



## بررسی اثر استفاده از سامانه ترمز بازیاب در کاهش مصرف انرژی خودروهای دورگه بر پایه چرخه رانندگی شهر تهران

احسان کارگر فروغ<sup>۱\*</sup>، سعید عبدالملکی<sup>۲</sup>، سید اشکان موسویان<sup>۳</sup>، حمید فغانی<sup>۴</sup>، احسان ذاکری<sup>۵</sup>، میثم صالحی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، [ehsan.kf\\_76@yahoo.com](mailto:ehsan.kf_76@yahoo.com)

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسامانه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [saeed.abdolmaleki@modares.ac.com](mailto:saeed.abdolmaleki@modares.ac.com)

<sup>۳</sup> عضو هیات علمی دانشکده فنی کشاورزی شهریار، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران، [a\\_moosavian@tvu.ac.ir](mailto:a_moosavian@tvu.ac.ir)

<sup>۴</sup> اداره نگاشت، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، [h\\_faghani@ip-co.com](mailto:h_faghani@ip-co.com)

<sup>۵</sup> اداره طراحی، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، [e\\_zakeri@ip-co.com](mailto:e_zakeri@ip-co.com)

<sup>۶</sup> اداره نگاشت، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، [me\\_salehi@ip-co.com](mailto:me_salehi@ip-co.com)

\* نویسنده مسئول

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۰ دی ۱۳۹۸

پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۳۹۸

کلیدواژه‌ها:

انرژی ترمزگیری

انرژی بازیابی شده

خودروهای دورگه

ترمز بازیاب

در هنگام رانندگی و ترمز کردن انرژی زیادی برای نگه داشتن خودرو هدر می‌رود؛ به خصوص در مناطق شهری که خودرو مدام حرکت کرده و باز می‌ایستد. می‌توان این انرژی را که توسط لنت‌های ترمز هدر می‌رود در انباره خودرو ذخیره نمود. در خودروهای دورگه و برقی می‌توان از ترمز بازیاب در کنار ترمز مکانیکی استفاده کرد که هنگام ترمز کردن بتوان مقداری از انرژی ترمز را بازیابی نمود. هدف از این مقاله بررسی زمان مناسب برای استفاده از ترمز بازیاب، مقدار انرژی قابل بازیابی بر حسب سرعت خودرو، قدرت ترمز و نرخ کاهش سرعت خودرو، مقدار انرژی ترمز در محورهای جلو و عقب، بررسی قدرت ترمز برای رفع دو نیاز تأمین نیروی ترمز مورد نیاز و عدم قفل شدن چرخ‌ها (لیز نخوردن چرخ‌ها) و بررسی دو سامانه ترمز ترکیبی موازی و کاملاً مهار شده است. بدین منظور از یک خودروی دورگه دنا استفاده شد و مقدار انرژی بازیابی شده طی چرخه رانندگی اروپا و شهر تهران محاسبه و با هم مقایسه شدند. نتایج تحقیق حاکی از اثر قابل توجه و کارا بودن استفاده از سامانه ترمز بازیاب به منظور بهره‌برداری از انرژی ناشی از ترمزگیری و در نتیجه کاهش مصرف انرژی برای خودروهای دورگه در رانندگی شهر تهران است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خودروهای برقی<sup>۱</sup>، خودروهای برقی دورگه<sup>۲</sup> و خودروهای پیل سوختی<sup>۳</sup>، توانایی بازیابی مقدار قابل توجهی از انرژی ترمز است. در این گونه خودروها از موتور/مبدل استفاده می‌شود تا بتوان انرژی جنبشی یا پتانسیل خودرو را از طریق مبدل در انباره ذخیره کرده و مجدد استفاده کرد. در خودروهای برقی، دورگه و پیل سوختی سامانه‌های ترمز اصطکاکی باید با ترمزهای برقی بازیاب همزیستی کنند. از این رو، به عنوان سامانه‌های ترمز ترکیبی<sup>۴</sup> شناخته می‌شوند. هدف نهایی از طراحی و مهار چنین سامانه‌هایی این است که از عملکرد ترمز و بیشینه بازیابی انرژی ترمز اطمینان حاصل شود [۱]. امکان بازیابی انرژی جنبشی وسیله نقلیه یکی از مزایای ذاتی وسایل نقلیه برقی و دورگه است. هنگامی که یک وسیله نقلیه در آمد و شد سنگین حرکت می‌کند، بیش از نیمی از کل انرژی در ترمزها از بین می‌رود. بنابراین بازیابی انرژی ترمز یک روش مؤثر برای بهبود دامنه حرکتی خودروی برقی و بازده انرژی خودروی دورگه است.

گائو و دیگران [۲]، سه الگوی ترمز مختلف برای ارزیابی در دسترس بودن بازیابی انرژی ترمز را بررسی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد حتی بدون مهار ترمز فعال نیز می‌توان مقدار قابل توجهی از انرژی ترمز را بازیافت کرد و سامانه ترمز نیز نیازی به تغییر زیادی نسبت به سامانه ترمز خودروهای معمولی مسافرتی ندارد. استفاده از یک حالت ترمز احیا کننده می‌تواند باعث کاهش مصرف انرژی کلی خودرو در بیشتر چرخه‌های راجع رانندگی شود. با این حال، تعدادی از مسائل فنی استفاده از ترمز احیا کننده را برای همه شرایط احتمالی ترمز محدود می‌کند.

این مسائل مربوط به دو محدودیت اساسی است؛ مورد اول مربوط به محدودیت‌های فیزیکی سامانه ترمز احیا کننده کاربردی است، به عنوان مثال محدودیت توان موتور برقی (E-Motor)؛ ظرفیت ذخیره سازی انرژی و انتقال بار وسیله نقلیه و غیره. محدودیت دوم نتیجه تعامل بالقوه مضر بین ترمز احیا کننده و سامانه ترمز ضد قفل (ABS) است. چاپمن و همکاران [۳] در بررسی هایشان نتیجه گیری کردند که نوع اول محدودیت، تا حدودی می‌تواند با انتخاب مناسب سخت افزار کاهش یابد. نوع دوم محدودیت مربوط به راهبردهای<sup>۵</sup> ترمز احیا کننده در طول یک رویداد ABS است. همچنین برخی از راهبردهای ترمیم کننده طراحی و مورد بررسی در پروژه فناوری کم کربن وسیله نقلیه کربن (LCVTP) مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند.

لیو و همکاران [۴] بر اساس تجزیه و تحلیل ویژگی‌های ترمز در چرخه رانندگی شهری و چگالی توان شدید وسایل نقلیه دورگه روغنی<sup>۶</sup>، یک راهبرد ترمیم احیا کننده جدید متناسب با PHHV برای بهبود مصرف

سوخت پیشنهاد داده اند. نتایج شبیه سازی نشان داد که راهبرد ترمز احیا کننده روغنی معقولانه، گشتاور ترمز بازسازی کننده روغن و گشتاور ترمز اصطکاکی سنتی را توزیع می‌کند. هم چنین انرژی ترمز بازسازی شده وسیله نقلیه و عملکرد ترمز را بهبود می‌بخشد.

وانگ و همکاران [۵] راهبرد توزیع گشتاور احیا کننده (RTD) برای استفاده بیشتر از انرژی ترمز برای بهبود مصرف سوخت برای وسایل نقلیه برقی دورگه را پیشنهاد دادند که در آن نیروی ترمز احیا کننده موجود، تقاضای نیروی ترمز چرخ جلو و قفل چرخ جلو همه به صراحت مورد توجه قرار گرفتند.

با توجه به ضرورت جلوگیری از هدررفت و بازیابی انرژی‌های حاصل از ترمزگیری در رانندگی‌های شهری، مقاله حاضر به عنوان تحقیقی نو قابلیت برداشت انرژی از ترمزگیری با استفاده از سامانه ترمز بازیاب حین رانندگی طی چرخه‌های مختلف رانندگی را بررسی می‌کند. همچنین مقایسه جامعی میان نتایج بدست آمده از چرخه‌های مختلف رانندگی ارائه می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای بازیابی انرژی ترمز از طریق ترمزهای بازیاب دو راه وجود دارد: اول این که ابتدا انرژی در انباره ذخیره شود و سپس در مواقع نیاز این انرژی در مدار آزاد گردد؛ بازده این روش نزدیک به ۳۶٪ است. این راه ۴ مرحله تبدیل انرژی به همراه دارد که باعث کاهش بازدهی می‌شود. روش دوم این که انرژی به صورت مکانیکی در چرخ‌های طیار ذخیره شود و در مواقع لزوم به مدار برگردد؛ بازده این روش نزدیک به ۷۰٪ است [۱]. در مقاله حاضر برای محاسبه انرژی در چرخه‌های رانندگی تحت بررسی، از روش دوم استفاده شده است.

نیروی مقاوم در برابر حرکت خودرو از معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$F' = F_0 + F_1V + F_2V_2 \quad (N) \quad (1)$$

که در آن واحد تمامی ضرایب  $F$ ،  $N/(km/h)$  است؛ و  $V$  سرعت بر حسب  $km/h$  و  $F'$  نیروی مقاوم بر حسب  $N$  است.

طبق قانون دوم نیوتن، مجموع نیروهای وارد بر یک جسم برابر با شتاب ایجاد شده ضرب در جرم جسم است؛ از این رو نیرویی که برای حرکت یا ترمز کردن به چرخ‌های خودرو وارد می‌شود از معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$F = F' + ma = F_0 + F_1V + F_2V_2 + ma \quad (2)$$

انرژی مصرفی توسط خودرو از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$E = Fdx \quad (3)$$

که در آن  $dx$  مسافت پیموده شده است و از معادله ۴ محاسبه می‌شود:

<sup>4</sup> Hybrid

<sup>5</sup> Strategies

<sup>6</sup> Hybrid hydraulic

<sup>1</sup> Electric Vehicles

<sup>2</sup> Hybrid Electric Vehicles

<sup>3</sup> Fuel Cell Vehicles

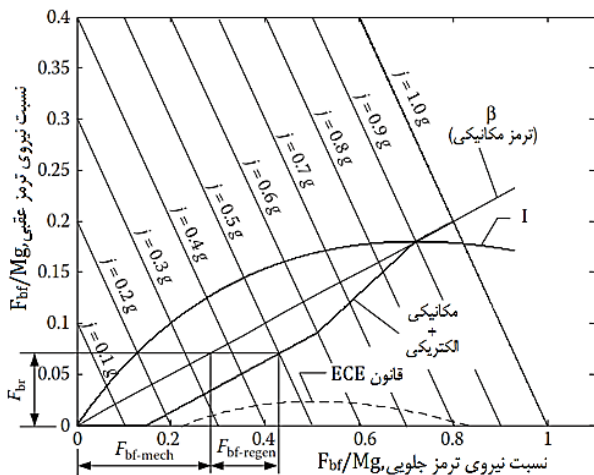
ترکیبی موازی است، که ساختار ساده‌ای دارد و قطعات اصلی ترمزهای معمولی را مهار و نگهداری می‌کند. دیگری یک سامانه ترمز ترکیبی کاملاً قابل مهار است، که می‌تواند نیروی ترمز را برای هر چرخ مجزا کاملاً مهار کند، بنابراین عملکرد ترمز خودرو را در انواع مسیرها تقویت می‌کند [۱].

## ۲-۲- سامانه ترمز ترکیبی موازی

این سامانه همه اجزای اصلی ترمزهای مکانیکی مرسوم را حفظ می‌کند و ترمز برقی را مستقیماً روی محور جلویی اضافه می‌کند. موتور برقی گشتاور ترمز خود را مستقیماً روی محور جلویی اعمال می‌کند و با مهار خودرو، بر اساس سرعت خودرو و موقعیت دریچه گاز، که قدرت ترمز دلخواه و راهبرد مهار ترمز جاسازی شده در مهار خودرو را نشان می‌دهد، مهار می‌شود. مشکل اساسی در طراحی و مهار چنین سامانه مهار درست نیروی ترمز برقی است تا بیشینه انرژی ترمز را بازیابی کند [۱].

## ۲-۳- اصول طراحی و مهار با نسبت ثابت بین نیروی ترمز برقی و مکانیکی

شکل ۲ یک راهبرد نیروی ترمز را نشان می‌دهد. نیروی ترمز روی چرخ‌های جلویی از ترمز مکانیکی ( $F_{bf-mech}$ ) و ترمز برقی ( $F_{bf-regen}$ ) تشکیل شده است؛ و کل نیروی ترمز با برچسب مکانیکی+برقی نشان داده شده است. وقتی که سرعت چرخ کمتر از ۱۵km/h ترمز برقی بازیاب هیچ نیروی ترمزی تولید نمی‌کند، و ترمز صرفاً با سامانه مکانیکی انجام می‌گیرد [۱].



شکل ۲: نیروهای ترمز با نرخ کاهش سرعت تغییر می‌کند [۱]

طراحی ترمز برقی با ظرفیت قدرت موتور برقی مرتبط است، ولی منحنی نیروی ترمز کل در شکل ۲ باید بالاتر از منحنی قانون ECE که کمینه نیروی ترمز روی چرخ‌های عقبی را مشخص می‌کند، باشد. کاهش سهم ترمز بازیاب از نرخ کاهش سرعت ۰.۶g تا ۰.۹g، به این دلیل است که نیروهای ترمز واقعی روی چرخ‌های جلویی و عقبی به

$$dx = \frac{V_{ave} \cdot dV}{a} \quad (۴)$$

در صورت ثابت بودن سرعت،  $dx$  از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

$$dx = V \cdot dt = \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot dt \quad (۵)$$

در بخش آزمون‌های تجربی این تحقیق، از یک خودروی دورگه توسعه یافته توسط شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) استفاده شد (شکل ۱). تمامی ضرایب معادله ۱ از آزمون coast down روی خودرو بدین شرح‌اند:

$F_2 = 0, 0, 171 \text{ N/(km/h)}$  و  $F_1 = 2, 4975$ ,  $F_0 = 138, 53$  شدند. پس از آن، تمامی محاسبات انرژی استحصالی از ترمزگیری با در نظر گرفتن محدودیت سامانه ترمز بازیاب، انباره خودروی دورگه و زمان ترمزگیری در هر یک از چرخه‌های رانندگی با برنامه‌نویسی در نرم افزار متلب صورت گرفت. صحت‌گذاری مقادیر حاصل از محاسبات، با مقادیر حاصل از آزمون تجربی خودرو بر روی شاسی لگام ترمز طی چرخه رانندگی استاندارد اروپا انجام شد. سپس از برنامه محاسباتی نوشته شده برای دیگر چرخه‌های رانندگی استفاده شد.

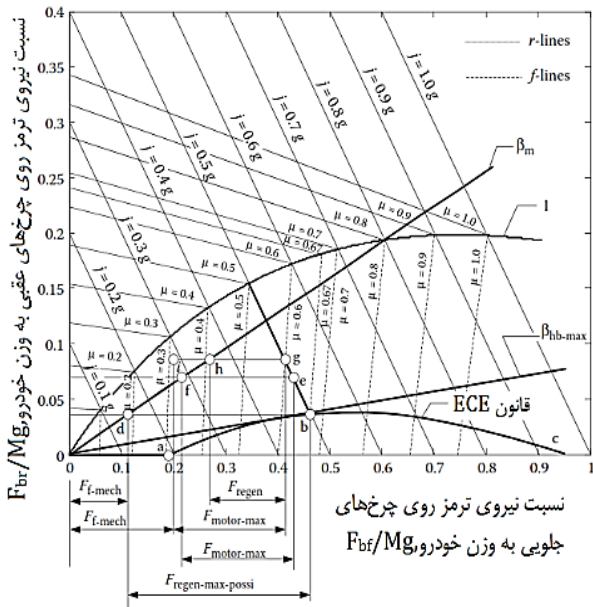


شکل ۱: خودروی دورگه استفاده شده در این تحقیق حین آزمون

در این تحقیق، چرخه‌های رانندگی استاندارد اروپا، FTP، نیویورک و چرخه رانندگی محدوده غربی شهر تهران که با استفاده از روش خوشه بندی k-means بر روی داده‌های رانندگی واقعی استخراج شد، بررسی شدند.

## ۲-۱- سامانه ترمز EV، HEV و FCV

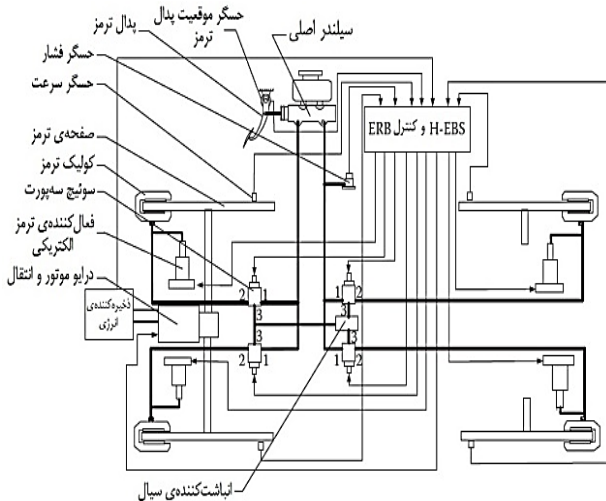
معمولاً ترمز بازیاب فقط برای محور محرک مؤثر است (محور جلو برای خودروهای سواری). موتور برقی باید به اندازه مناسب نیروی ترمز تولید کند تا بیشینه انرژی ترمز ممکن را بازیابی کند، و در عین حال، کل نیروی ترمز باید کافی باشد تا به نرخ کاهش سرعت خودرو که راننده می‌خواهد برسد. در این بخش دو پیکربندی سامانه ترمز ترکیبی، طراحی متناظر و اصول مهارشان معرفی می‌شود؛ اول سامانه ترمز



شکل ۴: شکل شماتیک توزیع نیروی ترمز روی چرخ‌های جلویی (مکانیکی + برقی) و چرخ‌های عقبی [۱]

#### ۲-۵- سامانه ترمز ترکیبی کاملاً مهار شده

شکل ۵ به صورت شماتیکی یک سامانه ترمز ترکیبی کاملاً مهار شده را نشان می‌دهد. این سامانه شامل یک سامانه ترمز روغنی برقی و یک سامانه ترمز برقی بازیاب می‌شود [۱].



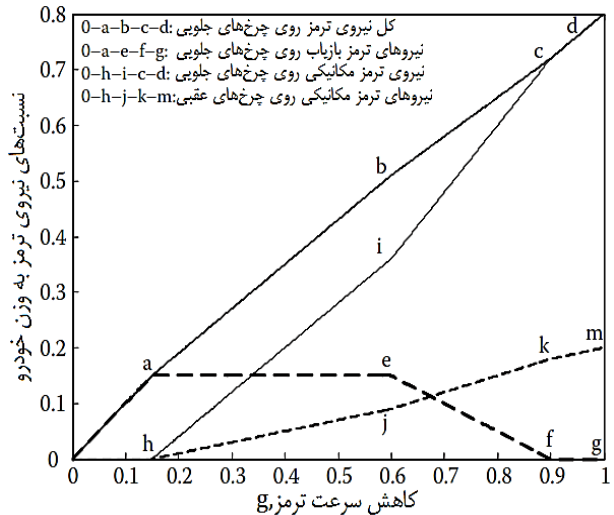
شکل ۵: سامانه ترمز ترکیبی کاملاً قابل مهار با H-EBS و ترمز برقی بازیاب [۱]

#### ۲-۶- راهبرد مهار برای عملکرد بهینه ترمز

همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، زمانی که موتور برقی به تنهایی نیروی ترمز روی چرخ‌های جلویی را اعمال می‌کند، ترمز مکانیکی به چرخ‌های عقبی هم نیرویی وارد می‌کند تا از منحنی I پیروی کند [۱].

منحنی توزیع ترمز آرمانی نزدیک شوند؛ که نتیجه‌اش فاصله ترمز کمتر و ترمز مکانیکی قوی‌تر خواهد بود که در مواقع اضطراری مطمئن‌تر است. شکل ۳ بترتیب کل نیروی ترمز، نیروی ترمز بازیاب، و نیروهای ترمز مکانیکی روی چرخ‌های جلو و عقب را بر حسب نرخ کاهش سرعت خودرو نشان می‌دهد [۱].

در مقاله حاضر برای محاسبه انرژی ترمز از این راهبرد مهار استفاده شده است.



شکل ۳: نسبت نیروی ترمز وابسته به وزن خودرو که با نرخ کاهش سرعت تغییر می‌کند [۱]

#### ۲-۴- اصول طراحی و مهار به منظور بازیابی انرژی بیشینه

این اصل طراحی و مهار از قانون پیروی می‌کند که تا جای ممکن کل نیروی ترمز را به چرخ‌های جلو، تحت شرایط رعایت قانون ECE، اختصاص می‌دهد، یعنی، توزیع کل نیروی ترمز از منحنی بیشینه نیروی ترمز محور جلویی مطابق شکل ۴ پیروی می‌کند (حداقل نیروی ترمز محور عقبی) که با قانون ECE تصریح می‌شود [۱].

برای بازیابی کامل بیشینه قدرت ترمز ممکن، دو شرط باید برقرار شود. شرط اول این که موتور برقی باید این نیروی ترمز را تولید کند؛ انرژی بازیابی شده با توان موتور برقی محدود می‌شود. فرض شود که موتور برقی به اندازه کافی قوی باشد، شرط دیگری که باید برقرار شود تا بیشینه قدرت ترمز ممکن بازیابی شود با قانون ECE محدود می‌شود. این شرط این است که ضریب چسبندگی مسیر باید بیش‌تر از ۰.۶۷ باشد. در غیر این صورت، چرخ‌های جلویی قفل می‌شوند.

از شکل ۴ می‌توان دید که قانون ECE یک منحنی پخش نیروی ترمز غیرخطی ایجاد می‌کند. این غیرخطی بودن ممکن است باعث یک طراحی و مهار پیچیده شود. یک خط ساده مستقیم می‌تواند جایگزین قانون ECE در طراحی و مهار سامانه ترمز ترکیبی شود، همان‌طور که در شکل ۴ با خط  $\beta_{hb-max}$  نشان داده شده است [۱].

قابل بازیافت بیش تری درست کند. با این حال، ظرفیت قدرت موتور برقی و مخزن انرژی معمولاً به اندازه کافی زیاد نیست که وقتی ترمز بسیار قوی است بتواند قدرت زیاد ترمز را مهار کند. در این مورد، فرض بر این است که موتور برقی بیشینه گشتاور ترمز خود را فراهم می کند، و ترمز مکانیکی بقیه گشتاور را فراهم می کند [۱].

### ۳- نتایج و بحث

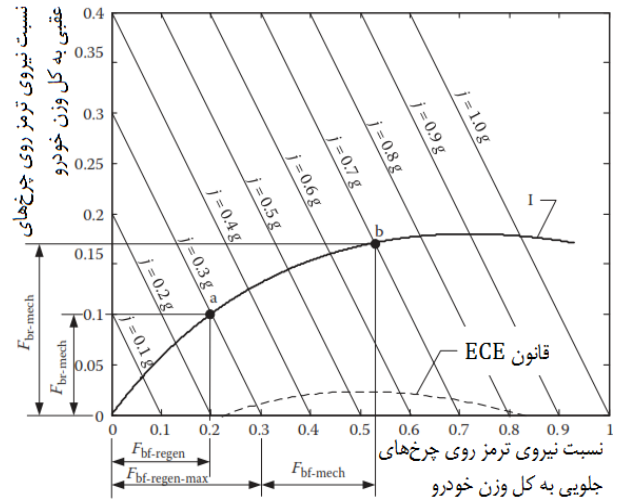
در این قسمت به ارائه نتایج به دست آمده در این تحقیق طی پنج بخش به شرح ذیل، پرداخته می شود.

#### ۳-۱- انرژی ترمز مصرفی در رانندگی شهری

وقتی که یک خودرو در مناطق شهری مدام می ایستد و حرکت می کند، مقدار قابل توجهی از انرژی با ترمزهای متعدد هدر می رود. این انرژی می تواند از ۲۰٪ انرژی کششی در شهرهای کوچک تا ۸۰٪ در شهرهای بزرگ باشد. جدول ۱ مقادیر بیشینه و میانگین سرعت خودرو، مسافت طی شده، انرژی کششی و ترمزی و درصد انرژی ترمزی به کششی برای چرخه های رانندگی مختلف را نشان می دهد. طبق این جدول، انرژی ترمزی در هر چرخه برای چرخه های رانندگی FTP75، نیویورک، اروپا و شهر تهران بترتیب ۰٫۶، ۰٫۲، ۰٫۳ و ۰٫۴ کیلووات است. همچنین درصد انرژی ترمزی به کششی برای چرخه های FTP75، نیویورک، اروپا و شهر تهران بترتیب حدوداً ۵۵، ۸۲، ۲۰ و ۴۱ درصد به دست آمده است.

جدول ۱: بیش ترین سرعت، میانگین سرعت، کل انرژی کششی، و انرژی های اتلاف شده با درگ و ترمز در چرخه های رانندگی مختلف

	تهران	اروپا	نیویورک	FTP75 Urban
بیشینه سرعت (km/h)	۶۷٫۹۵	۱۲۰٫۴	۴۴٫۶	۸۶٫۴
میانگین سرعت (km/h)	۲۵٫۵۴	۳۳٫۶۳۶	۱۲٫۲	۲۷٫۹
مسافت پیموده شده در هر چرخه (km)	۷٫۵۴۶۵	۱۱٫۰۲۴	۱٫۹۰	۱۰٫۶۳
انرژی کششی (kWh)	۰٫۹۷۲۰	۱٫۴۳۷۹	۰٫۲۹۶	۱٫۱۲۹
در هر چرخه	۰٫۱۲۸۸	۰٫۱۳۰۴	۰٫۱۵۵	۰٫۱۰۶
در هر کیلومتر				
انرژی ترمز (kWh)	۰٫۳۹۸۳	۰٫۲۸۹۳	۰٫۲۴۳	۰٫۶۲۵
در هر چرخه	۰٫۰۵۲۸	۰٫۰۲۶۲	۰٫۱۲۷	۰٫۰۵۹
در هر کیلومتر				
درصد انرژی ترمز به انرژی کششی	۴۰٫۹۸	۲۰٫۱۱۸	۸۱٫۹	۵۵٫۴

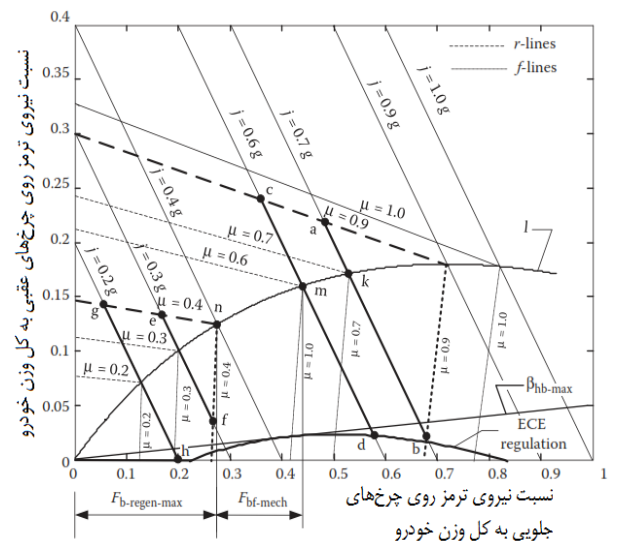


شکل ۶: راهبرد مهار برای بهترین عملکرد ترمز [۱]

همانطور که در شکل ۶ دیده می شود، مقدار زیادی از انرژی ترمز توسط ترمزهای عقبی از بین می رود، مخصوصاً در ترمزهای ضعیف (شتاب کم). برای مثال، در  $j = ۰٫۳g$ ، حدود ۳۳٪ از کل انرژی ترمز در ترمزهای عقبی از بین می رود. در  $j = ۰٫۱g$ ، این نسبت به ۳۷٫۸٪ می رسد [۱].

#### ۲-۷- راهبرد مهار برای بازیابی انرژی بهینه

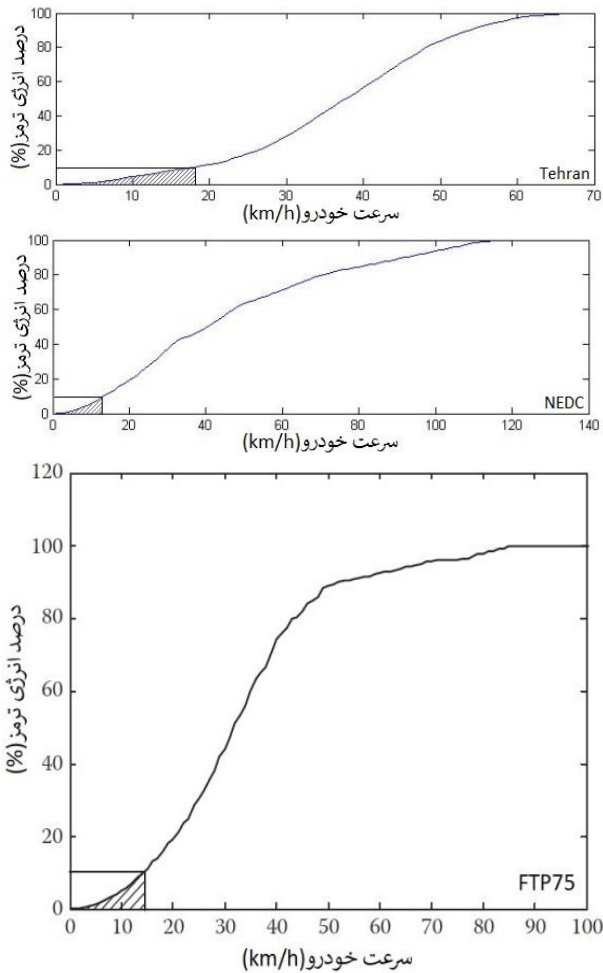
شکل ۷ نمودار راهبرد مهار برای بازیابی بهینه انرژی را نشان می دهد. اصل این راهبرد مهار، تخصیص نیروی ترمز بیش تر به چرخ های جلویی است در شرایطی که چرخ های جلویی روی مسیری با هر ضریب چسبندگی هرگز زودتر از چرخ های عقبی قفل نشوند. بنابراین انرژی ترمز بیش تری برای ترمز بازیاب در دسترس است [۱].



شکل ۷: راهبرد مهار برای بازیابی بهینه انرژی [۱]

این تحلیل فقط یک اصل مهار برای سامانه ترمز ترکیبی فراهم می کند تا بیشینه انرژی ترمز روی چرخ جلویی را به دست آورد تا انرژی ترمز

انرژی ترمز کمی در این محدوده برای بازیابی وجود دارد (کمتر از ۱۰٪). بنابراین عملکرد یک سامانه ترمز ترکیبی باید در سرعت‌های بالاتر از مقدار آستانه ۱۵km/h باشد. لازم به ذکر است که در سرعت‌های بالا با این که انرژی ترمز کم است اما به دلیل ولتاژ بالای موتور بازیابی راحت‌تری صورت می‌گیرد و در نتیجه به صرفه است. در محاسبات، کم‌ترین سرعت برای چرخه تهران ۱۸km/h و برای چرخه اروپا، ۱۳km/h در نظر گرفته شده است.



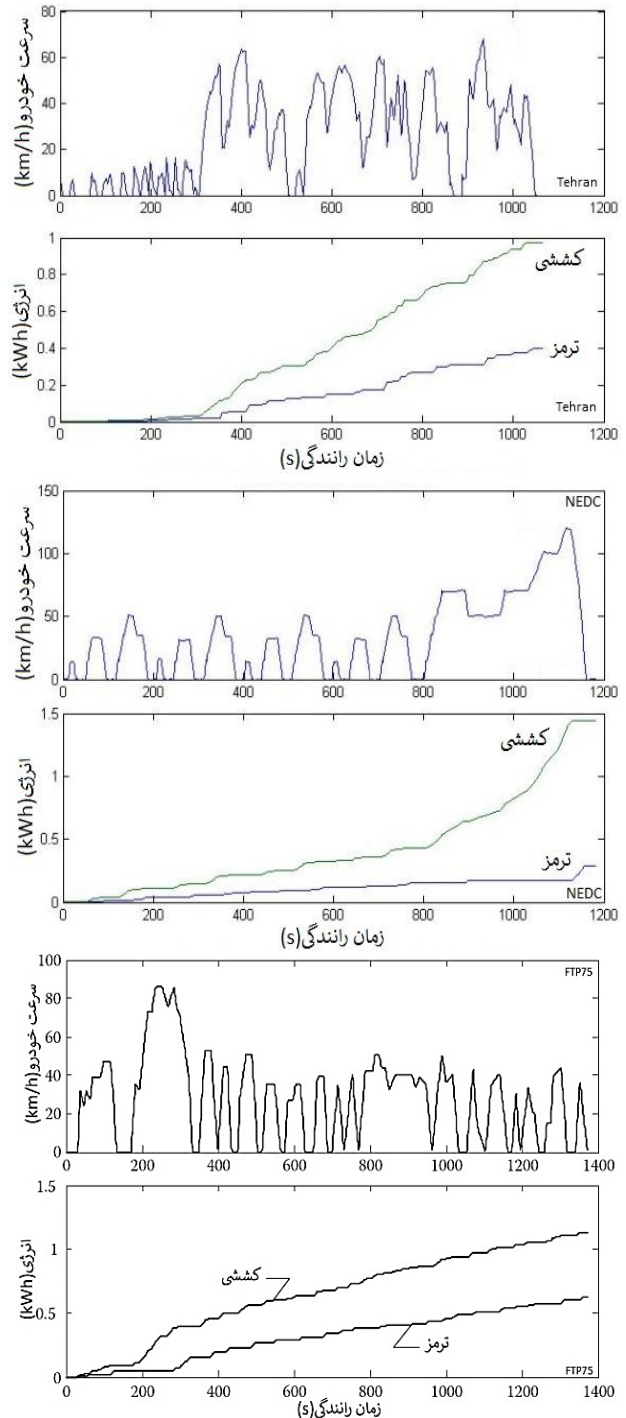
شکل ۹: انرژی ترمز هدررفته در محدوده سرعت کمتر از یک مقدار داده شده

جدول ۲ مقادیر درصد انرژی‌های ترمز در سرعت‌های کمتر از ۱۵km/h برای چرخه‌های رانندگی مختلف را نشان می‌دهد. برای چرخه رانندگی شهر تهران، مقدار این متغیر به حدوداً ۸ درصد رسیده است در حالی که برای چرخه اروپا، ۱۲ درصد است.

جدول ۲: انرژی‌های ترمز کمتر از ۱۵km/h در چرخه‌های مختلف

	تهران	اروپا	نیویورک	FTP75 Urban
انرژی ترمز (%) $V < 15\text{km/h}$	۷,۸۷	۱۲,۲۷۵	۲۱,۳۲	۱۰,۹۳

در شکل ۸ مصرف انرژی کششی و ترمز در چرخه‌های رانندگی تحت بررسی نمایش داده شده است.



شکل ۸: مصرف انرژی کششی و ترمز در چند چرخه رانندگی استاندارد

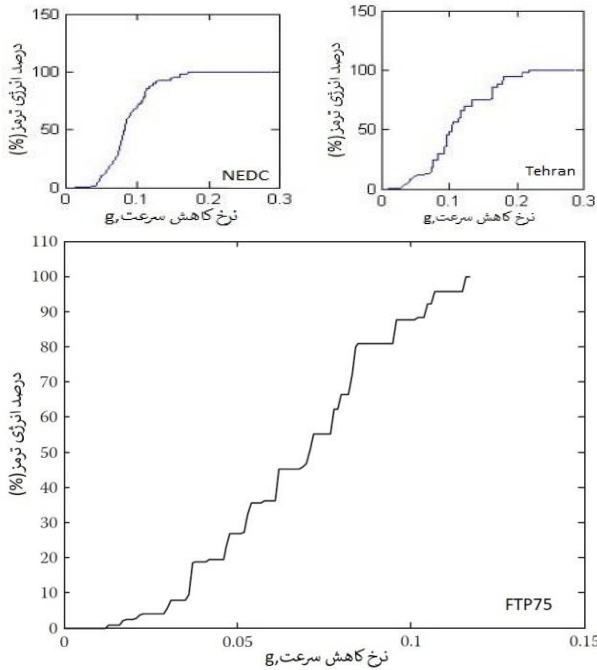
### ۳-۲- انرژی ترمز بر حسب سرعت خودرو

شکل ۹ انرژی ترمز هدررفته در محدوده سرعت کمتر از یک مقدار داده شده را در چند چرخه رانندگی شهری نشان می‌دهد.

در سرعت‌های کمتر از ۱۵km/h ولتاژ موتور کم است و در نتیجه بازیابی در سرعت‌های پایین سخت است. به علاوه با توجه به شکل ۹

### ۳-۳- انرژی ترمز بر حسب قدرت ترمز

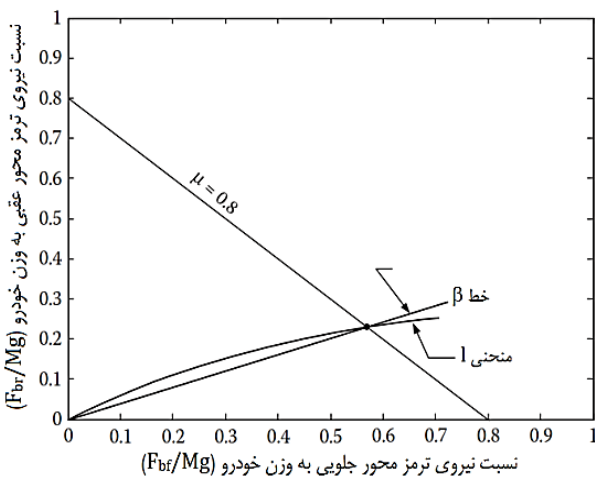
شکل ۱۰ نتایج شبیه‌سازی ترمز برای خودروی در حال حرکت در چند چرخه رانندگی شهری را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: انرژی ترمز هدررفته در نرخ‌های کاهش سرعت متفاوت

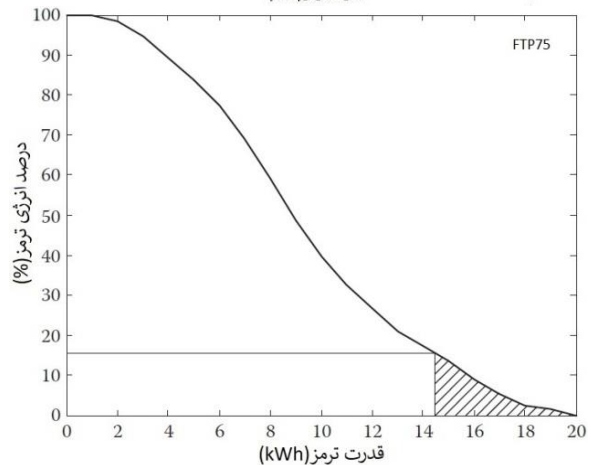
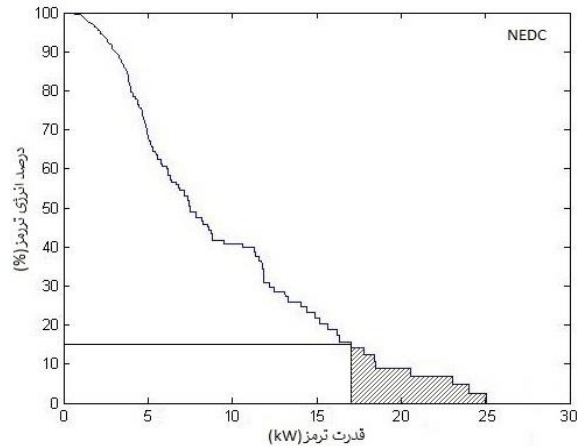
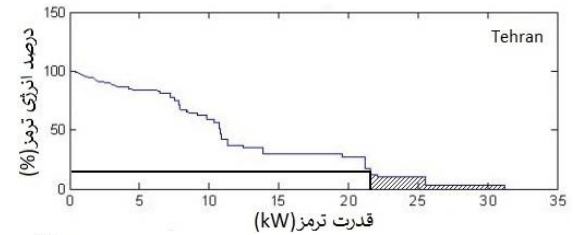
### ۳-۵- انرژی ترمز در محورهای جلو و عقب

عملکرد ترمز برای خودروهای سواری نیازمند پخش نیروی ترمز روی محورهای جلو و عقب است تا زیر منحنی  $I$  ولی بالای منحنی تنظیم ترمز باشد، همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این الزام به این معنی است که بیش‌تر نیروی ترمز روی محور جلویی اعمال می‌شود. در نتیجه، ترمز بازبای روی محور جلویی بهتر از محور عقبی است. با این حال، برای بقیه انواع خودرو، مثل باری‌ها، ممکن است محور عقبی بهتر باشد.



شکل ۱۲: منحنی‌های واقعی و ایده‌آل پخش نیروی ترمز [۱]

با استفاده از معادلات (۱) تا (۵) و راهبرد ترمز نسبت ثابت بین نیروهای ترمز برقی و مکانیکی، انرژی ترمز اعمال شده، انرژی ترمز بازبایی شده، انرژی کششی و نسبت انرژی ترمز و انرژی بازبایی شده به انرژی کششی در چرخه‌های تهران و اروپا برای ۱ تا ۴ سرنشین (به جز راننده) محاسبه شد و بترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است؛ این جداول نشان‌دهنده تأثیر



شکل ۱۰: درصد انرژی ترمز در محدوده بزرگ‌تر از قدرت نشان داده شده روی محور افقی

این شکل نشان می‌دهد که در چرخه FTP75 تقریباً ۱۵٪ کل انرژی ترمز در محدوده قدرت بزرگ‌تر از ۱۴,۴kW هدر می‌رود. لذا یک موتور برقی ۱۵kW می‌تواند تقریباً ۸۵٪ کل انرژی ترمز در این چرخه رانندگی را بازبایی کند. برای چرخه‌های تهران و اروپا این مقدار بترتیب برابر ۲۱,۶kW و ۱۷kW است.

### ۳-۴- انرژی ترمز بر حسب نرخ کاهش سرعت

شکل ۱۱ انرژی ترمز مصرف شده در نرخ کاهش سرعت خودرو کم‌تر از یک مقدار داده شده را هنگام رانندگی در چند چرخه رانندگی شهری نشان می‌دهد. می‌توان در این شکل ملاحظه کرد که ترمز گرفتن در این چرخه‌های رانندگی بسیار ملایم است؛ زیرا بیش‌ترین نرخ کاهش سرعت کم‌تر از ۰,۲۵g است.

جدول ۶: مقایسه انرژی بازیابی شده و نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی در چرخه تهران

	۱۵ kW	۲۲ kW
انرژی بازیابی شده (kWh)	۰,۲۷۳۲	۰,۳
نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی (%)	۲۵,۰۵۵۳	۲۷,۵۱۳۲

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، کارایی سامانه ترمز بازیاب در جهت کاهش مصرف انرژی برای خودروهای دورگه طی چرخه‌های رانندگی مختلف بررسی شد. انرژی‌های ترمزگیری، کششی و بازیابی شده برپایه آزمون‌های تجربی بر روی یک خودروی دورگه و محاسبات عددی برنامه‌نویسی شده در نرم افزار متلب برای هر یک از چرخه‌های رانندگی به دست آمد.

نتایج نشان داد که مقدار انرژی ترمزی در هر چرخه، برای چرخه‌های رانندگی FTP75، نیویورک، اروپا و شهر تهران بترتیب ۰,۶، ۰,۲، ۰,۳ و ۰,۴ کیلووات است. همچنین درصد انرژی ترمزی به کششی برای چرخه‌های FTP75، نیویورک، اروپا و شهر تهران بترتیب حدوداً ۵۵، ۸۲، ۲۰ و ۴۱ درصد به دست آمد.

به علاوه، برای چرخه رانندگی شهر تهران، مقدار درصد انرژی‌های ترمز در سرعت‌های کم‌تر از ۱۵km/h به حدوداً ۸ درصد رسید در حالی که برای چرخه اروپا، ۱۲ درصد بود. با توجه به نتایج به دست آمده، در چرخه FTP75 تقریباً ۱۵٪ کل انرژی ترمز در محدوده قدرت بزرگ‌تر از ۱۴,۴kW هدر می‌رود. لذا یک موتور برقی ۱۵kW می‌تواند تقریباً ۸۵٪ کل انرژی ترمز در این چرخه رانندگی را بازیابی کند.

برای چرخه‌های تهران و اروپا این مقدار بترتیب برابر ۲۱,۶kW و ۱۷kW بود. همچنین نتایج نشان داد که انرژی بازیابی شده در چرخه شهر تهران زمانی که خودرو ۴ سرنشین دارد مثلاً برای تاکسی‌ها، از خودروی تک سرنشین بیشتر است. بنابراین می‌توان از سامانه ترمزبازیاب به طور مؤثری در خطوط تاکسیرانی شهر تهران استفاده کرد.

همچنین نتایج نشان داد که مقدار انرژی بازیابی محاسبه شده برای چرخه رانندگی شهر تهران از چرخه اروپا نیز بیشتر است. این اختلاف حاکی از کارا نبودن چرخه استاندارد اروپا برای شهر تهران است. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان از سامانه ترمزهای بازیاب برای استفاده از انرژی ناشی از ترمزگیری در رانندگی شهر تهران و در نتیجه کاهش مصرف انرژی برای خودروهای دورگه استفاده کرد.

تعداد سرنشینان بر انرژی بازیابی شده است. وزن هر سرنشین ۷۴,۶kg در نظر گرفته شده است.

جدول ۳: انرژی‌های ترمز، بازیابی شده و کششی برای تعداد سرنشینان ۱ تا ۴ نفر در چرخه رانندگی تهران

	۱	۲	۳	۴
تعداد سرنشینان				
انرژی ترمز (kWh)	۰,۴۲۷۷	۰,۴۵۷۳	۰,۴۸۷	۰,۵۱۶۷
انرژی بازیابی شده (kWh)	۰,۲۳۵۷	۰,۲۴۸۵	۰,۲۶۱	۰,۲۷۳۲
انرژی کششی (kWh)	۱,۰۰۱۴	۱,۰۳۱	۱,۰۶۰۷	۱,۰۹۰۴
نسبت انرژی ترمز به انرژی کششی (%)	۴۲,۷۱۲	۴۴,۳۵۶	۴۵,۹۱۴	۴۷,۲۸۸
نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی (%)	۲۳,۵۳۲	۲۴,۱۰۵	۲۴,۶۰۴	۲۵,۰۵۵

جدول ۴: انرژی‌های ترمز، بازیابی شده و کششی برای تعداد سرنشینان ۱ تا ۴ نفر در چرخه رانندگی اروپا

	۱	۲	۳	۴
تعداد سرنشینان				
انرژی ترمز (kWh)	۰,۳۱۴	۰,۳۳۹	۰,۳۶۴	۰,۳۸۹
انرژی بازیابی شده (kWh)	۰,۱۸۳	۰,۱۹۴	۰,۲۹۳	۰,۲۱۵
انرژی کششی (kWh)	۱,۴۶۲	۱,۴۸۷	۱,۵۱۲	۱,۵۳۷
نسبت انرژی ترمز به انرژی کششی (%)	۲۱,۴۷	۲۲,۷۹	۲۴,۰۷	۲۵,۰۳
نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی (%)	۱۲,۵۳	۱۳,۱۰	۱۳,۵۷	۱۳,۹۸

این مقادیر با احتساب انباره ۱۴,۴kW محاسبه شده است. مطابق شکل ۱۰، ۱۵٪ انرژی ترمز در چرخه تهران در محدوده قدرت بزرگ‌تر از ۲۱,۶kW و در چرخه اروپا در محدوده قدرت بزرگ‌تر از ۱۷kW هدر می‌رود. اگر تنها سرنشین خودرو راننده باشد، در صورت استفاده از انباره‌های مناسب، انرژی بازیابی شده و نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی محاسبه شده، در جداول ۵ و ۶ بترتیب برای چرخه‌های تهران و اروپا با مقادیر به دست آمده از انباره ۱۴,۴kW مقایسه شده است.

جدول ۵: مقایسه انرژی بازیابی شده و نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی در چرخه اروپا

	۱۵ kW	۱۷ kW
انرژی بازیابی شده (kWh)	۰,۱۷۱۳	۰,۱۷۵
نسبت انرژی بازیابی شده به انرژی کششی (%)	۱۱,۹۱۰۲	۱۲,۱۷۱۶

- [4] T. Liu, J. Jihai, S. Hui, Investigation to simulation of regenerative braking for parallel hydraulic hybrid vehicles, In 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, IEEE, 2 (2009) 242-245.
- [5] F. Wang, B. Zhuo. Regenerative braking strategy for hybrid electric vehicles based on regenerative torque optimization control, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 222(4) (2008) 499-513.

### مراجع و منابع

- [1] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, K. Ebrahimi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press, 2018.
- [2] Y. Gao, C. Liping E. Mehrdad, Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV, SAE transactions (1999) 3184-3190.
- [3] S.A. Oleksowicz, K.J. Burnham, P. Barber, B. Toth-Antal, G. Waite, G. Hardwick, C. Harrington, J. Chapman, Investigation of regenerative and anti-lock braking interaction, International Journal of Automotive Technology, 14(4) (2013) 641-650.



## An Investigation on the Effect of Using Regenerative Braking System on Energy Consumption Reduction of Hybrid Vehicles Based on Tehran City Driving Cycle

E. Kargar Foroogh<sup>1\*</sup>, S. Abdolmaleki<sup>2</sup>, A. Moosavian<sup>3</sup>, H. Faghani<sup>4</sup>, E. Zakeri<sup>5</sup>, M. Salehi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> B.Sc. Student, Mechanical Engineering Department, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran, [ehsan.kf.76@yahoo.com](mailto:ehsan.kf.76@yahoo.com)

<sup>2</sup> PhD Student, Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, [saeed.abdolmaleki@modares.ac.com](mailto:saeed.abdolmaleki@modares.ac.com)

<sup>3</sup> Assistant Professor, Shahriyar Faculty, Technical and Vocational University, Tehran, Iran, [a\\_moosavian@tvu.ac.ir](mailto:a_moosavian@tvu.ac.ir)

<sup>4</sup> Calibration Unit, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO), [h\\_faghani@ip-co.com](mailto:h_faghani@ip-co.com)

<sup>5</sup> Design Unit, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO), [e\\_zakeri@ip-co.com](mailto:e_zakeri@ip-co.com)

<sup>6</sup> Calibration Unit, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO), [me\\_salehi@ip-co.com](mailto:me_salehi@ip-co.com)

\*Corresponding Author

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 10 January 2020

Accepted: 18 February 2020

#### Keywords:

Braking energy

Regenerated energy

Hybrid vehicles

Regenerative braking

### ABSTRACT

In driving and when you brake, a lot of energy is dissipated to stop the car; especially in urban areas where the vehicle is driving in a stop-and-go pattern. This energy, which is dissipated by the brake pads, can be stored in the vehicle's battery. In Hybrid and Electric Vehicles, a regenerative brake can be used alongside the mechanical brakes to regenerate some energy while braking. The purpose of this article is to investigate the appropriate time to use the regenerative brake, the amount of energy recoverable versus the vehicle's speed, braking power and deceleration rate, the amount of energy on front and rear axles, to investigate the braking power to meet the two requirements of providing the required brake force and not locking the wheels (not to slide the wheels) and to investigate two parallel and fully controlled hybrid braking systems. To this end, a Dena hybrid vehicle was used and the recovered energy during Europe and Tehran city driving cycles was computed and compared with each other. The results shows a significant and efficient effect of the use of the regenerative brake system to utilize the braking energy and consequently the energy consumption reduction for the hybrid vehicles in Tehran city driving.

