

ارائه مدل مدیریت تأمین انرژی در ایران براساس معیارهای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی

محمدسعید خانی^۱، دکتر اسماعیل فلاحی^۲ و دکتر مهدی بانیشی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۵/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۳

چکیده

دستیابی به مدل بهینه و تعریف نقشه جامع تأمین انرژی در شرایط امروز کشور به یک ضرورت تبدیل شده است. پژوهش حاضر با رویکردی کل‌نگر و ترسیم وضعیت مطلوب در ابعاد مختلف پایداری مشتمل بر جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، مدل بهینه‌ای را به منظور دستیابی به منابع انرژی کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست تحت سناریوهای مختلف زمانی ۱۰۰ تا ۵۰۰ ساله با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک ارائه نمود. نتایج ضمن مشخص نمودن ترکیب مناسب انرژی در هر دوره‌ی زمانی، حاکی از سهم بیش‌تر سوخت‌های فسیلی جهت تأمین انرژی در دوره‌های زمانی کوتاه و تأثیر نسبی بیش‌تر شاخص مالی نسبت به زیست‌محیطی بوده در حالی که این روند به سرعت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر در حال تغییر بوده به گونه‌ای که سهم ۶۳ درصدی سوخت‌های فسیلی در دوره‌ی ۱۰۰ ساله به سهم ۶۲ درصدی انرژی‌های تجدیدپذیر در افق ۵۰۰ ساله تغییر یافته است. همچنین، برآورد میزان برداشت هریک از منابع انرژی از کل ظرفیت منبع در طی یک سال نشان داد با افزایش طول دوره در سناریوهای مختلف، میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست تقریباً نزدیک به ظرفیت کامل بهره‌برداری از این منابع مورد توصیه بوده است.

واژگان کلیدی: مدیریت بهینه‌ی منابع انرژی، معیارهای اقتصادی، محیط زیست، الگوریتم ژنتیک.

طبقه‌بندی JEL: C61، P18، Q42، Q47

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی دانشگاه شیراز

Email: saeed.khani70@gmail.com

۲ عضو هیئت علمی بخش اقتصاد کشاورزی دانشگاه شیراز (نویسنده مسئول)

Email: esmaeilfallahi@yahoo.com

۳ عضو هیئت علمی دانشکده مکانیک دانشگاه شیراز

Email: mbaneshi@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

انرژی برای سال‌های متمادی، توجه بسیاری از برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران را به خود معطوف نموده است، به طوری که توسعه و پیشرفت بسیاری از جوامع حاضر به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، به میزان قابل توجهی متأثر از آن خواهد بود. از طرف دیگر، انرژی در مراحل مختلف استخراج، تولید و مصرف و نیز ضمن انجام تمام فعالیت‌های اقتصادی، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر محیط‌زیست اثر گذاشته و می‌تواند به آن آسیب رساند (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳).

براساس آمارهای موجود، میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در جهان که شامل نفت، گاز و زغال‌سنگ است، در سال ۲۰۱۳ به میزان ۸۱/۴ درصد از کل مصرف انرژی رسیده و بقیه‌ی انرژی از منابع هسته‌ای، برق‌آبی و تجدیدپذیر تأمین می‌شود. براساس تحقیقات انجام‌شده، میزان سهم سوخت‌های فسیلی تا سال ۲۰۳۵ به میزان تقریبی ۸۱ درصد از کل مصرف جهان می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و استفاده از منابع با آلودگی کم‌تر است (شرکت بریتیش پترولیوم^۱، ۲۰۱۶). در بین سوخت‌های فسیلی، گاز طبیعی رشد سریع‌تری دارد که به‌عنوان یک جایگزین پاک برای منابعی با آلاینده‌ی زیاد نظیر زغال‌سنگ محسوب می‌شود. ایران با دارا بودن ۱۰ درصد از منابع کشف‌شده‌ی نفت و همچنین ۱۵ درصد از کل منابع گاز جهان، از کشورهای با منابع غنی نفت و گاز محسوب می‌شود. در سال ۲۰۱۳ سهم مصرف داخلی انرژی ایران از گاز معادل ۵۶/۹ درصد و از نفت ۴۱/۲ درصد بوده و بقیه از دیگر منابع انرژی تأمین شده است (آژانس بین‌المللی انرژی^۲، ۲۰۱۶). با توجه به این که سهم عمده مصرف کشور ایران از منابع تجدیدناپذیر و تمام‌شدنی بوده و از طرفی آلودگی این منابع می‌تواند خسارات قابل توجهی به محیط‌زیست وارد آورد، ضرورت یک برنامه‌ریزی بلندمدت برای دستیابی به مدل بهینه‌ای برای مصرف انرژی در کشور که ملاحظات مختلف را مورد توجه قرار دهد، وجود خواهد داشت.

1. BP Company

2. International Energy Agency

دسترسی به مدل بهینه‌ی تولید انرژی و همچنین تعریف نقشه جامع تولید انرژی همواره یکی از مسائل بحث‌برانگیز میان برنامه‌ریزان حوزه‌ی انرژی بوده است. این که هر کشوری از کدام منابع انرژی و به چه میزان استفاده کند تا بیش‌ترین بازده ممکن را داشته باشد از نکات قابل توجه بوده است. کشور ایران با داشتن منابع سرشار نفت و گاز قابلیت دسترسی به انرژی ارزان را دارد، اما مشکلات زیست‌محیطی که مصرف این منابع برای کشور ایجاد می‌کند بسیار زیاد است. بدین معنا که هزینه‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی استفاده از این منابع محیط‌زیست کشور را نه تنها در حال حاضر بلکه تا نسل‌های بعد تهدید می‌کند (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳). اهمیت این موضوع گسترده‌ی جهانی داشته به گونه‌ای که مسائلی مانند گرم شدن زمین به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی، حیات بشر را بر روی کره‌ی زمین تهدید می‌کند. به همین منظور به نظر می‌رسد که برای رسیدن به منبع انرژی پایدار نه تنها به ماهیت منبع بلکه به تأثیرات زیست‌محیطی نیز باید توجه شود.

با توجه به نقش تعیین‌کننده‌ی انرژی در فرآیند توسعه‌ی اقتصادی، تاکنون مطالعاتی در حوزه‌ی مدیریت منابع انرژی صورت پذیرفته است. میدی و همکاران (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تقاضای انرژی با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات پرداخته و با بهره‌گیری از شاخص اقتصادی- اجتماعی به پیش‌بینی تقاضای انرژی تا سال ۱۳۹۶ پرداخته‌اند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد الگوی ترکیبی شبکه‌ی عصبی و الگوریتم ژنتیک نسبت به سایر مدل‌ها دارای بیش‌ترین دقت در محاسبه‌ی تقاضای انرژی کشور است. ترکیب دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک در پژوهشی دیگر که توسط میرفخرالدینی و همکاران (۱۳۹۲) به منظور پیش‌بینی مصرف انرژی صورت پذیرفت نیز مورد استفاده واقع شده است. در این بررسی، از داده‌های سالیانه جمعیت کل کشور، تولید ناخالص داخلی، واردات و صادرات به عنوان متغیرهای ورودی مصرف انرژی کشور به عنوان متغیر خروجی مدل‌های پیش‌بینی استفاده شده است. چنگی آشتیانی و جلولی (۱۳۹۱) با استفاده از داده‌های سری زمانی و تکنیک‌های همجمعی در اقتصاد

سنجی، به خصوص مدل‌های پویای خود توضیح با وقفه‌های توزیعی (ARDL) و ساز و کار تصحیح خطا (ECM)، روابط بلندمدت و کوتاه‌مدت مدل تقاضای انرژی الکتریکی کل کشور را برآورده کردند. براساس نتایج بدست آمده، بی‌کشش بودن تقاضای برق نسبت به قیمت در این مطالعه تأیید گردید. برزین پور و کریمی (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای، ضمن تحلیل عوامل موثر بر تقاضای برق خانگی، با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، مدلی با هدف شناخت الگوی مصرف برق خانگی ایجاد و با تعریف پنج سناریوی مختلف قیمتی، میزان مصرف را تا سال آخر اجرای هدفمندی یارانه‌ها پیش‌بینی کردند. گریمود و روگ^۱ (۲۰۰۳) منابع طبیعی تجدیدناپذیر را در یک مدل رشد درون‌زا وارد نموده و در نهایت مقادیر بهینه‌ی این منابع را جهت اجرای سیاست‌های پولی و مالی محاسبه نمودند. اوزترک^۲ و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از پارامترهای سرانه‌ی مصرف، سرانه‌ی مصرف برق و GDP به بررسی رابطه‌ی علی- معلولی بین انرژی و رشد اقتصادی در کشورهای آلبانی، بلغارستان، مجارستان و رومانی پرداخته‌اند. محدوده‌ی زمانی مطالعه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۶ بوده است. تکزساری^۳ (۲۰۰۷) با استفاده از مدل کلونی مورچه‌ها و با بهره‌گیری از متغیرها تولید ناخالص داخلی، جمعیت، صادرات و واردات به برآورد تقاضای انرژی تا سال ۲۰۲۵ برای کشور ترکیه پرداخته است. آنلر^۴ (۲۰۰۸) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات با در نظر گرفتن متغیرهای تولید ناخالص داخلی، جمعیت، صادرات و واردات به ارائه‌ی توابع خطی و درجه‌ی دوم تقاضای انرژی در ترکیه به تخمین تقاضای انرژی تا سال ۲۰۲۵ پرداخته است. جیم و روپر^۵ (۲۰۰۹) با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیون خطی و نمایی و با استفاده از متغیرهای، جمعیت، تولید ناخالص داخلی، واردات و صادرات تحت چهار سناریو تقاضای انرژی کره‌ی جنوبی را تا سال ۲۰۲۵ تخمین زده‌اند. در مدل رگرسیون خطی و نمایی میزان تقاضا به طور دائم رشد می‌کند ولی در پیش‌بینی ارائه شده توسط شبکه‌ی عصبی مصنوعی یک نقطه، اوج

1-Grimaud and Rougé

2-Ozturk

3- Toksari

4- Ünler

5-Geem and Roper

تقاضا است و بعد از آن میزان تقاضا کاهش می‌یابد که این با دو مدل قبلی متفاوت است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که شبکه‌ی عصبی مصنوعی میزان تقاضا را بهتر از یک مدل رگرسیون خطی و یا یک مدل نمایی پیش‌بینی می‌کند. اکونومو^۱ (۲۰۱۰) با بهره‌گیری از یک مدل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و با استفاده از متغیرهای دمای سالیانه‌ی محیط، ظرفیت برق نصب شده، مصرف سالیانه‌ی برق مسکونی و تولید ناخالص داخلی مصرف انرژی بلندمدت کشور یونان را پیش‌بینی کرده است. این پژوهش نشان می‌دهد مدل ارائه شده با دقت نسبتاً خوبی میزان مصرف انرژی را پیش‌بینی می‌کند و به همین دلیل یک ابزار مناسب جهت اجرای سیاست‌های انرژی است. تورینی^۲ و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از منطق فازی و با استفاده از پارامترهای جمعیت و تولید ناخالصی به پیش‌بینی تقاضای بلندمدت برق سالانه برزیل تا سال ۲۰۵۰ پرداخته‌اند. اوه^۳ و همکاران (۲۰۱۶) در یک پژوهش به پیش‌بینی بلندمدت مصرف برق برای سرمایه‌ی خانگی با در نظر گرفتن یک سناریو محافظه‌کارانه پرداخته است. این مدل‌سازی با استفاده از رویکرد از پائین به بالا^۴ براساس رگرسیون خطی برای پیش‌بینی تقاضای برق سرمایه‌ی خانگی و غیرخانگی در دوره ۲۰۱۴-۲۰۳۰ انجام شده است. در این پژوهش، تولید ناخالص ملی، جمعیت، واردات و صادرات در مدل لحاظ شده است. مالا و تیمیلسینا^۵ (۲۰۱۶) با استفاده از یک مدل به پیش‌بینی تقاضای بخش‌های مختلف انرژی کشور رومانی از سال ۲۰۱۵-۲۰۵۰ پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در سال ۲۰۵۰ تقاضای انرژی ۳۴ درصد نسبت به سال ۲۰۱۳ افزایش داشته است. در این بین، برخی مطالعات نظیر کانپورت^۶ و اوزترک (۲۰۰۶) و سیلان^۷ و اوزتورک (۲۰۰۴) بر استفاده از روش بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک تأکید داشته‌اند. مطالعه‌ی اخیر، تقاضای انرژی ترکیه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و براساس شاخص‌های اقتصادی تخمین زده و مصرف انرژی این کشور را تحت سناریوهای مختلف تا سال

5-Ekonomou

6-Torrini

7-Oh

8-Bottom-up

9- Malla and Timilsina

6- Canyon

7- Ceylan

۲۰۲۵ پیش‌بینی کرده است. این مطالعه ثابت کرد که پیش‌بینی تقاضا با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهتر از مدل ارائه‌شده توسط دولت است.

با توجه به آنچه گفته شد، دسترسی به منابع انرژی پایدار اقتصادی و منطبق با محیط‌زیست، در شرایط امروز کشور در حوزه‌ی مدیریت انرژی ضروری به نظر می‌رسد. نظر به این که تاکنون در مطالعات معدودی به مقوله‌ی مدیریت انرژی در کشور با رویکردی کل‌نگر و ترسیم وضعیت مطلوب در ابعاد مختلف پایداری پرداخته شده است، لذا در پژوهش حاضر تلاش شده است به منظور دستیابی به منابع انرژی ارزان، پایدار و سازگار با محیط‌زیست، مدلی را با تعریف شاخص‌های مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، تحت سناریوی‌های مختلف زمانی ارائه و از این رهگذر، راهبردهایی جهت تصمیم‌گیری بهتر توسط برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران حوزه‌ی انرژی فراهم شود. بدین منظور در نوشتار حاضر، پس از مقدمه، در بخش مواد و روشها ضمن معرفی اجزای الگو و اطلاعات لازم، نحوه‌ی مدل‌سازی در چارچوب الگوریتم ژنتیک تشریح گردد. سپس نتایج حاصل از الگوی پیشنهادی ارائه و مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، نتیجه‌گیری کلی حاصل از مطالعه و پیشنهادها، پژوهش بر مبنای نتایج به دست آمده، ارائه شده است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مبانی نظری الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در واقع شناخته‌شده‌ترین نوع از الگوریتم‌های تکاملی است که طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ توسط جان هلند و همکارانش ابداع و گسترش یافت (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱). الگوریتم ژنتیک در مسائل مختلف از جمله بهینه‌یابی، طراحی، شبکه‌ی عصبی و غیره کاربرد دارد. الگوریتم ژنتیک جستجو را با جمعیتی از راه‌حل‌های اولیه‌ی تصادفی آغاز کرده و چنانچه معیارهای توقف برآورده نشود. سه عملگر تکثیر، جهش و تقاطع به کار گرفته می‌شود تا جمعیت به‌روز شود. هر تکرار از این سه عملگر به‌عنوان یک نسل شناخته می‌شود (صادقی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲-۱-۱- جزئیات اجرای الگوریتم ژنتیک

۲-۱-۱-۱- نمایش رشته‌ها

نمایش مناسب رشته‌ها به ویژگی‌های فضای جستجو بستگی دارد، ولی معمولاً به صورت رشته‌های دودویی نشان داده می‌شوند. رشته‌های مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک را می‌توان به صورت گسسته یا پیوسته کد کرد (میرفخرالدینی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲-۱-۱-۲- محاسبه‌ی برازندگی

تابع برازندگی از اعمال تبدیل مناسب روی تابع هدف که قرار است بهینه شود، به دست می‌آید. این تابع هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آن را مشخص نماید. هرچه کیفیت رشته جواب بالاتر باشد، مقدار برازندگی جواب بیشتر و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی افزایش پیدا می‌کند (گلدبرگ^۱، ۱۹۸۹).

۲-۱-۱-۳- اندازه جمعیت

گلدبرگ^۱ (۱۹۸۹) برای محاسبه‌ی بهترین اندازه‌ی جمعیت برای کدهای دودویی تغییرهای پیوسته با طول حداکثر، شصت رشته پیشنهاد می‌کند.

۲-۱-۲- عملگرهای الگوریتم ژنتیک

۲-۱-۲-۱- انتخاب

پس از این که برازندگی تمام افراد یک نسل مشخص شد، طبق اصول طبیعی، فرزندان که از زوج‌های برازنده‌تر به وجود می‌آیند، برازندگی بیشتری دارند؛ الگوریتم ژنتیک این فرآیند را شبیه‌سازی می‌کند و به افراد برازنده‌تر شانس تولیدمثل بیشتری می‌دهد. ساده‌ترین روش انتخاب، استفاده از گردونه‌ی شانس است. در این روش، چرخه‌ی با قطاع‌های نامساوی

طوری در نظر گرفته می شود که هر فرد قطاعی با زاویه ی مرکزی $\frac{2 f_1}{f_i}$ داشته باشد. حال عدد تصادفی در این قطاع ها قرار می گیرد. رشته ای انتخاب می شود که عدد تصادفی آن در قطاع بزرگ تر قرار دارد (گلدبرگ، ۱۹۸۹).

۲-۱-۲-۲- پیوند

پیوند مهم ترین عملگر الگوریتم ژنتیک و کلید موفقیت آن است. عملگر انتخابی برای کشف نواحی جدید فضای جستجو ابزاری ندارد و اگر تنها به نسخه برداری ساختارهای قدیمی بدون تغییر آن اکتفا شود، نمی توان به بررسی موارد جدید پرداخت. پیوند عملگری است که اطلاعات بین رشته ها را به طور اتفاقی مبادله می کند (میرفخرالدینی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲-۱-۲-۳- جهش

سومین عملگر مهم در الگوریتم ژنتیک جهش نام دارد. اگرچه عملگرهای انتخاب و پیوند، جستجوی مؤثری در فضای طراحی می کنند، گاهی باعث می شوند از بین خصوصیات رشته ها بروند. عملگر جهش امکان دستیابی مجدد به این ویژگی مثبتی را که در جمعیت نیست فراهم می کند. رفتار عملگر جهش به صورت ساده، به این نحو است که برای هر فرد در مجموعه احتمال وقوع جهش که معمولاً کم تر از دو درصد است بررسی شده، چنانچه باید جهش انجام شود نقطه ای در کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب می شود و مقدار آن از صفر به یک تغییر می کند (میرفخرالدینی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲-۱-۲-۴- همگرایی

مسئله ی بهینه سازی کلی در حالت عمومی خود حل نشدنی است، بنابراین در زمان محدود نمی توان انتظار داشت به بهینه ی کلی تابع دست پیدا کرد، با این حال معمولاً علاقه داریم که

به‌عنوان عاملی اطمینان‌بخش الگوریتم بهینه‌سازی ما با احتمال یک به بهینه‌ی کلی تابع همگرا شود (میرفخرالدینی و همکاران، ۱۳۹۲).

۲-۲- نحوه‌ی مدل‌سازی

به‌منظور مدل‌سازی لازم است پس از مشخص نمودن منابع مختلف انرژی و گردآوری اطلاعات مربوطه، مدل بهینه با تعیین اهداف و محدودیت‌های الگو با در نظر گرفتن شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی تشکیل شود. مراحل موردنظر در ادامه، ارائه‌شده است.

۲-۲-۱- تعیین منابع انرژی و جمع‌آوری اطلاعات

۲-۲-۱-۱- نفت

میدان‌های نفتی ایران مشتمل بر مخازن و حوضه‌های نفتی واقع در پهنه‌ی جغرافیای ایران می‌باشند. از آن‌جا که ایران دارای میادین مشترکی با کشورهای عراق، کویت، عربستان، قطر، امارات و عمان هست، لذا عمده فعالیت‌های اجرایی خود را بر روی این میادین و توسعه‌ی آن‌ها متمرکز نموده است. مجموع ذخایر قابل استحصال نفت خام و میعانات گاز کشور در پایان سال ۱۳۹۱، ۱۵۶/۹۱ میلیارد بشکه بوده است.

ایران با این میزان ذخیره‌ی نفت خام و میعانات گازی متعارف، پس از ونزوئلا، عربستان سعودی و کانادا در رتبه‌ی چهارم جهان قرار گرفته و بالغ بر ۹ درصد ذخایر نفت جهان را دارا است. بایستی خاطر نشان کرد که ایران در سال‌های گذشته در مقام دوم قرار داشته که با کشف ذخایر نفتی جدید و لحاظ نمودن ذخایر غیرمتعارف در کشورهای ونزوئلا و کانادا به مقام چهارم تنزل یافته است (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۱-۲- گاز طبیعی

میزان کل ذخایر قابل استحصال گاز طبیعی به ۳۳/۸ تریلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۱ رسید. ایران با این میزان ذخیره‌ی گاز طبیعی در رتبه‌ی اول جهان قرار دارد. لازم به ذکر است که

براساس آخرین آمار منتشر شده از سوی شرکت بریتیش پترولیوم، برآورد ذخایر گاز طبیعی جهان مورد تجدیدنظر قرار گرفته است. این تجدیدنظر عمدتاً برآورد ذخایر گاز طبیعی روسیه و سایر کشورهای استقلال یافته‌ی اتحاد جماهیر شوروی سابق و همچنین سایر کشورهایی را که اطلاعات دقیقی از میزان ذخایر گاز آنها در دسترس نبوده تحت تأثیر قرار داده است. با این بازنگری ذخایر گاز طبیعی کشور روسیه که برای سالین متمادی بزرگ‌ترین دارنده‌ی ذخایر گاز جهان بود، به رتبه‌ی دوم پس از ایران تنزل یافت (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۱-۳- زغال سنگ

در سال ۱۳۹۱ از مجموع ۱۸۴ معدن زغال سنگ کشور، ۱۱۱ معدن فعال، ۶۲ معدن غیرفعال و ۱۱ معدن در حال تجهیز بوده است. در این سال، به ترتیب ۲ معدن به معادن فعال و ۴ معدن به معادن در حال تجهیز کشور نسبت به سال قبل افزوده شده است. بررسی تعداد معادن زغال سنگ برحسب مالکیت نشان می‌دهد که در پی اتخاذ سیاست‌های خصوصی‌سازی در کشور، ۳ معدن زغال سنگ جدید نیز تحت مالکیت بخش خصوصی درآمدند.

با توجه به توضیحات بالا، ذخایر زمین‌شناسی (احتمالی) زغال سنگ ایران در مجموع حدود ۱۱ تا ۱۴ میلیارد تن برآورد شده است (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۱-۴- انرژی باد

جمهوری اسلامی ایران در بخش غربی فلات و در جنوب غرب آسیا واقع شده است. ایران با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع بین طول جغرافیایی شرقی ۴۴ تا ۶۳/۹۹ درجه و عرض شمالی ۲۵ تا ۳۹/۹۹ درجه قرار گرفته و بیش از نیمی از مساحت آن نواحی کوهستانی پوشانده است.

این کشور با تنوع آب‌وهوایی زیادی روبه‌رو است. نواحی شمالی ایران دارای آب‌وهوای معتدل و بارندگی فراوان به‌ویژه در نواحی غربی استان گیلان است. آب‌وهوای

نواحی غربی ایران در فصول سرد، سرد و مرطوب و در فصول گرم، خشک و معتدل است. در نواحی جنوبی، دمای هوا و رطوبت بیش‌تر است، تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های معتدل از مشخصات آب‌وهوایی این ناحیه است و تغییرات روزانه‌ی دما کم‌تر محسوس است. نواحی شرقی و جنوب شرقی دارای آب‌وهوای بیابانی با تغییرات زیاد دما در طول روز است. برای این‌که بتوان از منابع باد موجود جهت تولید برق استفاده نمود، وجود اطلاعات باد قابل‌اعتماد در خصوص پتانسیل باد منطقه موردنظر جهت احداث نیروگاه بادی ضروری است.

در ایران با توجه به وجود مناطق بادخیز، بستر مناسبی جهت گسترش بهره‌برداری از توربین‌های بادی فراهم است. یکی از مهم‌ترین پروژه‌های انجام‌شده در زمینه‌ی انرژی بادی، تهیه‌ی اطلس بادی کشور بوده است که پروژه مذکور در سازمان انرژی‌های نو ایران صورت گرفته و به‌عنوان یکی از پروژه‌های ملی در صنعت انرژی باد محسوب می‌گردد. در انجام پروژه پتانسیل سنجی بادی در ایران شرکت لامایر^۱ آلمان نیز به‌عنوان مشاور همکاری داشته است و براساس مطالعات شرکت مذکور پتانسیل بادی قابل‌استحصال در کشور در حدود ۱۰۰ هزار مگاوات برآورد گردیده است (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۱-۵- انرژی خورشیدی

انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و از مهم‌ترین آن‌ها است. میزان تابش انرژی خورشیدی در نقاط مختلف جهان متغیر بوده و در کمربند خورشیدی زمین بیش‌ترین مقدار را دارا است. کشور ایران نیز در نواحی پرتابش واقع است و مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از تجهیزات خورشیدی در ایران مناسب بوده و می‌تواند بخشی از انرژی موردنیاز کشور را تأمین نماید.

ایران کشوری است که به گفته‌ی متخصصان این فن باوجود ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دوسوم آن و متوسط تابش ۵/۵-۴/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز یکی از

کشورهای با پتانسیل بالا درزمینهی انرژی خورشیدی معرفی شده است. برخی از کارشناسان انرژی خورشیدی گام را فراتر نهاده و در حالتی آرمانی ادعا می کنند که ایران در صورت تجهیز مساحت بیابانی خود به سامانه های دریافت انرژی تابشی می تواند انرژی مورد نیاز بخش های گسترده ای از منطقه را نیز تأمین و درزمینهی صدور انرژی برق فعال شود. با مطالعات انجام شده توسط سازمان هوافضای آلمان، کشور ایران پتانسیل ۲۰۰۰۰ تراوات ساعت در یک سال (TW.h/Year) نیروگاه حرارتی خورشید و ۱۶ تراوات ساعت در یک سال (TW.h/Year) نیروگاه سلول خورشیدی (PV) را دارد (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۱-۶- انرژی زمین گرمایی

موقعیت قرارگیری ایران در مرزهای تکتونیکی، نیروی عظیم نهفته در کالبد کشور را نشان می دهد. فشار صفحهی قاره ای عربستان و صفحهی اقیانوس هند از سوی دیگر باعث تغییر شکل های وسیعی در ایران شده است، که چین خوردگی های منطقه ی زاگرس و راندگی آن، شواهد سطحی عظیم این نیروها هستند. قرار گرفتن ایران در کمربند آتش فشانی باعث شده است که گستره ی ایران از لحاظ زمین ساختاری، بسیار فعال بوده و از پتانسیل بالای انرژی زمین گرمایی بهره مند باشد، وجود فعالیت های آتش فشانی و چشمه های آبگرم فراوان، گواه بر این مدعی است.

پتانسیل انرژی زمین گرمایی در ایران بر اساس مطالعات انجام شده توسط سازمان هوافضای آلمان در حدود ۱۱/۳ تراوات ساعت در یک سال (TW.h/Year) است (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۱-۷- انرژی زیست توده

منابع زیست توده به پنج منبع مختلف و عمده شامل زباله ها، فاضلاب های صنعتی، زائدات جنگلی، کشاورزی و دامپتفکی کمی شود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط سازمان هوافضای

آلمان پتانسیل انرژی زیست‌توده در حدود ۲۳/۷ تراوات‌ساعت در یک سال (TW.h/Year) تخمین زده می‌شود (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۱-۸- انرژی برق آبی

نیروگاه‌های برق آبی نقش مؤثری در پایداری شبکه‌ی برق و به‌ویژه تأمین برق موردنیاز شبکه‌ی سراسری در ساعات اوج مصرف دارند. پتانسیل قابل استحصال از انرژی برق آبی در حدود ۸۰ تراوات‌ساعت در یک سال (TW.h/Year) در این میان رودخانه‌های کارون، دز و کرخه به ترتیب با دارا بودن پتانسیل تولید ۳۰، ۹ و ۶ تراوات‌ساعت در سال بیش‌ترین پتانسیل برق آبی در کشور را دارا هستند (معاونت امور برق و انرژی، ۱۳۹۱).

۲-۲-۲- ارائه‌ی مدل بهینه‌ی الگوی تولید انرژی

براساس موارد یاد شده، برنامه‌ریزی در حوزه‌ی مدیریت منابع انرژی در فرآیند توسعه پایدار، مستلزم در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در کنار معیارهای فنی و اقتصادی است. درواقع، پرسش اساسی آن است که چگونه می‌توان به منابعی از انرژی که ارزان، پایدار و سازگار با محیط‌زیست باشد، دست یافت. مدل پیش رو تلاشی برای پاسخ به این پرسش اساسی است، تا از این رهگذر، راهکارهایی جهت مدیریت منابع انرژی در اختیار تصمیم‌گیران حوزه‌ی انرژی کشور قرار گیرد.

مدل تدوین شده با لحاظ سه معیار فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی برای هر یک از منابع انرژی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر در یک مدل برنامه‌ریزی خطی و سپس بهینه‌سازی از طریق الگوریتم ژنتیک، امکان دستیابی به الگوی بهینه‌ی مصرف انرژی را فراهم می‌کند. در ادامه، شاخص‌های موردنظر الگو تعریف و سپس به تشکیل الگوی تجربی مورد استفاده در این پژوهش مبادرت شده است.

۲-۲-۲-۱- تعریف شاخص‌های سه‌گانه مدل

۲-۲-۲-۱-۱- شاخص فنی

برای تعریف شاخص فنی، بایستی مراحل طی شود. در ابتدا، حداکثر پتانسیل قابل استحصال در خصوص هر یک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول مدت یک سال در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- حداکثر پتانسیل قابل استحصال هریک از منابع انرژی تجدیدپذیر در طول یک سال

منبع انرژی	ژول در یک سال
فوتولتائیک	$5/7 \times 10^{16}$
خورشیدی	$7/2 \times 10^{19}$
بادی	$2/88 \times 10^{17}$
آبی	$1/8 \times 10^{17}$
زیست توده	$8/53 \times 10^{16}$
زمین گرمایی	$4/07 \times 10^{16}$

مأخذ: <http://www.dlr.de>

اما شرایط برای منابع فسیلی با انرژی‌های تجدید پذیر متفاوت است. منابع فسیلی محدود بوده و با مصرف بیش تر، از حجم این منابع کاسته می شود. با این وجود می توان این منابع را نیز تحت شرایطی پایدار فرض کرد. با این فرض که اگر استفاده از منابع فسیلی محدود شود، می توان مدت زمان استفاده از این منابع را افزایش داد. البته این مفهوم بستگی به تعریف ما از پایداری دارد. برخی بر این باورند که پایداری مفهومی پانصدساله دارد. به این معنی که اگر پانصد سال در دسترس باشد پایدار است (معاونت پژوهش های زیربنایی، ۱۳۹۳). این بحث با مفهوم میزان مصرف ارتباط دارد. بدین معنی که اگر ذخایر یک منبع تجدیدناپذیر را به ۵۰۰ واحد تقسیم کنیم و عدد حاصل را میزان بیشینه ی مصرف انرژی در یک سال نامیده و در هر سال، حداکثر، از این میزان استفاده کنیم، می توان مطمئن بود که این منبع پایدار خواهد ماند. البته به دلیل این که تعریف درستی از پایداری در دسترس نیست، در این پژوهش میزان بیشینه ی مصرف برای سناریوهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ساله

محاسبه و سپس شاخص فنی پایداری به دست آمده. میزان بیشینه‌ی مصرف برای یک دوره‌ی زمانی معین از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳).

پتانسیل انرژی

$$(۱) \quad \text{میزان بیشینه‌ی مصرف برای دوره‌ی زمانی}$$

تا این جا بیش‌ترین دوره‌ی زمانی

فنی ارائه نشده است. برای فراهم نمودن امکان مقایسه‌ی منابع مختلف، بایستی به یک شاخص بدون ابعاد دست یافت. به منظور دست‌یابی به این شاخص باید حداکثر انرژی قابل برداشت از یک منبع انرژی به کل انرژی موردنیاز برای یک سال آن کشور تقسیم شود. شاخص موردنظر برای یک دوره‌ی زمانی مشخص از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳).

میزان بیشینه‌ی مصرف

$$(۲) \quad \text{شاخص فنی} = \frac{\text{میزان بیشینه‌ی مصرف}}{\text{کل تقاضای انرژی}}$$

کل تقاضای انرژی

۲-۲-۱-۲-۲-۲ شاخص اقتصادی

برای تشکیل شاخص اقتصادی، ابتدا باید هزینه‌ی تولید در میزان انرژی سالیانه‌ی موردنیاز کشور ضرب شود. عدد به دست آمده بیانگر میزان سرمایه‌ی مورد نیاز برای تأمین همه‌ی نیاز انرژی از یک منبع خاص است. این عدد بیشینه‌ی سرمایه‌ی مورد نیاز نام دارد که برحسب دلار است (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳). برای به دست آوردن یک شاخص بدون ابعاد باید این عدد بیشینه‌ی سرمایه‌ی موردنیاز به GDP (تولید ناخالص داخلی) سالیانه‌ی کشور تقسیم شود که نهایتاً شاخص اقتصادی پس از انجام محاسبات لازم، در جدول ۴ در بخش نتایج و بحث ارائه شده است.

۲-۲-۱-۲-۲-۳ شاخص زیست‌محیطی

ب) با توجه به اینکه میزان جمعیت رو به افزایش است، میزان تقاضای انرژی افزایش یافته، اما از طرفی پیشرفت تکنولوژی باعث بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش تقاضا برای انرژی می‌شود. به همین منظور، با توجه به برآیند این دو عامل، میزان تقاضا برای انرژی در طول مدت محاسبات در نظر گرفته شده در مدل پیشنهادی ثابت در نظر گرفته شده است.

بدین معنی که مصرف بشر در طی سال‌های آینده کاهش یا افزایش نخواهد داشت. ج) فرض شده تاثیر پیشرفت تکنولوژی بر روی آلاینده‌گی منبع انرژی در طول مدت در نظر گرفته برای مدل ثابت خواهد بود. این فرض با توجه به اینکه عدد آلاینده‌گی سوخت‌های فسیلی اختلاف زیادی با انرژی‌های تجدیدپذیر داشته و بهبود تکنولوژی تأثیر چندانی بر این اختلاف آلاینده‌گی ندارد، قابل توجیه است.

د) با توجه به اینکه هدف، تمرکز بر شرایط فعلی بازار منابع انرژی در تحلیل بوده است، قیمت منابع انرژی ثابت در نظر گرفته شده است. (معاونت پژوهش‌های زیربنایی، ۱۳۹۳).

۲-۲-۲-۲-۲-۲ مدل‌سازی

برای دستیابی به یک مدل بهینه باید ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی خلق شود. مدل‌سازی به این معنی است که مسئله را با متغیرها و روابط ریاضی توصیف شود، به طوری که مسئله‌ی بهینه‌سازی شبیه‌سازی شود. با مشخص بودن چهار مؤلفه می‌توان مسائل بهینه‌سازی را به صورت زیر بیان نمود:

$$\min f(x_1, \dots, x_n)$$

هدف تابع

(۳)

$$\begin{aligned}
 & g_1(x_1, \dots, x_n) = 0, \\
 & \vdots \\
 & g_m(x_1, \dots, x_n) = 0, \\
 \\
 \text{subject to } & h_1(x_1, \dots, x_n) = 0, \\
 & \vdots \\
 & h_k(x_1, \dots, x_n) = 0, \\
 \\
 & x_1 \in D_1, \dots, x_n \in D_n
 \end{aligned}$$

نامساوی قیود

قیود تساوی

دامنه‌های قیود

در برنامه‌ریزی خطی در این مدل، ۱۰ منبع انرژی شامل نفت، گاز، زغال‌سنگ، هسته‌ای، سلول خورشیدی، حرارتی خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی در نظر گرفته شد. در نتیجه ۱۰ متغیر هم وجود دارد. در این سیستم بهینه‌سازی، اهداف عمده‌ی پایداری شامل حداقل نمودن میزان هزینه‌ی تولید برق و میزان انتشار گاز گلخانه‌ای مدنظر است. در عین حال، باید توجه داشت که باید میزان تقاضا از انرژی تأمین شده و میزان برداشت از منابع نمی‌تواند از بیشینه‌ی مصرف هر منبع در سال بیش‌تر باشد یا به عبارتی مقدار برداشت از منبع به کل تقاضا باید از شاخص فنی آن منبع کم‌تر باشد. با توجه به توضیحات بالا، مدل موردنظر به شکل زیر نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned}
 & \min EEI = \sum EEI_i X_i \\
 & \min FI = \sum FI_i X_i \\
 \\
 & \left. \begin{aligned} & X_i \geq 0 \\ & X_i \leq TI_i \end{aligned} \right\} \text{ قیود}
 \end{aligned}$$

(۴)

الگوی تجربی موردنظر به صورت زیر قابل ارائه است.

تابع هدف (۵)

$$\min EEI \quad (EEI \text{ نفت } X \text{ نفت } EEI \text{ گاز } X \text{ گاز } EEI \text{ زغال سنگ } X \text{ زغال سنگ } EEI \\ EEI \text{ سلول خورشیدی } X \text{ سلول خورشیدی } EEI \text{ هسته‌ای } X \text{ هسته‌ای } EEI \\ EEI \text{ بادی } X \text{ بادی } EEI \text{ حرارتی خورشیدی } X \text{ حرارتی خورشیدی } EEI \\ EEI \text{ زمین گرمایی } X \text{ زمین گرمایی } EEI \text{ زیست توده } X \text{ زیست توده } EEI \text{ آبی } X \text{ آبی } EEI)$$

$$\min FI \quad (FI \text{ نفت } X \text{ نفت } FI \text{ گاز } X \text{ گاز } FI \text{ زغال سنگ } X \text{ زغال سنگ } FI \\ FI \text{ سلول خورشیدی } X \text{ سلول خورشیدی } FI \text{ هسته‌ای } X \text{ هسته‌ای } FI \\ FI \text{ بادی } X \text{ بادی } FI \text{ حرارتی خورشیدی } X \text{ حرارتی خورشیدی } FI \\ FI \text{ زمین گرمایی } X \text{ زمین گرمایی } FI \text{ زیست توده } X \text{ زیست توده } FI \text{ آبی } X \text{ آبی } FI)$$

قیود

$$X \text{ سلول خورشیدی } X \text{ هسته‌ای } X \text{ زغال سنگ } X \text{ گاز } X \text{ نفت } X \\ X \text{ زمین گرمایی } X \text{ زیست توده } X + X \text{ آبی } X \text{ بادی } X \text{ حرارتی خورشیدی } X \\ \bullet \quad X_i \quad TI_i$$

متغیرهای موجود در الگوی (۵) عبارتست از:

$$EEI_i = \text{شاخص محیط‌زیستی منبع انرژی آم} \quad FI_i = \text{شاخص اقتصادی منبع انرژی آم}$$

$$X_i = \text{درصد برداشت از منبع انرژی آم} \quad TI_i = \text{شاخص فنی منبع انرژی آم}$$

که هر یک از زیرنویس‌های i که معرف منبع انرژی مربوط بوده در الگو مشخص شده است.

چنان‌که گفته شد، مدل (۵) شامل دو تابع هدف بوده که در تابع هدف اول، حداقل‌سازی میزان آلودگی محیط زیست بر اثر تولید انرژی و در تابع هدف دوم، حداقل‌سازی میزان هزینه تولید انرژی مد نظر بوده تا بهترین ترکیب انرژی حاصل شود. در این الگو، دو قید در نظر گرفته شده است. قید اول مجموع درصد انرژی‌های مصرفی است که باید کل تقاضا کشور را تامین کند و در نتیجه برابر ۱ در نظر گرفته شده است. همچنین، قید دوم نشان دهنده این است که میزان برداشت از هر انرژی باید از میزان شاخص فنی کمتر باشد.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

مدل معرفی شده در بخش مواد و روش‌ها، با استفاده از نرم‌افزار متلب بهینه‌سازی و نتایج برای سناریوهای مختلف زمانی به دست آمد. ذکر این نکته ضروری است که نقاط بهینه‌ی به‌دست‌آمده در الگوریتم ژنتیک تشکیل‌دهنده‌ی منحنی پارتو بوده که همه‌ی آن‌ها را می‌توان به‌عنوان بهترین جواب انتخاب کرد؛ با این وجود، به‌منظور فراهم نمودن امکان مقایسه بین دوره‌های مختلف، یک عدد با استفاده از یک میانگین‌گیری از بین تمام نقاط جواب، به‌عنوان شاخص برای مقایسه انتخاب گردید.

در این بخش، در ابتدا هر یک از شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی براساس مکانیسم تعریف‌شده در بخش مواد و روش‌ها ارائه و در ادامه، براساس مدل بهینه‌ی تدوین‌شده، میزان درصد استفاده از انرژی‌های مختلف به‌منظور تأمین اهداف حداقل کردن میزان آلودگی محیط‌زیست و میزان سرمایه‌گذاری در بخش انرژی تحت سناریوهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ سال تعیین شده است. به‌منظور تشکیل شاخص فنی، مراحل محاسبه‌ی میزان بیشینه مصرف هر یک از منابع مختلف انرژی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- میزان بیشینه مصرف برای منابع مختلف انرژی

منبع انرژی	ژول در یک سال	شاخص کار آبی	پتانسیل اصلاح‌شده	بیشینه مصرف
نفت	$9/17504 \times 10^{20}$	۳۵%	$3/21126 \times 10^{20}$	$3/21126 \times 10^{18}$
گاز	$1/27362 \times 10^{21}$	۵۵%	$7/00494 \times 10^{20}$	$7/00494 \times 10^{18}$
زغال‌سنگ	$2/97 \times 10^{20}$	۴۰%	$1/3365 \times 10^{20}$	$1/3365 \times 10^{18}$
هسته‌ای	$3/2 \times 10^{20}$	۸۵%	$2/72 \times 10^{20}$	$2/72 \times 10^{18}$
PV	$5/7 \times 10^{16}$	۱۵%	$8/55 \times 10^{15}$	$8/55 \times 10^{15}$
خورشیدی	$7/2 \times 10^{19}$	۳۳%	$2/376 \times 10^{19}$	$2/376 \times 10^{19}$
بادی	$2/88 \times 10^{17}$	۲۷%	$7/776 \times 10^{16}$	$7/776 \times 10^{16}$
آبی	$1/8 \times 10^{17}$	۵۰%	$9/00 \times 10^{16}$	$9/00 \times 10^{16}$
زیست‌توده	$8/53 \times 10^{16}$	۸۵%	$7/2505 \times 10^{16}$	$7/2505 \times 10^{16}$
زمین‌گرمایی	$4/07 \times 10^{16}$	۸۰%	$3/256 \times 10^{16}$	$3/256 \times 10^{16}$

مأخذ: یافته‌های پژوهش

درنهایت، جدول ۳ شاخص فنی پایداری برای سناریوهای زمانی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ساله را نشان می‌دهد.

جدول ۳- شاخص فنی برای منابع مختلف انرژی تحت سناریوهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ساله

منبع انرژی	شاخص فنی (۱۰۰ سال)	شاخص فنی (۲۰۰ سال)	شاخص فنی (۳۰۰ سال)	شاخص فنی (۵۰۰ سال)
نفت	۰/۴۷۴۸۹۸۰	۰/۲۳۷۴۴۹	۰/۱۵۸۲۹۹	۰/۰۹۴۹۷۹
گاز	۱/۰۳۵۹۲۵۷	۰/۵۱۷۹۶۲	۰/۳۴۵۳۰۸	۰/۲۰۷۱۸۵
زغال‌سنگ	۰/۱۹۷۶۴۸۴	۰/۰۹۸۸۲۴	۰/۰۶۵۸۸۲	۰/۰۳۹۵۲۹
هسته‌ای	۰/۴۰۲۲۴۷۵	۰/۲۰۱۱۲۳	۰/۱۳۴۰۸۲	۰/۰۸۰۴۴۹
pv	۰/۰۰۱۲۶۴۴	۰/۰۰۰۶۳۲	۰/۰۰۰۴۲۱	۰/۰۰۰۲۵۲
خورشیدی	۳/۵۱۳۷۵۰۷	۱/۷۵۶۸۷۵	۱/۱۷۱۲۵۰	۰/۷۰۲۷۵۰
بادی	۰/۰۱۱۴۹۹۵	۰/۰۰۵۷۴۹	۰/۰۰۳۸۳۳	۰/۰۰۲۲۹۹
آبی	۰/۰۱۳۳۰۹۶	۰/۰۰۶۶۵۴	۰/۰۰۴۴۳۶	۰/۰۰۲۶۶۱
زیست‌توده	۰/۰۱۰۷۲۲۴	۰/۰۰۵۳۶۱	۰/۰۰۳۵۷۴	۰/۰۰۲۱۴۴
زمین‌گرمایی	۰/۰۰۴۸۱۵۱	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۱۶۰۵	۰/۰۰۰۹۶۳

مأخذ: یافته‌های پژوهش

شاخص فنی در یک دوره خاص به معنای حداکثر میزان برداشت از منبع انرژی با توجه به میزان تقاضای انرژی سالیانه کشور بوده به گونه‌ای که منبع انرژی مورد نظر در آن دوره به اتمام برسد. به عنوان مثال، عدد تقریبی ۰/۴۷ برای شاخص فنی نفت در دوره ۱۰۰ ساله به معنای این است که حداکثر میزان برداشت از منبع نفت در هر سال برای اینکه این منبع در دوره ۱۰۰ ساله به اتمام برسد حدود ۰/۴۷ میزان تقاضای کل کشور است.

جدول ۴ نتایج محاسبات لازم جهت دستیابی به شاخص اقتصادی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای انجام محاسبات موردنیاز جهت تشکیل شاخص اقتصادی، از هزینه‌ی اصلاح‌شده‌ی تولید برای هر مگاوات ساعت (ستون سمت چپ جدول ۴) که توسط مرکز مطالعات انرژی تهیه شده، استفاده گردید.

جدول ۴- شاخص اقتصادی برای منابع مختلف انرژی

منبع انرژی	هزینه تولید الکتریسیته (\$/Mw.h)	بیشینه‌ی سرمایه‌ی موردنیاز	شاخص اقتصادی (FI)
نفت	۱۱۹/۰۳	$۲/۲۳۵۷۸ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۲۱۲۳۲۵
گاز	۹۰/۵۸۶	$۱/۷۰۱۵۱ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۱۶۱۵۸۷
زغال‌سنگ	۹۰/۹۸	$۱/۷۰۸۹۱ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۱۶۲۲۹
هسته‌ای	۸۴/۷۹۷	$۱/۵۹۲۷۷ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۱۵۱۲۶
سلول خورشیدی	۵۴۴/۸۲	$۱/۰۲۳۳۵ \times ۱۰^{۱۲}$	۰/۹۷۱۸۴۶
خورشیدی حرارتی	۲۵۶/۷	$۴/۸۲۱۶۹ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۴۵۷۹
بادی	۱۳۴/۳۵	$۲/۵۲۳۵۴ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۲۳۹۶۵۳
آبی	۱۶۱/۰۴	$۳/۰۲۴۸۷ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۲۸۷۲۶۲
زیست‌توده	۱۳۳/۹۱	$۲/۵۱۵۲۸ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۲۳۸۸۶۸
زمین‌گرمایی	۱۲۸/۴۳	$۲/۴۱۲۳۵ \times ۱۰^{۱۱}$	۰/۲۲۹۰۹۳

مأخذ: یافته‌های پژوهش و سالوادور و کپلر^۱ (۲۰۱۰)

عدد بیشینه سرمایه مورد نیاز در جدول (۴) به معنای آن است که هزینه تامین کل انرژی کشور از یک منبع خاص انرژی به چه میزان است. همچنین، شاخص اقتصادی در این جدول، عددی بدون ابعاد است که از تقسیم عدد بیشینه سرمایه مورد نیاز به تولید ناخالص داخلی سالانه بدست می‌آید و نشان دهنده هزینه نسبی هر کدام از منابع برای تولید انرژی الکتریسیته است. بر این اساس، این شاخص می‌تواند اطلاعاتی را در این خصوص که کدام منابع در تولید انرژی الکتریسیته هزینه‌ی بیشتری خواهند داشت، در اختیار قرار دهد. مطابق جدول ۴، منابع انرژی هسته‌ای و زمین‌گرمایی به ترتیب، کمترین و بیشترین هزینه‌های تولید الکتریسیته را دربر خواهند داشت.

همچنین، جدول ۵ چگونگی تعریف شاخص زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

جدول ۵- شاخص زیست‌محیطی برای منابع مختلف انرژی

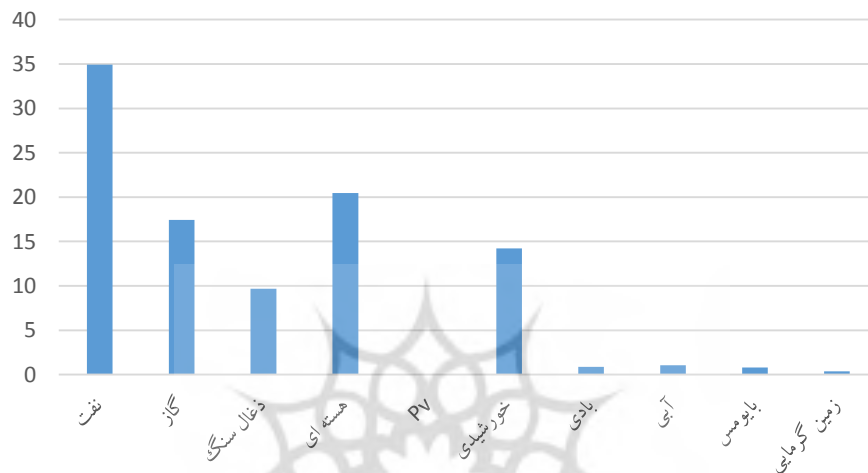
منبع	فاکتور آلاینده‌گی (کیلو وات ساعت / گرم کربن)	عدد حجم آلاینده‌گی	شاخص زیست‌محیطی
نفت	۲۰۴/۶۶	۳/۸۴۴۲×۱۰ ^{۱۴}	۸/۷۱۷
گاز	۱۳۸	۳/۵۰۶۹۶×۱۰ ^{۱۴}	۷/۹۵۲
زغال سنگ	۲۷۵/۶۶	۵/۱۷۷۸۲×۱۰ ^{۱۴}	۱۱/۷۴۱
هسته‌ای	۱/۴	۷/۷۰۱۱۷×۱۰ ^{۱۲}	۰/۱۷۵
pV	۱۸/۶۵	۳/۵۰۳۰۹×۱۰ ^{۱۳}	۰/۷۹۴
خورشیدی	۱۸/۶۵	۳/۵۰۳۰۹×۱۰ ^{۱۳}	۰/۷۹۴
بادی	۷/۰۶	۱/۷۹۴۱۴×۱۰ ^{۱۳}	۰/۴۰۷
آبی	۱۹/۱	۳/۵۸۱۷۶۲×۱۰ ^{۱۳}	۰/۸۱۴
زیست‌توده	۱۲/۵	۳/۱۷۶۶۶×۱۰ ^{۱۳}	۰/۷۲۰
زمین‌گرمایی	۱۴/۳۲۵	۲/۶۹۰۷۱×۱۰ ^{۱۳}	۰/۶۱۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش و جوزف^۱ و همکاران (۲۰۰۰)

در جدول ۵، عدد حجم آلاینده‌گی به معنای این است که برای تأمین کل انرژی سالانه کشور از یک منبع خاص چه میزان آلودگی زیست‌محیطی برحسب گرم کربن به وجود می‌آید. شاخص زیست‌محیطی تأثیر زیست‌محیطی تولید انرژی از یک منبع را بر محیط زیست نشان می‌دهد. هرچه عدد شاخص زیست‌محیطی بیشتر باشد تولید انرژی از آن منبع آلودگی بیشتری برای محیط زیست به دنبال خواهد داشت. همچنانکه از اعداد این جدول برمی‌آید، سوخت‌های فسیلی بیشترین آلاینده‌گی را ایجاد نموده در حالی که انرژی‌های تجدیدپذیر میزان آلودگی بسیار کمتری به دنبال داشته به طوری که انرژی بادی با اختصاص عدد ۰/۴۰۷ بهترین وضعیت را از این حیث دارد.

اکنون با ورود اطلاعات حاصل از تعریف شاخص‌های مختلف موردنظر و همچنین سایر اطلاعات موردنیاز، مدل بهینه‌ی تدوین‌شده در بخش‌های قبلی، اجرا و نتایج تحت سناریوهای مختلف زمانی ارائه گردید.

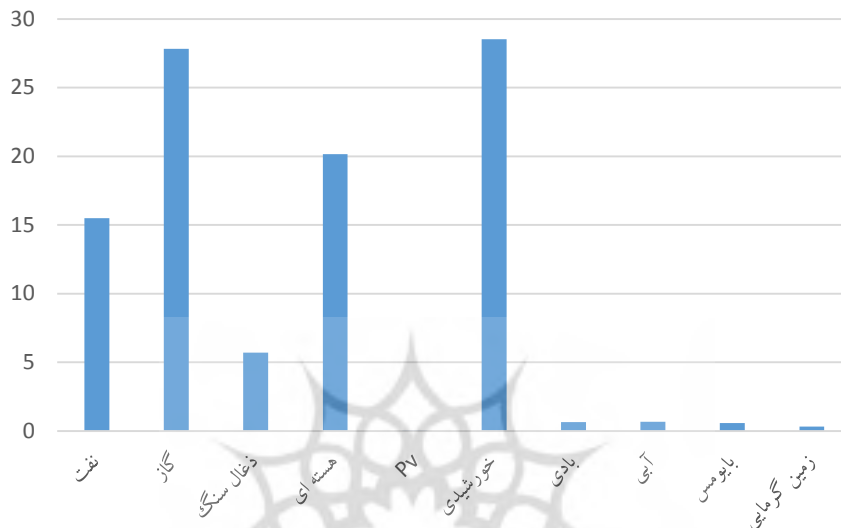
نمودار ۱ سهم هر یک از منابع انرژی را در تأمین انرژی موردنیاز تحت سناریوی ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد.



نمودار ۱- سهم هر یک از منابع در تأمین انرژی طی دوره‌ی ۱۰۰ ساله
مأخذ: یافته‌های پژوهش

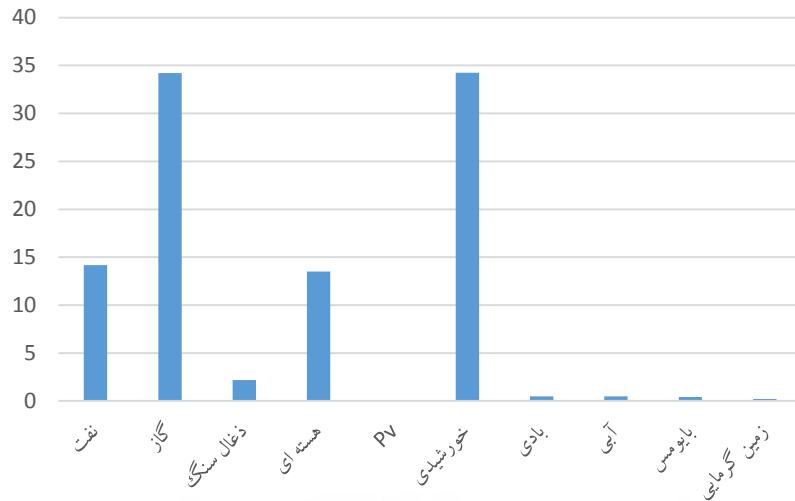
همان‌طور که از این نمودار دیده می‌شود، بیش‌ترین بار انرژی بر روی انرژی‌های فسیلی و هسته‌ای و کم‌تر از ۲۰ درصد بار انرژی را بخش تجدیدپذیر متحمل می‌شود. توزیع سهم تأمین انرژی در سناریوی ۱۰۰ ساله نشان‌دهنده‌ی این است که اثر شاخص مالی در این دوره نسبت به شاخص محیط‌زیستی بیش‌تر بوده است. در نمودار (۲) که مربوط به دوره‌ی ۲۰۰ ساله است، مشاهده می‌شود که باید میزان استفاده از سوخت‌های نفت و زغال‌سنگ کاهش و میزان استفاده از انرژی خورشیدی حرارتی و سوخت گاز در طی دوره موردنظر افزایش پیدا کند. نتایج به‌دست‌آمده تحت این سناریو در مقایسه با نتایج سناریوی ۱۰۰ ساله نشان‌دهنده‌ی این است که تأثیر شاخص

زیست‌محیطی نسبت به دوره‌ی ۱۰۰ ساله بیش‌تر بوده است؛ به‌گونه‌ای که در دوره‌ی ۲۰۰ ساله، نزدیک به ۳۰ درصد انرژی بایستی از منابع تجدید پذیر باید تأمین شود.



نمودار ۲- سهم هر یک از منابع در تأمین انرژی طی دوره‌ی ۲۰۰ ساله
مأخذ: یافته‌های پژوهش

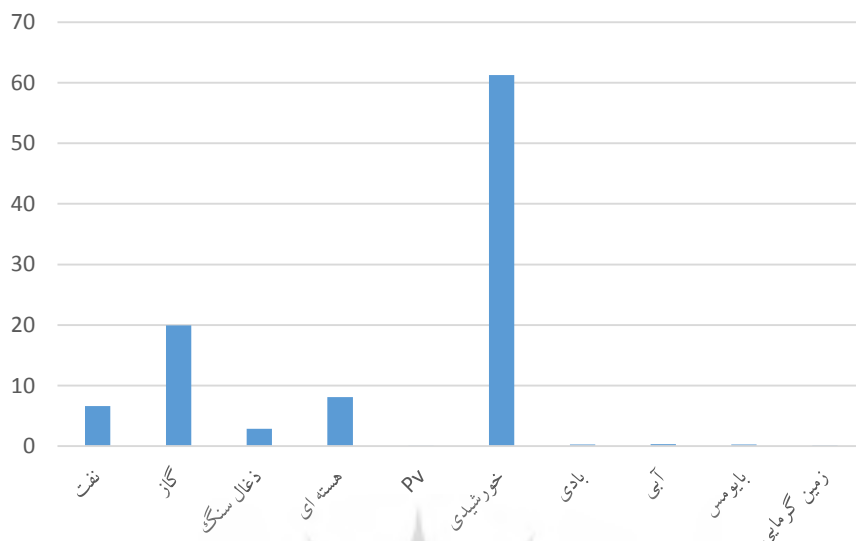
همچنین، با توجه به نمودار (۳) که برای دوره‌ی ۳۰۰ ساله ترسیم شده است، باید میزان استفاده از انرژی هسته‌ای و سوخت نفت کاهش یافته و به میزان انرژی خورشیدی حرارتی و سوخت گاز افزوده شود. این تغییر الگوی تأمین انرژی، میزان آلودگی را کاهش داده و استفاده از انرژی تجدیدپذیر را به بیش از ۳۵ درصد افزایش می‌دهد. می‌توان گفت که در این دوره، انرژی غالب از انرژی تجدید پذیر به دست می‌آید.



نمودار ۳- سهم هر یک از منابع در تأمین انرژی طی دوره ۳۰۰ ساله

مأخذ: یافته‌های پژوهش

در نهایت، در نمودار (۴) که برای دوره ۵۰۰ ساله ترسیم شده، می‌توان اثر غالب شدن شاخص زیست‌محیطی بر شاخص اقتصادی را به وضوح دید به گونه‌ای که بیش‌تر از ۶۰ درصد از انرژی را منابع تجدیدپذیر تأمین نموده و میزان استفاده از سوخت‌های فسیلی به شدت کاهش یابد.



نمودار ۴- سهم هر یک از منابع در تأمین انرژی طی دوره‌ی ۵۰۰ ساله
 مأخذ: یافته‌های پژوهش

در مرحله‌ی بعد، میزان برداشت هر یک از منابع انرژی از کل ظرفیت آن منبع در طی یک سال تعیین شده است. نتایج مربوط در این مرحله نیز طی چهار سناریوی موردنظر ارائه شده است. نتایج موردنظر در جدول (۶) خلاصه شده است.

دومین ستون سمت راست جدول (۶)، برداشت انواع انرژی از کل ظرفیت منبع موردنظر در یک سال را تحت سناریوی ۱۰۰ ساله نشان می‌دهد. همان‌گونه که از ارقام ستون مورد اشاره برمی‌آید، میزان برداشت از منابع تجدیدپذیر به‌جز انرژی حرارتی خورشیدی و سلول خورشیدی بیش از ۷۰ درصد است که نشان‌دهنده‌ی این است که برای نیل به سیاست تولید کم آلودگی باید از توان بالای این انرژی‌ها استفاده شود.

ستون سوم جدول در خصوص دوره‌ی ۲۰۰ ساله نشان‌دهنده‌ی این است که از بین منابع در دسترس باید از میزان برداشت از منابعی مانند نفت کاسته شود و به سایر منابع انرژی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر افزود.

جدول ۶- نسبت برداشت هر یک از منابع انرژی از کل ظرفیت آن منبع در طی یک سال تحت سناریوهای چهارگانه

سناریوی تحت بررسی				منبع انرژی
سناریوی ۵۰۰ ساله (درصد)	سناریوی ۳۰۰ ساله (درصد)	سناریوی ۲۰۰ ساله (درصد)	سناریوی ۱۰۰ ساله (درصد)	
۶۹/۳۳	۸۹/۴۸	۶۵/۵۴	۷۳/۵۵	نفت
۹۶/۱۰	۹۹/۰۹	۵۳/۷۰	۱۶/۸۴	گاز
۷۱/۹۰	۳۳/۳۴	۵۷/۵۸	۴۹/۲۷	زغال سنگ
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰/۹۰	هسته‌ای
۱۰۰	۹۳/۸۰	۶۵/۵۱	۱۹/۴۵	سلول خورشیدی
۸۷	۳۴/۲۱	۱۶/۳۴	۴/۰۴	حرارتی خورشیدی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۷/۵۶	بادی
۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۴۶	۷۹/۷۱	آبی
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۶/۳۱	زیست توده
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۷۶/۶۵	زمین گرمایی

مأخذ: یافته‌های پژوهش

برای دوره‌ی ۳۰۰ ساله همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، میزان مصرف زغال سنگ از منابع در دسترس آن کم‌تر از دوره‌ی ۲۰۰ ساله است که این تغییر الگو به دلیل آلودگی بالای آن برای تولید انرژی است که نشان‌دهنده‌ی اثر غالب شاخص محیط‌زیستی بر شاخص مالی است.

در نهایت، همان‌طور که از نتایج مربوط به سناریوی ۵۰۰ ساله دیده می‌شود، میزان استفاده از ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر تقریباً نزدیک به صد درصد در حالی که میزان استفاده از ظرفیت منابعی مانند زغال سنگ و نفت کم‌تر است. در این نمودار مجدداً تغییر الگوی تأمین انرژی به سمت انرژی‌های تأمین‌کننده‌ی اهداف زیست‌محیطی به‌طور قابل توجهی مورد تأکید و توصیه است.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات سیاستی

دستیابی به مدل بهینه‌ی تولید انرژی و تعریف نقشه جامع تولید انرژی همواره یکی از مسائل اساسی توسعه‌ی کشور بوده و دسترسی به منابع انرژی پایدار اقتصادی و منطبق با محیط‌زیست، در شرایط امروز کشور به یک ضرورت تبدیل شده است. در پژوهش حاضر تلاش شده است با رویکردی کل‌نگر و ترسیم وضعیت مطلوب در ابعاد مختلف پایداری، به منظور دستیابی به منابع انرژی ارزان و سازگار با محیط‌زیست، مدل بهینه‌ای ارائه گردد. در الگوی مورد نظر، در ابتدا شاخص‌های مختلف فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی تشکیل و نتایج بهینه‌سازی با ملاحظه‌ی اهداف مختلف تحت سناریوی‌های مختلف زمانی ارائه شد. نتایج مطالعه درخصوص ۱۰ منبع مختلف انرژی شامل منابع سوخت فسیلی و منابع تجدیدپذیر از جمله نفت، گاز، زغال‌سنگ، هسته‌ای، سلول خورشیدی، حرارتی خورشیدی، بادی، آبی، زیست‌توده و زمین‌گرمایی طی چهار سناریوی زمانی ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ ساله به دست آمد. براساس نتایج به دست آمده در سناریوی ۱۰۰ ساله، سهم عمده‌ی تأمین انرژی به عهده‌ی سوخت‌های فسیلی بوده و تأثیر شاخص مالی نسبت به شاخص زیست‌محیطی بیش‌تر بوده است. جهت‌گیری تأمین انرژی در دوره‌ی ۲۰۰ ساله حاکی از این است که میزان استفاده از سوخت‌های نفت و زغال‌سنگ کاهش و بهره‌گیری از انرژی خورشیدی حرارتی و سوخت گاز افزایش پیدا می‌کند. الگوی تأمین انرژی از دوره‌ی ۳۰۰ ساله به بعد ضمن جایگزینی بیش‌تر انرژی خورشیدی حرارتی و سوخت گاز به جای سوخت‌های هسته‌ای و نفت میزان آلودگی را کاهش داده و استفاده از انرژی تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد به گونه‌ای که تحت سناریوی ۵۰۰ ساله، انرژی غالب از منابع تجدیدپذیر به دست می‌آید.

در مطالعه‌ی حاضر، همچنین میزان برداشت هر یک از منابع انرژی از کل ظرفیت آن منبع در طی یک سال تعیین شد. نتایج مربوط طی چهار سناریوی موردنظر نشان داد که در طول زمان و با افزایش طول دوره در سناریوهای مختلف، نسبت برداشت به کل ظرفیت منابعی مانند نفت و زغال‌سنگ کاهش یافته و این نسبت در خصوص منابع تجدیدپذیر

افزایش خواهد یافت. در مجموع، تغییر الگوی تأمین انرژی به سمت انرژی‌های تأمین‌کننده اهداف زیست‌محیطی به‌طور قابل‌توجهی مورد تأکید قرار گرفته به طوری که میزان استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تقریباً نزدیک به ظرفیت کامل بهره‌برداری از این منابع مورد توصیه بوده است. براساس یافته‌های پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود دولت ضمن تدوین استراتژی‌های کلان ملی در حوزه انرژی، جهت‌گیری سیاستی خود را در این حوزه با سرعتی بیش از پیش به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست سوق دهد. در این راستا، ایجاد و توسعه‌ی صندوق حمایت مالی از سوخت‌های تجدیدپذیر می‌تواند نقش مهمی در اجرایی نمودن این سیاست‌ها ایفا نماید. همچنین نهادینه کردن فرهنگ عمومی مصرف بهینه‌ی منابع انرژی در بین آحاد جامعه از طریق ابزارهای گوناگون تأثیر بسزایی در پیشبرد اهداف این سیاست‌ها خواهد داشت. در نهایت، پیشنهاد می‌شود، سناریوهای مختلف قیمتی، تکنولوژیک و زمانی در مطالعات آتی مورد بررسی تفصیلی‌تری قرار گیرد.

۵- منابع

الف) فارسی

- آژانس بین‌المللی انرژی (۲۰۱۶). قابل دسترس در: <http://www.iea.org>
- امامی میبدی، علی، خضری، محسن و اعظمی، آرش (۱۳۸۸)، شبیه‌سازی تابع تقاضای انرژی در ایران با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)، فصلنامه‌ی مطالعات اقتصاد/انرژی، سال ۶، شماره ۲، ص ۱۵۹-۱۴۱.
- برزین پور، فرناز و کریمی، سعید (۱۳۹۳). پیش‌بینی آثار سناریوهای مختلف هدفمندی یارانه‌ها بر تقاضای برق خانگی با استفاده از شبکه‌های عصبی. نشریه مهندسی صنایع، شماره ۴۸، ص ۸۳-۹۰.

شرکت بریتیش پترولیوم (۲۰۱۶). قابل دسترس در: <http://www.bp.com>

ارائه‌ی مدل مدیریت تأمین انرژی در ایران ... ۵۹

صادقی، حسین، ذوالفقاری، مهدی، سهرابی، حسین و سلمانی، یونس (۱۳۹۱)، کاربرد الگوریتم انبوه ذرات و الگوریتم ژنتیک در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تقاضای انرژی، نشریه انرژی ایران، سال ۱۵، شماره ۲، ص ۴۵-۶۰.

صادقی، حسین، سهرابی وفا، حسین و نوری، فاطمه (۱۳۹۲)، کاربرد شبکه عصبی مبتنی بر الگوریتم در پیش‌بینی تقاضای بلندمدت انرژی، فصلنامه‌ی پژوهش اقتصادی کاربردی، سال ۱، شماره ۲، ص ۲۹-۵۹.

چنگی آشتیانی، علی و جلویی، مهدی (۱۳۹۱). برآورد تابع تقاضای برق و پیش‌بینی آن برای افق چشم‌انداز ۱۴۰۴ ایران و نقش آن در توسعه کشور با توجه به هدفمند شدن یارانه‌های انرژی. فصلنامه پژوهش‌های رشد و توسعه اقتصادی، سال ۲، شماره ۷، ص ۱۰۱-۱۹۱.

معاونت امور برق و انرژی، "ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱".

معاونت پژوهش‌های زیربنایی، "ارائه‌ی مدل مدیریت منابع انرژی"، مهرماه ۱۳۹۳. میرفخرالدینی، سید حیدر، بابایی میبدی، حمید و مروتی شریف‌آبادی، علی (۱۳۹۲)، "پیش‌بینی مصرف انرژی ایران با استفاده از مدل ترکیبی الگوریتم ژنتیک- شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با الگوهای سنتی"، پژوهش‌های مدیریت در ایران، سال ۱۷، شماره ۲، ص ۱۹۶-۲۲۲.

Canyurt, O. E. and Ozturk, H. K. (2006), Three Different Applications of Genetic Algorithm (GA) Search Techniques on Oil Demand Estimation, *Energy Conversion and Management*, Vol.47, Issue.18-19, pp. 3138-3148.

Ceylan, H. and Ozturk, H. K. (2004), Estimating Energy Demand of Turkey Based on Economic Indicators Using Genetic Algorithm Approach, *Energy Conversion and Management*, Vol.45, Issue. 15-16, pp. 2525-2537.

Ekonomou, L. (2010), Greek Long-Term Energy Consumption Prediction using artificial neural networks, *Energy*, Vol.35, Issue.2, pp.512-517.

Geem, Z. W. and Roper, W. E. (2009), Energy Demand Estimation of South Korea Using Artificial Neural Network, *Energy Policy*, Vol.37, Issue.10, pp. 4049-4054.

Goldberg, D. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, ma, *NN Schraudolph and J*, Vol.3, Issue.1, pp.95-99.

Grimaud, A. and Roug, L. (2003), Non-Renewable Resources and Growth with Vertical Innovations: Optimum, Equilibrium and Economic Policies, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.45, Issue.2, pp.433-453.

<http://www.dlr.de>.

Joseph, V. Lucille Langlois, S. and Hamilton, B. (2000), Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chain Assessing The Difference, *Journal of IAEA bulletin*, Vol. 42, Issue. 2, pp.19-28

Malla, S., and Timilsina, G. R. (2016). Long-Term Energy Demand Forecasting in Romania: an End-Use Demand: The World Bank, <http://www.worldbank.org/>

Oh, S. J., Ng, K. C., Thu, K., Chun, W., and Chua, K. J. E. (2016). Forecasting Long-Term Electricity Demand for Cooling of Singapore Buildings Incorporating an Innovative Air-conditioning Technology. *Journal of Energy and Buildings*. Vol. 127, pp.183-193.

Ozturk, H. K. Ceylan, H. and Canyurt O. E. (2005), Electricity Estimation Using Genetic Algorithm Approach: a Case Study of Turkey, *Journal of Energy*, Vol.30, Issue.7, pp.1003-1012.

Salvadore, M. S. and Keppler, J. H. (2010), *Projected Costs of Generating Electricity: 2010 Edition*, Paris Dauphine University.

Toksari, M. D. (2007), Ant Colony Optimization Approach to Estimate Energy Demand of Turkey, *Journal of Energy Policy*, Vol.35, Issue.8, pp.3984-3990.

Torrini, F. C., Souza, R. C., Oliveira, F. L. C., and Pessanha, J. F. M. (2016). Long Term Electricity Consumption Forecast in Brazil: A Fuzzy Logic Approach. *Journal of Socio-Economic Planning Sciences*, Vol.54, pp.18-27.

Yildiz, A. (2008), Improvement of Energy Demand Forecasts Using Swarm Intelligence: The Case of Turkey with Projections to 2025, *Journal of Energy Policy*, Vol.36, Issue.6, pp.1937-1944.