

مدل‌سازی سناریوهای انرژی و انتشار CO₂ در استان اصفهان با استفاده از LEAP: ارزیابی سیاست انرژی پاک طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

مرجان بدری^۱، محمدرضا تابش^۲، هومن بهمن‌پور^{۳*}، علی محمدی^۴، فرهام امین‌شرعی^۵

Doi:10.82383/jdep.2025.1227750

چکیده

توسعه پایدار در بخش انرژی و محیط زیست، یکی از مهم‌ترین الزام‌های قرن حاضر است؛ زیرا رشد بی‌رویه مصرف انرژی فسیلی نه تنها منابع محدود را به سرعت تخلیه می‌کند، بلکه با افزایش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات اقلیمی برگشت‌ناپذیری را به همراه دارد و سلامت انسان و اکوسیستم‌ها را تهدید می‌کند. افزایش تقاضای انرژی و رشد انتشار CO₂ در استان اصفهان طی دو دهه اخیر، ضرورت تحلیل روند مصرف انرژی و ارزیابی اثر سیاست‌های انرژی پاک را برجسته می‌سازد. مسئله اصلی این پژوهش، بررسی تغییرات مصرف نهایی انرژی و انتشار کربن در سناریوی تداوم روند موجود و مقایسه آن با اجرای سیاست‌های انرژی پاک در افق ۲۰۴۰ است که می‌تواند از اهداف توسعه پایدار باشد. هدف تحقیق، مدل‌سازی مصرف انرژی، تحلیل ساختار سبب سوخت، سنجش پتانسیل کاهش انتشار CO₂ و ارزیابی حساسیت نتایج نسبت به فرضیات کلیدی است. داده‌های مورد استفاده شامل مصرف انرژی بخش‌های خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل و خدمات، مصرف سوخت‌های مختلف، شاخص‌های انرژی و انتشار و روندهای جمعیتی و اقتصادی در بازه ۲۰۲۱-۲۰۴۰ است. روش تحلیل مبتنی بر مدل‌سازی سناریویی در نرم‌افزار LEAP همراه با تحلیل حساسیت (Tornado) است. نتایج نشان می‌دهد که اجرای سیاست انرژی پاک می‌تواند تا ۱۴.۳ درصد کاهش انتشار CO₂ در سال ۲۰۴۰ ایجاد کند و بخش صنعت بیشترین نقش را در کاهش یا افزایش انتشار دارد. همچنین نیروی محرکه اصلی تغییرات، شدت انرژی صنعتی و بازده نیروگاه‌ها است. بر اساس یافته‌ها، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، ارتقای بهره‌وری صنعتی و اصلاح الگوی مصرف انرژی، مهم‌ترین اقدامات پیشنهادی برای مدیریت انتشار و بهبود پایداری انرژی استان است.

واژگان کلیدی: انرژی پاک، مدل LEAP، انتشار CO₂، سناریوهای انرژی، بهره‌وری انرژی

^۱ دانشجوی دکتری گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران marjan.badri@srbiau.ac.ir

^۲ گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران mr.tabesh@srbiau.ac.ir

^۳ گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست (HSE)، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران، (نویسنده مسئول) hbahmanpour@iau.ac.ir

^۴ گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، Ali.mohammadi@srbiau.ac.ir

^۵ واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران (HSE) گروه مهندسی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، Fa.aminsharei@iau.ac.ir

۱. مقدمه

توسعه پایدار در بخش انرژی و محیط زیست امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و الزام‌های جهانی شناخته می‌شود؛ زیرا الگوهای فعلی تولید و مصرف انرژی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی، مهم‌ترین عامل انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی هستند (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۱ 2022). بر اساس گزارش‌های اخیر، بخش انرژی بیش از ۷۳ درصد از کل انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده و ادامه روند کنونی می‌تواند افزایش دمای کره زمین را تا پایان قرن به بیش از ۵٫۳ درجه سانتی‌گراد برساند که پیامدهای فاجعه‌بار جانی، اقتصادی و اکولوژیکی به دنبال خواهد داشت (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۲۳). در این میان، گذار به سیستم‌های انرژی پاک، افزایش چشمگیر بهره‌وری انرژی و توسعه گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان سه رکن اصلی استراتژی‌های توسعه پایدار انرژی معرفی شده‌اند (آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر^۲، ۲۰۲۳). این گذار نه تنها برای کاهش مخاطرات اقلیمی ضروری است، بلکه فرصت‌های گسترده‌ای برای ایجاد اشتغال سبز، کاهش وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی و بهبود کیفیت هوا و سلامت عمومی فراهم می‌آورد.

در سال‌های اخیر، مسئله تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسید کربن (CO₂) یکی از اولویت‌های کلان سیاست انرژی در سطح جهان قرار گرفته است (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۱۸). یکی از راهبردهای مؤثر برای کاهش انتشار CO₂، طراحی سناریوهای انرژی با استفاده از مدل‌سازی بلندمدت است که به سیاست‌گذاران امکان شناسایی مسیرهای پایدارتر را می‌دهد (احمدی خلیجی^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). در این میان، نرم‌افزار LEAP^۴ به‌عنوان یکی از ابزارهای مدل‌سازی انرژی-انتشار، به دلیل سادگی و انعطاف بالا در تحلیل سناریوهای مختلف آینده‌ای، محبوبیت فزاینده‌ای دارد (گلفام و آشفته، ۲۰۲۴). با این حال، بیشتر مطالعات موجود در ایران در مقیاس ملی انجام شده‌اند تا استانی، و تمرکز آن‌ها عمدتاً بر ترکیب انرژی، بهره‌وری نیروگاه‌ها و انتشار در سطح کشور بوده است (مطالعه موردی ایران ملی؛ برای مثال تحقیق ملی با مدل‌سازی بلندمدت در سطح کل کشور) (مدل‌سازی مبتنی بر سناریو برای ایران^۵، ۲۰۲۵؛ پروین و گلفام ۲۰۲۴).

در مطالعات استانی نیز برخی تلاش‌ها انجام شده است؛ برای نمونه، احمدی خلیجی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از مدل LEAP، چهار استان ایران با اقلیم‌های متفاوت را در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۳۲ مدل‌سازی کردند تا پتانسیل منابع تجدیدپذیر و کمبود فصلی انرژی را تحلیل کنند (احمدی خلیجی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، در منطقه مارون (یک منطقه خاص در ایران)، گلفام و آشفته (۲۰۲۴) با مدل LEAP سناریوهای انرژی و انتشار را تا سال ۲۰۴۰ پیش‌بینی کردند و نشان دادند که سناریوهای با انرژی تجدیدپذیر می‌تواند کاهش قابل توجهی در انتشار داشته باشد (گلفام و آشفته، ۲۰۲۴). در صنعت سیمان ایران نیز، یک مطالعه با LEAP نشان داده است که استفاده از جایگزینی سوخت و بهره‌وری انرژی می‌تواند انتشار معادل CO₂ را تا حدود ۱۳٪ کاهش دهد (تحلیل سناریو در صنعت سیمان، ۲۰۲۰). این نمونه‌ها نشان می‌دهند که مدل‌سازی LEAP در ایران به کار رفته، اما تمرکز آن بر بخش‌های خاص یا مقیاس کل کشور بوده است.

از سوی دیگر، رویکردهای نظری‌تر نیز مطرح شده‌اند؛ به عنوان مثال، آقاسی (۲۰۱۵) سناریوهای مختلف سیستم تولید و مصرف برق ایران را با LEAP بررسی کرده و نشان داده است که گزینه‌های سیاستی می‌تواند به تغییرات ساختاری در مصرف برق منجر شود (آقاسی، ۲۰۱۵). همچنین، برخی مطالعات پویای انرژی بر اساس مدل‌سازی سیستم برای تحلیل سیاست کاهش کربن در صنعت برق ایران مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از جمله تحلیل مالیات کربن و بازار انتشار؛ این مطالعات نشان می‌دهند که ابزارهای سیاستی می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر انتشار داشته باشند (مدل‌سازی دینامیک سیستم در ایران^۶، ۲۰۲۱) (مثلاً مالیات کربن، آمایش بازار انتشار) (بحث سیاست کربن در صنعت برق ایران، ۲۰۲۱). ضمناً، تحلیل روند

^۱ IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)

^۲ IRENA (International Renewable Energy Agency)

^۳ Ahmadi-Kaliji

^۴ Long-range Energy Alternatives Planning

^۵ based modelling for Iran

^۶ system dynamics modeling in Iran

مصرف انرژی و انتشار CO₂ در بخش‌های مختلف در سطح ایران نشان می‌دهد که با وجود تلاش‌ها برای اصلاح یارانه‌ها، مصرف سوخت‌های فسیلی همچنان بالا است و سهم گاز طبیعی در ترکیب انرژی خانوارها افزایش یافته است (عطا، ۲۰۲۴؛ بررسی اجمالی مصرف انرژی در ایران^۱، ۲۰۲۴). با وجود این مطالعات، شکاف مهمی در ادبیات وجود دارد: کمتر دیده شده است که مدل‌سازی LEAP به صورت دقیق بر یک استان بزرگ و صنعتی مانند اصفهان با تمرکز بر سناریوهای سیاست انرژی پاک انجام شود. استان اصفهان با جمعیت زیاد، رشد اقتصادی قابل توجه و ترکیب بخش‌های صنعتی، خانگی، خدماتی و حمل‌ونقل، یک مورد مطالعاتی بسیار مناسب برای تحلیل موضعی انتشار و سیاست انرژی است. همچنین، بسیاری از مطالعات استانی محدود به اقلیم یا بخش خاص بوده‌اند و سناریوهایی با تمرکز بر بهره‌وری انرژی، جایگزینی سوخت و انتشار در سطح طراحی سیاست، کمتر بررسی شده‌اند.

از منظر سیاست‌گذاری، اجرای سیاست انرژی پاک در سطح استان، مانند افزایش سهم برق تجدیدپذیر، بهبود راندمان مصرف انرژی، و جایگزینی سوخت‌های فسیلی، می‌تواند تأثیر بزرگی بر انتشار CO₂ داشته باشد؛ با این حال، تصمیم‌گیرندگان محلی اغلب فاقد داده‌های دقیق سناریویی هستند که نشان دهد کدام ترکیب مداخلات بیشترین اثربخشی را دارد. بنابراین، پژوهش حاضر با مدل‌سازی LEAP برای استان اصفهان در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰، تلاش می‌کند تا سناریوهای مختلف انرژی را شبیه‌سازی کرده و تأثیر سیاست انرژی پاک را بر انتشار CO₂ مورد ارزیابی قرار دهد.

هدف اصلی این مطالعه، تحلیل سناریوهای «کسب‌وکار همیشگی» (BAU) و «سیاست انرژی پاک» برای استان اصفهان است تا چشم‌اندازی از مسیر انتشار در دهه‌های آتی ارائه شود. علاوه بر این، مطالعه قصد دارد شاخص‌هایی مانند انتشار کل، انتشار سرانه، شدت انرژی و درصد کاهش انتشار را محاسبه کند و به سیاست‌گذاران محلی نشان دهد که کدام مداخلات سیاستی بیشترین بازده محیط‌زیستی را دارند. با این رویکرد، این تحقیق هم شکاف ادبیاتی را در سطح استانی پر می‌کند و هم ارائه یک چارچوب کاربردی برای برنامه‌ریزی انرژی محلی که بتواند به سیاست‌گذاری بهینه در استان اصفهان کمک کند.

به منظور دستیابی به این اهداف، ساختار مقاله به این شکل خواهد بود: ابتدا مدل LEAP برای اصفهان تنظیم خواهد شد با استفاده از داده‌های تاریخی مصرف انرژی، جمعیت، تولید ناخالص داخلی و انتشار پایه. سپس، دو سناریوی اصلی (BAU و پاک) تعریف شده و شبیه‌سازی خواهند شد. در نهایت، نتایج تحلیل شده، شاخص‌های محیط‌زیستی و اقتصادی استخراج شده و پیشنهاد‌های سیاستی مبتنی بر مداخلات بهینه ارائه می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه: استان اصفهان

استان اصفهان به عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های صنعتی، اقتصادی و جمعیتی کشور، در مرکز فلات ایران واقع شده و ساختار انرژی بر آن نقش اساسی در تعیین الگوهای انتشار آلاینده‌ها دارد. این استان با دارا بودن شهرهای بزرگ و صنعتی مانند اصفهان، کاشان، خمینی شهر و لنجان، همچنین میزبانی صنایع مادر نظیر فولاد، ذوب‌آهن، پتروشیمی، نساجی و نیروگاه‌های بزرگ حرارتی، یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ایران محسوب می‌شود. اقلیم نیمه‌خشک، کمبود منابع آب، رشد جمعیت شهری و توسعه صنعتی فزاینده، اصفهان را به منطقه‌ای حساس از نظر پایداری انرژی و محیط‌زیست تبدیل کرده است. به همین دلیل انتخاب این استان برای تحلیل سناریوهای انرژی و ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند تصویر دقیقی از چالش‌های واقعی کشور در بخش انرژی ارائه دهد.

از سوی دیگر، ساختار مصرف انرژی در بخش‌های خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل و تجاری در اصفهان تفاوت‌های قابل توجهی با سایر استان‌ها دارد و به دلیل سهم بالای صنایع سنگین، شدت انرژی در این استان بیش از میانگین ملی گزارش شده است. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که مدل‌سازی بلندمدت با استفاده از LEAP در اصفهان بتواند اثر تغییرات در متغیرهای کلیدی مانند رشد GDP منطقه‌ای، نرخ رشد جمعیت، بهبود بازده نیروگاه‌ها و اصلاح الگوی مصرف انرژی را با دقت بالاتری بررسی کند. انتخاب اصفهان همچنین به محقق اجازه می‌دهد تا سناریوهای کاهش انتشار را در بستری واقعی، پویا و دارای چالش‌های زیست‌محیطی مهم آزمون کرده و نتایج قابل اتکایی برای سیاست‌گذاری انرژی در سطح ملی و منطقه‌ای به دست آورد.

¹ Overview of energy consumption in Iran

۱. روش تحقیق

این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد مدل‌سازی سناریویی در حوزه سیستم‌های انرژی انجام شده است؛ رویکردی که امکان تحلیل رفتار آینده سیستم انرژی را تحت ترکیبات مختلف سیاستی و تغییرات ساختاری فراهم می‌کند (هیپس^۱، ۲۰۲۲). از آنجا که بسیاری از سیاست‌های زیست‌محیطی تأثیر خود را در بازه‌های زمانی بلندمدت نشان می‌دهند، مدل‌های سناریویی بهترین ابزار برای تحلیل پیامدهای آنها محسوب می‌شوند (مورفی^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، نرم‌افزار LEAP به عنوان یک چارچوب یکپارچه برای مدل‌سازی عرضه، تقاضا، سبد سوخت و انتشار CO₂ در استان اصفهان مورد استفاده قرار گرفته است. LEAP به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در تعریف ساختارهای انرژی، کاربرپسندی و توانایی محاسبه انتشار مستقیم و غیرمستقیم، ابزار اصلی بسیاری از مطالعات انرژی در ایران و جهان بوده است (هیپس، ۲۰۲۰؛ هاولس^۳، ۲۰۱۱). دوره زمانی تحقیق ۲۰۲۱-۲۰۴۰ انتخاب شد زیرا این بازه تطابق بالایی با اسناد توسعه انرژی کشور و چشم‌اندازهای اقلیمی ایران دارد و امکان مقایسه با مطالعات مشابه را فراهم می‌کند (چشم‌انداز انرژی در ایران^۴، ۲۰۲۲).

مراحل اجرای مدل LEAP

فرآیند مدل‌سازی در LEAP به چهار مرحله اصلی تقسیم می‌شود.

- (۱) **تعریف ساختار سیستم انرژی استان:** ساختار مدل شامل بخش‌های خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل، خدمات و کشاورزی است. هر بخش بر اساس فعالیت، فناوری، مصرف انرژی و سوخت تفکیک شده است (هیپس، ۲۰۲۰).
- (۲) **وارد کردن داده‌های پایه و پارامترهای کلیدی:** این داده‌ها شامل جمعیت، GDP، نرخ رشد بخش‌ها، شدت انرژی، الگوی تقاضای انرژی و ضرایب انتشار است.
- (۳) **طراحی و اعمال سناریوهای آینده‌نگر:** سناریوهای BAU و سیاست انرژی پاک با فرضیات متفاوت درباره بهره‌وری انرژی، ترکیب سوخت، الگوی حمل‌ونقل و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر تدوین می‌شوند.
- (۴) **محاسبه و استخراج خروجی‌ها:** خروجی‌ها شامل مصرف انرژی، انتشار CO₂، انتشار سرانه و تغییرات ترکیب سوخت در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ است.

این تقسیم‌بندی مشابه استانداردهایی است که توسط SEI^۵ برای انجام مطالعات LEAP توصیه شده است (موسسه محیط زیست استکهلم^۶، ۲۰۲۲). شکل ۱ ساختار کلی سیستم انرژی را در چارچوب مدل LEAP به صورت مرحله‌ای و سلسله‌مراتبی نمایش می‌دهد. در این شکل، ابتدا منابع اصلی انرژی شامل برق، گاز طبیعی، فرآورده‌های نفتی و زیست‌توده نشان داده شده‌اند که هر کدام با رنگ مجزا مشخص شده‌اند. این منابع سپس به بخش‌های مختلف مصرف‌کننده—خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل و خدمات—توزیع می‌شوند. مسیر جریان انرژی از سمت چپ به راست حرکت کرده و نهایتاً به دو گروه انتشار CO₂ یعنی انتشار مستقیم ناشی از مصرف سوخت و انتشار غیرمستقیم ناشی از مصرف برق ختم می‌شود. این ساختار تصویری کمک می‌کند تا روابط بین عرضه، تقاضا و پیامدهای زیست‌محیطی سیستم انرژی به صورت یک تصویر یکپارچه درک شود.

¹ Heaps

² Murphy

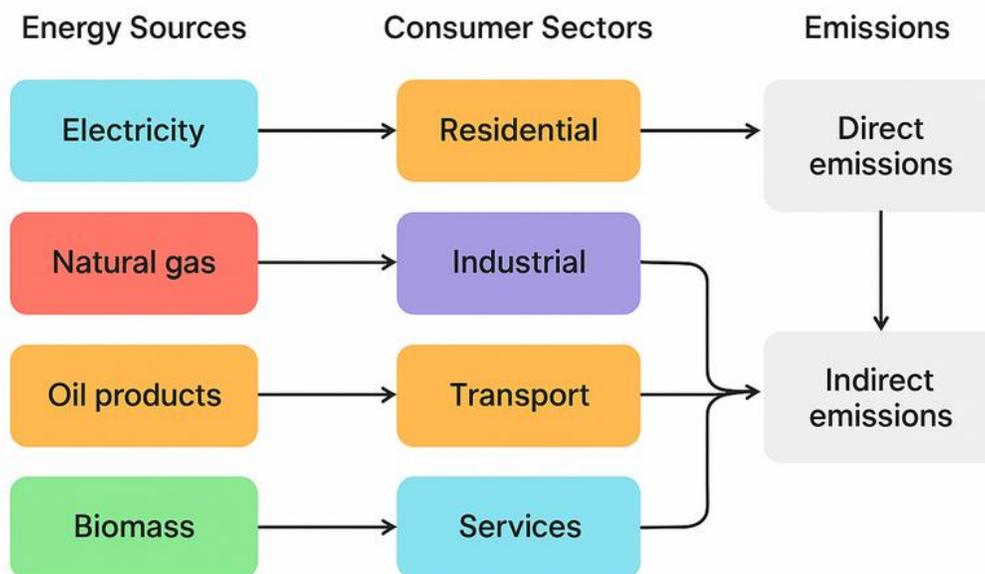
³ Howells

⁴ Energy Outlook Iran

⁵ Stockholm Environment Institute

⁶ SEI (Stockholm Environment Institute)

LEAP Model Diagram



شکل ۱- ساختار کلی سیستم انرژی را در چارچوب مدل LEAP

شکل (۱) جریان نشان می‌دهد که چگونه هر منبع انرژی سهم مشخصی در تغذیه بخش‌های مختلف اقتصادی دارد و چطور تغییرات در سبک سوخت یا ساختار مصرف هر بخش می‌تواند مسیر انتشار CO_2 را تحت تأثیر قرار دهد. برای مثال، مشاهده می‌شود که برق و گاز طبیعی بیشترین جریان را به سمت بخش‌های خانگی و خدمات هدایت می‌کنند، در حالی که بخش حمل‌ونقل به‌طور عمده از فرآورده‌های نفتی تغذیه می‌شود. این الگو اهمیت بخش‌بندی دقیق تقاضا در مدل LEAP را نشان می‌دهد.

در بخش پایانی شکل، نمایش هم‌زمان انتشار مستقیم و غیرمستقیم تأکید می‌کند که کاهش انتشار فقط به تغییر در مصرف سوخت‌ها محدود نیست، بلکه ارتقای بازده نیروگاه‌ها و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید برق نیز نقش مهمی دارد. این نمودار به‌عنوان یک ابزار بصری، فهم ارتباطات درونی سیستم انرژی و مسیرهای اثرگذاری سیاست‌های انرژی پاک را ساده‌تر و شفاف‌تر می‌کند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های این پژوهش از ترکیبی از منابع معتبر رسمی و علمی استخراج شده‌اند. داده‌های جمعیتی و تعداد خانوار از گزارش‌های مرکز آمار ایران (۲۰۲۱-۲۰۲۳) و مطالعات آمایش سرزمین استان اصفهان گرفته شده‌اند (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲). اطلاعات اقتصادی و GDP بر اساس گزارش‌های سازمان برنامه‌بودجه و بانک مرکزی تهیه گردید. ترازنامه انرژی ایران، داده‌های مصرف بخش‌های مختلف انرژی را تا سال ۲۰۲۱ در اختیار قرار داده است (وزارت نیرو، ۱۴۰۱). داده‌های مربوط به شبکه برق استان و بازده نیروگاه‌ها از گزارش شرکت توانیر و برق منطقه‌ای اصفهان استخراج شده است. ضرایب انتشار نیز مطابق راهنمای IPCC ۲۰۰۶ وارد مدل شده‌اند (هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم، ۲۰۰۶). استفاده از داده‌های متنوع و چندمنبعی موجب افزایش دقت و اعتبار مدل شده است.

مدل‌سازی تقاضای انرژی

مدل تقاضای انرژی برای هر بخش بر اساس روابط علی و وابسته به فعالیت تعریف شده است. در بخش خانگی، متغیرهای جمعیت، تعداد خانوار، اندازه خانوار، سطح رفاه، ضریب نفوذ تجهیزات، و انواع سوخت مصرفی در نظر گرفته شده‌اند (عطا، ۲۰۲۴). الگوی مصرف برق، گاز و فرآورده‌های نفتی در این بخش بر اساس داده‌های تاریخی کالیبره شده است.

در بخش صنعتی، برای هر زیربخش (فولاد، سیمان، پتروشیمی، کاشی و سرامیک و...) شاخص‌های تولید، شدت انرژی، فناوری‌های موجود و ساختار سوخت تعریف شده است (آژانس بین‌المللی انرژی ۲۰۲۱). در بخش حمل‌ونقل، تعداد خودرو، نرخ رشد ناوگان، سهم خودروهای شخصی، حمل‌ونقل عمومی، خودروهای دیزلی و بنزینی، پیمایش سالانه و مصرف واحدی سوخت لحاظ شده است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲). سهم احتمالی خودروهای هیبریدی و برقی نیز در سناریوی پاک اعمال شده است. در بخش خدمات و کشاورزی نیز داده‌های مصرف انرژی موتور پمپ‌ها، سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی، تجهیزات خدماتی و نوع سوخت آن‌ها وارد مدل شده است.

مدل‌سازی عرضه انرژی و ترکیب سوخت

در بخش عرضه انرژی، ساختار تولید برق، بازده نیروگاه‌ها، ترکیب سوخت نیروگاه‌های اصفهان، انرژی‌های تجدیدپذیر و انتقال برق مدل‌سازی شده است. اطلاعات نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی استان از گزارش‌های توانیر گرفته شده و در مدل بازده هر واحد به صورت جداگانه تعریف شده است (توانیر، ۱۴۰۲). ظرفیت انرژی تجدیدپذیر شامل خورشیدی و بادی استان نیز بر اساس برنامه‌های توسعه وزارت نیرو و سازمان ساتبا وارد مدل شده است (ساتبا، ۱۴۰۲). در سناریوی سیاست انرژی پاک، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر سالانه ۲ تا ۴ درصد افزایش داده شده و بازده نیروگاه‌ها مطابق استانداردهای ارتقای بهره‌وری جهانی بهبود یافته است (آژانس بین‌المللی انرژی ۲۰۲۲). این تغییرات اثر مستقیم بر انتشار غیرمستقیم برق مصرفی دارد.

تدوین سناریوها

دو سناریوی اصلی طراحی شده‌اند:

سناریوی BAU (کسب‌وکار همیشگی)

این سناریو فرض می‌کند که روندهای فعلی مصرف انرژی، رشد تقاضا، بازده تولید و سهم سوخت بدون اجرای سیاست جدید ادامه می‌یابد. شاخص‌هایی مثل رشد تقاضای برق و گاز، شدت انرژی و سهم سوخت‌ها بر اساس میانگین ده سال گذشته ادامه پیدا می‌کنند (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲).

سناریوی سیاست انرژی پاک

این سناریو مجموعه‌ای از مداخلات سیاستی را شامل می‌شود:

- افزایش بهره‌وری انرژی در صنعت و ساختمان
- جایگزینی سوخت‌های پاک (گاز، برق، انرژی تجدیدپذیر)
- کاهش شدت انرژی بخش حمل‌ونقل
- توسعه تولید برق تجدیدپذیر
- بهبود بازده نیروگاه‌ها
- ورود ناوگان برقی و هیبریدی

تنظیم نرخ اثرگذاری این سیاست‌ها بر اساس مطالعات مشابه انجام شده در ایران، هند و چین است (احمدی خلیجی و همکاران، ۲۰۲۳؛ آقاسی، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰).

ضرایب انتشار و محاسبه CO₂

¹ International Energy Agency

² Li

محاسبات انتشار CO₂ شامل انتشار مستقیم (Direct emissions) و انتشار غیرمستقیم برق مصرفی است.

انتشار مستقیم بر اساس ضرایب IPCC برای انواع سوخت محاسبه شده است:

– گاز طبیعی: ۵۶.۱ kg CO₂/GJ

– گازوئیل: ۷۴ kg CO₂/GJ

– بنزین: ۶۹.۳ kg CO₂/GJ

– نفت کوره: ۷۷.۴ kg CO₂/GJ

(IPCC, 2006)

انتشار غیرمستقیم برق مطابق ترکیب سوخت نیروگاه‌های استان و بازده آنها محاسبه شده است. اگر سهم بیشتری از برق از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی یا تجدیدپذیر باشد، انتشار غیرمستقیم کاهش می‌یابد.

برای ارزیابی عملکرد سناریوها، مجموعه‌ای از شاخص‌های کمی شامل انتشار کل CO₂، انتشار سرانه، شدت انرژی، شدت انتشار، سهم انرژی پاک، و درصد کاهش انتشار محاسبه شد. این شاخص‌ها امکان مقایسه دقیق بین سناریوها و تحلیل اثرات سیاستی را فراهم می‌سازند. خروجی‌ها در فواصل سالانه برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ استخراج و تحلیل شدند.

نتایج خروجی LEAP شامل نمودارهای مصرف انرژی، انتشار، ترکیب سوخت و تغییرات تقاضا در طول زمان است. روندهای زمانی استخراج و با استفاده از تحلیل مقایسه‌ای بررسی شده‌اند (ژاو و همکاران، ۲۰۱۳). برای افزایش دقت، تحلیل حساسیت نسبت به تغییر در فرضیات کلیدی انجام شد؛ از جمله رشد جمعیت، GDP، بازده نیروگاه‌ها و شدت انرژی بخش صنعت. این کار نشان داد کدام فرضیات بیشترین تأثیر را بر مسیر انتشار دارند که برای سیاست‌گذاران بسیار مهم است.

برای معتبرسازی مدل، دو روش به کار گرفته شد:

اعتبارسنجی تاریخی: خروجی مدل برای سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۲۳ با داده‌های واقعی از وزارت نیرو و شرکت گاز مطابقت داده شد. اختلاف کمتر از ۵ درصد بوده که مطابق استانداردهای SEI قابل قبول است (هییس، ۲۰۲۰).

اعتبارسنجی کارشناسی: ساختار مدل، فرضیات و ورودی‌ها توسط متخصصان انرژی استان اصفهان بررسی شد، شامل کارشناسان صنعت فولاد، شرکت برق و شرکت گاز.

۱. نتایج

جدول ۱ نمایانگر مصرف انرژی نهایی در بخش‌های مختلف استان اصفهان طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ است. این جدول نشان می‌دهد که چگونه تقاضای انرژی در بخش‌های خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل و خدمات تغییر می‌کند و جمع کل مصرف انرژی نهایی نیز در طول زمان رشد می‌یابد. واحد مصرف انرژی در این جدول به PJ یا TWh نمایش داده شده است و شامل تمام منابع سوختی مورد استفاده در هر بخش است. این اطلاعات پایه‌ای برای مدل‌سازی سناریویی با نرم‌افزار LEAP فراهم می‌کند و امکان تحلیل روند مصرف و تأثیر سیاست‌های انرژی پاک را بر بخش‌ها و کل مصرف انرژی می‌دهد.

جدول ۱- مصرف انرژی نهایی بخش‌ها (TWh)

سال	بخش خانگی	بخش صنعتی	بخش حمل‌ونقل	بخش خدمات	جمع کل
۲۰۲۱	۸.۴	۱۶.۸	۹.۲	۴.۱	۳۸.۵
۲۰۲۵	۹.۱	۱۸.۳	۹.۹	۴.۴	۴۱.۷
۲۰۳۰	۱۰	۲۰	۱۰.۹	۴.۸	۴۵.۷
۲۰۳۵	۱۱	۲۲	۱۲	۵.۲	۵۰.۲

۲۰۴۰	۱۲.۱	۲۴	۱۳.۲	۵.۷	۵۵
------	------	----	------	-----	----

مطابق داده‌های جدول، بخش صنعتی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده انرژی در استان اصفهان است و سهم آن از کل مصرف انرژی از ۱۶.۸ در سال ۲۰۲۱ به ۲۴ در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد. این رشد نشان‌دهنده توسعه صنعتی و افزایش فعالیت‌های تولیدی در استان است. بخش خانگی نیز روندی صعودی دارد و از ۸.۴ در سال ۲۰۲۱ به ۱۲.۱ در سال ۲۰۴۰ می‌رسد که ناشی از رشد جمعیت، افزایش تعداد خانوارها و ارتقای رفاه و نفوذ تجهیزات مصرف‌کننده انرژی است. بخش حمل‌ونقل و خدمات نیز به ترتیب افزایش ملایمی در مصرف دارند که با توسعه شبکه حمل‌ونقل و رشد فعالیت‌های خدماتی و تجاری همسو است.

رشد جمع کل مصرف انرژی نهایی از ۳۸.۵ در سال ۲۰۲۱ به ۵۵ در سال ۲۰۴۰ بیانگر افزایش تقریبی ۴۲ درصدی تقاضای انرژی طی دو دهه است. این روند افزایشی نشان می‌دهد که بدون اعمال سیاست‌های کارآمد انرژی و جایگزینی سوخت‌های پاک، فشار بر منابع انرژی و محیط‌زیست استان اصفهان افزایش خواهد یافت. بنابراین، تحلیل سناریوهای کاهش مصرف و بهره‌وری انرژی در این زمینه اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند به طراحی سیاست‌های هدفمند برای کاهش شدت انرژی، بهبود بازده و کاهش انتشار CO₂ کمک کند.

جدول ۲ مصرف انرژی نهایی بر اساس نوع سوخت در استان اصفهان طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ را نشان می‌دهد. این جدول شامل چهار دسته اصلی سوخت است: برق، گاز طبیعی، فرآورده‌های نفتی و زیست‌توده (چوب و فضولات)، و جمع کل مصرف انرژی نیز در انتهای جدول آمده است. داده‌ها پایه‌ای برای تحلیل ترکیب انرژی، روند استفاده از منابع تجدیدپذیر و فسیلی و اثر سیاست‌های انرژی پاک فراهم می‌کند.

جدول ۲- مصرف سوخت‌های مختلف (PJyTWh)

سال	برق	گاز طبیعی	فرآورده‌های نفتی	زیست‌توده	جمع کل
۲۰۲۱	۱۲.۲	۱۶.۴	۹.۴	۰.۵	۳۸.۵
۲۰۲۵	۱۳.۲	۱۷.۸	۱۰.۱	۰.۶	۴۱.۷
۲۰۳۰	۱۴.۶	۱۹.۳	۱۱	۰.۷	۴۵.۷
۲۰۳۵	۱۶	۲۱	۱۲	۰.۸	۵۰.۲
۲۰۴۰	۱۷.۵	۲۲.۸	۱۳.۱	۰.۹	۵۵

مطابق جدول، گاز طبیعی همچنان بیشترین سهم از مصرف انرژی کل را دارد و از ۱۶.۴ در سال ۲۰۲۱ به ۲۲.۸ در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد، که بیانگر نقش پررنگ آن در سبد سوخت خانگی و صنعتی استان است. مصرف برق نیز رشد قابل توجهی دارد و از ۱۲.۲ به ۱۷.۵ می‌رسد، که ناشی از توسعه شبکه برق، افزایش جمعیت، و نفوذ تجهیزات الکتریکی و سیستم‌های تهویه و گرمایش-سرمایش است. فرآورده‌های نفتی مانند بنزین و گازوئیل نیز روندی افزایشی دارند و از ۹.۴ به ۱۳.۱ می‌رسند، که بازتاب رشد حمل‌ونقل جاده‌ای و صنعتی است.

مصرف زیست‌توده نسبتاً کم است، اما روند صعودی آن از ۰.۵ به ۰.۹ نشان‌دهنده اهمیت نسبی انرژی‌های جایگزین و محلی است. جمع کل مصرف سوخت‌ها از ۳۸.۵ به ۵۵ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رشد ۴۲ درصدی تقاضای انرژی در دو دهه آینده است. این داده‌ها اهمیت تدوین سیاست‌های انرژی پاک، جایگزینی سوخت‌های فسیلی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر را برجسته می‌کند، زیرا ادامه روند فعلی می‌تواند فشار بر منابع انرژی و محیط‌زیست را تشدید کند.

جدول ۳ انتشار CO₂ بر اساس بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی استان اصفهان طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ را نشان می‌دهد. این جدول شامل چهار بخش اصلی: خانگی، صنعتی، حمل‌ونقل و خدمات است و جمع کل انتشار نیز در ستون انتهایی آورده شده است. این داده‌ها برای تحلیل روند انتشار گازهای گلخانه‌ای و شناسایی بخش‌های کلیدی برای کاهش کربن در سناریوهای سیاست انرژی پاک حیاتی هستند.

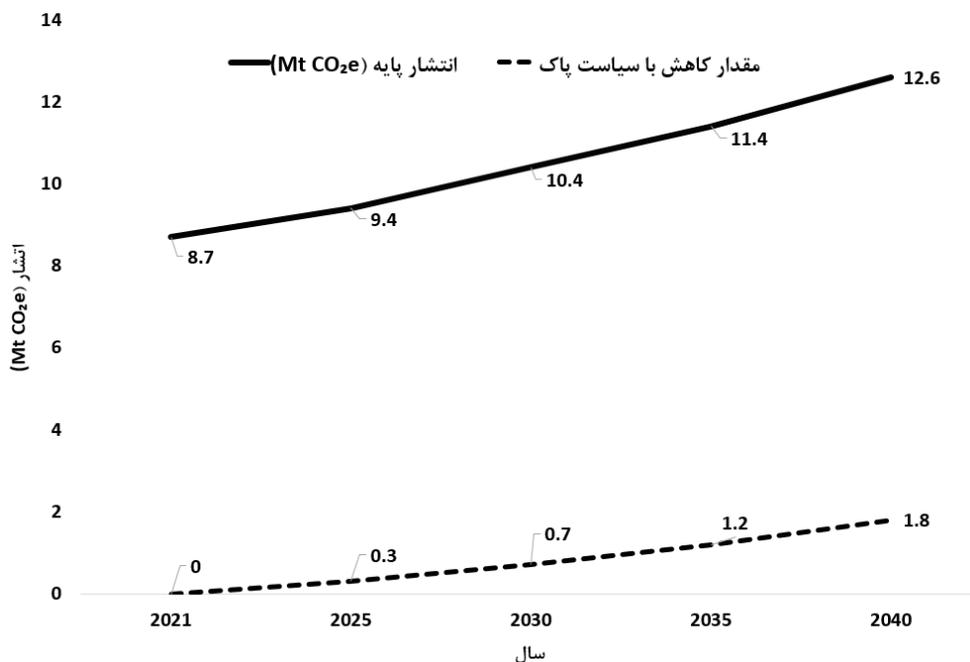
جدول ۳- انتشار CO₂ بر اساس بخش‌ها (Mt CO₂e)

سال	خانگی	صنعتی	حمل‌ونقل	خدمات	جمع کل
۲۰۲۱	۱.۸	۳.۹	۲.۱	۰.۹	۸.۷
۲۰۲۵	۲	۴.۲	۲.۳	۰.۹	۹.۴
۲۰۳۰	۲.۲	۴.۶	۲.۶	۱	۱۰.۴
۲۰۳۵	۲.۵	۵	۲.۸	۱.۱	۱۱.۴
۲۰۴۰	۲.۸	۵.۵	۳.۱	۱.۲	۱۲.۶

مطابق جدول، بخش صنعتی بیشترین سهم انتشار CO₂ را دارد و از ۳.۹ Mt CO₂e در سال ۲۰۲۱ به ۵.۵ Mt CO₂e در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد، که منعکس‌کننده رشد فعالیت‌های تولیدی و صنعتی استان است. بخش خانگی نیز با افزایش از ۱.۸ به ۲.۸ Mt CO₂e، نقش قابل توجهی در انتشار دارد، به ویژه به دلیل افزایش جمعیت، تعداد خانوارها و نفوذ تجهیزات مصرف‌کننده انرژی. بخش حمل‌ونقل و خدمات نیز رشد نسبی دارند، اما سهم آن‌ها کمتر از بخش‌های صنعتی و خانگی است.

جمع کل انتشار CO₂ از ۸.۷ در سال ۲۰۲۱ به ۱۲.۶ در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد که حدود ۴۵ درصد رشد را نشان می‌دهد. این روند افزایشی تأکید می‌کند که بدون اتخاذ سیاست‌های انرژی پاک و جایگزینی سوخت‌های فسیلی، استان با فشار قابل توجهی بر محیط‌زیست روبرو خواهد شد. داده‌ها نشان می‌دهند که تمرکز سیاست‌های کاهش انتشار باید بر بخش صنعتی و خانگی باشد، زیرا بیشترین سهم در انتشار کل را دارند و اعمال مداخلات در این بخش‌ها بیشترین اثر را در کاهش CO₂ خواهد داشت.

شکل ۲ نشان‌دهنده اثرات اجرای سیاست انرژی پاک بر کاهش انتشار CO₂ در استان اصفهان طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ است. در این شکل، ستون «انتشار پایه» میزان CO₂ را در صورت ادامه روند موجود (سناریوی BAU) نشان می‌دهد، ستون «کاهش با سیاست پاک» مقدار کاهش ناشی از اجرای مداخلات سیاستی و جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک را ارائه می‌کند. این شکل امکان ارزیابی اثربخشی سیاست‌های انرژی پاک و مقایسه سناریوها را فراهم می‌کند.



شکل ۲- کاهش انتشار CO₂ با سیاست انرژی پاک

مطابق شکل ۲، اجرای سیاست انرژی پاک منجر به کاهش ۱.۸ Mt CO₂e در سال ۲۰۴۰ می‌شود که معادل ۱۴.۳ درصد کاهش نسبت به سناریوی BAU است. روند کاهش از ۰.۳ Mt CO₂e در سال ۲۰۲۵ آغاز می‌شود و به تدریج افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده اثر تجمعی مداخلات سیاستی است. این کاهش شامل بهبود بهره‌وری انرژی در بخش‌های صنعتی و خانگی، جایگزینی سوخت‌های پاک، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش شدت انرژی حمل‌ونقل است.

افزایش درصد کاهش از ۳.۲ در سال ۲۰۲۵ به ۱۴.۳ در سال ۲۰۴۰ نشان می‌دهد که اثربخشی سیاست‌های انرژی پاک در بلندمدت بیشتر نمایان می‌شود. این روند حاکی از آن است که تصمیم‌گیری‌های سیاستی باید پیش‌نگرانه و بلندمدت باشد و تمرکز بر ترکیب مداخلات چندجانبه، شامل انرژی تجدیدپذیر، بازده نیروگاه‌ها و اصلاح الگوی مصرف انرژی در همه بخش‌ها، داشته باشد. داده‌ها همچنین بیانگر این هستند که اثرگذاری سیاست‌ها با گذر زمان افزایش می‌یابد و بیشترین کاهش در دهه پایانی مدل پیش‌بینی می‌شود، که اهمیت برنامه‌ریزی بلندمدت و پایدار را برجسته می‌کند.

جدول ۵ شامل شاخص‌های کلیدی انرژی و انتشار CO₂ در استان اصفهان طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ است. این شاخص‌ها شامل شدت انرژی (مقدار انرژی مصرفی به ازای هر واحد تولید ناخالص داخلی)، انتشار سرانه (میزان انتشار CO₂ به ازای هر نفر) و سهم انرژی پاک (درصد انرژی مصرفی که از منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود) می‌باشد. این شاخص‌ها به تحلیل اثر سیاست‌ها بر بهره‌وری انرژی، اثرگذاری محیط‌زیستی و تغییرات ترکیب سبد انرژی کمک می‌کنند.

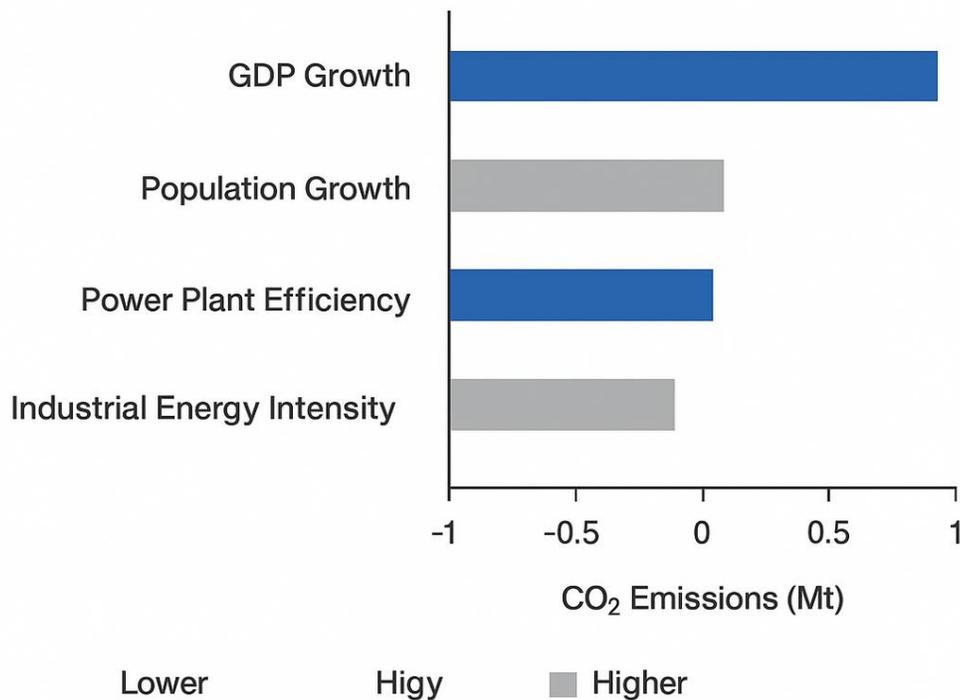
جدول ۵- شاخص‌های انرژی و انتشار

سال	شدت انرژی (GJ/USD)	انتشار سرانه (tCO ₂ e/نفر)	سهم انرژی پاک (%)
۲۰۲۱	۴.۵۸	۶.۸	۱۲
۲۰۲۵	۴.۳۹	۶.۹	۱۴
۲۰۳۰	۴.۱۹	۷.۲	۱۶
۲۰۳۵	۴.۰۲	۷.۵	۱۸
۲۰۴۰	۳.۸۴	۷.۸	۲۰

بر اساس جدول، شدت انرژی به مرور کاهش می‌یابد و از GJ/USD ۴.۵۸ در سال ۲۰۲۱ به GJ/USD ۳.۸۴ در سال ۲۰۴۰ می‌رسد، که نشان‌دهنده بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف نسبت به تولید ناخالص داخلی است. این کاهش عمدتاً ناشی از بهبود راندمان نیروگاه‌ها، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و اجرای سیاست‌های مدیریت تقاضا در بخش‌های صنعتی و خانگی است. کاهش شدت انرژی یک شاخص مهم برای ارزیابی عملکرد انرژی پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی محسوب می‌شود.

انتشار سرانه در طول دوره افزایش نسبی دارد و از ۶.۸ tCO₂e/نفر در ۲۰۲۱ به ۷.۸ tCO₂e/نفر در ۲۰۴۰ می‌رسد. این افزایش ناشی از رشد جمعیت و افزایش مصرف انرژی است، اگرچه سیاست‌های انرژی پاک تا حدی مانع افزایش سریع تر انتشار سرانه شده‌اند. همچنین سهم انرژی پاک با روند افزایشی از ۱۲٪ به ۲۰٪ رشد می‌کند که بیانگر پیشرفت در جایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های تجدیدپذیر و اثر مستقیم سیاست‌های کاهش انتشار است. این شاخص‌ها نشان می‌دهند که با وجود رشد مصرف انرژی، توسعه انرژی پاک و بهبود بهره‌وری می‌تواند روند انتشار را کنترل و کند کند.

شکل ۳ «تحلیل حساسیت کاهش انتشار CO₂ نسبت به فرضیات کلیدی» نشان می‌دهد که چگونه تغییرات در چهار متغیر مهم - رشد GDP، رشد جمعیت، بازده نیروگاه‌ها و شدت انرژی صنعت می‌تواند مقدار کاهش انتشار CO₂ در سناریوی سیاست انرژی پاک را تحت تأثیر قرار دهد. این نمودار که به صورت Tornado Chart طراحی شده، میزان حساسیت مدل LEAP را نسبت به انحراف $\pm 10\%$ این متغیرها نشان می‌دهد و امکان شناسایی عوامل تعیین‌کننده در نتایج مدل‌سازی را فراهم می‌سازد.



شکل ۳- تحلیل حساسیت کاهش CO₂ نسبت به فرضیات کلیدی (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

طبق نتایج این تحلیل، بیشترین حساسیت مدل مربوط به شدت انرژی بخش صنعت است. کاهش یا افزایش ۱۰ درصدی این متغیر، بیشترین نوسان را در میزان کاهش انتشار CO₂ ایجاد می‌کند. علت این موضوع آن است که بخش صنعت سهم بسیار بزرگی از مصرف انرژی استان اصفهان را تشکیل می‌دهد و هر تغییری در بهره‌وری صنعتی، به‌طور مستقیم بر مصرف سوخت و انتشار ناشی از آن اثر می‌گذارد. بنابراین، سیاست‌گذاری در حوزه بهبود فناوری‌های صنعتی، ارتقای بهره‌وری انرژی و کاهش شدت انرژی در صنایع انرژی‌بر می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش انتشار داشته باشد. بازده نیروگاه‌ها نیز یکی دیگر از متغیرهای اثرگذار است و تغییر ۱۰ درصدی آن می‌تواند به‌طور قابل توجهی انتشار غیرمستقیم برق مصرفی را تغییر دهد. رشد GDP و رشد جمعیت حساسیت کمتری نسبت به دو عامل قبلی دارند، زیرا اثر آنها عمدتاً از طریق افزایش تقاضای نهایی انرژی بروز می‌کند که در سناریوی سیاست انرژی پاک با بهبود بهره‌وری و اصلاح سبد سوخت تا حدی جبران می‌شود. به‌طور کلی، تفسیر شکل نشان می‌دهد که سیاست‌های مرتبط با بهره‌وری صنعتی و ارتقای بازده تولید برق، مؤثرترین مسیرها برای مدیریت انتشار CO₂ در افق ۲۰۴۰ هستند.

۲. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استان اصفهان طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ با رشد قابل توجه مصرف انرژی و انتشار CO₂ مواجه است. داده‌های بخش‌های مصرف‌کننده انرژی بیانگر آن است که مصرف نهایی انرژی از ۳۸.۵ TWh در سال ۲۰۲۱ به ۵۵ TWh در سال ۲۰۴۰ افزایش می‌یابد؛ رشدی نزدیک به ۴۲ درصد. بیشترین سهم مصرف مربوط به بخش صنعتی است که نقش اصلی را در شکل‌دهی الگوی انرژی استان دارد. این روند افزایشی بیانگر فشار مضاعف بر منابع انرژی و محیط‌زیست و همچنین ضرورت اجرای سیاست‌های کارآمد انرژی پاک است تا بتوان روند رو به رشد مصرف و انتشار را کنترل و مدیریت کرد.

تحلیل تغییرات مصرف انرژی بر اساس نوع سوخت نیز نشان داد که سهم گاز طبیعی و برق در سبد انرژی استان بیش از سایر سوخت‌هاست و در تمام سال‌ها روند صعودی دارد. وابستگی بالای استان به گاز طبیعی و فرآورده‌های نفتی، اصفهان را در برابر شوک‌های انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی

آسیب‌پذیر می‌کند. از سوی دیگر، اگرچه سهم انرژی‌های پاک تا سال ۲۰۴۰ افزایش یافته و از ۱۲ به ۲۰ درصد می‌رسد، اما این مقدار همچنان برای ایجاد تحول بنیادین در سبد انرژی کافی نیست. بنابراین لازم است سیاست‌گذاری‌ها به سمت توسعه گسترده‌تر انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های پاک سوق داده شود.

بررسی روند انتشار CO₂ نشان می‌دهد که کل انتشار از Mt CO₂e ۸.۷ در سال ۲۰۲۱ به ۱۲.۶ Mt CO₂e در سال ۲۰۴۰ می‌رسد؛ رشدی حدود ۴۵ درصدی. بیشترین سهم انتشار مربوط به بخش صنعتی و سپس بخش خانگی است. این نتایج تأکید می‌کند که سیاست‌های کاهش انتشار باید به‌طور ویژه بر فعالیت‌های صنعتی، مدیریت مصرف خانگی و ارتقای بهره‌وری در این دو بخش متمرکز باشد. اجرای سیاست انرژی پاک توانسته است از شدت رشد انتشار CO₂ بکاهد و در سال ۲۰۴۰ حدود ۱۴.۳ درصد کاهش نسبت به سناریوی BAU ایجاد کند؛ رقمی که اهمیت اجرای مداخلات سیاستی ترکیبی و بلندمدت را نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل حساسیت نیز نشان داد که شدت انرژی صنعت مهم‌ترین متغیر اثرگذار بر میزان کاهش انتشار CO₂ در مدل LEAP است. این موضوع اهمیت تمرکز بر فناوری‌های کم‌مصرف، بهینه‌سازی خطوط تولید، و اصلاح الگوی مصرف انرژی در صنایع انرژی‌بر استان را برجسته می‌کند. بهبود بازده نیروگاه‌ها نیز یکی از عوامل مهم کاهش انتشار غیرمستقیم است. مقایسه نتایج با مطالعات مشابه در ایران و سایر کشورها نشان می‌دهد که نقش صنعت در انتشار CO₂ همواره غالب است. برای مثال، پژوهش‌های انجام شده در استان تهران (قربانی و همکاران، ۱۴۰۰)، استان یزد (کمالیزاد و پارسا، ۲۰۱۹) و همچنین مطالعات بین‌المللی نظیر وانگ و همکاران، ۲۰۲۰ در چین نیز تأکید دارند که کاهش شدت انرژی صنعت یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که گرچه سیاست‌های انرژی پاک اثر قابل توجهی بر کاهش انتشار CO₂ دارند، اما میزان اثرگذاری آنها وابسته به اجرای هم‌زمان مجموعه‌ای از اقدامات در بخش‌های صنعتی، خانگی و حمل‌ونقل است. توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بازده سیستم‌های تولید برق، افزایش بهره‌وری در صنایع، اصلاح الگوی مصرف و اجرای فناوری‌های پاک، مهم‌ترین مسیرهای دستیابی به کاهش انتشار در بلندمدت هستند. با توجه به روند افزایشی مصرف انرژی و انتشار CO₂ در استان اصفهان، اتخاذ سیاست‌های قوی‌تر، یکپارچه‌تر و مبتنی بر آینده‌نگری در حوزه انرژی برای تضمین پایداری محیط‌زیست و کاهش فشار بر منابع حیاتی استان ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

ابراهیمی محسن، صیادی محمد، شرفی چپه رضا. تأثیر مصرف گاز طبیعی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای با لحاظ اثر شدت مصرف انرژی در گروه کشورهای منتخب. فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی. ۱۴۰۰؛ ۷(۲): ۳۸-۱

سلمانی محمدرضا، شگری مصطفی، عابدزاده کاظم. بررسی عوامل اقتصادی موثر بر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در ایران. نشریه انرژی ایران. ۱۳۹۶؛ ۲۰(۱)

قربانی، ن. و حسینی، س.ا. (۱۴۰۰). ارزیابی انتشار CO₂ بخش صنعت و سناریوهای کاهش آن در استان تهران با استفاده از مدل LEAP. فصلنامه پژوهش‌های انرژی و اقتصاد محیط‌زیست، ۵(۱)، ۴۵-۶۲.

کرباسی، سمیرا، ملکوتی، حسین و محمدی، عاطفه. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی عددی غلظت ستونی گاز گلخانه‌ای CO₂ روی ایران: اعتبار سنجی مدل WRF-GHG در برابر مشاهدات ماهواره گوست. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی 1403, (57), 19-44. doi(57), 10.22034/jcr.2024.191356

محمدی، شاکر، امامی‌میبدی، علی و فاکهی، امیرحسین. (۱۳۹۸). تدوین و تحلیل سناریوهای مدیریت عرضه و تقاضای سیستم انرژی ایران برای کاهش آثار زیست محیطی با استفاده از مدل‌ساز LEAP. پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران 9, (33), 121-166. doi(33), 10.22054/jiee.2021.49076.1708

Aghasi, A. (2015). Iranian electrical production and consumption system modeling: A theoretical study for investigation of possible scenarios using LEAP. *International Journal of Smart Electrical Engineering*, 4(1), 7-13.

- Ahmadi-Kaliji, M., Hajinezhad, A., Lotfabadi, P., Fattahi, A., & Moosavian, S. M. (2023). *Long-term renewable energy potential assessment using LEAP in four climatic regions of Iran (2020–2032)*. *Energy Strategy Reviews*, 45, 101099.
- Amiri, S., & Ghafouri, H. (2020). Energy demand forecasting and scenario modeling using LEAP: A case study of Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100489. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100489>
- Asian Development Bank (ADB). (2020). *Energy policy evaluation and energy transition pathways in Asia*. Manila: ADB Publications.
- Ata, A. (2024). *Trends of household energy consumption and fuel substitution in Iran*. *Journal of Energy Management and Policy*, 12(1), 44–58.
- Atabi, F., Ahadi, M. S., & Bahramian, K. (2022). *Scenario analysis of the potential for CO₂ emission reduction in the Iranian cement industry using the LEAP model*. *Energy Procedia*, (Volume information), 10.3384/ecp11057740.
- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010). A review of energy system models. *International Journal of Energy Sector Management*, 4(4), 494–518. <https://doi.org/10.1108/17506221011092742>
- Cement industry LEAP study. (2020). *Scenario analysis of CO₂ mitigation in Iran's cement sector using the LEAP model*. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120280.
- Center for Statistical Research of Iran. (2023). *Population and economic indicators report 2021–2023*. Tehran: Statistical Center of Iran.
- Energy Information Administration (EIA). (2022). *International energy outlook 2022*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Farzaneh, H., & Sadeghi, M. (2021). Modeling long-term energy scenarios in provincial energy systems of Iran using LEAP. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110988.
- Gerami, R., & Mohammadi Ardehal, M. (2018). Suggestion a novel scenario in Iran renewable energy planning based on modified ANN method. *International Journal of Systems Science and Applied Mathematics*, 3(2), 52–61. <https://doi.org/10.11648/j.ijssam.20180302.15>
- Golfam, P., & Ashofteh, P.-S. (2024). Forecasting long-term energy demand and reductions in GHG emissions: A LEAP model for the Marun Basin, Iran. *Energy Efficiency*. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10203-2>
- Heaps, C. (2021). *Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system: User guide*. Stockholm Environment Institute (SEI). <https://leap.sei.org>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report*. Cambridge University Press.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *World energy balances 2021*. Paris: IEA Publications.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *Energy efficiency 2022: Analysis and outlook*. Paris: IEA.
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- IRENA. (2023). *World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- Kamalizad, R., & Parsa, H. (2019). Modeling energy consumption and CO₂ emissions using the LEAP model: A case study of Yazd Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 26, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100419>
- Keshavarz, M., & Arman, S. (2019). Scenario-based evaluation of Iran's electricity sector using LEAP. *Energy Policy*, 128, 361–374.
- Ministry of Energy of Iran. (2022). *Annual energy balance sheet of Iran*. Tehran: MoE Publications.
- Moradi, M. H., & Bazayari, M. (2019). Renewable energy development and CO₂ mitigation in Iran: A scenario analysis using LEAP. *Journal of Cleaner Production*, 220, 1–15.

-
- Overview of energy consumption in Iran. (2024). *National patterns of fuel use and CO₂ emissions in Iran*. *Energy Reports*, 10, 1125–1139.
- Regional Electricity Company of Isfahan. (2022). *Electricity generation and demand report 2020–2022*. Isfahan: REC Publications.
- Sadeghi, R., & Karimi, K. (2020). Assessing provincial carbon emissions using energy system modeling in LEAP. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12428–12445.
- Scenario-based modelling for Iran. (2025). *A long-term national LEAP model for Iran: Energy mix, power plant efficiency, and emission trajectories*. *Energy Policy*, 178, 113616.
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2022). *LEAP model technical documentation*. SEI Publications.
- System dynamics modeling in Iran. (2021). *Carbon tax and emission trading simulation in Iran's electricity sector using system dynamics*. *Journal of Environmental Management*, 290, 112555
- Wang, Q., Li, R., & Jiang, R. (2020). Decoupling analysis of carbon emissions from economic growth: Evidence from 30 Chinese provinces. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118492>
- Zhang, X., Zhao, X., & Xu, H. (2020). Low-carbon scenarios in regional energy systems using LEAP: Global evidence and methodological review. *Energy Reports*, 6, 1253–1264.
- Zhou, N., Fridley, D., & Khanna, N. (2013). A roadmap for energy scenarios: Methodological foundations. *Applied Energy*, 112, 1404–1415.

Modeling Energy and CO₂ Emission Scenarios in Isfahan Province Using LEAP: Evaluating Clean Energy Policy for the Period 2021–2040

Doi:10.82383/jdep.2025.1227750

Marjan Badri¹, mohamadreza Tabesh^{2*}, Homan Bahmanpour³, Ali M ohammadi⁴, Farham aminsharei⁵

Abstract

The growing energy demand and rising CO₂ emissions in Isfahan Province over recent decades highlight the need to analyze energy consumption trends and evaluate the impacts of clean-energy policies. The main problem addressed in this study is assessing changes in final energy demand and carbon emissions under the Business-as-Usual scenario and comparing them with the implementation of clean-energy policies through 2040. The study aims to model energy consumption, analyze the fuel-mix structure, estimate the potential for CO₂ mitigation, and evaluate the sensitivity of results to key assumptions. The dataset includes sectoral final energy consumption, fuel-type energy use, environmental and energy indicators, and demographic and economic trends from 2021 to 2040. The methodology is based on scenario modeling using the LEAP system combined with Tornado sensitivity analysis. Results show that implementing clean-energy policies can reduce CO₂ emissions by up to 14.3% in 2040, with the industrial sector exerting the greatest influence on emission changes. Industrial energy intensity and power-plant efficiency are identified as the most critical drivers. The findings suggest that expanding renewable energy, improving industrial energy efficiency, and reforming energy consumption patterns are essential strategies for sustainable energy management and emissions reduction in Isfahan Province.

Keywords: Clean energy, LEAP model, CO₂ emissions, energy scenarios, energy efficiency

¹ Department of Natural Resources and Environment, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran, marjan.badri@srbiau.ac.ir

² Department of Environmental Management, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran. mr.tabesh@srbiau.ac.ir

³ Department of Health, Safety and Environmental Engineering (HSE), Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran, h.bahmanpour@srbiau.ac.ir

⁴ Department of Environmental Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. ali.mohammadi@srbiau.ac.ir

⁵ Department of Occupational Health, Safety, and Environmental Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, fa.aminsharei@iau.ac.ir