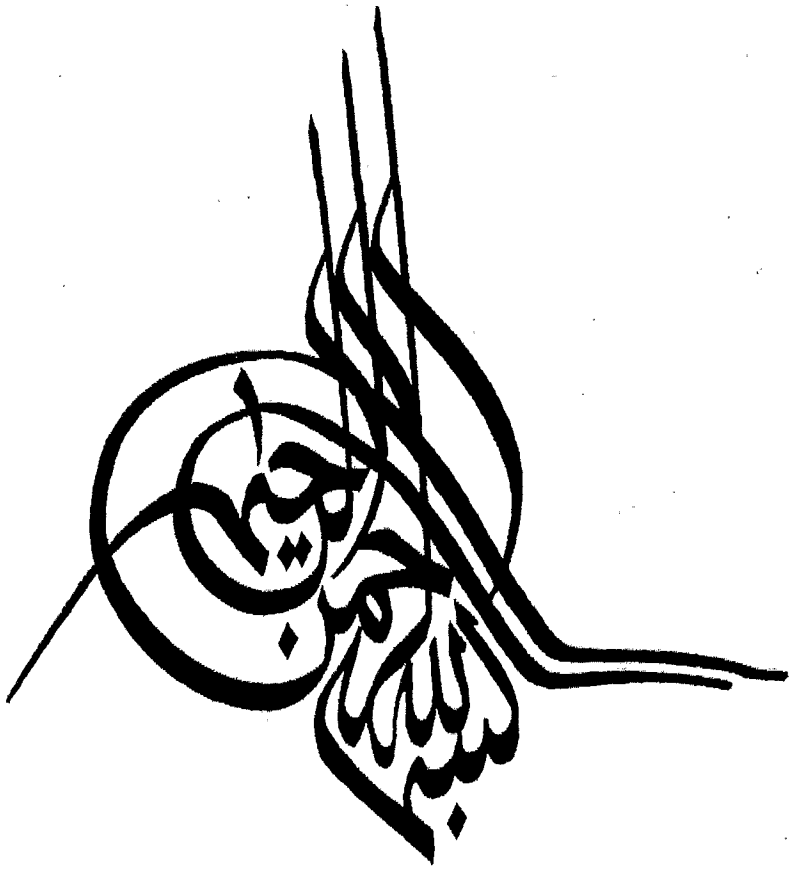

٩٢٨٩٦

دانشگاه شیراز

دانشکده مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک

(گرایش طراحی کاربردی)

آنالیز و بهینه‌سازی سیستم های تعلیق و ترمز MR به کمک الگوریتم ژنتیک

توسط

محمد واحدی

۱۳۸۷ /۳/ ۷

استاد راهنما:

دکتر فرهنگ دانشمند

شهریور ماه ۱۳۸۶

۴۲۸۹۶

به نام خدا

آنالیز و بهینه‌سازی سیستم های تعلیق و ترمز MR به کمک الگوریتم ژنتیک

به وسیله‌ی:

محمد واحدی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی

از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

مهندسی مکانیک

از دانشگاه شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: عالی

دکتر فرهنگ دانشمند، استادیار بخش مهندسی مکانیک (رئیس کمیته).....

دکتر محمد اقتصاد، دانشیار بخش مهندسی مکانیک.....

دکتر محمد حسین پایدار، استادیار بخش مهندسی مواد و متالورژی.....

شهریورماه ۱۳۸۶

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

سپاسگذاری

سپاس بی‌کران پروردگار آسمان و زمین را، که مرا مورد لطف خویش قرار داد تا نگارش این پایان‌نامه را به اتمام رسانم.

حال وظیفه خود می‌دانم مراتب تشکر و قدردانی خود را از اشخاص زیر اعلام نمایم:

جناب آقای دکترفرهنگ دانشمند، او برای من هم استاد و هم دوست من بود. محبت و صداقت ایشان را هیچگاه فراموش نخواهم کرد، چرا که به من درس انسانیت آموخت و بی‌شک بدون راهنماییهایش این پایان نامه به ثمر نمی‌نشست.

جناب آقای دکتر محمد اقتصاد، که در انجام این پایان نامه راهنماییهای ایشان کمک بسیاری به من داشت.

جناب آقای دکتر مجتبی محزون، که الگوی بی‌نظیری برای خدمت خالصانه، در زندگی‌ام است.

اساتید بخش مکانیک، که شاگردی آنها، افتخار من است.

پدر و مادر عزیزم، که در راه پیشرفت من از هیچ کمکی مضایقه نکردند.

همچنین از **وزارت صنایع و معادن** که از این پایان نامه حمایت نموده‌اند تقدیر و تشکر می‌گردد.

چکیده

آنالیز و بهینه‌سازی سیستم های تعلیق و ترمز MR به کمک الگوریتم ژنتیک

بوسیله‌ی

محمد واحدی

سیالات MR موادی هستند که با تغییر خواص سیال، پاسخ شگرفی به اعمال میدان مغناطیسی از خود نشان می‌دهند. سیال MR معمولی از ذرات ریز پودر آهن که در روغن سیلیکونی تشکیل است که به دلیل اهمیت تغییر خواص سیال در اثر اعمال میدان مغناطیسی در بیشتر سازه‌ها و ابزارهای هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تحقیق شامل دو مبحث است:

الف) دمپرهای MR : این دمپرها ابزارهای جدیدی برای کاهش ارتعاشات هستند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی خواص اساسی سیال از مدل ساده بینگهام و معادله ساختاری هرشل-بالکلی استفاده می‌شود. سپس مدل اجزا محدود با استفاده از خواص غیرخطی مواد بسط می‌یابد و آنالیز مدار مورد استفاده قرار می‌گیرد تا با استفاده از آن چگالی شدت میدان مغناطیسی در حجم سیال فعال محاسبه شود که این نتایج در ادامه مورد استفاده آنالیزها قرار می‌گیرد. سپس از مدل جریان سیال بین صفحات موازی برای محاسبه‌ی نیروی میرایی دمپرهای MR استفاده می‌شود. بعد از گسترش مدل المان محدود که رفتار این دمپرها را بیان می‌کند، روش بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به بهترین طراحی توسعه می‌یابد. سپس کنترلر بهینه در مدل چهار درجه آزادی اتومبیل که تحت تاثیر ورودیهای ضربه و شوک قرار گرفته، مورد استفاده واقع می‌شود.

ب) ترمزهای MR: این ترمزها ابزارهایی هستند که در آنها عامل ایجاد گشتاور برشی، تنش برشی سیال MR است. در این تحقیق روش طراحی ترمزهای استوانه‌ای MR ارائه می‌شود و در ادامه روابط گشتاور انتقال یافته، توسط ترمز برای طراحی ترمزها استخراج می‌شود. سپس مدل اجزا محدود برای محاسبه چگالی شدت میدان مغناطیسی ارائه می‌شود و بر اساس مدل المان محدود، با تقریبهای بیان شده، محاسبات مربوط به گشتاور ترمز و توان ترمز انجام می‌پذیرد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- تاریخچه ۳
۱-۳- هدف تحقیق ۶
۲- ویژگیهای سیالات MR و ER ۸
۲-۱- مقدمه ۸
۲-۲- سیال MR ۹
۲-۳- ویژگی‌های سیال ER ۱۵
۲-۳-۱- مقدمه ۱۵
۲-۴- مدل‌های ارائه شده برای خواص سیال غیر نیوتونی MR ۱۷
۲-۵- ابزارهای MR ۱۷
۳- مدل شبه استاتیک دمپرها و ترمزهای MR ۱۹
۳-۱- مقدمه ۱۹
۳-۲- دمپرهای MR ۱۹
۳-۲-۱- مقدمه ۱۹
۳-۲-۲- جریان سیال MR درون محفظه حلقوی ۲۰
۳-۲-۲-۱-مدلسازی بر اساس مدل هرشل- بالکلی ۲۱
۳-۲-۲-۲- مدلسازی سیال بر اساس مدل ویسکو پلاستیک بینگهام ۲۴
۳-۲-۳- جریان سیال MR بین صفحات موازی ۲۵
۳-۲-۳-۱-مدلسازی بر اساس مدل هرشل- بالکلی ۲۷
۳-۲-۳-۲- مدلسازی سیال بر اساس مدل ویسکو پلاستیک بینگهام ۲۷
۳-۲-۴- محدوده دینامیکی و نیروی کنترل‌پذیر ۲۸
۳-۳- ترمزهای MR ۲۹
۳-۳-۱- مقدمه ۲۹
۳-۳-۲- استخراج روابط گشتاور ترمز ۳۰
۴- مدلهای ارتعاشاتی سیستمهای تعلیق ۳۲
۴-۱- مقدمه ۳۲
۴-۲- سیستمهای یک درجه آزادی ۳۲

۴-۲-۱-تحریک سیستم تعلیق در اثر حرکت تکیه‌گاه ۳۲
۴-۲-۲-ماکزیمم نیروی انتقالی ۳۶
۴-۲-۳- دامنه نوسانات سیستم تعلیق ۳۸
۴-۳- مدل دو درجه آزادی سیستم تعلیق ۳۹
۴-۳-۱- مقدمه ۳۹
۴-۳-۲- مدل غیر فعال دو درجه آزادی سیستم تعلیق ۴۰
۴-۳-۳- مدل نیمه فعال یک چهارم دو درجه آزادی سیستم تعلیق ۴۲
۵- مدلسازی المان محدود دمپر و ترمز ۴۵
۵-۱- مقدمه ۴۵
۵-۲- طراحی مدار مغناطیسی ۴۵
۵-۳- فرمول بندی المان محدود مسئله ۴۷
۵-۳-۱- بردار پتانسیل مغناطیسی ۴۹
۵-۳-۲- استخراج ماتریسهای تحیلی الکترومغناطیس ۴۹
۵-۴- مدلسازی مسئله در محیط ANSYS ۵۲
۵-۵- نتایج مدلسازی دمپر ۵۳
۵-۵-۱- نتایج مدلسازی المان محدود دمپر ۵۳
۵-۵-۱-۱- تاثیر جریان الکتریکی بر تنش برشی سیال ۵۴
۵-۵-۱-۲- تاثیر تعداد دور سیم پیچ بر تنش برشی سیال ۶۱
۵-۶- نتایج مدلسازی ترمز ۶۵
۵-۶-۱- مقدمه ۶۵
۵-۶-۲- تاثیر جریان الکتریکی بر تنش برشی سیال ۶۷
۵-۶-۳- تاثیر تعداد دور سیم پیچ بر تنش برشی سیال ۶۹
۶- بهینه سازی دمپر MR به کمک الگوریتم ژنتیک ۷۲
۶-۱- مقدمه ۷۲
۶-۲- الگوریتم ژنتیک ۷۲
۶-۳- نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک ۷۳
۶-۳-۱- کدگذاری ۷۳
۶-۳-۲- تشکیل جمعیت اولیه ۷۴
۶-۳-۳- تولید مجدد ۷۴
۶-۳-۴- تقاطع ۷۵
۶-۳-۵- جهش ۷۷
۶-۳-۶- قیود و محدودیتها ۷۸
۶-۴- فرمول‌بندی مسئله طراحی مقید ۷۹
۶-۴-۱- معرفی تابع هدف ۷۹
۶-۴-۲- قیود مسئله ۸۰
۷- بهینه سازی پاسخ سیستم تعلیق اتومبیل ۸۳
۷-۱- مقدمه ۸۳

۷-۲- مدل ارتعاشی اتومبیل ۸۳
۷-۳- تعریف مدل ارتعاشی در فضای حالت ۸۷
۷-۴-کنترل بهینه ۸۸
۷-۵- مدلسازی سیستم تعلیق نیمه فعال ۹۰
۷-۶- طراحی کنترل بهینه ۹۲
۷-۷- نتایج مدل ارتعاشات اتومبیل ۹۵
۷-۷-۱- پارامترهای مدل ارتعاشاتی ۹۵
۷-۷-۲- پاسخ مدل سیستم تعلیق به ورودی پله ۹۵
۷-۷-۲- پاسخ مدل سیستم تعلیق به ورودی ضربه ۹۸
۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۲
۸-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۲
۸-۲- پیشنهادات ۱۰۳
منابع و مراجع ۱۰۴

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول۲-۱) خواص اصلی سه نمونه سیال MR متداول در بازار ۱۳
جدول۲-۲) مقایسه خواص سیال MR و ER ۱۶
جدول ۴-۱) حالتهای مختلف دمپرMR ۴۴
جدول ۵-۱) ابعاد دمپر ۵۳
جدول ۵-۲) تنش برشی سیال برای جریانهای الکتریکی اعمالی در دمپر ۵۷
جدول ۵-۳ تاثیر تغییرات تعداد دور سیم‌پیچ بر روی تنش برشی سیال ۶۲
جدول ۵-۴) پارامترهای ترمز مدلسازی ۶۶
جدول ۵-۵ تنش برشی سیال برای جریانهای الکتریکی اعمالی در مدل ترمز ۶۷
جدول ۵-۶) تاثیر تغییرات تعداد دور سیم‌پیچ روی تنش برشی سیال در مدل ترمز ۶۹
جدول ۷-۱) پارامترهای مدل اتومبیل ۹۵

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱) برگشت سیال از حالت نیمه جامد به حالت روان ۸
الف) در حالت عدم وجود میدان مغناطیسی، ب) در حالت وجود میدان مغناطیسی
شکل ۲-۲) قبل و بعد از اعمال میدان مغناطیسی MR سیال ۹
شکل ۲-۳) ریز ساختار سیال MR با ۳۰ در صد حجم پودر آهن در زمینه ۱۰
روغن سیلیکون در حالت فاقد میدان مغناطیسی. بزرگنمایی ۲۰۰۰
شکل ۲-۴) ریز ساختار سیال MR با ذرات همراستا شده در اثر میدان مغناطیسی ۱۱
با ۳۰ در صد حجم پودر آهن در زمینه روغن سیلیکون. بزرگنمایی ۱۱۰۰
شکل ۲-۵) شبیه سازی دینامیکی سیال با ٪۱۰ حجمی ذرات معلق ۱۲
شکل ۲-۶) شبیه سازی دینامیکی سیال با ٪۲۰ حجمی ذرات معلق ۱۲
شکل ۲-۷) شبیه سازی دینامیکی سیال با ٪۳۰ حجمی ذرات معلق ۱۳
شکل ۲-۸) خواص سیال MRF-132LDF با زمینه روغن الف) ویسکوزیته سیال بر حسب ۱۴
نرخ کرنش برشی، ب) میدان مغناطیسی القاء شده، پ) تنش برشی ناشی از میدان مغناطیسی
شکل ۲-۹) مقایسه مدل بینگهام و مدل هرشل- بالکلی ۱۸
شکل ۲-۱۰) حالات مختلف ابزار MR ۱۸
الف) حالت شیر، ب) حالت برش مستقیم، پ) حالت له شدگی
شکل ۳-۱) نمودار تنش برشی و سرعت سیال در محفظه حلقوی ۲۱
شکل ۳-۲ دیاگرام آزاد سیال در محفظه‌ی حلقوی ۲۳
شکل ۳-۳) جریان سیال بین صفحات موازی ۲۶
شکل ۳-۴) دیاگرام آزاد تنش برشی و پروفیل سرعت سیال بین دو صفحه‌ی موازی ۲۶
شکل ۳- ۵) اجزای ترمز MR ۳۰
شکل ۳-۶) پارامترهای گشتاورترمز ۳۱
شکل ۴-۱) مدل یک درجه آزادی حرکت اتومبیل بر روی جاده ۳۳
شکل ۴-۲) پارامتر انتقال پذیری بر حسب نسبت فرکانسی ۳۵۵
شکل ۴-۳) پارامتر ρ بر حسب نسبت فرکانسی ۳۷
شکل ۴-۴) پارامتر دامنه نوسان بر حسب نسبت فرکانسی ۳۸
شکل ۴-۵) شماتیک یک چهارم خودرو ۴۰

شکل ۴-۶) مدل دو درجه آزادی یک چهارم خودرو ۴۱
شکل ۴-۷) دامنه نیروی قابل کنترل دمپر ۴۲
شکل ۴-۸) مدل دو درجه آزادی خودرو با سیستم تعلیق نیمه فعال ۴۳
شکل ۵-۱) (الف) اجزای مدار مغناطیسی ۴۶
(ب) سطح مقطع موثر و سطح مقطع قطب مغناطیسی
شکل ۵-۲) المان دو بعدی *PLANE*13 ..... ۵۲
شکل ۵-۳) ابعاد دمپر مدلسازی شده ۵۳
شکل ۵-۴) شدت میدان مغناطیسی (H) در مدل دمپر ۵۴
شکل ۵-۵) چگالی شدت میدان مغناطیسی (B) در مدل دمپر ۵۴
شکل ۵-۶) (الف) تاثیر جریان روی چگالی شدت میدان مغناطیسی (B) در سیال هوشمند ۵۵
اعمال جریان ۱- ۰ آمپر
شکل ۵-۶) (ب) تاثیر جریان روی چگالی شدت میدان مغناطیسی (B) در سیال هوشمند ۵۶
اعمال جریان ۲- ۱/۲۵ آمپر
شکل ۵-۷) تنش برشی سیال برای جریانهای الکتریکی مختلف ۵۷
شکل ۵-۸) نمودار نیرو بر حسب سرعت دمپر ۵۸
شکل ۵-۹) نمودار نیرو بر حسب تغییر مکان پستون دمپر ۵۹
شکل ۵-۱۰) میرایی معادل دمپر MR برای جریانهای مختلف ۶۰
شکل ۵-۱۱) ضریب نسبت میرایی ۶۱
شکل ۵-۱۲) تاثیر تغییر تعداد دور سیم‌پیچ بر روی تنش برشی سیال ۶۲
شکل ۵-۱۳) تاثیر تغییرات تعداد سیم‌پیچ روی نمودار نیرو-سرعت دمپر ۶۳
شکل ۵-۱۴) تاثیر تغییرات تعداد سیم‌پیچ روی نمودار نیرو-جابجایی پیستون ۶۳
شکل ۵-۱۵) تاثیر تعداد دور سیم‌پیچ روی میرایی معادل دمپر MR ۶۴
شکل ۵-۱۶) تاثیر تعداد دور سیم‌پیچ بر روی ضریب نسبت میرایی ۶۵
شکل ۵-۱۷) پارامترهای ترمز مدلسازی شده ۶۶
شکل ۵-۱۸) شدت میدان مغناطیسی (B) در مدل ترمز ۶۶
شکل ۵-۱۹) چگالی شدت میدان مغناطیسی (B) در مدل ترمز ۶۷
شکل ۵-۲۰) تنش برشی سیال برای جریانهای الکتریکی مختلف اعمال شده به ترمز ۶۸
شکل ۵-۲۱) تاثیر تغییر جریان روی گشتاور ترمز نسبت به سرعت دورانی شفت ۶۸
شکل ۵-۲۲) تاثیر تغییر جریان روی توان ترمز نسبت به سرعت دورانی شفت ۶۹
شکل ۵-۲۳) تاثیر تغییر تعداد دور سیم‌پیچ بر روی تنش برشی سیال در مدل ترمز ۷۰
شکل ۵-۲۴) تاثیر تغییر دور سیم‌پیچ روی گشتاور ترمز نسبت به سرعت دورانی شفت ۷۱
شکل ۵-۲۵) تاثیر تغییر تعداد دور سیم‌پیچ روی توان ترمز نسبت به سرعت دورانی شفت ۷۱
شکل ۶-۱) تقاطع یک نقطه‌ای ۷۶
شکل ۶-۲) تقاطع دو نقطه‌ای ۷۶
شکل ۶-۳) تقاطع پراکنده ۷۷
شکل ۶-۴) انواع مختلف تولد فرزندان در نسل بعد ۷۸
شکل ۶-۵) تغییرات تابع هدف با افزایش نسل ۸۱

شکل ۶-۶) تغییرات تابع هدف با افزایش نسل ۸۲
شکل ۷-۱) مدل ارتعاشی اتومبیل ۸۴
شکل ۷-۲) نمایش سیستم به صورت ورودی-خروجی ۸۷
شکل ۷-۳) سیستم کنترل بهینه ۸۹
شکل ۷-۴) جابجایی جرم فنربندی نشده جلو به ورودی پله ۹۶
شکل ۷-۵) جابجایی مرکز جرم فنربندی شده به ورودی پله ۹۷
شکل ۷-۶) تغییرات سرعت مرکز جرم سیستم‌تعلیق ۹۷
شکل ۷-۷) تغییرات شتاب مرکز جرم سیستم تعلیق ۹۸
شکل ۷-۸) جابجایی جرم فنربندی نشده جلو به ورودی ضربه ۹۹
شکل ۷-۹) جابجایی مرکز جرم فنربندی شده به ورودی ضربه ۱۰۰
شکل ۷-۱۰) تغییرات سرعت مرکز جرم سیستم‌تعلیق به ورودی ضربه ۱۰۰
شکل ۷-۱۱) تغییرات شتاب مرکز جرم سیستم تعلیق برای ورودی ضربه ۱۰۱

۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

یکی از صنایع پیشرفته و رو به گسترش در کشورهای دنیا صنعت خودروسازی می‌باشد. در جوامع امروزی خودرو به عنوان یکی از وسایل ضروری و جدا نشدنی در آمده و برای هر خانواده جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است.

در کشورهای پیشرفته دنیا این صنعت از جمله صنایع مادر به شمار می‌رود و سالیانه سود هنگفتی را نصیب صاحبان صنایع مربوطه می‌نماید. در کشور ما نیز این صنعت گرچه دیر زمانی است فعالیت خود را آغاز کرده است اما برای رسیدن به کشورهای صنعتی راهی بس طولانی را پیش رو دارد.

کاهش ارتعاشات، افزایش ضریب اطمینان و آسایش بیشتر سرنشینان اتومبیل اخیرا توجه بسیاری به خود جلب کرده است. امروزه سیستمهای تعلیق و ترمز پیشرفت شایانی نسبت به گذشته یافته است. با پیشرفت‌های اخیر در زمینه خودرو و افزایش اهمیت فاکتور راحتی انسان، سیستم‌های ترمز ضد قفل و سیستم‌های تعلیق کنترل پذیر وارد بازار شده‌اند و با ورود خود گوی سبقت را از موارد پیشین ربودند.

هدف از طراحی سیستم تعلیق برای یک خودرو کنترل انتقال نوسانات حاصل از ناهمواریهای جاده به سرنشینان است. عناصر انتخابی برای یک سیستم تعلیق بایستی علاوه بر ایجاد راحتی برای سرنشینان، رانندگی مطمئن و کنترل خوب خودرو را در پی داشته باشد. به عبارت دیگر یک سیستم باید بتواند راحتی و ایمنی سفر را تامین کند.

در این راستا ابتدا سیستم‌های تعلیق غیرفعال[1] به عنوان ساده‌ترین نوع، مورد استفاده قرار گرفتند. در این نوع سیستم تعلیق، پارامترهای سختی و میرایی مقادیر ثابت و معینی بوده که با انتخاب بهینه این پارامترها می‌توان در یک محدوده کاری خاص، بهترین پاسخ ارتعاشی داده شود ولی با تغییر این پارامترها سیستم از حالت بهینه خود خارج شده و دیگر نمی‌تواند پاسخ مناسبی ارائه نماید. بنابراین این گونه سیستم‌ها علیرغم سادگی، به دلیل محدود بودن دامنه‌ی

[1] Passive

فرکانسی که این سیستم‌ها در آن کار می‌کنند مشکلاتی را با خود به همراه دارند. لذا سیستم‌های تعلیق فعال[1] وارد بازار شده و مشکل کار در دامنه‌ی فرکانسی محدود را برطرف کرده‌اند. در این نوع سیستم تعلیق، تعدادی جک سرو هیدرولیک و یا سرو پنوماتیک به صورت موازی با فنر و میراکننده‌ی سیستم قرار دارند. در این حالت ارتعاشات خودرو با استفاده از سنسورهای مناسب، اندازه گیری شده و به سیستم کنترلی وارد می‌شود. این سیستم کنترلی پس از پردازش اطلاعات ورودی، پالسهای کنترلی مناسبی را جهت ورود به شیرهای هیدرولیکی یا پنوماتیکی می‌فرستد و بدین ترتیب نیروی اعمالی این جکها تحت کنترل در می‌آید تا بدین وسیله، کنترل مناسبی بر روی وضعیت ارتعاشی خودرو صورت گیرد. اما پیچیدگی این سیستم‌ها، میزان مصرف انرژی و بالا بودن هزینه‌ی آن، که در صنایع خودروسازی فاکتور بسیارمهمی است، محدودیتهایی بر میزان مصرف این نوع سیستم تعلیق فعال در صنایع خودرو سازی گذاشته است.

برای غلبه بر این مشکلات، سیستم‌های تعلیق نیمه فعال[2] پیشنهاد شدند که در دامنه‌ی فرکانسی بالایی کار می‌کردند و مشکل مصرف انرژی بالا را نیز حل کردند. در این راستا ابتدا سیال ER[3] به عنوان یک ماده هوشمند در سیستم تعلیق نیمه‌فعال، وارد بازار شد. این سیال با چگالی ۲ -۱ گرم بر سانتیمترمکعب ولتاژی در حدود ۵-۲ کیلو ولت و جریانی حدود ۱۰-۱ میلی آمپر نیاز دارد و در صورت اعمال میدان، تنش برشی ۵-۲ کیلو پاسکال در آن ایجاد می‌شود. این سیستم هوشمند نیز به دلیل ولتاژ بالا چندان مورد استقبال خودرو سازان قرار نگرفت.

سپس سیال MR[4] به عنوان نسل جدید مواد هوشمند در سیستم‌های تعلیق استفاده شد. این سیال ولتاژ ۲۵-۲ ولت و جریان ۲-۱ آمپر نیاز دارد که درصورت اعمال میدان، تنش برشی ۱۰۰-۵۰ کیلو پاسکال در آن ایجاد می‌شود.

همزمان با پیشرفت کاربرد این سیال در سیستم‌های تعلیق، کاربرد این سیال در سیستم ترمز نیز مورد توجه واقع شد. ترمزهای MR ابزاری هستند که گشتاور را بوسیله سیال MR انتقال می‌دهند. هنگامیکه میدان مغناطیسی به سیال اعمال می‌شود ذرات ریز مغناطیسی به صورت زنجیره‌هایی در امتداد میدان تبدیل می‌شوند که مانع حرکت دورانی سیال شده و تنش برشی سیال را افزایش می‌دهند.

بدین ترتیب می‌توان دو حالت برای این سیال در نظرگرفت:

الف) فاقد میدان مغناطیسی[5]:

---

[1] Active
[2] Semi Active
[3] Electrorheological Fluid
[4] Magnetorheological Fluid
[5] Off State

دراین حالت رفتار سیال شبیه سیال نیوتونی است و تنش برشی در آن برابر با حاصلضرب ویسکوزیته سیال در نرخ کرنش است.

ب) اعمال میدان مغناطیسی[1]:

در این حالت سیال رفتاری مشابه مدل بینگهام دارد؛ یعنی تنش برشی سیال مجموع دو بخش نیوتونی و اثر ناشی از میدان مغناطیسی می‌باشد.

به طور کل فواید سیستم‌هایی که با سیال MR کار می‌کنند عبارتند از:

نیروی قابل کنترل در برابر لرزشهای اتومبیل

پاسخ سریع این سیستمها بعد از تحریک (در حدود چند میلی ثانیه)

سادگی سیستم مکانیکی(به دلیل نداشتن قسمت متحرک)

قابلیت کار در دمای بالا (اهمیت این فاکتور در ترمزها بیشتر است)

کم بودن مصرف انرژی

قابلیت اطمینان بالا

مزایای این سیستمها موجب شد که دامنه کاربرد این سیال در صنایع خودروسازی پیشرفت شایانی بیابد.

۱-۲- تاریخچه

از آنجاییکه راحتی سرنشینان یکی از مهمترین معیارها در طراحی سیستم تعلیق است، لذا تحقیقات اولیه پیرامون این موضوع صورت گرفته است. در این خصوص حدود نود سال پیش شخصی به نام روال در انگلستان تحقیقات وسیعی در این خصوص انجام داد. وی در تحقیقات خود فقط از فنر به عنوان المان سیستم تعلیق استفاده کرد و لذا اصطکاک ساختاری در فنر و شاسی و اتصالات به عنوان تنها عامل میرایی محسوب می‌شد. سپس در سال ۱۹۴۱ شیلینگ و فکس از یک رایانه آنالوگ برای بررسی مدل یک درجه آزادی خودرو استفاده کردند. این پژوهشگران با تغییر ضریب میرایی کمک فنرها، سعی در دستیابی به یک مقدار بهینه برای کاهش شتاب عمودی وارد بر سرنشینان داشتند. در سال ۱۹۵۳ مدل ارتعاشی چهار درجه آزادی توسط ریچارد چسکا مورد بررسی قرار گرفت. وی طی آزمایشات مختلف توانست ناهمواریهای سطح جاده را به ثبت رساند. در سالهای ۱۹۷۴ تا ۱۹۸۵ به منظور بهبود راحتی و ایمنی سفر، تحقیقات زیادی بر روی سیستم‌های تعلیق انجام گرفت، که در نتیجه کارایی

---

[1] On State

سیستم‌های تعلیق با جایگزینی سیستم‌های فعال و نیمه فعال به جای سیستم‌های تعلیق غیر فعال بهبود چشمگیری یافته است.

درسالهای اخیر کاربرد سیالMR در دمپرهای هوشمند بسیار مورد توجه واقع شده است. مزایای این دمپرها برای کاربران صنایع مختلفی از جمله ماشینهای سنگین وکامیونها [۱-۲] سیستم روتور هلیکوپتر[۵-۳] و سیستم تعلیق اتومبیل [۶] وغیره به اثبات رسیده است.

تاکنون مدلهای مختلفی برای تشریح رفتار دمپرهای MR به کار رفته، که به طور کل این مدلها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- مدل شبه استاتیکی[1]
- مدل دینامیکی

در زمینه‌ی مدل شبه استاتیک کارهای متنوعی انجام شده است. درسال ۱۹۶۹ فیلیپس یک معادله بدون بعد برای حرکت سیال غیرنیوتنی بینگهام درون محفظه مستطیلی ارائه کرد که افت فشار درون محفظه را از این معادله بدون بعد محاسبه می‌کرد [۷].

گوین و همکارانش در سال ۱۹۹۶ یک تقریب برای حل معادله بدون بعد فیلیپس ارائه کردند و یکسری روابط برای طراحی دمپرهای ER پیشنهاد دادند[۸].

گوین در سال ۱۹۹۶ یک مدل متقارن محوری برای مدل دمپر به کار برد و فرض کرد که تنش برشی سیال درون محفظه حلقوی مقداری ثابت است [۹].

درسال ۱۹۹۸ گردانی نژاد مدل هرشل- بالکلی[2] را برای آنالیز سیال کنترل پذیر درون محفظه‌ی حلقوی به کار برد و معادلات بدون بعد افت فشار را استخراج کرده و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی و نتایج گوین مقایسه کرد[۱۰].

درسال ۲۰۰۱ یانگ و همکارانش یک جواب برای معادله‌ی فیلیپس ارائه کردند که افت فشار بی بعد سیال درون دمپر را به صورت تابعی ازتنش برشی وسرعت سیال بدون بعد بیان می‌کرد[۱۱].

در سال ۲۰۰۵ هونگا و همکارانش حل بی‌بعد دیگری برای معادله‌ی فیلیپس ارائه کردند؛ آنها در تحقیق خود از چهار پارامتر بی بعد شده‌ی عدد بینگهام، محدوده‌ی دینامیکی، نیروی دمپر و پارامترهندسی استفاده نمودند[۱۲].

اگر چه مدل شبه استاتیک به نحو مناسبی رفتار این دمپرها را مدل می‌کرد، اما در مدلسازی رفتار غیر خطی نیرو- سرعت نقایصی را به همراه داشت[۱۱].

برای غلبه بر این مشکل، در سال ۱۹۹۶ گوین یک روش پارامتری ارئه کرد که از چند جمله‌ای‌های متعامد چبیشف برای پیش بینی نیروی کنترل پذیر دمپر، از روی سرعت و جابجایی دمپر استفاده می‌کرد[۱۳].

---

[1] Quasi-Static Model
[2] Herschel-Bulkley

سپس در سال ۱۹۹۸ چانگ و روشکه با استفاده از شبکه‌ی عصبی، رفتار دینامیکی این دمپر را مدل کرد[۱۴].

یکی دیگر از مدلهایی که برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیال به کار می‌رود، مدل هیسترزیس بوس- ون[1] است. در این راستا سال ۱۹۹۷ اسپنسر و همکارانش یک مدل اصلاح شده بوس- ون برای شبیه سازی رفتار دمپرهای MR ارائه کردند. این مدل با دقت مناسبی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دیاگرام نیرو- سرعت و نیرو - جابجایی دمپر را نشان می‌داد[۱۵].

درسال ۲۰۰۰ لی و همکارانش یک مدل غیرخطی ویسکو الاستیک – پلاستیک که رفتار دینامیکی دمپرهای MR را مدل می‌کرد ارائه کردند[۱۶].

درسال ۲۰۰۲ لیائو مدل یک درجه آزادی سیستم تعلیق با استفاده از دمپر MR را به صورت ریاضی و با استفاده از مدل هیسترزیس بوس- ون حل کرد و نتایج خود را با نتایج دمپرهای پیشین مقایسه کرد[۱۷].

سال ۲۰۰۲ یائو و همکارانش کنترل نیمه فعال سیستم تعلیق با استفاده از دمپرهای MR را ارائه کردند. آنها برای مدلسازی دمپر از مدل هیسترزیس بوس-ون استفاده کردند و پارامترهای آن را با جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار MATLAB بهینه کرده و سپس تاثیر این دمپر را بر روی مدل ارتعاشی اتومبیل بررسی نمودند[۱۸].

در سال ۲۰۰۲ یانگ و همکارانش مدل متقارن محوری را برای آنالیز حرکت سیال به کار بردند و یک دمپر با ابعاد بزرگ (۲۰ تنی) را طراحی کردند و سپس برای خاصیت برگشت پذیری سیال پارامترهای مدل *بوس- ون* را به صورت تابعی از جریان ورودی به دمپر پیشنهاد کردند[۱۹].

در سال ۲۰۰۴ صداقتی و دمینگوئز یک روش ریاضی جدید برای محاسبه‌ی پارامترهای مدل بوس- ون پیشنهاد کردند، که پارامترهای مدل آنها تابعی از جریان ورودی دمپر است[۲۰].

درسال ۲۰۰۴ روزنفلد و ورلی مسئله‌ی مقید دمپر MR را بهینه‌سازی کردند؛ سپس روابطی را برای طراحی شیرهای MR ارائه کرده و قابلیتهای آن را نسبت به شیرهای ER با استفاده از روابط تحلیلی مقایسه نمودند[۲۱].

سال ۲۰۰۶ تسانگ و چاندلر یک روش دینامیکی معکوس بر اساس مدل بینگهام و مدل بوس- ون پیشنهاد دادند که با استفاده ازآن جریان بهینه دمپر برای کاهش ارتعاشات یک آپارتمان چند طبقه تعیین شد. همچنین آنها روابطی برای تنش برشی سیال بر حسب جریان دمپر ارائه کردند[۲۲].

ویژگیهای مکانیکی سیال MR باعث شد تا در اجزای مکانیکی دیگری نظیر ترمزهای دوار و کلاچها مورد استفاده قرار گیرد[۲۸-۲۳].

---

[1] Bouce-Wen

در طراحی ترمزهای MR ابتدا باید روابطی بین گشتاور ایجاد شده توسط سیال با پارامترهای هندسی ترمز و میدان مغناطیسی ایجاد شده در سیال پیدا کرد. در سال ۲۰۰۲ هوانگ و همکارانش حرکت دورانی سیال غیر نیوتنی درون محفظه‌ی استوانه‌ای را حل کردند و روابط تئوری برای انتقال گشتاور ترمز توسط سیال ارئه کردند[۲۹].

سال ۲۰۰۶ پارک و همکارانش طرح یک ترمز MR را پیشنهاد دادند که در آن از دیسکهای دوار استفاده می‌شود، سپس گشتاور و وزن این ترمز را بهینه کرده و این ترمز بهینه شده را به مدل یک چهارم اتومبیل اعمال کرده و یک کنترلر برای این سیستم ترمز طراحی کردند[۳۰].

۱-۳- هدف تحقیق

با توجه به مزایای این نوع سیستم‌های ترمز و تعلیق، در این پایان‌نامه به بررسی سیستم‌های تعلیق و ترمز MR پرداخته شده است. در فصل اول این پایان‌نامه، مروری بر تاریخچه استفاده از این نوع سیستم‌ها و تحقیقات انجام شده، صورت پذیرفته است.

در فصل دوم تحقیق حاضر، سیال هوشمند MR معرفی می‌شود. سپس تاثیر میدان مغناطیسی بر ریز ساختار این سیال مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر پارامتر درصد حجمی ذرات معلق بر زمان واکنش سیال مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه نوع دیگری از مواد هوشمند موسوم به سیال ER معرفی می‌شود و خواص این سیال، با سیال MR مورد استفاده در مدلسازی موجود در این پایان‌نامه، مورد مقایسه قرارمی‌گیرد.

در فصل سوم از پایان نامه، مدل شبه استاتیک سیال در مدل جریان سیال بین صفحات موازی و متقارن محوری بر اساس معادلات ناویر-استوکس برای رفتار دمپر بررسی می‌شود. در این فصل، برای مدلسازی خواص وابسته به میدان سیال MR مدل ویسکوپلاستیک هرشل-بالکلی و مدل بینگهام برای سیال غیرنیوتونی به کار می‌رود و اثر عوامل تنش برشی و هندسه، روی عملکرد دمپر و نیروی قابل کنترل آن مورد بررسی واقع می‌شود و روابط مربوط به نیروهای کنترل پذیر و غیر قابل کنترل این نوع دمپرهای هوشمند استخراج می‌شود. سپس در ادامه ترمز استوانه‌ای با استفاده از مدل بینگهام مدل می‌شود و روابط مربوط به محاسبه گشتاور ترمز و طراحی ترمز ارائه می‌شود.

در فصل چهارم از این تحقیق، مدلهای ارتعاشاتی یک درجه آزادی و دو درجه آزادی اتومبیل بررسی می‌شود و روابط مربوط به جدایش ارتعاشات و دامنه‌ی نوسانات، استخراج می‌شود. سپس مدل یک چهارم دو درجه آزادی غیر فعال و نیمه فعال اتومبیل و روابط مدل

ارتعاشاتی مربوطه استخراج می‌شود و حالتهایی که نیروی دمپر هوشمند ماکزیمم و مینیمم است بررسی می‌شود.

در فصل پنجم از این پایان نامه، طراحی مدار مغناطیسی دمپرها و ترمزهای MR مورد بررسی قرار گرفته و فرمول بندی المان محدود میدان مغناطیسی مربوطه، ارائه می‌شود. با توجه به اینکه سیال MR موجود در محفظه‌ی حلقوی به همراه پیستون وسیلندر و سایر اجزای دمپر و ترمز تشکیل یک مدار مغناطیسی می‌دهند، در این فصل از پایان نامه، دمپر وترمز MR با روش المان محدود در فضای چند محیطی[1] نرم افزار ANSYS مدل می‌شود. در مدل المان محدود ارائه شده ابتدا میدان مغناطیسی دمپر و ترمز توسط المان دو بعدی متقارن محوری مدل می‌شود و رابطه‌ی میدان مغناطیسی سیال به صورت تابعی از جریان اعمالی به دمپر و ترمز پیشنهاد می‌گردد. در این مدلسازی برای بالا رفتن دقت، خواص مغناطیسی سیال، پیستون و سیلندر به صورت غیرخطی و با استفاده از منحنی‌های چگالی شدت میدان مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی القا شده (B-H) در نظر گرفته می‌شوند. سپس تنش برشی ناشی از میدان مغناطیسی سیال محاسبه می‌گردد و این تنش در روابط تئوری ارائه شده برای دمپر و ترمز به کار می‌رود و با استفاده از آن نیروی دمپر و گشتاور ترمز محاسبه می‌شود.

از آنجایی که پارامترهای اجزای مدار مغناطیسی به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در میدان القایی توسط جریان الکتریکی تاثیر گذار هستند، باید این پارامترها به نحوی بهینه شوند. لذا ابعاد هندسی این اجزاء می‌تواند به عنوان پارامترهای طراحی دمپر محسوب می‌شود. بدین ترتیب انتخاب هوشمندانه این پارامترها می تواند موجب افزایش نیروی تولید شده توسط دمپر شود. در این راستا، در فصل ششم از این تحقیق، الگوریتم ژنتیک[2] که یک روش جستجو می‌باشد که بر اساس مکانیزم ژنتیک طبیعی پایه گذاری شده است، برای بهینه سازی ابعاد دمپر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در فصل هفتم از تحقیق حاضر، معادلات مدل ارتعاشی چهار درجه آزادی اتومبیل استخراج می‌شود. سپس این معادلات در فضای حالت[3] بیان می‌شوند و ماتریسهای فضای حالت استخراج می‌شود. در ادامه، بهینه سازی پاسخ سیستم‌های کنترلی به کمک کنترل بهینه معرفی می‌شود و ماتریسهای مورد نیاز در این روش استخراج می‌گردد و با استفاده از این روش، پاسخ مدل سیستم تعلیق بهینه می‌گردد و پاسخ سیستم تعلیق غیرفعال و نیمه‌فعال اتومبیل به ورودی پله و ضربه، بررسی می‌گردد.

---

[1] Multi Physics
[2] Genetic Algorithm
[3] State Space