انتخاب مدل مناسب برای تخصیص منابع انرژی در ایران با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

عالیه کاظمی[۱] ، حامد شکوری گنجوی[۲] ، شیوا شکیبا[۳] ، مهناز حسین‌زاده[۴]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۳۹۱/۱۲/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله:
۱۳۹۲/۰۳/۰۵

چکیده:

در این تحقیق، برای تعیین مناسب‌ترین مدل عرضه انرژی برای ایران و نیز آسیب‌شناسی و درک مزایا و معایب مدل‌های مختلف اجراشده در جهان و ایران، ۱۳ مدل عرضه انرژی شناخته شده در جهان شامل MARKAL، TIMES، EFOM، WASP، JASP، MESSAGE، IDEAS، RETScreen، LEAP، NPEP، MESAP، NEMS و ENERGY2020 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس با انتخاب شاخص‌های مناسب و دریافت نظر خبرگان به روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، مدل‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و مناسب‌ترین مدل‌های عرضه انرژی برای کشور انتخاب شده‌اند.

کلمات کلیدی:
انرژی، مدل‌سازی، مدل‌های عرضه انرژی، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

۱) استادیار دانشکده مدیریت دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) aliyehkazemi@ut.ac.ir
۲) دانشیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران
۳) کارشناس‌ارشد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه تهران
۴) دانشجوی دکتری مدیریت تحقیق در عملیات دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مقدمه

انرژی از عواملی است که در اکثر فعالیت‌های اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. امنیت ملی بسیاری از کشورهای جهان نیز در گرو دسترسی مطمئن به انرژی است. از این‌رو، آینده تولید و مصرف حامل‌های انرژی و کاربرد بهینه آنها از اهمیتی خاص برخوردار است. ایران به عنوان یک کشور صاحب ذخایر انرژی در دنیا شناخته شده است. نزدیک به ۱۱ درصد از ذخایر جهانی نفت و ۱۶ درصد از ذخایر جهانی گاز در ایران قرار گرفته است و منابع انرژی تجدیدپذیر نیز در ایران قابلیت استفاده فراوان دارند. با توجه به محدودیت‌های مربوط به افزایش تولید نفت‌خام و گاز طبیعی، رشد فزاینده مصرف فرآورده‌های نفتی و گاز، وابستگی اقتـصاد و بـودجه عمومی به درآمدهای حاصل از فروش نفت خام و مالکیت نسل‌های آینده بر منابع طبیعی، لزوم بهینه‌سازی در بخش‌های عرضه و تقاضای انرژی، واقعیتی انکارناپذیر است[۱].

مدل‌های انرژی، ابزاری استاندارد برای برنامه‌ریزی‌های انرژی هستند. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای فرموله‌کردن و اجرای راهبردهای برنامه‌ریزی انرژی انجام شده و مدل‌های انرژی مختلفی در جهان ارائه شده‌اند. برخی از این مدل‌ها در ایران نیز اجرا شده‌اند. با توجه به خصوصیات مدل‌های مختلف عرضه انرژی، این تحقیق به بررسی مدل‌های مختلف عرضه انرژی پرداخته و مناسب‌ترین آنها را برای کشور انتخاب می‌نماید. برای انتخاب مناسب‌ترین مدل، از روش فرایند سلسله مراتبی[1] استفاده می‌شود، بدین‌ترتیب که با انتخاب شاخص‌های مناسب و دریافت نظر خبرگان، مدل‌های مختلف عرضه انرژی مورد مقایسه قرار گرفته و مناسب‌ترین آنها برای ایران انتخاب می‌شوند. در ادامه، در بخش ۲، سیزده مدل‌عرضه انرژی معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش ۳، با استفاده از روش فرایند سلسله‌مراتبی، مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته و مناسب‌ترین مدل‌ها برای تخصیص منابع انرژی کشور انتخاب می‌شوند. در بخش ۴، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌شود.

بررسی مدل‌های عرضه انرژی

مدل MARKAL

مدل MARKAL که مختصرشده مدل تخصیص بازار[2] است، یک مدل کلی است که با ورود داده‌ها می‌تواند برای نمایش تغییرات یک سیستم انرژی خاص در طول یک دوره ۴۰ تا ۵۰ ساله در سطح ملی، منطقه‌ای، استانی یا جوامع کوچک به کار رود. این مدل، یک مدل ریاضی از سیستم انرژی یک یا چند ناحیه است که یک پایه فنی قوی برای ارزیابی دینامیک انرژی در طول یک افق زمانی متشکل از چند دوره ایجاد می‌کند[۱۰].

1) Analytic Hierarchy Process
2) MARKet ALlocation model

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

MARKAL تعادل انرژی را در تمام سطوح یک سیستم انرژی شامل منابع اولیه، سوخت‌های ثانویه، انرژی نهایی و خدمات انرژی محاسبه می‌کند و تلاش می‌کند که از طریق سرمایه‌گذاری در تجهیزات، تصمیمات عملیاتی و تصمیمات عرضه انرژی اولیه، خدمات انرژی را با حداقل هزینه کل در یک ناحیه عرضه کند[۱۰].

بخش اقتصاد انرژی مدل MARKAL از تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان حامل‌های انرژی تشکیل شده است. MARKAL مانند بیشتر مدل‌های تعادل اقتصادی، بازار رقابت کامل را برای حامل‌های انرژی در نظر می‌گیرد که در آن، تولیدکنندگان به دنبال حداکثرکردن سود و مصرف‌کنندگان به دنبال حداکثرسازی بهره‌وری هستند که حاصل آن، یک تعادل عرضه- تقاضاست که اضافه رفاه کل را حداکثر می‌کند. با این حال، ممکن است مدل MARKAL از فرض بازار رقابت کامل با معرفی فروض خاصی که توسط کاربر معرفی می‌شوند، فاصله بگیرد. از لحاظ عملی، مدل MARKAL، سیستم انرژی (مربوط به مجموعه‌ای از نواحی) را در طول افق زمانی خاصی به منظور حداقل کردن هزینه کل (یا به صورت معادل حداکثرکردن اضافه رفاه کل) سیستم طراحی می‌کند به گونه‌ای که محدودیت‌هایی را ارضا کند[۱۰]. در حقیقت، روال بهینه‌سازی که در حل مدل MARKAL استفاده می‌شود، از هریک از منابع اولیه، حامل‌های انرژی و فناوری‌های تبدیل، آنهایی را انتخاب می‌کند که منتج به حداقل هزینه، مشروط به مجموعه‌ای از محدودیت‌ها شود. کاربر، خود هزینه‌های انرژی، ویژگی‌های تکنیکی و تقاضای خدمات انرژی را تعریف می‌کند. در نتیجه این رویکرد جامع، فناوری‌های طرف عرضه با تقاضای خدمات انرژی مختلف تطبیق داده می‌شوند. ویژگی‌های فناوری‌های جدید که مصرف انرژی یا انتشار آلاینده کمتری دارند، به کاربر اجازه می‌دهد تا اثرات این انتخاب‌ها را بر روی هزینه کلی سیستم، تغییرات در ترکیب فناوری‌ها و سوخت‌ها و سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌ها بررسی کند[۹].

مانند بسیاری از مدل‌های سیستم‌های انرژی، در مدل MARKAL نیز حامل‌های انرژی، تبدیل و مصرف انرژی را به هم متصل می‌کنند. این شبکه که توسط کاربر تعریف می‌شود، همه حامل‌های انرژی شامل عرضه اولیه، فرآوری و تبدیل و تقاضای نهایی برای خدمات انرژی را در بر می‌گیرد[۹]. خلاصه‌ای از ویژگی‌های مدل MARKAL در جدول (۱) آمده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ۱) ویژگی‌های مدل MARKAL

سازمان توسعه دهنده		آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)/ ETSAP
۱. اهداف	عمومی:	برنامه‌ریزی برای آینده
	خاص:	عرضه انرژی با یک سری از محدودیت‌ها، هدف شامل تحلیل و برنامه‌ریزی یکپارچه و هدفگرای انرژی بر اساس رویکرد حداقل هزینه است.
۲. مفروضات		درجه پایین درون‌زایی، تمرکز تنها بر بخش انرژی، توصیفات مشروح از مصارف نهایی و فناوری‌های انرژی (تجدیدپذیر) ممکن است.
۳. رویکرد مدل‌سازی		پایین به بالا
۴. متدولوژی		جعبه ابزار[1]/ بهینه‌سازی
۵. رویکرد ریاضی		برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا
۶. پوشش جغرافیایی		محلی، ملی
۷. پوشش بخشی		تنها بخش انرژی
۸. افق زمانی		میان‌مدت، بلندمدت
۹. نیازهای داده‌ای		کمّی، پولی، تفکیک نشده
۱۰. ورودی ها		توازن انرژی سال پایه و برآورد تقاضای نهایی، قیمت‌های سال پایه و برآورد قیمت‌ها، فناوری انرژی، بازده کلی، ترکیب ورودی‌ها، هزینه‌ها، محدودیت‌های نفوذ، تعمیرات برنامه‌ریزی شده، قطع برق
۱۱. خروجی ها		مدل‌سازی جزئی منابع پایان‌پذیر و تجدیدپذیر، مدل‌سازی جزئی سیستم عرضه، برقرارکردن تعادل جزئی با بهینه سازی

مدل EFOM

مدل بهینه‌سازی جریان انرژی[2] (EFOM) به عنوان یک مدل بهینه‌سازی عرضه انرژی توسط اتحادیه اروپا توسعه داده شد. این مدل نخستین بار در سال ۱۹۷۰ در موسسه IEJE[3] در گرنوبل فرانسه طراحی شد. هدف این مدل، گسترش راهبردهایی بود که اروپای غربی را از واردات نفت بی‌نیاز می‌کرد و تعیین فناوری‌هایی برای تسهیل رسیدن به این هدف بود. ساختار این مدل بر اساس برنامه‌ریزی خطی با حداقل‌سازی هزینه‌های تنزیل کل برای تامین نیازهای انرژی یک کشور یا یک منطقه در بلندمدت با فرض اهداف متفاوت بود.

1) Toolbox
2) Energy Flow Optimization Model
3) Insititut Economique et Juridque de l’Energie

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

با رشد مصرف انرژی و پیدایش مشکلات زیست‌محیطی مخصوصاً باران‌های اسیدی، اتحادیه اروپا تلاش کرد که راه حلی برای این مشکلات بیابد و راهبردها و فناوری‌هایی برای کاهش انتشار آلاینده‌ها مخصوصا SO_2 و NO_X انتخاب کند. از آنجایی که مدل EFOM تنها مساله انرژی را مد نظر قرار می‌داد، قادر نبود مشکلات زیست‌محیطی را حل کند. لذا مدل جدیدی طراحی شد که دارای ماژول زیست‌محیطی بود. این نسخه توسعه یافته توسط IIP[1] انجام شد و EFOM-ENV نام گرفت. مهم‌ترین خصوصیات مدل EFOM-ENV عبارتند از:

- اطلاعات فنی- اقتصادی در یک پایگاه داده ذخیره می‌شود. این پایگاه امکان تشکیل ساختارهای خاص سیستم‌های بزرگ انرژی در سطح ملی و منطقه‌ای را فراهم می‌آورد.
- دو زیر مدل عملیاتی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بر روی هر یک از ساختارهای ایجاد شده در قسمت الف قابل اجراشدن است.
- بیان صریح فرایند انرژی از طریق رابطهای جهت‌دار صورت می‌گیرد. رابطها می‌توانند در داخل یک زیربخش قرار بگیرند که آن زیربخش نمایشگر یک گروه از فرایندهای فنی کاملاً مشخص است. شبکه سیستم جامع انرژی از طریق زیرسیستم‌های بهم پیوسته و مرتبط نشان داده می‌شود.
- امکان بیان روشن فرایندها و فناوری‌های عرضه و مصرف انرژی به وسیله مجموعه‌ای از پارامترهای اقتصادی- اجتماعی- زیست‌محیطی بهم مرتبط وجود دارد.
- مدل، امکان مشاهده ۳۰۰-۴۰۰ فرایند تبدیل و مصرف انرژی شامل ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ داده برای هر سیستم مورد مطالعه را در اختیار دارد.
- تحلیل فعالیت‌های تولید و مصرف انرژی با توجه به الگوی فصلی مصرف برای برق، گرما (آب گرم) و گاز طبیعی قابل ارائه است.
- این مدل برای مطالعات بلندمدت انرژی مناسب است.
- ساختار متغیر مدل، امکان تحلیل‌های منطقه‌ای، ملی و بخشی را فراهم می‌آورد. یک الگوی واحد می‌تواند برای کشورهای گوناگون به منظور مطالعات منطقه‌ای ساخته شود.

ساختار مدل از سه زیرسیستم اصلی تشکیل شده است: استخراج یا سیستم‌های عرضه انرژی اولیه، تغییر شکل یا سیستم‌های تبدیل انرژی و مصرف انرژی یا سیستم‌های تقاضای نهایی انرژی. فرایندهای انرژی در چهار سطح سلسله

1) Institute for Industrial Production, University of Karlsruhe

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مراتبی طبقه‌بندی می‌شوند: بخش‌ها، تولیدکنندگان، واحدها و فرایندها. سیستم انرژی یک کشور برای بخش‌های مختلف مانند نفت، گاز، برق، حمل و نقل و صنعت متفاوت است. ویژگی‌های بخشی ممکن است در هر کشور متفاوت باشد. تابع حداقل هزینه فناورانه برای همه فناوری‌های تبدیل انرژی و فناوری‌های کاهش آلایندگی مدل به دست می‌آید. ساختارهای متفاوت عرضه انرژی برای کشورهای مختلف و همچنین توابع فناورانه، توسعه یک تابع هزینه خاص برای یک کشور را ممکن می‌سازد[۱۵]. برخی از ویژگی‌های این مدل در جدول (۲) خلاصه شده است.

جدول۲) ویژگی‌های مدل EFOM-ENV

سازمان توسعه دهنده		اتحادیه اروپا، بلژیک
۱. اهداف	عمومی:	برنامه‌ریزی برای آینده
	خاص:	عرضه انرژی مشروط به محدودیت‌های فنی، زیست‌محیطی و سیاسی، توصیف مشروح از فناوری‌ها (تجدیدپذیر)، ارزیابی از طریق تحلیل اثربخشی هزینه. هدف تحلیل و برنامه‌ریزی سیاست‌های انرژی و محیط‌زیست بخصوص کاهش انتشار آلاینده‌هاست.
۲. مفروضات		درجه پایین درون‌زایی، بدون هیچ ارتباطی بین بخش‌های غیرانرژی، توصیف مفصل از فناوری‌های عرضه انرژی و مصارف نهایی، تحلیل درونزای توسعه تولید، ورودی‌های مورد نیاز: پیش‌بینی‌ها/ سناریوهای تقاضا، هزینه‌های عرضه، محدودیت‌ها (زیست‌محیطی)
۳. رویکرد مدل‌سازی		پایین به بالا
۴. متدولوژی		بهینه‌سازی
۵. رویکرد ریاضی		برنامه‌ریزی خطی/ برنامه‌ریزی پویا
۶. سطح		ملی
۷. پوشش بخشی		بخش‌های تولیدکننده و مصرف‌کننده انرژی
۸. افق زمانی		میان مدت، بلند مدت
۹. نیازهای داده‌ای		کمّی، پولی، تفکیک نشده

مدل TIMES

در سال ۱۹۹۹، سازمان ETSAP به منظور برطرف‌کردن ضعف‌های مدل MARKAL و متناسب‌ساختن آن برای آینده، شروع به ادغام مزایای مدل MARKAL با برخی از توانایی‌های EFOM نمود. مدل TIMES که مختصرشده سیستم یکپارچه MARKAL-EFOM[1] می‌باشد، یک مدل‌ساز اقتصادی برای سیستم‌های انرژی محلی، ملی یا

1) The Integrated MARKAL-EFOM System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

چندمنطقه‌ای است که یک پایه فنی قوی برای ارزیابی دینامیک انرژی در طول یک افق زمانی بلندمدت متشکل از چند دوره ایجاد می‌کند. این مدل معمولاً برای تحلیل کل بخش‌های انرژی به کار می‌رود اما ممکن است برای مطالعه هر کدام از بخش‌ها به تنهایی نیز به کار رود (برای مثال برق).

هدف مدل TIMES، عرضه خدمات انرژی با حداقل هزینه کل از طریق سرمایه‌گذاری و عملکرد تجهیزات، عرضه انرژی اولیه و تصمیمات تبادل انرژی در یک ناحیه است. انتخاب تجهیزات تولید توسط مدل، بر اساس تحلیل ویژگی‌های سایر فناوری‌های تولید، اقتصاد عرضه انرژی و معیارهای زیست‌محیطی صورت می‌گیرد. لذا مدل TIMES یک مدل یکپارچه عمودی از کل سیستم انرژی است. حوزه مدل فراتر از مسائل مربوط به انرژی بوده و شامل نمایش انتشار آلاینده‌ها و مواد مربوط به سیستم انرژی می‌شود. بعلاوه، مدل به صورت قابل ملاحظه‌ای برای تحلیل سیاست‌های انرژی و محیط زیست مناسب است.

اقتصاد انرژی TIMES از تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان محصولات تشکیل شده است و برای تمامی محصولات، بازار رقابتی در نظر می‌گیرد. حاصل، یک تعادل عرضه- تقاضاست که اضافه رفاه کل را حداکثر می‌کند. با این حال، ممکن است مدل TIMES از فرض بازار رقابت کامل با معرفی فروض خاصی که توسط کاربر معرفی می‌شوند، فاصله بگیرد. TIMES به روش دینامیک حل می‌شود. اقتصاد انرژی TIMES از سه نوع اجزا تشکیل شده است: فناوری‌ها، محصولات و جریان محصولات. در سیستم انرژی مرجع TIMES، فرایندها به صورت جعبه و محصولات به صورت خطوط عمودی نشان داده می‌شوند. جریان محصولات به صورت رابط بین جعبه فرایندها و خطوط محصولات نشان داده می‌شوند[۱۱]. برخی از ویژگی‌های مدل TIMES در جدول (۳) خلاصه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول۳) ویژگی‌های مدل TIMES

سازمان توسعه‌دهنده		Institute of Energy Economics and Regional Use of Energy Energy Technology System Analysis Programme (ETSAP)
۱. اهداف	عمومی:	کاوش در آینده از طریق تحلیل سناریوهای مختلف
	خاص:	حداقل‌سازی هزینه کل سیستم انرژی– اقتصاد از طریق مدل یکپارچه
۲. ساختار مدل • درجه درونزایی • درجه توصیف اجزای غیرانرژی • درجه توصیف مصارف نهایی درجه توصیف فناوری‌های عرضه		درجه پایین درون‌زایی، ارتباط مدل با بخش‌های غیرانرژی از طریق منحنی تقاضاست که کاربر ضریب کشش تقاضا یا خود منحنی تقاضا را به مدل می‌دهد. مدلسازی شفاف فرایندها و فناوری‌های تولید، تبدیل و مصرف انرژی و مدل‌سازی درونی یادگیری فناوری، از مهم‌ترین نقاط قوت مدل است و تمام فناوری‌های عرضه، تبدیل و مصرف انرژی در TIMES به صورت دقیق مدل شده‌اند.
۳. رویکرد مدل‌سازی		بالا به پایین
۴. پوشش جغرافیایی		توانایی مدل‌سازی انرژی به صورت محلی (کشوری)، منطقه‌ای (بین‌المللی) و جهانی
۵. پوشش بخشی		تمام بخش‌های مصرف‌کننده انرژی را شامل می‌شود.
۶. پوشش حامل‌های انرژی		تمام حامل‌های انرژی را شامل می‌شود.
۷. افق زمانی		۵۰ الی ۶۰ سال
۸. متدولوژی		بهینه‌سازی
۹. رویکرد ریاضی		برنامه‌ریزی پویا، خطی، غیرخطی، مختلط و عدد صحیح
۱۰. نیازهای نرم‌افزاری		نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS
۱۱. ورودی‌ها		پارامترهای فناوری‌ها، کالاها و پارامترهای جریان ورودی و خروجی کالاها از فناوری‌ها
۱۲. خروجی‌ها		میزان سرمایه‌گذاری در هر یک از فناوری‌ها در هر منطقه، سطح فعالیت هر یک از فناوری‌ها در هر یک از مناطق، حجم کالای تولیدی یا مصرفی توسط هر یک از فناوری‌ها در هر یک از مناطق

مدل WASP

مدل WASP[1] در ابتدا توسط سازمان‌های TVA[2] و ORNL[3] ایالت متحده آمریکا برای برآوردن نیازهای آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در بررسی بازار انرژی هسته‌ای در کشورهای در حال توسعه که توسط آژانس در سال‌های

1) Wien Automatic System Planning Package
2) Tennessee Valley Authority
3) Oak Ridge National Laboratory

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

۱۹۷۲-۱۹۷۳ انجام شد، طراحی شد. سپس بهبودهای بسیاری توسط کارکنان آژانس بر روی کد رایانه‌ای آن انجام شد که حاصل آن، نسخه WASP-II در سال ۱۹۷۶ بود. پس از آن، نیاز کمسیون ECLA[1] به مطالعه روابط شبکه‌های الکتریکی شش کشور آمریکای مرکزی که پتانسیل بالایی از منابع برقابی داشت، منجر به تلاش همزمان ECLA/IAEA از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۰ برای طراحی نسخه WASP-III شد. سپس نسخه‌های جدید WASP شامل WASP-III Plus و WASP-IV نیز انتشار یافتند.

WASP-IV مانند مدل‌های پیش از خود برای یافتن سیاست بهینه اقتصادی برای توسعه تولید سیستم برق بر اساس محدودیت‌هایی که کاربر تعیین می‌کند، طراحی شده است. این مدل از برآورد احتمالی برای هزینه‌های تولید سیستم، هزینه انرژی تأمین‌نشده و قابلیت اطمینان سیستم، از تکنیک برنامه‌ریزی خطی برای تعیین سیاست بهینه توزیع که محدودیت‌های برون‌زا بر روی انتشار آلاینده‌ها را ارضا می‌کند، در دسترس بودن سوخت و تولید برق توسط برخی نیروگاه‌ها و از روش دینامیک بهینه‌سازی برای مقایسه هزینه سیاست‌های دیگر توسعه سیستم استفاده می‌کند. ساختار ماژولار WASP-IV به کاربر اجازه می‌دهد که نتایج میانی را کنترل کند.

مدل WASP-IV، برنامه توسعه بهینه برای یک سیستم تولید برق در طول یک دوره حداکثر ۳۰ ساله را بر اساس محدودیت‌هایی تعیین شده توسط برنامه‌ریز تعیین می‌یابد. پاسخ بهینه بر اساس حداقل هزینه کل تنزیل شده به دست می‌آید. محاسبه هر یک از این اجزا در WASP توسط مدل‌های خاصی صورت می‌گیرد تا ویژگی‌های پیش‌بینی بار، ویژگی‌های نیروگاه‌های حرارتی و هسته‌ای، ویژگی‌های نیروگاه‌های برقابی، شرایط آب و هوایی و هزینه انرژی تامین نشده نیز لحاظ شوند.

محدودیت‌هایی که در مساله بهینه‌سازی WASP به کار می‌روند، عبارتند از:

- حداقل و حداکثر تولید نیروگاه‌ها
- حد رزرو در نیروگاه‌ها
- قابلیت اطمینان سیستم
- احتمالات وضعیت آب و هوای کشور در دوره‌های مختلف (کم آبی، پرآبی، متوسط،...)
- انتشار آلاینده‌ها
- محدودکردن ترکیب‌های توسعه‌ای نیروگاه‌ها[۷].

1) Economic Commission for Latin America

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مدل JASP

مـدل JASP، بهیـنه‌سازی بـرنامه‌ریزی تولید را بـر اساس نیروگاه‌ها انجام می‌دهد و هزینه شبکه انتقال را نیـز لحـاظ می‌کند در حالی که در مدل WASP هزینه انتقال لحاظ نمی‌شد و محل نیروگاه‌ها نیز به دست نمی‌آمد و تنهـا ظرفیـت و نوع نیروگاه‌ها مشخص می‌شد. مدل این امکان را می‌دهد که تأثیر مکان نیروگاه بر سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌بـرداری بـه دست آید. همچنین بهینه‌سازی با توجه به اینکه نیروگاه برای تعادل و هماهنگی توان الکتریکی درون ناحیه‌ای کارآتر است، انجام می‌پذیرد. نهایتاً مشخصه‌های بدست آمده از شرایط جغرافیایی و هیدرولوژیکی بایـد در نظـر گرفتـه شـوند. در چنـین حالتی، متغیرهای تصمیم‌گیری به مراتب بسیار افزایش یافته و حل چنین مسأله بهینه‌سازی نیازمند الگوریتم‌های مـؤثرتری می‌باشد.

ساختار مدل از سه بخش اصلی پردازش داده، مدل بهینه‌سازی و گزارش خروجی تشکیل شده است. بخش پردازش داده به چهار نوع داده اولیه نیاز دارد: اطلاعات بار، اطلاعات نیروگاه، اطلاعات جغرافیایی و اطلاعات منابع انرژی اولیه. داده‌های ورودی بار بر اساس نواحی تعادل انرژی الکتریکی درون یک ناحیه ساخته می‌شوند. داده‌ها شامل حداکثر بار در هر سال برای دوره زمانی برنامه‌ریزی، منحنی حداکثر بار ماهانه، هفتگی و روزانه می‌باشند. تقاضای انرژی و حداکثر و حداقل بار در هر ناحیه از پردازش داده‌های فوق به دست می‌آید. داده‌های نیروگاه‌ها شامل شاخص‌های فنی و اقتصادی نیروگاه‌های موجود و نیروگاه‌هایی است که نامزد می‌شوند. این داده‌ها مشابه با داده‌های روش WASP می‌باشند، با این تفاوت که در آنجا داده‌های ورودی به واحدهای تولید مربوط هستند در حالی که در JASP داده‌های ورودی بر اساس نیروگاه‌های تولید می‌باشند. داده‌های جغرافیایی شامل اطلاعات مکانی نیروگاه‌های نامزد و مراکز بار می‌باشند. این داده‌ها برای تعادل انرژی الکتریکی ناحیه‌ای و تخمین هزینه انتقال انرژی از نیروگاه‌های انتخاب شده به مراکز بار استفاده می‌شوند. داده‌های مربوط به منابع در بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری برنامه‌ریزی تولید به کار می‌روند. بزرگترین بخش ساختار را مدل بهینه‌سازی تشکیل می‌دهد. هسته این بخش، مدل تصمیم‌گیری برای سرمایه‌گذاری تأمین‌کننده‌های توان می‌باشد. این بخش در واقع فرمان‌های بهره‌برداری از نیروگاه‌های تولید را بهینه می‌کند و یک جدول زمانی برای راه‌اندازی هر یک از نیروگاه‌های حرارتی و برنامه‌ریزی نیروگاه‌های آبی ارائه می‌کند[۲].

مدل MESSAGE

مدل MESSAGE[1] که مدل سیستم‌های عرضه انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی آنهاست، یک مدل برنامه‌ریزی خطی پویاست که هزینه تنزیل‌شده کل عرضه انرژی را در طول یک افق زمانی مفروض حداقل می‌کند. هدف اصلی مدل، ایجاد

1) Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

تعادل بین تقاضای انرژی ثانویه (یا نهایی) و عرضه منابع انرژی اولیه از طریق فناوری‌های مختلف است. مهم‌ترین محدودیت‌های مدل بیانگر محدودیت‌هایی بر روی سرعت افزایشی فناوری‌ها، دسترسی منابع بومی و وارداتی و روابط فناورانه است. مهم‌ترین ویژگی‌های متمایز مدل، لحاظ کردن نواحی بار برای تقاضای برق، تقسیم‌بندی منابع به طبقاتی بر حسب هزینه و در نظرگرفتن تأثیرات زیست‌محیطی راهبردهای عرضه انرژی است. خروجی مدل برای توصیف سناریوهای عرضه انرژی به کار می‌رود.

مدل MESSAGE سومین مدل برنامه‌ریزی خطی است که توسط IIASA طراحی شد. مدل‌های اول و دوم Hafele-Manne و MESSAGEII نام داشتند. اصل زیربنایی مدلی که توسط MESSAGE ساخته می‌شود، بهینه‌سازی یک تابع هدف تحت مجموعه‌ای از محدودیت‌هاست که ناحیه شدنی پاسخ‌های ممکن را تعریف می‌کنند[۱۶]. رکن اصلی MESSAGE یک چارچوب انعطاف‌پذیر است که اجازه می‌دهد توصیفات مفصلی از سیستم انرژی مدل شوند. این امر شامل تعریف اَشکال انرژی در هر سطح از زنجیره‌های انرژی، فناوری‌هایی که این اشکال انرژی را تولید یا مصرف می‌کنند و منابع انرژی است. اشکال انرژی و فناوری‌ها می‌توانند برای تمامی گام‌های زنجیره‌های انرژی تعریف شوند. تعریف اشکال انرژی شامل شناسایی سطوح مختلف در زنجیره انرژی است که از تقاضا شروع شده و به منابع می‌رسد. داده‌های تقاضای انرژی برون‌زا هستند و به عنوان سطح اول هر زنجیره انرژی، وارد مدل می‌شوند. فناوری‌ها بر اساس ورودی‌ها و خروجی‌ها، بازده و درجه تغییرپذیریشان تعریف می‌شوند. درجه تغییرپذیری زمانی که بیش از یک ورودی (یا خروجی) استفاده (یا تولید) می‌شود، برای تعریف الگوی تولید امکان‌پذیر برای برخی از فناوری‌ها مانند پالایشگاه به کار می‌رود. بعلاوه، در مدل MESSAGE فعالیت یک فناوری به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است. کاربر می‌تواند برای عملکرد یک فناوری بیش از یک فعالیت تعریف کند. با تعریف حامل‌های انرژی و فناوری‌ها، زنجیره انرژی ساخته می‌شود[۱۲]. برخی از ویژگی‌های مدل MESSAGEIII در جدول (۴) خلاصه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ٤) ویژگی‌های مدل MESSAGEIII

سازمان توسعه دهنده		موسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی (IIASA)[1]، اتریش
۱. اهداف	عمومی:	برنامه‌ریزی برای آینده، برنامه‌ریزی میان مدت و بلندمدت انرژی، تحلیل سیاست‌های انرژی و توسعه سناریوها
	خاص:	عرضه و تقاضای انرژی، تاثیرات زیست‌محیطی، دسته‌بندی ماژولار. هدف شامل برنامه‌ریزی توسعه تولید، تحلیل مصارف نهایی، تحلیل سیاست‌های زیست‌محیطی، سیاست‌های سرمایه‌گذاری. تعیین جریان بهینه انرژی از منابع اولیه تا تقاضای نهایی و ارائه ترکیبی از گزینه‌های عرضه ممکن با کمترین هزینه که قادر به تامین تقاضا باشند.
۲. مفروضات		توصیف مشروح از مصارف نهایی انرژی و فناوری‌های انرژی
۳. ساختار مدل • درجه درون‌زایی • درجه توصیف اجزای غیرانرژی • درجه توصیف مصارف نهایی • درجه توصیف فناوری‌های عرضه		عرضه و اثرات زیست‌محیطی گزینه‌های عرضه به صورت درون‌زا تولید شده و تقاضا برون‌زا است. تحلیل جایگزین‌های سیستم‌های عرضه انرژی و اثرات کلی زیست‌محیطی آنها تعیین انواع مصارف نهایی در بخش خانگی، صنعت، حمل و نقل و انواع فناوری‌های وابسته به آن پرداختن به انواع فناوری‌های عرضه و تعیین ترکیب بهینه آنها از فناوری‌های استخراج منابع اولیه تا فناوری‌های مصارف نهایی برای تامین تقاضا با حداقل هزینه
۴. رویکرد مدل‌سازی		پایین به بالا
۵. متدولوژی		بهینه‌سازی
۶. رویکرد ریاضی		برنامه‌ریزی پویا
۷. سطح		محلی، ملی
۸. پوشش بخشی		بخش انرژی
۹. پوشش جغرافیایی		مناطق مختلف جهان
۱۰. پوشش حامل‌های انرژی		تمام حامل‌های انرژی را شامل می‌شود.
۱۱. افق زمانی		میان مدت، بلندمدت
۱۲. نیازهای داده‌ای		کمّی، پولی، تفکیک نشده
۱۳. ورودی‌ها		منابع انرژی اولیه، تقاضاهای انرژی، پایگاه اطلاعات فناوری‌ها از قبیل بازده هزینه‌ها و آلاینده‌ها و غیره، محدودیت‌های صادرات و واردات، محدودیت‌ها و نرخ‌های نفوذ فناوری
۱۴. خروجی‌ها		تخمین مقادیر تمامی متغیرهایی که توسعه سیستم انرژی را برای تمامی مناطق جهان در بازه زمانی مورد نظر توصیف می‌کنند. این متغیرها ترکیب بهینه فناوری‌ها و سوخت‌ها را برای تامین تقاضا در هر بخش نمایش می‌دهند. به عبارتی، خروجی‌ها شامل تحلیل استخراج منابع، صادرات و واردات انرژی، تحلیل و تبدیل انرژی، تحلیل انتقال و توزیع انرژی، بهره‌مندی از انرژی نهایی به وسیله تحلیل مصرف‌کننده، سیاست‌گذاری حفاظت محیط‌زیست و سیاست‌گذاری سرمایه‌گذاری می‌باشند.

1) International Institute for Applied System Analysis

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مدل IDEAS

مدل IDEAS[1] که نسخه پیشرفته و توسعه‌یافته مدل FOSSIL2 است، مدلی از عرضه و تقاضای انرژی ایالت متحده آمریکاست که برای برنامه‌ریزی رفتار بلندمدت سیستم انرژی آن کشور طراحی شده است. این مدل تصویر جامعی از عرضه، تقاضا، قیمت، هزینه و انتشار آلاینده مربوط به بخش انرژی آمریکا در طول افق زمانی حداکثر ۴۰ ساله را به دست می‌دهد و توانایی آزمون سیاست‌های مختلف انرژی را دارا می‌باشد. این مدل از روش سیستم داینامیک استفاده می‌کند و برای تحلیل بلندمدت سیاست‌های انرژی بسیار مناسب است. مدل IDEAS دارای سازوکاری است که رفتار بازارهای انرژی را شبیه‌سازی می‌کند. بازارهای انرژی، قیمت‌های انرژی را طوری تنظیم می‌کنند که تضمین کند برای سوخت‌های مشخص، عرضه برابر با تقاضاست. مدل، سازوکارهای قیمت‌گذاری و تسویه بازار را برای چهار کالای عمده انرژی شامل نفت، گاز طبیعی، زغال‌سنگ و برق شبیه‌سازی می‌کند. تمامی قیمت‌های دیگری که در مدل استفاده می‌شوند، به صورت برون‌زا توسط کاربر تعیین می‌گردند.

مدل IDEAS ممکن است به عنوان یک مدل تعادل جزئی در نظر گرفته شود زیرا فرایند تعادل بازار را تنها برای یک بخش از کل اقتصاد (بخش انرژی) مدل می‌کند. فرایند تعادل بازار در مدل IDEAS در طول دو چارچوب زمانی کوتاه مدت و بلندمدت اتفاق می‌افتد. این مدل از منحنی‌های ذخیره و حفظ انرژی برای نشان‌دادن فناوری‌های حفاظت موجود برای مصرف‌کنندگان انرژی استفاده می‌کند. این منحنی‌ها به صورت مجزا برای هر نوع سوخت و هر مصرف‌کننده نهایی در هر بخش وجود دارند. بخش‌ها شامل خانگی، تجاری، صنعت و وسایل نقلیه سبک و سنگین هستند. شاخص‌های حفاظت بر اساس قیمت‌های حاشیه‌ای مرتب می‌شوند. این منحنی‌ها با توجه به تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری که توسط مصرف‌کننده انرژی مشخص می‌شود، طراحی می‌شوند. مدل IDEAS متغیرهای بسیاری را گزارش می‌کند که می‌توانند به عنوان معیاری برای سنجش موفقیت یا شکست سیاست‌های انرژی به کار روند. این مدل یک معیار کلی برای سنجش رفاه اجتماعی ندارد و لذا سیاست‌گذار می‌تواند تاثیراتی را که سیاست‌های مختلف بر روی خروجی‌ها می‌گذارند، به طرق مختلف توزین کند تا به راهبرد انرژی معقولی دست یابد[۱۹]. ویژگی‌های کلی مدل IDEAS در جدول (۵) خلاصه شده است.

1) Integrated Dynamic Energy Analysis Simulation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ۵) ویژگی‌های مدل IDEAS

سازمان توسعه دهنده	در یک روند تدریجی از سال ۱۹۷۷ با شروع اولین بحران انرژی در امریکا رشد و توسعه یافته است و نمی‌توان آن را به شرکت یا موسسه خاصی نسبت داد. سازمان‌ها، موسسات و دانشگاه‌های بسیاری در توسعه آن سهیم بوده‌اند.
۱. اهداف عمومی	کاوش در آینده
۲. اهداف اختصاصی	برآوردهای مفصلی از عرضه، تقاضا، قیمت‌ها و هزینه‌های انرژی و میزان انتشار آلاینده‌ها در افق زمانی ۴۰ ساله ارائه داده و به منظور شبیه‌سازی عکس‌العمل عرضه و تقاضا در بازار انرژی نسبت به تغییرات بلندمدت در هزینه‌های منابع و دخالت‌های دولت ساخته شده است.
۳. ساختار مدل: درجه درون‌زایی درجه توصیف اجزای بخش غیرانرژی درجه توصیف مصارف نهایی درجه توصیف فناوری‌های عرضه	عرضه و تقاضای انرژی را به‌صورت درون‌زا مدل می‌کند. در این مدل از تعادل عرضه و تقاضا قیمت انرژی به‌دست می‌آید. برای متغیرهای بخش اقتصادی از سناریوهای مختلف استفاده می‌کند. مسائل و محدودیت‌های بخش زیست محیطی نیز دیده شده است. در این مدل مصارف نهایی با جزئیات کامل مدل شده‌اند. منحنی‌های مربوط به فناوری‌های مختلف به صورت برون‌زا وارد مدل می‌شوند.
۴. رویکرد مدل سازی	پائین به بالا
۵. پوشش جغرافیایی	پروژه‌ای، محلی و ملی
۶. پوشش بخشی	تمام بخش‌ها
۷. پوشش حامل های انرژی	تمام حامل‌های انرژی
۸. افق زمانی	میان‌مدت و بلندمدت
۹. متدولوژی مدل‌سازی	نگرش سیستمی
۱۰. تکنیک ریاضی مورد استفاده	تحلیل پویایی سیستم‌ها
۱۱. خروجی ها	مصرف حامل‌های انرژی، هزینه خدمات انرژی، انتشار آلاینده‌ها

مدل RETScreen

نرم‌افزار RETScreen می‌تواند در سرتاسر جهان برای ارزیابی تولید انرژی، هزینه‌های چرخه عمر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای انواع مختلف فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر (RET)[1] به کار رود. نرم‌افزار RETScreen به منظور غلبه بر موانع استفاده از فناوری انرژی پاک در مرحله شدنی بودن اولیه طراحی شد. این نرم‌افزار یک متدولوژی اثبات شده برای مقایسه فناوری‌های متداول و انرژی پاک ایجاد می‌کند، لذا تحلیل‌گر می‌تواند بیش از توسعه یک

1) Renewable energy technologies

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

متدولوژی، بر مطالعات ابتدایی امکان‌پذیری تمرکز کند. بعلاوه، نیاز حداقل این نرم‌افزار به داده‌های ورودی و پایگاه داده‌های درون‌ساز آب و هوا و محصولات، موجب سهولت و تحلیل‌های دقیق‌تر می‌شود. RETSceen نه تنها برای کمک به تحلیل یک پروژه، بلکه برای ایجاد اطلاعات مفید درباره فناوری‌های انرژی پاک و ایجاد آگاهی در مورد توانایی‌ها و کاربردهایشان طراحی شده است. پایه نرم‌افزار RETScreen یک مقایسه بین یک حالت پایه (معمولاً فناوری‌های متداول) و یک حالت پیشنهادشده (فناوری انرژی پاک) است. برای این نرم‌افزار هزینه‌های خالص اهمیت چندانی ندارند بلکه هزینه‌های افزایشی (هزینه‌هایی که در حالت پیشنهادی بیش از حالت پایه هستند) دارای اهمیت هستند. کاربر می‌تواند هزینه‌های افزایشی را مستقیماً و یا هزینه‌های حالت‌های پایه و پیشنهادی را به صورت مجزا وارد کند.

در RETScreen، منافع انرژی برای حالت پایه و حالت پیشنهادی یکسان است. وظیفه تحلیلی RETScreen تعیین این است که آیا تعادل هزینه‌ها و صرفه‌جویی در طول عمر پروژه، منجر به جذاب بودن پیشنهاد از لحاظ مالی می‌شود یا خیر. این موضوع توسط شاخص‌های مالی مختلف و جریان نقدینگی نشان داده می‌شود. تحلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط RETScreen نیز به این صورت است که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر تغییر فناوری حالت پایه به فناوری حالت پیشنهادی را گزارش می‌کند. زمانی که یک مدل RETScreen برای هر یک از فناوری‌های که RETScreen آنها را پوشش می‌دهد، استفاه می‌شود، روش تحلیل استاندارد ۵ مرحله‌ای برای همه آنها مشترک است. از آنجایی که مدل RETScreen توسط اکسل طراحی شده است، هر ۵ مرحله روش تحلیل استاندارد با یک یا چند صفحه اکسل همراه است.

- مدل انرژی
- تحلیل هزینه‌ها
- تحلیل گازهای گلخانه‌ای (اختیاری)
- خلاصه مالی
- تحلیل حساسیت و ریسک (اختیاری)

نرم‌افزار RETScreen می‌تواند برای ارزیابی کاربردهای صنعتی، تجاری، موسساتی، اجتماعات و خانگی به کار رود[۱۳]. برخی از ویژگی‌های این مدل در جدول (۶) آمده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ٦) ویژگی‌های مدل RETScreen

سازمان توسعه دهنده		CEDRL/Natural Resources Canada
۱. اهداف	عمومی:	برنامه‌ریزی برای آینده
	خاص:	عرضه انرژی، به طور خاص برای فناوری‌های تجدیدپذیر طراحی شده است.
۲. مفروضات		توصیف مشروح از فناوری‌های عرضه برای توسعه تولید
۳. رویکرد مدل‌سازی		پایین به بالا
۴. متدولوژی		صفحه گسترده[1]/ جعبه ابزار
۵. رویکرد ریاضی		موجود نیست.
۶. پوشش جغرافیایی		محلی، ملی
۷. پوشش بخشی		بخش انرژی
۸. افق زمانی		موجود نیست.
۹. نیازهای داده‌ای		کمّی، پولی، تفکیک نشده

مدل LEAP

مدل برنامه‌ریزی بلندمدت جایگزین‌های انرژی[2] (LEAP) اولین بار در مؤسسه محیط زیست استکهلم واقع در مرکز مؤسسه تلوس[3] و با حمایت و همکاری بسیاری از سازمان‌های دیگر توسعه یافت. در حال حاضر مدل LEAP دارای بیش از ۵۰۰۰ هزار کاربر در بیش از ۱۷۰ کشور جهان است. این مدل، دارای چارچوب حسابداری، کاربرپسند، سناریو–محور و شامل ابزار مدل‌سازی همزمان انرژی و محیط زیست است. مدل LEAP یک سیستم انرژی را به صورت تمام و کمال در بر می‌گیرد و امکان تحلیل هر دو دسته فناوری‌های عرضه و تقاضا و همچنین اثرات کلی سیستم را امکان‌پذیر می‌سازد. مدل‌های LEAP اولیه، مدل‌های بهینه‌سازی را پشتیبانی نمی‌کرد اما این قابلیت در اشتراک با مدل آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در حال توسعه است. این مدل از مجموعه‌ای از برنامه‌های یکپارچه تشکیل شده است. در این مدل،۴ گروه برنامه اصلی و ۵ زیربرنامه وجود دارد که عبارتند از:

۱– سناریوهای انرژی شامل تقاضا، فرایند تبدیل، بیوماس (زیست توده) و منابع انرژی، محیط زیست و ارزیابی

1) Spreadsheet
2) Long-Range Energy Alternatives Planning System (Leapo
3) Stockholm Environment Institute-Boston Center at the Tellus Institute

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

۲- تفکیک[1]

۳- پایگاه داده‌های محیطی

۴- زنجیره‌های سوخت

LEAP یک مدل تقاضامحور است. این مدل به پیش‌بینی تقاضای انرژی می‌پردازد و بر اساس این تقاضای پیش‌بینی شده، برنامه تبدیل در LEAP به شبیه‌سازی عرضه و فرایندهای تبدیل می‌پردازد تا از کفایت منابع اولیه به منظور برآورده ساختن تقاضا و مقاصد صادراتی اطمینان حاصل کند. سیستم تبدیل دارای دو سطح تحلیل است: سطح ماژول و سطح فرایند. سطح ماژول، صنایع و بخش‌های انرژی را ارائه می‌کند، برای مثال، تولید برق، پالایشگاه، تولید زغال‌چوب و توزیع گرمایش و سطح فرایند به توصیف فناوری‌های مجزا و گروهی در یک ماژول می‌پردازد، برای مثال، نیروگاه‌های زغال‌سنگ و نیروگاه‌های گاز در ماژول تولید برق. چهار نوع ماژول مختلف وجود دارند که عبارتند از: ماژول‌های ساده، ماژول‌های انتقال و توزیع، ماژول‌های جزء به جزء و ماژول‌های برق.

نرم افزار LEAP در نوع داده‌های موردنیاز بسیار انعطاف‌پذیر است، به طوری که می‌توان با حداقل داده‌ها مدل را اجرا کرد و زمانی که داده‌های بسیاری در دسترس است، می‌توان مدلی با سطح عمیقی از جزئیات برای سیستم انرژی طراحی کرد. داده‌های اصلی مورد استفاه در برنامه عبارتند از: داده‌های هزینه، مقادیر افزایش و کاهش در منابع[2] (مربوط به منابع غیرتجدیدپذیر)، مقاصد صادراتی و وارداتی برای هر سوخت، داده‌های تبدیل، داده‌های مربوط به برق و پالایشگاه، داده‌های تقاضای انرژی در یک شکل سلسله‌مراتبی در چهار سطح: بخش، زیربخش، مصرف‌کننده نهایی و ابزار، داده‌های مربوط به منابع بیوماس (زیست توده)، داده‌های انرژی مربوط به منابع تجدیدپذیر غیر بیوماس، داده‌های مالی، متغیرهای تأثیرگذار[3] مانند تولید ناخالص داخلی، قیمت برق، جمعیت و غیره (اگر برای پیش‌بینی استفاده شوند).

خروجی حاصل از مدل LEAP، یک جواب قطعی است زیرا که LEAP یک مدل از نوع مدل‌های حسابداری است. خروجی مدل عبارت است از ترازنامه عرضه و تقاضای انرژی، برآورد میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی و ترازنامه عرضه و تقاضای منابع بیوماس. LEAP همچنین قادر است هزینه کلی و پیامدهای زیست‌محیطی سناریوهای مختلف را با هم مقایسه کند. محدودیت های LEAP عبارتند از:

- تنها دارای یک چارچوب حسابداری است و تأثیر عوامل اقتصادی بر عرضه انرژی و ترکیبات سوختی در این مدل نادیده گرفته می‌شود.

1) Aggregation
2) Quantities of resource additions and depletions
3) Driver variables

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

- سهم مصرف سوخت و ابزارهای جایگزین برای مصرف باید به صورت خارجی توسط تحلیلگر وارد شوند و خود مدل قابلیت برآورد آنها را ندارد. بنابراین، آینده سیستم انرژی تا حد زیادی به فناوری بستگی دارد که بر اساس قضاوت مدل‌ساز برای آینده ترجیح داده می‌شود.
- با اینکه قیمت/هزینه انرژی می‌تواند به عنوان یکی از سه متغیر مؤثر در تعیین سطح فعالیت در مدل در نظر گرفته شود، با این حال، این متغیر نمی‌تواند از عوامل انتخاب میان سناریوهای مختلف فناوری‌های انرژی و یا سوخت تلقی شود.
- با توجه به ماهیت مدل، این مدل قادر به تحلیل رقابت میان سوخت‌های فسیلی و سوخت‌های تجدیدپذیر نیست[۸].

خلاصه‌ای از ویژگی‌های کلی مدل LEAP در جدول (۷) آمده است.

جدول ۷) خلاصه‌ای از ویژگی‌های کلی مدل LEAP

سازمان توسعه دهنده		مؤسسه محیط زیست استکهلم واقع در بوستون، ایالات متحده امریکا
۱.اهداف	عمومی:	برنامه‌ریزی برای آینده، پیش‌بینی
	خاص:	تقاضا، عرضه، اثرات زیست‌محیطی، رویکردی یکپارچه. اهداف عبارتند از: تحلیل سیاست‌های انرژی، تحلیل سیاست‌های زیست محیطی، برآوردهای مربوط به زیست‌توده‌ها و آمایش سرزمین، تحلیل پروژه‌ها پیش از سرمایه‌گذاری، برنامه‌ریزی یکپارچه انرژی، تحلیل کامل چرخه سوختی. برای کشورهای در حال توسعه و نیز کشورهای توسعه یافته قابل استفاده است.
۲. مفروضات		تقاضا: درجه درون‌زایی بالایی در مدل وجود دارد و شرح کاملی از کلیه بخش‌های اقتصادی در دل این بخش تعبیه شده است. عرضه: شرح ساده‌ای از بخش‌های نهایی مصرف و فناوری‌های عرضه برای مثال انرژی‌های تجدیدپذیر در این بخش وجود دارد.
۳. رویکرد مدل‌سازی		در بخش تقاضا بالا به پایین و در بخش عرضه پایین به بالا
۴. متدولوژی		در بخش تقاضا اقتصاد سنجی یا اقتصاد کلان و در بخش عرضه شبیه‌سازی
۵. رویکرد ریاضی		مدل از روش های محاسباتی ساده در اقتصادسنجی و شبیه سازی استفاده می‌کند.
۶. پوشش جغرافیایی		محلی، ملی، منطقه‌ای، بین‌المللی
۷. پوشش بخشی		تمامی بخش‌های انرژی
۸. افق زمانی		میان‌مدت و بلندمدت
۹. نیازهای داده‌ای		داده‌ها کمّی، پولی، داده‌های تفکیک شده/تفکیک نشده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مدل ENPEP

مدل ENPEP اولین بار توسط آزمایشگاه ملی آرگون (ANL)[1] با پشتیبانی وزارت نیروی ایالت متحده آمریکا، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، بانک جهانی و انجمن برق مجارستان[2] توسعه یافت. این مدل سناریو محور است و شامل ابزار مدل‌سازی همزمان انرژی و محیط زیست است، کاربرپسند نیست و به داده‌های بسیار نیاز دارد.

موارد کاربرد این مدل بسیار گسترده بوده و طیف وسیعی از مسایل موجود در بازار پیچیده انرژی امروز را پوشش می‌دهد که عبارتند از: تحلیل سیاست‌های انرژی، پیش‌بینی‌های مربوط به بازار انرژی، پیش‌بینی تقاضای برق و انرژی، تحلیل گزینه‌های مربوط به توسعه بازار برق، تحلیل هزینه‌های تولید، هزینه‌های نهایی و قیمت‌های برق در بازارهای مشترک[3]، عملیات و مدیریت نیروگاه‌های آبی و مخازن، ارزیابی اقتصادی و زمانی سرمایه‌گذاری‌های جدید در بخش برق، تحلیل تصمیمات و تبادل میان اهداف انرژی زیست محیطی، تحلیل بازار گاز طبیعی، پیش‌بینی‌های مربوط به انتشار کربن، پیش‌بینی راهبردهای کنترل صدور آلاینده‌های هوا، بررسی انتشار گازهای گلخانه‌ای، بررسی بازار برق و طراحی آنها و مطالعات بین بخشی. داده‌های مورد نیاز در ENPEP عبارتند از: تمامی ترازنامه‌های عرضه و تقاضا در سیستم انرژی مربوط به سال پایه، مقدار کارایی در پردازش انرژی، ظرفیت‌های پردازش، عامل ظرفیت، طول عمر مورد انتظار تجهیزات و نیروگاه‌ها در سال پایه و در آینده، پیش‌بینی تقاضای نهایی، پیش‌بینی قیمت‌های سوخت (داخلی و وارداتی)، پیش‌بینی هزینه‌ها، فرایند تنظیم قیمت که شامل ضریب قیمت، اضافه قیمت، حداقل قیمت و حداکثر قیمت و غیره است و ترکیب شیمیایی انرژی، عوامل انتشار آلاینده‌ها برای برآورد آلودگی. مدل ENPEP متشکل از ۱۰ ماژول تحلیل فنی است که هر یک از آنها به طور اتوماتیک با سایر ماژول‌های ENPEP مرتبط بوده و هر یک نیز به طور جداگانه قابلیت‌های منحصر بفرد خود را دارا می‌باشد[۶]. خلاصه‌ای از ویژگی‌های کلی مدل ENPEP در جدول (۸) آمده است.

1) Argonne National Laboratory
2) Hungarian Electric Board
3) spot markets

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ۸) خلاصه‌ای از ویژگی‌های کلی مدل ENPEP

سازمان توسعه دهنده		آژانس بین المللی انرژی اتمی (IAEA)، استرالیا
۱.اهداف	عمومی:	پیش‌بینی، برنامه‌ریزی برای آینده
	خاص:	تقاضا و عرضه انرژی، ایجاد هماهنگی میان عرضه و تقاضا، اثرات زیست محیطی. تحلیل مفصل بخش برق بر مبنای بهینه‌سازی با هدف حداقل‌کردن هزینه. رویکرد یکپارچه. ایجاد امکان تحلیل سیاست‌های انرژی، تعیین تعرفه‌های انرژی، تجزیه و تحلیل سرمایه‌گذاری، برنامه‌ریزی برای توسعه تولید، تحلیل سیاست‌های زیست محیطی.
۲. مفروضات		تقاضا: درجه درون‌زایی بالایی در مدل وجود دارد و شرح کاملی از کلیه بخش‌های اقتصادی در این بخش تعبیه شده است. عرضه: شرح جزء به جزء و مفصل بخش‌های نهایی مصرف و فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر
۳. رویکرد مدل‌سازی		هیبریدی، در بخش تقاضا بالا به پایین و در بخش عرضه پایین به بالا
۴. متدولوژی		اقتصاد کلان در بخش تقاضا، تعادل اقتصادی برای کل سیستم انرژی
۵. پوشش جغرافیایی		محلی، ملی
۶. پوشش بخشی		کل اقتصاد
۷. افق زمانی		کوتاه مدت (۱ تا ۳ سال)، میان مدت، بلندمدت (حداکثر ۵۰ سال)
۸. نیازهای داده‌ای		داده‌ها کمّی، پولی، داده‌های تفکیک شده/تفکیک نشده

مدل MESAP

مدل برنامه‌ریزی و تحلیل ماژولار سیستم انرژی MESAP[1] در سال ۱۹۸۴، در انستیتوی اقتصاد انرژی و استفاده منطقی از انرژی بخش IER دانشگاه اشتوتگارت تولید شد. این مدل یک نرم‌افزار و یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای مدیریت یکپارچه انرژی و محیط زیست است. MESAP یک بسته نرم‌افزاری برنامه‌ریزی انرژی به صورت ماژولار است که می‌تواند پاسخگوی نیازهای خاص کشورهای در حال توسعه باشد. ابزارهای مدل‌سازی MESAP حیطه‌های مختلفی را در حوزه انرژی در بر می‌گیرند. محاسبات مربوط به سرمایه‌گذاری، محاسبات مربوط به محیط زیست، شبیه‌سازی سیستم انرژی، برنامه‌ریزی عملکرد و گسترش شبکه برق، شبیه‌سازی عرضه، مدیریت تقاضا، برنامه‌ریزی یکپارچه منابع، چرخه عمر مواد و تحلیل زنجیره سوختی را می‌توان به عنوان حیطه‌های مختلف تحلیلی در این نرم‌افزار نام برد. این مدل برای برنامه‌ریزی ساختاریافته انرژی طراحی شده است و امکان تصمیم‌گیری واقعی و عملی را به شرح زیر فراهم می‌آورد:

- مستندسازی موضوعات راهبردی مورد مطالعه
- ایجاد و مستندسازی سیستم معادلات مدل

1) Modular Energy System Analysis and Planning

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

- تحلیل جدولی و نموداری نتایج
- ارزیابی نتایج بر اساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی
- ایجاد و مستندسازی ساختار شبکه‌ای سیستم انرژی
- ورود، مدیریت و مستندسازی داده
- ایجاد گزارش‌های استاندارد
- ایجاد سیستم نظارتی.

MESAP متشکل از سه قسمت است: ماژول محاسبات، سیستم اطلاعات MESAP و ابزارهای اضافی برای اهداف و یا ماژول های خاص[۱۴]. جدول (۹)، خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل MESAP را نشان می‌دهد.

جدول ۹) خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل MESAP

سازمان توسعه دهنده		IER، دانشگاه اشتوتگارت، آلمان
۱.اهداف	عمومی:	اکتشاف، پیش‌بینی
	خاص:	بسته ماژولار. تقاضا، عرضه، محیطزیست از طریق ماژول‌های مختلف
۲. مفروضات		بسته با ماژول‌های مختلف، متفاوت است.
۳. رویکرد مدل‌سازی		در بخش تقاضا بالا به پایین و در بخش عرضه پایین به بالا
۴. متدولوژی		در بخش تقاضا اقتصادسنجی، در بخش عرضه شبیه‌سازی یا برنامه‌ریزی خطی
۵. رویکرد ریاضی		(در میان سایر روش‌ها) برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا
۶. پوشش جغرافیایی		محلی، ملی
۷. پوشش بخشی		تمامی‌بخش‌های انرژی از طریق ماژول PLANET/MADE
۸. افق زمانی		میان‌مدت و بلندمدت
۹. نیازهای داده‌ای		داده‌ها کمی، پولی، داده‌های تفکیک شده/تفکیک نشده
۱۰. پوشش حامل‌های انرژی		تمام حامل‌های انرژی را شامل می‌شود.
۱۱. ورودی ها		تراز انرژی و فعالیت‌های اقتصادی؛ مشخصات، عملکرد، هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های انرژی؛ محدودیت‌های فناورانه زیست محیطی و سیاستی؛ قیمت‌های جهانی انرژی (واردات)؛ منابع، پتانسیل‌ها و محدودیت‌های اختیاری: عوامل آلودگی
۱۲. خروجی ها		تقاضای هر یک از حامل‌های انرژی توسط هر یک از مصارف نهایی، سرمایه‌گذاری در هر یک از فناوری‌های عرضه، میزان آلودگی هر یک از آلاینده‌ها

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مدل NEMS

مدل NEMS، مدل ملی سیستم انرژی آمریکا[1] برای افق زمانی ۲۰۲۵ میلادی است. در این مدل، سیاست‌گذاری در تولید، تبدیل، مصرف و قیمت برای دوره زمانی مورد مطالعه طراحی می‌شود. طراحی سیاست‌های انرژی در سیستم بهم پیوسته اقتصاد و انرژی انجام شده و تاثیر سیاست‌های انرژی بر تعامل سیستم اقتصاد و انرژی در موضوعات و زمینه‌های مختلفی مانند مسائل مالی و اقتصاد کلان، بازار جهانی انرژی، هزینه‌ها و نحوه دسترسی به منابع انرژی، معیارهای انتخاب فناوری‌های تولید و مصرف انرژی، ویژگی‌ها و هزینه‌های فناوری‌های انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. شاید بتوان مدل NEMS را جامع‌ترین و کامل‌ترین مدل سیستمی برای بخش‌های مختلف انرژی و تعامل آن با بخش‌های اقتصاد و محیط زیست دانست. مدل NEMS مدل بازار انرژی داخلی شامل چگونگی تصمیم‌گیری اقتصادی تولید، تبدیل و مصرف انرژی در سیستم اقتصادی است. ایده مهم در مدل NEMS، مدل‌سازی نسبتاً شفاف و با جزئیات فراوان فناوری‌های انرژی، خصوصیات و نحوه توسعه آنها در بازارهای انرژی است. یکی از ویژگی‌های اصلی مدل NEMS، وجود مدل‌های منطقه‌ای برای بازارهای انرژی است که با این روش، وضعیت هزینه‌های انرژی، دسترسی به منابع انرژی و خصوصیات مصرف‌کنندگان آن به صورت منطقه‌ای در مدل مورد توجه قرار گرفته و اثر سیاست‌های انرژی به صورت منطقه‌ای تحلیل می‌گردد. برای سادگی تحلیل سیاست‌ها و اطمینان نسبت به نتایج مدل، جزئیات بسیار زیادی در مدل‌سازی تولید و مصرف انرژی به‌کار رفته است[۳]. برخی از ویژگی‌های مدل NEMS در جدول (۱۰) آمده است.

جدول ۱۰) خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل NEMS

سازمان توسعه دهنده	وزارت انرژی امریکا
۱. اهداف عمومی	کاوش در آینده
۲. اهداف اختصاصی	بررسی تاثیر سیاست‌های انرژی و عوامل محیطی و امنیتی بر اقتصاد و بازار انرژی آمریکا
۳. ساختار مدل: درجه درون‌زایی درجه توصیف اجزای بخش غیرانرژی درجه توصیف مصارف نهایی درجه توصیف فناوری‌های عرضه	مدل NEMS از شش زیر مدل اصلی تشکیل شده است: ۱- زیرمدل عرضه شامل چهار مدل برای عرضه نفت و گاز، انتقال و توزیع گاز طبیعی، زغال‌سنگ و سوخت‌های تجدیدپذیر، ۲- مدل‌های تبدیل شامل دو مدل برای پالایشگاه‌های پتروشیمی و برق، ۳- مدل‌های تقاضا شامل چهار مدل برای تقاضا در بخش‌های خانگی، تجاری، حمل و نقل و صنعتی، ۴- مدل فعالیت‌های اقتصاد کلان: مدل شبیه سازی تعاملات سیستم اقتصادی و سیستم انرژی، ۵- مدل فعالیت بین‌المللی انرژی: مدل برای شبیه‌سازی قیمت جهانی نفت، ۶- مدل یکپارچه‌کننده: مدلی برای دستیابی به نقطه تعادل عمومی در بازارهای انرژی، بخشی از مدل یکپارچه‌کننده، زیرمدل سیاست انتشار آلودگی است که در آن میزان انتشار دی‌اکسید کربن و گاز متان تخمین زده می‌شود. یکی از مزیت‌های مهم مدل NEMS، نمایش فناوری و توسعه آن در طول زمان است. پنج بخش خانگی، تجاری، حمل و نقل، صنعت و تولید برق شامل انواع وسیعی از فناوری‌ها می‌شوند. فرایند فناوری در هر یک از بخش‌ها به صورت تابعی از زمان مدل شده و فرض می‌شود فناوری‌ها با هزینه‌های فراوانی متولد شده و با گذشت زمان و تطبیق شرایط با فناوری، هزینه‌ها کاهش می‌یابد. در سایر بخش‌ها (صنعت، عرضه نفت، گاز و زغال سنگ) رفتار فناوری‌ها به دلیل کمبود اطلاعات در باره آنها محدود می‌شود.

1) National Energy Model System

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

ادامه جدول ۱۰) خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل NEMS

۴. رویکرد مدل‌سازی	ترکیبی از رویکرد پائین به بالا و بالا به پائین
۵. پوشش جغرافیایی	پروژه‌ای، محلی و ملی
۶. پوشش بخشی	در برگیرنده تمام بخش‌های انرژی، اقتصاد و بخش زیست محیطی است.
۷. پوشش حامل های انرژی	تمام حامل‌های انرژی را در بر می‌گیرد.
۸. افق زمانی	برای تحلیل سیاست‌هایی در افق زمانی ۲۰ الی ۲۵ سال طراحی شده است.
۹. متدولوژی مدل‌سازی	متدولوژی اصلی، نگرش سیستمی است در بخشی از مدل از سایر روش‌ها مثل اقتصادسنجی استفاده شده است.
۱۰. تکنیک ریاضی	سیستم داینامیک
۱۱. ورودی ها	ورودی‌های **مدل انرژی بین المللی:** روند ظرفیت تولید کشورهای OPEC، عرضه و تقاضای نفت دیگر کشورها، پارامترهای اقتصادی دیگر کشورها، منحنی‌های پایه عرضه واردات برای نفت‌های خام، تولیدات پتروشیمی و مواد اکسیژن‌دار، **مدل تقاضای خانگی:** مقدار جاری انباره خانه‌سازی و نرخ استهلاک آن، مقدار جاری انباره لوازم خانگی و طول عمر آن، انواع لوازم خانگی جدید، میزان بهره‌وری و هزینه‌های آنها، شاخص-های عایق‌بندی ساختمان‌های خانگی، متراژ زیربنای خانگی، **مدل تقاضای صنعتی:** مراحل تولید در صنایع با مصرف شدید انرژی، منحنی‌های امکان انتخاب فناوری، نرخ استهلاک انباره، **مدل حمل و نقل:** پیش‌بینی متغیرهای جمعیتی و مقدار جاری آن، انباره خورودهای موجود با مدل Vintage برحسب بهره‌وری سوخت آنها، طول عمر خودروها، خصوصیات فناوری‌های جدید در خودروها، قوانین آلایندگی و ایمنی خودروها، نرخ کاهش مسافت طی شده بر حسب ماشین–مایل برای هر گالن سوخت، **مدل بازار برق:** داده‌های مالی، فروض مالیاتی، هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های جاری و نگهداری، پارامترهای راه‌اندازی نیروگاه، نرخ انتشار آلایندگی، نیروگاه‌های موجود، محدودیت‌های انتقال، ظرفیت مولدهای برقابی و بهره‌وری آنها، **مدل سوخت‌های تجدیدپذیر:** داده‌های کیفی منابع زمین گرمایی، داده‌های کیفی منابع بادی، بهره‌وری نیروگاه (عامل ظرفیت)، هزینه فناوری و پارامترهای عملکردی، ظرفیت گاز حاصل از سوزاندن زباله‌ها، **مدل عرضه نفت و گاز:** سطوح منابع نفت و گاز، هزینه‌ها و پارامترهای اولیه اکتشاف، الگوهای تولید، پارامترهای مالیاتی، ظرفیت تولید و مصرف گاز طبیعی مکزیک، **مدل انتقال و توزیع گاز طبیعی:** الگوهای تاریخی مصرف، الگوهای تاریخی جریان گاز، داده‌های مالی شرکت‌های گاز، داده‌های بهره‌وری و ظرفیت ذخیره سازی و خطوط لوله، مالیات‌های ایالتی و کشوری، داده‌های هزینه توسعه ظرفیت ذخیره‌سازی و خطوط لوله، تولید گاز طبیعی اضافی، **مدل بازار مواد نفتی:** ظرفیت‌های واحدهای پالایشگاهی، خصوصیات محصولات نفتی، هزینه‌های جاری، هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های انتقال و توزیع، مالیات ایالتی و کشوری، پارامترهای اجرای واحدهای مولد ترکیبی برق، ظرفیت واحدهای مولد ترکیبی برق، **مدل بازار زغال سنگ:** سال مبنا برای ظرفیت تولید، بهره‌وری ظرفیت، قیمت‌ها و پارامترهای کیفی زغال سنگ، هزینه‌های پیمانکاری، بهره‌وری نیروی کار، هزینه‌های نیروی کار، هزینه‌های حمل و نقل داخلی و بین المللی، منحنی‌های عرضه بین المللی
۱۲. خروجی ها	**خروجی مدل انرژی بین‌المللی:** قیمت جهانی نفت، منحنی‌های عرضه نفت خام وارداتی، تولیدات پالایشگاهی و واردات مواد اکسیژن‌دار، **خروجی مدل تقاضای خانگی:** تقاضای انرژی برحسب نوع خدمت و سوخت مصرفی، تغییرات در انباره خانه‌سازی و لوازم خانگی، بهره‌وری انباره لوازم خانگی، **خروجی مدل تقاضای تجاری:** زیربنای تجاری موجود، طول عمر واحدهای تجاری، انباره لوازم و تجهیزات اداری و طول عمر آنها، انواع تجهیزات جدید، بهره‌وری و هزینه آنها و شدت مصرف انرژی، **خروجی مدل تقاضای صنعتی:** تقاضای انرژی برای انواع خدمات و انواع سوخت‌ها، فروش برق به شبکه برق، مصرف سوخت و تولید برق کمکی، **خروجی مدل حمل و نقل:** تقاضای سوخت، فروش، انبار و خصوصیات انواع خودروها، مسافت طی‌شده برحسب ماشین–مایل، بهره‌وری سوخت بر اساس انواع فناوری‌ها، فروش خودروهای سوخت جایگزین برحسب انواع فناوری‌ها، خصوصیات خودروهای سبک در ناوگان حمل و نقل تجاری، **خروجی مدل بازار برق:** قیمت برق، تقاضای سوخت، ظرفیت‌های اضافی، نیازهای سرمایه‌ای، میزان آلایندگی، ظرفیت تولید برق با سوخت‌های تجدیدپذیر، **خروجی مدل سوخت‌های تجدیدپذیر:** ظرفیت‌های تولید انرژی، هزینه‌های سرمایه‌ای، هزینه‌های جاری، ظرفیت موجود، **خروجی مدل عرضه نفت و گاز:** تولید نفت‌خام، منحنی‌های عرضه گاز طبیعی داخلی و کانادا، واردات و صادرات گاز طبیعی مایع و گاز طبیعی مکزیک، میزان ذخایر نفت و گاز و میزان ذخایر اضافی آنها، **خروجی مدل انتقال و توزیع گاز طبیعی، خروجی مدل بازار زغال سنگ**

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

مدل ENERGY2020

مدل ENERGY2020، روند توسعه و گسترش مدل‌سازی در آمریکا از سال ۱۹۷۲ را نشان می‌دهد. این مدل، توسعه یافته مدل UTILITY2020 است. این مدل یک سیستم تحلیل انرژی چندبخشی است که به شبیه‌سازی عرضه، تقاضا و قیمت و تقاضای هر یک از انواع سوخت می‌پردازد. مدل را می‌توان با تغییر سطح جزئیاتش با هر سیستم انرژی تطابق داد و می‌توان ماژول‌های دیگری از سایر مدل‌های مرتبط با ENERGY2020 مانند ماژول اقتصاد کلان را به مدل اضافه کرد. این انعطاف‌پذیری، قابلیت استفاده از مدل و تکامل آن در واکنش به تغییرات صورت‌گرفته در تصمیمات سیاست‌گذاران را افزایش می‌دهد.

در این مدل، بخش تقاضا از پنج بخش خانگی، تجاری، صنعتی، کشاورزی و حمل و نقل تشکیل شده است. در تمام نسخه‌های ENERGY2020 حداقل سه بخش اول وجود دارند[۵]. بخش تقاضا در تعامل مستقیم با بخش عرضه قرار دارد تا سطح تعادلی تقاضا و قیمت انرژی تعیین شود. بخش تقاضای انرژی با داده‌های بخش اقتصادی اجرا می‌شود و همچنین خود، داده‌های سرمایه‌گذاری و قیمت‌های انرژی را به عنوان ورودی به این بخش بازخور می‌دهد. بخش اقتصادی این مدل بسیار ساده طراحی شده است به گونه‌ای که ارتباط بین سیستم انرژی و کلیت سیستم اقتصادی را بخوبی برقرار می‌کند. پیش‌فرض این بخش آن است که تقاضای هر بخش بر اساس استفاده از موجودی سرمایه برای تولید یک خروجی حاصل می‌شود[۱۷].

بخش عرضه مدل ENERGY2020 شامل برق، نفت، گاز طبیعی، فرآورده‌های نفتی تصفیه‌شده، اتانول، گاز حاصل از سوزاندن زباله و زغال‌سنگ و در بعضی نسخه‌ها منابع خورشیدی و زیست‌توده است. در این بخش، مدل به شبیه‌سازی تولید اولیه انرژی، میزان انتشارات ناشی از این تولیدات، توزیع انرژی و استفاده از انرژی به منظور ایجاد انرژی جدید می‌پردازد. بخش عرضه تنها در نسخه خاصی از مدل ENERGY2020 وجود دارد و بسته به منطقه‌ای که شبیه‌سازی در آن صورت می‌گیرد و مشکلی که برای آن منطقه شناسایی شده متفاوت عمل می‌کند[۵]. مدل ENERGY2020 قادر به محاسبه آلودگی ناشی از احتراق سوخت (به ازای هر سوخت، هر بخش و هر مصرف‌کننده نهایی) و آلودگی‌هایی که به احتراق و انرژی مربوط نیستند (به ازای سطوح اقتصادی) می‌باشد[۱۷]. این مدل دارای یک بسته با قابلیت انعکاس عدم اطمینان به نام HYPERSENS است که در آزمون سیاست‌ها به کاربر کمک می‌کند. این بسته اثرات عدم اطمینان‌های موجود در فناوری‌های تبدیل انرژی را بر متغیرهایی مانند هزینه/منفعت کمّی می‌کند. عدم اطمینان پارامترهای مدل را می‌توان با هر تابع توزیعی نشان داد. با اینکه مدل ENERGY2020 یک مدل بهینه‌سازی نیست، اما کاربر می‌تواند برای آن توابع هدفی مانند دستیابی به نرخ‌های باثبات، کاهش تقاضا در زمان اوج مصرف، حداکثرکردن بازده سرمایه و غیره تعریف کند. همچنین این مدل دارای قابلیت استفاده از معیارهای مختلف با وزن‌های مختلف برای رتبه‌بندی سناریوهای مختلف است. با استفاده از HYPERSENS می‌توان از تصمیم‌گیری چندشاخه برای یافتن مسیر بهینه برای دستیابی به توابع هدف استفاده کرد[۱۸]. جدول (۱۱) خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل ENERGY2020 را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

جدول ۱۱) خلاصه ای از ویژگی‌های کلی مدل ENERGY2020

سازمان توسعه دهنده		مدل ENERGY2020 در یک روند تدریجی از سال ۱۹۷۲ در امریکا رشد و توسعه یافته است و نمی‌توان آن را به شرکت یا موسسه خاصی نسبت داد.
۱.اهداف	عمومی:	کاوش در آینده
	خاص:	تحلیل سیاست‌های مختلف در زمینه عرضه، تقاضا و مسائل زیست محیطی
۲. ساختار مدل: درجه درون‌زایی درجه توصیف اجزای بخش غیرانرژی درجه توصیف مصارف نهایی درجه توصیف فناوری‌های عرضه		مدل عرضه و تقاضای انرژی را به صورت درون‌زا مدل می‌کند. در این مدل از تعادل عرضه و تقاضا قیمت انرژی به‌دست می‌آید. مدل برای بخش اقتصادی از یک مدل مستقل به نام REMI استفاده می‌کند. مسائل و محدودیت‌های بخش زیست محیطی نیز دیده شده است. در این مدل مصارف نهایی با جزئیات کامل مدل شده‌اند. منحنی‌های مربوط به فناوری‌های مختلف به صورت برون‌زا وارد مدل می‌شوند.
۳. رویکرد مدل‌سازی		پایین به بالا
۴. متدولوژی مدل‌سازی		نگرش سیستمی
۵. رویکرد ریاضی		سیستم‌های دینامیکی و تحلیل حساسیت
۶. پوشش جغرافیایی		محلی، منطقه‌ای و بین‌المللی
۷. پوشش بخشی		تمام بخش‌های انرژی، اقتصاد و مسائل زیست‌محیطی
۸. ورودی‌ها		جمعیت و رشد اقتصادی، قیمت سوخت‌ها، مصرف انرژی، میزان انتشار آلاینده‌ها و مقررات فعلی درباره کیفیت آب و هوا، ظرفیت تولید برق و عملیات
۹. خروجی‌ها		مدل شامل خروجی‌هایی در چهار دسته است: داده‌های اصلی (ترازنامه، منابع تأمین و موارد استفاده از بودجه‌ها، شرح درآمد، تولید، فروش و بار مصرفی مصرف‌کننده نهایی)، بررسی مقایسه‌ای (تأثیرات مقایسه‌ای، تغییرات بازار فناوری، نشر آلاینده‌ها، تاثیرات برنامه زمانبندی نرخ‌ها، تاثیرات بازار برق بر بازار گاز و بالعکس، روابط متغیر قانون‌گذاری)، بررسی‌های خاص (پروژه‌های ترکیبی، مالکیت، رقابتی کردن و پروژه‌های تمرکز زدایی)، بررسی‌های استاندارد (تحلیل‌های آتی، اعتبار/عدم اعتبار، اثرات پویا و تحلیل سود و هزینه با درنظر گرفتن شرایط بیرونی)

انتخاب مدل مناسب عرضه انرژی برای ایران

در این بخش با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، مدل مناسب عرضه انرژی برای ایران مشخص می‌شود.

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به منظور تصمیم‌گیری و انتخاب یک گزینه از میان گزینه‌های متعدد تصمیم با توجه به شاخص‌هایی که تصمیم‌گیرنده تعیین می‌کند، به کار می‌رود. این روش

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

در سال ۱۹۸۰ توسط توماس ساعتی ابداع شد. این تکنیک، مسائل پیچیده را بر اساس آثار متقابل آنها مورد بررسی قرار می‌دهد و آنها را به شکلی ساده تبدیل کرده و به حل آنها می‌پردازد. بکارگیری این روش مستلزم چهار گام عمده زیر است[۴]:

۱- مدل‌سازی: در این گام، مسأله و هدف از تصمیم‌گیری به صورت سلسله مراتبی از عناصر تصمیم که با هم در ارتباط هستند، در می‌آید. عناصر تصمیم شامل شاخص‌های تصمیم‌گیری و گزینه‌های تصمیم است.
۲- قضاوت ترجیحی: مقایسه‌های زوجی بین گزینه‌های مختلف تصمیم براساس هر شاخص صورت می‌گیرد. مقایسه‌های زوجی همچنین در مورد شاخص‌های تصمیم نیز انجام می‌گیرد.
۳- محاسبات وزن‌های نسبی: وزن و اهمیت عناصر تصمیم نسبت به هم از طریق مجموعه‌ای از محاسبات عددی تعیین می‌شود.
۴- ادغام وزن‌های نسبی: این گام به منظور رتبه‌بندی گزینه‌های تصمیم صورت می‌گیرد. در این گام، ماتریس وزن شاخص‌ها برای هر گزینه تصمیم در بردار وزن شاخص‌ها ضرب می‌شود.
۵- سازگاری قضاوت‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. تجربه نشان داده است که اگر نسبت سازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، سازگاری مقایسه‌ها قابل قبول است و در غیر این صورت، باید دوباره انجام گیرد.

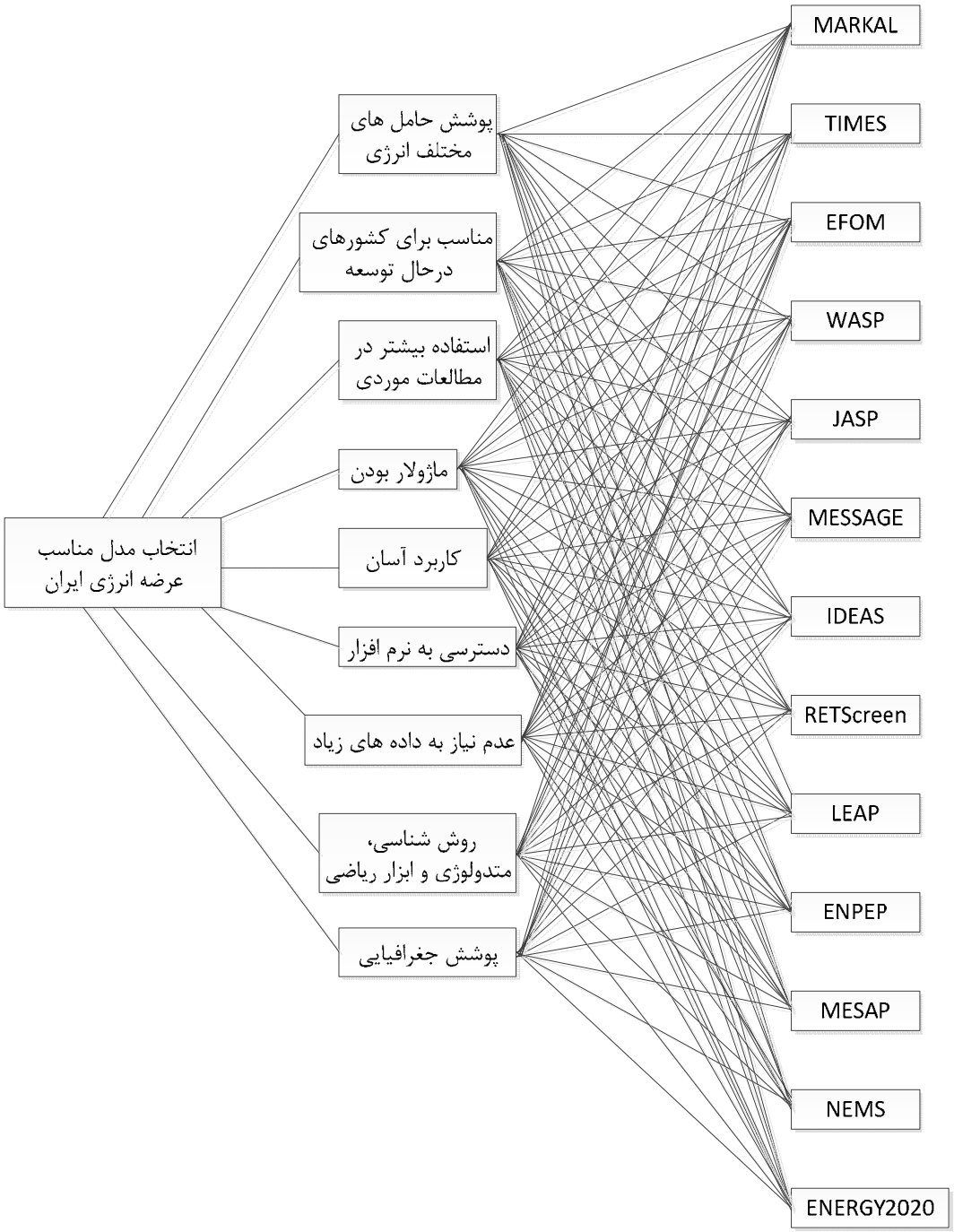
اجرای فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب مدل مناسب برای تخصیص منابع انرژی ایران

مدل‌سازی

در این مرحله، با توجه به هدف مسأله که در اینجا انتخاب مدل مناسب برای تخصیص منابع انرژی ایران است، شاخص‌هایی در نظر گرفته می‌شود و گزینه‌های مختلف که مدل‌های عرضه انرژی هستند، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. شکل (۱) مدل تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل مناسب تخصیص منابع انرژی ایران را نشان می‌دهد. سیزده مدل MARKAL، TIMES، EFOM، WASP، JASP، MESSAGE، IDEAS، RETScreen، LEAP، NPEP، MESAP، NEMS، NERGY2020 توسط ۹ شاخص زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند:

۱- پوشش حامل‌های مختلف انرژی
۲- مناسب برای کشورهای در حال توسعه
۳- استفاده بیشتر در مطالعات موردی
۴- ماژولار بودن
۵- کاربرد آسان
۶- دسترسی به نرم‌افزار
۷- عدم نیاز به داده‌های زیاد
۸- روش شناسی، متدولوژی و ابزار ریاضی
۹- پوشش جغرافیایی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]



شکل ۱) مدل تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل مناسب برای تخصیص منابع انرژی ایران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

شاخص‌های مذکور با توجه به مشخصات مدل‌های مختلف و نظر خبرگان، به عنوان شاخص‌های مناسب برای بررسی و مقایسه مدل‌های مختلف عرضه انرژی انتخاب شده‌اند. قابل ذکر است که خبرگان، کارشناسان وزارت نفت و وزارت نیرو و همچنین اساتید دانشگاه‌های تهران، خواجه نصیرالدین طوسی، اصفهان و صنعت شریف بوده‌اند.

قضاوت ترجیحی

در این مرحله، مقایسه‌های زوجی بین گزینه‌های مختلف تصمیم و همچنین بین مدل‌های مختلف عرضه انرژی بر اساس هر شاخص، توسط خبرگان انجام شده است.

محاسبات وزن‌های نسبی

پس از ترکیب نظر خبرگان با استفاده از میانگین هندسی، وزن‌های نسبی شاخص‌ها و وزن مدل‌های مختلف بر اساس شاخص‌ها مطابق با جداول (۱۲) و (۱۳) به‌دست آمده است.

جدول ۱۲) وزن شاخص‌ها

شاخص‌ها	وزن	شاخص‌ها	وزن
پوشش حامل‌های مختلف انرژی	۰/۱۶	دسترسی به نرم‌افزار	۰/۲۰
مناسب برای کشورهای در حال توسعه	۰/۱۴	عدم نیاز به داده‌های زیاد	۰/۰۹
استفاده بیشتر در مطالعات موردی	۰/۰۸	روش‌شناسی، متدولوژی و ابزار ریاضی	۰/۰۹
ماژولار بودن	۰/۰۹	پوشش جغرافیایی	۰/۱۰
کاربرد آسان	۰/۰۵		

جدول۱۳) وزن مدل‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف

شاخص‌ها / مدل	پوشش حامل‌های مختلف انرژی	مناسب برای کشورهای در حال توسعه	استفاده بیشتر در مطالعات موردی	ماژولار بودن	کاربرد آسان	دسترسی به نرم‌افزار	عدم نیاز به داده‌های زیاد	روش‌شناسی، متدولوژی و ابزار ریاضی	پوشش جغرافیایی
MARKAL	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹
TIMES	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۱
EFOM	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۲	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۰۳
WASP	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۰۱
JASP	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹
MESSAGE	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۴
IDEAS	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۸
RETScreen	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۰۳	۰/۰۷
LEAP	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۴
ENPEP	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۶
MESAP	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹
NEMS	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۱
ENERGY 2020	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

ادغام وزن‌های نسبی

در این مرحله، ماتریس وزن شاخص‌ها برای هر مدل عرضه انرژی در بردار وزن شاخص‌ها ضرب و رتبه‌بندی مدل‌های عرضه انرژی مطابق با جدول (۱۴) انجام شده است.

جدول ١٤) رتبه‌بندی مدل‌های مختلف عرضه انرژی

مدل	امتیاز	رتبه	مدل	امتیاز	رتبه
MARKAL	۰/۰۷۳۵۹	۷	RETScreen	۰/۰۷۱۴	۸
EFOM	۰/۰۷۴۱	۴	LEAP	۰/۰۹۰۲	۲
TIMES	۰/۰۷۳۹	۵	ENPEP	۰/۰۶۰۰	۱۳
WASP	۰/۰۶۷۴	۱۰	MESAP	۰/۰۸۳۵	۳
JASP	۰/۰۶۲۵	۱۱	NEMS	۰/۰۶۱۵	۱۲
MESSAGE	۰/۱۳۸۷	۱	ENERGY 2020	۰/۰۷۳۶۱	۶

بررسی سازگاری قضاوت‌ها

در این مرحله، سازگاری ماتریس‌های مختلف تصمیم بررسی و مورد تأیید قرار گرفته است.

بدین ترتیب، مدل MESSAGE و سپس مدل LEAP به عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها برای تخصیص منابع انرژی ایران انتخاب شده‌اند.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق، ۱۳ مدل عرضه انرژی شناخته شده در جهان شامل MARKAL، TIMES، EFOM، WASP، JASP، MESSAGE، IDEAS، RETScreen، LEAP، NPEP، MESAP، NEMS و ENERGY2020 مورد بررسی قرار گرفتند. سپس با انتخاب شاخص‌های مناسب و دریافت نظر خبرگان، مدل‌های مختلف عرضه انرژی به روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مورد مقایسه قرار گرفتند. مناسب‌ترین مدل‌ها برای کشور، مدل MESSAGE و سپس مدل LEAP شناخته شدند.

پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، زیرشاخص‌های مربوط به هر شاخص به عنوان مثال زیرشاخص‌های مربوط به شاخص مناسب‌بودن برای کشورهای در حال توسعه نیز مورد توجه قرار گیرد. همچنین تحقیقات انجام‌شده در کشور در خصوص مدل‌سازی عرضه انرژی نیز مورد بررسی قرار گرفته و بهترین آنها معرفی گردند.

تقدیر و تشکر

این مقاله برگرفته از پروژه پژوهشی با عنوان "تجزیه و تحلیل مدل‌های اجرا شده برای تخصیص بهینه منابع عرضه انرژی در کشور" است که با همکاری دانشکده مدیریت دانشگاه تهران و موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی اجرا شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]

منابع

[۱] اسعدی، فریدون. (۱۳۸۶)، اهمیت و ضرورت بهینه‌سازی و کاهش شدت مصرف انرژی، مجلس و پژوهش، سال ۱۳، شماره ۵۴، ۲۵۳-۲۷۸.

[۲] شکوری گنجوی، حامد. کرمی، احسان. (۱۳۸۶)، شناسایی روش‌های کارآمد برنامه‌ریزی توسعه سیستم‌های قدرت (روش‌های پیش‌بینی بار، برنامه‌ریزی تولید و انتقال)، موسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی.

[۳] موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی. فایل پاورپوینت دوره آموزشیLEAP..

[۴] مهرگان ، محمدرضا، (۱۳۸۳)، پژوهش عملیاتی پیشرفته، نشر کتاب دانشگاهی، چاپ اول.

[5] Backus, G., Amlin, J., A History of Making Energy Policy.

[6] Guenter Conzelmann Center for Energy. 2001. “Environmental and Economic Systems Analysis (CEEESA) Decision and Information Sciences Division Argonne National Laboratory, Prepared for International Atomic Energy Agency (IAEA) Greenhouse Gas Mitigation Analysis Using ENPEP”, Vienna, Austria.

[7] IAEA. 2006. “Wien Automatic System Planning (WASP) Package: A Computer Code for Power Generating System Expansion planning”, VIENNA.

[8] Intarapravich, D. 1999. “Development of Analytic Methodologies to Incorporate Renewable Energy in Domestic Energy and Economic Planning”, Technology Development Partners.

[9] J. Seebregts. J, Goldstein, G. and Smekens, K. “Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models”, Energy Research Centre of the Netherlands and International Resources Group Ltd.

[10] Loulou, R. Goldstein G. and Noble, K. 2004. “Documentation for the MARKAL Family of Models”, IEA ETSAP.

[11] Loulou, R. Remne, U. Kanudia, A. Lehtila, A. and Goldstein G. 2005, “Documentation for the TIMES Model, Part I”, IEA ETSAP.

[12] “Manual MESSAGE”.

[13] Minister of Natural Resources. 2001-2005. “Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering and Cases Textbox, Introduction to Clean Energy Project Analysis”, Canada

[14] Remme, U. Goldstein, G.A. Schellmann, U. and Schlenzig, C. “MESAP/TIMES - Advanced Decision Support for Energy and Environmental Planning”.

[15] Rostamihozori, N. 2002. “Development of Energy and Emission Control Strategies for Iran”, Universität Fridericiana zu Karlsruhe.

[16] Schrattenholzer, L. 1981. “The Energy Supply Model MESSAGE, International Institute for Applied Systems Analysis”, Laxenburg.

[17] Staff Report to the Air Resources Board. 2010. “Updated Economic Analysis of California’s Climate Change Scoping Plan”.

[18] Systematic Solutions, Inc. and Policy Assessment Corp. “ENERGY2020 Documentation”, volume 1.

[19] The AES Corporation, Prepared For The U.S. Department Of Energy Office Of Policy, Planning, And Evaluation. 1993. “An Overview of the IDEAS Model: A Dynamic Long-Term Policy Simulation Model of U.S. Energy Supply and Demand”.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-02-25]