

# اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات PM10 و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری

علی اصغر صادقی، استادیار، گروه عمران، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران  
رحیم ایلدرآبادی (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه برق و الکترونیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

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

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۵

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

## چکیده

آلاینده PM10<sup>۱</sup> یکی از منابع آلودگی هوا است که تهدید کننده سلامت افراد می باشد. سایش لنت های ترمز در حرکت وسایل نقلیه یکی از منابع مهم این آلاینده در شهرها می باشد. سیستم ترمز احیاء کننده انرژی ترمزی با حذف لنت ترمز و بازیافت انرژی می تواند به کاهش این آلاینده کمک کند. در این تحقیق ابتدا امکان گردآوری داده های مورد نیاز برای تعیین میزان ترمزگیری در سفرهای شهری با استفاده از برنامه کاربردی speed view GPS در مقایسه با سنسور ترمز مورد بررسی قرار گرفت و سپس با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده و تحلیل به کمک نرم افزار متلب مشخص شد این روش امکان پذیر است و بطور متوسط ۵۰/۴۴٪ ترمز در هر سفر و ۶/۳۳٪ بار ترمز در هر کیلومتر در سرعت های متفاوت انجام می شود. این مقدار ترمزگیری در صورت استفاده از سیستم ترمز احیاء کننده انرژی<sup>۲</sup> برای وسایل نقلیه سواری برابر  $10^5 \times 1/61$  ژول انرژی در هر کیلومتر سفر می باشد. با استفاده از اطلاعات شهر مشهد نتایج نشان می دهد تنها در سال ۱۳۹۹ مقدار ۳۸/۴۷ تن ذرات PM10 ناشی از ترمزگیری وسایل نقلیه سواری در هوا منتشر شده است. در صورت استفاده از سیستم ترمز احیاء کننده انرژی علاوه بر حذف PM10 منتشر شده از بخش ترمز، ۳/۲۳ تن PM10 نیز از بازیافت انرژی و کاهش انتشار آلودگی منتشر شده از بخش اگزوز خودرو، پتانسیل کاهش دارد. نتایج حاصله از این در بررسی های اقتصادی طرح های حمل و نقل می تواند مورد استفاده قرار گیرند.

واژه های کلیدی: آلاینده PM10، سایش لنت ترمز، سیستم ترمز احیاء کننده انرژی

## ۱. مقدمه

ایران انجام نشده است. محاسبه میزان ترمزگیری انواع خودروها در طول مسیر حرکت و محاسبه میزان انرژی مصرف شده و آلودگی ایجاد شده، در محاسبات مالی و توجیه طرح‌های حمل و نقلی قابل استفاده و مورد نیاز است. در این تحقیق روشی برای محاسبه میزان ترمزگیری خودروهای سواری در محیط شهری و مقدار آلاینده PM10 پیشنهاد شده است. این مقاله امکان استفاده از برنامه‌های کاربردی مبتنی بر تلفن همراه که مجهز به گیرنده سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) می‌باشند را در محاسبه میزان ترمزگیری بررسی می‌کند. با شناسایی میزان ترمزگیری در واحد میزان رانندگی، امکان محاسبه میزان انتشار PM10 ناشی از ترمزگیری خودروها مقدور می‌گردد. همچنین این مقاله پتانسیل استفاده از سیستم ترمز احیاءکننده انرژی را در کاهش میزان آلاینده PM10 مورد بررسی قرار می‌دهد. از آنجا که شرایط پستی و بلندی و میزان ترافیک نیز در میزان بهره‌وری سیستم احیاءانرژی ترمزی موثر است این مطالعه به محیط رانندگی در شهر مشهد واقع در ایران محدود شده است.

در بخش دوم این مقاله پیشینه پژوهش و در بخش سوم روش تحقیق شامل نحوه جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه میزان ترمزگیری در رانندگی سفرهای شهری و مقدار انرژی قابل بازیافت توسط سیستم ترمز احیاءکننده انرژی شرح داده شده است. در بخش چهارم تحلیل نتایج آورده شده است و میزان انتشار PM10 ناشی از ترمزگیری خودروهای سواری در شهر مشهد و پتانسیل کاهش میزان آلاینده PM10 با استفاده از سیستم ترمز احیاءکننده انرژی در خودروهای شهر مشهد آورده شده است. نتیجه‌گیری مباحث مطرح شده در بخش ۵ بیان شده است.

## ۲. ادبیات پژوهش

انتشار PM10 هم در فرآیند احتراق داخلی موتور خودرو و هم در فرآیند حرکت در اثر سایش ترمزها، لاستیک‌ها و دیگر بخش‌های خودرو ایجاد می‌شود که بطور کلی به دو دسته آگزوزی و غیرآگزوزی نامگذاری شده است. سهم انتشار غیرآگزوزی PM10 در طول زمان نسبت به انتشار آگزوزی در حال افزایش

آلودگی هوا و گرمایش جهانی دو پدیده‌ای است که امروزه هم در سطح محلی و هم در سطح جهانی، تهدید کننده سلامت عمومی جوامع و افراد شده است [IPCC, 2014; McNeill, 2019]. شاخص کیفیت هوا در سال ۱۳۹۸ در شهر مشهد نشان می‌دهد تنها ۴۰ روز از سال شرایط هوای پاک را داشته است و ۵۷ روز از سال شرایط ناسالم برای گروه‌های حساس و ۲ روز شرایط ناسالم برای تمام افراد را داشته است [Environmental Pollutants Monitoring Center of Mashhad, 2020]. آلودگی هوا و گرمایش زمین از مصرف مداوم و روزافزون سوخت‌های فسیلی ناشی شده است که منتج از نیاز به انرژی می‌باشد. وسایل نقلیه سهم بزرگی از مصرف انرژی و تولید آلاینده‌ها را دارند. PM10 ذرات معلق در هوای با ابعاد ریزتر از ۱۰ میکرون یکی از آلاینده‌های مهم به دلیل اثرات منفی آن بر سلامت انسان است که در حرکت وسایل نقلیه و از جمله در فرآیند ترمزگیری تولید می‌شود [Paustenbach et al., 2004; Grange et al., 2021]. در فرآیند ترمزگیری، ترمزها در معرض سایش و گرمای گسترده ناشی از آن قرار می‌گیرند که منجر به انتشار ذرات می‌شود. امروزه بحث کمبود انرژی و نگرانی‌های محیط زیستی باعث پیشرفت کاربرد تکنولوژی در خودروها برای کاهش اثرات مخرب محیط زیست و صرفه جویی انرژی شده است. سیستم‌های احیاءکننده انرژی ترمز، سیستم‌هایی هستند که می‌توانند بخش بزرگی از انرژی جنبشی تلف شده به شکل گرمایی را بصورت الکتریکی درآورند و به این ترتیب از یک طرف باعث کاهش مصرف سوخت و از طرف دیگر با حذف ترمز بصورت اصطکاکی موجب کاهش آلاینده‌ها و ریزگردهای منتشره شوند. در این مقاله هدف آن است تا با در نظر گرفتن شرایط واقعی رانندگی در یک محیط شهری واقعی (شهر مشهد) میزان ترمزگیری خودروهای سواری در واحد میزان رانندگی اندازه‌گیری شود. تا کنون تحقیقی که منجر به این اندازه‌گیری شود در

## اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات PM10 و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری

2014]. گارج و همکاران مقدار  $2/9$  تا  $7/5$  mg/km را برای انواع وسایل نقلیه ذکر کرده‌اند [Garg et al., 2000]. با توجه به شرایط میدانی و محیط رانندگی شهری ساندرز و همکارانش [Sanders et al., 2003] مقدار  $8/1$  mg/km و لوهانا و همکارانش [Luhana et al., 2004] مقدار  $8/8$  میلی گرم بر کیلومتر را بدست آورده‌اند. همچنین بکویکی و همکارانش [Bukowiecki et al., 2009] در سال 2009 مقدار 8 میلی-گرم بر کیلومتر را در شرایط رانندگی شهری به عنوان ضریب انتشار PM10 ذکر کرده‌اند.

کمبود انرژی و نگرانی‌های محیط زیستی در تولید آلاینده‌هایی از جمله PM10، باعث نوآوری در صنعت خودرو برای بهبود وضعیت و حل این مشکلات شده است. سیستم‌های احیاءکننده انرژی ترمز، یکی از سیستم‌هایی هستند که می‌توانند بخش بزرگی از انرژی جنبشی را که بصورت گرما به هدر می‌رود را بصورت الکتریکی در باتری‌ها و ابرخازن‌ها<sup>۱</sup> و یا بصورت مکانیکی در چرخ طیار<sup>۲</sup> و یا بصورت پنوماتیکی در مخازن هوای فشرده ذخیره نمایند و بخشی از انرژی لازم جهت شتابگیری مجدد را تامین نمایند [Cao, Bai and Zhang, 2005; Lin et al., 2016; Adamiec, Jarosz-Krzemińska and Wieszała, 2016]. سیستم احیاءکننده ترمز در سال‌های اخیر خصوصاً در خودروهای الکتریکی، هیبریدی و سلول سوختی مورد توجه بیشتر قرار گرفته و پیاده‌سازی شده است [Lin et al., 2016; Chan, 2007; Guo, Wang and Cao, 2009]. طرح پیاده‌سازی سیستم ترمز احیاءکننده فعال و استفاده از موتور الکتریکی DC بدون جاروبک [Nian, Peng and Zhang, 2014] و ترمز احیاءکننده هوشمند مبتنی بر منطق فازی [Xu et al., 2011] نیز به منظور بهبود هرچه بیشتر بازیابی انرژی ترمزی پیشنهاد شده است.

به دلیل وزن بالاتر خودروهای الکتریکی - باتری (BEV)، شماری از مطالعات تاکید کرده‌اند که این خودروها سایش بیشتری در ترمز، تایر و سطح جاده ایجاد می‌کنند و زمانی می‌توانند باعث کاهش آلودگی PM10 شوند که از سیستم‌های

بوده است [Grange et al., 2021; Grigoratos and Martini, 2015]. پیشرفت‌ها در استفاده از استانداردهای بالاتر در کیفیت سوخت مصرفی و فیلترهای ذرات گازوئیل باعث کاهش انتشار PM10 آگروزی شده است. هرچند بعضی مطالعات افزایش وزن وسایل نقلیه شخصی به دلیل رجحان روزافزون وسایل نقلیه اسپورت SUV و کراس آور را از دلایل افزایش سهم انتشار غیرآگروزی شمرده‌اند [Diaz et al., 2020; Harrison et al., 2021]. شمار دیگری از مطالعات افزایش سهم وسایل نقلیه برقی و وزن سنگین تر آنها نسبت به وسایل با موتورهای احتراق داخلی را که موجب سایش بیشتر در ترمزها، تایرها و سطح جاده می‌شود را موجب افزایش سهم آلاینده‌های غیرآگروزی، ذکر کرده‌اند [Beddows and Harrison, 2021; Timmers and Achten, 2016].

بخش مهمی از آلاینده‌های غیرآگروزی نیز ناشی از سایش ترمزها است. ترمزهای مکانیکی در خودروهای معمولی انرژی جنبشی خودرو را با کمک نیروی اصطکاک لنت ترمزها، جذب و به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند [Bhandari, 2010]. در این نوع سیستم، ترمزها کل انرژی جنبشی خودرو را بصورت انرژی گرمایی تلف می‌کنند و با سایدگی لنت‌ها موجب انتشار مواد آلاینده، ریزگردها و آلودگی محیط زیست نیز می‌شوند. مطالعات بسیاری به شناسایی و بررسی فلزات سنگین و ترکیب شیمیایی آنها در ترکیب غبار PM10 ناشی از سایش پد ترمز پرداخته‌اند [Chen and Stachowiak, 2004; Adamiec, Jarosz-Krzemińska and Wieszała, 2016]. این مطالعات و اندازه‌گیری‌ها گاهی در آزمایشگاه با هدایت آزمایشات ترمز دینامومتری<sup>۳</sup> و یا جمع‌آوری ردیاب سایش ترمز<sup>۴</sup> یا با نمونه‌گیری ذرات سایش ترمز در روی سطح جاده بوده است [Garg et al., 2000; Kukutschova et al., 2011; Mosleh, Blau and Dumitrescu, 2004; Harrison et al., 2021; Mathissen et al., 2011; Liu et al., 2022]. این مطالعات مقادیر متفاوتی از سایش و انتشار PM10 را در حدود  $2/9$  تا  $29/8$  mg/km را ذکر کرده‌اند [EPA, 2014].

شهری و بزرگراهی ۴۰ و ۱۸ درصد است. بجورسن و کارلسون [Bjorsson and Karlsson, 2016] نیز پتانسیل بازگشت انرژی ترمزی را در شرایط سوئد سنجیده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که پتانسیل بازگشت انرژی بر حسب الگوی حرکت افراد تغییر می‌کند و مقدار متوسط آن برابر  $0.33 \text{ kwh/km}$  می‌باشد که معادل ۲۷ درصد از کل انرژی فراهم شده در چرخه‌ها<sup>۹</sup> می‌باشد.

در سال‌های اخیر با توسعه سیستم‌های رایانه‌ای، تلفن‌های همراه و سیستم‌های موقعیت یاب جهانی (GPS) تحقیقاتی در زمینه حمل و نقل و نیز ارزیابی زیست محیطی در ابعاد بزرگ امکان‌پذیر شده است. گاتلی و همکاران [Gately et al, 2017] تراکم ترافیک و آلودگی ناشی از آن را با استفاده از برنامه‌های کاربردی<sup>۱۰</sup> تلفن‌های همراه مجهز به GPS کاربران تخمین زده‌اند. دانگ و همکاران [Dang et al., 2015] یک سیستم شناسایی محل نقاط سانحه‌خیز را بر اساس تلفن هوشمند کاربران و تغییر سرعت ناگهانی آنها پیشنهاد کرده‌اند. ژانگ و همکاران [Zhang et al., 2018] بهینه‌سازی سیستم اشتراکی دوچرخه را بر اساس تلفن همراه کاربران پیشنهاد کرده‌اند و میزان کاهش آلودگی را تخمین زده‌اند. چن و همکاران [Chen et al., 2020] نیز با استفاده از سیستم موقعیت یاب، یک تحلیل زمانی- مکانی برای میزان ترمزگیری وسایل نقلیه ارائه کردند و مشخص کردند که حدود ۲۰/۶ درصد زمان حرکت وسایل نقلیه همراه با ترمزگیری می‌باشد و آلودگی ناشی از وسایل نقلیه سنگین ۲/۳۳ برابر وسایل نقلیه سبک است.

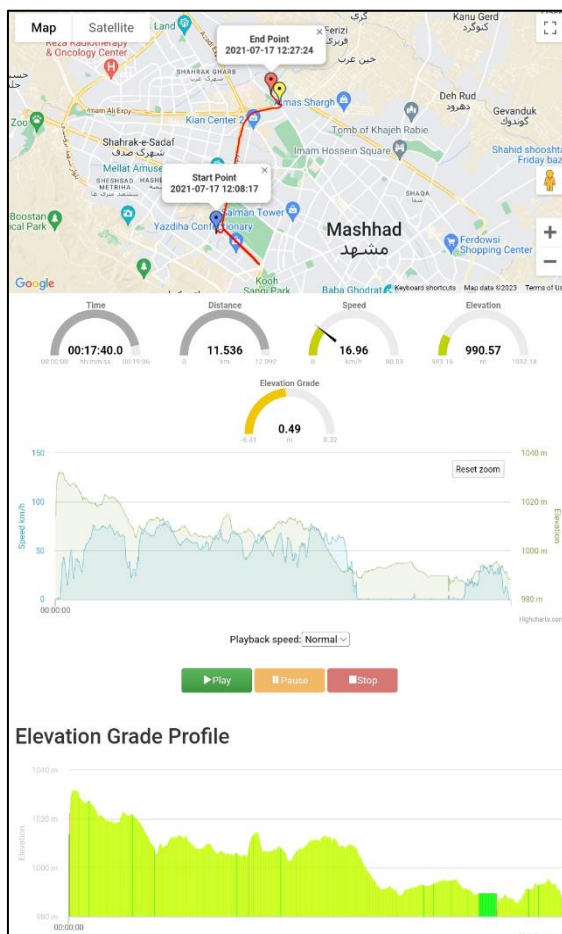
بررسی متون گذشته نشان می‌دهد تحقیقات در زمینه‌های میزان ترمزگیری و سایش ترمز و آلودگی ناشی از آن و بررسی فواید ناشی از کاربرد فناوری ترمز احیاءکننده انرژی چندان غنی نمی‌باشد و خصوصاً، بصورت مطالعه موردی در ایران چنین تحقیقاتی انجام نشده است. در این مقاله سعی شده است امکان استفاده از برنامه‌های مبتنی بر تلفن همراه کاربران در اندازه‌گیری میدانی میزان ترمزگیری به جای روش‌های آزمایشگاهی یا

احیاءکننده انرژی ترمز استفاده شود [Timmers and Achten, 2016; Soret, Guevara and Baldasano, 2014; Timmers and Achten, 2018].

بدووز و هریسون [Beddows and Harrison, 2021] ذکر کرده‌اند که خودروهای BEV با وجود سیستم احیاء انرژی ترمزی در محیط شهری و برون شهری به ترتیب می‌توانند  $11/5 \text{ mg/km.veh}$  و  $2/7 - 4 \text{ mg/km.veh}$  ذرات PM10 را کاهش دهند در غیر اینصورت از این لحاظ خودروهای BEV نسبت به خودروهای معمول از لحاظ انتشار PM10 اثر چندانی ندارند. لیو و همکاران [Liu et al., 2021] نیز ذکر کرده‌اند که انتشار غیرآگزوزی در اتوموبیل‌های برقی نسبت به اتوموبیل‌های معمولی احتراق داخلی افزایش می‌یابد و ضرورت دارد که همه EV ها به سیستم احیاء انرژی ترمزی مجهز باشند. افزایش وزن متوسط وسایل سواری به دلیل ترجیح کاربران به وسایل اسپورت و کراس آور و اتوموبیل‌های واگنی نیز که موجب افزایش سهم ذرات PM10 شده است ضرورت استفاده از سیستم احیاءکننده ترمز را بیش از قبل می‌سازد [Diaz et al., 2020]. راکو و همکاران [Rakov, Kapustin and danilov, 2020] اثر سیستم احیاء انرژی ترمزی در کاهش مقدار CO2 را مورد بررسی قرار داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که استفاده از این سیستم توانایی کاهش ۰/۲ تا ۰/۵ تن CO2 در سال به ازای هر وسیله-نقلیه را دارد.

البته پتانسیل احیاء انرژی ترمزی به نحو زیادی به نحوه رانندگی و شرایط ترافیکی و محیطی بستگی دارد. اغلب مطالعات ذکر کرده‌اند که سرعت کم و تعداد زیاد ایست- حرکت پتانسیل زیادی در بهره‌وری سیستم احیاء انرژی ترمزی ایجاد می‌کند [Gao, Chen and Ehsani, 1999; Christidis et al., 2005; Wang, Xu and Yang, 2014]. مارتین و همکاران [Martins et al., 2009] ذکر کرده‌اند که در خودروهای الکتریکی هیبریدی پلاگ این<sup>۸</sup> در محیط شهری سیستم احیاء انرژی ترمزی ۷۰ درصد انرژی مفید موتور را می‌تواند تامین کند، در حالی که این مقادیر برای رانندگی برون

## اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات PM10 و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری



شکل ۱. نمونه ای از محیط برنامه کاربردی speed view GPS

### ۲-۳ شناسایی ترمزگیری

با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی GPS و نرم افزار مربوطه ثبت اطلاعات تغییرات سرعت امکان پذیر است و هدف آن است که از این اطلاعات وقایع ترمزگیری استخراج شود. مشخصه ترمزگیری در پروفیل سرعت کاهش شتاب می باشد. اما با اینحال هر کاهش شتاب نشان دهنده ترمزگیری نمی باشد و مواردی نظیر عدم فشردن پدال گاز، شیب سربالایی و نحوه رانندگی می تواند باعث کاهش شتاب شود. از این رو گام اول در شناسایی واقعه ترمزگیری تعریف معیاری برای میزان کاهش شتاب می باشد. برای شناسایی موارد ترمزگیری واقعی از یک سیستم مطابق شکل (۲) استفاده شد تا با تطبیق تعداد ترمزگیری های واقعی در طول سفر و تطابق آن با پروفیل سرعت بدست آمده از برنامه

تجهیزات نصبی بر روی وسایل نقلیه بررسی شود. همچنین میزان فواید ناشی از کاهش آلودگی PM10 با راهکار جایگزینی ترمزهای احیاء کننده انرژی تخمین زده شده است که یک کاربرد عملی پس از محاسبه میزان ترمزگیری وسایل نقلیه می باشد.

### ۳. روش پژوهش

#### ۳-۱ جمع آوری داده های سرعت و حرکت

در سال های اخیر ثبت اطلاعات بیشتری از سفر رانندگان وسایل نقلیه با توسعه تکنولوژی های ارتباطات و اطلاعات امکان پذیر شده است. با استفاده از داده های موقعیت مکانی GPS امکان تشخیص لحظه ای موقعیت وجود دارد و با ثبت رکورد خط سیر، امکان اندازه گیری سرعت فراهم شده است. هم اکنون دستگاه های تلفن همراه شخصی نیز به ابزار GPS مجهز است و با استفاده از نرم افزارها امکان ثبت این اطلاعات وجود دارد. در این تحقیق به دلیل خروجی های مناسب بصورت فایل اکسل، از برنامه کاربردی speed view GPS استفاده شده است. شکل (۱) نمونه ای از محیط این نرم افزار را نشان می دهد. توسعه دهنده این برنامه کاربردی شخصی با نام ایوزیرویی<sup>۱۱</sup> است و کاربرد اصلی آن نشان دادن سرعت لحظه بر مبنای GPS، نشان دادن مسیر و اطلاعات حرکت کاربران است. برای کاربران با استفاده از این برنامه کاربردی در شروع سفر و ذخیره در انتها، ثبت اطلاعات سفر ممکن می شود. موقعیت جغرافیایی شامل طول، عرض و ارتفاع و سرعت و فاصله تا موقعیت اندازه گیری بعدی و بصورت فایل خروجی اکسل ثبت می شود. نظر به اینکه ترمزگیری در زمان های بسیار کوتاه اتفاق می افتد، با قرار دادن مقدار صفر برای حداقل فاصله در اندازه گیری بالاترین دقت ممکن که تنها به ارتباط بین دستگاه و ماهواره ها وابسته است به دست می آید.

پروفیل حرکت خطای برابر با ۱/۰۴ بدست می‌دهد که نشان می‌دهد مقدار تخمینی ترمزها حاصل از نمودار سرعت نرم افزار به مقدار واقعی به حد کافی نزدیک است.

### ۳-۳ ضریب انتشار PM10

برای محاسبه پتانسیل کاهش ذرات PM10 با سیستم احیاء انرژی ترمزی، نیاز به فاکتور انتشار ناشی از ترمزگیری و مصرف سوخت انواع وسایل نقلیه معمول می‌باشد تا با محاسبه میزان صرفه‌جویی در لنت ترمز و سوخت فسیلی مقدار پتانسیل کاهشی را بتوان محاسبه نمود. ضرایب انتشار آلودگی اعداد ثابتی نیست و برای هر وسیله‌نقلیه با توجه به نوع سوخت مصرفی، عمر و وسیله‌نقلیه، وزن، شتاب و... تغییر می‌کند. در جدول (۱) متوسط ضرایب انتشار PM10 آگزوزی و ترمزگیری برای وسایل نقلیه سواری آورده شده است. ضریب انتشار PM10 آگزوزی با توجه به ترکیب انواع وسایل نقلیه و سن وسایل و شبیه‌سازی آنها تخمین زده شده است [Iran Fuel Conservation Company, 2019; Sadeghi and Deymi, 2017].

کاربرد GPS speed view ضابطه‌ای برای شناسایی ترمزگیری حاصل شود.

سنسور ترمز، سنسوری است که روی (مطابق شکل ۲) پدال ترمز نصب است. هر بار ترمزگیری پالس را به پردازنده تعبیه شده ارسال می‌نماید. پردازنده نیز زمان دریافت پالس (لحظه‌ای که ترمزگیری صورت گرفته است) را در حافظه پرتابل (فلش مموری) موجود در مدار، ضبط و ذخیره می‌نماید. بعد از پایان سفر، فلش مموری از مدار جدا شده و داده‌های آن به رایانه منتقل و توسط نرم افزار متلب تحلیل می‌شود. با انطباق زمان‌های ترمزگیری بر منحنی سرعت خودرو که از برنامه کاربردی راهبری خودرو (که قابلیت در دسترس قراردادن اطلاعات مسیر و سرعت خودرو را دارد) بدست آمده و به رایانه منتقل شده، صحت نتایج حاصله از برنامه کاربردی راهبری مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت همزمانی منحنی سرعت حاصل از برنامه کاربردی تلفن همراه با منحنی ترمزگیری حاصل از سیستم ثبت ترمز، با روشن کردن خودرو برنامه کاربردی تلفن همراه نیز فعال می‌شود.

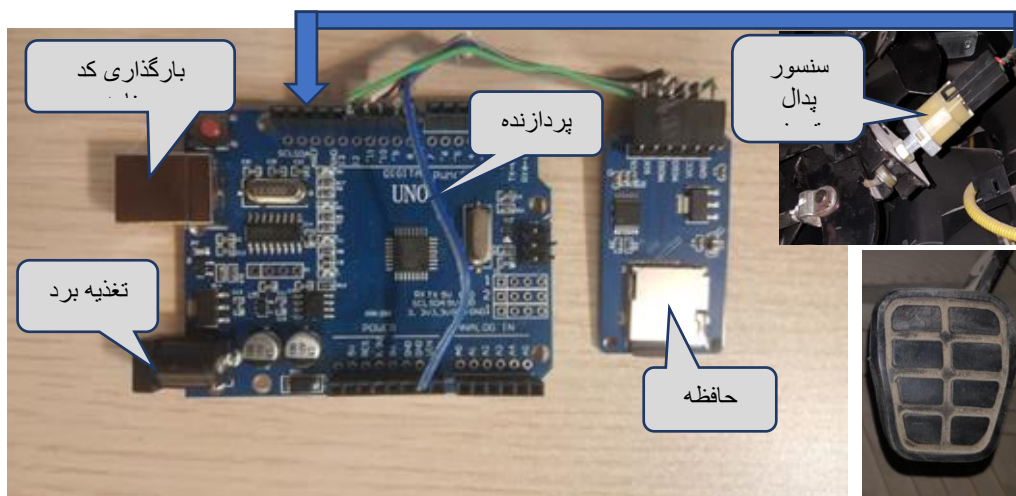
برای تمایز بین شتاب منفی حاصل از ترمز و ناشی از وجود شیب یا کاهش فشار ترمز، در صورتی شتاب منفی ترمزگیری تلقی می‌شود که شتاب لحظه‌ای (در هر ثانیه) کمتر از منهای ۷/۲ متر بر مجذور ثانیه باشد. شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی سرعت حاصل از نرم افزار را بر سیگنال حاصله از سنسور پدال ترمز نشان می‌دهد.

با بررسی تعداد بیشتری از پروفیل‌های سرعت در خودرو مجهز به سنسور ترمز دقت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد. میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE) عموماً در ارزیابی خطای نسبی مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. MAPE بصورت زیر محاسبه می‌شود:

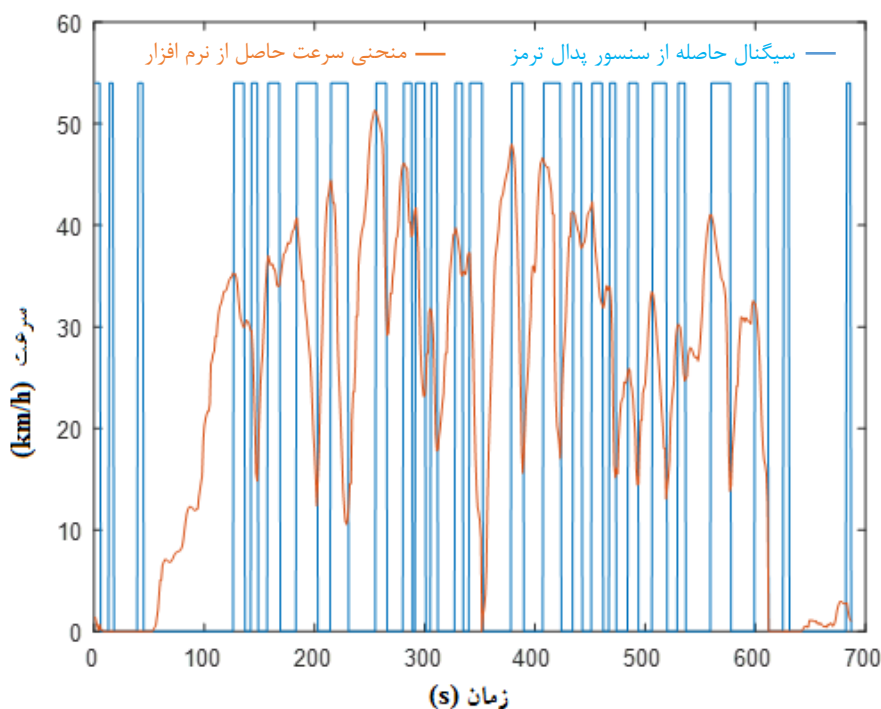
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - E_i}{A_i} \right| \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $A_i$  تعداد واقعی ترمزگیری در حرکت  $i$  و  $E_i$  تعداد ترمزگیری حاصل از پروفیل سرعت می‌باشد. مقایسه ۳۲ نمونه

اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات  $PM_{10}$  و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری



شکل ۲. سنسور شناسایی ترمزگیری نصب شده بر خودرو نمونه



شکل ۳. منحنی سرعت حاصل از برنامه کاربردی تلفن همراه منطبق بر سیگنال حاصله از سنسور پدال ترمز

ترکیبی از انواع وسایل نقلیه با ترمزهای دیسکی و کاسه‌ای می‌باشد. با توجه به شرایط مطالعه موردی در شرایط رانندگی در شهر مشهد نیز مقدار مذکور در نظر گرفته شده است.

تا کنون مطالعه مستقلی که ضریب انتشار  $PM$  ترمزی را در شرایط ترافیکی کشور ایران بدست آورد انجام نشده است. با توجه به شرایط میدانی و محیط رانندگی شهری ساندرز و همکارانش [Sanders et al., 2003] مقدار  $8/1$  و بکوویکی و همکاران [Bukowiecki et al., 2009] مقدار  $8$  میلی گرم بر کیلومتر را به عنوان ضریب انتشار بدست آورده‌اند که برای

جدول ۱. ضرایب انتشار PM10 اگزوزی و ترمزی وسایل نقلیه

سواری	
مرجع	gr/km
شرکت بهینه سازی مصرف	ضریب انتشار
سوخت، ۱۳۹۷؛ صادقی و دیمی	PM10 اگزوزی ۰/۰۰۳
دشت بیاض، ۱۳۹۵	در محیط شهری
Sanders et al., 2003	ضریب انتشار
Bukowiecki et al., 2009	PM10 ترمزی ۰/۰۰۸
	در محیط شهری

مقدار فاکتور کاهش انتشار PM در خودرو با سیستم احیاء انرژی

بصورت زیر می تواند محاسبه شود:

$$REF_{PM10-reg} = R_{EF_b} + R_{EF_e} \quad (2)$$

$$= R_{EF_b} + \frac{E_{rec}}{U_{El}} \times EF_{PM10-con}$$

که در این رابطه:

$REF_{PM10-reg}$ : فاکتور کاهش انتشار PM10 در خودرو با

سیستم احیاء انرژی ترمزی بر حسب g/km

$R_{EF_b}$ : فاکتور کاهش انتشار PM10 ناشی از حذف لنت ترمز

(g/km)

$R_{EF_e}$ : فاکتور کاهش انتشار PM ناشی از صرفه جویی مصرف

الکتریسیته معادل مصرف سوخت (g/km)

$E_{rec}$ : انرژی احیاء شده ترمزی (kwh/km)

$U_{El}$ : میزان مصرف الکتریسیته خودرو برقی (kwh/km)

$EF_{PM10-con}$ : فاکتور انتشار خودروهای سواری مرسوم

(g/km)

می باشد. میزان مصرف الکتریسیته خودروهای الکتریکی بر

حسب نوع خودروهای تولیدی در شرکت های مختلف متفاوت

است و مقادیری از ۱۵۰ wh/km برای تسلا مدل ۳ تا ۳ wh/km

۲۹۵ برای مرسدس EQV 3001long ذکر شده است. با

بررسی بیش از ۳۵۰ نوع وسیله نقلیه بطور متوسط میزان مصرف

انرژی وسایل نقلیه سواری برقی ۰/۲ kwh/km می باشد

[Electric Vehicle Database, 2021]

### ۴- انرژی قابل بازیافت با سیستم ترمز احیاء کننده

#### انرژی

در فرآیند توقف خودروهای مرسوم تمام انرژی جنبشی خودرو تلف می شود. با استفاده از سیستم ترمز احیاء کننده انرژی مقداری از انرژی جنبشی قابل احیاء است. نیروی ترمز لازم برای کاهش سرعت از رابطه زیر بدست می آید [Guo et al., 2009]:

$$F_{req} = F_a - F_r - F_w - F_h \quad (3)$$

که در آن:

$F_a$ : نیروی مورد نیاز برای کاهش سرعت خودرو

$F_r$ : نیروی مقاومت غلتشی تایر

$F_w$ : نیروی پسای آیرودینامیکی

$F_h$ : نیروی شیب جاده

برای نیروهای فوق:

$$F_r = C_r \times mg \times \cos \alpha \quad (4)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_w \times A_f \times C_d \times V_0^2 \quad (5)$$

$$F_h = mg \times \sin \alpha \quad (6)$$

$$F_a = M \frac{v_1 - v_2}{t_s} \quad (7)$$

که در روابط بالا:

$C_r$ : ضریب اصطکاک غلتشی

$\alpha$ : زاویه شیب جاده

$\rho_w$ : چگالی هوای محیط

$A_f$ : مساحت سطح جلو خودرو

$C_d$ : ضریب پسای آیرودینامیکی

و  $v_1$  سرعت اولیه هنگام ترمزگیری و  $v_2$  سرعت کاهش یافته

می باشد و  $t_s$  مدت زمان ترمزگیری است.

رابطه میان کار (انرژی) و نیروی همراستا با جابجایی عبارتند از:

$$E = F \times SD \quad (8)$$

$$SD = t_s \times \frac{(v_1 - v_2)}{2} \quad (9)$$

در رابطه (۸) و (۹)  $SD$  و  $t_s$  به ترتیب مسافت و زمان طی شده

هنگام ترمزگیری خودرو هستند. واحد کار ژول (J) است. یک

ژول، کار نیرویی برابر یک نیوتن در جابجایی یک متر است.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره چهارم (۶۱) / تابستان ۱۴۰۳

## اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات PM10 و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری

محاسبه می‌شود. شکل (۴) میزان انرژی هر بار ترمزگیری برای یکی از سفرهای انجام شده را به عنوان نمونه نشان می‌دهد. ۵۰/۴۴ بار ترمز در هر سفر و ۶/۳۳ بار ترمز در هر کیلومتر مقادیر بدست آمده برای میزان ترمزگیری در نمونه سفرهای درون-شهری شهر مشهد می‌باشد. همچنین متوسط انرژی قابل احیاء با استفاده از سیستم ترمز احیاء انرژی برابر  $10^0 \times 1/82$  در هر کیلومتر سفر بدست آمده است. با استفاده از رابطه (۲) میزان ضریب کاهش انتشار PM10 با استفاده از سیستم ترمز احیاء انرژی برابر ۰/۰۰۸۷ بدست می‌آید. بدین ترتیب در صورت جایگزینی سیستم ترمز احیاءکننده انرژی با سیستم ترمز معمول و در خودروهای الکتریکی به ازای هر کیلومتر سفر ۸/۷ میلی‌گرم آلودگی PM کاهش می‌یابد که ۸ میلی‌گرم در کیلومتر ناشی از حذف آلاینده‌های متنج از ترمز لنتی و ۰/۷ میلی‌گرم آن ناشی از کاهش مصرف سوخت فسیلی می‌باشد. با توجه به تعداد سفرها و کیلومترهای زیاد رانندگی درونشهری این مقدار قابل توجه است. جدول (۴) اطلاعات کل سفرهای درونشهری مشهد را بر حسب سال ذکر شده در جدول نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مطالعات جامع حمل و نقل در سال ۱۳۹۰ انجام شده است اطلاعات جامع تری از این سال وجود دارد. با توجه به این اطلاعات و مقایسه به تعداد سفرها در سال ۱۳۹۹ میزان مسافت طی شده در یک روز در سال ۱۳۹۹ برای وسایل نقلیه سواری برابر ۱۳۱۷۶۰۶۵ کیلومتر در روز تخمین زده می‌شود.

بخشی از انرژی مطابق صرف غلبه بر دیگر نیروها می‌شود. لذا انرژی قابل بازیافت مکانیکی ( $E_{recov-Mech}$ ) یک خودرو برابر است با:

$$E_{recov-Mech} = (F_a - F_r - F_w - F_h) \times SD \quad (10)$$

البته سیستم مبدل الکترومکانیکی (ماشین الکتریکی) نیز دارای تلفات است که بایستی در نظر گرفته شود. بنابراین اگر تلفات انرژی بخش مبدل الکترومکانیکی با  $E_{Loss-Elec}$  نشان داده شود، میزان انرژی بازیابی کل عبارت خواهد بود از:

$$E_{recov} = E_{recov-Mech} - E_{Loss-Elec} \quad (11)$$

جهت ساده‌سازی در ادامه تلفات الکترومکانیکی صفر در نظر گرفته شده است. در این مقاله از یک خودرو نمونه بعنوان خودرو مورد مطالعه با مشخصات جدول (۲) برای محاسبات میزان انرژی قابل بازیابی سیستم ترمز احیاءکننده انرژی استفاده شده است [Gantt, 2011; Ildarabadi and sadeghi, 2022].

جدول ۲. داده‌های خودرو مورد مطالعه

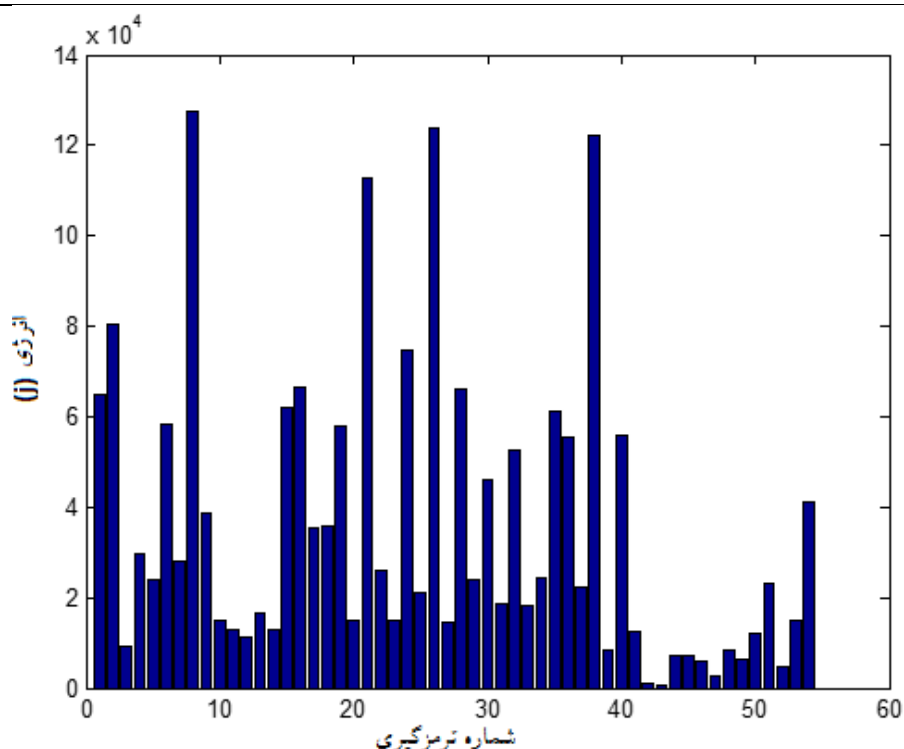
۱۱۰۰	وزن خودرو (کیلوگرم)
۲/۱	سطح جلو خودرو (متر مربع)
۵	زمان ایست خودرو (ثانیه)
۰/۰۰۸	ضریب اصطکاک غلشی
۰/۳	ضریب پسای آیرودینامیکی
۱/۲	چگالی هوای محیط (کیلوگرم بر متر مکعب)
۰	شیب جاده (درجه)

## ۴. نتایج و بحث

تحلیل نتایج بدست آمده از ۶۸ سفر انجام شده در شهر مشهد با اجرای برنامه کاربردی speed view GPS و فرآیند شرح داده شده در بخش‌های (۱-۳) و (۲-۳) در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد بطور متوسط ۵۰/۴۴ ترمز در هر سفر و ۶/۳۳ بار ترمز در هر کیلومتر در سرعت‌های متفاوت انجام می‌شود. با بدست آوردن سرعت‌های ابتدا و انتهای هر بار ترمزگیری میزان انرژی قابل احیاء با استفاده از روابط (۳) تا (۱۰)

جدول ۳. نتایج آماری میزان ترمزگیری و مقدار انرژی قابل احیاء در سفرهای انجام شده در شهر مشهد

متوسط طول سفر (km)	متوسط تعداد ترمز شناسایی شده (n)	چگالی ترمزگیری (n/km)	متوسط انرژی قابل بازیافت (J)	متوسط انرژی قابل بازیافت بر طول حرکت (J/km)	متوسط انرژی قابل بازیافت بر طول حرکت (kwh/km)
۸/۱۴	۵۰/۴۴	۶/۳۳	$۱/۲۷ \times ۱۰^۶$	$۱/۶۱ \times ۱۰^۵$	$۴/۴۷ \times ۱۰^{-۱}$
۳/۰۱	۲۳/۸۶	۲/۴۷	$۵/۶۳ \times ۱۰^۵$	$۵/۱۰ \times ۱۰^۴$	$۱/۴۲ \times ۱۰^{-۱}$



شکل ۴. نمونه میزان انرژی قابل احیاء با سیستم ترمز احیاء کننده انرژی در هر ترمزگیری برای یک سفر درونشهری

جدول ۴. اطلاعات سفرهای درونشهری شهر مشهد

تعداد سفرهای سواره در یک شبانه روز در سال ۱۳۹۹	۶۶۶۷۷۱۱	[سازمان حمل و نقل و ترافیک مشهد، ۱۴۰۰]
تعداد سفرهای سواره در یک شبانه روز در سال ۱۳۹۰	۵۷۸۶۳۱۳	
مسافت طی شده در ساعت اوج صبح در سال ۱۳۹۰ (veh-km)	۲۸۶۹۷۳۲	[سازمان حمل و نقل و ترافیک مشهد، ۱۳۹۱]
ضریب ساعت اوج سفرهای روزانه در سال ۱۳۹۰ (درصد)	۱۰/۹۴	
سهم وسیله نقلیه سواری از سفرهای روزانه (درصد)	۴۳/۵۹	

منتشر شده است. با توجه به اینکه سهم سفرها با وسایل سواری در سال ۱۳۹۹ در شهر مشهد می‌باشد میزان انتشار کل وسایل نقلیه شامل تاکسی و اتوبوس‌ها و موتورسیکلت‌ها بسیار بالاتر می‌باشد.

با بکار بردن ضریب انتشار  $PM_{10}$  ناشی از ترمزگیری، میزان انتشار این آلاینده در سال ۱۳۹۹ برای وسایل نقلیه سواری در شهر مشهد برابر  $۳۸/۴۷$  تن می‌باشد. به عبارتی  $۳۸/۴۷$  تن ذرات  $PM_{10}$  در سال ۱۳۹۹ ناشی از ترمزگیری وسایل نقلیه سواری

## اثر بازیابی انرژی ترمزی وسایل نقلیه روی کاهش ذرات PM10 و اندازه گیری آن به کمک نرم افزارهای ناوبری

ترمزگیری‌ها با تعداد ترمزگیری شناسایی شده در پروفیل سرعت حاصل از GPS و برنامه کاربردی speed view GPS همخوانی دارد.

با جمع‌آوری داده‌ها از ۶۸ سفر انجام شده در سطح شهر مشهد مشخص شد که بطور متوسط ۵۰/۴۴ ترمز در هر سفر و ۶/۳۳ بار ترمز در هر کیلومتر در سرعت‌های متفاوت انجام می‌شود. این مقدار ترمزگیری در صورت استفاده از سیستم ترمز احیاءکننده انرژی برابر  $1/61 \times 105$  در هر کیلومتر سفر می‌باشد. با استفاده از ضرایب انتشار ترمزگیری که در دیگر تحقیقات بدست آمده است و داده‌های حمل و نقل شهر مشهد نشان داده شده است که تنها در سال ۱۳۹۹ مقدار ۳۸/۴۷ تن ذرات PM10 ناشی از ترمزگیری وسایل نقلیه سواری منتشر شده است. با توجه به اینکه سهم سفرهای با وسایل سواری ۴۳/۵۹ درصد از کل سفرها در شهر مشهد می‌باشد میزان انتشار کل وسایل نقلیه بسیار بالاتر است. در صورت جایگزینی وسایل سوخت فسیلی با خودروهای مجهز به سیستم احیاءکننده انرژی، علاوه بر حذف مستقیم این میزان آلودگی، امکان حذف ۳/۲۳ تن PM10 در نتیجه بازیافت انرژی و کاهش مصرف سوخت امکان پذیر است. نتایج این تحقیق در مورد میزان ترمزگیری، انرژی مصرفی و میزان آلودگی ایجاد شده در بررسی‌های اقتصادی و هزینه-فایده طرح‌های حمل و نقل مربوط می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

با افزایش جمع‌آوری داده‌ها قابلیت اطمینان نتایج می‌تواند بالاتر رود. پیشنهاد می‌شود با توجه به کمبود مطالعات در این زمینه و نظر به اینکه پتانسیل استفاده از سیستم احیاء انرژی به نحوه رانندگی و شرایط خودروها بستگی دارد، در صورت دسترسی به بانک اطلاعاتی برنامه‌های کاربردی مسیریابی تلفن همراه (از جمله گوگل مپس، نشان و بلد)، مطالعات مشابه این تحقیق انجام شود. محاسبه میزان ترمزگیری به تفکیک برای انواع وسایل نقلیه (تاکسی، اتوبوس و غیره) و انواع مسیر از لحاظ عملکردی (بزرگراهی و غیر بزرگراهی) در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود. بررسی میزان انتشار آلاینده‌ها در مرحله تولید و عمر کارکرد

با فرض جایگزینی سیستم ترمز احیاءکننده انرژی و خودروهای الکتریکی در خودروهای سواری شهر مشهد، مقدار امکان کاهش آلودگی PM در دو بخش آگزوزی و ترمزی مطابق جدول (۵) به ترتیب برابر ۳۸/۴۷ و ۳/۲۳ تن و در مجموع برابر ۴۱/۷۱ تن در سال ۱۳۹۹ بوده است.

جدول ۵. میزان امکان کاهش انتشار PM10 با استفاده از سیستم ترمز احیاءکننده انرژی در وسایل نقلیه سواری شهر مشهد در سال

۱۳۹۹

$R_{EFb}$ (gr/km)	۰/۰۰۸
$R_{EFe}$ (gr/km)	۰/۰۰۰۷
وسیله نقلیه - کیلومتر طی شده در روز	۱۳۱۷۶۰۶۵
وزن ذرات PM10 ناشی از ترمزگیری (بخش ترمزی) (تن)	۳۸/۴۷
وزن ذرات PM10 قابل حذف در بخش آگزوزی	۳/۲۳

نتایج نشان می‌دهد میزان ترمزگیری و آلودگی ناشی از آن در محیط شهری قابل توجه است که با مطالعات ساندرز و همکارانش [Sanders et al., 2003] و بجورسن و کارلسون [Bjorsson and Karlsson, 2016] همخوانی دارد. فرآیند بکار برده شده در این مطالعه نشان می‌دهد استفاده از نرم افزارهای کاربردی تلفن همراه مشابه دیگر مطالعات [Gately et al, 2017; Zhang et al., 2018; Chen et al., 2020] در زمینه حمل و نقل در جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز می‌تواند کارا باشد.

### ۵. نتیجه‌گیری

این تحقیق، رویکردی از استفاده نرم‌افزارهای تلفن همراه برای شناسایی میزان ترمزگیری در سفرهای شهری و اهمیت میزان نشر آلاینده PM10 را نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد برای جمع‌آوری یک مجموعه داده بزرگ از حرکت وسایل نقلیه، از داده‌های مبتنی بر سیستم GPS و نرم‌افزارهای نصب شده بر تلفن همراه می‌توان استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد تعداد

- صادقی، علی اصغر و دیمی دشت بیاض، مهدی (۱۳۹۵)، بررسی تاثیرات اجرای خطوط ریلی در کاهش ترافیک درون شهری، کاهش آلاینده ها و افزایش ایمنی ترافیک"، معاونت برنامه ریزی و توسعه شهرداری مشهد، شهرداری مشهد.

- مرکز پایش آلاینده های زیست محیطی مشهد (۱۳۹۸)، "گزارش سالانه آلاینده های زیست محیطی مشهد ۱۳۹۸"، شهرداری مشهد، معاونت خدمات شهری، اداره محیط زیست، سلامت و ایمنی.

- Adamiec, E., Jarosz-Krzemińska, E., and Wieszała, R. (2016) "Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts". Environmental Monitoring and Assessment, Vol.188, No. 6, 369.

- Beddows, D. C. S. and Harrison, R. M. (2021) "PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles". Atmospheric Environment, Vol. 244, 117886.

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

- Björnsson, L. H., and Karlsson, S. (2016) "The potential for brake energy regeneration under Swedish conditions". Applied Energy, Vol. 168, pp. 75-84.

- Bukowiecki N, Lienemann P, Hill M, Figi R, Richard A, Furger M, Rickers K, Falkenberg G, Zhao Y, Cliff S, Prevot A, Baltensberger U, Buchmann B and Gehrig R. (2009) "Real-world emission factors for antimony and other brake wear related trace elements: size segregated values for light and heavy duty vehicles". Environmental Science & Technology, No. 143. pp. 8072-8078.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره چهارم (۶۱) / تابستان ۱۴۰۳

دستگاه های ترمزهای معمول و ترمزهای احیاءکننده انرژی با استفاده از روش های نظیر ارزیابی چرخه عمر نیاز به تحقیقات جداگانه دارد. انجام مطالعات مشابه در مورد آلاینده PM2.5 که ذرات با ابعاد کوچکتر می باشد و برای سلامتی مضرتر می باشد نیز پیشنهاد می شود.

## ۶. پی نوشت ها

1. Particulate Matter
2. Regenerative braking system
3. Conducting various brake dynamometer
4. Specific brake wear tracer
5. Supercapacitors
6. Flywheel
7. Battery Electric Vehicles
8. Plugin hybrid electric vehicles
9. Total average supplied at the wheels
10. Application
- 11- luozirui

## ۷. مراجع

- ایلدرآبادی، رحیم و صادقی، علی اصغر (۱۴۰۰)، "برآورد میزان انرژی اتلافی ناشی از ترمزگیری خودروها در مقابل تقاطعات چراغدار شهر تهران"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۳، شماره ۲، ص. ۱۴۶۷-۱۴۵۷.

- سازمان حمل و نقل و ترافیک مشهد، (۱۴۰۰)، "هفدهمین آمارنامه حمل و نقل و ترافیک مشهد"، معاونت مطالعات و برنامه ریزی.

- سازمان حمل و نقل و ترافیک مشهد، (۱۳۹۱)، "هشتمین آمارنامه حمل و نقل و ترافیک مشهد"، معاونت مطالعات و برنامه ریزی.

- شرکت بهینه سازی مصرف سوخت (۱۳۹۶)، "راهنمای مصرف سوخت خودروهای سبک ایران"، مدیریت بهینه سازی انرژی در بخش حمل و نقل، شرکت ملی نفت ایران.

- Harrison, R.M., Jones, A .M., Gietl, J., Yin, J., Green, D.C., (2012) "Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements". *Environmental Science & Technology*. Vol. 46, pp. 6523- 6529.
- 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 Technical Paper 1999-01-2910.
- Garg, B.D., Cadle, S.H., Mulawa, P.A., Groblicki, P.J., Laroo, C., Parr, G.A ., (2000) "Brake wear particulate matter emissions". *Environmental Science & Technology* Vol. 34, pp. 4463-4469.
- Gately, C.K., Hutyra, L.R., Peterson, S., Wing, I.S., (2017) "Urban emissions hotspots: quantifying vehicle congestion and air pollution using mobile phone GPS data", *Environmental Pollution*, Vol. 229, pp. 496 -504.
- Grange, S. K., Fischer, A., Zellweger, C., Alastuey, A., Querol, X., Jaffrezo, J.-L., Weber, S., Uzu, G., & Hueglin, C. (2021). "Switzerland's PM10 and PM2.5 environmental increments show the importance of non-exhaust emissions". *Atmospheric Environment*: No. 12, 100145.
- Grigoratos, T., Martini, G., (2015) "Brake wear particle emissions: a review". *Environmental science and Pollution Research*, No. 22, pp. 2491-2504.
- Guo J, Wang J, Cao B. (2009) "Regenerative braking strategy for electric vehicles".
- Cao B, Bai Z, Zhang W. (2005) "Research on control for regenerative braking of electric vehicle. In *Vehicle Electronics and Safety*", IEEE International Conference, 2005 Oct 14, pp. 92-97. IEEE.
- Chan CC. (2007) "The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles". *Proceedings of the IEEE*. 2007 Apr; No. 95(4) pp.704-18.
- Chan, D., Stachowiak, G., (2004) "Review of automotive brake friction materials". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, The Journal of Automobile Engineering*, Vol.218, pp. 953-966.
- Chen, J., Li W., Zhang H., Jiang W., Li W., Sui Y., Song X., Shibasaki R., (2020) "Mining urban sustainable performance: GPS data-based spatio-temporal analysis on on-road braking emission" , *Journal of Cleaner Production*, Vol. 270, 122489.
- Christidis P, Hernandez H, Georgakaki A, Peteves SD. (2005) "Hybrids for road transport, status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles". European Commission, vol. Technical Report EUR 21743 EN.
- Dang, V.C., Kubo, M., Sato, H., Shirakawa, T., Namatame, A, (2015) "Occupancy grid map of semi-static objects by mobile observer", *Artificial Life and Robotics*, Vol. 20, pp. 7 -12.
- Diaz, S., Mock, P., Bernard, Y., Bieker, G., Pniewska, I., Ragon, P.-L., Rodriguez, F., Tietge, U., Wappelhorst, S., (2020) "European vehicle market statistics, 2020/2021". International Council on Clean Transportation.
- EPA United States Environmental Protection Agency (2014) "Brake and Tire Wear Emissions from On road Vehicles in MOVES2014, EPA-420-R-14-013.

- Liu, Y., Chen H., Yin C., Federici M., Perricone G., Li Y., Margaritis D., Shen Y., Guo J., Wei T., (2022) "PM10 prediction for brake wear of passenger car during different test driving cycles", *Jornal of Chemosphere*, Vol. 305, 135481.
- Liu, Y., Chen H., Gao J., Li Y., Dave K., Chen J., Federici M. and Perricone G. (2021). "Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles." *Journal of Hazardous Materials*, No. 420. 126626.
- Luhana L, Sokhi R, Warner L, Mao H, Boulter P, McCrae I, Wright J, Osborn D., (2004) "Characterisation of exhaust particulate emissions from road vehicles". FP5 Particulates Project.
- Martins L, Brito J, Rocha A, Martins J., (2009) "Regenerative braking potential and energy simulations for a Plug-in hybrid electric vehicle under real driving conditions", *Proceedings of IMECE09: ASME interna-tional mechanical engineering congress and exposition*, November 13–19, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- Mathissen, M., Scheer, V., Vogt, R., Benter, T., (2011) "Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire/road interface". *Atmospheric Environment*, No. 45 , pp. 6172- 6179.
- McNeill, V.F., (2019) "Addressing the global air pollution crisis: chemistry's role". *Trends in Chemistry* No.1, pp. 5-8.
- Mosleh, M., Blau, P.J., Dumitrescu, D. (2004) "Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials". *Wear* No. 256, pp. 1128-1134.
- Nian X, Peng F, Zhang H. (2014) "Regenerative braking system of electric InIntelligent Vehicles Symposium, IEEE 2009 Jun 3 (pp. 864-868).
- Harrison, R. M., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M. R., Lewis, A. C., Marner, B., Murrells, T., & Williams, A., (2021) "Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review". *Atmospheric Environment*, No. 262, 118592.
- IPCC, (2014) "IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2014" Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment->
- Kukutschova, J., Moravec, P., Tomasek, V., Matejka, V., Smolík, J., Schwarz, J., Seidlerová, J., Safarová, K., Filip, P., (2011) "On airborne nano/micro-sized wear particles released from low-metallic automotive brakes". *Environmental Pollution* No. 159, pp. 998-1006.
- Kwak, J.-h., Kim, H., Lee, J., Lee, S., (2013) "Characterization of non-exhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements". *Science of the Total Environment*. No. 458, pp. 273-282.
- 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.
- Electric Vehicle Database, (2021) "Energy consumption of full electric vehicles", Available at: <https://ev-database.org/cheatsheet/energy-consumption-electric-car>
- Litman, T. (2019) "Generated traffic and induced travel". Victoria, British Columbia, Canada: Victoria Transport Policy Institute.

different EV powertrain topologies”. Energy Conversion and Management, Vol. 86, pp. 916-26.

- Xu G., Li W., Xu K., Song Z., (2011) “An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles”, Energies, Vol. 4, No.9, pp. 1461-1477.

- 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.

- Zhang, H., Song, X., Xia, T., Zheng, J., Haung, D., Shibasaki, R., Yan, Y., Liang, Y., (2018) “MaaS in bike-sharing: smart phone GPS data based layout optimization and emission reduction potential analysis”, Energy Procedia, Vol.152, pp. 649- 654.

vehicle driven by brushless DC motor”. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014 Oct; Vol. 61(10), pp.5798-808.

- Paustenbach, D.J., Finley, B.L., Lu, E.T., Brorby, G.P., Sheehan, P.J., (2004) “Environmental and occupational health hazards associated with the presence of asbestos in brake linings and pads (1900 to present): a state-of-the-art re-view”. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, Vol. 7, pp. 25-80.

- Rakov, V., kapustin, A., Danilov I., (2020) “Study of braking energy recovery impact on cost-efficiency and environmental safety of vehicle”, Transportation Research Procedia Vol. 50, pp.559–565.

- Sanders P.G., Xu N., Dalka T.M., Maricq M.M., (2003) “Airborne brake wear debris: size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests”. Environmental Science & Technology Vol. 37, pp. 4060-4069.

- Soret, A., Guevara, M., Baldasano, J., (2014) “The potential impacts of electric vehicles on air quality in the urban areas of Barcelona and Madrid (Spain)”. Atmospheric Environment Vol. 99, pp. 51-63.

-

- Timmers, V.R.J.H., Achten, P.A.J., (2016) “Non-exhaust PM emissions from electric vehicles”, Atmospheric Environment Vol. 134, pp. 10-17.

- Timmers, V.R.J.H., Achten, P.A.J., Amato, F., (2018). “Chapter 12-non-exhaust PM emissions from battery electric vehicles. In: Non-Exhaust Emissions”, Academic Press, pp. 261-287.

- Wang B., Xu M., Yang L., (2014) “Study on the economic and environmental benefits of

## علی اصغر صادقی، رحیم ایلدرآبادی

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. زمینه‌های 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.



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. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان انرژی، اتوماسیون، الکترونیک قدرت بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه حکیم سبزواری است.

