

برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات

چراغدار شهر تهران

رحیم ایلدرآبادی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه برق، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

E-mail: r.ildar@hsu.ac.ir

علی اصغر صادقی، استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

چکیده

امروزه گسترش شهرها و استفاده از خودروها بحران‌هایی از جمله افزایش مصرف سوخت، آلودگی هوا و ترافیک شهری را بدنبال داشته است. همواره مقدار قابل توجهی از انرژی خودروها، در اثر ترمزگیری‌های پی در پی در شهرهای پر ترافیک به هدر می‌رود. از این رو بازیابی و استفاده مجدد از انرژی ترمزی باعث کاهش مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا می‌گردد. در این مقاله یک برآورد حداقلی از مقدار متوسط انرژی و توان تلف شده خودروها در شهر تهران در اثر ترمزگیری مقابل چراغ‌های راهنمایی مطابق با آمار سال ۱۳۹۳ انجام شده و سپس مقدار انرژی قابل بازیافت روزانه آن محاسبه شده است. مقایسه انرژی قابل بازیابی ناشی از این ترمزگیری‌ها با انرژی روزانه تولیدی نیروگاه پرند و برق مصرفی منازل نشان می‌دهد تنها از همین نوع ترمزگیری می‌توان معادل ۳ درصد انرژی تولیدی نیروگاه پرند که معادل برق مصرفی ۹۶۰۰۰ منزل مسکونی است، صرفه‌جویی کرد. نتایج حاصل از محاسبات انجام گرفته می‌تواند بطور قابل توجهی، طراحی و ساخت سیستم‌های ترمز احیاء کننده انرژی را وسوسه انگیز و توجیه‌پذیر نماید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی هوا، بازیابی انرژی، ترافیک شهری، سیستم ترمز احیاء کننده انرژی

۱. مقدمه

انرژی ترمزی، در بخش سوم تخمینی از تعداد ترمزهای خودروها در شهر تهران که از توقف در تقاطع‌های چراغدار ناشی می‌شود، ارایه شده است. بخش ۴ نیز مقدار این انرژی و بخش قابل بازیابی آن را محاسبه می‌نماید. همچنین مقدار انرژی قابل بازیابی محاسبه شده با انرژی تولیدی نیروگاه پرند و همچنین حجم انرژی الکتریکی مصرف خانگی مقایسه می‌گردد. نتیجه‌گیری مباحث مطرح شده در بخش ۵ بیان می‌شود.

۲. سیستم‌های ترمز احیاء کننده انرژی

در کتاب‌های طراحی اجزاء ماشین [Bhandari, 2010] ترمز مکانیکی را سیستمی از خودرو تعریف کرده که انرژی جنبشی خودرو را به کمک نیروی اصطکاک جذب و به انرژی گرمایی تبدیل می‌کند. این ترمزها که در غالب خودروهای قدیمی و برخی خودروهای امروزی وجود دارند، با درگیر کردن لنتهایی که از مواد سایید شونده با اصطکاک زیاد ساخته شده اند، عمل ترمزگیری و کاهش سرعت و توقف برای خودروها را انجام می‌دهند [Day, 2014]. این نوع سیستم ترمز همه انرژی جنبشی را بصورت انرژی گرمایی تلف می‌کند، و علاوه بر این جنبه از جنبه ساییده شدن لنتها نیز موجب آلودگی محیط زیست می‌شوند. در ادامه نشان داده خواهد شد که این میزان انرژی تلف شده به خصوص در داخل شهرهای با ترافیک سنگین بطور محسوسی قابل ملاحظه است. به نحوی که اگر امکان بازیابی این انرژی وجود داشته باشد، ضمن کاهش مصرف سوخت خودروها، میزان آلاینده‌گی زیست محیطی را نیز کاهش داد. سیستم‌هایی که می‌توانند بخش اعظم انرژی تلف شده در هنگام ترمزگیری خودرو را کاهش دهند، سیستم ترمز احیاء کننده انرژی نامیده می‌شوند. این نوع سیستمها؛ انرژی ترمزی را به صورت الکتریکی در باتریها و ابرخازنها، و یا به صورت مکانیکی در چرخ طیار و یا به صورت پنوماتیکی در مخازن هوای فشرده، به عنوان بانک انرژی، ذخیره می‌نمایند و در هنگام شتابگیری خودرو با استفاده از انرژی ذخیره شده، بخشی از

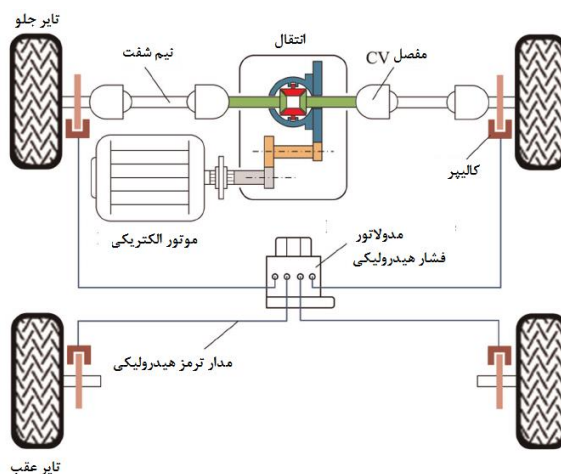
امروزه افزایش تعداد خودروها و میزان تردد آنها در سطح شهرها مشکلات بسیاری را با خود به همراه دارد. گسترش روزافزون خودروها موجب بروز بحران‌های قابل توجهی شده که از جمله آنها می‌توان به ترافیک شهری و آلودگی هوا اشاره نمود. بنابراین با توجه به حائز اهمیت بودن این موضوع مقالات و تحقیقات بسیاری در این رابطه انجام گرفته است [Larsen, 1966; Mage and Zali, 1992]. ترافیک در شهرهای بزرگ علاوه بر بروز مشکلاتی چون آلودگی هوا و افزایش مصرف سوخت، افزایش تعداد توقفها و به تبع آن، افزایش تعداد ترمزها را به همراه داشته است [Zhang and Batterman, 2013; Litman, 2019]. ترمز خودروهای معمولی مقدار قابل توجهی از انرژی در چرخه رانندگی را توسط ترمز خودروها تلف می‌کنند [Walker, 2005]. این اتلاف انرژی علاوه بر افزایش مصرف سوخت و آلودگی هوا موجب کاهش بازده موتور نیز می‌گردد. ایونیک [Iwnicki, 2006] به برآورد این مقدار انرژی پرداخته است. اهمیت این موضوع باعث شده تا محققین به فکر بازیابی توسط جایگزینی ترمزهای مکانیکی متداول با سیستمهای ترمزی جدیدی بیفتند که قادرند این انرژی را به چرخه مفید استفاده از انرژی برگردانند. این سیستم ترمز با قابلیت بازیابی انرژی ترمزی معمولاً به سیستم ترمز احیاء کننده انرژی^۱ معروف است. این سیستمها قادرند که درصد قابل توجهی از انرژی اتلافی ناشی از ترمز خودروها را بازیافت نمایند. سیستم بازیابی انرژی ترمزی می‌تواند بر روی انواع وسایل نقلیه از لحاظ نوع موتور و نحوه تامین انرژی و از جمله خودروهای با سوخت فسیلی نصب شود. همچنین این سیستم بر حسب اندازه و وزن ماشین بر روی انواع وسایل نقلیه سبک و سنگین قابل نصب است.

در این مقاله سیستمهای احیاء کننده انرژی در بخش ۲ توضیح داده می‌شوند. به منظور نشان دادن ملموس تر اهمیت بازیابی

برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات چراغدار شهر تهران

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، موتور الکتریکی به چرخ‌های جلو خودرو کوپل شده است. این موتور در هنگام احتیاج به انرژی مکانیکی جنبشی، به صورت موتوری عمل کرده و این انرژی را از بانک باتری‌ها تامین می‌نماید. در حالت ترمزی نیز شتاب منفی لازم برای خودرو را با جذب انرژی مکانیکی جنبشی خودرو از طریق چرخ‌های جلو تامین می‌کند. در این حالت ماشین الکتریکی به صورت مولدی عمل نموده و انرژی مکانیکی جنبشی جذب شده را به صورت الکتریکی در بانک باتریها ذخیره می‌نماید. ساختارهای سیستم ترمز احیاء کننده انرژی و مقایسه آن با سیستم ترمز معمولی در شماری از مراجع [Cao, Bai and Zhang, 2005; Lin, 2016] مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. سیستم ترمز احیاء کننده یکی از موضوعاتی است که در سالهای اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و در خودروهایی چون الکتریکی، هیبریدی و سلول سوختی پیاده‌سازی شده است [Palou, 1994; Chan, 2007]. گاو، چن و احسانی [Gao, Chen, L. and Ehsani, 1999] به بررسی تأثیرات پیاده‌سازی سیستم ترمز احیاء کننده بر روی خودروهای الکتریکی و هیبریدی پرداخته‌اند. گاو، ونگ و کاو [Guo, Wang, and Cao, 2009] ذکر کرده‌اند که کاربرد این سیستم در خودروهای الکتریکی موجب افزایش میزان رانندگی در یک بازه شارژی مشخص می‌شود. تاکنون طرح‌های ساختاری و کنترلی بسیاری به منظور بهبود هرچه بیشتر این سیستم ارائه شده است. تا کنون طرح پیاده‌سازی سیستم ترمز احیاء کننده فعال و استفاده از موتور الکتریکی DC بدون جاروبک (BLDC) و ترمز احیاء کننده هوشمند^۴ مبتنی بر منطق فازی^۵ به منظور بهبود هرچه بیشتر بازیابی انرژی ترمزی پیشنهاد شده است [Nian, Peng, and Zhang, 2014; Xu et al., 2011]. هودا و همکارانش [Huda et al., 2020] تأثیر ترمز احیاء کننده در مصرف انرژی کلی یک وسیله نقلیه الکتریکی تبدیل شده مورد بررسی قرار داده‌اند. استراتژی

انرژی لازم جهت شتاب‌گیری را مجدداً مورد استفاده قرار می‌دهند. بدین ترتیب بخش اعظم انرژی ترمزی بازیابی می‌گردد. از میان سیستم‌های مذکور، سیستم ترمزی احیاء کننده انرژی نوع الکتریکی معمولاً برای خودروهای شهری مرسوم‌تر هستند. سیستم‌های احیاء کننده انرژی الکتریکی، ماشینهای الکتریکی هستند که به محور چرخهای خودرو کوپل شده‌اند. این ماشینهای الکتریکی قابلیت کار در حالت موتوری و ژنراتوری را دارا هستند. هنگامی که لازم است تا سرعت خودرو کاسته شود، این ماشین الکتریکی به صورت مولدی (ژنراتوری) عمل کرده و با اخذ انرژی جنبشی خودرو باعث ایجاد شتاب منفی در خودرو شده و سرعت آن را کاهش می‌دهد. ماشین الکتریکی انرژی جنبشی‌ای که دریافت نموده را به صورت الکتریکی در بانک‌های ذخیره انرژی الکتریکی نظیر ابرخازنها و باتریها، ذخیره می‌نماید. از طرفی در هنگام شتاب‌گیری (مثبت) خودرو ماشین الکتریکی در حالت موتوری قرار گرفته و انرژی ذخیره شده را به منظور فراهم کردن بخشی از انرژی لازم جهت شتاب‌گیری به صورت انرژی جنبشی (مکانیکی) آزاد می‌کند [Naseri, Farjah and Ghanbari, 2017]. شکل ۱ شماتیک یک مدل از سیستم‌های ترمز احیاء کننده انرژی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شماتیک عملکرد نمونه‌ای از سیستم‌های احیاء کننده

انرژی [Chen et al., 2014]

متوسط درصد زمان	۵۱/۱	۵۱/۸	۵۰/۷
تاخیر به زمان سفر			

به منظور سادگی مطالعه، میانگین تعداد توقفات مقابل چراغ‌های راهنمایی برای یک خودرو به نمایندگی از سایر خودروهای سطح شهر تهران در طول یک روز محاسبه و در تعداد سفرهای روزانه خودروها ضرب می‌شود، تا تعداد کل ترمزهای شهر تهران در طول یک روز بطور متوسط بدست آید.

برای این منظور ابتدا میانگین تعداد چراغ‌های راهنمایی که هر خودرو به طور متوسط در مسیر خود با آنها روبرو می‌شود را محاسبه و سپس تعداد توقف‌های مقابل چراغ‌های راهنمایی بدست می‌آیند. بدین منظور متوسط مسافت طی شده یک سفر روزانه درون شهری با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$X_{i,avg} = v_{i,avg} \times t_{i,avg} \quad (1)$$

که در آن:

$X_{i,avg}$: متوسط مسافت طی شده در هر سفر درون شهری برای خودرو

$v_{i,avg}$: متوسط سرعت سفر روزانه درون شهری

$t_{i,avg}$: متوسط زمان یک سفر درون شهری

و با جایگذاری داده‌های جدول ۱ در رابطه ۱ داریم:

$$X_{i,avg} = 0.451 \frac{km}{min} \times 25min = 11.275 km$$

جدول ۲. تعداد چراغ قرمزهای شهر تهران در سال ۱۳۹۳

[TTOTM, 2015]			
مناطق	ثابت	زماندار	هوشمند
۱	۸	۸	۲۲
۲	۳۹	۳۹	۳۴
۳	۵	۵	۲۷
۴	۳۶	۳۵	۵۲
۵	۱۰	۱۰	۳۷
۶	۲۲	۲۲	۵۹
۷	۸	۸	۳۶
۸	۱۷	۱۶	۲۵

بهینه سازی و کنترل بهره وری سیستم ترمز احیا کننده با موتور دوگانه نیز اخیرا ارایه شده است [Yang et al. 2020].

۳. تخمین متوسط روزانه تعداد ترمزهای

خودروهای شهر تهران

عمل ترمزگیری در هنگام رانندگی به دلیل کاهش سرعت، جلوگیری از برخورد با وسیله نقلیه دیگر و یا پیاده‌رو، پارک نمودن، تغییر مسیر، پیاده و سوار کردن مسافر و توقف نهایی و همچنین توقف پشت چراغ‌های راهنمایی در روند رانندگی از یک مبدا به مقصد امر اجتناب ناپذیر است. چراغ‌های راهنمایی به منظور مدیریت ترافیک شهر مورد استفاده قرار می‌گیرند و وجودشان اجتناب ناپذیر است. با افزایش حجم تردد نسبت به ظرفیت مسیر میزان ترمزگیری نیز افزایش می‌یابد. در شهرهای بزرگی نظیر تهران (که به طور متوسط) طول مسیر سفر افراد طولانی است، معمولا تعداد ترمزها نیز افزایش می‌یابد. در این تحقیق صرفا به برآورد تعداد ترمز خودروهای سواری سبک در هنگام توقف کامل پشت چراغ راهنمایی پرداخته شده است. در جدول ۱ آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۳ آورده شده است. همچنین جدول ۲ تعداد و انواع چراغ قرمزهای موجود در شهر تهران بیان می‌نماید [TTOTM, 2015].

جدول ۱. آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران ۱۳۹۳

[TTOTM, 2015]				
عنوان	واحد	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳
تعداد سفرهای روزانه	میلیون سفر	۱۷,۴	۱۷,۷	۱۸
درون شهری	روزانه			
میانگین سرعت سفر	کیلومتر در	۲۶,۵	۲۷,۲	۲۷,۱
روزانه درون شهری	ساعت			
متوسط زمان یک سفر	دقیقه	۲۵,۵	۲۵	۲۵
درون شهری				

برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات چراغدار شهر تهران

$P_{all,teh}$: طول خیابان‌های شهر تهران که امکان نصب چراغ

راهنمایی در آن وجود دارد

بنابراین $N_{i,avg}$ برابر می‌شود با:

$$N_{i,avg} = \frac{11.275 \times 1112}{1875} = 6.69 \cong 7$$

بعد از محاسبه تعداد چراغ‌هایی که هر خودرو به طور میانگین در مسیر خود با آن روبرو می‌شود به بررسی تعداد توقف کامل پشت این چراغ‌ها پرداخته می‌شود. سهم هر کدام از انواع وسایل نقلیه مختلف در حمل و نقل روزانه سفرهای داخلی شهر تهران را برحسب درصد در جدول ۳ آمده است. همچنین متوسط ضریب سرنشین وسایل نقلیه در مطالعات جامع حمل و نقل و ترافیک این شهر نیز توسط جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳. سهم وسایل نقلیه در سفرهای شهر تهران در سال ۱۳۹۳

(درصد) [TTOTM, 2015]

مترو	اتوبوس و مینی بوس	تاکسی	سواری	جمع
۱۶/۴	۲۰	۲۱/۸	۴۱/۸	۱۰۰

جدول ۴. متوسط ضریب سرنشین وسایل نقلیه شهر تهران

(برحسب نفر) [TTOTM, 2013]

اتوبوس واحد	مینی بوس	تاکسی	وانت	سواری
۳۹/۰۵	۱۷/۲۲	۲/۴۱	۱/۴	۱/۳۴

در این مقاله فرض می‌شود که چراغ‌ها به فاصله یکسان از هم قرار گرفته، همزمان سبز و قرمز شده و بازه زمانی سبز و قرمز این چراغ‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۱ دقیقه باشد. مبدا حرکت خودرو از چراغ‌راهنمایی اول فرض می‌شود یعنی در مقابل چراغ-راهنمایی اول توقف و بعد از سبز شدن آن حرکت می‌کند. با توجه به فاصله بین چراغ‌های راهنمایی و سرعت متوسط خودرو که به ترتیب برابر با ۰/۴۱۸ km و $0.0594 \frac{km}{min}$ ($35/65 \frac{km}{h}$) سرعت حرکت بدون در نظر گرفتن توقف در چراغ هستند، خودرو بعد از ۰/۷ دقیقه به چراغ‌راهنمایی دوم می‌رسد. همچنین با توجه به فرضیات قبلی مبتنی بر همزمان سبز و قرمز شدن چراغ‌ها و بازه زمانی سبز و قرمز ماندن آن‌ها، خودرو در لحظه

مناطق	ثابت	زماندار	هوشمند
۹	۱۵	۱۳	۹
۱۰	۲۶	۲۷	۲۶
۱۱	۲۱	۲۱	۲۴
۱۲	۲۴	۲۴	۱۹
۱۳	۶	۶	۹
۱۴	۱۰	۱۰	۱۴
۱۵	۱۰	۸	۱۶
۱۶	۱۰	۱۰	۵
۱۷	۱۱	۱۱	۲
۱۸	۷	۷	۹
۱۹	۱۳	۱۳	۶
۲۰	۸	۸	۴
۲۱	۱۷	۱۶	۷
۲۲	۸	۸	۱۴
جمع	۳۳۱	۳۲۵	۴۵۶

تعداد چراغ‌های قرمز موجود مناطق مختلف شهر تهران برای سال ۱۳۹۳ در جدول ۲ براساس گزارش شرکت کنترل ترافیک شهر تهران آورده شده است [TTOTM, 2015]. با توجه به این جدول تعداد کل چراغ‌های قرمز شهر تهران ۱۱۱۲ عدد است.

طول خیابان‌های شهر تهران که امکان نصب چراغ راهنمایی در آن وجود دارد برابر ۱۸۷۵ km تخمین زده شده است [Google Maps, 2019] و با بهره‌گیری از یک تناسب ساده میانگین تعداد چراغ‌های راهنمایی قابل نصب در متوسط مسافت طی شده در طول یک روز مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$N_{i,avg} = \frac{X_{i,avg} \times N_{all}}{P_{all,the}} \quad (2)$$

که در آن:

$N_{i,avg}$: میانگین تعداد چراغ‌های راهنمایی است که خودرو در هر سفر با آنها برخورد می‌کند.

N_{all} : تعداد کل چراغ‌های راهنمایی شهر تهران

تاخیر در آمارنامه حمل و نقل شهری سال ۱۳۹۳ تهران از داده های سال ۱۳۹۲ استفاده می شود که نسبت تاخیر در تقاطع و در مسیر از تاخیر کل را به ترتیب برابر ۴۶/۹ و ۵۳/۱ ذکر کرده است [TTOTM, 2014]. در این صورت متوسط سرعت حرکت در مسیر با حذف تاخیر ناشی از تقاطعات برابر است با (V_0) :

$$V_0 = \frac{27.1}{(1-0.507 \times 0.469)} = 35.55 \text{ km/h}$$

با توجه به توقف کامل پشت چراغ V_f برابر صفر و وزن میانگین برای خودروهای سبک ۱۱۰۰ کیلوگرم فرض می شود. طبق رابطه (۳) متوسط انرژی اتلافی در خودرو نماینده به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$E_{i_{recov}} = \frac{1}{2} \times 1100 \times \left(\frac{35.55}{3.6}\right)^2 = 53633.6$$

با توجه به تعداد ترمزهای بدست آمده در بخش ۲ برای خودروهای شهر تهران مقدار انرژی متوسط کل تلف شده برابری می شود با:

$$E_{recov} = E_{i_{recov}} \times Y \quad (۴)$$

$$E_{recov} = 53633.6 \times 50.701 \times 10^6 \\ = 2.719 \times 10^{12} \text{ J}$$

مقدار انرژی متوسط کل تلف شده به روش دیگری نیز تخمین زده می شود. در این روش با فرض پیاده سازی ترمز بازیافت در خودروهای شهر تهران و تامین تمام نیروی ترمزی مورد نیاز خودرو توسط ترمز بازیابی به محاسبه مقدار متوسط انرژی و توان قابل بازیافت این خودروها پرداخته می شود. نیروی ترمزی مورد نیاز برای کاهش سرعت خودرو از رابطه زیر بدست می آید [Guo, Wang and Cao, 2009]:

$$F_{req} = F_a - F_r - F_w - F_k \quad (۵)$$

که در آن:

F_a : نیروی مورد نیاز برای کاهش سرعت خودرو

F_r : نیروی مقاومت غلتشی تایر

F_w : نیروی پسای آیرودینامیکی

F_k : نیروی شیب جاده

رسیدن به چراغ دوم که حالت قرمز خود را دارد توقف می کند. این بار مبداء حرکت خودرو چراغ راهنمایی دوم خواهد بود و دقیقاً حالت قبل پیش می آید بنابراین خودرو نماینده در مقابل تمام چراغ های راهنمایی که در مسیر خود قرار دارد توقف می کند و تعداد توقفات برابر ۶/۶۹ می شود. با توجه به تعداد سفر روزانه در شهر تهران، سهم وسایل نقلیه سبک شامل سواری ها و تاکسی ها و میزان ضریب سرنشین هر وسیله تعداد خودروهای سبک که در جداول ۱، ۳ و ۴ آورده شده است تعداد خودروهای در حال سفر (C) برابر است با:

$$C = 18 \times 10^6 \times \left(\frac{0.418}{1.34} + \frac{0.218}{2.41}\right) \\ = 7.243 \times 10^6$$

حال اگر تعداد توقفها پشت چراغ قرمزها در تعداد سفرهای روزانه خودروهای سبک ضرب شود، تعداد ترمزهای خودروهای سبک شهر تهران به طور متوسط در طول یک روز بدست می آید، که حاصل برابر می شود با (Y):

$$Y = C \times N_{i_{avg}} = 7.243 \times 10^6 \times 7 \\ = 50.701 \times 10^6$$

۴. متوسط انرژی تلف شده ناشی از

ترمزهای خودروهای شهر تهران در طی یک روز

در فرآیند ایست خودروهای معمولی تمام انرژی جنبشی خودرو تلف می شود. برای محاسبه این انرژی داریم:

$$E = \frac{1}{2} M (V_0^2 - V_f^2) \quad (۳)$$

در رابطه بالا V_0 سرعت اولیه خودرو در هنگام ترمز و V_f سرعت نهایی خودرو بعد از ترمز و M وزن خودرو می باشد.

با توجه به جدول ۱ متوسط زمان سفر و متوسط زمان تاخیر به زمان سفر در سال ۱۳۹۳ در شهر تهران برابر با km/h ۲۷/۱ و ۵۰/۷ درصد می باشد. بخشی از تاخیر به زمان تلف شده در تقاطع و بخشی از آن به تراکم ترافیک در مسیر مربوط می شود. با توجه به عدم ذکر نسبت این دو نوع

برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات چراغدار شهر تهران

برای نیروهای فوق روابط زیر را خواهیم داشت:

$$F_r = C_r \times mg \times \cos \alpha \quad (6)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_w \times A_f \times C_d \times V_0^2 \quad (7)$$

$$F_h = mg \times \sin \alpha \quad (8)$$

که در روابط بالا:

C_r : ضریب اصطکاک غلتشی

α : زاویه شیب جاده

ρ_w : چگالی هوای محیط

A_f : مساحت سطح جلو خودرو

C_d : ضریب پسی آیرودینامیکی [Gantt, 2011]

میزان نیروی لازم جهت توقف خودرو با سرعت اولیه V_0 در

مدت زمان t_s عبارتست از:

$$F_{req} = M \frac{0-v_0}{t_s} \quad (9)$$

$$F_{req} = 1100 \frac{0-\frac{35.55}{3.6}}{5} = -2172.5N$$

که منفی بودن نیرو نشان دهنده وارد شدن آن به سیستم بدلیل ایجاد شتاب منفی است.

برای بیان رابطه میان انرژی و نیرو داریم:

$$E_{req} = F_{req} \times SD \quad (10)$$

$$SD = \frac{t_s \times V_0}{2} \quad (11)$$

در رابطه (11) SD و t_s به ترتیب مسافت و زمان طی شده هنگام ترمزگیری خودرو هستند.

مسافت طی شده با استفاده از رابطه (11) برابر است با:

$$SD = \frac{9.875}{2} \times 5 = 24.69m$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$E_{req} = 2172.5 \times 24.69 = 53639 J$$

از طرفی بخشی از این انرژی مطابق صرف غلبه بر دیگر نیروها می شود. بنابراین با فرض اینکه سیستم ترمز احیاء کننده بتواند تمام انرژی ناشی ناشی از شتاب منفی را بازیابی نماید، انرژی قابل بازیافت یک خودرو از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_{i_recov} = E_{req} - [(F_r + F_w + F_h)SD] \quad (12)$$

با توجه به داده های جدول ۵ داریم:

$$F_r = 0.008 \times 1100 \times 9.8 \times \cos 0 \\ = 86.24N$$

$$F_h = 1100 \times 9.8 \times \sin 0 = 0$$

$$F_w = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 2.1 \times 0.3 \times 9.875^2 \\ = 73.72$$

از رابطه (۱۲) می توان نوشت:

$$E_{i_recov} = 53639 - [(86.24 + 73.72 + 0) \times 24.69] \approx 51920 J$$

با استفاده از رابطه (۴) مقدار متوسط انرژی قابل بازیافت تمام خودروهای سبک شهر تهران در طی یک روز محاسبه می شود:

$$E_{recov} = 51920 \times 50.701 \times 10^6 \\ = 2.632 \times 10^{12} J$$

ملاحظه می شود که با روش مذکور انرژی قابل بازیابی کمی کمتر از میزانی است که از روش اول محاسبه گردید و دلیل آن نیز وجود انرژی های تلفاتی است که از کل انرژی لازم برای ترمزگیری کم شده است.

ملاحظه می شود که بخش قابل ملاحظه ای از کل انرژی لازم جهت ترمزگیری با شرایط مذکور، قابل بازیابی است که این میزان به درصد عبارتست از:

$$\eta = \frac{E_{recov}}{E_{req}} = \frac{2.632 \times 10^{12}}{2.719 \times 10^{12}} \times 100 = 96.8\% \quad (13)$$

به منظور نشان دادن اهمیت میزان انرژی قابل بازیافت توسط سیستم احیاء انرژی ترمزی، دو مقایسه به صورت زیر انجام می شود.

جدول ۵. داده های خودرو مورد مطالعه [Zhao, 2017]

۱۱۰۰	وزن خودرو (کیلوگرم)
۲/۱	سطح جلو خودرو (متر مربع)
۵	زمان ایست خودرو (ثانیه)
۰/۰۰۸	ضریب اصطکاک غلتشی
۰/۳	ضریب پسی آیرودینامیکی
۱/۲	چگالی هوای محیط (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰	شیب جاده (درجه)

$$E_{Demand} = 2614 \times 3600 \times \frac{1000}{360}$$

$$\approx 2.6 \times 10^7 J$$

ملاحظه می‌شود با توجه به نتایج حاصل، در صورت بازیابی انرژی ترمزی تعداد منازلی که می‌توان انرژی آنها را تامین کرد برابر است با:

$$N = \frac{E_{recov}}{E_{Demand}} = \frac{2.5 \times 10^{12}}{2.6 \times 10^7} = 96000 \quad (14)$$

۵. نتیجه‌گیری

در ترمزگیری خودروهای معمولی مقدار قابل توجهی از انرژی به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شود. در این مقاله ابتدا یک برآورد حداقلی از تعداد ترمزگیری خودروها معادل با تعداد توقف های خودروها در تقاطعات چراغ‌دار محاسبه شده و سپس مقدار متوسط انرژی تلف شده ناشی از این ترمزگیری‌ها برآورد شده است که حدوداً ۲۶۳۲ گیگا ژول، معادل با ۷۳۱ مگا وات ساعت می‌باشد. در ادامه محاسبات نشان می‌دهند در صورتیکه ترمز بازیافتی صرفاً برای خودروهای سبک شهر تهران پیاده سازی ۹۶٫۸٪ انرژی و توان تلف شده فوق قابل بازیافت خواهد بود. مقایسه بین توان قابل بازیافت و توان تولیدی نیروگاه پرند نشان می‌دهد که اگر بتوان سوخت حاصل از صرفه‌جویی این مقدار متوسط انرژی بازیافت شده را در مصارفی چون خانگی و کشاورزی استفاده نمود یک صرفه‌جویی ۳ درصدی خواهیم داشت که معادل برق مصرفی حدود ۹۶۰۰۰ خانه است. قابل ذکر است که میزان صرفه‌جویی محاسبه شده در این مقاله، با توجه به اینکه تعداد ترمزها صرفاً معادل توقفها در تقاطعات چراغدار در نظر گرفته شده است، یک برآورد حداقلی است و در روند رانندگی تعداد ترمزگیری‌ها به دلیل جلوگیری از تصادف، سوار و پیاده کردن مسافر و توقف نهایی بسیار بیشتر خواهد بود که برآورد میزان صرفه‌جویی انرژی را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

۴-۱ مقایسه انرژی بازیافتی ناشی از ترمزهای

خودروهای سبک شهر تهران در طول یک روز با

توان تولیدی نیروگاه پرند تهران

همانطور که ذکر شد در فرآیند توقف خودروهای معمولی تمام انرژی جنبشی خودرو تلف می‌شود که این انرژی از منبع تامین انرژی خودرو (سوخت فسیلی) حاصل شده است. در صورت استفاده از این سیستم، این انرژی جنبشی ذخیره و در ادامه حرکت مورد استفاده قرار خواهد گرفت و لذا انرژی کمتری مصرف خواهد شد. این میزان سوخت مصرف نشده در خودروها، می‌تواند در نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. که مقدار آن می‌تواند قابل ملاحظه باشد. لذا جهت نشان دادن اهمیت میزان انرژی قابل بازیافت توسط سیستم احیا انرژی ترمزی در خودروهای شهر تهران را می‌توان با توان تولیدی نیروگاه پرند تهران مقایسه کرد.

توان اسمی نیروگاه پرند ۹۵۴ Mw است [MAPNA Group, 2020]، بنابراین می‌توان انرژی روزانه این نیروگاه را از رابطه زیر بدست آورد:

$$E_{G_parand} = 954 \times 24 \times 3600$$

$$\approx 82 \times 10^{12} J$$

با توجه به نتایج حاصله، ملاحظه می‌شود که سیستم احیاء انرژی ترمزی قادر است تا حدود ۳ درصد انرژی نیروگاه پرند را تامین نماید.

۴-۲ مقایسه توان بازیافتی ناشی از ترمزهای

خودروهای سبک شهر تهران در طول یک روز با برق

مصرفی منازل

در سال ۱۳۹۱ سرانه مصرف مشترکین خانگی شهر تهران ۲۶۱۴ کیلو وات ساعت بوده است [Berahmandzadeh and Rezayee Ghohrodi, 2014]. بنابراین میزان مصرف انرژی روزانه مشترکین خانگی بصورت زیر قابل محاسبه است.

- Chan, C.C. (2007) "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles". Proceedings of the IEEE. Vol. 95, No. 4, pp. 704-18.

- Chen, L., Zhang, J., Li, Y. and Yuan, Y. (2014) "Mode-switching-based active control of a powertrain system with non-linear backlash and flexibility for an electric vehicle during regenerative deceleration". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 229, No. 11, pp. 1429-1442.

- Day, A.J. (2014) "Braking of Road Vehicles", Butterworth-Heinemann.

- Gantt L.R. (2011) "Energy losses for propelling and braking conditions of an electric vehicle" Master of Science dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.

- Gao, Y., Chen, L. and Ehsani, M. (1999) "Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV". SAE Transactions, Journal of Passenger cars, Vol. 108, No. 6, pp. 3184-3190.

- Guo, J., Wang, J. and Cao, B. (2009) "Regenerative braking strategy for electric vehicles". IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Jun 3, Xi'an, China: pp. 864-868.

- Huda, N., Kaleg, S., Hapid, A., Kurnia, M. R. and Budiman, A.C. (2020) "The influence of the regenerative braking on the overall energy consumption of a converted electric vehicle", SN Applied Sciences, Vol. 2, Issue 4, No.606, pp. 1-8.

- Iwnicki, S. (2006) "Handbook of railway vehicle dynamics". CRC press.

میزان کاهش انتشار آلاینده ها و مصرف لنت نیز در تحقیقات دیگر می تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۶. پی نوشت ها

1. Regenerative braking system
2. Supercapacitors
3. Brushless dc machine
4. Intelligent regenerative brake
5. Fuzzy logic

۷. منابع

- برهمندزاده، د. و رضایی قهرودی، ز. (۱۳۹۰) " بررسی روند تغییرات مصرف برق در بخشهای مختلف"، مجله آمار، جلد ۲، شماره ۲، ص. ۱۳۸۰ - ۱۳۹۱.

- معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران (۱۳۹۴) "گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران ۱۳۹۳"، شهرداری تهران.

- معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران (۱۳۹۲) "گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران ۱۳۹۱"، شهرداری تهران.

- معاونت و سازمان حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران (۱۳۹۳) "گزیده آمار و اطلاعات حمل و نقل شهری تهران ۱۳۹۲"، شهرداری تهران.

- Bhandari, V.B. (2010) "Design of Machine Elements, 3rd revised edition". New York McGraw-Hill.

- Cao, B., Bai, Z. and Zhang, W. (2005) "Research on control for regenerative braking of electric vehicle". IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shaan'xi, China. pp. 92-97.

- Walker, J. (2005) "The Physics of Braking Systems". StopTech LLC.
- Xu, G., Li, W., Xu, K. and Song, Z. (2011) "An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles". *Energies*. Vol. 4, pp. 1461-1477.
- Yang, Y., Qiang H., Yongzheng C. and Chunyun F. (2020) "Efficiency optimization and control strategy of regenerative braking system with dual motor". *Energies*, Vol.13, Issue 3, No. 711, pp. 1-21.
- Zhang, K. and Batterman, S. (2013) "Air pollution and health risks due to vehicle traffic". *Science of the total Environment*, Vol. 450-451, pp.307-16.
- Zhao Y.Q., Li, H.Q., Lin, F., Wang, J. and Ji, X.W. (2017) "Estimation of Road Friction Coefficient in Different Road Conditions Based on Vehicle Braking Dynamics", *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 982–990.
- Larsen, R.I. (1966) "Air pollution from motor vehicles". *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 136, No. 12, pp. 277-301.
- Lin, Z., Zhanqun, S., Yuegang, L. and Jing, K. (2016) "A Study of Energy Recovery System during Braking for Electric Vehicle". 6th International Conference on Applied Science, Engineering and Technology. Qingdao, China: May 29-30, pp. 7-13.
- Litman, T. (2019) "Generated traffic and induced travel". Victoria, British Columbia, Canada: Victoria Transport Policy Institute, Canada.
- Mage, D.T. and Zali, O. (1992) "Motor vehicle air pollution: public health impact and control measures". Geneva, Switzerland: World Health Organization WHO.
- MAPNA Group (2020), "Parand Power Plant", <https://www.mapnagroup.com/en/projects/power/parand-power-plant>
- Naseri F., Farjah, E. and Ghanbari, T. (2017) "An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles with BLDC Motor". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 5, pp. 3724-3738.
- Nian, X., Peng, F. and Zhang, H. (2014) "Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 10, pp. 5798-5808.
- Palou, C. (1994) "Therapeutic preparation for topical application to the skin". United States patent US 5,350,774.

برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات چراغدار شهر تهران

رحیم ایلدرآبادی، درجه کارشناسی در رشته برق- قدرت را در سال ۱۳۷۶ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد و درجه کارشناسی ارشد در رشته برق- قدرت در سال ۱۳۷۹ را از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۸۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته برق- قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان انرژی، اتوماسیون، الکترونیک قدرت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه حکیم سبزواری است.

علی اصغر صادقی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی خط و ابنیه راه آهن را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه فردوسی مشهد اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری از دانشگاه فردوسی مشهد گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان ایمنی ترافیک جاده ای و ریلی، برنامه ریزی و قابلیت اطمینان در حمل و نقل بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه حکیم سبزواری است.

