فصلنامه مهندسی ترافیک، سال بیستم، شماره ۸۱، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۳۳-۲۱

بررسی تأثیر میزان شاخص بین‌المللی ناهمواری جاده و سرعت وسیله نقلیه بر روی مصرف سوخت ۵ کلاس وسیله نقلیه و بومی‌سازی نرم‌افزار MOVES

علی خالقی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری دانشگاه تهران

محمد ضیا علوی (مسئول مکاتبات)، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

E-mail: zia.alavi@ut.ac.ir

چکیده

در جاده‌های کشور سالانه ۵ میلیارد لیتر سوخت مصرف می‌شود که این موضوع اهمیت کاهش مصرف سوخت را در حوزه حمل‌ونقل جاده‌ای می‌رساند. یکی از سیاست‌های کوتاه‌مدت کاهش مصرف سوخت، بهبود شرایط روسازی جاده می‌باشد. ویژگی‌های مختلف سطح روسازی که در تماس با لاستیک وسیله نقلیه می‌باشد، بر روی مقاومت غلتشی و به‌تبع آن مصرف سوخت وسایل نقلیه تأثیرگذار است. به منظور بررسی این سیاست کوتاه مدت کاهش مصرف سوخت، به بررسی تأثیر توام شاخص بین‌المللی ناهمواری جاده (IRI[1]) و سرعت وسیله نقلیه بر روی مصرف سوخت ۵ کلاس وسیله نقلیه (در حال حرکت) پرداخته شده‌است. بدین منظور از مدل‌های HDM-4[2] و MOVES[3] و ارتباط این دو مدل بر مبنای معادله قدرت مشخصه وسیله نقلیه (VSP[4]) استفاده شده‌است. بر اساس نتایج این تحقیق به ازای افزایش ۱ واحد (1 m/km) در شاخص بین‌المللی ناهمواری، مصرف سوخت وسایل نقلیه سبک در سرعت‌های پایین (کمتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت) و در سرعت‌های بالا (بیشتر از ۶۰ کیلومتر بر ساعت) به ترتیب به طور میانگین ۱,۶ و ۳,۳ درصد و در وسایل نقلیه سنگین به ترتیب به طور میانگین ۰,۸ و ۱,۷ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: شاخص بین‌المللی ناهمواری، VSP، مصرف سوخت، HDM-4، MOVES

۱. مقدمه

مسئله نفت و انرژی در کشور ما و کشورهای نفت‌خیز منطقه در مقایسه با سایر کشورها از حساسیت بیشتری برخوردار است. با اینکه انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل ضروری برای توسعه کشور محسوب می‌شود، اما مصرف انرژی‌های فسیلی که بیشتر در بخش حمل‌ونقل مورد استفاده قرار می‌گیرد، به کاهش و در نهایت اتمام منابع و ذخایر منجر خواهد شد.

همه ساله حدود ۲۵ درصد از کل انرژی کشور در حوزه حمل‌ونقل اعم از جاده‌ای، ریلی، هوایی و دریایی مصرف شده و روند صعودی میزان مصرف در این بخش کماکان ادامه پیدا کرده‌است، تقریباً ۹٤ درصد در زیر بخش جاده‌ای، حدود ۱ درصد در زیر بخش ریلی و مابقی در زیر بخش‌های هوایی و دریایی مصرف‌شده است.

مصرف بنزین از ۸/۸ میلیون لیتر در روز در سال ۱۳۵۳ به میانگین ۷٤,۷ میلیون لیتر در روز در سال ۱۳۹۵ رسیده و پیش‌بینی می‌شود برای سال ۹۸ این رقم به ۸۷,۸ میلیون لیتر افزایش یابد. در ایران هر ده سال یکبار مصرف سوخت دو برابر شده است درحالی‌که میزان مصرف جهانی هر ۵۰ سال یک‌بار دو برابر می‌شود و این نشان از مصرف سوخت بی‌رویه در ایران می‌باشد.

یکی از سیاست‌های کوتاه‌مدت کاهش مصرف سوخت وسایل نقلیه، بهبود کیفیت روسازی جاده می‌باشد. ویژگی‌های مختلف رویه روسازی که در تماس با لاستیک وسیله نقلیه می‌باشد، بر روی مقاومت غلتشی و به‌تبع آن مصرف سوخت وسایل نقلیه تأثیرگذار است.

ساختار این مقاله بدین صورت سازماندهی شده‌است که در بخش بعدی مبانی نظری و تحقیقات مرتبط صورت‌گرفته در این حوزه ارائه می‌شود. در بخش سوم روش پژوهش تحقیق آورده شده و بخش چهارم به تحلیل یافته‌ها می‌پردازد. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری تحقیق ارائه شده‌است.

۲. مبانی نظری

ناهمواری روسازی بیانگر نامنظمی‌هایی بر روی سطح روسازی است که منجر به تأثیر منفی بر روی کیفیت رانندگی و افزایش هزینه‌های کاربر می‌شود. ناهمواری در بیشتر کشورها با شاخص ناهمواری بین المللی (IRI) به صورت کمی بیان می‌شود. ناهمواری بر روی مقاومت غلتشی و مصرف سوخت تأثیر مشخصی را ایفا می‌کند که در ادامه به نتایج مطالعات پیشین به صورت خلاصه پرداخته می‌شود.

لوکاس و لاگانیر تأثیر ناهمواری را بر روی مصرف سوخت از طریق مطالعات آزمایشگاهی ارزیابی نمودند. آنان دریافتند که ناهمواری عامل مهمی برای افزایش مصرف سوخت وسیله نقلیه می‌باشد. محققین دیگری از جمله سندبرگ مصرف سوخت را بر روی بیست سطح مختلف روسازی در سرعت‌های مختلف بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ناهمواری روسازی می تواند بر روی مصرف سوخت تا حدود ۱۲ درصد تأثیر گذارد. دیلین تأثیر ناهمواری روسازی را بر روی مصرف سوخت وسیله نقلیه سبک با استفاده از آزمایشات تجربی بررسی نمود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش ناهمواری روسازی می تواند به طور چشمگیری تا ٦ درصد مصرف سوخت را افزایش دهد. در همین راستا آموس داده‌های سوخت یک کامیون کمپرسی با سرعت ۹۷ کیلومتر بر ساعت را بر روی جاده‌ای در دو حالت قبل و بعد از بهسازی سطح روسازی جمع‌آوری نمود. نتایج داده‌های سوخت حاکی از کاهش ۲,٤٦ درصدی مصرف سوخت برای کامیون کمپرسی را به دنبال داشت. هفرنان مصرف سوخت کامیون را بر روی روسازی طی دوره مطالعه دو ساله اندازه‌گیری نمود. نتایج نشان داد که افزایش میزان شاخص بین‌المللی ناهمواری به اندازه ۰,۱ متر بر کیلومتر سبب افزایش کارایی سوخت وسیله به اندازه ۰,۲ کیلومتر بر لیتر گردید. در ادامه کو مصرف سوخت را در دو جاده با شاخص ناهمواری‌ها مختلف و سرعت‌های مختلف اندازه‌گیری نمود. او دریافت که مصرف سوخت (لیتر بر ۱۰۰ کیلومتر) وسایل نقلیه متوسط و بزرگ با

افرایش شاخص ناهمواری در حدود ۳,۵ متر بر کیلومتر در سرعت بین ٤٠ تا ١٠٠ کیلومتر بر ساعت، ۷ برابر سریع تر می شود. چاتی و زابر بررسی میدانی را بر روی قطعات مختلف ۵ جاده مختلف با ۵ نوع وسیله نقلیه انجام دادند. آنها دریافتند که تأثیر ناهمواری می تواند مصرف سوخت را ١,٦٠ برای خودرو سواری، ۱,۳۵ برای شاستی بلند، ۱,۷۵ برای ون، ۱,۱۵ برای کامیون سبک و ۱,۷۰ درصد برای کامیون سنگین افزایش دهد. وانگ و همکارانش با استفاده از ارتقاء مدل ارزیابی چرخه عمر توانستند میزان مصرف انرژی و گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید مصالح، ساخت و استفاده از روسازی که شامل تأثیر مقاومت غلتشی بر روی عملکرد وسیله نقلیه می‌شد را مورد ارزیابی قرار دهند. در ادامه تحقیقات، فخری و شورمیج نتایج حاصل از تحلیل مصرف سوخت وسایل نقلیه را با استفاده از نرم افزار HDM-4در دو سطح از ناهمواری و در هر دو سطح مصرف سوخت وسایل نقلیه را برای دو نوع رویکرد (نگهداری روزمره و نگهداری اساسی) در دوره طرح مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که مصرف سوخت وسایل نقلیه با وضعیت ظاهری روسازی رابطه مستقیم دارد. زیادی و همکاران با استفاده مدل تأثیر ناهمواری–سرعت (RSI°) دریافتند که یک واحد تغییر در شاخص ناهمواری درسرعت‌های بالا و پایین (۱۰۵ و ٥٦ کیلومتر بر ساعت) به ترتیب منجربه افزایش به طور میانگین ۳ و ۲ درصد برای خودروهای سواری و افزایش ۲ و ۱ درصد مصرف سوخت برای کامیون‌های سنگین می شود. در ادامه آمیت با مرور کارهای صورت گرفته در گذشته به این نتیجه دست یافت که مقاومت غلتشی بیشتر تحت تأثیر ناهمواری می باشد و هیچ موافقت صریح و جامعی بر روی اثرگذاری نوع روسازی بر روی مصرف سوخت وسیله نقلیه وجود ندارد. بت‌شکن و همکارانش با استفاده از تحلیل حساسیت دریافتند که معیارهای ناهمواری به عبارت دیگر شاخص بین‌المللی ناهمواری و تعداد موج روسازی نماینده ۸۸ تا ۹۳ درصد تغیرات در استهلاک انرژی می‌باشند و همچنین موثرترین عوامل تأثیرگذار بر روی مصرف سوخت اضافی به شمار می‌روند.

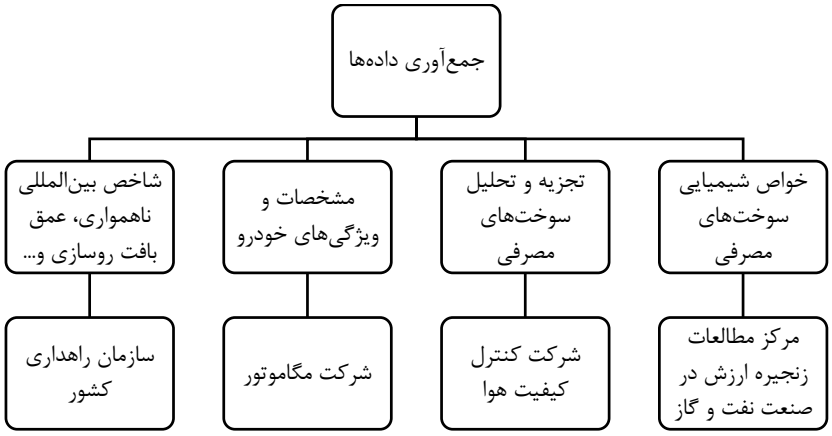
بررسی مطالعات صورت گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که تأثیر ناهمواری روسازی بر روی مصرف سوخت وسایل نقلیه با توجه به اهمیت جایگاه سوخت در جوامع همواره مورد توجه محققین بوده است.

۳. داده‌ها و روش تحقیق

در این تحقیق در گام نخست به منظور کالیبره‌نمودن مدل و بومی‌سازی نرم‌افزار MOVES از داده‌های متعددی استفاده و این اطلاعات در پایگاه داده نرم‌افزارMOVES اضافه شد. در گام دوم اقدام به شبیه‌سازی آزادراه تهران–کرج با استفاده از برنامه MOVES گردید و تغیرات مصرف انرژی ۵ کلاس وسیله نقلیه با توجه به تغیر شاخص بین‌المللی ناهمواری جاده و سرعت وسیله نقلیه بررسی شد. در نهایت با توجه به اینکه میزان محتوای انرژی سوخت‌های مصرفی که بر حسب کیلوژول بر گرم بیان می‌شود، بنابراین با تغیر درصد میزان انرژی مصرفی، به همان اندازه میزان سوخت مصرفی تغیر می‌یابد.

۳-۱ گردآوری داده‌ها

در این تحقیق به منظور جمع‌آوری داده‌هـا از مراجع و منابع متعددی استفاده گردیده‌است که به طور خلاصه در نمودار شکل ۱ ارائه شده‌است.



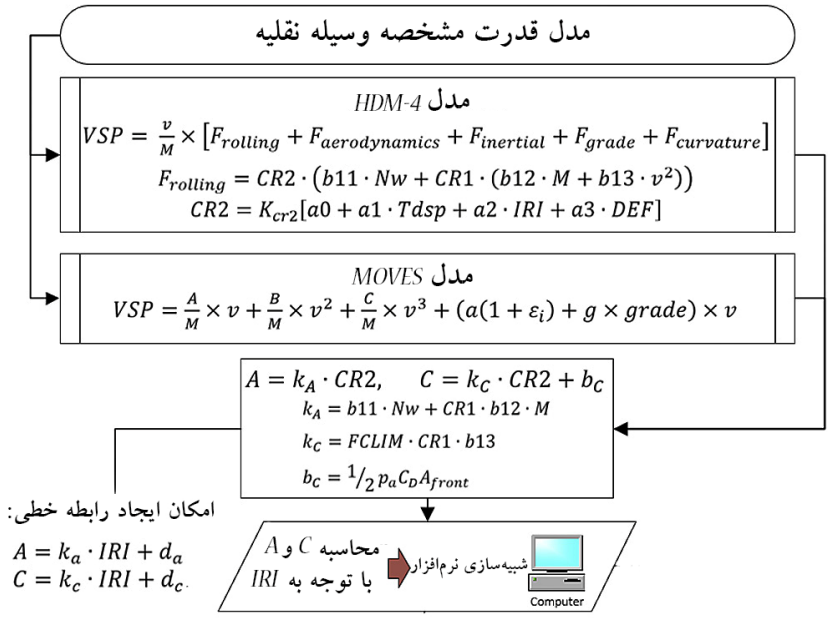
شکل ۱. نمودار منابع جمع‌آوری اطلاعات

۳-۲ نرم‌افزار MOVES

شبیه‌ساز آلاینده‌های موتور وسیله نقلیه (MOVES)، مدل محاسبه آلاینده و مصرف سوخت وسایل نقلیه می‌باشد که توسط آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا ارتقاء یافته است. این مدل می‌تواند بر اساس فاکتورهای آلایندگی و ترکیب تردد وسایل نقلیه، میزان مصرف سوخت و آلاینده‌ها را محاسبه نماید. با توجه به اینکه نرم افزار MOVES در محاسبات خود تأثیر ناهمواری را در نظر نمی‌گیرد، لذا بدین منظور در مطالعات پیشین از طریق ایجاد ارتباط بین مدل MOVES و HDM-4 توانستند تا تأثیر ناهمواری جاده و سرعت وسیله نقلیه را به صورت همزمان در محاسبه مصرف انرژی و سوخت در برنامه MOVES درنظر گیرند. وانگ و همکارانش از طریق ارتباط بین معادله VSP در مدل HDM-4 و معادله VSP در برنامه MOVES توانستند تأثیر ناهمواری روسازی را در محاسبات مصرف انرژی در برنامه MOVES درنظر بگیرند و نتایج شبیه‌سازی MOVES را به صورت مستقیم در ارزیابی چرخه عمر (LCA[7]) به‌کار گیرند.

۳-۳ کالیبره‌نمودن مدل برای راه‌های ایران (آزادراه تهران-کرج)

در مدل ارائه شده توسط وانگ و همکارانش، به منظور بررسی رابطه‌ی بین متغیرهای ترافیکی و رابطه روسازی، فرم کلی مدل‌های مصرف انرژی-قدرت مدنظر قرارگرفته‌است و از برابری معادلات قدرت مشخصه وسیله نقلیه (VSP) در مدل HDM-4 و برنامه MOVES استفاده گردیده‌است. ساختار معادله VSP مبنایی برای محاسبه مصرف انرژی وسایل نقلیه مختلف تحت شرایط عملکردی مختلف می‌باشد. نحوه‌ی ارتباط بین دو مدل ذکر شده در شکل ۲ ارائه شده‌است.



شکل ۲. روند مدل

مصرف انرژی وسیله نقلیه در مدل HDM-4 برابر است با عناصر مقاوم در برابر حرکت که شامل نیروهای غلتشی (Frolling)، آیرودینامیک (Faerodynamic)، مقاومت ناشی از شیب (Fgrade) و مقاومت ناشی از قوس (Fcurvature) می‌باشد.

$$VSP = \frac{v}{M} \times [Frolling + Faerodynamics + Finertial + +Fgrade + Fcurvature] \quad (۱)$$

در میان این عناصر مقاوم در برابر حرکت، تنها ترم مقاومت غلتشی تحت تأثیر شرایط روسازی مانند ناهمواری، بافت و یا ویژگی‌های سازه‌ای می‌باشد .بنابراین با فرض حرکت وسیله نقلیه با سرعت ثابت و جاده بدون تأثیر شیب و قوس، می‌توان تمامی ترم‌ها را به دو ترم که تحت تأثیر اثر متقابل روسازی-وسیله نقلیه می‌باشند، کاهش داد (به عبارت دیگر مقاومت غلتشی و آیرودینامیک).

رابطه‌ی بین شرایط روسازی و مصرف سوخت در مدل HDM-4 به صورت معادله 2 بیان شده است.

$$F_{rolling} = CR2 \times (b11 \times Nw + CR1 \times (b12 \times M + b13 \times\times V^2)) \quad (۲)$$

CR1: فاکتور مقاومت غلتشی لاستیک (بی بعد)

CR2: فاکتور مقاومت غلتشی سطح (بی بعد)

b11, b12, b13 : ضرایب مدل

Nw : تعداد چرخ وسیله نقلیه

M : جرم وسیله نقلیه (کیلوگرم)

V : سرعت (km/h)

$$CR2 = K_{cr2}[a0 + a1 \times Tdsp + a2 \times IRI + a3 \times DEF] \quad (۳)$$

K_{CR2}: فاکتور کالیبراسیون

a0, a1, a2, a3: ضرایب مدل

Tdsp: عمق بافت سطحی (میل‌متر)

IRI: شاخص ناهمواری (متر بر کیلومتر)

DEF: خیز تیر بکلمن (میلی‌متر)

در شبیه‌ساز MOVES ساختار مدل *VSP* به شکل معادله ٤ می‌باشد.

$$VSP = \frac{A}{M} \times v + \frac{B}{M} \times v^2 + \frac{C}{M} \times v^3 + (a(1+\varepsilon_i) + g \times grade) \times v \quad (٤)$$

A,B,C: ضرایب مدل

M: جرم وسیله نقلیه (کیلوگرم)

V: سرعت وسیله نقلیه (متر بر ثانیه)

ضرایب a و ε به ترتیب ترم‌های مربوط به شتاب وسیله نقلیه و فاکتور جرم می‌باشند که با توجه به اینکه در ارتباط با ویژگی‌های طراحی هندسی جاده می‌باشند در نتیجه فراتر از حوزه این تحقیق می‌باشند. ارتباط بین سطح روسازی و شرایط سازه‌ای با مصرف سوخت نباید تحت تأثیر ویژگی‌های هندسی جاده قرار گیرد. بنابراین سه ترم اولیه در معادله VSP می‌توانند به عنوان پارامترهای تحت تأثیر ناهمواری روسازی باشند. ضرایب A، B و C در برنامه MOVES به صورت مستقیم قابل تغییر نمی‌باشند و این ضرایب در پایگاه داده نرم‌افزار ذخیره و قابل تغییر هستند.

معادلات ۱ و ٤ امکان ارتباط ضرایب VSP (A، B و C) در مدل MOVES با برخی از مشخصات فیزیکی روسازی را فراهم می‌کنند. با مساوی قراردادن این دو معادله و بسط معادله ۲ از طریق معادله ۳، همانطور که مشاهده می‌شود ترم‌های درجه ۱ و درجه ۳ سرعت مرتبط با عناصر مقاومت غلتشی مقاوم در برابر حرکت می‌باشند. بنابراین ضرایب A و C به عنوان پارامترهای مرتبط با ناهمواری روسازی در نظر گرفته می‌شود. اگر معادله ۱ و معادله ٤ را برابر قرار دهیم، ضرایب A و C به شرح معادله ۵ قابل تعریف می‌باشند.

$$\begin{cases} A = a \cdot CR2; \\ C = c \cdot CR2 + d. \end{cases} \quad (٥)$$

$$a = FCLIM \cdot (b11 \cdot Nw + CR1 \cdot b12 \cdot M) \quad (٦)$$

$$c = FCLIM \cdot CR1 \cdot b13; \quad (٧)$$

$$d = \frac{1}{2}\rho_a C_D A_{front}; \quad (٨)$$

FCLIM: فاکتور آب و هوا

PCTDS: درصد رانندگی در برف

PCTDW: درصد رانندگی در باران

Pa: چگالی هوای محیط

CD: ضریب پسا

Afront: مساحت جلویی خودرو (مترمربع)

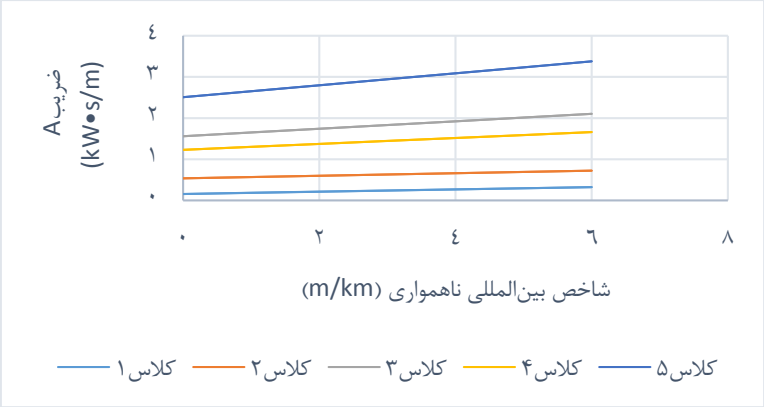
شاخص بین‌المللی ناهمواری داده شده تنها متغیر درمعادلات A و C می‌باشد. بنابراین می‌توان میان پارامترهای A و C و IRI رابطه خطی‌ای در نظر گرفت.

$$\begin{cases} A = n \cdot IRI + d_a \\ C = m \cdot IRI + d_c \end{cases} \quad (٩)$$

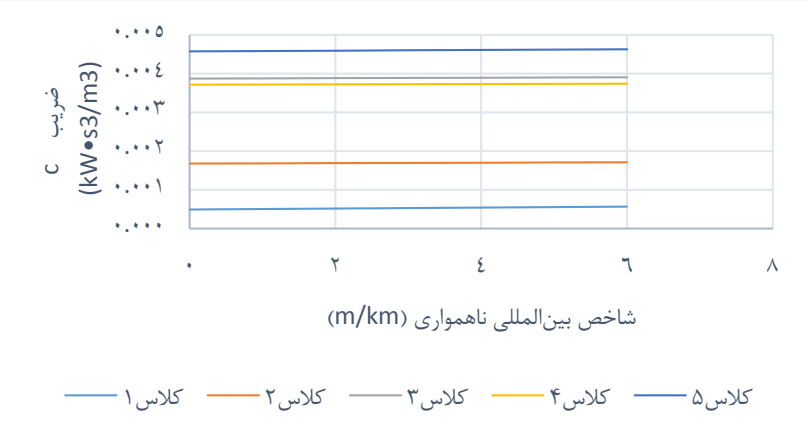
در معادله ۹ m، n، da و dc پارامترهای نامعلوم هستند که توسط رگرسیون خطی محاسبه می‌شوند.

مقادیر اولیه A، B و C در برنامه MOVES با توجه به شاخص بین‌المللی ناهمواری صفر محاسبه شده است. با قرار دادن مقادیر اولیه ضرایبVSP به ازای شاخص ناهمواری صفر که در شبیه‌ساز MOVES محاسبه گردیده‌است در سمت چپ معادلات (معادله ۵)، مقادیر مجهول سمت راست معادلات (معادله ۵) به دست می‌آید.

در گام بعد با قرار دادن مقادیر مختلف شاخص بین‌المللی ناهمواری، ضرایب A وC به ازای این مقادیر به دست می‌آید. با توجه به مقادیر داده‌شده، رابطه‌ی بین شاخص بین‌المللی ناهمواری و ضرایب VSP وسایل نقلیه به شرح نمودارهای زیر می‌باشد(شکل ۳ و شکل ٤).



شکل ۳. رابطه‌ی بین شاخص بین‌المللی ناهمواری و ضریب A برای ۵ کلاس وسیله نقلیه



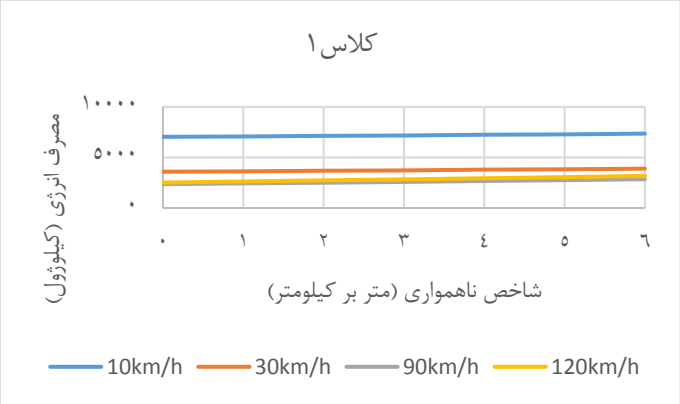
شکل ۴. رابطه‌ی بین شاخص ناهمواری و ضریب C برای ۵ کلاس وسیله نقلیه

٤. بحث و تحلیل یافته‌ها

پس از جمع‌آوری داده‌ها و کالیبره‌نمودن مدل، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MOVES 2014 به منظور بدست آوردن نتایج انجام گردید. این عملیات به تعداد ۹۸ دفعه در سرعت‌ها و مقادیر مختلف شاخص بین‌المللی ناهمواری اجرا شد. محدوده‌ی سرعت از ۱۰ تا ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت (۱۰، ۱۲، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰) مطابق با حداقل و حداکثر محدوده سرعت در جاده‌های ایران تغیر داده‌شد. در سرعت‌های اولیه با توجه به مشاهده تغییرات شدید مقادیر خروجی سبب شد تا تغیر بازه‌های سرعت در بازه‌های کوچکتری صورت گیرد که نتایج در دو بخش به شرح زیر می‌باشد.

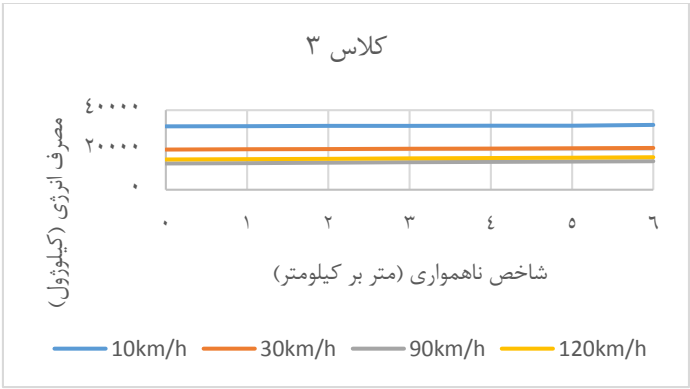
٤-١ بررسی تغیرات مصرف انرژی در سرعت‌های ثابت با در نظرگرفتن تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری

با توجه به نتایج شبیه‌سازی برنامه MOVES، تغیرات مصرف انرژی مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری در چندین سرعت (محدوده‌ی پایین و بالا) به شرح نمودارهای شکل ۵ تا شکل ۹ می‌باشد.

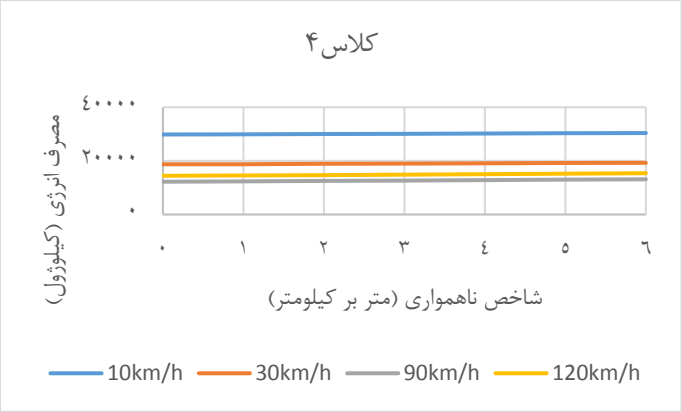


شکل ۵. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۱ مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری

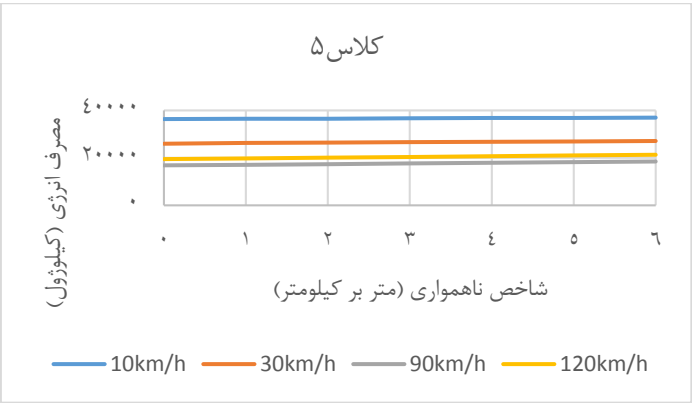
شکل ۶. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۲ مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری



شکل ۷. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس۳ مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری



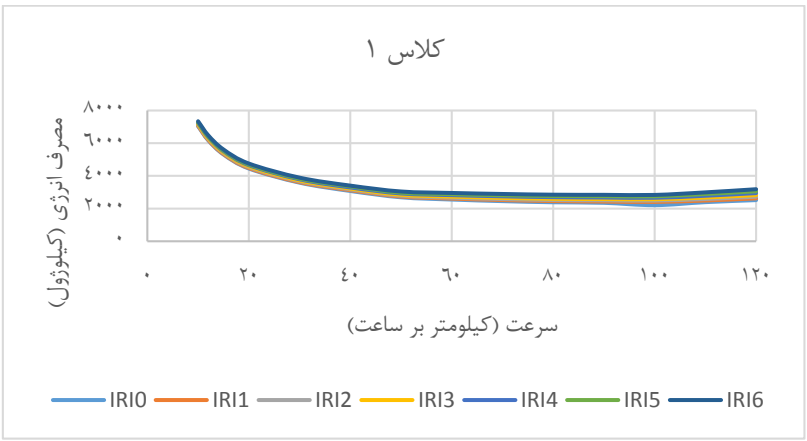
شکل ۸. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ٤ مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری



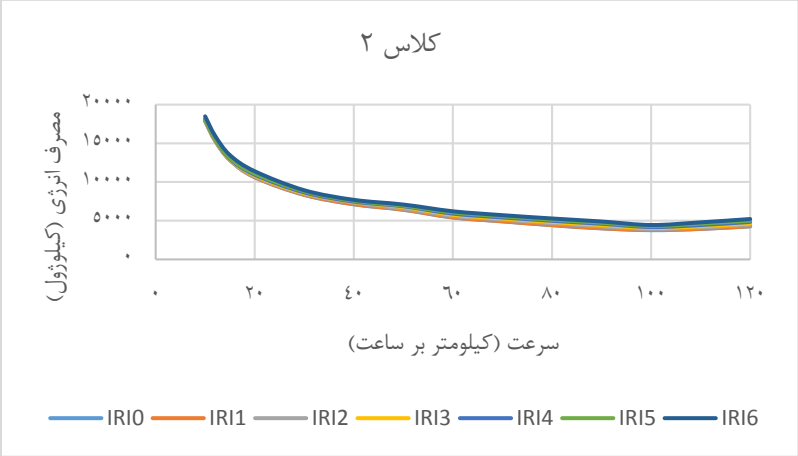
شکل ۹. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۵ مطابق با تغیرات شاخص بین‌المللی ناهمواری

٤-۲ بررسی تغیرات مصرف انرژی در شاخص بین‌المللی ناهمواری ثابت با در نظرگرفتن تغییرات سرعت

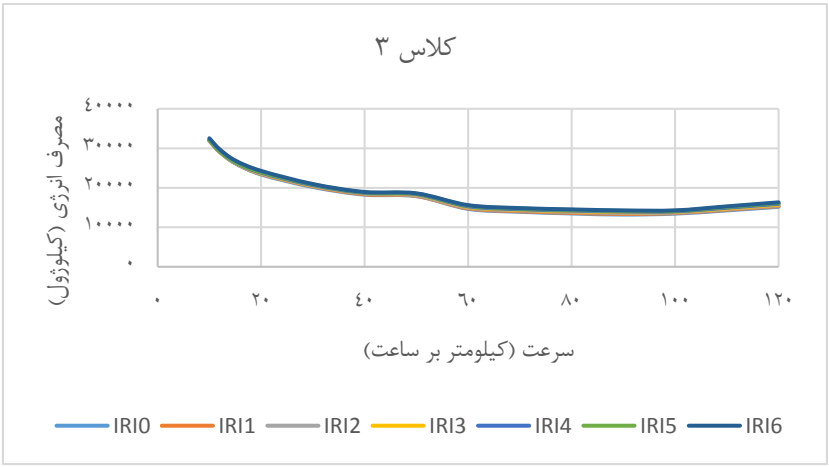
با توجه به نتایج شبیه‌سازی برنامه MOVES، تغیرات مصرف انرژی مطابق با تغیرات سرعت در مقادیر مختلف شاخص بین‌المللی ناهمواری به شرح نمودارهای شکل ۱۰ تا شکل ١٤ می‌باشد.



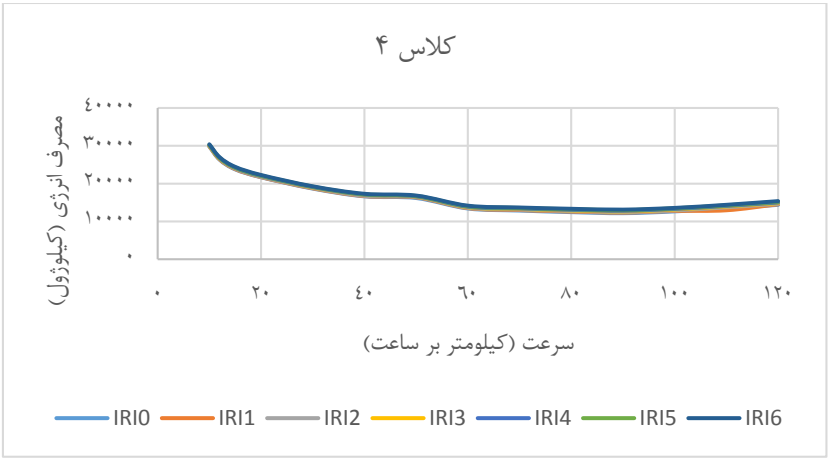
شکل ۱۰. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۱ مطابق با تغیرات سرعت



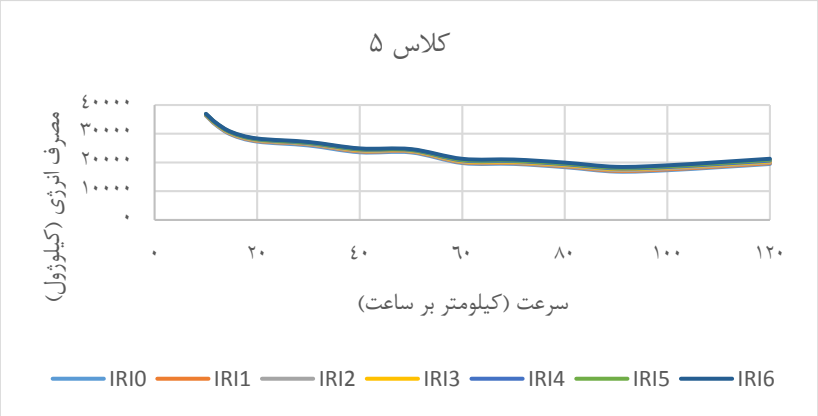
شکل ۱۱. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۲ مطابق با تغیرات سرعت



شکل ۱۲. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۳ مطابق با تغیرات سرعت



شکل ۱۳. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ٤ مطابق با تغیرات سرعت



شکل ۱۴. نمودار بررسی تغیرات مصرف انرژی وسایل نقلیه کلاس ۵ مطابق با تغیرات سرعت

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر توام میزان شاخص بین‌المللی ناهمواری روسازی و سرعت وسیله نقلیه بر روی ۵ کلاس وسیله نقلیه پرداخته شد که می‌توان به طور خلاصه به نتایج زیر اشاره نمود.

۱. در سرعت ثابت میان مصرف سوخت وسایل نقلیه و شاخص بین‌المللی ناهمواری به طور تقریبی رابطه‌ای خطی برقرار است.

۲. در سرعت ثابت با افزایش میزان شاخص بین‌المللی ناهمواری، میزان مصرف سوخت افزایش می‌یابد.

۳. میان سرعت وسیله نقلیه و مصرف سوخت آن رابطه‌ای غیر خطی برقرار است.

٤. در وسایل نقلیه سبک (کلاس ۱) با افزایش سرعت تا سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت، میزان مصرف انرژی روند کاهشی را دارد اما پس از افزایش سرعت از سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت میزان مصرف انرژی روند افزایشی را بر خود می‌گیرد.

۵. در وسایل نقلیه سنگین با افزایش میزان سرعت، میزان مصرف انرژی روند ثابتی را طی نمی‌کند و در سرعت‌های حدود ۵۰ و ۱۰۰ (کیلومتر بر ساعت) شیب نمودار مصرف انرژی–سرعت دچار تغییر می‌شود.

٦. به ازای افزایش ۱ واحد (1 m/km) در شاخص بین‌المللی ناهمواری، مصرف سوخت وسایل نقلیه سبک در سرعت‌های پایین (کمتر از ٦۰ کیلومتر بر ساعت) و در سرعت‌های بالا (بیشتر از ٦۰ کیلومتر بر ساعت) به ترتیب به طور میانگین ۱,٦ و ۳,۳ درصد و در وسایل نقلیه سنگین به ترتیب به طور میانگین ۰,۸ و ۱,۷ درصد افزایش می‌یابد.

٦. پی‌نوشت‌ها

1. International Roughness Index
2. Highway Development and Maintenance Management
3. Motor Vehicle Emissions Simulator
4. Vehicle-Specific Power
5. Roughness-Speed Index
6. Life Cycle Assessment

۷. مراجع

– ترازنامه های انرژی سال های ۱۳٦٦–۱۳۹۵، وزارت نیرو، معاونت برق و انرژی، دفتر برنامه ریزی کلان برق و انرژی.

– آمارنامه مصرف فرآورده‌های نفتی انرژی‌زا–۱۳۹۵، شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران.

– فخری، منصور، شورمیج، ابراهیم (۱۳۹۳) "بررسی تأثیر وضعیت ظاهری روسازی بر مصرف سوخت وسایل نقلیه با استفاده از نر مافزار .HDM-4 دانشگاه خواجه‌نصیر الدین طوسی، تهران، ایران.

- Harvey, J.T., Meijer, J., Ozer, H., Al-Qadi, I.L., Saboori, A., Kendall, A., 2016. Pavement Life-cycle Assessment Framework (No. FHWA-HIF-16e1014).

- Laganier, R. & Lucas, J., 1990. The Influence of Pavement Evenness and Macrotexture on Fuel Consumption. In: W. Meyer & J. Reichert, eds. Surface Characteristics of Roadwasys: International Research and Technologies. Philadelphia, PA: Ameircan Society for Testing and Materials, pp. 454-459.

- Sandberg, U., 1990. Road Macro-and Megatexture Influence on Fuel Consumption. In: W. Meyer & J. Reichert, eds. Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 460-479.

- Delanne, Y., 1994. The Influence of Pavement Evenness and Macrotexture on Fuel Consumption. In: B. Kulakowski, ed. Vehicle-Road Interaction. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 240-247.

- Amos, D., 2006. Pavement Smoothness and Fuel Efficiency: An Analysis of the Economic Dimensions of the Missour Smooth Road Initiative, Jefferson City, MO: Missouri Department of Transportation.

- Heffernan, M., 2006. NCAT Fuel Economy Research Overview, Auburn, AL: Master of Science Thesis, Auburn University.

- Ko K-H. (2010). The Change Rate of Fuel Consumption for Different IRI of Paved Roads. Journal of the Korean Society of Road Engineers, 12(1), 55-59.

- Zaabar, I., & K. Chatti (2011). A Field Investigation of the Effect of Pavement Surface Conditions on Fuel Consumption. In Proceedings of the TRB 90th Annual Meeting. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.

- Wang, T., Lee, I.S., Kendall, A., Harvey, J., Lee, E.B., Kim, C., 2012. Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. J. Clean. Prod. 33, 86e96..

- Ziyadi, M., Ozer, H., Kang, S.; Al-Qadi, I.L. Vehicle energy consumption and an environmental impact calculation model for the transportation infrastructure systems. J. Clean. Prod. 2018, 174, 424–436.

- Vashtish, A., kumar, R. Review on Effect of Pavement Characteristics on Fuel Consumption. (IJEAT).2018, ISSN: 2249 – 8958, Volume-7 Issue-4.

- Botshekan, M., P.Tootkaboni, M., Louhghalam, A. Global Sensitivity of Roughness-Induced Fuel Consumption to Road Surface Parameters and Car Dynamic Characteristics. (TRR).2019.

- EPA, U., 2015. Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2014a [Software]. Washington, DC.

- Bennett, C.R., Greenwood, I.D., 2003. Volume 7: Modeling Road User and Environmental Effects in HDM-4, Version 3.0,

International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM). World Road Association (PIARC). World Road Association (PIARC), Paris.