



## طراحی و ساخت دستگاه دیفرانسیل لغزش محدود مبتنی بر مکانیزم ترمز

هادی قاسمی زوارق\*، بهمن رحمتی نژاد، حسین رحیمی آسیابارکی\*، فرزین عظیم پور شیشوان

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: hahasemi@tvu.ac.ir و h.rahimi@tvu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۴ اسفند ۱۴۰۳

پذیرش: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۴

### کلیدواژگان:

سیستم محرکه خودرو

دیفرانسیل لغزش محدود

کنترل لغزش چرخ

مکانیزم ترمز هیدرولیک

پایداری دینامیکی خودرو

### چکیده

دیفرانسیل لغزش محدود (LSD) به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی در سیستم انتقال قدرت خودرو، نقش بسزایی در بهبود پایداری و عملکرد دینامیکی خودرو در شرایط شتاب‌گیری و پیچ‌ها ایفا می‌کند. در این پژوهش، یک نمونه اولیه از دستگاه دیفرانسیل لغزش محدود مبتنی بر مکانیزم ترمز طراحی و ساخته شد. اجزای سیستم بر روی یک استند نصب و پیاده‌سازی گردید. در این طراحی، از یک مکانیزم خاص برای ایجاد اصطکاک‌های متفاوت بین چرخ و محل نشیمنگاه آن استفاده شد. زمانی که اصطکاک چرخ‌ها متفاوت باشد، اختلاف دور ایجاد خواهد شد و در صورت ایجاد اختلاف سرعت زاویه‌ای بیش از ۳۵ درصد بین چرخ‌ها، سیستم به‌صورت خودکار وضعیت لغزش را تشخیص داده و با فعال‌سازی شیر برقی مربوط به چرخ با سرعت بالاتر، به مدت ۴۰۰ میلی‌ثانیه روغن هیدرولیک تحت فشار را به سمت چرخ موردنظر هدایت می‌کند. این فرایند به‌صورت دوره‌ای تا رسیدن اختلاف سرعت به مقادیر مجاز (کمتر از ۳۵ درصد) ادامه می‌یابد. جهت ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان سیستم، آزمایش‌ها در ۱۰ تکرار انجام پذیرفت که نتایج حاکی از دقت عملکردی حدود ۹۷ درصد برای سیستم طراحی شده بود.

## Design and construction of a limited slip differential device based on brake mechanism

Hadi Ghasemi Zavaragh\*, Bahman Rahmatinejad, Hossein Rahimi Asiabaraki\*, Farzin Azimpour Shishevan

Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

\* Corresponding Author's Email: hahasemi@tvu.ac.ir & h.rahimi@tvu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 22 February 2025

Accepted: 2 May 2025

### Keywords:

Powertrain

Limited Slip Differential

Wheel Slip Control

Hydraulic Brake Mechanism

Vehicle Dynamic Stability

### Abstract

The Limited Slip Differential (LSD) serves as a crucial component in vehicle powertrain systems, playing a significant role in enhancing dynamic stability and performance during acceleration and cornering. In this study, a prototype of a limited slip differential based on brake mechanism was designed and constructed. The system components were implemented on a stand. The design employs a specialized mechanism to create variable friction between the wheel and its seating area. When the wheel friction is different, a speed difference occurs. If the angular velocity difference exceeds 35%, the system automatically detects slippage and activates the solenoid valve corresponding to the faster-rotating wheel. This directs pressurized hydraulic oil to the target wheel for 400 milliseconds. This process continues periodically until the speed difference falls within acceptable limits (below 35%). To evaluate system accuracy and reliability, tests were conducted with 10 times, demonstrating approximately 97% operational accuracy for the designed system.

### Please cite this article using:

Ghasemi Zavaragh H, Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F. Design and construction of a limited slip differential device based on brake mechanism. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jun 22;12(4):29-39. doi: 10.22034/ijme.2025.508277.2051 [In Persian]

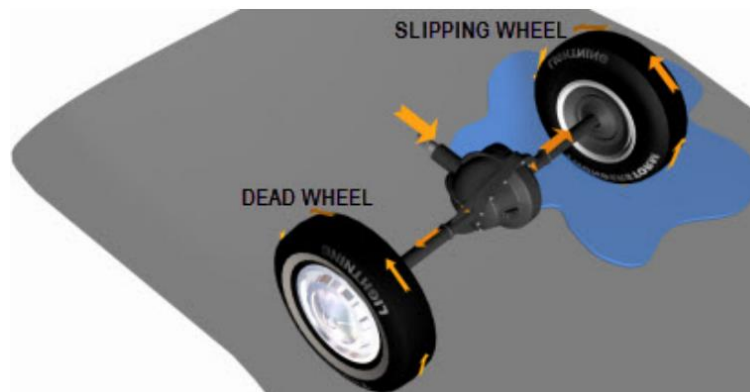
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

خودرو به‌عنوان یکی از دستاوردهای مهم مهندسی مکانیک، تحولی اساسی در صنعت حمل‌ونقل ایجاد کرده و نقش بی‌بدیلی در توسعه جوامع مدرن ایفا می‌نماید. عملکرد بهینه این سیستم پیچیده مهندسی، وابسته به هماهنگی دقیق زیرسیستم‌های متعددی است که مهم‌ترین آن‌ها سیستم محرکه خودرو می‌باشد. سیستم محرکه خودرو که به‌عنوان قلب تپنده وسایل نقلیه شناخته می‌شود، مجموعه‌ای یکپارچه از موتور و سیستم انتقال قدرت است. در این میان، دیفرانسیل به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی و تعیین‌کننده در سیستم انتقال قدرت، نقش کلیدی در عملکرد کلی خودرو ایجاد می‌کند و وظایف مهمی را بر عهده دارد. دیفرانسیل گشتاور موتور را بین چرخ‌های محرک توزیع کرده و امکان چرخش با سرعت‌های متفاوت را در هنگام پیچیدن فراهم می‌آورد. این عملکرد از طریق مجموعه‌ای از دنده‌های هرزگرد درون هوزینگ دیفرانسیل امکان‌پذیر می‌شود که نه تنها از سایش نامتعادل تایرها جلوگیری می‌کند، بلکه نقش مهمی در حفظ پایداری دینامیکی خودرو ایفا می‌نماید. در شرایطی که خودرو در حال پیچیدن است، این سیستم به چرخ بیرونی اجازه می‌دهد با سرعت بیشتری نسبت به چرخ داخلی بچرخد، درحالی‌که در حرکت مستقیم، سرعت چرخش هر دو چرخ یکسان حفظ می‌شود [۱]. این ویژگی منحصربه‌فرد دیفرانسیل، انتقال قدرت بهینه و کنترل‌شده‌ای را در تمام شرایط رانندگی ممکن می‌سازد.

طراحی خودرو شامل جنبه‌های متعددی است که در آن از تکنولوژی‌های جدید شامل سیستم‌های مانیتورینگ، الگوریتم ژنتیک [۲]، هوش مصنوعی، یادگیری عمیق [۳]، بینایی ماشین، آکوستیک امیشن [۴] و غیره استفاده می‌شود که به تولید وسیله‌ای ایمن، کارآمد و جذاب منجر می‌گردد. توجه به اصل آکرمین یکی از جنبه‌های مهم طراحی خودرو، به‌ویژه در طراحی سیستم‌های فرمان است. این اصل به طراحی هندسه سیستم فرمان برای تضمین حرکت تمامی چرخ‌ها بر روی مسیر مناسب و هم‌مرکز در حین پیچیدن می‌پردازد [۵]. با تنظیم دقیق زوایای فرمان مطابق با مسیر حرکتی مورد انتظار در حین پیچیدن، هندسه آکرمین موجب کاهش اصطکاک جانبی تایرها شده و امکان پیچیدن خودرو با حداقل ساییدگی را فراهم می‌کند. همچنین با پیکربندی صحیح سیستم فرمان بر اساس این اصل، توزیع وزن بهتری بین تایرها ایجاد می‌گردد و فشار کمتری به سیستم فرمان وارد می‌شود.

زمانی که خودرو در پیچ قرار می‌گیرد، چرخ خارج پیچ باید دوران بیشتری نسبت به چرخ داخل پیچ داشته باشد. در صورتی که دیفرانسیل نتواند این اختلاف دور را ایجاد کند، پایداری خودرو از دست می‌رود و چرخ‌ها دچار لغزش می‌شوند. یکی از چالش‌های اساسی در سیستم‌های دیفرانسیل معمولی، پدیده توزیع نامتعادل گشتاور در شرایط نامساعد جاده‌ای می‌باشد. مطابق شکل ۱ هنگامی که یکی از چرخ‌ها بر روی سطح لغزنده و کم اصطکاک قرار بگیرد، این چرخ با سرعت زیاد چرخش نموده و تمام نیرو صرف چرخش این چرخ شده و چرخ مقابل هیچ نیروی محرکه‌ای دریافت نمی‌کند [۶]. در چنین شرایطی، خودرو معمولاً قادر به حرکت نبوده و برای انتقال صحیح قدرت به مکانیزمی نیاز است که بتواند سرعت چرخ دارای لغزش را کاهش دهد به‌نحوی که کندتر شود و نیرو را به چرخ دارای اصطکاک کافی منتقل نماید. از آنجاکه افزایش اصطکاک بین چرخ و سطح لغزنده عملاً دشوار است، در برخی از خودروها از سیستم دیفرانسیل لغزش محدود<sup>۱</sup> (LSD) استفاده می‌شود که به‌طور مؤثری مشکل لغزش چرخ‌ها را کنترل می‌نماید.



شکل ۱ قرار گرفتن چرخ‌ها بر روی سطوح مختلف اصطکاکی

<sup>۱</sup> Limited Slip Differential

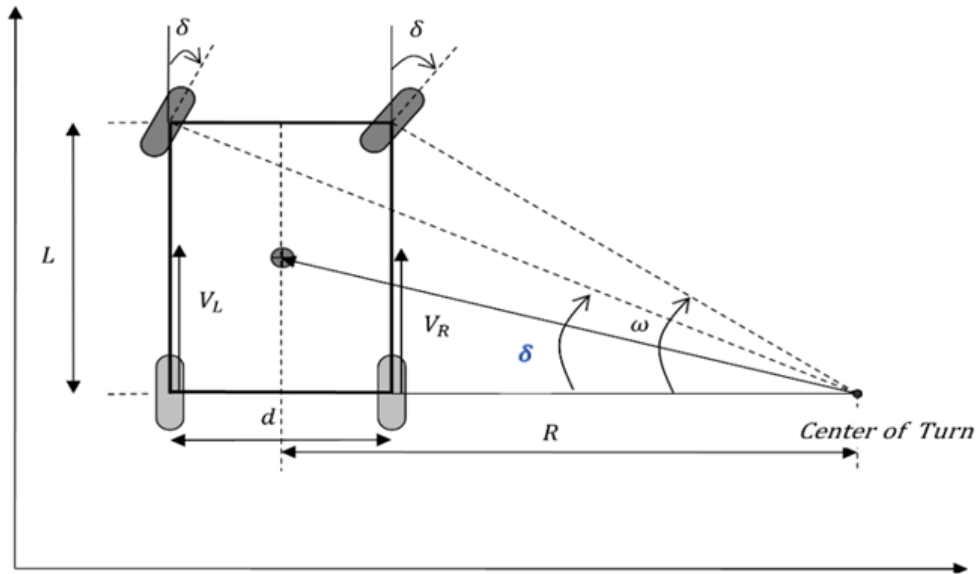
محققان متعددی به بررسی سیستم‌های دیفرانسیل و دیفرانسیل لغزش محدود پرداخته‌اند که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. کامگار و همکاران [۷] یک سیستم کنترل خودکار راه‌انداز قفل دیفرانسیل تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ را ساخته و مورد ارزیابی قرار دادند. این سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که می‌تواند به‌صورت خودکار و بدون نیاز به دخالت راننده، مکانیزم قفل دیفرانسیل را در شرایط مختلف کاری کنترل نموده و ایمنی لازم را تأمین نماید. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده مداوم از چنین سیستم کنترلی برای کاهش مصرف انرژی، افزایش بازدهی و بهبود ظرفیت مزرعه‌ای تراکتور ضروری است. رستمی و همکاران [۸] تأثیر قفل دیفرانسیل بر میزان لغزش چرخ‌های محرک و مصرف سوخت تراکتور را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از قفل دیفرانسیل در حین عملیات شخم با گاوآهن برگرداندار در تمامی تراکتورها منجر به کاهش مصرف سوخت و زمان انجام عملیات می‌گردد. همچنین این سیستم موجب کاهش ۱۵/۵۷ درصدی لغزش چرخ محرک راست و ۲۵/۶۴ درصدی لغزش چرخ محرک چپ شده است. روسو و همکاران [۹] در پژوهش خود به ارائه یک نوآوری مهم در زمینه دیفرانسیل‌های لغزش محدود با استفاده از فناوری سیالات مغناطیسی پرداختند. در این مطالعه، ابتدا نمونه اولیه سیستم به کمک نرم‌افزارهای طراحی مدل‌سازی گردید و سپس نمونه فیزیکی آن ساخته شد. طراحی این سیستم به‌گونه‌ای بود که در مواقع مورد نیاز می‌توانست فعال شود و با بهره‌گیری از خواص سیال مغناطیسی، گشتاور اصلاحی ایجاد کند. نتایج حاکی از آن بود که این فناوری نوین قادر است پایداری خودرو را در شرایط مختلف مانوردهی به‌طور چشمگیری بهبود بخشد. به‌ویژه، سیستم طراحی‌شده توانست در موقعیت‌های بحرانی که نیاز به توزیع سریع و دقیق گشتاور بین چرخ‌ها وجود داشت، عملکرد مطلوبی از خود نشان دهد. در پژوهش شیائولونگ و گویچن [۱۰]، یک دیفرانسیل لغزش محدود مرکزی مبتنی بر چرخ‌دنده‌های صفحه‌ای طراحی و تأثیر آن بر عملکرد خودرو مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه با ایجاد یک مدل دینامیکی خودرو با هفت درجه آزادی، عملکرد سیستم را در چهار سناریوی مختلف شامل: شتاب‌گیری، حرکت در سربالایی، نوسانات سینوسی شاسی و مانور تغییر خط دوگانه، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی تحلیل نمود. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر، چهار گروه از خودروهای چهارچرخ محرک با سرعت‌های مختلف دیفرانسیل مرکزی به‌عنوان گروه کنترل در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که سیستم دیفرانسیل لغزش محدود طراحی‌شده می‌تواند به‌صورت مؤثری موجب بهبود عملکرد دینامیکی خودرو و افزایش قابلیت رهایی از شرایط بحرانی گردد. اشنایدر و همکاران [۱۱] به بررسی حالت‌های خرابی و اثرات عملکرد کلاچ‌های تر در دیفرانسیل‌های لغزش محدود خودروهای سواری پرداختند. در پژوهش آن‌ها، سه نوع کلاچ چندصفحه‌ای تر با لایه‌های اصطکاکی ارگانیک مختلف شامل نوع کاغذی، کامپوزیت کربنی و کربن بافته‌شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. محققان با انجام آزمایش‌های دقیق، رفتار اصطکاکی و دمایی این کلاچ‌ها را تحت شرایط بار بالا مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که پایش همزمان پارامترهای دمایی می‌تواند معیارهای قابل اعتمادی برای پیش‌بینی رفتارهای آسیب‌زا و تخریب زودرس در این کلاچ‌ها ارائه نماید.

پژوهش حاضر به ارائه و ارزیابی یک سیستم کنترل لغزش نوین برای دیفرانسیل‌های خودرو پرداخته است. سیستم پیشنهادی با استفاده از برنامه‌نویسی انجام پذیرفته، هنگامی که اختلاف سرعت چرخ‌ها از ۳۵ درصد بیشتر شود، به‌صورت خودکار مکانیزم ترمز را فعال می‌کند. برخلاف روش‌های مرسوم که نیازمند تغییرات ساختاری پیچیده در داخل دیفرانسیل هستند، این راهکار با کنترل خارجی لغزش از طریق سیستم ترمز، بدون نیاز به تغییر در ساختار داخلی دیفرانسیل عمل می‌کند. این فناوری با کاهش هزینه‌های تولید و نگهداری، قابلیت نصب روی انواع پلتفرم‌های موجود را دارا می‌باشد و بهبود ایمنی و کارایی خودرو در شرایط جاده‌ای مختلف را در پی دارد و گامی مهم در توسعه سیستم‌های انتقال قدرت هوشمند و مقرون‌به‌صرفه محسوب می‌شود. یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای محققان و تولیدکنندگان خودرو در بهینه‌سازی طراحی دیفرانسیل‌ها بسیار ارزشمند باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تحلیل سینماتیکی سیستم فرمان بر اساس اصل آکرمن

شکل ۲ هندسه آکرمن را برای وسیله نقلیه در حال پیچیدن نشان می‌دهد [۱۲]. بر اساس این اصل، در حین پیچیدن، چرخ جلوی داخلی باید زاویه فرمان بزرگ‌تری نسبت به چرخ جلوی خارجی داشته باشد تا از لغزش عرضی تایرها که می‌تواند منجر به سایش نامتقارن آن‌ها و در نتیجه ناهمسانی تایرها که موجب افزایش هدررفت توان تولیدی موتور می‌شود [۱۳] جلوگیری نماید و مهم‌تر از آن پایداری خودرو در حین پیچیدن را تضمین کند.



شکل ۲ هندسه آکرمن یک وسیله نقلیه در حال پیچیدن

با استفاده از هندسه آکرمن، شعاع پیچ مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{L}{\tan(\delta)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\delta$  زاویه فرمان و  $L$  فاصله محور چرخ‌ها است. بنابراین سرعت خطی هر چرخ محرک از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید:

$$V_R = \left(R - \frac{d}{2}\right)\omega \quad (2)$$

$$V_L = \left(R + \frac{d}{2}\right)\omega \quad (3)$$

و سرعت زاویه‌ای توسط روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌گردد:

$$\omega_R = \frac{L - \left(\frac{d}{2}\right)\tan(\delta)}{L} \omega \quad (4)$$

$$\omega_L = \frac{L + \left(\frac{d}{2}\right)\tan(\delta)}{L} \omega \quad (5)$$

که در آن مقدار  $\omega$  سرعت زاویه‌ای وسیله نقلیه حول مرکز پیچ است. اختلاف سرعت زاویه‌ای چرخ داخل و خارج پیچ از رابطه ۶ حاصل می‌شود که نشان‌دهنده تفاوت سرعت چرخش چرخ‌ها در حین پیچیدن است:

$$\Delta\omega = \omega_L - \omega_R = \frac{-d\omega\tan(\delta)}{L} \quad (6)$$

می‌توان با بررسی پارامتر  $d$  در مورد جهت چرخش فرمان نظر داد، به طوری که مقادیر  $d > 0$  نشان‌دهنده پیچش به راست، مقادیر  $d < 0$  نشان‌دهنده پیچش به چپ و مقدار  $d = 0$  نشان‌دهنده حرکت مستقیم وسیله نقلیه است؛ بنابراین سرعت زاویه‌ای چرخ داخل و خارج پیچ از روابط ۷ و ۸ به دست می‌آید:

$$\omega_L = \omega + \frac{\Delta\omega}{2} \quad (7)$$

$$\omega_R = \omega - \frac{\Delta\omega}{2} \quad (8)$$

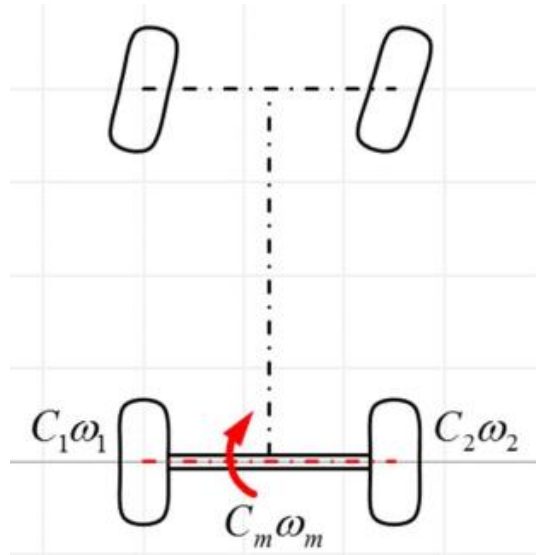
تحلیل سینماتیکی ارائه‌شده بر مبنای اصل آکرمن، ابزاری ضروری برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های فرمان مدرن محسوب می‌شود. این روابط دقیق با مدل‌سازی رفتار دینامیکی خودرو در حین پیچیدن، امکان محاسبه پارامترهای کلیدی مانند شعاع پیچ، سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها و اختلاف سرعت بین آن‌ها را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها می‌تواند عملکرد خودرو را در شرایط مختلف رانندگی بهبود بخشد و ایمنی و پایداری آن را افزایش دهد.

## ۲-۲- رفتار دیفرانسیل قفل شده

در حالت عدم وجود دیفرانسیل یا قفل شدن دنده‌های هرزگرد، هر دو چرخ محرک ملزم به چرخش با سرعت زاویه‌ای یکسان مطابق رابطه ۹ هستند. این موضوع در شکل ۳ نمایش داده شده است [۱۴]. در این شرایط، توان ورودی برابر با توان خروجی است.

$$\omega_m = \omega_1 = \omega_2 \Rightarrow C_m = C_1 + C_2 \quad (9)$$

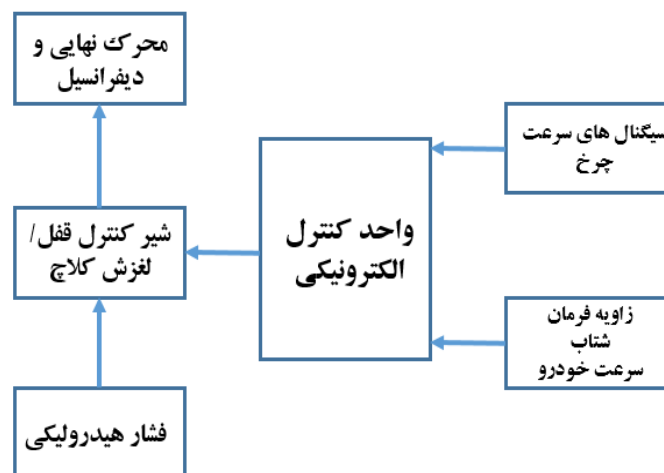
در این رابطه  $\omega$  سرعت زاویه‌ای و  $C$  کوپل پیچشی می‌باشد.



شکل ۳ حالت قفل شدن دنده‌های هرزگرد دیفرانسیل

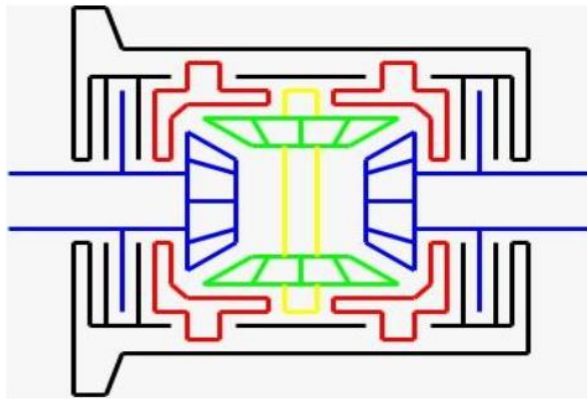
## ۲-۳- ایده اولیه طراحی

مبنای طراحی دستگاه ارائه شده در این پژوهش، الهام گرفته از دیفرانسیل لغزش محدود الکترونیکی می‌باشد که ارتباط بین اجزای مختلف آن در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. دیفرانسیل‌های لغزش محدود معمولی به دلیل ایجاد اثرات نامطلوب بر رفتار دینامیکی خودرو مخصوصاً در حین پیچیدن، نمی‌توانند عملکرد بهینه داشته باشند. به‌ویژه در خودروهای مجهز به دیفرانسیل جلو، این اثرات نامطلوب می‌تواند موجب اختلال در عملکرد سیستم فرمان نیز گردد. همین محدودیت‌های عملکردی سبب ظهور دیفرانسیل لغزش محدود الکترونیکی شد.



شکل ۴ ارتباط اجزا در دیفرانسیل لغزش محدود الکترونیکی

در این مدل دیفرانسیل، عمل محدود کردن لغزش به وسیله مجموعه کلاچ‌های چندصفحه‌ای کنترل می‌شود که بین کرانویل و هوزینگ دیفرانسیل قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود این کلاچ‌ها قابلیت قفل کامل محور محرک را در شرایط مورد نیاز دارا می‌باشند [۱۵]. کنترل فشار اعمالی بر صفحات کلاچ، به صورت هیدرولیکی و توسط یک شیر برقی انجام می‌شود که خود تحت فرمان واحد کنترل الکترونیکی عمل می‌نماید. داده‌های مورد نیاز این سیستم توسط سنسورهای سرعت چرخ که مورد استفاده در سیستم ترمز ABS هستند جمع‌آوری و به واحد کنترل الکترونیکی ارسال می‌گردد.



شکل ۵ دیفرانسیل لغزش محدود با استفاده از مجموعه کلاچ‌های چندصفحه‌ای

ظرفیت انتقال گشتاور مجموعه‌های کلاچ مورد استفاده در این دیفرانسیل را می‌توان از معادله ۱۰ به دست آورد [۱۵]:

$$\Delta T = F \times \frac{2}{3} \times \left( \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \times n \times \mu_c = \frac{2}{3} \times \left( \frac{C_m}{r_{ramp}} \cot \sigma \right) \times \left( \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \right) \times n \times \mu_c \quad (10)$$

که در آن  $\Delta T$  اختلاف گشتاور،  $C_m$  گشتاور ورودی دیفرانسیل و  $\sigma$  زاویه رمپ است.

## ۲-۴- ساخت نمونه فیزیکی دستگاه

مرحله ساخت مدل آزمایشگاهی دیفرانسیل لغزش محدود مبتنی بر مکانیزم ترمز، با ترسیم طرح اولیه در نرم‌افزار سالیدورکس آغاز شد. پایه اصلی دستگاه شامل یک میز کار با ابعاد ۵۵۵ میلی‌متر طول، ۴۳۳ میلی‌متر عرض و ۵۵۵ میلی‌متر ارتفاع جهت نصب تجهیزات اصلی بر روی آن طراحی گردید و سپس قطعاتی همچون دیفرانسیل، الکتروموتور، سیستم ترمز، مدول هیدرولیک و ... تهیه شد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای جلوگیری از برخورد هوزینگ به سطح میز از پایه‌های فاصله‌انداز و جهت مهار کردن اکسل از کرپی‌های U شکل استفاده شده است.



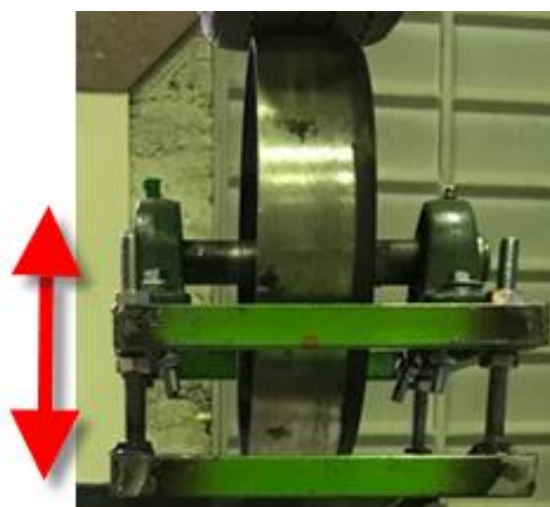
شکل ۶ محل نصب پایه‌های فاصله‌انداز و کرپی‌های U شکل

برای به حرکت در آوردن پینیون دیفرانسیل از یک الکتروموتور موتوژن با توان ۴ کیلووات و سرعت نامی ۱۴۲۰ دور بر دقیقه استفاده گردید. کنترل سرعت موتور به کمک یک اینورتر انجام پذیرفت. پس از نصب چرخ‌ها بر روی اکسل، به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی رانندگی و ایجاد اختلاف سرعت بین چرخ‌ها، سیستم ویژه‌ای طراحی شد که امکان تغییر ضریب اصطکاک بین چرخ‌ها و سطح نشیمنگاه آن‌ها را فراهم می‌ساخت. این سیستم با ایجاد اختلاف دور بین چرخ‌ها، شرایط لازم برای فعال‌سازی مکانیزم کنترل در هنگام عبور از آستانه تعیین‌شده (۳۵ درصد اختلاف سرعت) را مهیا می‌نمود. برای دستیابی به ضرایب اصطکاک متغیر، از دو عدد کاسه ترمز استفاده شد که لبه بیرونی آن‌ها همانند قسمت ۱ شکل ۷ تراشکاری گردید و سپس یک درپوش فلزی مطابق قسمت ۲ شکل ۷ برای آن برش داده شد و جوشکاری انجام شد و در نهایت محل بلبرینگ برای آن طراحی گردید و مطابق قسمت ۳ شکل ۷ بر روی یک شفت سوار شد.



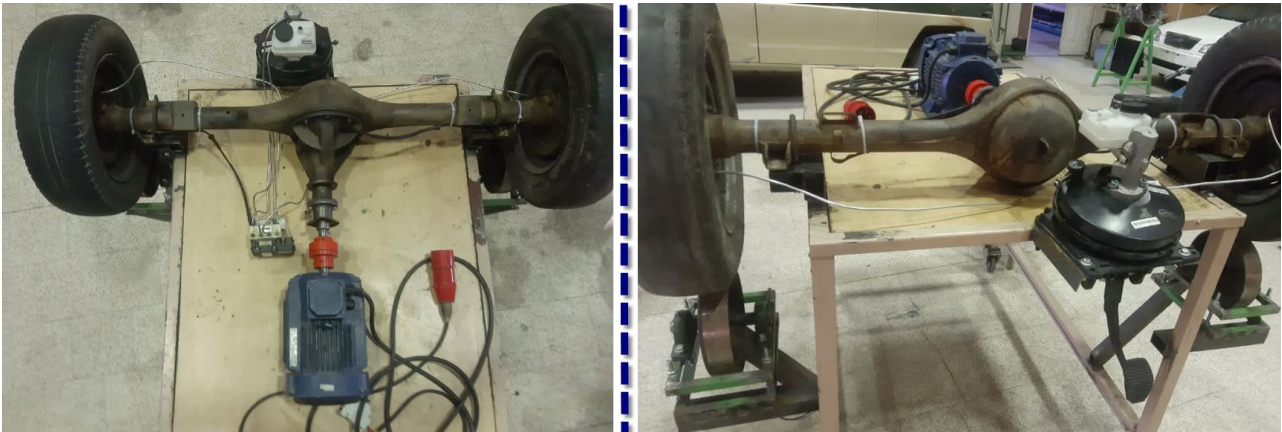
شکل ۷ غلتک طراحی شده به عنوان نشیمنگاه چرخ (زمین)

حال برای اینکه بتوان نشیمنگاه را جابجا نمود (به سمت پایین یا بالا) و به تبع آن اصطکاک را کم یا زیاد کرد، دو عدد چهارچوب به صورت شکل ۸ طراحی و با پروفیل ساخته شد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، این چهارچوب‌ها با استفاده از پیچ و مهره به یکدیگر متصل شده‌اند و فاصله آن‌ها می‌تواند به یکدیگر نزدیک و یا دور شود. این طراحی به محققان اجازه می‌داد تا با تغییر موقعیت غلتک‌ها، شرایط مختلف اصطکاکی را شبیه‌سازی نمایند و عملکرد سیستم را در حالت‌های مختلف ارزیابی کنند.



شکل ۸ امکان حرکت به سمت بالا و پایین غلتک توسط سیستم پیچ و مهره

نهایتاً، این مجموعه مطابق شکل ۹ به همراه کلیه تجهیزات مرتبط بر روی شاسی اصلی نصب و راه‌اندازی شد.



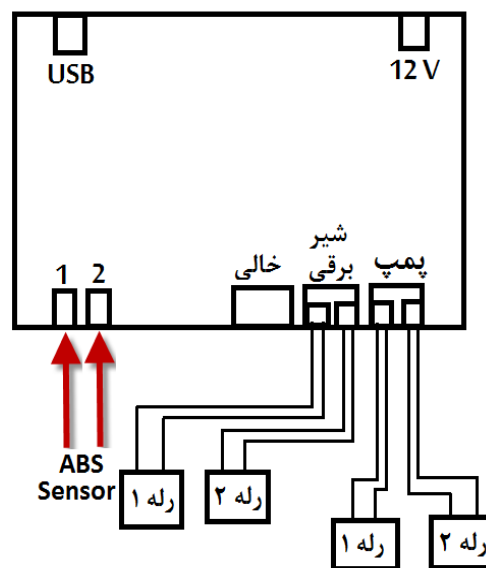
شکل ۹ مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده

## ۲-۵- طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل الکترونیکی

یک برد الکترونیکی برای تشخیص و کنترل اختلاف دور چرخ‌ها طراحی و پیاده‌سازی شد. این برد که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، به سنسورهای سرعت چرخ متصل می‌شود و به‌صورت پیوسته سرعت دورانی هر چرخ را پایش می‌کند. زمانی که سیستم تشخیص دهد اختلاف سرعت بین چرخ‌ها از آستانه ۳۵ درصد فراتر رفته است، به‌صورت خودکار مکانیزم کنترل لغزش را فعال می‌نماید. در این حالت، شیر برقی مربوط به چرخ‌هایی که با سرعت بیشتری در حال چرخش است (چرخ دارای اصطکاک کمتر) به مدت ۴۰۰ میلی‌ثانیه فعال شده و روغن تحت فشار را به سمت چرخ مورد نظر هدایت می‌کند. این عمل در واقع یک نیش ترمز کنترل شده به چرخ در حال بکسوات وارد می‌نماید. سیستم به‌صورت دوره‌ای این فرایند را تکرار می‌کند تا زمانی که اختلاف سرعت چرخ‌ها به زیر ۳۵ درصد کاهش یابد. این سیستم کنترل هوشمند با واکنش سریع خود، نقش مهمی در حفظ پایداری خودرو در شرایط مختلف رانندگی ایفا می‌کند. اهمیت الگوریتم‌های کنترلی در چنین سیستم‌هایی، مشابه آنچه نصیری و همکاران [۱۶] در مورد سیستم ترمز ضدقفل نشان دادند، به‌وضوح در عملکرد مطلوب سیستم تأیید می‌شود.



(ب)

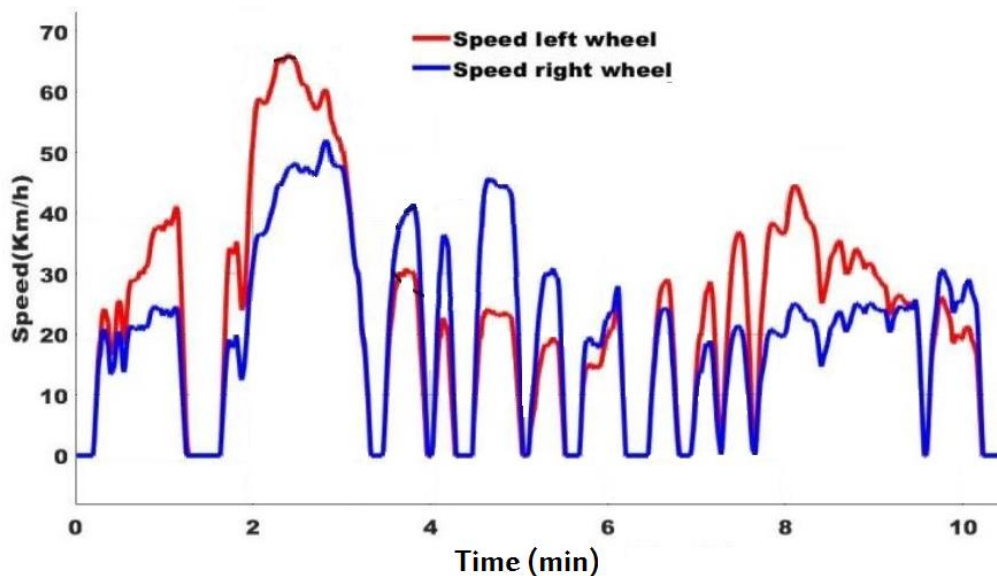


(الف)

شکل ۱۰ شماتیک برد طراحی شده، (ب) برد الکترونیکی ساخته‌شده

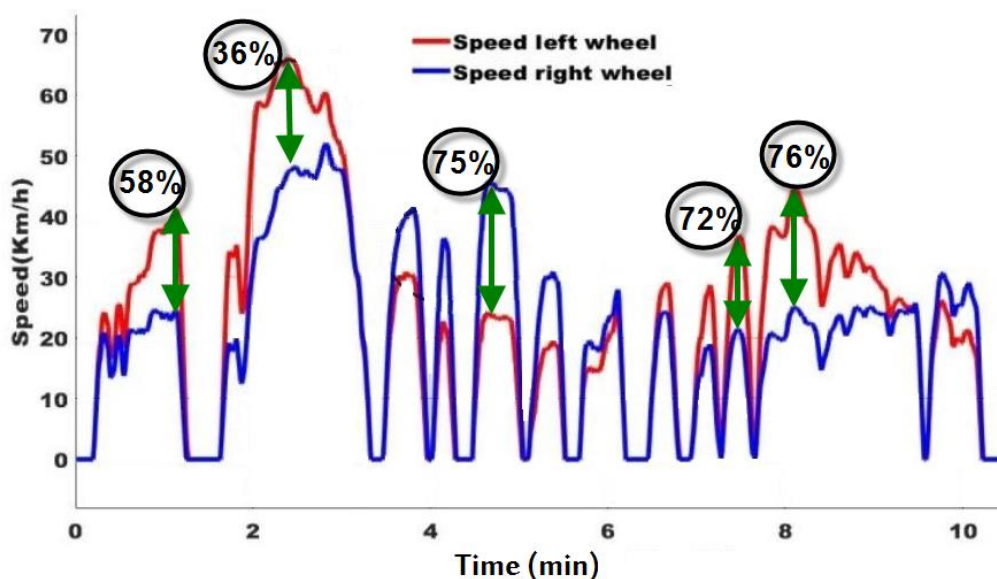
## ۳- نتایج و بحث

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در حین چرخش به راست، سرعت چرخ چپ از چرخ راست بیشتر می‌شود، درحالی‌که در چرخش به چپ، چرخ راست سرعت بالاتری نسبت به چرخ چپ نشان می‌دهد و در حرکت مستقیم نیز سرعت هر دو چرخ با یکدیگر برابر است [۱۷، ۱۸]. برای بررسی این پدیده، با ایجاد اصطکاک کنترل‌شده در محل تماس چرخ‌ها با سطح نشیمنگاه، سرعت چرخ موردنظر کاهش داده شد و تغییرات سرعت هر دو چرخ در شرایط مختلف اندازه‌گیری و مطابق شکل ۱۱ ترسیم گردید.

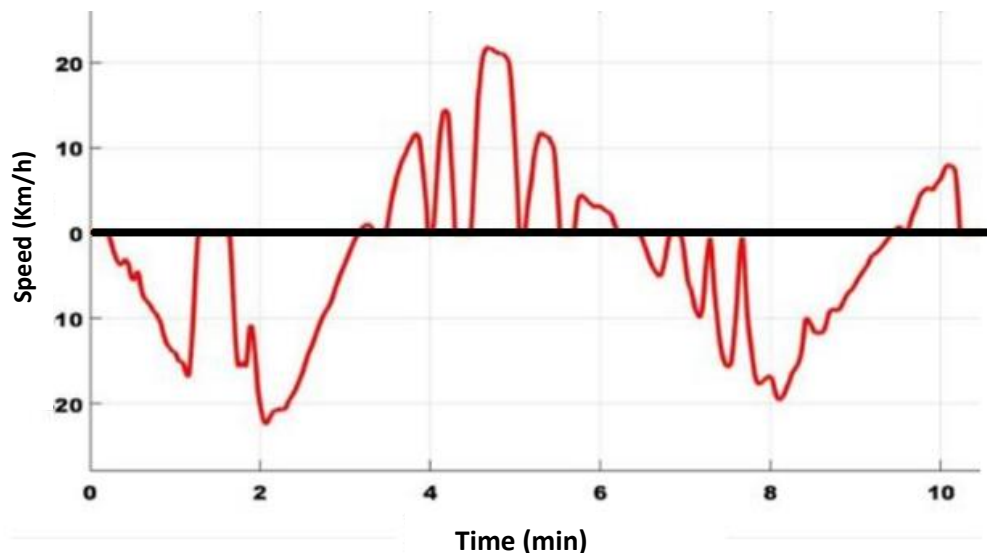


شکل ۱۱ نمودار مقایسه‌ای سرعت چرخ سمت چپ و راست

در شکل ۱۲، درصد اختلاف سرعت ایجادشده در پنج ناحیه مختلف مشخص شده است. برای ساده‌سازی تحلیل داده‌ها، می‌توان تنها مقدار اختلاف سرعت را در یک نمودار مجزا همانند شکل ۱۳ ترسیم نمود. در این نمودار، مقادیر زیر خط صفر نشان‌دهنده سرعت بیشتر چرخ چپ و مقادیر بالای خط صفر بیانگر سرعت بالاتر چرخ راست می‌باشد.



شکل ۱۲ درصد اختلاف سرعت ایجادشده در نواحی مختلف



شکل ۱۳ نمودار اختلاف سرعت چرخ سمت چپ و راست

به منظور ارزیابی دقت سیستم، آزمایش‌ها در ۱۰ تکرار انجام پذیرفت که نتایج حاکی از دقت ۹۷ درصدی سیستم طراحی شده بود. یکی از منابع احتمالی خطا در این محدوده دقتی، عدم دقت سنسورهای سرعت چرخ می‌باشد. عملکرد این سیستم به شدت وابسته به داده‌های دریافتی از سنسورهاست و هرگونه خطا در قرائت سنسورها (ناشی از نویز، تأخیر یا مشکلات کالیبراسیون) می‌تواند منجر به انحراف در عملکرد سیستم گردد. به‌عنوان مثال، در کاربردهای عملی بر روی خودرو، حتی یک خطای کوچک در سنسورها ممکن است موجب توزیع نادرست گشتاور و یا حتی ناپایداری خودرو در طول پیچ‌های تند شود. برای کاهش این امر، استفاده از سنسورهای با دقت بالا و به‌کارگیری الگوریتم‌های فیلتراسیون پیشرفته برای کاهش اثر نویز پیشنهاد می‌گردد. این راهکارها می‌توانند دقت سیستم را در شرایط عملیاتی مختلف افزایش دهند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به طراحی و ارزیابی یک سیستم دیفرانسیل لغزش محدود (LSD) مبتنی بر مکانیزم ترمز پرداخته است که نمونه اولیه آن بر روی میز آزمایشگاهی ساخته و نصب شد. سیستم طراحی شده با استفاده از یک مکانیزم خاص که اختلاف اصطکاک بین چرخ‌ها و محل نشیمنگاه آن‌ها را ایجاد می‌کند، قادر است با پایش لحظه‌ای سرعت چرخ‌ها، هنگامی که اختلاف سرعت از آستانه ۳۵ درصد فراتر می‌رود، به‌صورت خودکار شیر برقی مربوط به چرخ با سرعت بالاتر را فعال نماید. این سیستم با اعمال پالس‌های ۴۰۰ میلی‌ثانیه‌ای از روغن تحت فشار برای ایجاد اثر ترمز استفاده کرده و این فرایند را تا زمانی که اختلاف سرعت به زیر ۳۵ درصد کاهش یابد، تکرار می‌نماید. نتایج حاصل از ۱۰ بار تکرار آزمایش نشان داد که سیستم پیشنهادی با دقت قابل توجه ۹۷ درصد عمل می‌نماید که بیانگر کارایی بالای سیستم در تشخیص و کنترل لغزش چرخ‌هاست. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که این دیفرانسیل لغزش محدود به‌طور مؤثری می‌تواند کشش خودرو را در شرایط مختلف جاده‌ای بهبود بخشد، پایداری دینامیکی را در حین شتاب‌گیری و پیچیدن افزایش دهد و از هرزگردی چرخ‌ها جلوگیری نماید. با توجه به عملکرد برتر این سیستم در حفظ کنترل خودرو، می‌توان آن را به‌عنوان یک گزینه مطلوب در طراحی سیستم‌های انتقال قدرت به‌ویژه در خودروهای اسپرت و آفرود مطرح نمود، هرچند برای دستیابی به عملکرد بهینه در شرایط عملی، استفاده از سنسورهای با دقت بالاتر و بهینه‌سازی الگوریتم‌های کنترلی پیشنهاد می‌شود. این پژوهش گامی مهم در جهت توسعه سیستم‌های انتقال قدرت هوشمند محسوب می‌شود که می‌تواند زمینه‌ساز تحقیقات آینده در این حوزه باشد.

#### References

[1] Trzesniowski M. Powertrain. Springer Vieweg; 2023 Mar 2. doi: 10.1007/978-3-658-39885-9

- [2] Rahmatinejad B, Abbasgholipour M, Mohammadi Alasti B. Redesign of engine radiator based on number of optimal fans using a genetic algorithm. *Karafan Quarterly Scientific Journal*. 2021 Jan 1;17(4):99-118. doi: [10.48301/KSSA.2021.128398](https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.128398) [In Persian]
- [3] Taghandiki K, Dallakehnejad M, Rahimi Asiabaraki H. Reducing Air Pressure System Repair Costs in Scania Trucks through Deep Learning. *Journal of Engineering and Applied Research*. 2024 May 7;1(1):183-96. doi: [10.48301/JEAR.2024.447671.1022](https://doi.org/10.48301/JEAR.2024.447671.1022)
- [4] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F. Diagnosing Dimensional Defects and Valve Cracks Using Machine Vision and Acoustic Emission. *Karafan Journal*. 2023 Nov 22;20(3):149-68. doi: [10.48301/KSSA.2023.391572.2501](https://doi.org/10.48301/KSSA.2023.391572.2501) [In Persian]
- [5] Hilton C. Wheel torque and speed in a vehicle with in-wheel motors. *Protean Electric*; 2016 May.
- [6] Radut AM, Shafaei S. A Regression-based Control Approach for Limited Slip Differential [Technical Report]. Munich: Technische Universität München (TUM); 2017.
- [7] Kamgar S, Loghavi M, Rezaei A, Jalili M. DESIGN, DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A DIFFERENTIAL LOCK CONTROL SYSTEM FOR MF-399 TRACTOR. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*. 2016 Oct 22;47(3):451-9. doi: [10.22059/IJBSE.2016.59351](https://doi.org/10.22059/IJBSE.2016.59351) [In Persian]
- [8] Rostami S, Aghababaei E, Besharati S, Hosseinzadeh B. Effect of differential lock on driving wheels slip and fuel consumption of tractor during operation of moldboard plow. *Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery*. 2016 Sep 22;5(2). [In Persian]
- [9] Russo R, Strano S, Terzo M. Enhancement of vehicle dynamics via an innovative magnetorheological fluid limited slip differential. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016 Mar 1;70:1193-208. doi: [10.1016/j.ymssp.2015.09.029](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.09.029)
- [10] Xianlong P, Guichen W. Design and research of face gear central limited slip differential and analysis of its influence on vehicle performance. *Vehicle System Dynamics*. 2024 Sep 11:1-23. doi: [10.1080/00423114.2024.2401009](https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2401009)
- [11] Schneider T, Voelkel K, Pflaum H, Stahl K. Investigating Failure Modes and Performance Impacts of Wet Clutches in Automotive Limited Slip Differentials. *Lubricants*. 2024 Feb 23;12(3):70. doi: [10.3390/lubricants12030070](https://doi.org/10.3390/lubricants12030070)
- [12] Moumni R, Laroussi K, Benlaloui I, Mahmoud MM, Elnaggar MF. Optimizing Single-Inverter Electric Differential System for Electric Vehicle Propulsion Applications. *International Journal of Robotics & Control Systems*. 2024 Oct 1;4(4). doi: [10.31763/ijrcs.v4i4.1542](https://doi.org/10.31763/ijrcs.v4i4.1542)
- [13] Nasiri S, Rahimi Asiabaraki H. The effect of tire non-uniformity on engine power loss. *Karafan Journal*. 2021 Sep 23;18(3):307-23. doi: [10.48301/KSSA.2021.298358.1654](https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.298358.1654) [In Persian]
- [14] Gadola M, Chindamo D, Lenzo B. Revisiting the mechanical limited-slip differential for high-performance and race car applications. *Engineering Letters*. 2021;29(3):824-39.
- [15] Jagtap M, Roy S, Bhosale Y, Dayane S. Design methodology of a custom limited slip differential for an FSAE vehicle. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021 Apr;8(4).
- [16] Nasiri S, Rahimi Asiabaraki H, Arefiyan M. Designing and Comparing the Performance of Rule-Based and Sliding Mode Controllers of Automotive Hydraulic Anti-Lock Braking System. *Karafan Journal*. 2022 Nov 22;19(3):115-40. doi: [10.48301/KSSA.2022.350886.2197](https://doi.org/10.48301/KSSA.2022.350886.2197) [In Persian]
- [17] Yadlapalli RT, Kotapati A, Kandipati R, Koritala CS. A review on energy efficient technologies for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*. 2022 Jun 1;50:104212. doi: [10.1016/j.est.2022.104212](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104212)
- [18] Yildiz A, Özel MA. A comparative study of energy consumption and recovery of autonomous fuel-cell hydrogen-electric vehicles using different powertrains based on regenerative braking and electronic stability control system. *Applied Sciences*. 2021 Mar 11;11(6):2515. doi: [10.3390/app11062515](https://doi.org/10.3390/app11062515)