تحلیل سناریوهای ترکیب سوخت ناوگان حمل‌ونقل شهری و اثرات آن بر مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های هوا در کلان‌شهر مشهد با رویکرد مدل‌سازی LEAP

مقاله علمی – پژوهشی

ابوالفضل یاری، دانشجوی دکتری، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

*خسرو اشرفی (نویسنده مسئول)، استاد، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدعلی زاهد، استادیار، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: **khashrafi@ut.ac.ir**

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

صفحه ۵۰۲-۴۸۱

چکیده

رشد سریع جمعیت، افزایش تقاضای حمل‌ونقل و وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی، منجر به تشدید آلودگی هوا و مصرف انرژی در کلان شهرهای ایران شده است. این پژوهش با هدف ارزیابی و مقایسه سناریوهای مختلف ترکیب سوختی ناوگان حمل‌ونقل شهر مشهد تا افق ۲۰۵۰، از مدل‌سازی LEAP بهره گرفته است. در این مطالعه، سه سناریوی تداوم روند موجود (BAU)، گذار تدریجی به سوخت‌های پاک (CT) و تحول سبز هدفمند (TGT) طراحی و آثار آن‌ها بر مصرف انرژی و انتشار ذرات معلق $PM_{2.5}$ تحلیل شد. نتایج نشان داد در سناریوی BAU، وابستگی به بنزین و گازوئیل استمرار داشته و مصرف انرژی و آلودگی هوا افزایش می‌یابد. در مقابل، سناریوی TGT با تمرکز بر جایگزینی خودروهای برقی و هیبریدی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و بهبود کیفیت سوخت، منجر به کاهش ۵۰ درصدی انتشار $PM_{2.5}$ می‌شود. تحلیل حساسیت متغیرهای کلیدی همچون نرخ رشد اقتصادی، سهم برق‌سازی و بهره‌وری سوخت نشان داد که سیاست‌های بهبود بهره‌وری انرژی و توسعه ناوگان حمل‌ونقل پاک، نقشی حیاتی در کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت تدوین راهبردهای جامع حمل‌ونقل پایدار و حمایت از فناوری‌های نوین انرژی در کلان‌شهرها تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی مصرف انرژی، ذرات معلق $PM_{2.5}$، ناوگان حمل‌ونقل شهری، مدل‌سازی LEAP، حمل‌ونقل پایدار

۱- مقدمه

شهرنشینی باعث پویایی آلودگی و تغییر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های طبیعی می شود (Williams et al., 2009). پدیدهٔ شهرنشینی در کشور ایران پیامدهای منفی از جمله آلودگی هوا را به دنبال داشته است. آلودگی هوا تعاریف مختلفی دارد. طبق یکی از این تعاریف، آلودگی هوا به معنی وجود یک یا چند آلاینده در هواست که زندگی انسان، گیاه یا حیوانات را با خطر مواجه می‌کند. تأثیرات افزایش آلودگی هوا می‌تواند باعث مشکلات حاد ازجمله حمله‌های مغزی و قلبی شود (Chang et al., 2007). آلودگی هوا یک نگرانی روبه‌رشد در سراسر جهان است و باتوجه‌به مشکلات فراوانی

که ایجاد کرده است به یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی تبدیل شده است. همچنین به‌عنوان چهارمین عامل در مرگ‌ومیر و بیماری‌های زودرس شناخته می شود (Erickson, 2017). برر سی که تو سط سازمان جهانی بهدا شت روی ۴۳۰۰ شهر انجام شـد، نشـان می‌دهد که ۸۰ درصـد جمعیت شـهری در شـهرهایی زندگی می‌کنند که کیفیت هوا پایین‌تر از مقادیر اسـتاندارد اسـت (WHO, 2018). آلودگی هوا به‌ویژه در کلان‌شـهرهای ایران، یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی اسـت که بر سـلامت انسـان تأثیر می‌گذارد. بررسـی کیفیت هوای تهران (پایتخت ایران) خطر مرگ‌ومیر مرتبط با ذرات را ۴۰۰۰ مرگ در سـال در اثر این آلاینـده نشـان داد (Shafipour, Ardestani and Sarraf, 2007). انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتر توسط مناطق شهری و صنعت شهری ایجاد می‌شود. انواع این نوع آلاینده‌های قابل‌انتشـار در هوای کلان‌شـهرهایی مانند تهران عبارت‌اند از ذرات معلق (PM_{10}, $PM_{2.5}$)، ازن (O_3)، مونوکسید کربن(CO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO_2)، دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، هیدروکربورها (CxHy)، ترکیبات آلی فرار (VOCs) که هر یک از این آلاینده ها دارای اثرات مخرب خاص خود هسـتند. منابع آلاینده هوا را می‌توان به دودسـته تقسیم نمود که عبارت‌اند از:

منابع آلاینده سـیار یا متحرک: خودروها و وسـایل نقلیه مهم‌ترین منبع آلاینده‌های سیار و متحرک هستند که آلاینده ها را انتشار می‌دهند.

منابع آلاینده ثابت: این منابع شـامل نیروگاه‌ها، کارگاه‌های ریخته‌گری، صنعت سیمان، کوره‌های آهک،کوره‌های آجرپزی، کوره‌های گچ، صنایع غذایی و دارویی، صنایع شیمیایی، صنایع فلزی، صـنایع غیرفلزی، صـنایع برق و الکترونیک، صـنایع نساجی، چرم و منابع خانگی و تجاری هستند. در میان منابع آلایندهٔ ثابت، نیروگاه‌ها، صنایع و منابع خانگی و تجاری نقش به سـزایی در آلودگی هوای شـهر دارند (Fahimifar and Afshar, 2010)

بیش‌ترین سـهم از نظر تعـداد در منـابع متحرک مربوط به خودروهای شـخصـی اسـت که با حدود ۳ میلیون خودرو، ۷۲ درصـد کل منابع متحرک تهران را تشـکیل می‌دهند. موتور سیکلت‌ها نیز با حدود ۷۵۰ هزار دستگاه، ۱۸ در صد از کل منابع متحرک تهران را تشـکیل داده‌اند (Tehran Air Pollution Emission Inventory, 2015). حمل‌ونقل از اساسی‌ترین ارکان اقتصادی هر کشور است که نقش کلیدی در توسعهٔ پایدار آن کشور و سهم به سزایی در ارزش‌افزودهٔ ملی و رشـد تولید آن جامعه دارد (Achour and Belloumi, 2016). لذا تحقیقات گسترده‌ای باهدف بهینه سازی و افزایش راندمان مصـرف انرژی در این بخش در حال انجام اسـت. علی‌رغم تمام تحقیقات و تلاش‌های انجام شـده در این زمینه؛ منابع نفتی تأمین‌کنندهٔ درصـد قابل‌توجهی در حدود ۹۵ درصـد انرژی مورد استفاده در بخش حمل‌ونقل است. سهم این بخش در ایران رشدی روزافزون دارد و از ۲۸۹ میلیون بشکه در سال ۱۳۹۰ بـه ۳۵۷ میلیون در سـال ۱۳۹۹ رسـیده اسـت (International Energy Agency, 2018). در دو دههٔ گذشـته، بخش حمل‌ونقل ایران سـهم بالایی از مصـرف انرژی داشته است به‌طوری که پس از بخش‌های مسکونی و تجاری، این بخش، دومین مصـرف‌کنندهٔ بزرگ انرژی نهایی و اولین مصرف‌کنندهٔ فرآورده‌های نفتی را به خود اختصاص داده است. طبق آمار شـرکت ملی پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران در سال ۱۳۹۳، حمل‌ونقل جاده‌ای و به‌طور خاص، وسایل نقلیهٔ سبک مسئول بیش از ۹۹ درصد از کل مصرف بنزین در بخش حمـل‌و نقـل بوده‌انـد (IFCO, 2012; MOE, 2014; NIORDC, 2014). علاوه بر این، حدود ۳۱ درصـد از کل مصـرف انرژی (معادل ۱۵۸,۷ میلیون بشـکه نفت) در سـال ۱۳۹۳ به بخش حمل‌ونقل اختصـاص یافت که مسئول انتشـار ۴۹,۶۹٪، ۷۹,۷۶٪، ۲۴,۹۳٪، ۹۷٪ و ۴۵٪ از کل انتشـارات NOx، SPM، CO_2، CO و SOx است (MOE, 2014; NIORDC, 2014).

پیش‌بینی‌ها حاکی از این موضوع است که ۶۳٪ افزایش تقاضای مصرف نفت تا سال ۲۰۳۰ مربوط به بخش حمل‌ونقل است که بخش اعظم این افزایش تقـاضـا مربوط بـه کشـورهـای درحال‌توسعه است (International Energy Agency, 2021). علاوه‌بر این، عدم وجود سـوخت‌های زیسـتی باید با ارزیابی و درنظرگرفتن این خانواده از سـوخت‌ها برطرف شـود تا ناوبری حمل‌ونقل جاده‌ای از ویژگی های مطلوب و متعدد آن‌ها استفاده کند.

براسـاس مطالعات، خودروهای هیبریدی که از موتورهای الکتریکی و احتراق داخلی برای نیروی محرکه استفاده می‌کنند، درحال‌حاضـر راه‌حلی برای مشـکل وابسـتگی به سـوخت‌های سـنتی، انتشـار درحال رشـد CO_2 و سـایر نگرانی‌های زیست‌محیطی ارائه می‌کنند (Adnan et al., 2017).

در نتیجه، اصلاح مصرف انرژی الگو در این بخش از اهمیت بالایی برخوردار است که می‌تواند در چندین زیربخش مانند زیرساخت‌ها، ساختار حمل‌ونقل جاده‌ای و سوخت‌ها و فناوری‌های جدید بررسی شود (Sehatpour and kazemi, 2017).

وضعیت حمل‌ونقل در سبد انرژی و تأثیر آن بر انتشار آلایندگی‌ها با رویکرد سوخت‌های جایگزین

در سبد مصرف نهایی انرژی کشور ایران حمل‌ونقل سهم زیادی را به خود اختصاص داده است. اگرچه سهم فزاینده بخش حمل‌ونقل در مصرف انرژی بیانگر رشد در این بخش است، اما متأسفانه این رشد مصرف روندی نامعقول و بی‌رویه یافته است؛ چنانچه این روند به حرکت خود ادامه دهد تخمین زده می‌شود که ایران در دهه آینده به یک واردکننده بزرگ فرآورده‌های نفتی تبدیل شود. ازاین‌رو نیاز به سوخت‌های جایگزین برای کاهش آلاینده‌های مضر و کربن اجتناب‌ناپذیر است؛ بنابراین **سوخت‌های جایگزین** که امروزه در دنیا مورد توجه و بعضاً مورداستفاده قرار دارد به شرح ذیل است:

سوخت‌های زیستی (بایوفیل): سوخت‌هایی نظیر متانول ،اتانول و بایو دیزل. از مزایای سوخت‌های زیستی می‌توان به قیمت پایین‌تر تولید آن نسبت به بنزین، عدم وابستگی به نفت به‌عنوان مواد اولیه و تجدیدپذیری اشاره کرد و از معایب آن می‌توان به تولید انرژی پایین‌تر نسبت به سوخت‌های فسیلی، هزینه بالای احداث کارخانه‌های تولیدی، مصرف آب بالا و ایجاد فضای زیاد برای کشت محصولات کشاورزی و تهدید امنیت غذایی اشاره کرد.

گاز طبیعی: از مزایای خودروهای گازسوز می‌توان به هزینه سوخت پایین‌تر نسبت به خودروهای بنزینی، کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی و گازهای گلخانه‌ای و فرایند تولیدی ساده‌تر و به صرفه‌تر نسبت به بنزین اشاره کرد و از معایب آن می‌توان به استهلاک موتور و قطعات مصرفی، اشغال حجم زیادی از صندوق خودرو که سبب ایجاد فشار به خودرو می‌گردد، آسیب‌پذیری بالا در هنگام تصادف و هزینه بالای احداث ایستگاه‌های سوخت‌گیری اشاره نمود.

سوخت هیدروژنی: این سوخت با استفاده از ترکیب هیدروژن و اکسیژن محیط، باعث تولید برق می‌شود و منجر به حرکت موتورهای الکتریکی اتومبیل شده توان آن را تأمین می‌کند. از معایب آن این است که برای هیدروژن مانند بنزین به منابع بزرگی در جایگاه‌های سوخت‌رسانی لازم است. نشت هیدروژن قابلیت انفجار و آتش‌سوزی دارد و برای محیط‌زیست مضر است و از مزایای آن این است که هیدروژن به دلیل این‌که سبک‌تر از هواست به‌سرعت بخار شده و آثار مخربی روی محیط‌زیست ندارد.

خودروهای برقی: به خودرویی گفته می‌شود که از باتری‌های قابل‌شارژ به‌عنوان منبع انرژی و از موتور الکتریکی به‌عنوان نیروی محرکه استفاده می‌کند. از مزایای خودروهای برقی می‌توان به کاهش قابل‌ملاحظهٔ آلودگی هوای محلی، کاهش گازهای گلخانه‌ای، کم‌صدایی، قابلیت شارژ در مناطق عمومی و منازل و کاهش وابستگی به نفت و پیمایش حداکثر ۵۰۰ کیلومتر با شارژ کامل، اشاره کرد و از معایب آن نیز می‌توان به زمان شارژ طولانی، برد کم‌تر نسبت به خودروهای بنزینی، هزینهٔ بالای تعویض باتری، عملکرد پایین‌تر نسبت به خودروهای بنزینی و نیاز به سوخت فسیلی برای تأمین برق اشاره کرد.

هیبرید: خودرو هیبریدی یا خودرو دو نیرویی خودرویی است که برای حرکت‌کردن از ترکیب دو یا چند منبع مجزای قدرت استفاده می‌کند که در سامانه پیشرانهٔ آن‌ها یک موتور درون‌سوز بنزینی در کنار یک یا چند موتور الکتریکی قرار دارد و این خودرو قابلیت این را دارد که فقط از یکی از این منابع انرژی یا هر دو آن‌ها استفاده کند. از مزایای خودروهای هیبریدی می‌توان به کم صدا بودن، مناسب برای سفرهای درون شهری، داشتن انرژی چند موتوری و مصرف بهینه سوخت و در نتیجه کاهش آلودگی هوا اشاره کرد و از معایب آن می‌توان به گران‌بودن خودروهای هیبریدی، فقدان قدرت لازم، کمبود ایستگاه‌های شارژ و ناسازگار برای آب‌وهوای سرد، اشاره کرد.

جدول ۱ آمار مصرف انرژی ایران در سال ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشخص است، بخش حمل‌ونقل با سهم ۲۷٫۴ درصدی دومین بخش پرمصرف انرژی در کشور است. از طرفی، مصرف انرژی در این بخش طی سال‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است؛ به‌گونه‌ای که از حدود ۲۵۰ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۳۹۰ به ۳۰۸ میلیون بشکه در سال ۱۳۹۸ و در نهایت به ۵۵۹ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۴۰۱ رسیده است (National Energy Balance, 2022).

جدول ۱. آمار کل مصرف انرژی در سال ۱۳۹۸ در بخش‌های مختلف (٪) (ترازنامهٔ انرژی ، ۱۴۰۱)

بخش حمل‌ونقل	**۲۷/٤**
بخش صنعت	**۳۱/۷**
بخش خانگی	**۲۰/٦**
مصارف پرانرژی	**۸/۳**
بخش تجاری و عمومی	**۲/۱**
بخش کشاورزی	**۸/٤**
سایر مصارف	**۱/۵**

جدول ۲. سبد سوخت حمل‌ونقل کشور (٪) (ترازنامهٔ انرژی، ۱۴۰۱)

بنزین	**۵۱**
گازوئیل	**٤۰**
گاز طبیعی	**٤**
گاز مایع	**۱**
سوخت جت	**۳**
سوخت‌های دیگر	**۱**

سهم حامل‌های مختلف انرژی در تأمین نیاز بخش حمل‌ونقل در کشور در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که در جدول مشخص است؛ بنزین و گازوئیل مصرف عمده حمل‌ونقل بوده است و می‌توان دلیل مصرف بیش‌تر بنزین از گازوئیل، افزایش نسبت تعداد خودروهای بنزین‌سوز به خودروهای گازوئیل‌سوز و توسعه‌نیافتگی حمل‌ونقل عمومی دانست (National Energy Balance, 2022).

تأثیر انرژی بر آلودگی هوا

در بررسی منابع انتشار آلاینده‌ها، باید این نکته را در نظر گرفت که انتشار گازهای آلاینده صرفاً توسط بخش انرژی و احتراق سوخت در سایر زیربخش‌های اقتصادی و صنعتی صورت نمی‌گیرد. ازاین‌رو؛ تقسیم‌بندی انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس منابع انتشار به چهار گروه اصلی به‌صورت زیر است.

-بخش انرژی

- فرایندهای صنعتی و ساخت و تولید

-کشاورزی، جنگلداری و سایر تغییر کاربری‌های زمین

-پسماندها

که دراین‌بین، بخش انرژی معمولاً مهم‌ترین بخش در موجودی انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهد به‌طوری‌که طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در سال ۲۰۰٦ ، بخش انرژی بیش از ۹۰ درصد کل انتشار دی‌اکسیدکربن و ۷۵ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشورهای توسعه‌یافته را دارا است. همچنین در بین سرفصل‌های بخش انرژی، احتراق ثابت حدود ۷۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی را تشکیل می‌دهد که در اغلب کشورها نیمی از انتشار ثابت توسط صنایع انرژی (خصوصاً نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها) انجام می شود. علاوه بر این، احتراق متحرک (حمل‌ونقل جاده‌ای و غیره) عامل حدود یک‌چهارم از انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش انرژی است (National Hydrocarbon Balance, 2017).

آلاینده‌های منتشرشده شامل گازهای گلخانه‌ای و غیر گلخانه‌ای در بخش انرژی و سهم حمل‌ونقل در انتشار این آلاینده‌ها و میزان انتشار آن‌ها به ترتیب در جداول ۳ و ٤ آمده است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیش‌ترین سهم در بخش حمل‌ونقل مربوط به انتشار ذرات معلق، دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن بوده است. در خصوص میزان انتشار این آلاینده‌ها در دورهٔ ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ رشد انتشار گازهای CO و NO_X بیش از رشد مصرف انرژی بوده است و تولید این محصولات به طور مستقیم به دمای احتراق به‌ویژه در خودروهای بنزینی وابسته است. اگرچه میزان رشد سایر آلاینده‌ها قابل‌ملاحظه است، اما رشد کم‌تری نسبت به آلاینده‌ها ذکر شده داشته‌اند (National Energy Balance, 2022).

جدول ۳. سهم انتشار گازهای آلاینده ناشی از مصرف سوخت در بخش حمل‌ونقل سال ۱۴۰۱(٪) (ترازنامهٔ انرژی، ۱۴۰۱)

بخش	NO_X	SO_2	SO_3	CO	SPM	CO_2	CH_4	N_2O
حمل‌ونقل	٤٩/٧	٢١/٤	٤٦/٨	١١/٦	٩٩/٢	٧١	١٨/٥	٣٠/٢

جدول ٤. میزان انتشار آلاینده‌های هوا ناشی از مصرف سوخت حمل‌ونقل سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۱ (تن) (ترازنامهٔ انرژی، ۱۴۰۱)

سال/ گاز	NO_X	SO_2	SO_3	CO	SPM	CO_2	CH_4	N_2O
۱۳۹۰	٨٧٧٣٧٤	٤١٥١٠٣	٤٦٢٩	٧٧٩٤٣٤٤	٣١١٣٥١	١٢٧١١٩٣٣٩	٤٢٧٤٦	٥٨٤١
۱۳۹۳	٩٣٨٨٩٨	٤٠٩٩٦٢	٤٤٣١	٩٠٤٠٣٦١	٣٢٤٤٤٦	١٣٧٦٤٨٨٤٠	٤٨٧٣٧	٦٣٨٧
۱۳۹۶	٩٦٤٣٧٨	٣٩٧٥٥٣	٤٢٠٩	١٠٤٤٦٨٣٧	٣١٥٥٢٤	١٤٥٤٠٦١١٤	٥٤٥٣٦	٦٧٣٣
۱۳۹۸	١٠٤٠٤٧٧	٤٩٢٦٧٦	٤٤٥١	١١٦٠٢٤٦٦	٣٣٥٣٢٠	١٥٦٣٨٩٣٥٥	٥٨٢٠٢	٧٢٧٢
۱۴۰۱	١٢٦٤٠٠٠	٥١٢٠٠٠	٤٧٨٠	١٣٨٥٠٠٠٠	٣٦٢٠٠٠	١٨٢٠٠٠٠٠٠	٦٣٥٠٠	٨١٠٠

افزایش روزافزون جمعیت کشور، تولید روزافزون خودروها و تمایل بیش‌تر شهروندان به استفاده از خودروهای شخصی، مستلزم مصرف سوخت بیش‌تر، خصوصاً استفاده از سوخت غیراستاندارد است. همچنین، مشکل تأمین معابر که سال‌هاست در سیاست‌های متخصصان حمل‌ونقل به‌عنوان یک چالش بزرگ تلقی می‌شود، موجب افزایش چشمگیر آلودگی هوا گردیده است؛ لذا، این موضوع بیش از گذشته به‌عنوان دغدغهٔ اصلی مسئولین مطرح شده است. در حال حاضر، این معضل اثرات زیان‌بار و جبران‌ناپذیری بر سلامت شهروندان، اکوسیستم شهری و هدررفت منابع انرژی دارد. بااین‌حال، تاکنون برنامه مدون و جامعی برای کاهش آلودگی‌های حمل‌ونقلی و تدوین یک سبد سوخت بهینه در سطح ملی و شهری وجود نداشته است. سیاست‌های موجود، از جمله اجرای لایحهٔ هوای پاک به دلیل عدم جامعیت و فراهم نبودن زیرساخت ها، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش آلودگی هوا نداشته است. از طرفی، بسیاری از راهکارهای بین‌المللی کاهش انتشار آلاینده‌ها به دلیل محدودیت‌های فنی و اقتصادی ایران قابل اجرا نیستند؛ بنابراین، نیاز به تدوین یک راهکار عملی متناسب با شرایط کشور، به‌ویژه در کلان‌شهر هایی مانند مشهد، امری ضروری است. مشهد، به‌عنوان دومین کلان شهر پرجمعیت ایران و یکی از مهم‌ترین قطب‌های زیارتی و گردشگری کشور، با چالش‌های جدی در زمینهٔ آلودگی هوا و مدیریت انرژی در بخش حمل‌ونقل مواجه است. این شهر سالانه میزبان بیش از ۳۰ میلیون زائر و گردشگر است که موجب افزایش قابل‌توجه ترافیک شهری و مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود.

مطالعات نشان داده‌اند که بخش حمل‌ونقل سهم عمده‌ای در انتشار آلاینده‌های هوا، به‌ویژه $PM_{2.5}$، در مشهد دارد و این آلودگی تأثیر مستقیم بر سلامت شهروندان دارد (Yousofpour et al., 2024).

با توجه به وابستگی بالای ناوگان حمل‌ونقل مشهد به سوخت‌های فسیلی و روند روبه‌رشد تعداد وسایل نقلیه، ارزیابی سناریوهای مختلف سبد سوخت برای کاهش آلاینده‌ها در این کلان‌شهر از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، مشهد یکی از شهر های منتخب ایران برای اجرای سیاست‌های انرژی پاک و توسعه ناوگان حمل‌ونقل عمومی برقی است که این موضوع ضرورت بررسی سناریوهای جایگزین برای کاهش مصرف انرژی و آلودگی هوا را دوچندان می‌کند. ازاین‌رو، هدف این مطالعه ارائهٔ یک سبد سوخت بهینه برای کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌های خطرناک، به‌ویژه $PM_{2.5}$، ناشی از تردد وسایل نقلیه در کلان شهر مشهد است. در این راستا، با استفاده از مدل‌سازی LEAP، سناریوهای مختلف ترکیب سوختی در ناوگان حمل‌ونقل این شهر بررسی شده و بهترین راهکار برای کاهش آلودگی هوا و مصرف انرژی در افق ۲۰۵۰ پیشنهاد می‌شود.

۲-پیشینهٔ تحقیق

پژوهش‌های مختلفی در ایران و جهان به بررسی تقاضای سوخت و ترکیب سوخت پرداخته‌اند و از روش‌های مختلفی برای برآورد استفاده کرده‌اند.

در ادامه به مرتبط‌ترین مقالات پرداخته می‌شود.

پژوهشی به بررسی ترازنامهٔ انرژی ایران با استفاده از مدل LEAP پرداخت. هدف اصلی مقاله، اندازه‌گیری عرضه و تقاضای انرژی در بازهٔ زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۴۲۰ و محاسبهٔ میزان صرفه‌جویی در مصرف نفت و گاز تحت سناریوهای مختلف مدیریت عرضه و تقاضا است. نتایج نشان داد که تقاضای انرژی در ایران از ۱۳۲۱ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۳۹۳ به ۲۴۷۱ میلیون بشکه معادل نفت خام در سال ۱۴۲۰ خواهد رسید. این مقاله پیشنهاد می‌کند که با جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر مانند باد و خورشید به جای سوخت‌های فسیلی، می‌توان به کاهش آلایندگی و افزایش صرفه‌جویی در مصرف انرژی دست یافت (Mohammadi et al., 2018).

پژوهشی دیگر به مدل‌سازی تقاضای انرژی در ایران با استفاده از مدلLEAP پرداخت. هدف اصلی مقاله، بررسی روند تاریخی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف (خانگی، تجاری، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی و روشنایی معابر) و پیش‌بینی تقاضای انرژی تا سال ۱۴۲۰بود. نتایج نشان داد که تقاضای انرژی در ایران به دلیل رشد جمعیت، توسعهٔ اقتصادی و افزایش مصرف انرژی در بخش‌های مختلف، به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. این مقاله پیشنهاد می‌کند که با بهبود بهره‌وری انرژی و استفاده از فناوری‌های نوین، می‌توان به کاهش مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دست یافت (Moradi, Ahmadi and Amidpour, 2013).

همچنین مطالعاتی در کشورهای دیگر نیز با نرم‌افزار LEAP صورت گرفته است که به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود:

در مطالعه‌ای در لاگوس نیجریه از مدل LEAP برای پیش‌بینی تقاضای انرژی استفاده شد. نتایج نشان داد که بزرگ‌ترین مانع لاگوس برای دستیابی به هدف کاهش آلایندگی، وجود وسایل نقلیهٔ بسیار قدیمی در جاده‌های آن است. تجزیه‌وتحلیل نشان داد که کاهش انتشار در بخش حمل‌ونقل جاده‌ای در لاگوس به نرخ بقای وسیله نقلیه حساس است (کسری از وسایل نقلیه با سن خاصی که هنوز رانندگی می‌کنند). نتیجه گرفته شد که اگر محدودیت سنی وسایل نقلیه در لاگوس از ۴۰ سال به ۲۲ سال کاهش یابد، نرخ رشد خودرو از ۵٪ به ۲٪ و مسافت پیموده شده ۲٪ در سال از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۲ کاهش یابد، لاگوس ممکن است تا سال ۲۰۳۲ به هدف خود برای کاهش ۵۰٪ آلایندگی دست پیدا نکند (Maduekwe et al., 2020).

در مطالعه‌ای دیگر از مدل LEAP برای تخمین انتشار آلاینده‌ها و مصرف انرژی استفاده کردند. آن‌ها اقدامات سیاستی را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در دو شهر در پاکستان، راولپندی و اسلام آباد پیشنهاد کردند. دریافتند در سناریوی BAU که در آن روند فعلی ادامه می‌یابد، تقاضای انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در سناریوهای جایگزین، نشان داده شده است که مصرف انرژی و سطوح آلودگی را می‌توان با تشویق استفاده از حمل‌ونقل عمومی و جایگزینی خودروهای دیزلی و بنزینی با گاز طبیعی کاهش داد (Shabbir and Ahmad, 2010).

در پژوهشی در قطر با نرم‌افزار LEAP انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از ترافیک جاده‌ای در قطر با سه سناریو مختلف مدل‌سازی شد. این تحقیق از داده‌های واقعی تعداد خودروها از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ استفاده کرد، درحالی‌که تمام پیش‌بینی‌های آتی را از ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۰ در نظر گرفت. اولین سناریو براساس رشد تاریخی تعداد وسایل نقلیه بود. دومی براساس سناریوی کسب‌وکار معمول بود و سومی در نظر گرفت که حمل‌ونقل عمومی باید به سه سناریوی فرعی تقسیم شود، یعنی بهبود مصرف سوخت، برقی‌سازی حمل‌ونقل عمومی و جایگزینی سوخت دیزل یا بنزین با گاز طبیعی فشرده. نتایج نشان داد که در BAU وسایل نقلیهٔ سبک نسبت به انتشار گازهای گلخانه‌ای در مقایسه با موتورسیکلت‌ها و وسایل نقلیهٔ سنگین مهم‌ترین مشارکت‌کننده است. علاوه‌بر این، مشخص شد که انتشار گازهای گلخانه‌ای را می‌توان با بهبود حمل‌ونقل عمومی، تغییر به سوخت پاک‌تر و کاهش اتکا به وسایل نقلیهٔ شخصی کاهش داد (Al-Jabir and Isaifan, 2023).

در پژوهشی دیگر، اثربخشی سیاست‌هایی را که دولت کرهٔ جنوبی در مورد بخش حمل‌ونقل اعمال کرده است، مورد بررسی قرار داد و تأثیر آن را در جنبه‌های انرژی و محیط‌زیست با نرم‌افزار LEAP تجزیه‌وتحلیل کرد این مطالعه پنج خط‌مشی را از نظر سناریوها در نظر گرفت: بهره‌وری سوخت بهبودیافته (IFE)، توزیع خودروهای سبز (GC, CGC)، تغییر حمل‌ونقل عمومی، و تغییر و تحولات جدید. سناریوی توزیع

کارت سبز به دودسته تقسیم می شود: سناریوی ماشین سبز و ماشین سبز رقابتی. سناریوی ماشین سبز (GC) بر روی خودروهای پاک و دیزل و هیبریدی متمرکز است و سناریوی ماشین سبز رقابتی (CGC) متمرکز بر روی سوخت هیدروژنی و الکتریکی. با توجه به تحلیل سناریوی انجام شده در مطالعه، سیاست‌های کاهش انرژی نهایی و GHG دولت کرهٔ جنوبی بر بخش حمل‌ونقل، تقاضای نهایی انرژی را ۲۵/۵-۲۵/۲ درصد کاهش خواهد داد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ۳/۶-۲۱/۲۱ درصد در سال ۲۰۲۰، نسبت به سناریوی BAU خواهد بود. بااین‌حال، این عدد با هدف ۳۴/۳درصد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در حمل‌ونقل کره مطابقت ندارد (Hong et al., 2016).

عدم پرداختن به بعد کاهش آلایندگی خصوصاً $PM_{2.5}$ در سبد سوخت‌های پیشنهادی در ایران در مقایسه با مطالعات جهانی، همچنین ضرورت بررسی تخصصی بخش حمل‌ونقل و زیربخش‌های آن به‌طور خاص، نیاز به انجام این پژوهش با تکیه بر بخش حمل‌ونقل را روشن‌تر می‌سازد.

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- بررسی اجمالی مدل‌های انرژی

با توجه به افزایش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از افزایش مصرف جهانی انرژی، برنامه‌ریزی انرژی و بهره‌گیری از ابزارهای طراحی سیاست‌های انرژی و زیست‌محیطی از اهمیت بیشتری برخوردار شده‌اند. مشکلات مربوط به انرژی همچنان به‌عنوان یکی از موانع اصلی رشد اقتصادی در کشورهای درحال توسعه که سرمایه‌گذاری در بخش انرژی قسمت اعظم سرمایه‌های عمومی را به خود اختصاص می‌دهد، مطرح است. به‌منظور دستیابی به اهداف زیست‌محیطی و تأمین انرژی مناسب همراه با سیستم عرضهٔ مطمئن برای جمعیت روبه‌رشد یک کشور در یک مسیر سازگار با محیط‌زیست، به سرمایه‌گذاری‌های عمده نیاز است.

پیشینهٔ اولین مدل‌های انرژی به زمان اولین بحران نفتی در دههٔ ۷۰ برمی‌گردد، یعنی زمانی که نیاز به جایگزینی نفت آشکار شد. هدف این مطالعات، حرکت در مسیر دستیابی به یک سبد سوختی بهینه برای سیستم عرضهٔ انرژی بود. بدین منظور، ارزیابی پتانسیل همهٔ منابع موجود ضروری می‌نمود، درحالی‌که ابزارهای فناوری انرژی در گذشته روی موضوعات خاصی تمرکز داشتند. روش شناسی آن‌ها اغلب تنها روی یک جنبه از مشکل مانند هزینه، آسیب‌های زیست‌محیطی یا امنیت عرضهٔ انرژی متمرکز بود. معمولاً یکی از بخش‌های اقتصادی مثل بخش خانگی یا صنعت مورد تجزیه‌وتحلیل قرار می‌گرفت یا تنها یکی از حامل‌های انرژی مثل برق، مد نظر قرار می‌گرفت. مدل فناورانه «مهندسی - فرایندی»، در ابتدا تنها روی موضوع یک سوخت یا زیربخش انرژی، مثل مدل‌های برنامه‌ریزی تولید برق در دههٔ شصت متمرکز بود.

اولین مدل‌های انرژی بر مبنای نظریه‌های اقتصاد سنجی بوده و تقاضای انرژی را با شاخص‌های اقتصاد کلان مثل تولید ناخالص ملی، هم‌بسته می‌کردند. ساختار ناکارآمد این مدل‌ها، باعث نادیده‌گرفتن اثرات گسترش مصرف انرژی روی محیط‌زیست در دههٔ هفتاد گردید. مدل‌های زیادی برای برنامه‌ریزی در چند سال اخیر توسعه داده شده‌اند که اکثر آن‌ها در سطح ملی مطرح بوده‌اند.

رویکردهای مختلفی برای مدل سازی انرژی و ارزیابی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای وجود دارند.

رویکرد مؤثرتر در ارزیابی کاهش انتشار به کنوانسیون چارچوب تغییر اقلیم در سازمان ملل در راهنماهای انتخاب کشورها با توجه به شرایط ملی بستگی دارد.

دو رویکرد مهم که رویکرد تحلیلی (بالابه‌پایین و پایین‌به‌بالا) و رویکرد هدف مدل هستند بررسی می‌گردد.

مدل‌های بالابه‌پایین

مدل‌های بالابه‌پایین معمولاً بر داده‌های تجمعی و روش‌های اقتصاد کلان و اقتصاد سنجی متکی هستند. در این رویکرد، پیش‌بینی روند مصرف در آینده با استفاده از روند تاریخی یا روابط اقتصاد سنجی (تولید ناخالص داخلی، قیمت سوخت و غیره) انجام می‌شود.

مدل‌های پایین‌به‌بالا

این مدل‌ها بر پایهٔ محاسبات فیزیکی دقیق در سیستم هستند. یک درک اساسی از نحوهٔ رفتار سیستم و تکامل آن در آینده ارائه می‌دهند. بنابراین برای بررسی تحولات در بلند مدت مناسب هستند. شامل مدل‌های یکپارچه برای کل کشور هستند که امکان مدل‌سازی ارتباط بین بخش‌ها رادارند.

همچنین شامل مدل‌های ویژهٔ هر بخش هستند که امکان ارائهٔ ورودی به مدل‌های یکپارچه را فراهم می‌کنند و می‌توان از آن‌ها برای ارزیابی بخش‌های با انتشار بالا استفاده کرد.

انواع مدل‌های پایین‌به‌بالا

مدل‌های بهینه سازی: از روابط ریاضی برای شناسایی ساختار سیستم‌های انرژی استفاده می‌کنند؛ با این هدف که هزینهٔ کل ارائهٔ خدمات به حداقل برسد. برای مثال:

MARKAL/TIMES ،LEAP ،MESSAGE

مدل‌های شبیه سازی: رفتار مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان را تحت شرایط مختلف (مانند قیمت، سطح درآمد) و محدودیت‌های مختلف (مثلاً محدودیت در نرخ جایگزینی سهام) شبیه‌سازی می‌کند. برای مثال:

ENPEP-BALANCE

مدل‌های بر پایهٔ حسابداری: محاسبهٔ سهم‌ها و جریان‌های فیزیکی را در سیستم‌ها، براساس روابط مهندسی و مفروضات روشن درمورد آینده (مثلاً پیشرفت‌های فناوری، نرخ نفوذ بازار) انجام می‌دهد. برای مثال:

MAED ،LEAP

مدل‌های مبتنی بر فناوری: بر نحوهٔ عملکرد یک فناوری خاص (یا مجموعه‌ای از فناوری‌ها) تحت محدودیت‌های خاص متمرکز است و می‌تواند هزینه‌ها و انتشارات مربوطه را ردیابی کند. برای مثال:

(Pourabedin, 2022) RETScreen ،HOMER

این مدل‌ها را می‌توان بر مبنای اهداف آن‌ها نیز طبقه‌بندی کرد: **تقاضای انرژی، عرضهٔ انرژی، تأثیرات، ارزیابی، رهیافت یکپارچه و ساختار ماژولار.** عمده‌ترین مدل‌ها عبارت‌اند از:

مدل‌های تقاضای انرژی

مدل‌های تقاضای انرژی برای مطالعهٔ تقاضای انرژی بخش‌های مختلف و تأثیر رشد آن بر میزان انرژی نهایی و انرژی قابل مصرف، طراحی شده‌اند. در میان این مدل‌ها، مدل‌های فنی – مهندسی گستردگی بیشتری دارند، اما از مدل‌های اقتصادسنجی نیز استفاده می شود. ابزارهای اصلی برآورد تقاضای انرژی عبارت‌اند از: مدل MEDEE، MAED و LEAP.

مدل‌های عرضهٔ انرژی

مدل‌های عرضهٔ انرژی به‌منظور کمینه‌کردن هزینهٔ دستیابی به افزایش ظرفیت عرضهٔ انرژی با توجه به محدودیت‌های سیستم طراحی شده‌اند. این محدودیت‌ها شامل مسائل فنی، مالی و زیست‌محیطی هستند. این مدل‌ها، تقاضای انرژی را به‌عنوان ورودی دریافت می‌کنند، اما اثرات قیمت‌ها و دیگر ابزارهای مدیریت تقاضای انرژی برای ترازمند کردن عرضه و تقاضا را مورد توجه قرار نمی‌دهند. مدل‌ها معمولاً از روش‌های شبیه سازی یا بهینه سازی استفاده می‌کنند. روش دوم بر مبنای برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی است. ایفوم، مارکال و میسیج از جمله ابزارهایی هستند که از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌کنند.

مدل‌های ماژولار

این ابزارها مدل‌های متعددی را در بر می‌گیرد؛ ازجمله مؤلفه‌های اقتصاد کلان، ترازمندی عرضه و تقاضا، خود تقاضای انرژی و غیره که در یک بسته مجتمع شده‌اند. لازم نیست که کاربر همهٔ مدل‌ها را اجرا کند، اما می‌تواند بر مبنای تجزیه‌وتحلیلی که می‌خواهد انجام دهد، بعضی از آن‌ها را انتخاب کند. انیپ، لیپ و مسپ برخی از این ابزارهای شناخته شده هستند.

در ادامه، کلیات مهم‌ترین مدل‌ها ارائه می‌شود:

مدل MEDEE

مدل می‌دی (مدلی برای تقاضای انرژی اروپا) یک مدل فنی–اقتصادی برای پیش‌بینی تقاضای نهایی انرژی است. برای پنج بخش (صنعت، حمل‌ونقل، خانگی، خدمات و کشاورزی) در نظر گرفته شده است و تقاضای انواع مختلف انرژی (از جمله گاز طبیعی) را برای هر بخش در یک یا چند سال آینده پیش‌بینی می‌کند.

مدل MAED

این مدل تجزیه‌وتحلیل تقاضای انرژی یک مدل شبیه‌سازی است که برای ارزیابی تقاضای متوسط و بلندمدت انرژی در یک کشور یا یک منطقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل

به‌وسیلهٔ آژانس بین‌المللی انرژی اتمی توسعه داده شد و به‌طور کلی بر پایهٔ کار انجام شده توسط دانشگاه گرونبل فرانسه است. مائد یک روش جایگزین برای برآورد تقاضای انرژی و تقاضای برق پیشنهاد می‌کند.

این مدل شامل سه ماژول می‌شود: ماژول تقاضای انرژی، ماژول تقاضای برق ساعتی و یک ماژول منحنی بار.

مدل LEAP

سیستم برنامه‌ریزی بلندمدت جایگزین‌های انرژی یک ابزار برای برنامه‌ریزی انرژی یکپارچه و همه‌جانبه بوده که تعامل بین اقتصاد – انرژی – محیط‌زیست را شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توسط انستیتوی محیط‌زیست استکهلم توسعه داده شده است و برای نشان‌دادن وضعیت فعلی انرژی در یک منطقهٔ خاص و پیش‌بینی آینده تحت یک‌سری پیش‌فرض‌ها از یک رهیافت شبیه‌سازی و بهینه‌سازی استفاده می‌کند.

مدل MESSAGE

مدل تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های عرضهٔ انرژی و اثرات عمومی محیطی آن‌ها توسط انستیتوی بین‌المللی تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های کاربردی موسوم به یاسا توسعه داده شده است و یک مدل مبتنی‌بر تقاضای شبه خطی بوده که برای بهینه سازی سیستم‌های عرضهٔ انرژی به کار می رود. این مدل هزینه‌های تنزیلی عرضه انرژی را با توجه به تقاضای انرژی داده شده و هزینه‌ها، کارایی و محدودیت‌های ورود به بازار، کمینه می‌کند. همچنین مسیج هزینه‌های سیستم انرژی و سرمایهٔ لازم برای برنامه‌ریزی انرژی و اثرات مالیات بر کربن روی سبد انرژی را ارزیابی می‌کند.

مدل MESAP

این مدل (نرم‌افزار ماژولار تجزیه‌وتحلیل و برنامه‌ریزی سیستم انرژی) یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای مدیریت یکپارچه انرژی است که توسط IER توسعه داده شده است. مدل مذکور ابزارهایی را برای محاسبه سرمایه‌گذاری، محاسبات انرژی و محیط‌زیست، تجزیه‌وتحلیل تقاضا، برنامه‌ریزی یکپارچهٔ منابع، مدیریت بخش تقاضا و برنامه‌ریزی بهره‌برداری و توسعه برق، ارائه می‌کند. (Energy Information, n.d.)

با بررسی‌های انجام شده بین مدل‌های مختلف قابل استفاده، به‌دلیل انعطاف‌پذیری با توجه به نیازهای خاص برای افق زمانی ۲۰۵۰، پشتیبانی از داده‌های منطقه‌ای، توانایی در شبیه‌سازی استراتژی‌های کاهش آلاینده‌ها، رابط کابری با قابلیت استفاده برای تحلیل های پیچیده‌تر همچنین امکان انجام تحلیل های حساسیت، مدل LEAP در این پژوهش انتخاب و استفاده گردید.

۳-۲- مدل LEAP

در این بخش نحوهٔ نصب و اجرای مدل بیان می‌شود. ابتدا مقدمات مدل LEAP توضیح داده می‌شود و پس از آن ورودی‌های مورد نیاز به‌طور کامل بیان می‌گردد.

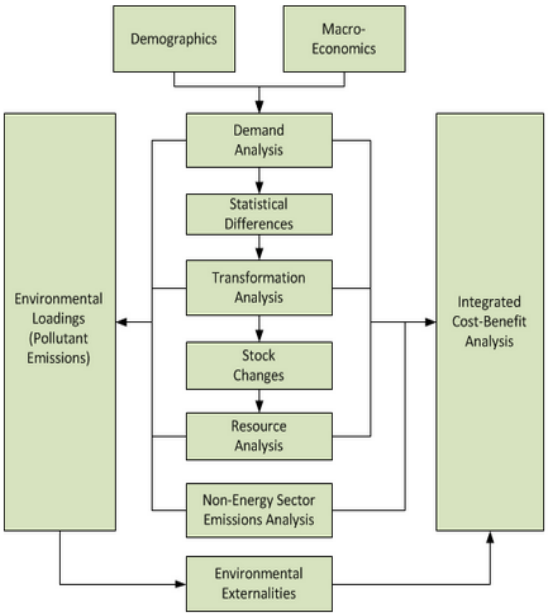
پلتفرم تجزیه‌وتحلیل کم انتشار[1] یک ابزار نرم‌افزاری پرکاربرد برای سیاست انرژی، کاهش تغییرات آب‌وهوا و برنامه‌ریزی کاهش آلودگی هوا است که در مؤسسهٔ محیط‌زیست استکهلم توسعه یافته است.

ازآنجایی‌که LEAP یک ابزار نرم‌افزاری با اهداف عمومی است که می‌تواند برای ساخت انواع مدل های مختلف انرژی و سیستم‌های محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گیرد، توصیف قطعی نیازهای داده‌های ورودی آن غیرممکن است.

بسیاری از بخش‌های LEAP مانند تجزیه‌وتحلیل عرضهٔ انرژی، تجزیه‌وتحلیل آلودگی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، تجزیه‌وتحلیل هزینه‌ها، و حسابداری انتشار گازهای گلخانه‌ای بخش غیرانرژی اختیاری هستند. در مقایسه با سایر روش‌های مدل‌سازی انرژی، داده‌های اولیهٔ موردنیاز LEAP نسبتاً ساده به نظر می‌رسد؛ اما گاهی بسیار پیچیده می‌شود.

ساختار LEAP

شکل ۱ جریان‌های اصلی اطلاعات و جهت اصلی محاسبات در LEAP را خلاصه می‌کند. البته بسیاری از جنبه‌ها اختیاری هستند.



شکل ۱. داده‌های مورد نیاز نرم‌افزار LEAP

داده‌های مورد نیاز، به‌ویژه در تجزیه‌وتحلیل تقاضا، به این بستگی دارد که یک مجموعه دادهٔ جمعی و از بالابه‌پایین که مصرف کل سوخت در هر بخش عمده را توصیف می‌کنید، یا مجموعه داده های تفکیک شده از پایین‌به‌بالا که نحوهٔ مصرف سوخت در دستگاه‌های مختلف و مصارف نهایی در هر زیر بخش مختلف اقتصاد را بررسی می‌کنید.

فهرست زیر توصیف برخی از داده‌های اساسی است که برای کمک به توسعهٔ مجموعهٔ داده‌های اولیهٔ LEAP در سطح ملی مورد نیاز است. در بیشتر موارد، داشتن داده‌های فعلی و داده‌های تاریخی (برای کمک در ایجاد روندها) و پیش‌بینی‌هایی برای آینده بسیار ارزشمند است. در اوایل کار، مهم است که سالی را که به‌عنوان سال پایهٔ پژوهش استفاده می‌شود، انتخاب کرد. به‌طور کلی، باید جدیدترین سالی را انتخاب کرد که داده‌های آن به‌طور گسترده در دسترس است.

داده‌های دموگرافیک

داده‌های ملی جمعیت (پیش‌بینی‌های تاریخی و رسمی دولت)

داده‌های کلان اقتصادی

داده‌های تولید ناخالص داخلی (تاریخی و پیش‌بینی)

پیش‌بینی تقاضا

سطوح فعالیت: پیش‌بینی‌های انرژی بر پیش‌بینی شدت انرژی (انرژی در واحد فعالیت) و سطوح کلی فعالیت متکی است. داده‌های فعالیت از بخشی به بخش دیگر متفاوت است.

برای پیش‌بینی مصرف انرژی حمل‌ونقل، یک رویکرد معمولی در نظر گرفتن تقاضای کلی برای حمل‌ونقل مسافر (اندازه‌گیری شده برحسب مسافر - کیلومتر) و حمل‌ونقل بار (اندازه‌گیری شده برحسب تن - کیلومتر)، با در نظر گرفتن اینکه چگونه کل هر یک بین حالت‌های مختلف (جاده، راه‌آهن، هوا، آب) و فناوری‌های مختلف (اتوبوس، اتومبیل، تاکسی، موتورسیکلت و غیره) تقسیم می‌شود.

فاکتورهای انتشار بخش انرژی

برای اولین برش ارزیابی کاهش گازهای گلخانه‌ای، فاکتورهای انتشار "IPCC "Tier 1 به‌طور کلی استفاده می‌شود. بااین‌حال، در صورت لزوم، می‌توان این موارد را با فاکتورهای انتشار ملی خاص جایگزین کرد. به‌عنوان مثال، خودروها در هر کشور ممکن است ویژگی‌های آلایندگی خاصی داشته باشند.

مشخصات سوخت

داده‌های بین‌المللی پیش‌فرض که سوخت‌ها و ویژگی‌های آن‌ها را توصیف می‌کنند (محتوای انرژی، ترکیب شیمیایی و غیره) عموماً برای برآورده کردن نیازهای بیشتر مطالعات کافی است. بااین حال، در برخی از کشورها، این ویژگی‌ها بسیار متفاوت از مقادیر متوسط بین‌المللی است. در صورت امکان، اطلاعاتی در مورد انرژی، کربن، رطوبت و محتوای گوگرد سوخت‌های مورد استفاده در هر کشور، همچنین اطلاعات مربوط به هرگونه سوخت غیرمعمول تولید یا مصرف شده در کشور مانند CNG، گاز شهری و غیره ارائه می‌شود.

۳-۳- محاسبات تحلیل حمل‌ونقل

برای یک شاخهٔ معین از وسایل نقلیه، معادلات زیر محاسبات حمل‌ونقل را توصیف می‌کنند.

$$Stock_{t,yv} = \left(Sales_{t,v}.Survival_{t.y-v}\right) \quad (۱)$$

$$Stock_{t,y} = \sum y,v,t \quad (۲)$$

در اینجا t نوع وسیلهٔ نقلیه (شاخهٔ فناوری)، V مدل (سال مدل)، y سال تقویمی، T تعداد انواع وسایل نقلیه است، Sales تعداد وسایل نقلیهٔ اضافه شده در یک سال و Stock تعداد وسایل نقلیهٔ موجود در یک سال خاص است. همچنین Survival کسری از وسایل نقلیه است که پس از چند سال فعال باقی می‌مانند.

$$FuelEconomy_{t,y,v} = FuelEconomy_{t,y}.FeDegradation_{t,y-v} \quad (۳)$$

FuelEconomy

مصرف سوخت به‌ازای واحد مسافت طی شده وسیلهٔ نقلیه یعنی (1/MPG) است.

FeDegradation

عاملی است که نشان‌دهندهٔ کاهش بهره‌وری مصرف سوخت با افزایش سن خودرو است. وقتی y=v باشد، برابر است با ۱.

کیلومتر پیمایش

$$Mileage_{t,y,v} = Mileage_{t,y}.MIDegradation_{t,y-v} \quad (۴)$$

Mileage مسافت سالانهٔ طی شده به‌ازای هر وسیلهٔ نقلیه است.

MIDegradation عاملی است که نشان‌دهندهٔ تغییر مسافت پیموده شده با افزایش سن خودرو است. وقتی y=v باشد، برابر است با ۱.

مصرف انرژی

$$Energy\ Consumption_{t,y,v} = Stock_{t,y,v}.Mileage_{t,y,v}.FuelEconomy_{t,y,v} \quad (۵)$$

Distance-Based Pollution Emissions (e.g. Criteria Air Pollutants)

$$Emission_{t,y,v,p} = Stock_{t,y,v}.Mileage_{t,y,v}.EmissionFactor_{t,v,y}.EmDegra_{v,y} \quad (۶)$$

در اینجا P یک آلایندهٔ شاخص، EmissionFactor نرخ انتشار برای آلایندهٔ p (مانند grammes/veh-mile) از وسایل نقلیهٔ جدید مدل v، EmDegradation عاملی است که نشان‌دهندهٔ تغییر در ضریب انتشار آلایندهٔ p با افزایش سن خودرو است. وقتی y=v باشد، برابر است با ۱.

انتشار بر پایهٔ مصرف انرژی (دی‌اکسید کربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای)

Energy-Based Emissions (e.g. CO_2 and other Greenhouse Gases)

$$Emission_{t,y,v,p} = EnergyConsumption_{t,y,v}.EmissionFactor_{t,v,p}. \quad (۷)$$

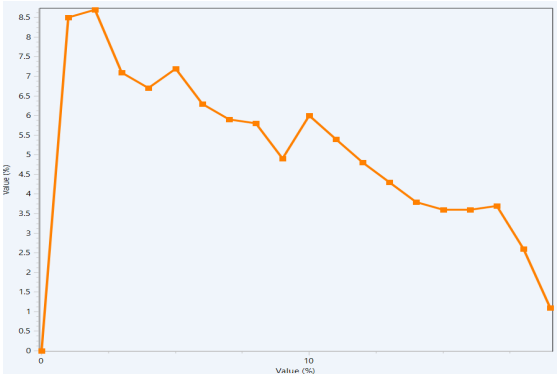
(Stockholm Environment Institute, 2024)

افزایش تعداد خودروها، مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران از معضلات مهم در سال‌های اخیر است. در همین را ستا، ارائهٔ سبد سوخت بهینه سهم قابل‌توجهی در سیاست‌های کلان کشور و بهبود شرایط زیست‌محیطی کشور خواهد داشت. در این پژوهش، از ویژگی‌های تحلیل حمل‌ونقل LEAP، برای ایجاد مجموعه‌ای از سناریوها برای ارزیابی سیاست‌گذاری مدیریت انرژی در وسایل نقلیه استفاده شد. از این مدل برای ایجاد ساختار مدل‌سازی مقادیر فعلی مصرف سوخت و همچنین ضرایب انتشار آلایندگی استفاده می شود. ابتدا سناریوی تداوم روند فعلی ایجاد می‌گردد که با فرض عدم وجود سیاست‌های جدید کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در آینده پیش‌بینی می‌کند. سپس گستره‌ای از سناریوها ایجاد و مقایسه می شوند که راهکارهای طرح شده برای کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در بخش حمل‌ونقل را ارزیابی می‌نمایند.

ارزیابی موارد ذکر شده توسط نرم‌افزار LEAP برای شهر مشهد با سال پایهٔ ۲۰۱۷، سال اول سناریو ۲۰۲۳ و سال آخر سناریوی ۲۰۵۰ انجام شد.

برای داده‌های ورودی سال پایه نیاز به ورودی‌های موجودی هر نوع وسیلهٔ نقلیه با عنوان متغیر Stock است. این داده‌ها از مرکز آمار پلیس راهور و سیاههٔ انتشار آلاینده‌های مشهد مقدس به دست آمد و وارد نرم‌افزار شد.

در صد سهم هرکدام از این وسایل نقلیه برا ساس سن تحت عنوان Vintage به‌صورت جدولی در بخش Lifecycle Profile اضافه شد که موارد مربوط به شکل ۲ و جدول ۵ است.



شکل۲. نمودار سهم خودروهای موجود در شهر مشهد (Existing Car Stocks)

تعداد خودروهای فروخته شده در سال پایه نیز تحت‌عنوان Sales در قسمت تقاضا وارد گردید. این داده‌ها برا ساس آمار خودروهای پلاک شدهٔ شهر مشهد از پلیس راهور دریافت شد و وارد نرم‌افزار گردید. همچنین می‌توان از آمار فروش دو خودرو ساز اصلی کشور و نسبت میزان فروش آن‌ها در شهر مشهد به تخمینی از این داده‌های مورد نیاز دست یافت.

با بالا رفتن سن خودروها و سایر وسایل نقلیه، به‌تدریج این وسایل نقلیه ازرده‌خارج می‌گردند. به همین دلیل باید یک پروفایل بقا تحت‌عنوان تابع‌نمایی زیر وارد مدل کرد.

$$S_t = S_{t-1} . e^{-0.02t} \quad (۸)$$

این پروفایل با عنوان Car Survival Profile وارد مدل شد. برای ضریب تابع‌نمایی از پیش‌فرض نرم‌افزار استفاده شد. سهم‌بندی هر نوع از خودروها و هر نوع سوخت نیز با توجه به اطلاعات موجود در قسمت Stock Share و Sale Share براساس درصد وارد شد. در مرحلهٔ بعد نیاز به ساختن یک Mileage Profile که تابع‌نمایی با نرخ نزولی ۰٫۰۰۲- است،

با این فرض که مسافت پیموده شده توسط تمام وسایل نقلیه با افزایش عمر وسیله، با این نرخ کاهش می‌یابد. در مرحلهٔ بعد اطلاعات مربوط به Fuel economy یا میزان مصرف سوخت به‌ازای پیمایش است که توسط تولیدکننده‌های خودرو در هر کشور اعلام می‌شود.

جدول ۵. سهم خودروهای موجود در شهر مشهد (Existing Car Stocks)

Age (Years) سن (سال)	*% of Stock* درصد فراوانی موجودی
۰	۰
۱	۸,۵
۲	۸,۷
۳	۷,۱
٤	٦,۷
۵	۷,۲
٦	٦,۳
۷	۵,۹
۸	۵,۸
۹	٤,۹
۱۰	٦
۱۱	۵,٤
۱۲	٤,۸
۱۳	٤,۳
۱٤	۳,۸
۱۵	۳,٦
۱٦	۳,٦
۱۷	۳,۷
۱۸	۲,٦
۱۹	۱,۱

۳-٤- منطقهٔ مورد مطالعه

مشهد کلان شهری در شمال شرقی ایران و در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ٦۰ درجه و ۳٦ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ٤۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه، مرکز استان خراسان رضوی است. شهر مشهد در حوزهٔ رودخانهٔ کَشَفرود و بین کوه‌های هزارمسجد و بینالود گسترده شده است. بیشینهٔ ارتفاع آن ۱۱۵۰ و کمینهٔ آن ۹۵۰ متر است. آب‌وهوای این شهر معتدل و متمایل به سرد و خشک است.مشهد با ۹۵۷ کیلومتر مربع مساحت، دومین شهر پهناور ایران بعد از تهران است. براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵، با ۳۰۰۱۱۸٤ نفر جمعیت، مشهد دومین شهر پرجمعیت ایران پس از تهران است.

٤- یافته‌ها

٤-۱- نتایج برآوردهای نرم‌افزار LEAP

در این پژوهش برای بررسی اثرگذاری سیاست‌های ترکیب سوختی بر کاهش آلاینده‌های هوا و مصرف انرژی در کلان‌شهر مشهد، ۳ سناریو برآورد شده است که توصیف هر سناریو و نتایج آن این شرح است.

سناریوی ۱: ادامهٔ روند موجود[۲]

سناریوی ۲: گذار تدریجی به سوخت‌های پاک[۳]

سناریوی ۳: تحول سبز هدفمند[٤]

در تمامی سناریوها فروض کلیدی رشد جمعیت و تولید ناخالص داخلی در نظر گرفته شده است. جمعیت با توجه به پیش‌بینی‌ها برای این بازهٔ زمانی به حدود ۵ میلیون نفر در شهر مشهد خواهد رسید و تولید ناخالص داخلی هم به‌طور متوسط سه درصد در نظر گرفته شد.

علاوه بر تغییرات در نوع سوخت خودرو ها، بهبود کیفیت سوخت[۵] هم برای سناریوی دوم و سوم به صورت پلکانی در نظر گرفته شده است. جدول مدهای حمل‌ونقلی به شرح جدول ٦ است.

جدول ٦. مدهای حمل‌ونقلی در سناریوهای مختلف

نوع وسیله نقلیه	نوع سوخت	سناریوی اول ادامهٔ روند موجود (%)	سناریوی دوم گذار تدریجی به سوخت‌های پاک (%)	سناریوی سوم تحول سبز هدفمند (%)
خودروهای شخصی	بنزینی	۹۰/۱	٦۰	۵۰
	دوگانه‌سوز	۹/۷	۳۰	۳۰
	هیبریدی	۰/۲	٦	۱۰
	برقی	۰	٤	۱۰
تاکسی‌ها	بنزینی	۹/۵	۵۰	٤۰
	دوگانه‌سوز	۹۰/۵	٤۰	٤۰
	هیبریدی	۰	۵	۱۰
	برقی	۰	۵	۱۰
مینی‌بوس‌ها	بنزینی	۰/۳	۵	۰
	گاز طبیعی	۰/۲	٦۰	۷۰
	دیزلی	۹۹/۵	۲۵	۱۰
	هیبریدی	۰	۵	۱۰
	برقی	۰	۵	۱۰
اتوبوس‌ها	گاز طبیعی	۱۱/۲	۷۰	٦۰
	دیزلی	۸۸/۸	۱۵	۱۰
	برقی	۰	۱۵	۳۰
وانت‌ها	بنزینی	٦۵	۵۰	۳۰
	دوگانه‌سوز	۳۲	٤۰	٤۰
	دیزلی	۳	۵	۵
	هیبریدی	۰	۵۳	۱۰
	برقی	۰	۲	۱۵
کامیون‌ها	بنزینی	۸	۵	۰
	دوگانه‌سوز	۳/۹	۵۰	٦۰
	دیزلی	۸۸/۱	٤۰	۲۰
	هیبریدی	۰	۳	۱۰
	برقی	۰	۲	۱۰
موتورسیکلت‌ها	بنزینی	۱۰۰	۹۰	٦۰
	برقی	۰	۱۰	٤۰

سناریوی ۱: ادامهٔ روند موجود

در این سناریو، تغییرات عمده‌ای در ترکیب سوخت‌ها و فناوری‌های ناوگان حمل‌ونقل رخ نمی‌دهد و وضعیت فعلی حفظ می‌شود.

–ویژگی‌های این سناریو حفظ وضعیت موجود:

درصد سوخت‌ها و فناوری‌ها مطابق وضعیت فعلی و بدون تغییرات عمده.

–وابستگی بالا به بنزین و دیزل:

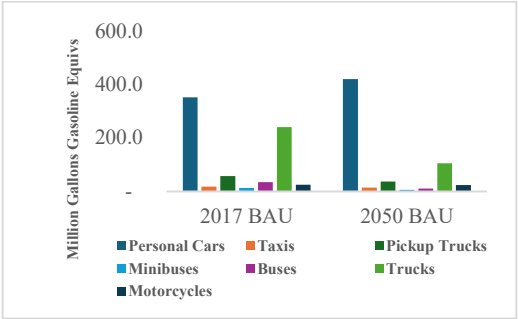
در اکثر دسته‌ها، سهم بنزین و دیزل همچنان غالب است.

– عدم برقی‌سازی یا استفاده از فناوری‌های هیبریدی:

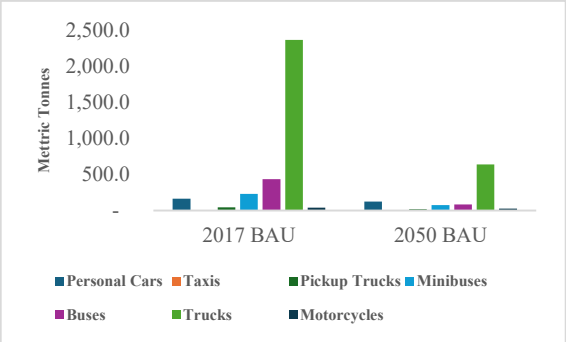
سهم برقی و هیبرید تقریباً صفر است.

نتایج سناریوی ۱

در نمودار شکل ۳، تقاضای انرژی در سال پایه (۲۰۱۷) و سال هدف (۲۰۵۰) در شرایط ادامهٔ روند موجود نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصورت عدم اجرای سیاست‌های کاهشی، تقاضای انرژی در ناوگان حمل‌ونقل مشهد به شدت افزایش می‌یابدکه عمدتاً ناشی از افزایش تعداد خودروهای سوخت فسیلی و رشد اقتصادی شهر است. وابستگی بالا به بنزین و گازوئیل در این سناریو، موجب افزایش تقاضای انرژی و افزایش هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی خواهد شد. همچنین شکل ٤، نشان‌دهندهٔ میزان انتشار $PM_{2.5}$ در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۵۰ تحت سناریوی ادامهٔ روند موجود است. در این سناریو، به‌دلیل عدم تغییر در ترکیب سوخت ناوگان حمل‌ونقل و کیفیت سوخت، تنها با فرض رعایت ضرایب انتشار IPCC، انتشار ذرات معلق ($PM_{2.5}$) روند کاهشی دارد. میزان این آلاینده در مقایسه با سناریوهای دیگر بسیار بالا است که نشان‌دهندهٔ تأثیر مخرب تداوم وضعیت فعلی بر کیفیت هوای مشهداست.



شکل۳. نمودار تقاضای انرژی برای سال پایه و سال هدف در سناریوی ادامهٔ روند موجود



شکل٤. نمودار انتشار $PM_{2.5}$ برای سال پایه و سال هدف در سناریوی ادامهٔ روند موجود

سناریوی ۲: گذار تدریجی به سوخت‌های پاک

این سناریو منعکس‌کنندهٔ یک رویکرد تدریجی و محتاطانه برای بهبود ناوگان حمل‌ونقل و کاهش آلاینده‌هاست. ویژگی‌های اصلی این سناریو عبارت‌اند از:

–تمرکز بر سوخت‌های گاز طبیعی

–افزایش سهم دوگانه‌سوز و گاز طبیعی در تمام دسته‌های وسایل نقلیه.

– بهبود بهره‌وری سوخت:

– کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی (بنزین و دیزل) با افزایش کارایی سوخت.

–جایگزینی محدود وسایل نقلیه هیبریدی و برقی:

سهم خودروهای هیبریدی و برقی مجموعاً در بازه ۵٪ تا ۱۵٪ بسته به نوع وسیله نقلیه.

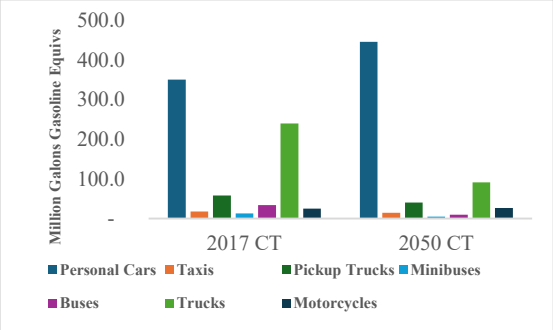
بهبود کیفیت سوخت ۲۰ در صد تا سال ۲۰۳۰ و ۳۰ در صد تا سال ۲۰۵۰

در صدهای اعمال شده به سناریوی ۲ برا ساس ترازنامهٔ انرژی (۱۴۰۱) و محدودیت‌های کشور ایران در نرم‌افزار وارد شده‌اند. در واقع، CT یک مسیر میانه است بین BAU (ادامهٔ وضعیت موجود) و TGT (گذار تکنولوژیکی گسترده) که با بهبود تدریجی فناوری و سوخت های موجود، اما بدون تغییرات بنیادی در سیستم حمل‌ونقل همراه است.

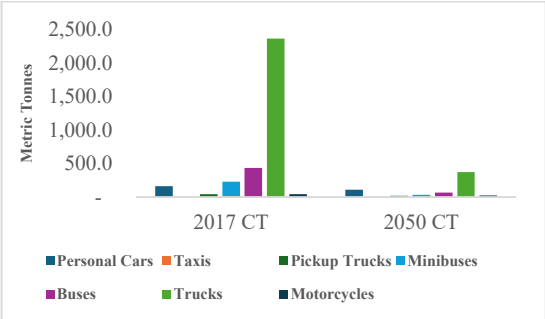
نتایج سناریوی ۲

در نمودار شکل ۵، میزان تقاضای انرژی در سناریوی گذار تدریجی به سوخت‌های پاک نشان داده شده است. در این سناریو، سهم خودروهای دوگانه‌سوز و گازسوز افزایش‌یافته و بخشی از ناوگان حمل‌ونقل به سمت سوخت‌های کم‌آلاینده‌تر حرکت کرده است. بااین‌حال، همچنان مصرف انرژی کل نسبت به سناریوی TGT بالاتر است و کاهش چشمگیری در وابستگی به سوخت‌های فسیلی مشاهده نمی‌شود.

همچنین شکل ٦، انتشار $PM_{2.5}$ در سناریوی گذار تدریجی نمایش داده شده است. کاهش مصرف بنزین و دیزل و جایگزینی نسبی با گاز طبیعی باعث شده است که میزان انتشار این آلاینده نسبت به سناریوی BAU کاهش یابد. اما همچنان بهینه سازی‌های بیشتری نیاز است تا کیفیت هوای مطلوب‌تری حاصل شود.



شکل۵. نمودار تقاضای انرژی برای سال پایه و سال هدف در سناریوی گذار تدریجی به سوخت‌های پاک



شکل٦. نمودار انتشار $PM_{2.5}$ برای سال پایه و سال هدف در سناریوی گذار تدریجی به سوخت‌های پاک

سناریوی ۳: تحول سبز هدفمند

این سناریو با تمرکز بیشتر بر اهداف جهانی طراحی شده است و بر جایگزینی سریع‌تر وسایل نقلیه آلاینده با فناوری‌های پاک‌تر تأکید دارد. نمایانگر گذار تدریجی به یک سیستم حمل‌ونقل کم‌کربن و پاک است که در آن سیاست‌هایی برای بهبود ترکیب سوخت، افزایش نفوذ خودروهای برقی، و توسعهٔ حمل‌ونقل عمومی سبز اجرا می‌شود.

-افزایش سهم برقی‌سازی:
سهم خودروهای برقی و هیبریدی در دسته‌های مختلف به ۲۰٪-۴۰٪ می‌رسد.
-کاهش شدید مصرف سوخت‌های فسیلی:
سهم بنزین و دیزل به حداقل ممکن کاهش می‌یابد.
-توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی:
تمرکز بر برقی‌سازی اتوبوس‌ها و مینی‌بوس‌ها

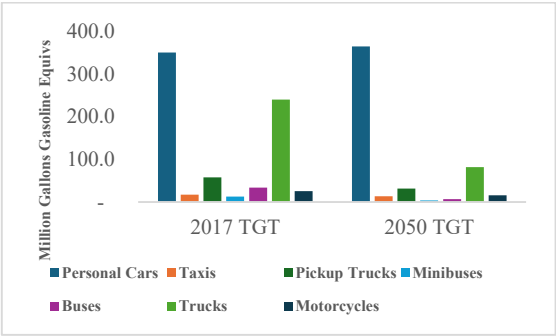
بهبود کیفیت سوخت ۲۵ در صد تا سال ۲۰۳۰ و ۴۰ در صد تا سال ۲۰۵۰

درصدهای اعمال شده به سناریوی ۳ براساس چشم‌انداز انرژی جهان، در نرم‌افزار وارد شده‌اند (World Energy Outlook, 2024).

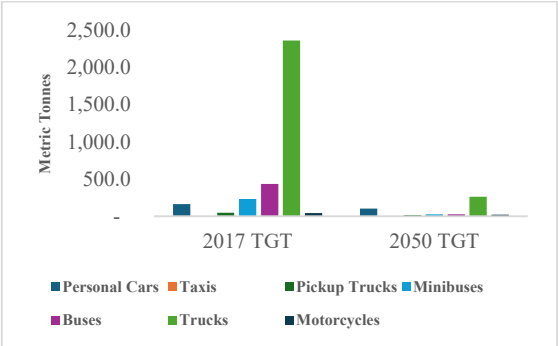
نتایج سناریوی ۳

نمودار شکل ۷، نشان‌دهندهٔ تغییرات تقاضای انرژی در سناریوی تحول سبز هدفمند است. در این سناریو، برقی سازی ناوگان حمل‌ونقل و بهبود بهره‌وری سوخت به‌طور جدی اجرا شده است. در نتیجه، تقاضای کلی انرژی در سال ۲۰۵۰ به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهندهٔ اثربخشی سیاست‌های جایگزینی خودروهای برقی و بهینه سازی مصرف انرژی در حمل‌ونقل عمومی است.

در شکل ۸، میزان انتشار $PM_{2.5}$ در سناریوی تحول سبز هدفمند نمایش داده شده است. به‌دلیل کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، توسعهٔ ناوگان برقی و افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش چشمگیری در انتشار ذرات معلق مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج مدل‌سازی، میزان انتشار $PM_{2.5}$ در این سناریو تا ۵۰٪ کاهش خواهد یافت که بهبود قابل‌توجهی نسبت به سایر سناریوها دارد. این نتایج نشان‌دهندهٔ اثربخشی سیاست‌های حمل‌ونقل پایدار و جایگزینی انرژی‌های پاک در کاهش آلودگی هوای مشهد است.

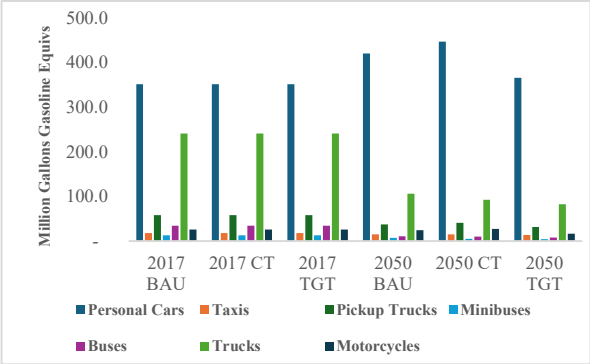


شکل۷. نمودار تقاضای انرژی برای سال پایه و سال هدف در سناریوی تحول سبز هدفمند



شکل ۸ نمودار انتشار $PM_{2.5}$ برای سال پایه و سال هدف در سناریوی تحول سبز هدفمند

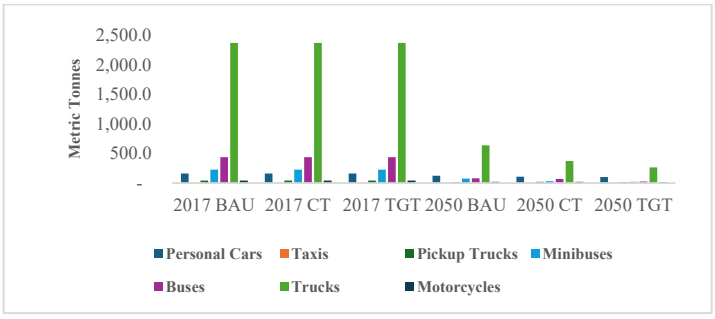
نمودارهای مقایسه‌ای سه سناریو برای تقاضای انرژی و انتشار $PM_{2.5}$ نیز به شرح زیر است.



شکل ۹. نمودار تقاضای انرژی برای سال پایه و سال هدف در سه سناریو

همان‌طور که در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود تقاضای انرژی در حالت کلی در سناریوی سوم کاهشی بوده اما در خودروهای شخصی به تنهایی در سناریوی دوم و سوم نسبت به وضع موجود افزایش داشته است. این مورد می‌تواند به‌علت افزایش جمعیت و تقاضا باشد.

همچنین در این سناریوها افزایش CNG اعمال شده است. این سوخت دارای چگالی انرژی پایین‌تر نسبت بنزین و دیزل است. برای تولید همان مقدار انرژی، حجم بیشتری از CNG نیاز است که ممکن است باعث افزایش تقاضای انرژی کل شود.



شکل ۱۰. نمودار انتشار $PM_{2.5}$ برای سال پایه و سال هدف در سه سناریو

همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود انتشار $PM_{2.5}$ در سناریوی اول کاهشی بوده که علت آن پیش رفتن با استانداردهای تعریف شده در حالت عادی و بدون تغییر در ترکیب وسایل نقلیه و کیفیت سوخت است. با اضافه شدن خودروهایی با نوع سوخت مناسب‌تر و بهبود کیفیت سوخت در سناریوی دوم، این روند کاهشی ادامه می‌یابد. در سناریوی سوم با تشدید کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، افزایش بیش‌تر سهم خودروهای برقی و هیبریدی، توسعهٔ ناوگان حمل‌ونقل عمومی و افزایش بیش‌تر بهبود کیفیت سوخت، نسبت به سناریوی دوم حدود ۵۰ درصد کاهش انتشار $PM_{2.5}$ خواهیم داشت.

٤-۲- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت یکی از روش‌های کلیدی در ارزیابی دقت مدل سازی و بررسی میزان تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر خروجی‌های مدل است. در این پژوهش، تحلیل حساسیت به‌منظور بررسی تأثیر تغییر در برخی از متغیرهای کلیدی بر انتشار آلاینده‌های بخش حمل‌ونقل در کلان‌شهر مشهد انجام شده است. هدف از این تحلیل، سنجش میزان وابستگی نتایج مدل LEAP به تغییرات در رشد اقتصادی، نرخ جایگزینی خودروهای برقی، و بهره‌وری سوخت ناوگان حمل‌ونقل است.

انتخاب متغیرهای تحلیل حساسیت

برای انجام تحلیل حساسیت، سه متغیر کلیدی که بیشترین تأثیر را بر میزان مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌های هوا دارند، انتخاب شده‌اند:

نرخ رشد اقتصادی[۶]

-رشد اقتصادی تأثیر مستقیمی بر افزایش تقاضای انرژی و میزان سفرهای حمل‌ونقلی دارد.

سهم خودروهای برقی در ناوگان حمل‌ونقل[۷]

- کاهش یا افزایش سهم خودروهای برقی بر میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌هاتأثیرگذار است.

میزان بهبود بهره‌وری سوخت در خودروهای جدید[۸]

- خودروهای کارآمدتر، مصرف سوخت کم‌تری داشته و در نتیجه آلاینده‌های کم‌تری تولید می‌کنند.

طراحی سناریوهای تحلیل حساسیت

سه سناریوی تحلیل حساسیت طراحی شده‌اند که در هر یک از آن‌ها یکی از متغیرهای کلیدی تغییر کرده است تا اثر آن بر میزان مصرف انرژی و انتشار آلاینده‌ها مشخص شود:

سناریوی رشد اقتصادی بالا[۹]

– نرخ رشد اقتصادی از ۳٪ در سناریوی پایه به ۵٪ در سال ۲۰۵۰ افزایش یافته است.

سناریوی کاهش سرعت برقی‌سازی[۱۰]

–سهم خودروهای برقی تا سال ۲۰۵۰ از متوسط ۱۰٪ در سناریوی گذار تدریجی به سوخت‌های پاک به ۵٪ کاهش یافته است.

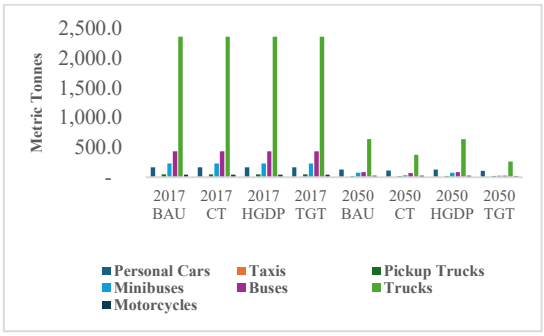
سناریوی بهره‌وری سوخت پایین[۱۱]

–میزان بهبود بهره‌وری سوخت از ۳۰٪ در سناریوی گذار تدریجی به سوخت‌های پاک به ۱۵٪ کاهش یافته است.

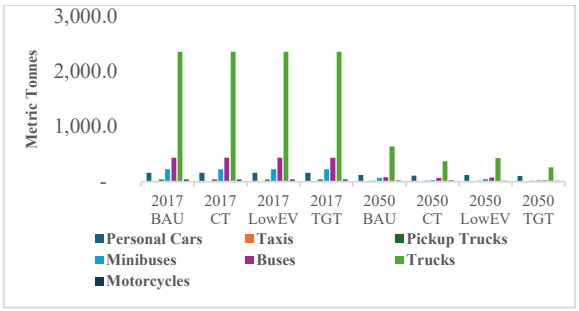
تمام این تغییرات به صورت جداگانه اعمال شده‌اند تا تأثیر هر عامل به‌تنهایی بررسی شود.

نتایج تحلیل حساسیت

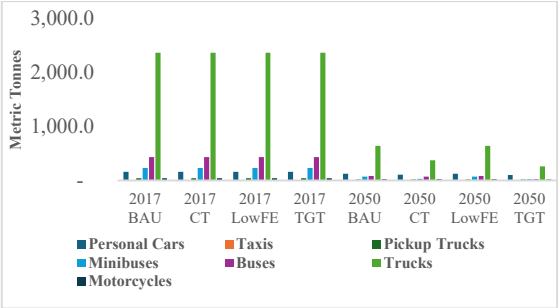
با توجه به شکل ۱۱، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که رشد اقتصادی بالا، افزایش انتشار $PM_{2.5}$ را همراه خواهد داشت. در سناریوی رشد اقتصادی بالا، میزان انتشار $PM_{2.5}$ نسبت به سناریوی CT حدود ۳۴٪ افزایش یافته است، زیرا تقاضای انرژی و سفرهای حمل‌ونقلی بیشتر شده است.



شکل ۱۱. نتایج تحلیل حساسیت با فرض رشد اقتصادی بالا و مقایسه با سناریوهای اصلی مدل



شکل ۱۲. نتایج تحلیل حساسیت با فرض کاهش سرعت برقی‌سازی و مقایسه با سناریوهای اصلی مدل



شکل ۱۳. نتایج تحلیل حساسیت با فرض بهره‌وری سوخت پایین و مقایسه با سناریوهای اصلی مدل

با توجه به شکل ۱۲، کاهش سرعت برقی‌سازی، افزایش وابستگی به سوخت‌های فسیلی را همراه خواهد داشت. در سناریوی کاهش EV، به دلیل عدم جایگزینی کافی خودروهای برقی، میزان انتشار $PM_{2.5}$ نسبت به سناریوی CT حدود ٪۱۲ افزایش پیدا کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که برقی‌سازی ناوگان، نقش کلیدی در کاهش آلودگی هوا دارد. با توجه به شکل ۱۳، بهره‌وری سوخت پایین، افزایش مصرف سوخت و آلاینده‌ها را همراه خواهد داشت. در سناریوی کاهش بهره‌وری سوخت، به دلیل کاهش میزان کارایی خودروهای جدید، انتشار $PM_{2.5}$ نسبت به سناریوی CT حدود ٪۳٤ افزایش یافته است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که سیاست‌های برقی‌سازی و بهبود بهره‌وری سوخت، نقش کلیدی در کاهش آلودگی هوا دارند. در صورت کاهش حمایت از توسعهٔ خودروهای برقی، مصرف سوخت‌های فسیلی افزایش یافته و آلودگی شهری تشدید می‌شود. بهبود ٪۱۰ بیشتر در بهره‌وری سوخت، می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد.

در نهایت، این تحلیل حساسیت اهمیت سیاست‌گذاری صحیح در مدیریت انرژی و کاهش آلاینده‌ها را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل سازی، سیاست‌های زیر برای بهبود ترکیب سوختی و کاهش آلاینده‌های حمل‌ونقل در مشهد پیشنهاد می‌شوند.

-افزایش سهم خودروهای برقی و توسعهٔ زیرساخت‌های شارژ: برقی‌سازی ناوگان حمل‌ونقل به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در کاهش انتشار $PM_{2.5}$ و سایر آلاینده‌ها باید در اولویت سیاست‌گذاری قرار گیرد.

- حمایت از حمل‌ونقل عمومی پاک، مانند اتوبوس های برقی: توسعهٔ ناوگان اتوبوس های برقی و ایجاد خطوط حمل‌ونقل سبز، می‌تواند مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار آلاینده‌ها را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

- اعمال مالیات بر خودروهای دیزلی پرمصرف: مالیات بر سوخت‌های پرآلاینده مانند دیزل می‌تواند به افزایش هزینهٔ استفاده از این خودروها و در نتیجه کاهش سهم آن‌ها در ناوگان حمل‌ونقل کمک کند.

- اصلاح استانداردهای مصرف سوخت و بهبود بهره‌وری انرژی در ناوگان حمل‌ونقل: اجرای استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر برای مصرف سوخت در خودروهای جدید و توسعهٔ فناوری‌های هیبریدی و برقی‌سازی در حمل‌ونقل عمومی، از دیگر راهکارهای پیشنهادی این مطالعه است.

٦- پی‌نوشت‌ها

1. The Low Emissions Analysis Platform
2. Business As Usual (BAU)
3. Clean Transition (CT)
4. Targeted Green Transformation (TGT)
5. Fuel Economy
6. GDP Growth Rate
7. EV Adoption Rate
8. Fuel Economy Improvement
9. High GDP Growth (HGDP)
10. Low EV Adoption (LowEV)
11. Low Fuel Economy Improvement (LowFE)

۷-مراجع

-Achour, H., & Belloumi, M. (2016). Investigating the causal relationship between transport infrastructure, transport energy consumption and economic growth in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 988-998.

-Adnan, N., Nordin, S. M., Rahman, I., & Amini, M. H. (2017). A market modeling review study on predicting Malaysian consumer behavior towards widespread adoption of PHEV/EV. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 17955-17975.

-Al-Jabir, M., & Isaifan, R. J. (2023). Low Transportation Emission Analysis and Projection Using LEAP: The Case of Qatar. *Atmosphere*, *14*(8), 1286.

-Chang, C. R., Li, M. H., & Chang, S. D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, *80*(4), 386-395.

-Energy Information (n.d.). Energy data and statistics of Iran.

-Erickson, L. E. (2017). Reducing greenhouse gas emissions and improving air quality: Two global challenges. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *36*(4), 982–988.

-Fahimifar, S. and Afshar, F. (2010). Study and measurement of air pollution in Mashhad city. 2*nd Urban Planning and Management Conference,* Ferdowsi University of Mashhad.

-Hong, S., Chung, Y., Kim, J., & Chun, D. (2016). Analysis on the level of contribution to the national greenhouse gas reduction target in Korean transportation sector using LEAP model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 549-559.

-International Energy Agency. (2018). Key world energy statistics 2018. *IEA.*

-International Energy Agency. (2021). World energy outlook 2021. *IEA.*

-International Energy Agency. (2021). World energy outlook 2024. *IEA.*

-Iranian Fuel Conservation Organization. (2012). Iran's Fuel Consumption Guide for LDVs: Transportation sector. *IFCO.*

-Maduekwe, M., Akpan, U., & Isihak, S. (2020). Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: An application of the LEAP model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, *6*, 100172.

-Ministry of energy. (2014). Energy Balance Annual Report. *MOE.*

-Mohammadi, Sh., Emami Meybodi, A., Javan, A. and Fakhei, A. (2018). Simulation of Iran's energy balance for 2041 and design of supply and demand-side management scenarios using LEAP. *Iranian Energy Economics Journal*, 8(29), 103–129.

-Ministry of Petroleum (2017). National Hydrocarbon Balance. Institute for International Energy Studies, Tehran.

-Ministry of Energy (2022). National Energy Balance. *Institute for International Energy Studies,* Tehran. (in Persian)

-Moradi, M., Ahmadi, S. and Amidpour, M. (2013). Development of a national-level energy demand model using LEAP software. *Energy Planning and Policy Research*, 1(3), 51–82.

-National Iranian Oil Refining and Distribution Company. (2014). Consumption Statistics and Information. *NIORDC.*

-Pourabedin, G. (2022). Energy and Environment. Tehran.

-Sehatpour, M. H., Kazemi, A., & Sehatpour, H. E. (2017). Evaluation of alternative fuels for light-duty vehicles in Iran using a multi-criteria approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*, 295-310.

-Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2010). Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy*, *35*(5), 2323-2332.

-Shahbazi, H., Mostafazadeh, A., Ahmadi, M., Taghvaei, S., Babaei, M., Salamat, Y., Afshin, H. and Hosseini, V. (2013). Tehran Air Pollution Emission Inventory for the Base Year Vol. I: Comprehensive Report. *Air Quality Control Company,* Tehran Municipality.

-Shafipour, M., Ardestani, M., & Sarraf, M. (2007). Fuels Price Structuring; A Tool for Integration of Environmental Concerns into Energy Sector.

-Stockholm Environment Institute. (2024). *LEAP* user guide *2024. SEI.*

-Wikipedia (n.d.). Persian Wikipedia. Retrieved from https://fa.wikipedia.org/.

-Williams, N. S., Schwartz, M. W., Vesk, P. A., McCarthy, M. A., Hahs, A. K., Clemants, S. E., ... & McDonnell, M. J. (2009). A conceptual framework for predicting the effects of urban environments on floras. *Journal of Ecology*, *97*(1), 4-9.

-World Health Organization (WHO). (2018). *Air Pollution and Health*.

-Yousofpour, Y., Abolhassani, L., Hirabayashi, S., Burgess, D., Sabouni, M. S., & Daneshvarkakhki, M. (2024). Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad. *Sustainable Cities and Society*, *101*, 105-110.

Scenario Analysis of Urban Transport Fleet Fuel Mix and Its Impacts on Energy Consumption and Air Pollutant Emissions in Mashhad Metropolis Using the LEAP Modeling Approach

Abolfazl Yari, Ph.D., Student, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.

Khosro Ashrafi, *Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.*

Mohammad Ali Zahed, Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Biological Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

E-mail: khashrafi@ut.ac.ir

Received: February 2026- Accepted: May 2026

ABSTRACT

Rapid population growth, rising transportation demand, and high dependency on fossil fuels have significantly increased air pollution and energy consumption in Iran's metropolitan areas. This study evaluates and compares different fuel mix scenarios for the urban transport fleet in Mashhad by 2050, using the Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) model. Three scenarios were developed: Business as Usual (BAU), Clean Transition (CT), and Targeted Green Transformation (TGT), analyzing their impacts on energy use and $PM_{2.5}$ emissions. Findings reveal that under the BAU scenario, reliance on gasoline and diesel continues, leading to increased energy consumption and air pollution. In contrast, the TGT scenario—focusing on the replacement of fossil-fueled vehicles with electric and hybrid ones, along with improvements in fuel quality—achieves up to a 50% reduction in $PM_{2.5}$ emissions. Sensitivity analyses on key variables such as economic growth rate, electrification share, and fuel efficiency indicate that energy efficiency policies and clean transport development play a critical role in reducing environmental pollutants. The study underscores the urgent need for comprehensive strategies on sustainable transport planning and support for emerging clean energy technologies in large urban centers.

Keywords: Energy Optimization, $PM_{2.5}$ Emissions, Urban Transport Fleet, LEAP Modeling, Sustainable Transport