



Islamic Azad University , Shiraz Branch

نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis

sanad.iau.ir/journal/jcdsa



Fuzzy Logic-Based Controller Design for Enhancing Anti-lock Braking System Performance

Amir Moghtadaei rad¹*

¹ Department of Computer and Electrical Engineering, Has.c., Islamic Azad University, Hashtgerd, Iran
Amir.Moghtadaei@iau.ac.ir

Abstract: This paper presents the design of a fuzzy controller for vehicles' Anti-lock Braking System (ABS), aiming to prevent wheel lockup during braking and enhance vehicle control under critical conditions. Wheel lockup can lead to an increased stopping distance and a loss of vehicle control, particularly on slippery road surfaces. The ABS accurately controls the hydraulic pressure within the braking system to maintain the longitudinal slip between the tire and the road surface within an allowable range. In this study, an optimal fuzzy controller is designed to achieve desirable performance in the ABS. The proposed controller can effectively prevent wheel lockup by adjusting the braking force on the front and rear wheels while improving braking performance under various road conditions. This research focuses on utilizing a fuzzy control system to enable rapid adaptation to different road conditions and mitigate the negative effects caused by wheel slips. Simulation results demonstrate that the proposed system can deliver superior performance compared to conventional braking systems. By improving the design of the ABS, this study contributes significantly to enhancing vehicle safety and reducing road accidents.

Keywords: Anti-lock braking system (ABS), fuzzy controller, Hydraulic Control Unit, Electronic Control Unit.

JCDSA, Vol. 3, No. 1, Spring 2025

Received: 2025-02-02

Online ISSN: 2981-1295

Accepted: 2025-03-19

Journal Homepage: <https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa>

Published: 2025-06-21

CITATION

Moghtadaei rad, A., "Fuzzy Logic-Based Controller Design for Enhancing Anti-lock Braking System Performance ", Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 3, No. 1, pp. 1-12, 2025.

DOI: 10.82526/JCDSA.2025.1198389

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

* Corresponding author

Extended Abstract

1- Introduction

Anti-lock braking systems (ABS) are critical for vehicle safety, preventing wheel lockup during sudden braking and enhancing steering control, especially on slippery roads. The design of a robust control system for ABS can significantly improve braking performance and vehicle stability. Sudden braking and wheel locking are among the most critical dangers that threaten vehicles and passengers. Wheel locking increases braking distance and reduces steering control, particularly on wet and slippery surfaces where the risk of wheel locking is higher. Therefore, a system that can control wheel brakes and prevent slippage is essential. This paper focuses on designing a fuzzy logic controller for controlling the opening and closing of electric valves to generate braking force on all four wheels of the vehicle. The motivation behind this study is to enhance road safety and reduce the likelihood of accidents caused by uncontrolled wheel slip.

2- Methodology

The proposed study utilizes a fuzzy logic controller to manage the hydraulic pressure in the braking system. The control strategy involves monitoring wheel speed sensors and estimating longitudinal slip to adjust the braking force accordingly. The fuzzy controller is designed with four main components: fuzzification, fuzzy inference engine, rule base, and defuzzification. The methodology includes the development of a simulation model using MATLAB/Simulink to evaluate the performance of the proposed control system under various road conditions. The model incorporates vehicle dynamics, hydraulic brake modeling, and sensor data processing to ensure accurate control of wheel slip. Additionally, real-world scenarios such as sudden braking on wet and icy roads were simulated to assess the system's robustness and adaptability.

3- Results and discussion

Simulation results indicate that the fuzzy logic controller effectively maintains the longitudinal slip within an optimal range, preventing wheel lockup while maximizing braking efficiency. Compared to conventional ABS systems, the proposed controller offers improved stability and shorter braking distances, especially on slippery roads. The performance evaluation under different braking scenarios demonstrates the adaptability of the controller to varying road conditions. The proposed system shows robustness against parameter variations and external disturbances, proving its applicability in real-world driving conditions. The comparative analysis with traditional control methods highlights the advantages of using a fuzzy logic approach, particularly in complex and unpredictable environments

4- Conclusion

The fuzzy logic-based ABS controller designed in this study offers a significant improvement in vehicle safety by preventing wheel lockup and enhancing braking performance. The simulation results confirm that the proposed system can adapt to diverse road conditions and provide reliable control of wheel slip. Future work could involve the implementation of the controller in a real-time embedded system and testing it on a physical vehicle to validate simulation results. Furthermore, exploring hybrid control strategies that combine fuzzy logic with machine learning techniques could further enhance the adaptability and efficiency of ABS systems.





طراحی کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی برای بهبود عملکرد سیستم ترمز ضد قفل

امیر مقتدایی راد^{*}

۱- گروه مهندسی برق و کامپیوتر، واحد هشتگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران (Amir.Moghtadaci@iau.ac.ir)

چکیده: این مقاله به طراحی یک کنترل کننده فازی برای سیستم ترمز ضد قفل خودرو پرداخته که هدف آن جلوگیری از قفل شدن چرخ‌ها در هنگام ترمز و بهبود کنترل خودرو در شرایط بحرانی است. قفل شدن چرخ‌ها می‌تواند منجر به افزایش فاصله توقف خودرو و از دست رفتن کنترل آن به‌ویژه در شرایط جاده‌ای لغزنده شود. سیستم ترمز ضد قفل با کنترل دقیق فشار هیدرولیک در سیستم ترمز، لغزش طولی ایجاد شده بین تایر و سطح جاده را در یک محدوده مجاز کنترل می‌کند. در این مقاله، با طراحی کنترل کننده فازی بهینه، هدف دستیابی به عملکرد مطلوب در سیستم ترمز ضد قفل است. این کنترل کننده با تنظیم نیروی ترمز بر روی چرخ‌های جلو و عقب خودرو، می‌تواند از قفل شدن چرخ‌ها جلوگیری کند و در عین حال عملکرد سیستم ترمز را در شرایط مختلف جاده‌ای بهبود بخشد. این تحقیق به استفاده از سیستم کنترل فازی جهت تطبیق سریع با شرایط مختلف جاده‌ای و کاهش اثرات منفی ناشی از لغزش طولی چرخ‌ها پرداخته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این سیستم می‌تواند عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم‌های ترمز معمولی ارائه دهد. این مقاله از طریق بهبود طراحی سیستم ترمز ضد قفل، نقش قابل توجهی در افزایش ایمنی خودروها و کاهش حوادث جاده‌ای ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیستم ترمز ضد قفل، کنترل کننده فازی، واحد کنترل هیدرولیک، واحد کنترل الکترونیک.

DOI: 10.82526/JCDSA.2025.1198389

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

در شرایط مختلف نمی‌باشد، از معیار دیگری با عنوان لغزش طولی برای این منظور استفاده می‌شود [۱-۳].

لغزش طولی عبارت است از اختلاف سرعت خطی تایر و خودرو در راستای طولی تقسیم بر سرعت تایر یا خودرو (هرکدام که بیشتر باشد). به این ترتیب لغزش طولی برای حالات شتاب گیری و ترمزگیری از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = (r\omega - V) / V < 0 \quad (1)$$

لغزش طولی هنگام شتاب‌گیری:

$$\lambda = (r\omega - V) / V > 0 \quad (2)$$

نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده تابع میزان لغزش طولی بین آنها می‌باشد (شکل ۲). در حالت کلی تغییرات مقدار مطلق نیروی اصطکاک طولی نسبت به تغییرات لغزش طولی شبیه به نمودار ۱ می‌باشد. مؤلفه عرضی نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده تابع لغزش طولی است و تغییرات آن با لغزش طولی بر روی جاده‌های مختلف با فرض ثابت بودن زاویه لغزش (زاویه راستای طولی تایر با راستای سرعت مطلق آن) در حالت کلی شبیه نمودار ۲ است:

۱- مقدمه

حرکت خودرو و پایداری آن بر روی جاده به‌طور کلی بستگی به نیروی اصطکاک به وجود آمده بین تایرها و سطح جاده دارد. با در نظر گرفتن یک سیستم مختصات که محورهای آن در راستای طول و عرض تایر هستند، می‌توان نیروی اصطکاک بین تایر و سطح جاده را به دو مؤلفه طولی و عرضی تجزیه نمود که مؤلفه طولی نیروی اصطکاک باعث ترمزگیری و شتاب خودرو شده و مؤلفه عرضی آن حرکات عرضی خودرو (دورزدن و حرکت به چپ و راست) را ایجاد می‌کند (شکل ۱). بسته به شرایط حرکت خودرو و جاده مقدار هرکدام از مؤلفه‌های نیروی اصطکاک می‌تواند از صفر تا مقدار حداکثر تغییر نماید. اختلاف سرعت بین تایر و سطح جاده (سرعت خودرو) در نقطه تماس باعث به وجود آمدن نیروی اصطکاک طولی برخلاف جهت سرعت نسبی بین آنها می‌شود. نیروی اصطکاک طولی عامل شتاب گیری و ترمزگیری خودرو است. هنگام ترمزگیری، سرعت تایر کمتر از سرعت خودرو یا جاده و در موقع شتاب گیری، بیشتر از آن است. از آنجا که اختلاف سرعت تایر و سرعت خودرو معیار خوبی برای تحلیل نیروی اصطکاک

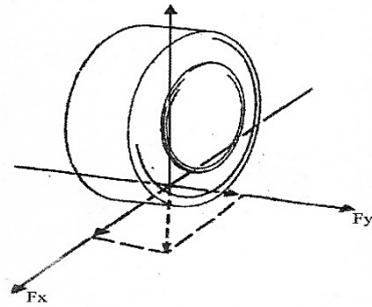


که بستگی به شرایط ترمزگیری و وضعیت هریک از چرخها دارد، کنترل نموده و با در نظر گرفتن اولویت پایداری خودرو بر روی جاده عملکرد سیستم ترمز را بهبود می بخشد [۴]. این مقاله شامل ۵ بخش است. بخش اول مقدمه‌ای بر دلیل استفاده از سیستم ترمز ضد قفل در خودرو است. بخش دوم به نحوه عملکرد سیستم ترمز ضد قفل و مدلسازی آن می پردازد. مدل سیستم ترمز خودرو با در نظر گرفتن نیروهای کشنده جلو و عقب و همچنین نیروهای نرمال وارد بر چرخها توسعه داده شده است. این مدل از دینامیک چرخها و قوانین فیزیکی مانند قانون دوم نیوتن و قوانین گشتاور بهره می برد. برای کنترل کننده فازی طراحی شده، دو کنترل کننده جداگانه برای چرخهای جلو و عقب خودرو در نظر گرفته شده اند. ورودی کنترل کننده فازی، خطای ردیابی لغزش مرجع است و خروجی آن گشتاور ترمزی مورد نیاز برای کنترل سیستم است. بخش سوم به شبیه سازی و تست مدل می پردازد. مدل سیستم ترمز ضد قفل در محیط Simulink نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است. پارامترهای فیزیکی و دینامیکی خودرو در جدول های مقاله ذکر شده اند و نتایج شبیه سازی شامل گشتاور ترمزی، لغزش چرخها و تغییرات سرعت خودرو ارائه شده اند. در بخش چهارم کنترل کننده فازی طراحی شده و جداول مربوط به قواعد فازی و ورودی ها و خروجی های سیستم کنترل فازی آورده شده است. در بخش پنجم تست و ارزیابی کنترل کننده فازی، صورت گرفته و عملکرد کنترل کننده فازی در ردیابی لغزش مرجع و جلوگیری از قفل شدن چرخها بررسی شده است. نتایج نشان داده اند که سیستم کنترل فازی توانسته است لغزش چرخها را در محدوده مجاز نگه دارد و عملکرد ترمز را بهبود بخشد. در نهایت در بخش نتیجه گیری، نتیجه و دستاوردهای این مقاله توضیح داده شده است.

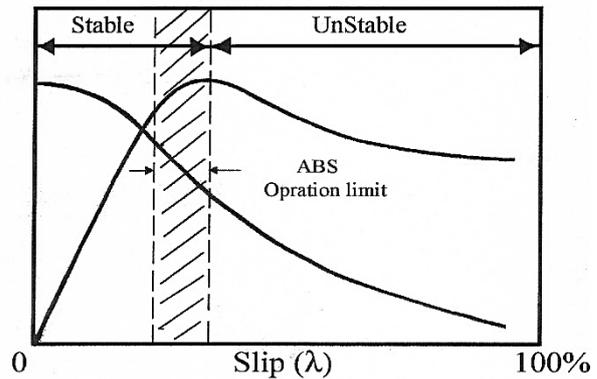
۲- ساختار و عملکرد سیستم ترمز ضد قفل:

در هنگام ترمزگیری با فشردن پدال ترمز، فشار هیدرولیکی ایجاد شده در سیلندر اصلی به وسیله سیال عامل که همان روغن است از طریق لوله های ترمز به مکانیزم های ترمزگیری بر روی چرخها منتقل می شود. با ورود سیال تحت فشار به این مکانیزمها لنتها یا کفشک های ترمز به سطوح دیسک یا کاسه چرخ فشرده شده و باعث کاهش سرعت دورانی چرخها می گردند. کاهش سرعت چرخها و به وجود آمدن لغزش در ناحیه تماس تایر با سطح جاده تولید نیروی اصطکاک در جهت خلاف حرکت نموده و باعث کاهش سرعت خودرو می گردد و اگر ترمزگیری ادامه یابد خودرو متوقف خواهد شد. یک سیستم ترمز ضد قفل معمولی از سه بخش اصلی زیر تشکیل شده است:

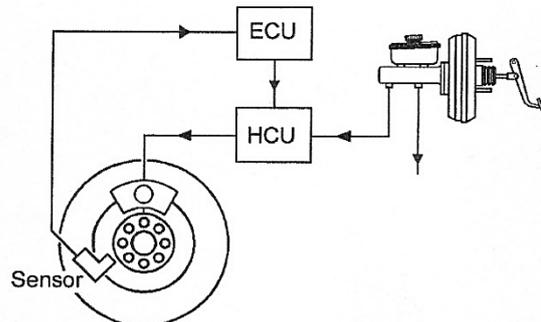
- واحد کنترل هیدرولیک
 - واحد کنترل الکترونیک
 - سنسورهای اندازه گیری سرعت دورانی چرخها.
- نمای کلی اجزای سیستم ترمز ضد قفل مطابق شکل (۳) است.



شکل (۱): تصویر شماتیک نیروهای وارد بر تایر [۱]



شکل (۲): نمایش شماتیک تغییرات مؤلفه طولی (نمودار ۱) و مؤلفه عرضی (نمودار ۲) نسبت به تغییرات لغزش طولی [۱]



شکل (۳): تصویر شماتیک ارتباط اجزا سیستم ترمز ضد قفل

باتوجه به نیروهای ارائه شده برای نیروهای اصطکاک طولی و عرضی، به طور کلی می توان گفت که افزایش لغزش طولی در ناحیه ناپایدار باعث کاهش نسبی مؤلفه طولی نیروی اصطکاک و افت شدید مؤلفه عرضی نیروی اصطکاک می گردد. به طوری که در لغزش طولی ۱۰۰٪ (حالت قفل شدگی کامل چرخ) نیروی اصطکاک عرضی تقریباً صفر می شود که در چنین شرایطی خودرو از کنترل خارج شده و دیگر فرمان پذیر نیست.

امروزه فناوری سیستم ترمز ضد قفل^۱ برای جلوگیری از قفل شدن چرخها و کنترل میزان لغزش طولی در راستای افزایش پایداری خودرو و کاهش فاصله توقف و بطور کلی بهبود پایداری و ایمنی خودرو هنگام ترمزگیری در شرایط آب و هوایی و جاده ای مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم ترمز ضد قفل از طریق کنترل فشار هیدرولیک سیستم ترمز لغزش طولی ایجاد شده بین تایر و سطح جاده را در یک محدوده مجاز

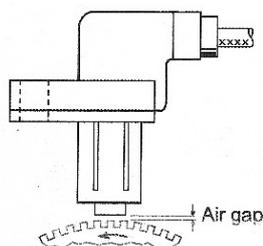
^۱ Antilock Brake System (ABS)



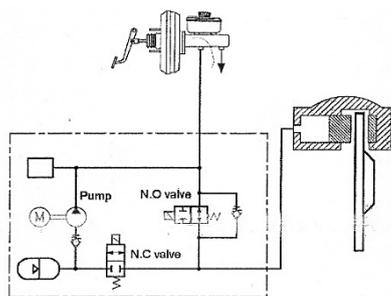
محفظه سیلندر چرخ حبس و ثلثت می‌کند. در این هنگام اگر راننده نیروی بیشتری را به پدال ترمز وارد نماید علیرغم افزایش فشار در سیلندر اصلی، فشار در سیلندر ترمز چرخ مورد نظر ثابت باقی می‌ماند.

۲-۱-۳- فاز کاهش فشار:

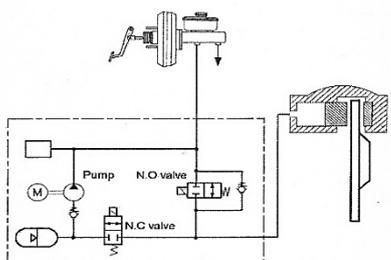
این فاز زمانی اتفاق می‌افتد که میزان لغزش در یکی از چرخ‌ها از مقدار مجاز محاسبه شده برای آن تجاوز نماید. در این هنگام واحد کنترل الکترونیک برای کاهش فشار هیدرولیک در سیلندر ترمز چرخ مربوطه با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تغذیه ارتباط آن چرخ را با سیلندر اصلی قطع کرده و با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تخلیه آن را باز و از این طریق فشار را در سیلندر ترمز به اندازه کافی کاهش می‌دهد. در این حالت روغن ابتدا داخل مخزن ذخیره شده و سپس پمپ با دریافت سیگنال ولتاژ ۱۲ ولت نسبت به تخلیه روغن از مخزن و ارسال آن به سیلندر اصلی ترمز اقدام می‌کند. پس از کاهش فشار و به دنبال آن، کاهش لغزش در چرخ مورد نظر، با توجه به شرایط جدید دوباره یکی از فازهای بالا توسط واحد کنترل الکترونیک اتخاذ می‌گردد. این نکته قابل ذکر است که تمام شیرهای برقی با تحریک جریان ۵ آمپر تغییر وضعیت می‌دهند و با قطع جریان به حالت طبیعی خود باز می‌گردند [۷-۹].



شکل (۴): تصویر شماتیک چگونگی عملکرد سنسور سرعت چرخ



شکل (۵): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز افزایش فشار



شکل (۶): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز تثبیت فشار

در سیستم ترمز ضد قفل برای کنترل فشار هیدرولیکی منتقل شده به چرخ‌ها از یک واحد کنترل هیدرولیک^۱ استفاده می‌شود. در داخل واحد کنترل هیدرولیک، تعدادی شیر کنترل برقی تعبیه شده که در صورت تحریک الکتریکی باز و بسته شده و می‌توانند مسیر حرکت سیال را کنترل نمایند. صدور فرامین کنترلی به واحد کنترل هیدرولیک توسط یک واحد کنترل الکترونیک^۲ صورت می‌گیرد. وظیفه این واحد پردازش اطلاعات رسیده از سنسورهای اندازه‌گیری سرعت دورانی چرخ‌ها و تخمین میزان لغزش و کنترل آن به وسیله باز و بسته کردن شیرهای الکتریکی تعبیه شده در واحد کنترل هیدرولیک است. سنسورهای سرعت نیز از نوع تحریک مغناطیسی بوده و شامل یک آهنربای دائمی و یک سیم‌پیچ هستند که دو انتهای سیم‌پیچ به واحد کنترل الکترونیک متصل است. در مقابل هر سنسور یک چرخ دندانه‌دار بر روی محور چرخ نصب شده است که سرعت دورانی آن همان سرعت دورانی چرخ‌ها است. به طور معمول چرخ دندانه‌دار در چرخ‌های جلو بر روی پلوس و در چرخ‌های عقب بر روی تویی نصب می‌گردند. دوران چرخ دندانه‌دار در میدان مغناطیسی ناشی از آهنربای سنسور، موجب تغییر فرم خطوط میدان شده و در نتیجه یک ولتاژ متناوب تولید و به واحد کنترل الکترونیک منتقل می‌گردد. واحد کنترل الکترونیک با استفاده از فرکانس این ولتاژ سرعت دورانی هر چرخ را محاسبه نموده و بر اساس آن سرعت خودرو را تخمین می‌زند. [۶-۵]. عملکرد این سنسور به صورت زیر شکل (۴) است.

۲-۱-۲- نحوه عملکرد سیستم ترمز ضد قفل:

بطور کلی سیستم ترمز ضد قفل دارای سه فاز عملکردی افزایش فشار، تثبیت فشار و کاهش فشار می‌باشد (شکل ۵-۷). در هنگام ترمزگیری برحسب شرایط یکی از این سه فاز توسط واحد کنترل الکترونیک انتخاب شده و توسط واحد کنترل هیدرولیک اجرا می‌شود. امروزه با بکارگیری شیرهای کنترل جهت هیدرولیکی با قابلیت کار در فرکانس‌های بالا، زمان لازم برای به اجرا در آمدن هر یک از فازهای فوق به حدود ۷ میلی ثانیه کاهش پیدا کرده است.

۲-۱-۱- فاز افزایش فشار:

تا هنگامی که میزان لغزش ایجاد شده در چرخ‌ها از مقدار مجاز محاسبه شده تجاوز نکرده باشد، واحد کنترل الکترونیک هیچ فرمانی به واحد کنترل هیدرولیک ارسال نکرده و این اجازه را می‌دهد که در صورت تمایل راننده به فشردن بیشتر پدال ترمز، فشار روغن در سیلندر ترمز چرخ‌ها افزایش یابد. در این حالت سیستم ترمز ضد قفل غیرفعال است.

۲-۱-۲- فاز تثبیت فشار:

چنانچه میزان لغزش ایجاد شده در یک چرخ با مقدار مجاز محاسبه شده برای آن برابر گردد، واحد کنترل الکترونیک با تحریک شیر قرار گرفته در مسیر تغذیه آن را در وضعیت بسته نگه داشته و فشار را در

² Electronic Control Unit (ECU)

¹ Hydraulic Control Unit (HCU)

۲-۲- مدل سیستم ترمز خودرو:

هنگامی که خودرو در حال شتاب‌گیری یا توقف باشد، نیروی کشنده F_{tf} و F_{tr} که به وسیله تایر ایجاد می‌شود متناسب با نیروهای F_{zf} و F_{zr} است که به ترتیب عکس‌العمل‌های جاده روی چرخ می‌باشند و مطابق شکل (۸) است. این ضریب تناسب با μ نشان داده می‌شود و ضریب چسبیدگی جاده نامیده می‌شود که تغییرات آن متناسب با سطح جاده است و مطابق شکل (۹) است. لغزش چرخ که با λ نمایش داده می‌شود نسبت تفاضل سرعت خودرو و سرعت منتقل شده به چرخ‌ها بر سرعت خودرو است. هدف سیستم ترمز ضد قفل، نگه‌داشتن محدوده عملکرد هر چرخ در نزدیکی قله نمودار $\lambda - \mu$ برای همان چرخ می‌باشد. یعنی نحوه عملکرد این سیستم به شدت به شرایط سطح جاده بستگی دارد. بنابراین از سیستمی که برای آسفالت خشک بهینه است نمی‌توان انتظار عملکردی به همان مطلوبی روی سطح یخی داشت. بنابراین اگر ما بتوانیم ضریب لغزش بهینه را برای سطح جاده مورد نظر شناسایی کنیم، می‌توانیم سیستم ترمز ضد قفل را با عملکرد بهتر برای شرایط مختلف و متنوع جاده ای بسازیم. در این پروژه، هدف ما طراحی یک کنترل‌کننده فازی جهت اعمال نیروی ترمزی مناسب به چرخ‌ها برای توقف خودرو در کمترین فاصله است. اولین قدم در پروسه طراحی کنترل‌کننده، به‌دست آوردن ساختار یک مدل واقعی از دینامیک فرآیندی است که می‌بایست کنترل شود. مدل واقعی یک مدل شبیه‌سازی شده است که تمام ویژگی‌های مربوط به فرآیند را شامل باشد. در واقع مدل طراحی می‌بایست تمام خصوصیات ضروری فرآیند را در بر داشته باشد [۱۰-۱۱].

ما مسیر ترمزگیری مستقیم را در نظر می‌گیریم و از اثر شیب و چرخش صرف‌نظر می‌کنیم. دیاگرام سیستم ترمز خودرو برای مسیر مستقیم به‌صورت شکل (۱۰) است. نیروهای کشنده جلو و عقب با F_{tf} و F_{tr} نمایش داده می‌شوند.

$$\begin{aligned} F_{tot} &= F_{tf} + F_{tr} \\ F_{tf} &= \mu(\lambda_f)F_{zf} \\ F_{tr} &= \mu(\lambda_r)F_{zr} \end{aligned} \quad (3)$$

در شکل (۱۱)، F_{zf} و F_{zr} نیروهای نرمال عمل‌کننده روی چرخ‌های جلو و عقب هستند و $\mu(\lambda)$ ضریب اصطکاک جاده است که تابعی از لغزش چرخ (λ) می‌باشد. برای چرخ جلو $\lambda = \lambda_f$ و برای چرخ عقب $\lambda = \lambda_r$ می‌باشد. لغزش هم بصورت زیر تعریف می‌شود:

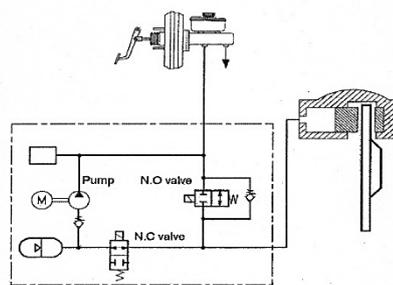
$$\lambda = \frac{V - \omega R_w}{V} = 1 - \frac{\omega R_w}{V} \quad (4)$$

V : سرعت خودرو

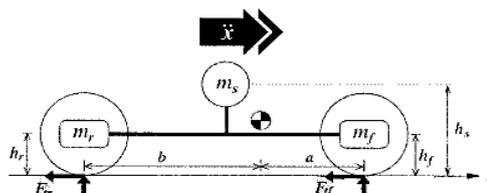
ω : سرعت زاویه‌ای تایر

R_w : شعاع تایر

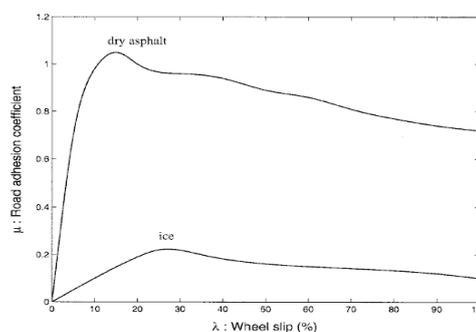
قابل توجه است که $0 < \lambda < 1$ است و مقدار λ را به‌صورت درصد بیان می‌کنند. قفل‌شدن چرخ‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که $\lambda = 100\%$ شود یا $\omega = 0$ باشد. هر چند همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است، قفل‌شدگی چرخ‌ها در زمانی نیست که نیروی کشنده تابعی از نیروی نرمال باشد. در واقع دو جزء در نیروی نرمال وجود دارد. یک جزء مربوط به توزیع جرم است که به‌صورت زیر است:



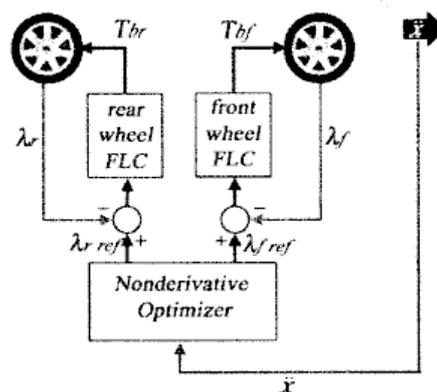
شکل (۷): وضعیت شیرهای کنترل جهت و پمپ در فاز کاهش فشار



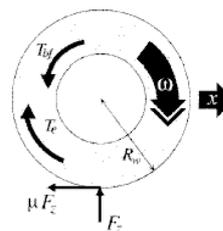
شکل (۸): وضعیت دینامیک چرخ‌های خودرو هنگام حرکت روی سطح جاده



شکل (۹): نمودار ضریب اصطکاک برای سطح جاده خشک و یخ زده



شکل (۱۰): نمودار سیستم ترمز خودرو برای مسیر مستقیم [۲]



شکل (۱۱): نمودار نیروهای عمل‌کننده روی چرخ‌ها [۲]



$$2J_r \dot{\omega}_r = -T_{br} + \mu(\lambda_r) F_{Zr} R_{\omega} \quad (18)$$

با به کارگیری معادلات بالا در (۱۰-۱۱) داریم:

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{2J_f} (-T_{bf} + \mu(\lambda_f) m_1 R_{\omega} g - \mu(\lambda_f) m_3 R_{\omega} \ddot{x} + T_e) \quad (19)$$

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} (-T_{br} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \ddot{x}) \quad (20)$$

0.2 < K_{br} < 0.6 است و گشتاور ترمز عقب وابسته به گشتاور ترمز جلو با رابطه زیر بدست می آید:

$$T_{br} = K_{br} T_{bf} \quad (21)$$

که K_{br} ثابت نسبت جابجایی ترمز است و بیانگر نسبت بین گشتاور ترمزی چرخ عقب و چرخ جلو است. معمولاً K_{br} بین ۰.۲ تا ۰.۶ است. بنابراین گشتاور ترمزی عقب نسبتی از گشتاور ترمزی جلو می باشد. این امر از قفل شدن چرخهای عقب در زمانیکه چرخهای جلو قفل شده است جلوگیری می کند و در نتیجه توانایی مانور خودرو را حفظ می کند. از قراردادن (۲۱) در (۲۰) داریم:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{2J_r} (-K_{br} T_{bf} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \ddot{x}) \quad (22)$$

در نتیجه مدل سیستم خودرو از معادلات (۱۶، ۱۹) بدست می آید. ما متغیرهای حالت را بصورت زیر تعریف می کنیم:

$$\begin{aligned} x_1 &= x \\ x_2 &= \dot{x} \\ x_3 &= \omega_f \\ x_4 &= \omega_r \end{aligned} \quad (23)$$

با به کارگیری متغیرهای حالت بالا، مدل سیستم ترمز خودرو در فضای حالت به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2 = -g \frac{\mu(\lambda_f) m_1 + \mu(\lambda_r) m_3}{m_{tot} - \mu(\lambda_f) m_3 + \mu(\lambda_r) m_3} \\ \dot{x}_3 &= f_3 = \frac{1}{2J_f} (-T_{bf} + \mu(\lambda_f) m_1 R_{\omega} g - \mu(\lambda_f) m_3 R_{\omega} \dot{x}_2 + T_e) \\ \dot{x}_4 &= f_4 = \frac{1}{2J_r} (-K_{br} T_{bf} + \mu(\lambda_r) m_2 R_{\omega} g + \mu(\lambda_r) m_3 R_{\omega} \dot{x}_2) \\ y &= [x_1 \ x_2 \ \lambda_f \ \lambda_r]^T = [x_1 \ x_2 \ 1 - \frac{R_{\omega} x_3}{x_2} \ 1 - \frac{R_{\omega} x_4}{x_2}]^T \end{aligned} \quad (24)$$

۳- نتایج تست مدل ترمز شبیه سازی شده

نتایج تست مدل سیستم ترمز خودرو در محیط Simulink نرم افزار MATLAB توسط شکل (۱۲-۱۸) زیر به نمایش درآمده است. پارامترهای در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی و مدل سازی سیستم در جدول (۱) آمده است.

۴- طراحی کنترل کننده فازی

همان طور که می دانیم هر کنترل فازی از ۴ بخش تشکیل شده است

- فازی ساز^۱: تبدیل ورودی های سیستم به مقادیر فازی.

برای تایر جلو:

$$F_{Zf1} = \frac{b}{a+b} m_{tot} g \quad (5)$$

برای تایر عقب:

$$F_{Zr1} = \frac{a}{a+b} m_{tot} g \quad (6)$$

بقیه اجزای نیروی نرمال، انتقال وزن جغرافیایی است که با شتاب گیری یا ترمزگیری ایجاد می شود و به راحتی با استفاده از قانون حفظ گشتاور به دست می آید [۱۲-۱۴].

گشتاور نقطه تماس تایر عقب را در نظر بگیرید:

$$(a+b) F_{Zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \ddot{x} \quad (7)$$

که \ddot{x} شتاب خودرو می باشد. با تقسیم کردن طرفین بر $a+b$ نیروی نرمال روی چرخ جلو که مربوط به انتقال وزن است بدست می آید:

$$F_{Zf2} = (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (8)$$

با بکارگیری قانون حفظ گشتاور در مورد نقطه تماس تایر جلو خواهیم داشت:

$$F_{Zr2} = -(m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (9)$$

بنابراین، نیروی نرمال کلی روی چرخ جلو برابر است با:

$$F_{Zf} = F_{Zf1} - F_{Zf2} = \frac{b}{a+b} m_{tot} g + (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (10)$$

و نیروی نرمال کلی روی چرخ عقب برابر است با:

$$F_{Zr} = F_{Zr1} - F_{Zr2} = \frac{a}{a+b} m_{tot} g + (m_f h_f + m_s h_s + m_r h_r) \frac{\ddot{x}}{a+b} \quad (11)$$

در نتیجه، برای نیروی نرمال روی چرخ جلو داریم:

$$F_{Zf} = m_1 g - m_3 \ddot{x} \quad (12)$$

و برای چرخ عقب داریم:

$$F_{Zr} = m_2 g - m_3 \ddot{x} \quad (13)$$

و نیروی کشنده کلی به صورت زیر است:

$$F_{tot} = \mu(\lambda_f) F_{Zf} + \mu(\lambda_r) F_{Zr} = \mu(\lambda_f) (m_1 g - m_3 \ddot{x}) + \mu(\lambda_r) (m_2 g + m_3 \ddot{x}) \quad (14)$$

با به کارگیری قانون دوم نیوتن خواهیم داشت:

$$m_{tot} \ddot{x} = -F_{tot} \quad (15)$$

با ترکیب دو معادله بالا داریم:

$$\ddot{x} = -g \frac{\mu(\lambda_f) m_1 + \mu(\lambda_r) m_3}{m_{tot} - \mu(\lambda_f) m_3 + \mu(\lambda_r) m_3} \quad (16)$$

فرض کنید T_e گشتاور موتور باشد که برای چرخهای جلو بکار گرفته شده است. با فرض اینکه ما با یک خودروی محور جلو سروکار داریم، T_{bf} گشتاور ترمز جلو است و T_{br} گشتاور ترمز عقب است و R_ω شعاع تایر می باشد [۱۵]. همچنین ω_f سرعت زاویه ای چرخ جلو و ω_r سرعت زاویه ای چرخ عقب می باشد. پس ما دینامیکهای چرخ جلو و عقب را به صورت زیر مدل می کنیم:

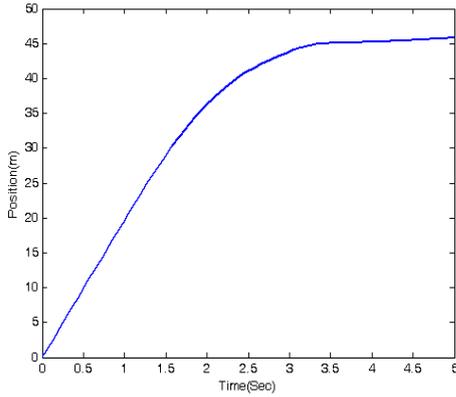
$$2J_f \dot{\omega}_f = -T_{bf} + \mu(\lambda_f) F_{Zf} R_{\omega} + T_e \quad (17)$$

¹ Fuzzifier

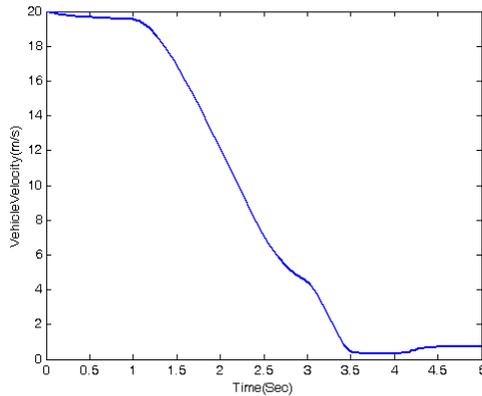


جدول (۱): مشخصات پارامترهای خودرو جهت مدلسازی [۱]

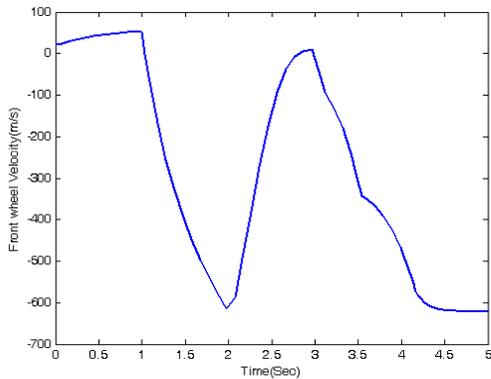
g	شتاب ثقل	9.81 m/s^2
a	فاصله از مرکز ثقل تا اکسل جلو	1.186 m
b	فاصله از مرکز ثقل تا اکسل عقب	1.285 m
h_s	ارتفاع جرم ارتجاعي	0.6 m
h_f	ارتفاع جرم غيرارتجاعي جلو	0.3 m
h_r	ارتفاع جرم غيرارتجاعي عقب	0.3 m
m_{tot}	جرم كل خودرو	1500 kg
m_s	جرم ارتجاعي خودرو	1285 kg
m_f	جرم غيرارتجاعي جلو	96 kg
m_r	جرم غيرارتجاعي عقب	119 kg
J_f	گشتاور سکون چرخ جلو	1.7 kgm^2
J_r	گشتاور سکون چرخ عقب	1.7 kgm^2
R_ω	شعاع تاپير	0.326 m
T_e	گشتاور موتور	0 Nm
K_{br}	ثابت تناسبی تغيير مکان ترمز	0.5



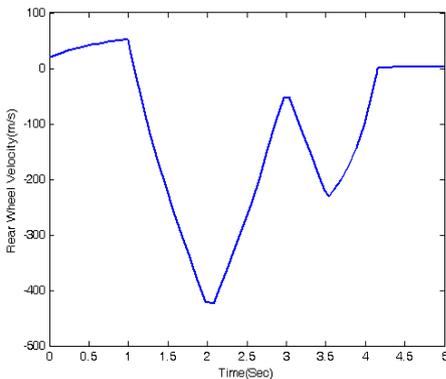
شکل (۱۵): نمایش تغییرات موقعیت خودرو



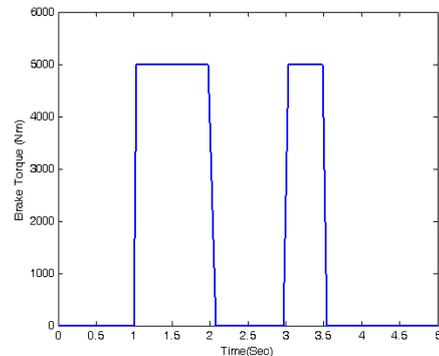
شکل (۱۶): نمایش تغییرات سرعت خودرو



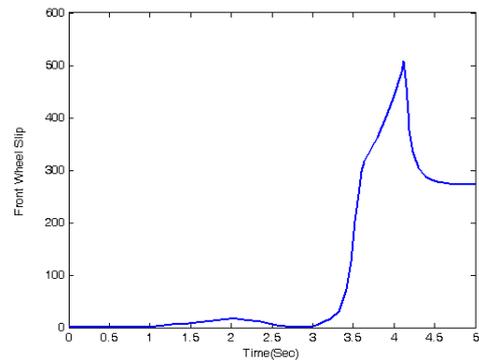
شکل (۱۷): نمایش سرعت چرخهای جلو



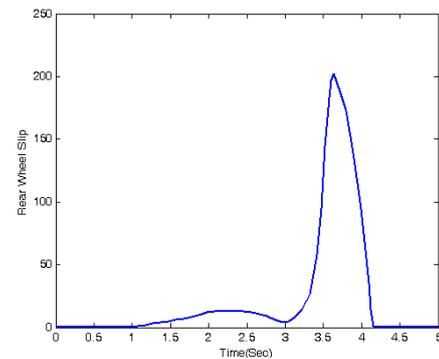
شکل (۱۸): نمایش سرعت چرخهای عقب



شکل (۱۲): گشتاور ترمزی اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل



شکل (۱۳): گشتاور ترمزی اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل



شکل (۱۴): نمایش لغزش چرخهای عقب



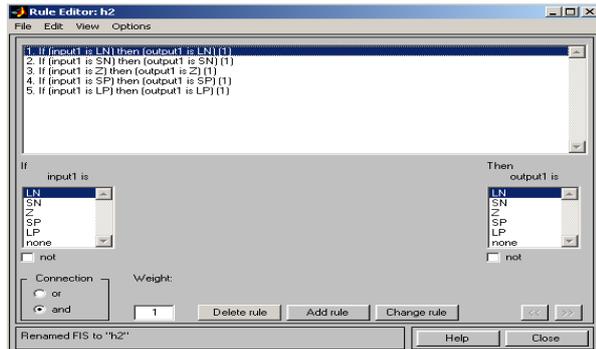
- موتور استنتاج فازی: پردازش ورودی‌ها و تعیین خروجی مناسب.
- پایگاه داده‌ها: شامل قوانین و توابع عضویت فازی.
- غیرفازی‌ساز^۱: تبدیل خروجی فازی به مقدار واقعی.

در این مقاله دو کنترل کننده فازی در نظر گرفته شده که یکی چرخ‌های جلوی خودرو و دیگری چرخ‌های عقب را کنترل می‌کند. هدف از این طراحی، قراردادن لغزش چرخ‌های جلو و عقب در محدوده مجاز و پایدار با ردیابی لغزش مرجعی است که ما به سیستم اعمال می‌کنیم. این عمل جهت جلوگیری از قفل شدن چرخ‌ها صورت می‌گیرد؛ بنابراین ورودی کنترل کننده فازی خطای ردیابی^۲ لغزش مرجع و خروجی آن گشتاوری است که باید متناسب با خطا به سیستم ترمزی اعمال شود [۱۹-۱۶]. در ابتدا فازی‌سازها را برای هر دو کنترل کننده به صورت مثلثی و با ۵ تابع عضویت منفی بزرگ (LN)، منفی کوچک (SN)، صفر (Z)، مثبت کوچک (SP) و مثبت بزرگ (LP) تعریف می‌کنیم. جدول (۲) نشان‌دهنده مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی است برای کنترل کننده چرخ‌های جلو به صورت است. نمایش روش استنتاج فازی به کارگیری شده، قواعد فازی تعریف شده و توابع عضویت فازی‌ساز و غیرفازی‌ساز که برای چرخ‌های جلو در جعبه ابزار فازی متلب تعریف شده در شکل (۱۹-۲۲) آمده است. همچنین پاسخ کنترلر فازی طراحی شده برای چرخ‌های جلو که بر حسب خطای ورودی و گشتاور خروجی است در شکل (۲۳) نمایش داده شده است.

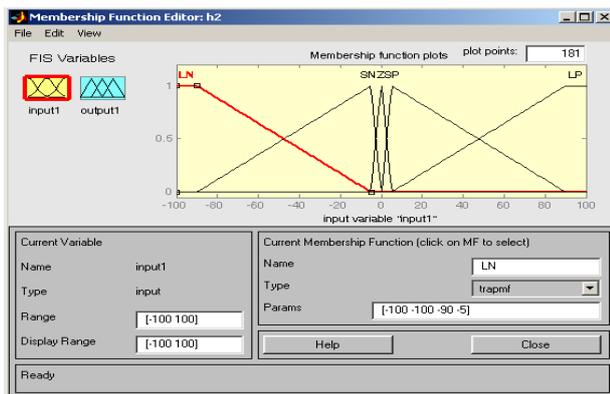
جدول (۲): مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی

برای چرخ‌های جلو

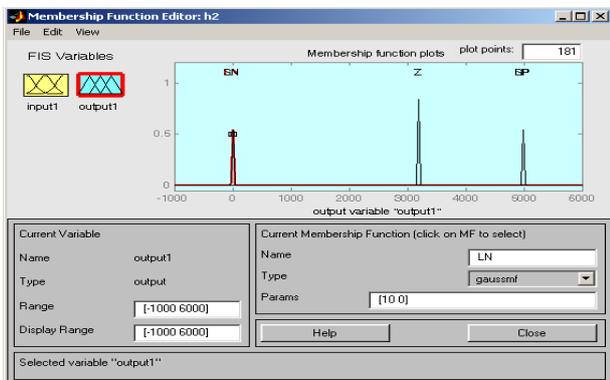
Input (e)	LN	SN	Z	SP	LP
Output (T_{bf})	0	به کارگیری	3206	5000	5000



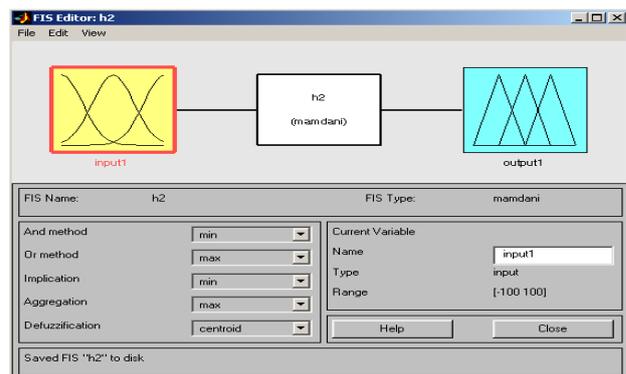
شکل (۲۰): قواعد فازی تعریف شده برای چرخ‌های جلو



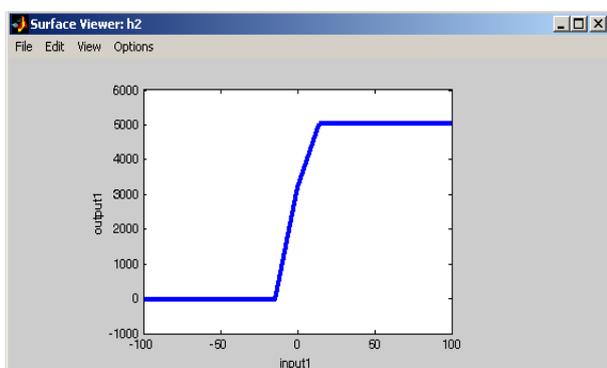
شکل (۲۱): توابع عضویت فازی ساز برای چرخ‌های جلو



شکل (۲۲): توابع عضویت غیرفازی ساز برای چرخ‌های جلو



شکل (۱۹): روش استنتاج فازی انتخاب شده برای چرخ‌های جلو



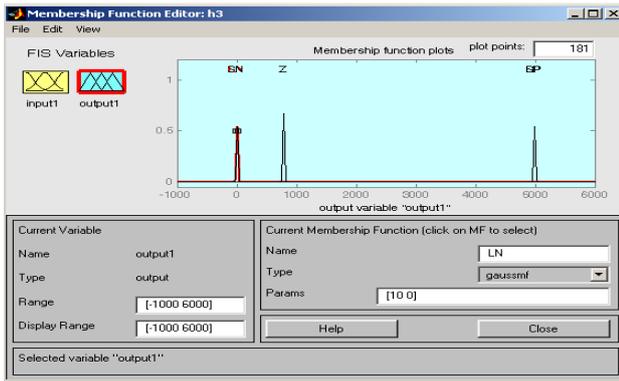
شکل (۲۳): نمایش پاسخ کنترلر فازی برای چرخ‌های جلو

³ Rule

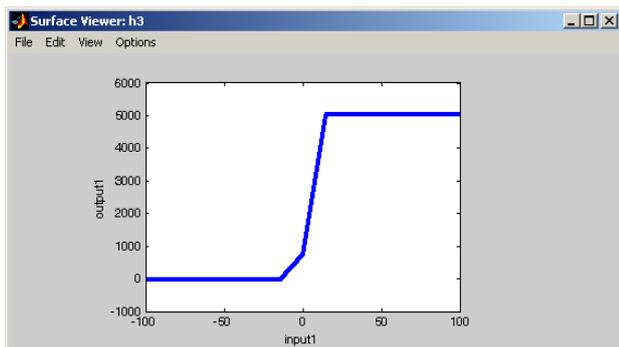
¹ Defuzzifier

² Tracking error





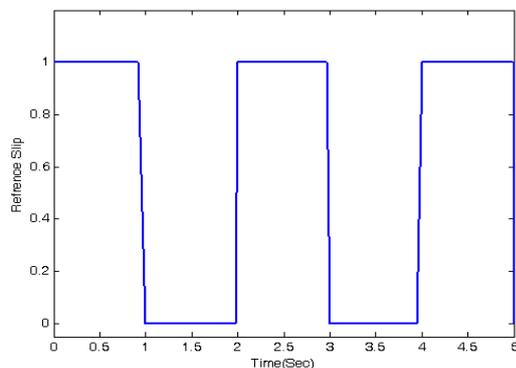
شکل (۲۷): توابع عضویت غیرفازی ساز برای چرخ های عقب



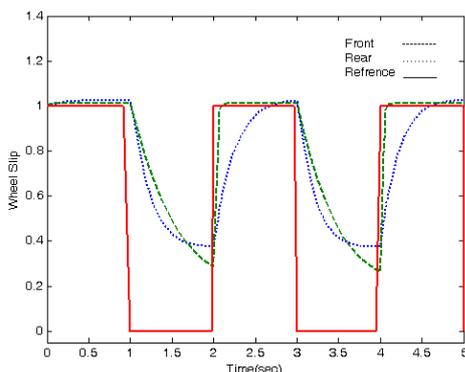
شکل (۲۸): نمایش پاسخ کنترلر فازی برای چرخهای عقب

۵- نتایج تست کنترل کننده فازی طراحی شده

نتایج طراحی کنترلر فازی جهت مدل شبیه سازی شده سیستم ترمز ضد قفل که به کمک جعبه ابزار Fuzzy نرم افزار Matlab انجام شده است در زیر نمایش داده شده است:



شکل (۲۹): نمایش لغزش مرجع اعمال شده به سیستم ترمز ضد قفل

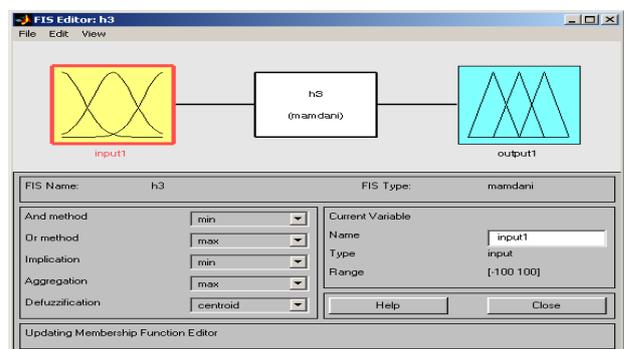


شکل (۳۰): نمایش لغزش چرخ های جلو، عقب و مرجع

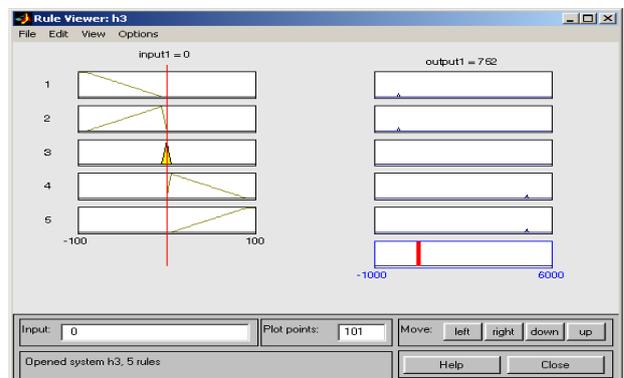
جدول (۳) نشان دهنده مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی است برای کنترل کننده چرخ های عقب است. همچنین نمایش روش استنتاج فازی به کارگیری شده، قواعد فازی تعریف شده و توابع عضویت فازی ساز و غیرفازی ساز که برای چرخ های عقب در جعبه ابزار فازی نرم افزار متلب تعریف شده است در شکل (۲۴-۲۷) و پاسخ کنترل کننده فازی طراحی شده برای چرخ های عقب که بر حسب خطای ورودی و گشتاور خروجی در شکل (۲۸) نشان داده شده است.

جدول (۳): مقادیر گشتاور خروجی بر حسب توابع ورودی برای چرخ های عقب

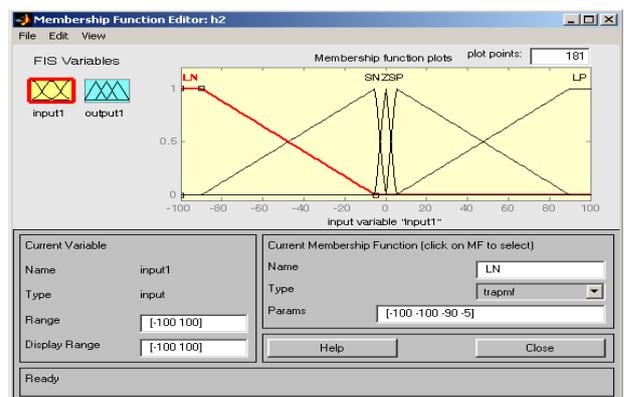
Input (e)	LN	SN	Z	SP	LP
Output (T_{br})	0	0	780	5000	5000



شکل (۲۴): روش استنتاج فازی انتخاب شده برای چرخ های عقب



شکل (۲۵): قواعد فازی تعریف شده برای چرخ های عقب



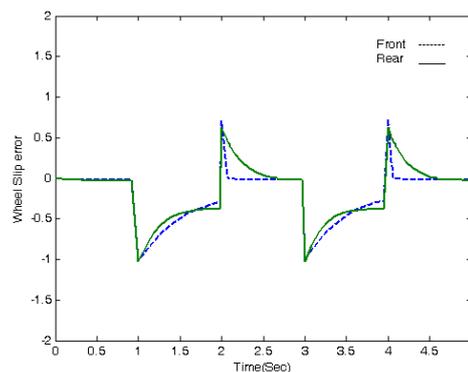
شکل (۲۶): توابع عضویت فازی ساز برای چرخ های عقب



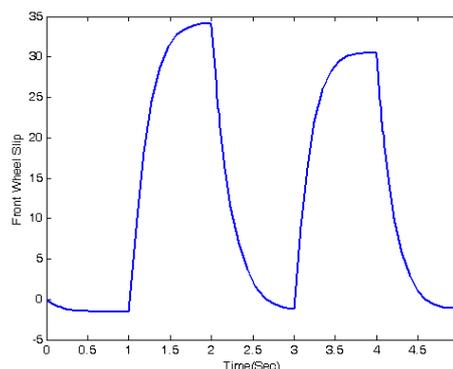
کنترل کننده برای سیستم ترمز ضد قفل طراحی شود که نتایج شبیه سازی ها نشان داد سیستم کنترل فازی به خوبی هدف را که همان کاهش سرعت چرخ ها و ردیابی کردن لغزش مرجع توسط چرخ های جلو و عقب است را محقق می نماید. البته لازم به ذکر است به دلیل دقیق نبودن مدل سیستم ترمز و غیرواقعی بودن مقادیر اجزای دینامیکی خودرو برخی از مقادیر نمایش های بالا تقریبی است و فقط بایستی در حد شبیه سازی به آنها اکتفا کرد.

مراجع

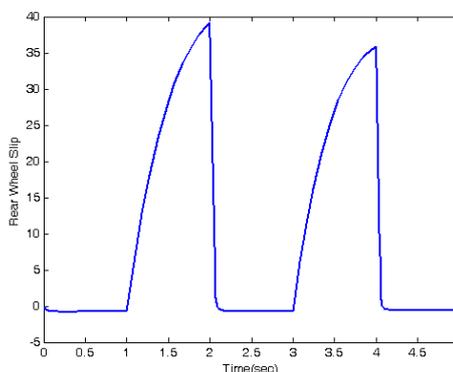
- [۱] مرکز تحقیقات ایران خودرو. (۱۳۹۰). معرفی سیستم ترمز ضد قفل خودروی سمند (واحد دینامیک خودرو، گروه ترمز).
- [۲] ایساکو. (۱۳۹۵). ترمز ضد قفل ABS. شرکت تهیه و توزیع قطعات و لوازم یدکی ایران خودرو.
- [۳] وانگ، لی (۱۳۷۸). سیستم های فازی و کنترل فازی (ترجمه دکتر محمد تشنه لب). دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [4] Sachenbacher, M., & Struss, P. (1997). Fault isolation in the hydraulic circuit of an ABS. *International Journal of Automation Technology*, 105-111.
- [5] Yu, F., Feng, J. Z., & Li, J. (2002). A fuzzy logic controller design for vehicle ABS with an online optimized target slip ratio. *International Journal of Automation Technology*, 165-170.
- [6] Lee, Y., & Zak, S. H. (2002). Designing a genetic neural fuzzy antilock brake system controller. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2).
- [7] Will, A. B., & Zak, S. H. (2000). Antilock brake system modeling and fuzzy control. *International Journal of Vehicle Design*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2000.001870>.
- [8] Yu, D. (2005). Antilock brake control system of electric vehicles. *Control Theory & Applications*. Available at: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTALKZLY200501027.htm.
- [9] Yu, Y. (2004). Study on fuzzy PID control algorithm for antilock brake system. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*. Available at: http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTALGLJK200407032.htm.
- [10] Sanchez-Torres, J. D., Loukianov, A. G., Galicia, M. I., & Rivera, J. (2011). A sliding mode regulator for antilock brake system. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 7187-7192. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03644>.
- [11] Lin, W.-C., Dobner, D. J., & Fruechte, R. D. (2014). Design and analysis of an antilock brake control system with electric brake actuator. *International Journal of Vehicle Design*. Available at: <https://trid.trb.org/view/383088>.
- [12] Liqun, Z., & Qingsong, L. (2018). Development prospects of ABS braking under the trend of high-end motorcycle manufacturing. *Motorcycle Technology*, 316(6), 40-46.
- [13] Tao, L. (2020). Design and research of automotive electronic mechanical braking system. *Internal Combustion Engine and Accessories*, 323(23), 32-33.
- [14] Jiantao, S., Lang, L., & Yang, C. (2020). The effect of automobile anti-lock braking system on braking distance. *Auto Parts*, 150(12), 73-75.
- [15] Shengli, Z. (2019). Design and analysis of automobile electromechanical brake actuator. *Mechanical Research and Application*, 32(5), 66-69.
- [16] Zhang, L., Wang, Y., & Chen, M. (2022). Robust wheel slip control in anti-lock braking systems using model predictive control. *Control Engineering Practice*, 235, Article 104897. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104897>.



شکل (۳۱): نمایش خطای ردیابی لغزش مرجع توسط چرخ های خودرو



شکل (۳۲): نمایش سرعت چرخ های جلو



شکل (۳۳): نمایش سرعت چرخ های عقب

۶- نتیجه

در سیستم ترمز خودرو، سنسورها اطلاعات دقیق سرعت چرخ و اطلاعات فشار را برای سیستم کنترل ترمز ارائه می دهند تا کنترل دقیق فشار ترمز را محقق کنند؛ بنابراین دقت اطلاعات خروجی سنسور مستقیماً بر صحت و اثربخشی دستورالعمل های کنترلی سیستم کنترل تأثیر می گذارد. هنگامی که یک خودرو به سرعت ترمز می کند، به راحتی چرخ ها قفل می شوند. در این زمان سیستم ترمز ضد قفل وارد حالت کار می شود و فشار ترمز هر چرخ به موقع و با دقت تنظیم می شود تا چرخ ها قفل نشوند. در هنگام ترمز گیری، این سیستم باید بتواند خود را با شرایط مختلف جاده ای وفق دهد، به طور مؤثر در برابر عوامل تداخل جاده ای مقاومت کند و در مدت زمان بسیار کوتاهی به سرعت پاسخ دهد. در این مقاله سعی شد تا با استفاده از سیستم کنترل فازی، یک

Mechatronics, 211, Article 2955432.
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2019.2955432>.
[19] Wu, D., Liu, Y., & Huang, T. (2024). Adaptive neural network control for anti-lock braking systems with uncertain road conditions. *Neural Computing and Applications*.
<https://doi.org/10.1007/s00521-023-07654-2>.

[17] Lee, H., Park, J., & Kim, K. (2023). Fuzzy logic-based control strategy for anti-lock braking systems in autonomous vehicles. *IEEE Access*, 326, Article 3056789.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3056789>.
[18] Ahmadi, M., Khajepour, A., Chen, S., & Litkouhi, B. (2020). Nonlinear control and estimation of longitudinal tire slip for anti-lock braking systems. *IEEE/ASME Transactions on*

