به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

طراحی سیستم ترمز ضدقفل و بازیاب انرژی برای خودرو هیبریدالکتریکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

پریسا کرمی

استاد راهنما

دکتر محسن اصفهانیان

۱۳۹۲

کلیه‌ی حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی

پریسا کرمی

تحت عنوان

طراحی سیستم ترمز ضدقفل و بازیاب انرژی برای خودرو هیبریدالکتریکی

در تاریخ ۱۳۹۲/۰۵/۱۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر محسن اصفهانیان
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر سعید ضیائی‌راد
۳- استاد داور	دکتر سعید بهبهانی
۴- استاد داور	دکتر محمد دانش
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّوجلّ":

از پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند؛

از استاد صبور، با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر محسن اصفهانیان، که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد شایسته و گرامی، جناب آقای دکتر سعید ضیائی راد، ریاست محترم دانشکده، که زحمت مشاوره این رساله را متقبل شدند؛

و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقایان دکتر سعید بهبهانی و محمد دانش که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

پریسا کرمی

مرداد ماه ۱۳۹۲

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر **پدرم**

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان امیدوار **مادرم**

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره‌آوردی گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم‌گونه غبار خستگیتان را بزداید.

بوسه بر دستان پرمهرتان

چکیده

آلودگی هوا و کاهش منابع سوخت فسیلی خودروسازان را ملزم به تولید تکنولوژی‌های جدید با دو هدف مصرف سوخت و آلایندگی کمتر نموده است. بهترین خودرویی که می‌تواند خواسته‌های ما را در شرایط کنونی به نحو مطلوب برآورده سازد، خودرو هیبرید با قابلیت استفاده از دو یا چند منبع تولید انرژی و ذخیره‌سازی انرژی توسط حداقل یکی از این منابع، برای تولید قدرت می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی خودروهای هیبرید می‌توان به توانایی در بازیابی مقدار قابل توجهی از انرژی ترمزگیری توسط سیستم ترمز بازیاب اشاره نمود. عواملی هم‌چون عدم تأمین توان ترمزی کافی از جانب سیستم بازیاب در ترمزهای ناگهانی و شدید و نیاز به وجود یک سیستم ترمز ایمن و قوی در کنار آن، ایجاد هماهنگی مؤثر بین دو سیستم ترمز بازیاب و مکانیکی و ارائه عملکرد ایمن (ضدقفل) از جانب آن‌دو را به‌عنوان بخش عمده‌ای از راهبرد کنترلی ترمز در خودروهای هیبرید اجتناب‌ناپذیر نموده است.

در این پایان‌نامه سیستم ترمزگیری یک خودرو هیبرید الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته و با توجه به الزام وجود یک ترمز مکانیکی در کنار ترمز بازیاب و نیاز به یک سیستم امنیت فعال همانند ترمز ضدقفل، سعی شده که یک تلفیق مناسب بین ترمز بازیاب، مکانیکی و ضدقفل ایجاد و سیستمی بروز با قابلیت اجراء در شرایط واقعی طراحی شود. در طرح ارائه شده، چهار کنترل‌کننده فازی مجزا برای کنترل سیستم ترمز هیدرولیک چرخ‌های جلو و عقب با ویژگی ضدقفل و نیز یک کنترل‌کننده فازی به‌منظور تنظیم گشتاور ترمز بازیاب به‌صورت ضدلغزش در پایین‌دست، طراحی شده و یک پردازشگر مرکزی در بالادست، هماهنگی این سامانه را به‌عهده دارد. سامانه طراحی شده در نرم‌افزار MATLAB/ADVISOR و برروی یک خودرو هیبرید با نام Insight مدل‌سازی شده است. سپس حرکت خودرو در نه سیکل رانندگی استاندارد شبیه‌سازی شده و با درنظرگرفتن میزان شارژ باتری و ضرایب لغزش هر چرخ به‌صورت مجزا و در شرایط جاده‌ای مختلف به‌عنوان توابع هدف، قوانین و توابع عضویت کنترل‌کننده‌های فازی بهینه گردیده و سرانجام با اجرا سامانه در یک سیکل رانندگی ترکیبی، چگونگی عملکرد این توابع عضویت و ضرائب بهره بهینه شده، بررسی شده‌است. عملکرد ضدقفل سیستم ترمز بازیاب، عدم تداخل عملکردی سیستم ترمز بازیاب و هیدرولیک برروی محور جلو، طراحی بر پایه ماکزیمم گشتاور موتورالکتریکی ودرنتیجه بازیاب میزان قابل توجهی از انرژی ترمزگیری، توجه به موقعیت شارژ باتری‌ها به‌منظور جلوگیری از شارژ فراتراز ظرفیت آن‌ها، دریافت سرعت چهار چرخ به‌صورت مجزا به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده‌ها در پایین‌دست و امکان شبیه‌سازی حرکت در جاده‌هائی با سطوح لغزشی متفاوت برای چهار چرخ و حرکت سر پیچ‌ها از دیگر، ویژگی‌های طرح ارائه‌شده می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در طول سیکل حرکتی توان ترمزی موردنیاز در کلیه شرایط ترمزگیری تأمین شده، ضرایب لغزش در نزدیکی مقدار مطلوب باقی مانده و لغزشی اتفاق نمی‌افتد. همچنین در شرایط ترمزگیری ناگهانی و شدید عملکرد ضدقفل سیستم ترمز بازیاب و هیدرولیک مشهود می‌باشد. در پایان سیکل حرکتی مصرف سوخت موتور احتراقی و میزان اتلافات ناشی از ترمزگیری کاهش، میزان انرژی ذخیره شده در باتری‌ها مخصوصاً در سیکل‌های شهری با فرکانس توقف و حرکت بالا و درنتیجه بازده کلی سیستم افزایش یافته است. این امر حاکی از عملکرد ایمن، ضدلغزش و بازیاب انرژی از سوی سیستم ارائه شده می‌باشد.

کلمات کلیدی:

۱- سیستم ترمز باویژگی ضدقفل و بازیاب انرژی ۲- ترمز هیدرولیک ضدقفل ۳- کنترل‌کننده فازی ۴- سرعت زاویه‌ای مجزا برای هر چرخ ۵- ترمز بازیاب

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مروری بر طرح‌های موجود ۶

۱-۳ پروژه پیش‌رو ۱۲

فصل دوم: اصول اولیه طراحی سیستم ترمزگیری

۲-۱ عملکرد ترمزگیری ۱۵

۲-۱-۱ نیروی ترمزگیری ۱۵

۲-۱-۲ توزیع نیروی ترمزگیری وارد بر چرخ‌های محور جلو و عقب ۱۶

۲-۱-۳ قوانین حاکم بر ترمزگیری ۱۹

۲-۱-۴ تحلیل عملکرد ترمزگیری ۱۹

۲-۲ اصول طراحی سیستم ترمز بازیاب در خودرو هیبرید ۲۲

۲-۲-۱ سیستم ترمز هیبرید موازی ۲۵

۲-۲-۲ سیستم‌های کنترل‌پذیر یکپارچه ۲۸

۲-۳ عملکرد ضدقفل ۳۱

فصل سوم: کنترل سیستم ترمز

۳-۱ الگوریتم کنترلی ترمز ۳۲

۳-۲ کنترل‌کننده‌های فازی و منطق حاکم بر آن‌ها ۳۸

۳-۲-۱ مقدمه‌ای بر منطق فازی ۳۸

۳-۲-۲ برآوردکننده‌های شرایط لغزش بحرانی ۴۰

۳-۲-۳ کنترل‌کننده‌های ترمز بازیاب و هیدرولیک ۴۳

فصل چهارم: شبیه‌سازی

۴-۱ مدل‌سازی دینامیک خودرو و اجزا مربوط به خودرو ۵۸

۴-۱-۱ مدل دینامیکی خودرو ۵۸

۴-۱-۲ مدل تایر ۵۹

۴-۱-۳ مدل موتور الکتریکی ۶۰

۴-۱-۴ مدل باتری ۶۱

۴-۲ شبیه‌سازی سامانه ترمزگیری ۶۳

۴-۲-۱ محاسبه پارامترهای هندسی خودرو ۶۴

۴-۲-۲ محاسبه لغزش و ضرایب چسبندگی ۶۶

۴-۲-۳ تشخیص حالت ترمزگیری از شتاب‌گیری ۶۸

۴-۲-۴ محاسبه پارامترهای مؤثر در تعیین شرایط لغزش بحرانی ۶۹
۴-۲-۵ محاسبه شرایط بحرانی ۷۰
۴-۲-۶ تعیین بحرانی‌ترین شرایط لغزش ۷۱
۴-۲-۷ محاسبه پارامترهای موردنیاز برای کنترل‌کننده‌های ترمز بازیاب و هیدرولیک ۷۲
۴-۲-۸ کنترل‌کننده گشتاور ترمز بازیاب ۷۳
۴-۲-۹ کنترل‌کننده گشتاور ترمز هیدرولیک ۷۴
۴-۲-۱۰ بازیاب انرژی توسط سیستم ترمز بازیاب ۷۶
فصل پنجم: تحلیل نتایج
۵-۱ پارمترهای شبیه‌سازی ۷۹
۵-۱-۱ مشخصات فنی ۷۹
۵-۱-۲ مشخصات موتورالکتریکی ۸۰
۵-۱-۳ بازیاب انرژی توسط سیستم ترمز بازیاب ۸۲
۵-۲ ضرایب بهره کنترل‌کننده‌های فازی ۸۳
۵-۳ تحلیل و بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۸۳
۵-۳-۱ سیکل رانندگی 5PEAK ۸۴
۵-۳-۲ سیکل رانندگی ECE و EUDC ۸۷
۵-۳-۳ سیکل رانندگی NEDC ۹۲
۵-۳-۴ سیکل رانندگی منهتن ۹۶
۵-۳-۵ سیکل رانندگی FTP ۹۹
۵-۳-۶ سیکل رانندگی شهری و بزرگراه هند ۱۰۲
۵-۳-۷ سیکل رانندگی تهران ۱۰۶
فصل ششم: جمع‌بندی و ارتقاء طرح
۶-۱ جمع‌بندی ۱۱۰
۶-۲ ارتقاء طرح کنترلی ۱۱۳
پیوست: مختصری درباره خودرو INSIGHT ۱۱۴
پ-۱- معرفی خودرو INSIGHT ۱۱۴
پ-۲- شبیه‌سازی Insight در نرم‌افزار ADVISOR ۱۱۶
مراجع ۱۲۶

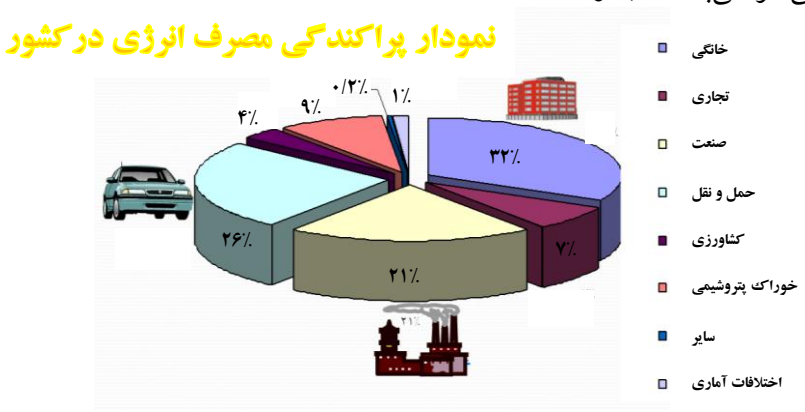
فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

شاید یکی از موضوعاتی که در اولین سال‌های عرضهٔ خودروهای احتراق داخلی به بازار هیچگاه ذهن سازندگان را به خود مشغول نمی‌کرد، مشکلات عدیده‌ای بود که با گذشت زمان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم گریبان‌گیر تمامی جهانیان شد[۲].

یکی از این مشکلات کاهش منابع سوخت فسیلی و وجود نوسان‌های شدید قیمت در بازار نفت و دیگر منابع سوختی می‌باشد، که از اواخر دههٔ شصت باعنوان بحران انرژی موردتوجه قرارگرفت. ظرف ۵۰ سال آینده تقریباً ۴ میلیارد نفر به جمعیت ۷ میلیارد نفری کرهٔ زمین اضافه می‌گردد[۲]. صرف‌نظر از هرگونه پیشرفت در فناوری‌های جدید و بهبود بهره‌وری در مصارف انرژی، تقاضا برای انرژی رو به افزایش بوده و این افزایش را هم‌اکنون در کاهش مقدار نفت موجود در انبارهای کشورهای صنعتی و افزایش قیمت جهانی نفت می‌توان ملاحظه کرد [۲]. به‌عبارت دیگر در آینده‌ای نه‌چندان دور، منابع موجود در کرهٔ زمین قادر به پاسخگویی نیازهای انرژی جامعهٔ بشری نخواهند بود. شکل ۱-۱ نمودار پراکندگی مصرف انرژی در کشور ایران را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در این نمودار مشخص می‌باشد، مصرف انرژی در بخش حمل‌ونقل سهم قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد.

موضوع دیگری که لزوم ایجاد تغییر در فناوری‌های متداول مورد استفاده در صنعت خودرو را گوشزد می‌کند، آلودگی هوا و آسیب‌های جدی وارد شده به محیط زیست می‌باشد. چالش‌های بزرگ زیست محیطی به‌وجود آمده بر سر راه زندگی ساکنان کرهٔ زمین از اواخر دههٔ هفتاد مورد توجه قرار گرفت و پس از آن در دههٔ هشتاد با وضع استانداردهای زیست‌محیطی و ناکام ماندن تلاش‌های صورت گرفته برای رسیدن به این استانداردها، به اوج خود رسید. انتشار گازهای سمی از قبیل CO، NO_x، SO_2 و HC و ذرات معلق ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی در خودروها علاوه بر تولید باران‌های اسیدی، تشکیل گازهای گلخانه‌ای و آسیب رساندن به لایهٔ ازن، همواره سلامت شهروندان را نیز در معرض خطر قرار می‌دهد [۲]. اختصاص بیشترین سهم آلوده‌کنندهٔ هوا به خودروها، در شهری هم‌چون تهران، خود بیانگر اهمیت توجه به نحوهٔ عملکرد خودروها در سامان بخشیدن به موضوع آلودگی هوا می‌باشد. (جدول ۱-۱)



شکل ۱-۱- نمودار پراکندگی مصرف انرژی در کشور ایران

جدول ۱-۱- سهم درصدی ناوگان حمل‌ونقل شهری در انتشار آلاینده‌های اصلی هوای تهران [۲]

نوع آلاینده	وسائط نقلیه سبک	موتورسیکلت	مینی بوس	وسائط نقلیه سنگین	اتوبوس واحد
CO_2	۶۰	۴	۸	۲۵	۳
NO_x	۴۸	۰	۵	۴۴	۳
HC	۶۳	۲۷	۱	۸	۱
CO	۹۰	۹	۰	۱	۰
SO_2	۰	۰	۲۱	۷۱	۸
ذرات معلق	۵۲	۶	۱۳	۲۶	۳

آن‌چه تاکنون ذکر شد از جمله مشکلات عدیده‌ای هستند، که خودروهای احتراق داخلی عامل ایجادکنندهٔ آن‌ها به‌حساب می‌آیند و لزوم انجام تلاش برای دستیابی به خودروهایی با مصرف سوخت و آلایندگی کمتر را بیش از پیش محرز می‌دارند [۲]. لذا خودروسازان ملزم به تولید فناوری‌های جدیدی خواهند بود که علاوه بر ارضاء نیازهای روزافزون راننده‌ها، با دو هدف کاهش مصرف سوخت و آلایندگی، صنعت خودروسازی را به سمتی متعالی سوق دهند. بدین‌منظور تلاش‌های متعددی صورت گرفته است که از آن‌جمله می‌توان به تلاش برای بهینه‌سازی موتورهای احتراق داخلی، استفاده از سوخت‌های جایگزین، خودروهای برقی محض، خودروهای پیل‌سوختی و انرژی خورشیدی و درنهایت استفاده از خودروهای هیبرید اشاره نمود.

محدودیت در بهینه‌سازی خودروهای با موتورهای احتراق داخلی و از بین نرفتن وابستگی به سوخت‌های فسیلی، خودروسازان را به‌سمت استفاده از سوخت‌های جایگزین سوق داد. استفاده از خودروهای برقی محض راهکار دیگری بود که سازندگان خود را با مشکلاتی از قبیل محدودیت پیمایش، گران بودن باتری‌ها، زمان شارژ بالا و سنگین بودن کل مجموعه روبرو نمود. پیچیدگی فناوری و عدم بلوغ جهت تولید و گران بودن نسبت به سیستم‌های دیگر، استفاده از خودروهای پیل سوختی و انرژی خورشیدی را نیز دچار مشکل ساخت.

پس از تلاش‌های فراوان، دانشمندان به این نتیجه رسیدند که بهترین خودرویی که می‌تواند خواسته‌های ما را در شرایط کنونی به‌نحو مطلوب برآورده سازد، خودرو هیبرید است. منظور از خودرو هیبرید، خودرویی است که از دو یا چند منبع تولید انرژی، که حداقل یکی از آن‌ها قابلیت ذخیره‌سازی انرژی را داشته باشد، برای تولید قدرت استفاده می‌کند.

در خودرو هیبرید با به‌کارگیری سیستم رانش الکتریکی درکنار سیستم رانش احتراقی، بخش عمده‌ای از توان خودرو هنگام شتاب‌گیری و شیب‌پیمایی توسط سیستم الکتریکی تأمین می‌شود و لذا حجم موتور احتراقی کاهش پیدا می‌کند. همچنین شرایط کاری موتور احتراقی به‌طور کامل یا جزئی، از شرایط کاری خودرو مستقل می‌شود و درنتیجه موتور احتراقی در اکثر مواقع در منطقهٔ بیشترین بازده خود کار می‌کند [۲]. به‌علاوه عملکرد موتور الکتریکی در نقش ژنراتور و بازیاب انرژی جنبشی خودرو، این انرژی را در زمان شتاب‌گیری مجدد به خودرو بازمی‌گرداند. استفاده هم‌زمان از فناوری موتور احتراقی، ارزان‌تر بودن نسبت به دیگر راه‌حل‌ها، عدم نیاز به باتری در درازمدت، نداشتن پیچیدگی‌های فناوری، کنترل و فرمان‌پذیری بیشتر و ... ازجمله مزایای قابل ذکر برای خودروهای هیبرید می‌باشد.

همان‌گونه که ذکر شد، یکی از ویژگی‌های خودروهای هیبرید قابلیت ذاتی آن‌ها در بازیابی مقدار قابل توجهی از انرژی ترمزگیری توسط سیستم ترمز بازیاب می‌باشد [۱]. درحقیقت این نوع ترمز یک فناوری کلیدی

است که بسته به ابعاد موتور قادر به افزایش ۲۰ تا ۵۰ درصدی بازده مصرف سوخت می‌باشد [۳]. این افـزایش بـازده به‌خصوص برای خودروهایی که در سیکل‌های شهری تردد داشته و دارای فرکانس توقف و حرکت بالا مـی‌باشـند، چشمگیر خواهد بود. اگرچه بیشـترین میـزان انـرژی مفیـد و قابـل دسترسـی توسـط سیسـتم ترمزگیـری بازیـاب، در ترمزهای معمولی به گرما تبدیل و اتلاف می‌گردد، ولی به‌دلیل محدودیت‌هـایی از قبیـل کـاربرد غیـرممکن سیسـتم ترمز بازیاب در برخی مواقع همچون بالا بودن ولتاژ بخش ذخیره‌کننده انرژی (که افزایش بیشتر ولتاژ باعث کـاهش طول عمر آن می‌گردد) و یا سرعت پایین خودرو (که استفاده از ترمز بازیاب در ایـن شـرایط بـازده پـایین بازیـاب و ترمزگیری نامطلوب را درپی دارد) [۴]، عملکرد ترمز بازیاب بطور معمول برروی فقط یک محور [۱] و نیـز ناکـافی بودن توان ترمز بازیاب در ترمزهای ناگهانی و شدید [۴]، به‌ناچار ترمز بازیاب بـه‌همـراه سیسـتم ترمزهـای مکـانیکی رایج بکار برده می‌شود تا در مواردی که کاربرد ترمز بازیاب امکان‌پذیر نمی‌باشـد بـا کمـک سیسـتم ترمـز معمـولی ترمزگیری بصورت مؤثر و پایدار انجـام پـذیرد. بـرهمین اسـاس ترمـز بازیـاب در دو نـوع سـری و مـوازی طراحـی می‌شود. در نوع سری راهبرد کنترل یکپارچه برای دو سیستم ترمز بازیاب و مکانیکی درنظـر گرفتـه شـده، درحـالی که در نوع موازی این دو سیستم بصورت کاملاً مجزا کنترل می‌گـردد. اگرچـه کـاربرد دو سیسـتم ترمزگیـری ذکـر شده بصورت موازی یک سیستم ساده، ایمن و بازیاب انرژی را فراهم می‌سازد ولی سوئیچ پی‌درپـی بـین دو سیسـتم برای راننده ناخوشایند بوده و تأثیر معکوسی برروی پایـداری خـودرو خواهـد داشـت [۶]. بـه‌عبـارت دیگـر اگرچـه سیستم ترمز بازیاب سری پیچیده‌تر می‌باشد ولی بازیاب انرژی و فرمان‌پذیری بیشتری را نسبت به نوع موازی خواهد داشت [۹]. بنابراین ایجاد هماهنگی مؤثر بین دو سیستم ترمز بازیاب و مکـانیکی بخـش عمـده‌ای از طراحـی راهبـرد کنترلی ترمز در خودروهای هیبرید را تشکیل خواهد داد [۴].

ایمنی از جمله ویژگی‌های متمایزکنندهٔ سیستم‌های کنترل ترمزگیری می‌باشد. نکته‌ای بسیار مهم این است که در شرایط سخت رانندگی در جاده‌ها و یا در هنگام بروز ترمزهای ناگهانی و شدید، چرخ‌ها قفل می‌شـود کـه به عقیده کارشناسان، حدود ۱۰ درصد سوانح جاده‌ای و تصادفات در این شرایط، به علت قفل شدن چرخ‌ها حین ترمزهای شدید و عدم کنترل خودرو در شرایط لغزش برروی سطح جاده، به‌وجود می‌آیـد. مـوارد بیـان شـده در خودروهایی که مجهز به سیستم کنترل قفل‌کنندهٔ چرخ‌ها است به وجود نخواهد آمد. زیرا در خودروهای مجهز به سیستم ترمز ضدقفل[1] حتی در صورت بروز ترمزهای شدید و ناگهانی، فرمان‌پذیری خودرو حفظ شده و به‌صورت ثابت باقی خواهد ماند. امروزه با پیشرفت‌هـای روزافـزون علـم الکترونیـک در سیسـتم ترمـز خـودرو، امنیـت فعـال خودرو بسیار بالا رفته و از نظر پایداری نیز بهبود خوبی در خودروها ایجاد شده است. نرم افزارهای مختلفـی از قبیـل

[1] Anti-Lock Brake System

توزیع الکترونیکی نیروی ترمزی[1]، کنترل رانش خودرو[2]، کمک ترمز الکترونیکی[3] و برنامه پایداری الکترونیکی[4] به سیستم ترمز ضدقفل اضافه می‌شوند تا علاوه بر بهبود پایداری جانبی و طولی خودرو، عملکرد ترمز خودرو را ارتقاء دهند و باعث کاهش بیشتر فاصله توقف گردند. در گذشته تحقیقات زیادی بر روی ترمزهای ضدقفل انجام شده است، با این حال هنوز نیز این تحقیقات ادامه دارد [۱۲]. بنابراین نیاز به سیستم‌های ترمز سریع و پیچیده‌تر محسوس خواهد بود. بعلاوه فشار کمتر پدال و کاهش طول کورس، ایجاد نیروی ترمزگیری بزرگتری را طلب خواهد کرد. نوسان نیروی پدال هنگام فعال شدن سیستم ترمز ضدقفل احساس ناراحتی را به راننده منتقل می‌کند که عملکرد آن‌را نامطلوب می‌سازد [۳]. علاوه بر آن تاکنون سیستم ترمز ضدقفل برای خودروهای با موتور احتراق داخلی رایج بوده و بکار برده شده است.

تمامی موارد ذکر شده تنها تعداد کمی از مشکلات و محدودیت‌های سیستم‌های کنترل ترمزگیری موجود می‌باشد. بنابراین نیاز به وجود یک سیستم ترمز ایمن و قوی در کنار ترمز بازیاب و ایجاد هماهنگی مؤثر بین این دو سیستم ترمز بازیاب و مکانیکی و ارائه عملکرد ایمن (ضدقفل) از جانب آن‌دو، بخش عمده‌ای از راهبرد کنترلی ترمز در خودرو هیبرید را به خود اختصاص می‌دهد.

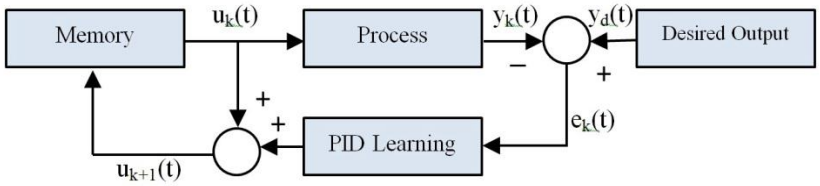
۱-۲ مروری بر طرح‌های موجود

در طی سال‌های نسبتاً اخیر طرح‌های متفاوتی در زمینه سیستم ترمزهای خودروهای هیبریدی ارائه شده‌است که در هر کدام به‌نحوی کوشش شده تا مشکلات و محدودیت‌های سیستم‌های موجود برطرف گردد. درادامه به‌طور مختصر به تعدادی از کارهای انجام گرفته در این زمینه اشاره شده است.

در سال ۲۰۰۵، میی[5]، ممبر[6]، لیین[7] و ژانگ[8] مقاله‌ای را باعنوان کنترل آموزش‌گیرنده مکرر[9] منتشر کردند [۱۰]. در این طرح با ارائه یک مدل غیرخطی از ضریب لغزش و استفاده از روش کنترلی ILC به‌منظور کنترل این ضریب براساس حداکثر ضریب چسبندگی، عملکرد سیستم ترمز بازیاب به صورت ضدقفل فراهم شده است (شکل

[1] Electronic Brake Force Distribution (EBD)
[2] Traction Control System (TCS)
[3] Electronic Brake Assist (EBA)
[4] Electronic Stability Program (ESP)
[5] Chunting Mi
[6] Senior Member
[7] Hui Lin
[8] Yi Zhang
[9] Iterative Learning Control (ILC)

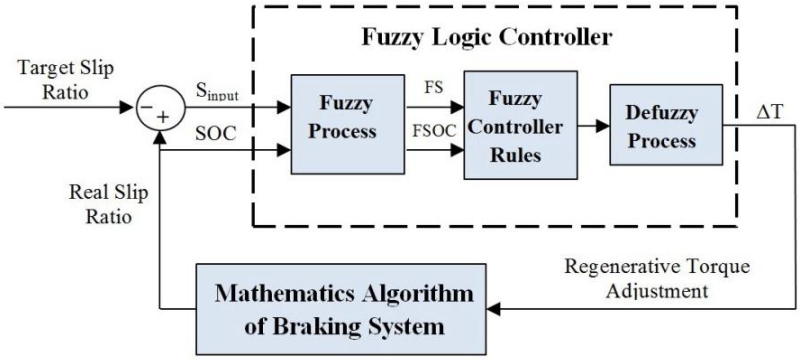
۱-۲). الگوریتم‌های آموزش‌دهنده ارائه شده در این طرح تناسبی و تناسبی مشتق‌گیر[1] می‌باشند. عملکرد ترمز بازیاب بصورت ضدقفل و زمان ترمزگیری مناسب حاکی از تأثیر پایدار راهبرد کنترلی پیشنهادی می‌باشد. منفعت کلیدی این راهبرد آن است که با یک بار آموزش، کنترل‌کننده توانایی تنظیم اتوماتیک با شرایط مختلف جاده را دارد. نیاز به یک سیستم ترمز ایمن و قوی در کنار ترمز بازیاب در شرایط ترمزگیری اضطراری و ارائه راهبرد کنترلی جهت هماهنگ‌سازی دو سامانه به‌منظور عملکرد مناسب و ایمن، ازجمله نواقص طرح مذکور می‌باشد.



شکل ۱-۲- کنترل آموزش‌گیرنده مکرر [۱۰]

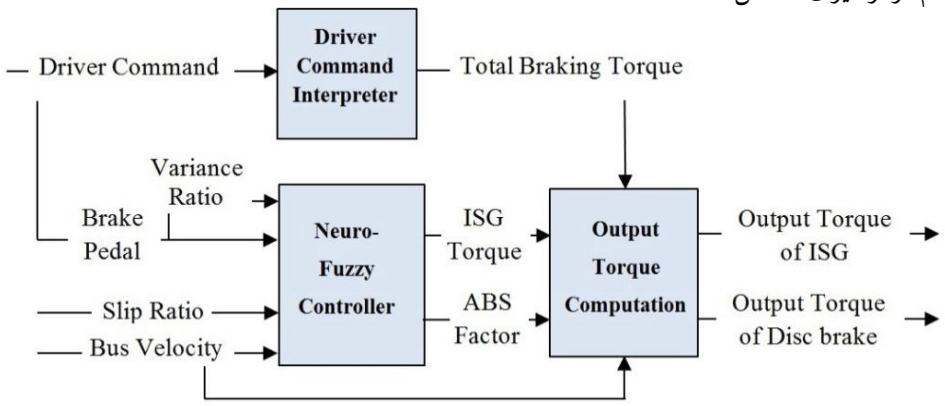
همان‌گونه که ذکر گردید، عدم تأمین توان ترمزی کافی از جانب ترمز بازیاب در ترمزهای ناگهانی و شدید، نیاز به وجود یک سیستم ترمز ایمن و قوی را در کنار آن محرز می‌سازد. همچنین معمولاً کنترل سیستم‌های دینامیکی هیبرید بدلیل خاصیت غیرخطی و تغییر با زمان مشکل است. لذا به‌منظور کنترل چنین سیستم‌هایی به کنترل‌کننده‌هایی با منطق فازی روی آورده شده‌است. به‌همین منظور و در سال ۲۰۰۷ یک طرح ترمز ترکیبی برای ترمز بازیاب و هیدرولیک ارائه شد [۷].در این طرح گشتاور ترمزی این دو سیستم توسط راهبردهای کنترلی با منطق آستانه و فازی تنظیم شده است. در پروسهٔ ترمزگیری، کنترل‌کننده سیگنال‌های ضریب لغزش و شتاب را به‌طور مرتب کنترل کرده و فشار ترمز هیدرولیکی را براساس آستانهٔ شتاب مثبت و منفی و آستانهٔ ضریب لغزش اول، به‌صورت دینامیکی تنظیم می‌کند. زمانی که ضریب لغزش واقعی به آستانهٔ دوم رسید، که این امر نشان‌دهندهٔ وجود امکان لغزش می‌باشد، یک کنترل‌کننده فازی (شکل ۱-۳)، گشتاور ترمز بازیاب را برای ادامهٔ ترمزگیری ایمن تنظیم می‌کند. طرح پیشنهادی برای دو حالت ترمزگیری اضطراری و سیکل رانندگی NEDC [2] شبیه‌سازی شده و نتایجی هم‌چون افزایش میزان شارژ باتری‌ها، ثابت ماندن ضریب لغزش در نزدیکی مقدار مطلوب، قفل نشدن چرخ‌ها در طول پروسهٔ ترمزگیری و هماهنگی سیستم ترمز بازیاب و هیدرولیک را دربر داشته است. استفاده از کنترل‌کننده‌های فازی با قوانینی که فضای زیادی از حافظه را اشغال کرده و حجم محاسبات را افزایش می‌دهند و عدم توانایی فراگیری شرایط مختلف جاده، نیاز به تکمیل و تصحیح طرح ارائه شده را محسوس می‌سازد.

[1] D & PD algorithm
[2] New European Driving Cycle



ش کل ۱-۳- بلوک دیاگرام کنترل‌کننده فازی برای سیستم ترمز بازیاب [۷]

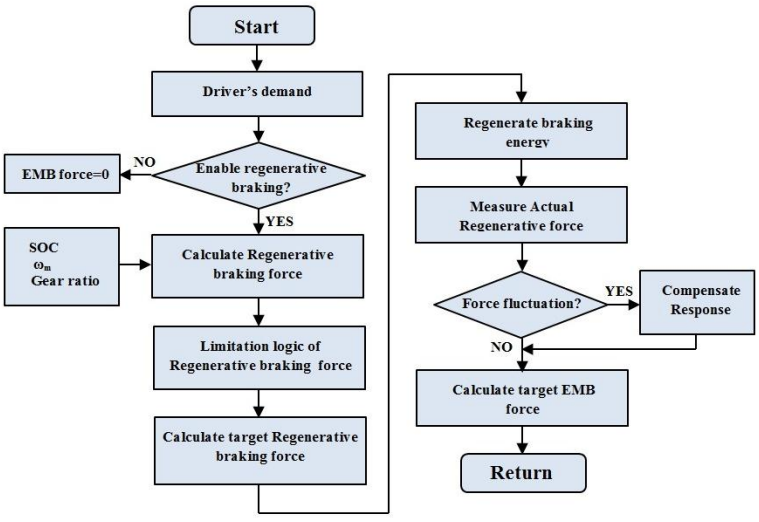
کنترل ترمز بازیاب هوشمند برای اتوبوس‌های هیبرید، عنوان مقاله دیگری است که در سال ۲۰۰۷ و توسط چن[۱]، کوانگ[۲]، هی[۳] و یانگ[۴] ارائه شد [۵]. در این مقاله یک سیستم ترمزگیری بازیاب هوشمند برای اتوبوس‌های هیبرید با ساختار سری، توسط ترکیب الگوریتم منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی طراحی شده است. در شکل ۱-۴ بلوک دیاگرام مربوط به مدل این سیستم ترمزگیری نمایش داده شده است. کنترل‌کننده هوشمند ارائه شده در این مقاله، یک NFC[۵] است که با گسترش قوانین در شبکه و تأکید بر توانایی خودآموز بودن آن، با سرعت بالا و محاسبات هم‌زمان به‌جای جستجوی پیچیده در بین قوانین فازی و با استفاده از مفاهیم اساسی کنترلی، قوانین مورد نظر را وضع می‌کند. با شبیه‌سازی سیستم ترمز معرفی شده برای اتوبوس هیبرید الکتریکی شهری، نتایجی هم‌چون توزیع مناسب گشتاور برای موتور الکتریکی و دیسک ترمز اصطکاکی و همچنین عملکرد بازیاب انرژی سیستم ترمزگیری حاصل شده‌است.



شکل ۱-۴- بلوک دیاگرام مدل ترمزگیری [۵]

[1] Ziqiang CHEN
[2] Jiaxi QIANG
[3] Jianhui HE
[4] Lin YANG
[5] Neuro-Fuzzy Controller

و بازهم در سال ۲۰۰۷ آنالیز سیستم ترمز بازیاب برای خودروهای هیبرید الکتریکی و این بار با استفاده از یک ترمز الکترومکانیکی توسط جانگ[1] و همکارانش صورت گرفت [۳]. از جمله مزیت‌های سیستم ترمز الکترومکانیکی توانایی آن در ایجاد نیروی ترمزگیری بزرگ در مقابل نیروی عکس‌العمل کوچک پدال ترمز می‌باشد. در طرح پیشنهادی در این مقاله، سیستم ترمز الکتریکی توسط واحد کنترل ترمز و سیستم ترمز بازیاب توسط واحد کنترل موتور سازماندهی و کنترل‌کننده مرکزی خودرو وظیفهٔ ایجاد هماهنگی بین این دو سیستم ترمز مجزا را به‌عهده داشت. در این سیستم ترمزگیری، گشتاور ترمز بازیاب و الکتریکی براساس درخواست راننده، مشخصات موتورالکتریکی، میزان شارژ باتری‌ها و سرعت خودرو تعیین می‌گردد. زمانی که گشتاور بازیاب جوابگوی نیاز ترمزگیری راننده باشد، کل گشتاور مورد نیاز از طریق ترمز بازیاب تأمین شده و واحد کنترل ترمز این گشتاور را کنترل می‌کند تا احساس ترمزگیری معمولی در خودروهای رایج پدید آید. روندنمای منطق کنترلی ترمز بازیاب در شکل ۱-۵ نمایش داده شده است. شبیه‌سازی سیستم ارائه شده در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته و در نتایج به‌دست آمده عملکرد ایمن، مؤثر و بازیاب انرژی سیستم ترمز ارائه شده، نمایش داده شده است.



شکل ۱-۵-روندنمای منطق کنترلی ترمز بازیاب [۳]

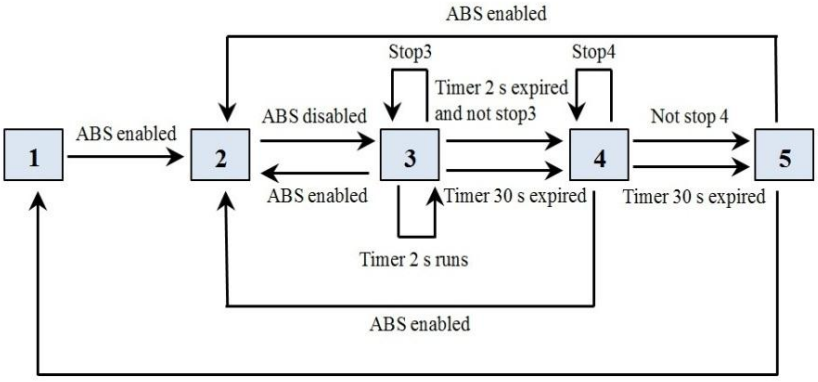
از دیگر کارهای صورت گرفته در سال ۲۰۰۷ می‌توان به تلاش ون یونگ[2]، فنگ[3] و بین[4] از دانشگاه جایوتانگ[5] شانگهای اشاره نمود، که یک الگوریتم کنترلی جدید بر پایه بهینه‌سازی گشتاور بازیاب پیشنهاد کردند

[1] JUNG
[2] XIAO Wen-yong
[3] WANG feng
[4] ZHUO Bin
[5] Jiaotong

و با توجه به پارامترهای متعدد در مورد چگونگی توزیع گشتاور ترمزی در ترمز بازیاب و مکانیکی کوشیدند تا با حفظ پایداری وسیله نقلیه و عملکرد مؤثر سیستم ترمز، به بالاترین سطح ذخیره انرژی جنبشی برسند [۴].

ارائه روشی جدید برای راهبرد کنترلی خودروهای الکتریکی با عنوان روش آزمون لغزش[1] از سوی لیی[2]، یوگونگ[3] ودیگر همکاران [۱۱] نیز در سال ۲۰۰۷ انجام گرفت.

در سال ۲۰۰۸ ژوانگ[4]، یین[5] و ژانگ[6] یک سیستم ترمز ضدلغزش هیبرید برای یک خودرو هیبرید الکتریکی با سیستم ترمز بازیاب و هیدرولیک با ویژگی ضدقفل، ارائه کردند و با پیشنهاد روش کنترلی جدیدی به‌منظور تأثیر ملایم‌تر سیکل‌های پی‌درپی تبدیل حالت ترمزگیری بازیاب به مکانیکی و برعکس برروی عملکرد خودرو، سعی کردند تا راه‌حلی برای مشکلات کنترل و فرمان‌پذیری سیستم‌های ترمز بازیاب موازی بیابند [۶]. سیستم ترمز ارائه شده در این مقاله دارای ساختار کنترلی چندلایه با یک کنترل‌کننده فازی برای سیستم ترمز هیدرولیک در پایین‌ترین سطح کنترلی خود می‌باشد. روش کنترلی ارائه شده دارای ۶ حالت عملکردی است که با فعال‌سازی تدریجی ترمز بازیاب پس از پایان عملکرد ترمز مکانیکی، فرآیند کنترلی طی خواهد شد (شکل ۱-۶). شبیه‌سازی سیستم ترمز پیشنهادی در نرم‌افزار Cruise انجام گرفته و نتایج بدست آمده نشان داده است که در شرایط ترمزگیری در جاده‌های با ضریب چسبندگی کم، هرگز چرخ‌ها قفل نشده‌اند. همچنین ضریب لغزش واقعی با نوسان کم مقدار مطلوب خود را دنبال کرده و میزان شارژ باتری از ۴۵ ٪ به ۴۵.۵ ٪ رسیده است.

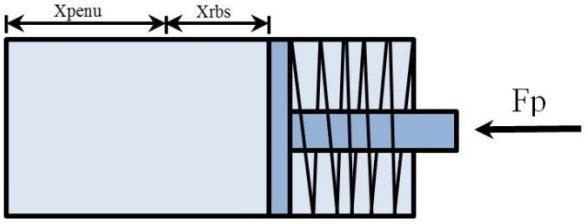


شکل ۱-۶- هماهنگی بین سیستم ترمز بازیاب و ضد لغزش [۶]

[1] Slip Trial Method
[2] Zou Lie
[3] Luo Yugong
[4] J. L.ZHANG
[5] CH. L. YIN
[6] J. W. ZHANG

ترمزگیری بازیاب یک عملکرد مهم برای اتوبوس‌های هیبرید الکتریکی شهری با سیکل‌های توقف و حرکت پی‌درپی محسوب می‌شود ولی هنوز یک مدل غیرخطی دقیق برای سیستم ترمز ترکیبی و نیز یک کنترل‌کننده غیرخطی بر اساس مدل[1]، برای اتوبوس‌های هیبرید الکتریکی سری- موازی به‌طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته است. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۰۸ منتشر گردید، سیستم ترمز با عملکرد بازیاب به‌همراه یک پدال ترمز مخصوص برای یک اتوبوس هیبرید الکتریکی با ساختار سری ارائه شده است [۸]. هنگامی که یک اتوبوس به‌سمت ایستگاه حرکت می‌کند، کنترل آن به‌منظور توقف در سکوی تعبیه شده، یکی از وظایف کنترل طولی خودرو محسوب می‌شود. در این مقاله سیستم انتقال قدرت اتوبوس به‌عنوان یک سیستم دینامیکی غیرخطی با پارامترهای کنترلی اثرگذار مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه با ارائه یک مدل غیرخطی از عدم قطعیت‌ها و ساده‌سازی مدل ارائه شده با فرضیات مربوط به توقف خودرو در ایستگاه، و پس از آن با یک کنترل‌کننده بهینه با طراحی پس‌رو و با الگوریتم کمترین مربعات سعی شده است، توقفی آرام، بازیاب انرژی و ایمن را ممکن سازد.

شکل ۱-۷، نمونه ساده شدهٔ پدال ترمز ارائه شده در این طرح را نمایش می‌دهد. هنگامی که پدال در محدوده سیستم ترمز بازیاب فشرده می‌شود X_{rbs}، ترمز بازیاب فعال خواهد شد و ورود به طول کورس نیوماتیک X_{penu}، به‌معنای ترکیب ترمز نیوماتیک و بازیاب می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که کنترل ترمز می‌تواند به‌خوبی رفتار ترمزگیری راننده را انعکاس داده و مسیر مطلوب خودرو به‌خوبی دنبال شود.



شکل ۱-۷- ساختار ساده شدهٔ پدال ترمز [۸]

همچنین در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ای با عنوان سیستم ترمزگیری بازیاب برای اتوبوس‌های هیبرید سری، سه سیستم ترمز بازیاب، یک سیستم با ساختار ترمز سری و دو سیستم با ساختار ترمز موازی طراحی و جهت اطمینان از ایمنی و پایداری آن‌ها هر کدام از سیستم‌های طراحی شده با سیستم ترمز معمولی یک اتوبوس شهری یکپارچه شد. پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیکل حرکتی درون‌شهری، نتایج نشان داد که سیستم ترمز بازیاب با ساختار ترمز سری از بازیاب انرژی، ایمنی و فرمان‌پذیری بیشتری نسبت به دو سیستم موازی برخوردار می‌باشد [۹].

[1] Model Based

۱-۳ پروژه پیش‌رو

همان‌گونه که بیان شد، تلفیق موتور احتراق داخلی، باتری و موتور الکتریکی درخودرو هیبرید، آلایندگی گازهای خروجی را کاهش و توان را افزایش می‌دهد. همچنین برد عملیاتی و مصرف سوخت مناسب نسبت به خودروهای معمولی گازوئیل و یا بنزینی را به‌دنبال خواهد داشت. این خودروها نیاز به اتصال به برق ندارند. این انعطاف‌پذیری ذاتی و دیگر مزایای ذکر شده برای خودروهای هیبرید آن‌ها را برای ناوگان حمل‌ونقل عمومی و همچنین استفاده شخصی مناسب ساخته است.

قابلیت کلیدی خودرو هیبرید در بازیاب انرژی و امکان استفاده از فناوری ترمز بازیاب حوزه طراحی سیستم‌های ترمزگیری را به فراتر از سیستم‌های ترمز مکانیکی رایج سوق داده است. ناکافی بودن توان ترمزگیری بازیاب و نیاز به یک سیستم ترمز قوی و ایمن در کنار آن، طراحی سامانه‌های کنترلی جهت هماهنگ‌سازی، تضمین عملکرد ضدلغزش و بدون تداخل عملکردی دو سیستم مذکور را مورد توجه قرار داده‌است.

در این پایان‌نامه یک خودرو هیبرید الکتریکی با یک موتور الکتریکی برروی محور جلو مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف طراحی یک سامانه کنترلی جهت تلفیق مناسب بین ترمز بازیاب، مکانیکی و ضدقفل و ارائه کنترل‌کننده‌ای به‌روز با قابلیت اجرا در شرایط واقعی می‌باشد. عملکرد ضدلغزش ترمز بازیاب و مکانیکی، عدم تداخل گشتاورهای این دو نوع ترمز، ذخیره‌سازی انرژی اتلافی در مرحله ترمزگیری، ایمنی در شرایط ترمزگیری اضطراری، هماهنگی ذخیره‌سازی انرژی با میزان شارژ[1] باتری‌ها ازجمله توابع هدف در طراحی موردنظر می‌باشد.

عملکرد ضدلغزش ترمز بازیاب و هیدرولیک، نیاز به حسگرهایی به‌منظور خواندن اطلاعات در لحظه و ارسال آن‌ها به پردازشگر مرکزی را می‌طلبد. این اطلاعات شامل سرعت خودرو، سرعت چرخ‌های محرک و متحرک به‌صورت مجزا، فشار ترمزگیری هیدرولیک برای پمپ اصلی و خطوط ترمزگیری چرخ‌های محرک و متحرک، جریان موتور الکتریکی و دیگر اطلاعات ضروری می‌باشد. بنابراین مدل‌سازی سیستمی فعال در لحظه، به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای مذکور، علاوه بر ارائه طرح کنترلی ذکر شده به‌منظور شبیه‌سازی و حصول نتایج موردنظر نیاز می‌باشد.

پایان‌نامه حاضر در شش فصل تدوین شده است که محتوای فصول بعدی به‌شرح ذیل می‌باشد:

در ادامه و در فصل دوم جزئیات کامل‌تری درباره‌ی خودروهای هیبرید و نحوه‌ی بازیاب انرژی توسط سیستم ترمز بازیاب ارائه شده و انواع ترمزهای بازیاب شامل ترمزهای سری و موازی و چگونگی عملکرد آن‌ها تشریح گردیده است. سپس اصول موردنیاز جهت کنترل سیستم ترمز ضدقفل و عملکرد آن ذکر شده است. در

[1] State of Charg