



Introducing a New Online Algorithm to Detect The Type of Surface in The Anti-lock Braking System

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Avazpour M.M.¹,
Mohammadi M.^{1*},
Mahdavianpanah A.¹,

How to cite this article

Avazpour MM, Mohammadi M, Mahdavianpanah A, Introducing a New Online Algorithm to Detect The Type of Surface in The Anti-lock Braking System. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(05):305-315.

¹ School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Mohsen_mohammadi@shirazu.ac.ir

Article History

Received: January 16, 2024
Accepted: August 10, 2024
ePublished: August 22, 2024

ABSTRACT

In recent decades, the evolution and advancement of automotive technology have played a crucial role in enhancing the safety and security of drivers and passengers. One prominent technology that significantly contributes to vehicle safety is the Anti-lock Braking System (ABS), which notably improves safety during braking, reduces braking distances, and enhances vehicle control across various road surface conditions. This paper introduces an innovative real-time algorithm aimed at improving the performance of ABS systems, leveraging practical data instead of complex mathematical modeling. Unlike traditional modeling approaches that rely on half car model and dynamic tire simulations, this study utilizes actual wheel data to develop and optimize the algorithms. This approach enhances the sensitivity and adaptability of the algorithm to real-world road changes and varying operational conditions. Furthermore, the method effectively addresses and analyzes the phenomena of Jump and Split, which have not been specifically tackled in other studies. Validated through both analytical and empirical models, this approach provides high accuracy in estimating acceleration in scenarios where accelerometer sensors are unavailable. It offers precise responses under varying braking conditions. Simulation results of the algorithm using practical test data indicate that it achieves approximately 49.1% faster detection times compared to other algorithms, offering significant advantages such as reduced braking distances and lower computational costs.

Keywords Anti-Lock Braking, Surface Detection, Realtime Algorithm, practical Data, Two-Level Testing

CITATION LINKS

1- Car braking system-general aspects in a review. 2- Efficient antilock braking by direct maximization of tire-road frictions. 3- Modeling and control of an anti-lock brake and steering system for 4- Design of anti-lock braking system compatible with 5- Linearized recursive least squares methods for real-time identification of 6- A practical identifier design of road variations for anti-lock brake system. 7- Experimental study on braking and stability performance during low-speed braking with 8- Improving the performance of anti-lock braking system by considering the turning dynamics and 9- Estimation of road frictional force and wheel slip for 10- Constrained nonlinear estimation of road friction coefficient and wheel slip for control of 11- Surface prediction and control algorithms for anti-lock brake system. 12- An anti-lock braking system algorithm using real-time wheel reference slip estimation and control. 13- Target slip tracking using gain-scheduling for antilock braking systems. 14- Measurement of tire brake force characteristics as related to 15- Stable anti-lock braking system using output-feedback direct adaptive fuzzy neural control. 16- Road vehicle state estimation using low-cost GPS/INS. 17- Implementation of EKF for vehicle velocities estimation on FPGA. 18- Vehicle longitudinal velocity estimation using two new estimators and 19- Observers for tire/road contact friction using only wheel angular velocity information. 20- Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. 21- An observer of tire-road forces and friction for active security vehicle systems. 22- A vehicle ABS adaptive sliding-mode control algorithm based on 23- ABS control using optimum search via sliding modes. 24- Observer-based direct adaptive fuzzy-neural control for 25- Dynamic slip-ratio estimation and control of antilock braking systems using 26- Development and comparison of integrated dynamics control systems with 27- Identification and control of split- μ road for antilock braking system.

ارائه یک الگوریتم نوین برخط برای تشخیص نوع سطح در سامانه ترمز ضد قفل

محمد مهدی عوض پور^۱، محسن محمدی^{۱*}، احمد رضا مهدوی پناه^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در دهه های اخیر، تکامل و توسعه فناوری خودروها در جهت افزایش ایمنی و امنیت برای راننده و سرنشینان خودرو نقش مهمی داشته است. یکی از فناوری های برجسته ای که به افزایش ایمنی در خودروها کمک به سزایی می کند، ترمز ضد قفل می باشد که این سامانه تاثیر قابل توجهی در افزایش امنیت در زمان ترمز گیری، کاهش مسافت خط ترمز و کنترل بهتر خودرو در شرایط سطوح مختلف ترمز گیری دارد. در این مقاله، یک الگوریتم برخط نوین برای بهبود عملکرد سامانه های ترمز ضد قفل (ABS) معرفی می شود که از داده های عملی به جای مدل سازی ریاضی پیچیده بهره می برد، به عبارتی برخلاف مدل سازی های سنتی که به مدل های نیمه خودرو و شبیه سازی های دینامیکی لاستیک متکی هستند، این پژوهش از داده های واقعی چرخ ها برای توسعه و بهینه سازی الگوریتم ها استفاده می کند که این رویکرد باعث افزایش حساسیت و تطبیق پذیری الگوریتم نسبت به تغییرات واقعی جاده و شرایط مختلف عملیاتی می شود. از طرفی به طور مؤثر به شناسایی و تحلیل پدیده های Jump و Split پرداخته شده است که در سایر مقالات به طور اختصاصی پرداخته نشده است. این روش، که با استفاده از مدل های تحلیلی و تجربی آزمایش و اعتبارسنجی شده است و در شرایطی که حسگرهای شتاب در دسترس نیستند، دقت بالایی را در تخمین شتاب ارائه می دهد و می تواند پاسخ هایی با دقت مناسب در شرایط متغیر ترمزگیری ارائه دهد. نتایج شبیه سازی الگوریتم بر روی داده های تست عملی نشان از آن دارد که این الگوریتم با توجه به کاهش تقریباً ۴۹٪ درصدی در زمان تشخیص با سرعتی بیشتر نسبت به سایر الگوریتم ها عمل می کند و مزیت های قابل توجهی از جمله کاهش خط ترمزگیری، کاهش هزینه های محاسباتی سامانه را فراهم می آورد.

کلیدواژه ها: ترمز ضد قفل، تشخیص سطح، الگوریتم برخط، داده عملی، تست دوسطحی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۰

* نویسنده مسئول: Mohsen_mohammadi@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

ترمز ضد قفل (Antilock Braking System) به عنوان یکی از دستاوردهای پیشرو در ایمنی و کنترل پایداری خودروها، اهمیت بسیاری در سامانه های متعدد خودروها دارد. اطلاع از سطح ترمزگیری و کنترل بهینه ترمزگیری خودرو در شرایط فوق العاده مهم است و تأثیر قابل توجهی در بهبود قدرت کنترل و کاهش خطرات حوادث رانندگی دارد که اهمیت استفاده از ترمز ضد قفل در خودروها ناشی از ویژگی های آن است. با استفاده از سامانه ترمز ضد قفل، می توان از قفل شدن چرخ ها در هنگام ترمزگیری سریع جلوگیری کند و در صورت قفل شدن چرخ ها، خودرو به سرعت کنترل ناپذیر و دچار انحراف قابل توجه می شود، که ممکن است منجر به حوادث جدی شود. از این رو این سامانه به دلیل

کاهش مسافت ترمزگیری و حفظ کنترل دقیق خودرو در اثر ترمزگیری، در تقلیل خطر انحراف خودرو و تصادفات، به خصوص در شرایط سخت و چالش برانگیز مانند روی زمین های لغزنده یا هوای بارانی، نقش بسیاری دارد.

هدف سامانه های ترمز ضد قفل از یک سو، جلوگیری از قفل شدن چرخ ها به منظور حفظ توانایی لاستیک در ایجاد نیروی جانبی و در نتیجه اطمینان از قابلیت مانور خودرو بوده و از طرف دیگر، حفظ لغزش چرخ در همسایگی نقطه ای است که نیروی تایلر را به حداکثر می رساند و در نتیجه، فاصله ترمز را به حداقل می رساند. ترمز ضد قفل در حال حاضر یک تجهیزات استاندارد برای تمام خودروهای سواری جدید در اتحادیه اروپا، ایالات متحده و ژاپن است [1]. این سامانه بیش از ۳۰ سال است که توسط شرکت بوش در مرسدس معرفی شده و از سال ۱۹۷۸ مورد استفاده قرار گرفته است. در حوزه طراحی الگوریتم بهینه در ترمز ضد قفل پژوهش های فراوانی انجام شده است. حسین زاده و باب هدیاشر [2] برای تخمین اصطکاک بین چرخ و زمین فرض کرده اند به صورت برخط اندازه گیری دقیقی از گشتاورهای ترمز و گشتاورهای پیش برنده برای هر چرخ وجود دارد. برآورده کردن این فرض در تست عملی امکان پذیر نمی باشد.

آهن و همکاران [3] با تخمین فشار و اندازه گیری تغییرات زاویه Yaw به طراحی کنترلر جهت کنترل زاویه فرمان پرداخته اند. آن ها مقادیر خروجی تخمین گر فشار خود را با مقادیر اندازه گیری شده در تست مقایسه کرده اند که از دقت خوب تخمینگر آن ها حکایت دارد. گل محمدی و همکاران [4]، یک کنترل کننده بصورت دولایه برای سیستم ترمز ضد قفل خودروهای سنگین با بیش از دو محور ارائه کردند که در لایه بالایی، یک کنترل کننده فازی طراحی کردند که مقدار لغزش طولی بهینه هر چرخ را که به ازای آن بیشترین نیروی ترمزی چرخ در هر لحظه برحسب شرایط مختلف جاده و نیز بار قائم تایلر محاسبه می نماید و در لایه پایین نیز یک کنترل کننده غیرخطی با استفاده از یک رویکرد بهینه ی پیش بین به شکل تحلیلی طراحی کرده اند که با ردیابی مقدار بهینه ی لغزش طولی هر چرخ که توسط کنترل کننده فازی تعیین می شود، گشتاور ترمزی مطلوب را به چرخ ها اعمال می کند.

چوی و همکاران [5] تخمین گر نیروی وارد به چرخ در راستای طولی و عرضی را طراحی کرده اند. این تخمین گر، زاویه فرمان، ممان اینرسی، سرعت چرخ ها و گشتاور موتور و نیروی ترمز را به عنوان ورودی دریافت می کند و از این طریق ضریب اصطکاک سطح و چرخ را محاسبه کرده است.

شی و همکاران [6] به شناسایی تغییرات سطح جاده بر اساس حالت خودرو پرداخته اند. متغیرهای حالت مورد استفاده در مقاله میزان لغزش، شتاب زاویه ای چرخ ها و سرعت و شتاب خودرو می باشد. آن ها فرض کرده اند که متغیرهای حالت مفروض قابل اندازه گیری اند یا با دقت خوبی قابل تخمین زدن می باشند. در صورت

و اعتبارسنجی بر روی داده‌های عملی و شبیه‌سازی، نتایج حاکی از دقت مطلوب این روش در تخمین شتاب است.

از سوی دیگر باهانداری و همکاران^[11] برای کنترل سامانه ABS از روش‌های کنترل PID و Sliding Mode Control استفاده کرده‌اند که این روش‌ها به‌طور معمول برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی و پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما به دلیل زمان محاسباتی مورد نیاز و پیچیدگی‌های اجرایی، در زمان‌های کوتاه ترمزگیری که نیاز به پاسخ‌دهی سریع و در زمان واقعی دارد، مناسب نمی‌باشند اما در مقابل، مقاله حاضر به‌طور خاص به طراحی الگوریتم‌هایی پرداخته که قادر به ارائه ضرایب کنترلی در لحظه هستند. از طرفی این الگوریتم به‌طور مستقیم از داده‌های سرعت چرخ‌ها و با استفاده از تحلیل‌های فوری برای تعیین ضرایب کنترلی استفاده می‌کند. بنابراین، مقاله حاضر قادر است نسبت به روش‌های پیچیده پیشنهادی در مقاله باهانداری، کاهش تقریباً ۴۹٫۱ درصدی در زمان تشخیص و در شرایط متغیر ترمزگیری با عملکرد بهینه‌تری را ارائه دهد.

در مقاله گوارکار و همکاران^[12] از الگوریتم فیلتر کالمن افزایشی (EKF) برای تخمین وضعیت و تحلیل رفتار ترمز استفاده می‌کند، الگوریتم EKF به دلیل نیاز به محاسبات پیچیده و هزینه‌بر، به‌ویژه در شرایط زمان واقعی، محدودیت‌های چشمگیری دارد و از آنجایی که زمان ترمزگیری بسیار کوتاه است و نیاز به پاسخ‌دهی سریع و به‌موقع دارد، اجرای EKF در این شرایط دشوار است.

مقاله حاضر به‌طور خاص، به الگوریتم‌هایی که قادر به ارائه ضرایب کنترلی در لحظه هستند، پرداخته است که این الگوریتم‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که قادر به تحلیل داده‌های سرعت چرخ‌ها و تولید ضرایب کنترلی در زمان‌های بسیار کوتاه هستند. در این راستا نیاز است الگوریتم کنترلی برای این سیستم طراحی شود و کنترلر متناسب با نوع سطح جاده‌ای که در آن ترمزگیری صورت می‌گیرد، دستورات متمایزی را صادر می‌کند. از آنجایی که نمودار ترمزگیری هر چرخ و شتاب ترمزی خودرو در سطوح مختلف متفاوت است، لذا در این مقاله بنا بر اکسترمم‌های سرعت چرخ در حین ترمزگیری، راهکاری عملی برای کاهش خط ترمز و تشخیص سطح ارائه شده است.

بر این اساس، در بخش دوم این مقاله به مدل‌سازی ریاضی سامانه ترمز ضد قفل، ارائه یک مدلی برای نیروی اصطکاک، بررسی هیدرولیک ترمز و مدل‌سازی دینامیکی خودرو پرداخته می‌شود. در بخش سوم یک الگوریتم نوین برای تشخیص سطح ارائه می‌شود و در بخش بعدی، نتایج شبیه‌سازی عملکرد الگوریتم در تست آسفالت خشک، آسفالت خیس و همچنین تست دو بخشی ارائه می‌گردد. در همین بخش چهارم، نتایج الگوریتم ارائه شده با نتایج یک پژوهش دیگر تست دو بخشی مقایسه شده است و نهایتاً در بخش پنجم مقاله نتایج کلی مقاله بیان شده است.

داشتن تخمین مناسب از این حالت‌ها می‌تواند از روش ارائه شدن در این مقاله استفاده کرد. نمودارها و داده‌های این مقاله نیز به علت برگرفته شدن از داده‌های تست عملی کاربردی هستند.

کویلو و تورال^[7] برای تحلیل پایداری ترمز ضد قفل به صورت عملی سرعت زاویه ای چرخ، سرعت خودرو، فشار ترمز، زاویه سمت، شتاب عمودی و مسافت ایستادن را اندازه‌گیری کرده‌اند. این مقاله کیفیت ترمزگیری ترمز ضد قفل را در سطوح مختلف بررسی و مقایسه کرده است. این درحالیست که در طراحی کنترلر برای تشخیص سطح ایده‌ای را مطرح نکرده است.

سالاری^[8] به‌منظور عملکرد بهینه ترمزگیری شامل طول توقف کمینه و در عین حال حفظ فرمان‌پذیری خودرو با توسعه مدل پنج درجه آزادی نصف خودرو با در نظر گرفتن دینامیک پیچ خودرو و دستیابی به بیشینه شتاب ترمزی ممکن، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) اقدام به تعیین مقدار لغزش بهینه لحظه‌ای نموده است. در عمل و برای پیاده‌سازی بر روی خودرو نیاز به تجهیزات و بردهای الکترونیکی پیشرفته است که باعث افزایش هزینه تولید خودرو می‌شود.

راجندران و همکاران^[9] کاربرد ترمز ضد قفل را برای خودروهای الکترونیکی بررسی کرده‌اند. این خودروها همراه با سنسورهای سرعت زاویه ای چرخ، گشتاور ترمز، جابه‌جایی سیستم تعلیق و اندازه‌گیری اینرسی عرضه می‌شوند. این مقاله روشی نو برپایه تخمین میزان لغزش با ترکیب دینامیک خودرو، چرخ و سیستم تعلیق معرفی کرده است. به علت استفاده از داده‌های سنسوری مختلف نمی‌توان از آن برای تشخیص سطح استفاده کرد.

عزیزی و همکاران^[10]، ضمن طراحی فیلتر کالمن توسعه یافته برای سیستم ترمز ضدقفل، اقدام به طراحی الگوریتمی جهت اصلاح تاثیر قیود فیزیکی مربوط به ضریب اصطکاک جاده و لغزش چرخ نموده‌اند. در ادامه، یک کنترل کننده غیرخطی مبتنی بر پیش بین برای محاسبه گشتاور ترمزی طراحی کرده‌اند تا با استفاده از اطلاعات تخمین، گشتاور ترمزی را کنترل کرده و از لغزش تایر و قفل شدن آن جلوگیری نماید. الگوریتم ارائه شده به دلیل نیاز به محاسبات پیچیده و هزینه‌بر، به‌ویژه در شرایط زمان واقعی، محدودیت‌های چشمگیری دارد و از آنجایی که زمان ترمزگیری بسیار کوتاه است و نیاز به پاسخ‌دهی سریع و به‌موقع دارد، اجرای الگوریتم مذکور را در این شرایط دشوار است.

در مقاله باهانداری و همکاران^[11]، برای پوشش خلا عدم وجود داده‌های شتاب در داده‌های سرعت چرخ‌ها، از حسگرهای شتاب‌سنج استفاده شده است، این درحالیست که در بسیاری از خودروهای روز دنیا، به‌ویژه در بازار ایران، این حسگرها وجود نداشته‌اند. با این حال در مقاله حاضر به‌طور خلاصه‌ای از داده‌های سرعت چرخ‌ها برای تخمین شتاب استفاده می‌کند که این تخمین با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از چرخ‌ها و به کمک مدل‌های تحلیلی و تجربی انجام می‌شود و پس از آزمایش

۲- مدل سازی سامانه ترمز ضد قفل

در ترمزهای معمولی راننده نمی‌تواند مقدار گشتاور ترمزی اعمال شده به چرخ را دقیقاً کنترل نماید و چنانچه اطلاع دقیقی از شرایط جاده و لاستیک نداشته باشد با فشردن بیش از حد پدال ترمز، سبب ایجاد ضریب اصطکاک کم میان لاستیک و جاده شده و یا باعث قفل شدن چرخ‌ها میگردد. قفل شدن چرخ‌ها به هنگام ترمزگیری سبب سرخوردن خودرو و همچنین به خطر افتادن ایمنی سرنشینان میگردد. از این جهت همواره محققین به دنبال راهکاری به منظور جلوگیری از این امر بوده‌اند.

لغزش به عنوان یک پارامتر مهم در سامانه ترمز ضد قفل به صورت سرعت نسبی نرمالیزه شده‌ی چرخ و خودرو محاسبه میگردد. عموماً مدل اصطکاک لاستیک-جاده با یک منحنی (یا منحنی‌هایی) از ضریب چسبندگی لاستیک-جاده بر حسب لغزش نمایش داده می‌شود. این منحنی‌ها همواره یک نقطه بیشینه دارند. لغزش مربوط به نقطه بیشینه باعث ایجاد بیشترین اصطکاک بین تایر و جاده می‌گردد که همین امر سبب توقف سریع‌تر خودرو می‌شود. ضریب چسبندگی یا همان ضریب اصطکاک لاستیک-جاده به سرعت وسیله نقلیه، نیروی نرمال و عوامل دیگر وابسته می‌باشد که نمونه‌ای از این وابستگی در [13,14] نشان داده شده است. بعضی از محققین مقدار لغزش را به صورت مصالحه، برای تمامی شرایط جاده‌ای که خودرو در آن واقع می‌شود، یکسان در نظر می‌گیرند و باتوجه به این مقدار لغزش، سامانه کنترل ترمز خودرو را تنظیم می‌نمایند [15].

ترمز ضد قفل از این جهت اهمیت دارد که با در نظر گرفتن لغزش بهینه، علاوه بر طی شدن کمترین مسافت برای توقف به جهت قفل نشدن چرخ‌ها، سبب پایداری و قدرت کنترل وسیله نقلیه به هنگام ترمزگیری نیز می‌گردد. همان‌طور که ذکر شد، برای محاسبه لغزش به سرعت چرخ و خودرو نیاز می‌باشد. سرعت چرخ به راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد اما سرعت خودرو به سادگی قابل محاسبه نمی‌باشد. از این جهت محققین از سنسورها و یا جهت‌یاب‌های جغرافیایی برای کاربردهای عملی استفاده کرده‌اند که این امر بسیار هزینه‌بردار بوده است [16]. از این جهت بسیاری از تحقیقات به سمت طراحی تخمینگرهای سرعت پیش رفته‌اند که می‌توان به استفاده از فیلترهای کالمن و کالمن توسعه‌یافته اشاره کرد [17]. به علت نیاز این تخمینگرها برای دسترسی به گشتاور ترمزی، تخمینگری در [18] طراحی گردیده است که نیاز به اندازه‌گیری گشتاور ترمزی ندارد. اما بکار بردن مدل‌های اصطکاک استاتیکی بر خالف مدل‌های دینامیکی در [18,19]، باعث نادیده گرفتن بسیاری از پدیده‌های فیزیکی در مدل اصطکاک لاستیک-جاده از قبیل حلقه‌های هیستریزیس و جابه‌جایی پیش لغزش، می‌گردد.

۲-۱- مدل اصطکاک

وسیله نقلیه به هنگام ترمزگیری از باد، لرزش سامانه تعلیق و مواردی دیگر تاثیر می‌پذیرد. بدین منظور توصیف دقیق و کامل دینامیک‌های ترمز ضد قفل سخت می‌باشد، اما دو فرض اساسی و مهم، حرکت وسیله نقلیه در یک جاده سطح صاف و همچنین صرف نظر کردن از دینامیک‌های ناشی از چرخش حول محور عمودی در نظر گرفته می‌شود. مولفه مهم لغزش در هنگام ترمزگیری به صورت زیر تعریف می‌گردد.

با استفاده از شتاب به دست آمده از لغزش چرخ‌ها به صورت دقیق می‌توان از مدل بورکهارت [20] کمک گرفت. بورکهارت به مطالعه پیرامون تأثیر شرایط مختلف آب و هوایی و همچنین تغییر سطح جاده روی مقدار ضرایب اصطکاک مطالعه داشت. او نشان داد که ضرایب اصطکاک تابع غیرخطی از میزان لغزش روی سطح جاده است. در این راستا مدلی را ارائه داده است که برای شرایط مختلف تابع نمایی شکلی از مقدار لغزش است و شرایط مختلف جاده‌ای، ضرایب این تابع را مشخص می‌سازد.

مسلماً با افزایش مقدار لغزش چرخ روی سطح جاده بر اساس شواهد شهودی، مقدار اصطکاک نیز افزایش می‌یابد تا به مقدار بیشینه خود برسد. سپس با افزایش مقدار لغزش، مقدار اصطکاک به تدریج کاهش می‌یابد تا مقدار ثابتی را در نهایت داشته باشد؛ بنابراین برای هر شرایط جاده‌ای اعم از آب‌وهوایی یا نوع جاده، مقدار بهینه‌ای در مقدار لغزش وجود دارد که در آن مقدار، میزان اصطکاک وارد بر خودرو بیشینه است.

معادله (۱)، تابعی است که بورکهارت برای ضریب اصطکاک لاستیک چرخ با سطح جاده نسبت به مقادیر مختلف پارامتر لغزش نوشته است [21].

$$\mu_x = c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda \quad (1)$$

μ_x که ضریب اصطکاک وارد بر چرخ است، در آن $i (i = 1, 2, 3)$ پارامترهایی هستند که توسط شرایط جاده‌ای مانند بارانی، برفی و غیره مشخص می‌شود. ضرایب این تابع برای شرایط مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

پارامتر λ نیز طبق رابطه‌ی (۲) است. [22]

$$\lambda = \frac{V - R\omega}{V} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، V سرعت خودرو و R شعاع چرخ و ω سرعت زاویه‌ای چرخ است. مقدار λ بین محدوده‌ی صفر تا یک است. مقدار صفر در زمانی است که سرعت چرخ با سرعت خودرو یکی است. به عبارت دیگر هنوز ترمز گرفته نشده است. مقدار یک نیز در زمانی است که چرخ‌ها قفل شده است که در این حالت مقدار سرعت زاویه‌ای چرخ برابر صفر است.

۲-۳- مدل حرکتی یک چهارم خودرو

یک لاستیک همراه با گشتاور حرکتی T_i و گشتاور ترمزی T_b ، دارای معادلات دیفرانسیلی دینامیک‌های طولی و دورانی وسیله نقلیه به صورت زیر می‌باشد.

$$\dot{\omega} = \frac{T_i - T_b}{J} = \frac{RF_x - K_b P_i}{J} \quad (5)$$

$$\dot{v} = \frac{-F_x}{m_q} \quad (6)$$

v سرعت وسیله نقلیه، F_x نیروی عکس العمل طولی، m_q جرم یک چهارم خودرو، ω سرعت زاویه‌ای وسیله نقلیه، J ممان اینرسی، K_b بهره بین فشار ترمز (ورودی) و T_b گشتاور ترمزی است و R شعاع چرخ می‌باشد. [25]

۳- الگوریتم برخط تشخیص سطح

برای پیاده سازی الگوریتم تشخیص سطح باید بررسی کرد که چگونه می‌توان از قفل شدن چرخ‌ها بر روی سطوح مختلف جلوگیری کرد. به طور کلی با توجه به نحوه طراحی سیستم انتقال نیرو خودرو در شرایط ترمزگیری، نباید اجازه داد که یکی از چرخ‌های خودرو نسبت به سایر چرخ‌ها دارای سرعت دوران بیشتر یا کمتر باشد چراکه ممکن است آن چرخ قفل شود، برای این منظور با استفاده از سنسور قراگرفته بر روی هر چرخ شرایط هرکدام بررسی شود.

در مقالات حوزه سامانه‌های ترمز ضد قفل، اکثر مطالعات بر اساس فرض وجود حسگرهای شتاب‌سنج در خودروها استوارند، در حالی که در بسیاری از خودروهای موجود در بازار ایران این حسگرها به‌طور مستقیم در ماژول ABS وجود ندارند و تنها داده‌های قابل دسترسی برای تشخیص سطح، سرعت زاویه‌ای هر چرخ $\omega_i(t)$ است. بنابراین، توسعه روش نوآورانه برای تحلیل و شناسایی نوع سطح جاده با استفاده از این داده‌های محدود و ارزیابی کیفیت نتایج با داده‌های واقعی حاصل از آزمون‌های عملی ضروری است. در این راستا، نیاز به طراحی الگوریتم‌های کنترلی خاصی است که قادر به شبیه‌سازی چگونگی باز و بسته شدن شیرهای ABS و تغییر فشار ترمز در زمان‌های مختلف بوده و به‌طور دقیق کیفیت ترمزگیری را بر اساس نوع سطح جاده‌ای که در آن ترمزگیری صورت می‌گیرد، تعیین کنند.

تشخیص سطح اشتباه باعث ارسال دستورات کنترلی نادرست می‌شود. نتیجه این امر ایجاد ناپایداری در حرکت خودرو و بروز حادثه می‌شود. از این جهت تشخیص سطح در همان ابتدای ترمزگیری از اهمیت بالایی دارد.

بر این اساس برای بدست آوردن الگوریتم برخط تشخیص سطح مناسب نیاز است، ابتدا مفاد استانداردهای لازم جهت تایید ABS، بررسی می‌شود چراکه برای ارزیابی الگوریتم معیارهایی وجود دارد که شناخت آن موجب می‌شود تشخیص سطح با کیفیت بالاتری

جدول ۱) پارامترهای مدل بورکهارت به‌ازای شرایط مختلف جاده

نوع سطح	c_1	c_2	c_3
آسفالت خشک	۱/۲۸	۲۳/۹۹	۰/۵۲
آسفالت تر	۰/۸۶	۳۳/۸۲	۰/۳۵
برفی	۰/۱۹	۹۴/۱۳	۰/۰۶
یخی	۰/۰۵	۳۰۶/۳۹	۰
سنگ‌فرش خشک	۱/۳۷	۶/۴۶	۰/۶۷
سنگ‌فرش تر	۰/۴	۳۳/۷۱	۰/۱۲

مقدار بهینه لغزش در مدل بورکهارت، هنگامی به دست می‌آید که با مشتق‌گیری از رابطه (۲) و برابر قرار دادن با صفر حاصل می‌شود که رابطه‌ی (۳) نیز به آن اشاره دارد.

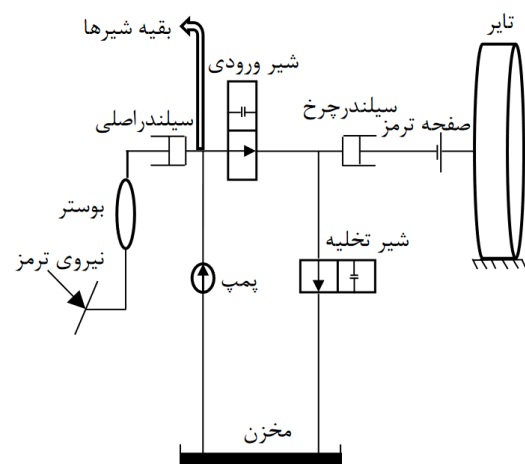
$$\lambda_0 = \frac{\ln(c_1 c_2) - \ln(c_3)}{c_2} \quad (3)$$

باتوجه به اینکه هنگام ترمزگیری تنها نیروی اصطکاک به خودرو وارد می‌شود، لذا شتاب خودرو با نیروی اصطکاک وارده به خودرو بر طبق قانون دوم نیوتن، متناسب است. براین اساس می‌توان شتاب خودرو را تابعی از نیروی اصطکاک به دست آورد.

۲-۲- انتقال نیروی هیدرولیکی

ترمز اغلب خودروها از نوع هیدرولیک است که می‌توان شکل ۱ را نمونه‌ای از نمایش ساده آن دانست. اگر شیر تخلیه باز و شیر ورود بسته باشد آن‌گاه سیال در جهت کاهش فشار خود به مخزن برمی‌گردد و فشار از پشت لاستیک، به‌صورت کاهشی در می‌آید و اگر دریچه ورود باز و دریچه تخلیه بسته باشد فشار پدال به پشت لاستیک درحال انتقال می‌باشد. با صرف نظر کردن از مقاومت سیال در لوله و مشخصات سیال می‌توان گشتاور ترمزی را به صورت تابعی از فشار ترمز معرفی نمود. [23]

$$T_b = K_b P_i \quad (4)$$

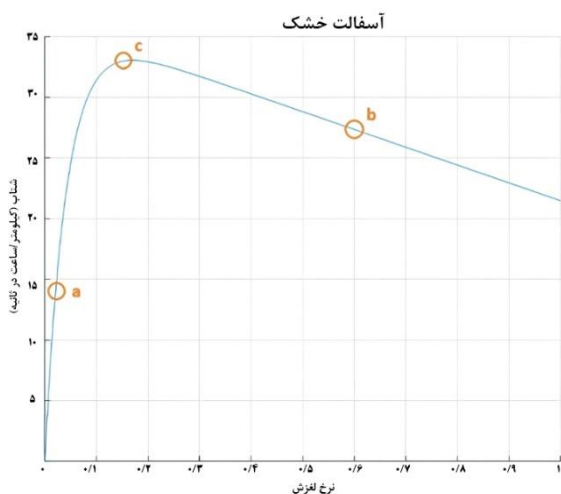


شکل ۱) نمایش ساختار کلی ترمز هیدرولیک خودرو [24]

بهینه‌سازی و بر اساس داده‌های دریافتی از هر چرخ در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شود. لازم به ذکر است خط آستانه به‌عنوان میانگین وزنی سرعت چرخ‌ها در نقاط اکسترمم تعریف می‌شود تا بهترین تطابق را با داده‌ها داشته باشد، در ادامه تفاوت بین آستانه بهینه و اکسترمم بعدی محاسبه می‌شود و بر اساس این تفاوت، ضرایب کنترلی برای تنظیم فشار ترمز و بهینه‌سازی عملکرد سیستم ABS صادر می‌شود. این فرآیند به‌طور مداوم تا پایان مسیر ترمزگیری ادامه می‌یابد. یکی از ویژگی‌های برجسته این الگوریتم، توانایی آن در تشخیص برخط نوع سطح جاده است که با تحلیل پیوسته داده‌های سرعت چرخ‌ها و شناسایی تغییرات در رفتار ترمزگیری، الگوریتم قادر است نوع سطح جاده را به‌طور دقیق تعیین کند.

این الگوریتم با ارائه این ویژگی‌ها، بهبود قابل توجهی در عملکرد سامانه ABS ارائه می‌دهد و به‌ویژه در شرایط متغیر جاده و ترمزگیری به دقت و کارایی بیشتری دست می‌یابد.

۳-۱- بهره‌گیری از لغزش چرخ‌ها به صورت تخمین خطی با سه بازه
همان‌گونه که در بخش‌های قبل مطرح شده، رابطه بورکهارت را نمی‌توان به صورت مستقیم به میکروکنترلر داد، لذا نیاز است برای بدست آوردن ضرایب اصطکاک چرخ‌ها و در نتیجه تخمین سطح، از رابطه بورکهارت استفاده کرد. دو روش تخمین سه نقطه‌ای و پنج نقطه‌ای استفاده شده است که در این بخش و بخش بعد مطرح خواهند شد. در این روش سعی بر این است رابطه بورکهارت به کمک دو خط تخمین زده شود و برای رسم این دو خط، نیاز است سه نقطه بر روی این نمودار انتخاب شود. لازم به ذکر است چگونگی انتخاب سه نقطه بر روی دقت تخمین سطح تاثیر بسزایی دارد. در شکل ۲ نحوه انتخاب این سه نقطه برای سطح آسفالت خشک رسم شده است.



شکل ۲ محل قرارگیری سه نقطه برای تخمین شتاب و در نتیجه تشخیص سطح از روی نمودار بورکهارت برای سطح خشک

انجام شود و در نهایت نتایج خروجی مقایسه شوند تا از عملکرد و کیفیت نتایج اطمینان حاصل شود.

الزامات و استانداردهای سامانه ترمز ضد قفل جهت طراحی الگوریتم برخط تشخیص سطح:

- سرعت خودرو تا حد امکان هنگام ترمزگیری باید نزولی باشد. این قید براساس فیزیک مسئله استنباط شده است. هنگام ترمزگیری انرژی خودرو کاهش می‌یابد لذا سرعت خودرو که نمایانگر انرژی جنبشی آن است باید کاهش یابد.

- تشخیص سطح باید با در نظر گرفتن تغییرات سرعت چرخ‌ها صورت گرفته باشد و نسبت به تغییرات آن‌ها بی تفاوت نباشد. زیرا در ترمز ضد قفل سرعت خودرو تابعی از سرعت چرخ‌ها می‌باشد.

- الگوریتم تشخیص سطح پیشنهادی بایستی به صورت برخط عمل کند. هنگام ترمزگیری در هر لحظه ای که سرعت چرخ‌ها اندازه‌گیری شدند و ترمز ضد قفل فعال شد بایستی سطح برای خودرو تشخیص داده شود، در غیر اینصورت الگوریتم به صورت برون خط عمل کرده که موجب دور شدن از هدف کنترلی، افزایش خط ترمز و لغزش چرخ‌ها در سطح می‌شود.

- یکی از ملاحظات آنکه در این الگوریتم مورد توجه قرار گرفته است، آن است که علاوه فعال شدن الگوریتم در ابتدای ترمزگیری جهت تشخیص سطح، الگوریتم در طول و تا پایان مسیر همواره به تشخیص سطح پرداخته می‌شود. این بدان معناست که اگر خودرو از سطحی به سطح دیگر حرکت کند، قادر به تشخیص این مدل رفتار و تشخیص تغییر سطح خواهد بود.

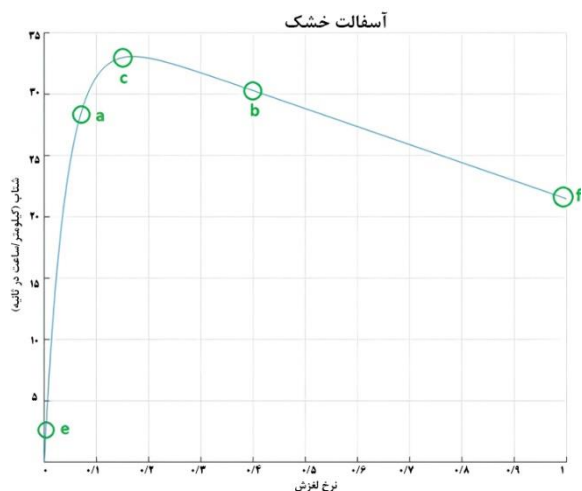
- آزمون‌های عملی مربوط به سطوح به سه دسته تقسیم می‌شوند:

(۱) چرخ‌ها در کل زمان ترمزگیری بر روی یک نوع سطح قرار دارند، به‌طور مثال از ابتدا تا انتهای فرآیند بر روی سطح خشک ترمزگیری صورت گرفته است.

(۲) چرخ‌ها در ابتدای ترمزگیری روی یک سطح قرار دارند و پس از گذشت مدتی سطح تغییر می‌کند. این نوع آزمون، پرش (Jump) نام دارد.

(۳) در کل زمان ترمزگیری چرخ‌های یک سمت روی یک نوع سطح و چرخ‌های سمت دیگر روی نوع دیگری از سطح قرار دارند که این آزمون دویخشی (Split) نامیده می‌شود.

در الگوریتم پیشنهادی، ابتدا به شناسایی اکسترمم‌های سرعت چرخ‌ها پرداخته می‌شود، الگوریتم با تحلیل داده‌های سرعت زاویه‌ای هر چرخ، نقاط اکسترمم (بیشینه‌ها و کمینه‌ها) را شناسایی می‌کند. این شناسایی بر مبنای مشتقات عددی اول و دوم داده‌های سرعت انجام می‌شود. به عبارتی، با استفاده از تغییرات سرعت چرخ‌ها، نقاطی را که سرعت در آنها بیشینه یا کمینه می‌شود، شناسایی می‌کند، پس از شناسایی اکسترمم‌ها، یک خط آستانه بهینه برای مقایسه با داده‌های سرعت چرخ‌ها ترسیم می‌شود که این خط آستانه به‌وسیله الگوریتم‌های



شکل ۳) محل قرارگیری پنج نقطه برای تخمین شتاب و در نتیجه تشخیص سطح از روی نمودار بورکهارت برای سطح خشک

جدول ۳) نقاط تخمین شتاب به منظور استفاده در الگوریتم نوین تخمین سطح در روش پنج نقطه‌ای

آسفالت خشک				
$f = 1$	$b = 0.04$	$c = 0.16$	$a = 0.09$	$e = 0.008$
$a_f = 22$	$a_b = 31$	$a_c = 33$	$a_a = 27$	$a_e = 3$
آسفالت خیس				
$f = 1$	$b = 0.06$	$c = 0.1$	$a = 0.04$	$e = 0.008$
$a_f = 14$	$a_b = 18$	$a_c = 22$	$a_a = 9$	$a_e = 2$
آسفالت دو بخشی				
$f = 1$	$b = 0.32$	$c = 0.125$	$a = 0.065$	$e = 0.008$
$a_f = 18$	$a_b = 24/5$	$a_c = 27/5$	$a_a = 18$	$a_e = 2/5$

نقطه‌ای برای تشخیص سطح از عملکرد بهتری برخوردار است. در جدول ۳، نقاط تخمین شتاب به منظور استفاده در الگوریتم نوین تخمین سطح در روش پنج نقطه‌ای برای سطوح آسفالت خشک و آسفالت خیس و آسفالت دو بخشی آورده شده است. مزیت قابل توجه این روش کیفیت بالای تشخیص سطح در سطوح مختلف و در همان ابتدای فعال شدن ترمز ضد قفل است، در روش پنج نقطه‌ای قابلیت تنظیم ضرائب کنترلی وابستگی کمتری نسبت به محل قرارگیری نقاط دارد. لازم به ذکر است که روش پنج نقطه‌ای حجم محاسبات بالایی دارد.

۴- شبیه‌سازی الگوریتم بر روی داده‌های تست عملی

به منظور آزمودن الگوریتم پیشنهادی تشخیص سطح، بر روی خودروی پژو پارس تجهیزات لازم نصب گردید و بر روی سطوح مختلف شامل آسفالت خشک، آسفالت خیس و سطح دوبخشی با سرعت‌های مختلف، آزمون ترمز ضد قفل گرفته شد و داده‌های مربوط به رفتار ترمزگیری هر چرخ استخراج شد. از آنجایی که سرعت سنج بر روی خودروهای موجود در بازار ایران نصب نمی‌باشد لذا برای بررسی رفتار هر چرخ، تنها داده در دسترس مربوط به حسگرهای سرعت چرخ می‌باشد که این حسگرها بر روی هر یک از چرخ‌های خودرو نصب شده‌اند و سرعت چرخ را اندازه‌گیری

جدول ۲) نقاط تخمین شتاب به منظور استفاده در الگوریتم نوین تخمین سطح در روش سه نقطه‌ای

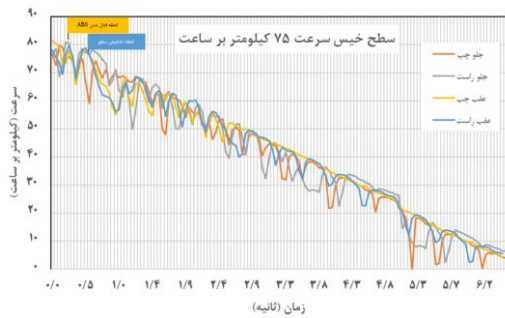
آسفالت خشک (Dry Asphalt)		
$b = 0.06$	$c = 0.15$	$a = 0.06$
$a_b = 27$	$a_c = 33$	$a_a = 14$
آسفالت خیس (Wet Asphalt)		
$a = 0.04$	$a = 0.04$	$a = 0.04$
$a_a = 15$	$a_a = 15$	$a_a = 15$
آسفالت دو بخشی (Split Asphalt)		
$a = 0.05$	$a = 0.05$	$a = 0.05$
$a_a = 14/5$	$a_a = 14/5$	$a_a = 14/5$

طبق شکل ۲ نقطه c بیشینه این نمودار و دونقطه a و b در دو سوی این نمودار انتخاب شده‌اند. تاکید می‌شود که این نقاط از روی نمودار تابع اصلی بورکهارت استخراج می‌شوند، لذا نظر به این که این تابع در سطوح مختلف مقادیر گوناگونی دارند، مقدار اختصاص یافته به این نقاط در سطوح مختلف متفاوت است. در این روش تابع اصلی بورکهارت به کمک دو خط تخمین زده می‌شود. زمانی که مقدار لغزش چرخ کوچک‌تر از مقدار نقطه a و یا بزرگتر از مقدار نقطه b باشد، مقدار ضریب اصطکاک صفر تخمین زده می‌شود و برای بهبود این روش محل نقاط a و b تغییرات بسیاری داشته است تا نقاط فوق بدست آمده است. در جدول ۲، نقاط تخمین شتاب به منظور استفاده در الگوریتم نوین تخمین سطح در روش سه نقطه‌ای برای سطوح آسفالت خشک و آسفالت خیس و آسفالت دو بخشی آورده شده است.

مزیت اصلی روش تخمین سطح سه نقطه‌ای، قابلیت تنظیم نقاط نمودار از طریق تغییر محل نقاط a و b و c می‌باشد و همچنین محدود بودن محاسبات تشخیص سطح از دیگر مزیت این روش می‌باشد، اما معایب این روش آن است که در صورت اشتباه در تشخیص سطح، کیفیت صدور ضرائب کنترلی به شدت کاهش می‌یابد، این بدان معناست که تشخیص سطح نامناسب خواهد بود.

۳-۲- بهره‌گیری از لغزش چرخ‌ها به صورت تخمین خطی با پنج بازه

این روش مشابه تخمین سه نقطه‌ای است، با این تفاوت که بجای سه نقطه از پنج نقطه به منظور استفاده در الگوریتم نوین تخمین سطح استفاده شده است که این نقاط در شکل ۳ روی نمودار تابع بورکهارت انتخاب شده‌اند. چهار خط از نقاط e به a، a به c، c به b و b به e رسم می‌شوند. با توجه به مقدار لغزش، مقدار نیروی اصطکاک با توجه به این خطوط مشخص می‌شوند، لذا در صورتی که مقدار لغزش کوچکتر از مقدار e و یا بزرگتر از مقدار f باشد، مقدار نیروی اصطکاک به صورت تخمینی برابر صفر قرار داده می‌شود. پر واضح است که این روش به علت استفاده از نقاط بیشتر برای تخمین تابع بورکهارت استفاده کرده است، در نتیجه از دقت بالاتری برخوردار باشد اما حجم محاسبات بیشتری را نیاز دارد، لذا با توجه به مقایسه نتایج تخمین سه نقطه‌ای و پنج نقطه‌ای با نتایج حاصل از تابع اصلی بورکهارت، نتیجه می‌شود که استفاده از روش پنج



شکل ۵) سرعت ۷۵ کیلومتر بر ساعت در سطح خیس، چرخ جلو سمت چپ

۴-۳- آزمایش بر روی سطح دو بخشی

اگر در حین زمان ترمزگیری چرخ‌های یک سمت روی یک نوع سطح و چرخ‌های سمت دیگر روی نوع دیگری از سطح قرار بگیرد، این سطح دوبخشی (split) نامیده می‌شود. هنگام ترمزگیری در مسیر دوبخشی، نیروی ترمزی و نیروی فرمان خودرو تاثیر بسزایی در پایداری خودرو دارند زیرا نیروی ترمز برای دو چرخ جانبی متفاوت است و در نتیجه این تفاوت سطح باعث چرخش خودرو می‌شود. راننده خودرو به منظور برگرداندن تعادل و پایداری به خودرو، نیرویی به فرمان خودرو وارد می‌کند که اغلب در این شرایط زاویه فرمانی که راننده بر روی فرمان تحمیل می‌کند باعث انحراف بیشتر خودرو می‌شود.

تنظیم فشار نیروی ترمزی بین چرخ‌های دو طرف به منظور بازگرداندن پایداری به خودرو امری بسیار دشوار است، چرا که نیروی جانبی اصطکاک نمی‌تواند به آستانه خود برسد و تفاوت سطح را جبران نماید. به منظور مقابله با این مشکل، در الگوریتم نوین برخط تشخیص سطح، ابتدا بر اساس نمودار رفتار هر چرخ دوبخشی بودن مسیر بررسی می‌گردد، در صورت تشخیص دوبخشی بودن رفتار هر چرخ به تنهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس طبق تفاوت سرعت هر چرخ مشخص می‌شود که کدام دو چرخ بر روی چه سطحی هستند. در نهایت متناسب با تشخیص داده شده ضرائب کنترلی مربوطه اعمال می‌شود. در تصاویر زیر نمونه‌ای از دوبخشی بودن سطح آورده شده است. طبق شکل ۶ چرخ‌های سمت چپ بر روی آسفالت خیس و چرخ‌های سمت راست در حین ترمزگیری بر روی آسفالت خشک بوده‌اند.



شکل ۶) سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت در سطح دوبخشی، چرخ جلو سمت چپ

می‌کنند که در این بخش نمودار مربوط به هر یک از آزمون‌هایی که با سرعت مختلف بر روی سطوح مختلف انجام شده، ترسیم گردیده است. داده‌های مربوط به هر چرخ در هر آزمون به عنوان ورودی به الگوریتم نوین برخط برای تشخیص نوع سطح در سامانه ترمز ضد قفل داده شده است و زمان فعال شدن ترمز ضد قفل و زمان تشخیص سطح در تصاویر مربوط به هر سطح آورده شده است. لازم به ذکر از که ۶۵ آزمون عملی انجام شده است که در این بخش تنها نمودار سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت در سطح خشک، سرعت ۵۰ و ۷۰ کیلومتر بر ساعت در سطح خیس و سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت در سطح دوبخشی آورده شده است.

۴-۱- تشخیص سطح خشک

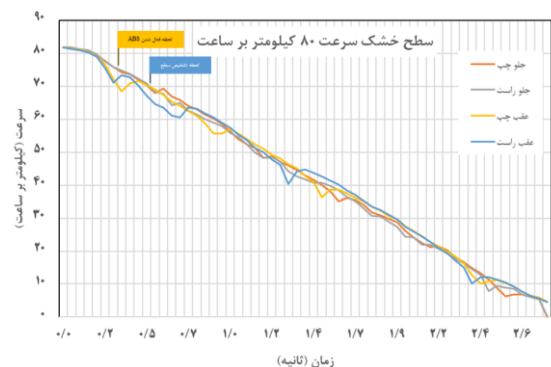
از آنجایی که اقلیم آب و هوایی کشور عزیزمان ایران در اغلب اوقات خشک و آفتابی است و سطوح مسیرها خشک می‌باشد لذا برای استخراج داده‌های عملی ترمزگیری بر روی سطح آسفالت خشک، با سرعت‌های مختلف اقدام به ترمزگیری شد.

این سرعت‌ها بر اساس میانگین سرعت مجاز خودروها در سطح شهری و سطح بین شهری (سرعت ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۱۰ کیلومتر بر ساعت) بدست آمدند و نمودار رفتاری چرخ‌ها به عنوان ورودی به الگوریتم برخط تشخیص سطح داده شد و زمان فعال شدن ترمز ضد قفل و همچنین زمان تشخیص سطح مشخص گردید.

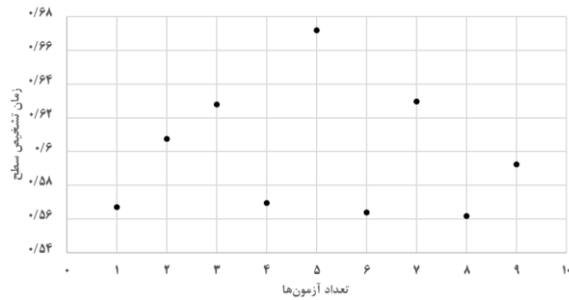
۴-۲- سطح خیس

باتوجه به مناطق شمالی و شمال غرب کشور که اغلب آب و هوای بارانی دارد و در دیگر نقاط کشور نیز که باران را تجربه می‌کنند، در نتیجه این نیاز احساس شد که برای استخراج داده‌های عملی ترمزگیری بر روی سطح آسفالت خیس، با سرعت‌های مختلف اقدام به ترمزگیری شود.

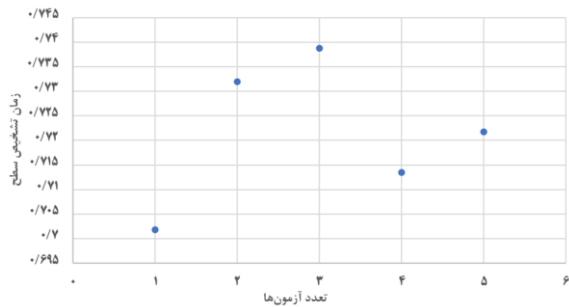
این سرعت‌ها در سطح شهری و سطح بین شهری (سرعت ۵۰، ۶۰ و ۷۵ کیلومتر بر ساعت) بدست آمدند. برای این بخش نیز نمودار رفتاری هر چرخ به عنوان ورودی به الگوریتم برخط تشخیص سطح داده شد و زمان فعال شدن ترمز ضد قفل و همچنین زمان تشخیص سطح مشخص گردید.



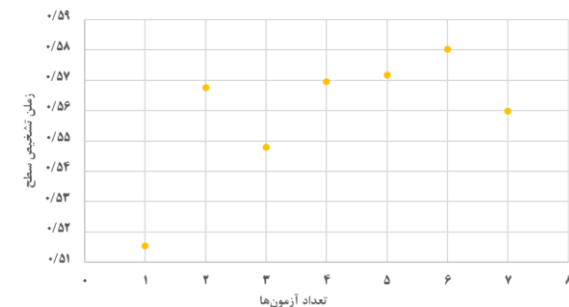
شکل ۷) سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت در سطح خشک



شکل ۷) زمان تشخیص سطح در ۹ آزمون عملی سطح خشک



شکل ۸) زمان تشخیص سطح در ۵ آزمون عملی سطح خیس



شکل ۹) زمان تشخیص سطح در ۷ آزمون عملی سطح دوبخشی

تعیین $K_{\mu-split}$ ضریبی است که می‌تواند تفاوت لغزش چرخ دو طرفه را در صورتی که دو بار پشت سرهم علامت باقی مانده مثبت باشد سطح خشک است و اگر دو بار پشت سرهم علامت باقی مانده منفی باشد سطح خیس تشخیص داده می‌شود. لازم به ذکر است که سطح به صورت پیش فرض خشک انتخاب می‌شود تا زمانی که دو بار پشت سرهم علامت باقی مانده منفی شود. پیش از تشخیص خیس یا خشک بودن سطح، بایستی دوبخشی بودن آن نیز بررسی شود. در صورتی که سطح دوبخشی بود دیگر نیازی به بررسی علامت باقی مانده نیست. نتیجه پیاده سازی الگوریتم پیشنهاد شده در دو مقاله فوق و بررسی آن با این پژوهش در شکل ۱۰ آورده شده است.

۴-۴- جمع بندی نتایج و بررسی سرعت تشخیص سطح

در این پژوهش، ۶۵ آزمون عملی بر روی سطوح خشک، خیس و دوبخشی انجام شده است که از این تعداد، ۲۱ آزمون عملی در الگوریتم برخط تشخیص سطح مورد بررسی قرار گرفته و زمان تشخیص سطح متناسب با سطح ترمزگیری استخراج شده است. در آزمون‌های عملی انجام شده، زمان فعال شدن ترمز ضدقفل در سطح خشک برابر ۰/۳۵ ثانیه بعد از ترمزگیری شدید می‌باشد و همان طوری که در شکل ۷ دیده می‌شود متوسط زمانی برای تشخیص سطح خشک برابر ۰/۶ ثانیه است یعنی ۰/۲۵ ثانیه بعد از فعال شدن ترمز ضدقفل، همچنین برای سطح خیس، زمان فعال شدن ترمز ضدقفل برابر ۰/۴۵ ثانیه بعد از ترمزگیری شدید بوده و مطابق شکل ۸، متوسط زمانی برای تشخیص سطح خیس برابر ۰/۷۲ ثانیه است یعنی ۰/۲۷ ثانیه بعد از فعال شدن ترمز ضدقفل و در نهایت برای سطح دوبخشی، زمان فعال شدن ترمز ضدقفل برابر ۰/۳۰ ثانیه بعد از ترمزگیری شدید بوده و مطابق شکل ۹، متوسط زمانی برای تشخیص سطح دوبخشی برابر ۰/۵۶ ثانیه است یعنی ۰/۲۶ ثانیه بعد از فعال شدن ترمز ضدقفل.

۴-۵- مقایسه نتایج الگوریتم ارائه شده با الگوریتم‌های دیگر

برای صحت سنجی سطح دوبخشی، مقاله سونگ [26] و فنگ [27] مورد بررسی قرار گرفت که در ادامه و روابط این دو مقاله آورده شده است. هنگامی که کاهش سرعت یکی از چرخ‌های جلو به مقدار آستانه می‌رسد و فشار کاهش می‌یابد، معادله (۷) و (۸) برای محاسبه انتگرال لغزش دو چرخ جلو اعمال می‌شود. لغزش حاصل تفاوت سرعت مرجع و سرعت چرخ جلو است [21].

$$S_{fl}^n = \int_{T_a^n}^{T_b^n} |V_{fl} - V_{ref}| dt \quad (7)$$

$$S_{fr}^n = \int_{T_a^n}^{T_b^n} |V_{fr} - V_{ref}| dt \quad (8)$$

که S_{fl}^n ، S_{fr}^n ، n امین انتگرال لغزش در چرخ چپ و n امین انتگرال از لغزش در چرخ راست است.

ویژگی‌های لغزش سرعت هر دو چرخ جلو در وضعیت تخلیه فشار در جاده با ضریب چسبندگی ثابت تقریباً یکسان است، انتگرال‌های لغزش پایدار هستند و تغییرات بسیار کم است. در حالی که در جاده دوبخشی، لغزش چرخ در جاده با اصطکاک کم افزایش می‌یابد، و تفاوت انتگرالی بین لغزش چرخ دوطرفه در رابطه (۹) به ترتیب افزایش می‌یابد. [25]

$$|S_{fl}^n - S_{fr}^n| \quad (9)$$

هنگامی که اختلاف انتگرال با فرمول (۱۰) مطابقت می‌کند، می‌توان استنباط کرد که ترمز در جاده دوبخشی است.

$$|S_{fl}^n - S_{fr}^n| > K_{\mu-split} \cdot \max(S_{fl}^n, S_{fr}^n) \quad (10)$$

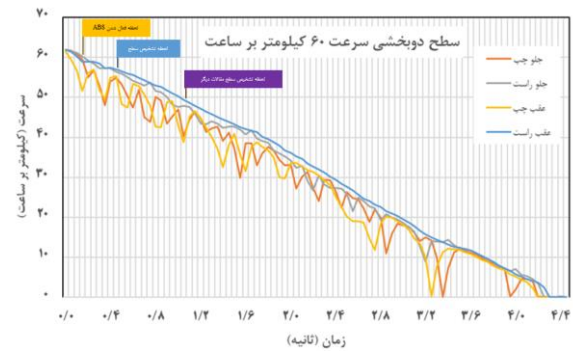
درصدی در زمان تشخیص نسبت به سایر روش‌ها سریع‌تر عمل می‌کند و مزیت‌هایی از جمله کاهش خطای ترمزگیری و کاهش هزینه‌های محاسباتی را ارائه می‌دهد، همچنین عملکرد الگوریتم ارائه‌شده در تست دوبخشی با یک پژوهش دیگر مقایسه شد که برتری الگوریتم این مقاله در سرعت و دقت تشخیص سطح نمایان است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Cristescu AC, Filip I, Stefan V, Popa L, Ipate G, Voicu G. Car braking system—general aspects in a review. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering*. 2022 Apr 1;15(2):105-10.
- 2- Hoseinnezhad R, Bab-Hadiashar A. Efficient antilock braking by direct maximization of tire–road frictions. *IEEE Trans Ind Electron*. 2010 Sep 30;58(8):3593-600.
- 3- Ahn C, Kim B, Lee M. Modeling and control of an anti-lock brake and steering system for cooperative control on split- μ surfaces. *Int J Automot Technol*. 2012 Jun;13:571-81.
- 4- Golmohammadi MH, Mirzaei M, Najjari B. Design of anti-lock braking system compatible with different road conditions for trucks. *Iranian Mechanical Engineering Journal*. (In Persian).
- 5- Choi M, Oh JJ, Choi SB. Linearized recursive least squares methods for real-time identification of tire–road friction coefficient. *IEEE Trans Veh Technol*. 2013 Apr 25;62(7):2906-18.
- 6- Shi Y, Li B, Luo J, Yu F. A practical identifier design of road variations for anti-lock brake system. *Veh Syst Dyn*. 2019 Mar 4;57(3):336-68.
- 7- Koylu H, Tural E. Experimental study on braking and stability performance during low-speed braking with ABS under critical road conditions. *Eng Sci Technol Int J*. 2021 Oct 1;24(5):1224-38.
- 8- Hosseini Salari, Mirzaei Nejad. Improving the performance of anti-lock braking system by considering the turning dynamics and longitudinal slip reference model based on neural network. *Iranian Mechanical Engineering Journal*. 2024. (In Persian).
- 9- Rajendran S, Spurgeon SK, Tsampardoukas G, Hampson R. Estimation of road frictional force and wheel slip for effective antilock braking system (ABS) control. *Int J Robust Nonlinear Control*. 2019 Feb 1;29(3):736-65.
- 10- Azizi M, Rafatnia S. Constrained nonlinear estimation of road friction coefficient and wheel slip for control of anti-lock braking system. *J Control*. 2021 May 10;15(1):67-78. (In Persian).
- 11- Bhandari R, Patil S, Singh RK. Surface prediction and control algorithms for anti-lock brake system.



شکل ۱۰) تفاوت زمانی تشخیص سطح الگوریتم پیشنهاد شده در دو مقاله فوق و این پژوهش در چرخ جلو سمت چپ در سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت بر روی سطح دوبخشی

همان‌طور که در تصاویر بالا دیده می‌شود، الگوریتم این پژوهش بعد از فعال شدن ترمز ضدقفل در لحظه ۰/۵۶ ثانیه دوبخشی بودن سطح را تشخیص داده است، اما در مقالات دیگر در لحظه ۱/۱ ثانیه سطح تشخیص داده شده است.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش ابتدا به مروری بر مقالات حوزه تشخیص سطح پرداخته شد. در این مقالات فرض شده است، خودرو دارای حسگر شتاب‌سنج است که در واقعیت این فرض صادق نیست؛ حال آن‌که در بسیاری از خودروهای موجود در بازار ایران این حسگرها وجود ندارند و تنها داده‌های سرعت زاویه‌ای چرخ‌ها در دسترس است. لذا، نیاز به توسعه روش‌های نوآورانه برای تحلیل و شناسایی نوع سطح جاده با استفاده از داده‌های محدود سرعت زاویه‌ای و ارزیابی کیفیت نتایج با استفاده از آزمون‌های عملی مشخص شد. لذا نیاز است روش‌های مختلفی بر روی مدل دینامیکی شبیه‌سازی شده و داده‌های واقعی گرفته شده در تست اجرا شود. در این مقاله، الگوریتم برخط جدیدی معرفی شده که به جای مدل‌سازی ریاضی پیچیده، از داده‌های عملی واقعی استفاده می‌کند و برخلاف روش‌های سنتی که به مدل‌های نیمه‌خودرو و شبیه‌سازی‌های دینامیکی لاستیک تکیه دارند، بر روی داده‌های واقعی چرخ‌ها توسعه یافته است. این رویکرد باعث افزایش حساسیت و تطبیق‌پذیری الگوریتم نسبت به تغییرات جاده و شرایط متغیر عملیاتی می‌شود. در این پژوهش، ۶۵ آزمون عملی بر روی سطوح خشک، خیس و دوبخشی انجام شد که از این تعداد، ۲۱ آزمون عملی در الگوریتم برخط تشخیص سطح مورد بررسی قرار گرفت و زمان تشخیص سطح متناسب با سطح ترمزگیری استخراج گردید. نتایج اجرای الگوریتم برای سطوح مختلف حاکی از آن است که متوسط زمانی برای تشخیص سطح خشک ۰/۲۵ ثانیه، سطح خیس ۰/۲۷ ثانیه و سطح دوبخشی ۰/۲۶ ثانیه بعد از ترمزگیری شدید و فعال شدن ترمز ضدقفل می‌باشد که در مقایسه با سایر مقالات نشان می‌دهد که این الگوریتم با کاهش حدود ۴۹/۱

- sliding mode control. *J Mech Sci Technol.* 2013 Jun;27:1853-61.
- 27- Fang Y, Chu L, Sun W, Shang M, Zhou F, Guo J. Identification and control of split- μ road for antilock braking system. In: *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control*; 2010 Mar 27; 3:298-301.
- Transp Res Part C Emerg Technol. 2012 Apr 1;21(1):181-95.
- 12- Gaurkar PV, Ramakrushnan K, Challa A, Subramanian SC, Vivekanandan G, Sivaram S. An anti-lock braking system algorithm using real-time wheel reference slip estimation and control. *Proc Inst Mech Eng Part D J Automob Eng.* 2022 Mar;236(4):676-88.
- 13- Liu Y, Sun J. Target slip tracking using gain-scheduling for antilock braking systems. In: *Proceedings of the 1995 American Control Conference*; 1995 Jun 21; 2:1178-82.
- 14- Harned JL, Johnston LE, Scharpf G. Measurement of tire brake force characteristics as related to wheel slip (antilock) control system design. *SAE Trans.* 1969 Jan 1;909-25.
- 15- Wang WY, Chen GM, Tao CW. Stable anti-lock braking system using output-feedback direct adaptive fuzzy neural control. In: *SMC'03 Conference Proceedings*; 2003 Oct 8. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; 2003; 4:3675-80.
- 16- Leung KT, Whidborne JF, Purdy D, Barber P. Road vehicle state estimation using low-cost GPS/INS. *Mech Syst Signal Process.* 2011 Aug 1;25(6):1988-2004.
- 17- Guo H, Chen H, Xu F, Wang F, Lu G. Implementation of EKF for vehicle velocities estimation on FPGA. *IEEE Trans Ind Electron.* 2012 Aug 13;60(9):3823-35.
- 18- Moaveni B, Khosravi M, Nasiri S, Amiri M. Vehicle longitudinal velocity estimation using two new estimators and without measuring the braking torque. *Modares Mech Eng.* 2014 Aug 10;14(5):183-93. (In Persian).
- 19- Canudas-De-Wit C, Horowitz R. Observers for tire/road contact friction using only wheel angular velocity information. In: *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*; 1999 Dec 7; 4:3932-7.
- 20- Canudas-de-Wit C, Tsiotras P, Velenis E, Basset M, Gissinger G. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Veh Syst Dyn.* 2003 Mar 1;39(3):189-226.
- 21- Baffet G, Charara A, Dherbomez G. An observer of tire-road forces and friction for active security vehicle systems. *IEEE/ASME Trans Mechatron.* 2007 Dec 17;12(6):651-61.
- 22- Zhang X, Xu Y, Pan M, Ren F. A vehicle ABS adaptive sliding-mode control algorithm based on the vehicle velocity estimation and tyre/road friction coefficient estimations. *Veh Syst Dyn.* 2014 Apr 3;52(4):475-503.
- 23- Drakunov S, Ozguner U, Dix P, Ashrafi B. ABS control using optimum search via sliding modes. *IEEE Trans Control Syst Technol.* 1995 Mar;3(1):79-85.
- 24- Chen GM, Wang WY, Lee TT, Tao CW. Observer-based direct adaptive fuzzy-neural control for anti-lock braking systems. *Int J Fuzzy Syst.* 2006 Dec 1;8(4).
- 25- Wang WY, Li IH, Chen MC, Su SF, Hsu SB. Dynamic slip-ratio estimation and control of antilock braking systems using an observer-based direct adaptive fuzzy-neural controller. *IEEE Trans Ind Electron.* 2008 Nov 18;56(5):1746-56.
- 26- Song J. Development and comparison of integrated dynamics control systems with fuzzy logic control and