نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

ISSN: 1605-9719
DOI: 10.30506/MMEP.2022.552988.2015

مروری بر عملکرد ترمزهای سیمی

فرشید نصیری
کارشناسی ارشد مهندسی خودرو

سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی*
استادیار، آزمایشگاه تحقیقاتی سیستم‌های دینامیکی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده: یکی از جدیدترین سیستم های ترمز حال حاضر جهان، سیستم ترمز سیمی است. این نوع ترمز که کنترل آن توسط دستگاه های الکترونیکی انجام می شود، فناوری در حال توسعه است و رانندگان را قادر می سازد تا عملکرد بالاتری در هنگام رانندگی در مقایسه با ترمزهای هیدرولیکی داشته باشند. در این نوع ترمز، مدارها و تجهیزات الکترونیکی جایگزین تجهیزات هیدرولیکی و مکانیکی مانند پمپ، تسمه، لوله و سیلندر ترمز می شود. استفاده از این فناوری علاوه بر کاهش وزن خودرو، سبب کاهش سروصدا و لرزش آن شده و زمان واکنش ترمز را کاهش می دهد. همچنین عیب یابی ترمز را نیز آسان می کند و گام مهمی در راستای کنترل پذیری هر چه بیشتر و الکترونیکی و خودران شدن خودروها خواهد بود. در این مقاله ضمن معرفی مفاهیم اولیه ترمز سیمی و شیوه کارکرد آن، به مسیر توسعه و بهینه سازی ترمز سیمی اشاره شده و حوزه های تحقیقاتی موجود در این زمینه شناسایی شده است.

واژه های راهنما: ترمز سیمی، ترمز برقی، ایمنی ترمز، بوستر هیبریدی، ترمز الکترومکانیک، بازیابی انرژی، ترمز الکتروهیدرولیک

مقاله ترویجی
دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۷

Review on the performance of brake by wire

Farshid Nasiri
M.Sc. in Automotive Engineering

Salman Ebrahimi-Nejad Rafsanjani*
Assistant Professor, Vehicle Dynamical Systems Research Lab, Faculty of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

Abstract: One of the newest braking systems in the world is the brake by wire (BBW) system. This type of brake is controlled by electronic devices and enables drivers to perform better compared to hydraulic brakes. In BBW, hydraulic and mechanical equipment such as pumps, belts, and cylinders are replaced by electronic devices. Using this system, in addition to reducing the weight of the car and its noises and vibrations, also reduces the braking response time and makes it easy to troubleshoot the brake. It will be an important step towards more controllability, electronic and self-driving cars. This article introduces the basic concepts of brake by wire and also reviews the operation, development, and optimization of BBW systems, and research areas in this field have been identified and introduced.

Keywords: Brake by wire (BBW), Electromechanical brake, Electrohydrolic brake, Automotive, Wedge brake, Regenerative braking

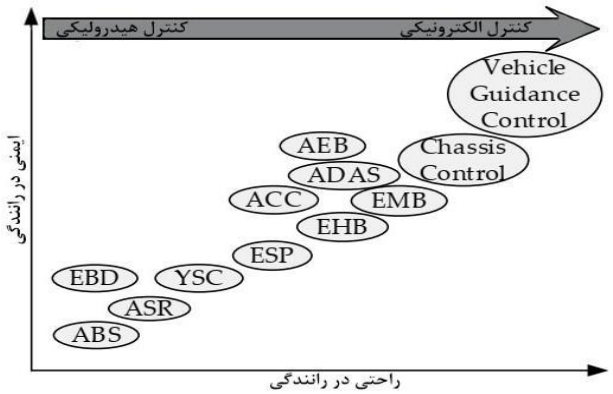
* نویسنده مسئول، ebrahiminejad@iust.ac.ir

۱- مقدمه

در صنعت خودروسازی، ترمز سیمی[1]به نوعی سیستم ترمز گفته می‌شود که کنترل شدن آن توسط دستگاه‌های الکترونیکی انجام می‌گیرد. بطور کلی هر نوع سیستم که با پسوند سیمی اطلاق شود؛ مانند فرمان سیمی[2] بدین معنی است که قطعات و عملگرهای الکترونیکی، جایگزین تجهیزات هیدرولیکی و مکانیکی در آن مجموعه شده است. در ترمز سیمی هم تجهیزات الکترونیکی جایگزین تجهیزاتی مانند پمپ، لوله و سیلندر ترمز در ترمزهای هیدرولیکی می‌شود. این دگرگونی گام بلندی در جهت ارتقاء ایمنی خودرو، افزایش کنترل‌پذیری و تسریع بازخورد سیستم می‌شود و راه را برای الکترونیکی و خودران شدن خودروها هموار می‌سازد.

واژه ترمز سیمی اولین بار در صنایع هوایی استفاده شد که در آن از این فناوری در هواپیماهای نظامی استفاده می‌کردند. به دلیل مسافت ترمزی که هواپیماهای نظامی طی می‌کردند، نیاز به ترمزی که بتواند واکنش سریعی داشته باشد احساس شد. به موجب عملکردی که این تکنولوژی ترمز از خود نشان داد، توجه خودروسازان را هم به خود جلب کرد [۱]. به مرور زمان و به منظور ارتقای ایمنی و عملکرد ترمزها، تجهیزات جدیدی به ترمزها اضافه شده است که این تجهیزات روزبه‌روز حالت الکترونیکی به خود گرفته‌اند. بنابراین با افزایش تجهیزات الکترونیکی، تبدیل انرژی الکتریکی به دستورات مکانیکی زمان بر است و در چندین مرحله صورت می‌گیرد. در حال حاضر حرکت روغن درون اجزای ترمز از لحظه فشار روی پدال تا جمع شدن لنت‌ها زمان‌بر تلقی می‌شود. در واقع نیاز به افزایش سرعت عمل ترمزگیری و افزایش ایمنی، راهی جز روی آوردن به قطعات الکترونیکی پیش روی طراحان قرار نمی‌دهد. پس نیاز است که تجهیزات مکانیکی کمرنگ‌تر شود و جای خود را به سیم و عملگر و برد الکترونیکی بدهد.

به تدریج سیستم‌هایی نظیر ترمز ضد قفل[3]که به‌صورت گسترده استفاده می‌شود، سیستم توزیع نیروی ترمز[4] سیستم کنترل کشش[5] کنترل پایداری جانبی[6] برنامه پایداری الکترونیکی[7] سیستم پیشرفته دستیار راننده[8]و ترمز اضطراری خودکار[9]به خودروها اضافه شده و با سیستم هیدرولیکی ترمز خودرو یکپارچه شده است [۲]. این سیستم‌ها به دلیل اینکه می‌بایست با حسگرهای خودرو بخوبی کار کند نیازمند افزایش دقت و سرعت بازخورد عملکرد قطعات ترمز است. بنابراین کنار رفتن قطعات مکانیکی و جایگزینی با قطعات الکترونیکی روندی است که در چند سال اخیر سرعت گرفته است. با توجه به شکل ۱ روند پیشرفت فناوری‌های ترمز در خودرو مشاهده می‌شود که تحت تاثیر دو شاخصه راحتی در رانندگی و افزایش ایمنی قرار می‌گیرد [۳]. از ویژگی‌های بارز ترمز سیمی این است که عمده فناوری‌های جدید ترمز که به‌صورت الکترونیکی هستند در ترمز سیمی قابلیت یکپارچگی دارند و بدون نیاز به تجهیزات اضافه و فقط با اضافه کردن ماژول‌های الکترونیکی، می‌توان از این فناوری‌ها استفاده کرد.



شکل ۱ افزایش ایمنی رانندگی و راحتی همزمان با الکترونیکی شدن قطعات [۳]

در این مقاله ابتدا به معرفی ترمز سیمی و عملکرد آن پرداخته می‌شود. سپس به برخی بهینه سازی‌های جدید و مزایا و معایب این نوع سیستم ترمز اشاره خواهد شد. در هر بخش، حوزه‌های تحقیقاتی موجود در این زمینه از قبیل سیستم ترمز الکتروهیدرولیک در ترمز سیمی، بوسترهای هیبریدی، بازیابی انرژی و استفاده از ترمز سیمی در هواپیماهای نظامی توضیح داده شده است.

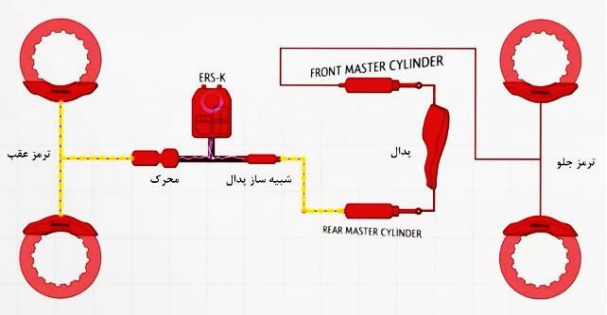
۲- اجزاء ترمز سیمی

سیستم ترمز سیمی شامل عملگرهای[10]الکترومکانیکی یا الکتروهیدرولیکی، شبیه‌ساز پدال[11]و واحد کنترل ترمز[12]است. نیروی وارده بر پدال توسط شبیه‌ساز پدال اندازه‌گیری شده و به

1 Brake By Wire
2 Steer By Wire
3 Anti-Lock Brake (ABS)
4 Electronic Brakeforce Distribution (EBD)
5 Traction Control System (TCS)
6 Yaw Stability Control (YSC)
7 Electronic Stability Program (ESP)
8 Advanced Driver Assistant System (ADAS)
9 Automatic Emergency Brake (AEB)
10 Actuator
11 Pedal Simulator
12 Brake Control Unit (BCU)

برد کنترل ترمز ارسال می‌شود. سپس مقدار مورد نیاز نیروی ترمز برای هر چرخ محاسبه شده و از طریق عملگرها به چرخ‌ها ارسال می‌شود (شکل ۲) [۴].

این سیستم ساده با حذف قطعات حجیم در سیستم ترمز هیدرولیکی شامل بوستر ترمز، سیلندر ترمز، پمپ و لوله‌های بازگشت روغن، سبب کاهش قیمت، کاهش وزن، افزایش ایمنی و کاهش آلودگی محیطی می‌شود.



شکل ۲ نمودار فرآیند ترمز سیمی از شرکت برمبو [۴]

۲-۱- عملگرها

عملگرها از یک سمت، اطلاعات را از واحد کنترل ترمز دریافت کرده و از سمت دیگر نیروی ترمز را به کالیپر انتقال می‌دهند. خودرویی با سیستم ترمز سیمی دارای یک عملگر برای هر چرخ است. عملگرها در ترمزهای سیمی دو نوع هستند. نوع اول از کالیپر ترمز فاصله دارند و نیروی ترمز را به‌صورت هیدرولیکی منتقل می‌کنند. در این حالت ترمز سیمی به صورت ترکیبی الکتروهیدرولیکی عمل می‌کند. امروزه عمده خودروهایی که از فناوری ترمز سیمی استفاده می‌کنند بدین صورت هستند.

نوع دوم از عملگرها که بصورت الکترومکانیکی عمل می‌کنند، میزان نیروی ترمز ارسالی به کالیپر را به صورت الکتریکی دریافت کرده و بصورت مکانیکی از طریق یک موتور جریان مستقیم، به کالیپر انتقال می‌دهد و کالیپر به کمک موتور الکتریکی جمع می‌شود [۵].

۲-۲- واحد کنترل ترمز

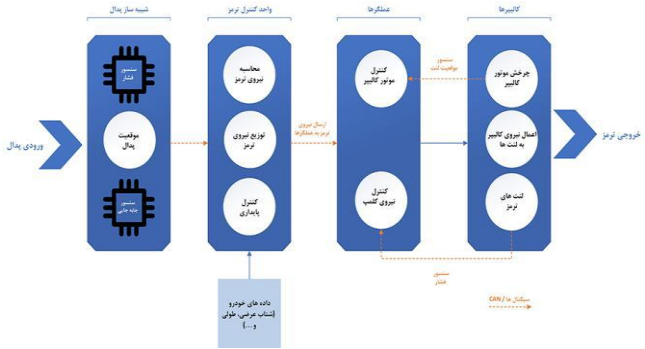
واحد کنترل ترمز ورودی‌هایی مثل نیروی وارده به پدال از طرف شبیه‌ساز پدال و همچنین مقادیری مانند شتاب‌های جانبی و مستقیم خودرو، زاویه فرمان و سرعت چرخش هریک از چرخ‌ها از طریق حسگرهای دیگر وارد این برد می‌شود. این قطعه پس از پردازش این اطلاعات، مقدار نیروی مورد نیاز ترمز را نسبت به هر چرخ محاسبه می‌کند و دستورات را به هریک از عملگرها منتقل می‌کند [۶].

۲-۳- شبیه‌ساز پدال

شبیه‌ساز پدال در سیستم ترمز سیمی قطعه‌ای الکترومکانیکی است که دارای حسگر نیرو و حسگر واکنش[1] است که این حسگرها میزان جابه‌جایی پدال را اندازه می‌گیرند. شبیه‌ساز پدال در واقع جایگزینی برای بوستر ترمز و سیلندر ترمز در ترمزهای هیدرولیکی است که در یک قطعه ساده شده است.

۳- عملکرد ترمز سیمی

با توجه به شکل ۳ که در آن عملکرد کنترلی ترمز سیمی نشان داده شده است، مراحل اصلی در ترمزگیری با سیستم ترمز سیمی بدین شرح است: ۱- راننده پدال ترمز را فشار می‌دهد و شبیه‌ساز پدال میزان شدت ترمز را اندازه‌گیری می‌کند. ۲- میزان شدت فشرده شدن پدال ترمز، به واحد کنترل ترمز ارسال و با ورودی‌های مثل شتاب و زاویه فرمان خودرو پردازش شده و نیروی ترمز مورد نیاز به عملگرها ارسال می‌شود. ۳- عملگرها، سیگنال الکتریکی را دریافت کرده و به کالیپرها ارسال می‌کنند. ۴- بستگی به نوع کالیپر، نیروی ترمز به چرخ‌ها اعمال می‌شود [۷].



شکل ۳ مراحل عملکرد ترمز سیمی

ترمزهای سیمی به دو صورت الکتروهیدرولیکی و یا الکترومکانیکی وجود دارند. هرکدام از آنها معایب و مزایای مختلفی دارند که به آن اشاره می‌شود.

۳-۱- ترمز سیمی الکتروهیدرولیک

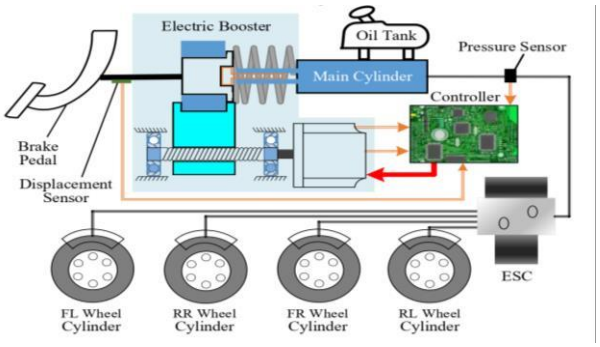
سیستم‌های ارتباطات ترمز سیمی که امروزه در خودروها استفاده می‌شود به دلیل مسائل ایمنی از نوع الکتروهیدرولیک یا

1Stroke Sensor

الکتروپنوماتیک هستند. آنها دارای تجهیزات هیدرولیکی یا پنوماتیکی مجزا برای مواقع اضطراری و در زمانی که نیروی برق خودرو از کار بیفتد هستند. این سیستم‌های هیدرولیکی به صورت مستقیم در دسترس راننده نیستند؛ یعنی راننده نمی‌تواند به خواست خود ترمز را روی آن حالت قرار دهد.

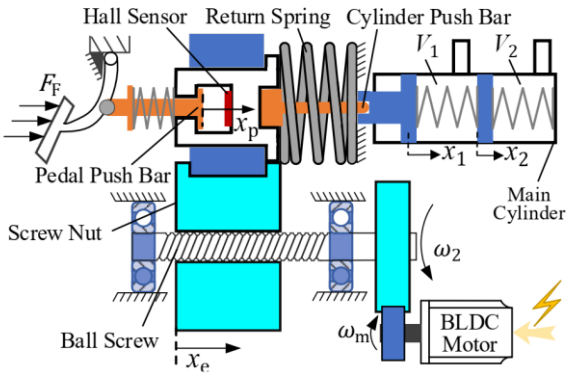
سیستم ترمز هیدرولیک مورد استفاده در خودروهای سواری معمولاً مجهز به بوستر وکیوم[1]است. ساختار آن به صورتی است که پاسخ سیستم کند است و محدودیت اساسی برای کاربردهای پیشرفته دارد، زیرا کنترل مستقیم قطعات مکانیکی توسط تراشه‌های الکترونیکی دشوار است. در مقابل، جدیدترین روش استفاده از ترمز سیمی در خودروها، بکارگیری ترمزهای سیمی الکتروهیدرولیک است که دارای بوسترهای هیبریدی شامل دو بخش الکتریکی و هیدرولیکی مجزا هستند. به این منظور، شبیه‌ساز پدال و بوستر وکیوم در یک قطعه ترکیب شده‌اند و بوستری هیبریدی ایجاد شده است.

وانگ و همکاران [۸] جدیدترین نوع بوستر هیبریدی را طراحی کرده‌اند. این بوستر هیبریدی با توجه به شکل ۴ دارای دو مجموعه اصلی مکانیکی و الکترونیکی است. قسمت مکانیکی شامل قطعاتی مانند بال اسکرو[2]، چرخ دنده یک مرحله ای[3] و پایه‌های نگهدارنده است. قسمت الکترونیکی نیز شامل یک موتور براشلس جریان مستقیم، حسگر اندازه‌گیری فشار، حسگر جابه‌جایی و یک کنترلر الکترونیکی است.



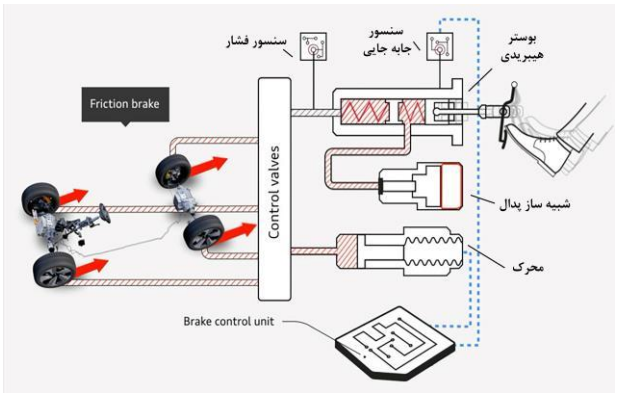
شکل ۴ بوستر هیبریدی در ترمز سیمی [۸]

حسگر جابه‌جایی برای اندازه‌گیری موقعیت نسبی بین پدال و پیستون سیلندر اصلی استفاده می‌شود که با توجه به میزان جابه‌جایی پدال ترمز، سیگنال‌ها را به کنترلر ارسال کرده و موتور براشلس شروع به چرخش کرده و روغن ترمز را به حرکت درمی‌آورد. در شکل ۵ قسمت مکانیکی بوستر هیبریدی مشاهده می‌شود.



شکل ۵ بخش مکانیکی بوستر هیبریدی با جزییات [۸]

در شکل ۶ مدل ترمز سیمی روی خودروی آئودی e-Tron مدل ۲۰۲۰ که مجهز به بوستر هیبریدی است مشاهده می‌شود. در حالت نرمال وقتی راننده پدال ترمز را فشار می‌دهد نیروی فشار از طریق شبیه‌ساز پدال اندازه‌گیری شده و به برد کنترل ترمز منتقل می‌شود. سپس از طریق عملگرها، روغن ترمز به کالیپرها می‌رسد. در حالت بدون برق، نیروی هیدرولیکی از طریق بوستر هیبریدی به‌صورت مستقیم بر اساس میزان نیروی وارده به پدال، به کالیپرها منتقل می‌شود [۹].



شکل۶ نمودار عملکرد ترمز سیمی در خودروی آئودی eTron 2020 [۹]

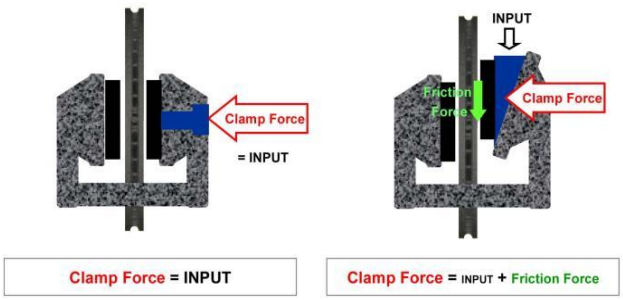
۳-۲- ترمز سیمی الکترومکانیک (بدون پشتیبانی هیدرولیک)

یکی دیگر از مزایای ترمز سیمی به جز حذف قطعات مکانیکی بزرگ، مستقل بودن سیستم ترمز از برد اصلی است که می‌تواند بستری را برای نصب ماژول‌ها و پروسه‌های مستقل فراهم کند که باعث بهینه‌تر شدن این ترمز می‌شود. ترمزهای EMB[4]

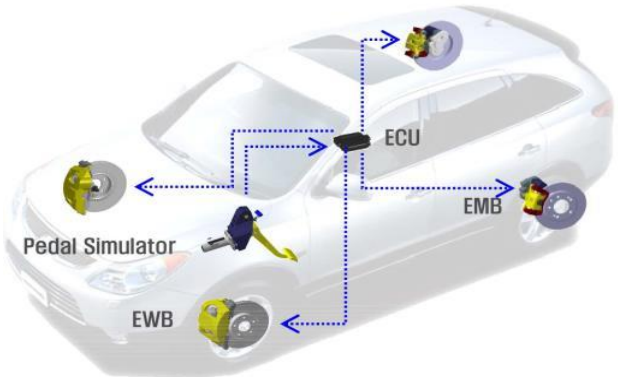
1Vacuum Booster
2 Ball-Screw
3Single-Stage Gear
4Electromechanical Brake

ترمزهای تمام برقی هستند که دارای کالیپرهای موتوردار هستند و نیاز به نیروی هیدرولیکی ندارند. در نتیجه مونتاژ کردن راحتی دارند و آسیب به محیط‌زیست آن کمتر است. همچنین به دلیل عدم نیاز به پیستون روغن، فضای کمتری اشغال می‌کنند و نیاز به بررسی نشت و هواگیری روغن ندارند. استفاده از این ترمزها در سیستم ترمزهای سیمی و حذف قسمت‌های هیدرولیکی سبب می‌شود سرعت ترمزگیری و زمان پاسخ سیستم به شدت افزایش یابد [۷].

سئونگ و همکاران [۱۰] بیان کردند که ترمزهای الکترومکانیکی EMB برای فعال شدن در محور جلو به دلیل نیاز به نیروی ترمز بیشتر، به جای منبع ۱۲ ولتی احتیاج به منبع ۴۲ ولتی دارند. اما فراهم کردن ولتاژ ۴۲ ولتی در خودرو، دشوار است. به کمک ترمز سیمی می‌توان این مشکل را هم حل کرد. یکی از بهینه سازی‌ها برای حل این مشکل استفاده از ترمز EWB در محور جلو و ترمز EMB در محور عقب خودرو است (شکل ۷). علت استفاده از ترمز EWB در جلو، نیاز به نیروی ترمز بیشتر در آنجا است. همچنین باعث استفاده کمتر از انرژی الکتریکی سیستم می‌شود. با توجه به شکل ۸ با تبدیل EMB به EWB در محور جلو همزمان با ثابت نگه داشتن نیروی ترمز، مقدار ولتاژ مورد نیاز هم به ۱۲ ولت کاهش می‌یابد.



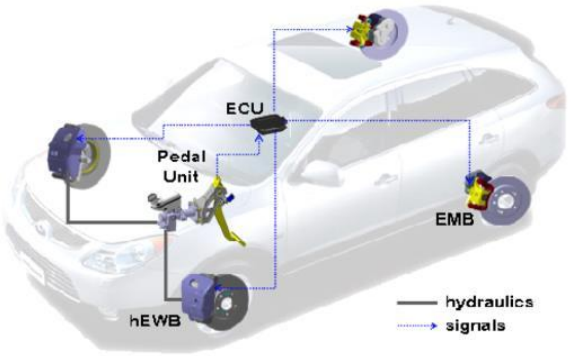
شکل ۷ مکانیزم EMB (چپ) و EWB (راست) [۱۰]



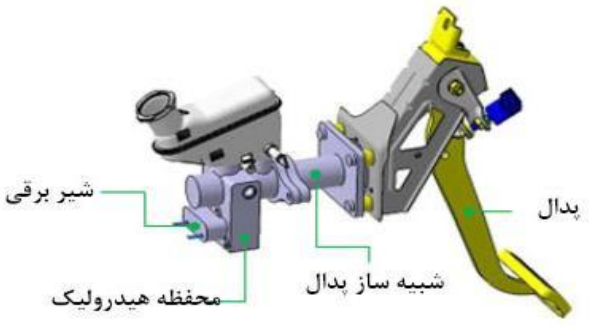
شکل ۸ محل قرارگیری کالیپرهای ترمز EMB و EWB [۷]

ترمز EWB با ترکیب نیروی کلمپ و اصطکاک، عمل ترمزگیری را انجام می‌دهد. اما مهم‌ترین عیبی که باعث شده استفاده از ترمز الکترومکانیکی در خودروها گسترده نشود بحث امنیت این ترمزها است که با قطع شدن برق خودرو، ترمز هم کاملاً از کار می‌افتد؛ بنابراین تا به امروز ترمزهای سیمی به‌صورت الکتروهیدرولیکی استفاده می‌شود. در این صورت کالیپرهای جلو همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، باید به‌صورت الکتروهیدرولیکی یا hEWB به‌کار گرفته شوند.

تغییرات در سیستم ترمز سیمی مبتنی بر hEWB بدین‌گونه است که در واحد پدال، یک محفظه هیدرولیک و شیرهای برقی همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است اضافه می‌شود. شیرهای برقی معمولاً در حالت باز هستند، به این معنی که روغن ترمز از محفظه هیدرولیک از طریق خطوط هیدرولیک به عملگر ترمز منتقل می‌شود. هنگامی که راننده پدال را فشار می‌دهد، فشار هیدرولیک افزایش می‌یابد. هنگامی که شیرهای برقی با ورودی برق بسته شوند، افزایش فشار هیدرولیک متوقف می‌شود و واحد پدال در حالت شبیه‌ساز پدال و ترمز در وضعیت تمام برقی خواهد بود.



شکل ۹ محل قرارگیری کالیپرهای ترمز EMB و hEWB [۱۰]



شکل ۱۰ واحد پدال مبتی بر hEWB [۱۰]

۴- نوآوری‌ها و حوزه‌های تحقیقات جدید در سیستم ترمز سیمی

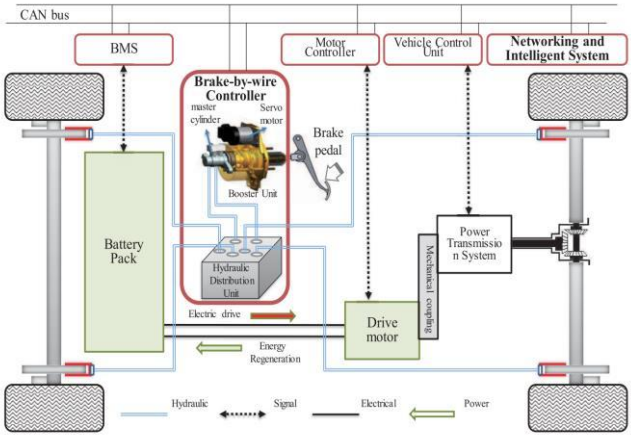
1Electromechanical Wedge Brake

2 hybrid Electric Wedge Brake

۴-۱- بازیابی انرژی

بازیابی انرژی یکی از مهم‌ترین موضوعات سیستم ترمز سیمی است. به‌منظور بهبود بهره‌وری انرژی خودرو، طراحی سیستم ترمز نیاز به درنظرگرفتن بازیابی انرژی ترمز دارد. در خودروهای الکتریکی استفاده از سیستم بازیابی انرژی ترمز به‌منظور تولید بخشی از نیروی الکتریکی باتری، ضرورت بیشتری دارد. خودروها به دلیل ترمزهای مکرر در سطح شهر، انرژی زیادی را هدر می‌دهند. سیستم بازیابی انرژی ترمز می‌تواند انرژی جنبشی ترمز را به انرژی الکتریکی تبدیل کند و سپس به باتری بازگرداند.

استراتژی‌های کنترلی مختلفی برای این سیستم وجود دارد که باهدف اطمینان از عملکرد صحیح ترمز و بازیابی هرچه بیشتر انرژی ترمزگیری طراحی شده است. عوامل مؤثر بر میزان انرژی بازیابی شده از ترمز به عواملی مانند سرعت وسیله نقلیه، نوع باتری و مشخصه گشتاور خروجی موتور بستگی دارد [۱۱]. منگ و همکاران [۱۲] با ارائه شکل ۱۱، ساختار سیستم ترمز احیایی[1] در ترمز سیمی را برای خودروهای برقی نشان داده‌اند. این سیستم از مواردی همچون سیستم مدیریت باتری[2]، کنترلر، کنترل کننده موتور، واحد کنترل ترمز، واحد پدال ترمز، بسته باتری، موتور محرک و سیستم انتقال نیرو تشکیل شده است. در اینجا سیستم مدیریت باتری یک سیستم کنترلی است که از ایمنی باتری محافظت می‌کند و وضعیت باتری را به طور مداوم برای اطمینان از ایمنی آن کنترل می‌کند. کنترل کننده موتور، عملیات استارت، جلو و عقب، صعود و سایر حالات رانندگی را طبق ورودی‌هایی مانند وضعیت دنده، دریچه گاز و وضعیت ترمز کنترل کرده و بخشی از انرژی ترمز را در باتری ذخیره می‌کند. اجزای کنترلر شامل سیلندر اصلی، موتور سروو، واحد تقویت کننده و واحد توزیع هیدرولیک است. در هنگام ترمزگیری، جابجایی پدال ترمز و سروو موتور باعث افزایش فشار روغن در سیلندر اصلی می‌شود که نیروی ترمز مناسب را از طریق واحد توزیع هیدرولیک به چرخ‌ها توزیع می‌کند. بخشی از نیروی ترمز برای عمل ترمز گیری استفاده می‌شود، در حالی که بخش دیگر نیرو برای ترمز احیا کننده برای بازیابی انرژی ترمز استفاده می‌شود. در سیستم بازیابی انرژی ترمز از طریق اتصال یک موتور جریان متناوب یا ژنراتور به سیستم انتقال قدرت صورت گرفته و با عمل ترمزگیری و کاهش دور موتور، انرژی الکتریکی توسط ژنراتور تولید شده و در باتری ذخیره می‌شود.



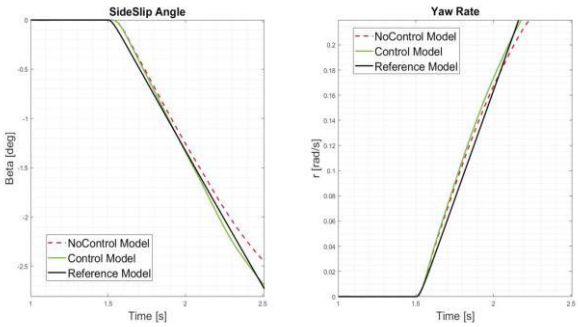
شکل ۱۱ دیاگرام ترمز سیمی همراه با سیستم بازیابی انرژی [۱۲]

۴-۲- افزایش پایداری خودرو در ترمز سیمی

مونتانی و همکاران [۱۳] به معرفی روشی برای افزایش دقت سیستم کنترل پایداری در خودروهای دارای ترمز سیمی پرداخته‌اند. خودروهای معمول دارای برنامه کنترل پایداری[3] هستند. اما ماژول‌های برنامه کنترل پایداری معمولی قادر به ایجاد پایداری مناسب و در نتیجه دستیابی به بهترین عملکردهای دینامیکی در هر زمان در حین حرکت خودرو نیستند. دینامیک وسیله نقلیه به شدت غیر خطی است و معمولاً به محاسبات زیادی برای کنترل نیاز دارد. ESP خودروهای مجهز به ترمز سیمی، دارای یک کنترل منطقی مرکزی و خطوط هیدرولیک برای فعال کردن کالیپرها است. این معماری دارای مقادیری تاخیر بین دستور و فعال سازی است.

سیستم پایداری خودرو در شرایط لغزندگی جاده به‌منظور پایداری خودرو، به‌صورت خودکار ترمزگیری می‌کند. در این روش به بررسی سیستم کنترل پایداری ساده و نوینی پرداخته شده است که از طریق رگولاتور درجه دوم خطی (LQR[4]) به‌جای کنترلر PID عمل می‌کند. با توجه به شکل ۱۲ این نوع از کنترلر با ردیابی خطاهای بین مقادیر مرجع و واقعی نرخ انحراف و زاویه لغزش جانبی، قادر است در زمان واقعی مقادیر فشاری را در عملگرهای ترمز با اطمینان از اینکه که خطاهای آن نزدیک به صفر شوند، اعمال کند؛ بنابراین با کاهش خطاهای زاویه لغزش و شتاب جانبی بین مقادیر حالت پایدار و مقادیر واقعی خودرو، منجر به افزایش پاسخ سیستم می‌شود. این سیستم با استفاده از سیگنال CAN Bus با عملگرهای ترمز سیمی در ارتباط است.

1 Regenerative Braking
2 Battery Management System (BMS)
3Electronic Stability Program (ESP)
4Linear Quadratic Regulator

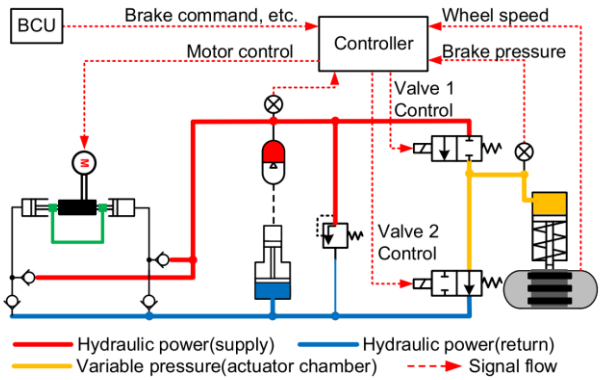


شکل ۱۲ عملکرد سیستم در سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت [۱۳]

۴-۳- ترمز سیمی در هواپیماهای نظامی

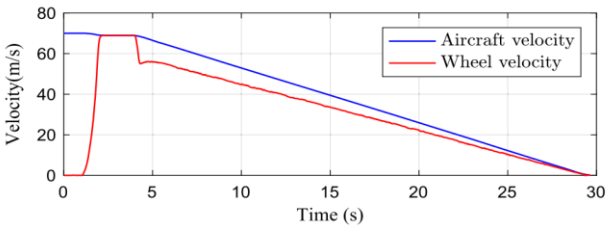
سیستم ترمز متداول در هواپیماهای نظامی از یک منبع هیدرولیک و پمپ تشکیل شده است. عملکرد مناسب ترمز در جنگنده‌ها نیازمند لوازم جانبی سنگین و متعددی مانند خطوط لوله و سوپاپ‌هایی در نزدیکی چرخ هواپیما هستند که تحت تأثیر جریان هوای بسیار سرد قرار می‌گیرند و می‌توانند سبب بروز اختلال در مسیر شوند [۱۴]. از آنجایی که سرعت هواپیماهای نظامی بسیار بالاست؛ به‌منظور توقف هواپیما دمای دیسک ترمز از ۶۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتیگراد متغیر است. این حرارت به لوله‌های ترمز نفوذ کرده و سبب کربونیزه شدن روغن ترمز می‌شود. در نتیجه رسوب درون لوله‌ها افزایش می‌یابد و سبب خسارت‌های جانی و مالی زیادی خواهد شد [۱۵]. استفاده از ترمزهای EMA در هواپیماهای نظامی نیز ناکارآمد است زیرا گشتاور موتورهای پله‌ای مورد استفاده در ترمزها ضعیف است و نمی‌تواند هواپیما را در سرعت‌های بالا متوقف کند [۱۶].

ژیائو و همکاران [۱۷] با طراحی نوعی از سیستم ترمز سیمی به نام PWABS این مشکلات را رفع کرده‌اند. این سیستم ترمز با توجه به شکل ۱۳ شامل یک موتور الکتریکی، یک پمپ هیدرولیک سفارشی، دو شیر قطع و وصل[2] دو سنسور فشار، یک مخزن، یک آکومولاتور[3] یک کنترلر و سایر متعلقات می‌باشد. کنترلر این سیستم دستورات را از واحد کنترل ترمز دریافت می‌کند. پمپ هیدرولیک توسط موتور به گردش در می‌آید و روغن را با فشار بالا از طریق عملگرهای ترمز ارسال می‌کند. شیرهای قطع و وصل نیز در مسیر عملگرها قرار گرفته‌اند تا با توجه به کنترلر، دریچه‌ها قطع و وصل شوند. یک آکومولاتور هیدروپنوماتیکی پیستونی برای تثبیت فشار مدار خروجی و تضعیف ارتعاش قرار داده شده است و مخزن روغن به کمک نیتروژن در محفظه گاز آکومولاتور تحت فشار قرار می‌گیرد.



شکل ۱۳ نمودار عملکرد ترمز سیمی در جنگنده [۱۷]

در شکل ۱۴ نمودار عملکرد ترمز یک هواپیمای نظامی که سیستم PWABS روی آن نصب شده مشاهده می‌شود. در این آزمایش سرعت از حدود 70 m/s در ۱ ثانیه به 50 m/s کاهش یافته است. یعنی ظرف یک ثانیه سرعت چرخ‌ها حدود ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی عملکرد ترمز [۱۷]

۴-۴- حوزه‌های تحقیقات پیشنهادی

ترمز سیمی، فناوری ترمز بسیار نوپا و آینده داری است که به دلیل سادگی و عملکرد بالا روزبه‌روز خودروسازان بیشتری را به خود جلب می‌کند. اگر فناوری ترمز سیمی را در سه بخش سیستم، مزایا و عملکرد بررسی کنیم، در هر سه بخش نسبت به فناوری‌های قدیمی ترمز، قدرت‌نمایی می‌کند. در بخش سیستمی به لحاظ داشتن سه مجموعه قطعه اصلی، سادگی مناسبی دارد و همین امر سبب عیب‌یابی راحت‌تر می‌شود. در بخش مزایا، این ترمزها هوشمند هستند و افزایش وزن خودرو تأثیری بر عملکرد ترمز ندارد و خودرو با درنظرگرفتن مقدار بار درون آن، عملکرد یکسانی دارد. همچنین کوچک‌ترین نقصی در آن روی داشبورد نمایش داده می‌شود و برای رانندگان و تعمیرکاران بسیار قابل کنترل است. برای توسعه دهندگان نیز با متصل شدن به برد کنترل ترمز، همه چیز قابل تنظیم است و

1 power-by-wire aircraft brake system
2 on/off valve
3Accumulator

می‌توانند با نصب نرم افزارهای مربوطه، سیستم را به‌روزرسانی کنند. به همین دلیل، مقالات جدید در زمینه افزونگی در سطح سیستمی ترمزهای سیمی [۱۸] و سیستمهای ترمز سیمی روادار خطا [۱۹] تمرکز کرده‌اند.

در حوزه عملکرد، به دلیل حذف قطعات هیدرولیکی، سرعت پاسخ سیستم بسیار بالاست اما همانند همه فناوری‌ها نقص‌ها و محدودیت‌هایی دارد. به دلیل اتکای صرف به انرژی الکتریکی در این نوع ترمز، قطع انرژی به هر دلیل چالش‌برانگیز است. دلیل استفاده نشدن گسترده از این فناوری همین علت است و این از بزرگترین چالش این سیستم است و می‌بایست قبل از هر نوع بهینه‌سازی، تمام تمرکز روی رفع این چالش باشد. تازه‌ترین راهکار برای رفع آن، استفاده از بوسترهای الکتروهیدرولیکی است. اولین راهکاری که فارغ از راهکار فوق به ذهن خطور می‌کند استفاده از باتری یدکی است. اما برای به کار افتادن باتری یدکی هم نیاز به یک سیستمی است که در مواقع نقص در سیستم اصلی، آن را فعال کند. یا همانند برق اضطراری در ساختمان‌ها، نیاز به یک ذخیره‌کننده انرژی اضافه است که باید در مدار قرار بگیرد و انرژی الکتریکی قبل از رسیدن به مصرف‌کننده از آن عبور کند. پیاده‌سازی چنین سیستمی در خودرو منجر به تحول گسترده‌ای در سیستم برق خودرو خواهد شد؛ بنابراین عملکرد آن می‌بایست طی آزمایش‌های گوناگون عملی قرار گیرد و به‌صورت تئوری کم‌فایده است. همچنین هزینه و عوامل دیگر بررسی شود.

به منظور توسعه محصول هم می‌توان روی موارد زیر تمرکز کرد:

- بهینه‌سازی سیستم به‌منظور ترمز ایمن و سریع‌تر
- ایجاد بستری برای استفاده در وسایل نقلیه خودران سطح پنجم
- بهینه‌سازی بازیابی انرژی ترمز در خودروهای الکتریکی

۵- نتیجه‌گیری

ترمز سیمی نوعی ترمز جدید است که کنترل آن توسط بردها و قطعات الکترونیکی انجام می‌شود. این قطعات شامل یک برد کنترل ترمز اصلی، عملگرها برای هر چرخ و یک شبیه‌ساز پدال است که دارای دو حسگر برای دریافت حرکت پدال است. همه این قطعات جایگزین تجهیزات هیدرولیکی مانند پمپ، تسمه و سیلندر می‌شود. استفاده از این فناوری به دلیل عدم وجود اتصالات هیدرولیکی، علاوه بر کاهش وزن خودرو سبب کاهش سروصدا و لرزش شده و زمان واکنش ترمز را کاهش، و عیب‌یابی آن را بسیار راحت‌تر و سریع‌تر می‌کند.

به دلیل اینکه عمل ترمزگیری در خودرو یکی از مهم‌ترین عامل در ایمنی رانندگان محسوب می‌شود، خودروسازان باید همیشه شرایطی را در نظر بگیرند که در وضعیت‌های غیرمنتظره هم راننده قادر به توقف خودرو باشد. از آنجایی‌که جایگزین کردن قطعات الکترونیکی با مکانیکی، نیازمند انرژی الکتریکی است. بنابراین قطع الکتریسیته می‌تواند باعث حادثه شود. پس نیاز است که در کنار استفاده از ترمز سیمی قطعات هیدرولیکی قدیمی هم استفاده شود و در هنگام نقص سیستم وارد عمل شود که در این مقاله شیوه‌ی تعامل بوستر هیدرولیکی و الکترونیکی در یک قطعه شرح داده شد. اما نصب ماژول‌های الکترونیکی پیشرفته‌تر، روی ترمز سیمی و هماهنگی آن با تجهیزات هیدرولیکی دشوار است؛ بنابراین باید این تجهیزات هیدرولیکی حذف شود. تا این لحظه راهکار اساسی برای حل این مشکل یافت نشده و امروزه فناوری ترمز سیمی به‌صورت کاملا الکترونیکی، فقط در سطح محدود استفاده می‌شود. اما به دلیل پتانسیل بالا به‌منظور افزایش ایمنی خودرو و همچنین قابلیت تطبیق‌پذیری با دیگر فناوری‌های ترمز، آینده روشنی دارد و استفاده از آن درحال‌توسعه است. بنابراین پیش بینی می‌شود که در آینده نزدیک استفاده از سیستم ترمز هیدرولیکی به دلیل محدودیت‌ها و آثار منفی آن که در این مقاله به آنها اشاره شد، به کلی کنار گذاشته شود و ترمز وسایل نقلیه هوایی و زمینی به ترمزهای سیمی مجهز شود.

۶- مراجع

[1] Brake by Wire history, https://www.brakebywire.com/brake-by-wire-history.html, Accessed on 20 July, (2021).

[2] Yu, Z., Review on Hydraulic pressure control of electro-hydraulic brake system, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 53, No. 14, pp. 1, doi: 10.3901/JME.2017.14.001, (2017).

[3] Gong, X., Ge, W., Yan, J., Zhang, Y., and Gongye, X., Review on the development, control method and application prospect of brake-by-wire actuator, Actuators, *Actuators*, Vol. 9, No. 1, pp. 15, doi: 10.3390/act9010015, (2020).

[4] Brake by Wire System, https://www.brembo.com/en/, Accessed on 11 March, (2022).

[5] Bayer, B., Büse, A., Linhoff, P., Piller, B., Rieth, P.E., Schmitt, S., Schmittner, B., Völkel, J. and Zhang, C., Electro-mechanical brake systems, In *Handbook of Driver Assistance Systems* (pp. 731-

744), Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-319-09840-1_31-1, (2016).

[6] Limpert, R., Brake design and safety, SAE international, 2nd ed., *Society of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, USA, (2011).

[7] Cheon, J.S., Brake by wire system configuration and functions using front EWB (Electric Wedge Brake) and Rear EMB (Electro-Mechanical Brake) Actuators, *SAE Technical Paper*, doi: 10.4271/2010-01-1708, (2010).

[8] Wang X, Wu X, Cheng S, Shi J, Ping X, Yue W., Design and experiment of control architecture and adaptive dual-loop controller for brake-by-wire system with an electric booster, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, No. 3, pp. 1236–1252, doi: 10.1109/TTE.2020.3010279, (2020).

[9] Audi, https://www.audiusa.com/us/web/en.html, Accessed on 11 March, (2020).

[10] Cheon, J.S., Kim, J. and Jeon, J., New brake by wire concept with mechanical backup, *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 2012-01–1800, doi: 10.4271/2012-01-1800, (2012).

[11] Liu, W., Chen, G., Zong, C., and Li, C., Research on electric vehicle braking force distribution for maximizing energy regeneration, *SAE Technical Paper*, doi: 10.4271/2016-01-1676, (2016).

[12] Meng, B., Yang, F., Liu, J. and Wang, Y., A survey of brake-by-wire system for intelligent connected electric vehicles, *IEEE Access*, Vol. 8. pp. 225424–225436, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3040184, (2020).

[13] Montani, M., Capitani, R. and Annicchiarico, C., Development of a brake by wire system design for car stability controls, Procedia Structural Integrity, Vol. 24, pp. 137–154, doi: 10.1016/j.prostr.2020.02.013, (2019).

[14] Yin, Q., Jiang, J.Z., Neild, S.A. and Nie, H., Investigation of gear walk suppression while maintaining braking performance in a main landing gear, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 91, pp. 122–135, doi: 10.1016/j.ast.2019.05.026, (2019).

[15] Deng, J., Hu, K., Lu, B., Zheng, B., Fan, S., Zhang, L. and Cheng, L., Influence of B4C on oxidation resistance of PSN/borosilicate glass-B4C field-based repair coating of C/C aircraft brake materials at 700–900 °C, *Ceramics International*, Vol. 45, No. 16, pp. 20860–20872, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.07.075, (2019).

[16] Yao, J.F., Chen, C. and Chen, H.P., Experimental study on friction braking deceleration system based on micro displacement mechanism, in *Proceedings of the 2017 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA)*, Chengdu, China, October, pp. 260–264, doi: 10.1109/SPAWDA.2017.8340335, (2017).

[17] Jiao, Z., Zhang, H., Shang, Y., Liu, X.. and Wu, S., A power-by-wire aircraft brake system based on high-speed on-off valves, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 106, doi: 10.1016/j.ast.2020.106177, (2020).

[18] Mi, J., Wang, T., and Lian, X., A system-level dual-redundancy steer-by-wire system, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 235(12), 3002-3025, (2021).

[19] Mortazavizadeh, S.A., Ghaderi, A., Hajian, M., and Ebrahimi, M., A fault-tolerant steer-by-wire system based on angular position estimation, *Electrical Engineering*, 103(5), 2403-2414, (2021).