد مشاور رساله جناب آقای دکتر کاظمی که با حمایتها و راهنماییهای سازنده خویش همواره اینجانب را در اجرای این پژوهش مساعدت نموده‌اند، نیز قدردانی و تشکر می‌نمایم.

اینجانب بر خود واجب می‌دانم که از مدیریت محترم شرکت صنایع ماشینهای الکتریکی جوین، جناب آقای مهندس یکتا مقدم، که با حمایتها و تشویقهای بی‌دریغ خود امکانات لازم جهت پیاده‌سازی اهداف رساله را فراهم آورده‌اند، کمال سپاسگزاری و تشکر را بنمایم. همچنین از ریاست محترم هیأت عامل سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران جناب آقای مهندس ویسه که امکانات مالی طرح ساخت خودرو برقی چند-چرخ-محرک را در اختیار گذاشته‌اند و ریاست محترم مرکز تحقیق و توسعه شرکت ایران خودرو جناب آقای مهندس جوادی که حمایت مالی و فنی طرح را تقبل نموده‌اند کمال امتنان را دارم. و البته از تمام همکاران اجرائی در شرکت جوین و دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی که در اجرای این طرح تا مرحله کنونی تلاشی شایسته نموده‌اند، نهایت امتنان و تشکر را دارم.

فرزاد تهامی

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه ۱

فصل ۲ پیشینه پژوهش ۸

فصل ۳ مدلسازی دینامیک خودرو و صحه‌گذاری ۱۳

۳ . ۱ مقدمه ۱۳

۳ . ۲ رفتار دینامیکی خودرو ۱۳

۳ . ۲ . ۱ نیروهای وارد بر خودرو ۱۴

۳ . ۲ . ۱ . ۱ مقاومت کششی کل ۱۴

۳ . ۲ . ۱ . ۲ نیروهای جانبی ۱۵

۳ . ۳ رفتار تایر ۱۶

۳ . ۳ . ۱ نیروهای وارده بر تایر ۱۶

۳ . ۳ . ۱ . ۱ اصطکاک ۱۷

۳ . ۳ . ۱ . ۲ لغزش ۱۸

۳ . ۳ . ۱ . ۳ لغزش جانبی ۲۰

۳ . ۳ . ۱ . ۴ گشتاور برگردان ۲۱

۳ . ۳ . ۱ . ۵ نیروی مقاوم غلتشی ۲۱

۳ . ۴ مدلسازی دینامیک خودرو ۲۱

۳ . ۴ . ۱ مدل دوچرخه‌ای ۲۲

۳ . ۴ . ۲ مدل هفت درجه آزادی ۲۴

۳ . ۴ . ۳ مدل چهارده درجه آزادی ۲۸

۳ . ۴ . ۳ . ۱ مدلسازی سیستم تعلیق ۳۱

۳ . ۴ . ۳ . ۲ مدلسازی رفتار تایر ۳۱

۳ . ۴ . ۳ . ۳ مدلسازی موتور و محرکه الکتریکی ۳۵

۳ . ۴ . ۴ شبیه‌سازی رفتار دینامیکی خودرو ۳۶

۳ . ۵ نتیجه‌گیری ۴۵

فصل ۴ کنترل دینامیک خودرو ۴۶

۴ . ۱ مقدمه ۴۶

۴ . ۲) انواع سیستم‌های کنترل دینامیک خودرو ۴۷

۴ . ۲ . ۱ سیستم ترمز ضدقفل (ABS) ۴۷

۴ . ۲ . ۲ سیستم کنترل کشش (TCS) ۴۸

۴ . ۲ . ۳ سیستم کنترل پایداری (VSC) ۴۸

۴ . ۲ . ۳ . ۱ کنترل مستقیم گشتاور چرخش (DYC) ۵۰

۴. ۲. ۳. ۲ سیستم چهارچرخ فرمان (4WS) ۵۰
۴. ۲. ۳. ۳ سیستم فرمان فعال چرخ‌های جلو ۵۱
۴ . ۳ الگوریتم‌های کنترل دینامیک خودرو ۵۱
۴. ۳. ۱ کنترل کشش ۵۱
۴. ۳. ۱. ۱ کنترل مبتنی بر قانون ۵۱
۴. ۳. ۱. ۲ کنترل تطبیقی مدل مرجع ۵۶
۴. ۳. ۱. ۳ کنترل فازی ۵۸
۴. ۳. ۱. ۴ کنترل مود لغزشی ۶۱
۴. ۳. ۲ کنترل پایداری خودرو ۶۴
۴. ۳. ۲. ۱ کنترل فعال چرخ‌های جلو ۶۵
۴. ۳. ۲. ۲ سیستم چهارچرخ فرمان ۷۸
۴. ۳. ۲. ۳ کنترل مستقیم گشتاور حرکت چرخشی ۸۲
۴. ۳. ۲. ۴ استفاده توأم از گشتاور تفاضلی و سیستم چهارچرخ فرمان ۹۷
۴. ۳. ۳ تخمین سرعت خودرو ۱۰۶
۴ . ۴ نتیجه‌گیری ۱۰۸

فصل ۵ طراحی سیستم کنترل دینامیکی خودرو برقی چند-چرخ-محرک ۱۱۰

۵ . ۱ مقدمه ۱۱۰
۵ . ۲ طراحی سیستم کنترل ۱۱۲
۵. ۲. ۱ طراحی کنترل‌کننده نرخ چرخش ۱۱۲
۵. ۲. ۲ طراحی کنترل‌کننده لغزش ۱۱۵
۵. ۲. ۳ طراحی تخمینگر سرعت ۱۱۸
۵. ۲. ۳. ۱ حذف اثر جاذبه و خطای حالت ماندگار حسگر شتاب ۱۲۳
۵. ۲. ۴ روش ایجاد مرجع سرعت چرخش ۱۲۳
۵ . ۳ طراحی سیستم کنترل برای خودرو آزمایشی ۱۲۵
۵ . ۴ نتیجه‌گیری ۱۲۶

فصل ۶ شبیه‌سازی و صحه‌گذاری ۱۲۷

۶ . ۱ مقدمه ۱۲۷
۶ . ۲ ارزیابی اجزاء جانبی سیستم کنترل ۱۲۸
۶. ۲. ۱ آموزش شبکه عصبی ۱۲۸
۶. ۲. ۲ تخمین سرعت خودرو و لغزش چرخها ۱۲۸
۶ . ۳ شبیه‌سازی سیستم کنترل برای خودرو چهار-چرخ-محرک ۱۳۰
۶. ۳. ۱ تغییر خط حرکت در جاده لغزنده ۱۳۰
۶. ۳. ۲ ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۳
۶. ۳. ۳ ترمزگیری شدید هنگام دور زدن ۱۳۶
۶. ۳. ۴ مقاوم بودن نسبت به تغییر پارامترهای خودرو ۱۳۹
۶ . ۴ شبیه‌سازی سیستم کنترل برای خودرو آزمایشی و مقایسه با روش کنترل مود لغزشی ۱۴۲

۶. ۴. ۱. ۱ مانور دوبار تغییر خط ۱۴۳
۶. ۴. ۱. ۲ مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۵
۶. ۵ نتیجه گیری ۱۴۷

فصل ۷ پیاده‌سازی ۱۴۹

۷. ۱ مقدمه ۱۴۹
۷. ۲ سیستم پیشرانه و ذخیره‌سازی انرژی ۱۵۱
۷. ۲. ۱ برآورد اولیه اندازه موتور، جعبه دنده و باتری ۱۵۱
۷. ۲. ۲ موتور و جعبه دنده ۱۵۲
۷. ۲. ۳ باتری ۱۵۳
۷. ۲. ۴ صحه‌گذاری انتخاب اندازه اجزای خودروی برقی با استفاده از شبیه‌سازی ۱۵۵
۷. ۲. ۴. ۱ شتاب‌گیری ۱۵۶
۷. ۲. ۴. ۲ شیب‌پیمایی ۱۵۸
۷. ۳ طراحی و ساخت مبدل قدرت ۱۶۰
۷. ۳. ۱ ساختار کلی مبدل قدرت ۱۶۱
۷. ۳. ۲ مشخصات اجزاء مبدل قدرت ۱۶۲
۷. ۳. ۲. ۱ باس DC ۱۶۲
۷. ۳. ۲. ۲ کلیدهای قدرت ۱۶۳
۷. ۳. ۲. ۳ مدار تحریک گیت ۱۶۴
۷. ۳. ۲. ۴ سیستم کنترل ۱۶۵
۷. ۳. ۲. ۵ سیستم پردازش ۱۶۶
۷. ۳. ۳ طراحی محفظه مبدل قدرت ۱۶۷
۷. ۳. ۴ مشخصات مبدل قدرت ۱۶۸
۷. ۴ طراحی و ساخت شارژکننده باتریها و مبدل استاتیک قدرت ۱۶۹
۷. ۴. ۱ اجزاء مدار شارژر ۱۶۹
۷. ۴. ۲ مشخصات شارژر ۱۷۱
۷. ۴. ۳ مبدل قدرت استاتیک ۱۷۱
۷. ۵ طراحی و ساخت سیستم کنترل دینامیک خودرو ۱۷۲
۷. ۵. ۱ سیستم پردازش ۱۷۲
۷. ۵. ۲ حسگرها ۱۷۳

نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۷۹

منابع و مآخذ ۱۸۱

پیوست- طراحی مکانیکی خودرو آزمایشی ۱۸۵

فهرست شکل‌ها

شکل۳-۱) نیروهای طولی وارد بر خودرو [25] ۱۴
شکل۳-۲) خودرو در مقابل باد جانبی [25] ۱۵
شکل۳-۳) نیروی گریز از مرکز در پیچ [25] ۱۶
شکل۳-۴) نیروهای وارد بر تایر [25] ۱۷
شکل۳-۵) حرکت غلتشی چرخ [25] ۱۹
شکل۳-۶) ضرایب اصطکاک بر حسب لغزش[25] ۱۹
شکل۳-۷) زاویه لغزش و تاثیر نیروی جانبی [25] ۲۰
شکل۳-۸) ضریب نیروی ترمزی و ضریب نیروی جانبی برحسب لغزش ترمز [25] ۲۱
شکل۳-۹) مدل دوچرخه برای حرکت جانبی خودرو [26] ۲۳
شکل۳-۱۰) مدل هفت درجه آزادی [26] ۲۴
شکل۳-۱۱) دستگاه مختصات متصل به خودرو[26] ۲۵
شکل ۳-۱۲) دستگاههای مختصات بکار رفته برای مدلسازی خودرو ۲۸
شکل ۳-۱۳) نیروهای وارد بر خودرو در صفحه افقی ۲۹
شکل ۳-۱۴) مدل سیستم تعلیق برای هر یک از چرخها ۳۱
شکل۳-۱۵) شکل سینوسی و کسینوسی فرمول جادویی [31] ۳۳
شکل۳-۱۶) تاثیر پارامترهای رابطه جادویی [31] ۳۳
شکل ۳-۱۷) نمودار بلوکی یک سیستم محرکه موتورهای القائی [33] ۳۶
شکل ۳-۱۸) نواحی کار موتور بر حسب سرعت [33] ۳۶
شکل ۳-۱۹) شکل ظاهری نرم‌افزار شبیه‌سازی خودرو ۳۷
شکل۳-۲۰) ورودی فرمان و پدال گاز برای مانور دو بار تغییر خط ۳۸
شکل۳-۲۱) ورودی پدال ترمز و پدال کلاچ برای مانور دو بار تغییر خط ۳۸
شکل۳-۲۲) مسیر حرکت خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۳۹
شکل۳-۲۳) موقعیت خطی خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۳۹
شکل۳-۲۴) موقعیت زاویه‌ای بدنه خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۴۰
شکل۳-۲۵) سرعت خطی خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۴۰
شکل۳-۲۶) سرعت زاویه‌ای بدنه خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۴۱
شکل۳-۲۷) شتاب خطی خودرو در مانور دو بار تغییر خط ۴۱
شکل۳-۲۸) سرعت چرخ‌ها در مانور دو بار تغییر خط ۴۲
شکل۳-۲۹) نیروی چسبندگی طولی تایرها در مانور دو بار تغییر خط ۴۲
شکل۳-۳۰) نیروی چسبندگی جانبی تایرها در مانور دو بار تغییر خط ۴۳
شکل۳-۳۱) بار عمودی تایرها در مانور دو بار تغییر خط ۴۳
شکل۳-۳۲) لغزش طولی چرخ‌ها در مانور دو بار تغییر خط ۴۴

شکل۳-۳۳) زاویه لغزش چرخ‌ها در مانور دو بار تغییر خط ۴۴
شکل۴-۱) نواحی کار سیستم ترمز ضد قفل [25] ۴۸
شکل۴-۲) بیش‌فرمانی و کم‌فرمانی خودرو [37] ۴۹
شکل۴-۳) طرز کار سیستم کنترل دینامیکی پایداری [36] ۵۰
شکل۴-۴) رابطه سرعت خودرو و چرخ محرک در مانور شتاب‌گیری (روش Fan) [39] ۵۳
شکل۴-۵) تغییرات ضریب چسبندگی در مانور شتاب‌گیری (روش Fan)[39] ۵۳
شکل۴-۶) تاثیر کنترل‌کننده کشش بر شتابگیری روی جاده لغزنده (روش Sakai)[40] ۵۵
شکل۴-۷) نمودار کنترل‌کننده مدل مرجع برای لغزش چرخ (روش Hori)[23] ۵۷
شکل۴-۸) شتاب‌گیری با کنترل کشش؛ a) جریان موتور، b) لغزش طولی، c) سرعت چرخ، d) سرعت خودرو [23]۵۸
شکل۴-۹) آزمایش شتابگیری بر روی جاده دوگانه با کنترل کشش فازی و بدون آن (روش Cheok) [41] ۶۰
شکل ۴-۱۰) سیستم حصی معادل در داخل لایه مرزی (روش Kawabe) [43] ۶۲
شکل ۴-۱۱) آزمایش روش کنترل مود لغزشی کنترل کشش بر روی یخ[43] ۶۴
شکل۴-۱۲) مدل به کار رفته در روش Ackermann [45] ۶۶
شکل۴-۱۳) دستگاه مختصات تایر و زاویه لغزش [45] ۶۷
شکل۴-۱۴) کنترل‌کننده فرمان چرخ‌های جلو (روش Ackermann)[45] ۶۹
شکل۴-۱۵) تأثیر کنترل فعال فرمان در مانور ترمزگیری بر روی جاده لغزنده در سرعتهای متفاوت (روش Ackermann)[45] ۷۰
شکل۴-۱۶) مدل دینامیکی خودرو در روش Ono [46] ۷۱
شکل۴-۱۷) مسیرهای حالت خودروی بدون کنترل با زوایای مختلف فرمان [46] ۷۲
شکل۴-۱۸) مختصات نقطه تعادل بر حسب مقادیر مختلف زاویه فرمان [46] ۷۴
شکل۴-۱۹) مدل خودرو به همراه نایقینی غیرخطی (روش Ono) [46] ۷۶
شکل۴-۲۰) نمودار بلوکی کنترل‌کننده (روش Ono)[46] ۷۷
شکل۴-۲۱) نمودار بلوکی سیستم افزوده (روش Ono)[46] ۷۷
شکل۴-۲۲) تأثیر کنترل فعال فرمان چرخهای جلو در دو مسیر خشک و لغزنده (روش Ono) [46] ۷۷
شکل۴-۲۳) نمودار سیستم کنترلی مدل مرجع با اغتشاش مدل‌شده (روش Brennan) [14] ۷۹
شکل۴-۲۴) مدل ساده شده سیستم کنترلی مدل مرجع (روش Brennan) [14] ۸۰
شکل۴-۲۵) مانور دو بار تغییر خط با سیستم چهارچرخ فرمان و بدون آن (روش Brennan)[14] ۸۲
شکل۴-۲۶) ساختار کنترل‌کننده گشتاور تفاضلی (روش Sakai) [19] ۸۶
شکل۴-۲۷) تغییرات زاویه لغزش و سرعت چرخش خودرو با اعمال ورودی پله به فرمان (روش Sakai) [19] ۸۶
شکل۴-۲۸) تأثیر اغتشاش بر زاویه لغزش و سرعت چرخش خودرو (روش Sakai) [19] ۸۷
شکل۴-۲۹) مقایسه مسیر خودرو با کنترل‌کننده و بدون آن (روش Sakai) [19] ۸۸
شکل۴-۳۰) ساختار کنترل‌مستقیم گشتاور چرخشی با کنترل‌کننده مود لغزشی (روش Abe) [49] ۸۹
شکل۴-۳۱) پاسخ خودرو به ورودی سینوسی فرمان با کنترل گشتاور و بدون آن (روش Abe) [49] ۹۱
شکل۴-۳۲) مانور تغییر خط با کنترل گشتاور و بدون آن (روش Abe) [49] ۹۱
شکل۴-۳۳) مدل خودرو و نیروهای وارد بر آن در روش Park [50] ۹۳
شکل۴-۳۴) مدل دینامیکی خودرو برای طراحی کنترل‌کننده H_∞ (روش Park) [50] ۹۴
شکل۴-۳۵) مدل خودرو برای طراحی کنترل کنده مود لغزشی چندگانه (روش Kwak) [51] ۹۶

شکل۴-۳۶) مدل دینامیکی خودرو در روش Nagai [52] ۹۷
شکل۴-۳۷) ساختار کنترل‌کننده همزمان چهارچرخ فرمان و گشتاور تفاضلی ترمز (روش Nagai) [52] ۹۹
شکل۴-۳۸) مدل هفت درجه آزادی بکار رفته در روش Horiuchi [53] ۹۹
شکل۴-۳۹) تعقیب مدل مرجع با کنترل‌کننده غیرخطی پیش‌بین (روش Horiuchi) [53] ۱۰۲
شکل۴-۴۰) مقایسه پاسخ سیستم چهارچرخ فرمان و کنترل‌کننده پیشبین در مانور تغییر ناگهانی فرمان [53] ... ۱۰۳
شکل۴-۴۱) مقایسه پاسخ سیستم چهارچرخ فرمان و کنترل‌کننده پیشبین در ترمزگیری بر روی جاده دوگانه [53] ۱۰۴
شکل۴-۴۲) ساختار سیستم تخمین سرعت در روش Kobayashi [54] ۱۰۶
شکل ۵-۱) کنترل‌کننده سرعت چرخش خودرو ۱۱۳
شکل ۵-۲) توابع عضویت کنترل‌کننده چرخش ۱۱۴
شکل ۵-۳) نمودار مجموعه سیستم کنترل ۱۱۷
شکل ۵-۴) توابع عضویت برای کنترل‌کننده لغزش ۱۱۸
شکل ۵-۵) نمودار بلوکی تخمینگر سرعت ۱۲۰
شکل ۵-۶) توابع عضویت برای ورودی‌ها و خروجی ۱۲۲
شکل ۵-۷) شبکه عصبی مولد مرجع سرعت چرخش خودرو ۱۲۵
شکل ۵-۸) سیستم کنترل دینامیکی خودرو آزمایشی ۱۲۶
شکل ۶-۱) آموزش شبکه عصبی ۱۲۸
شکل ۶-۲) مقایسه سرعت تخمین زده شده با مقدار شبیه‌سازی ۱۲۹
شکل ۶-۳) مقایسه لغزش تخمین زده شده چرخ جلو-راست با مقدار شبیه‌سازی ۱۲۹
شکل ۶-۴) مقایسه لغزش تخمین زده شده چرخ عقب-راست با مقدار شبیه‌سازی ۱۳۰
شکل ۶-۵) مسیرحرکت خودرو در مانور تغییر خط ۱۳۱
شکل ۶-۶) سرعت چرخش خودرو و مقدار مرجع آن در مانور تغییر خط ۱۳۲
شکل ۶-۷) گشتاور چرخ عقب راست در مانور تغییر خط ۱۳۲
شکل ۶-۸) گشتاور چرخ عقب چپ در مانور تغییر خط ۱۳۲
شکل ۶-۹) گشتاور چرخ جلو راست در مانور تغییر خط ۱۳۳
شکل ۶-۱۰) گشتاور چرخ جلو چپ در مانور تغییر خط ۱۳۳
شکل ۶-۱۱) مسیرحرکت خودرو در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۴
شکل ۶-۱۲) سرعت خودرو در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۵
شکل ۶-۱۳) لغزش چرخ جلو چپ در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۵
شکل ۶-۱۴) لغزش چرخ عقب چپ در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۵
شکل ۶-۱۵) گشتاور چرخ جلو چپ در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۶
شکل ۶-۱۶) گشتاور چرخ عقب چپ در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۳۶
شکل ۶-۱۷) مسیرحرکت خودرو در مانور ترمزگیری هنگام دور زدن ۱۳۷
شکل ۶-۱۸) سرعت چرخش خودرو و مقدار مرجع آن در مانور ترمزگیری هنگام دور زدن ۱۳۷
شکل ۶-۱۹) زاویه لغزش خودرو در مانور ترمزگیری هنگام دور زدن ۱۳۸
شکل ۶-۲۰) لغزش چرخ جلو چپ در مانور ترمزگیری هنگام دور زدن ۱۳۸
شکل ۶-۲۱) لغزش چرخ جلو راست در مانور ترمزگیری هنگام دور زدن ۱۳۸

شکل ۶-۲۲) تأثیر کاهش وزن خودرو بر عملکرد سیستم کنترل ۱۳۹
شکل ۶-۲۳) تأثیر جابجائی طولی مرکز ثقل خودرو بر عملکرد سیستم کنترل ۱۴۰
شکل ۶-۲۴) تأثیر جابجائی ارتفاع مرکز ثقل خودرو بر عملکرد سیستم کنترل ۱۴۱
شکل ۶-۲۵) تأثیر کاهش وزن خودرو بر عملکرد سیستم کنترل در ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۱
شکل ۶-۲۶) تأثیر جابجائی طولی مرکز ثقل خودرو بر عملکرد سیستم کنترل در ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۲
شکل ۶-۲۷) مانور دوبار تغییر خط خودرو آزمایشی ۱۴۴
شکل ۶-۲۸) مقایسه نرخ چرخش در روش فازی و روش مود لغزشی برای مانور دوبار تغییر خط ۱۴۴
شکل ۶-۲۹) گشتاور چرخها در مانور دوبار تغییر خط با کنترل‌کننده فازی ۱۴۵
شکل ۶-۳۰) گشتاور چرخها در مانور دوبار تغییر خط با کنترل‌کننده لغزشی ۱۴۵
شکل ۶-۳۱) مسیر حرکت در مانور ترمز روی جاده دوگانه برای خودرو آزمایشی ۱۴۶
شکل ۶-۳۲) تغییرات سرعت خودرو آزمایشی در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۶
شکل ۶-۳۳) گشتاور چرخها در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۷
شکل ۶-۳۴) شتاب جانبی در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۷
شکل ۶-۳۵) زاویه لغزش جانبی در مانور ترمز روی جاده دوگانه ۱۴۷
شکل ۷-۱) موتور تراکشن، جعبه‌دنده و منحنی مشخصات آن ۱۵۲
شکل ۷-۲) باتری مورد استفاده در خودرو آزمایشی ۱۵۴
شکل ۷-۳) سرعت خودرو و مقدار مطلوب آن (خط‌چین) در مانور شتاب‌گیری ۱۵۶
شکل ۷-۴) حالت شارژ باتری در مانور شتاب‌گیری ۱۵۷
شکل ۷-۵) جریان باتری در مانور شتاب‌گیری ۱۵۷
شکل ۷-۶) مجموع توان موتورها در مانور شتاب‌گیری ۱۵۷
شکل ۷-۷) مجموع گشتاور موتورها در مانور شتاب‌گیری ۱۵۸
شکل ۷-۸) مجموع توان موتورها در مانور شیب‌پیمایی ۱۵۹
شکل ۷-۹) مجموع گشتاور موتورها در مانور شیب‌پیمایی ۱۵۹
شکل ۷-۱۰) حالت شارژ باتری در مانور شیب‌پیمایی ۱۵۹
شکل ۷-۱۱) جریان باتری در مانور شیب‌پیمایی ۱۶۰
شکل ۷-۱۲) نمودار کلی سیستم الکتریکی خودرو برقی ۱۶۱
شکل ۷-۱۳) ساختار مبدل قدرت ۱۶۲
شکل ۷-۱۴) خط تغذیه مورق ۱۶۲
شکل ۷-۱۵) ماجول قدرت 2MBI 300P-140 مورد استفاده در اینورتر قدرت ۱۶۳
شکل ۷-۱۶) سیستم داخلی ماجول قدرت PM300DSA120 مورد استفاده در ترمز دینامیکی ۱۶۴
شکل ۷-۱۷) درایور گیت SKHI 24 ..... ۱۶۴
شکل ۷-۱۸) نواحی کار موتور برحسب سرعت ۱۶۵
شکل ۷-۱۹) آزمایش نرم افزار کنترل برداری با نمونه کوچکتر مبدل قدرت ۱۶۶
شکل ۷-۲۰) آزمایش نرم افزار کنترل برداری با موتور تحت بار کامل ۱۶۶
شکل ۷-۲۱) برد DSP مورد استفاده برای کنترل برداری ۱۶۷
شکل ۷-۲۲) نمای سه‌بعدی از اینورتر و اجزای آن ۱۶۸
شکل ۷-۲۳) بلوک دیاگرام مدار شارژر ۱۷۰