دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

**پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک–طراحی سیستم‌های تعلیق، ترمز و فرمان خودرو**

# طراحی سیستم تعلیق هندسه فعال خودرو با کنترلر فازی

**روزبه استیفایی**

**استاد راهنما:**

**دکتر شهرام آزادی**

زمستان ۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

**بسمه تعالی**

| | | |
|---|---|---|
| تاسیس ۱۳۰۷<br>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی | **تأییدیه هیأت داوران** | **شماره:**<br>**تاریخ:** |

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان:

**طراحی سیستم تعلیق هندسه فعال خودرو با کنترلر فازی**

توسط آقای **روزبه استیفایی**، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک**، گرایش **طراحی سیستم‌های تعلیق، ترمز و فرمان خودرو** در تاریخ **۱۳۹۱/۱۱/۳۰** مورد تأیید قرار می‌دهند.

| | | |
|---|---|---|
| **۱- استاد راهنما** | جناب آقای دکتر **شهرام آزادی** | امضاء |
| **۴- ممتحن داخلی** | جناب آقای دکتر **رضا کاظمی** | امضاء |
| **۵- ممتحن داخلی** | جناب آقای دکتر **علی نحوی** | امضاء |
| **۶- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده** | جناب آقای دکتر **علی نحوی** | امضاء |

**بسمه تعالی**

| | | |
|---|---|---|
| تاسیس ۱۳۰۷<br>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی | **اظهارنامه دانشجو** | **شماره:**<br>**تاریخ:** |

این‌جانب، **روزبه استیفایی**، دانشجوی **کارشناسی ارشد** رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **طراحی سیستم‌های تعلیق، ترمز و فرمان خودرو** دانشکده مهندسی مکانیک **دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی** گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

**طراحی سیستم تعلیق هندسه فعال خودرو با کنترلر فازی**

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای **دکتر شهرام آزادی**، توسط شخص این‌جانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید می‌باشد، و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه، گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تا کنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط این‌جانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

**امضاء دانشجو:**

**تاریخ:**

**بسمه تعالی**

| | | |
|---|---|---|
| تاسیس ۱۳۰۷<br>دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی | **حق طبع و نشر و مالکیت نتایج** | **شماره:**<br>**تاریخ:** |

**۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.**

**ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.**

**۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.**

**همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی‌باشد.**

*** توجه:**

این فرم می‌بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده قرار داده شود.

## چکیده

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های عمده‌ای در زمینه بهبود ویژگی‌های فرمان‌پذیری خودرو حاصل شده است. تمامی این تکنیک‌ها هدف مشترکی دارند: افزایش ایمنی و بهبود عمل‌کرد خودرو با صرف نیروی کمتری توسط راننده. این پروژه به حوزه‌ای در این زمینه می‌پردازد که نوپاتر از سایر حوزه‌های این زمینه است.

با به وجود آوردن امکان تغییر هندسه تعلیق به وسیله محرک‌هایی که اتصالات را جابه‌جا می‌کنند یا طول بندها را تغییر می‌دهند، می‌توان ویژگی‌های مختلف دینامیکی خودرو را تغییر داد. در این پروژه، با به وجود آوردن امکان چنین تغییری در هندسه سعی می‌کنیم عمل‌کرد خودرو را بهتر کنیم. برای انجام پروژه از نرم‌افزار ADAMS/Car استفاده شده است تا مدلی از خودرو ساخته شود و سپس امکان تغییر فعال زاویه فرمان چرخ و تغییر طول بازوی شناور مکانیزم تعلیق ایجاد شده است. مدل نرم‌افزاری این سیستم مکانیکی در محیط Simulink مورد استفاده قرار می‌گیرد تا برای بهتر کردن عمل‌کرد خودرو در تست‌های مختلف و افزایش پایداری آن، کنترلری طراحی شود که با استفاده از منطق فازی محرک‌های فعال‌کننده هندسه را کنترل کند. در پایان، با ارائه نتایج تست‌های مختلف روی خودرو با و بدون کنترلر، عمل‌کرد سیستم کنترلی نمایانده شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سیستم تعلیق خودرو، هندسه فعال، کنترل فازی، تعلیق فعال

فهرست مطالب

چکیده ..... الف

فهرست مطالب ..... ب

فهرست شکل‌ها ..... و

فهرست جدول‌ها ..... ی

فهرست نمادها ..... ک

۱- مقدمه ..... ۱

۱-۱-تحلیل تعلیق ..... ۲

۱-۲-هندسه متغیر ..... ۳

۱-۳-پیشینه تحقیق ..... ۴

۱-۴-اهداف تحقیق ..... ۶

۲- دینامیک و کنترل خودرو ..... ۷

۲-۱-مقدمه ..... ۷

۲-۲-مدل دوچرخه ..... ۷

۲-۳-کنترل حرکت ..... ۱۲

۲-۴-مکانیک تایر ..... ۱۳

۲-۴-۱- ایجاد نیروی عرضی در چرخ (تایر و زاویه لغزش جانبی) ..... ۱۳

۲-۴-۲- ویژگی‌های دورزنی تایر ..... ۱۴

۲-۴-۳- مدل فیالا ..... ۱۵

۲-۵-مرکز رول و محور رول ..... ۲۰

۲-۵-۱- تعریف ..... ۲۰

۲-۵-۲- محور رول ..... ۲۱

۲-۵-۳- مرکز رول بدنه در سیستم‌های تعلیق مستقل ..... ۲۲

۳- مدل‌سازی با ADAMS ..... ۲۴

۳-۱-مقدمه ..... ۲۴

۳-۱-۱- ADAMS/Car ..... ۲۵

۳-۱-۲- ADAMS/Controls ..... ۲۹

۳-۲-مدل‌سازی اجزا ..... ۳۰

۳-۲-۱- سیستم تعلیق جلو ..... ۳۱

۳-۲-۲- سیستم کنترلی ..... ۳۴

۳-۲-۳- سیستم تعلیق عقب ..... ۳۶

۳-۲-۴- سیستم فرمان ..... ۳۶

۳-۲-۵- بدنه ..... ۳۷

۳-۲-۶- تایرها ..... ۳۸

۳-۳-مونتاژ قطعات و تنظیمات نهایی ..... ۳۹

۳-۴-اجرای تست ..... ۴۰

۳-۵-تست‌های مدل غیرفعال خودرو ..... ۴۱

۳-۵-۱- تست تغییر خط با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ..... ۴۱

۴- منطق فازی ..... ۵۰

۴-۱-مقدمه ..... ۵۰

۴-۲-تاریخچه ..... ۵۱

۴-۳-اصول منطق فازی ..... ۵۲

۴-۳-۱- مجموعه فازی ..... ۵۳

۴-۳-۲- تابع عضویت ..... ۵۳

۴-۳-۳- اجتماع دو مجموعه ..... ۵۳

۴-۳-۴- اشتراک دو مجموعه ..... ۵۴

۴-۳-۵- قانون فازی ..... ۵۴

۴-۳-۶- استنتاج فازی ..... ۵۴

۴-۳-۷- فازی‌سازی ..... ۵۴

۴-۳-۸- قدرت آتش ..... ۵۵

۴-۳-۹- استنتاج ممدانی ..... ۵۵

۴-۳-۱۰- نافازی‌سازی ..... ۵۵

۴-۳-۱۱- تجمع ..... ۵۵

۴-۴-منطق فازی در مقایسه با روش‌های کلاسیک ..... ۵۶

۴-۵- منطق فازی در MATLAB ..... ۵۶

۴-۶-کنترلر فازی ..... ۵۷

۴-۶-۱- Upright Controller ..... ۵۸

۴-۶-۲- Tierod Controller ..... ۵۸

۴-۶-۳- توابع عضویت و قوانین ..... ۵۹

۵- نتایج ..... ۶۳

۵-۱-۱- تغییر خط با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ..... ۶۳

۵-۱-۲- ورودی فرمان پله‌ای با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ..... ۷۴

۵-۱-۳- ورودی فرمان ضربه‌ای با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت ..... ۷۸

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهاد ..... ۸۲

منابع ..... ۸۴

## فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱- نام‌گذاری پارامترهای مربوط به صفحه یاو خودرو ..... ۸
شکل ۲-۲- زوایای فرمان و لغزش چرخ و نسبت آن‌ها با سرعت چرخ ..... ۸
شکل ۲-۳- نسبت شعاع دورزنی دینامیکی به سینماتیکی برای حالت‌های فرمان خنثی، کم‌فرمان و بیش‌فرمان ..... ۱۱
شکل ۲-۴- زاویه لغزش خودرو ..... ۱۱
شکل ۲-۵- نسبت کنترلی راننده و خودرو ..... ۱۲
شکل ۲-۶- نمای بالای چرخ در زمانی که (الف) حرکت مستقیم دارد؛ (ب) لغزش جانبی دارد. ..... ۱۴
شکل ۲-۷- مدل ساختاری تایر ..... ۱۵
شکل ۲-۸- نمودار نیروی عرضی بر حسب زاویه لغزش جانبی برای بارهای عمودی مختلف، در فشار هوای ۲۱۰ کیلو پاسکال ..... ۱۸
شکل ۲-۹- نیروی عرضی بر حسب بار عمودی برای زاویه لغزش‌های مختلف، در فشار هوای ۲۱۰ کیلو پاسکال ..... ۱۹
شکل ۲-۱۰- نمودار سختی دورزنی بر حسب بار عمودی در فشار هوای ۲۰۰ کیلو پاسکال ..... ۲۰
شکل ۲-۱۱- مرکز رول خودرو ..... ۲۱
شکل ۲-۱۲- محور رول و اندازه‌های مرتبط با آن ..... ۲۲
شکل ۲-۱۳- محل مرکز رول در شرایط متقارن سیستم تعلیق ..... ۲۳
شکل ۲-۱۴- محل مرکز رول در شرایط غیرمتقارن سیستم تعلیق ..... ۲۳
شکل ۳-۱- الگوی سیستم دو جناغی مورد استفاده در مدل ..... ۳۱
شکل ۳-۲- نمای نزدیک از محرک آپرایت ..... ۳۲
شکل ۳-۳- نمای نزدیک از محرک تای‌راد ..... ۳۳

شکل ۳-۴- سیستم تعلیق عقب ..... ۳۶
شکل ۳-۵- سیستم فرمان ..... ۳۷
شکل ۳-۶- بدنه ..... ۳۸
شکل ۳-۷- تایرها ..... ۳۸
شکل ۳-۸- مجموعه کامل خودرو ..... ۳۹
شکل ۳-۹- انتخاب تست در ADAMS/Car ..... ۴۱
شکل ۳-۱۰- ورودی فرمان ۴۰ درجه ..... ۴۲
شکل ۳-۱۱- مسیر حرکت خودرو ..... ۴۲
شکل ۳-۱۲- نمودار زاویه یاو ..... ۴۳
شکل ۳-۱۳- نمودار سرعت یاو ..... ۴۳
شکل ۳-۱۴- نمودار زاویه لغزش جانبی ..... ۴۴
شکل ۳-۱۵- نمودار زاویه لغزش چرخ جلو سمت چپ و راست ..... ۴۵
شکل ۳-۱۶- نمودار زاویه رول ..... ۴۵
شکل ۳-۱۷- ورودی فرمان ۵۰ درجه ..... ۴۶
شکل ۳-۱۸- مسیر حرکت خودرو ..... ۴۶
شکل ۳-۱۹- نمودار زاویه یاو ..... ۴۷
شکل ۳-۲۰- نمودار سرعت یاو ..... ۴۷
شکل ۳-۲۱- نمودار زاویه لغزش ..... ۴۸
شکل ۳-۲۲- نمودار لغزش چرخ‌های جلو چپ و راست ..... ۴۸
شکل ۳-۲۳- نمودار زاویه رول ..... ۴۹
شکل ۴-۱- ساختار مدار کنترلی مورد استفاده در پروژه ..... ۵۷

شکل ۴-۲- کنترلر مربوط به آپرایت‌ها ..... ۵۹
شکل ۴-۳- کنترلر مربوط به تای‌رادها ..... ۵۹
شکل ۴-۴- توابع عضویت ورودی‌های کنترلر آپرایت ..... ۵۹
شکل ۴-۵- تابع عضویت خروجی کنترلر آپرایت ..... ۶۰
شکل ۴-۶- توابع عضویت ورودی‌های کنترلر تای‌راد ..... ۶۱
شکل ۴-۷- تابع عضویت خروجی کنترلر تای‌راد ..... ۶۱
شکل ۵-۱- زاویه غربیلک فرمان ورودی ..... ۶۴
شکل ۵-۲- مسیر خودرو ..... ۶۴
شکل ۵-۳- نمودار زاویه یاو ..... ۶۵
شکل ۵-۴- نمودار سرعت یاو ..... ۶۵
شکل ۵-۵- نمودار زاویه لغزش ..... ۶۶
شکل ۵-۶- لغزش چرخ جلو چپ و راست ..... ۶۶
شکل ۵-۷- نمودار زاویه رول ..... ۶۷
شکل ۵-۸- ورودی فرمان ..... ۶۷
شکل ۵-۹- مسیر حرکت خودرو ..... ۶۸
شکل ۵-۱۰- زاویه یاو ..... ۶۸
شکل ۵-۱۱- نمودار سرعت یاو ..... ۶۹
شکل ۵-۱۲- نمودار زاویه لغزش ..... ۶۹
شکل ۵-۱۳- زاویه لغزش چرخ‌های جلو چپ و راست ..... ۷۰
شکل ۵-۱۴- نمودار زاویه رول ..... ۷۰
شکل ۵-۱۵- ورودی فرمان ..... ۷۱

شکل ۵-۱۶- مسیر حرکت خودرو ..... ۷۲
شکل ۵-۱۷- زاویه یاو..... ۷۲
شکل ۵-۱۸- نمودار سرعت یاو ..... ۷۲
شکل ۵-۱۹- نمودار زاویه لغزش..... ۷۳
شکل ۵-۲۰- زاویه لغزش چرخ‌های جلو چپ و راست..... ۷۳
شکل ۵-۲۱- نمودار زاویه رول ..... ۷۴
شکل ۵-۲۲- ورودی فرمان..... ۷۴
شکل ۵-۲۳- مسیر حرکت خودرو ..... ۷۵
شکل ۵-۲۴- زاویه یاو..... ۷۵
شکل ۵-۲۵- نمودار سرعت یاو ..... ۷۶
شکل ۵-۲۶- نمودار زاویه لغزش..... ۷۶
شکل ۵-۲۷- زاویه لغزش چرخ جلوی چپ و راست ..... ۷۷
شکل ۵-۲۸- نمودار زاویه رول ..... ۷۷
شکل ۵-۲۹- ورودی فرمان..... ۷۸
شکل ۵-۳۰- مسیر حرکت خودرو ..... ۷۹
شکل ۵-۳۱- زاویه یاو..... ۷۹
شکل ۵-۳۲- نمودار سرعت یاو ..... ۸۰
شکل ۵-۳۳- نمودار زاویه لغزش..... ۸۰
شکل ۵-۳۴- زاویه لغزش چرخ جلوی چپ و راست ..... ۸۱
شکل ۵-۳۵- زاویه رول ..... ۸۱

## فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱- پارامترهای مدل دوچرخه ..... ۱۰

جدول ۳-۱- مجموعه ورودی‌های سیستم کنترلی با واحدهای آن‌ها ..... ۳۵

جدول ۳-۲- مجموعه خروجی‌های سیستم کنترلی با واحدهای آن‌ها ..... ۳۵

جدول ۳-۳- نحوه اتصال هر سیگنال به پورت سیستم کنترلی ..... ۴۰

جدول ۴-۱- قوانین فازی مربوط به کنترلر آپرایت..... ۶۰

جدول ۴-۲- قوانین فازی مربوط به کنترلر تای‌راد..... ۶۲

## فهرست نمادها

| | |
|---|---|
| $a$ | فاصله طولی محور جلوی خودرو از مرکز جرم |
| $b$ | فاصله طولی محور عقب خودرو از مرکز جرم |
| $\delta$ | زاویه فرمان چرخ |
| $r$ | سرعت یاو |
| $u$ | سرعت پیش‌روی (سرعت طولی) |
| $v$ | سرعت عرضی |
| $m$ | جرم |
| $c$ | سختی دورزنی |
| $\alpha$ | زاویه لغزش تایر |
| $\beta$ | زاویه لغزش بدنه |
| $\mu$ | ضریب اصطکاک |
| $W$ | وزن |
| $G$ | مدول برشی |
| $E$ | مدول یانگ |
| $I$ | ممان اینرسی |
| $k$ | ثابت فنر |
| $w$ | عرض خودرو |
| $l$ | طول خودرو |

## ۱- مقدمه

سیستم‌های هندسه وردا[1]، و به خصوص تعلیق هندسه وردا، در گذشته چندان مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند، و به همین دلیل هم تحقیقات مرتبط با آن‌ها چندان متنوع و در دسترس نیستند. با وجود این، در حوزه‌های مرتبط با این موضوع، مخصوصا موضوعات مربوط به دینامیک کلی خودرو، کنترل خودرو، و تحلیل تعلیق، مقالات بسیاری وجود دارند. دینامیک خودرو شاخه بسیار وسیعی است و از سرفصل‌های بسیاری، از نظریه دینامیک چند جسمی[2] تا صحه‌گذاری و نتیجه‌گیری از مدل‌های مختلف، تشکیل شده است.

در مورد کاربرد کنترل خودکار در دینامیک خودرو هم تحقیقات زیادی انجام شده است. این حوزه شامل شاخه‌های بسیاری می‌شود، که از جمله آن‌ها می‌توان کنترل راه‌بری[3]، بهین‌روی[4]، کنترل تعلیق، و کنترل کشش[5] را نام برد [۱]. در هر کدام از این شاخه‌ها هم زیر شاخه‌های متعددی وجود دارد؛ به خصوص در مورد کنترل کشش، که شامل ترمز ضدقفل، کنترل چرخ‌گردش[6]، و کنترل گشتاور یاو می‌شود. مطالعات در زمینه کنترل تعلیق و راه‌بری، اغلب، به مطالعات سیستم‌های هندسه فعال مرتبط هستند، و دلیل آن هم این است که این سیستم‌ها عملکردی مدام و پیوسته دارند، در حالی که سیستم‌های کنترل کشش معمولا فقط در شرایط خاص فعال می‌شوند. مشکلات کنترل راه‌بری معمولا در دو دسته قرار می‌گیرند: یک دسته آن‌هایی هستند که هدفشان حذف راننده از مراحل مرتبط به کنترل راه‌بری است، و دسته دیگر آن‌هایی که به تغییر پاسخ خودرو برای دنبال کردن دقیق‌تر مسیر مطلوب می‌پردازند. مورد اول

---

[1] Variable Geometry
[2] Multibody Dynamics
[3] Steering Control
[4] Cruise Control
[5] Traction Control
[6] Wheelspin Control

در واقع استراتژی‌ای است که، همانند مساله بهین‌روی، به دنبال کاهش بار تراکمی ترافیک بزرگ‌راهی است. مطالب مرتبط با مورد دوم به اهداف این تحقیق مرتبط‌تر هستند. در اصل، راه‌بری چهارچرخ[۷] را، به دلیل این که اتصالات راه‌بری بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم تعلیق به حساب می‌آیند، می‌توان شکل محدودی از کنترل هندسه فعال در نظر گرفت. تعلیق فعال هم یکی دیگر از حوزه‌های مرتبط تحقیقات است، اما این حوزه بسیار وسیع است. در این‌جا تنها بخشی از مطالب مربوط به این حوزه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱-۱- تحلیل تعلیق

سینماتیک نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های فرمان‌پذیری خودرو ایفا می‌کند. از آن‌جا که سینماتیک سیستم تعلیق تابعی از هندسه آن است، کمیت‌های هندسی مختلفی که بر فرمان‌پذیری خودرو اثر دارند شناسایی شدند. این کمیت‌هاشامل کمبر[۸]، سرجمعی[۹]، کستر[۱۰]، و شیب کینگ پین می‌شوند. کمبر را برابر با مقدار شیب چرخ از صفحه عمودی تعریف می‌کنیم. سرجمعی اندازه اولیه زاویه فرمان است، که معمولا برای نمایندن جهت آن از اصطلاحات «Toe-in» و «Toe-out» استفاده می‌شود. کستر هم میزان شیب محور فرمان است، وقتی که از کنار خودرو به آن نگاه کنیم. شیب کینگ پین مانند کستر تعریف می‌شود؛ میزان شیب محور فرمان وقتی که از جلوی خودرو به آن نگاه کنیم[۱].

یکی دیگر از خواص هندسی سیستم تعلیق که بر فرمان‌پذیری خودرو اثرگذار است محل مرکز رول آن است. مرکز رول سیستم تعلیق را با پیدا کردن محوری انجام می‌دهند که دوران خودرو حول آن محور باعث حرکت عرضی تایرها روی جاده نشود. به این حرکت عرضی تایر «سابش[۱۱]» می‌گویند. از آن‌جا که

---

[7] Four Wheel Steering
[8] Camber
[9] Toe
[10] Castor
[11] Scrub

سیستم تعلیق در اغلب موارد متقارن است و چپ و راست برابری دارد، مرکز رول معمولا در وسط خودرو، در ارتفاعی بین مرکز جرم خودرو و سطح زمین، قرار می‌گیرد، گر چه لزوما همیشه این طور نیست. مکان مرکز رول، بر اثر تغییر شکل سیستم تعلیق، به بالا و پایین و چپ و راست حرکت می‌کند. پیدا کردن مرکز رول برای مشخص کردن ویژگی‌های فرمان‌پذیری خودرو مفید است. تغییر شکل سیستم تعلیق عمود بر خطی است که از سطح تماس تایر با زمین و مرکز رول می‌گذرد. نیروهای وارد بر تایر در راستای مرکز رول مستقیما به خودرو منتقل می‌شوند، و باعث هیچ تغییر شکلی در سیستم تعلیق نخواهند شد.

فاصله بین مرکز گرانش و مرکز رول تعیین کننده بازوی گشتاور رول است. با فرض این که مرکز رول، چنان که معمول است، در زیر مرکز جرم قرار بگیرد، افزایش ارتفاع مرکز رول باعث کوتاه شدن بازوی گشتاور رول می‌شود. در نتیجه، زاویه رول به ازای یک شتاب عرضی مشخص کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بالا رفتن مرکز رول هم‌بستگی حرکت‌های عرضی و عمودی، یا تمایل به «جکینگ[۱۲]» سیستم تعلیق، را افزایش می‌دهد.

### ۱-۲- هندسه متغیر

اضافه کردن عناصر فعال به سیستم تعلیق یک خودرو امکان رسیدن به سطوحی از کنترل را به وجود می‌آورد که با استفاده از عناصر متداول تعلیق غیرقابل دست‌یابی‌اند. توسعه طبیعی ایده سیستم‌های فعال تعلیق به این می‌رسد که حرکات کنترل شده بیشتری به وجود آوریم. نتیجه سیستم تعلیق با هندسه متغیر، یا اگر سیستم از یک نوع کنترل خودکار استفاده کند، تعلیق هندسه فعال، خواهد بود. تعلیق خودرو تنها کاندید استفاده از سیستم‌های هندسه متغیر یا فعال نیست. در بیشتر سیستم‌های مکانیکی سنتی، متغیرها برای جبران آثار هم‌دیگر و رسیدن به اهداف متضاد انتخاب می‌شوند. در بیشتر موارد می‌توان

[12] Jacking

عمل‌کرد را با به وجود آوردن امکان تغییر در متغیرها بهبود بخشید. تحقیقات مربوط به این حوزه مدت‌هاست که در زمینه مکانیزم‌ها انجام می‌شود. چند نمونه از این تحقیقات را، از گذشته تا حال، می‌توان در کارهای تائو و کریشنامورتی [۲] و [۳]، ژو و چیونگ [۴] و ژو [۵] یافت. با کمی فاصله، در مقاله‌هایی از قبیل کار ووکوبراتوویچ و پاتکونیاک [۶]، امکان استفاده از این سیستم‌ها در کاربردهای عملی مختلف و از جمله در سیستم‌های تعلیق خودرو نیز بررسی شد.

دو شیوه مختلف برای رسیدن به هندسه متغیر در تعلیق خودروها ممکن است. امکان اول تغییر موقعیت نقاط اتصال فنر و دمپرهای سیستم تعلیق است، که بنا بر آن سختی و میرایی موثر چرخ‌ها، و شکل منحنی جابه‌جایی نیروها هم تغییر می‌کند. این شیوه را شارپ در [۷] اجرا کرده است. امکان دیگر تغییر طول بازوهای تعلیق است که به وسیله آن ویژگی‌های سینماتیکی تعلیق تغییر می‌کنند. در این پایان‌نامه با شیوه اخیر کار خواهیم کرد.

### ۱-۳- پیشینه تحقیق

استفاده از دینامیک چندجسمی[۱۳] در دهه اخیر بسیار متداول شده است. هوستون در [۸] می‌گوید که دینامیک چندجسمی «یکی از فعال‌ترین شاخه‌های مکانیک» بوده و «این اقبال ادامه دارد». در مرورِ به نسبت مُفصلش بر تحقیقات انجام شده، هوستون این حوزه را به چهار شاخه تقسیم می‌کند: ۱. تحلیل عمومی، ۲. روش‌های تحلیل، ۳. سیستم‌های با بدنه انعطاف‌پذیر، ۴. سیستم‌های مقید.

با استفاده از دینامیک چندجسمی در مساله خودرو، مجموعه معادلاتی بسیار پیچیده و کامل به وجود می‌آیند. این معادلات، در حالت کلی، غیرخطی هستند، و بنا بر این برای شبیه‌سازی دامنه زمان مناسب‌تر هستند تا دیگر شیوه‌ها. روش چندجسمی، با در نظر گرفتن چیزهایی مثل اثر سینماتیکی و دینامیکی

[13] Multi-Body Dynamics