

ارزیابی سیاست‌های بهینه برای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن در ناوگان خودروهای سبک ایران

مقاله علمی-پژوهشی

سحر رفیعی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
زین العابدین صادقی (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
کوروش قادری، دانشیار، دانشکده کشاورزی و مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: z_sadeghi@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

صفحه ۴۷۱-۴۸۲

چکیده

بخش حمل و نقل سبک ایران به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش بسزایی در افزایش دی‌اکسید کربن (CO_2) و تشدید تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. وابستگی شدید این بخش به سوخت‌های فسیلی، استفاده از فناوری‌های قدیمی در موتور خودروها و شدت بالای کربن شبکه برق، موجب شده است که روند انتشار در دهه‌های اخیر به صورت فزاینده ادامه یابد. هدف این پژوهش، تحلیل مسیرهای بهینه کربن‌زدایی در ناوگان خودروهای سبک ایران تا افق ۲۰۵۰ است. بدین منظور، با بهره‌گیری از مدل سازی سری‌های زمانی (Auto-ARIMA) و شبیه سازی سناریوهای سیاستی در محیط GAMS، پنج سناریو از «تداوم روند موجود» تا «سیاست‌های خوش‌بینانه» طراحی و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در صورت تداوم و وضعیت فعلی، تعداد خودروهای سبک کشور تا سال ۲۰۵۰ از ۵۰ میلیون دستگاه فراتر رفته و میزان انتشار CO_2 بیش از دو برابر خواهد شد. در مقابل، در سناریوی خوش‌بینانه که شامل افزایش سهم خودروهای برقی و هیبریدی به ۲۰ درصد، بهبود ۳۰ درصدی بهره‌وری خودروهای احتراقی و کاهش شدت کربن شبکه برق از ۰/۶۰ به ۰/۴۰ کیلوگرم CO_2 بر کیلووات ساعت است، انتشار کل ناوگان بیش از ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. یافته‌ها نشان می‌دهد که تحقق اهداف کربن‌زدایی مستلزم اتخاذ سیاست‌های جامع شامل توسعه فناوری‌های پاک، اصلاح ساختار تولید برق، نوسازی ناوگان و طراحی نظام‌های انگیزشی اقتصادی برای مصرف‌کنندگان است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری‌های ملی در جهت تحقق حمل و نقل پایدار و کم‌کربن در ایران فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: کربن‌زدایی، خودروهای برقی، شدت کربن شبکه برق، سناریوهای سیاستی، حمل و نقل سبک

۱- مقدمه

سهم بالای خود در مصرف بنزین و گازوئیل، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید گرمایش جهانی ایفا می‌کنند. آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۱) نیز پیش‌بینی می‌کند که بدون مداخلات سیاستی مؤثر، انتشار CO_2 در بخش حمل و نقل جهانی تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۶۰ درصد افزایش خواهد یافت. این در حالی است که در ایران، وابستگی شدید به سوخت‌های

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO_2)، به یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم تبدیل شده است. گزارش هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که حدود ۲۴ درصد از کل انتشار جهانی CO_2 ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی در بخش حمل و نقل است. در این میان، خودروهای سبک شهری به دلیل

و بهبود بهره‌وری انرژی است. یافته‌های این تحقیق، مبنایی علمی برای تدوین سیاست‌های جامع کاهش انتشار CO₂ و دستیابی به آینده‌ای پایدار و کم‌کربن در بخش حمل و نقل ایران فراهم می‌آورد.

۲- پیشینه تحقیق

بخش حمل و نقل یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان است و سهمی حدود ۲۴ درصد از کل انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی را به خود اختصاص می‌دهد. این سهم در کشورهای در حال توسعه، به دلیل رشد سریع ناوگان خودروها و گسترش شهرنشینی، روندی افزایشی دارد. سیاست‌های جهانی برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی شامل حمایت از خودروهای برقی، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و اعمال مالیات‌های کربنی است (برنامه محیط‌زیست سازمان ملل، ۲۰۱۹). در ایران، رشد فزاینده تعداد خودروهای سبک، فناوری پایین موتورها، کیفیت نامناسب سوخت و میانگین عمر بالای ناوگان از مهم‌ترین عوامل افزایش مصرف انرژی و انتشار CO₂ به شمار می‌روند. در سال ۲۰۲۲، میزان انتشار ناشی از بخش حمل و نقل کشور به بیش از ۱۴۲ میلیون تن رسیده است که حدود ۲۵ درصد از کل انتشار ملی را تشکیل می‌دهد (ترازنامه انرژی وزارت نیرو، ۱۴۰۱؛ BP، ۲۰۲۴). پژوهش‌های داخلی نظیر ناظران و حقدوست (۱۳۹۱) نشان داده‌اند که جایگزینی تدریجی خودروهای هیبریدی و برقی می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سوخت ایجاد کند. با این حال، ضعف زیرساخت‌های شارژ، یارانه‌های سنگین سوخت و شدت بالای کربن در شبکه برق، مانع گسترش این فناوری‌ها شده است (حسینی، ۱۳۹۹). در حوزه بین‌المللی، مطالعات متعددی به بررسی اثر خودروهای برقی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای پرداخته‌اند. مطالعه رکویا و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که تأثیر زیست‌محیطی خودروهای برقی به شدت به ترکیب تولید برق بستگی دارد. در کشورهایی با شبکه برق پاک، برقی‌سازی منجر به کاهش چشمگیر انتشار می‌شود، در حالی که در کشورهایی با شبکه برق آلاینده، اثر آن محدودتر است (هوا و همکاران، ۲۰۱۵). گیسولفی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان «کربن‌زدایی حمل و نقل باری: مرور نظام‌مند ادبیات بر مدل‌های دینامیک سیستم» با بهره‌گیری از روش

فسیلی، قیمت پایین حامل‌های انرژی و فرسودگی فناوری ناوگان، منجر به روندی ناپایدار در مصرف انرژی و افزایش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. بر اساس ترازنامه انرژی وزارت نیرو (۱۴۰۱)، سهم بخش حمل و نقل از کل مصرف انرژی نهایی بیش از ۲۹ درصد و از مصرف فرآورده‌های نفتی بیش از ۴۰ درصد برآورد می‌شود.

علاوه بر این، در بازه زمانی ۱۹۶۵ تا ۲۰۲۳، میزان انتشار CO₂ کشور بیش از ده برابر افزایش یافته و به حدود ۶۰۰ میلیون تن در سال رسیده است (BP، ۲۰۲۴). این روند بیانگر آن است که بدون اصلاحات ساختاری در نظام انرژی و سیاست‌های حمل و نقل، تحقق تعهدات بین‌المللی ایران در زمینه کاهش انتشار با چالش‌های اساسی روبه‌رو خواهد بود (عادل‌بخوردار و ورهرامی، ۱۴۰۳).

تجربه کشورهای پیشرو مانند چین، اتحادیه اروپا و برزیل حاکی از آن است که برقی‌سازی ناوگان، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود بهره‌وری سوخت از مهم‌ترین راهبردهای کربن‌زدایی در بخش حمل و نقل به شمار می‌روند (گلیناداکیس و بالستیری، ۲۰۲۳). در این کشورها، اجرای سیاست‌هایی نظیر یارانه خرید خودروهای برقی، افزایش سهم انرژی‌های پاک در تولید برق و اعمال استانداردهای سخت‌گیرانه انتشار، موجب کاهش قابل توجه آلاینده‌گی و مصرف سوخت شده است. در مقابل، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، ضعف زیرساخت‌های شارژ، هزینه بالای خودروهای برقی و شدت بالای کربن شبکه برق، از مهم‌ترین موانع تحقق اهداف کربن‌زدایی محسوب می‌شوند (هوا و همکاران، ۲۰۱۵).

با توجه به اینکه بیش از ۹۰ درصد انرژی مصرفی بخش حمل و نقل ایران از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود، گذار به نظام حمل و نقل پاک، ضرورتی راهبردی برای دستیابی به توسعه پایدار به شمار می‌رود. مطالعات اخیر (حسینی، ۱۳۹۹؛ چانگچون و همکاران، ۲۰۲۲) نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های نوین نظیر خودروهای برقی و هیبریدی با اصلاح ترکیب تولید برق، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش آلاینده‌گی ایفا کند. بر این اساس، مقاله حاضر با استفاده از رویکرد مدل‌سازی پیش‌بینی Auto-ARIMA و تحلیل سناریوهای سیاستی تا افق ۲۰۵۰، به بررسی مسیرهای بهینه کربن‌زدایی در بخش حمل و نقل سبک ایران می‌پردازد. تمرکز اصلی پژوهش بر ارزیابی اثر برقی‌سازی ناوگان، تغییر شدت کربن شبکه برق

مرور نظام‌مند، چارچوب‌های مبتنی بر پویایی سیستم در حوزه کربن‌زدایی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که اکثر مدل‌های موجود تصویر جامعی از تعاملات پیچیده میان تقاضای حمل و نقل، مصرف انرژی و سیاست‌های اقلیمی ارائه نمی‌دهند و عمدتاً به ترکیب محدودی از راهبردهای کاهش انتشار اکتفا کرده‌اند. علاوه بر این، بسیاری از این مدل‌ها در تبیین رفتارهای وابسته به زمان و مسیرهای گذار بلندمدت با محدودیت مواجه‌اند؛ موضوعی که برای تحلیل فوریت سیاست‌ها و ارزیابی اثربخشی مداخلات در افق‌های زمانی بلندمدت اهمیت اساسی دارد.

امودی و همکاران (۲۰۲۲) در مقاله خود تحت عنوان «کربن‌زدایی بخش حمل و نقل در کشورهای جنوب جهانی: یک مرور نظام‌مند ادبیات» با بهره‌گیری از روش مرور کمی نظام‌مند، به بررسی این حوزه پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که تولیدات علمی در این حوزه رو به رشد است، اما توزیع جغرافیایی مطالعات ناهمگن بوده و نتایج کربن‌زدایی در کشورهای در حال توسعه متنوع و متغیر است. این مطالعه همچنین بر چالش‌هایی نظیر محدودیت‌های مالی، رقابت بر سر سوخت‌های جایگزین، آثار بازگشتی رفتاری و مخاطرات اجتماعی برای گروه‌های کم‌درآمد تأکید می‌کند. این یافته‌ها ضرورت طراحی سیاست‌های بومی‌سازی‌شده و مبتنی بر پایش مستمر را برای کشورهای در حال توسعه برجسته می‌سازد. پژوهش‌چانگچون و همکاران (۲۰۲۲) بر ضرورت ترکیب سیاست‌های فناورانه و قیمتی برای دستیابی به اهداف کربن‌زدایی تأکید کرده است. به‌طور کلی، مرور ادبیات نشان می‌دهد که سه محور کلیدی در موفقیت سیاست‌های کربن‌زدایی بخش حمل و نقل نقش دارد:

- شدت کربن شبکه برق به‌عنوان تعیین‌کننده اصلی مزیت خودروهای برقی،

- کارایی انرژی و فناوری موتور خودروها، و

- سیاست‌های قیمتی و مالیاتی مرتبط با سوخت و آلاینده‌ها.

در ادبیات داخلی، پژوهش‌های اندکی رابطه بین این سه مؤلفه را به‌صورت هم‌زمان و در قالب پیش‌بینی بلندمدت بررسی کرده‌اند. از این‌رو، پژوهش حاضر با ترکیب مدل‌های سری‌زمانی Auto-ARIMA و شبیه‌سازی سناریوها در محیط GAMS، تلاش دارد این شکاف پژوهشی را پوشش دهد و مسیرهای بهینه کربن‌زدایی ناوگان خودروهای سبک ایران را تا افق ۲۰۵۰

تحلیل کند. پاتیل و همکاران (۲۰۲۴)، در مقاله‌ای با عنوان «کربن‌زدایی پایدار حمل و نقل جاده‌ای: سیاست‌ها، وضعیت کنونی و چالش‌های خودروهای برقی»، با استفاده از مرور نظام‌مند داده‌ها و تحلیل سیاستی به بررسی این حوزه پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بخش حمل و نقل سهم قابل‌توجهی در انتشار جهانی CO₂ دارد و جایگزینی خودروهای احتراقی با خودروهای برقی یکی از مؤثرترین راهبردهای کاهش انتشار کربن محسوب می‌شود. همچنین، سیاست‌های حمایتی دولت، یارانه‌ها، توسعه زیرساخت شارژ، پیشرفت‌های فناورانه، کاربرد هوش مصنوعی و نگرش مصرف‌کنندگان نقش تعیین‌کننده‌ای در تسریع پذیرش خودروهای برقی دارند؛ به‌گونه‌ای که کشورهایی مانند چین و نروژ در این زمینه پیشرو هستند. سلیمانی و پوترو (۲۰۲۵)، در مقاله خود با عنوان «کاهش انتشار کربن در بخش حمل و نقل: تجربه و ملاحظات طراحی سیاست‌ها»، با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی FMOLS و DOLS نشان دادند که بخش حمل و نقل سهم بالایی در مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار CO₂ دارد و کشورهای پراشتار حدود ۶۸ درصد از انتشار جهانی را تولید می‌کنند. یافته‌ها همچنین بیانگر آن است که ترکیب سیاست‌های سمت تقاضا و عرضه اثربخش‌ترین راهبرد کاهش انتشار است و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر می‌تواند این اثر را تقویت کند.

فرگوسن و همکاران (۲۰۲۵) در مقاله‌ای با عنوان «حمل و نقل میان‌مدل و کربن‌زدایی: دیدگاه تحقیق در عملیات» با استفاده از مرور ادبیات و تحلیل سیستماتیک به بررسی این حوزه پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات کربن‌زدایی از سال ۲۰۱۸ افزایش چشمگیری داشته و توسعه مدل‌های تصادفی چندمرحله‌ای، استفاده از فناوری‌های نوین مانند یادگیری ماشینی و بلاک‌چین، و مدل‌های ارزیابی چرخه عمر می‌تواند مدیریت عدم قطعیت‌ها، تصمیم‌گیری و استفاده بهینه از منابع در سیستم‌های حمل و نقل میان‌مدل را بهبود دهد و گذار به منابع انرژی جایگزین را تسهیل کند.

زین و همکاران (۲۰۲۵) در مقاله‌ای با عنوان «تأثیر تأخیر در کربن‌زدایی حمل و نقل جاده‌ای بر کاهش انتشار سایر بخش‌ها» با استفاده از تحلیل سناریویی و شبیه‌سازی اقتصادی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که کربن‌زدایی کند در بخش حمل و نقل جاده‌ای می‌تواند هزینه‌های

۳-۴- طراحی و شبیه سازی سناریوها

در گام بعد، با استفاده از نرم افزار GAMS، پنج سناریوی اصلی برای آینده بخش حمل و نقل سبک ایران طراحی و تحلیل می شوند.

جدول ۱. معرفی سناریوها

کد سناریو	توضیح	ویژگی
SC0	سناریوی پایه	تداوم شرایط فعلی
SC1	سناریوی سیاستی میان	سیاست های متعارف و قابل انتظار
SC2	سناریوی بدبینانه	کندی نو سازی نیروگاهی و توسعه انرژی های تجدیدپذیر
SC3	سناریوی خوش بینانه	گسترش تجدیدپذیرها، افزایش کارایی نیروگاهی و برنامه های حمایتی قوی برای خودروهای برقی
SC4	سناریو افزایش سفر	افزایش پیمایش سالانه

در هر سناریو، تابع هدف مدل به صورت کمینه سازی کل انتشار CO_2 تعریف شده و قیود مدل شامل رشد جمعیت ناوگان، عمر متوسط خودروها (۱۳ تا ۱۵ سال)، محدودیت ظرفیت شبکه برق، نرخ جایگزینی خودروهای جدید و میزان پیمایش سالانه است. در مدل سازی انرژی و حمل و نقل، به دلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهایی مانند رشد ناوگان یا شدت انتشار برق، سناریو سازی ایزاری ضروری محسوب می شود تا نتایجی واقع گرایانه و مقاوم حاصل شود. سناریوها به پژوهشگر امکان می دهند طیفی از نتایج (خوش بینانه، بدبینانه و میانه) را بررسی کرده و نقاط حساس مدل را شناسایی کنند.

در ادبیات علمی، سه دسته اصلی از سناریوها قابل تفکیک است:

- سناریوهای مرجع (ادامه روند گذشته)،
 - سناریوهای سیاستی (تحت مداخلات دولتی)، و
 - سناریوهای حساسیت (بر پایه تغییر پارامترهای کلیدی).
- در جدول شماره (۲)، تمامی پارامترهای مورد استفاده در سناریوها و نحوه تغییر آنها ارائه شده است.

سیستم را تا ۱۲۶ میلیارد یورو در سال افزایش دهد و مستلزم دو برابر شدن قیمت CO_2 برای سایر بخش ها باشد. در مقابل، تسریع گذار به حمل و نقل پاک، مقرون به صرفه ترین گزینه محسوب می شود؛ این رویکرد امکان تعدیل تدریجی در بخش های گرمایش و صنعت را فراهم کرده، از شکل گیری دارایی های راکد جلوگیری می کند و می تواند تا ۴۳ میلیارد یورو در سال صرفه جویی ایجاد کند.

۳- روش تحقیق

۳-۱- نوع و رویکرد تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش، توصیفی-تحلیلی است. هدف اصلی آن، شناسایی مسیرهای بهینه کربن زدایی در بخش حمل و نقل سبک ایران تا سال ۲۰۵۰ و تحلیل آثار سیاستی ناشی از برقی سازی ناوگان، تغییر در شدت کربن شبکه برق و بهبود بهره وری انرژی است.

۳-۲- داده ها و منابع اطلاعاتی

داده های مورد استفاده در این مطالعه شامل آمار رسمی مربوط به تعداد ناوگان خودروهای سبک، ترکیب سوختی، مصرف سالانه سوخت، پیمایش متوسط سالانه و ضرایب انتشار CO_2 است که از منابع وزارت نفت و شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی ایران، مرکز آمار ایران، آژانس بین المللی انرژی، بانک جهانی و گزارش های پژوهشی IPCC و BP گردآوری شده اند. دوره زمانی مورد بررسی برای داده های تاریخی، سال های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳ (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۴) و برای پیش بینی و شبیه سازی سناریوها، بازه ۲۰۲۴ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفته شده است.

۳-۳- مدل پیش بینی رشد ناوگان

برای پیش بینی رشد تعداد خودروهای سبک و پیمایش سالانه هر خودرو، از مدل سری زمانی خودرگرسیو میانگین متحرک خودکار (Auto-ARIMA) استفاده شده است. این مدل با انتخاب خودکار پارامترهای (p, d, q) بر اساس معیارهای آماری آکائیک و ریشه میانگین مربعات خطا، دقیق ترین الگوی رشد را تعیین می کند. خروجی این مدل شامل برآورد تعداد خودروهای فعال و میزان کل پیمایش سالانه تا سال ۲۰۵۰ است که به عنوان مبنای محاسبه میزان انتشار CO_2 در سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۶- بهینه سازی تابع هدف

به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه ای ناوگان خودرویی ایران تا سال ۲۰۵۰، یک هدف کاهش کربن تعریف شده است. برای بررسی امکان دستیابی به این هدف، دو پایگاه داده شامل اطلاعات مربوط به ترکیب برق تولیدی کشور و ساختار ناوگان خودرو ایجاد شده و با استفاده از آن ها میزان انتشار آینده پیش بینی می شود.

در این مدل، انتشار خودروهای بنزینی بر اساس ضرایب آلاینده گی سوخت و انتشار خودروهای برقی بر اساس ترکیب تولید برق ملی محاسبه می شود و حداقل و حداکثر شدت کربن برق در نظر گرفته شده است. کارایی خودرو و منبع انرژی نقش تعیین کننده ای در مقدار انتشار دارند. تحلیل ترکیب تولید برق ایران تا سال ۲۰۵۰ کمک می کند تا تأثیر واقعی توسعه خودروهای برقی بر کاهش آلاینده گی به صورت دقیق تر مشخص شود. برای ارزیابی سیاست ها، ابتدا یک سناریوی پایه بدون در نظر گرفتن خودروهای برقی تعریف شده است. سپس با اتصال داده های سیستم برق به مدل بهینه سازی، میزان انتشار آلاینده ها در سه سناریوی مرجع، خوش بینانه و بدبینانه محاسبه شده است. الگوریتم بهینه سازی تلاش می کند با شبیه سازی مصرف سوخت و برق تا سال ۲۰۵۰، کم انتشارترین مسیر ممکن را شناسایی کند. این سناریوها قابلیت به روز رسانی بر اساس تغییرات آینده در تولید برق و تقاضای حمل و نقل را دارند.

معادلات هدف (۲) و (۳) با هدف کمینه سازی میزان کل انتشار گازهای گلخانه ای در سناریوهای پیشنهادی مورد استفاده قرار می گیرند.

$$OF: Min \sum_{t=2020}^{2050} EMI_{AF,t} \quad (2)$$

$$EMI_{AF,t} = \sum_{t=2020}^{2050} (EMI_{AF,BEV,t} + EMI_{AF,HEV,t} + EMI_{AF,ICEV,CNG,t} + EMI_{AF,ICEV,gasoline,t}) \quad (3)$$

در این معادلات:

EMI_{AF} میزان انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از ناوگان خودرویی ایران، اندازه گیری شده بر حسب میلیون کیلوگرم دی اکسید کربن در سال ($10^6 \text{ kgCO}_2/\text{year}$).

جدول ۲. تغییر پارامترها در هر سناریو (درصد)

کد سناریو	شدت انتشار برق	حداقل سهم BEV	بهبود کارایی ICE بنزین
SC0	ثابت	۲	+۴
SC1	-۱۶	۱۰	+۸
SC2	+۸	۵	بدون بهبود
SC3	-۲۷	۲۰	+۱۵
SC4	-۱۶	۱۰	+۸

در سناریوی پایه (که به عنوان تداوم وضعیت فعلی در نظر گرفته شده است)، فرض بر ثابت ماندن شدت انتشار برق و افزایش ۴ درصدی کارایی موتورهای احتراقی بنزینی (ICE) است. در سناریوی بدبینانه، افزایش شدت انتشار برق و عدم بهبود در کارایی ICE بنزین مفروض شده است.

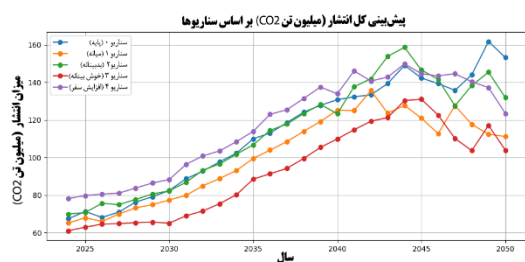
سناریوهای انتخاب شده بر اساس واقعیت های ساختاری ایران طراحی شده اند؛ از جمله وابستگی شدید تولید برق به سوخت های فسیلی، اهداف اعلام شده برای توسعه انرژی های تجدید پذیر و کندی سیاست های الکتریکی سازی بخش حمل و نقل. همچنین، سناریوی افزایش تقاضای سفر با هدف بررسی اثرات رفتاری که ممکن است بخشی از مزایای فناوری های پاک را خنثی کند، در تحلیل گنجانده شده است. این مجموعه سناریوها به عنوان یک چارچوب تحلیلی متوازن عمل می کند تا مسیرهای مختلف گذار ایران به حمل و نقل کم کربن را تا سال ۲۰۵۰ ارزیابی نماید.

۳-۵- محاسبه انتشار دی اکسید کربن

کل انتشار سالانه CO_2 از بخش حمل و نقل سبک طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$E_{total} = \sum_i (N_i \times VKT_i \times EF_i) \quad (1)$$

در این رابطه، N_i تعداد خودروهای نوع i (بر حسب نوع سوخت)، VKT_i پیمایش سالانه هر خودرو و EF_i ضریب انتشار به ازای هر واحد سوخت یا انرژی مصرفی است. برای خودروهای برقی، ضریب انتشار بر اساس شدت کربن شبکه برق (CI_{power}) و مصرف متوسط انرژی (کیلووات ساعت بر ۱۰۰ کیلومتر) محاسبه شده است.



شکل ۱. روند پیش‌بینی کل انتشار در سناریوها (۲۰۲۴ تا ۲۰۵۰)

۲-۴- مقایسه سناریوهای سیاستی کربن‌زدایی

برای بررسی تأثیر سیاست‌های مختلف، پنج سناریو (SC0 تا SC4) در مدل GAMS طراحی و تحلیل شدند. نتایج کمی هر سناریو در جدول شماره (۳) خلاصه شده است.

جدول ۳. میزان کل انتشار (میلیون تن دی‌اکسیدکربن)

تغییرات (درصد)	سال ۲۰۵۰	سال ۲۰۲۴	کد سناریو
۸۵/۶۴	۱۵۳/۱۳	۶۷/۵۰	SC0
۴۵/۹۳	۱۱۱/۱۶	۶۵/۲۲	SC1
۶۱/۸۹	۱۳۱/۸۴	۶۹/۹۴	SC2
۴۲/۷۸	۱۰۳/۹۳	۶۱/۱۴	SC3
۴۵/۲۱	۱۲۳/۴۸	۷۸/۲۷	SC4

همان‌طور که جدول نشان می‌دهد، سناریوی خوش‌بینانه (SC3) بهترین عملکرد را دارد و میزان انتشار CO₂ را حدود ۳۰ درصد نسبت به روند پایه کاهش می‌دهد. این سناریو ترکیبی از سه مداخله کلیدی است: برقی‌سازی سریع ناوگان، پاک‌سازی شبکه برق و بهبود بهره‌وری خودروهای احتراقی.

در مقابل، سناریوی سیاستی میانه (SC1) نشان می‌دهد که بهبود کارایی خودروها به‌تنهایی اثر قابل‌توجهی دارد (کاهش حدود ۱۷ درصدی انتشار)، اما برای دستیابی به اهداف کربن‌زدایی کافی نیست. این یافته اهمیت حیاتی پاک‌سازی شبکه برق پیش از برقی‌سازی گسترده ناوگان را تأیید می‌کند.

ICEV: خودروهای احتراق داخلی که از بنزین، گازوئیل یا سایر سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند.

BEV: وسایل نقلیه تمام‌برقی باتری‌دار.

HEV: خودروهای هیبریدی که از ترکیب موتور احتراق داخلی و موتور برقی برای حرکت استفاده می‌کنند.

۳-۷- تحلیل داده‌ها و ارزیابی سیاستی

پس از اجرای مدل‌ها، نتایج سناریوها از منظر میزان کاهش انتشار، نرخ نفوذ فناوری و نیاز به زیرساخت‌های انرژی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. همچنین، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر در شدت کربن شبکه برق و نرخ رشد خودروهای برقی انجام شده است تا پایداری و اعتبار نتایج بررسی شود. در نهایت، بر اساس یافته‌های کمی حاصل از مدل، پیشنهادهای سیاستی برای کاهش انتشار در افق ۲۰۵۰ تدوین شده است.

۴- نتایج و محاسبات

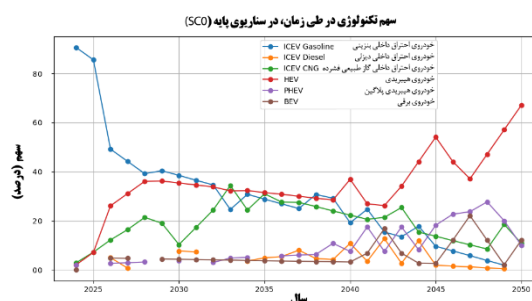
۴-۱- روند تاریخی رشد ناوگان و انتشار CO₂

نتایج حاصل از مدل Auto-ARIMA نشان می‌دهد که تعداد خودروهای سبک در ایران از حدود ۷ میلیون دستگاه در سال ۱۳۸۰ به بیش از ۲۴ میلیون دستگاه در سال ۱۴۰۳ رسیده است. بر اساس روندهای پیش‌بینی‌شده، در صورت تداوم شرایط فعلی، این رقم تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۵۰ میلیون دستگاه خواهد رسید. مصرف سالانه سوخت ناوگان خودروهای سبک نیز از حدود ۲۶ میلیارد لیتر در سال ۱۴۰۳ به بیش از ۴۲ میلیارد لیتر در افق ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. به تبع این رشد، میزان کل انتشار CO₂ در بخش حمل‌ونقل سبک در سناریوی پایه (SC0) از حدود ۶۷ میلیون تن در سال ۲۰۲۴ به بیش از ۱۵۳ میلیون تن در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید؛ به عبارت دیگر، افزایشی معادل ۸۴ درصد طی بازه‌ای ۲۶ ساله. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بدون مداخلات سیاستی و فناورانه مؤثر، ایران در زمره کشورهای قرار خواهد گرفت که بیشترین رشد انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بخش حمل‌ونقل تجربه می‌کنند. در شکل شماره (۱)، روند تغییرات انتشار CO₂ به تفکیک سناریوهای مختلف ارائه شده است.

۳-۴- ترکیب سهم هر فناوری در سناریوهای مختلف

۳-۴-۱- سناریو پایه (SC0)

تغییرات در سهم هر یک از فناوری‌ها برای سناریوی پایه در شکل شماره (۲) ارائه شده است.

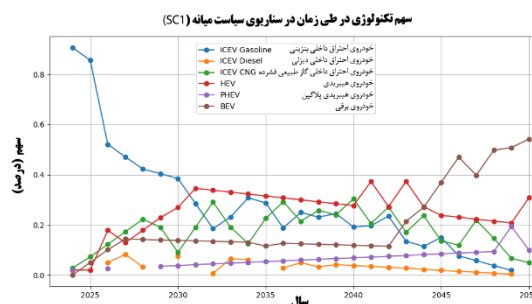


شکل ۲. تغییر سهم فناوری‌های خودرو در سناریوی پایه (SC0)

در سال ۲۰۲۴، خودروهای بنزینی با سهم حدود ۹۰ درصد بر ناوگان حمل و نقل سبک ایران تسلط دارند، اما این سهم تا سال ۲۰۴۹ به کمتر از ۲ درصد کاهش می‌یابد و جای خود را به فناوری‌های پاک‌تر می‌دهد. سهم خودروهای دیزلی نیز از ۲,۳ درصد به ۰,۴ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که خودروهای هیبریدی (HEV) رشد ثابتی داشته و به تدریج نقش مهمی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی پیدا می‌کنند. خودروهای پلاگین هیبریدی (PHEV) از ۲ درصد در ۲۰۲۴ به ۲۰ درصد در ۲۰۴۹ افزایش می‌یابند و خودروهای تمام‌برقی (BEV) نیز با رشدی قابل توجه، از ۰,۰۰۰۶ درصد به حدود ۲ درصد می‌رسند. این روند نشان‌دهنده گذار تدریجی ناوگان ایران به سمت حمل و نقلی پاک‌تر و پایدارتر است.

۳-۴-۲- سناریوی سیاستی میانه (SC1)

در شکل شماره (۳)، سهم هر یک از فناوری‌ها برای سناریوی سیاستی میانه ارائه شده است.



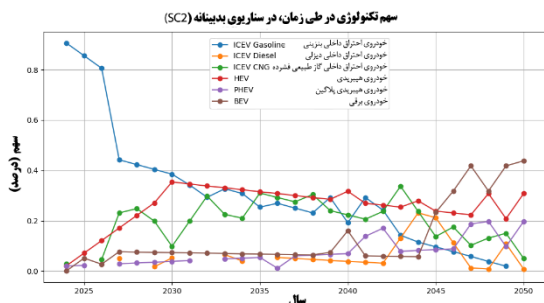
شکل ۳. سهم تکنولوژی خودرو در سناریو سیاست میانه (SC)

در این سناریو (SC1)، تا سال ۲۰۴۹ سهم خودروهای بنزینی به حدود ۱ درصد کاهش می‌یابد که بیانگر جایگزینی گسترده آن‌ها با خودروهای هیبریدی و برقی است. خودروهای دیزلی با سهم اولیه ۲,۳ درصد، سهم اندکی دارند و در بلندمدت تقریباً حذف می‌شوند. خودروهای گاز طبیعی فشرده (CNG) که در ابتدا سهمی حدود ۲,۹ درصد دارند، در میانه دوره تا ۳۰ درصد رشد می‌کنند و سپس در پایان بازه زمانی به ۵ درصد کاهش می‌یابند، که نشان‌دهنده نقش موقتی آن‌ها به عنوان سوخت جایگزین است. خودروهای هیبریدی (HEV) رشد باثباتی دارند و به عنوان عامل کلیدی در کاهش انتشار عمل می‌کنند، در حالی که خودروهای پلاگین هیبریدی (PHEV) از ۲ درصد در ۲۰۲۴ به حدود ۱۹ درصد در ۲۰۴۹ می‌رسند.

در نهایت، خودروهای تمام‌برقی (BEV) با رشد چشمگیر از ۰,۰۰۰۶ درصد به بیش از ۵۰ درصد تا سال ۲۰۴۹ می‌رسند و به فناوری غالب ناوگان کشور تبدیل می‌شوند.

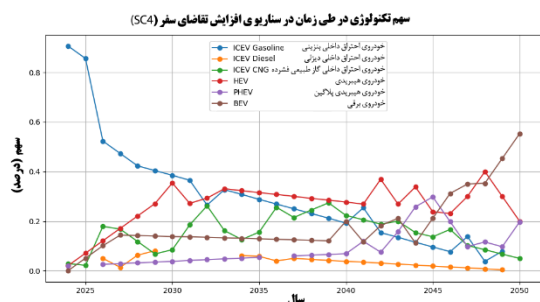
۳-۴-۳- سناریو بدبینانه (SC2)

در شکل شماره (۴)، سهم هر یک از فناوری‌ها برای سناریوی بدبینانه ارائه شده است.



شکل ۴. سهم فناوری‌های خودرو در سناریوی بدبینانه (SC2)

در این سناریو، خودروهای بنزینی بین سال‌های ۲۰۲۶ تا ۲۰۳۳ با سرعت زیادی جای خود را به فناوری‌های پاک‌تر می‌دهند و تا سال ۲۰۵۰ سهم آن‌ها به حدود ۱,۹ درصد کاهش می‌یابد. خودروهای دیزلی نیز با سهم اندک خود تقریباً حذف می‌شوند و در پایان دوره تنها ۰,۸ درصد باقی می‌مانند. خودروهای گاز سوز (CNG) در میانه دوره رشد می‌کنند، ولی در نهایت با سهم ۵ درصدی به عنوان سوخت مکمل باقی می‌مانند. خودروهای هیبریدی (HEV) از ۲,۱ درصد در سال‌های ابتدایی به حدود ۳۰ درصد در ۲۰۵۰ می‌رسند و نقش مهمی در کاهش انتشار ایفا می‌کنند، در حالی که خودروهای تمام‌برقی



شکل ۶. سهم فناوری‌های خودرو در سناریوی افزایش سفر (SC4)

خودروهای گاز طبیعی (CNG) ابتدا سهمی حدود ۲ تا ۳ درصد دارند، در میانه دوره تا حدود ۲۷ درصد افزایش می‌یابند و در پایان دوباره به ۵ درصد کاهش می‌یابند. در مقابل، خودروهای هیبریدی (HEV) با رشد پیوسته تا ۲۰ تا ۴۰ درصد افزایش می‌یابند، خودروهای پلاگین هیبریدی (PHEV) تا حدود ۱۹ تا ۲۰ درصد در سال ۲۰۵۰ رشد می‌کنند و خودروهای تمام‌برقی (BEV) با افزایش چشمگیر، بیش از ۵۵ درصد از کل ناوگان را تشکیل می‌دهند؛ این روند نشان‌دهنده گذار قطعی به سمت فناوری‌های پاک و برقی است.

۴-۴- مصرف انرژی در سناریوهای مختلف

در سال پایه (۲۰۲۴)، حدود ۹۶ درصد انرژی مصرفی بخش حمل‌ونقل سبک از بنزین تأمین می‌شود و سهم برق و CNG در مجموع کمتر از ۴ درصد است. در جدول شماره (۴) سهم هر فناوری در سال ۲۰۵۰ ارائه شده است:

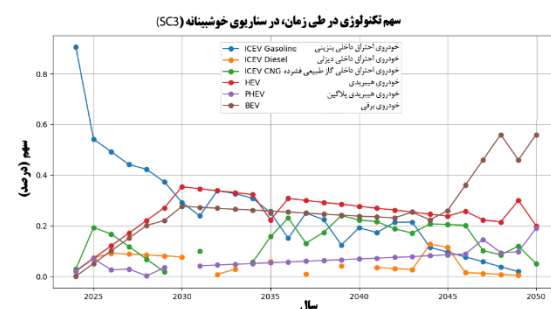
جدول ۴. سهم هر فناوری در سال ۲۰۵۰ (درصد)

کد سناریو	مصرف کل انرژی (معادل میلیارد لیتر بنزین)	انتشار کل (میلیون تن)	تغییر نسبت به پایه (درصد)
SC0	۴۲	۲۳۰	-
SC1	۳۹	۲۰۸	-۹/۶
SC2	۳۴	۱۶۰	-۳۰/۴
SC3	۳۶	۱۷۶	-۲۳/۵
SC4	۳۷	۱۹۱	-۱۷

(BEV) با رشدی چشمگیر از ۰,۰۰۰۶ درصد به ۴۳,۸ درصد تا سال ۲۰۵۰ می‌رسند و به فناوری غالب ناوگان تبدیل می‌شوند.

۴-۳-۴- سناریوی خوش‌بینانه (SC3)

سهم هر یک از فناوری‌ها برای سناریوی خوش‌بینانه در شکل شماره (۵) ارائه شده است.



شکل ۵. سهم فناوری‌های خودرو در سناریوی خوش‌بینانه (SC3)

در سناریوی خوش‌بینانه، سهم خودروهای بنزینی با کاهش چشمگیر تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۱ درصد می‌رسد و خودروهای دیزلی نیز با نوسانات اندک، در نهایت به ۰,۴ درصد کاهش می‌یابند. خودروهای گازسوز (CNG) در میانه دوره با رشد موقت تا حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد نقش جایگزین موقت دارند، اما در پایان به ۵ درصد محدود می‌شوند. سهم خودروهای هیبریدی (HEV) از ۲ درصد در ۲۰۲۴ به حدود ۳۰ درصد در ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد و خودروهای پلاگین هیبریدی (PHEV) نیز با رشد آهسته‌تر به حدود ۱۹ درصد می‌رسند. در نهایت، خودروهای تمام‌برقی (BEV) بیشترین رشد را تجربه کرده و تا سال ۲۰۵۰ حدود ۵۶ درصد از کل ناوگان را تشکیل می‌دهند که نشان‌دهنده گذار سریع به سمت فناوری‌های کم‌کربن است.

۴-۳-۵- سناریوی افزایش سفر (SC4)

سهم هر یک از فناوری‌ها برای سناریوی افزایش تقاضای سفر (مانند سفرهای نروزی یا تابستانی) در شکل شماره (۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی SC4، خودروهای بنزینی که در سال ۲۰۲۴ حدود ۹۰ درصد از ناوگان را تشکیل می‌دهند، با کاهش مداوم تا سال ۲۰۵۰ به حدود ۸ درصد می‌رسند و خودروهای دیزلی نیز تقریباً حذف شده و سهم آن‌ها به کمتر از ۱ درصد کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سناریوی خوش‌بینانه (SC3) تا سال ۲۰۵۰ سهم بنزین به کمتر از ۲ درصد، سهم برق به ۷۰ درصد و سهم CNG به ۱۲ درصد می‌رسد. در این حالت، میزان مصرف بنزین سالانه حدود ۸ میلیارد لیتر کمتر از سناریوی پایه است که معادل صرفه‌جویی اقتصادی سالانه بیش از ۶ میلیارد دلار در واردات یا یارانه سوخت خواهد بود.

۴-۵- تأثیر شدت کربن شبکه برق

تحلیل حساسیت نشان داد که کاهش شدت کربن شبکه برق از ۰,۶۰ به ۰,۴۰ kgCO_2/kWh به‌تنهایی موجب کاهش حدود ۱۲ درصدی انتشار کل CO_2 از ناوگان برقی می‌شود. در صورتی که این کاهش با رشد سهم خودروهای برقی همراه شود، اثر هم‌افزایی آن می‌تواند به بیش از ۲۰ درصد برسد. این یافته‌ها همسو با نتایج هوا و همکاران (۲۰۱۵) و آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۲) است که تأکید می‌کنند پاکی شبکه برق، عامل تعیین‌کننده در موفقیت راهبرد برقی‌سازی است.

۴-۶- اثر برقی‌سازی بر تقاضای برق

نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در سناریوی خوش‌بینانه، با افزایش سهم خودروهای برقی به ۷۰ درصد، تقاضای اضافی برق حدود ۳۲ تراوات‌ساعت در سال ۲۰۵۰ خواهد بود. این مقدار معادل ۸ درصد از تولید کل برق کشور در آن سال است. بر این اساس، اگر افزایش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر متناسب با این رشد انجام نشود، بخشی از صرفه‌جویی کربنی ممکن است از بین برود. بنابراین، سیاست‌گذاری هم‌زمان در دو بخش حمل و نقل و انرژی ضروری است.

۴-۷- تحلیل حساسیت سیاست‌ها

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد:

- افزایش نرخ جایگزینی سالانه خودروهای برقی از ۲ درصد به ۳ درصد، میزان انتشار را تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد.
- تأخیر در پاک‌سازی شبکه برق به مدت ۱۰ سال می‌تواند اثر مثبت سناریوهای سیاستی را تا ۸ درصد کاهش دهد.
- بهبود بهره‌وری سوخت هر ۱۰ درصد، حدود ۵ درصد کاهش در انتشار ایجاد می‌کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت تداوم روند فعلی، انتشار CO_2 در بخش حمل و نقل سبک ایران تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۸۰ درصد افزایش خواهد یافت و ناوگان خودرویی کشور به یکی از منابع اصلی انتشار در بخش انرژی تبدیل می‌شود. این یافته با نتایج مطالعات هوا و همکاران (۲۰۱۵) و آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۲) همخوان است که بیان می‌کنند در کشورهای در حال توسعه، در صورت نبود مداخله ساختاری، رشد ناوگان شخصی می‌تواند سیاست‌های کربن‌زدایی را ناکام سازد. در مقایسه با پژوهش ژنگ و همکاران (۲۰۲۰) در چین، مشخص شد که سرعت نفوذ خودروهای برقی در ایران، حتی در سناریوی خوش‌بینانه، پایین‌تر از تجربه کشورهای دارای سیاست فعال است. دلیل اصلی این تفاوت، شدت کربن بالای شبکه برق و فقدان سیاست حمایتی پایدار است. همچنین یافته‌ها نشان داد که بهبود بهره‌وری ناوگان احتراقی می‌تواند در کوتاه‌مدت کاهش نسبی در انتشار ایجاد کند، اما مطابق با نتایج پژوهش دو اچ و همکاران (۲۰۲۰)، اگر این بهبود با برقی شدن هم‌زمان نباشد، در میان‌مدت به اثر جبرانی منجر شده و افزایش پیمایش، بخشی از دستاوردهای فناوریانه را خنثی می‌کند. مطابق با تحلیل حساسیت این پژوهش، زمان‌بندی پاک‌سازی شبکه برق متغیر تعیین‌کننده موفقیت سناریوهای سیاستی است؛ این نکته در گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۲۲) نیز برجسته شده است که «برقی‌سازی بدون برق پاک، صرفاً جابجایی محل انتشار از جاده به نیروگاه است». افزون بر این، گنجاندن سناریوی رفتاری (SC4) در این تحقیق نوآوری مهمی به شمار می‌رود؛ زیرا اغلب مطالعات موجود در ایران صرفاً به توسعه فناوری پرداخته و تغییرات رفتاری، نظیر افزایش سفر یا تقاضای تردد بین‌شهری، را لحاظ نمی‌کنند. مطابق با نتایج هوا و همکاران (۲۰۱۵)، نوسانات رفتار سفر می‌تواند تا ۲۰ درصد انتشار نهایی را تغییر دهد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در صورت تداوم روند موجود و نبود مداخلات سیاستی قوی، انتشار دی‌اکسیدکربن در بخش حمل و نقل سبک ایران تا سال ۲۰۵۰ با رشدی قابل توجه مواجه خواهد شد و این بخش به یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای کشور تبدیل می‌شود. تحلیل سناریوها نشان داد که برقی‌سازی ناوگان به‌تنهایی قادر به ایجاد کاهش معنادار

۶- مراجع

-برخوردار، عادل، سادات و ورهرامی، ویدا (۱۴۰۳). ارزیابی تاثیر جایگزینی سوخت در بخش حمل و نقل بر انتشار گازهای گلخانه‌ای. *نشریه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو*، ۱۱(۱)، ۹۹-۹۰.

-حسینی، میثم (۱۳۹۹). مدل و الگوریتم حل مسئله مکان‌یابی جایگاه‌های سوخت برای خودروهای دوگانه‌سوز به منظور مینیمم کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای. *پژوهشنامه حمل و نقل*، ۱۷(۳)، ۱۴۲-۱۲۱.

-مرکز آمار ایران. (۱۴۰۲). نتایج سرشماری عمومی و گزارش آمار ناوگان حمل و نقل جاده‌ای ایران.

-ناظمیان، حمید و حقدوست، احسان (۱۳۹۱). بررسی امکان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا با استفاده از خودروهای برقی-بنزینی (الکتروهیبرید). *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، ۱(۴)، ۱۹۶-۱۶۹.

-مؤسسه مطالعات بین‌المللی انرژی (۱۳۹۸). چشم‌انداز انرژی ایران در افق ۲۰۴۰. تهران.

-وزارت نفت (۱۴۰۰). گزارش سالانه شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران. تهران: معاونت برنامه‌ریزی و نظارت.

وزارت نیرو. (۱۴۰۱). آمار ترازنامه انرژی سال ۱۴۰۱.

-BP. (2024). Statistical review of world energy 2024. *BP p.l.c.*

-Changchun, L., Zhen, Y., & Xia, H. (2022). Transportation decarbonization pathways in developing economies: Policy and technology synergies. *Energy Policy*, 164, 112-125. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112125>

-Du, H., Chen, Z., Zhang, Z., & Southworth, F. (2020). The rebound effect on energy efficiency improvements in China's transportation sector: A CGE analysis. *Journal of Management Science and Engineering*, 5(4), 249-263. doi.org/10.1016/j.jmse.2020.05.004

-Emodi, N. V., Okereke, C., Abam, F. I., Diemuodeke, O. E., Owebor, K., & Nnamani, U. A. (2022). Transport sector decarbonisation in the Global South: A systematic literature review. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100925. doi.org/10.1016/j.esr.2022.100925

-European Commission. (2021). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial

در انتشار نیست، مگر آنکه هم‌زمان شدت کربن شبکه برق نیز کاهش یا بد. بهبود بهره‌وری ناوگان احتراقی می‌تواند در کوتاه‌مدت نقش تثبیت‌کننده‌ای ایفا کند، اما بدون گذار ساختاری به سمت فناوری‌های کم‌کربن، اثر آن محدود خواهد بود. سناریوی خوش‌بینانه، که ترکیبی از سیاست‌های برقی سازی، پاک‌سازی شبکه برق و ارتقای کارایی انرژی را دربر می‌گیرد، بیشترین کاهش انتشار را محقق می‌سازد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکردهای تک‌بعدی در مدیریت انتشار ناکافی بوده و تنها از طریق هم‌افزایی سیاست‌های کربن‌زدایی در بخش حمل و نقل با سیاست‌های بخش انرژی می‌توان به نتایج مؤثر، پایدار و گذار به حمل و نقل کم‌کربن دست یافت. همچنین، نتایج سناریوی رفتاری (SC4) نشان داد که رشد تقاضای سفر و افزایش پیمایش سالانه می‌تواند بخشی از دستاوردهای فناوریانه را خنثی کند. بنابراین، مدیریت تقاضای سفر نیز باید به‌عنوان یک مؤلفه اساسی در سیاست‌گذاری لحاظ شود.

با توجه به یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری در حمل و نقل سبک ایران به صورت یک بسته سیاستی جامع و مرحله‌ای طراحی شود:

- نوسازی ناوگان: نوسازی سالانه ناوگان با اولویت خودروهای برقی و هیبریدی و هدایت یارانه سوخت به سمت فناوری‌های پاک ضروری است.

- پاک‌سازی شبکه برق: کاهش پیوسته شدت کربن شبکه برق با توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود بازده نیروگاه‌ها باید قانونی شود تا انتشار از جاده به نیروگاه منتقل نشود.

-تأمین مالی و زیرساخت‌ها: ایجاد صندوق ملی حمل و نقل پاک با مشارکت دولت و بخش خصوصی منابع مالی لازم برای توسعه زیرساخت شارژ، مشوق‌های خرید و تحقیق و توسعه را فراهم می‌کند.

- قیمت‌گذاری هوشمند و مدیریت تقاضا: قیمت‌گذاری هوشمند انرژی و عوارض مبتنی بر پیمایش می‌تواند رفتار مصرف‌کننده را بهینه کند.

-ارتقای آگاهی و سیاست‌های تلفیقی: ارتقای آگاهی عمومی، توسعه حمل و نقل اشتراکی برقی و تلفیق سیاست‌های انرژی و حمل و نقل در قالب راهبرد ملی، شرط لازم برای گذار پایدار به ناوگان کم‌کربن تا سال ۲۰۵۰ است.

- Patil, G., Pode, G., Diouf, B., & Pode, R. (2024). Sustainable decarbonization of road transport: Policies, current status, and challenges of electric vehicles. *Sustainability*, 16(18), 8058. doi.org/10.3390/su16188058
- Requia, W. J., Mohamed, M., Higgins, C. D., Arain, A., & Ferguson, M. (2018). How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, *Greenhouse Gas Emissions and Human Health. Atmospheric Environment*, 185, 64–77. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.041
- Solaymani, S., & Botero, J. (2025). Reducing carbon emissions from transport sector: Experience and policy design considerations. *Sustainability*, 17(9), 3762. doi.org/10.3390/su17093762
- United Nations Environment Programme. (2019). Emissions gap report 2019.
- World Bank. (2023, June 1). Electric mobility & power systems. *Open Knowledge Repository*.
- Zeyen, E., Kalweit, S., Victoria, M., & Brown, T. (2025). Shifting burdens: How delayed decarbonisation of road transport affects other sectoral emission reductions. *Environmental Research Letters*, 20(4), 044044. doi.org/10.1088/1748-9326/abf123
- Zheng, Y., He, X., Wang, H., & Wang, M. (2020). Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(5), 779–798. doi.org/10.1007/s11027-019-09890-5
- vehicles in line with the Union's increased climate ambition (COM(2021) 556 final).
- Ferguson, M. M., Sharmin, A., Camur, M. C., & Li, X. (2025). A review on intermodal transportation and decarbonization: An operations research perspective. *arXiv preprint arXiv:2503.12322*. doi.org/10.48550/arXiv.2503.12322
- Ghisolfi, V., Tavasszy, L. A., Correia, G. H. d. A., Chaves, G. d. L. D., & Ribeiro, G. M. (2022). Freight transport decarbonization: A systematic literature review of system dynamics models. *Sustainability*, 14(6), 3625. doi.org/10.3390/su14063625
- Glyniadakis, S., & Balestieri, J. A. P. (2023). Brazilian light vehicle fleet decarbonization scenarios for 2050. *Energy Policy*, 181, 113682. doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113682
- Huo, H., Cai, H., Zhang, Q., Liu, F., & He, K. (2015). Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and theUS. *AtmosphericEnvironment*, 108,107–116. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.041
- IEA. (2021). World Energy Outlook 2021. International Energy Agency.
- IEA. (2022). Global EV Outlook 2022. International Energy Agency.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Vol. 2: *Energy*. Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. *Cambridge University Press*.

Optimal Policies for Reducing Carbon Dioxide Emissions in Iran's Light Vehicle Fleet

Sahar Rafiei, M.Sc. Grad., Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.

Zeinolabedein Sadeghi, Associate Professor, Department of Economics, Faculty of Management and Economics, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Kourosh Qaderi, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

E-mail: z. sadeghi@uk.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The light-duty transportation sector in Iran, as one of the main sources of greenhouse gas emissions, plays a significant role in increasing carbon dioxide (CO₂) levels and intensifying climate change. The sector's heavy dependence on fossil fuels, outdated engine technologies, and the high carbon intensity of the power grid have led to a rising trend in emissions over recent decades. The aim of this study is to analyze optimal decarbonization pathways for Iran's light-duty vehicle fleet through 2050. To achieve this goal, time series modeling (Auto-ARIMA) and policy scenario simulations were conducted using the GAMS environment, in which five scenarios—ranging from “business as usual” to “optimistic policies”—were designed and examined. The results indicate that if the current trend continues, the number of light vehicles in the country will exceed 50 million units by 2050, and CO₂ emissions will more than double. In contrast, under the optimistic scenario—which assumes an increase in the share of electric and hybrid vehicles to 20%, a 30% improvement in the fuel efficiency of combustion vehicles, and a reduction in the carbon intensity of the power grid from 0.60 to 0.40 kg CO₂ per kWh—total fleet emissions would decline by more than 30%. The findings emphasize that achieving decarbonization targets requires comprehensive policies, including the development of clean technologies, reform of the power generation structure, fleet modernization, and the design of economic incentive mechanisms for users. These results can serve as a basis for national policymaking toward achieving sustainable and low-carbon transportation in Iran.

Keywords: Decarbonization, Electric Vehicles, Electricity Grid, Policy Scenarios, Light Transportation