

بهینه‌یابی تأمین منابع انرژی با هدف تولید برق، چشم‌انداز ایران در افق ۱۴۰۴

حسین صادقی^۱

عادل آذر^۲

سمانه خاکسار آستانه^۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۵

چکیده

با توجه به نیاز روز افزون جوامع امروزی به انرژی برای تأمین نیازهای متفاوت، دانشمندان و محققان کشورهای متعددی از جمله ایران، رویکردی اساسی نسبت به دستیابی به انرژی‌های تجدیدپذیر در دستور کار خود قرار داده‌اند. دانشمندان معتقدند انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط زیست می‌توانند به اولین گزینه برای تولید انرژی تبدیل شوند. کشور ما به دلیل موقعیت جغرافیایی، ظرفیت‌های متعددی در حوزه تولید انرژی‌های نوین و تجدیدپذیر دارد. این مساله به ضرورت وجود یک الگوی بهینه جهت توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید می‌کند. از این رو در این تحقیق، هدف اصلی ارائه الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که علاوه بر تأمین برق مورد نیاز، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی می‌شود. در این مطالعه، با مینیمم کردن تابع هزینه و با توجه به سه گروه محدودیت منابع، تقاضا و فنی و با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی استوار، الگوی مورد نظر برای افق بلندمدت ۱۴۰۴ پیشنهاد شده است. بر طبق نتایج این الگوی بهینه، ۱۵ درصد تولید برق از انرژی خورشیدی در افق ۱۴۰۴ پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، الگوی بهینه، بهینه‌سازی استوار، ایران

طبقه بندی JEL: Q20, Q40, Q43

-
۱. دانشیار دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول) sadeghih@modares.ac.ir
 ۲. استاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس Azara@modares.ac.ir
 ۳. دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز دانشگاه علامه طباطبائی saman.astaneh@yahoo.com

۱- مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون جوامع امروزی به انرژی برای تأمین نیازهای متفاوت، دانشمندان و محققان کشورهای متعددی از جمله ایران، رویکردی اساسی نسبت به دستیابی به انرژی های تجدیدپذیر در دستور کار خود قرار داده اند. دانشمندان معتقدند انرژی های تجدیدپذیر و پاک با توجه به محدود بودن سوخت های فسیلی و آلودگی محیط زیست می توانند به اولین گزینه برای تولید انرژی تبدیل شوند. چرا که این نوع از انرژی ها پاک، ارزان و بلاخص تجدیدپذیر است. کشور ما نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی، ظرفیت های متعددی در حوزه تولید انرژی های نوین و تجدیدپذیر دارد و همین موضوع باعث شده است که ضرورت توسعه انرژی های تجدیدپذیر در دستور کار مسئولان قرار گیرد. در کشورهای اروپایی تا سال ۲۰۲۰ برنامه ریزی شده است که ۳۰ درصد ظرفیت نصب شده کشورها، برای منابع تجدیدپذیر باشد، این در حالی است که در کشور ما، به جهت وجود منابع بزرگ نفت و گاز، برنامه ریزی کشور بر مبنای استفاده از انرژی فسیلی جهت تولید انرژی است؛ در صورتی که باید به تدریج سهم منابع تجدیدپذیر را مانند اکثر مناطق جهان افزایش داد.

این مساله به ضرورت وجود یک الگوی بهینه جهت توسعه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر تأکید می کند. از این رو در این تحقیق، هدف اصلی ارائه الگوی بهینه استفاده از انرژی های تجدیدپذیر بوده که علاوه بر تأمین برق مورد نیاز، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی می شود. در این راستا پس از بیان ضرورت استفاده از انرژی های تجدیدپذیر و بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، به ارائه الگوی بهینه تولید برق از انرژی خورشیدی (به عنوان نماینده انرژی های تجدیدپذیر) و نیروگاه های فسیلی در افق بلندمدت ۱۴۰۴، پرداخته شده است.

در راستای این هدف، بعد از بیان ضرورت توسعه انرژی های تجدیدپذیر و مروری بر ادبیات تحقیق، روش تحقیق بیان شده، سپس مدل بهینه یابی تأمین انرژی طراحی، حل و در انتها، شبیه سازی شده و در پایان مقاله، تجزیه و تحلیل نتایج صورت گرفته است.

۲- ضرورت توسعه انرژی های تجدیدپذیر

به طور خلاصه می توان دلایل زیر را برای ضرورت توسعه انرژی های تجدیدپذیر برشمرد:

- کاهش آلودگی های زیست محیطی
- جلوگیری از کاهش ذخایر فسیلی
- صرفه جویی اقتصادی
- ارتقاء امنیت عرضه انرژی
- تولید پراکنده و کاهش اتکا به شبکه های سراسری انتقال انرژی

- اشتغال‌زایی و توسعه نواحی دور افتاده
- حل معضل ضایعات شهری

۳- مروری بر مطالعات انجام شده

در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، تا کنون مطالعه داخلی مبنی بر بهینه‌سازی ترکیب این نوع از انرژی انجام نشده اما، مطالعات مختلفی در کشورهای مختلف با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی و برنامه ریزی استوار صورت گرفته است، که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: آرنت و زوبل (Arnette, A., Zobel, Ch. 2011)، در مطالعه‌ای به ارائه الگویی بهینه توسعه انرژی-های تجدیدپذیر در شرق آمریکا پرداخته‌اند.

شفیع‌الله و همکاران (۲۰۱۲)، در مطالعه خود با عنوان "چشم‌اندازی به انرژی‌های تجدیدپذیر" به بررسی پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته و مناطقی از استرالیا که پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر بخصوص انرژی خورشیدی و بادی را دارند شناسایی کرده و یک مدل بهینه ترکیبی برای توسعه چشم‌اندازی از انرژی باد در منطقه‌ای از استرالیا با در نظر گرفتن هزینه‌های تولید، هزینه‌های انرژی، هزینه‌های کاهش انتشار ارائه کرده‌اند.

اکسیدیس و کرونس (Xydis, G. & Koroneos, C. 2012)، در مطالعه خود با عنوان "روش برنامه‌ریزی خطی به منظور برنامه‌ریزی بهینه سیستم انرژی در آینده (با توجه به پتانسیل تولید انرژی از مواد زائد جامد شهری)" به علت عدم توازن بین عرضه انرژی و مصرف نهایی، سیستم انرژی یونان را مورد مطالعه قرار دادند. هدف نهایی از این مطالعه، ارائه الگوی بهینه‌ای به منظور برآورد نیاز انرژی کشور یونان با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر و بالاخص تمرکز در پتانسیل تولید انرژی از مواد زائد جامد شهری (MSW^۱) در هر منطقه بوده است.

کو و همکاران (Koo, J.; et al. 2012)، در مطالعه‌ای به بررسی یکپارچه‌سازی فناوری CCS، تجارت انتشار و بی‌ثباتی قیمت سوخت به منظور برنامه‌ریزی پایدار انرژی با استفاده از رویکرد بهینه-سازی استوار پرداخته‌اند.

چن و همکاران (Chen, C.; et al. 2012)، در مطالعه‌ای با عنوان "بهینه‌سازی استوار، تکنیکی برای برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت در مقیاس منطقه‌ای و مدیریت دی‌اکسیدکربن" از روش بهینه‌سازی استوار بازه‌ای برای برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی و تجارت دی‌اکسیدکربن در چارچوب ترکیب برنامه‌ریزی پارامتری-بازه‌ای همراه با بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت استفاده کرده‌اند.

چن و همکاران (Chen, C.; et al. 2012)، در مطالعه‌ای از تکنیک بهینه‌سازی استوار بازه‌ای برای

برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی و مدیریت انتشار آلاینده CO₂ در کشور چین، از طریق ترکیب دو تکنیک برنامه‌نویسی پارامتری- بازه‌ای و بهینه‌سازی استوار استفاده کرده‌اند.

فریرا و همکاران (Ferreira et al. 2012)، در مطالعه‌ای با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار به طراحی مدلی برای پاسخ به تقاضای انرژی برق با فرض همبستگی اطلاعات قیمتی پرداخته‌اند.

دومینز و همکاران (Domingues et al. 2012)، در مطالعه‌ای با عنوان ارائه الگوی بهینه توسعه نیروگاه خورشیدی متمرکز به پیشنهاد روشی برای ارائه منحنی عرضه انرژی نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز پرداخته‌اند. آنها برای ارائه منحنی عرضه انرژی نیروگاه مورد مطالعه، از مدل برنامه‌ریزی خطی استوار استفاده و تابع هدف سود را در این مطالعه ماکزیمم کرده‌اند.

ریموند (Raymond, R.T. 2011)، در مطالعه‌ای به طراحی مدلی برای بخش انرژی فیلیپین با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی استوار و با توجه به محدودیت‌های غیرعملیاتی پرداخته است.

آرنت و زوبل (Zobel & Arnette 2011)، در مطالعه‌ای به بررسی نقش سیاست‌های دولت در بهینه‌سازی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در جنوب کوه‌های آپالاچی پرداختند. آنها در این تحقیق، یک سیستم جامع به منظور برنامه‌ریزی انرژی ارائه می‌دهند و هدف اصلی آنها در این سیستم، تأمین برق از منابع انرژی تجدیدپذیر است.

مویس و همکاران (Muis et al. 2010)، در مطالعه خود با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی اعداد صحیح، الگوی بهینه‌ای را برای تولید برق با هدف کاهش دی‌اکسیدکربن ارائه داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد به منظور کاهش ۵۰ درصدی انتشار دی‌اکسیدکربن از سطح فعلی، یک الگوی بهینه از سیکل ترکیبی گاز، سیکل ترکیبی گاز طبیعی، انرژی هسته‌ای و انرژی زیست توده ناشی از دفن زباله انتخاب شده است.

لی و همکاران (Li et al. 2010)، در مطالعه خود به طراحی مدلی به منظور برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند.

کی و همکاران (Cai et al. 2009)، در مطالعه خود به طراحی سیستمی جامع برای مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند. آنها در این مطالعه از مدل برنامه‌ریزی دومرحله‌ای با پارامترهای بازه‌ای به منظور ارائه مدلی جهت حمایت و پشتیبانی از مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر در مقیاس کلان استفاده کرده‌اند.

لین و هانگ (Lin & Huang 2009)، در مطالعه خود با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی پویا مدلی را به منظور مدیریت انتشار گازهای گلخانه‌ای و توسعه پایدار انرژی‌های تجدیدپذیر در کانادا ارائه داده‌اند.

۴- روش تحقیق

برنامه‌ریزی ریاضی، یکی از روش‌های بهینه‌سازی است. بهینه‌سازی، هنر و علم تخصیص منابع محدود به بهترین وضعیت ممکن می‌باشد و برنامه‌ریزی خطی، یکی از زیرمجموعه‌های برنامه‌ریزی ریاضی است. پاسخی که از حل یک مساله برنامه‌ریزی خطی به دست می‌آید، معمولاً عبارت است از یک برنامه یا طرح مشخص که شامل مقادیر بهینه فعالیت‌های انتخاب شده است. مدل‌هایی که بر اساس ارتباط خطی بین متغیرها ساخته می‌شوند، دارای محدودیت‌هایی هستند. بسیاری از وقایع موجود در دنیای واقعی خطی نبوده و روابط غیرخطی بین آنها برقرار است. به همین دلیل در برنامه‌ریزی خطی، فرض می‌شود متغیرها دارای خصوصیات معین بودن، پیوسته بودن، جمع‌پذیر بودن و تناسب هستند تا بتوان مدل‌های ساده‌تری از واقعیت‌های موجود ساخت (صبوچی، ۱۳۹۱).

۴-۱- استواری

مسائل تصمیم‌گیری اغلب به دلیل عدم دقت، تغییرپذیری مستمر و ناتوانی در دیدن وقایع آینده با عدم اطمینان‌هایی مواجه‌اند. نویسندگان بسیاری بحث استواری را مورد تحقیق و بررسی قرار داده و نتیجه کار آنها منجر به حوزه تحقیقاتی وسیعی شده است (Hites et al, 2006). بحث استواری مدل از مباحث بسیار مهمی بوده که در اخلاق در مدل‌سازی و متعاقباً اخلاق در تحقیق در عملیات نیز مطرح می‌باشد. در حقیقت اگر مدل‌ها استوار باشند، خطر به کارگیری اشتباه با استفاده غلط آن بسیار کمتر خواهد شد و استواری به این مفهوم است که خروجی مدل نباید خیلی نسبت به مقادیر دقیق پارامترها و ورودی‌های مدل حساس باشد (Kleijnen, 2001).

به لحاظ تاریخی، بهینه‌سازی در شرایط غیرقطعی در اواخر دهه ۱۹۵۰ شروع شد و هم در زمینه تئوری و هم، در زمینه الگوریتم به سرعت پیشرفت کرد. رویکردهای زیادی برای بهینه‌سازی در شرایط غیرقطعی مورد استفاده قرار گرفته است که از آن جمله، کمینه کردن امید ریاضی، کمینه کردن انحراف از آرمان‌ها، کمینه کردن بیشترین هزینه‌ها را می‌توان نام برد. البته همه این رویکردها با مشکلاتی مواجه بوده‌اند.

اما رویکردی که در سالهای اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها، بسط داده شده است، بهینه‌سازی استوار می‌باشد؛ که در آن به بهینه‌سازی هنگام رخ دادن بدترین موارد پرداخته می‌شود که ممکن است منجر به یک تابع هدف کمینه کردن ماکسیمم^۱ شود. در این رویکرد، به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه‌ای هستیم که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر، با کمی صرف نظر کردن از تابع هدف، موجه بودن جواب به دست آمده را تضمین می‌کنیم. البته در مورد عدم قطعیت در

1. Min-max

ضرایب تابع هدف، با کمی صرف نظر کردن از مقدار تابع هدف بهینه، به دنبال جوابی هستیم که با احتمال بالایی جواب های واقعی، بهتر از آن جواب باشند (فیض الهی، ۱۳۸۶).

به طور کلی در برنامه ریزی ریاضی قطعی فرض می شود، داده های ورودی به طور مشخص و معادل با مقادیر اسمی است. این نگرش تأثیر عدم اطمینان را روی کیفیت و موجه بودن مدل مدنظر قرار نمی دهد. در حقیقت داده هایی که مقادیر متفاوتی را از مقادیر اسمی شان اختیار می کنند، ممکن است منجر به این مساله شوند که تعدادی از محدودیت ها نقض گردند و جواب بهینه ممکن است مدت طولانی بهینه نمانده یا حتی موجه بودن آن از بین برود. این بحث خواسته ای طبیعی را به ذهن متبادر می سازد که روش های حلی طراحی و ارائه شوند که در مقابل عدم اطمینان داده ها ایمنی ایجاد کنند و این روش ها، "حل استوار" نامیده می شوند (Bertsimas & Sim, 2004).

اولین گام و تحقیق در این راستا از روی سویستر (Soyster 1973) ارائه گردید که یک مدل برنامه ریزی خطی را برای تولید جوابی که برای همه داده های متعلق به یک مجموعه محدب موجه است، ارائه کرد. مدل مذکور، جواب هایی ارائه می کند که در قبال بهینگی مساله اسمی به منظور اطمینان از استواری که به شدت محافظه کارانه (با محافظه کاری بالا^۱) عمل می کند. بدین معنی که در این رویکرد، برای اطمینان از استوار بودن جواب، به مقدار زیادی از بهینگی مساله اسمی دور می شود. در این مدل، هر داده ورودی می تواند هر مقداری را از یک بازه^۲ بگیرد Ben-Tal (& Nemirovski, 2000; Bertsimas & Sim, 2004).

در ادامه مدل ریاضی استوار برتسیمس و سیم معرفی می شود:

۲-۴- مدل برتسیمس و سیم

در مباحث بهینه سازی استوار، به ازای هر مساله اسمی (مساله حاوی پارامترهای نامطمئن)، یک مدل استوار ارائه می گردد که همتای استوار نامیده می شود. به عبارتی با حل مدل همتای استوار، جواب های استوار برای مساله اصلی ارائه می گردد. مساله برنامه ریزی عدد صحیح مختلط اسمی زیر، با مجموعه n متغیر که k تای اول آن متغیرهای عدد صحیح هستند، در نظر گرفته شده است.

مدل (۱) Minimize $c'x$

subject to: $Ax \leq b$

$l \leq x \leq u$

$x_i \in Z, i = 1, \dots, k$

با حفظ کلیت مساله، فرض می شود ماتریس A و c شامل داده های غیرقطعی و بردار b شامل

1. Over-conservative
2. Interval

اعداد قطعی باشد. با فرض اینکه هر کدام از ضرایب $j \in N_{aj}$ به صورت یک متغیر تصادفی مستقل، با توزیع متقارن و کراندار $j \in N_{\hat{a}ij}$ مدل می‌شود که در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ مقدار می‌گیرد. هر کدام از $z \in N_{cj}$ در بازه $[c_j - d_j, c_j + d_j]$ مقدار می‌گیرد، که d_j بیانگر انحراف از ضریب هزینه اسمی c_j و نیز تنها فرض برای توزیع ضرایب a_{ij} متقارن بودن آن می‌باشد. علاوه بر این، اگر عدد سمت راست نیز همانند ضرایب فنی در بازه‌ای متقارن نوسان کند، هیچ خللی به بحث وارد نمی‌شود و مدل‌سازی استوار آن شبیه ضرایب فنی صورت می‌گیرد. برای استواری جواب، اعداد $\Gamma_i, i=0,1,\dots,m$ تعریف می‌شود که در بازه $[0, |J_i|]$ مقدار می‌گیرند، که $|J_i|$ برابر با تعداد داده‌های غیرقطعی در محدودیت i ام می‌باشد. نقش پارامتر Γ_i در محدودیت‌ها، تنظیم میزان استواری در مقابل محافظه‌کاری جواب می‌باشد. پارامتر Γ_0 سطح استوار بودن را برای تابع هدف کنترل می‌کند. اگر $\Gamma_0 = 0$ باشد، اثر تغییرات در ضرایب هزینه به طور کامل لحاظ نمی‌شود؛ اما اگر $\Gamma_0 = |J_0|$ باشد، همه تغییرات ممکن لحاظ می‌شود که محافظه‌کارانه‌ترین حالت می‌باشد. همتای استوار برتسیمس و سیم برای مدل (۱) به شکل زیر است (Bertsimas & Sim, 2006-Bertsimas & Sim, 2004).

$$\text{Min } z = c'x + z_0\Gamma_0 + \sum_{j \in j_0} p_{0j} \quad \text{مدل (۲)}$$

$$\text{S. t: } \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i$$

$$\begin{aligned} z_0 + p_{0j} &\geq d_j y_j && \forall j \in j_0 \\ z_i + p_{ij} &\geq \hat{a}_{ij} y_i && \forall i \neq 0, j \in J_i \\ p_{ij} &\geq 0 && \forall i, j \in J_i \\ y_{ij} &\geq 0 && \forall j \\ z_i &\geq 0 && \forall i \\ -y_j &\leq x_j \leq y_j && \forall j \\ l_j &\leq x_j \leq u_j && \forall j \\ x_i &\in Z && i = 1, \dots, k \end{aligned}$$

در صورتی که عدد سمت راست یعنی b_i در بازه $[b_i - \hat{b}_i, b_i + \hat{b}_i]$ نیز مقدار بگیرد، همتای استوار برتسیمس و سیم برای مدل (۱) به شکل زیر خواهد بود:

$$\text{Min } z = c'x + z_0\Gamma_0 + \sum_{j \in j_0} p_{0j} \quad \text{مدل (۳)}$$

$$\text{S. t: } \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i$$

$$\begin{aligned} z_0 + p_{0j} &\geq d_j y_j && \forall j \in j_0 \\ z_i + p_{ij} &\geq \hat{a}_{ij} y_i && \forall i \neq 0, j \in J_i \\ z_i + p_{i0} &\geq \hat{b}_i && \forall i \\ p_{ij} &\geq 0 && \forall i, j \in J_i \\ y_{ij} &\geq 0 && \forall j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_i &\geq 0 & \forall i \\ -y_j &\leq x_j \leq y_j & \forall j \\ l_j &\leq x_j \leq u_j & \forall j \\ x_i &\in Z & i = 1, \dots, k \end{aligned}$$

۵- طراحی مدل

۵-۱- مدل اسمی تولید برق از سوخته‌های فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر در افق ۱۴۰۴

با توجه به قابل توجه بودن پتانسیل انرژی خورشیدی نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور، این انرژی به عنوان نماینده انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی این مدل در نظر گرفته شده است. در این مدل سعی شده است با استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی و با انتخاب تابع هزینه به عنوان تابع هدف و با توجه به محدودیت‌های ظرفیت نیروگاهی کشور، پتانسیل انرژی خورشیدی (محدودیت منابع)، میزان مصرف انرژی برق در هر یک از مناطق ۱۶ گانه برق (محدودیت تقاضا)، محدودیت مدیریت بار و ضریب اطمینان تأمین انرژی از انرژی خورشیدی (محدودیت فنی)، الگوی بهینه تولید برق از نیروگاه‌های سوخت فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر را ارائه دهیم. همان‌طور که در جدول پیوست مشاهده می‌شود، متغیرهای X_1 تا X_{90} میزان تولید برق از هر یک از نیروگاه‌های سوخت فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر در هر برق منطقه‌ای را نشان می‌دهد.

تابع هدف

در این مدل به منظور به دست آوردن الگوی بهینه تولید برق از انواع نیروگاه‌های سوخت فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر، از تابع هزینه تولید برق در راستای حداقل هزینه تولید انرژی از نیروگاه‌های بخار، گاز، سیکل ترکیبی، برق آبی بزرگ و انرژی خورشیدی استفاده شده است.

$$\text{Min} \left(A \sum_{i=1}^{16} x_i + B \sum_{i=17}^{32} x_i + C \sum_{i=32}^{48} x_i + D \sum_{i=49}^{64} x_i + E \sum_{i=65}^{80} x_i \right)$$

در این مدل ضرایب تابع هدف، شامل هزینه تولید برق از انواع نیروگاه‌های بخار، گاز، سیکل ترکیبی، برق آبی بزرگ و انرژی خورشیدی بوده، و جدول ۱ متوسط هزینه تولید یک کیلووات ساعت برق از هر یک از انواع نیروگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. هزینه یک واحد تولید برق از انواع نیروگاه های فسیلی و خورشیدی
(دلار/کیلووات ساعت)

انواع نیروگاه ها	قیمت
نیروگاه بخاری	۰,۰۳۵۶۷
نیروگاه گازی	۰,۰۶۹۹۳
نیروگاه سیکل ترکیبی	۰,۰۳
نیروگاه برق آبی بزرگ	۰,۰۰۹۶۷
خورشیدی	۰,۲

مأخذ: Arette&zobel, 2011

محدودیت ها

✓ محدودیت پتانسیل نصب شده برای انواع نیروگاه های فسیلی (ظرفیت عملی) و پتانسیل انرژی خورشیدی در کل کشور؛
با فرض اینکه ساختار نیروگاه های حرارتی و آبی کشور در سال ۱۴۰۴ ساختار کنونی باشد، محدودیت ظرفیت نصب شده نیروگاهی کشور بر اساس آمار و اطلاعات موجود در ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹، در این مدل اعمال شده است.

جدول ۲. ظرفیت نصب شده نیروگاهی کشور (مگاوات)

نیروگاه	متغیر	ظرفیت عملی
بخاری	R_1	۱۴۵۵۹,۹
گازی	R_2	۹۹۵۸,۶
سیکل ترکیبی	R_3	۱۱۶۹۷,۸
برق آبی	R_4	۸۴۸۷,۸

مأخذ: ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹

همچنین پتانسیل انرژی خورشیدی مطابق جدول زیر می توان در نظر گرفت.

جدول ۳. مقادیر سمت راست محدودیت پتانسیل انرژی خورشیدی

تراوات ساعت	متغیر	انرژی تجدیدپذیر
۱۹۳۱۶۱	R_5	انرژی خورشیدی

مأخذ: خاکسار آستانه، ۱۳۹۱

$$\sum_{i=1}^{16} x_i \leq R_1$$

$$\sum_{i=17}^{32} x_i \leq R_2$$

$$\sum_{i=33}^{48} x_i \leq R_3$$

$$\sum_{i=49}^{64} x_i \leq R_4$$

$$\sum_{i=65}^{80} x_i \leq R_5$$

✓ محدودیت پتانسیل نصب شده انواع نیروگاه ها در هر برق منطقه ای (ظرفیت عملی) و پتانسیل انرژی خورشیدی در هر برق منطقه ای؛

مقادیر سمت راست محدودیت ظرفیت نصب شده نیروگاهی در هر برق منطقه ای که مقادیر R_6 تا R_{85} را شامل می شود، در جدول مربوط به پتانسیل انرژی تولیدی هر برق منطقه ای بر اساس نوع نیروگاه در پیوست ذکر شده است.

$$x_i \leq R_{i+5} ; i = 1, \dots, 80$$

✓ محدودیت ماکزیمم مصرف برق در هر یک از مناطق ۱۶ گانه برق

بر اساس پیش بینی وزارت نیرو، مصرف انرژی برق در سال ۱۴۰۴ مطابق با جدول زیر می باشد.

جدول ۴. پیش بینی مصرف انرژی برق در سال ۱۴۰۴ (گیگاوات ساعت)

سال	مصرف برق
۱۴۰۴	۳۹۰۴۵۹

مأخذ: سازمان بهره‌وری انرژی ایران

بنابراین مطابق با پیش بینی وزارت نیرو، میزان مصرف برق در افق ۱۴۰۴، ۱۲، ۲ برابر مصرف برق در سال ۱۳۸۹ خواهد بود. مقادیر مربوط به پیش بینی مصرف برق مناطق ۱۶ گانه برق (R_{86}) تا (R_{101}) در جدول مربوطه در پیوست ارجاع داده شده است.

$$\begin{aligned}x_1 + x_{17} + x_{33} + x_{49} + x_{65} &\geq R_{86} \\x_2 + x_{18} + x_{34} + x_{50} + x_{66} &\geq R_{87} \\x_3 + x_{19} + x_{35} + x_{51} + x_{67} &\geq R_{88} \\x_4 + x_{20} + x_{36} + x_{52} + x_{68} &\geq R_{89} \\x_5 + x_{21} + x_{37} + x_{53} + x_{69} &\geq R_{90} \\x_6 + x_{22} + x_{38} + x_{54} + x_{70} &\geq R_{91} \\x_7 + x_{23} + x_{39} + x_{55} + x_{71} &\geq R_{92} \\x_8 + x_{24} + x_{40} + x_{56} + x_{72} &\geq R_{93} \\x_9 + x_{25} + x_{41} + x_{57} + x_{73} &\geq R_{94} \\x_{10} + x_{26} + x_{42} + x_{58} + x_{74} &\geq R_{95} \\x_{11} + x_{27} + x_{43} + x_{59} + x_{75} &\geq R_{96} \\x_{12} + x_{28} + x_{44} + x_{60} + x_{76} &\geq R_{97} \\x_{13} + x_{29} + x_{45} + x_{61} + x_{77} &\geq R_{98} \\x_{14} + x_{30} + x_{46} + x_{62} + x_{78} &\geq R_{99} \\x_{15} + x_{31} + x_{47} + x_{63} + x_{79} &\geq R_{100} \\x_{16} + x_{32} + x_{48} + x_{64} + x_{80} &\geq R_{101}\end{aligned}$$

✓ محدودیت مدیریت بار

در بحث مدیریت بار، نیروگاه های بخاری و سیکل ترکیبی برای تولید انرژی در بار پایه مورد استفاده قرار می گیرند و نیروگاه های گازی و برق آبی برای تأمین انرژی الکتریکی در بار پیک وارد مدار می شوند، نیروگاه های خورشیدی نیز برای تأمین انرژی در بار پایه در این مدل در نظر گرفته شده است. بار پیک سالیانه مطابق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\text{انرژی مورد نیاز سالیانه} \\ \text{پیک بار سالیانه} = \frac{\text{انرژی مورد نیاز سالیانه}}{\text{ضریب بار}} = 8760 *$$

در این رابطه، انرژی مورد نیاز سالیانه از جمع مصرف سالیانه و ۱۰ درصد میزان اتلاف انرژی در شبکه توزیع به دست می آید.

به منظور محاسبه بار پیک در سال ۱۴۰۴، تقریبی از تلفات شبکه توزیع و ضریب بار با توجه به متوسط ۷ ساله این شاخص ها مطابق با جداول (۵) و (۶) در نظر گرفته شده است.

جدول ۵.

تلفات شبکه توزیع طی دوره ۸۹-۱۳۸۳ (درصد)

سال	سهم تلفات شبکه توزیع
۱۳۸۳	۱۶,۴
۱۳۸۴	۱۸,۱
۱۳۸۵	۱۷,۵
۱۳۸۶	۱۷,۹
۱۳۸۷	۱۶
۱۳۸۸	۱۵,۹
۱۳۸۹	۱۴
میانگین	۱۶,۵

مأخذ: ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹

جدول ۶.

ضریب بار سالانه کشور طی دوره ۸۹-۱۳۸۳ (درصد)

سال	ضریب بار سالانه کل کشور
۱۳۸۳	۶۷,۲
۱۳۸۴	۶۶,۱
۱۳۸۵	۶۵,۹
۱۳۸۶	۶۷,۳
۱۳۸۷	۷۱,۲
۱۳۸۸	۶۷
۱۳۸۹	۶۸,۴
میانگین	۶۷,۶

مأخذ: ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹

بنابراین با فرض سهم تلفات ۱۶,۵ درصدی و ضریب بار ۶۷,۶ درصدی، در سال ۱۴۰۴ پیک بار

سالانه مطابق فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \text{بار سالیانه پیک} &= \frac{390459.2 + (10\% * 16.5\% * 390459.2)}{8760 * 67.6\%} = 67.02429 \text{ GW} \\ &= 67024.29 \text{ MW} \\ &= 587132780 \text{ MWH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{102} &\leq \sum_{i=1}^{16} x_i + \sum_{i=33}^{48} x_i + \sum_{i=65}^{80} x_i \\ \sum_{i=17}^{32} x_i + \sum_{i=49}^{64} x_i &\leq R_{103} \end{aligned}$$

✓ محدودیت ضریب اطمینان در استفاده از انرژی خورشیدی

همچنین در محدودیت مربوط به ضریب اطمینان تولید برق از نیروگاه خورشیدی، به منظور برآورد الگوی بهینه عرضه قابل اطمینان برق ناشی از انرژی های تجدیدپذیر، ضریب تولید برق از این نیروگاه ۱۰ در نظر گرفته شده است.

$$10 \sum_{i=65}^{80} x_i \leq R_5$$

✓ محدودیت ضمنی

$$x_i \geq 0 ; i = 1, \dots, 80$$

۲-۵- همتای استوار مدل تولید برق از سوختهای فسیلی و تجدیدپذیر در افق ۱۴۰۴

در این مدل، عدم قطعیت در ضرایب تابع هدف (پارامترهای هزینه) می باشد. همچنین از مدل برتسیمس و سیم جهت استوارسازی مدل استفاده شده است.

$$\text{Min} \left(A \sum_{i=1}^{16} x_i + B \sum_{i=17}^{32} x_i + C \sum_{i=33}^{48} x_i + D \sum_{i=49}^{64} x_i + E \sum_{i=65}^{80} x_i + \Gamma_0 P_0 + \sum_{i=1}^{80} Q_i \right)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{16} x_i \leq R_1$$

$$\sum_{i=17}^{32} x_i \leq R_2$$

$$\sum_{i=33}^{48} x_i \leq R_3$$

$$\sum_{i=49}^{64} x_i \leq R_4$$

$$\sum_{i=65}^{80} x_i \leq R_5$$

$$x_i \leq R_{i+5} \quad ; i = 1, \dots, 80$$

$$x_1 + x_{17} + x_{33} + x_{49} + x_{65} \geq R_{86}$$

$$x_2 + x_{18} + x_{34} + x_{50} + x_{66} \geq R_{87}$$

$$x_3 + x_{19} + x_{35} + x_{51} + x_{67} \geq R_{88}$$

$$x_4 + x_{20} + x_{36} + x_{52} + x_{68} \geq R_{89}$$

$$x_5 + x_{21} + x_{37} + x_{53} + x_{69} \geq R_{90}$$

$$x_6 + x_{22} + x_{38} + x_{54} + x_{70} \geq R_{91}$$

$$x_7 + x_{23} + x_{39} + x_{55} + x_{71} \geq R_{92}$$

$$x_8 + x_{24} + x_{40} + x_{56} + x_{72} \geq R_{93}$$

$$x_9 + x_{25} + x_{41} + x_{57} + x_{73} \geq R_{94}$$

$$x_{10} + x_{26} + x_{42} + x_{58} + x_{74} \geq R_{95}$$

$$x_{11} + x_{27} + x_{43} + x_{59} + x_{75} \geq R_{96}$$

$$x_{12} + x_{28} + x_{44} + x_{60} + x_{76} \geq R_{97}$$

$$x_{13} + x_{29} + x_{45} + x_{61} + x_{77} \geq R_{98}$$

$$x_{14} + x_{30} + x_{46} + x_{62} + x_{78} \geq R_{99}$$

$$x_{15} + x_{31} + x_{47} + x_{63} + x_{79} \geq R_{100}$$

$$x_{16} + x_{32} + x_{48} + x_{64} + x_{80} \geq R_{101}$$

$$R_{102} \leq \sum_{i=1}^{16} x_i + \sum_{i=33}^{48} x_i + \sum_{i=65}^{80} x_i$$

$$\sum_{i=17}^{32} x_i + \sum_{i=49}^{64} x_i \leq R_{103}$$

$$10 \sum_{i=65}^{80} x_i \leq R_5$$

$$P_o + Q_i \geq eAy_i \quad ; i = 1, \dots, 1$$

$$P_o + Q_i \geq eBy_i \quad ; i = 17, \dots, 32$$

$$P_o + Q_i \geq eCy_i \quad ; i = 33, \dots, 48$$

$$P_o + Q_i \geq eDy_i \quad ; i = 49, \dots, 64$$

$$P_o + Q_i \geq eEy_i \quad ; i = 65, \dots, 80$$

$$-y_i \leq x_i \leq y_i \quad ; i = 1, \dots, 80$$

$$x_i, Q_i \geq 0 \quad ; i = 1, \dots, 80$$

در این مدل: $\Gamma_0 =$ سطح محافظه کاری مربوط به پارامترهای هزینه می باشد.

$e =$ درصد انحراف در ضرایب تابع هدف (پارامترهای غیرقطعی هزینه) که پس از مشورت با خبرگان، استادان و کارشناسان سازمان انرژی‌های نو و وزارت نیرو، حداکثر ۲۰٪ منظور شد.
 $P_o, Q_i, y_i =$ متغیرهای استواری هستند که به مدل اضافه شده‌اند.

لازم به ذکر است، دسته محدودیت‌های ۲۶ الی ۳۱ شامل محدودیت‌های استواری می‌باشد که در حین تبدیل مدل اصلی به همتای استوار، به مدل اضافه شده‌اند.

۶- حل مدل

پس از اینکه همتای استوار مدل طراحی شد، اکنون نوبت به حل آن می‌رسد. به علت بالا بودن تعداد پارامترهای غیرقطعی در مدل طراحی شده (۸۰ پارامتر غیرقطعی در تابع هدف)، تعداد سطوح حفاظت، از طریق مشورت با خبرگان به صورت بازه‌ای و در مجموع ۱۱ سطح حفاظت برای مدل در نظر گرفته شد. به ازای هر حالت، سطح حفاظت یک مدل حل می‌گردد که پارامترهای سطوح مختلف حفاظت، اعدادی هستند که در جدول ذیل آورده شده‌اند.

جدول ۷. سطوح حفاظت پارامترهای استواری مدل‌ها

سطوح مختلف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
سطح حفاظت پارامتر	۰	۸	۱۶	۲۴	۳۲	۴۰	۴۸	۵۶	۶۴	۷۲	۸۰	-	-
هزینه در مدل ۳													

برای بررسی تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مساله همتای استوار فرض می‌کنیم که تعداد k ضریب از ماتریس $m \times n$ اسمی A دارای عدم قطعیت باشند. اگر مساله اسمی اصلی دارای m محدودیت و n متغیر باشد، بر اساس مدل برتسیمس و سیم دارای $m+n+k$ محدودیت و $n+k+1$ متغیر می‌باشد (Bertsimas & Sim, 2004).

در جدول زیر آمار مدل شامل تعداد محدودیت‌های اصلی، تعداد محدودیت‌های استواری، تعداد متغیرهای اصلی و تعداد متغیرهای استواری مدل ارائه گردیده است.

جدول ۸. آمار مدل

مدل	
محدودیت‌های اصلی	۱۰۴
محدودیت‌های استواری	۱۶۰
متغیرهای اصلی	۸۰
متغیرهای استواری	۱۶۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۱-۶- جواب‌های حاصله از مدل

همان‌طور که با دقت در جدول ۹ ملاحظه می‌گردد، با افزایش سطح حفاظت مقدار انحراف از بهینه و همچنین تابع هدف بدتر می‌شود که این امر با منطق ریاضیاتی استوار سازی مدل کاملاً سازگار است؛ به نحوی که هرچقدر که تصمیم‌گیرنده بخواهد عدم اطمینان بیشتری را برای مدل در نظر بگیرد، جواب‌های محافظه‌کارانه‌تری را دریافت خواهد نمود. که این افزایش محافظه‌کاری در تابع هدف هزینه به معنی هزینه بیشتر خواهد شد. همچنین واضح است که با افزایش سطح حفاظت مقدار انحراف از بهینه بدتر می‌شود و به عبارتی، مقدار تابع هدف مینیمم، بیشتر می‌شود. در واقع هرچه سطح حفاظت افزایش یافته، مدل مقادیر متغیرها را به نحو سختگیرانه‌تری در بازه مجاز انتخاب کرده و نهایتاً جواب تابع هدف بدتر می‌شود و تغییر سطح محافظه‌کاری می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عایدی تصمیم‌گیرنده داشته باشد. بنابراین سطح حفاظت از اهمیت قابل توجهی حکایت دارد؛ به نحوی که تصمیم‌گیرنده با برقراری توازنی بین سطح ریسک و میزان دستیابی به اهداف، تصمیمی عقلانی اتخاذ نماید.

در این مطالعه، با توجه به نتایج جدول ۹ و همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل که در جدول ۱۱ خلاصه شده است و گویای کاهش ریسک تصمیم با توجه به افزایش سطوح حفاظت می‌باشد و همچنین مشورت با خبرگان، سطح حفاظت ۸ به منظور تحلیل نتایج در نظر گرفته شده است.

جدول ۹. مقادیر تابع هدف مدل استوار ۳ در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

سطوح حفاظت	مقادیر بهینه تابع هدف (دلار)	انحراف از بهینه
۰	2.4×10^4	۰
۸	22.66×10^4	۰.۱۱۱
۱۶	22.76×10^4	۰.۱۵۱
۲۴	22.82×10^4	۰.۱۷۷
۳۲	22.86×10^4	۰.۱۹۲
۴۰	22.87×10^4	۰.۱۹۹
۴۸	22.87×10^4	۰.۱۹۹
۵۶	22.87×10^4	۰.۲
۶۴	22.87×10^4	۰.۲
۷۲	22.87×10^4	۰.۲
۸۰	22.87×10^4	۰.۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۱۰. مقادیر بهینه متغیرهای مدل شماره ۳ (مگاوات ساعت)

X ₁	۲۱۵۴۹۶۰	X ₂₁	۵۷۴۶۴۰۰	X ₄₁	۳۵۲۴۱۴۸	X ₆₁	۲۷۶۲۰۲۸
X ₂	۱۱۳۸۸۰۰۰	X ₂₂	.	X ₄₂	.	X ₆₂	۴۹۸۲۵۳۰۰
X ₃	۱۹۸۸۵۲۰۰	X ₂₃	۷۹۳۶۵۶۰	X ₄₃	۷۵۰۲۹۴۰	X ₆₃	۲۸۳۸۲۴
X ₄	.	X ₂₄	۱۴۵۵۲۹۹۰	X ₄₄	.	X ₆₄	.
X ₅	۵۶۰۶۴۰۰	X ₂₅	.	X ₄₅	۳۱۳۵۰۲۹۰	X ₆₅	.
X ₆	.	X ₂₆	۳۲۴۵۵۸۰	X ₄₆	.	X ₆₆	.
X ₇	۱۱۲۱۲۸۰۰	X ₂₇	.	X ₄₇	۱۳۲۹۷۶۸۰	X ₆₇	۶۶۹۱۹۲۰
X ₈	۶۴۱۶۷۰۰	X ₂₈	۵۶۵۰۲۰	X ₄₈	۶۳۷۷۲۸۰	X ₆₈	۴۳۵۶۹۷۲
X ₉	۱۴۵۰۶۷۶۰	X ₂₉	۱۳۳۵۲۸۷۰	X ₄₉	.	X ₆₉	.
X ₁₀	.	X ₃₀	.	X ₅₀	۳۶۰۰۳۶	X ₇₀	.
X ₁₁	۵۷۵۲۵۶۰	X ₃₁	.	X ₅₁	۱۷۵۲۰۰	X ₇₁	۸۶۵۰۴۰
X ₁₂	۲۱۲۱۶۷۲۰	X ₃₂	۱۴۱۹۱۲۰	X ₅₂	۹۸۳۷۴۸	X ₇₂	۱۳۹۴۴۵۶
X ₁₃	۷۲۲۷۰۰۰	X ₃₃	.	X ₅₃	.	X ₇₃	.
X ₁₄	.	X ₃₄	۲۵۲۱۱۲۸	X ₅₄	۷۶۸۲۵۲	X ₇₄	۲۱۰۲۳۲۰
X ₁₅	۴۰۹۹۶۸	X ₃₅	.	X ₅₅	.	X ₇₅	.
X ₁₆	.	X ₃₆	۱۷۳۲۹۹۱۰	X ₅₆	۸۷۶	X ₇₆	۱۹۲۲۸۶۸۰
X ₁₇	۴۹۵۳۳۴۰	X ₃₇	.	X ₅₇	۱۲۷۸۹۶	X ₇₇	۱۸۴۸۱۰۲۰
X ₁₈	۸۵۸۰۵۳۶	X ₃₈	۷۸۰۲۸۴۸	X ₅₈	.	X ₇₈	.
X ₁₉	۲۸۹۰۸۰	X ₃₉	.	X ₅₉	.	X ₇₉	۳۳۷۱۵۲۸
X ₂₀	۹۲۱۷۲۷۲	X ₄₀	۱۰۱۴۴۰۸۰	X ₆₀	۸۹۸۷۷۶	X ₈₀	۲۲۹۵۲۰۰

ماخذ: یافته‌های تحقیق

۷- شبیه‌سازی

در توضیحی ساده، شبیه‌سازی را می‌توان تولید تکرارهایی از واقعیت‌های موجود در طبیعت بیان کرد. در پاره‌ای موارد، انجام تکرارهایی برای یک واقعیت طبیعی مشکل و یا غیر ممکن می‌باشد و از این رو، شبیه‌سازی یک ابزار کارآمد برای مهندسان و طراحان می‌باشد تا با هزینه ناچیزی تکرارهایی از پدیده‌ها را تولید کنند.

✓ روش شبیه‌سازی مونت کارلو

یکی از روش‌های مناسب برای شبیه‌سازی، روش مونت کارلو^۱ (MCS) می‌باشد که کاربرد زیادی در علوم مختلف دارد. در بحث تجزیه و تحلیل عدم قطعیت نیز روش شبیه‌سازی مونت کارلو دارای اهمیت خاصی بوده و مورد توجه محققان می‌باشد. امروزه روش مونت کارلو نه تنها در تحلیل فرایند-های اتفاقی مورد استفاده قرار می‌گیرد بلکه در سیستم‌های معین نیز کارایی دارد. در عمل شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌سازی رفتار یک سیستم در مدت شبیه‌سازی، می‌توان عملکرد واقعی سیستم

1. Mont Carlo Simulation

را پیش‌بینی نمود. به عبارت دیگر، در روش شبیه‌سازی با مدل‌سازی رفتار سیستم به صورت تصنعی در زمان شبیه‌سازی می‌توان عملکرد سیستم را مورد ارزیابی قرار داد.

در این مطالعه به منظور دستیابی به میزان نقض تابع هدف در هر حالت، مقادیر متغیرهای حاصله از هر بار حل مدل، ثابت لحاظ شدند و پارامترهای نامطمئن در بازه در نظر گرفته شده، به طور تصادفی در قالب تابع توزیع یکنواخت برای ۱۰ هزار بار تولید و شبیه‌سازی شدند. عمل شبیه‌سازی مدل استوار برتسیمس و سیم، به صورت معکوس حل مدل اتفاق خواهد افتاد؛ به طوری که در عمل شبیه‌سازی مقادیر متغیرها که از حل مدل به دست آمده، ثابت فرض می‌شوند و مقادیر پارامترهای نامطمئن به صورت تصادفی در قالب یک توزیع یکنواخت تولید می‌شوند. روش کلی این شبیه‌سازی عبارت است از:

تابع هدف و مقدار آن را در نظر بگیرید و به آن عدد یک، و در غیر این صورت، مقدار صفر را اختصاص دهید.

بنابراین با هر بار شبیه‌سازی، تعداد حالت‌های بدتر شدن تابع هدف مشخص می‌گردد. به طور خلاصه، برای مدل طراحی شده، یک بار برای مدل قطعی و به تعداد سطوح مختلف حفاظت در مدل استوار، عمل شبیه‌سازی انجام می‌گیرد (۸۱ بار).

۷-۱- شبیه‌سازی مدل قطعی با پارامترهای نامطمئن

به منظور نمایش ضرورت استوار نمودن مدل طراحی شده، به شبیه‌سازی مدل قطعی پرداختیم تا متوجه شویم اگر از مدل قطعی استفاده نماییم و پارامترهای نامطمئن در بازه نوسانی خود، تغییر داشته باشند، چند درصد، احتمال بدتر شدن جواب و در نتیجه، ناموجه بودن مدل و نتایج حاصل از آن وجود دارد. برای این منظور مدل قطعی، برای ۱۰ هزار بار شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داد در ۴۹,۰۲ درصد موارد، احتمال بدتر شدن جواب وجود دارد. به این ترتیب، استوار نمودن مدل امری ضروری بوده تا با بهره‌گیری از منطق ریاضیاتی مباحث استواری، ریسک تصمیم‌گیری (احتمال نقض مدل) کاهش یابد.

۷-۲- شبیه‌سازی مدل استوار با پارامترهای نامطمئن

مدل‌های استوار به نحوی عمل می‌کند که سطح ریسک تصمیم در ازای افزایش سطح حفاظت، کاهش می‌یابد. در این قسمت، به منظور اثبات استوارسازی صحیح و همچنین ارائه اطلاعاتی پیرامون چگونگی توازن بین سطح ریسک در سطوح مختلف حفاظت، مدل استوار نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفت.

جدول ذیل بیانگر ۱۰ هزار بار شبیه سازی مدل استوار با پارامترهای نامطمئن بوده که به ازای هر سطح حفاظت صورت گرفته است:

جدول ۱۱.

نتایج ۱۰ هزار بار شبیه سازی مدل استوار به ازای هر سطح حفاظت (درصد)

سطح حفاظت	احتمال بدتر شدن جواب
۰	۴۹,۷۸
۱	۳۳,۰۶
۲	۱۹,۰۲
۳	۱۳,۲۹
۴	۱۱,۱۷
۵	۸,۸۷
۶	۶,۳۷
۷	۴,۸۲
۸	۳,۵۴
۹	۲,۷۲
۱۰	۲
۱۱	۱,۵۸
۱۲	۱,۲
۱۳	۰,۹
۱۴	۰,۵۷
۱۵	۰,۴۳
۱۶	۰,۴۱
۱۷	۰,۲۵
۱۸	۰,۲
۱۹	۰,۰۹
۲۰	۰,۰۶
۲۱	۰,۰۲
۲۲	۰,۰۱
۲۳	۰
۲۴	۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۸- تجزیه و تحلیل نتایج مدل

یکی از مهمترین برنامه‌های سازمان محیط زیست این است که تا پایان برنامه پنجم توسعه حدود ۲۰ درصد از برق کشور از انرژی‌های تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی، زیست توده، زمین گرمایی، برق آبی کوچک، باد و امواج دریا، تولید و در اختیار مصرف کننده قرار گیرد. با این رویکرد تا سال ۱۴۰۴ سهم قابل توجهی از سبد انرژی کشور باید از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود. بنابراین در این مطالعه الگویی بهینه برای گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در افق بلندمدت ۱۴۰۴ ارائه شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، به دلیل اینکه سهم قابل توجهی از پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور را انرژی خورشیدی تشکیل داده و سرمایه گذاری‌های وسیعی جهت بهره‌برداری از این انرژی توسط وزارت نیرو به عمل آمده، این انرژی به عنوان نماینده انرژی‌های تجدیدپذیر در این مدل در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از این الگو نشان داده سهم ۲۷ درصدی نیروگاه بخاری، ۱۷ درصدی نیروگاه گازی، ۲۵ درصدی نیروگاه سیکل ترکیبی، ۱۴ درصدی نیروگاه برق آبی بزرگ و ۱۵ درصدی انرژی خورشیدی است. ۱۵ درصد تولید برق خورشیدی معادل ۶۵,۸ میلیون بشکه نفت خام و برابر تنها ۰,۳ درصد از کل پتانسیل خورشیدی کشور است. از طرفی با ۱۵ درصد تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر به میزان نزدیک به ۴۰ میلیون تن انتشار دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

خروجی‌های الگوی بهینه، مصرف سوخت را برای گاز، گازوئیل و نفت کوره، به ترتیب ۲,۱۲، ۰,۹۸ و ۱,۳۰ برابر مصرف کنونی پیش بینی کرده‌اند. با توجه به اینکه فروش نفت و فرآورده نسبت به گاز راحت‌تر بوده و جایگزین کردن گاز به جای فرآورده برای کشور مقرون به صرفه‌تر می‌باشد، این الگو نشان دهنده افزایش مصرف فرآورده‌ها با شیب بسیار کندتری نسبت به مصرف برق در افق ۱۴۰۴ بوده است. بنابراین خروجی‌های مدل با هدف جایگزینی فرآورده توسط گاز همخوانی لازم را داشته است.

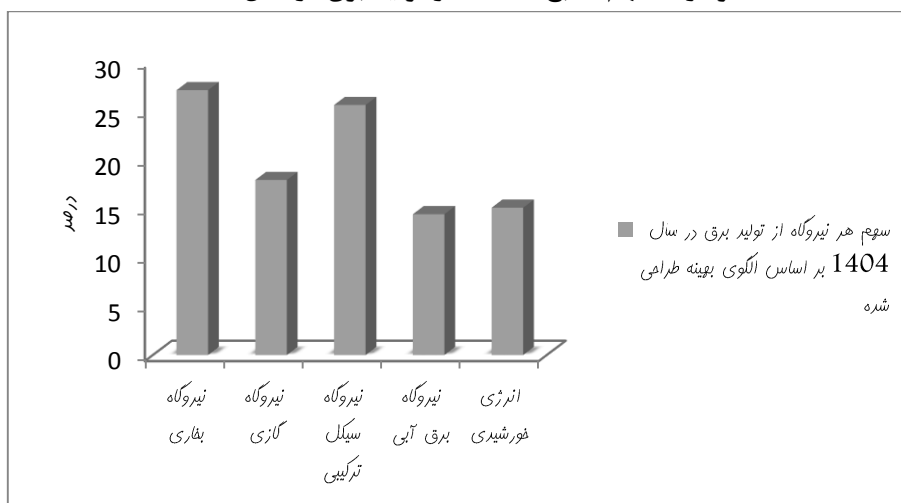
جدول ۱۲. سهم منابع مختلف در تولید برق هر برق منطقه‌ای در سال ۱۴۰۴

انرژی خورشیدی	نیروگاه برق آبی	نیروگاه سیکل ترکیبی	نیروگاه گازی	نیروگاه بخاری	برق منطقه‌ای
۰	۰	۰	۶۹,۶۸	۳۰,۳۱	برق منطقه ای سیستان
۰	۱,۵۷	۱۱,۰۳	۳۷,۵۵	۴۹,۸۳	برق منطقه ای آذربایجان
۲۴,۷۴	۰,۶۴	۰	۱,۰۶	۷۳,۲۵	برق منطقه ای باخر
۱۳,۶۶	۳,۰۸	۵۴,۳۴	۲۸,۹	۰	برق منطقه ای فارس
۰	۰	۰	۵۰,۶۱	۴۹,۳۸	برق منطقه ای غرب
۰	۸,۹۶	۹۱,۰۳	۰	۰	برق منطقه ای گیلان

انرژی خورشیدی	نیروگاه برق آبی	نیروگاه سیکل ترکیبی	نیروگاه گازی	نیروگاه بخاری	برق منطقه‌ای
۴,۳۲	۰	۰	۳۹,۶۵	۵۶,۰۲	برق منطقه ای هرمزگان
۴,۲۸	۰,۰۰۳	۳۱,۲۰	۴۴,۷۶	۱۹,۷۳	برق منطقه ای خراسان
.	۰,۷۰	۱۹,۴۰	۰	۷۹,۸۸	برق منطقه ای مازندران
۳۹,۱۱	۰	۰	۶۰,۶۸	۰	برق منطقه ای سمنان
۰	۰	۵۶,۶	۰	۴۳,۳۹	برق منطقه ای زنجان
۴۵,۸۸	۲,۱۴	۰	۱,۳۴	۵۰,۶۲	برق منطقه ای اصفهان
۲۵,۲۵	۳,۷۷	۴۲,۸۴	۱۸,۲۴	۹,۸۷	برق منطقه ای تهران
۰	۱۰۰	۰	۰	۰	برق منطقه ای خوزستان
۱۹,۴۱	۱,۶۳	۷۶,۵۸	۰	۲,۳۶	برق منطقه ای کرمان
۲۲,۷۴	۰	۶۳,۱۹	۱۴,۰۶	۰	برق منطقه ای یزد

ماخذ: یافته‌های تحقیق

نمودار ۱. سهم منابع مختلف در تولید برق در سال ۱۴۰۴



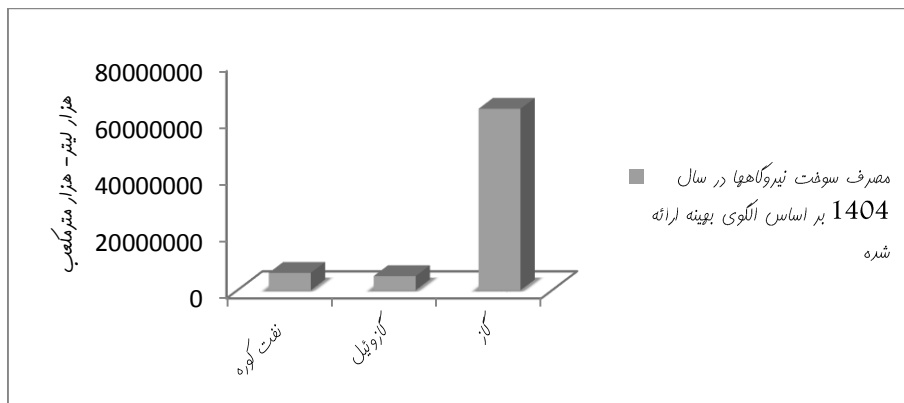
بنابراین با توجه به مقادیر بهینه به دست آمده، پیش بینی می‌شود مصرف سوخت در سال ۱۴۰۴ در نیروگاه‌های مختلف مطابق جداول زیر باشد.

جدول ۱۳. مصرف انواع سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها در سال ۱۴۰۴

نفت کوره (هزار لیتر)	گاز (هزار مترمکعب)	گازوئیل (هزار لیتر)	برق منطقه‌ای
۱۲۴۹۸۷,۷	۱۹۸۳۵۴۲,۴	۲۷۳۲۹۵,۷	برق منطقه ای سیستان
۶۶۰۵۰,۴	۵۴۹۹۰۹۰,۴	۵۰۴۲۱۷,۱	برق منطقه ای آذربایجان
۱۱۵۳۳۴۱,۶	۴۰۸۷۴۰۷,۲	۲۳۸۵۳,۹	برق منطقه ای باختر
۰	۶۴۸۹۶۲۷,۴	۶۹۷۵۷۸,۹	برق منطقه ای فارس
۳۲۵۱۷۱,۲	۲۹۲۵۵۰۹,۶	۳۱۸۲۹۴,۶	برق منطقه ای غرب
۰	۱۶۲۲۹۹۲,۴	۸۵۸۳۱,۳	برق منطقه ای گیلان
۶۵۰۳۴۲,۴	۴۷۳۷۹۱۶,۱	۴۴۰۹۹۵,۹	برق منطقه ای هرمزگان
۳۷۲۱۶۸,۶	۷۹۵۴۸۱۱,۲	۹۱۴۵۶۶	برق منطقه ای خراسان
۸۴۱۳۹۲,۱	۳۶۴۸۸۸۱,۵	۴۴۵۶۳,۳	برق منطقه ای مازندران
۰	۱۰۱۵۸۶۶,۵	۱۷۸۵۰۶,۹	برق منطقه ای سمنان
۳۳۳۶۴۸,۴	۲۷۱۶۸۷۶,۱	۸۴۸۳۳,۴	برق منطقه ای زنجان
۱۲۳۰۵۶۹,۸	۴۴۴۱۴۱۱,۹	۳۹۵۶۲,۸	برق منطقه ای اصفهان
۴۱۹۱۶۶	۱۲۱۵۲۹۳۵,۶	۱۰۸۲۱۵۱,۸	برق منطقه ای تهران
۰	۰	۰	برق منطقه ای خوزستان
۲۳۷۷۸,۱	۲۸۴۸۳۲۱	۱۴۶۴۳۸,۵	برق منطقه ای کرمان
۰	۱۷۷۰۶۵۸,۸	۱۴۸۲۰۱,۶	برق منطقه ای یزد
۶۱۳۵۰۶۹,۹	۶۳۸۹۵۸۴۸,۱	۴۹۸۲۸۹۱,۷	جمع

مأخذ: یافته‌های تحقیق

نمودار ۲. پیش بینی مصرف سوخت نیروگاه‌ها در سال ۱۴۰۴



۹- خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به روند کلی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان، همچنین به منظور کاهش آلودگی، صرفه اقتصادی و درآمدزایی که از جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر نصیب دولت خواهد شد، همراه با رسیدن به اهداف کلان برنامه‌ریزی شده در افق بلندمدت ۱۴۰۴ و از همه مهمتر مصرف ۲,۱۲ برابری برق نسبت به هم‌اکنون در سال ۱۴۰۴، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر امری ضروری است. بنابراین در این مطالعه، الگوی بهینه بلندمدتی برای توسعه این انرژی‌ها در افق ۱۴۰۴ ارائه شده است. نتایج حاکی از سهم ۲۷ درصدی نیروگاه بخار، ۱۷ درصدی نیروگاه گازی، ۲۵ درصدی نیروگاه سیکل ترکیبی، ۱۴ درصدی نیروگاه برق آبی بزرگ و ۱۵ درصدی انرژی خورشیدی است. ۱۵ درصد تولید برق خورشیدی معادل ۶۵,۸ میلیون بشکه نفت خام و برابر تنها ۰,۰۳ درصد از کل پتانسیل خورشیدی کشور است. از طرفی با ۱۵ درصد تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر به میزان نزدیک به ۴۰ میلیون تن انتشار دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد.

همچنین بر اساس پیش‌بینی وزارت نیرو مصرف برق در سال ۱۴۰۴ نسبت به هم‌اکنون، ۲,۱۲ برابر خواهد شد، اما خروجی‌های الگوی بهینه، مصرف سوخت را برای گاز، گازوئیل و نفت کوره، به ترتیب ۲,۱۲، ۰,۹۸ و ۱,۳۰ برابر مصرف کنونی پیش‌بینی کرده‌اند. با توجه به اینکه فروش نفت و فرآورده نسبت به گاز راحت‌تر بوده و جایگزین کردن گاز به جای فرآورده برای کشور مقرون به صرفه‌تر می‌باشد، این الگو نشان دهنده افزایش مصرف فرآورده‌ها با شیب بسیار کندتری نسبت به مصرف برق در افق ۱۴۰۴ بوده است.

۱۰- پیشنهادات

- ✓ متناسب با پیشرفت‌هایی که در سراسر جهان در توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر انجام می‌شود، در کشورمان نیز باید تحولی عظیم در توسعه این منبع انرژی انجام گیرد.
- ✓ انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور ما و در جهان موضوع جدیدی است و در عین حال مراحل توسعه و پیشرفت فناوری‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر متفاوت است. اگر انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورمان به طور موازی و هم‌جهت با سایر کشورهای جهان توسعه نیابد، در حوزه پیشرفت‌های فنی این منبع انرژی جایگاهی نخواهیم یافت و در نتیجه، باعث عقب‌ماندگی فنی و تکنولوژیکی در این زمینه خواهد شد.
- ✓ دانش فنی، تکنولوژی و فناوری استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در داخل کشور باید هر چه سریع‌تر توسعه یابد و رفع محدودیت‌ها در این زمینه، بخصوص در فناوری استفاده از انرژی خورشیدی انجام شود.

- ✓ با توسعه استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر، علاوه بر گسترش تکنولوژی در کشور بخصوص در نقاط دور افتاده، فرصتهای اشتغال بیشتری را نیز می توان ایجاد کرد.
- ✓ با توسعه استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر می توان به میزان قابل توجهی از آلودگی زیست محیطی کاهش داد.
- ✓ کشور ما از جمله کشورهایی است که پتانسیل بسیار بالایی در استفاده از انرژی خورشیدی دارد، بنابراین می باید یک برنامه مستقل در جهت توسعه هر چه بیشتر این منبع در پیش گرفته شود.
- ✓ سایر انرژی های تجدیدپذیر منهای انرژی خورشیدی با توجه به اهداف چندگانه باید به صورت برنامه ریزی بخشی توسعه یابند، اما انرژی خورشیدی که بیشترین پتانسیل را در کشور دارد، می باید به عنوان رقیب اصلی نیروگاه های فسیلی، در توسعه بلندمدت جایگزین برق حرارتی شود.
- ✓ شبکه برق کشور یک شبکه فروشنده برق است، بنابراین به منظور توسعه انرژی های تجدیدپذیر، باید شبکه برق تغییر کرده و به عنوان خریدار برق از نقاط پراکنده، وارد عمل شود.
- ✓ با جایگزین کردن تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر می توان به مقدار قابل توجهی نفت خام در سال صرفه جویی اقتصادی کرد، که با توجه به قیمت قابل توجه کنونی نفت، می توان این مقدار نفت را صادر و درآمد قابل توجهی را از آن دولت نمود.

منابع و مأخذ

- فیض الهی، محمدجواد (۱۳۸۶) بهینه‌سازی استوار و کاربرد آن در مهندسی مالی و صنایع؛ پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت شریف تهران.
- خاکسارآستانه، سمانه (۱۳۹۱) ارائه الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- صوحی، محمود (۱۳۹۱) کاربرد برنامه‌ریزی ریاضی در اقتصاد کشاورزی با تأکید بر استفاده از اکسل؛ انتشارات دانشگاه زابل و نورالعلم.
- مهذب ترابی، سعید (۱۳۹۰) مهندسی مجدد راهبرد مدیریت بخش توزیع کشور با رویکرد بازرگانی برق؛ سازمان بهره‌وری انرژی ایران.
- وزارت نیرو (۱۳۸۹) ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی.
- Arnette, A., Zobel, Ch. (2011) The role of public policy in optimizing renewable energy development in the greater southern Appalachian mountains; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15: 3690-3702.
- Arnette, A. & Zobel, Ch. (2012) An optimization model for regional renewable energy development; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16: 4606-15.
- Ben-Tal, A. & Nemirovski, A. (2000) Robust solution of Linear Programming problem contaminated with uncertain data; *Math. Program*, Vol. 88: 411-24.
- Bertsimas, D. & Sym, M. (2004) The Price of Robustness; *Operations Research*, Vol. 52: 35-53.
- Cai, Y.P.; Huang, G.H.; Ten, Q. & Yang, Z.F. (2009) Planning of community-scale renewable energy management systems in a mixed stochastic and fuzzy environment; *Renewable energy*, Vol. 34: 1833-47.
- Chen, C.; Li, Y.P.; Huang, G.H. & Li, Y.H. (2012) A robust optimization method for planning regional-scale electric power systems and managing carbon dioxide; *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44: 70-84.
- Chen, C.; Li, Y.P.; Huang, G.H. & Zhu, Y. (2012) An inexact robust nonlinear optimization method for energy systems planning under uncertainty; *Renewable energy*, Vol. 47: 55-66.
- Dominguez, R.; Baringo, L. & Conejo, A. j. (2012) Optimal offering strategy for a concentrating solar power plant; *Applied energy*, Vol. 98: 316-25.
- Ferreira, R.S.; Barrose, L.A. & Carvalho, M.M. (2012) Demand response models with correlated price data: A robust optimization approach; *Applied energy*, Vol. 96: 133-49.
- Hites, R.; Desmet, H.; Risse, N.; Salazar-Neumsnn, M. & Vincke, P. (2006) About the application ability of MCDA to some robustness problems; *E. J of Operational Research*, Vol. 174: 322-32.

- Koo, J.; Han, K. & Yoon, E. (2012) Integration of CCS, emissions trading and volatilities of fuel prices into sustainable energy planning, and its robust optimization; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15: 665-72.
- Kleijnen, J.P.C. (2001) Ethical issues in modeling: Some reflections; *E.J of Operational Research*, Vol. 130: 223-30.
- Lin, Q.G. & Huang, G.H. (2009) A dynamic inexact energy systems planning model for supporting greenhouse-gas emission management and sustainable renewable energy development under uncertainty: a case study for the City of Waterloo, Canada; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13: 1836-53.
- Li, Y.F.; Li, Y.P.; Huang, G.H. & Chen, X. (2010) Energy and environmental systems planning under uncertainty: An inexact fuzzy-stochastic programming approach; *Applied Energy*, Vol. 87: 3189-3211.
- Muis, Z.A.; Hashim, H.; Manan, Z.A.; Taha, F.M & Douglas, P.L. (2010) Optimal planning of renewable energy-integrated electricity generation schemes with CO2 reduction target; *Renewable Energy*, Vol. 35: 2562-70.
- Raymond, R.T. (2011) A general source-sink model with inoperability constraints for robust energy sector planning; *Applied energy*, Vol. 88: 3759-3764.
- Shafiullah, G.M.; Amanullah, M.T.O.; Shawkat Ali, A.B.M.; Jarvis, D. & Wolfs, P. (2012) Prospects of renewable energy: a feasibility study in the Australian context; *Renewable energy*, Vol. 39: 183-97.
- Xydis, G. & Koroneos, C. (2012) A linear programming approach for the optimal planning of a future energy system- potential contribution of energy recovery from municipal solid wastes; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16: 369-78.

متغیرهای تصمیم مدل			
X ₁	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق سیستان	X ₄₁	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق مازندران
X ₂	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق آذربایجان	X ₄₂	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق سمنان
X ₃	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق باختر	X ₄₃	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق زنجان
X ₄	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق فارس	X ₄₄	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق اصفهان
X ₅	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق غرب	X ₄₅	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق تهران
X ₆	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق گیلان	X ₄₆	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق خوزستان
X ₇	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق هرمزگان	X ₄₇	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق کرمان
X ₈	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق خراسان	X ₄₈	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق یزد
X ₉	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق مازندران	X ₄₉	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق سیستان
X ₁₀	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق سمنان	X ₅₀	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق آذربایجان
X ₁₁	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق زنجان	X ₅₁	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق باختر
X ₁₂	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق اصفهان	X ₅₂	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق فارس
X ₁₃	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق تهران	X ₅₃	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق غرب
X ₁₄	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق خوزستان	X ₅₄	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق گیلان
X ₁₅	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق کرمان	X ₅₅	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق هرمزگان
X ₁₆	برق تولیدی از نیروگاه بخار در برق یزد	X ₅₆	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق خراسان
X ₁₇	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق سیستان	X ₅₇	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق مازندران
X ₁₈	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق آذربایجان	X ₅₈	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق سمنان
X ₁₉	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق باختر	X ₅₉	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق زنجان
X ₂₀	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق فارس	X ₆₀	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق اصفهان
X ₂₁	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق غرب	X ₆₁	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق تهران
X ₂₂	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق گیلان	X ₆₂	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق خوزستان
X ₂₃	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق هرمزگان	X ₆₃	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق کرمان
X ₂₄	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق خراسان	X ₆₄	برق تولیدی از نیروگاه برق آبی در برق یزد
X ₂₅	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق مازندران	X ₆₅	انرژی خورشیدی تولیدی در برق سیستان
X ₂₆	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق سمنان	X ₆₆	انرژی خورشیدی تولیدی در برق آذربایجان
X ₂₇	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق زنجان	X ₆₇	انرژی خورشیدی تولیدی در برق باختر
X ₂₈	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق اصفهان	X ₆₈	انرژی خورشیدی تولیدی در برق فارس
X ₂₉	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق تهران	X ₆₉	انرژی خورشیدی تولیدی در برق غرب
X ₃₀	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق خوزستان	X ₇₀	انرژی خورشیدی تولیدی در برق گیلان
X ₃₁	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق کرمان	X ₇₁	انرژی خورشیدی تولیدی در برق هرمزگان
X ₃₂	برق تولیدی از نیروگاه گازی در برق یزد	X ₇₂	انرژی خورشیدی تولیدی در برق خراسان
X ₃₃	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق سیستان	X ₇₃	انرژی خورشیدی تولیدی در برق مازندران
X ₃₄	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق آذربایجان	X ₇₄	انرژی خورشیدی تولیدی در برق سمنان
X ₃₅	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق باختر	X ₇₅	انرژی خورشیدی تولیدی در برق زنجان
X ₃₆	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق فارس	X ₇₆	انرژی خورشیدی تولیدی در برق اصفهان
X ₃₇	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق غرب	X ₇₇	انرژی خورشیدی تولیدی در برق تهران
X ₃₈	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق گیلان	X ₇₈	انرژی خورشیدی تولیدی در برق خوزستان
X ₃₉	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق هرمزگان	X ₇₉	انرژی خورشیدی تولیدی در برق کرمان
X ₄₀	برق تولیدی از نیروگاه سیکل ترکیبی در برق خراسان	X ₈₀	انرژی خورشیدی تولیدی در برق یزد

پتانسیل انرژی تولیدی هر برق منطقه ای بر اساس نوع نیروگاه (مگاوات ساعت)				
برق منطقه ای	بخاری	گازی	سیکل ترکیبی	برق آبی
برق منطقه ای سیستان	۲۱۵۴۹۶۰	۵۲۷۳۵۲۰	.	.
برق منطقه ای آذربایجان	۱۱۳۸۸۰۰۰	۱۵۲۳۸۰۲۰	۲۵۲۱۱۲۸	۳۶۰۰۳۶
برق منطقه ای باختر	۱۹۸۸۵۲۰۰	۲۸۹۰۸۰	.	۱۷۵۲۰۰
برق منطقه ای فارس	.	۹۲۱۷۲۷۲	۱۷۳۲۹۹۰۸	۹۸۳۷۴۸
برق منطقه ای غرب	۵۶۰۶۴۰۰	۷۷۷۲۷۴۸	.	.
برق منطقه ای گیلان	۲۱۰۲۴۰۰	۹۱۹۸۰۰	۱۰۴۲۷۰۲۸	۷۶۸۲۵۲
برق منطقه ای هرمزگان	۱۱۲۱۲۸۰۰	۷۹۳۶۵۶۰	.	.
برق منطقه ای خراسان	۶۴۱۶۷۰۰	۱۴۵۵۲۹۸۸	۱۰۱۴۴۰۸۰	۸۷۶
برق منطقه ای مازندران	۱۵۱۸۹۸۴۰	.	۳۵۲۴۱۴۸	۱۲۷۸۹۶
برق منطقه ای سمنان	.	۳۲۴۵۵۸۰	.	.
برق منطقه ای زنجان	۸۷۶۰۰۰۰	۳۴۲۹۵۴۰	۷۵۰۲۹۴۰	.
برق منطقه ای اصفهان	۲۱۲۱۶۷۲۰	۵۶۵۰۲۰	.	۸۹۸۷۷۶
برق منطقه ای تهران	۷۲۲۷۰۰۰	۱۳۳۵۲۸۶۸	۳۱۳۵۰۲۸۸	۲۷۶۲۰۲۸
برق منطقه ای خوزستان	۱۵۹۶۹۴۸۰	۳۷۹۳۰۸۰	.	۶۷۹۹۳۳۶۸
برق منطقه ای کرمان	۴۰۹۹۶۸	.	۱۳۲۹۷۶۸۰	۲۸۳۸۲۴
برق منطقه ای یزد	.	۱۴۱۹۱۲۰	۶۳۷۷۲۸۰	.
جمع	۱۲۷۵۳۹۶۶۸	۸۷۰۰۵۱۹۶	۱۰۲۴۷۴۴۸۰	۷۴۳۵۴۰۰۴

مأخذ: ترازنامه انرژی، ۱۳۸۹

پیش بینی مصارف انرژی الکتریکی مناطق ۱۶ گانه در سال ۱۴۰۴ (گیگاوات ساعت)

برق منطقه ای	مصرف برق در سال ۱۴۰۴
برق سیستان و بلوچستان	۷۱۰۸,۳
برق آذربایجان	۲۲۸۴۹,۷
برق باختر	۲۷۰۴۱,۴
برق فارس	۳۱۸۸۷,۹
برق غرب	۱۱۳۵۲,۸
برق گیلان	۸۵۷۱,۱
برق هرمزگان	۲۰۰۱۴,۴
برق خراسان	۳۲۵۰۹,۱
برق مازندران	۱۸۱۵۸,۸
برق سمنان	۵۳۴۷,۹
برق زنجان	۱۳۲۵۵,۵
برق اصفهان	۴۱۹۰۹,۲
برق تهران	۷۳۱۷۳,۲
برق خوزستان	۴۹۸۲۵,۳
برق کرمان	۱۷۳۶۳
برق یزد	۱۰۰۹۱,۶
کل کشور	۳۹۰۴۵۹,۲

مأخذ: مهذب ترابی، ۱۳۹۰ و محاسبات تحقیق