بسم الله الرحمن الرحیم

الهی؛

مرا مدد کن تا دانش اندکم نه نردبانی باشد برای فزونی تکبّر،

نه حلقه ای باشد برای اسارت،

و نه دستمایه ای برای تجارت؛

بلکه گامی باشد برای تجلیل از تو و متعالی ساختن زندگی خود

و دیگران...

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه مهندسی کنترل

کنترل سیستم تعلیق فعال خودرو به روش مد لغزشی ترمینال فازی (FTSMC)

دانشجو: **عرفان مهم کار خیراندیش**

استاد راهنما:

دکتر محمد حداد ظریف

استاد مشاور:

دکتر علیرضا الفی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیرماه 1390

تقدیم به

پدر عزیزم که همواره راهنما و بسترساز پیشرفتم بوده است،

روح مادر بزرگوارم که اولین و بزرگترین معلم زندگی‌ام بود،

برادران خوبم که پشتوانه های گران‌قدر و بی‌نظیری در مسیر

پر تلاطم زندگیم بوده اند،

همسفر مهربانی که انگیزه هایی بزرگ و زیبا را به من بخشید،

و دوستانی که در لحظه های سخت، وجودشان مرا دلگرم می کرد.

تقدیر و تشکر

در اینجا وظیفه می دانم از اساتید گرامی راهنما و مشاورم، جناب آقای دکتر حداد و جناب آقای دکتر الفی که در طول دورهٔ تحصیل و همچنین انجام این پروژه از تجربیات و دانششان برخوردار بودم، کمال تشکر را بنمایم.

از جناب آقای دکتر قرویسی که هنگام انجام این پایان نامه، دانش ارزنده خود را سخاوتمندانه در اختیار بنده قرار دادند، سپاس فراوان دارم.

در ضمن بر خود واجب می دانم که از تمام زحمات و مشقات اساتید گران قدر گروه کنترل دانشگاه صنعتی شاهرود، آقایان دکتر فاتح، دکتر صدرنیا، دکتر اکبرزاده که در دوران تحصیل، دلسوزانه تمامی تجربیات و علم خود را در اختیارم قرار دادند، مراتب سپاسگزاری خود را ابراز دارم.

از خانوادهٔ گرامی و عزیزم، پدر خوبم و برادران مهربانم هومان و پویان، به سبب همکاری و یاری همیشگی شان بی نهایت سپاسگزارم.

از سرکار خانم غزال آیتی که بسیار لطف کردند و در تدوین، ویراستاری و رفع مشکلات این رساله، زحمات بسیاری را عهده دار شدند، مراتب سپاس و تشکر را دارم.

از دوست بزرگوارم جناب آقای سجاد شجاع که نهایت لطف را به بنده نمودند و در این پروژه بسیار مرا راهنمایی کردند، سپاسگزارم.

همچنین از دوستان گرانقدرم جناب آقای ایمان محمدی، علیرضا ایزدبخش، یاسر ارجمند، امیر علیزاده، سیامک آذرگشسب، حسین خلفباغی، رامین موحد، سعید اسفندیارپور و حمید اسفیدانی تشکر فراوان دارم.

در پایان از تمامی عزیزانی که بر اثر غفلت، نامشان از قلم افتاده، صمیمانه پوزش می خواهم و برایشان آرزوی موفقیت دارم.

چکیده

در این پایان نامه هدف این است که با استفاده از کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی، در مدل سیستم تعلیق یک چهارم خودرو، از انتقال حرکت های نامطلوب ناشی از ناهمواری سطح جاده، شتاب و ترمزگیری خودرو به بدنه جلوگیری شود. بر این اساس، ابتدا دینامیک سیستم تعلیق فعال خودرو مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد، سپس با روش مد لغزشی عملگر را کنترل می کنیم. پس از آن با استفاده از مد لغزشی ترمینال، سرعت رسیدن به پاسخ را بهبود می دهیم و با کمک کنترل فازی، پدیده لرزش در کنترل کننده مد لغزشی ترمینال را از بین می بریم.

سرانجام، نتایج روش مد لغزشی ترمینال فازی با روش مد لغزشی مقایسه خواهد شد.

کلید واژه: سیستم تعلیق فعال، مدل یک چهارم خودرو، عملگر الکتروهیدرولیک، ضربه گیر غیرخطی، کنترل فازی، مد لغزشی، مد لغزشی ترمینال، مد لغزشی ترمینال فازی.

فهرست مطالب

چکیده ..... **و**

فصل 1- مقدمه **2**

1-1- پیش گفتار 2

1-2- تاریخچه تحقیق بر روی سیستم تعلیق 2

1-3- پژوهش های انجام شده بر روی مدل سازی سیستم تعلیق 3

1-4- پژوهش های انجام شده با روش های کنترلی متفاوت 5

1-5- معرفی بخش های رساله 6

فصل 2- سیستم تعلیق خودرو **9**

2-1- مقدمه 9

2-2- جرم معلق و نامعلق 10

2-3- زیر بخش های سیستم تعلیق خودرو 11

2-3-1- فنر 11

2-3-2- ضربه گیر 12

2-3-3- تایرها 17

2-4- انواع سیستم های تعلیق 18

2-4-1- سیستم تعلیق ایستا 18

2-4-2- سیستم تعلیق پویا 18

فصل 3- معرفی کنترل لغزشی و مد لغزشی ترمینال **27**

3-1- مقدمه 27

3-2- مد لغزشی 27

3-2-1- معرفی مد لغزشی 27

3-2-2- طراحی سطح لغزش 29

3-2-3- طراحی سیگنال کنترلی $\boldsymbol{U(x,t)}$ 34

3-2-4- ملایم کردن رفتار ناپیوسته سیگنال کنترلی لغزشی $U(x,t)$ 37
3-3- مد لغزشی ترمینال 40
3-3-1- معرفی مد لغزشی ترمینال 40
3-3-2- مفهوم کنترل مد لغزشی ترمینال 41
3-3-3- کنترل مد لغزشی ترمینال در سیستم های تک ورودی- تک خروجی 47
فصل 4- نظریه فازی و ارائه روش FTSMC 57
4-1- مقدمه 57
4-2- سیستم های فازی 57
4-2-1- فازی کردن اطلاعات 60
4-2-2- استنتاج فازی 62
4-2-3- غیرفازی سازی نتایج استنتاج 65
4-3- تلفیق کنترل فازی با کنترل مد لغزشی ترمینال 67
4-3-1- مد لغزشی ترمینال با حرکت فازی 67
4-3-2- استفاده از سیستم فازی در کاهش پدیده لرزش در کنترل مد لغزشی 72
فصل 5- شبیه سازی 75
5-1- مقدمه 75
5-2- مدل سیستم تعلیق 75
5-2-1- مدل یک چهارم خودرو 75
5-2-2- پارامترهای غیرخطی 77
5-3- کنترل مد لغزشی 80
5-3-1- انتخاب حالت های مناسب 81
5-3-2- طراحی سیستم کنترل لغزشی 86
5-3-3- شبیه سازی کنترل لغزشی برای سیستم تعلیق 90
5-4- کنترل مد لغزشی ترمینال 93
5-4-1- طراحی کنترل مد لغزشی ترمینال 93
5-4-2- شبیه سازی کنترل لغزشی ترمینال برای سیستم تعلیق 96

5-5- کنترل به روش مد لغزشی ترمینال فازی 99
5-5-1- طراحی کنترل مد لغزشی ترمینال فازی 99
5-5-2- شبیه سازی کنترل لغزشی ترمینال فازی برای سیستم تعلیق 101
5-6- مقایسه روش کنترل لغزشی و کنترل لغزشی ترمینال فازی 103
فصل 6- نتیجه گیری و پیشنهادات 108

فهرست شکل ها

شکل 2-1 : نمایش شتاب عمودی وارد شده به خودرو در هنگام عبور از دست انداز[10]..... 9

شکل 2-2 : عملکرد ضربه گیر [10]..... 13

شکل 2-3 : مدل سیستم تعلیق نیمه کنا [12]..... 20

شکل 2-4 : عملکرد مایع مگناراید[12]..... 21

شکل 2-5 : مدل سیستم تعلیق کنا [12]..... 22

شکل 2-6 : مدل سیستم تعلیق با میله تعادل فعال..... 23

شکل 2-7 : عملکرد عملگر الکتروهیدرولیکی[32]..... 24

شکل 2-8 : عملگر LEM ساخت شرکت Bose [10]..... 25

شکل 4-1 : بلوک دیاگرام عملکرد کنترل کننده فازی و اجزای آن..... 60

شکل 4-2 : تقسیم فضای تغییرات به صورت (الف) قطعی ، (ب)فازی..... 61

شکل 4-3 : مجموعه های فازی برای قد افراد (الف) ورودی ، (ب) خروجی 63

شکل 4-4 : توابع عضویت ورودی و خروجی..... 68

شکل 4-5 : سطح قوانین فازی بین ورودی و خروجی..... 69

شکل 4-6 : کنترل کننده فازی پیشنهادی برای تک بعدی کردن ورودی ها..... 72

شکل 5-1: مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو..... 76

شکل 5-2 : نمایش روش آزمایش و به دست آوردن نمودار مشخصه کمک فنر [29]..... 78

شکل 5-3 : نمودار مشخصه یک کمک فنر[30]..... 78

شکل 5-4 : مدل عملگر الکتروهیدرولیکی[31]..... 79

شکل 5-5 :مشخصه فنر استفاده شده در شبیه سازی ها..... 83

شکل 5-6 : جابجایی بدنه با کنترل کننده لغزشی..... 91

شکل 5-7 : تغییر فاصله میان جرم معلق و نامعلق در دو حالت سیستم کنترل شده و کنترل نشده..... 91

شکل 5-8 : نیروی خروجی عملگر در کنترل مد لغزشی..... 92

شکل 5-9 : ورودی عملگر (سیگنال کنترل) در کنترل مد لغزشی. 92
شکل 5-10 : جابجایی بدنه با کنترل کننده مد لغزشی ترمینال. 97
شکل 5-11 : تغییر فاصله میان جرم معلق و نامعلق در دو حالت سیستم کنترل شده با مد لغزشی ترمینال و کنترل نشده. 97
شکل 5-12 : خروجی عملگر هنگام عبور خودرو از سطح پله با کنترل کننده مد لغزشی ترمینال. 98
شکل 5-13 : ورودی عملگر (سیگنال کنترل) در کنترل مد لغزشی ترمینال. 98
شکل 5-14 : توابع تعلق نرمال متغیرهای ورودی l و dl 101
شکل 5-15 : توابع تعلق متغیر خروجی u_{fuzzy} 102
شکل 5-16 : نمای ورودی- خروجی سطح فازی. 102
شکل 5-17 : سیستم فازی جایگزین تابع علامت. 102
شکل 5-18 : خروجی عملگر در روش مد لغزشی ترمینال فازی. 103
شکل 5-19 : مقایسه جابجایی بدنه خودرو با دو روش کنترل SMC و FTSMC 104
شکل 5-20: مقایسه تغییر فاصله بین جرم معلق و نامعلق خودرو با دو روش کنترل SMC و FTSMC 104
شکل 5-21 : شماتیک شبیه سازی با استفاده از نرم افزار سیمولینک 106

فهرست جدول ها

جدول 4-1 : قوانین فازی بین ورودی و خروجی..... 69
جدول 4-2 : قوانین فازی تک بعدی برای سیستم دو ورودی..... 71
جدول 5-1 :مقادیر نامی پارامترهای مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو..... 83
جدول 5-2 : عدم قطعیت در مقادیر پارامترهای سیستم تعلیق..... 83
جدول 5-3 : پارامترهای تحریک کننده(Actuator)..... 84
جدول 5-4: جدول قوانین کنترل کننده فازی..... 100

فصل اول

مقدمه

فصل 1- مقدمه

1-1- پیش گفتار

طراحی خودرو دانشی آمیخته از هنر و مهندسی است که طراح بایستی بخش های گوناگون خودرو را با نگرش های متفاوتی بنگرد. خودرو های امروزی، از کنار هم قرار گرفتن بخش هایی تشکیل شده اند که هر یک توسط چندین گروه متشکل از مهندسین و دانش آموختگان رشته های مختلف طراحی شده اند. پیچیدگی طراحی خودرو سبب شده است تا برای کار تخصصی بر روی آن، مجبور به تفکیک و زیربخش سازی آن به قسمت های متفاوت شویم.

یکی از زیربخش های تخصصی خودرو، سیستم تعلیق آن است. سیستم تعلیق مناسب سبب می شود تا سرنشینان در خودرو احساس راحتی کنند و فرمان پذیری و کنترل خودرو بسیار بهتر شود. دست اندازها و ناهمواری سطح جاده سبب لرزش خودرو می شوند. هنگامی که لرزش و حرکات عمودی نامطلوب از سطح جاده کمتر به بدنه انتقال پیدا کند، علاوه بر خوش سواری، موجب محافظت از بخش های مختلف خودرو و سر وصدای کمتر قطعات خواهد شد. بنابراین لزوم مطالعه و پژوهش در زمینه بهتر کردن طراحی و کنترل سیستم تعلیق خودرو کاملاً مشخص است.

1-2- تاریخچه تحقیق بر روی سیستم تعلیق

در قرن 16 تلاش هایی در جهت حل مشکل انتقال بد همهٔ نیرو از دست انداز به گاری و واگن ها انجام گردید. آنها توسط چهار کیسه چرمی پر از باد که به چهار ستون شاسی متصل بودند، بدنهٔ گاری را (که شبیه به یک میز وارونه بود) معلق نمودند. و چون بدنهٔ گاری از شاسی معلق بود، از آن پس به عنوان سیستم تعلیق شناخته شد. این اصطلاحی است که امروزه نیز به انواع راه حل های این مشکل اطلاق می شود.

هدف از طراحی سیستم های تعلیق غیر فعال، نیل به دو هدف اصلی خوش سواری و فرمان پذیری بهتر است. مشکل این است که این دو مقصود با هم در تضاد هستند و هنگام طراحی بایستی بین آنها یک تعامل برقرار گردد. سیستم تعلیق غیر فعال قادر نیست که با شرایط متفاوت جاده، تطابق زیادی پیدا کند. امروزه برای بهبود فرمان پذیری و کارآیی بهتر، به جای روش مرسوم استاتیکی فنر و ضربه گیر، استفاده از سیستم های نیمه فعال و فعال در حال افزایش است[1].

از آنجا که پیشرفت مناسب سیستم های تعلیق فعال و نیمه فعال، توانایی سواری راحت و قابلیت مانور دادن را بهبود می بخشد، تحقیق در این زمینه برای سالیان متمادی می تواند اثربخش باقی بماند [2].

3-1- پژوهش های انجام شده بر روی مدل سازی سیستم تعلیق

تحقیقات بسیار و مقالات زیادی در مورد سیستم های تعلیق خودرو ارائه شده است. در بسیاری از بررسی ها از پارامترهای غیرخطی تعلیق خودرو صرف نظر شده است مدل خطی آن در نظر گرفته شده است. اما مدل دینامیکی سیستم تعلیق به شدت غیرخطی است. حرکت پیچشی جرم فنر و حرکت چرخشی بازوی کنترل قسمت هایی هستند که اغلب در تقریب خطی نادیده گرفته می شوند[3].

در بسیاری از تحقیقات در مورد سیستم های تعلیق کنا و نیمه کنا، از دینامیک عملگر چشم پوشی می شود و دینامیک تعلیق، از خروجی عملگر مورد بررسی قرار می گیرد در حالی که عملگر دارای دینامیک غیرخطی شدیدی بوده و همانند یک تقویت کننده[1] خطی مدل نمی شود.

[1] Gain

پاسخ دینامیکی خودرو را می توان در سه حالت کارکرد(واکنش طولی)، سواری(واکنش لرزشی) و فرمان پذیری(واکنش سمتی) خلاصه نمود. محققین، سیستم های تعلیق را معمولاً به سه صورت مدل می کنند و سپس طراحی های خود را بر آن اساس انجام می دهند. *مدل کامل*[1]، که شامل چهار چرخ خودرو می شود و در این مدل، حرکات عمودی، طولی، کناری، غلت زنی[2]، کله زنی[3] ، چرخ زنی[4] و ... می تواند بررسی شود. *مدل نیمه*[5]، که قابلیت بررسی حرکت های عمودی و کله زنی و ... را دارد.

مدل یک چهارم[6]، که ساده ترین مدل برای مطالعه درباره حرکات عمودی خودرو است. در مدل یک چهارم، تنها یکی از چرخ ها به صورت مستقل بررسی می شود.

در این مدل، یک چهارم جرم خودرو به عنوان جرم معلق درنظر گرفته می شود و چرخ و فنر و کمک فنر به عنوان جرم نامعلق فرض می شود.

در اکثر پژوهش ها، فنر و کمک فنر را دارای دینامیک خطی فرض می کنند و از غیرخطی بودن آنها چشم پوشی می کنند، حال آنکه اندازه هر دوی این موارد به صورت غیرخطی به سرعت حرکت عمودی خودرو بستگی دارند.

خطی سازی مدل سیستم تعلیق سبب می شود تا در عمل با بسیاری از رفتارهای پیش بینی نشده روبرو شویم که کنترل کننده خطی قادر به ارائه پاسخ مطلوب نخواهد بود.

---

[1] Full Suspension Model

[2] Roll

[3] Pitch

[4] Yaw

[5] Half Suspension Model

[6] Quarter Suspension Model

4-1- پژوهش های انجام شده با روش های کنترلی متفاوت

روش های کنترلی مختلف برای سیستم تعلیق وسایل نقلیه در 4 دههٔ گذشته، هم به صورت علمی و هم در صنعت خودروسازی جهانی مورد توجه بوده است. سیستم تعلیق وظیفه نگه داشتن در سطح جاده و ایزوله نمودن بدنه وسیله نقلیه را از اختلالات جاده بر عهده دارد.

در سال های اخیر، پژوهش ها بیشتر به سوی استفاده از انواع کنترل کننده های هوشمند و مقاوم سوق پیدا کرده است. وجود نویز، اغتشاش، دینامیک های مدل نشده و تغییرات پارامترها در طول کار سیستم، باعث می شود تا در عمل، استفاده از کنترل کننده های سنتی، دچار مشکل شود. روش های کنترلی پیشرفته ای همچون کنترل فازی، کنترل تطبیقی، کنترل مقاوم، کنترل لغزشی و ... ، امروزه به خدمت گرفته می شوند تا بر مسائل پیش بینی نشده در سیستم، تا حد زیادی به طور خودکار غلبه کنند. تنها بایستی حداکثر میزان خطا را برآورد کرد تا عملکرد این قبیل کنترل کننده ها بهبود یابد.

وجود برخی نقایص در کنترل کننده های ذکر شده، سبب شده است تا پژوهشگران و دانشجویان، به ترکیب انواع این روش ها روی آورند تا عملکرد کنترل کننده را بهبود بخشند.

کنترل فازی دارای یک ساختار غیرخطی خاص می باشد که برای کنترل سیستم های مختلف مشابه است. مزیت استفاده از کنترل فازی در سیستم تعلیق خودرو اینست که قادر است تا دانش کارشناسی در مورد دینامیک های سیستمی و استراتژی های کنترل و اطلاعات افراد خبره را در خود جای دهد[4]، اما دیگر کنترل کننده ها این خاصیت را ندارند و این ویژگی فازی باعث علاقه پژوهشگران در به کارگیری آن در کنترل کننده های ترکیبی می شود. مشکل اصلی کنترل کننده های فازی این است که در برخی از موارد که مرتبه سیستم بالاست، ناچاریم از تعداد بسیاری قوانین فازی استفاده کنیم که این سبب می شود پردازش اطلاعات مشکل شود و با محاسبات زیاد، سرعت کنترل کننده کم شود.

کنترل کننده های تطبیقی اگر چه قادرند در طول عمل کنترل، خود را با شرایط متغیر وفق دهند، اما برای استفاده از آنها بایستی حتماً اطلاعات خاصی همچون مرتبه سیستم و ... را در اختیار داشته باشیم. بنابراین دینامیک های مدل نشده، ممکن است در عملکرد کنترل کننده اختلال ایجاد نماید. همچنین مدت زمانی صرف یادگیری سیستم تطبیقی خواهد شد که در این فاصله سیستم پاسخ نامناسبی خواهد داشت. با این وجود کنترل کننده های تطبیقی و فازی تطبیقی مناسبی برای سیستم های تعلیق پیشنهاد شده اند[5] و [6].

کنترل مد لغزشی، یکی از روش های کنترلی غیرخطی است که نسبت به دینامیک های مدل نشده مقاوم است. تاکنون مقالات زیادی با به کارگیری از این روش کنترلی به طور مستقل یا در ترکیب با روش های کنترلی دیگر در زمینه سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است [7] ، [8] و[9].

از روش های کنترلی دیگر همچون شبکه عصبی، روش H_∞ ، کنترل بهینه، کنترل نیرو و ترکیب آنها نیز در زمینه سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است.

برای سیستم تعلیق خودرو تاکنون روش مد لغزشی ترمینال فازی به کار گرفته نشده است. در این رساله از روش کنترل مد لغزشی ترمینال برای کنترل مدل یک چهارم سیستم تعلیق خودرو استفاده شده است. سیستم شبیه سازی دارای یک کمک فنر غیر خطی است و دینامیک غیرخطی عملگر نیز در معادلات خودرو وارد شده است. در ادامه تحقیق و محاسبات مربوط به این روش کنترلی خواهد آمد.

1-5- معرفی بخش های رساله

در این رساله، در راستای بهبود عملکرد سیستم تعلیق خودرو، در فصل دوم، به بیان نقش سیستم تعلیق و کارکرد آن می پردازیم. زیر مجموعه های سیستم تعلیق بیان می شوند و با برخی اصطلاحات تخصصی در این زمینه آشنا خواهیم شد.

فصل سوم به بیان مقدمات و تا حدودی جزئیات روش کنترل مد لغزشی و مد لغزشی غیرخطی که موسوم به ترمینال است می پردازیم و نتایج برخی روش های جدید در این مبحث آورده می شود.

در فصل چهارم مقدماتی در مورد نظریه فازی تشریح می شود و سپس بعضی از روش های استفاده از کنترل فازی در بهبود عملکرد کنترل لغزشی ترمینال توضیح داده خواهد شد.

در فصل پنجم، از اطلاعات فصول قبلی استفاده می کنیم و به طراحی و شبیه سازی کنترل کننده مد لغزشی و مد لغزشی ترمینال برای سیستم تعلیق خودرو می پردازیم. سپس از ایده مطرح شده در فصل پنجم استفاده کرده و کنترل کننده مد لغزشی ترمینال فازی را معرفی می نماییم. در انتهای این فصل، نتایج کنترل کننده جدید را با کنترل کننده مد لغزشی عادی مقایسه خواهیم کرد.

در فصل آخر نتیجه گیری و پیشنهاداتی درباره استفاده از مد لغزشی ترمینال فازی در سیستم تعلیق خودرو ارائه خواهد شد.

فصل دوم

سیستم تعلیق خودرو