



مدل سازی دینامیکی و کنترل سرعت یک خودروی الکتریکی هوشمند سطح یک

یاسمین غلامی^۱، وحید فخاری^{۲*}

^۱ دانش آموزخته کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، gholami.yasamin@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، v_fakhari@sbu.ac.ir

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۵ بهمن ۱۴۰۰

پذیرش: ۲۹ اردیبهشت ۱۴۰۱

کلیدواژه‌ها:

جی تی سوویت

خودروی الکتریکی هوشمند

سیمولینک متلب

کنترل سرعت طولی

مدل سازی دینامیکی

چکیده

با توجه به منابع محدود سوخت های فسیلی و آلودگی ناشی از آن ها، استفاده از سوخت های پاک ضروری به نظر می رسد. در این راستا، توسعه خودروهای الکتریکی یا دورگه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. در سال های اخیر، حوزه های پژوهشی مربوط به خودروهای الکتریکی هوشمند توجه پژوهشگران و صنعت گران زمینه خودرو را به خود جلب کرده است. این خودروها به لحاظ قابلیت ها دارای رده های مختلفی از جمله کنترل هوشمند سرعت خودرو هستند. در این پژوهش، مدل سازی دینامیکی و کنترل سرعت طولی یک خودروی الکتریکی هوشمند سطح یک با استفاده از نرم افزارهای جی تی سوویت و متلب مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین، مدل ایجاد شده در نرم افزار جی تی سوویت به کمک داده های به دست آمده از آزمون های تجربی حلقه باز، اعتبارسنجی می شود. در ادامه، پس از مرتبط کردن دو نرم افزار مذکور، یک کنترلر تناسبی- انتگرالی به منظور کنترل سرعت طولی خودرو طراحی شده و پارامترهای آن تنظیم می شوند. در نهایت، عملکرد کنترلر طراحی شده در کنترل سرعت خودرو در شرایط مختلف (مانند شیب جاده، وزش باد و ورودی های سرعت مرجع مختلف) مورد ارزیابی قرار می گیرد.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

امروزه یکی از موضوعاتی که در رانندگی با خودروهای الکتریکی مطرح می‌شود، امکان هوشمندسازی آن‌ها می‌باشد. به این معنا که انجام و کنترل برخی وظایف رانندگی به جای راننده، از طریق یک کنترلر صورت پذیرد. این نوع خودروها، خودروی خودران^۱ نیز نامیده می‌شوند. خودروی خودران، خودرویی است که دارای حسگرهای متعددی برای تشخیص محیط اطراف خود، عملگرها و الگوریتم‌های پیچیده‌ای است. این خودروها به سطوح مختلف دسته‌بندی می‌شوند. سطح اول با کنترل سرعت آغاز می‌شود و به ترتیب در سطوح بالاتر سایر وظایف رانندگی مانند کنترل فرمان و پارک خودرو را در بر می‌گیرد. سطوح پیشرفته‌تر شامل قابلیت رانندگی و کنترل خودرو بدون دخالت و حتی حضور راننده است و تنها مقصد از طرف سرنشین تعیین می‌شود. در این مقاله، کنترل سرعت یک خودروی الکتریکی هوشمند سطح یک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تجادو^۲ و همکاران [۱] به طراحی و اجرای آزمایشی یک کنترلر تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری^۳ برای کنترل سرعت‌های پایین به خصوص در ترافیک‌های سنگین در یک نمونه خودروی سیتروئن خودران سطح یک پرداختند. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این نوع کنترلر نسبت به کنترلر تناسبی-انتگرالی و تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر به‌ویژه در سرعت‌های پایین نتایج بهتری به دنبال خواهد داشت و سرنشینان نیز حس بهتر و راحت‌تری را تجربه می‌کنند.

خوبان و همکاران [۲] یک کنترلر پیش‌بین غیرخطی برای این که خودروی الکتریکی خودران سطح یک را با مقدار سرعت مطلوب کنترل نمایند، پیشنهاد دادند. داده‌های آزمایشگاهی حاصل از یک سیکل جدید اروپایی^۴ جهت بررسی عملکرد کنترلر استفاده شده است. نتایج آن‌ها نشان داده که روش ارائه‌شده می‌تواند به محدوده وسیعی از سیستم‌های غیرخطی با عدم قطعیت‌های متعددی اعمال شود.

نیه^۵ و همکاران [۳] روش جدیدی بر پایه کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر خودتنظیم و شبکه عصبی ارائه دادند که باعث بهبود عملکرد کنترلر سرعت طولی خودروی خودران سطح یک می‌شود. همچنین به مقایسه دقت کنترلر سرعت و راحتی در راندن خودرو، میان کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر، منطق فازی و روشی که ارائه داده‌اند، پرداختند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی آن‌ها عملکرد بهتری نسبت به سایر داشته است.

آلتون^۶ و همکاران [۴] به بررسی ساختار کلی خودروهای الکتریکی پرداختند. آن‌ها در ابتدا درباره موتور الکتریکی و باتری به عنوان اجزای

اصلی خودروهای الکتریکی، انواع آن‌ها و عوامل مؤثر بر عملکرد آن‌ها توضیح دادند. همچنین در مورد روش‌های شارژ کردن باتری و نکات کلی که در طراحی خودروهای الکتریکی باید در نظر گرفت توضیح دادند. شاپینگ چن^۷ و هوپان چن^۸ [۵] یک کنترلر جدید برای سرعت طولی و سرعت جانبی^۹ خودرو که بر اساس کنترلر پیش‌بین با هم مرتبط شده‌اند را، برای یک خودروی خودران سطح بالا جهت پیمودن مسیر و ردیابی سرعت مطلوب ارائه داده‌اند. آن‌ها از کنترلر پیش‌بین برای کنترلر پیمایش مسیر و از کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای دنبال کردن سرعت استفاده کردند و نتایج مدل‌های دینامیکی ۸ و ۱۴ درجه آزادی را با یک مدل شبیه‌سازی در نرم‌افزار کارسیم^{۱۰} اعتبارسنجی کردند. نتایج آن‌ها که از نرم‌افزار متلب برای کنترلرها استفاده نموده‌اند، نتایج خوبی است.

محمود و همکاران [۶] به ارائه یک روش طراحی سیستم کنترل سرعت^{۱۱} تطبیقی پرداختند. آن‌ها یک مدل گرافیکی کامل از خودروی خودران سطح بالا را با استفاده از کتابخانه متلب سیم اسکپ^{۱۲} ساختند. سپس دو کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای گاز و ترمز طراحی کردند. شبیه‌سازی‌های متعددی برای مشخص کردن ظرفیت کنترلرها برای شرایط مختلف رانندگی انجام شده است که نشان می‌دهد کنترلرها در رسیدن به سرعت دلخواه عملکرد درستی داشته‌اند. همچنین زمان پاسخگویی معقولی، جهت تأمین امنیت و راحتی در حین رانندگی به دست آمده است.

شمس‌الدین و همکاران [۷] یک کنترلر غیرخطی تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر^{۱۳} برای پاسخ دینامیکی یک خودروی الکتریکی خودران سطح یک پیشنهاد دادند. هدف این کنترلر این است که سرعت مرجعی که راننده خودرو تعیین کرده است را به طور دقیق دنبال کند. یک مدل دینامیکی از خودرو برای مطالعه سیستم در محیط سیمولینک متلب^{۱۴} ایجاد و اعتبارسنجی شده است. کنترلر پیشنهادی آن‌ها از طریق مقایسه با کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر کلاسیک بررسی شده است. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که کنترلر پیشنهادی آن‌ها با کاهش خطای ماندگار و زمان نشست عملکرد خودروی الکتریکی را بهبود می‌بخشد.

سینگ^{۱۵} [۸] برای کنترلر سرعت طولی یک خودروی خودران سطح بالا، به طراحی یک سیستم کنترلی پرداخته است. او از الگوریتم‌های کنترلی تناسبی-انتگرالی و تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر برای کنترل

⁷ Shuping Chen

⁸ Huiyan Chen

⁹ Lateral Speed

¹⁰ CarSim

¹¹ Adaptive Cruise Control (ACC)

¹² MATLAB Simscape

¹³ NPID (Nonlinear PID)

¹⁴ MATLAB Simulink

¹⁵ Singh

¹ Self-Driving Car or Autonomous Vehicle

² Tejado

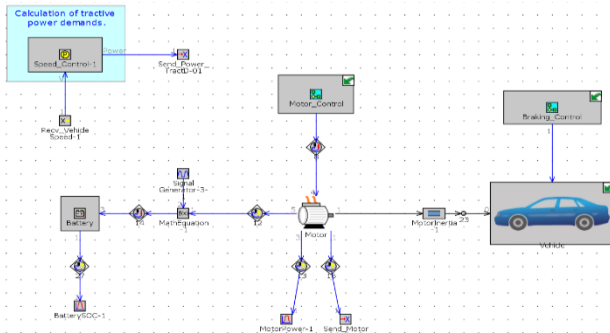
³ Fractional PI Controller

⁴ NEDC (New European Driving Cycle)

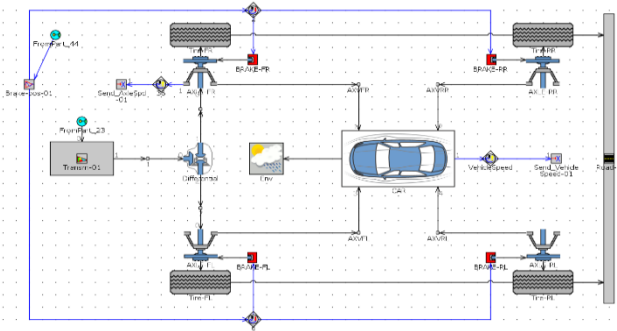
⁵ Nie

⁶ Altun

موتور الکتریکی، باتری، کنترلر سرعت، خودرو و سیستم انتقال قدرت نشان داده شده است. در شکل ۲، ارتباط سیستم انتقال قدرت شامل دیفرانسیل، محورها، چرخ‌ها و دنده با خودرو نشان داده شده است. همچنین شرایط محیطی در این قسمت قابل اعمال هستند.



شکل ۱: مدل دینامیکی خودرو در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت (ارتباط کلی اجزا)



شکل ۲: مدل دینامیکی خودرو در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت (ارتباط سیستم انتقال قدرت)

مشخصات هر جزء مطابق با مشخصات خودروی رانا الکتریکی موجود در شرکت ایپکو، مطابق با پارامترهای موجود در جدول‌های ۱ تا ۵ و نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۳ تا ۶ به نرم‌افزار اعمال شده‌اند.

جدول ۱: مشخصات باتری

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	وضعیت شارژ اولیه	۰.۸۹
۲	تعداد دسته‌های موازی	۱
۳	تعداد سلول‌های سری در یک دسته	۹۶
۴	ظرفیت باتری	۴۰ (آمپر ساعت)
۵	منحنی مشخصه ولتاژ هر سلول هنگام شارژ و تخلیه	شکل ۳
۶	منحنی مشخصه مقاومت درونی هر سلول هنگام شارژ و تخلیه	شکل ۴

جدول ۲: مشخصات موتور الکتریکی

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	منحنی مشخصه بازده موتور	شکل ۵
۲	منحنی بیشترین و کمترین گشتاور ترمز	شکل ۶

سرعت استفاده و درباره نتایج آن‌ها بحث کرده است. نتایج او نشان دادند که کنترلر تناسبی-انتگرالی پاسخ بهتری از لحاظ پایداری و تکان‌های تند نامطلوب نسبت به پاسخ کنترلر تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر دارد. البته کمی پاسخ آن کند است که می‌تواند بهبود یابد. با توجه به مرور پژوهش‌های ارائه‌شده در حوزه کنترل سرعت خودروهای الکتریکی، پژوهش‌های پیشین به بررسی عملکرد کنترلرها در شرایط کاری مختلف و بحرانی رانندگی نپرداخته‌اند، در حالی که در این مقاله عملکرد روش کنترل طراحی‌شده در کنترل سرعت خودروی الکتریکی در شرایط شیب جاده و وزش باد و همچنین با اعمال ورودی‌های سرعت مرجع مختلف، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ضمن، در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی خودروی الکتریکی در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت^۱ انجام شده و کنترلر سرعت در نرم‌افزار متلب^۲ شبیه‌سازی می‌شود و در نهایت با مرتبط‌کردن نرم‌افزارهای جی‌تی‌سویت و متلب، سیستم حلقه بسته شبیه‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت تنها امکان اعمال کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر وجود دارد و امکان به‌کارگیری سایر روش‌های کنترلی وجود ندارد. لذا با مرتبط‌نمودن دو نرم‌افزار مذکور، بستری برای اعمال و شبیه‌سازی روش‌های کنترلی متنوع‌تر فراهم می‌شود. به علاوه، در این مقاله، مدل دینامیکی صحه‌گذاری‌شده برای خودروی الکتریکی در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت ارائه می‌شود که مبنای انجام پژوهش‌های آینده خواهد بود.

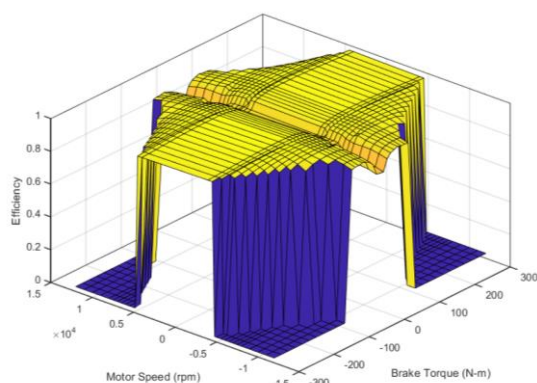
در این مقاله، در ابتدا به مدل‌سازی دینامیکی یک نمونه خودروی الکتریکی (رانا الکتریکی) در نرم‌افزار جی‌تی‌سویت پرداخته می‌شود. در ادامه، با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی جی‌تی‌سویت با نتایج تجربی، مدل دینامیکی ایجادشده در این نرم‌افزار اعتبارسنجی می‌شود. سپس، یک کنترلر تناسبی-انتگرالی مناسب به منظور کنترل سرعت خودروی مذکور طراحی شده و معادلات مربوطه در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌شوند. در نهایت، با مرتبط‌نمودن نرم‌افزارهای جی‌تی‌سویت و متلب، عملکرد کنترلر طراحی‌شده در شرایط شیب جاده و وزش باد و همچنین با اعمال ورودی‌های سرعت مرجع مختلف، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل‌سازی دینامیکی

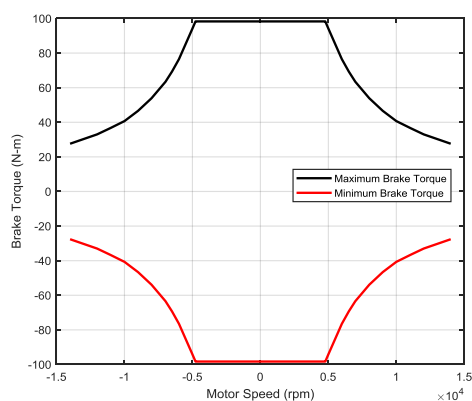
نرم‌افزار جی‌تی‌سویت، نرم‌افزاری مهندسی با کتابخانه‌ای جامع شامل انواع اجزاست که با استفاده از آن می‌توان مدل تقریباً دقیقی از سیستم‌های مهندسی را از جمله وسایل نقلیه با ثبت جزئیات شبیه‌سازی کرد. در این مقاله مدل‌سازی دینامیکی خودروی الکتریکی در این نرم‌افزار انجام شده است. ارتباط اجزا به صورت نشان داده شده در شکل‌های ۱ و ۲ می‌باشد. در شکل ۱، ارتباط کلی اجزایی مانند

^۱ GT-SUITE

^۲ MATLAB



شکل ۵: منحنی مشخصه بازده موتور برحسب دور موتور و گشتاور ترمز



شکل ۶: منحنی بیشترین و کمترین گشتاور ترمز

۳- اعتبارسنجی

حدود ۲۶ دقیقه آزمون تجربی بر روی خودرو به صورت رانندگی در شهر در شرایط مختلف مانند سرعت و شیب جاده متفاوت انجام شده است. عملکرد اجزای مختلف توسط حسگرها ثبت و از طریق واحد کنترل خودرو^۱، نتایج خروجی در هر لحظه مانند سرعت خودرو، توان‌های مصرفی موتور الکتریکی و باتری، سرعت موتور الکتریکی و وضعیت شارژ باتری به دست آمده‌اند.

برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی، سرعت خودرو هنگام آزمون تجربی (شکل ۷) به عنوان ورودی به نرم‌افزار جی‌تی‌سویت اعمال شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند.

در ادامه، نتایج شبیه‌سازی و تجربی بررسی خواهند شد. در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب منحنی‌های توان مصرفی باتری و توان الکتریکی موتور الکتریکی و جذر میانگین مربعات آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، جذر میانگین مربعات برای توان الکتریکی موتور و توان باتری در نتایج تجربی و شبیه‌سازی تا حدودی به یکدیگر نزدیک هستند. رفتار منحنی‌ها نیز مشابه است. در برخی قسمت‌ها منحنی تجربی بالاتر از شبیه‌سازی

جدول ۳: مشخصات خودرو

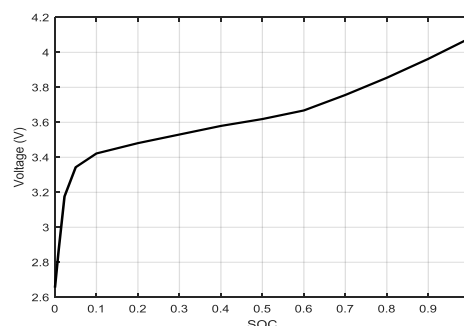
ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	وزن خودرو	۱۴۷۰ (کیلوگرم)
۲	وزن سرنشین	۷۰ (کیلوگرم)
۳	ضریب پسا خودرو	۰٫۳۴
۴	مساحت ناحیه جلوی خودرو	۰٫۲ (متر مربع)
۵	مرکز فشار	۵۰۰ (میلی‌متر)
۶	فاصله بین محور جلو و عقب خودرو	۲٫۴۴۵ (متر)
۷	فاصله افقی محور عقب تا مرکز جرم	۱٫۴۹۵ (متر)
۸	فاصله عمودی محورها تا مرکز جرم	۰٫۵ (متر)
۹	ممان اینرسی نصف محور	۱٫۰۳ (کیلوگرم متر مربع)

جدول ۴: مشخصات سیستم انتقال قدرت

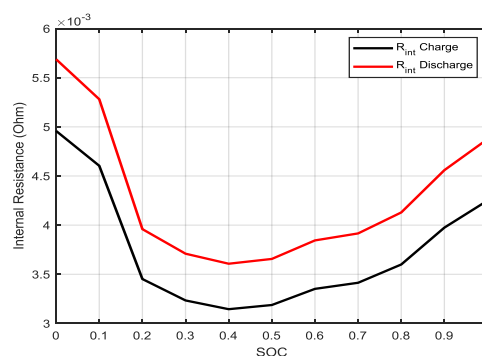
ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	نسبت دنده	۱۰
۲	کارایی مکانیکی چرخ‌دنده	۹۸ (درصد)
۳	ممان اینرسی شفت ورودی دنده	۰٫۳ (کیلوگرم متر مربع)
۴	ممان اینرسی شفت خروجی دنده	۰٫۴ (کیلوگرم متر مربع)
۵	ممان اینرسی شفت ورودی دیفرانسیل	۰٫۰۰۱ (کیلوگرم متر مربع)
۶	ممان اینرسی شفت خروجی دیفرانسیل	۰٫۰۰۵ (کیلوگرم متر مربع)
۷	کارایی مکانیکی کل	۹۵ (درصد)

جدول ۵: مشخصات تایر

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	شعاع	۲۹۸٫۲ (میلی‌متر)
۲	ضریب اصطکاک غلتشی تایر	۰٫۰۲



شکل ۳: منحنی مشخصه ولتاژ هر سلول باتری بر حسب وضعیت شارژ باتری در دماهای ۳۰۰ و ۳۵۰ کلین



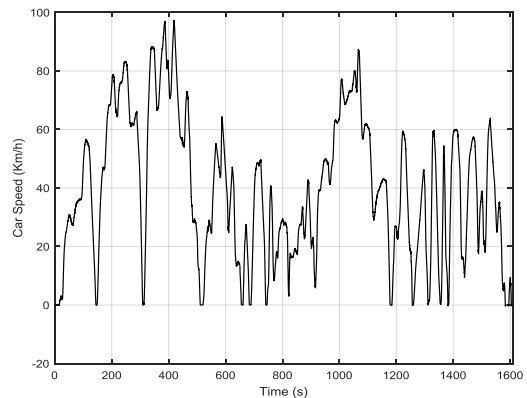
شکل ۴: منحنی مشخصه مقاومت درونی هر سلول باتری در حالت‌های شارژ و تخلیه بر حسب وضعیت شارژ باتری در دماهای ۲۷۵ و ۳۰۰ و ۳۵۰ کلین

¹ VCU (Vehicle Control Unit)

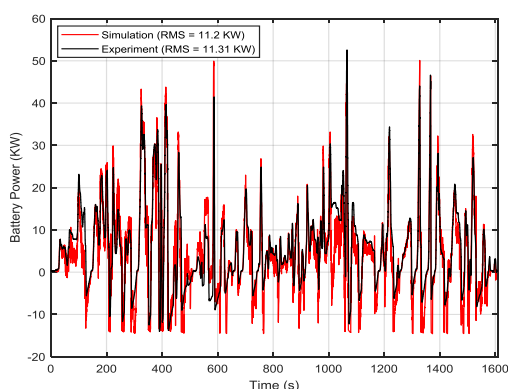
از آنجایی که این مدل‌سازی با این هدف انجام شده است که آزمون‌های مختلف به جای پیاده‌سازی تجربی، روی این مدل انجام شوند (به دلیل صرفه‌جویی در وقت و هزینه و انرژی)، نیاز است که نتایج با دقت بیشتری به هم نزدیک باشند و مدل معتبر باشد. در نتیجه دو متغیر که مقدار آن‌ها به صورت کاملاً دقیق قابل بیان نمی‌باشد و بر توان مصرفی تأثیرگذار هستند، در محدوده‌ای قابل قبول تغییر داده می‌شوند. این دو متغیر ضریب اصطکاک غلتشی تایر و کارایی مکانیکی کل دیفرانسیل هستند. مقادیر جدید این دو متغیر در جدول ۶ قابل مشاهده هستند. ضریب اصطکاک غلتشی تایر کاهش و کارایی مکانیکی کل دیفرانسیل افزایش یافته‌اند تا جذر میانگین مربعات توان مصرفی کاهش یابد.

شکل ۱۰ منحنی توان مصرفی باتری و جذر میانگین مربعات آن پس از تغییر دو متغیر و میزان خطای آن را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی، سایر نتایج خروجی مانند توان الکتریکی موتور، درصد وضعیت شارژ باتری، سرعت موتور و توان مکانیکی موتور نیز به دست آمده‌اند، که جذر میانگین مربعات همه نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در جدول ۷ مقایسه شده‌اند.

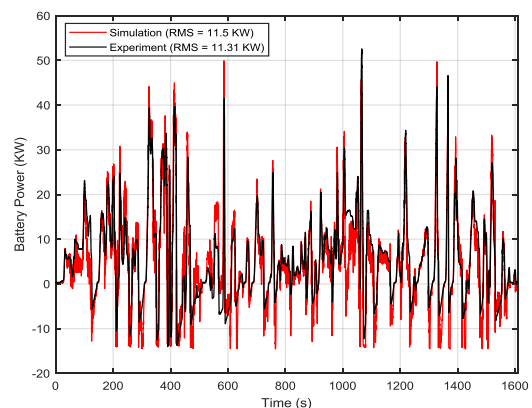
قرار گرفته است که به معنای مصرف توان بیشتر در پیمایش است. این اختلاف ممکن است به دلایل مختلفی رخ دهد. به طور مثال ممکن است در جاده شیب وجود داشته باشد یا باد در جهت مخالف با حرکت خودرو وزیده باشد. در نتیجه این شرایط که به شبیه‌سازی قابل اعمال نیستند باعث افزایش توان مصرفی باتری و موتور می‌شوند. عکس این موضوع نیز صادق است.



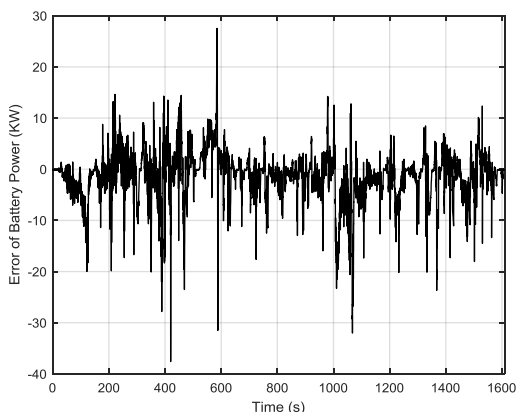
شکل ۷: منحنی ورودی سرعت خودرو به دست آمده از آزمون تجربی



الف

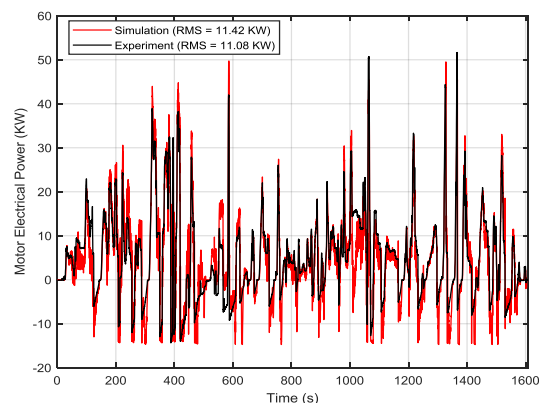


شکل ۸: نمودار مقایسه توان مصرفی باتری نسبت به زمان در نتایج شبیه‌سازی و تجربی



ب

شکل ۱۰: الف- نمودار مقایسه توان مصرفی باتری نسبت به زمان در نتایج شبیه‌سازی و تجربی پس از تغییر دو پارامتر. ب- نمودار خطای لحظه‌ای توان مصرفی باتری در نتایج شبیه‌سازی و تجربی (بر حسب تجربی)



شکل ۹: نمودار مقایسه توان الکتریکی موتور الکتریکی نسبت به زمان در نتایج شبیه‌سازی و تجربی

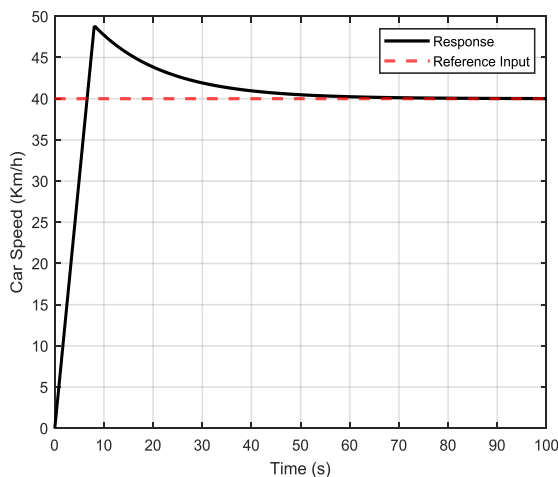
نمی‌دهد. در نتیجه از روش دوم استفاده شده است. ضریب تناسبی بحرانی از این روش ۸۱ و دوره تناوب بحرانی ۳ به دست آمده است. از این اعداد مطابق با جدول پیشنهادی زیگلر- نیکولز استفاده شده است و ضرایب پیشنهادی کنترلر که در جدول ۸ آمده‌اند، محاسبه شده‌اند.

جدول ۸: ضرایب پیشنهادی کنترلر

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	ضریب تناسبی	۳۶,۴۵
۲	ضریب انتگرالی	۲,۵

۴-۱- بررسی پاسخ سیستم حلقه بسته در حالت نامی

نمودار سرعت خودرو در حالت نامی، در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. ورودی مرجع ۴۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۳: خروجی سرعت با ضرایب کنترلی طراحی شده

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، میزان فرایجهش و زمان نشست زیاد می‌باشد. همچنین پاسخ دارای شیب تند و هنگام کاهش سرعت است که این رفتار برای سرنشین مطلوب نمی‌باشد. در نتیجه جهت رفتاری مطلوب، ضرایب کنترلی با آزمون و خطا به مقادیر آورده شده در جدول ۹ تغییر یافته‌اند.

شکل ۱۴ سرعت خودرو پس از تغییر ضرایب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمان نشست و میزان فرایجهش تا حد بسیار خوبی کاهش یافته‌اند، در نتیجه این ضرایب به عنوان ضرایب نهایی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۹: ضرایب کنترلی نهایی

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	ضریب تناسبی	۸
۲	ضریب انتگرالی	۰,۰۵

جدول ۶: تغییرات دو متغیر

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	ضریب اصطکاک غلشی تایر	۰,۰۱۸
۲	کارایی مکانیکی کل دیفرانسیل	۹۶ (درصد)

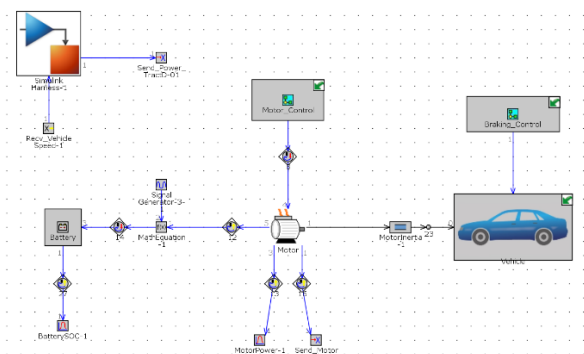
جدول ۷: مقایسه جذر میانگین مربعات نتایج شبیه‌سازی و تجربی (مقدار مشخصه، درصد اختلاف جذر میانگین مربعات نتایج شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی است)

ردیف	نام مشخصه	مقدار مشخصه (واحد)
۱	توان مصرفی باتری	-۰,۹۷
۲	درصد وضعیت شارژ باتری	۲
۳	توان الکتریکی موتور	۰,۴۵
۴	سرعت موتور	-۵,۲۲
۵	توان مکانیکی موتور	۱,۸۹

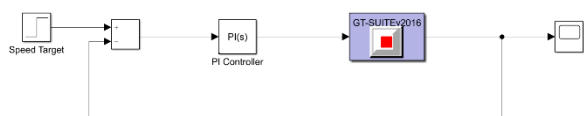
همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، میزان درصد اختلاف جذر میانگین مربعات نتایج تجربی و شبیه‌سازی کم و قابل چشم‌پوشی می‌باشند. در نتیجه می‌توان اظهار کرد که مدل دینامیکی ایجاد شده اعتبار دارد.

۴-۲ طراحی کنترلر سرعت و بحث بر روی نتایج

برای طراحی کنترلر سرعت، کنترلر مدل حذف شده است و نرم‌افزار جی‌تی‌سویت با سیمولینک متلب مرتبط شده است. مدل دینامیکی تغییر یافته در شکل ۱۱ و مدل کنترلر سرعت در نرم‌افزار متلب در شکل ۱۲ قابل مشاهده می‌باشند.



شکل ۱۱: مدل دینامیکی تغییر یافته به منظور مرتبط کردن دو نرم‌افزار

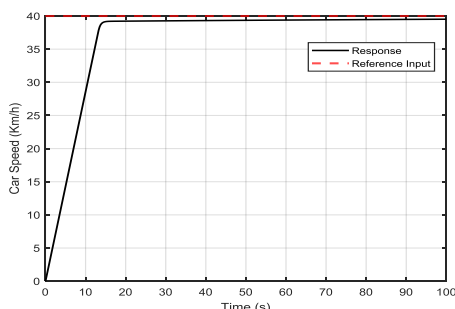


شکل ۱۲: مدل کنترلر سرعت در سیمولینک متلب

در این مقاله برای طراحی کنترلر از روش زیگلر- نیکولز استفاده شده است. پس از بررسی روش اول مشخص شد که این روش پاسخ

۴-۲- اعمال شیب جاده

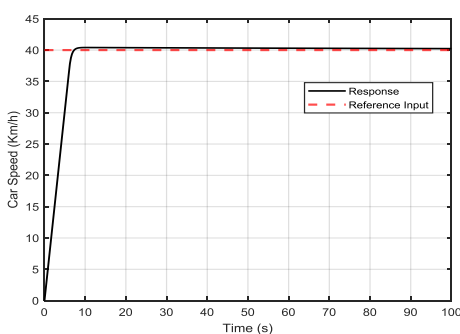
پاسخ سیستم در شرایطی که جاده دارای ۱۰ درصد شیب می‌باشد، در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این شرایط سیستم به سرعتی کمی کمتر از سرعت هدف می‌رسد. همچنین نسبت به زمانی که جاده صاف می‌باشد، زمان نشست کمی بیشتر شده است.



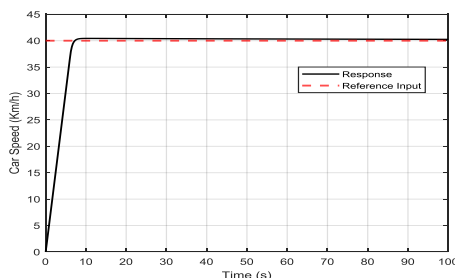
شکل ۱۷: خروجی سرعت در شرایط جاده با شیب ۱۰ درصد

۴-۳- اعمال وزش باد

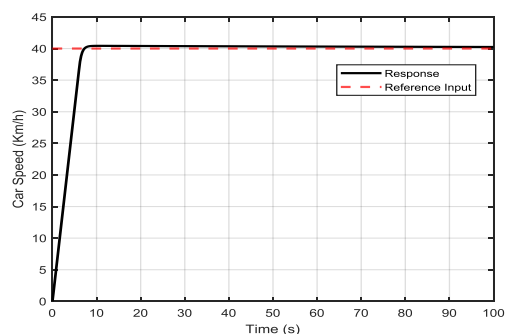
پاسخ سیستم در شرایطی که باد در جهت مخالف با حرکت خودرو، با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت می‌وزد در شکل ۱۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترلر در این شرایط عملکرد مناسبی دارد. پاسخ سیستم در شرایطی که باد در جهت موافق با حرکت خودرو، با سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت می‌وزد در شکل ۱۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترلر در این شرایط عملکرد مناسبی دارد.



شکل ۱۸: خروجی سرعت در شرایط باد در جهت مخالف

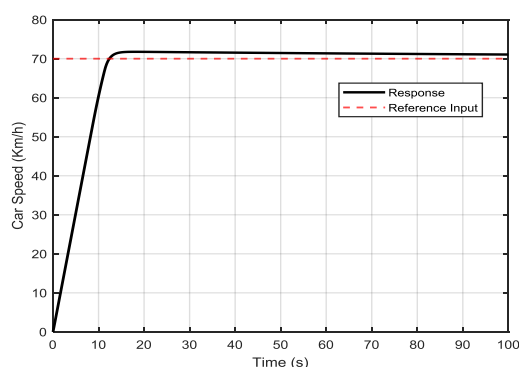


شکل ۱۹: خروجی سرعت در شرایط باد در جهت موافق



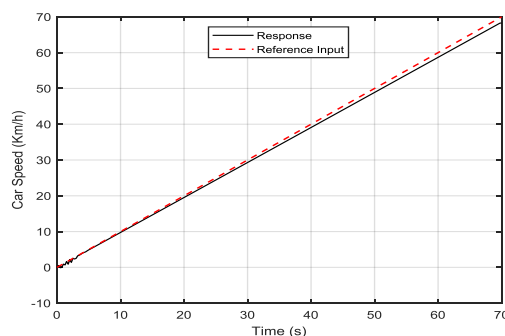
شکل ۱۴: خروجی سرعت با ضرایب کنترلی نهایی

با در نظر گرفتن سرعت هدف برابر ۷۰ کیلومتر بر ساعت، پاسخ سیستم مطابق شکل ۱۵ می‌شود. این پاسخ نشان می‌دهد، کنترلر عملکرد مناسبی به لحاظ میزان فرابرجش، زمان نشست و خطای ماندگار داشته است. در مقایسه با سرعت هدف ۴۰ کیلومتر بر ساعت، زمان نشست و میزان فرابرجش کمی افزایش یافته است. این افزایش با توجه به غیرخطی بودن سیستم قابل توجیه است.



شکل ۱۵: خروجی سرعت در شرایط سرعت هدف ۷۰ کیلومتر بر ساعت

پاسخ سیستم در شرایطی که سرعت ورودی به صورت شیب واحد اعمال می‌شود، در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ثانیه‌های ابتدایی حرکت، سرعت کمی اغتشاش دارد، اما پس از آن رفتار مطلوبی مشاهده می‌شود. با افزایش زمان، خطا در حال افزایش است. علت این است که در هر لحظه ورودی مرجع در حال افزایش است و با توجه به غیرخطی بودن سیستم قابل توجیه است.



شکل ۱۶: خروجی سرعت در شرایط سرعت هدف شیب واحد

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به مدل سازی دینامیکی یک خودروی الکتریکی در نرم افزار جی تی سویت و اعتبارسنجی آن از طریق مقایسه با داده های تجربی حاصل از پیمایش پرداخته شد. باتوجه به نزدیک بودن نتایج شبیه سازی و تجربی، نتیجه گرفته شد که مدل دینامیکی ایجاد شده در نرم افزار جی تی سویت معتبر است. همچنین به منظور کنترل سرعت خودروی مذکور، یک کنترلر از نوع تناسبی- انتگرالی در محیط سیمولینک نرم افزار متلب طراحی شد. در ادامه، با مرتبط کردن نرم افزارهای جی تی سویت و متلب، عملکرد سیستم حلقه بسته در شرایط مختلف (شیب جاده، وزش باد و ورودی های مرجع مختلف) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان دادند که کنترلر طراحی شده با رفتار گذرای نسبتاً مناسبی، ورودی های سرعت مرجع را دنبال می کند. اما در برخی شرایط، اندکی خطای ماندگار در دنبال کردن ورودی های مرجع به وجود می آید. لذا به منظور بهبود عملکرد کنترلر در شرایط محیطی متغیر، پیشنهاد می شود در پژوهش های آینده از روش های کنترلی تطبیقی استفاده شود تا ضرایب کنترلی متناسب با تغییر شرایط محیطی تغییر نمایند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و به ویژه آقای مهندس میثم صالحی به واسطه در اختیار قرار دادن داده ها و نتایج تجربی نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

فهرست علائم

K_{cr}	ضریب تناسبی بحرانی
P_{cr}	دوره تناوب بحرانی

مراجع و منابع

- [1] I. Tejado, V. Milanés, J. Villagrà, J. Godoy, H. HosseinNia, and B. M. Vinagre, Low speed control of an autonomous vehicle by using a fractional PI controller, IFAC Proceedings Volumes, 2011.
- [2] M. H. Khooban, N. Vafamand, and T. Niknam, T-S fuzzy model predictive speed control of electrical vehicles, ISA transactions, 2016.
- [3] L. Nie, J. Guan, C. Lu, H. Zheng, and Z. Yin, Longitudinal speed control of autonomous vehicle based on a self-adaptive PID of radial basis function neural network, IET Intelligent Transport Systems, 2018.
- [4] F. Altun, S. A. Tekin, S. Gürel, and M. Cernat, Design and optimization of electric cars. A Review of Technological Advances, 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2019.
- [5] S. Chen and H. Chen, MPC-based path tracking with PID speed control for autonomous vehicles, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- [6] A. Mahmood, M. Almagd, M. N. Noaman, and Y. H. S. Alnema, Adaptive cruise control of a simscape driveline vehicle model using PID controller, Journal of Engineering Science and Technology, 2021.
- [7] M. Shamseldin, M. Abdel Ghany, and Y. Hendawey, Optimal nonlinear PID speed control based on harmony search for an electric vehicle, Future Engineering Journal, 2021.
- [8] S. Singh, Longitudinal velocity control of autonomous ground vehicle using PID and PI controller, 2021.



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineerresearch.ir

DOI:10.22034/ER.2022.697919



Dynamic modeling and speed control of a level-one autonomous electric vehicle

Y. Gholami¹, V. Fakhari^{2*}¹ B.Sc. graduated, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, gholami.yasamin@gmail.com² Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, v_fakhari@sbu.ac.ir

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 February 2022

Accepted: 19 May 2022

Keywords:

Autonomous electric vehicle

Dynamic modeling

GT-SUITE

Longitudinal speed control

MATLAB Simulink

ABSTRACT

Due to the limited resources of fossil fuels and the pollution caused by them, the use of clean fuels seems necessary. In this regard, the development of electric or hybrid vehicles has great importance. In recent years, research areas related to autonomous electric vehicles have attracted the attention of automotive researchers and industrialists. These cars have different categories in terms of capabilities, including intelligent vehicle speed control. In this paper, dynamic modeling and longitudinal speed control of a level-one autonomous electric vehicle using GT-SUITE and MATLAB are investigated. Also, the model created in GT-SUITE software is validated with the help of data obtained from open-loop experimental tests. Then, after connecting the two software, the proportional-integral controller is designed to control the longitudinal speed of the vehicle and its parameters are adjusted. Finally, the performance of the designed controller in controlling the vehicle speed in the presence of various conditions (road slope, wind blowing, and different velocity reference inputs) is evaluated.



© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.