



دانشکده مهندسی خودرو

بهبود سرعت عمل و نیروی محرک سیستم فرمان برقی سیمی با استفاده از محرک خطی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک خودرو گرایش سیستم‌های دینامیکی خودرو

حسن خدادوست خوش دره گی

اساتید راهنما:

دکتر محمدحسن شجاعی فرد

دکتر سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی

خردادماه ۱۳۹۹



دانشکده مهندسی خودرو

بهبود سرعت عمل و نیروی محرک سیستم فرمان برقی سیمی با استفاده از محرک خطی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مکانیک خودرو گرایش سیستم‌های دینامیکی خودرو

حسن خدادوست خوش دره گی

اساتید راهنما:

دکتر محمدحسن شجاعی فرد

دکتر سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی

خردادماه ۱۳۹۹



تأییدیه‌ی هیئت‌داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

نام دانشکده: دانشکده خودرو

نام دانشجو: حسن خدادوست

عنوان پایان‌نامه: بهبود سرعت عمل و نیروی محرک سیستم فرمان برقی سیمی با استفاده از محرک خطی

تاریخ دفاع:

رشته: مهندسی مکانیک خودرو

گرایش: سیستم‌های دینامیکی

| ردیف | سمت | نام و نام خانوادگی | مرتبه دانشگاهی | دانشگاه یا مؤسسه | امضا |
|------|------------------|--------------------------------------|----------------|--|------|
| ۱ | استاد راهنما | دکتر محمدحسن شجاعی فرد | استاد | دانشگاه علم و صنعت ایران | |
| ۲ | استاد راهنما | دکتر سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی | استادیار | دانشگاه علم و صنعت ایران | |
| ۵ | استاد مدعو داخلی | دکتر مسیح طهرانی | استادیار | دانشگاه علم و صنعت ایران | |
| ۶ | استاد مدعو خارجی | دکتر علی نحوی | استادیار | دانشگاه صنعتی خواجeh نصیرالدین طوسی | |

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه‌تعالی

این جانب حسن خدادوست به شماره دانشجویی ۹۶۶۲۳۰۳۵ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک خودرو گرایش سیستم‌های دینامیکی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار این جانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با این جانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی این جانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: حسن خدادوست

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط اساتید راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام اساتید راهنما:

دکتر محمدحسن شجاعی فرد

دکتر سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی

تاریخ:

امضا:

تقدیم به:

تقدیمی به

پدر و مادرم برای آغوش همیشه حامی شان

اساتیدم برای زحمات بی دریغشان

همسرم که بهترین و مهربان ترین دوست دنیاست

و تمامی دوستان عزیزی که وجودشان دلگرمی راه بوده و هست

تشکر و قدردانی:

در تدوین این رهاورد خود را مدیون راهنمایی و رهنمودهای ارزنده و مساعدت صمیمانه اساتید ارجمند، جناب آقایان دکتر محمدحسن شجاعی فرد و آقای دکتر سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی می‌دانم. تشکر و قدردانی خاص دارم از جناب آقای دکتر مسیح طهرانی و دکتر بهروز مشهدی، که الطاف بی‌شائبه این عزیزان در طول مدت تحصیل شامل حال بنده شده است.

چکیده

در این پایان‌نامه هدف طراحی سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی خطی بر روی خودرو سدان E کلاس بوده است. این سیستم فرمان برای برطرف کردن معایبی از جمله وزن بیشتر به دلیل داشتن مجموعه دنده شانهای و پینیون و همین‌طور سرعت عمل پایین‌تر به دلیل داشتن قسمت‌های مکانیکی در سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی و همین‌طور بهینه‌سازی نیرو و سرعت خروجی چرخ خودرو طراحی و شبیه‌سازی شده است. مدل کامل سیستم فرمان خودرو و مدل خودرو دوچرخ در نرم‌افزار MATLAB/Simulink مدل سازی است. قسمت صحنه‌گذاری به دو قسمت صحنه‌گذاری سیستم فرمان سیمی و محرک الکترومکانیک خطی تقسیم شده است. در ادامه منحنی مشخصه زاویه خروجی چرخ نسبت به زاویه ورودی از سمت راننده و همچنین مقدار نیروی اعمالی از سمت موتور محرک الکترومکانیکی خطی به چرخ خودرو نیز استخراج شده است. نتایج خروجی سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی با سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی نیز مقایسه شده که نشان‌دهنده ۳۵ درصد بهبود در نتایج خروجی زاویه تایلر خودرو نسبت به ورودی ضربه راننده بوده است. در انتها نیز با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و فازی PID به بهینه‌سازی نتایج نیروی اعمالی به تایلر و سرعت پاسخ سیستم فرمان با کمینه کردن مقدار نیروی خروجی و مقدار خطای خروجی پرداخته شده است. بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم فازی PID توانسته ۲۰ درصد بهبود در نتایج خروجی داشته باشد اما نتایج خروجی دارای نوسان زیادی بوده است و الگوریتم ژنتیک باعث بهبود ۱,۲ ثانیه‌ای در زمان پاسخ‌دهی، افزایش سرعت عملکرد خروجی چرخ نسبت به مدل سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی شده است. نتایج خروجی از هر دو مدل توسط مدل دوچرخ خودرو در دو تست حالت مانا و قلاب ماهی^۱ نیز مورد مقایسه قرار گرفته که ۵ درصد بهبود در نتایج خروجی داشته است.

واژه‌های کلیدی: سیستم فرمان سیمی، محرک الکترومکانیک خطی، سرعت عمل، نیروی محرک تایلر، الگوریتم ژنتیک

¹ fishhook

Table of Contents

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل ۱: مقدمه |
| ۲ | ۱-۱- مقدمه |
| ۳ | ۲-۱- اهداف پایان نامه |
| ۳ | ۳-۱- ساختار پایان نامه |
| ۴ | فصل ۲: مروری بر منابع |
| ۵ | ۱-۲- مقدمه |
| ۵ | ۲-۲- فرمان |
| ۷ | ۱-۲-۲- سیستم فرمان مکانیکی |
| ۸ | ۲-۲-۲- سیستم‌های کمکی فرمان |
| ۱۳ | ۳-۲- مبانی سیستم فرمان سیمی |
| ۱۴ | ۲-۳-۲- اجزای سیستم فرمان سیمی |
| ۱۶ | ۳-۳-۲- پیشینه پژوهش |
| ۲۲ | ۴-۲- مبانی موتور با محرک خطی |
| ۲۴ | ۱-۴-۲- اجرا موتور با محرک خطی |
| ۲۵ | ۲-۴-۲- پیشینه پژوهش |
| ۲۷ | ۵-۲- نتیجه‌گیری |
| ۲۸ | فصل ۳: مدل و شبیه‌سازی |
| ۲۹ | ۱-۳- مقدمه |
| ۳۰ | ۲-۳- محاسبات تعیین محرک الکترومکانیک خطی |
| ۳۲ | ۱-۲-۳- معادلات سیستم فرمان سیمی |
| ۳۵ | ۲-۲-۳- معادلات و مدل |
| ۳۷ | ۳-۳- سیستم فرمان با محرک خطی |
| ۳۹ | ۲-۳-۳- معادلات دینامیکی حاکم |
| ۴۳ | ۴-۳- سیمولینک سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی |
| ۴۴ | ۵-۳- صحنه‌گذاری |
| ۴۴ | ۱-۵-۳- سیستم فرمان برقی سیمی |
| ۴۵ | ۲-۵-۳- سیستم موتور الکتریکی با محرک خطی |
| ۴۶ | ۶-۳- مدل دو درجه خودرو |
| ۴۷ | ۷-۳- بهینه‌سازی |
| ۴۷ | ۱-۷-۳- الگوریتم ژنتیک |
| ۴۸ | ۲-۷-۳- کنترل کننده Fuzzy-PID |
| ۵۲ | ۸-۳- جمع‌بندی |

فصل ۴:

۵۳

شبیه‌سازی و استخراج نتایج

۵۳

۵۴-۱-۴ مقدمه

۵۴-۲-۴ نتایج خروجی از سیستم فرمان سیمی با محرک خطی

۵۷-۳-۴ مقایسه نتایج خروجی با سیستم فرمان سیمی

۶۰-۴-۴ بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک

۶۴-۵-۴ Fuzzy-PID کنترل کننده

۶۷-۶-۴ نمودار نیروهای خروجی چرخ خودرو

۶۷-۱-۶-۴ مانور حالت مانا

۶۹-۲-۶-۴ Fishhook مانور

فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادها

۷۳

۷۴-۱-۵ مقدمه

۷۵-۱-۱-۵ نوآوری

۷۵-۲-۱-۵ پیشنهادها

مراجع

۷۷

پیوست‌ها

۸۲

فهرست اشکال

شکل (۱-۲) روندنما مروری بر منابع ۵

شکل (۲-۲) نمایی از سیستم فرمان خودرو [7] ۶

شکل (۳-۲) شماتیک سیستم فرمان خودرو ۶

شکل (۴-۲) سیستم فرمان معمولی [15] ۷

شکل (۵-۲) سیستم فرمان هیدرولیکی [15] ۹

شکل (۶-۲) سیستم فرمان الکتروهیدرولیک [15] ۱۰

شکل (۷-۲) سیستم فرمان برقی [15] ۱۱

شکل (۸-۲) مجموعه سیستم فرمان‌های مورد استفاده در خودرو [22] ۱۲

شکل (۹-۲) سیستم فرمان سیمی [26] ۱۴

شکل (۱۰-۲) موتور محرک چرخ DC [28] ۱۵

شکل (۱۱-۲) موتور فیدبک DC [28] ۱۵

شکل (۱۲-۲) حس گر زاویه [28] ۱۶

شکل (۱۳-۲) سیستم فرمان سیمی با تحریک پینیون [38] ۱۷

شکل (۱۴-۲) سیستم فرمان سیمی با تحریک شانه ای فرمان [40] ۱۸

شکل (۱۵-۲) سیستم فرمان سیمی با تحریک میل رابط فرمان [41] ۱۸

شکل (۱۶-۲) سیستم فرمان سیمی با دو موتور محرک و دو کنترل کننده [45] ۱۹

شکل (۱۷-۲) سیستم فرمان سیمی با دو محرک و یک کنترل کننده ۲۰

شکل (۱۸-۲) سیستم فرمان سیمی با محرک خطی مورد استفاده در تراکتور ۲۰

شکل (۱۹-۲) دوچرخ خودران با استفاده از موتور الکترومکانیک خطی ۲۱

شکل (۲۰-۲) سیستم فرمان سیمی با دو محرک دورانی ۲۱

شکل (۲۱-۲) سیستم فرمان سیمی با دو محرک و ۴ کنترل کننده ۲۲

شکل (۲۲-۲) موتور الکتریکی با محرک خطی الکترومکانیکی [55] ۲۳

شکل (۲۳-۲) مجموعه گیربکس و حس گر موقعیت سنج شفت [55] ۲۳

شکل (۲۴-۲) اجزا موتور با محرک خطی [56] ۲۴

شکل (۲۵-۲) انواع محرک‌های خطی [59] ۲۶

شکل (۲۶-۲) انواع محرک‌های الکترومکانیکی [60] ۲۷

شکل (۱-۳) فلوجارت طراحی سیستم فرمان برقی با محرک خطی ۳۰

شکل (۲-۳) دیاگرام فرمان خودرو [34] ۳۳

شکل (۳-۳) دیاگرام چرخ های جلو [34] ۳۴

شکل (۴-۳) دیاگرام نیرویی موتور با محرک خطی [56] ۳۶

شکل (۵-۳) معادله نیروی میله خروجی [56] ۳۷

- شکل (۳-۶) شماتیک سیستم فرمان برقی با محرک خطی ۳۸
- شکل (۳-۷) شماتیک سیستم فرمان سیمی (الف) سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی (ب) سیستم فرمان سیمی با موتور دورانی ۳۹
- شکل (۳-۸) دیاگرام فرمان خودرو ۴۰
- شکل (۳-۹) نمودار نیرویی موتور با محرک خطی ۴۱
- شکل (۳-۱۰) شماتیک سیمولینک سیستم فرمان برقی سیمی ۴۳
- شکل (۳-۱۱) نمودار خروجی در حالت بدون اعمال نسبت دنده ۴۴
- شکل (۳-۱۲) نمودار خروجی در حالت اعمال نسبت دنده ۴۵
- شکل (۳-۱۳) نمودار صحنه‌گذاری سیستم موتور با محرک خطی ۴۵
- شکل (۳-۱۴) نمودار صحنه‌گذاری سیستم محرک خطی الکترومکانیکی [62] ۴۶
- شکل (۳-۱۵) تابع تبدیل ورودی سیستم فازی [74] ۴۹
- شکل (۳-۱۶) شکل سطح ΔKP ۵۱
- شکل (۳-۱۷) شکل سطح ΔKI ۵۱
- شکل (۴-۱) شکل موج ضربه ۵۵
- شکل (۴-۲) نمودارهای خروجی از سیستم فرمان خودرو سیستم (الف) زاویه تایلر خودرو (ب) مقدار خطای خروجی تایلر خطی (پ) مقدار نیروی ورودی به تایلر از سمت موتور الکتریکی ۵۶
- شکل (۴-۳) زاویه خروجی چرخ (الف) مقدار زاویه خروجی تایلر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ب) مقدار زاویه خروجی تایلر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی ۵۸
- شکل (۴-۴) مقدار خطای خروجی تایلر (الف) در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ب) در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی خطی (پ) مقدار نیروی ورودی به تایلر از فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ت) مقدار نیروی ورودی به تایلر از فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی ۵۹
- شکل (۴-۵) شماتیک محل قرارگیری الگوریتم ژنتیک ۶۱
- شکل (۴-۶) نمودارهای خروجی از سیستم فرمان خودرو با کنترل کننده Fuzzy-PID (الف) زاویه فرمان تایلر خودرو (ب) مقدار خطای خروجی تایلر (پ) مقدار نیروی ورودی به تایلر از سمت موتور الکتریکی ۶۲
- شکل (۴-۷) زاویه خروجی چرخ (الف) مقدار زاویه خروجی تایلر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیک خطی با بهینه‌سازی ژنتیک (ب) مقدار زاویه خروجی تایلر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی با بهینه‌سازی زیگلر-نیکولز ۶۳
- شکل (۴-۸) شماتیک سیستم فرمان با کنترل کننده Fuzzy-PID ۶۴
- شکل (۴-۱۰) نمودار زاویه تایلر خودرو در سه حالت زیگلر-نیکولز، ژنتیک الگوریتم و فازی ۶۶
- شکل (۴-۱۱) نمودار ورودی فرمان حالت مانا ۶۷
- شکل (۴-۱۲) نمودارهای خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور حالت مانا (الف) زاویه تایلر خودرو (ب) زاویه انحراف خودرو ۶۸

- شکل (۴-۱۳) نمودارهای خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور حالت مانا (الف) زاویه خروج از محور (ب) نیروی جانبی چرخ جلو (پ) نیروی جانبی چرخ عقب ۶۹
- شکل (۴-۱۴) نمودار مانور fishhook ۷۰
- شکل (۴-۱۵) نمودار خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور fishhook (الف) زاویه تایلر خودرو (ب) زاویه انحراف خودرو ۷۰
- شکل (۴-۱۶) نمودار خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور fishhook (الف) زاویه خروج از محور (ب) نیروی جانبی چرخ جلو (پ) نیروی جانبی چرخ عقب ۷۱

فهرست جداول

| | |
|----|--|
| ۱۳ | جدول (۱-۲) مزایا و معایب انواع سیستم فرمان |
| ۲۴ | جدول (۲-۲) مشخصات موتور با محرک خطی [49] |
| ۴۲ | جدول (۱-۳) داده‌های ورودی به سیستم فرمان برقی با محرک سیمی |
| ۵۰ | جدول (۲-۳) قوانین فازی برای ΔKP |
| ۵۰ | جدول (۳-۳) قوانین فازی برای ΔKI |
| ۵۰ | جدول (۴-۳) قوانین فازی برای ΔKD |
| ۵۵ | جدول (۱-۴) مقادیر PID |
| ۵۷ | جدول (۲-۴) مقادیر کنترل کننده ها در هر دو مدل سیستم فرمان |
| ۵۸ | جدول (۳-۴) جدول پارامتری نمودار ها |
| ۶۰ | جدول (۴-۴) جدول پارامتری نمودار ها |
| ۶۱ | جدول (۵-۴) ضرایب کنترل کننده |
| ۶۴ | جدول (۶-۴) جدول پارامتری نمودار ها |
| ۶۶ | جدول (۷-۴) جدول پارامتری نمودار ها |

فصل ۱ :

مقدمه

۱-۱- مقدمه

یکی از پارامترهای مؤثر در انتخاب نوع خودرو، راحتی چرخش غربیلک فرمان آن خودرو است. این موضوع سازندگان خودرو را بر آن داشته است که جهت تسهیل در چرخش فرمان و به تبع آن کاهش خستگی راننده و افزایش ایمنی و فراهم کردن کنترل بهتر خودرو سیستم‌های کمکی به سیستم فرمان خودرو اضافه کنند [1]. مهندسين و محققان بسياری در زمینه‌هایی از جمله فناوری اطلاعات، مواد پیشرفته، سیستم‌های استحکامی و ایرودینامیکی به منظور افزایش کارایی خودرو و تقویت ایمنی مسافر با صنعت خودروسازی همکاری کرده‌اند. اخیراً، کنترل و هدایت خودرو از طریق سیم^۱ یکی از فناوری‌هایی است که در خودرو ورود کرده است و بانام X-by-Wire شناخته می‌شود که هرروزه کاربردهای خودرویی بیشتر و پرفرودارتری را دارا شده است. این فناوری بیانگر آن است که احتمالاً در آینده نزدیک از قطعات و سیستم‌های مکانیکی کمتری در خودرو استفاده می‌شود و به جای آن از سامانه‌های الکترومکانیکی، بین انسان و خودرو مانند دریچه گاز سیمی^۲ (TBW)، ترمز سیمی^۳ (BbW) و فرمان سیمی^۴ (SbW) استفاده شود [2-3]. از این رو اجزایی چون ستون فرمان، شافت‌ها، پمپ و تسمه‌ها، از ساختمان خودرو حذف شده‌اند، که باعث کاهش فضای اشغالی و کاهش هزینه تمام شده خودرو می‌شود. به دلیل اینکه سیستم فرمان از اهمیت اساسی در نقش راننده در تعامل با وسیله نقلیه برخوردار است، سیستم فرمان سیمی و کنترل‌کننده‌های سیستم برای تنظیم دقیق عملکرد و سایل نقلیه توجه زیادی را از صنعت خودرو به خود جلب کرده است [4-5].

گرچه سیستم‌های کنترلی فرمان سیمی با بهبود پایداری وسایل نقلیه جاده‌ای و راحتی رانندگان به موفقیت بزرگی دست یافته‌اند، اما هنوز هم اطمینان از عملکرد خوب فرماندهی در این سیستم وجود ندارد، به خصوص هنگامی که وسیله نقلیه غالباً شرایط غیرمنتظره‌ای از جاده را تجربه می‌کند. بنابراین، باید قطعات برای سیستم فرمان سیمی به گونه‌ای طراحی شود که عملکرد فرمان سیمی را در محیط‌های مختلف جاده‌ای تضمین کند. برای رسیدن به این مطلوب طرح پیشنهادی این است که برای افزایش اطمینان و کنترل‌پذیری و همین‌طور کاهش وزن تمام شده خودرو از محرک خطی الکترومکانیکی در سیستم فرمان سیمی استفاده شود.

¹ X-By-Wire

² Throttle-by-Wire

³ Brake-by-Wire

⁴Steer-by-wire

۱-۲- اهداف پایان نامه

هدف در این پایان نامه، مورد بررسی قرار دادن بهبود سیستم فرمان برقی سیمی با استفاده از محرک خطی الکترومکانیکی^۱ است، که این محرک خطی الکترومکانیکی به جای دنده شانهای و پینیون^۲ و موتور دورانی در مجموعه فرمان سیمی عادی مورد استفاده قرار گرفته و نقش موتور الکتریکی دورانی و شانهای و پینیون فرمان را ایفا می کند. تخمین مقدار نیروی وارده به چرخ ها و همین طور سرعت عمل سیستم و افزایش کنترل پذیری این سیستم مورد نظر می باشد و در پایان صحت گذاری با استفاده از این سیستم نسبت به سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی مورد مطالعه قرار می گیرد.

۱-۳- ساختار پایان نامه

در فصل ۱ مقدمه ای بر استفاده از کنترل خودرو به وسیله سیم و همین طور سیستم فرمان سیمی به اختصار بیان شد. در فصل ۲ پیشینه تحقیق و مروری بر انواع سیستم های فرمان و همین طور محرک خطی الکترومکانیکی و کار های انجام شده در زمینه سیستم فرمان سیمی و محرک خطی الکترومکانیکی مورد بررسی قرار می گیرد. در فصل ۳ مدل دینامیکی سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی استخراج خواهد شد که این مدل تشکیل شده است از دو مدل سیستم فرمان برقی سیمی و سیستم محرک خطی الکترومکانیکی و به صحت گذاری مدل فرمان مورد نظر نیز پرداخته شده است. سپس توضیحاتی در مورد مدل خودرو دو چرخ و الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی سیستم مورد نظر ارائه می شود. در فصل ۴ به استخراج نتایج سیستم فرمان طراحی شده و مقایسه این نتایج با سیستم فرمان سیمی پرداخته می شود، سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم fuzzy-pid به بهینه سازی سیستم فرمان مورد نظر پرداخته می شود تا بتوان با کمترین نیرو اعمالی از سمت موتور الکتریکی با محرک الکترومکانیک خطی سرعت پاسخ سیستم را به بهینه ترین حالت رساند.

1 Linear Actuator

2 Rack and pinion

فصل ۲ :

مروری بر منابع

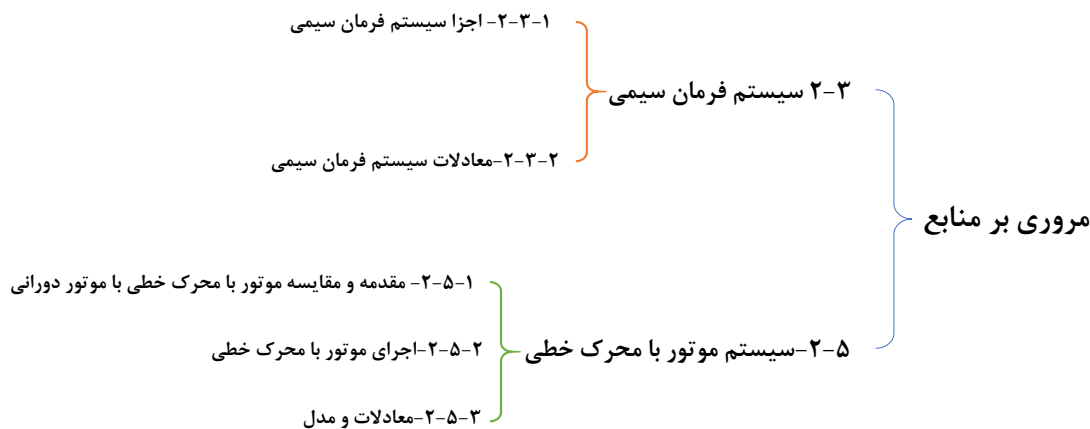
۲-۱- مقدمه

از آنجاکه مسیر پیموده شده توسط خودرو همیشه مستقیم نیست، باید در مقاطعی از سفر تغییراتی در موقعیت و مسیر خودرو ایجاد شود.

راننده در خودرو سه وظیفه اصلی دارد که عبارت‌اند از: ۱- کنترل وسیله نقلیه ۲- پیمایش مسیر ۳- جلوگیری از ایجاد خطر [6]. در این فصل انواع سیستم فرمان به صورت مفصل مورد بررسی قرار می‌گیرد تا به درک درست‌تری از رانندگی و هدایت در خودرو برسیم.

برای درک بهتر مروری بر منابع سیستم فرمان سیمی و محرک الکترومکانیکی خطی از روند نما بیان شده

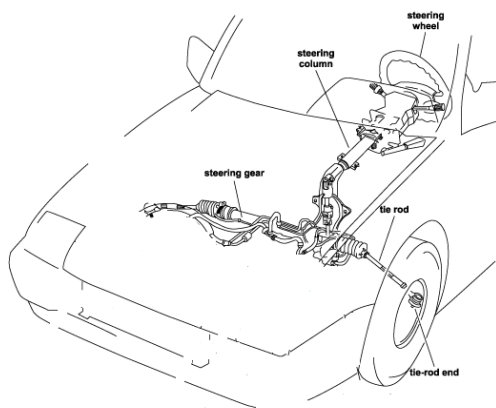
در شکل (۲-۱) استفاده می‌کنیم:



شکل (۲-۱) روند نما مروری بر منابع

۲-۲- فرمان

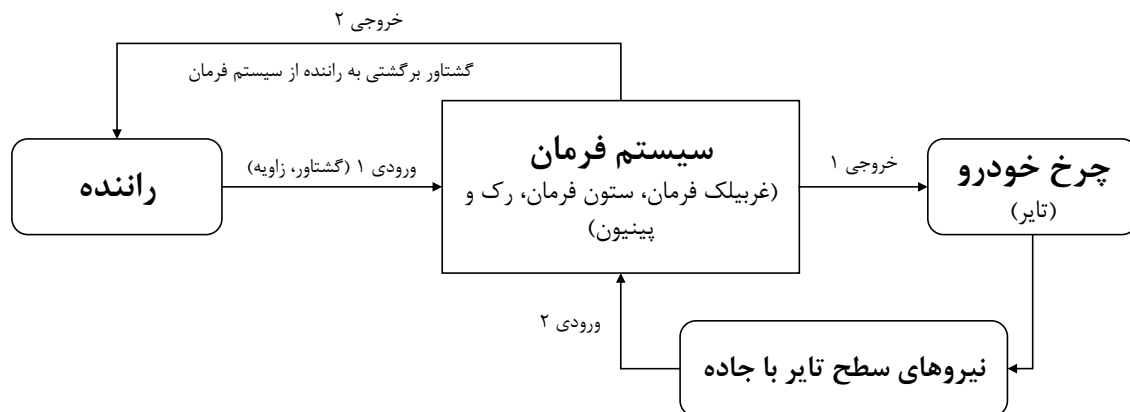
فرمان دادن با چرخاندن غربیلک فرمان خودرو شروع می‌شود. با چرخاندن فرمان قطعاتی از قبیل میل فرمان، اتصالات کاردانی، اتصال شانه‌ای و پینیون و اتصالات سیبکی که به چرخ وصل شده است شروع به حرکت می‌کنند [7]. نمای کلی از مجموعه سیستم فرمان که بر روی خودرو نصب شده است در شکل (۲-۲) آورده شده است:



شکل (۲-۲) نمایی از سیستم فرمان خودرو [7]

راننده با چرخاندن فرمان، باعث تولید نیروهای در قسمت تماس تایر با جاده می‌شود. بر اساس طراحی سیستم، نیروهای تولیدشده در چرخ به هندسه فرمان، شتاب جانبی وسایل نقلیه، زاویه فرمان و سرعت خودرو بستگی دارند.

از طرفی، نیروهای تولیدشده در منطقه تماس تایر با جاده از طریق فرمان به‌عنوان گشتاور بازخورد به راننده منتقل می‌شوند. نیروهایی که به غربلیک فرمان منتقل می‌شوند حاوی اطلاعاتی در مورد گشتاور آنی از جاده هستند، این گشتاور به راننده در کنترل جهت و تخمین نیروی موردنظر جهت هدایت خودرو کمک می‌کند [8]. این بازخورد از طریق حس‌گرهای اختصاصی در بدن درک می‌شود. همان‌طور که در شکل شماتیک (۲-۳) نشان داده شده است، گشتاور بازخورد نیز به‌شتاب جانبی خودرو وابسته است و رانندگان می‌توانند علاوه بر اطلاعات بصری، از گشتاور بازخورد نیز استفاده کنند تا بتوانند خودرو را به نحو مطلوب هدایت کنند [8]. این شماتیک یک سیستم فرمان مکانیکی را نشان می‌دهد بر اساس ورودی و خروجی سیستم، که دارای دو ورودی و دو خروجی است: (۱) نیروی دست راننده که به‌عنوان ورودی اولیه بوده و نیروی به وجود آمده در سطح تماس تایر با جاده که به‌عنوان ورودی‌های سیستم فرمان می‌باشند. (۲) خروجی‌های که در سیستم فرمان وجود دارد نیروی وارده برای به وجود آمده زاویه در تایر است و نیروی بازخوردی که از سیستم فرمان به راننده وارد می‌شود برای اطلاع از اطلاعات سطح جاده.



شکل (۳-۲) شماتیک سیستم فرمان خودرو

درحالی که گشتاور بازخورد به دلایلی که در بالا ذکر شد مهم است، همچنین خصوصیات دیگری نیز توسط مکانیسم فرمان تعریف شده و توسط راننده درک می شود که به طور غیرمستقیم به فرمان دادن کمک می کند بلکه به تجربه کلی فرمان نیز کمک خواهد کرد.

۲-۲-۱- سیستم فرمان مکانیکی

معمولی ترین نوع سیستم فرمان، سیستم دنده شانهای و پینیون است. پینیون حرکت دورانی غربلیک فرمان را به دنده شانهای انتقال می دهد، دنده شانهای نیز حرکت خطی را از طریق مفصل ها به چرخ های خودرو منتقل می کند. همان طور که در شکل (۲-۴) ملاحظه می شود در این سیستم، از سیستم های کمکی خبری نبوده و نیروی دست راننده از طریق غربلیک فرمان و ستون فرمان به مجموعه دنده شانهای و پینیون و چرخ ها منتقل می شود که این نیرو تنها عامل تعیین کننده مقدار زاویه چرخ است. در این شرایط نیرو و زاویه ی تولیدی در چرخ خودرو مستقیماً به نیرو و زاویه دست راننده بستگی دارد که باعث شده ایمنی و راحتی راننده خودرو را کاهش دهد و در درازمدت باعث ایجاد خستگی در راننده خواهد شد [9,10].



شکل (۲-۴) سیستم فرمان معمولی [15]

برای برطرف کردن این اشکالات و کمک به دست راننده از سیستم های کمکی فرمان استفاده شده است. لازم به ذکر است که، برای سیستم های ^۱HPAS و سیستم ها ^۲EPAS، مبانی کاری این است که از طریق شافت مکانیکی و دنده شانهای فرمان به نیروی دست راننده کمک کنند تا راننده حداقل نیرو را برای فرمان

¹ electric hydraulic power assisted steering

² electric power assisted steering

دادن به خودرو به کار ببرد. در سیستم فرمان معمولی کل گشتاور فرمان مستقیماً از طریق شافت مکانیکی به چرخ های منتقل می شود، در نتیجه از مدل کلی تر و ساده تر برای سیستم های فرمان معمولی استفاده شده است که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است [10,9]. اطلاعات اولیه در مورد مدل و عملکرد سیستم های HPAS^۱ و EPAS^۲ به طور خلاصه در بخش های بعدی مورد بیان قرار خواهد گرفت [11]. از جمله مزایای این سیستم می توان به هزینه ساخت کم و سادگی ساختار و معایب سیستم نیز می توان به دقت پایین و عملکرد سخت سیستم اشاره کرد.

۲-۲-۲- سیستم های کمکی فرمان

یکی از پارامترهای مؤثر در انتخاب خودرو، راحتی چرخش غربیلک فرمان خودرو است. این موضوع سازندگان خودرو را بر این داشته است که جهت تسهیل در چرخش فرمان و به تبع آن کاهش خستگی راننده و همچنین افزایش ایمنی با فراهم کردن کنترل بهتر در جاده های خشن، سیستم های کمکی فرمان را به خودرو اضافه کنند. وظیفه اصلی سیستم کمکی فرمان در وسایل نقلیه جاده ای، کاهش نیرو اعمالی دست راننده برای اعمال گشتاور اضافی در سیستم فرمان مکانیکی در وضعیت نامناسب رانندگی مانند مانور سرعت کم و موارد پارک کردن خودرو است. به طور کلی، سیستم های کنترل HPAS و EPAS وظیفه دارند که به راننده جهت سهولت در عمر فرمان دادن به خودرو کمک کنند. مقدار نیروی کمکی از طریق حس گر مکانیکی یا الکتریکی اندازه گیر نیرو و زاویه فرمان سنجیده می شود.

۲-۲-۲-۱- سیستم فرمان کمکی هیدرولیک

سیستم فرمان کمکی HPAS، نسل اولیه سیستم های کمک فرمان است که وظیفه کمک کردن به سیستم فرمان مکانیکی را با استفاده از فشار روغن هیدرولیک که توسط پمپ هیدرولیک از موتور خودرو تأمین می شود، را انجام می دهد. علاوه بر آن، سیستم هیدرولیک به صورت مرکز آزاد (Open-Center) عمل می کند؛ یعنی حتی در زمان هایی که خودرو به صورت مستقیم در حال حرکت بوده و هیچ انحرافی انجام نمی دهد، این سیستم به پمپ کردن روغن ادامه می دهد و از خودرو توان دریافت می کند [12,13].

اجزای اصلی سیستم HPAS عبارتند از پمپ هیدرولیک، شیر چرخشی و جک هیدرولیکی. شکل (۵-۲) واحد فرمان کمکی را با نمای دقیق تری توضیح داده است، جایی که فرمان از طریق دریچه ای که به عنوان

¹ electric hydraulic power assisted steering

² electric power assisted steering

عنصر کنترل در واحد فرمان در نظر گرفته شده است به دنده شانه‌ای فرمان متصل می‌شود. جابجایی سوپاپ به همراه سیستم هیدرولیک فشار داخل سیلندر را به منظور اضافه کردن کمک‌های مناسب به ستون فرمان تنظیم می‌کند مطابق شکل (۵-۲) از یک نمایش ساده سیستم کاربردی^۱ EHPAS استفاده می‌شود [14]. در این سیستم توان توسط پمپ هیدرولیک تولید شده، روغن پمپ شده به سمت شیر هیدرولیک فرستاده شده و این شیر بنا به زاویه و گشتاور وارده از سمت راننده مقدار فشار روغن و جهت حرکت روغن را تغییر می‌دهد [14].



شکل (۵-۲) سیستم فرمان هیدرولیکی [15]

اجزا تشکل دهنده هیدرولیکی که به قیمت مکانیکی اضافه شده‌اند:

- پمپ هیدرولیک با مخزن روغن و چرخ تسمه
- شیرهای کنترل
- لوله‌های رابط
- سیلندر
- تسمه

از جمله مزایای این سیستم می‌توان به افزایش عمر قطعات به دلیل استفاده از روغن و سادگی طراحی و از جمله معایب این سیستم نیز می‌توان به حساسیت به روغن و آلاینده‌گی سیستم نیز اشاره کرد.

¹ electric hydraulic power assisted steering

۲-۲-۲-۲ - سیستم فرمان الکتروهیدرولیک

سیستم فرمان‌های الکتروهیدرولیک که بانام اختصاری^۱ EHPAS نشان داده می‌شوند برای برطرف کردن معایب سیستم فرمان هیدرولیک بوده و استفاده از مزایای این سیستم که مهم‌ترین تغییری که در این سیستم به وجود آمده این است که به‌جای استفاده از موتور خودرو از یک موتور الکتریکی استفاده‌شده که این موتور وظیفه تأمین نیروی موردنیاز برای تولید فشار در روغن را بر عهده دارد.

در این سیستم یک موتور الکتریکی وظیفه تولید فشار روغن را در سیستم بر عهده دارد و فشار روغن را به سمت شیر هیدرولیک فرستاده و این شیر مسیر موردنظر و فشار روغن را تعیین می‌کند [16].



شکل (۲-۶) سیستم فرمان الکتروهیدرولیک [15]

۲-۲-۲-۳ - سیستم کمکی برقی فرمان

با توجه به اینکه راندمان سیستم‌های معمولی^۱ HPAS و EHPAS به‌ویژه برای رانندگی در بزرگراه‌ها بسیار پایین است، سیستم‌های^۲ EPAS اخیراً به‌عنوان یک جایگزین در وسایل نقلیه کوچک و متوسط مورد استفاده قرار گرفته است. مزایای استفاده از سیستم‌های EPAS عبارت‌اند از استقلال موتور و مصرف سوخت، مقاومت در برابر حس فرمان، مدولار و مونتاژ سریع و سازگاری با محیط‌زیست. عملکرد یک سیستم EPAS مجهز به موتور DC در شکل (۲-۷) نشان داده شده است [17-19]. هنگامی که راننده غربلیک فرمان را می‌چرخاند، گشتاور فرمان توسط یک حس‌گر گشتاور سنج نصب شده بین غربلیک و موتور شنا سایی

¹ electric hydraulic power assisted steering

می شود. گشتاور اندازه‌گیری شده راننده برای تعیین میزان گشتاور کمکی که توسط موتور الکتریکی تأمین می شود، استفاده می شود. گشتاور کمکی که با افزایش گشتاور قابل تنظیم بر اساس سرعت خودرو ایجاد می شود و گشتاور موتور اعمال شده با گشتاور راننده ترکیب شده است تا کل گشتاور فرمان را برای چرخ های جلو فراهم کند [20].



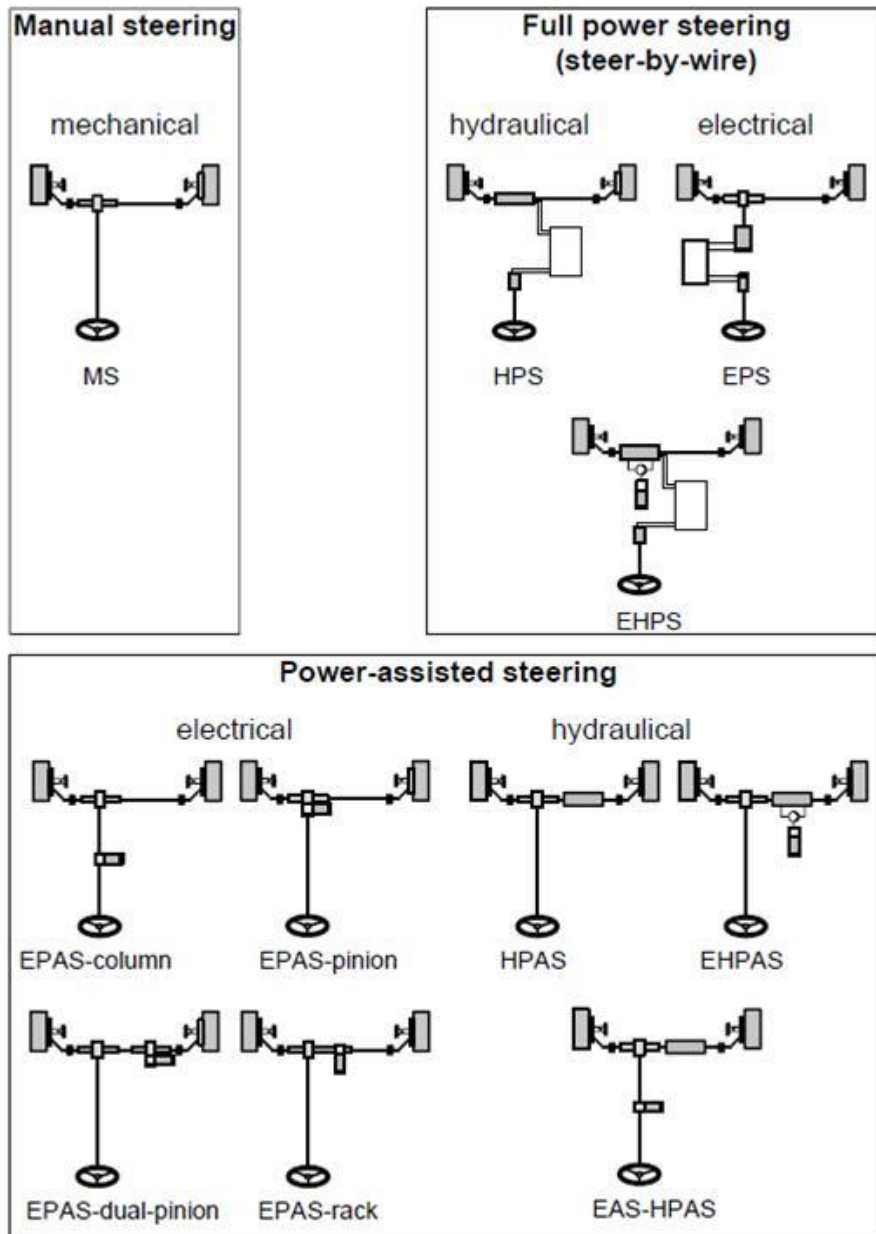
شکل (۲-۷) سیستم فرمان برقی [15]

اهداف سیستم کنترل EPAS اطمینان از گشتاور کمکی مناسب، پایداری سیستم، کاهش لرزش، بهبود برگشت پذیری غریبک فرمان و عملکرد کنترلی خودرو بهبود می یابد. علاوه بر این، سیستم کنترل باید در برابر خطاهای مدل سازی سیستم و عدم قطعیت پارامترها و همچنین اختلال در جاده ها محکم و با اطمینان باشد [21].

از جمله مزایای این سیستم نسبت به سیستم های پیشین می توان به چند مورد از جمله: حذف قطعات مکانیکی و وزن کمتر و غیره است.

۲-۲-۲-۴ - مقایسه انواع سیستم های فرمان

شکل (۸-۲) نشان دهنده شماتیک انواع سیستم فرمان خودرو است.



شکل (۲-۸) مجموعه سیستم فرمان‌های مورد استفاده در خودرو [22]

سیستم‌های فرمان ارائه شده در بالا دارای مزایا و معایبی بوده‌اند که در جدول (۱-۲) به صورت خلاصه

بیان شد است:

جدول (۱-۲) مزایا و معایب انواع سیستم فرمان

| معایب | مزایا | نوع فرمان |
|---|---|----------------|
| ۱. استفاده از توان موتور ۲. افزایش مصرف سوخت ۳. آلودگی محیط زیست ۴. استفاده دائم از توان موتور | ۱. سهولت رانندگی و کاهش رانندگی راننده ۲. کارکرد فرمان هنگام قطع هیدرولیک ۳. عدم انحراف خودرو هنگام عبور از موانع ۴. کاهش اثر تیزی فرمان | هیدرولیکی |
| ۱. نشستی روغن ۲. آلودگی محیط زیست ۳. تغییر خواص روغن بنا به شرایط مختلف ۴. کنترل پذیری کمتر نسبت به الکتریکی | ۱. حذف پمپ هیدرولیک ۲. گشتاور مورد نیاز پایین تر ۳. کاهش مصرف سوخت ۴. آلودگی محیط زیست کمتر ۵. وزن کم نسبت به هیدرولیک | الکتروهیدرولیک |
| ۱. هزینه اولیه بیشتر ۲. سیستم کنترلی سخت تر | ۱. حذف پمپ هیدرولیک ۲. وزن کمتر نسبت به هیدرولیک ۳. ۸۵٪ در مصرف انرژی صرفه جویی شده ۴. قابلیت اطمینان بالا نسبت به هیدرولیک ۵. گشتاور مورد نیاز پایین ۶. ایمنی در سرعت های مختلف ۷. کاهش مصرف سوخت ۸. عدم آلودگی محیط زیست | الکتریکی |

۲-۳- مبانی سیستم فرمان سیمی

به منظور غلبه بر مشکلات ناشی از شافت مکانیکی در سیستم های فرمان معمولی، سیستم فرمان جدیدی موسوم به فرمان سیمی SBW مورد توجه محققان و مهندسان صنعت خودرو قرار گرفته است. انتظار می رود که فرمان های SBW کاملاً جایگزین شافت مکانیکی در وسایل نقلیه مدرن شود تا در آینده نزدیک ایمنی و راحتی قابل توجهی به طور قابل توجهی بهبود یابد [23-25].



شکل (۲-۹) سیستم فرمان سیمی [26]

همان طور که در شکل (۲-۹) دیده می‌شود سیستم فرمان موردنظر دارای اتصال بین چرخ و غربیلک فرمان نبوده و دو موتور الکتریکی وظیفه‌دارند نیرو دست راننده را برای حرکت چرخ‌ها به وجود بیاورند و همچنین حس جاده را جهت تشخیص راننده از سطح جاده به دست راننده منتقل کنند [27].

این سیستم دارای مزایا و معایبی بوده که در زیر بیان شده است:
مزایای سیستم فرمان سیمی:

۱. ساده‌تر کردن طراحی خودرو به دلیل نداشتن ستون فرمان
۲. استفاده بهتر از فضای موتور جهت طراحی به دلیل نداشتن ستون فرمان
۳. ایمنی بیشتر در تصادفات به دلیل نداشتن ستون فرمان در خودرو
۴. حالت‌های فرمان دادن به چرخ‌های جلو را می‌توان به بی‌نهایت حالت تنظیم کرد به دلیل نداشتن ستون فرمان
۵. کاهش نویز و صدای وارده به کابین به دلیل نداشتن ستون فرمان
۶. بهینه طراحی کردن تعلیق به دلیل عدم احساس راننده از وضعیت جاده به صورت مستقیم

معایب سیستم فرمان سیمی:

۱. امنیت پایین سیستم به دلیل نداشتن ستون فرمان (در صورت قطع برق سیستم)

۲-۳-۲- اجزای سیستم فرمان سیمی

۱. موتور محرک

محرک مورد استفاده در سیستم فرمان خودرو باید از قدرت کافی برای چرخاندن چرخ ها خودرو برخوردار باشد. معمولاً برای محرک چرخ های خودرو از موتور بدون براش DC که در شکل (۱۰-۲) آورده شده است استفاده می شود. این موتور ۱۲ ولت بوده و آمپر مورد استفاده این موتور حدود ۳-۴ آمپر است. شکل (۲-۱۰) نشان دهنده این موتور بوده است [28]:



شکل (۲-۱۰) موتور محرک چرخ DC [28]

۲. موتور فیدبک

موتور بازخورد که وظیفه دارد اطلاعات وارده از سمت جاده به سیستم فرمان را برای راننده شبیه سازی کند، لازم نیست به اندازه موتور محرک چرخ پر قدرت باشد. در واقع، باید این موتور بسیار کم قدرت تر باشد تا بتواند به راحتی توسط راننده چرخانده شود. نمونه موتور مورد استفاده در شکل (۲-۱۱) آورده شده است. این موتور دارای ولتاژ ۱۲ ولت DC بوده و جریانی کمتر از ۱,۵ آمپر مصرف می کند [28].



شکل (۲-۱۱) موتور فیدبک DC [28]

۳. حس گر زاویه

حس گرهای زاویه ای در سیستم بسیار مهم هستند و باید بسیار دقیق باشند زیرا خطاها در نهایت کنترل

سیستم را برای راننده سخت تر می کند. شکل (۱۲-۲) حس گر زاویه سنج را نشان داده که زاویه ورودی از سمت راننده و همین طور زاویه خروجی از موتور دوم را اندازه گیری می کند و این اطلاعات را به کامپیوتر کنترل کننده سیستم فرمان اطلاع می دهد [28]:



شکل (۱۲-۲) حس گر زاویه [28]

اجرای تشکیل دهنده یک سیستم فرمان سیمی باید از حساسیت و دقت بالایی برخوردار باشد تا خطرات و اختلالات به وجود آمده در سیستم را به حداقل برسد.

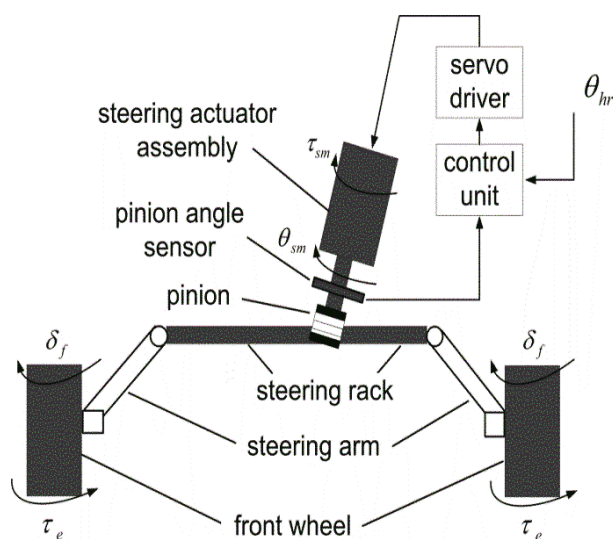
۲-۳-۳- پیشینه پژوهش

تاکنون به بیان انواع سیستم فرمان ها و معادلات سیستم فرمان سیمی پرداخته شده است. در ادامه، به بیان پیشینه ای از تحقیقاتی که در زمینه مدل سیستم فرمان برقی سیمی تا به حال ایجاد شده است پرداخته می شود.

- شرکت ZF توسط گرهارد و پیتر (۱۹۸۹) مروری بر انواع سیستم فرمان های کمکی و شبیه سازی از این سیستم ها داشته و به عملکرد فرمان برقی می پردازد. در این پژوهش فرمان فعال برقی به عنوان مقدمه سیستم فرمان سیمی (Steer by wire) معرفی شده است [29].
- هیتزر و سایدالد یکی از مهم ترین ایرادات سیستم هدایت سیم، نگرانی های ایمنی آن است. قابلیت اطمینان سیستم بسیار مهم است بنابراین برای جلوگیری از دست رفتن کامل کنترل، باید یک سیستم پشتیبان تهیه شود. یک پشتیبان مکانیکی یا دو برابر شدن سیستم الکتریکی راه حل های اصلی هستند. افزونگی هر دو سیستم هزینه های اضافی را ایجاد می کند [30].
- هودا و همکاران بر اساس مکان تحرک سیستم فرمان سیستمی سه طبقه بندی ایجاد کرده اند: این سیستم ها عبارتند از: سیستم فرمان سیمی با تحریک پینیون، سیستم فرمان سیمی با تحریک

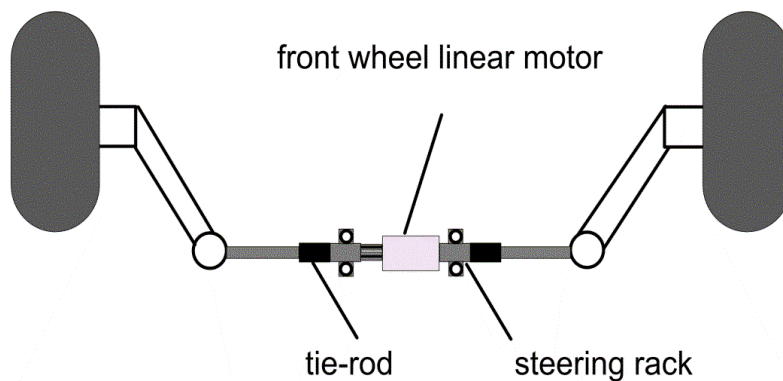
دنده شانه‌ای فرمان و نوع تحریک کردن هر چرخ به صورت جداگانه. نوع تحریک پینیون محبوب‌ترین نوع سیستم فرمان‌های سیمی بوده است به دلیل ساده بوده مدل و همچنین کاهش هزینه تولید اما از معایب این سیستم داشتن یک موتور الکتریکی است که در صورت ایجاد خطا فرمان پذیری کلی خودرو از دست خواهد رفت [31].

- عنبر کار و همکاران یک سیستم ایمنی برای سیستم‌های سیمی ارائه می‌دهد، اخیراً انواع مختلفی از سیستم‌های SBW در چندین نسخه ایجاد شده است [32]. این مدل از سیستم فرمان سیمی دارای شانه فرمان و مکانیزم دنده شانه‌ای و پینیون می‌باشد و به دلیل داشتن قطعات مکانیکی دارای سرعت عمل کمتر می‌باشد. این نوع سیستم فرمان به وضوح در شکل (۲-۱۵) آورده شده است.



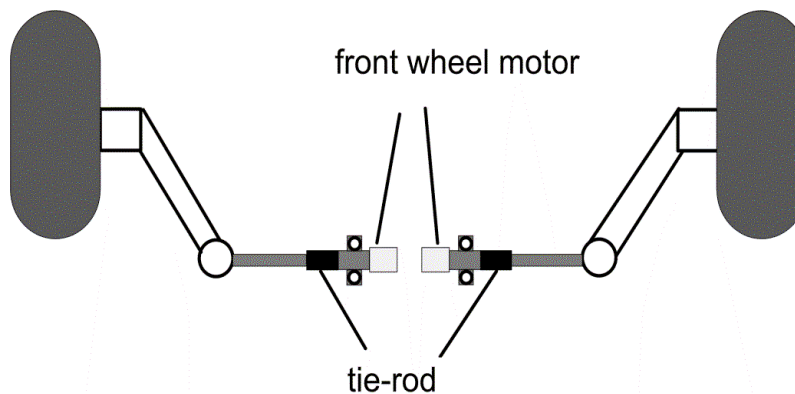
شکل (۲-۱۳) سیستم فرمان سیمی با تحریک پینیون [38]

- برخی از محققان با الهام از استفاده از نوع مدل تحریک پینیون، همان‌طور که در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است، مکانیزم فرمان سیمی با تحریک دنده شانه‌ای فرمان را پیشنهاد کرده‌اند. نوع محرک دنده شانه‌ای فرمان این مزیت را دارد که از هندسه اکرمین پیروی می‌کند و همراه سیستم‌های میل پیچشی و اتصالات مکانیکی تعلیق می‌تواند هماهنگ شود. پارک و همکاران این روش برای مدل‌سازی سیستم فرمان سیمی با تحریک دنده شانه‌ای فرمان را ارائه کرده‌اند [33].
- کیم و همکاران با استفاده از این روش به مزایای از جمله بهبود پایداری و مانور پذیری وسیله نقلیه رسیده‌اند (شکل (۲-۱۶)) [34].



شکل (۲-۱۴) سیستم فرمان سیمی با تحریک دنده شانه‌ای فرمان [34]

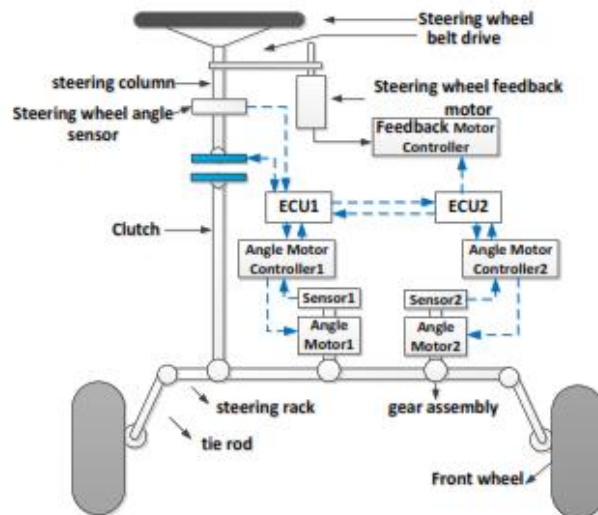
- در همین حال، کیم و همکاران مدل سیستم فرمان سیمی با نوع تحریک‌کننده میل رابط فرمان به چرخ را ایجاد کرده است که در این مدل از دو موتور الکتریکی مستقل در طرفین میله رابط مورد استفاده قرار داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲-۱۷) نشان داده شده است، مکانیسم فرمان چرخ جلو در سیستم SBW با نوع تحریک میل رابط فرمان شامل اتصال دنده شانه‌ای و پینیون نیست و دو موتور الکتریکی عملکرد سیستم فرمان خودرو را کنترل می‌کنند. این دو سیستم درعین حال که باید هر دو موتور الکتریکی دارای عملکرد یکسانی باشند نیاز است که از هندسه اکرمین نیز پیروی کنند که باید در مدل‌سازی خودرو چهارچرخ لحاظ شود [35].



شکل (۲-۱۵) سیستم فرمان سیمی با تحریک میل رابط فرمان [35]

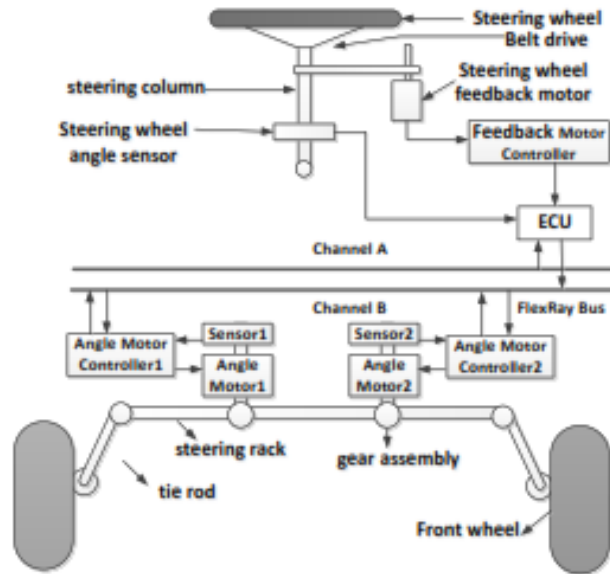
- ژانگ و جیانگ یک مدل کامل ریاضی از SBW با در نظر گرفتن دینامیکی فرمان، موتور بازخورد فرمان، موتور محرک چرخ جلو، مجموعه دنده شانه‌ای و پینیون و چرخ‌های جلو را ارائه داده‌اند [36].
- ستین و همکاران دینامیک تایر را در نظر نگرفته و مدل کنترل پیشنهادی برای سیستم فرمان

- سیمی ارائه کرده جهت بهبود ردیابی چرخ های جلو خودرو [37].
- اوندا و همکارانش یک سیستم کنترل چرخ ها برای فرمان SBW جهت تحمل خطا را پیشنهاد می کنند که در آن از ECU دو گانه برای کنترل موتورهای دو گانه فرمان استفاده می شود (شکل (۲-۱۸) [38].



شکل (۲-۱۶) سیستم فرمان سیمی با دو موتور محرک و دو کنترل کننده [45]

- یائو و همکاران یک سیستم SBW با دو موتور محرک فرمان ارائه می دهند تا امنیت و تقویت توانایی تحمل خطا و مشکلات سیستم را بیشتر کنند [39].
- لی و همکاران، در این مقاله از دو خط برای انتقال اطلاعات استفاده شده که یک کنترل کننده هر دو محرک را کنترل می کند که باعث کاهش هزینه تولید و همین طور هماهنگی بیشتر محرک ها بوده (شکل (۲-۱۹) [40].



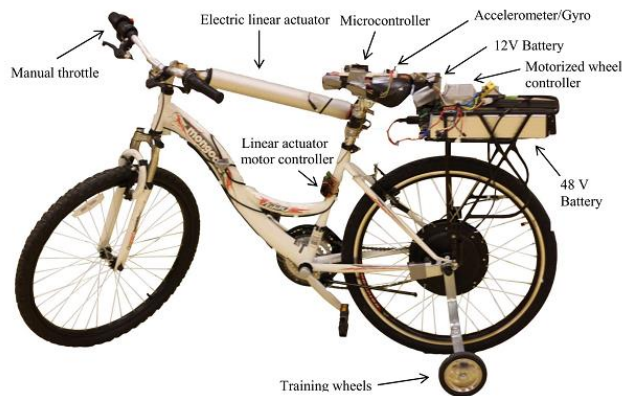
شکل (۲-۱۷) سیستم فرمان سیمی با دو محرک و یک کنترل کننده

- تنگویی و همکاران، از سیستم محرک خطی در سیستم فرمان سیمی در تراکتور استفاده کرده‌اند که باعث افزایش سرعت عمل سیستم فرمان شده است [41].



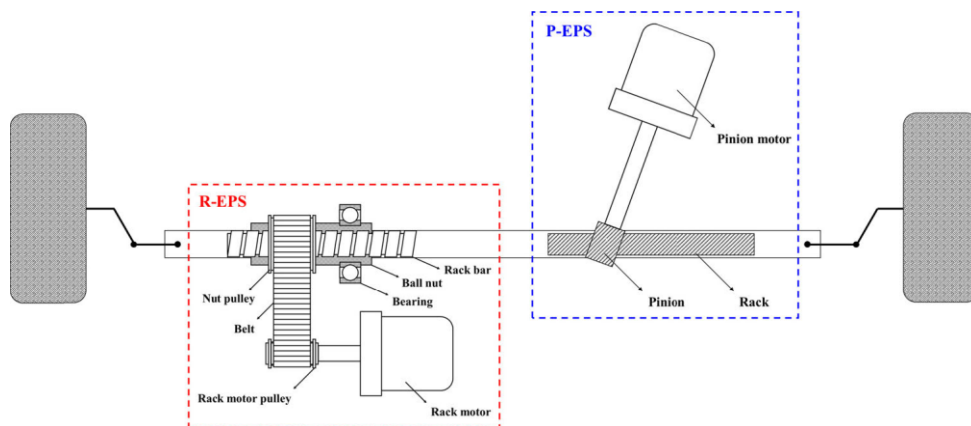
شکل (۲-۱۸) سیستم فرمان سیمی با محرک خطی مورد استفاده در تراکتور

- فاواز و همکاران، از موتور محرک الکترومکانیک خطی در دوچرخه‌های خودران استفاده کرده که باعث افزایش کنترل پذیری و ثبات دوچرخ شده است [42].



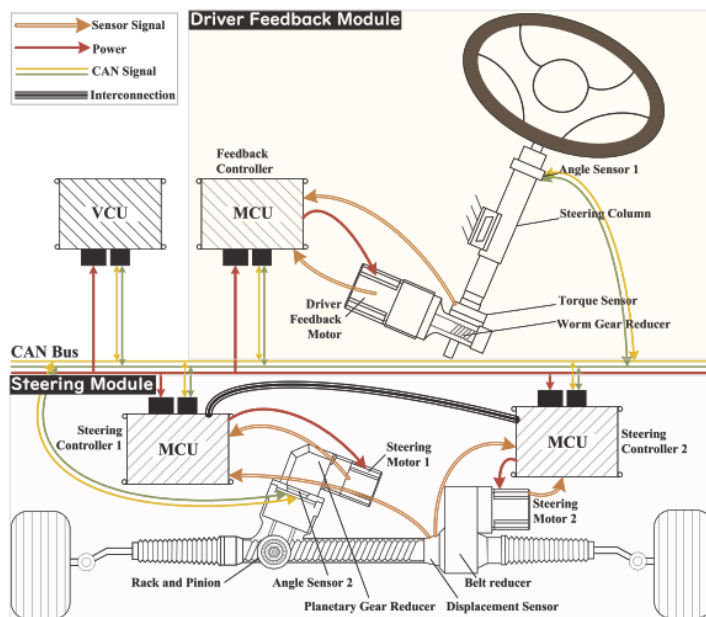
شکل (۲-۱۹) دوچرخ خودران با استفاده از موتور الکترومکانیک خطی

- هوانگ و همکاران، نیز برای افزایش کنترل پذیری سیستم فرمان خودرو از دو موتور دورانی برای محرک رک خودرو استفاده کرده اند که باعث افزایش سرعت عمل سیستم بهبود ایمنی و افزایش کنترل پذیری سیستم شده است [43].



شکل (۲-۲۰) سیستم فرمان سیستم با دو محرک دورانی

- هانک و همکاران، نیز برای افزایش ایمنی سیستم فرمان سیمی با دو محرک دورانی برای رک فرمان در برابر خطاهای به وجود آمده در سیستم از شبکه CAN با ۴ کنترل کننده استفاده کرده است تا بتواند ایمنی در سیستم فرمان سیمی را افزایش دهد. این سیستم به دلیل داشتن تعداد زیاد کنترل کننده و موتور محرک می تواند ایمنی سیستم را تضمین کند اما باعث افزایش وزن پیچیدگی و افزایش قیمت تمام شده می شود [44].



شکل (۲-۲۱) سیستم فرمان سیمی با دو محرک و ۴ کنترل کننده

- آقای وو و همکاران، با استفاده از سیستم فرمان سیمی و الگوریتم ژنتیک برای بهبود کارایی سیستم فرمان استفاده از نسبت دنده متغیر را پیشنهاد داده‌اند. که با انجام این عمل سیستم فرمان دچار چابکی در دوره‌های پایین و پایداری فرمان در دوره‌های بالا شده است [45].

۲-۴- مبانی موتور با محرک خطی

اصطلاح "محرک خطی" طیف گسترده‌ای از محصولات را در برمی‌گیرد که در با حرکت خطی بین دونقطه حرکت می‌کنند. محرک خطی الکترومکانیکی وسیله‌ای مکانیکی است که انرژی (انرژی از هوا، برق یا مایع) را برای تبدیل حرکت در یک خط مستقیم تبدیل می‌کند [47,46]. حرکت این موتور با حرکت دایره‌ای یک موتور الکتریکی معمولی در تضاد است. از این موتور برای اعمال نیرو و جابجایی و غیره می‌توان استفاده کرد به‌عنوان مثال می‌توان به: مسدود کردن، بستن، بیرون کشیدن، بلند کردن، فشار یا کشیدن.

محرک‌های خطی بر اساس فناوری‌های مورد استفاده از جمله: مکانیکی، الکترومکانیکی، الکتریکی مستقیم (موتور خطی)، هیدرولیک و پنوماتیک در دسترس هستند.

در حال حاضر محرک مورد نیاز بنا به محاسبه گشتاور، قدرت و خصوصیات دیگر که در قسمت قبل بیان شده انتخاب شده است. بنا به محاسبات انجام شده و استفاده از مدل دوچرخ خطی خودرو از یک محرک استفاده شده است [49,48].

این محرک خطی الکترومکانیکی با استفاده از یک موتور بدون جاروبک DC که دارای گشتاور بالایی است هدایت می‌شود که این موتور با ایجاد دوران و با استفاده از چرخ‌دنده‌ها و یک محرک به صورت خطی حرکت با اصطکاک کم را تولید می‌کند. این موتور قادر به تحمل نیرو به صورت استاتیکی هستند که در حالت خاموش هم وضعیت خود را حفظ می‌کنند. این موتورها از دوام و اطمینان بالایی نیز برخوردار هستند زیرا جنس قسمت‌های مختلف آن از فولاد و آلومینیوم است. در شکل (۲-۲۰) موتور محرک الکترومکانیکی خطی مورد استفاده در این پایان‌نامه آورده شده است [50].



شکل (۲-۲۰) موتور الکتریکی با محرک خطی الکترومکانیکی [55]

این موتورها دارای فیدبک موقعیت در قسمت پشتی بالای جعبه‌دنده هستند. همان‌طور که در شکل (۲-۲۱) آورده شده، موقعیت سنج شفت محرک را نشان می‌دهد که با استفاده از دو سیم اطلاعات را برای کنترل‌کننده موتور ارسال می‌کند.



شکل (۲-۲۳) مجموعه گیربکس و حس‌گر موقعیت سنج شفت [50]

اکچویاتور یا محرک به‌عنوان عملگر در سیستم قرار می‌گیرد و وظیفه دارد حرکت تولیدشده توسط محرک را به صورت خطی یا به صورت دورانی تبدیل کند. اکچویاتورها غالباً از یک موتور DC به‌عنوان محرک سیستم استفاده می‌کنند و این حرکت را به صورت دورانی یا به صورت حرکت خطی منتقل می‌کنند.

در این پایان نامه از محرک خطی الکترومکانیکی استفاده شده است زیرا در این اکچویاتور دیگر نیازی به تبدیل دور و همچنین نیاز به استفاده از مکانیزم های تبدیل دور زاویه ای (دورانی به خطی) وجود ندارد. از دیگر مزایای این محرک اشغال فضای کمتر و همچنین کاهش وزن تمام شده است [50].

جدول (۲-۲) مشخصات موتور محرک الکترومکانیک خطی موردنظر را بیان می کند:

جدول (۲-۲) مشخصات موتور با محرک خطی [50]

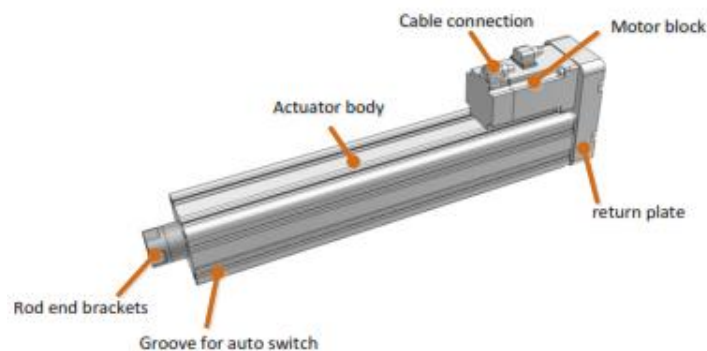
| مقادیر | پارامتر |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 4.504 kg | وزن کل |
| 6v- 12v | ولتاژ کاری |
| 3A | جریان کاری در حالت بدون بار |
| 3000 N | ماکسیمم نیرو |
| 66.80 mm per second | سرعت (بدون بار) |
| 46.99 mm per second | سرعت (بیشترین بار) |
| 10 K Ω potentiometer | بازخورد |

۲-۴-۱- اجرا موتور با محرک خطی

محرک خطی الکترومکانیکی در شکل (۲-۲۲) آورده شده است. همان طور که دیده می شود به صورت کلی از اجزای به شرح زیر تشکیل شده است [51]:

- موتور محرک
- گیربکس
- مجموعه مکانیکی محرک

قسمت های اشاره شده در ادامه تفصیل بیان خواهند شد:



شکل (۲-۲۴) اجزا موتور با محرک خطی [52]

محرک بنا به تعریفی که دارد وسیله‌ای است که اجزا را به حرکت درمی‌آورد. در موتور با محرک خطی، حرکت ابتدا توسط موتور DC تولید می‌شود و غالباً دور این موتور هزار دور در دقیقه است. این حرکت چرخشی پر سرعت توسط گیربکس کاهش پیدا می‌کند که این نسبت دنده حدوداً ۱:۱۰۰ است، به این معنا است که هر صد دور چرخشی موتور باعث ایجاد یک چرخش در خروجی گیربکس می‌شود.

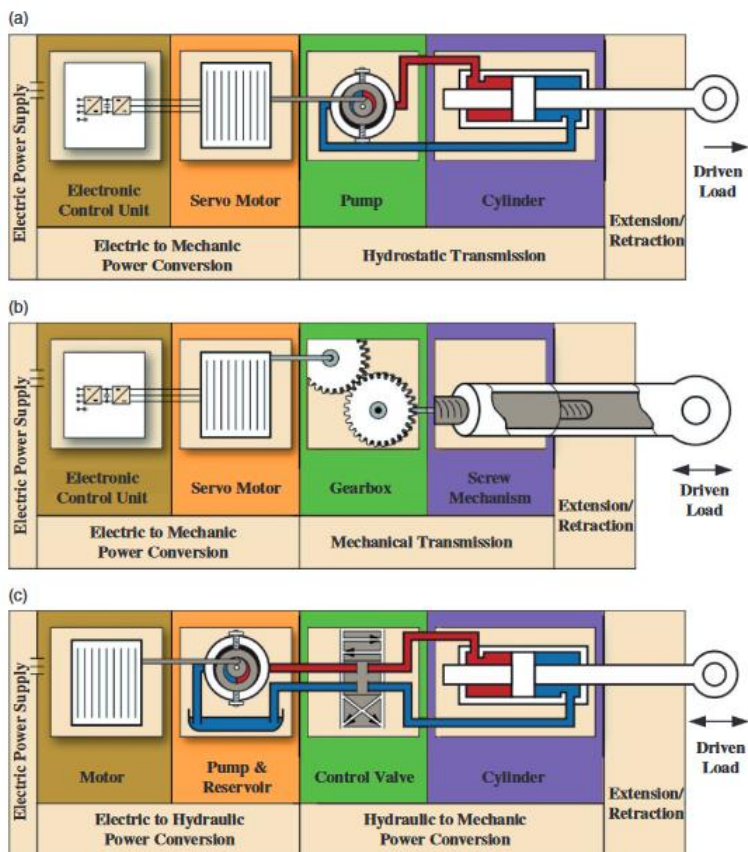
خروجی گیربکس به میله دارای رزوه وصل شده است که این میله دارای رزوه در داخل یک مهره قرار دارد که این مهره، مهره به دلیل شیار محدودکننده‌ای که در داخل بدنه محرک خطی الکترومکانیکی قرار دارد حرکت خطی می‌کند و نمی‌تواند بچرخد نسبت دنده بین چرخ‌دنده و میله رزوه دار ۱۵ است که بدین معنی است که در ۱۵ دور میله دارای رزوه باعث می‌شود پیچ که به خروجی سیستم متصل است یک اینچ جابجا شود.

سرعت موتور، گیربکس و نسبت دنده بین پیچ و مهره سرعت نهایی خروجی محرک خطی الکترومکانیکی را تعیین می‌کند.

۲-۴-۲- پیشینه پژوهش

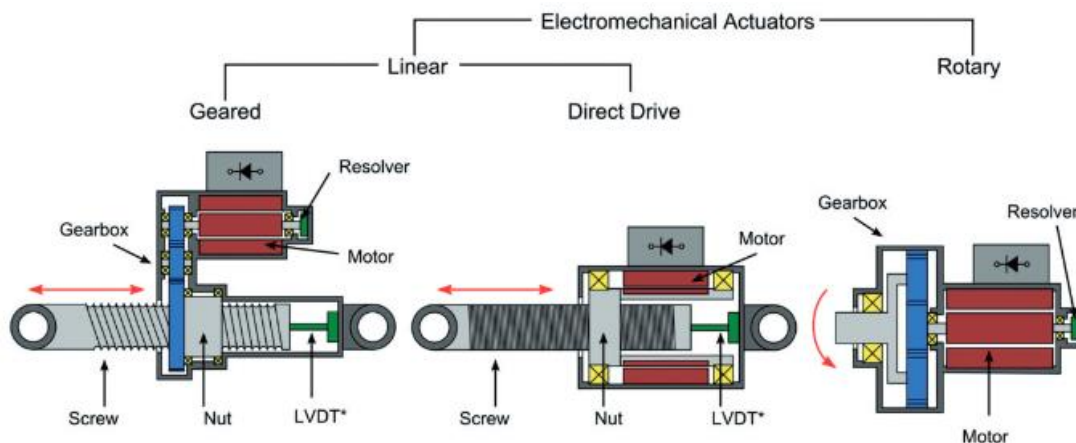
تاکنون به توضیحاتی در مورد موتور محرک الکترومکانیک خطی و معادلات این سیستم پرداخته شده است. در ادامه، به بیان پیشینه‌ای از تحقیقاتی که در زمینه موتور محرک الکترومکانیک خطی تا به حال ایجاد شده است پرداخته می‌شود.

- تنگ در پایان‌نامه خود از سیستم موتور محرک الکترومکانیک خطی برای اتوماتیک کردن سیستم کلاچ و تغییر نسبت دنده خودرو استفاده کرده است [53].
- آنتونک در پایان‌نامه خود از سیستم محرک الکترومکانیک خطی برای تنظیم حالت باله‌های هواپیما استفاده شده که با استفاده از کنترل‌کننده فازی به بهینه کردن این سیستم پرداخته شده [54].
- گوان و همکاران در مقاله خود به بیان انواع سیستم‌های محرک خطی بر اساس نوع حرکت محرک خطی پرداخته‌اند. که عبارت‌اند از (A) سیستم محرک خطی الکترومکانیکی (B) سیستم محرک خطی الکترومکانیک (C) سیستم محرک خطی مکانیکی با راه‌انداز برقی که هر کدام دارای مزایا و معایبی بوده‌اند که سیستم محرک خطی الکترومکانیکی دارای استهلاک کمتر سرعت عمل بیشتر و آلاینده‌گی کمتر نسبت به باقی مدل‌ها بوده است [55].



شکل (۲-۲۵) انواع محرک‌های خطی [55]

- وانگر و همکاران نیز در مقاله خود به دسته‌بندی انواع سیستم‌های محرک الکترومکانیک پرداخته‌اند. برای سیستم محرک الکترومکانیک سه نوع مدل در نظر گرفته شده است که عبارت‌اند از: ۱. محرک الکترومکانیک خطی دنده‌ای ۲. محرک الکترومکانیک خطی با محرک مستقیم ۳. محرک الکترومکانیک چرخشی. این سیستم‌ها هر کدام دارای مزایا و معایبی بوده‌اند که در این پایان‌نامه از مدل محرک الکترومکانیک خطی دنده‌ای استفاده شده است به دلیل ایجاد نیرو و توان بیشتر نسبت به نمونه‌های دیگر سیستم محرک الکترومکانیک [56].



شکل (۲-۲۶) انواع محرک‌های الکترومکانیکی [56]

تحقیقات اخیر در زمینه استفاده از موتور الکترومکانیک خطی در خودرو و سیستم فرمان سیمی در جدول ... آورده شده است:

۲-۵- نتیجه‌گیری

در ابتدای این فصل آشنایی با انواع سیستم‌های فرمان در خودرو و مزایا و معایب هر یک پرداخته شده است. به دلیل داشتن مزایای زیادی که سیستم فرمان سیمی دارد از این سیستم استفاده شده است. سیستم محرک الکترومکانیک خطی دارای مزایای نداشتن آلایندگی و سرعت عمل بیشتر نسبت به نمونه‌های هیدرولیک بوده و سیستم محرک الکترومکانیک خطی دارای گشتاور و توان تولیدی بیشتر نسبت به مدل‌های محرک الکترومکانیکی بوده است. تحقیقات اخیر انجام شده در زمینه سیستم فرمان سیمی انجام شده نشان دهند این است که نمونه سیستم فرمان‌ها با محرک دورانی دارای وزن بیشتر و همچنین سرعت عمل و ایمنی کمتری بوده‌اند که برای جبران این مشکلات از تعداد کنترل‌ها و موتورهای محرک دورانی بیشتر استفاده شده است. در فصل بعد به بیان معادلات سیستم فرمان سیمی با محرک خطی پرداخته می‌شود و همچنین به توضیحاتی در مورد کنترل‌کننده‌های مورد استفاده در این پایان‌نامه.

فصل ۳ :

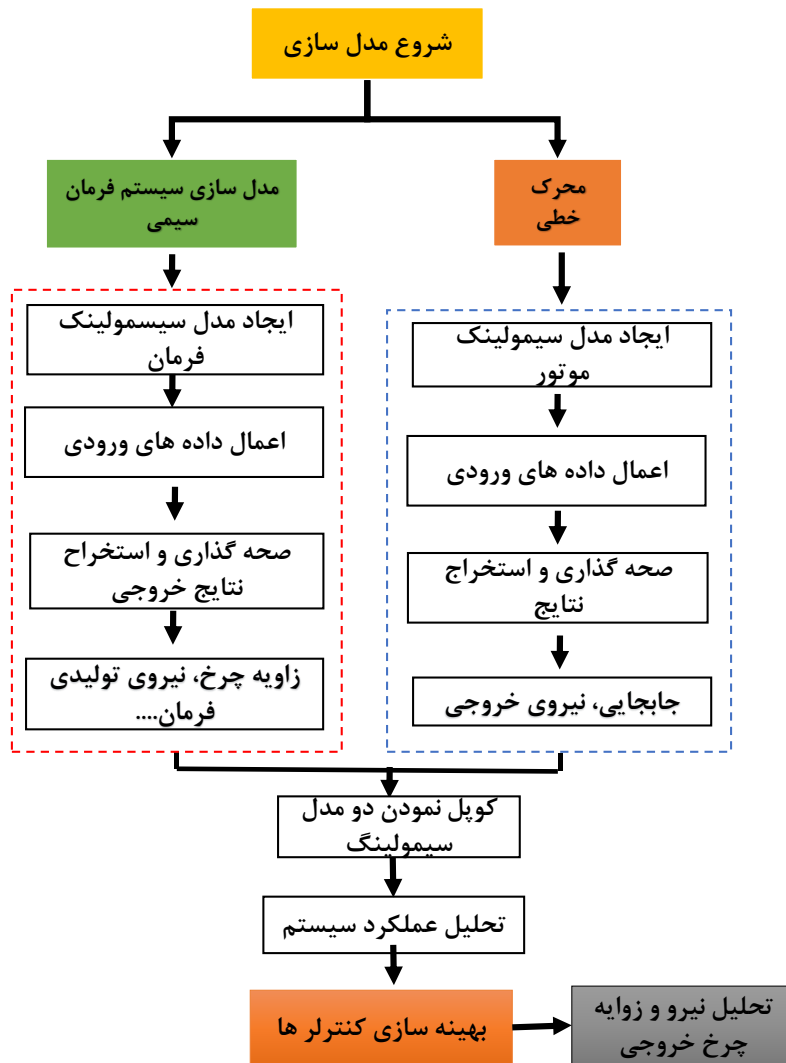
مدل و شبیه‌سازی

۳-۱- مقدمه

در فصل پیشین به بیان مقدمه‌ای از انواع سیستم‌های فرمان خودرو و سیستم موتوربرقی با محرک خطی الکترومکانیکی پرداخته شده است، می‌توان ملاحظه کرد که سیستم محرک الکترومکانیکی خطی دارای مزایای از جمله کنترل پذیری بهتر، بهره‌وری انرژی بیشتر و آلاینده‌گی کمتر نسبت به نمونه‌های هیدرولیکی دارد و نسبت به نمونه‌های محرک الکترومکانیکی دارای نیرو و گشتاور تولیدی بیشتری می‌باشد. هدف در این فصل طراحی سیستم فرمان برقی سیمی می‌باشد که بتواند این مزایا را در خود جای دهد. سیستم‌های فرمان سیمی با موتور دورانی دارای اطمینان کمتری بوده‌اند به دلیل استفاده از یک موتور محرک، اما در سیستم فرمان موردنظر برای هر چرخ از یک موتور محرک خطی الکترومکانیکی استفاده شده است که باعث افزایش اطمینان و همین‌طور استفاده از موتور با نیرو و سرعت عمل بیشتر را نیز فراهم می‌کند. برای رسیدن به این مطلوب ابتدا مدل دینامیکی سیستم را طراحی کرده و توسط نرم‌افزار متلب سیمولینک اقدام به شبیه‌سازی سیستم موردنظر می‌کنیم. در انتها به صحت‌گذاری مدل و توضیحاتی در مورد مدل دوچرخ خودرو و الگوریتم ژنتیک نیز پرداخته می‌شود.

جهت طراحی سیستم فرمان موردنظر، در شکل (۳-۱) روند طراحی سیستم فرمان موردنظر آورده شده است که به سه بخش تقسیم می‌شود:

- مدل‌سازی سیستم فرمان سیمی
- مدل‌سازی موتوربرقی با محرک خطی
- ساخت مدل نهایی و استخراج نتایج



شکل (۱-۳) فلوچارت طراحی سیستم فرمان برقی با محرك خطی

۳-۲- معادلات

۳-۲-۱- محاسبات تعیین محرك الکترومکانیک خطی

با استفاده از داده جدول (۱-۳) که برای یک خودرو سدان E کلاس بیان شده است، مقدار وزن وارده شده به جلو و عقب خودرو را محاسبه می کنیم [57]:

$$W_f = \frac{M \times l_f}{L} = \frac{1961 \times 1.05}{2.76} = 746/032 \quad (1-3)$$

$$W_r = \frac{M \times l_r}{L} = \frac{1961 \times 1.71}{2.76} = 1214/68 \quad (2-3)$$

در معادلات (۱-۳) و (۲-۳) پارامترهای W_r و W_f مقدار وزن وارد شده به چرخ های جلو و عقب و M و L برابر با وزن خودرو و فاصله عرض بین دوچرخ خودرو و همچنین پارامترهای l_r و l_f نیز فاصله محور چرخ جلو و عقب از مرکز جرم خودرو می باشد. با استفاده از داده های جدول (۱-۳) در فصل سه مقدار وزنی که بر روی چرخ های جلو و عقب خودرو وارد می شود را محاسبه کرده ایم. همان طور که ملاحظه می شود مقدار وزن وارده به چرخ های جلو کمتر از چرخ های عقب بوده به دلیل فاصله کمتر چرخ های جلو تا مرکز جرم خودرو، مقدار وزن وارده به چرخ های جلو محاسبه شده است حال نیاز است مقدار وزن وارده به هر یک از چرخ های جلو محاسبه شود که از معادله زیر محاسبه می شود:

$$W_{f,r} = \frac{W_f}{2} = \frac{746.032}{2} = 373/016 \quad (۳-۳)$$

حال که مقدار وزن وارده شده به چرخ های جلو و عقب خودرو را محاسبه کردیم، حال مقدار نیروی موردنیاز برای ایجاد زاویه در چرخ های خودرو را باید محاسبه کنیم برای این منظور با توجه به معادله دینامیکی چرخ خودرو و ساده سازی های به وجود آمده مقدار نیروی موردنیاز را محاسبه می کنیم:

$$\sum F_x = 0 \quad F - F_k = 0 \rightarrow F = F_k \quad (۴-۳)$$

$$\sum F_y = 0 \quad M \times g - N = 0 \rightarrow N = m \times g \quad (۵-۳)$$

در معادلات (۴-۳) و (۵-۳) پارامترهای F_k و N مقدار نیروی اصطکاک و مقدار نیروی وارده از سطح به تایلر می باشد. با توجه به دو معادله دینامیکی در راستای X و Y و ساده سازی انجام شده در معادلات می توان بیان کرد که نیروهای وارده در جهت X به تایلر خودرو برابر با مقدار نیروی اصطکاک است که از ایجاد زاویه در چرخ خودرو جلوگیری می کند و با توجه به این معادله در صورت محاسبه مقدار نیروی F_k در تایلر می توان مقدار نیروی موردنیاز که نیاز است موتور الکتریکی به چرخ وارد کند تا حداکثر زاویه موردنیاز در چرخ ایجاد شود را محاسبه کرد.

با توجه به ساده سازی های انجام شده در راستای Y تایلر نیز می توان به این نتیجه رسید مقدار نیروی که از سطح به تایلر وارد می شود برابر است با مقدار وزن وارد شده بر روی هر چرخ از طرف خودرو ضربدر شتاب گرانش زمین که وارد می شود به آن جسم.

مقدار نیروی اصطکاک تایلر برابر است با [58]:

$$F_k = u_k \times N \rightarrow F_k = u_k \times mg \quad (۶-۳)$$

همان طور که در معادله (۶-۳) ملاحظه می شود مقدار نیروی اصطکاک تایلر مستقیماً به وزن و پارامتر u_k ضریب اصطکاک تایلر با جاده در ارتباط است. با توجه به این مسائل که در طراحی سیستم فرمان خودرو باید همیشه بدترین شرایط را برای تایلر در نظر گرفت از نظر اصطکاک (گیرکردن در داخل گل) نیاز است موتور

الکتریکی بتواند نیروی موردنیاز برای فرمان پذیری را فراهم کند، در نتیجه مقدار ضریب اصطکاک را ۰,۷ در نظر می‌گیریم و محاسبات را بر مبنای این عدد انجام می‌دهیم:

$$F_k = 0.7 \times 373.016 \times 9.81 = 2558/889 \quad (۷-۳)$$

مقدار نیروی محاسبه‌شده نشان‌دهنده مقدار نیروی اصطکاکی است که در چرخ خودرو به وجود آمده است و سیستم فرمان موردنظر باید بتواند برای ایجاد زاویه فرمان در چرخ نیروی بیشتر از این مقدار را به چرخ خودرو وارد کند تا تاثیر خودرو بتواند زاویه فرمان بگیرد.

با توجه به معادله (۷-۳) بالا مقدار نیروی وارده از سمت موتور الکتریکی را محاسبه می‌کنیم:

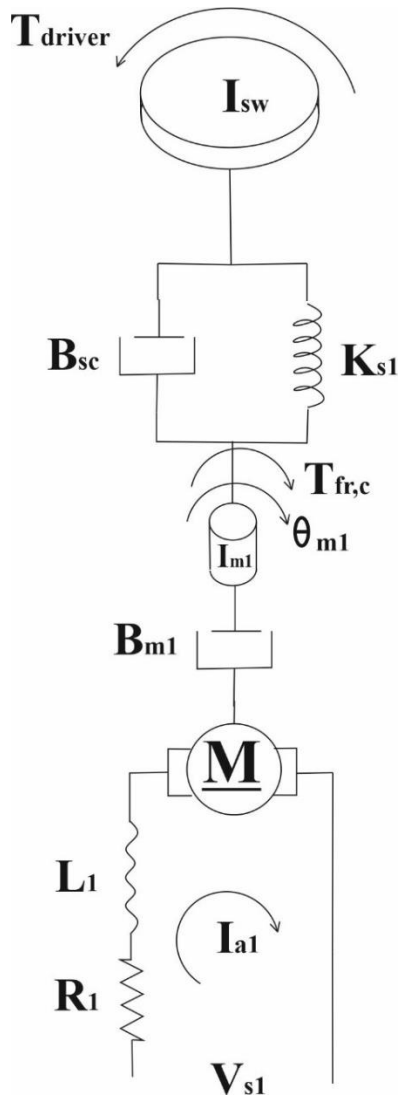
$$\sum F_x = 0 \rightarrow F - F_k = 0 \rightarrow F = F_k \quad (۸-۳)$$

با توجه به معادله بالا همان‌طور که قبل گفته‌شده است نیاز است موتور انتخاب‌شده برای سیستم فرمان سیمی موردنظر بتواند این نیرو را تولید کند که در ادامه به جزئیات محرک الکترومکانیکی خطی پرداخته خواهد شد.

۳-۲-۲- معادلات سیستم فرمان سیمی

اگر سیستم فرمان برقی سیمی را به دو بخش تقسیم کنیم، قسمت اول از فرمان خودرو شروع شده و تا سیم‌پیچ‌های خروجی از موتور زیردست راننده تقسیم می‌شود و قسمت دوم از سیم‌پیچ ورودی به موتور دوم تا چرخ‌ها می‌باشد [59-63].

در شکل (۲-۳) دیاگرام نیرویی قسمت اول سیستم فرمان آورده شده است:



شکل (۲-۳) دیاگرام فرمان خودرو [34]

معادله غریبلیک فرمان خودرو

$$\ddot{\theta}_{sw} = \frac{1}{I_{sw}} (T_{driver} - B_{sc}(\dot{\theta}_{sw} - \dot{\theta}_{M1}) - K_{s1}(\theta_{sw} - \theta_{M1}) - T_{fr,c}) \quad (۹-۳)$$

در معادله (۹-۳)، θ_{sw} و زاویه I_{sw} و اینرسی غریبلیک فرمان و T_{driver} گشتاور وارده از راننده است. B_{sc} میرایی ستون فرمان و K_{s1} گشتاور سفتی ستون فرمان می باشد، $T_{fr,c}$ گشتاور اصطکاکی ستون فرمان و θ_{M1} جابجایی زاویه‌ای موتور فرمان است.

معادله موتور فرمان

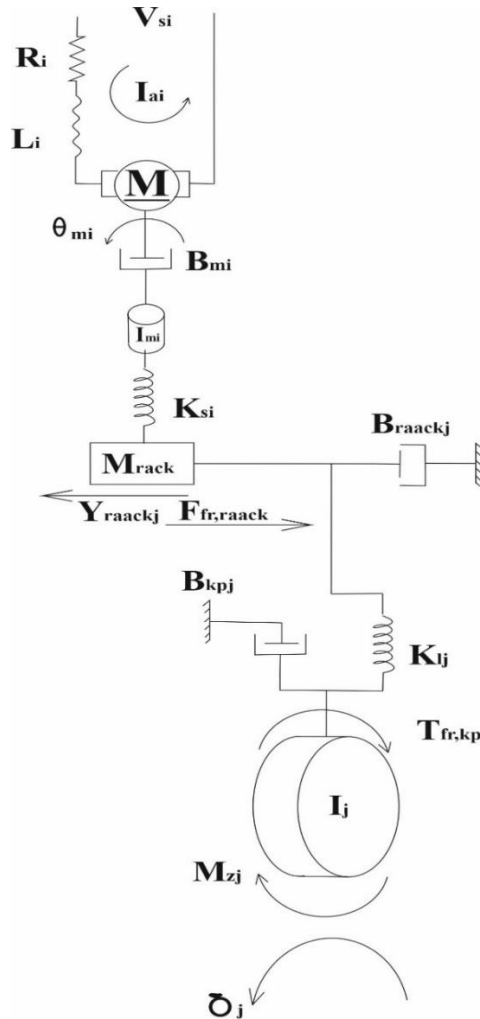
$$\ddot{\theta}_{M1} = \frac{1}{I_{M1}} (T_{M1} - B_{sc}(\dot{\theta}_{M1} - \dot{\theta}_{sw}) - K_{s1}(\theta_{M1} - \theta_{sw}) - B_{M1}\dot{\theta}_{M1}) \quad (۱۰-۳)$$

در معادله (۱۰-۳)، θ_{M1} و زاویه I_{M1} و اینرسی موتور زیر غریبلیک فرمان است. T_{M1} گشتاور موتور زیر غریبلیک فرمان و B_{M1} ضریب میرایی موتور زیر غریبلیک فرمان است.

معادله جریان موتور فرمان

$$\frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (V_{s1} - R_1 i_{a1} - K_{b1} \dot{\theta}_{M1}) \quad (11-3)$$

در معادله (۱۱-۳)، i_{a1} و L_1 جریان و ظرفیت القایی به وجود آمده در موتور زیر غربلیک فرمان است و V_{s1} ولتاژ به وجود آمده در موتور اول و R_1 مقاومت الکتریکی موتور الکتریکی زیر غربلیک فرمان و K_{b1} نیروی مقاوم محرک الکتریکی است. در شکل (۳-۳) دیاگرام نیرویی چرخ های جلوی خودرو آورده شده است که این سیستم دارای معادلاتی به شرح زیر است [59-63]:



شکل (۳-۳) دیاگرام چرخ های جلو [63]

معادله زاویه موتور جلو فرمان

$$\ddot{\theta}_{M2} = \frac{1}{I_{M2}} \left(-T_{M2} - K_{S2} \left(\theta_{M2} - \frac{y_{rack}}{r_p} \right) - B_{M2} \dot{\theta}_{M2} \right) \quad (12-3)$$

در معادله (۱۲-۳)، θ_{M2} و I_{M2} زاویه و اینرسی موتور محرک چرخ و T_{M2} گشتاور موتور محرک چرخ ها است. B_{M2} و K_{S2} گشتاور سفتی و ضریب میرایی موتور محرک چرخ است.

معادله جریان موتور جلو فرمان

$$\frac{di_{a2}}{dt} = \frac{1}{L_2} (V_{s2} - R_2 i_{a2} - K_{b2} \dot{\theta}_{M2}) \quad (13-3)$$

در معادله (۱۳-۳)، i_{a2} و L_2 جریان و ظرفیت القایی به وجود آمده در موتور محرک چرخ بوده و V_{s2} ولتاژ ورودی به موتور محرک می باشد. در موتور محرک چرخ R_2 و K_{b2} مقاومت الکتریکی و نیروی مقاوم محرک الکتریکی در موتور الکتریکی محرک چرخ است.

معادله جابجایی دنده شانه‌ای فرمان

$$\ddot{y}_{rack} = \frac{1}{m_{rack}} \left(-F_{fr,rackf} - \frac{2K_{Lf}}{r_l} \left(\frac{y_{rack}}{r_l} - \delta_F \right) - B_{rack} \dot{y}_{rack} + \frac{K_{S2}}{r_p} \left(\theta_{M2} - \frac{y_{rack}}{r_p} \right) \right) \quad (14-3)$$

در معادله (۱۴-۳)، y_{rack} و m_{rack} و $F_{fr,rackf}$ جابجایی، جرم و نیروی اصطکاکی دنده شانه‌ای فرمان است. پارامترهای B_{rack} و K_{Lf} و K_{S2} به ترتیب بیانگر نیروی مقاوم دنده شانه‌ای و گشتاور سفتی اتصالات مکانیکی بین چرخ و دنده شانه‌ای خودرو و گشتاور سفتی موتور محرک چرخ بوده است.

پارامترهای r_L و r_p برابر با شعاع پینیون و شعاع دنده شانه‌ای فرمان است.

معادله زاویه‌ای چرخشی چرخ های جلو

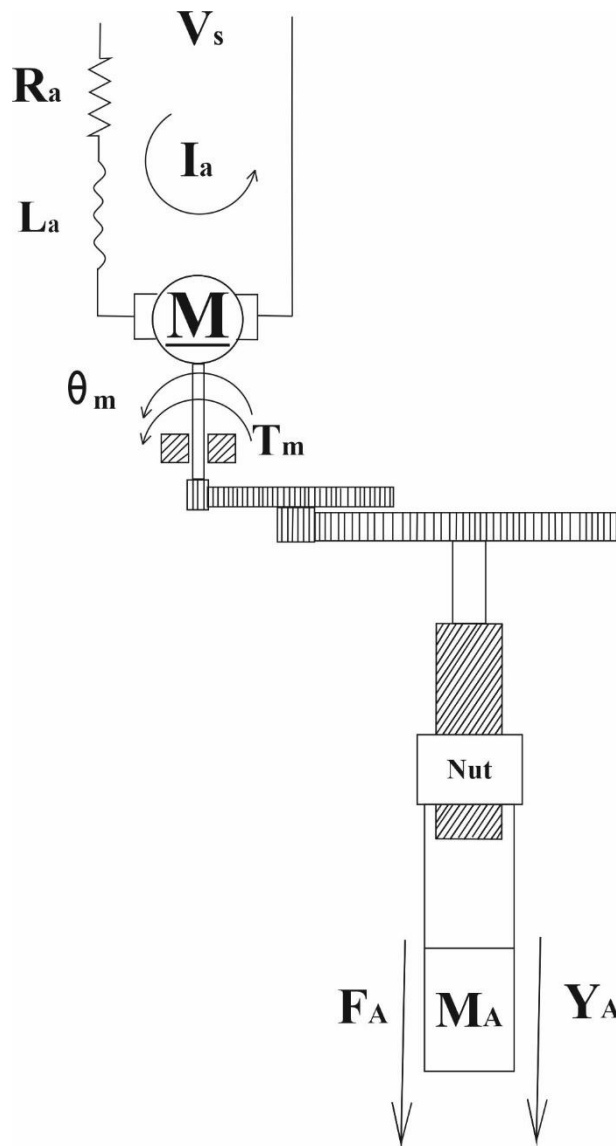
$$\ddot{\delta}_F = \frac{1}{I_f} \left(-T_{fr,kpf} - K_{Lf} \left(\delta_F - \frac{y_{rack}}{r_l} \right) - B_{kpf} \dot{\delta}_F - M_Z \right) \quad (15-3)$$

در معادله (۱۵-۳)، δ_F و I_f و $T_{fr,kpf}$ به ترتیب برابرند با زاویه، اینرسی دورانی و گشتاور مقاوم در چرخ و B_{kpf} برابر با گشتاور سفتی بین قطعات مکانیکی چرخ و دنده شانه‌ای است. پارامتر M_Z گشتاور مقاوم چرخشی چرخ خودرو است.

۳-۲-۳ - معادلات موتور الکترومکانیک خطی

جهت طراحی و استخراج مقالات و همین‌طور طراحی سیستم در نرم‌افزار متلب سیمولینک از مراجع [۶۴-۶۵] استفاده شده است که در ادامه پرداخته خواهد شد.

در شکل (۴-۳) دیاگرام نیروی یک محرک خطی الکترومکانیکی آورده شده است که نشان‌دهنده و بیانگر نوع پارامترها است و معادلات دینامیکی حاکم بر موتور خطی نیز بر مبنای شکل (۳-۳) در ادامه آورده شده است.



شکل (۳-۴) دیاگرام نیرویی موتور با محرک خطی [65]

معادله جریان ورودی به موتور

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_a} (V_s - R_a i - K_e \dot{\theta}_M) \quad (۱۶-۳)$$

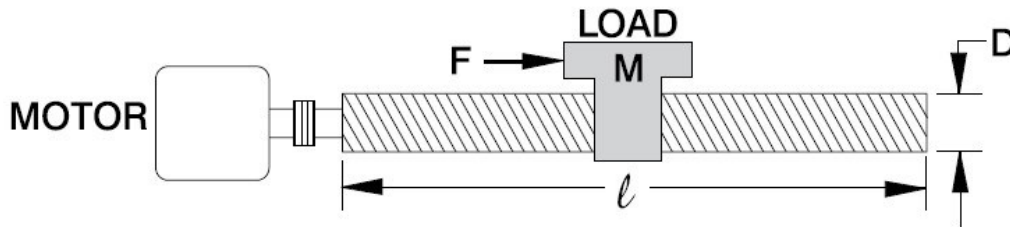
در معادله (۱۶-۳)، i و L_a جریان و ظرفیت القایی به وجود آمده در موتور محرک خطی الکترومکانیکی بوده و V_s ولتاژ ورودی به موتور محرک می‌باشد. در موتور محرک خطی الکترومکانیکی R_a و K_e مقاومت الکتریکی و نیروی مقاوم محرک الکتریکی در محرک الکترومکانیکی خطی است.

معادله حاکم بر زاویه به وجود آمده توسط موتور خطی

$$\ddot{\theta}_M = \frac{1}{J} (K_T I - (D + Ch^2)\dot{\theta}_m + Ch\dot{X}_L + khX_L - kh^2\theta_m) \quad (۱۷-۳)$$

در معادله (۳-۱۷)، θ_M و J زاویه و اینرسی موتور محرک خطی الکترومکانیکی بوده. پارامترهای C و k دمپینگ و سفتی توپی و لغزنده است. K_T و D گشتاور ثابت موتور و اصطکاک لغزنده موتور و توپی چرخ دنده است.

معادلات مقدار حرکت میله خروجی و نسبت دنده در سیستم



شکل (۳-۵) معادله نیروی میله خروجی [56]

$$X_a = \frac{l}{2\pi} \theta_m \quad (۱۸-۳)$$

$$h = \frac{l}{2\pi N} \quad (۱۹-۳)$$

در معادله (۳-۱۸) و (۳-۱۹)، X_a و l به ترتیب بیانگر جابجایی محرک و طول مهره محرک میله اکچویاتور الکتریکی است. N نیز نسبت دنده در سیستم موتور محرک الکتریکی است.

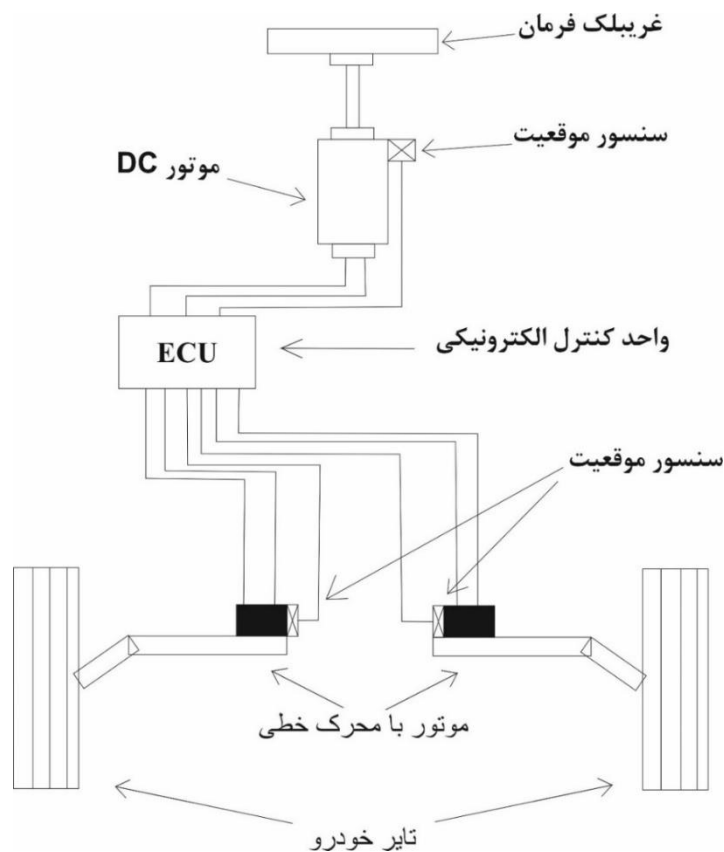
معادلات حاکم بر حرکت بار خروجی در سیستم

$$\ddot{X}_L = \frac{1}{M_L} (kh\theta_m + ch\dot{\theta}_m - kX_L - c\dot{X}_L) \quad (۲۰-۳)$$

در معادله (۳-۲۰)، X_L و M_L به ترتیب مقدار جابجایی و جرم بار موردنظر جهت جابجایی توسط موتور محرک خطی الکترومکانیکی را بیان می‌کند.

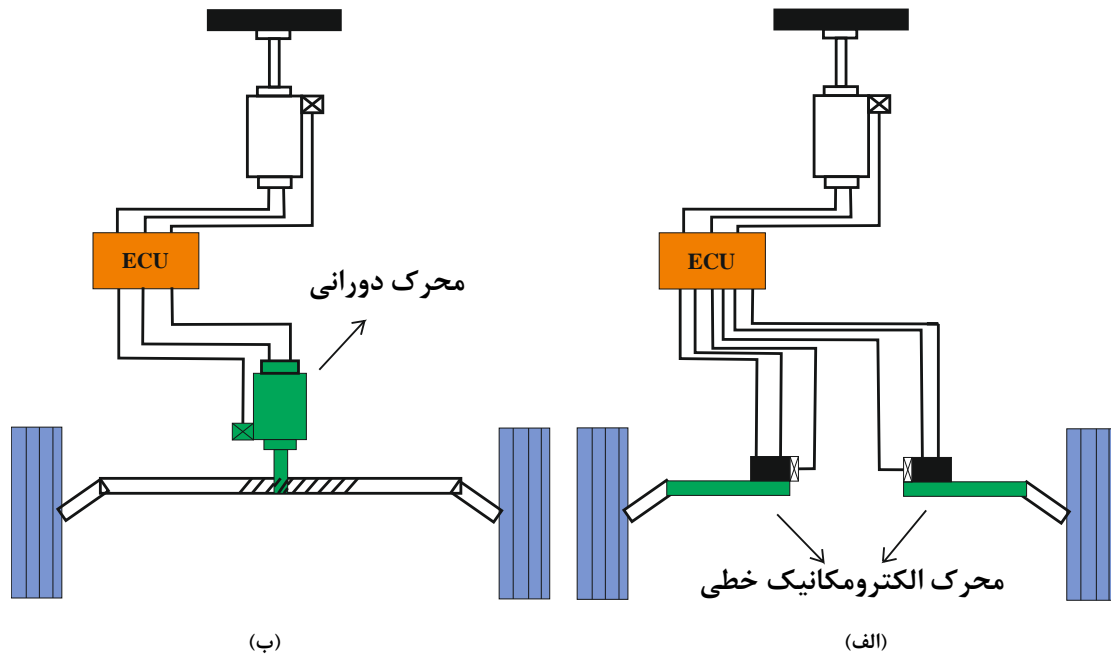
۳-۳- سیستم فرمان با محرک خطی

شکل (۳-۶) شماتیک سیستم فرمان برقی با محرک سیمی را نشان می‌دهد که در این فصل به بیان معادلات و مدل سیمولینک متلب آن پرداخته خواهد شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این سیستم ترکیبی از دو سیستم فرمان سیمی و محرک الکترومکانیکی خطی بوده که در فصل قبل به تفصیل بیان شده است. شکل (۳-۶) نشان‌دهنده هر دو سیستم فرمان برقی سیمی با موتور دورانی و سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی است که این سیستم‌ها در قسمت غربلیک فرمان و دینامیک قسمت بالایی سیستم یکنواخت بوده‌اند اما در قسمت محرک چرخ‌های خودرو دچار تغییراتی هستند.



شکل (۳-۶) شماتیک سیستم فرمان برقی با محرک خطی

همان طور که در شکل (۳-۶) ملاحظه می‌شود در قسمت بالایی از یک موتور دورانی استفاده شده است که این موتور وظیفه شبیه‌سازی حالت‌های جاده را برای راننده انجام دهد تا راننده بنا به شرایط جاده اقدام به فرمان دادن به خودرو کند. در سیستم فرمان برقی سیمی با موتور دورانی در قسمت چرخ خودرو از یک موتور دورانی استفاده شده است که این موتور وظیفه محرک برای سیستم دنده شانه‌ای و پینیون بوده که توسط سیستم دنده شانه‌ای و پینیون حرکت دورانی به حرکت خطی با یک نسبت دنده ثابت تبدیل شده و به چرخ‌ها منتقل می‌شود، که این سیستم دارای مزایای از جمله استفاده از موتور دورانی ضعیف‌تر به دلیل نسبت دنده بین دنده شانه‌ای و پینیون بوده که باعث کاهش هزینه ساخت نیز می‌شود اما به دلیل استفاده از تعداد قطعات بیشتر هزینه کاهش چشمگیری ندارد. در قسمت سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی آورده شده است که در این سیستم از موتور خطی استفاده شده است که با استفاده از این موتور می‌توان موتور دورانی و دنده شانه‌ای و پینیون را در سیستم فرمان حذف کرد و موتور خطی را به صورت مستقیم به چرخ‌ها متصل کرد که باعث کاهش وزن تمام‌شده خودرو و کاهش اتلاف نیرو در قسمت‌های مکانیکی خواهد شد.

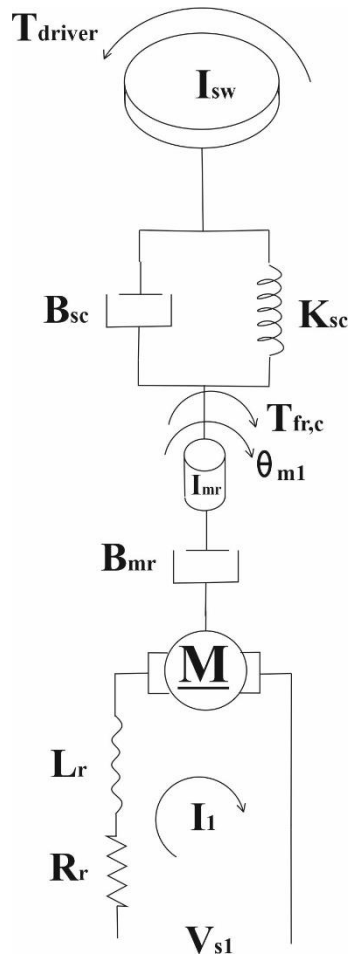


شکل (۳-۷) شماتیک سیستم فرمان سیمی (الف) سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی (ب) سیستم فرمان سیمی با موتور دورانی

۳-۲-۲- معادلات دینامیکی حاکم

برای درک بهتر سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی در این قسمت به بیان معادلات و شماتیک سیستم فرمان پرداخته می‌شود. همان‌طور که قبلاً بیان شد این سیستم فرمان از دو قسمت تشکیل شده است که در شکل (۳-۲) و (۳-۳) آورده شده است:

شکل (۳-۸) دیاگرام نیرویی قسمت غربیلک فرمان آورده شده است.



شکل (۸-۳) دیاگرام فرمان خودرو

پارامترهای مورد استفاده در قسمت‌های پایین در فصل قبل بیان شده‌اند و از ذکر دوباره عنوان پرهیز شده است.

در شکل (۸-۳) دینامیک قسمت فرمان خودرو آورده شده است که معادلات زیر به ترتیب استخراج می‌شوند:

معادلات غریبک فرمان خودرو

$$\ddot{\theta}_{sw} = \frac{1}{I_{sw}} (T_{driver} - B_{sc}(\dot{\theta}_{sw} - \dot{\theta}_{MR}) - K_{sc}(\theta_{sw} - \theta_{MR}) - T_{fr,c}) \quad (۲۱-۳)$$

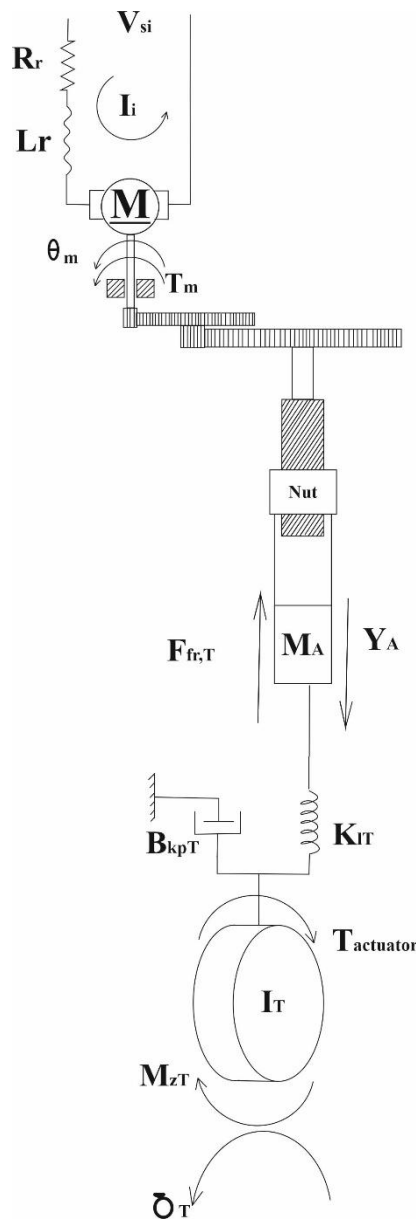
معادلات موتور فرمان

$$\ddot{\theta}_{MR} = \frac{1}{I_M} (T_M - B_{sc}(\dot{\theta}_{MR} - \dot{\theta}_{sw}) - K_{sc}(\theta_{MR} - \theta_{sw}) - B_{MR}\dot{\theta}_{MR}) \quad (۲۲-۳)$$

معادله جریان موتور فرمان

$$\frac{di_{a1}}{dt} = \frac{1}{L_R} (V_{s1} - R_R i_{a1} - K_{bR} \dot{\theta}_{M1}) \quad (۲۳-۳)$$

در شکل (۹-۳) نمودار نیروی محرک خطی الکترومکانیکی آورده شده است که نشان‌دهنده مقادیر و معادلات دینامیکی حاکم بر موتور خطی است:



شکل (۳-۹) نمودار نیرویی موتور با محرک خطی

معادله جریان ورودی به موتور

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_r} (V_{si} - R_r i - K_e \dot{\theta}_M) \quad (۳-۲۴)$$

معادله حاکم بر زاویه به وجود آمده توسط موتور خطی

$$\ddot{\theta}_M = \frac{1}{J} (K_T I - (D + Ch^2) \dot{\theta}_m + Ch \dot{X}_L + kh X_L - kh^2 \theta_m) \quad (۳-۲۵)$$

معادلات مقدار حرکت دنده شانه‌ای خروجی و نسبت دنده در سیستم

$$X_a = \frac{l}{2\pi N} \theta_m \quad (۳-۲۶)$$

$$h = \frac{l}{2\pi N} \quad (۳-۲۷)$$

معادلات حاکم بر حرکت بار خروجی در سیستم

$$\ddot{X}_L = \frac{1}{M_L} \left(kh\theta_m + ch\dot{\theta}_m - kX_L - c\dot{X}_L - \frac{2K_{Lt}}{r_l} \left(\frac{y_a}{r_l} - \delta_t \right) \right) \quad (28-3)$$

معادله حاکم بر زاویه ایجادشده در چرخ

$$\ddot{\delta}_t = \frac{1}{I_t} \left(-T_{fr,kpt} - K_{Lt} \left(\delta_t - \frac{y_a}{r_l} \right) - B_{kpt} \dot{\delta}_t - M_{zt} \right) \quad (29-3)$$

داده‌های ورودی به سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی در جدول (۲-۳) آورده شده است:

جدول (۱-۳) داده‌های ورودی به سیستم فرمان برقی با محرک سیمی

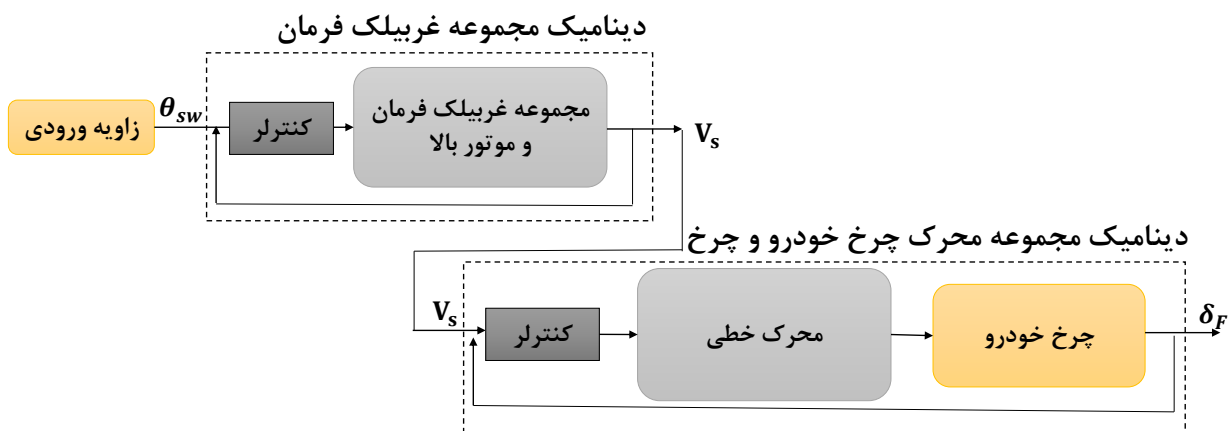
| واحد | مقادیر | نماد | کمیت |
|------------------|---------------------------|---------------------|----------------------------------|
| kgm ² | $7/9 \times 10^{-3}$ | I _{sw} | لختی دورانی فرمان |
| Nms/rad | 0/136 | B _{sc} | ضریب میرایی ستون فرمان |
| Nm/rad | 3500 | K _s | سختی پیچشی ستون فرمان |
| Nm | 0/1 | T _{fr,c} | گشتاور اصطکاکی |
| kgm ² | $2/19 \times 10^{-3}$ | I _{m1} | لختی دورانی موتور فرمان ۱ |
| Nms/rad | 1 | B _{m1} | ضریب میرایی ستون الکتریکی ۱ |
| Nm | 2 | T _m | گشتاور اصطکاکی موتور ۱ |
| kgm ² | 1/36 | I _f | لختی دورانی چرخ |
| Nms/rad | 30 | B _{kpf} | ضریب میرایی کینگ پین |
| Nms/rad | 26000 | K _{lf} | سختی پیچشی اتصالات چرخ |
| Ω | ۶/۴ | R _R | ضریب میرایی موتور الکتریکی ۱ |
| Nm.s/ rad | $3/5 \times 10^{-3}$ | K _{bR} | ثابت مقاومت الکتریکی موتور ۱ |
| Nm | 2 | M _z | گشتاور بازگرداننده چرخ |
| m | 0/3 | r _l | شعاع شفت رابط فرمان و موتور |
| Nm | 0/1 | T _{fr,kps} | گشتاور اصطکاکی کینگ پین |
| Ω | $2/668 \times 10^{-3}$ | L | ظرفیت القایی موتور خطی |
| mH | 0/976987 | R | مقاومت الکتریکی موتور خطی |
| kgm ² | $7/124 \times 10^{-3}$ | K _t | ثابت گشتاور موتور |
| Nm.s/ rad | $7/124 \times 10^{-3}$ | K _e | ثابت مقاومت الکتریکی موتور |
| Nm.s/ rad | $2/714326 \times 10^{-6}$ | J | لختی دورانی موتور محرک اکچویاتور |
| Nm/A | $6/710936 \times 10^{-5}$ | D | اصطکاک چسب ناک معادل |
| m/rad | 6×10^{-3} | L | طول میله دندان |

| | | | |
|-------|-----------|-------|----------------------------|
| Kg | 5 | M | جرم بار |
| N/m | 201060000 | K | سختی پیچشی Nut |
| Ns/m | 26900 | C | ضریب میرایی Nut |
| N/rad | 23000 | C_f | ضریب سختی پیچشی تایر جلو |
| N/rad | 46000 | C_r | ضریب سختی پیچشی تایر عقب |
| Kg | 1500 | M | جرم خودرو |
| M | 1/05 | l_f | فاصله محور جلو از مرکز جرم |
| M | 1/71 | l_r | فاصله محور عقب از مرکز جرم |
| Km/h | Random | V | سرعت خودرو |

۳-۴- سیمولینک سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی

شکل (۳-۶) دیاگرام شماتیک بلوکی سیستم فرمان برقی سیمی با محرک برقی در نرم افزار متلب سیمولینک آورده شده است که ترکیبی از دو سیستم بیان شده در قبل می باشد. جهت طراحی سیستم موردنظر از داده ها و معادلات بالا استفاده شده است.

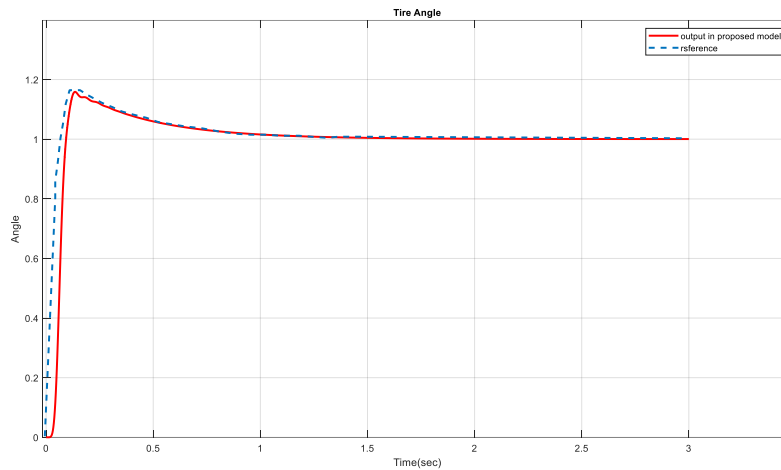
همان طور که در شکل (۳-۱۰) ملاحظه می شود سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی به دو بخش تقسیم می شود قسمت زیر دست راننده و قسمت چرخ خودرو که هر دو مجموعه توسط کنترل کننده های PID کنترل می شوند. در قسمت غربیلک فرمان زاویه دست راننده ورودی به سیستم بوده و خروجی سیستم غربیلک فرمان ولتاژ بوده که این ولتاژ ورودی مجموعه موتور و چرخ خودرو می شود که این ولتاژ نیز توسط کنترل کننده PID دیگر که در قسمت چرخ قرار دارد کنترل می شود و در انتها مجموعه خروجی زاویه چرخ بوده و باعث ایجاد زوایای مختلف در چرخ نسبت به ورودی دست راننده می شود. شکل بلوک دیاگرام سیمولینک سیستم فرمان سیمی در پیوست ۱ آورده شده است.



شکل (۳-۱۰) شماتیک سیمولینک سیستم فرمان برقی سیمی

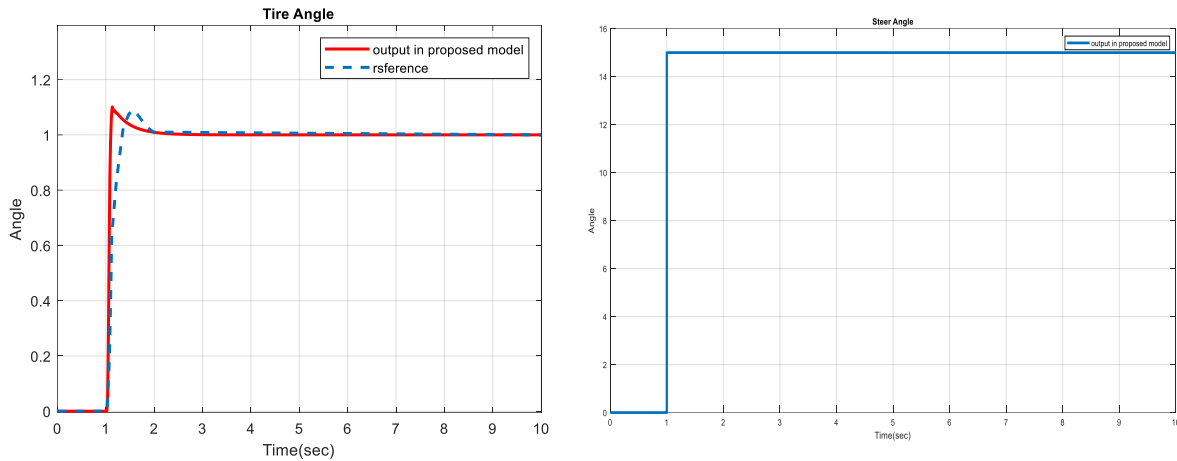
۳-۵-۱- سیستم فرمان برقی سیمی

شکل (۳-۱۱) نمودار خروجی زاویه چرخ خودرو را بین نتایج خروجی از مقاله آقای فهامی و همکاران [67] و خروجی سیمولینک نرم افزار متلب نشان داده است. همان طور که ملاحظه می شود نمودار محاسبه شده نسبت به نمودار خروجی از نرم افزار متلب عملکرد بهتری داشته و مقدار خطای خروجی ۶ درصد بوده است. این نمودارها با ورودی پله یک به هر دو سیستم اعمال شده و نسبت دنده در زاویه به عمل آمده در چرخ دخیل نمی باشد.



شکل (۳-۱۱) نمودار خروجی در حالت بدون اعمال نسبت دنده

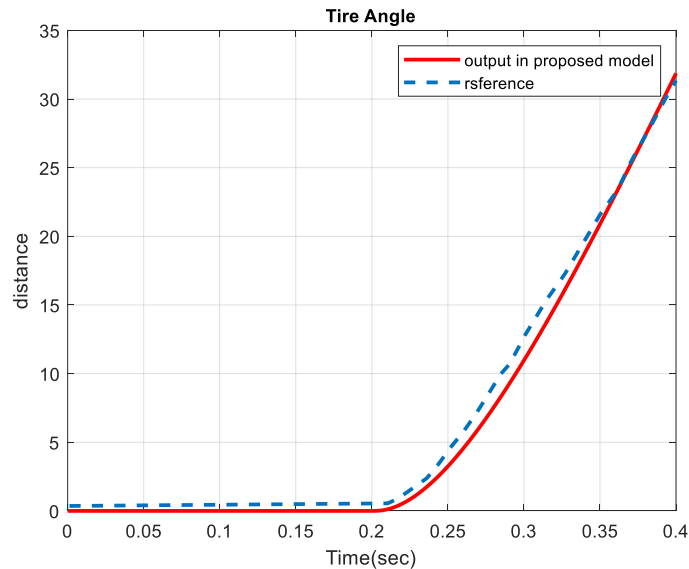
شکل (۳-۱۲) نمودار خروجی در هر دو بخش بیان شده با اعمال نسبت دنده آورده شده است. همان طور که دیده می شود ورودی سیستم فرمان دارای زاویه ۱۵ درجه بوده و خروجی سیستم بنا به مقاله باید با نسبت ۱:۱۵ محاسبه شود همان طور که ملاحظه می شود عملکرد هر دو سیستم رفتاری شبیه به هم بوده و نتایج صحنه گذاری در زمان ۱ ثانیه هر دو نمودار با مقدار اورشوت ۱/۱ ثانیه همراه بوده و با گذاشت یک ثانیه ۱ ثانیه رفتار راننده را دنبال می کند. خروجی مدار سیمولینک طراحی شده از خروجی مقاله رفتار بهتری در سرعت پاسخ دهی را ارائه داده است.



شکل (۳-۱۲) نمودار خروجی در حالت اعمال نسبت دنده

۳-۵-۲- سیستم موتور الکتریکی با محرک خطی

شکل (۳-۱۳) بیانگر مقدار جابجایی محرک خطی الکترومکانیکی برحسب زمان می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نمودار خروجی به‌دست‌آمده در بازه زمانی ۰/۴ ثانیه توانسته است به مقدار جابجایی ۳۰ میلی‌متر برسد و رفتار نمودار مرجع را دنبال کند. مقدار درصد خطای به وجود آمده با مقایسه با مقاله آقای انتونیک و همکاران [68] برابر ۸ درصد بوده است و مقدار قابل قبولی می‌باشد.



شکل (۳-۱۳) نمودار صحه‌گذاری سیستم موتور با محرک خطی

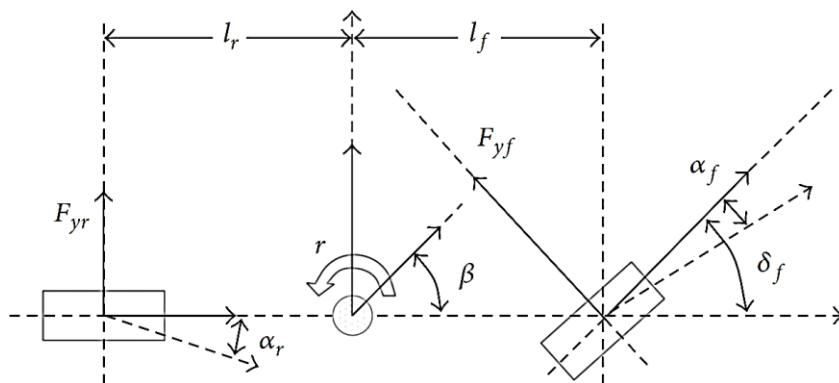
۳-۶- مدل دو درجه خودرو

مدل سازی خودرو برای شبیه سازی و ارزیابی رفتار حرکتی فرمان لازم است. بنابراین یک مدل جامع باید بتواند خواص اصلی سیستم خودرو را به خوبی بیان کند. با فرض اینکه مقدار زاویه ورودی چرخ ها (زاویه فرمان) کوچک است، زاویه لغزش نیز کوچک است، بنابراین می توان تغییرات نسبت های مثلثاتی را خطی در نظر گرفت [69-71]. یعنی :

$$\sin \alpha_i = \alpha_i$$

همچنین می توان مقدار زاویه فرمان دوچرخ جلو را با میانگین گرفتن بین زوایای آن ها و حذف اختلاف ناشی از هندسه آکرمین یکسان در نظر گرفت. با توجه به کوچک بودن زوایا لغزش و کم بودن مقادیر نیروهای طولی برای حفظ سرعت نسبت به نیروهای عرضی، تأثیر نیروهای طولی نیز تقریباً کم رنگ خواهد بود. از طرفی چرخش چرخ ها و حرکت آن ها در راستای Z نیز از قبل قابل صرف نظر بود.

با توجه به کارهایی که در زمینه مدل سازی دینامیک حرکت خودرو صورت گرفته است، مدل مورد نظر در این سیستم مدل خطی خودرو بوده به دلیل ساده سازی در شبیه سازی سیستم فرمان مورد نظر، در شکل (۳-۱۴) مدل دو درجه خودرو آورده شده است.



شکل (۳-۱۴) نمودار صحنه گذاری سیستم محرک خطی الکترومکانیکی [62]

ویژگی های پایداری یک وسیله نقلیه با استفاده از سیستم فرمان سیمی برقی تحت تأثیر نیروهای لاستیک جلو از طریق بازخورد پاسخ دینامیکی خودرو قرار دارد. مدل وسیله نقلیه خطی در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است. در این مقاله، مدل سازی وسیله نقلیه خطی به منظور تخمین نیروهای به وجود آمده در چرخ صورت گرفته است. فرضیات زیر برای مانور معمولی رانندگی در نظر گرفته شده است. این فرضیات می توانند مدل وسیله نقلیه را ساده کنند [71]:

۱. نیروی اصطکاک در x جهت ناچیز است.

۲. سرعت خودرو ثابت

۳. زاویه تایلر راست و چپ یکسان

با استفاده از فرضیات بالا معادلات زاویه لغزش خودرو و میزان انحراف تایلر را محاسبه می‌کنیم [63]:

$$\dot{r} = \left[\frac{(l_f^2 c_f + l_r^2 c_r)}{I_s V} \right] r + \left[\frac{(l_r^2 c_r - l_f^2 c_f)}{I_s} \right] \beta + \left[\frac{(l_f c_f)}{I_s} \right] \delta_f \quad (30-3)$$

$$\dot{\beta} = \left[1 + \frac{(l_r c_r - l_f c_f)}{mV^2} \right] r + \left[\frac{(c_r + c_f)}{mV} \right] \beta + \left[\frac{(c_f)}{mV} \right] \delta_f \quad (31-3)$$

در ناحیه خطی لاستیک، نیروی جانبی در جلو و عقب مربوط به زاویه لغزش با میزان انحراف تایلر که در لاستیک‌های جلو و عقب است که به شرح زیر نوشته شده است [72]:

$$F_{yf} = -C_f \alpha_f \quad (32-3)$$

$$F_{yr} = -C_r \alpha_r \quad (33-3)$$

در زاویه لغزش بزرگ‌تر، رابطه بین نیروی جانبی و زاویه لغزش غیرخطی می‌شود. با فرض تقریباً زاویه لغزش کوچک‌تر، زاویه لغزش از نظر زاویه لغزش بدنه وسیله نقلیه و سرعت انحرافی که به شرح زیر است [72]:

$$\alpha_f = \left(\beta + \frac{l_f}{V} r - \delta_f \right) \quad (34-3)$$

$$\alpha_r = \left(\beta + \frac{l_r}{V} r - \delta_r \right) \quad (35-3)$$

جدول (۳-۱) نشان‌دهنده مقادیر ورودی به مدل دو درجه آزادی خودرو موردنظر می‌باشد:

۳-۷- بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است. استفاده از روش‌های تکاملی تدریجی برای حل مسائل بهینه‌سازی روندی رو به رشد داشته است. الگوریتم‌های تکاملی بر اساس شبیه‌سازی تکاملی طبیعی شکل گرفته‌اند. الگوریتم ژنتیک و فازی به‌عنوان محبوب‌ترین الگوریتم تکامل تدریجی در فضاهای جستجوی نامعین کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. در بخش‌های بعد به این الگوریتم‌ها بیشتر پرداخته خواهد شد.

۳-۷-۱- الگوریتم ژنتیک

برای این که کنترل‌کننده PID بتواند در بهترین حالت کاری خود قرار بگیرد نیاز است که پارامترهای این کنترل‌کننده به صورت دقیق تعیین شوند، اما تنظیم دقیق این ضرایب نیاز به صرف زمان زیادی دارد و درصد امکان خطا در تعیین این ضرایب زیاد است. برای حل این مشکل نیاز است از الگوریتم‌های کمکی استفاده

کنیم، الگوریتم ژنتیک وظیفه تعیین این ضرایب را به صورت دقیق دارد. تو ضیحات مربوط به ساختار کلی الگوریتم ژنتیک در پیوست ارائه شده است.

برای این که به بتواند الگوریتم ژنتیک مقادیر خروجی مورد نظر را به بهینه ترین مقدار برساند نیاز است که بر طبق کدی که در ادامه ارائه شده است مقادیر سه ضریب دو کنترل کننده را تعیین کند بر طبق کاهش مقدار خطای خروجی و همچنین کاهش مقدار نیروی ورودی از سمت رک فرمان به تاینر خودرو که در بازه مقداری ۰ تا ۷۰۰ الگوریتم ژنتیک بهترین مقدار برای ضرایب این دو کنترل کننده را فراهم می کند. کد ژنتیک الگوریتم برای بهینه سازی سیستم فرمان برقی با محرک خطی:

```
function [j] = piid(x)
```

```
set_param('complet_ga/PID Controller','P',num2str(x(1)));  
set_param('complet_ga/PID Controller','T',num2str(x(2)));  
set_param('complet_ga/PID Controller','D',num2str(x(3)));  
set_param('complet_ga/PID Controller1','P',num2str(x(4)));  
set_param('complet_ga/PID Controller1','T',num2str(x(5)));  
set_param('complet_ga/PID Controller1','D',num2str(x(6)));  
sim('complet_ga.slx');
```

```
j = sqrt((Rack_Force.Data(end))^2+(er.Data(end))^2);
```

همان طور که قبلاً بیان شده است هدف از بهینه سازی سیستم محاسبه بهترین نقطه کاری سیستم می باشد، برای این که نقطه مورد نظر را پیدا کنیم نیاز است که پارامترهایی بهینه شوند و در بهینه ترین حالت خود قرار گیرند. در بهینه سازی انجام شده در سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی بهینه کردن ضرایب کنترل کننده ها (PID) است که در بالا ضرایب هر دو کنترل کننده را با X نشان داده شده است و به تعداد ضرایب پارامتر X در سیستم داریم به دلیل این که سیستم طراحی شده در قسمت سیمولینک نرم افزار متلب نیاز است که فراخوانی شود که با دستور sim این اتفاق می افتد.

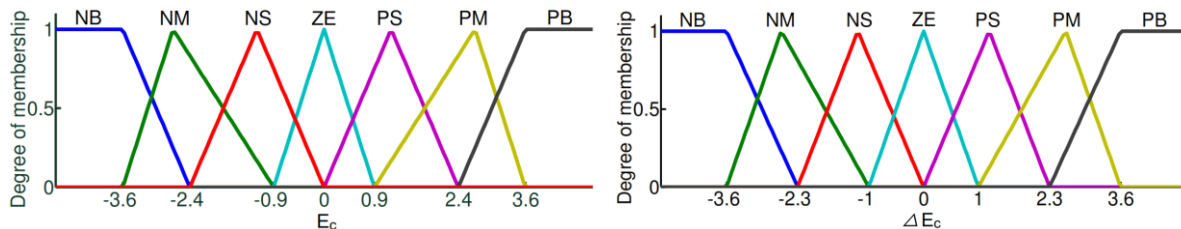
توابعی که نیاز است به کمترین مقدار برسد دو پارامتر نیروی وارده از اکچویاتور به چرخ و مقدار خطای خروجی سیستم است، کمترین مقدار یعنی این که بتواند سیستم عملکرد بهینه خود را داشته باشند

۳-۷-۲ - کنترل کننده Fuzzy-PID

کنترل کننده های PID اغلب برای کنترل و سیله نقلیه استفاده می شوند. با این وجود، هنگام تغییر شرایط کار و پارامترهای کنترل، دستیابی به نتایج رضایت بخش دشوار است. در مقابل، یک کنترل کننده منطقی فازی (FLC) نیازی به یک مدل دقیق ریاضی سیستم ندارد. این ویژگی FLC عملکرد پایدار سیستم را

تضمین می‌کند حتی اگر پارامترها و شرایط کنترل تغییر دینامیکی داشته باشند [73]. در طراحی کنترل‌کننده فازی سه مرحله اساسی وجود دارد که عبارت‌اند از: ۱. طراحی مبتنی بر شناخت ۲. تنظیم پارامترهای کنترلی ۳. توابع عضویت. برای اینکه کنترل‌کننده فازی بتواند اهداف کنترلی خود را به‌درستی انجام دهد مراحل بالا باید به‌طور مناسب انجام گیرد.

میزان خطا E_c و مشتق خطای DEC به وجود آمده در سیستم به‌عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است، هفت واژه فازی تعیین هر دو ورودی و خروجی اتخاذ شده است: منفی بزرگ (NB)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (NS)، صفر (ZE)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM)، و مثبت بزرگ (PB) است. تابع‌های عضویت بر اساس تجربیات انسانی از کارکرد وسیله نقلیه تنظیم می‌شود تا اینکه سیستم به طرز قابل قبولی وظایف خود را انجام دهد [74].



شکل (۳-۱۵) تابع تبدیل ورودی سیستم فازی [74]

شکل (۳-۱۵) میزان خطا E_c و مشتق خطای DEC به وجود آمده در سیستم را نشان می‌دهد. تابع عضویت ورودی نشان‌دهنده مقدار تغییراتی است که موج ورودی می‌تواند انجام دهد در بازه‌هایی که برای این موضوع تعیین شده است. نیاز است در خروجی سیستم فازی موردنظر نیز تابع‌های عضویتی قرار گیرند که این توابع بانام‌های ΔKP و ΔKI و ΔKD نشان داده می‌شوند. برخی از قوانین فرایندی اصلی کنترل‌کننده PID فازی اساسی به شرح زیر است: وقتی E_c و DEC کوچک هستند، KP و KI بزرگ‌تر و KD مناسب باید در مقایسه با پارامترهای فعلی اتخاذ شود، تا بتواند سیستم فرمان را تثبیت کند [75-76]. وقتی E_c و DEC با اندازه متوسط باشند، از KP کوچک‌تر و KI و KD مناسب برای کاهش بیش‌ازحد زاویه فرمان استفاده می‌شود. هنگامی که E_c و DEC بزرگ هستند، از KP بزرگ‌تر و KI و KD کوچک‌تر برای جلوگیری از فشار بیش‌ازحد و تسریع در پاسخ فرمان استفاده می‌شود [75-76]. برای طراحی کنترل‌کننده موردنظر نیاز است قوانین بیشتری وجود داشته باشد تا بر طبق این قوانین کنترل‌کننده فازی بتواند تصمیماتی را اتخاذ کند، این قوانین بر طبق جداول (۳-۲) تا (۳-۴) است:

جدول (۲-۳) قوانین فازی برای ΔKP

| E EC | NB | NM | NS | Ze | PS | PM | PB |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS | PM | PM | PM | PS | ZO | NS | NS |
| Ze | PM | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM | PS | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

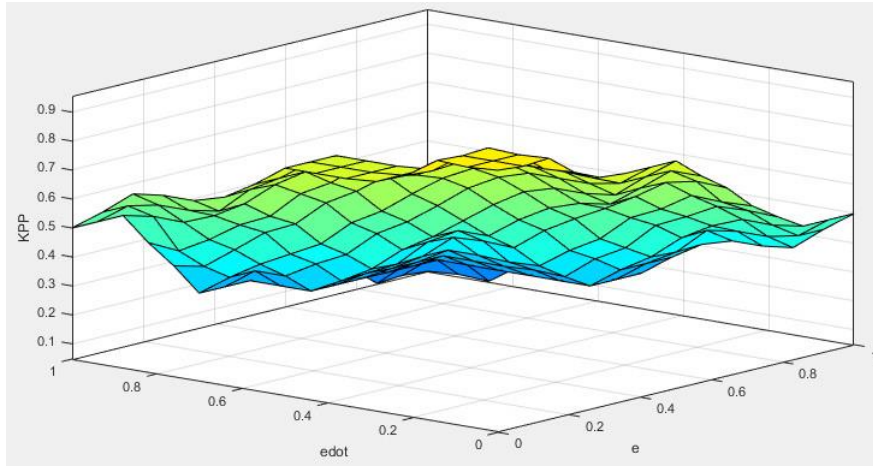
جدول (۳-۳) قوانین فازی برای ΔKI

| E EC | NB | NM | NS | Ze | PS | PM | PB |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM | NB | NB | NM | NS | NS | ZO | ZO |
| NS | NB | NM | PS | NS | ZO | PS | PS |
| Ze | NM | NM | NS | ZO | PS | PM | PM |
| PS | NM | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM | ZO | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB | ZO | ZO | PS | PM | PM | PB | PB |

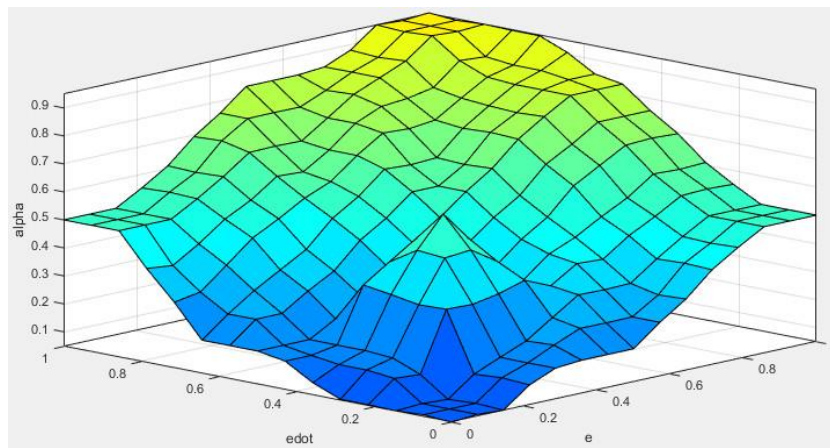
جدول (۴-۳) قوانین فازی برای ΔKD

| E EC | NB | NM | NS | Ze | PS | PM | PB |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | PS | NS | NB | NB | NB | NM | PS |
| NM | PS | NS | NB | NM | NM | NS | ZO |
| NS | ZO | NS | NM | NM | NS | NS | ZO |
| Ze | ZO | NS | NS | NS | NS | NS | ZO |
| PS | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO |
| PM | PM | NS | PS | PS | PS | PS | PB |
| PB | PB | PM | PM | PM | PS | PS | PB |

بعد از اعمال ورودی‌های موردنظر و قوانین حاکم بر منطق فازی به کنترل‌کننده فازی، نمودار سطح ورودی و متغیرهای منطق فازی خروجی ΔKP و ΔKI را بر اساس قوانین ارائه‌شده در جدول بالا و تابع عضویت‌های ورودی سیستم نشان می‌دهد.



شکل (۱۶-۳) شکل سطح ΔK_P



شکل (۱۷-۳) شکل سطح ΔK_I

مقادیر محاسبه شده به وسیله کنترل کننده فازی با استفاده از معادلات (۳-۳۶) تا (۳-۴۲) همسان سازی شده است تا بتواند به عنوان ورودی‌های کنترل کننده PID استفاده شود.

$$K_P^{min} = 0.32 K_u \quad (۳-۳۶)$$

$$K_P^{max} = 0.6 K_u \quad (۳-۳۷)$$

$$K_d^{min} = 0.08 K_u T_u \quad (۳-۳۸)$$

$$K_d^{max} = 0.15 K_u T_u \quad (۳-۳۹)$$

$$K_p = K_P^{min} + (K_P^{max} - K_P^{min}) \Delta K_p \quad (۳-۴۰)$$

$$K_d = K_d^{min} + (K_d^{max} - K_d^{min}) \Delta K_d \quad (۳-۴۱)$$

$$K_i = \frac{\Delta K_p^2}{\Delta K_d \times \Delta K_i} \quad (۳-۴۲)$$

در معادلات (۳-۳۶) تا (۳-۴۲) پارامترهای K_p^{max} , K_p^{min} , K_d^{max} و K_d^{min} به ترتیب محدوده بهره‌های مشتقی و تناسبی فرضی می‌باشند و K_i , K_p و K_d بهره‌های انتگرالی، تناسبی و مشتقی می‌باشند. همچنین پارامترهای T_u و K_u به ترتیب بهره و دوره نوسان در مرز پایداری کنترل کننده است. عملکرد کنترل کننده PID بستگی به انتخاب مناسب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی دارد. انتخاب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی که قدر باشند تا بهترین عملکرد را برای آن فراهم نمایند، کار ساده‌ای نیست. در عمل بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی معمولاً با استفاده از تجزیه و بر پایه تعداد قواعد کلی استخراج می‌شود. کنترل کننده فازی PID بر مبنای یک مجموعه از قواعد اگر-آنگاه مرحله‌ای بنانهاده شده است که چگونگی انتخاب بهره‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی را تحت شرایط عملکرد مشخص تشریح می‌کند. در معادلات (۳-۳۶) تا (۳-۴۲) هدف تعیین سه ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از قوانین کنترل کننده فازی است.

۳-۸- جمع‌بندی

در این فصل به طراحی سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی اقدام شد. مدل طراحی شده باعث حذف مجموعه رک فرمان و افزایش سرعت کنترل‌پذیری و کاهش نیروی موردنیاز سیستم جهت فرمان دادن به خودرو می‌شود. در ادامه نیز به صحنه‌گذاری مدل فرمان سیمی با مقایسه نتایج همچنین محرک الکترومکانیکی خطی و توضیحاتی در مورد الگوریتم ژنتیک و فازی PID برای بهینه‌سازی سیستم فرمان بر اساس تحقیقات اخیر پرداخته شده است. در فصل بعد نیاز است برای بهینه‌سازی نیرو موردنیاز و سرعت پاسخ‌دهی سیستم از کنترل کننده Genetic algorithm-PID و Fuzzy-pid استفاده شود تا بتوان ضرایب کنترل کننده PID را بهینه کرد و با کمترین نیرو بهینه‌ترین پاسخ سیستم را به دست آورد. سیستم فرمان موردنظر بر روی مدل درجه‌دو چرخ خودرو قرار می‌گیرد و نتایج خروجی نیروها استخراج می‌شود.

فصل ۴ :

شبیه‌سازی و استخراج نتایج

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بیان نتایج خروجی از مدل فرمان طراحی شده پرداخته خواهد شد که این نتایج خروجی با مدل سیستم فرمان سیمی نیز مقایسه خواهد شد. برای بهبود عملکرد و بهینه‌سازی سیستم فرمان موردنظر از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که با استفاده از این الگوریتم به پیدا کردن ضرایب بهینه برای کنترل‌کننده‌ها پرداخته شده است. در ادامه نیز به مقایسه نتایج سیستم فرمان طراحی شده در سه حالت بهینه‌سازی شده ضرایب با زیگلر نیکولز، الگوریتم ژنتیک و کنترل کننده Fuzzy-PID پرداخته خواهد شد. در انتها نیز مدل سیستم فرمان موردنظر را در مدل خطی خودرو قرار داده و نتایج خروجی خودرو استخراج می‌شود.

۴-۲- نتایج خروجی از سیستم فرمان سیمی با محرک خطی

سیستم فرمان موردنظر که توسط نرم‌افزار MATLAB/Simulink طراحی شده را تحت تأثیر ورودی زاویه دست راننده قرار می‌دهیم و خروجی سیستم را بر مبنای این زاویه را به‌عنوان خروجی سیستم در نظر گرفته شده است.

سیستم‌های الکتریکی باید پایداری قابل قبولی داشته باشند یعنی پاسخ سیستم باید تا حد قابل قبولی سریع و میرا باشد. برای رسیدن به این مطلوب و کنترل‌پذیری بهتر سیستم و کاهش خطاها و نویزهای به وجود آمده در مجموعه باید از انواع کنترل‌کننده‌های مدار الکتریکی استفاده شود، در سیستم فرمان خودرو از دو کنترل‌کننده PID استفاده شده به این دلیل که سیستم فرمان سیمی به دو قسمت تقسیم می‌شود و برای کاهش اغتشاشات نیاز هرکدام از یک کنترل‌کننده مجزا استفاده‌کننده. از مزایای اصلی این کنترل‌کننده ساده بودن و قابلیت اعتماد خوب این سیستم بوده و به همین دلایل در صنعت استفاده گسترده‌ای دارد برای عملکرد بهتر این سیستم نیاز است که ضرایب این کنترل‌کننده در بهینه‌ترین حالت خود قرار داشته باشند، برای رسیدن به این مقدار بهینه از روش زیگلر نیکولز استفاده شده است [77].

تابع تبدیل یک کنترل‌کننده PID به صورت زیر است:

$$G = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4-1)$$

در معادله (۴-۱)، K_p ضریب تناسبی، K_I ضریب انتگرالی و K_D ضریب مشتق کنترل‌کننده می‌باشند. برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده PID با استفاده از الگوریتم زیگلر نیکولز نیاز است که سیستم موردنظر

به صورت حلقه بسته باشد و ورودی سیستم سیگنال ضربه باشد، بعد از اعمال ورودی موردنظر کنترل کننده را فقط به صورت K_P کنترل می‌کنیم. ضریب K_P را افزایش داده تا به نوسانی شدن برسد و ضرایب T و K را تعیین می‌کنیم و بر اساس جدول زیگلرنیکولز مقادیر سه ضریب کنترل کننده PID را تعیین می‌کنیم.

$$K_P = 0.6 K_u \quad (۲-۴)$$

$$T_u = T_u/2 \quad (۳-۴)$$

$$T_d = T_u/8 \quad (۴-۴)$$

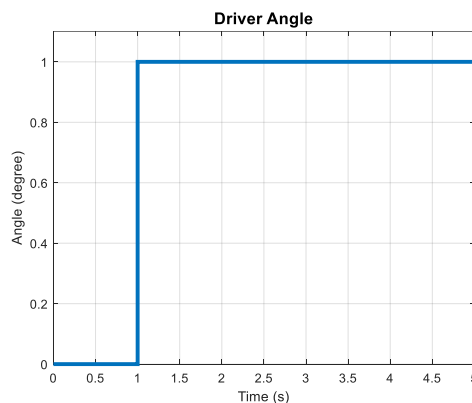
مقادیر که برای این دو کنترل کننده بعد از بهینه‌سازی به روش زیگلرنیکولز استخراج شده، در جدول (۴-۱) آورده شده است:

جدول (۴-۱) مقادیر PID

| Controller tuning | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Ziegler-Nichols method | K_P | K_I | K_D |
| PID Controller-1 | 30 | 70 | 0.08 |
| PID Controller-2 | 130 | 10 | 5 |

با توجه به مقادیر محاسبه شده توسط این روش که در جدول بالا آورده شده است اقدام به استخراج نتایج خروجی از سیستم فرمان موردنظر می‌کنیم.

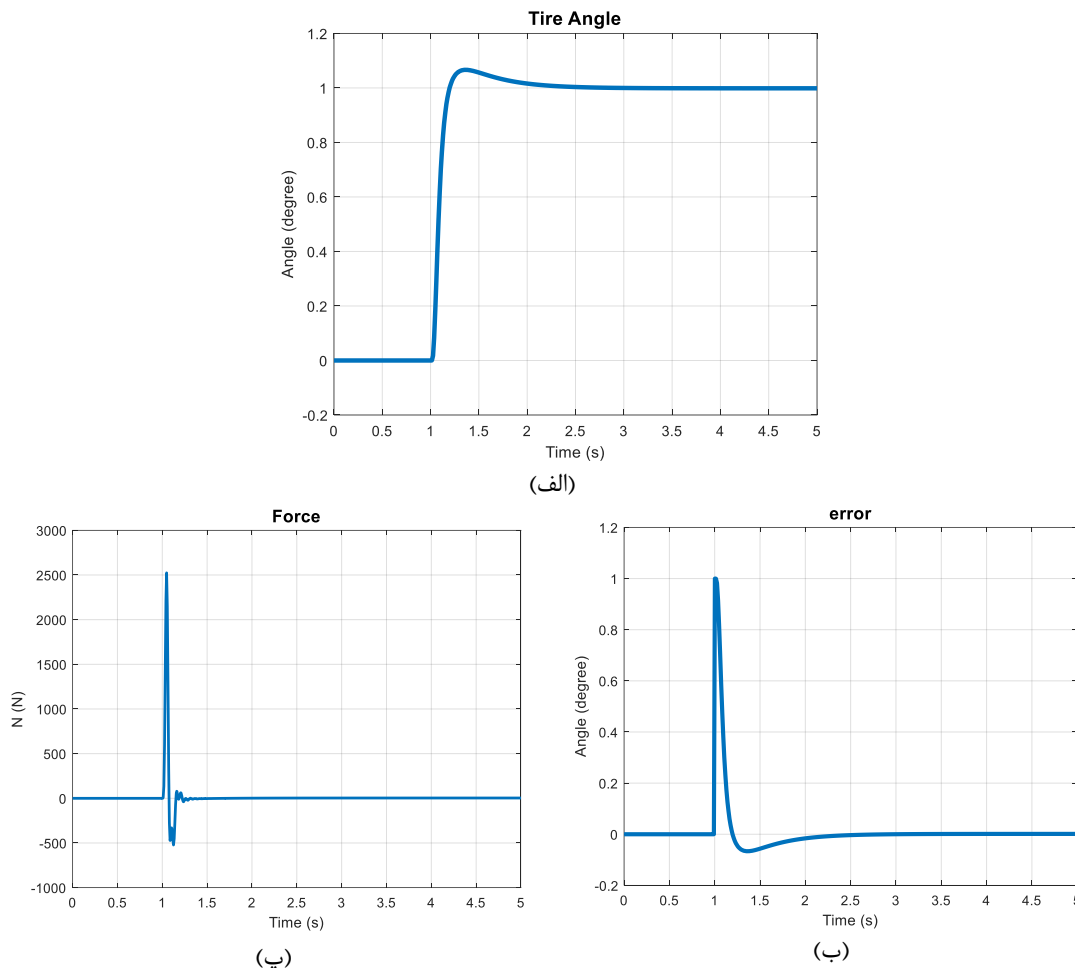
ورودی موردنظر برای سیستم فرمان خودرو زاویه پله است به دلیل بررسی عکس‌العمل سیستم که در مقاله فهیمی آورده شده است [76]. که از سمت راننده که در شکل (۴-۱) آورده شده است به سیستم اعمال می‌شود:



شکل (۴-۱) شکل موج ضربه

در شکل (۴-۱)، نشان دهند شکل موجی بوده است که به‌عنوان ورودی سیستم فرمان موردنظر قرار می‌گیرد.

بعد از اعمال ورودی موردنظر به سیستم فرمان خودرو اقدام به استخراج خروجی‌های سیستم فرمان موردنظر کرده‌ایم که این نتایج خروجی از سیستم فرمان طراحی شده در شکل (۴-۲) زیر آورده شده است:



شکل (۴-۲) نمودارهای خروجی از سیستم فرمان خودرو سیستم (الف) زاویه تایر خودرو (ب) مقدار خطای خروجی تایر خطی (پ) مقدار نیروی ورودی به تایر از سمت موتور الکتریکی

شکل (۴-۲)، نشان دهند خروجی‌های سیستم فرمان برقی با محرک الکترومکانیکی خطی است. زاویه چرخ است که نسبت به ورودی پله اعمال شده از سمت راننده است که این مقدار محاسبه شده نسبت به مقدار ورودی از سمت راننده مقدار خطای بعد از زمان ۲٫۵ ثانیه به صفر رسیده است که نشان دهند این است که سیستم برای دنبال کردن نمودار ورودی از سمت راننده ۱٫۵ ثانیه زمان لازم دارد. نمودار شکل (پ) مقدار نیروی وارده از سمت محرک به تایر خودرو جهت فرمان دادن را نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار نیروی خروجی از این سیستم برابر ۲۵۲۰ نیوتن بوده است.

۴-۳- مقایسه نتایج خروجی با سیستم فرمان سیمی

هدف این بخش بیان خروجی‌های هر دو سیستم فرمان خودرو موردنظر در این پایان‌نامه می‌باشد تا بتوانیم عملکرد سیستم فرمان طراحی شده را با سیستم فرمان سیمی برسی کنیم، برای رسیدن به این منظور به هر دو سیستم ورودی برابر اعمال می‌کنیم سپس نتایج خروجی هر دو سیستم را از نظر شباهت به هم و درصد خطا و همچنین بحث دنبال کردن رفتار راننده را مدنظر داریم.

همان‌طور که بیان شد برای رسیدن به بهینه‌ترین جواب‌های خروجی نیاز است که ضرایب کنترل‌کننده‌های هر دو سیستم تنظیم شود؛ برای رسیدن به این منظور از روش زیگلر-نیکولز جهت تنظیم ضرایب استفاده کرده‌ایم.

برای محاسبه مقادیر موردنظر ورودی پله را به هر دو مدل سیستم فرمان اعمال کرده و سپس ضرایب K_D و K_I را در هر دو کنترل‌کننده صفر قرار می‌دهیم یعنی یک کنترل‌کننده تناسبی داریم. مقادیر خروجی را با استفاده از معادلات (۲-۴) تا (۴-۴) محاسبه کرده.

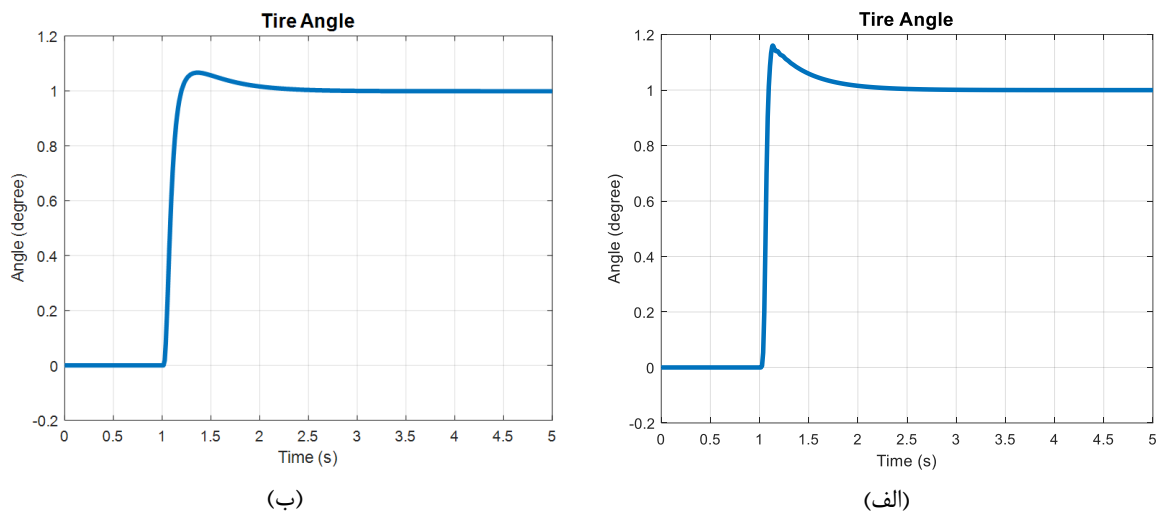
مقادیر خروجی با استفاده از روش زیگلر-نیکولز برای کنترل‌کننده‌های هر دو سیستم فرمان در جدول (۴-۲) آورده شده است:

جدول (۲-۴) مقادیر کنترل‌کننده‌ها در هر دو مدل سیستم فرمان

| Ziegler– Nichols method tune controller | K_P | | K_I | | K_D | |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Controller 1 | Controller 2 | Controller 1 | Controller 2 | Controller 1 | Controller 2 |
| SBW_PID | 30 | 155.263 | 70 | 1 | 0.08 | 36.211 |
| SBW with linear Actuator_PI D | 30 | 130 | 70 | 10 | 0.08 | 5 |

مقادیر ضرایب به‌دست‌آمده در مدل‌های سیستم فرمان جایگزین شده و اقدام به استخراج نتایج خروجی از سیستم فرمان‌های موردنظر می‌شود.

نتایج خروجی از دو سیستم فرمان در شکل‌های (۳-۴) آورده شده است:



شکل (۳-۴) زاویه خروجی چرخ (الف) مقدار زاویه خروجی تایر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ب) مقدار زاویه خروجی تایر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی

شکل (۳-۴)، نشان‌دهنده زاویه چرخ هر دو سیستم فرمان خودرو می‌باشد. نمودار (الف) بیانگر زاویه چرخ در سیستم فرمان سیمی معمولی بوده است و نمودار (ب) نشان‌دهنده زاویه چرخ در سیستم فرمان برقی با محرک الکترومکانیکی خطی بوده است. همان‌طور که در اشکال بالا ملاحظه می‌شود رفتار هر دو سیستم نسبت به ورودی پله به یک صورت بوده است. در سیستم فرمان با محرک الکترومکانیک خطی رفتار سیستم بالا زدگی کمتری داشته و نرم‌تر به ورودی راننده می‌رسد اما در سیستم فرمان برقی سیمی رفتار سیستم هجومی بوده که باعث ایجاد بلازدگی بیشتری در نتیجه خروجی می‌شود. در جدول (۳-۴) داده‌های دو نمودار آورده شده است.

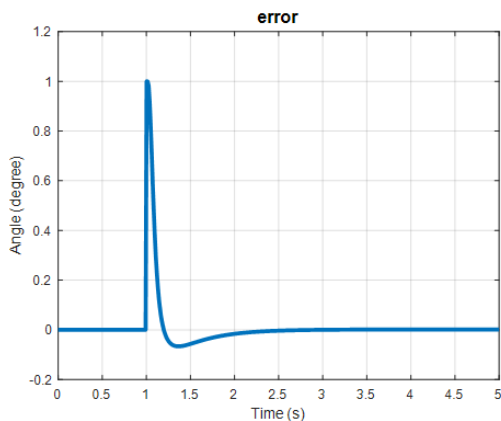
جدول (۳-۴) جدول پارامتری نمودارها

| سیستم فرمان برقی سیمی | سیستم فرمان برقی سیمی | پارامتر |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی | سیستم فرمان برقی سیمی | اور شوت |
| ۱۰,۸ | ۱,۱۸ | |
| ۱,۵ | ۱,۵ | تأخیر زمانی |

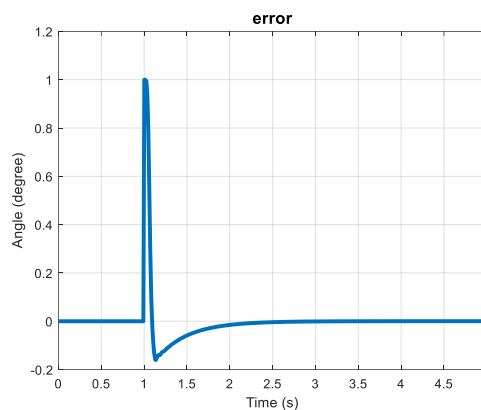
تأخیر زمانی هر دو سیستم باهم برابر بوده و حدوداً با تأخیر ۱,۵ ثانیه به زاویه ورودی راننده را دنبال کرده‌اند.

همان‌طور که در شکل (۳-۴) بیان شد سیستم فرمان‌ها دارای رفتاری شبیه به هم برای رسیدن به ورودی راننده بوده‌اند.

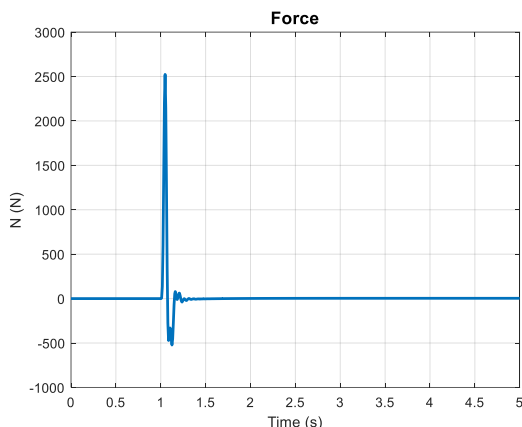
شکل (۴-۴) مقدار این خطای هر دو سیستم از مقدار مطلوب آورده شده است:



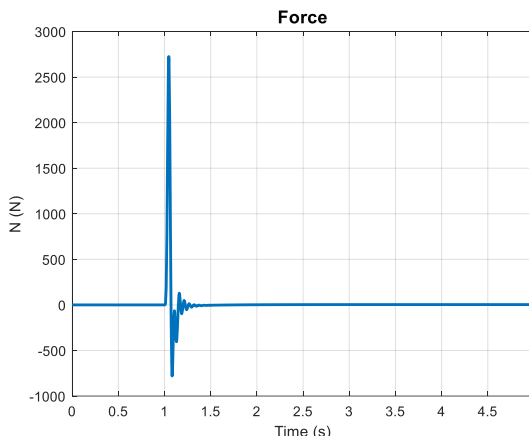
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل (۴-۴) مقدار خطای خروجی تایر (الف) در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ب) در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی خطی (پ) مقدار نیروی ورودی به تایر از فرمان برقی سیمی با محرک دورانی (ت) مقدار نیروی ورودی به تایر از فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی

شکل (۴-۴) بیانگر مقدار خطای هر دو سیستم نسبت به ورودی از سمت راننده است. نمودارهای (الف و ب) مقدار خطای هر دو سیستم نسبت به ورودی از سمت راننده را بیان می‌کند همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار هر دو سیستم به هم نزدیک بوده و با یک‌زمان تأخیر مساوی به صفر رسیده‌اند و نمودارهای (پ و ت) اختلاف بین خطای خروجی تایر و ورودی از سمت راننده هر دو سیستم بوده است. همان‌طور که در نمودارهای (پ و ت) ملاحظه می‌شود، مقدار نیروی وارده از سمت محرک به تایر خودرو جهت فرمان دادن را نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار نیروی خروجی در سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی برابر ۲۷۵۰ و در سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی برابر ۲۵۲۰ نیوتن بوده است.

با توجه به شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) ملاحظه می‌شود با مقایسه رفتار سیستم فرمان برقی سیمی با

محرک خطی الکترومکانیکی و سیستم فرمان برقی سیمی با محرک دورانی به این نتیجه می‌توان رسید که سیستم فرمان طراحی شده رفتار قابل قبول داشته و می‌تواند به‌عنوان سیستم فرمان در خودرو مورد استفاده قرار گیرد. برای بهبود عملکرد این سیستم در بخش‌های بعد با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده پرداخته می‌شود. در جدول شماره (۴-۴) به مقایسه پارامترهای خروجی پرداخته شده است.

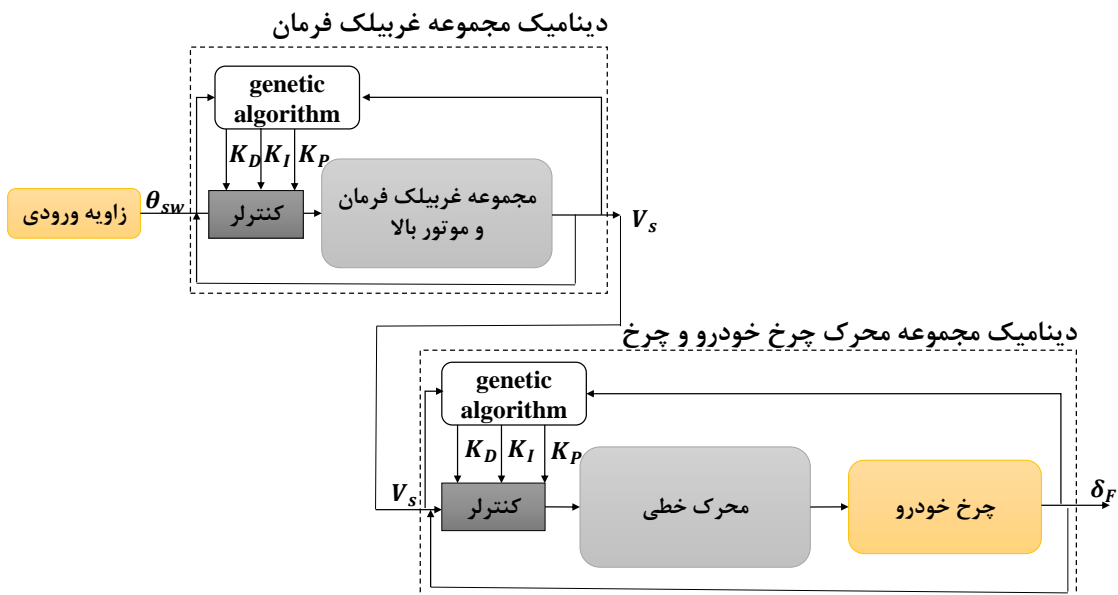
جدول (۴-۴) جدول پارامتری نمودارها

| پارامتر | سیستم فرمان برقی سیمی | سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی |
|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| پیک ارور | ۱,۱۸ | ۱۰,۸ |
| تأخیر زمانی ارور | ۱,۵ | ۱,۵ |
| نیرو اعمالی | ۲۷۳۰ | ۲۲۵۰ |

۴-۴- بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک

در بخش‌های قبل ملاحظه می‌شود که سیستم فرمان طراحی شده می‌تواند رفتار قابل قبولی از خود ارائه دهد، در این قسمت هدف بر این است که سیستم فرمان موردنظر باید با دقت بیشتری رفتار راننده را دنبال کند تا بتواند به بهترین نتیجه خروجی برسد برای رسیدن به این مطلوب باید از روش‌های دقیق‌تری برای رسیدن به بهترین مقادیر برای کنترل‌کننده PID سیستم برسییم برای رسیدن به این منظور از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در شکل (۴-۵) شماتیک سیستم فرمان خودرو با استفاده از الگوریتم ژنتیک آورده شده است:



شکل (۴-۵) شماتیک محل قرارگیری الگوریتم ژنتیک

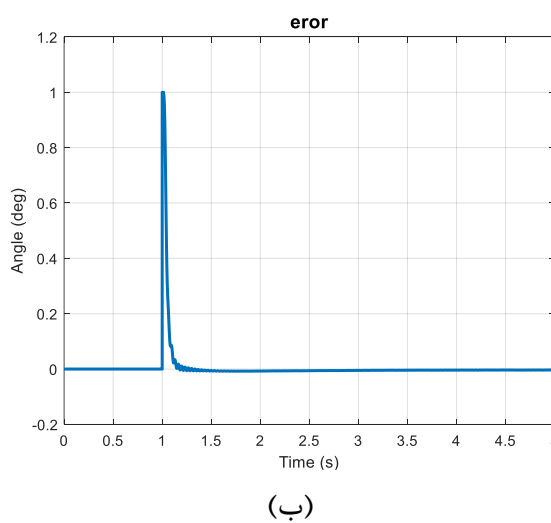
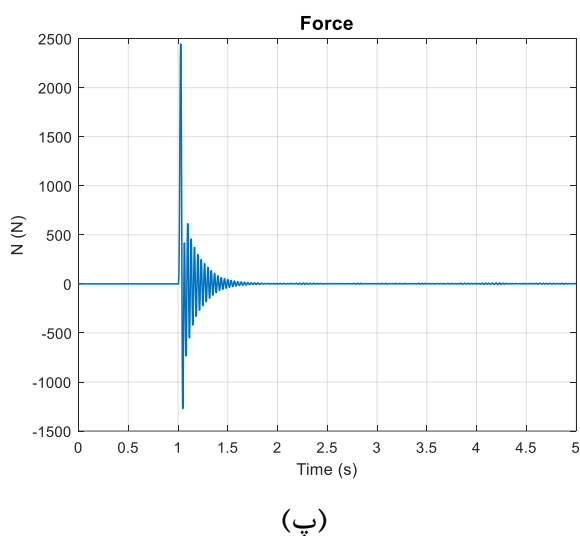
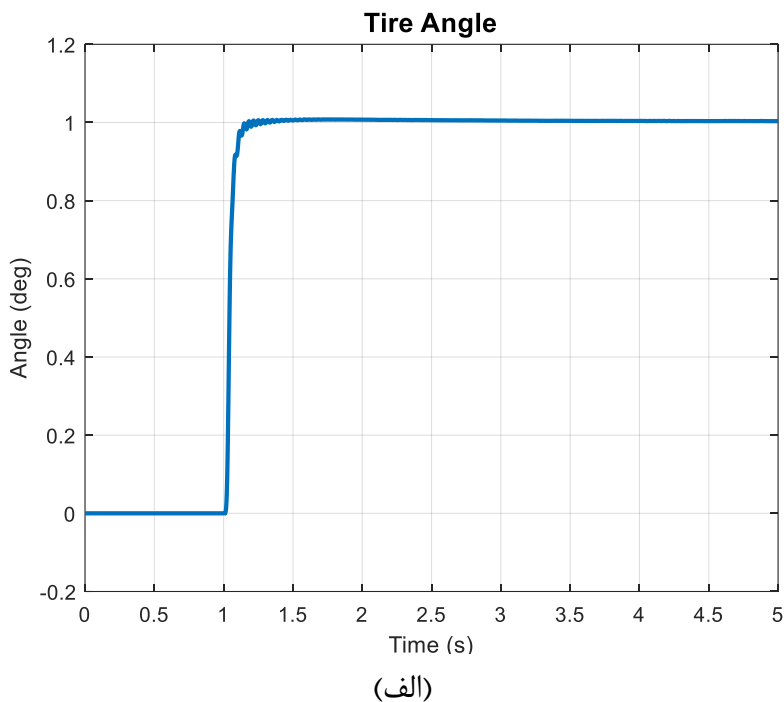
همان‌طور که در شکل (۴-۵) ملاحظه می‌شود، هدف از الگوریتم ژنتیک تعیین سه ضریب K_D و K_I ، K_P می‌باشد که روش انجام این فرایند در فصل سوم بیان شده است. الگوریتم ژنتیک مقدار اختلاف به خطای به وجود آمده از ابتدا و انتهای سیستم را می‌خواند و با استفاده از محدوده تعیین‌شده برای این سه ضریب بهینه‌ترین نقطه برای هر یک از این ضرایب انتخاب می‌کند.

الگوریتم ژنتیک با استفاده از کد که در پیوست (الف) آورده شده است اقدام به تعیین مقادیر بهینه برای کنترل‌کننده کرده است که این مقادیر در جدول (۴-۳) آورده شده است.

جدول (۴-۵) ضرایب کنترل‌کننده

| genetic Algorithm tune controller | K_P | | K_I | | K_D | |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Controller 1 | Controller 2 | Controller 1 | Controller 2 | Controller 1 | Controller 2 |
| SBW_PID | 30 | 265 | 70 | 30 | 2.8590 | 85 |

مقادیر استخراج شده توسط الگوریتم ژنتیک باعث ایجاد نتایج خروجی بهتر نسبت به روش زیگلر نیکولز شده است. مقدار نوسانی که به وجود آمده است در اثر مقادیر جدید باعث به وجود آمدن آسیب در سیستم به دلیل بازه کم این نوسان نخواهد شد و سیستم می‌تواند به خوبی عملکرد خود را دنبال کند. نتایج در شکل (۴-۶) زیر آورده شده است:



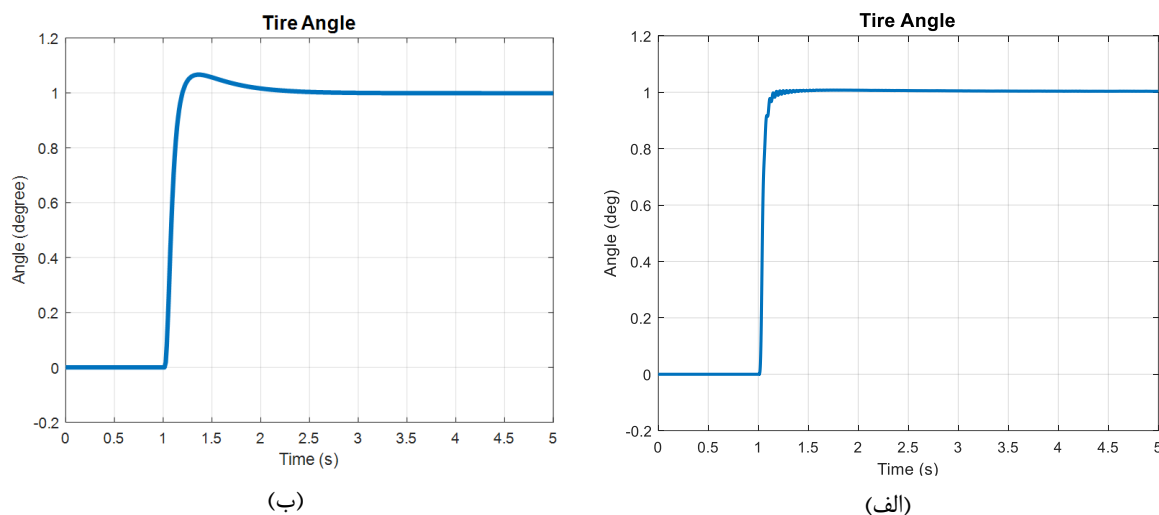
شکل (۴-۶) نمودارهای خروجی از سیستم فرمان خودرو با کنترل کننده Fuzzy-PID (الف) زاویه فرمان تایر خودرو (ب) مقدار خطای خروجی تایر (پ) مقدار نیروی ورودی به تایر از سمت موتور الکتریکی

شکل (۴-۶) نشان‌دهنده نتایج خروجی بعد از اعمال ضرایب بهینه شده تو سطر الگوریتم ژنتیک است. همان‌طور که نمودار (الف) نشان می‌دهد زاویه چرخ خودرو مقدار تأخیر زمانی حدوداً ۲۰ میلی ثانیه بوده است. با مقایسه نتایج با سیستم فرمان برقی سیمی، محرک الکترومکانیکی خطی حدود ۱,۳۰ ثانیه بهبودیافته است و با سرعت بیشتری رفتار راننده را دنبال می‌کند. نمودار (ب) نشان‌دهنده مقدار خطای

خروجی در تایر خودرو نسبت به ورودی از سمت راننده می‌باشد همان‌طور ملاحظه می‌شود مقدار این خطا کاهش چشم‌گیری داشته است.

نمودار (ب) مقدار نیروی اعمالی از سمت موتور الکتریکی به چرخ خودرو را نشان می‌دهد، بنا به محاسبات انجام شده در فصل دو مقدار نیروی موردنیاز برای به حرکت درآوردن چرخ خودرو $2558,889 \text{ N}$ بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نیروی اعمالی با نیروی به‌دست‌آمده از محاسبات نزدیک بوده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج خروجی سیستم نسبت به حالت قبل در نقطه‌ی کاری بهینه‌تر قرار گرفته است. نتایج خروجی از سیستم فرمان موردنظر را در دو حالت تنظیم‌کننده کنترل‌کننده تو سطر روش زیگلر نیکولز و الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار دهیم که نتایج خروجی هر دو سیستم در شکل (۴-۷) زیر آورده شده است:



شکل (۴-۷) زاویه خروجی چرخ (الف) مقدار زاویه خروجی تایر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیک خطی با بهینه‌سازی ژنتیک (ب) مقدار زاویه خروجی تایر در سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی با بهینه‌سازی زیگلر نیکولز

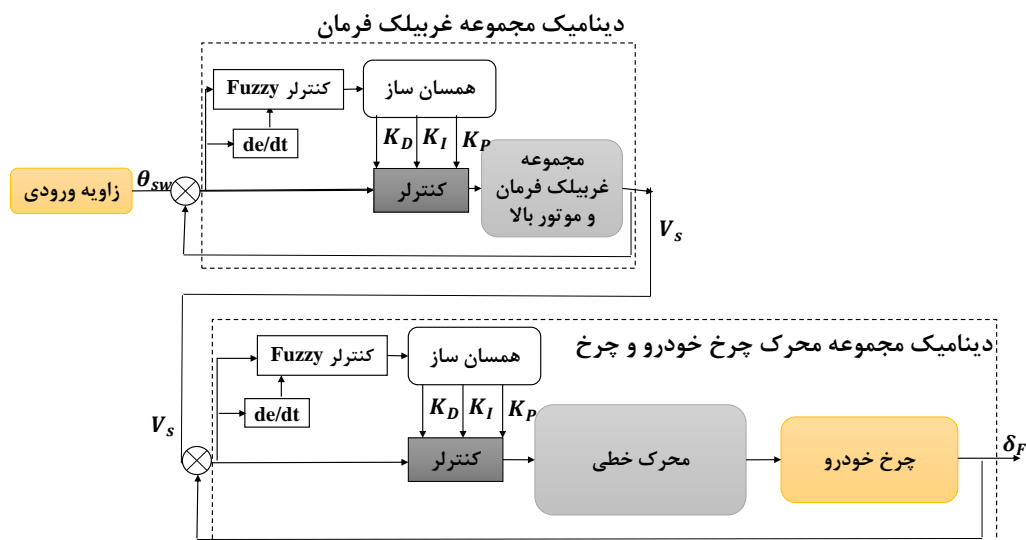
شکل (۴-۷) نشان دهند زاویه چرخ بوده همان‌طور که در شکل بالا ملاحظه می‌شود مقدار تأخیر زمانی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بسیار کمتر از روش زیگلر نیکولز بوده است که این نشان‌دهنده این است که سیستم با استفاده از این روش جهت تعیین ضرایب کنترل‌کننده PID بهتر می‌تواند رفتار راننده را دنبال کند.

جدول (۴-۶) جدول پارامتری نمودارها

| پارامتر | الگوریتم ژنتیک | الگوریتم زیگلر-نیکولز |
|-------------|----------------|-----------------------|
| اور شوت | ۱ | ۱,۰۹ |
| تاخیر زمانی | ۰,۳ | ۱ |

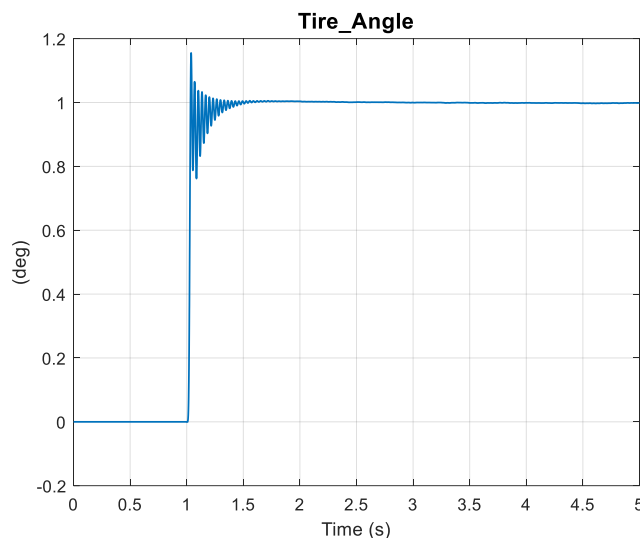
۴-۵- بهینه‌سازی توسط کنترل کننده Fuzzy-PID

در بخش‌های قبل به تعیین ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از دو روش زیگلر-نیکولز و الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است. در این بخش هدف تعیین ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم کنترل کننده فازی است و با مقایسه نتایج خروجی از این سه روش هدف آن است تا بتوان بهترین الگوریتم جهت تعیین ضرایب کنترل کننده PID استفاده شود. ساختار کنترل کننده PID فازی که برای مدل سیستم فرمان برقی با محرک الکترومکانیکی خطی استفاده شده است در شکل (۴-۸) نشان داده شده است.

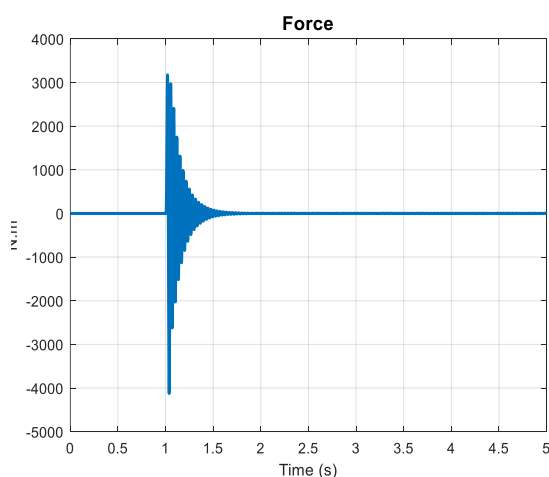


شکل (۴-۸) شماتیک سیستم فرمان با کنترل کننده Fuzzy-PID

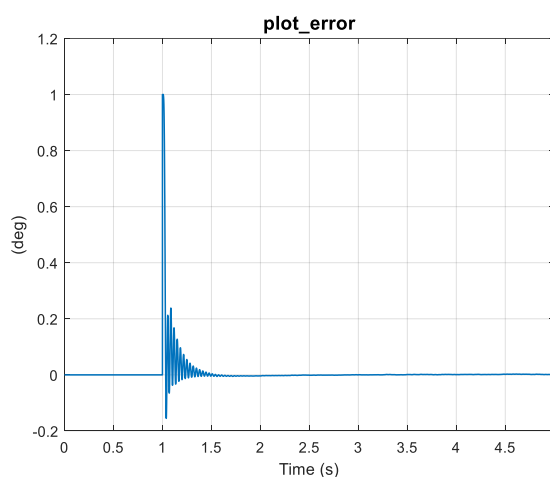
نتایج خروجی بعد از اعمال کنترل کننده Fuzzy-PID در شکل (۴-۹) آورده شده است:



(الف)



(پ)



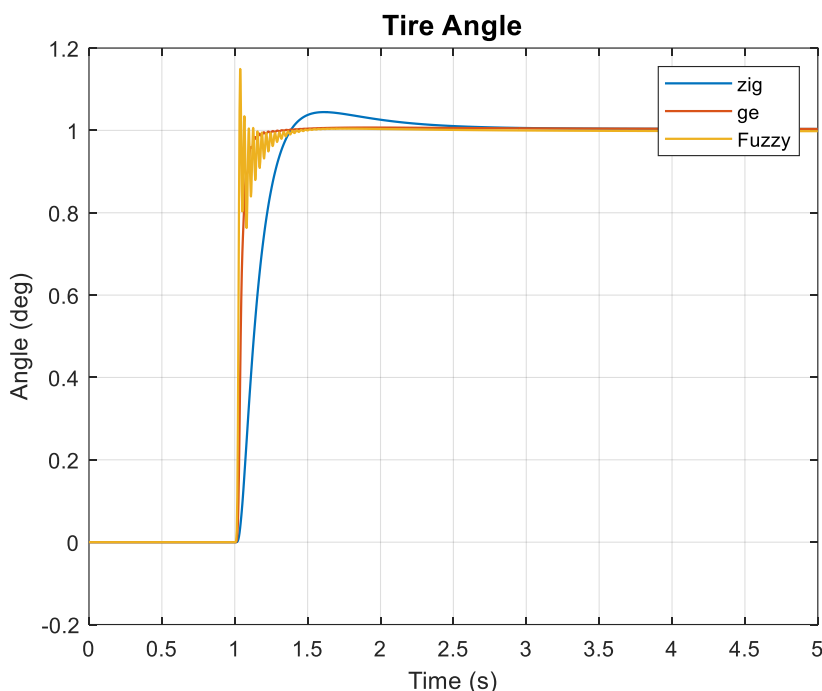
(ب)

شکل (۴-۹) نمودارهای خروجی از سیستم فرمان خودرو با کنترل کننده Fuzzy-PID (الف) زاویه فرمان تایلر خودرو

(ب) مقدار خطای خروجی تایلر (پ) مقدار نیروی ورودی به تایلر از سمت موتور الکتریکی

شکل (۴-۹) نتایج خروجی سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی که توسط کنترل کننده Fuzzy-PID کنترل می شود را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود شکل موج و مقدار خطا مانند حالت استفاده از ژنتیک الگوریتم برای کنترل نتایج خروجی بوده است اما مقدار نیروی تولیدی در این حالت به ۳۱۰۰ نیوتن رسیده است که از مقدار محاسبه شده در فصل ۲ بیشتر بوده است و نشان دهند دقت پایین تر این روش می باشد.

۴-۶- نمودار مقایسه‌ای سه روش کنترلی برای بهینه‌سازی ضرایب PID



شکل (۴-۱۰) نمودار زاویه تاپر خودرو در سه حالت زیگنلر- نیکولز، ژنتیک الگوریتم و فازی

شکل (۴-۱۰) نتایج خروجی از سه روش زیگنلر- نیکولز، ژنتیک الگوریتم و فازی را برای تعیین ضرایب کنترل کننده PID استفاده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روش زیگنلر- نیکولز از دقت پایینی برخوردار بوده است نسبت به دو روش کنترلی دیگر، روش کنترلی فازی نیز دقت خوبی نسبت به حالت زیگنلر- نیکولز داشته اما از نظر درصد خطا نسبت به حالت ژنتیک الگوریتم خطای بیشتری داشته است و دامنه نوسان بیشتری نیز داشته است. مقدار این نوسان به دلیل داشتن دامنه و بازه زمانی کم در سیستم مشکل زیادی به جود نمی‌آورد. بهینه‌ترین روش برای تنظیم کنترل کننده PID استفاده از الگوریتم ژنتیک در تعیین مقادیر ضرایب کنترل کننده بوده است. در ادامه نیز از مقادیر بهینه محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک برای استخراج نتایج خروجی از مدل دوچرخ خودرو استفاده می‌شود.

جدول (۴-۷) جدول پارامتری نمودارها

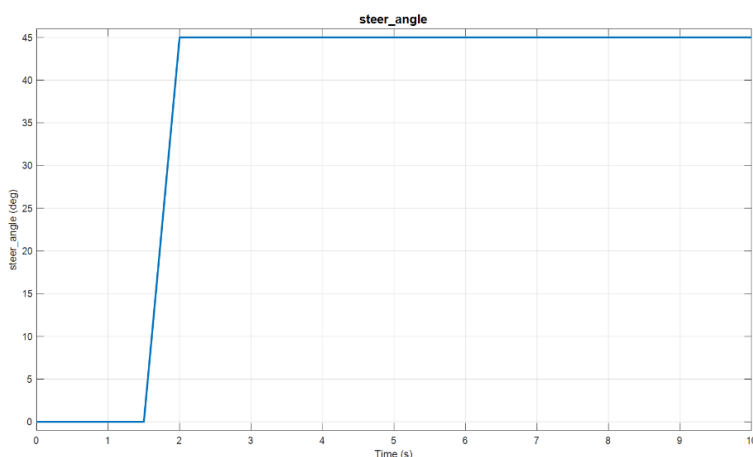
| پارامتر | زیگنلر نیکولز | ژنتیک الگوریتم | فازی-PID |
|-------------|---------------|----------------|----------|
| اور شوت | ۱,۱۸ | ۱ | ۱,۱۸ |
| تاخیر زمانی | ۱,۵ | ۰,۲ | ۰,۵ |

۴-۷- نمودار نیروهای خروجی چرخ خودرو

در ای بخش خروجی مدل دوچرخ را برای سیستم فرمان سیمی موردنظر و سیستم فرمان خودرو سیمی عادی را با توجه به مقاله سعیدی [68] در دو تست دو مانور حالت مانا و Fishhook مقایسه کرده و نتایج را به تفصیل بیان می‌کنیم.

۴-۷-۱- مانور حالت مانا

در این آنالیز، خودرو با سرعت اولیه 70 km/h در جاده خشک، شروع به حرکت کرده و ورودی فرمان به صورت شکل (۴-۱۱) است. ورودی سیستم فرمان تغییری از ۰ تا ۴۵ درجه کرده است و سپس حالت به وجود آمده در سیستم را ادامه داده است.



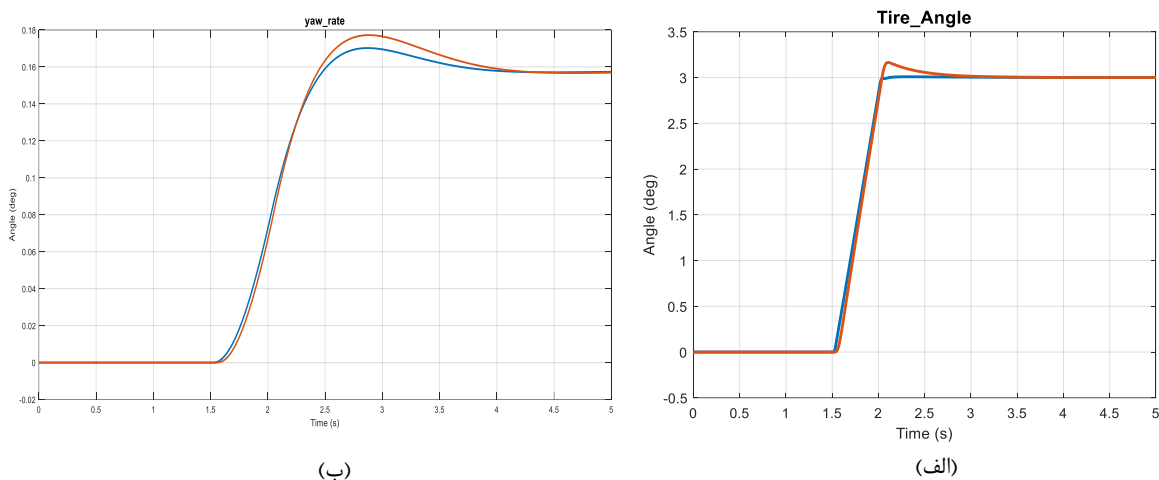
شکل (۴-۱۱) نمودار ورودی فرمان حالت مانا

ورودی اعمالی از راننده به سیستم باعث ایجاد تغییراتی در خروجی مدل شده است که در شکل (۴-۱۰) آورده شده است.

شکل (۴-۱۲) نمودار (الف)، نمودار خروجی زاویه تایلر خودرو در اثر ورودی حالت مانای خودرو می‌باشد که با نسبت دنده ۱۵ به سیستم اعمال شده است. سیستم فرمان سیمی با محرک خطی الکترومکانیکی ورودی راننده را به خوبی دنبال می‌کند اما سیستم فرمان سیمی عادی دارای بیرون زدگی و تأخیر در جواب خروجی نسبت به ورودی راننده بوده است.

نمودار (ب)، سرعت زاویه‌ای چرخشی خودرو را نشان می‌دهد، همان‌طور که ملاحظه می‌شود سیستم

فرمان سیمی با موتور خطی دارای مقدار پیک سرعت زاویه‌ای چرخشی کمتری در خودرو نسبت به سیستم فرمان برقی سیمی عادی دارد و نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر سیستم فرمان برقی سیمی عادی می‌باشد.

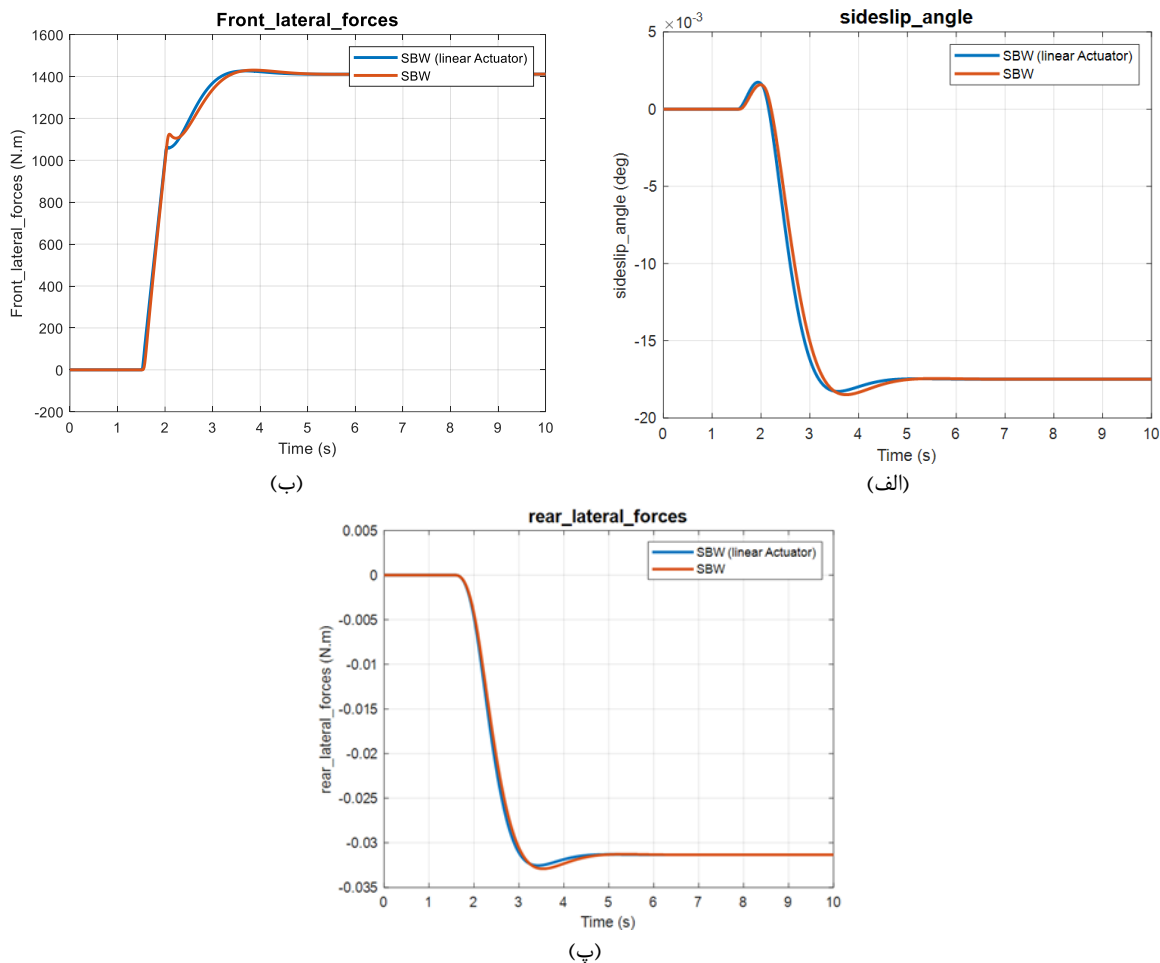


شکل (۴-۱۲) نمودارهای خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور حالت مانا (الف) زاویه تایلر خودرو (ب) زاویه انحراف خودرو

شکل (۴-۱۲)، نمودار (الف)، مقدار زاویه خروج از محور خودرو در اثر زاویه فرمان اعمالی به سیستم فرمان می‌باشد. مقدار این زاویه در بازه هزارم درصد بوده است و بعد از اعمال یک پیک مثبت شروع به منفی شدن کرده است و این زاویه برخلاف جهت فرمان دهی سیستم است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود رفتار سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی بهتر از سیستم فرمان سیمی عادی می‌باشد.

نمودار (ب)، مقدار نیروی به وجود آمده در چرخ‌های جلوی خودرو در بازه ۱۴۰۰ نیوتن متر است که این بازه نیرو در بازه مقدار نیرو قابل قبول تولیدی موتور الکتریکی است و سرعت و مقدار نیروی به وجود آمده در سیستم فرمان با موتور خطی کمتر شده است.

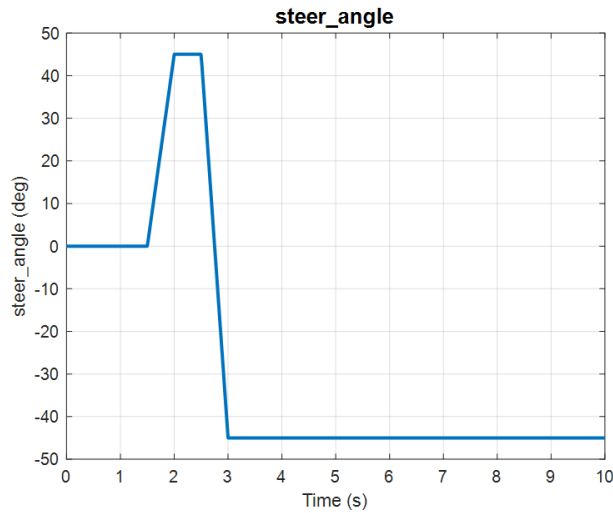
نمودار (پ)، مقدار نیروی به وجود آمدن در اثر این مانور در چرخ‌های عقب خودرو ۰,۰۳ نیوتن متر است که هرچقدر مقدار این نیرو بیشتر باشد باعث لغزش چرخ عقب خودرو شده و ناپایداری را در خودرو ایجاد می‌کند، در مدل دوچرخ خودرو موردنظر می‌توان از این نیرو صرف‌نظر شود. نمودارهای نتایج خروجی این مانور در شکل (۴-۱۳) آورده شده است:



شکل (۴-۱۳) نمودارهای خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور حالت مانا (الف) زاویه خروج از محور (ب) نیروی جانبی چرخ جلو (پ) نیروی جانبی چرخ عقب

۴-۷-۲- مانور Fishhook

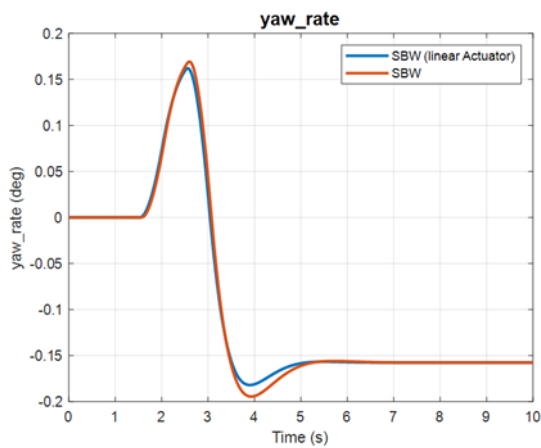
این تست در جهت بررسی پایداری خودرو معرفی و از ۲ مرحله تشکیل شده است. ابتدا راننده با زاویه فرمان صفر به حرکت خود ادامه داده سپس با تغییر زاویه ۴۵ درجه به سمت چپ و راست با یک زاویه فرمان ثابت فرمان به حرکت خود ادامه می‌دهد. این تست جهت اندازه‌گیری پایداری خودرو می‌باشد. در این آنالیز، خودرو با سرعت اولیه 100 km/h در جاده خشک، شروع به حرکت کرده و ورودی فرمان به صورت شکل (۴-۱۴) است.



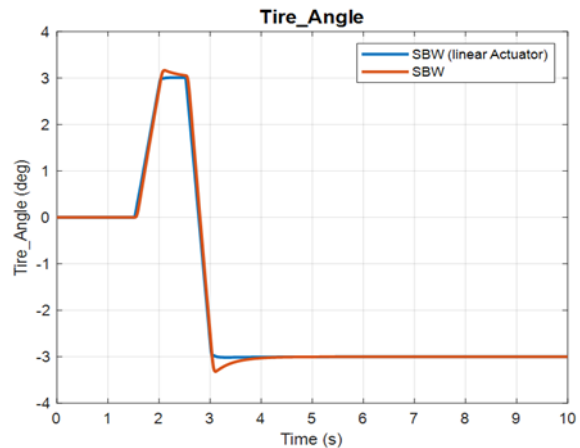
شکل (۴-۱۴) نمودار مانور fishhook

شکل (۴-۱۵)، نشان‌دهنده مقدار خروجی‌های مدل خودرو در اثر مانور fishhook بوده است. نمودار (الف)، نشان‌دهنده مقدار زاویه تایلر خودرو در اثر ورودی مانور توسط راننده می‌باشد همان‌طور که ملاحظه می‌شود نسبت دنده مدل سیستم فرمان‌ها ۱۵ در نظر گرفته شده است، سیستم فرمان سیمی عادی دارای مقداری پیشینه خطا در سیستم بوده است.

نمودار (ب)، نشان‌دهنده مقدار سرعت زاویه‌ای چرخشی خودرو بوده است همان‌طور که ملاحظه می‌شود عملکرد سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی دارای عملکرد بهتری بوده و با سرعت بیشتری ورودی سیستم را دنبال می‌کند.



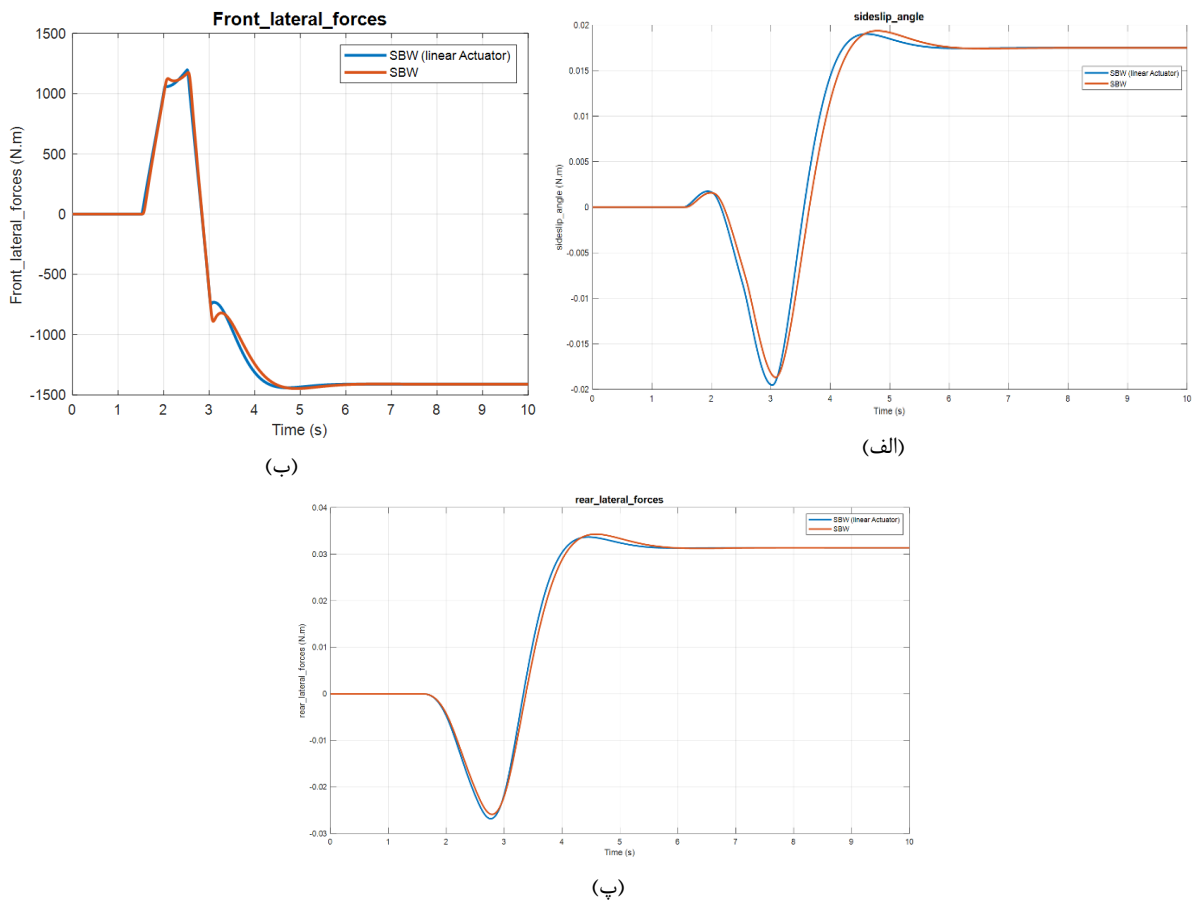
(ب)



(الف)

شکل (۴-۱۵) نمودار خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور fishhook (الف) زاویه تایلر خودرو (ب) زاویه انحراف خودرو

شکل (۴-۱۶)، نمودار (الف)، مقدار زاویه خروج از محور در مدل خودرو بوده است در اثر مانور ورودی از سمت راننده به سیستم، مقدار این زاویه $0,02$ بوده است که مقدار کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. نمودار (ب)، مقدار نیروی به وجود آمده در چرخ جلو خودرو در اثر اعمال مانور به مدل بوده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار نیرو حدود 1500 نیوتن بوده است و در بازه نیروی تولیدی موتور الکتریکی می‌باشد. سیستم فرمان سیمی عادی نیز بازه نیرویی مشابه ای داشته است اما سرعت عمل سیستم کمتر بوده است. نمودار (پ)، مقدار نیروی به وجود آمده در چرخ های عقب خودرو می‌باشد، که در حدود هزارم می‌باشد و به دلیل عدم ایجاد لغزش و ناپایداری خودرو قابل صرف‌نظر می‌باشد.



شکل (۴-۱۶) نمودار خروجی از خودرو دوچرخ در اثر مانور fishhook (الف) زاویه خروج از محور (ب) نیروی جانبی چرخ جلو (پ) نیروی جانبی چرخ عقب

۴-۸- جمع‌بندی

در این فصل به استخراج نتایج خروجی از سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی پرداخته‌شده است که این نتایج با سیستم فرمان سیمی یا محرک دورانی نیز مقایسه شده است که نشان از رفتار مشابه دو سیستم دارد. بعد از مقایسه نتایج به بهینه‌سازی سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی با دو روش الگوریتم ژنتیک و همچنین الگوریتم فازی PID پرداخته‌شده است و با مقایسه نتایج خروجی به عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم فازی PID دست‌یافتیم. سیستم فرمان موردنظر را با استفاده از خودرو دوچرخ نیز در دو مانور حالت مانا و فیش هوک موردبررسی قرار داده‌ایم و با سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی مقایسه کرده که بهبود ۵ تا ۷ درصد در نتایج خروجی را داشته‌ایم.

فصل ۵ :

جمع‌بندی و پیشنهادها

۵-۱- مقدمه

طراحی سیستم فرمان برقی سیمی به دلیل عدم استفاده اجسام مکانیکی رابط بین غربیلک فرمان و چرخ خودرو کاری بسیار چالش‌برانگیز می‌باشد. در طراحی سیستم فرمان جدید باید به نکاتی از جمله تضمین پایداری سیستم و همچنین امنیت سیستم و خودرو پرداخته شود.

سیستم فرمان سیمی نسل جدید سیستم‌های فرمان بوده که در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها دارای مزایای مختلفی بوده‌اند که اصلی‌ترین مزیت این سیستم‌ها هم مسیر بودن با خودروهای خودران بوده و می‌توانند نیازهای سیستم فرمان را در آینده برطرف کنند. اصلی‌ترین مشکل سیستم‌های فرمان سیمی امنیت سیستم بوده که در صورت قطع برق سیستم خودرو بتواند حالت فرمان پذیری خود را حفظ کند تا کنترل خودرو تا حدودی حفظ شود. تا به حال تحقیقات زیادی در این بخش صورت گرفته است، هدف از این پایان‌نامه پژوهشی جدید در این راستا بوده، طرح این پژوهش جدید استفاده از سیستم محرک خطی الکترومکانیکی به جای سیستم شانه‌ای و پینیون و موتور محرک دورانی در سیستم چرخ بوده است. با انجام این کار هر چرخ خودرو دارای یک موتور محرک خطی الکترومکانیکی بوده و در صورت به وجود آمدن هر مشکلی برای یک موتور، موتور دیگر می‌تواند به کار خود ادامه دهد.

در فصول پیشین ضمن معرفی سیستم فرمان سیمی، اجزا و عملکرد آن، مقایسه و مزیت‌های سیستم نسبت به نسل‌های پیشین سیستم‌های فرمان خودرو، اهمیت به کارگیری آن در خودروهای امروزی مشخص شد. سپس مروری بر مدل سیستم فرمان سیمی و همچنین مدل سیستم موتور الکتریکی با محرک خطی الکترومکانیکی پرداخته شده است.

هدف در این پایان‌نامه مدل‌سازی سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی برای خودرو می‌باشد. ابتدا می‌بایست سیستم فرمان برقی سیمی و محرک خطی الکترومکانیکی مدل‌سازی شود و بعد از آن نمونه کامل سیستم فرمان خودرو طراحی شود سپس ضرایب بهینه برای کنترل‌کننده‌های انتخاب شود تا سرعت پاسخ سیستم و مقدار نیروی اعمالی به تأثیر خودرو در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار گیرند. جهت تعیین کارایی سیستم مزبور سیستم فرمان خودرو را در سیستم خودرو دوچرخ تست کرده و تحت تأثیر دو ورودی مانور حالت مانا و مانور fishhook قرار داده که به‌طور میانگین باعث بهبود ۵ درصد در مانور حالت مانا و ۷ درصد در مانور فیش هوک شده است.

۵-۱-۱- نوآوری

در این پایان‌نامه با توجه به تحلیل دینامیک خودرو و پایداری، به طراحی سیستم فرمان برقی سیمی با محرک الکترومکانیکی خطی، پرداخته شده است. برخلاف سیستم‌های قبلی که تمرکز بر روی استفاده از سیستم فرمان سیمی با محرک دورانی می‌باشند، سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی علاوه بر افزایش امنیت خودرو به دلیل استفاده از موتور الکتریکی جداگانه برای هر چرخ فرمان پذیر باعث بهبود سرعت عمل سیستم فرمان شده است و این سیستم در ورودی ضربه توانسته است ۳۵ درصد باعث بهبود عملکرد سیستم فرمان نسبت به حالت فرمان سیمی عادی با کنترل‌کننده زیگلر نیکولز در خودرو شود. در ابتدا مدل سیستم فرمان مورد نظر طراحی شده و با نمونه سیستم فرمان برقی سیمی با موتور دورانی مقایسه شده. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و کنترل‌کننده فازی PID به بهینه‌سازی سیستم فرمان طراحی شده پرداخته شده است. در نهایت سیستم فرمان طراحی شده با مدل خودرو دوچرخ کوبا شده و نتایج خروجی از خودرو استخراج شده است.

۵-۱-۲- پیشنهادها

پیشنهادهایی که برای ادامه این کار وجود دارد عبارت‌اند از:

۱. محرک الکترومکانیک خطی باعث افزایش سرعت عمل سیستم فرمان برقی سیمی شده است که می‌توان با استفاده از موتور القایی خطی در سیستم فرمان برقی سیمی به دلیل انجام دادن حرکت خطی خود موتور و داشتن سرعت حرکت بیشتر باعث افزایش سرعت عمل سیستم شد.
۲. در سیستم فرمان برقی با محرک الکترومکانیک خطی به دلیل استفاده هر چرخ محرک از یک موتور الکتریک امنیت سیستم افزایش پیدا کرده است که می‌توان با استفاده از سیستم ترمز کنترلی برای کنترل خودرو در صورت ایجاد خطاهای نرم‌افزاری در سیستم فرمان این امنیت را بیشتر کرد.
۳. یکی از مزایای اصلی سیستم فرمان برقی با محرک الکترومکانیک خطی کاهش وزن سیستم فرمان خودرو بوده است و همچنین فرمان دهی به هر چرخ بنا به شرایط مختلف و به صورت جداگانه که با استفاده از این سیستم فرمان در خودروهای چهارچرخ فرمان پذیر می‌توان به این مهم دست پیدا کرد.
۴. سیستم فرمان سیمی به دلیل ار سال اطلاعات در به صورت الکترونیکی به کنترل‌کننده فرمان می

توان از اطلاعات الکترونیکی قسمت‌های مختلف خودرو استفاده کرد از قبیل داده‌های سیستم ترمز گیری و عملکرد موتور خودرو

۵. در سیستم فرمان سیمی به دلیل جدا بودن غریبک فرمان از چرخ خودرو و الکترونیکی بوده این دو قسمت می‌توان با استفاده از کوپل کردن سیستم فرمان سیمی با تعلیق فعال جهت کاهش رول خودرو از واژگونی خودرو جلوگیری کرد.

۶. در سیستم فرمان سیمی با محرک الکترومکانیک خطی به دلیل جدا بوده عملکرد فرمان پذیری هر چرخ می‌توان با استفاده از داده‌های اصطکاکی تایر و جاده، زاویه فرمان مناسب آن چرخ را تعیین کرد.

مراجع

- [۱] طاووسی، وحید. (۱۳۸۸). بهبود رفتار جانبی خودرو با استفاده از فرمان برقی به کمک کنترل بهینه تطبیقی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی.
- [2] E. A. Bretz, "By-wire cars turn the corner," IEEE Spectrum, vol. 38, no. 4, pp. 68-73, 2001.
- [3] W. Xiang, P. C. Richardson, C. Zhao, and S. Mohammad, "Automobile brake-by-wire control system design and analysis," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 57, no. 1, pp. 138-145, 2008.
- [4] N. Yuhara, J. Tajima, S. Sano, and S. Takimoto, "Steer-by-wire-oriented steering system design: Concept and examination," Vehicle System Dynamics, vol. 33, pp. 692-703, 2000.
- [5] P. Yih and J. C. Gerdes, "Modification of vehicle handling characteristics via Steer-by-Wire," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 6, pp. 965-976, 2005.
- [6] Stanton, N., & Marsden, P. (1997). Drive-by-wire systems: Some reflections on the trend to automate the driver role. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 211(4), 267-276.
- [7] www.answers.com/topics/automotive steering, 2014
- [8] M. Parmar and J. Y. Yung, "A sensor less optimal control system for an automotive electric power assist steering system," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 2, pp. 290-298, 2004.
- [9] M. Bertoluzzo, G. Buja, and R. Menis, "Control schemes for Steer-by-Wire systems," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 1, no. 1, pp.20-27, 2007.
- [10] Y. Xue and J. Watton, "Modelling of a hydraulic powering steering system," International Journal of Vehicle Design, vol. 38, no. 2, 2005.
- [11] M. Parmar and J. Y. Yung, "A sensorless optimal control system for an automotive electric power assist steering system," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 2, pp. 290-298, 2004.
- [12] Y. Inaguma, K. Suzuki, and K. Haga, "An energy saving technique in an electro- hydraulic power steering ehps system," in SAE International Congress and Exposition, no. 960934, Detroit, Michigan, USA, March 1996.
- [13] J. Hur, "Characteristics analysis of interior permanent-magnet synchronous motor in electrohydraulic power steering systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 55, no. 6, pp. 2316-2323, 2008.
- [14] X. Chen, T. Yang, X. Chen, and K. Zhou, "A generic model-based advanced control of electric power-assisted steering systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 16, no. 6, pp. 1289-1300, 2008.
- [15] W. Harter, W. Pfeiffer, P. Dominke, G. Ruck, and P. Blessing. Future Electrical Steering Systems: Realizations with Safety Requirements. SAE 2000 World Congress - Steering & Suspension Technology Symposium, Mar. 2000.
- [16] D. Ammon, M. Borner, and J. Rauh, "Simulation of the perceptible feed-forward and feed-back properties of hydraulic power-steering systems on the vehicle's handling behavior using simple physical models," Vehicle System Dynamics, vol. 44, Supplement, pp. 158-170, 2006.
- [17] P. Zhao, X. Lin, J. Chen, and J. Men, "Parametric design and application of steering characteristic curve in control for electric power steering," Mechatronics, vol. 19, no. 6, pp. 905-911, 2009.
- [18] A. Marouf, M. Djemai, C. Sentouh, and P. Pudlo, "Sensorless control of electric power assisted steering system," in Proceedings of 20th Mediterranean Conference on Control & Automation, Barcelona, pp. 909-914, 2012.
- [19] A. Marouf, M. Djemai, C. Sentouh, and P. Pudlo, "A new control strategy of an electric-power-assisted steering system," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 8, pp. 3574-3589, 2012.
- [20] Badawy, Aly, Jeff Zuraski, Farhad Bolourchi, and Ashok Chandy. Modeling and analysis of an electric power steering system. No. 1999-01-0399. SAE Technical Paper, 1999.

- [21] Mallikarjuna, V., & Rao, B. J. P. (2017). Fabrication of Electrical Steering Mechanism, 5(X), 1414–1429.
- [22] D. Iles-Klumpner, M. Risticovic, H.W. Hartkorn, G. Lahm, and I. Serban. Electric Actuation Technologies for Automotive Steering Systems. SAE 2005 World Congress & Exhibition, Apr. 2005.
- [23] Y. Marumo and N. Katagiri, "Control effects of steer-by-wire system formotorcycles on lane-keeping performance," Vehicle System Dynamics, vol. 49, no. 8, pp. 1283-1298, 2011.
- [24] C. D. Gadda, S. M. Laws, and J. C. Gerdes, "Generating diagnosticresiduals for Steer-by-Wire vehicle," IEEE Transactions ControlSystems Technology, vol. 15, no. 3, pp. 529-540, 2007.
- [25] R. Kazemi and A. A. Janbakhsh, "Nonlinear adaptive sliding modecontrol for vehicle handling improvement via steer-by-wire," International Journal of Automotive Technology, vol. 11, no. 3, pp. 345354, 2010.
- [26] S.B. Park, S.W. Hwang, Y.H. Oh, and U.K. Lee. Development of the Independent-Type Steer by Wire System. SAE World Congress & Exhibition- Steering and Suspension Technology Symposium, Apr. 2007.
- [27] D.F. LeRoy. MR Technology, Tactile Feedback and Application of By-WireSystems. Industrial Utility Vehicle & Mobile Equipment Magazine, Nov. /Dec. 2007.
- [28] W. El Messoussi and A. El Hajjaji, "Four-wheel steering vehicle control usingTakagi-Sugeno fuzzy models," in Fuzzy Systems Conference, 2007. FUZZ-IEEE2007. IEEE International, 2007, pp. 1-6: IEEE.
- [29] S. Abcha, A. Baviskar, J.R. Wagner and D.M. Dawson. 2007. Ground Vehicle steering systems; modelling, control and analysis ofhydraulic, electric and steer-by-wire configurations. Int. J. VehicleDesign. Vol.44 (1/2). 188-208.
- [30] Gerhard Ruck - ZF Steering Systems GmbH · Peter Dominke - Robert BoschGmbH "The First Step on the Way to "Steer By Wire"" ,SAE Inc, Paper No.1999-01-0401
- [31] D. Heitzer, & A. Seewald, "Development of a fault tolerant steer-by-wire steering system," 2004.
- [32] K. Hudha, F. Ahmad, H. Jamaluddin, and Z. Abd, Pid Controller with Roll MomentRejection for Pneumatically Actuated Active Roll Control (Arc) Suspension System. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [33] S. Amberkar, D. Ambrosio, and B. T. T. Murray, "A system-safetyprocess for by-wire automotive systems," in Proceedings of the SAEInternational Congress, SAE paper 2000-07-1056, 2000.
- [34] T. J. Park, C. S. Han, and S. H. Lee, "Development of the electroniccontrol unit for the rack-actuating steer-by-wire using the hardware-in-the-loop simulation system," Mechatronics, vol. 15, no. 8, pp. 899-918, 2005.
- [35] C. J. Kim, J. H. Jang, and S. K. Oh, "Development of a controlalgorithm for a rack-actuating steer-by-wire system using roadinformation feedback," Proc. International Mechanical Engineering, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 222 pp. 1559-1571, 2008.
- [36] C. Kim, J. Jang, S. Yu, S. Lee, C. Han, and J. K. Hedrick, "Developmentof a control algorithm for a tie-rod-actuating steer-by-wire system," inProceedings of International Mechanical Engineering Part D; Journalof Automobile Engineering, vol. 222, no. 9, pp. 1534-1557, 2008.
- [37] Y. Zhang and J. J. A. r. i. c. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable faulttolerantcontrolsystems," vol. 32, no. 2, pp.229-252, 2008.
- [38]. E. Cetin, M. A. Adli, D. E. Barkana, and H. Kucuk, "Compliant control of steerby-wire systems," in Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conferenceon, 2009, pp. 636-643: IEEE.
- [39] Y. Onoda, Y. Onuma, T. Goto, and T. Sugitani, "Design concept and advantages ofsteer-by-wire system," SAE Technical Paper0148-7191, 2008.
- [40] C. Zong, H. Xiang, L. He, and F. Sha, "Study on control method of dual-motor for steer-by-wire system," in Consumer Electronics, Communications and Net works(CECNet), 2012 2nd International Conference on, 2012, pp. 2890-2893: IEEE.
- [41] Z. C.-f. He Lei, TIAN Cheng-wei, WU Ren-jun, Zhang Tai-wu, "DC motor faultdiagnosis and fault tolerance control method for steer-by-wire car," Journal of JilinUniversity(Engineering and Technology Edition), vol. 41, no. 3, pp. 608-612, 2011.

- [42] Li, Tonghui, Bin Xie, and Rong Wang. "Design and experiments of electronic steer-by-wire system in electric tractor." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 252, no. 3, p. 032108. IOP Publishing, 2019.
- [43] Fawaz, Ziad, Ronald Smith, Paul Muench, Sridhar Lakshmanan, and Alireza Mohammadi. "Design and benchtop validation of an autonomous bicycle with linear electric actuators." In *Unmanned Systems Technology XXI*, vol. 11021, p. 110210B. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [44] Hwang, Hyeongjin, Hyungjeon Choi, and Kanghyun Nam. "Practical Synchronous Steering Angle Control of a Dual-Motor Driving Steer-by-Wire System." *IEEE Access* 7 (2019): 133100-133110.
- [45] Huang, Chao, and Liang Li. "Architectural design and analysis of a steer-by-wire system in view of functional safety concept." *Reliability Engineering & System Safety* 198 (2020): 106822.
- [46] Wu, Xiaodong, and Wenqi Li. "Variable steering ratio control of steer-by-wire vehicle to improve handling performance." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 234, no. 2-3 (2020): 774-782.
- [47] SERVO CITY, 2019. Super duty linear actuator. Servocity.com. Dostupné také z: <https://www.servocity.com/sda6-263>
- [48] B. Motor, DC Motor63x97 1.13.0163.0xx Data Sheet. B• uhler Motor.
- [49] THK, THK Low Price Actuator: VLACT35 Data Sheet. THK Co., LTD.
- [50] R.J. Patton, "Fault-tolerant Control Systems : The 1997 Situation", SAFE-PROCESS '97, IFAC Symposium on fault detection, supervision and safety, pp. 1033-1054, 1997.
- [51] Du Xinli, "High Redundancy Actuator", A Doctoral Thesis, Loughborough University, 2008.
- [52] Antong, H., Dixon, R., Ward, C.: Modelling and building of experimental rig for high redundancy actuator. In: UKACC International Conference on Control, pp. 385-388, 9-11 July 2014
- [53] Ma, Teng. "Model-Based Control Design and Experimental Validation of an Automated Manual Transmission." PhD diss., The Ohio State University, 2013.
- [۵۴] ستوده، هادی. (۱۳۹۴). طراحی بهینه سیستم فرمان خودرو سواری بر پایه پلتفرم برای یک خانواده محصول. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۵۵] بیكدلی، محمد. (۱۳۹۳). طراحی و تحلیل دینامیکی فرمان الکتریکی برای پلتفرم ملی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [56] Antong, Hasmawati P. "Highly redundant and fault tolerant actuator system: control, condition monitoring and experimental validation." PhD diss., © Hasmawati Ponging Antong, 2017.
- [57] Reza Kazemi et al "Yaw Moment Control of the passenger Car via Steer by Wire system" ASME-International mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE 2011), Denver, Colorado USA, Nov 11
- [58] Y. Tau, "Vehicle Steer-by-Wire System Control" SAE Technical Paper No. 2006-01-1157.
- [59] T. Kaufmann, S. Millsap, B. Murray and J. Petrowski. 2001. Development Experience with Steer-by-Wire. SAE Paper. No. 200101-2479
- [60] Gualino, D., & Adoukpe, I. J. (2006, September). Force-feedback system design for the steer-by-wire: optimization and performance evaluation. In Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC'06. IEEE (pp. 181-187). IEEE.
- [61] M. Bertoluzzo, G. Buja, and R. Menis, "Control schemes for Steer-by-Wire systems," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 1, no. 1, pp.20-27, 2007.
- [62] Qiao, Guan, Geng Liu, Zhenghong Shi, Yawen Wang, Shangjun Ma, and Teik C. Lim. "A review of electromechanical actuators for More/All Electric aircraft systems." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 232, no. 22 (2018): 4128-4151.
- [63] Wagner H, Nikolov G, Bierig A, et al. Challenges for health monitoring of electromechanical flight control actuation systems. SAE paper 2011-01-2701, 2011.

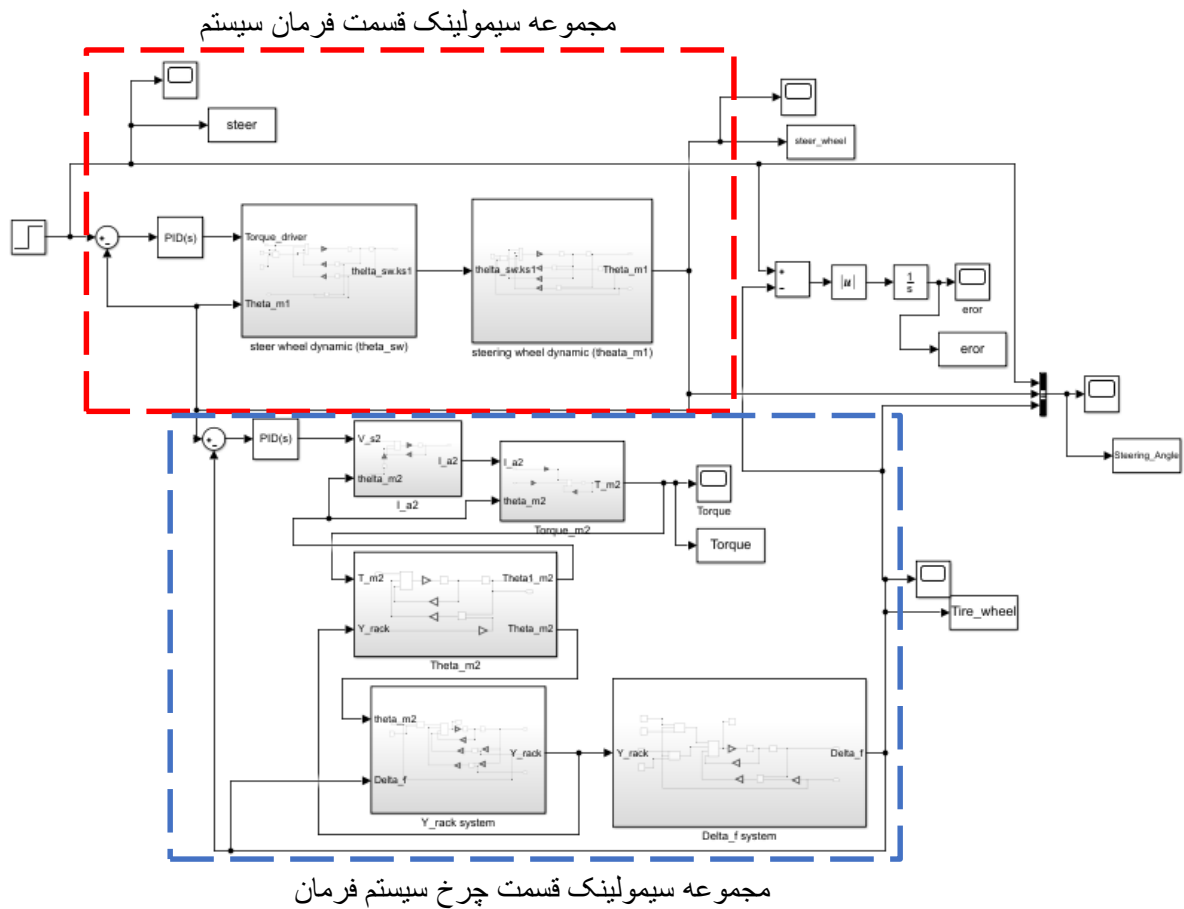
- [64] Du, X., Dixon, R., Goodall, R.M., Zolotas, A.C.: LQG Control of a High Redundancy Actuator. In: Mechatronics, IEEE, vol. 44, pp. 1–6 (2007)
- [65] Ackermann J. Robust car steering by yaw rate control. In: Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control; 1990. p. 2033–4.
- [66] Ackermann J. Robust yaw damping of cars with front and rear wheel steering. IEEE Trans Control Syst Technol 1993;1(March):15–20.
- [67] S. Anwar, "Generalized predictive control of yaw dynamics of a hybrid brake-by-wire equipped vehicle," Int. J. Mechatron., vol. 15, pp. 1089–1108, Nov. 2005.
- [68] Visteon Vehicle Dynamics Test Procedures: Single Lane Change (Snow), VVDTP-009-02, Visteon Corp., 2001.
- [69] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.
- [70] K. Atashkari, N. Nariman-Zadeh, A. Pilechi, A. Jamali, and X. Yao, "Thermodynamic Pareto optimization of turbojet engines using multi objective genetic algorithms," Int. J. Therm. Sci., vol. 44, no. 11, pp. 1061–1071, Nov. 2005.
- [71] Anwar, Sohel, and Lei Chen. "An analytical redundancy-based fault detection and isolation algorithm for a road-wheel control subsystem in a steer-by-wire system." IEEE Transactions on Vehicular Technology 56, no. 5 (2007): 2859–2869.
- [72] Fahami, Sheikh Muhammad Hafiz, Hairi Zamzuri, and Saiful Amri Mazlan. "Development of estimation force feedback torque control algorithm for driver steering feel in vehicle steer by wire system: hardware in the loop." International Journal of Vehicular Technology 2015 (2015).
- [73] Davis, Lawrence. "Handbook of genetic algorithms." (1991).
- [74] Sivanandam, S.N. and Deepa, S.N., 2008. Genetic algorithms. In *Introduction to genetic algorithms* (pp. 15–37). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [75] Gen, M. and Lin, L., 2007. Genetic algorithms. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, pp. 1–15.
- [76] Harun Yazgan, Furkan Yener, Semih Soysal, Ahmet Gür; (2019), Comparison Performances of PSO and GA to Tuning PID Controller for the DC Motor. Sakarya University Journal of Science, 23(2), 162-174, DOI: 10.16984/saufenbilder.376464
- [77] Kumar, N.S.; Sadasivam, V.; Prema, K. Design and Simulation of Fuzzy Controller for Closed Loop Control of Chopper Fed Embedded DC Drives. In Proceedings of the IEEE international conference, Singapore, 21–24 November 2004; pp. 613–617.
- [78] Naranjo, J.E.; Sotelo, M.A.; Gonzalez, C.; García, R.; Pedro, T.D. Using fuzzy logic in automated vehicle control. IEEE Intell. Syst. 2007, 22, 36–45.
- [79] W. S. L. Huashi. Yaw moment fuzzy control of four-wheel-steering vehicle based on co-simulation technology. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, No. 5, 2011, pp. 2–9.
- [80] D. Xiang, J. Yuan, W. Xu. Study on fuzzy PID algorithm for a new active front steering system [J]. Journal of Control Engineering and Technology, Vol. 2, No. 1, 2012, pp. 24–29.
- [81] S. M. H. Fahami, H. Zamzuri, S. A. Mazlan and M. A. Zakaria, "Modeling and simulation of vehicle steer by wire system," 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Kuala Lumpur, 2012, pp. 765–770, doi: 10.1109/SHUSER.2012.6268992.

[۸۲] سعیدی، محمد امین، ۱۳۹۸، یک سیستم کنترل غیرخطی فرمان فعال برای افزایش پایداری جانبی خودرو، فصلنامه مکانیک هوافضا ۱۵ (۳) https://www.civilica.com/Paper-JR_MEASEJT-JR_MEASEJT-15-3_004.html

[83]

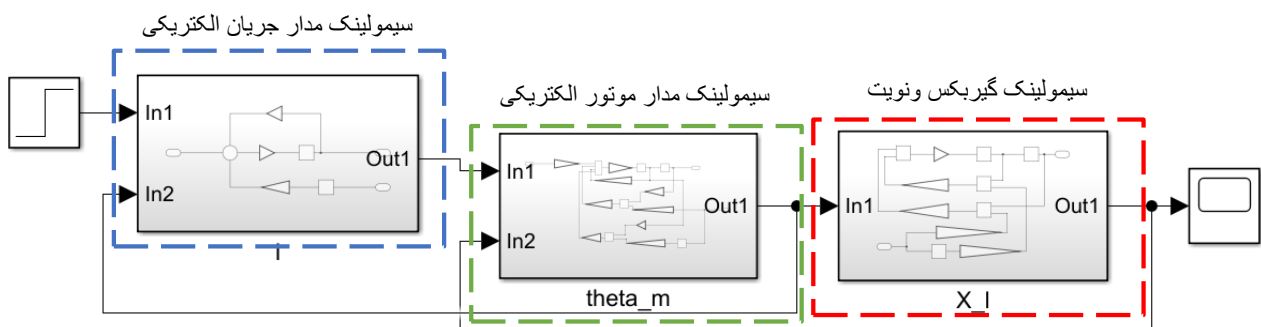
پیوست‌ها

شکل شماتیک سیستم فرمان برقی سیمی:



شکل بالا نشان‌دهنده مدل سیمولینک سیستم فرمان سیمی خودرو بوده که در فصل دوم به تفصیل معادلات آن بیان شده است. این مدل از دو قسمت تشکیل می‌شود: ۱. مجموعه سیمولینک قسمت فرمان خودرو ۲. مجموعه سیمولینک قسمت چرخ خودرو که هرکدام از این قسمت‌ها دارای زیر بخش‌های مدل سیمولینک هستند.

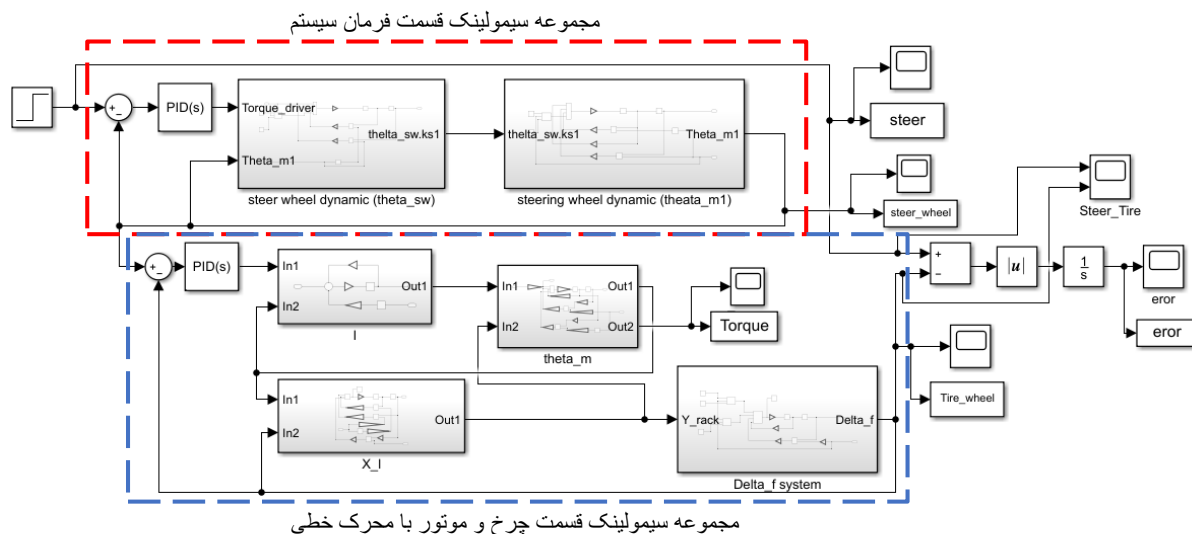
شکل شماتیک موتور با محرک خطی:



مدل سیمولینک محرک خطی الکترومکانیکی بر اساس معادلات آورده شده در فصل دوم طراحی شده نیز به سه قسمت تبدیل شده است که این سه قسمت عبارت‌اند از:

۱. سیمولینک مدار تولیدکننده جریان در سیستم
۲. سیمولینک مدار موتور الکتریکی
۳. سیمولینک گیربکس و مجموعه پیچ و مهره میله خروجی

شکل شماتیک مدل کامل سیستم فرمان برقی سیمی با محرک خطی



مدل سیمولینک سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکی بر اساس معادلات بیان شده در فصل سوم طراحی شده است را می‌توان ترکیبی از دو مدل سیستم فرمان برقی سیمی و محرک خطی الکترومکانیکی دانست که این دو سیستم باهم کوپل شده‌اند و سیستم فرمان جدید موردنظر را به وجود آورده‌اند.

الگوریتم ژنتیک چیست

الگوریتم‌های تکاملی مانند GA^1 , ICA, PSO و... از روش‌های تکامل زیستی یا اجتماعی و... گرفته شده است. چنین الگوریتم‌هایی برای مسائل بهینه‌سازی با تعداد متغیر زیاد و البته غیرخطی مناسب‌تر از روش‌های سنتی است. روش‌های سنتی اغلب متکی به قدرت محاسباتی کامپیوتر بودند و از تکنیک‌های هوشمند استفاده نمی‌کردند و اکثر این روش‌ها برای حل مسائل غیرخطی و با تعداد متغیرهای زیاد مناسب نبودند و با شکست مواجه می‌شدند. استفاده از روش‌های ریاضی تحلیلی برای بهینه‌سازی مسائل با تعداد متغیر زیاد و غیرخطی خیلی سخت و با زمان‌های طولانی همراه است و ممکن است منجر به جواب‌های با کیفیتی هم نشود. روش‌های قدیمی که در حوزه بهینه‌سازی وجود داشتند به دلایل مختلف کارایی چندانی در حال حاضر ندارند. این روش‌ها بیشتر متکی به سخت‌افزار کامپیوتر (قدرت محاسباتی کامپیوترها) بودند و از هوشمندی کافی برخوردار

¹ Genetic Algorithm, Particle swarm optimization, Imperialist Competitive Algorithm

نبودند و از نظر عملکرد زمانی کارایی خوبی نداشتند و خیلی از مسائل مهندسی را هم نمی‌توان با آن‌ها حل کرد. ولی در مقابل روش‌هایی مانند هوش مصنوعی (الگوریتم‌های فرا ابتکاری) می‌توانند با کمترین زمان ممکن بهترین عملکرد را داشته باشند. در روش‌های قدیمی ریاضی، زمانی مشکل شدیدتر می‌شود که تعداد متغیرهای طراحی زیادی وجود داشته باشد و یا تابع هدف غیرخطی باشد. (که ممکن است در نقطه بهینه محلی گرفتار شوند). به همین علت وقتی در روش‌های ریاضی از تابع و مشتق‌گیری از تابع ریاضی استفاده می‌شود این عمل مشتق‌گیری، خود محدودکننده است. خیلی از مسائل، اصلاً تابع تحلیلی (ریاضی) ندارند. (بیشتر پروسه‌وار هستند) یا اصلاً تابع ندارند یا اگر تابع دارند تابع آن‌ها در حوزه گسسته است و مشتق برای آن‌ها مفهوم ندارد. اگر تابع هدف وجود نداشته باشد یا تابع هدف قابل مشتق‌گیری نباشد از روش‌های قدیمی ریاضی (تحلیلی) نمی‌توان استفاده کرد. ولی روش‌های فرا ابتکاری چنین مشکلاتی را ندارند و با قرار دادن اپراتورهای خاص در طراحی الگوریتم، این روش‌ها امکان افتادن در نقطه بهینه محلی را کاهش می‌دهد. روش‌های فرا ابتکاری روش‌های جست‌وجوی کلی هستند که از طبیعت، شرایط اجتماعی حاکم بر جامعه ناشی می‌شوند [65-68].

الگوریتم ژنتیک یا به اختصار GA¹، الگوریتم جستجویی است که از فرآیند انتخاب در طبیعت تقلید می‌کند. در طبیعت، موجودات زنده برای بقا باید با شرایط محیط سازگار شوند. بر اساس این فرآیند که تکامل² نام دارد، خصوصیتی که باعث پیروزی در این رقابت می‌شود، به هنگام تولیدمثل، حفظ و به نسل جدید منتقل می‌شوند. خصوصیتی هم که باعث تضعیف او در این رقابت می‌شوند حذف خواهند شد. خصوصیات موجودات زنده توسط ژن‌ها³ که واحد تشکیل‌دهنده کروموزوم‌ها هستند کنترل می‌شود. در نسل‌های متمادی نه تنها افرادی که شایستگی بیشتری دارند زنده می‌مانند بلکه شایسته‌ترین ژن‌های آن‌ها که به فرزندان منتقل شده‌اند نیز حفظ می‌شوند. باید به این نکته توجه نمود که اصولاً طبیعت، مناسب‌ترین‌ها را انتخاب می‌کند نه بهترین‌ها را. قانون انتخاب طبیعی بدین صورت است که تنها گونه‌هایی از یک جمعیت ادامه نسل می‌دهند که بهترین خصوصیات را داشته باشند و آن‌هایی که این خصوصیات را نداشته باشند به تدریج و در طی زمان از بین می‌روند. مثلاً اگر فرض شود گونه‌ی خاصی از افراد، هوش بیشتری از بقیه افراد یک جامعه یا کلونی دارند. در شرایط کاملاً طبیعی، این افراد پیشرفت بیشتری خواهند کرد و رفاه نسبتاً بالاتری خواهند داشت و این رفاه، خود باعث طول عمر بیشتر و باروری بهتر خواهد بود. حال اگر این خصوصیت (هوش) ارثی باشد، بالطبع تعداد افراد باهوش در نسل بعدی همان جامعه، به دلیل زادوولد بیشتر این گونه افراد، بیشتر خواهد بود. اگر همین روند ادامه یابد مشاهده می‌شود که در طی نسل‌های متوالی دائماً جامعه‌ی نمونه ما باهوش و باهوش‌تر می‌شود. بدین ترتیب یک مکانیزم ساده‌ی طبیعی توانسته است در طی چند نسل، عملاً افراد کم‌هوش را از جامعه حذف کند، علاوه بر اینکه میزان هوش متوسط جامعه نیز دائماً در حال افزایش است. بدین ترتیب می‌توان دید که طبیعت با بهره‌گیری از یک روش بسیار ساده (حذف تدریجی گونه‌های نامناسب و درعین حال تکثیر بالاتر گونه‌های بهینه)، توانسته است دائماً هر نسل را از لحاظ خصوصیات مختلف ارتقاء بخشد [69-70].

1 Genetic Algorithm

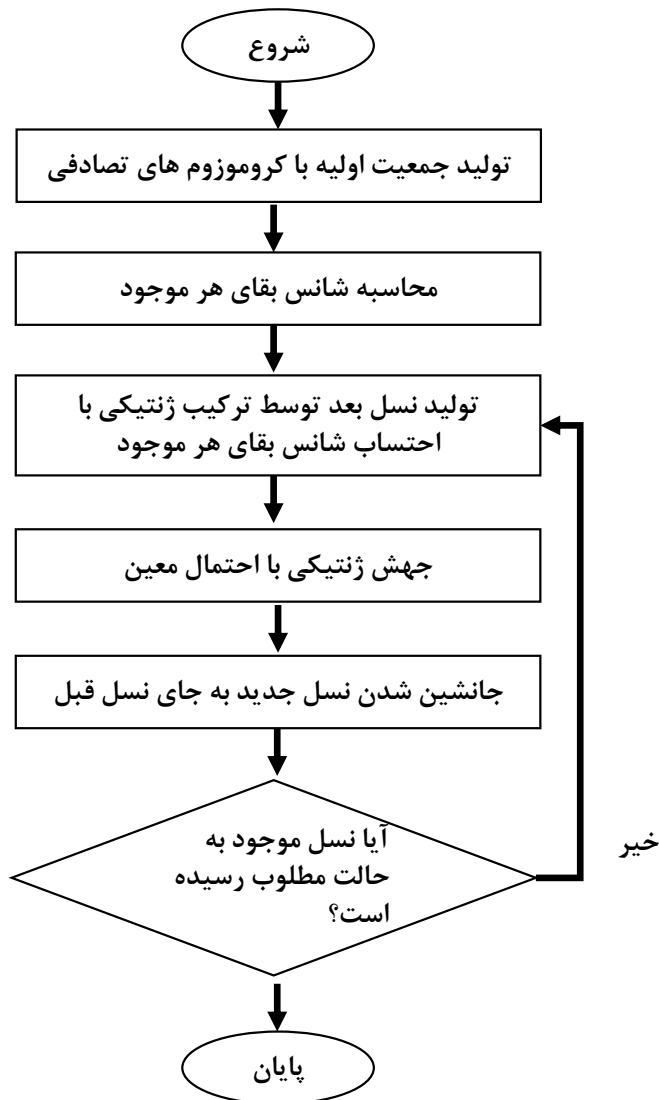
2 Evolution

3 Gen

□ ساختار کلی الگوریتم

مبانی الگوریتم ژنتیک را می‌توان به‌سادگی تشریح کرد. مجموعه‌ای از نقاط در یک فضای جستجو که به‌طور تصادفی انتخاب‌شده‌اند را در نظر بگیرید. این مجموعه، جمعیت اولیه را تشکیل می‌دهد. هر فرد x از این جمعیت، دارای مقدار برازندگی معینی است که درجه‌ی تطبیق آن فرد را با تابع هدف تعیین می‌کند. در حالتی که تابع هدف Z کمینه‌سازی باشد، اگر $Z(x)$ کوچک‌تر باشد، برازندگی x بالاتر خواهد بود. یک الگوریتم تکاملی در طی نسل‌های متوالی، به‌طور تدریجی تکامل پیدا می‌کند. در طول نسل‌ها، هدف، بهبود برازندگی افراد است [71].

حرکت از هر نسل به نسل بعدی، در چهار فاز صورت می‌گیرد: فاز انتخاب، فاز تولیدمثل، فاز ارزیابی برازندگی و فاز جایگزینی. فاز انتخاب، افرادی را که در تولیدمثل شرکت می‌کنند، تعیین می‌کند. در این فاز، افرادی که دارای برازندگی بالا هستند، قابلیت تولیدمثل بالاتر و بقای بیشتری دارند. فاز تولیدمثل، شامل به کار بردن عملگرهای تغییر بر روی افراد انتخاب‌شده، برای ایجاد افراد جدید است. نقش عملگرهای تغییر، تولید افراد جدید از افراد قدیمی است. عملگرهای تغییر در الگوریتم ژنتیک، به دو نوع جهش و بازترکیب تقسیم‌بندی می‌شوند. عملگرهای بازترکیب، تقاطع نیز نام دارند که یک یا دو فرزند را از دو والد تولید می‌کنند. عملگر جهش، یک فرزند جدید را تنها از یک فرد ایجاد می‌کند. ساختار عملگرهای تغییر، به میزان زیادی به نحوه نمایش افراد بستگی دارد. در فاز ارزیابی، میزان برازندگی افراد جدید از اهداف تعیین‌شده، ارزیابی می‌شود. درنهایت، فاز جایگزینی شامل انتخاب اعضای نسل جدید است. به‌طور مثال، می‌توان افراد با مطلوبیت پایین را به‌وسیله‌ی تعدادی از بهترین افراد تولیدشده، جایگزین کرد. الگوریتم، پس از یک تعداد نسل معین و با توجه به‌شرط خاتمه‌ی از پیش تعیین‌شده، خاتمه می‌یابد. ساختار کلی الگوریتم ژنتیک در شکل (۱۱-۳) نمایش داده‌شده است:



شکل (۵-۱) ساختار کلی الگوریتم ژنتیک [71]

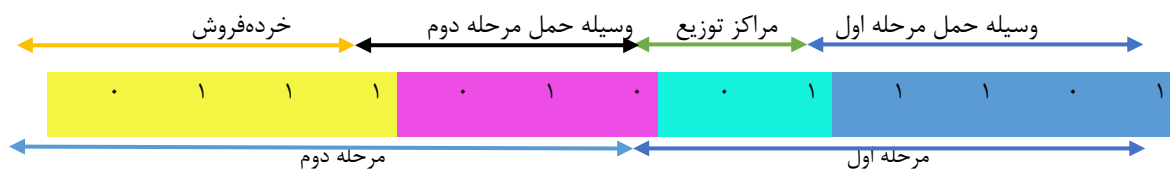
□ توسعه روش حل بر پایه الگوریتم ژنتیک

برای مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین دومرحله‌ای شش الگوریتم فرا ابتکاری، یک نوع نحوه نمایش جواب و شیوه رمزگشایی ارائه می‌شود. گام‌های الگوریتم به شرح ذیل می‌باشد [72]:

۱-تعریف کروموزوم

بدیهی است که مبنای هر رویکرد فرا ابتکاری، نحوه نمایش جواب می‌باشد. این موضوع شدیداً به ماهیت مسئله موردبررسی یعنی تعداد و بعد متغیرهای تصمیم‌گیری و محدودیت‌های مدل وابسته است. در این مسئله جهت نمایش جواب شدنی از یک روش استفاده می‌شود. از روش جدیدی به نام string برای مسئله موردنظر به کار گرفته شده است. نحوه نمایش مورد استفاده در الگوریتم‌های پیشنهادی منجر به تولید کروموزوم‌های

موجه می‌شود. در روش string برای هر برابر $(I+V)+(J+K)$ می‌باشد. شکل (۱۲-۳) نمونه‌ای از نحوه نمایش کروموزوم می‌باشد. با توجه به شکل از قرار گرفتن دو مرحله (stage) در کنار هم یک کروموزوم حاصل می‌شود.



شکل (۵-۲) نمونه‌ای از کروموزوم روش string base

۲- ایجاد جمعیت اولیه

اولین مرحله بعد از تعیین تکنیکی که برای تبدیل هر جواب به یک کروموزوم بکار می‌رود ایجاد یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها است. در این مرحله جواب اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود. مقدار جمعیت در هر نسل با توجه به اندازه مسئله (کوچک، متوسط و بزرگ) اعداد مختلفی را به خود اختصاص می‌دهد.

۳- تابع برازش

تابع برازش از تابع هدف مسئله به دست می‌آید و بعد از ایجاد هر کروموزوم شدنی، میزان تابع هدف برای آن کروموزوم محاسبه می‌شود. سپس با معکوس کردن آن، میزان تابع برازش کروموزوم مربوطه به دست می‌آید.

$$\text{مقدار برازندگی} = \frac{1}{\text{هدف تابع مقدار}} \quad (۳-۲۴)$$

۴- مکانیزم نمونه‌گیری

مکانیزم نمونه‌گیری به چگونگی انتخاب کروموزوم‌ها از فضای نمونه‌گیری مربوط می‌شود که در این تحقیق از روش چرخ رولت^۱ استفاده می‌شود. که در آن احتمال انتخاب متناظر با هر کروموزوم، بر اساس برازندگی آن محاسبه می‌شود بطوریکه اگر f_k مقدار برازندگی کروموزوم k ام باشد احتمال بقای متناظر با آن کروموزوم طبق رابطه (۳-۲۵) محاسبه می‌شود.

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad \text{و} \quad n = \text{pop} - \text{size} \quad (۳-۲۵)$$

در روش انتخاب چرخ رولت به این صورت عمل می‌شود که برای انتخاب هر کروموزوم ابتدا یک عدد تصادفی بین یک و صفر تولید شده و سپس عدد مذکور در هر بازه‌ای که قرار گرفت کروموزوم متناظر با آن انتخاب می‌شود.

¹ Roulette Selection

۵- تولید مجدد

در مورد عملگر تولید مجدد^۱ می‌بایست تعدادی از کروموزوم‌های نسل فعلی بدون تغییر به نسل بعد منتقل شوند. بدین منظور از استراتژی بهترین‌ها (نخبه‌ها) استفاده می‌شود. این عمل به این صورت انجام می‌شود که میزان برزندگی هر کروموزوم از نسل فعلی (که به وسیله تابع هدف به دست می‌آید) محاسبه می‌شود. با توجه به کمینه‌سازی تابع هدف در این مسئله، کروموزوم‌هایی که کمترین مقدار تابع هدف (بیشترین مقدار تابع برزندگی) را دارند به نسل بعد منتقل می‌شوند که این تعداد از کروموزوم‌ها با توجه به اندازه مسئله می‌تواند متفاوت باشد.

۶- عملگرهای تقاطعی

عملگرهایی که یک یا چند نقطه از دو یا چند جواب را انتخاب و مقادیر آن‌ها را تعویض می‌کنند. این عملگرها یک جواب را در نظر گرفته و محل‌هایی از جواب را با جواب‌های دیگر معاوضه کرده و جواب‌های جدید را به وجود می‌آورند. در این تحقیق در طراحی الگوریتم‌های ژنتیک ابتدا دو کروموزوم از نسل فعلی به وسیله چرخ رولت به صورت تصادفی انتخاب شده، سپس برای تولید فرزندان از عملگر یک نقطه‌ای، دونقطه‌ای، یکنواخت، ترتیب استفاده شده است. در عملگر یک نقطه‌ای به تصادف نقطه‌ای برای برش مشخص می‌گردد و از این نقطه عمل برش صورت گرفته و سمت راست کروموزوم‌های والد باهم تعویض می‌شود. و به این ترتیب دو فرزند جدید ایجاد می‌شود. ممکن است فرزندان ایجاد شده حلی غیرموجه باشند که در این صورت باید دو فرزند ایجاد شده به عنوان دو حل از مسئله، موجه گردند.

در عملگر دونقطه‌ای دونقطه برای برش مشخص می‌گردد و کروموزوم‌های والد را به سه قسمت تقسیم می‌کنند. قسمت وسط از کروموزوم‌های والد ۱ و ۲ به ترتیب در فرزندان ۱ و ۲ کپی می‌شوند و سمت راست و چپ کروموزوم‌های والد باهم تعویض می‌شود. و به این ترتیب دو فرزند جدید ایجاد می‌شود. ممکن است فرزندان ایجاد شده حلی غیرموجه باشند که در این صورت باید دو فرزند ایجاد شده به عنوان دو حل از مسئله، موجه گردند. در عملگر یکنواخت، یک کروموزوم که تعداد ژن‌های آن برابر با تعداد ژن‌های کروموزوم والد است و مقادیر آن ۰ و ۱ می‌باشد ایجاد گشته و به ترتیب از سمت چپ به راست اگر مقدار ژن برابر با ۰ بود مقدار ژن کروموزوم فرزند از والد ۱ در غیر این صورت از والد ۲ گرفته می‌شود. و به این ترتیب یک فرزند جدید ایجاد می‌شود. ممکن است فرزند ایجاد شده حلی غیرموجه باشد که در این صورت باید فرزند ایجاد شده به عنوان یک حل از مسئله، موجه گردد. در عملگر ترتیب، دونقطه برای برش مشخص می‌گردد و کروموزوم‌های والد را به سه قسمت تقسیم می‌کنند. قسمت وسط از کروموزوم والد ۱ در کروموزوم فرزند کپی می‌شود و سمت

¹ Reproduction

راست و چپ کروموزوم فرزند توسط والد ۲ پر می‌شود. ممکن است فرزند ایجادشده حلی غیرموجه باشد که در این صورت باید به‌عنوان یک حل از مسئله، موجه گردد.

۷- تقاطع تک نقطه‌ای

عملگر ادغام شامل سه عمل است:

دو رشته را به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند.

- محلی را برای عمل ادغام به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند.
- سرانجام مقدار دو رشته را با توجه به محل ادغام جابه‌جا می‌کند.
- ساختار عملگر تقاطع تک نقطه‌ای در شکل (۳-۱۳) نمایش داده شده است.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۵ | ۳ | ۸ | ۲ | ۷ | ۴ |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۴ | ۶ | ۵ | ۹ | ۲ |

والد ۱

والد ۲

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۵ | ۴ | ۶ | ۵ | ۹ | ۲ |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۳ | ۸ | ۲ | ۷ | ۴ |

فرزند ۱

فرزند ۲

شکل (۳-۵) ساختار عملگر تقاطع تک نقطه‌ای

۸- تقاطع دونقطه‌ای

در این روش دونقطه را به‌صورت تصادفی به‌عنوان نقطه برش، در طول دو کروموزومی که به‌عنوان والدین انتخاب شده‌اند در نظر گرفته و کروموزوم‌ها از آن دونقطه به سه قسمت تقسیم می‌شوند که قسمت وسط ثابت مانده و قسمت‌های دو طرف از دو کروموزوم باهم تعویض می‌شوند. در شکل (۳-۱۴) ساختار عملگر تقاطع دونقطه‌ای نمایش داده شده است.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۵ | ۳ | ۸ | ۲ | ۷ | ۴ |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۴ | ۶ | ۵ | ۹ | ۲ |

والد ۱

والد ۲

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۴ | ۱ | ۱ | ۳ | ۸ | ۲ | ۹ | ۲ |
| ۱ | ۳ | ۵ | ۴ | ۶ | ۵ | ۷ | ۴ |

فرزند ۱

فرزند ۲

شکل (۴-۵) ساختار عملگر تقاطع دونقطه‌ای

۹- تقاطع یکنواخت

در روش تقاطع یکنواخت یک‌رشته صفر و یک به طول کروموزوم به صورت تصادفی تولید می‌شود. اگر رقمی در طول این رشته یک باشد، مقدار ژن فرزند متناظر در کروموزوم‌ها به همان صورت باقی می‌ماند و در غیر این صورت، مقدار ژن فرزند متناظر از والد بعدی انتخاب می‌شود. در این حالت نیز لازم است تا رویه‌ای برای تولید کروموزوم‌های شدنی طی شود.

- اگر مقدار ژن رشته تصادفی برابر با ۱ بود، ژن متناظر از والد ۱ را در فرزند ۱ کپی کنید.
- اگر مقدار ژن رشته تصادفی برابر با ۱ بود، ژن متناظر از والد ۲ را در فرزند ۲ کپی کنید.
- ژن‌های باقی‌مانده از والد ۲ را در ژن‌های فرزند ۱ قرار دهید.
- ژن‌های باقی‌مانده از والد ۱ را در ژن‌های فرزند ۲ قرار دهید.

در این نوع تقاطع، جمعیت جدیدی که به وجود می‌آید، دارای تنوع ژنتیکی بیشتری نسبت به تقاطع‌های تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای هست. به همین دلیل این نوع ترکیب در جمعیت‌هایی که اعضای کمی دارند اثر بهتری دارد تا جمعیت‌هایی که تعداد اعضای زیادی دارند. در جمعیت‌های کوچک، ممکن است نیاز به تنوع ژنتیکی باشد تا روش سریع‌تر همگرا شود. اما در جمعیت‌های بزرگ معمولاً تنوع ژنتیکی لازم فراهم می‌باشد. شکل (۱۵-۳) ساختار عملگر تقاطع یکنواخت را نشان می‌دهد.

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

رشته تصادفی

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۳ | ۵ | ۳ | ۸ | ۲ | ۷ | ۴ |
| ۴ | ۱ | ۱ | ۴ | ۶ | ۵ | ۹ | ۲ |
| ۱ | ۱ | ۵ | ۳ | ۶ | ۲ | ۹ | ۲ |
| ۴ | ۳ | ۱ | ۴ | ۸ | ۵ | ۷ | ۴ |

والد ۱
والد ۲
فرزند ۱
فرزند ۲

شکل (۵-۵) ساختار عملگر تقاطع یکنواخت

۱۰- عملگر جهش

در طبیعت برخی عوامل مانند تابش اشعه ماورای بنفش باعث به وجود آمدن تغییرات غیرقابل پیش‌بینی در کروموزوم‌ها می‌شوند. از آنجایی که الگوریتم ژنتیک از قانون تکامل پیروی می‌کند در این الگوریتم نیز عملگر جهش با احتمال کم اعمال می‌شود. عملگر جهش یکسری تغییرپذیری اضافی در جمعیت، برای بالا بردن تنوع‌پذیری جمعیت و جلوگیری از همگرایی زودرس جمعیت را فراهم می‌کند.

به ازای سیستم‌های کدینگ مختلف برای کروموزوم‌ها، عملگرهای متفاوتی برای جهش استفاده می‌شود. عملگر جهش بر روی یک یا چند ژن کروموزوم که به‌طور تصادفی انتخاب‌شده تغییراتی ایجاد می‌کند و مقدار

آن را تغییر می‌دهد. عملگر جهش نیز معمولاً بر روی درصدی از جمعیت به صورت تصادفی اعمال می‌شود. این عملگر تضمین می‌کند که قسمت‌های جدیدی از فضا که عملگرهای تقاطع به آن دسترسی پیدا نکرده‌اند نیز جستجو شود. می‌توان استنباط کرد که مهم‌ترین وظیفه جهش اجتناب از همگرایی به بهینه محلی است. نحوه کار به این صورت می‌باشد، هر فرزندی که از عملگر تقاطع به وجود می‌آید، این احتمال برایش وجود دارد که برخی از ژن‌هایش تغییر یابد. یک عدد تصادفی تولید می‌شود و با نرخ جهش مقایسه می‌شود، که آیا عملگر جهش بر روی آن انجام شود یا خیر.

□ جهش تعویض

در این نوع از عمل جهش، دو ژن مجاور باهم تعویض می‌شوند که در شکل (۱۶-۳) ملاحظه می‌شود.



شکل (۵-۶) جهش (تعویض)

□ جهش معکوس سازی

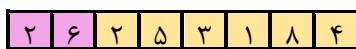
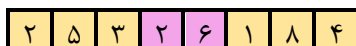
در این نوع از جهش دونقطه به‌طور تصادفی انتخاب می‌شوند و سپس ژن‌های موجود در این محدوده معکوس می‌شوند. شکل (۱۷-۳) نشان‌دهنده این نوع از جهش است.



شکل (۵-۷) جهش (معکوس سازی)

□ جهش تغییر مکان

همان‌طور که در شکل (۱۸-۳) نمایش داده شده است، در این نوع از جهش، یک‌رشته از کروموزوم انتخاب شده و سپس به یک موقعیت جدید منتقل می‌شود.



شکل (۵-۸) جهش (تغییر مکان)

۱۱- مکانیزم انتخاب بازمانده

مکانیزم انتخاب بازمانده پس از تولید فرزند اجرا می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، اندازه‌ی جمعیت ثابت است بنابراین، باید مشخص شود کدام افراد باید در نسل بعد حضور داشته باشند. این تصمیم، معمولاً بر اساس مقادیر برازندگی انجام می‌شود. برخلاف انتخاب والد، که نوعاً احتمالی است، انتخاب بازمانده معمولاً قطعی است. به‌عنوان مثال، رتبه‌بندی مجموعه‌ی والدین و فرزندان و انتخاب بخش بالایی رتبه‌بندی (مبتنی بر برازندگی)، یا انتخاب فقط از فرزندان (مبتنی بر سن).

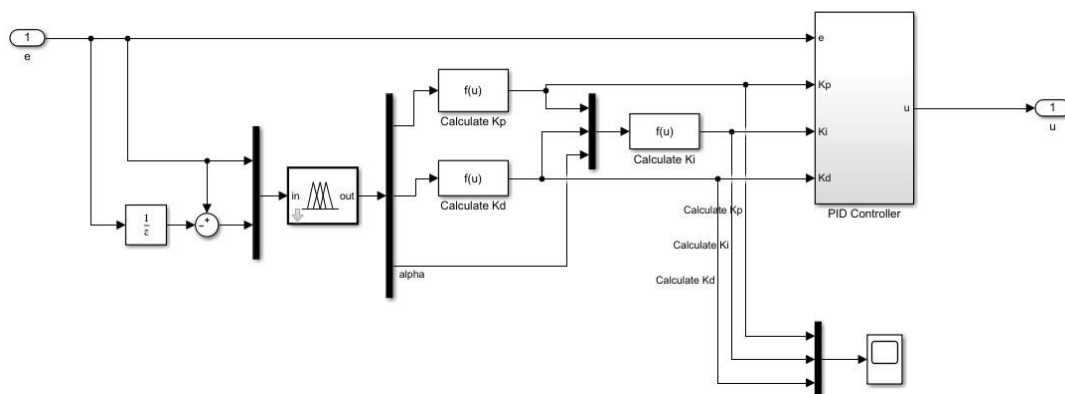
۱۲- شرایط خاتمه

اصولاً، برای مسئله مشخص باهدف ایجاد یک جمعیت، با برازندگی بالاتر، می‌توان از روش‌های ابتکاری استفاده کرد. شرایط خاتمه‌ی متفاوتی می‌تواند برای یک الگوریتم ژنتیک به کار رود از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تولید تعداد معینی از نسل‌ها
- تنوع جمعیت، کمتر از یک آستانه‌ی معین قرار گیرد
- برای یک دوره‌ی معین از نسل‌ها، بهبودی حاصل نشود
- تعداد تکرار

نتایج خروجی از بهینه‌سازی توسط این کد در فصل پایان نامه آورده شده است.

شماره‌ی کنترل کننده Fuzzy-Pid :



مدل سیمولینک کنترل کننده Fuzzy-Pid براساس معادلات بیان شده که کل این مجموعه در داخل سیمولینک سیستم فرمان برقی با محرک خطی الکترومکانیکیدر قسمت کنترل کننده قرار می‌گیرد.

Abstract:

In this dissertation, the aim was to design a steer by wire system with linear electromechanical actuator on the E-Class sedan. This steering system is designed and simulated to eliminate disadvantages such as more weight due to having a set of rack and pinion gears as well as lower operating speed due to having mechanical parts in the steer by wire system with rotary actuator as well as optimizing the force and output speed of the car wheels. The complete model of the car steering system and the two-wheeled car model are modeled and validated in MATLAB / Simulink software. In the following, the characteristic curve of the output angle of the wheel with respect to the input angle from the driver side and also the amount of force applied from the side of the linear electromechanical actuator to the vehicle wheel is also extracted. The output results of the steer by wire system with linear electromechanical actuator are also compared with the steer by wire system with rotary actuator, which shows a 32% improvement in the output results of the car tire angle relative to the driver impact input. Finally, using a genetic algorithm, the results of the force applied to the tire and the response speed of the steering system are optimized by minimizing the amount of output force and the amount of output error. The correction has improved the response time by 1.2 seconds, increasing the speed of the wheel output compared to the model of the steer by wire system with rotary actuator. The output results of both models were compared by the car bicycle model in two tests of mana and fishhook, which had a 5% improvement in the output results.

Keywords:

Steer by wire system, linear electromechanical actuator, Tire Force, Optimization, genetic algorithm



Iran University of Science and Technology
Automotive Engineering Department

Improvement of Actuation Force and Response Time of a Steer-by-Wire System using Linear Actuator

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of
Master of Science in Automotive Engineering tendency vehicle dynamics
systems

By:

Hassan Khodadoost Khosh Darrehgi

Supervisor:

Dr. Mohammad hasan Shojaee fard

Dr. Salman Ebrahimi-Nejad Rafsanjani

June2020