بررسی تأثیر توزیع نامناسب بار محوری وسایل نقلیه باری بر عملکرد روسازی با استفاده از داده‌های توزین حین حرکت (مطالعه موردی: تهران-رودهن)

مقاله علمی-پژوهشی

*محسن ابوطالبی اصفهانی (نویسنده مسئول)، دانشیار، گروه راه آهن و مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
محمد نام‌آور جهرمی، دانش‌آموخته دکتری، مسئول بخش تحقیق و توسعه(R&D)، شرکت زرین سپاهان، اصفهان، ایران
مهسا گرجی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه آهن و مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
مرضیه اسماعیلی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه آهن و مهندسی برنامه ریزی حمل و نقل، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵
صفحه۳۰-۱

چکیده

حمل‌ونقل جاده‌ای که از مهم‌ترین ارکان زیرساخت‌های اقتصادی و توسعه‌ای کشور است سهم چشمگیری از سرمایه‌های ملی را به خود اختصاص داده و نقشی تعیین‌کننده در پایداری و رشد اقتصادی ایفا می‌کند. ازاین‌رو، صیانت و نگهداری بهینه از زیرساخت آن یعنی روسازی راه‌ها، از اهمیتی ویژه برخوردار است. باوجود آنکه عمر طراحی روسازی‌ها در ایران معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ سال پیش‌بینی می‌شود، در عمل بروز خرابی‌ها در بسیاری از موارد بسیار زودتر و غالباً در فاصله ۵ تا ۶ سال پس از بهره‌برداری مشاهده می‌گردد؛ مسئله‌ای که ضرورت بازنگری در شیوه‌های طراحی، اجرا و نگهداری این زیرساخت‌های حیاتی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. یکی از فرضیات مهم که در بروز این خرابی‌ها موثر است، بارگذاری بیش از حد وسایل نقلیه و به‌ویژه توزیع غیراصولی بار بر محورهای آن‌هاست؛ به‌طوری که عدم رعایت الزامات آیین‌نامه‌ای در این زمینه، منجر به افزایش تنش‌های وارد بر روسازی و تسریع در روند تخریب آن می‌گردد. براین‌اساس، در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های ثبت‌شده توسط سیستم توزین در حال حرکت (WIM) در محور تهران–رودهن، الگوی توزیع بار محوری وسایل نقلیه مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل‌ها در چهار سناریو انجام شد: در سناریوی نخست، تمامی وسایل نقلیه، اعم از بارگیری‌شده و بدون بار، در نظر گرفته شدند. در سناریوی دوم، تنها وسایل نقلیه بارگیری‌شده مورد بررسی قرار گرفتند. در سناریوی سوم، وسایل نقلیه دارای اضافه‌بار تحلیل شدند؛ و در سناریوی چهارم، محورهای دارای اضافه‌بار در وسایل نقلیه مدنظر قرار گرفتند. نتایج نشان داد که در سناریوهای اول و دوم، هیچ‌گونه اضافه‌باری مشاهده نشد. بااین‌حال، در سناریوی سوم، ۵۶/۶ درصد از وسایل نقلیه دارای اضافه‌بار بودند و در سناریوی چهارم، ۸۹/۴ درصد از محورها بار بیش از حد مجاز داشتند. این یافته‌ها بیانگر تأثیر قابل‌توجه توزیع نامناسب بار در افزایش بارگذاری وارده بر روسازی است.

واژه‌های کلیدی: بار محور مبنای هم‌ارز، سیستم توزین در حال حرکت، ضریب بار هم‌ارز، وسایل نقلیه باری، خرابی

۱- مقدمه

حمل‌ونقل جاده‌ای پرکاربردترین شیوه جابه‌جایی در جهان و به ویژه در ایران است و روسازی‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی باید دوام کافی در برابر شرایط محیطی و بارهای ترافیکی داشته باشند. در ایران عمر طراحی رو سازی‌ها معمولاً ۱۰ تا ۲۰ سال در نظر گرفته می‌شود، اما در عمل اغلب پس از ۵ تا ٦ سال خرابی‌ها ظاهر می‌شوند. عوامل متعددی سبب خرابی رو سازی

می‌شوند؛ از جمله شرایط سازه‌ای، عوامل اقلیمی و محیطی، ویژگی‌های ناوگان عبوری و میزان ترافیک در بازههای زمانی مشخص (Jahromi & Sarkar, 2025; Jahromi, Sarkar, Mansourian, & Zaghi, 2025; Namavar Jahromi, Sarkar, Mansourian, & Esmaeil Zaghi, 2024). در این میان، بارگذاری ناشی از وسایل‌نقلیه سنگین یکی از مهم‌ترین عوامل محسوب می‌شود؛ زیرا وزن کل خودرو، تعداد و نوع محورها تأثیر مستقیمی بر عملکرد و دوام روسازی دارد (Brzozowski, Maczyński, Ryguła, & Konior, 2023; Rys, Judycki, & Jaskula, 2016; Taylor, Bergan, Lindgren, & Berthelot, 2000).

با توجه به اهیمت بارگذاری در طراحی و بهره‌برداری راها، عبور وسایل نقلیه دارای اضافه بار که محورهای آن‌ها نیز دارای اضافه بار خواهند بود منجر به خرابی زودرس روسازی‌ها خواهد شد(Khalifa, Zulkiple, & Ogab, 2020; Pais, Figueiras, Pereira, & Kaloush, 2019; Sholichin & Rumintang, 2018). در تحقیقی در سال ۲۰۲۳، رابطه بین شرایط روسازی آسفالتی و عملکرد ترافیک در بزرگراه‌های چندخطی بررسی شد. داده‌ها شامل ویژگی‌های هندسی، حجم ترافیک، شرایط آسفالت و سرعت خودروها بودند. نتایج نشان دادند که شاخص وضعیت روسازی (PCI) مهم‌ترین عامل مؤثر بر ظرفیت ترافیک است؛ هرچه کیفیت روسازی بالاتر باشد، ظرفیت و سرعت خودروها افزایش می‌یابد و در بخش‌های با روسازی آسیب‌دیده، سرعت و حجم ترافیک کاهش می‌یابد (Hashim, Badawy, & Heneash, 2023). در پژوهشی در سال ۲۰۱۹، تأثیر خرابی سطح روسازی بر جریان ترافیک بررسی شد. نتایج نشان داد خرابی‌هایی مانند صیقلی‌شدن، فرورفتگی و ترک‌خوردگی باعث کاهش سرعت، افزایش خطر تصادف و کاهش ظرفیت ترافیکی می‌شوند؛ به‌طوری‌که خطوط دارای خرابی تا ٪٤٤ و خطوط مجاور بدون خرابی تا ٪٢٦ کاهش ظرفیت تجربه کردند (Aydin & Topal, 2019). در ده‌های گذشته، گسترش سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل (ITS) زمینه را برای پایش دقیق‌تر و مستمر بارگذاری محوری وسایل نقلیه فراهم کرده است. در این میان، سامانه توزین در حال حرکت (WIM)به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین و کارآمدترین ابزارهای ITS، جایگاه ویژه‌ای در اندازه‌گیری و ارزیابی بار محوری به خود اختصاص داده است. این سامانه قادر است اطلاعاتی مانند کلاس خودرو، تعداد و فاصله محورها، وزن هر محور و سرعت وسایل‌نقلیه را به‌صورت برخط ثبت کند و بدین ترتیب، هم ابزاری ارزشمند برای طراحی روسازی و پل‌ها و مطالعات ترافیکی فراهم آورد و هم نقش مهمی در اجرای قوانین اضافه بار ایفا کند (Adresi, Abedi, Dong, & Yekrangnia, 2024; Ahn, Kandala, Uzan, & El-Basyouny, 2011; M Bosso, Mota, Vasconcelos, & Bernucci, 2019; Cremona, 2001; Masud, Haider, Selezneva, & Wolf, 2020, 2024; Morovatdar, Ashtiani, & Mahmoud, 2023; Pais Choi, Plemel, & ,et al., 2019; Pratt Papagiannakis, 2022; Ryguła, Brzozowski, & Maczyński, 2020; Rys, Więckowski, Wasilewska, & Dołęga, 2024; Sujon & Dai, 2021; Yu, Cai, & Deng, 2016). استفاده از این سیستم‌ها که عمدتاً در کشورهای آمریکایی و آسیایی گسترده است، کمتر در اروپا دیده می‌شود و توسعه آن‌ها در کشورهای در حال توسعه مانند قزاقستان نیز قابل مشاهده است (Kim et al., 2021; Ventura, Barabino, Vetturi, & Maternini, 2023). امروزه سیستم WIM با ثبت خودکار اطلاعات وسایل نقلیه، شناسایی متخلفان و صدور جریمه را تسهیل می‌کند و باعث تسریع اعمال قانون، افزایش ایمنی و کاهش هزینه‌های ناشی از تخریب جاده می‌شود (Brzozowski et al., 2023; Burnos, Gajda, Sroka, Wasilewska, & Dolega, 2021; B. Jacob & Cottineau, 2016; National Academies of Sciences & Medicine, 2020; Warscotte, Boreux, Antofie, & Corbaye, 2023).

۲- پیشینه تحقیق

پژوهش‌های متعددی بر اهمیت بارگذاری واقعی و نقش وسایل‌نقلیه دارای اضافه‌بار بر خرابی روسازی‌ها تأکید کرده‌اند. خلیفه و همکاران نشان دادند که کامیون‌های سنگین دارای اضافه‌بار حدود ۷۱٪ از خسارت روسازی‌های محلی را ایجاد می‌کنند (Khalifa et al., 2020). در همان سال، عوامل مؤثر بر پدیده بارگذاری بیش از حد در حمل‌ونقل جاده‌ای چین، با تکیه بر داده‌های سیستم توزین در بزرگراه‌ها و با هدف ارائه راهکارهایی برای کاهش خرابی‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، یک مطالعه میدانی جامع مبتنی بر نمونه‌برداری از ناوگان حمل‌ونقل جاده‌ای انجام شد که طی آن، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های وسایل نقلیه، شرایط بهره‌برداری و مشخصات

حمل‌ونقل از ۳۲۴۸ کامیون گردآوری شد. نتایج نشان داد عواملی نظیر نوع حمل‌ونقل، میزان بار مجاز، وضعیت عملکردی وسیله نقلیه، وزن بار در طول دوره مطالعه، اثرات متقابل بین بار مجاز و بار واقعی، و همچنین میانگین فاصله حمل‌ونقل، از جمله مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر اضافه‌بار وسایل نقلیه محسوب می‌شوند (Chen et al., 2020). در یک مطالعه در هند، تأثیر اضافه‌بار وسایل‌نقلیه بر سطح روسازی و طراحی ضخامت آن بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های بار محوری، ضرایب بار محوری معادل (EALF) و ضریب آسیب وسیله نقلیه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که اضافه‌بار وسایل نقلیه سبب افزایش ضریب آسیب و در نتیجه افزایش بارگذاری ترافیکی نسبت به محورهای استاندارد معادل، می‌شود. این موضوع در نهایت منجر به نیاز به ضخامت بیشتر روسازی و هزینه‌های بالاتر نگهداری می‌گردد (Kumar, Arya, Gupta, & Bhola, 2020). پایس و همکاران با استفاده از داده‌های WIM دریافتند که درصد بالایی از وسایل‌نقلیه دارای اضافه‌بار هستند و این امر هزینه‌های روسازی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد (Pais et al., 2019). همچنین یولونگ و همکاران نیز تأکید کردند که اضافه‌بار محوری، عمر سرویس روسازی را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (He et al., 2021). فوکیک و همکاران به این نتیجه رسیدند که WIM دقیق‌ترین روش برای تعیین ESAL واقعی و ارزیابی خسارت است (B. Jacob & Schmidt, 2019). شولیچین و رومینتانگ در پژوهش خود بیان کردند که میانگین خسارت ناشی از کامیون‌های دو محوره حدود ۳٤/٤۲ درصد بوده و منجر به بیشترین آسیب تغییر شکل جاده شده است (Sholichin & Rumintang, 2018).

در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۸، یک تحلیل جامع به منظور ارزیابی عملکرد روسازی تحت تأثیر بارهای ترافیکی عادی و بارهای ناشی از کامیون‌های سنگین در یکی از ایالت‌های آمریکا انجام شد. در این مطالعه، چهار بزرگراه به دلیل حجم بالای ترافیک کامیون‌های دارای اضافه‌بار برای بررسی انتخاب شدند. روش تحقیق شامل کار میدانی، از جمله شمارش ترافیک و بررسی بصری خرابی‌های سطح روسازی، و همچنین استفاده از نرم‌افزار SSTr Design بود. نتایج نشان داد با وجود نسبت کم وسایل نقلیه دارای اضافه‌بار در مقایسه با کل ترافیک، اثر آن‌ها بر ترک‌خوردگی خستگی روسازی بیش از ۱۰۰۰ درصد (۱۰ برابر) یک کامیون با وزن استاندارد است. بر این اساس، برای طراحی روسازی تحت چنین شرایطی، لازم است ضخامت روسازی افزایش یابد (Titi, Coley, & Latifi, 2018).

ابوطالبی اصفهانی و رضوانی در پژوهشی به بررسی تأثیر اصلاح مقررات حمل بار در سال ۱۳۹۰ و نقش اضافه‌بار وسایل نقلیه بر میزان خسارت وارده به روسازی راه‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که تغییر مقررات مذکور نه‌تنها موجب کاهش آسیب‌ها نشده، بلکه خسارت قابل‌توجهی به سازه روسازی وارد کرده و اضافه‌بارها سهم چشمگیری در بارگذاری و تخریب دارند. همچنین عدم تناسب بین میزان جرایم دریافتی و خسارت واقعی وارده مشاهده شد. یافته‌ها حاکی از آن است که روسازی نسبت به باربر دو محور نوع ۲ بیشترین حساسیت را دارد و استفاده از سیستم توزین در حال حرکت (WIM) برای کنترل بار محورها ضروری است (ابوطالبی اصفهانی و رضوانی، ۱۳۹۸). همچنین آن‌ها در پژوهشی دیگر به ارزیابی عوارض دریافتی و تطابق آن با میزان خسارت وارده به روسازی پرداختند. نتایج نشان داد که بین عوارض و خسارت تناسبی وجود ندارد، به‌طوری‌که وسایل نقلیه با آسیب کمتر عوارض بیشتری پرداخت می‌کنند و عوارض موجود نیز پاسخگوی هزینه‌ها نیست؛ بنابراین بازنگری در نظام عوارض و استفاده از سیستم WIM ضروری است (ابوطالبی اصفهانی و رضوانی، ۱۳۹۷).

جدول ۱ مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه تحلیل بارگذاری محوری و اثرات آن بر روسازی ارائه می‌دهد. باوجود تعداد قابل‌توجهی مطالعه، در ایران هنوز تحقیقات جامعی که با بهره‌گیری از داده‌های سیستم توزین در حال حرکت (WIM) به تحلیل بارگذاری محوری و تخمین بارگذاری دوره طراحی روسازی پرداخته باشند، بسیار محدود است. این کمبود دانش دقیق، بررسی تأثیر واقعی اضافه‌بار محوری در شرایط ترافیکی کشور را با چالش مواجه می‌کند؛ بنابراین، به‌کارگیری داده‌های WIMدر مطالعات میدانی و تحلیل‌های طراحی، امری ضروری است؛ چرا که این داده‌ها امکان ارائه ارزیابی‌های مبتنی بر شرایط واقعی ترافیک، شناسایی الگوهای توزیع بار و تخمین دقیق اثر اضافه‌بار بر دوام روسازی را فراهم می‌کنند و می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود طراحی و نگهداری زیرساخت‌های حمل‌ونقل جاده‌ای ایفا کنند.

جدول ۱. جمع‌بندی پیشینه پژوهش

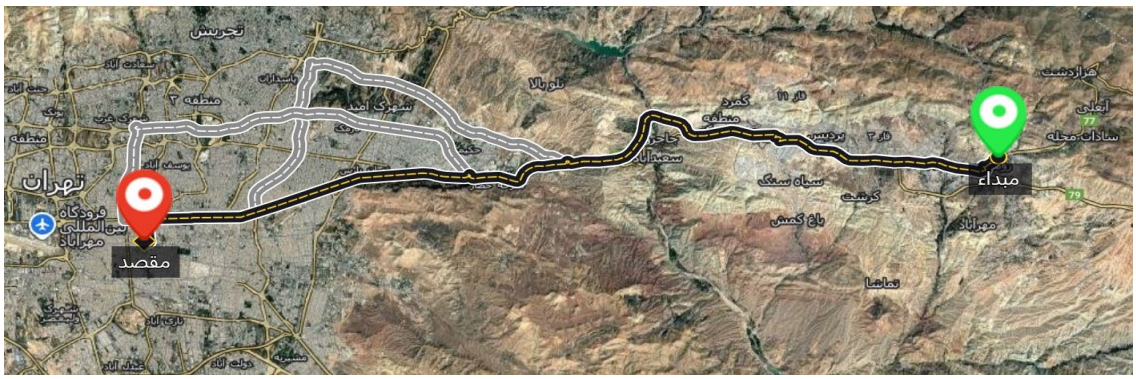
محقق	سال	عنوان تحقیق	نتیجه
شولیچین و همکاران	۲۰۱۸	رابطه آسیب جاده با اضافه‌بار وسایل نقلیه در جاده کالیاناک سورابایا	میانگین درصد خسارت وسیله‌نقلیه در کامیون ۲ محور برابر با ٤۲/۳٤ درصد است. تحریف پروفیل ۸/۱۹ درصد برای فاز اول و ۲٤/۲۰ درصد برای فاز دوم
اوجا و همکاران (Ojha, 2018)	۲۰۱۸	بارگذاری بیش از حد و عمر سرویس روسازی – مطالعه موردی نپال	ESAL تجمعی ۲۵/۳۲ میلیون محاسبه شد اما برای استاندارد ۱۱/۲۹ میلیون وجود دارد. بار ترافیکی ۱۰ساله راه ۲۰/۳٤ میلیون ESAL درحالیکه این تعداد در حالت اضافه‌بار برای ۱۰/٤ سال به‌دست می‌آید و به معنای کاهش عمر روسازی تا ۹/۵۹ درصد است.
آریفین و همکاران (Arifin, Prabowo, & Wicaksono, 2024)	۲۰۲٤	مدل‌سازی پیش‌بینی خسارت جاده در اثر اضافه‌بار با استفاده از روش HDM-4	اضافه‌بار بر افزایش مقدار IRI تأثیر می‌گذارد. این مقدار توسط وسایل‌نقلیه با بار استاندارد به مدت ۲۰ سال از ۳۷/۲ به ٤۲/۱۰ افزایش اما با وسایل نقلیه اضافه‌بار به ۸۸/۱٦ افزایش می‌یابد.
رحیم اف و همکاران (رحیم‌اف و همکاران، ۱٤۰۱)	۱۳۹۹	تأثیر سامانه توزین در حال حرکت بر ارتقای عملکرد برخورد با تخلفات ترافیکی	عمده وسایل‌نقلیه سنگین عبوری از نوع ۵ محور هستند و ۳۱/۵۵ درصد عمده تخلفات، ناشی از این نوع است.
ایوبی‌نژاد و همکاران (ایوبی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸)	۱٤۰۰	تأثیر تردد ناوگان باری دارای اضافه تناژ بر کاهش طول عمر روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از اطلاعات WIM	در محور اول بیش از ۵ درصد آن‌ها دارای اضافه‌تناژ هستند و در محور دوم حدود ۸ درصد آن‌ها دارای اضافه‌تناژ هستند.
رایس و همکاران (Rys & Jaskula, 2018)	۲۰۱۹	تأثیر وسایل نقلیه اضافه‌بار بر هزینه کل عمر روسازی‌های انعطاف‌پذیر	میانگین درصد وسایل‌نقلیه اضافه تناژ از ۵ درصد برای جاده‌هایی با سطح کنترل بالا تا ۲۳ درصد برای جاده‌هایی با سطح کنترل پایین متغیر است.
پایس و همکاران (Pais et al., 2019)	۲۰۱۹	هزینه روسازی به دلیل اضافه‌بار	وسایل‌نقلیه اضافه‌بار باعث افزایش خسارت روسازی و هزینه‌های چرخه عمر در حدود ۳۰ درصد در مقایسه با هزینه خودروهای مشابه با بار قانونی می‌شود.
بوسو و همکاران (Mariana Bosso, Vasconcelos, Ho, & Bernucci, 2020)	۲۰۲۰	مدل‌سازی کامیون‌های دارای اضافه‌بار با استفاده از داده‌های WIM	۹/۲۸ درصد از کامیون‌ها بیش از حد بارگیری شده‌اند و محورهای تریدم و تاندم بالاترین اضافه‌بار را ارائه کردند.
جاکوب و همکاران (O. O. Jacob, Chukwudi, Thaddeus, & Agwu, 2020)	۲۰۲۰	تجزیه‌وتحلیل اثرات مخرب اضافه‌بار کامیون‌های بارگذاری شده بر روی سازه‌های روسازی بزرگراه فدرال در نیجریه	میزان تخلف وسایل‌نقلیه اضافه‌بار بین ۲۰ تا ۹٤ درصد بود. با مقایسه VDF وسیله‌نقلیه دارای اضافه‌بار و استاندارد محدوده بین ۲/۱ تا ۳٤/٤۱ برابر یافت شد.

مشاهده وسایل نقلیه باربر در جاده‌ها نشان می‌دهد در شرایطی که بار آن‌ها از نظر جرم حجمی نظیر سنگ و یا رول‌های ورق فولادی بالا باشند، به علت حجم کم، بجای اینکه بار در وسط خودرو قرار گرفته و توزیع بار یکنواختی بین محورها اتفاق بیفتد، عمدتا با توجه وضعیت لاستیک و یا سیستم ترمز مجموعه چرخهای خودرو، بار معمولا رو و یا نزدیک مجموعه چرخهای محور جلو و یا عقب این وسایل نقلیه قرار می‌گیرد. این امر باعث می‌شود حتی اگر خودرو با بار مجاز باشد، توزیع

بار روی محورها م ساوی نبوده و اختلاف زیادی با بار محوری مجاز داشته باشد. با توجه به اینکه محاسبه ضرایب بار هم‌ارز و خرابی رو سازی‌ها با توان چهارم وزن ارتباط دارد، ممکن ا ست این اختلاف توزیع بار در کل منجر به بارگذاری محور مبنای طرح بیش از حد مقدار فرض شده در طراحی شود. درصورت اختلاف زیاد، این فرضیه می‌تواند یکی از دلایل زودرس خرابی روسازی‌ها باشد که نیاز به پژوهش دارد. بررسی پژوهش‌ها نشان می‌دهد در این خصوص مطالعه خاصی صورت نگرفته یا اگر هم انجام شده ا ست در د سترس نی ست. بنابراین باتوجه‌به مباحث مطرح‌شده، هدف اصلی این پژوهش بهره‌گیری از داده‌های سی ستم توزین در حال حرکت (WIM) برای تحلیل دقیق بارگذاری و سایل نقلیه سنگین با تمرکز بر توزیع بار روی م حورهای آن‌ها و محاسبه ضرایب بار هم‌ارز (ESAL) در مطالعه موردی محور رودهن-تهران است. این مطالعه با استفاده از روش آشتو و داده‌های واقعی ترافیک، امکان ارزیابی فرضیه تأثیر توزیع نامناسب بارگذاری محوری را بر دوام رو سازی‌ها فراهم می‌آورد و ت صویری رو شن از نقش اضافه‌بار و توزیع نامناسب بار بین محورهای و سایل نقلیه باربر را در کاهش عمر مفید روسازی ارائه می‌کند. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند راهنمایی عملی برای طراحی روسازی مقاوم‌تر، بهینه‌سازی برنامه‌های نگهداری زیرساخت‌های جاده‌ها و سیستم کنترل بار در جاده‌های ایران باشد.

۳- روش‌ها

مطالعه حاضر به تحلیل ترافیک و بارگذاری محور آسفالتی مسیر رفت رودهن–تهران بر اساس داده‌های ثبت‌شده توسط سیستم توزین در حال حرکت (WIM) می‌پردازد. داده فوق فوق برای مدت ۸ ماه و در یک جهت دریافت شد. تلاش مضاعفی برای دریافت داده‌ها برای یک سال و در دو جهت انجام شد که نتیجه نداد. با این وجود داده‌های ۸ ماهه به صورت تناسب مستقیم برای یکسال توسعه داده شد. شکل ۱ مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد. رودهن که در فاصله ۳۰ کیلومتری شرق تهران واقع شده، دارای اقلیم سرد و کوهستانی است و تحت تأثیر بارگذاری سنگین وسایل نقلیه و شرایط محیطی، خرابی زودرس روسازی در آن مشاهده می‌شود. مسیر مورد مطالعه دارای شاخص کیفیت روسازی (PCI) برابر با ۵۳ است و ساختار روسازی آن شامل لایه رویه آسفالتی (توپکا) به ضخامت ۵ سانتی‌متر، لایه بیندر به ضخامت ۷ سانتی‌متر، لایه اساس به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر و دو لایه زیراساس هر کدام به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد.
این ترکیب لایه‌ها، همراه با شدت ترافیک سنگین و شرایط جوی خاص منطقه، اهمیت تحلیل دقیق بارگذاری محوری و ارزیابی عملکرد روسازی را بیش‌ازپیش برجسته می‌کند و امکان ارائه راهکارهای بهینه برای افزایش دوام و کاهش خرابی‌های زودرس روسازی را فراهم می‌سازد.



شکل ۱. مسیر رودهن - تهران

داده‌های مورد ا ستفاده در این پژوهش شامل وزن محور، تعداد محور، نوع محور و کلاس و سایل نقلیه بوده و از منابع ر سمی اداره راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای جمع‌آوری شده است. نمونه‌ای از این داده‌ها در جدول ۲ ارائه شده که با استفاده از آن تحلیل بارگذاری محوری و بررسی عملکرد روسازی فراهم شده است.

جدول ۲. نمونه‌ای از دیتاهای خام سازمان راهداری کل

CAR CLASS	LENGTH AXLES 12	LENGTH AXLES 23	LENGTH AXLES 34	LENGTH AXLES 45	LENGTH AXLES 56	LENGTH AXLES 67	LENGTH AXLES 78	LENGTH AXLES 89	TOTAL WEIGHT	AXLES WEIGHT 1	AXLES WEIGHT 2	AXLES WEIGHT 3	AXLES WEIGHT 4	AXLES WEIGHT 5	AXLES WEIGHT 6	AXLES WEIGHT 7	AXLES WEIGHT 8	AXLES WEIGHT 9
1	225	0	0	0	0	0	0	0	1056	555	501	0	0	0	0	0	0	0
1	229	0	0	0	0	0	0	0	1215	705	510	0	0	0	0	0	0	0
1	229	0	0	0	0	0	0	0	1222	675	547	0	0	0	0	0	0	0
1	227	0	0	0	0	0	0	0	1058	645	413	0	0	0	0	0	0	0
3	327	0	0	0	0	0	0	0	5147	1882	3265	0	0	0	0	0	0	0
1	246	0	0	0	0	0	0	0	1501	717	784	0	0	0	0	0	0	0
7	428	137	0	0	0	0	0	0	10393	3921	3552	2920	0	0	0	0	0	0
1	249	0	0	0	0	0	0	0	1275	637	638	0	0	0	0	0	0	0
1	228	0	0	0	0	0	0	0	1197	680	517	0	0	0	0	0	0	0
12	334	375	125	120	0	0	0	0	41170	7448	11992	7499	7183	7048	0	0	0	0
1	223	0	0	0	0	0	0	0	1253	630	623	0	0	0	0	0	0	0
3	312	0	0	0	0	0	0	0	6100	2155	3945	0	0	0	0	0	0	0
1	258	0	0	0	0	0	0	0	1149	634	515	0	0	0	0	0	0	0
1	241	0	0	0	0	0	0	0	1028	496	532	0	0	0	0	0	0	0
1	249	0	0	0	0	0	0	0	1423	751	672	0	0	0	0	0	0	0
1	231	0	0	0	0	0	0	0	1125	635	490	0	0	0	0	0	0	0
13	307	137	368	152	0	0	0	0	44488	5758	9097	9428	9495	10710	0	0	0	0
1	232	0	0	0	0	0	0	0	1197	676	521	0	0	0	0	0	0	0
3	333	0	0	0	0	0	0	0	5597	1810	3787	0	0	0	0	0	0	0
10	323	534	121	0	0	0	0	0	37989	6464	12582	7150	11793	0	0	0	0	0
1	372	0	0	0	0	0	0	0	1445	754	691	0	0	0	0	0	0	0
1	239	0	0	0	0	0	0	0	1439	802	637	0	0	0	0	0	0	0
1	232	0	0	0	0	0	0	0	793	455	338	0	0	0	0	0	0	0
12	353	464	133	123	0	0	0	0	42777	6725	13338	7513	7523	7678	0	0	0	0
1	254	0	0	0	0	0	0	0	1073	598	475	0	0	0	0	0	0	0
13	337	136	916	128	0	0	0	0	26685	5846	4912	5081	4305	6541	0	0	0	0
1	266	0	0	0	0	0	0	0	1691	983	708	0	0	0	0	0	0	0

۳-۱- کلاس‌بندی وسایل‌نقلیه

در این مطالعه، وسایل نقلیه بر اساس وزن کل و تعداد محور با استفاده از دستورالعمل نشریه ۲۳٤ و داده‌های سیستم WIM به کلاس‌های مختلف دسته‌بندی شدند. این طبقه‌بندی به‌منظور ارائه یک چارچوب استاندارد و هم‌گرا برای تحلیل بارگذاری محوری و محاسبه اثرات آن بر روسازی انجام شد. جدول ۳، خلاصه‌ای از کلاس‌های نهایی وسایل نقلیه را ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه گروه‌بندی‌ها بر اساس ویژگی‌های کلیدی وسایل نقلیه انجام شده است. به‌کارگیری این روش، امکان تحلیل دقیق‌تر و واقعی‌تر بارگذاری‌های محوری را فراهم می‌کند و در عین حال، جداول جزئی اولیه که شامل داده‌های پراکنده و غیرضروری بودند، حذف شده‌اند تا حجم متن کاهش یابد و تمرکز پژوهش بر تحلیل‌های اصلی حفظ شود. این رویکرد، علاوه بر ساده‌سازی ارائه داده‌ها، به فهم بهتر اثرات واقعی بارگذاری وسایل نقلیه بر عملکرد روسازی کمک می‌کند و پایه‌ای محکم برای محاسبه ضرایب بار هم‌ارز فراهم می‌آورد.

جدول ۳. کلاس‌بندی و مشخصات محورهای درنظر گرفته شده در این پژوهش

کد کلاس	عنوان	آرایش چرخ‌ها	تعداد محور	تعداد چرخ	وزن مجاز	محور ۱	محور ۲	محور ۳	محور ٤	محور ٥	محور ٦	گروه محور ۱	گروه محور ۲	گروه محور ۳
۱	سواری		۲	۲	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	وانت		۲	۲	۳۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	کامیون ۲ محور سبک		۲	٦	۸۰۰۰	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
٤	کامیون ۲ محور سنگین		۲	٦	۱۹۰۰۰	٦۰۰۰	۱۳۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
٥	اتوبوس ۲ محور		۲	٦	۱۹۰۰۰	٦۰۰۰	۱۳۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

٦	اتوبوس ۳ محور		۳	٦	۲٦۰۰۰	٦۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰
۷	کامیون ۳ محور		۳	۱۰	۲٦۰۰۰	٦۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰
۹	تریلر ۳ محور		۳	٦	۲٦۰۰۰	٦۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰
۱۰	تریلر ٤ محور ۱۰ چرخ		٤	۱۰	۳۹۰۰۰	٦۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰
۱۱	تریلر ٤ محور ۱٤ چرخ		٤	۱٤	۳۹۰۰۰	٦۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۳۰۰۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰۰	۰
۱۲	تریلر ۵ محور ۱۲ چرخ		۵	۱۲	٤۳۰۰۰	٦۰۰۰	۱۳۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۰	۰	۱٦۰۰۰	۲٤۰۰۰
۱۳	تریلر ۵ محور ۱۸ چرخ		۵	۱۸	٤۰۰۰۰	٦۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۹۰۰۰	۹۰۰۰	۰	۱٦۰۰۰	۱۸۰۰۰
۱٤	تریلر ٦ محور		٦	۱٦	۵۰۰۰۰	٦۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۱٦۰۰۰	۲٤۰۰۰

۲-۲- محاسبه ضرایب بار هم‌ارز(ESAL)

یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تعیین ضرایب بار هم‌ارز، روش آشتو است. آزمایش بزرگ آشتو (۱۹۵۸–۱۹٦۰) در ایالت ایلی‌نوی آمریکا با صرف هزینه بیش از ۲۷ میلیون دلار اجرا شد و نتایج ارزشمندی از جمله تعیین ضرایب بار هم‌ارز و ارائه روش طراحی روسازی‌ها به دست آمد. در این آزمایش شش قطعه راه با روسازی آسفالتی و بتنی و پل‌های کوچک و بزرگ ساخته و تحت بارگذاری چندین میلیون وسیله‌نقلیه با انواع محور، انواع آرایش چرخ و وزن‌های مختلف قرار گرفتند. محورهای منفرد از ۰/۹ تا ۱۳/٦ تن و محورهای مرکب از ۱۰/۹ تا ۲۱/۸ تن مورد استفاده قرار گرفت. روسازی‌های آسفالتی شامل ٤۵۰ قطعه با ضخامت‌ها و طرح‌های مختلف بودند که بر روی بستری با حداقل مقاومت (CBR=3) ساخته شدند. به هر قطعه راه براساس میزان ناهمواری، شیارشدگی، ترک‌ها و وصله‌ها نمره‌ای بین صفر (غیرقابل استفاده) تا پنج (کیفیت عالی) داده شد که به عنوان شاخص خدمت‌دهی تعریف گردید. شاخص خدمت اولیه Pi و شاخص خدمت نهایی Pt در آزمایش آشتو به‌ترتیب ٤/۲ و ۱/۵ در نظر گرفته شد. برای راه‌های اصلی مقدار Pt=2.5 و برای راه‌های فرعی Pt=1.5 پیشنهاد گردید. رابطه عمومی آشتو برای محاسبه ضرایب بار هم‌ارز به‌صورت زیر است (معادله ۱).

$$G_t = \beta(\log W_t - \log \rho) \qquad (۱)$$

Gt: تابع لگاریتمی که نسبت خدمت‌دهی در زمان t به کاهش خدمت‌دهی تا نشان نهایی ۱/۵ می‌باشد.

B: تابعی که به متغیرهایی چون نوع محور، مقدار بار محور و عدد ضخامت روسازی بستگی دارد.

Wt: تعداد کل وسایل‌نقلیه استاندارد که در طول زمان t از راه استفاده می‌کنند.

ρ: تابعی که به متغیرهایی از قبیل نوع محور، مقدار بار محور و عدد ضخامت روسازی بستگی دارد.

در آزمایش آشتو محور استاندارد به‌صورت محور منفرد با وزن ۱۸۰۰۰ پوند (۸/۲ تن) در نظر گرفته شد. در این حالت معادله فوق به شکل ساده‌تری بیان می‌شود (معادله ۲).

$$\log W_{t_{18}} = 9.36\log(SN+1) - 0.20 + \frac{G_t}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} \quad (۲)$$

در این روابط:

SN: عدد ضخامت روسازی که تابعی از جنس و ضخامت لایه‌هاست.

باتوجه‌به تعریف ضریب بار هم‌ارز و مقایسه وسایل نقلیه با محور استاندارد، رابطه نهایی (۳) به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\log W_{t_x}/W_{t_{18}} = 4.79\log(18+1) - 4.79\log(L_x+L_2) + 4.33\log L_2 + G_t/\beta_x - G_t/\beta_{18} \quad (۳)$$

در این پژوهش ضرایب بار هم‌ارز مطابق با مقادیر نشریه ۲۳٤ (با فرض Pt=2.5 و SN=3) برای محورهای منفرد، تاندم و تریدم در جداول ٤، ٥ و ٦ مورد استفاده قرار گرفت. در صورتی که ضریب برای باری خاص در جداول موجود نبود، مقدار آن با استفاده از فرمول محاسبه شد.

جدول ٤. کلاس‌بندی و مشخصات محورهای درنظر گرفته شده در این پژوهش ضریب بار هم‌ارزی برای محور منفرد و Pt=۲/۵

بار محوری (تن)	عدد ضخامت روسازی (SN)					
	۱	۲	۳	٤	٥	٦
۱	۰/۰۰۰۶۶	۰/۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۳۸	۰/۰۰۰۳۸
۲	۰/۰۰۴۶۴	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۵۰۵	۰/۰۰۳۶۴	۰/۰۰۳۴۳
۳	۰/۰۱۷۴	۰/۰۲۶۲	۰/۰۲۷۴	۰/۰۲۱۶	۰/۰۱۷۳۸	۰/۰۱۵۷
۴	۰/۰۵	۰/۰۶۹۵	۰/۰۷۸۴	۰/۰۶۶	۰/۰۵۶۱	۰/۰۵۱۰۹
۵	۰/۱۲۳۹	۰/۱۵۰۹۶	۰/۱۷۴	۰/۱۵۸	۰/۱۳۹۵	۰/۱۲۸۹
۶	۰/۲۶۷۲	۰/۲۹۷۲	۰/۳۳۴۴	۰/۳۲۱۵	۰/۲۹۵	۰/۲۷۸۹
۷	۰/۵۱۶۷	۰/۵۴۰۹	۰/۵۷۶۲	۰/۵۷۲۳	۰/۵۴۸۷	۰/۵۳۱۴
۸	۰/۹۲۶۳	۰/۹۳۰۳	۰/۹۳۶۲	۰/۹۳۶۱	۰/۹۳۲۱	۰/۹۲۹۰
۹	۱/۵۶۲۷	۱/۵۲۵۸	۱/۴۵۲	۱/۴۳۳۵	۱/۴۷	۱/۵۰۷۳
۱۰	۲/۵۱	۲/۴۰۷	۲/۱۹۳	۲/۱۱	۲/۲۰۱	۲/۳۲۴
۱۱	۳/۸۹۹	۳/۶۸۱	۳/۲۴۵	۳/۰۲	۳/۱۶۵	۳/۴۲۴
۱۲	۵/۸۲	۵/۴۴۷۷	۴/۶۷	۴/۲۰۹	۴/۳۸۹	۴/۸۲۵
۱۳	۸/۴۲	۷/۸۱	۶/۵۶۵	۵/۷۳۸	۵/۹۲۵	۶/۵۸۵

جدول ۵. ضریب بار هم‌ارزی برای محور تاندم و Pt=۲/۵

بار محوری (تن)	عدد ضخامت روسازی (SN)					
	۱	۲	۳	٤	٥	٦
۱۰	۰/۱۶۱۷	۰/۱۹۹۸	۰/۲۳۱۱	۰/۲۰۹۱	۰/۱۸۲	۰/۱۶۷۹
۱۲	۰/۳۵۵۵	۰/۳۹۸۲۹	۰/۴۴۹۴	۰/۴۳۱۵	۰/۳۹۴۱	۰/۳۷۱۴۴
۱۴	۰/۶۹۸۸	۰/۷۳۲۸	۰/۷۸۳	۰/۷۷۸۵	۰/۷۴۴۵	۰/۷۲۰۴
۱۶	۱/۲۶۴	۱/۲۷۲	۱/۲۸۲۸	۱/۲۸۲۸	۱/۲۷۵۶	۱/۲۷۲
۱۸	۲/۱۳۸	۲/۰۹	۲/۰۰۲	۱/۹۷۵	۲/۰۲۱۱	۲/۰۷
۲۰	۳/۴۴۸	۳/۳۰۵۵	۳/۰۱	۲/۹۰۶	۳/۰۲	۳/۱۹۱۵
۲۲	۵/۳۸	۵/۰۴	۴/۴۴۸۹	۴/۱۴	۴/۳۴۵	۴/۶۹۱

جدول ٦. ضریب بار هم‌ارزی برای محور تریدم و Pt=۲/۵

بار محوری (تن)	عدد ضخامت روسازی (SN)					
	١	٢	٣	٤	٥	٦
٢٠	٠/٦٧٣٢	٠/٧٢١	٠/٧٨٧٨	٠/٧٧٦١	٠/٧٣٠٢	٠/٦٩٩٣
٢٢	١/٠٢٧٧	١/٠٦٢١	١/١١٤٨	١/١١٥١	١/٠٨٠٦	١/٠٥٤٧
٢٤	١/٥١٩٦	١/٥٢٥	١/٥٤١٢	١/٥٤١٢	١/٥٣٣٨	١/٥٢٥
٢٦	٢/١٧٦١	٢/١٤٢٨	٢/٠٧٩	٢/٠٧٢٩	٢/١٠٢	٢/١٣٦

۲-۳- تحلیل حالت‌های مختلف محتمل و تخمین بارگذاری در دوره طراحی

در این پژوهش تحلیل‌ها با استفاده از داده‌های WIM، کلاس بندی جدول ۳، محاسبه ضریب بار هم‌ارز واقعی براساس وزن واقعی محورها و محاسبه ضریب بار هم‌ارز براساس وزن مجاز محورها که در جدول ۳ آمده است انجام می‌شود. جمع‌بندی ضریب بار هم‌ارز محورها برای هر کلاس و کل بارگذاری در طول عمر طراحی با توجه به تعریف حالت‌های مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. بر این اساس چهار حالت محتمل برای تحلیل و بررسی تعریف شد که عبارتند از:

-درنظر گرفتن تمام وسایل‌نقلیه مطابق کلاس بندی جدول ۳، اعم از خودروهای بارگیری شده و نشده.

-تنها وسایل‌نقلیه تجاری باربر که وزن آن‌ها نشان می‌دهد بارگیری شده‌اند.

-وسایل نقلیه‌ای که وزن کل آن‌ها برابر یا بیشتر از وزن مجاز آیین‌نامه (جدول ۳) باشند.

-در این حالت به جای وسایل نقلیه، وزن محورهایی از وسایل نقلیه که وزن آن‌ها برابر یا بیشتر از وزن مجاز آیین‌نامه بود مورد بررسی قرار گرفتند تا اثر مستقیم بارگذاری محورهای سنگین بر روسازی بررسی شود.

در این مطالعه با فرض رشد ۵ درصدی برای وسایل نقلیه و دوره طراحی ۱۵ ساله برای هر حالت، ضرایب بارهم‌ارز برای هر چهار حالت و برای بارگذاری واقعی و بارگذاری مطابق وزن‌های مجاز آیین‌نامه، محاسبه و مقایسه شدند. مجموع ESAL برای هر کلاس وسیله‌نقلیه و یا محورهای آن‌ها از معادله (٤) محاسبه گردید.

$$ESAL_n = EAL\frac{(1+r)^n - 1}{r} \qquad (٤)$$

r: نرخ رشد سالانه ترافیک

n: دوره طرح برحسب سال

ESALn: تعداد کل محورهای هم‌ارز در n سال دورهٔ طرح

EAL: تعداد کل محور هم‌ارز در سال اول طرح

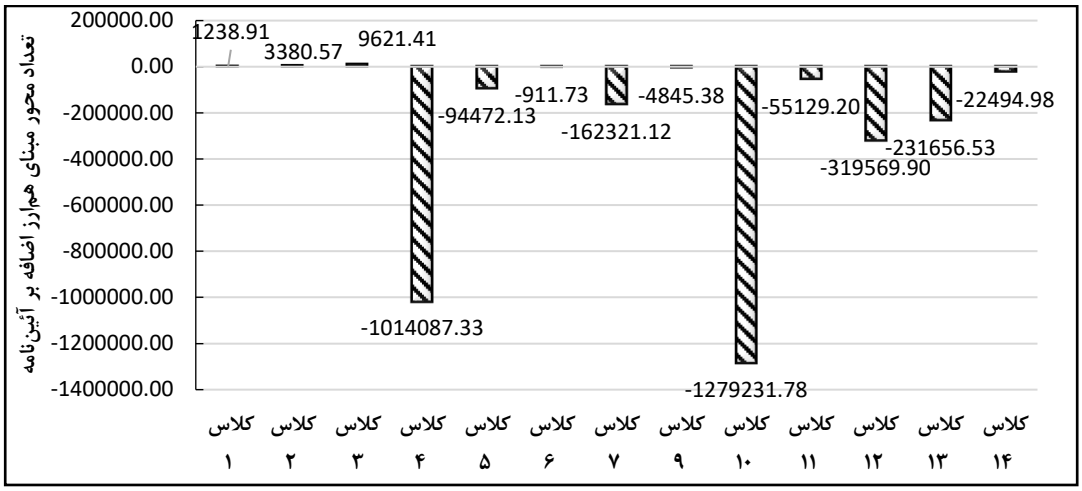
بدین منظور ضرایب‌بار هم‌ارز برای داده‌های واقعی wim را که شامل کلاس‌ها و محورهای مختلفی از وسایل نقلیه می‌باشند را محاسبه و برای همان کلاس‌ها و محورها و همان تعداد وسایل نقلیه عبوری، ضرایب بار هم‌ارز مطابق آیین‌نامه و بار محوری مجاز آن‌ها محاسبه و مقایسه می‌شوند. درصورتیکه فرض کنیم وسایل نقلیه عبوری مطابق فرضیات طراحی و برآورد آن باشد، اختلاف بین این دو محاسبه نشان دهنده بارگذاری واقعی و بارگذاری مفرض در طراحی می‌باشد که اختلاف زیاد ممکن است یکی از دلایل خرابی‌های زودرس در جاده‌ها باشد. همچنین در شرایط بارهای واقعی مجاز مطابق آیین‌نامه نحوه توزیع بار روی محورهای وسایل نقلیه تجاری به طور خاص بررسی شد.

٤- نتایج بررسی و تحلیل داده‌های WIM

در این بخش، باتوجه‌به حالت‌های تعریف شده برای پژوهش، داده‌های جمع آوری شده و فرضیات در نظر گرفته شده، خروجی‌های تحلیل هر حالت روی داده‌های WIM ارائه می‌شوند.

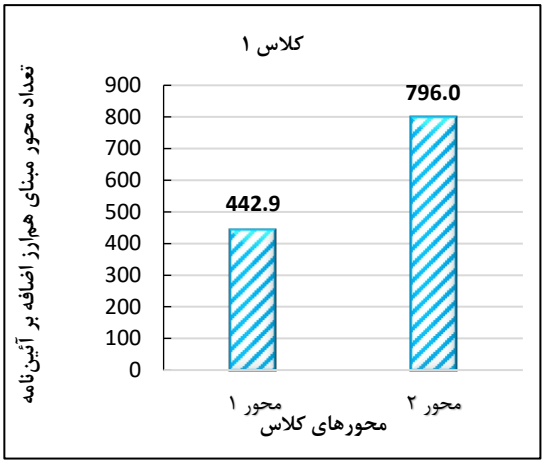
٤-١- نتایج بررسی و تحلیل داده‌های WIM در حالت ١

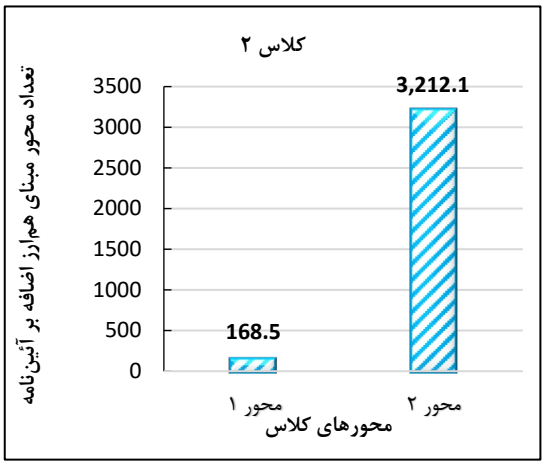
در این حالت، تمامی وسایل نقلیه که شامل ١٤ کلاس جدول ٣ هستند، اعم از بارگیری‌شده و بدون بار، لحاظ شده‌اند. شکل ٢ اختلاف بین تعداد محورهای مبنای هم‌ارز براساس بارگذاری واقعی و بارگذاری مطابق آیین‌نامه‌ای را برای هر کلاس در این حالت نشان می‌دهد.

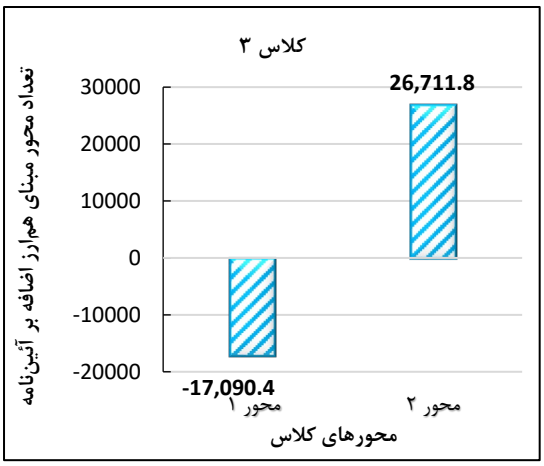


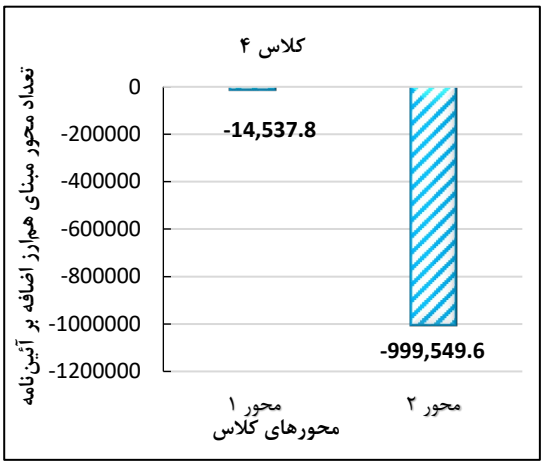
شکل ٢. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس در حالت ١

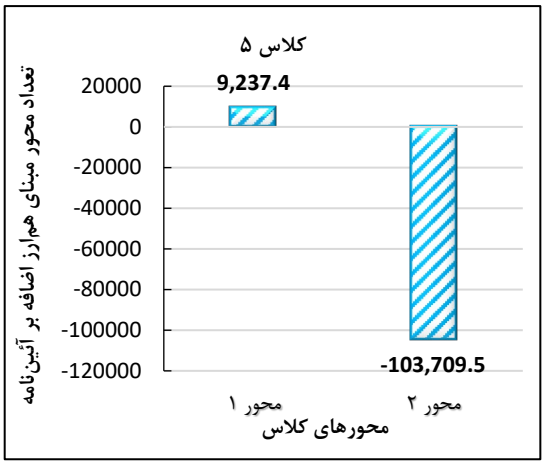
همان‌گونه که در شکل ٢ مشاهده می‌شود، اغلب کلاس‌ها دارای مقادیر منفی هستند و در کل، کل بارگذاری منفی است. این امر از آنجا ناشی می‌شود که در محاسبات براساس وزن‌های مجاز آیین‌نامه، محاسبات ضرایب بار هم‌ارز برای تمام محورها براساس حداکثر وزن مجاز آن‌ها یعنی برای وسایل نقلیه تجاری در حالت بارگیری‌شده تعیین می‌گردد؛ در حالی‌که در شرایط واقعی برخی از وسایل نقلیه تجاری خالی از بار بوده که به علت فراوانی تعداد وسایل نقلیه بدون بار، سر جمع تمام محورها در هر کلاس موجب اختلاف منفی بین بارگذاری آیین‌نامه‌ای و مقادیر واقعی شده است. در این میان، تنها کلاس‌های ١، ٢ و ٣ دارای مقادیر مثبت هستند که به‌ترتیب برابر با ١٢٣٩، ٣٣٨٠ و ٩٦٢١ می‌باشند؛ به‌گونه‌ای که کلاس ٣ با بیشترین مقدار، بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز مازاد بر آیین‌نامه را داشته و به‌عنوان بحرانی‌ترین کلاس شناخته می‌شود. در شکل ٣، تعداد محورهای مبنای هم‌ارزِ مازاد بر آیین‌نامه برای هر محور و در هر کلاس ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود وزن متفاوت روی محورهای مختلف هر کلاس در شرایط بارگذاری مطابق واقعیت و آیین‌نامه موجب نتایج خاصی شده که وضعیت بارگذاری روی هر محور را نشان داده و امکان تجزیه و تحلیل را فراهم می‌کند. در محورهای مفرد بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه مربوط به محور ١ از کلاس ١٢ و برابر با ٣٨٩٣٣ و کمترین آن را محور ٢ از کلاس ٤ که تقریباً برابر با ٩٩٩٥٤٩- می‌باشد تشکیل می‌دهند. در محورهای مرکب، محور تاندم ٢ و ٣ از کلاس ١٣ دارای بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه حدود ٢٠٨٣٦ و محور تاندم ٣ و ٤ از کلاس ١٠ کمترین آن را که حدود ٤١٥٨٧٣- است دارا می‌باشند. از طرف دیگر درمواردی هم که اضافه بار وجود دارد ناچیز است. بر این اساس محورهایی که بار آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته، به‌عنوان بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس، در جدول ٧ برای حالت ١ مشخص شده‌اند.

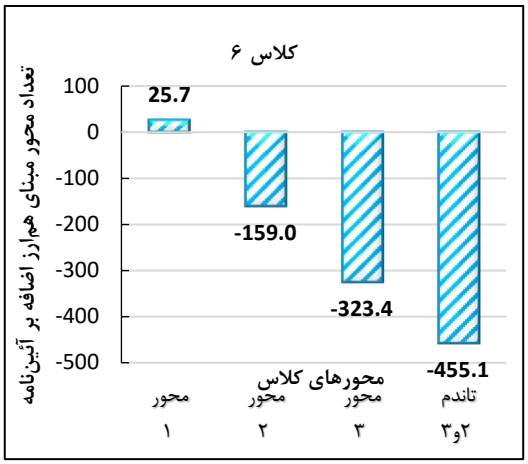

کلاس ۱
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
442.9
796.0
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

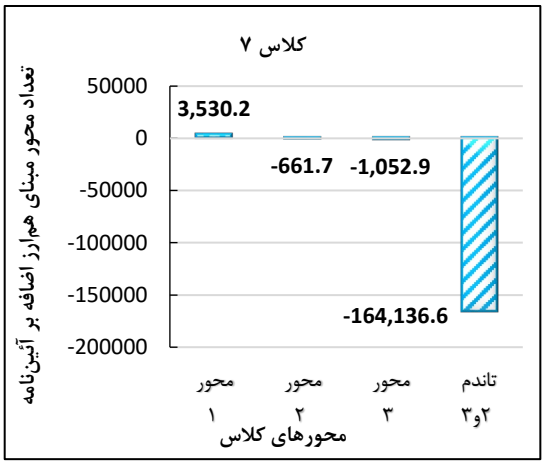

کلاس ۲
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
168.5
3,212.1
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

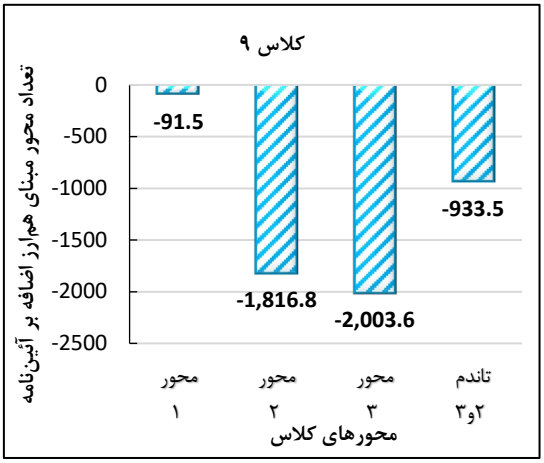

کلاس ۳
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
30000
20000
10000
0
-10000
-20000
-17,090.4
26,711.8
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

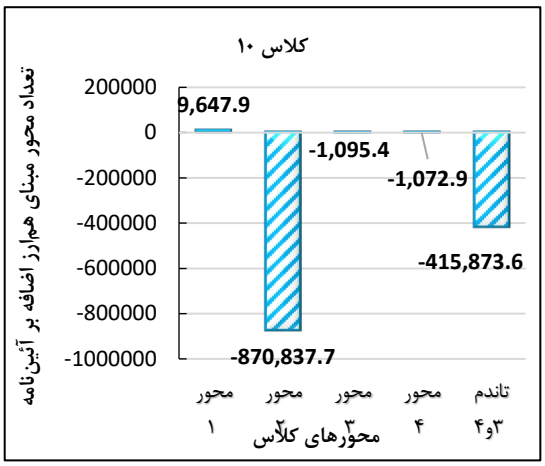

کلاس ۴
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
0
-200000
-400000
-600000
-800000
-1000000
-1200000
-14,537.8
-999,549.6
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

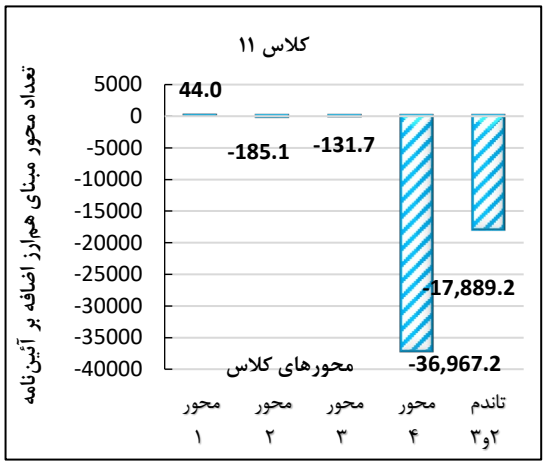

کلاس ۵
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
20000
0
-20000
-40000
-60000
-80000
-100000
-120000
9,237.4
-103,709.5
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

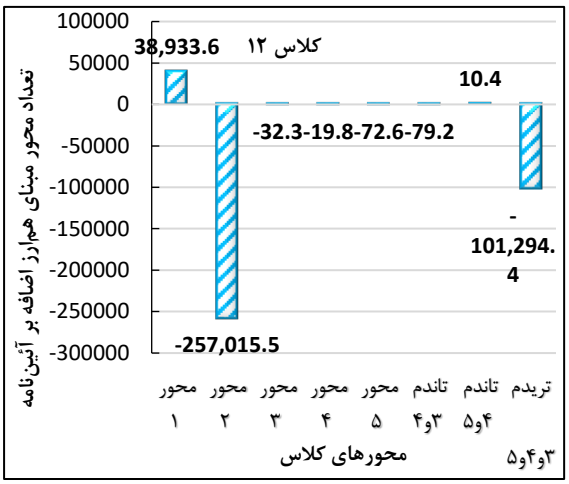

کلاس ۶
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
25.7
-159.0
-323.4
-455.1
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

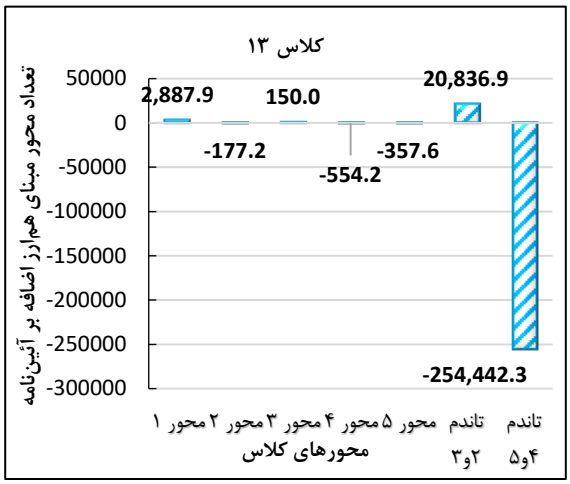

کلاس ۷
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
50000
0
-50000
-100000
-150000
-200000
3,530.2
-661.7
-1,052.9
-164,136.6
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۳و۲
محورهای کلاس

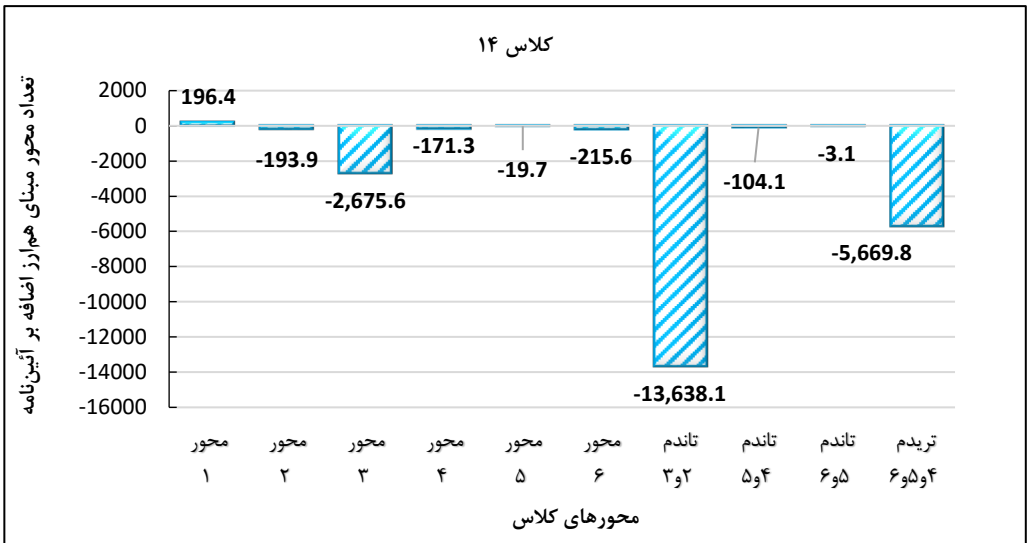

کلاس ۹
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-91.5
-1,816.8
-2,003.6
-933.5
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۳و۲
محورهای کلاس


کلاس ۱۰
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
200000
0
-200000
-400000
-600000
-800000
-1000000
9,647.9
-870,837.7
-1,095.4
-1,072.9
-415,873.6
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۴و۳
محورهای کلاس


کلاس ۱۱
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
5000
0
-5000
-10000
-15000
-20000
-25000
-30000
-35000
-40000
44.0
-185.1
-131.7
-17,889.2
-36,967.2
محورهای کلاس
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۳و۲


کلاس ۱۲
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
100000
50000
0
-50000
-100000
-150000
-200000
-250000
-300000
38,933.6
-257,015.5
-32.3-19.8-72.6-79.2
10.4
-101,294.4
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
محور ۵
تاندم ۴و۳
تاندم ۵و۴
تریدم ۵و۴و۳
محورهای کلاس


کلاس ۱۳
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
50000
0
-50000
-100000
-150000
-200000
-250000
-300000
2,887.9
-177.2
150.0
-554.2
-357.6
20,836.9
-254,442.3
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
محور ۵
تاندم ۳و۲
تاندم ۵و۴
محورهای کلاس



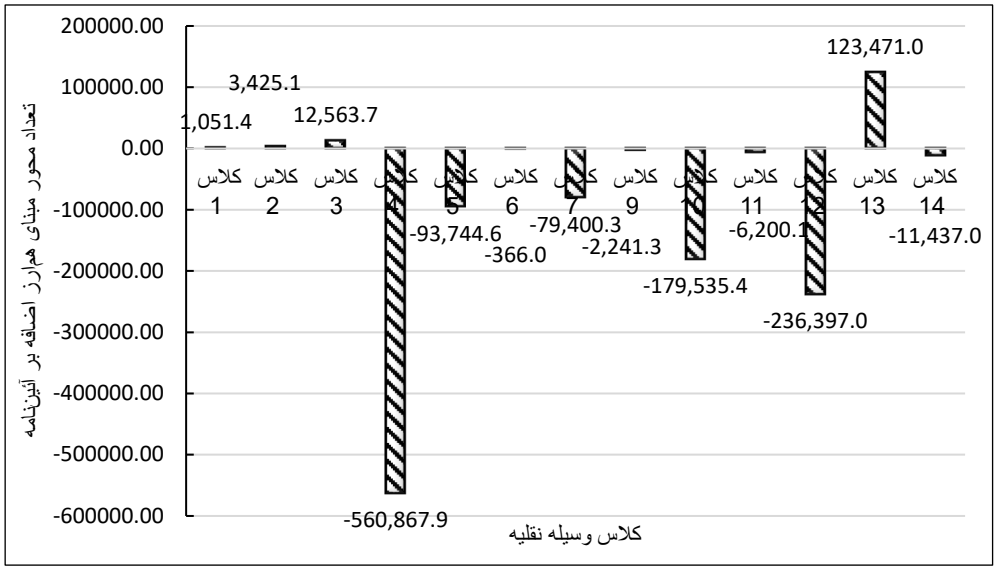
شکل ۳. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر بر آیین‌نامه برای هر محور از هر کلاس در حالت ۱

جدول ۷. بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس از حالت ۱

کلاس	بحرانی‌ترین محور	کلاس	بحرانی‌ترین محور
۱	محور ۲	۹	–
۲	محور ۲	۱۰	محور ۱
۳	محور ۲	۱۱	محور ۱
٤	–	۱۲	محور ۱
٥	محور ۱	۱۳	تاندم ۲ و ۳
٦	محور ۱	١٤	محور ۱
۷	محور ۱		

٤-۲- نتایج بررسی و تحلیل داده‌های WIM در حالت ۲

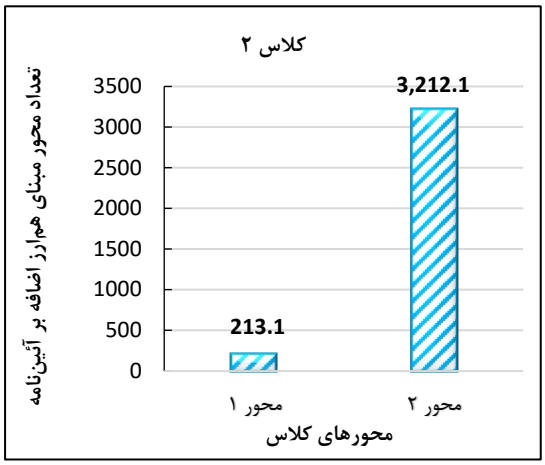
این حالت تنها شامل وسایل‌نقلیه تجاری بوده که از وزن کل آن‌ها مشخص می‌شود بارگیری شده‌اند. با توجه به وزن مجاز بار هر وسیله نقلیه تجاری، حداکثر وزن خالی هر یک قابل محاسبه بوده که با انجام فیلتر در فایل اکسل داده‌ها، بررسی و تحلیل صورت گرفت. شکل ٤ اختلاف بین تعداد محورهای مبنای هم‌ارز براساس بارگذاری واقعی و بارگذاری مطابق آیین‌نامه‌ای را برای هر کلاس و در این حالت نشان می‌دهد که تغییرات نسبت به حالت ۱ قابل توجه است. از شکل ٤ مشاهده می‌شود که در حالت ۲ نیز مانند حالت ۱، اکثر کلاس‌های وسایل نقلیه دارای مقادیر منفی هستند و در کل، کل بارگذاری منفی است؛ این مقادیر نشان می‌دهد مجموع ضرایب بار هم‌ارز محورهای وسایل نقلیه عبوری با بار، کمتر از مجموع ضرایب بار هم‌ارز محورهای وسایل نقلیه مطابق با وزن حداکثر مجاز آیین‌نامه است. در میان این کلاس‌ها، کلاس ۱۳ با بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه (ESAL۱۲۳،٤۷۱)، بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد روسازی نشان می‌دهد. پس از آن، کلاس‌های ۳، ۲ و ۱ به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

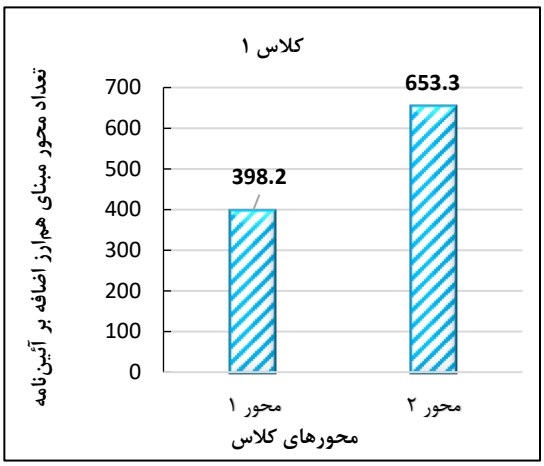


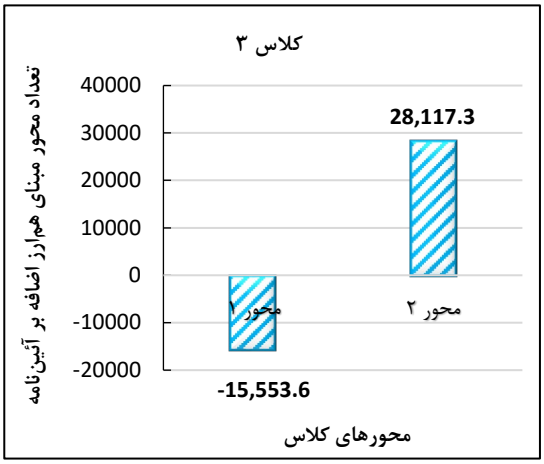
شکل ٤. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس در حالت ۲

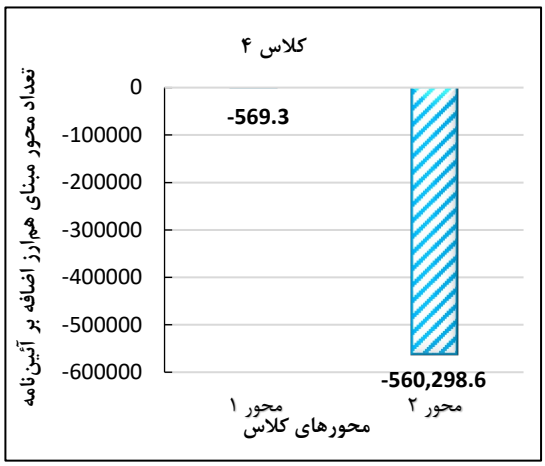
در شکل ۵، تعداد محورهای مبنای هم‌ارزِ مازاد بر آیین‌نامه برای هر محور و در هر کلاس ارائه شده است.

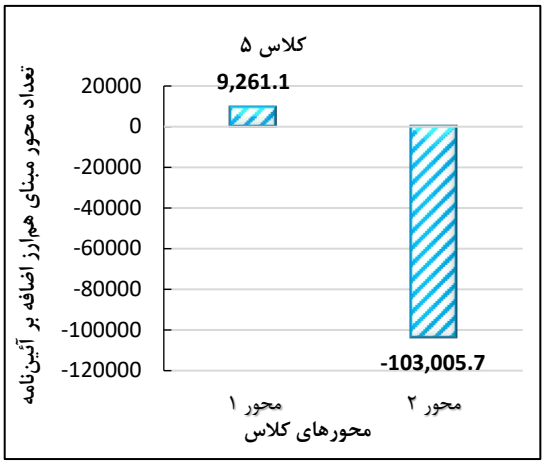
همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد که بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه مربوط به محور تاندم ۲ و ۳ از کلاس ۱۳ که برابر با ۱۲۹۲۰۸ است و کمترین آن را محور ۲ از کلاس ٤ و برابر با ٥٦٠٢٩٨,٦٤- تشکیل می‌دهد. همچنین در محورهای مفرد بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه، مختص محور ۱ از کلاس ۱۲ و برابر ۳۸۷۷۵ و کمترین آن در محورهای مرکب مربوط به محور تاندم ۲ و ۳ از کلاس ۷ و ۸٦۱۹۷- می‌باشد. بنابراین محورهایی که بار آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته، به‌عنوان بحرانی‌ترین محور در هر کلاس، در جدول ۸ ارایه شده‌اند.

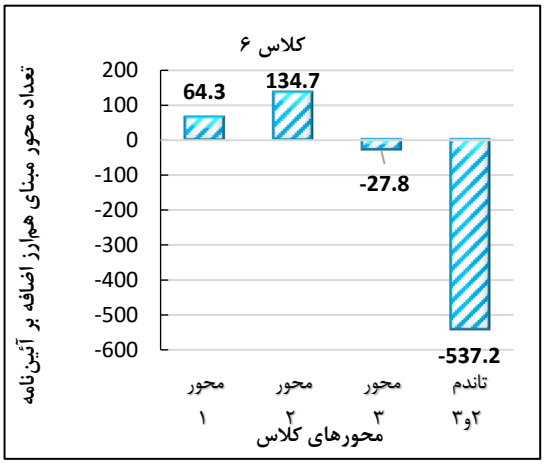


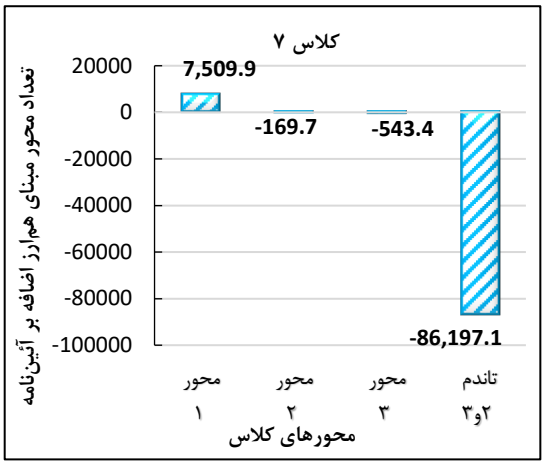


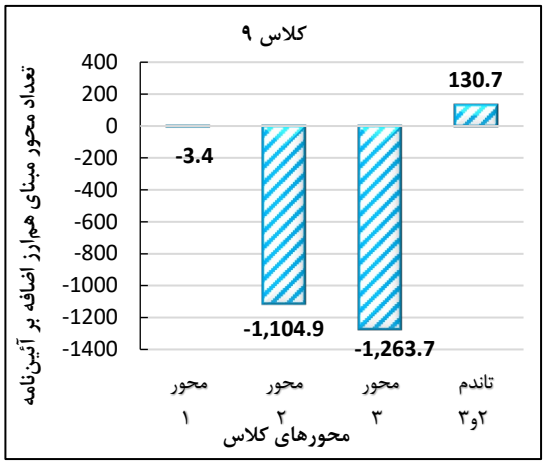

کلاس ۳
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
40000
30000
20000
10000
0
-10000
-20000
28,117.3
-15,553.6
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

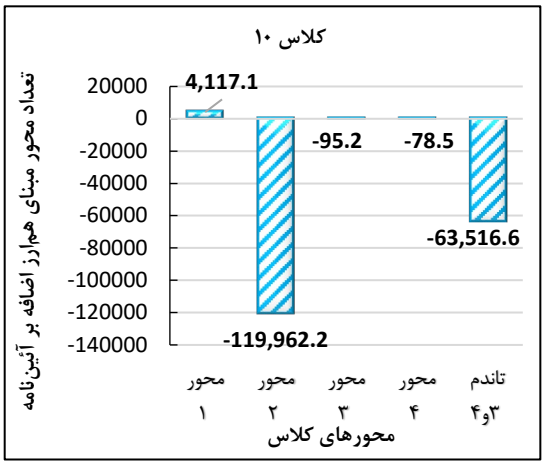

کلاس ۴
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
0
-100000
-200000
-300000
-400000
-500000
-600000
-569.3
-560,298.6
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

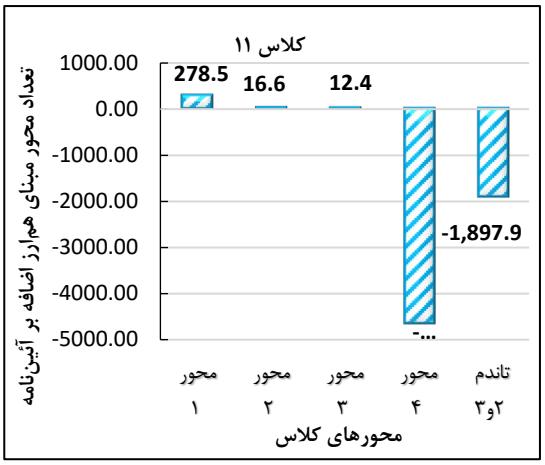

کلاس ۵
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
20000
0
-20000
-40000
-60000
-80000
-100000
-120000
9,261.1
-103,005.7
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

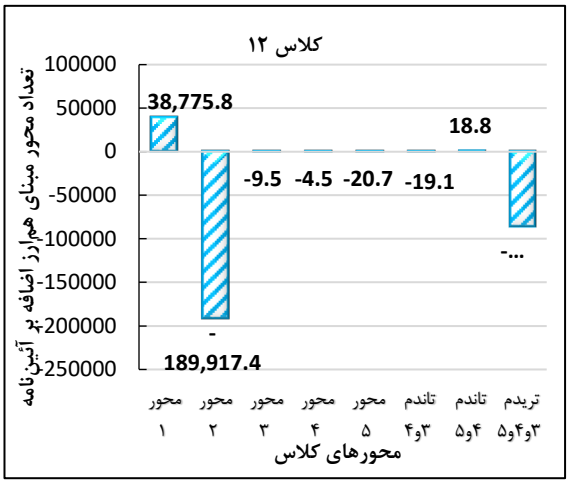

کلاس ۶
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
200
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
-600
64.3
134.7
-27.8
-537.2
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

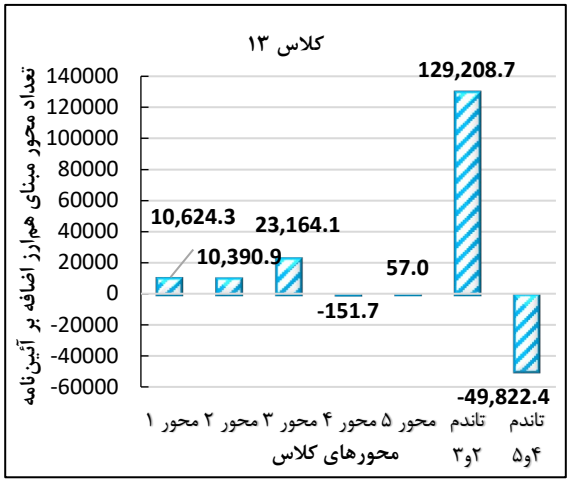

کلاس ۷
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
20000
0
-20000
-40000
-60000
-80000
-100000
7,509.9
-169.7
-543.4
-86,197.1
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

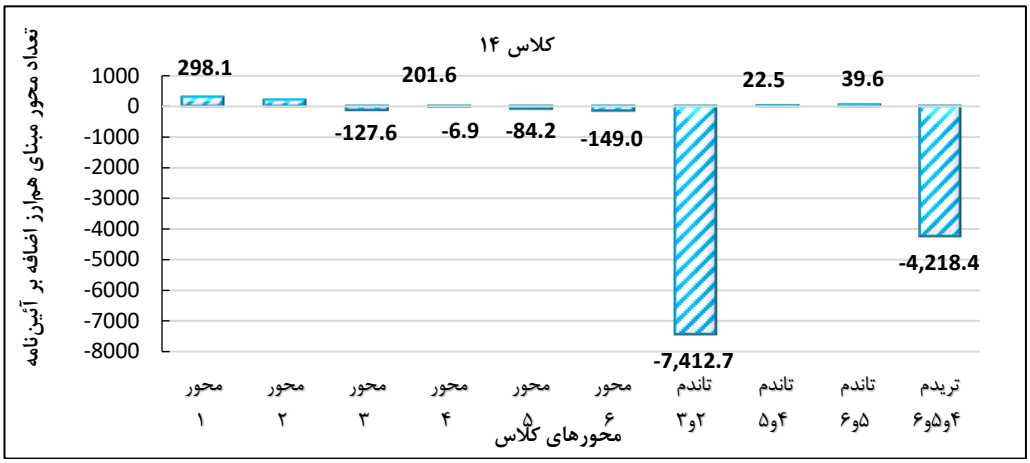

کلاس ۹
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
400
200
0
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
-1400
-3.4
-1,104.9
-1,263.7
130.7
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس











شکل ۵. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر بر آیین‌نامه برای هر محور از هر کلاس در حالت ۲

جدول ۸ بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس از حالت ۲

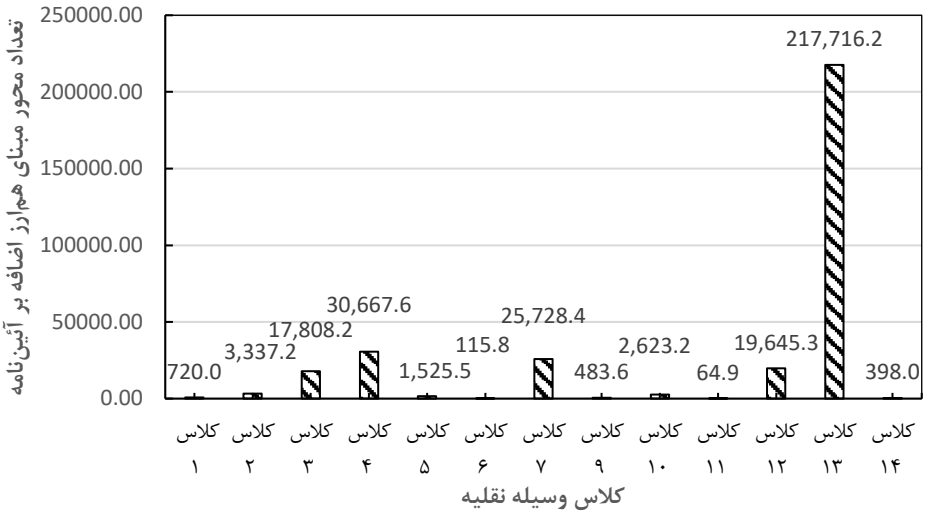
کلاس	بحرانی‌ترین محور	کلاس	بحرانی‌ترین محور
۱	محور ۲	۹	تاندم ۲ و ۳
۲	محور ۲	۱۰	محور ۱
۳	محور ۲	۱۱	محور ۱
٤	–	۱۲	محور ۱
٥	محور ۱	۱۳	تاندم ۲ و ۳
٦	محور ۲	۱٤	محور ۱
۷	محور ۱		

٤-۳- نتایج بررسی و تحلیل داده‌های WIM در حالت ۳

در حالت ۳ تنها وسایل نقلیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند که وزن کل آن‌ها برابر یا بیشتر از حد مجاز آیین‌نامه است.

شکل ٦ اختلاف بین تعداد محورهای مبنای هم‌ارز براساس بارگذاری واقعی و بارگذاری مطابق آیین‌نامه‌ای را برای هر کلاس در این حالت نشان می‌دهد.

در این حالت نیز نظیر حالت ۲، بیشترین اضافه‌بار مربوط به کلاس ۱۳ است که بیش از ۲۱۷ هزار محور هم‌ارز اضافه، نسبت به آیین‌نامه دارد. پس از آن کلاس‌های ٤، ۷، ۱۲ و ۳ بیشترین سهم را داشتند. اما تفاوت این حالت با دوحالت دیگر مشخصا در این است که برای همه کلاس‌ها مقادیر اختلاف‌ها برای هر کلاس مثبت شده است و در کل در این حالت، بارگذاری بیش از مقادیر مجاز آیین نامه صورت گرفته است و می‌توان روی آن جهت تاثیر مخرب بر عملکرد روسازی تمرکز کرد.

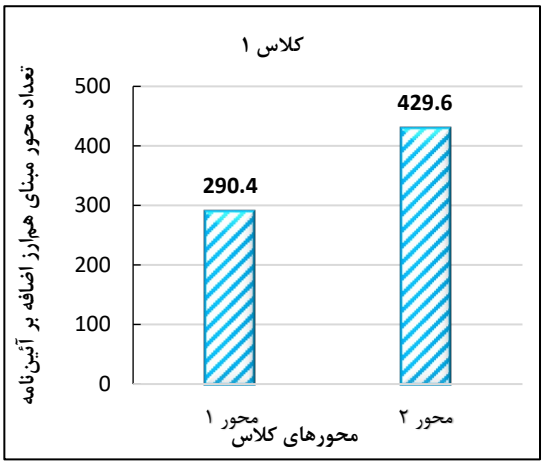


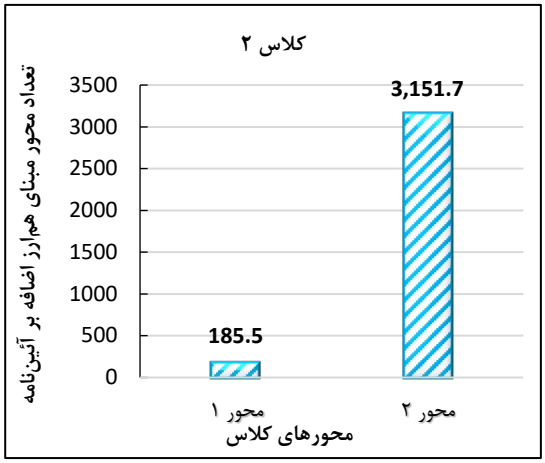
شکل ٦. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس در حالت ۳

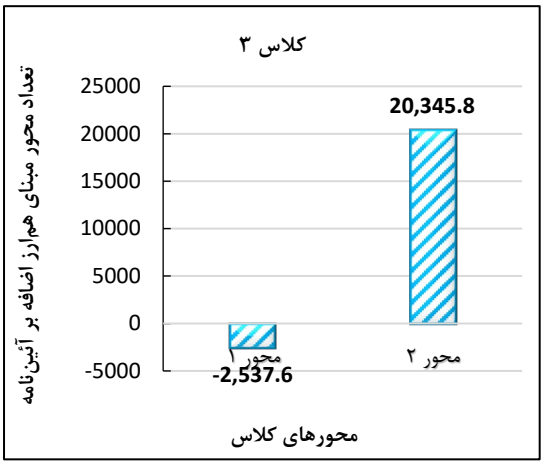
شکل ۷ نشان می‌دهد در این حالت برخلاف دو حالت قبل، اکثر محورها دارای اضافه بار نسبت به آیین نامه بوده و مقادیر آن‌ها مثبت هستند. همچنین شکل ۷ نشان داده که بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه مربوط به محور تاندم ۲ و ۳ از کلاس ۱۳ برابر با ۱۳۲۰۷۸ است و کمترین آن محور ۱ از کلاس ۳ برابر با ۲۵۳۷- است. در بین محورهای منفرد محور ۲ از کلاس ٤ با ۲۷٦۰٤ بیشترین اختلاف بارگذاری واقعی و آیین‌نامه را نشان

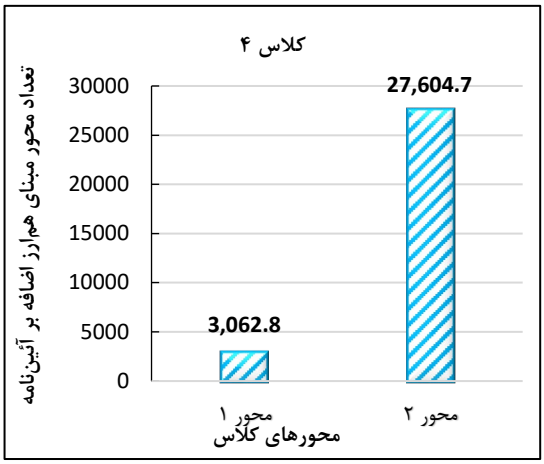
می‌دهد. پس آن محور منفرد از کلاس ۳ و ۱۲ به ترتیب بیشترین مقدار را در بین محورهای منفرد دارد.

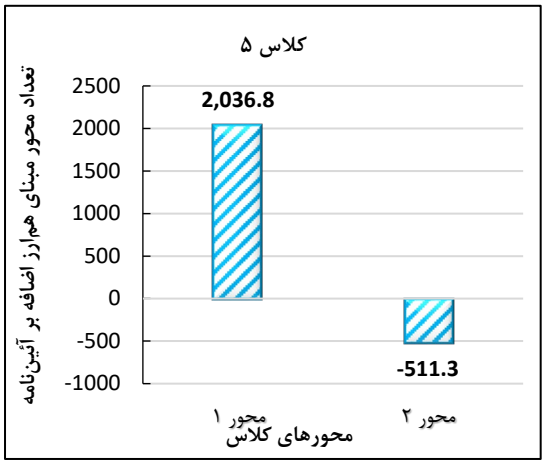
بر این اساس محورهایی که بار آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته، به‌عنوان بحرانی‌ترین موارد در هر کلاس، در جدول ۹ مشخص شده‌اند. تحلیل‌ها در این حالت نشان می‌دهد که بارگذاری واقعی نسبت به آیین‌نامه دارای افزایش ۵۶/۶ درصد است که در نهایت موجب خرابی زودرس روسازی می‌شود.

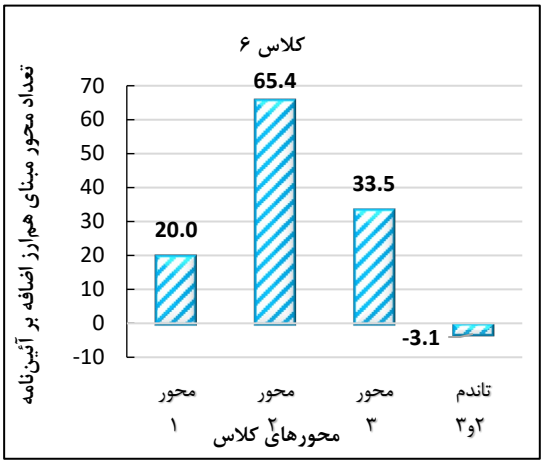


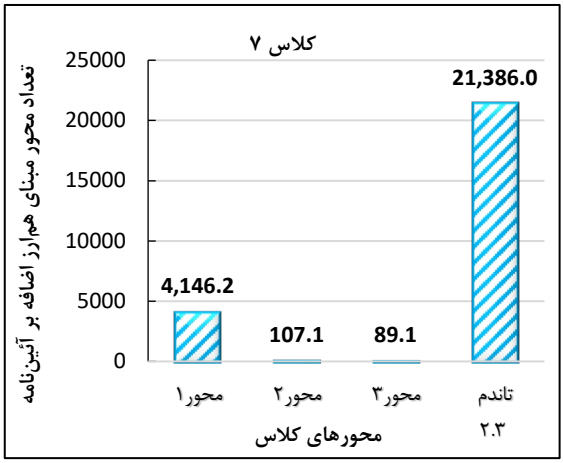


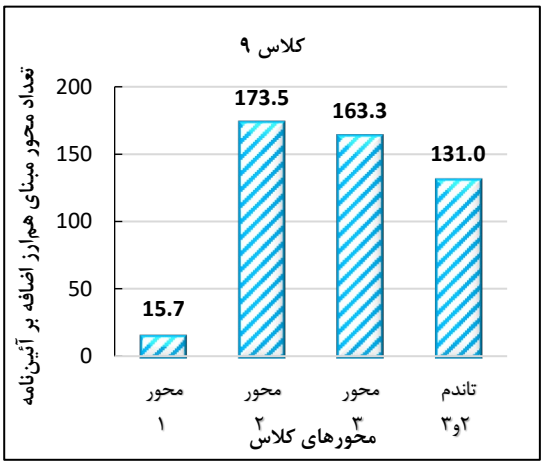


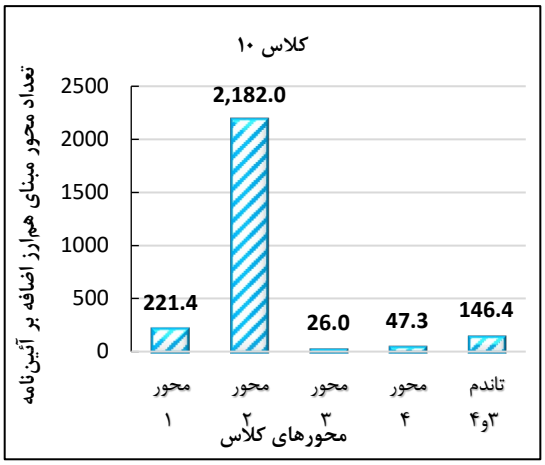


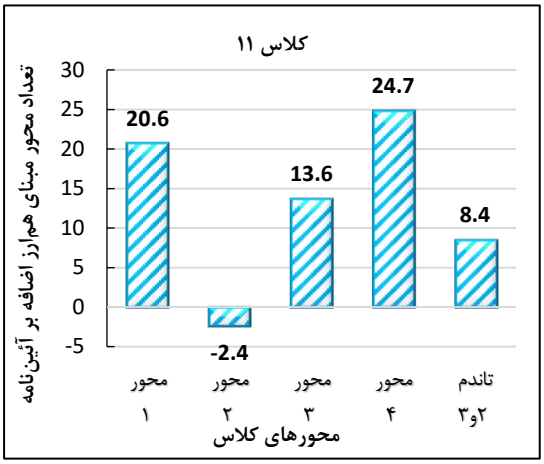

کلاس ۵
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
2500
2000
1500
1000
500
0
-500
-1000
2,036.8
-511.3
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

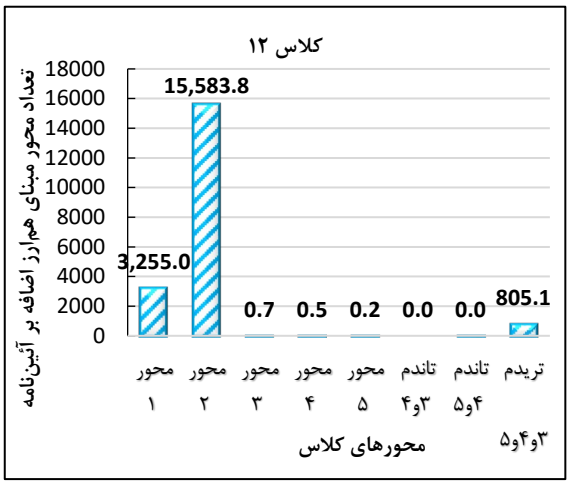

کلاس ۶
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
20.0
65.4
33.5
-3.1
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

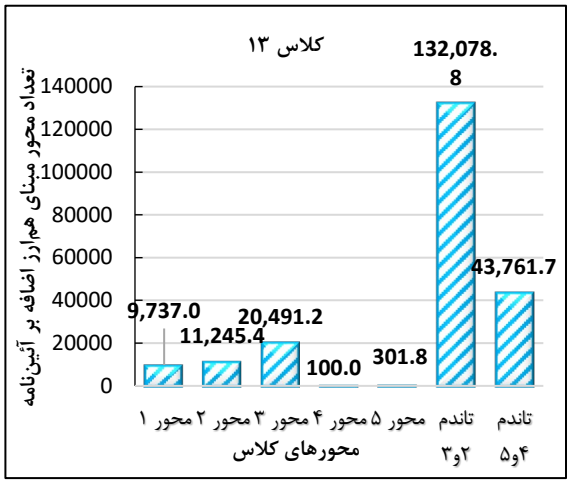

کلاس ۷
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
25000
20000
15000
10000
5000
0
4,146.2
107.1
89.1
21,386.0
محور۱
محور۲
محور۳
تاندم ۲.۳
محورهای کلاس

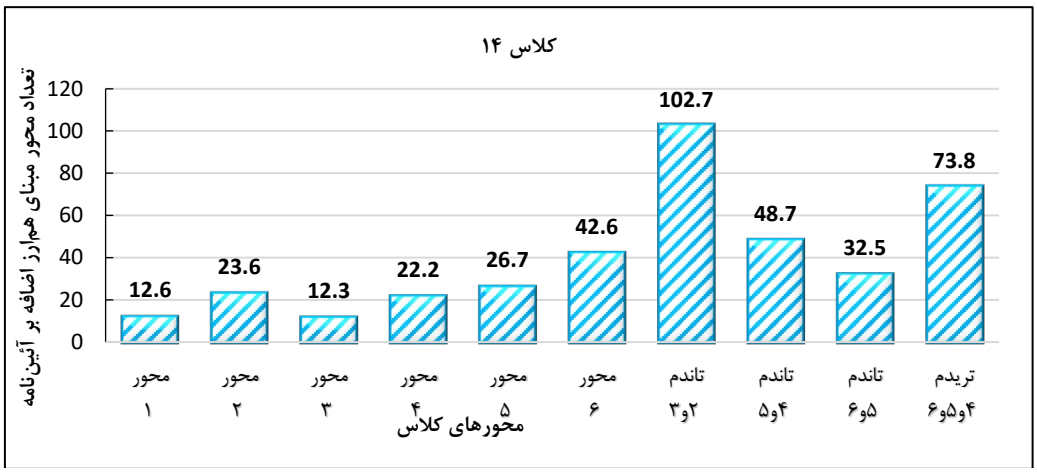

کلاس ۹
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
200
150
100
50
0
15.7
173.5
163.3
131.0
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس


کلاس ۱۰
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
2500
2000
1500
1000
500
0
221.4
2,182.0
26.0
47.3
146.4
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۳و۴
محورهای کلاس


کلاس ۱۱
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
30
25
20
15
10
5
0
-5
20.6
-2.4
13.6
24.7
8.4
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس







شکل ۷. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس در حالت ۳

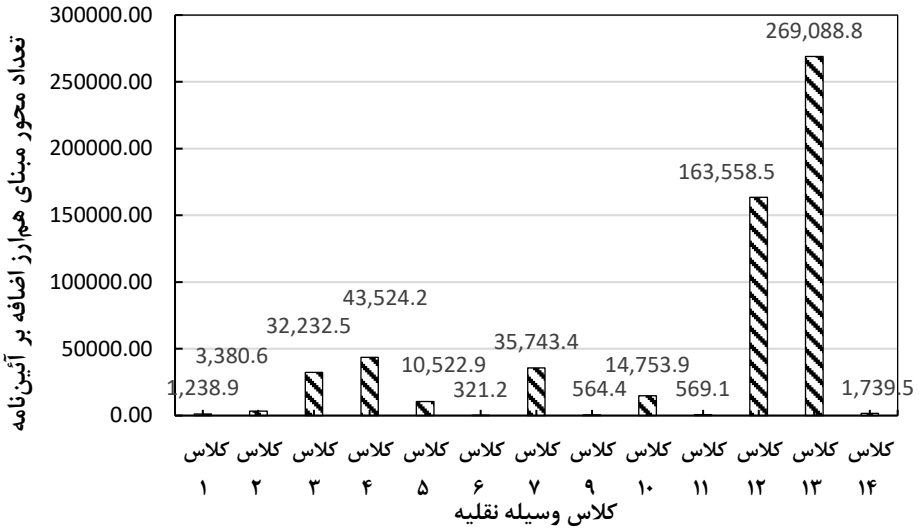
جدول ۹. بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس از حالت ۳

کلاس	بحرانی‌ترین محور	کلاس	بحرانی‌ترین محور
۱	محور ۲	۹	محور ۲
۲	محور ۲	۱۰	محور ۲
۳	محور ۲	۱۱	محور ٤
٤	محور ۲	۱۲	محور ۲
٥	محور ۱	۱۳	تاندم ۲ و ۳
٦	محور ۲	۱٤	تاندم ۲ و ۳
۷	تاندم ۲ و ۳		

٤-٤- نتایج بررسی و تحلیل داده‌های WIM در حالت ٤

در این حالت به جای وسایل نقلیه تمرکز بر هر محورها به‌صورت جداگانه بود و وزن محورهایی که برابر یا بیشتر از حد مجاز آیین‌نامه است در تحلیل وارد شدند. شکل ۸ اختلاف بین تعداد محورهای مبنای هم‌ارز براساس بارگذاری واقعی و

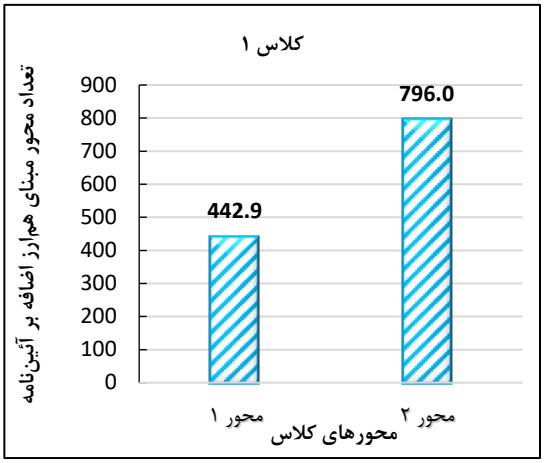
بارگذاری مطابق آیین‌نامه‌ای را برای هر کلاس در این حالت برای محورهایی که وزن آن‌ها برابر یا بیشتر از حد مجاز آیین‌نامه بود را ارایه می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که در این حالت کلاس ۱۳ با تعداد محور مبنای هم‌ارز برابر ۲۶۹۰۸۹ اضافه بر آیین‌نامه به عنوان بحرانی‌ترین کلاس شناخته می‌شود. همچنین کلاس ۱۲ با تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه برابر با ۱۶۳۵۵۸ در رده دوم قرار دارد. کلاس ٤، ۷، ۳ و ۱۰ به ترتیب بعد از آن‌ها قرار دارند.

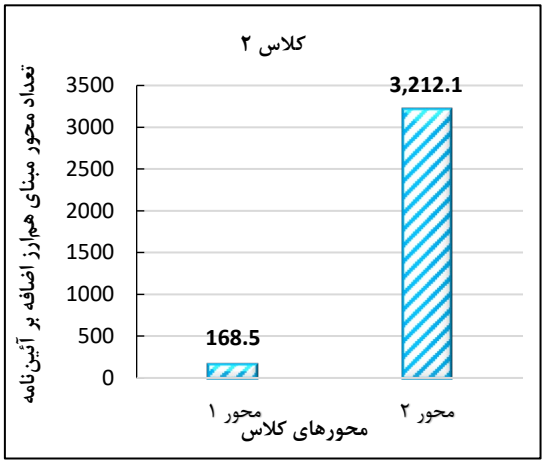


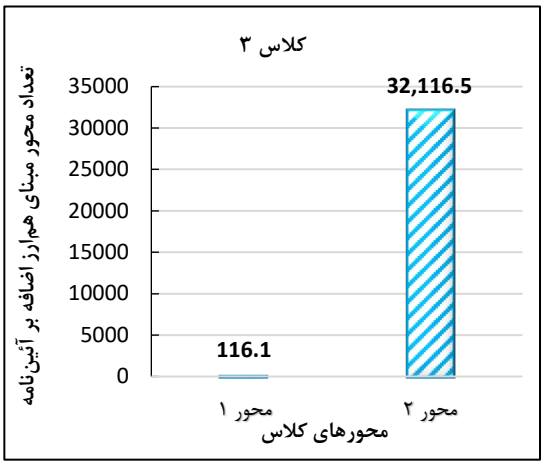
شکل ۸. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس برای ۸ ماه در حالت ٤

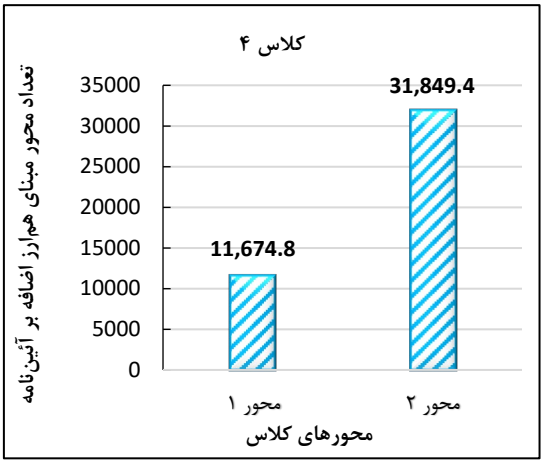
در این حالت با توجه تعریف انجام شده برای آن، مطابق شکل ۹ همه محورها دارای مقادیر اضافه بار مثبت نسبت به آیین‌نامه هستند. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد که محور ۲ و محور تاندم ۲ و ۳ به ترتیب در کلاس‌های ۱۲ و ۱۳ دارای بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هستند. بر این اساس محورهایی که بار آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته، به‌عنوان بحرانی‌ترین موارد در هر کلاس، در جدول ۹ مشخص شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در برخی کلاس‌ها محور ۱ ترافیک سنگین‌تری از خود نشان داده است. ارزیابی مجدد داده‌ها نشان می‌دهد که احتمالا بارها در نزدیک به اتاق راننده قرار داده شده است. در این حالت با ترمز بسیار کوچکی روی سیستم تردشمار نصب شده روی جاده که با کمی اختلاف تراز ناچیز با روسازی مجاور خود حالتی مثل یک دست‌انداز را ایجاد می‌کند، وزن واقعی محور ۱ تشدید شده و سیستم توزین وزن بیشتری را گزارش کرده است. جدول ۱۰ بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس را در بین محورهای غیرمجاز نشان می‌دهد.

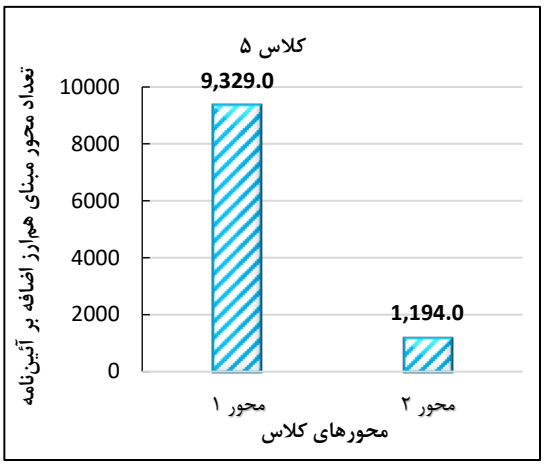
تحلیل‌ها در این حالت نشان می‌دهد که بارگذاری واقعی نسبت به آیین‌نامه دارای افزایش ۸۹/٤ درصد دارد که تاثیر آن بر خرابی‌های زودرس روسازی محرزاست.

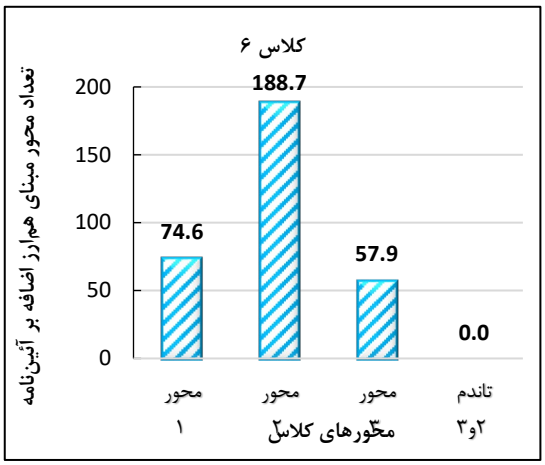

کلاس ۱
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
442.9
796.0
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

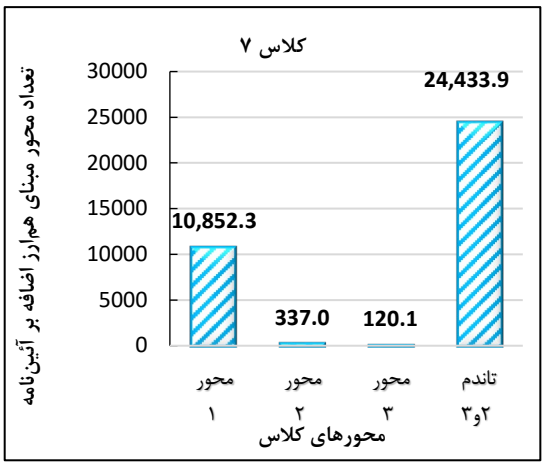

کلاس ۲
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
168.5
3,212.1
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

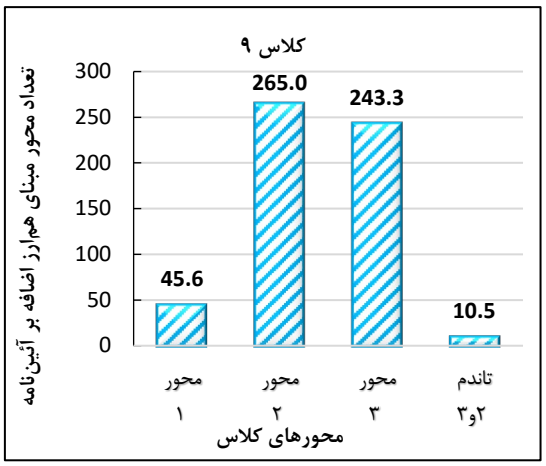

کلاس ۳
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
116.1
32,116.5
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

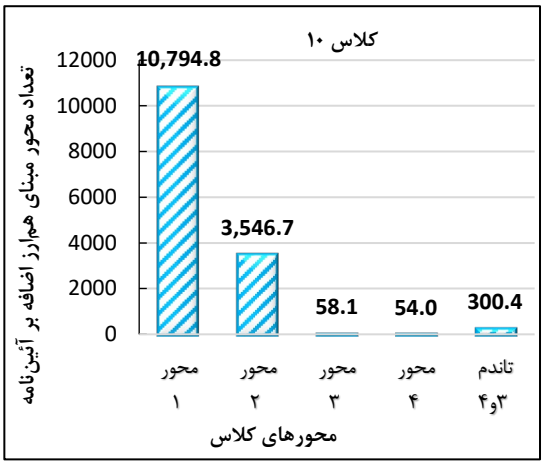

کلاس ۴
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
11,674.8
31,849.4
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

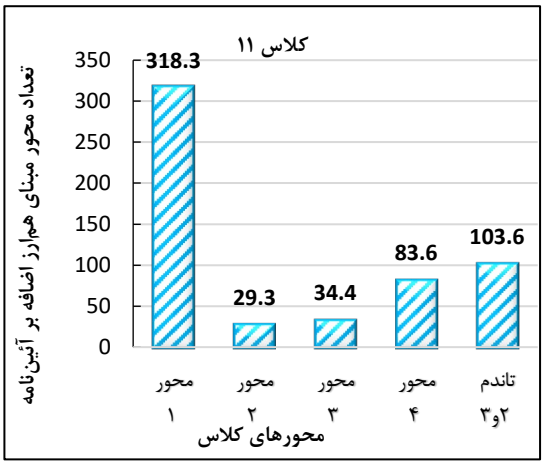

کلاس ۵
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
10000
8000
6000
4000
2000
0
9,329.0
1,194.0
محور ۱
محور ۲
محورهای کلاس

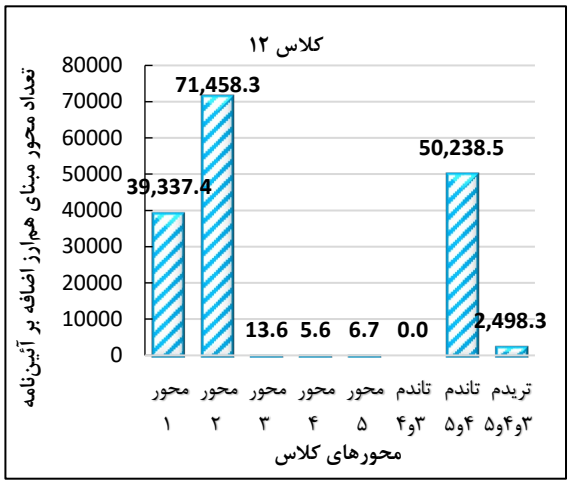

کلاس ۶
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
200
150
100
50
0
74.6
188.7
57.9
0.0
محور ۱
محور
محور
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

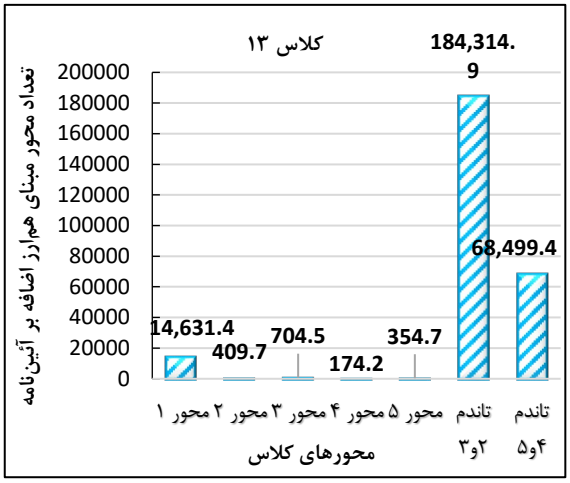

کلاس ۷
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
10,852.3
337.0
120.1
24,433.9
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس

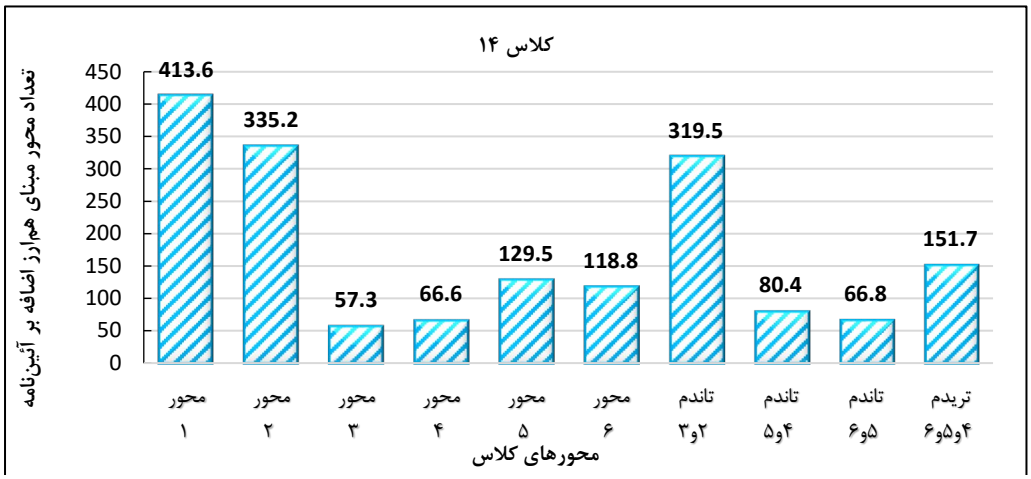

کلاس ۹
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
300
250
200
150
100
50
0
45.6
265.0
243.3
10.5
محور ۱
محور ۲
محور ۳
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس


کلاس ۱۰
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
10,794.8
3,546.7
58.1
54.0
300.4
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۳و۴
محورهای کلاس


کلاس ۱۱
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
350
300
250
200
150
100
50
0
318.3
29.3
34.4
83.6
103.6
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
تاندم ۲و۳
محورهای کلاس


کلاس ۱۲
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
80000
70000
60000
50000
40000
30000
20000
10000
0
39,337.4
71,458.3
13.6
5.6
6.7
0.0
50,238.5
2,498.3
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
محور ۵
تاندم ۳و۴
تاندم ۴و۵
تریدم ۳و۴و۵
محورهای کلاس


کلاس ۱۳
تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آئین‌نامه
200000
180000
160000
140000
120000
100000
80000
60000
40000
20000
0
14,631.4
409.7
704.5
174.2
354.7
184,314.9
68,499.4
محور ۱
محور ۲
محور ۳
محور ۴
محور ۵
تاندم ۲و۳
تاندم ۴و۵
محورهای کلاس



شکل ۹. تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه هر کلاس در حالت ٤

جدول ۱۰. بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس از حالت ٤

کلاس	بحرانی‌ترین محور	کلاس	بحرانی‌ترین محور
۱	محور ۲	۹	محور ۲
۲	محور ۲	۱۰	محور ۱
۳	محور ۲	۱۱	محور ۱
٤	محور ۲	۱۲	محور ۲
٥	محور ۱	۱۳	تاندم ۲ و ۳
٦	محور ۲	۱٤	محور ۱
۷	تاندم ۲ و ۳		

٥- نتیجه‌گیری

این مطالعه باهدف بررسی وضعیت بارگذاری روسازی‌ها توسط وسایل نقلیه طبق واقعیت و تفاوت آن با بارگذاری همان تعداد و کلاس‌ها و محورهای وسایل نقلیه اما مطابق حداکثر بارهای آیین‌نامه برای وسایل نقلیه و محورهای آن‌ها، انجام شد. تأثیر اضافه‌بار وسایل نقلیه بر عملکرد روسازی و تحلیل بارگذاری واقعی محورهای عبوری نسبت به مقادیر مجاز تعیین‌شده در آیین‌نامه‌های مربوطه انجام گرفت. در این پژوهش چهار حالت مختلف که در بالابیان شد درنظر گرفته شد و ابتدا داده‌های واقعی مربوط به تردد وسایل نقلیه و وزن محورهای آن‌ها جمع‌آوری شد و سپس تحلیل‌های لازم بر اساس این داده‌ها انجام گردید. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده اهمیت توجه به اضافه‌بار و بارگذاری محورهای سنگین در حفظ طول عمر روسازی و بهبود برنامه‌ریزی نگهداری و مدیریت ترافیک است. یافته‌های کلیدی این پژوهش به تفکیک هر حالت به شرح زیر ارائه می‌شود:

-در حالت ۱ با در نظر گرفتن تمام وسایل نقلیه نشان داده شده که اضافه باری در کل وجود ندارد و اضافه بار برخی محورها هم ناچیز است (شکل ۲ و ۳). ترکیب مختلفی از وسایل نقلیه تجاری به صورت بارگیری شده و نشده (تحلیل داده‌های WIM نشان داد ٤٨/٥ درصد از وسایل تجاری خالی و یا با حداکثر وزن مجاز بارگیری نشده بودند) تعدیل شده و در کل، به ظاهراضافه بار محور هم‌ارزی بر روسازی اعمال نمی شود. با توجه به اینکه داده‌های WIM فقط برای یک جهت بودند، اگر در هر دو جهت چنین شرایطی وجود داشته باشد به ظاهر مطلوب است.

اما درصورتیکه یک جهت وسایل نقلیه به صورت پر تردد کنند و در جهت دیگر خالی، موضوع باید بررسی شود.

-در حالت ۲ نیز علارغم در نظر گرفتن وسایل نقلیه تجاری، بارگذاری اضافه اعمال نشد هر چند اضافه بار برخی محورها قابل توجه بود (شکل ٤ و ٥). چون وسایل نقلیه‌ای که وزن‌شان از حالت خالی آن‌ها بیشتر بود در نظر گرفته شده بودند و ٤٨/٥ درصد آن‌ها به ظرفیت حداکثر مجاز نرسیده بودند، مجددا مانند حالت ۱ ضرایب بار هم‌ارز تعدیل شده و اضافه باری بر روسازی اعمال نشد. اگر در مسیر برگشت نیز چنین حالتی باشد به ظاهر مطلوب خواهد بود و روسازی در اثر بارگذاری زودتر ار موعد مضمحل نمی‌شود.

-با توجه تحلیل‌های حالت ۱ و ۲، تحلیل حالت ۳ روی داده‌ها انجام شد که نتیجه متفاوتی را هم در کل بارگذاری و هم روی محورها، ارایه داد (شکل ٦ و ۷). در این حالت که فقط ۱۱/۷ درصد از وسایل نقلیه دارای بار بیشتر از مجاز بودند، مجموع محورهای هم‌ارز مازاد، نسبت به مقادیر آیین‌نامه‌ای برابر با ۱۰،۳۸٥،۳٦٦ محور که معادل ٥٦/٦ درصد اضافه‌بار بود، محاسبه شد. با توجه به عدد ۱۱/۷ درصد، اضافه بار ٥٦/٦ درصد نشان دهنده توزیع بار نامناسب روی محورهای وسایل نقلیه تجاری است که عدد آن (۱۰،۳۸٥،۳٦٦ اضافه بار) قابل توجه است. در حالت ۱ و ۲ که کل وسایل در نظر گرفته شده بودند به ظاهر اضافه باری بر روسازی اعمال نشد و نشان داد شرایط بارگذاری واقعی در کل مطلوب است؛ اما در این حالت اضافه بار ٥٦/٦ درصدی مشاهده شد. این اضافه بار نشان دهنده بار بیش از حد مجاز بوده که با توجه به نسبت خرابی‌ها با توان ٤ وزن، حاکی از تاثیربسیار مخراب آن دارد. شاخص وضعیت ٥۳ مسیر و وضعیت عملکردی آن، گواه آن است. یعنی بارگذاری به ظاهر مطلوب در حالت‌ها ۱ و ۲ مورد سوال خواهد بود. این نتیجه نشان می‌دهد لازم است علاوه بر کنترل کل مجموع ضرایب بار هم‌ارز و کنترل ظرفیت کل بار هر وسیله نقلیه، وزن مجاز روی هر محور یا به عبارت دقیق‌تر ضرایب بار هم‌ارز معادل هر محور نیز باید به دقت کنترل شود.

-در حالت ٤ که تنها محورهایی که وزن آن‌ها برابر یا فراتر از حد مجاز آیین‌نامه‌ای بود مورد تحلیل قرار گرفتند، نتایج قابل توجه‌تری هم در کل بارگذاری و هم در تحلیل و بررسی محورها مشاهده شد (شکل ۸ و ۹). نتایج نشان داد که مجموع محورهای هم‌ارز مازاد به ۱۸،٦۸٥،۱۹۰ محور معادل هم‌ارز می‌رسد که معادل ۸۹/٤ درصد اضافه‌بار است. این اضافه بار با در نظر گرفتن اینکه فقط ۱۱/۷ درصد از وسایل نقلیه دارای بار بیشتر از مجاز بودند، مجددا مانند حالت ۳ نشان دهنده توزیع بسیار نامناسب بار روی محورهای وسایل نقلیه تجاری بوده و مطلوبیت بارگذاری در حالت‌های ۱ و ۲ زیر سوال می‌رود. تاثیر مخرب این اضافه بار با توجه به شرایط روسازی وجود و عملکرد آن محرز است. بنابراین باید کنترل بار مجاز محورهای مختلف وسایل نقلیه تجاری هم علاوه بر کنترل کل بار مجاز آن‌ها با دقت صورت گیرد.

-اشکال ٤، ٦ و ۸ نشان می‌هد که کلاس ۱۳ بحرانی‌ترین کلاس است. در حالت ٤ که به عنوان بحرانی‌ترین حالت شناخته شد، کلاس‌های ۱۲، ٤، ۷، ۳، ۱۰ و ٥ در رده بعدی بحرانی قرار می‌گیرد (شکل ۸). این نتیجه حاکی از آن است که اثر بارگذاری محوری بر کاهش عمر مفید روسازی به شدت به کلاس وسیله نقلیه وابسته است و حتی تعداد محدود وسایل نقلیه با بارگذاری بالا می‌تواند سهم قابل‌توجهی در تسریع تخریب روسازی داشته باشد. علاوه بر این داده‌های فوق می‌تواند راهنمایی برای اولویت‌بندی کنترل بار توسط پلیس و سازمان راهداری به‌ویژه در مسیرهای پرتردد و در زمان‌های اوج ترافیک، جهت نظارت بیشتر بر تردد وسایل نقلیه تجاری مورد توجه و استفاده قرار گیرد.

-همانطور که نتایج حالت‌های ۳ و ٤ نشان داد کنترل توزیع بار روی محورها، اهمیت ویژه‌ای دارد. اشکال ۷ و ۹ و همچنین جداول ۹ و ۱۰ نشان دهنده بحرانی‌ترین محورها در هر کلاس است. بیشترین سهم این اضافه‌بار مربوط به محور تاندم ۲ و ۳ از کلاس ۱۳ (تریلر پنج‌محوره ۱۸ چرخ متعارف) می‌باشد که بیانگر نقش غالب این کلاس و این محور در تشدید بارگذاری روسازی است. این یافته‌ها به‌روشنی نشان می‌دهد که توزیع بار محوری در میان وسایل نقلیه یکنواخت نبوده و بخش عمده‌ای از آسیب‌های وارده به روسازی ناشی از تعداد محدودی از کلاس‌های خاص است. همچنین این نتیجه که به‌وضوح نشان‌دهنده توزیع نامناسب بار میان محورهای وسایل نقلیه و تمرکز اضافه‌بار بر روی برخی محورهاست؛ می‌تواند منجر به افزایش تنش‌های موضعی و تسریع در روند خرابی روسازی گردد و لزوم کنترل دقیق‌تر بارگذاری محوری را برجسته می‌سازد. بر این اساس، تمرکز اقدامات کنترلی و نظارتی، به‌ویژه توسط پلیس راه، بر این کلاس‌ها و محورهای بحرانی می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اضافه‌بار، افزایش عمر روسازی و بهبود عملکرد شبکه راه‌های کشور ایفا کند.

-تحلیل دقیق‌تر حالت ٤ نشان می‌دهد بیشترین تعداد محور مبنای هم‌ارز اضافه بر آیین‌نامه برای هر محور از کلاس‌های عبور شامل محور تاندم ۲ و ۳ (۱۸٤۳۱٤) و محور تاندم ٤ و ٥ (٦۸٤۹۹) از کلاس ۱۳، محور ۲ (۷۱٤٥۸) و محور تاندم ٤ و ٥ (٥۰۲۳۸) و محور ۱ (۳۹۳۳۷) از کلاس ۱۲، محور ۲ (۳۱۸٤۹) و محور ۱ (۱۱٦۷٤) از کلاس ٤، محور تاندم ۲ و ۳ (۲٤٤۳۳) و محور ۱ (۱۰۸٥۲) از کلاس ۷، محور ۲ (۳۲۱۱٦) از کلاس ۳، محور ۱ (۱۰۷۹٤) از کلاس ۱۰ و محور ۱ (۹۳۲۹) از کلاس ٥ می‌باشد. بنابراین هنگام وزن‌کشی اولویت با کلاس‌ها و محورهای بیان شده می‌باشد که در شرایط ترافیک سنگین، برنامه‌ریزی و مدیریت آن حائز اهمیت است.

-تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت بارگیری تمام وسایل‌نقلیه تجاری، باتوجه‌به توزیع نامناسب بار روی محورها و اضافه بارها، بارگذاری سنگین‌تری به روسازی وارد می‌شود؛ بنابراین کنترل بارگذاری محورهای بحرانی و کلاس‌های مربوطه در مسیرهای تجاری با یکسر بار برای کنترل کل بار و رعایت توزیع بار روی محورها اهمیت ویژه‌ای دارد.

٦-مراجع

-ابوطالبی اصفهانی، محسن، رضوانی، مهرداد (۱۳۹۸). تأثیر اصلاحیه مقررات حمل‌ونقل بار بر خرابی و اضافه‌بارها با استفاده از سامانه هوشمند (مطالعه موردی استان اصفهان). *فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل‌ونقل، ۱٦(٤)، ۳٤-۱٥.*

-ابوطالبی اصفهانی، محسن.، رضوانی، مهرداد (۱۳۹۷). قیمت‌گذاری و بررسی اخذ عوارض عبور خودروها براساس صدمه وارده به روسازی با استفاده از سامانه هوشمند (مطالعه موردی: محورهای اصفهان). *فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی حمل‌ونقل، ۱٥(٤)، ۷۹-٦۱.*

-ایوبی‌نژاد، جلال، برادران رحمانیان، نصیر، جراحی، آرمین (۱٤۰۱). بررسی تأثیر تردد ناوگان باری دارای اضافه تناژ بر کاهش طول عمر روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از اطلاعات سامانه‌های توزین حین حرکت. *پژوهشنامه حمل و نقل، ۱۹(۱)، ۱۸٦-۱۷۷.*

-محمدی، کبری.، مرشدی، مسعود.، معصومی، مصطفی.، رحیم‌اف، کامران. (۱۳۹۹). تأثیر سامانه توزین در حال حرکت -بهره‌برداری کامل و یکپارچه از سامانه‌های توزین در حال حرکت (WIM) و لزوم گسترش آن در تمام شبکه راه‌های کشور، همراه با اعمال جریمه‌های هوشمند و برخط برای وسایل نقلیه و محورهای دارای اضافه‌بار، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در ایجاد بازدارندگی عمل کند. این رویکرد، با هدایت بهره‌برداران به رعایت حدود مجاز بارگذاری، موجب بهبود توزیع بار بر روی محورها شده و در نتیجه، کاهش تنش‌های وارده به روسازی و جلوگیری از خرابی زودرس آن را به دنبال خواهد داشت. در نهایت، پیاده‌سازی چنین نظام کنترلی، ضمن افزایش عمر مفید روسازی، به ارتقای سطح ایمنی و کارایی شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای نیز منجر می‌شود.

-درصورت داشتن داده‌های سیستم WIM در هر دوجهت مسیر، می‌توان تحلیل‌های بهتری را مخصوصا برای مسیرهای که عمده وسایل نقلیه تجاری آن‌ها یک سر بار هستند ارایه داد. البته حالت ۳ و ٤ نشان داد وضعیت حتی در مسیری که به ظاهر در کل اضافه بار ندارد نیز بحرانی است و یکی از دلایل خرابی‌های زودرس در این مسیر اضافه تنش‌های قابل توجه اعمالی در اثر اضافه بارها است.

بر ارتقای عملکرد برخورد با تخلفات ترافیکی. مطالعات مدیریت ترافیک، ۱٥(٥۸)، ۱۷۰-۱٤۹.

-معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور (۱۳۹۰). آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (تجدید نظر اول) (نشریه شماره ۲۳٤).

-Adresi, M., Abedi, M., Dong, W., & Yekrangnia, M. (2024). A review of different types of weigh-in-motion sensors: State-of-the-art. *Measurement, 225*, 114042.

-Ahn, S., Kandala, S., Uzan, J., & El-Basyouny, M. (2011). Impact of traffic data on the pavement distress predictions using the mechanistic empirical pavement design guide. *Road Materials and Pavement Design, 12*(1), 195-216.

-Arifin, M. Z., Prabowo, P., & Wicaksono, A. D. (2024). Modeling of road damage prediction due to overload using HDM-4 method. *EUREKA: Physics and Engineering*(1), 70-81.

-Aydin, M. M., & Topal, A. (2019). Effects of pavement surface deformations on traffic flow. *Transport, 34*(2), 204-214.

-Bosso, M., Mota, R., Vasconcelos, K., & Bernucci, L. (2019). *Impact of overloaded vehicles on asphalt pavement fatigue life.* Paper

Nanosilica Aerogels. *Journal of Materials in Civil Engineering, 37*(1), 04024436.
-Khalifa, N. A., Zulkiple, A., & Ogab, M. (2020). The impact of different road damage factors on the pavement of local roads (JKR U2/U3) in Malaysia. *International Journal of Pavement Research and Technology, 13*(3), 240-246.
-Kim, J. W., Jung, Y. W., Utebayeva, A., Kamaliyeva, Z., Collins, N., Sarbassov, D., Amanzhlova, R. (2021). High-performance high-speed WIM for sustainable road load monitoring using GIS technology. *Transport Problems, 16*(4), 149-162.
-Kumar, S., Arya, A., Gupta, A., & Bhola, K. (2020). Methodology of Studying Impact of Vehicle Overloading on Pavement Surface and Design of Overall Thickness. *International Research Journal of Engineering and Technology, 7*(5), 3666-3672.
-Masud, M. M., Haider, S. W., Selezneva, O., & Wolf, D. J. (2020). Impact of WIM systematic bias on axle load spectra–A case study. In *Advances in Materials and Pavement Performance Prediction II*, CRC Press, 64-67.
-Masud, M. M., Haider, S. W., Selezneva, O., & Wolf, D. J. (2024). Representative weigh-in-motion (WIM) system accuracy and guidelines for equipment selection based on sensor, site, and calibration-related factors. *International Journal of Pavement Research and Technology, 17*(3), 732-749.
-Morovatdar, A., Ashtiani, R. S., & Mahmoud, E. (2023). Mechanistic approach to predict service life of flexible pavements subjected to heavy traffic loads. *Road Materials and Pavement Design, 24*(2), 427-446.
-Namavar Jahromi, M., Sarkar, A., Mansourian, A., & Esmaeil Zaghi, A. (2024). Bitumen and silica-aerogel composite; thermal analysis of reaction, structural and mechanical properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 149*(22), 13483-13494.
-National Academies of Sciences, E., & Medicine. (2020). Use of Weigh-in-Motion Data for Pavement, Bridge, Weight Enforcement, and Freight Logistics Applications.
-Ojha, K. N. (2018). Overloading and pavement service life—a case study on narayanghat-mugling road, nepal. *Journal of Transportation Technologies, 8*(4), 343-356.
-Pais, J. C., Figueiras, H., Pereira, P., & Kaloush, K. (2019). The pavements cost due to presented at the Proceedings of the ICWIM8-international conference on weigh-in-motion.
-Bosso, M., Vasconcelos, K. L., Ho, L. L., & Bernucci, L. L. (2020). Use of regression trees to predict overweight trucks from historical weigh-in-motion data. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7*(6), 843-859.
-Brzozowski, K., Maczyński, A., Ryguła, A., & Konior, T. (2023). A weigh-in-motion system with automatic data reliability estimation. *Measurement, 221*, 113494.
-Burnos, P., Gajda, J., Sroka, R., Wasilewska, M., & Dolega, C. (2021). High accuracy weigh-in-motion systems for direct enforcement. *Sensors, 21*(23), 8046.
-Chen, Y., Wang, K., Zhang, Y., Luo, R., Yu, S., Shi, Q., & Hu, W. (2020). Investigating factors affecting road freight overloading through the integrated use of BLR and CART: A case study in China. *Transport, 35*(3), 236-246.
-Cremona, C. (2001). Optimal extrapolation of traffic load effects. *Structural Safety, 23*(1), 31-46.
-Hashim, I. H., Badawy, R. M., & Heneash, U. (2023). Impact of Pavement Defects on Traffic Operational Performance. *Sustainability, 15*(10), 8293.
-He, Y., Li, J., Xu, X., Li, A., Liu, H., Jiang, T., & Shi, K. (2021). *Influence of overloaded vehicles on pavement life based on WIM data.* Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
-Jacob, B., & Cottineau, L.-M. (2016). Weigh-in-motion for direct enforcement of overloaded commercial vehicles. *Transportation Research Procedia, 14*, 1413-1422.
-Jacob, B., & Schmidt, F. (2019). *ICWIM8-8th Conference on Weigh-in-Motion-Book of proceedings.* Paper presented at the ICWIM8, 8th International Conference on Weigh-in-Motion.
-Jacob, O. O., Chukwudi, I. C., Thaddeus, E. O., & Agwu, E. E. (2020). Estimation of the impact of the overloaded truck on the service life of pavement structures in Nigeria. *Int. J. Traffic Transp. Eng, 9*, 41-47.
-Jahromi, M. N., & Sarkar, A. (2025). Stone Matrix Asphalt and silica-aerogel composite: mechanical and structural performance. *Results in Engineering*, 106219.
-Jahromi, M. N., Sarkar, A., Mansourian, A., & Zaghi, A. E. (2025). Mechanical Performance of Hot-Mix Asphalt Modified with Porous

-Sujon, M., & Dai, F. (2021). Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review. *Automation in Construction, 130*, 103844.
-Taylor, B. D., Bergan, A., Lindgren, N., & Berthelot, C. F. (2000). Heavyweight safety: overweight commercial vehicles are a safety hazard to other motorists and have an inordinate impact on infrastructure. *Traffic technology international: the international review of advanced traffic management. 2000*.
-Titi, H. H., Coley, N. J., & Latifi, V. (2018). Evaluation of Pavement Performance due to Overload Single-Trip Permit Truck Traffic in Wisconsin. *Advances in Civil Engineering, 2018*(1), 1070653.
-Ventura, R., Barabino, B., Vetturi, D., & Maternini, G. (2023). Monitoring vehicles with permits and that are illegally overweight on bridges using weigh-in-motion (WIM) devices: A case study from Brescia. *Case studies on transport policy, 13*, 101023.
-Warscotte, L., Boreux, J., Antofie, A., & Corbaye, D. (2023). Direct enforcement in Belgium with high speed weigh-in-motion (HS-WIM). *Electronics, 12*(3), 555.
-Yu, Y., Cai, C., & Deng, L. (2016). State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology. *Advances in Structural Engineering, 19*(9), 1514-1530.
traffic overloads. *International Journal of Pavement Engineering, 20*(12), 1463-1473.
-Pratt, D., Choi, Y., Plemel, M., & Papagiannakis, A. (2022). Continuous calibration weigh-in-motion system using static weight data. *Transportation research record, 2676*(12), 740-749.
-Ryguła, A., Brzozowski, K., & Maczyński, A. (2020). Limitations of the effectiveness of Weigh in Motion systems. *Open engineering, 10*(1), 183-196.
-Rys, D., & Jaskula, P. (2018). *Effect of overloaded vehicles on whole life cycle cost of flexible pavements.* Paper presented at the Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference.
-Rys, D., Judycki, J., & Jaskula, P. (2016). Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data. *International Journal of Pavement Engineering, 17*(8), 716-726.
-Rys, D., Więckowski, P., Wasilewska, M., & Dołęga, C. (2024). Impact of accuracy of weigh-in-motion data for pavement analysis and design: influence of temperature variations. *Road Materials and Pavement Design*, 1-18.
-Sholichin, I., & Rumintang, A. (2018). Relation analysis of road damage with excessive vehicles load on Kalianak road Surabaya. *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.*

Investigating the Effect of Improper Axle Load Distribution in Freight Vehicles on Pavement Performance Using Weigh-in-Motion Data

(Case Study: Tehran–Rudehen)

Mohsen Aboutalebi Esfahani, *Associate Professor, Department of Transportation, Faculty of Civil and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*
Mohammad Namavar Jahromi, Ph.D., Grad., R&D Department, Zarrin Sepahan Company, Isfahan, Iran.
Mahsa Gorji, M.Sc., Grad., Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
Marziyeh Esmaeili, M.Sc., Grad., Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

E-mail: m.aboutalebi.e@eng.ui.ac.ir

Received: July 2026- Accepted: November 2026

ABSTRACT
Road transport, as one of the most critical pillars of a country's economic and developmental infrastructure, accounts for a significant portion of national capital and plays a decisive role in economic sustainability and growth. Therefore, the optimal maintenance and preservation of road pavements are of particular importance. Although the design life of pavements in Iran is typically estimated to be between 10 and 20 years, in practice, distress often appears much earlier, usually within 5 to 6 years after opening to traffic—an issue that further highlights the need to revise design, construction, and maintenance practices for these vital infrastructures. Research indicates that one of the most significant factors contributing to such distress is vehicle overloading, particularly improper load distribution across axles. Failure to comply with regulatory requirements in this regard increases stress on the pavement and accelerates its deterioration. Accordingly, the present study analyzes and evaluates axle load distribution patterns using data recorded by a Weigh-in-Motion (WIM) system on the Tehran–Rudehen axis. The analysis was conducted under four scenarios: In the first scenario, all vehicles (both loaded and unloaded) were considered. In the second scenario, only loaded vehicles were examined. In the third scenario, overloaded vehicles were analyzed. In the fourth scenario, overloaded axles within vehicles were considered. The results showed that in the first and second scenarios, no overloading was observed. However, in the third scenario, 56.6% of vehicles were overloaded, and in the fourth scenario, 89.4% of axles carried loads exceeding the permissible limit. These findings indicate the significant impact of improper load distribution on increasing the load imposed on the pavement.

Keywords: Equivalent Single Axle Load, Weigh-in-Motion (WIM) System, Equivalent Axle Load Factor, Heavy Vehicles, Pavement Distress