۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک–طراحی سیستم‌های تعلیق، ترمز و فرمان

سیستم تعلیق فعال برای خودروهای سواری با استفاده از روش کنترلی تطبیقی

توسط:

میثم امیرزاده

استاد راهنما:

دکتر شهرام آزادی

دکتر رضا کاظمی

زمستان ۱۳۹۰

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه خانم / آقای: میثم امیرزاده

را با عنوان: سیستم تعلیق فعال برای خودروهای سواری با استفاده از روش کنترلی تطبیقی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی/ کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر شهرام آزادی	استادیار	
۲- استاد راهنما	دکتر رضا کاظمی	دانشیار	
۳- استاد ارزیاب	دکتر سید حسین ساداتی	استادیار	
۴- استاد ارزیاب	دکتر امیرحسین شامخی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر امیرحسین شامخی	استادیار	

تقدیم

تقدیم به خانواده گرامی و دوست داشتنی و همراه همیشگی رها.

تشکر و قدردانی

با سپاس از خانواده گرامی که همواره من‌را مورد حمایت خود قرار داده و همچنین سپاس از تلاش‌های استادان گرامی، دکتر آزادی و دکتر کاظمی.

چکیده

امروزه راحتی و ایمنی خودرو از جمله معیارهای رقابتی در خودروها می‌باشد و رقابت در این مسائل بسیار نزدیک بوده و در فروش این محصولات تاثیر عمده‌ای دارد. در گذشته به دلیل عدم پیشرفت مناسب سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مهندسی، استفاده از سیستم‌های تعلیق فعال متداول نشده بود. ولی امروزه با توجه به ارزانی نسبی این تجهیزات استفاده از آنها گسترده‌تر شده است. روش‌های کنترل پیشرفته، مانند کنترل تطبیقی و کنترل فازی، از جمله روش‌های امروزی برای کنترل این سیستم‌ها می-باشد. در این پایان‌نامه، ابتدا مدل یک خودرو کامل در محیط نرم‌افزار ADAMS صحه‌گذاری شده و سپس با استفاده از روش کنترل تطبیقی خود تنظیم و همچنین استفاده از روش کمترین مربعات بازگشتی، پارامترهای مدل خطی مشابه تخمین زده می‌شود و در ادامه از کنترل بهینه خطی برای کنترل استفاده می‌گردد و مشاهده می‌شود که راحتی بهتری برای این خودرو فراهم شده است. نکته‌ی مهمی که در این پایان‌نامه در نظر گرفته شده است، تاخیر عملگرها به واسطه ساختار آنها می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از این روش کنترلی با حالت غیر کنترلی(Passive) مقایسه شده و برتری آن نشان داده خواهد شد.

کلید واژه: مدل خودروی کامل، مدل ADAMS، کنترل تطبیقی، کنترل بهینه، تخمین پارامتر

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها..... ه

فهرست علایم و نشانه‌ها..... و

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- مروری بر کارهای انجام شده..... ۴

۱-۲- هدف پایان‌نامه..... ۷

۱-۳- ساختار پایان‌نامه..... ۸

فصل ۲- بررسی دینامیک خودرو و ارتعاشات و بررسی ارتعاشات اتفاقی و اثر آن در مدل راحتی خودرو..... ۹

۲-۱- مدل ارتعاشی خودرو کامل با در نظر گرفتن ۷ درجه آزادی..... ۱۰

۲-۲- بررسی راحتی سفر با استفاده از دیاگرام شتاب RMS..... ۱۵

۲-۳- تحلیل سیستم تعلیق..... ۱۶

۲-۳-۱- سیستم های تعلیق غیرفعال، نیمه فعال و فعال..... ۱۷

۲-۳-۲- مقایسه سیستم های فعال و نیمه فعال..... ۱۸

۲-۳-۳- استراتژی کنترل در سیستم های نیمه فعال..... ۱۸

۲-۴- ارتعاشات اتفاقی و اثر آن در مدل راحتی خودرو..... ۲۰

۲-۴-۱- تابع چگالی طیفی جاده مطابق استاندارد (ISO)..... ۲۰

۲-۴-۲- ارتعاشات وارد بر بدنه خودرو و محاسبه شتاب RMS..... ۲۲

۲-۵- مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ادامز..... ۲۳

۲-۵-۱- معرفی سیستم تعلیق جلو و عقب..... ۲۴

۲-۵-۲- سیستم فرمان ۲۸
۲-۵-۳- بدنه ۲۹
۲-۵-۴- مشخصات تایرهای جلو و عقب ۳۰
فصل ۳- معرفی کنترل تطبیقی ۳۳
۳-۱- مقدمه ۳۴
۳-۲- تاریخچه ۳۵
۳-۳- روش‌های تطبیقی ۳۶
۳-۳-۱- جدولبندی بهره ۳۶
۳-۳-۲- سیستم تطبیقی مدل – مرجع (MRAS) ۳۷
۳-۳-۳- کنترل تطبیقی خود تنظیم (STR) ۳۸
۳-۳-۴- کنترل دوگان ۴۰
۳-۴- کنترل تطبیقی خودتنظیم ۴۱
۳-۴-۱- مقدمه ۴۱
۳-۴-۲- تخمین پارامترها ۴۲
۳-۴-۲-۱- کمترین مربعات و مدلهای رگرسیون ۴۲
۳-۵- کنترل بهینه ۴۸
۳-۵-۱- مقدمه ۴۸
۳-۵-۲- روابط کنترل بهینه به منظور حل مساله کنترل ۴۸
فصل ۴- شبیه‌سازی و نتایج ۵۱
۴-۱- تخمین پارامترهای یک مدل خطی: ۵۲
۴-۲- طراحی کنترلر LQR ۵۵
۴-۳- کنترل سیستم غیر خطی ۶۱
۴-۴- نتایج ۶۱

فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۷۰

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۷۱

۵-۲- پیشنهادات..... ۷۳

فهرست مراجع..... ۷۴

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: طبقه‌بندی زبری جاده‌ها مطابق استاندارد ISO ۲۲

جدول ۲-۲: پارامترهای تایر برای محورهای جلو و عقب ۳۱

جدول ۲-۳: پارامترهای هندسی خودرو ۳۲

جدول ۵-۱: نتایج به‌دست آمده از پایان‌نامه ۷۱

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
زاویه پیچ	θ_a
زاویه رول	φ_a
فرکانس مکانی جاده	Ω
فرکانس زمانی	f
فاصله طولی مرکز ثقل خودرو تا محور جلوی خودرو	a
فاصله طولی مرکز ثقل خودرو تا محور عقب خودرو	b
فاصله عرضی مرکز ثقل خودرو تا مرکز چرخ سمت راست خودرو	c
فاصله عرضی مرکز ثقل خودرو تا مرکز چرخ سمت چپ خودرو	d
ضریب میرایی کمک فنر جلو	b_{pf}
ضریب میرایی کمک فنر عقب	b_{pr}
ممان اینرسی بدنه حول محور x	I_{px}
ممان اینرسی بدنه حول محور y	I_{py}
سختی فنر جلو	k_{pf}
سختی فنر عقب	k_{pr}
جرم فنربندی شده	M_p
جرم فنربندی نشده	M_w
ورودی جاده برای چرخ جلو	R_f
ورودی جاده برای چرخ عقب	R_r
تابع چگالی طیفی	S_g

فصل ۱– مقدمه

مدرن بودن خودرو، به تعداد سیستم های کنترل دیجیتالی که برای ارتقاء تجربه سواری، برروی خودرو نصب می‌شود، بستگی دارد. این سیستم‌ها شامل سیستم‌های تعلیق نیمه فعال خودرو[1] [۱]، سیستم های ترمز ضد قفل[2] [۲]،کروز کنترل [۳]، کنترل درجه حرارت [۴]، انتقال قدرت اتوماتیک [۵] و کنترل قدرت برای خودروهای هیبریدی [۶] می‌باشد.

سیستم تعلیق خودرو نقش مهمی دردینامیک و پایداری خودرو دارا می‌باشد. وظیفه اصلی سیستم تعلیق، ایزوله کردن بدنه خودرو و سرنشین از نیروی ارتعاشی انتقال یافته از جاده می‌باشد. برای کاهش نیروی ارتعاشی انتقال یافته به خودرو، معمولا از المانهای غیر فعال فنر و میراکننده، بین منبع ارتعاش و بدنه خودرو استفاده می‌شود. این‌ها عناصر پایدارکننده سیستم تعلیق غیر فعال را تشکیل می‌دهند و این سیستم تعلیق در بیشتر خودروها از ابتدای قرن ۲۰، مورد استفاده قرار گرفته است[۷].

ارتعاشات خودرو در هنگام رانندگی، به خاطر سطح نامنظم جاده، باعث ناراحتی سرنشین می‌شود. سیستم تعلیق با جذب ارتعاشات خودرو در شرایط ناهموار سطح جاده سبب بهبود احساس سواری می-شود [۸]. مزیت دیگر سیستم تعلیق، حفظ تماس تایر با سطح زمین وقرار دادن چرخها در موقعیت مناسب روی سطح جاده می‌باشد[۹]. این هدف، با مینیمم کردن شتاب عمودی بدنه خودرو با استفاده از سیستم تعلیق ، به دست می‌آید.

سیستم تعلیق بر اساس عملکرد، معمولا به ۳ گروه تقسیم می‌شود: سیستم تعلیق غیر فعال[3] شامل فنر و میراکننده، سیستم تعلیق نیمه فعال که از یک میراکننده متغیر استفاده می‌کند، سیستم تعلیق فعال[4] که از یک عملگر نیرویی هیدرولیکی، پنوماتیک و یا الکتریکی استفاده می‌کند. سیستم تعلیق غیر فعال، ساده‌ترین و از لحاظ اقتصادی به صرفه ترین نوع سیستم تعلیق می‌باشد. اشکال عمده سیستم تعلیق غیر فعال، محدودیت جذب ارتعاشاتی است که به‌واسطه سطح نامنظم جاده رخ می‌دهد[۹]. در

[1] Semi-Active Suspension

[2] Anti-Lock Braking Systems

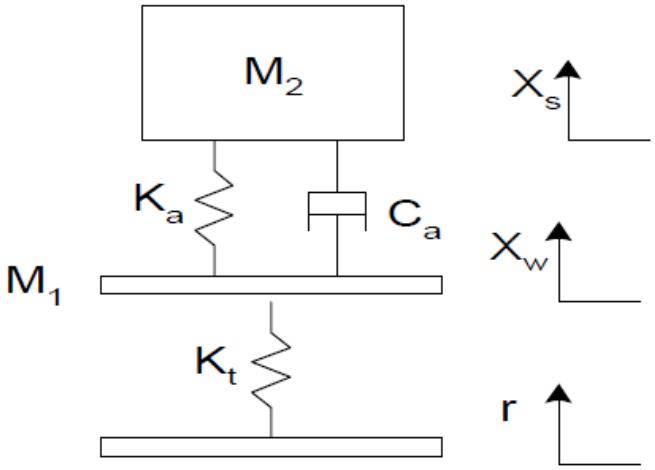
[3] Passive Suspension

[4] Active Suspension

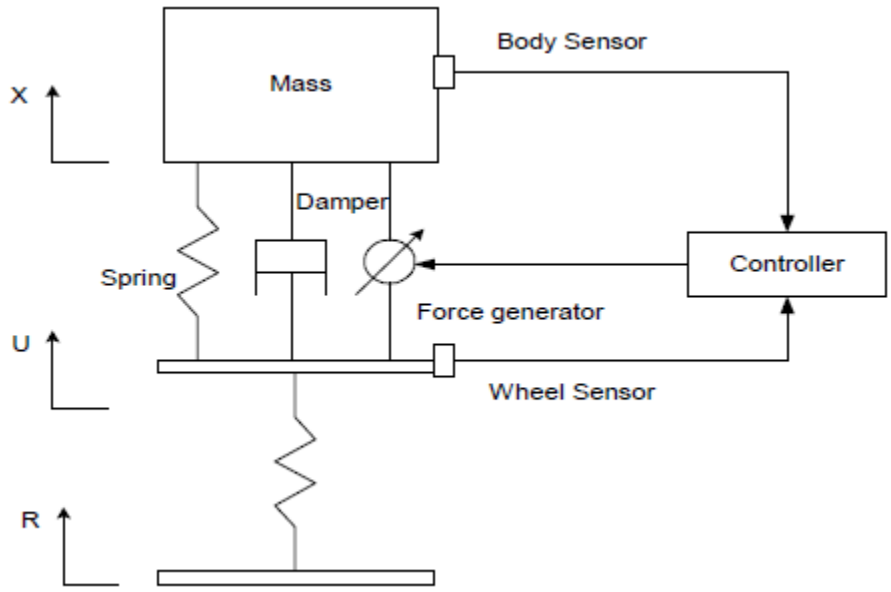
سیستم تعلیق نیمه فعال، امکان تغییر پارامترهای میراکننده در امتداد جاده وجود دارد[۱۰]. مزیت دیگر سیستم تعلیق فعال، قابلیت جبران دینامیکی آن نسبت به سیستم تعلیق غیر فعال و روش‌های مختلفی که می‌توان برای طراحی الگوریتم‌های کنترلی استفاده کرد، می‌باشد[۱۱].

شکل (۱-۱) مدل جرم و فنر ربع خودرو را در یک سیستم تعلیق غیرفعال نشان می دهد. در سیستم های غیر فعال پارامترهای سیستم از جمله ضریب میرایی کمک فنر و ضریب سختی فنر ثابت است.

شکل(۲-۱) مدل جرم و فنر ربع خودرو را در یک سیستم تعلیق فعال نشان می دهد. در سیستم های فعال، در شرایط مختلف حرکت خودرو روی جاده، پارامترهای سیستم تغییر می کند و علاوه بر کمک فنر و فنر که ضرایب ثابتی دارند، از یک عملگر استفاده می شود که با روش های مختلف کنترلی، کنترل خواهد شد.



شکل ۱-۱: مدل ارتعاشی ربع خودرو



شکل ۱-۲: مدل ارتعاشی ربع خودرو(سیستم تعلیق فعال)[۱۸]

۱-۱- مروری بر کارهای انجام شده

در بررسی مجموعه مقالات گردآوری شده در مورد سیستم تعلیق فعال روی دو مقوله: ۱- رفتار دینامیک خودرو ۲- الگوریتم های کنترل به منظور کنترل مدل پرداخته شده است. بنابراین به طور خلاصه کارهای انجام شده در هر کدام از مقالات گزارش شده و مورد ارزیابی قرار می گیرد.

کار و مطالعه روی طراحی سیستم های فعال از دهه ۷۰ آغاز شد. شاید از اولین نمونه کارهایی که در این زمینه انجام شده است بتوان به طراحی سیستم های پادغلت فعال توسط میری وراسلر در سال ۱۹۶۸ در دانشگاه MIT انجام پذیرفته است، اشاره کرد. با توجه به اینکه در زمان اجرای این تحقیق وسایل اندازه گیری و همین طور اجزای هیدرلیک با دقت بالا وجود نداشته است، این سیستم ها به خوبی پیاده سازی نشده اند[۱۲].

با توجه به اینکه هدف از طراحی سیستم های تعلیق هماهنگی و سازش دو مقوله مغایر و مخالف هم که عبارتند از راحتی سفر و پایداری خودرو، می باشد، ویلیام در سال ۱۹۹۷ با به‌کارگیری مدل خودرو

ابتدا در حالت غیر فعال خودرو را بررسی کرد. ایشان با استفاده از تابع تبدیل سیستم ۱/۴ خودرو و با اعمال ورودی‌های جاده به صورت اتفاقی، پاسخ ارتعاشی مدل را به دست آورد و سپس با عوض کردن ضریب دمپینگ و ضریب سختی، رفتار ارتعاشی مختلف در حالت سیستم غیر فعال مقایسه کرده است. برای کنترل مدل از روش کنترل بهینه استفاده شده است. ایشان در مقاله دوم خود در همان سال به بررسی انواع مختلف سیستم های تعلیق از نظر فیلتر کردن فرکانس های پایین و یا بالا که از طرف جاده ایجاد می شود، پرداخته است و از دیدگاه صنعتی، طراحی ابعادی عملگر برای سیستم تعلیق فعال با استفاده از فنرهای گازی یا روغنی را انجام داده است و نیروی عملگر با توجه به نوع سیستم تعلیق فعال و قدرت هیدرولیکی لازم برای این سیستم ها محاسبه کرده است. الگوریتم کنترلی به منظور کنترل سیستم تعلیق فعال، کنترل بهینه استفاده شده است[۱۳].

پوردی و برلمن در سال ۱۹۹۷ مدل ۱/۴ خودرو را به منظور طراحی سیستم های تعلیق فعال برای خودروهای مسابقه، بکار برده اند. کار ارائه شده از هر دو مقوله تئوری و عملی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش کنترل پاسخ مدار باز به منظور صحه گذاری روی مدل انجام شده است، ساختار کنترلی متوالی بکار برده اند. در این مقاله سعی شده روی سیستم تعلیق به گونه ای کار شود که بتواند هم در فرکانس های پایین و هم در فرکانس های بالای جاده جواب مناسب دهد[۱۴].

واتابنه و شارپ در سال ۱۹۹۹ یک سیستم تعلیق فعال با هندسه متغیر را مورد توجه قرار داده اند. عملاً نیروی محرکه در این روش صرف تغییر نسبت اهرم بندی بین مجموعه کمک فنر با مجموعه چرخ می گردد. مدل استفاده ۱/۴ می باشد و صرفاً برای غلبه بر اصطکاک مقابل این حرکت به کار گرفته می شود. نیرو و انرژی کمی مورد نیاز است. نتایج گرفته شده نیز حاکی از پاسخ مناسب میزان غلت و حرکت قائم دارد. همچنین میزان مصرف انرژی نیز به طور قابل ملاحظه ای کم است. قابل ذکر است که جک مورد استفاده در این تغییر شکل یک جک الکترومغناطیسی می باشد. در نهایت با روش کنترل شبکه عصبی به مقایسه این روش با متدهای کنترلی برای مکانیزم ابتکاری خود پرداخته اند[۱۵].

اخیرا پژوهشگران، تکنیک‌های متفاوتی با کنترلرهای مختلف برای بهبود راحتی سوار و فرمان‌پذیری خودرو، با استفاده از سیستم تعلیق فعال، مورد استفاده قرار داده‌اند. در [۱۶] دو خودروی ایده‌آل به صورت جداگانه طراحی شده است و سپس به شکل خطی به منظور ایجاد یک خودروی ایده‌آل از نظر راحتی سواری ، با یکدیگر ترکیب شده‌اند. تکنیک Modified Adaptive Robust Control (MARC) برای بهبود پایداری حلقه بسته وفقدان عملکرد سنسور نیرو برای فیدبک، در [۱۱] معرفی شده است. در [۱۷] مدل H_∞ برای مینیمم کردن ارتعاشات ناشی از ناهمواری جاده با میراکننده غیر خطی، طراحی شده است. بیشتر پژوهشگران برای مدل‌های خطی و غیر خطی، از عملگرهای غیر خطی استفاده می-کنند[۱۸].در مرجع [۱۹] از یک کنترل کننده مقاوم برای سیستم تعلیق فعال خودرو کامل با استفاده ازترکیب مختلط پارامترها، استفاده شده است. در [۲۰] یک تکنیک مد لغزشی برای سیستم تعلیق فعال یک خودروی کامل ، طراحی شده است. در مرجع [۲۱] توسعه سیستم کنترل یکپارچه برای فرمان فعال جلو و کنترل نیروی نرمال با استفاده از منطق فازی به منظور افزایش عملکرد فرمان‌پذیری مدل خودروی کامل، ارائه شده است.

همانطورکه برای همه شناخته شده، به طور معمول در سیستم‌های مختلف مهندسی از جمله سیستم‌های پنوماتیک و هیدرولیک و فرآیندهای صنعتی تاخیر زمانی وجود دارد [۲۲]، [۲۳]. در کنترل فعال سیستم تعلیق خودرو، تاخیر زمان سیستم یک مسئله مهم است که نیاز به شناخت دقیق آن برای جلوگیری از عملکرد ضعیف و یا حتی ناپایداری احتمالی سیستم حلقه بسته است. اگر چه تاخیر زمانی ممکن است کوتاه باشد اما عملکرد کنترل را وقتی‌که تاخیر در حلقه بازخورد ظاهر می‌شود، محدود می-کند. برخی از نتایج در مورد سیستم تعلیق فعال با تاخیر ورودی عملگر در مراجع [۲۴]، [۲۵] و [۳۸] وجود دارد.

به منظور نزدیک شدن نتایج به نتایج واقعی‌تر یا به عبارتی شبیه سازی بهتر مدل دینامیکی به نحوی که مشابه یک مدل واقعی خودرو باشد، از شبیه سازی در نرم‌افزار ادامز[1] استفاده شده است. برای نمونه، کاتالین الکساندر و پیتر الکساندر در [۲۶] شبیه سازی مدل دینامیکی یک خودروی کامل را در نرم‌افزار ادامز و شبیه‌سازی کنترل آن در نرم‌افزار متلب را ارائه داده‌اند. آزاده فرازنده و رضا کاظمی در [۲۷] کنترل فازی سیستم تعلیق فعال یک خودروی کامل بررسی کرده اند.

از جمله روش های کنترلی مختلف که روی سیستم های تعلیق فعال در مقالات مطالعه شده به ترتیب پیشرفت زمانی عبارتند از : ۱- کنترل های کلاسیک ۲- روش های بهینه سازی در کنترل ۳- روش های پیشرفته ای چون کنترل فازی ۴- شبکه های عصبی ۵- کنترل تطبیقی که امروزه روی سه روش آخر بسیار کار و تحقیق می شود.

بنابراین با مطالعه این مقالات می توان اظهارنظر کرد که امروزه تحقیقات فراوانی روی بهینه کردن روش های کنترلی خودرو انجام می شود و هزینه های زیادی صرف آزمایش به منظور عملی کردن این روش ها روی سیستم های تعلیق فعال می شود به عنوان مثال دارلینگ و هیکسون در سال ۱۹۹۸ تنها برای نوعی دیگر از میله پادغلت به گفته نویسندگان هزینه ای بالغ بر هزار دلار به کار گرفته شده که نکته قابل توجهی می باشد[۲۸].

۱-۲- هدف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه، توسعه سیستم های کنترل تطبیقی به منظور ایجاد ثبات در سیستم تعلیق خودرو می‌باشد. سیستم استفاده شده سبب افزایش کیفیت سواری خودرو تحت شرایط مختلف جاده می‌شود.

[1] ADAMS Software

برتری این پایان‌نامه نسبت به کارهای مشابه قبل(کنترل سیستم تعلیق فعال برای مدل کامل خودروی سواری)، استفاده از مدل دینامیکی شبیه‌سازی شده در محیط مجازی ادامز، استفاده از روش کنترل تطبیقی به منظور تخمین پارامترها و در نظر گرفتن تاخیر زمانی برای عملگرها می‌باشد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه شامل چهار فصل است. توضیح کوتاهی از هر فصل در زیر آمده است:

- *فصل۱* مقدمه و معرفی انواع سیستم‌های تعلیق و همچنین مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه می‌باشد.
- *فصل۲* مدل‌سازی ریاضی خودروی کامل در حالت سیستم تعلیق غیر فعال و سیستم تعلیق فعال انجام می‌شود و در ادامه به معرفی جاده‌های استاندارد به عنوان ورودی خودرو پرداخته می‌شود. همچنین معیار راحتی سرنشین معرفی می‌شود.
- *فصل۳* در این فصل به معرفی کنترل تطبیقی و روش‌های کنترل تطبیقی اشاره شده و روش رگولاتور خودتنظیم به طور کامل تشریح شده است.
- *فصل۴* در این فصل نتایج شبیه سازی کامپیوتری آورده شده و نتایج سیستم تعلیق فعال و غیر فعال مقایسه می‌شود. شبیه سازی‌ها در نرم‌افزار های متلب/سیمولینک و ادامز/کار انجام شده است.

در انتهای گزارش پایان‌نامه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آمده است.

فصل ۲–

بررسی دینامیک خودرو و ارتعاشات آن و بررسی ارتعاشات اتفاقی و اثر آن در مدل راحتی خودرو