پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران
سال سوم، شماره ۱۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحات ۱۹۴- ۱۵۹

ارائه یک الگوی بهینه توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از رویکرد بهینه‌یابی استوار

دکتر حسین صادقی،[۱] سمانه خاکسارآستانه[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳

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 منابع سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط‌زیست می‌توانند به اولین گزینه برای تولید انرژی تبدیل شوند. کشور ما نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی ظرفیت‌های متعددی در حوزه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر دارد و همین موضوع باعث شده است که ضرورت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در دستور کار مسئولین قرار گیرد. این مسئله به ضرورت ارائه یک الگوی بهینه جهت توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید می‌کند. از این رو در این مطالعه هدف اصلی ارائه الگوی بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است. در راستای این هدف با انتخاب تابع هزینه به عنوان تابع هدف و با توجه به محدودیت‌های پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر (محدودیت منابع)، میزان مصرف انرژی برق در هر یک از مناطق ۱۶گانه برق (محدودیت تقاضا) و محدودیت ضریب اطمینان تولید انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر (محدودیت فنی)، الگوی بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر طراحی و با استفاده از مدل برنامه‌ریزی استوار در نرم‌افزار *LINGO* حل شد. نتایج حاصل از الگوی بهینه حاکی از تولید ۳۶,۷۱ درصدی انرژی برق آبی کوچک، ۱۸,۲۲ درصدی

۱- عضو هیئت علمی گروه اقتصاد دانشگاه تربیت مدرس
Email: sadeghih@modares.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی دانشگاه تربیت مدرس (نویسنده مسئول)
Email: saman.astaneh@yahoo.com

انرژی باد، ۱۷,۱۹درصدی انرژی زیست توده، ۱۳,۴۳درصدی انرژی زمین گرمایی، ۱۲,۵۳ درصدی انرژی جزرومد و ۱ درصدی انرژی خورشیدی است.

طبقه‌بندی *JEL*: *Q40*، *Q42*، *Q53*

کلمات کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، الگوی بهینه، بهینه‌سازی استوار، ایران

۱- مقدمه

انرژی در حیات اقتصادی جوامع، نقش زیربنایی را ایفا می‌کند، به این معنا که هرگاه انرژی به مقدار کافی و به موقع در دسترس باشد توسعه اقتصادی نیز میسر خواهد بود. نگاهی به گذشته نشان می‌دهد که همواره رقابت‌های بزرگی در سطح جهانی بر سر تصاحب منابع انرژی وجود داشته است، چراکه امنیت ملی و پایداری نظام‌های حکومتی تا حد زیادی در گرو دسترسی به این منابع است. خوشبختانه ایران از نظر دارا بودن منابع و ذخایر متنوع انرژی از ثروتمندترین کشورهای جهان به حساب می‌آید. این منابع درکشور ما با قیمت‌هایی به مراتب نازل‌تر از سایر کشورها و با سهولت بیشتری به مصرف‌کننده عرضه می‌شود. بدون شک این منابع انرژی روزی پایان خواهد پذیرفت. از آنجایی که زندگی عادی انسان امروزی بدون استفاده از منابع انرژی ممکن نیست باید همزمان با توسعه فناوری‌های نوین استحصال انرژی، در روش‌های مصرف بهینه انرژی نیز سرمایه‌گذاری کرد.

انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور ما و در جهان موضوع جدیدی است. همچنین مراحل توسعه و پیشرفت فناوری‌های مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر متفاوت است. برخی همچون انرژی باد و فتوولتائیک به درجه بالایی از تکامل رسیده‌اند و بعضی همچون امواج و نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در مراحل پایین‌تری از پیشرفت هستند، اما همه آنها نیاز به تحقیق و توسعه به منظور بهبود در عملکرد دارند. با توجه به نو بودن فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر، تحقیق و نوآوری در مورد این سامانه‌ها به مراتب از اهمیت بالاتری برخوردار

است به طوری که مسئله تحقیقات جزء لاینفک سامانه‌های تجدیدپذیر بوده و تنها راه غلبه بر موانع توسعه و ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر ایجاد زمینه‌های توسعه تحقیقات، انتقال فناوری و نوسازی فن‌آوری‌ها است.

با وجود اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی پاک، هنوز مطالعه‌ای مبنی بر ارائه الگوی مناسب استفاده و گسترش این نوع از انرژی در ایران صورت نگرفته است. از این رو در این مطالعه تلاش شده الگوی بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیرارائه شود.

این مطالعه در ۱۰ بخش تدوین شده است؛ بعد از مقدمه به بررسی وضعیت انرژی‌های تجدیدپذیر، جایگاه و اهمیت آن در جهان و ایران پرداخته شده است، سپس پیشینه و روش تحقیق مقاله بیان شده است. در بخش ۶ و ۷ مدل طراحی و حل شده و در بخش ۸ شبیه سازی صورت گرفته است. در بخش ۹ تجزیه و تحلیل نتایج بیان شده و در آخر جمع‌بندی و پیشنهادات ارائه شده است.

۲- انرژی‌های تجدیدپذیر، جایگاه و اهمیت آن

سوخت‌های فسیلی بیش از ۸۱ درصد انرژی مصرفی دنیا و بیش از ۹۵ درصد انرژی ایران را تأمین می‌کنند (معینی و همکاران، ۱۳۸۹). ایران دومین عضو اوپک از نظر تولید نفت است و حدود ۸,۶ درصد (۱۲/۳ میلیارد تن) از منابع نفتی جهان و ۱۷ درصد (۲۶/۶ تریلیون مترمکعب) از منابع گازی جهان در ایران واقع شده است. تولید نفت ایران در سال ۲۰۱۱ حدود ۱۴۷۰ میلیون بشکه با ۴,۱ میلیون بشکه در روز بوده است. تولید گاز ۲۸۸,۷ میلیارد بشکه در روز است که در سال ۱۹۹۱ حدود ۷۸,۸ هزار بشکه در روز بوده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۰). این آمار و آمارهای تفصیلی دیگر به وضوح نشان‌دهنده استخراج سریع منابع فسیلی کشور است. از سوی دیگر، کشورهای صنعتی و پیشرفته که مصرف‌کنندگان عمده انرژی در جهان هستند، همواره سعی دارند بر سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی مصرفی خود بیفزایند.

از منظر سیاسی و راهبردی، یکی از مهم‌ترین توانمندی‌ها و نقاط قوت کشور ایران، قدرت آن در بازار انرژی‌های فسیلی جهان است که کشورهای پیشرفته در حال حاضر به آن وابسته‌اند. از سوی دیگر، مسئله گرم شدن جهانی که به حد بحرانی رسیده و دیگر مسایل زیست محیطی سبب شده است استفاده از انرژی‌های فسیلی در معرض انتقادهای بنیادین قرار داشته باشد از این رو، رویکرد جهانی قدرت‌ها، محدود کردن استفاده از انرژی‌های فسیلی است.

هم‌اکنون سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در تأمین انرژی مورد نیاز قاره اروپا حدود ۸,۵ درصد بوده، این در حالی است که کشور در حال توسعه‌ای مانند هند از لحاظ ظرفیت نصب شده کل انرژهای تجدیدپذیر مقام پنجم و از نظر ظرفیت نیروگاه‌های بادی نصب شده مقام چهارم جهان را داراست. سهم کشور ما در این میان تاکنون ۱۰۰ مگاوات ظرفیت تولید و به طور عمده توربین‌های بادی است و اگر نیروگاه‌های آبی متوسط و بزرگ را هم جزو منابع تجدیدپذیر محسوب کنیم، آنگاه این ظرفیت به ۷۷۰۰ مگاوات خواهد رسید (سمینار توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، ضرورت نیل به توسعه پایدار، ۱۳۸۷).

مطابق اعلام سازمان انرژی های نو ایران (۱۳۸۸)، «کاهش آلودگی های زیست محیطی»، «کاهش ذخایر فسیلی»، «صرفه جویی اقتصادی»، «ارتقای امنیت عرضه انرژی»، «تولید پراکنده و کاهش اتکا به شبکه‌های سراسری انتقال انرژی»، «اشتغال‌زایی و توسعه نواحی دور افتاده» و «حل معضل ضایعات شهری» را می‌توان از جمله دلایل برای ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر عنوان کرد.

۳-انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران

طی سال ۱۳۸۸ در ایران ۱۴۱,۵۳ مگاوات انرژی تجدیدپذیر (آبی کوچک، بادی، خورشیدی و بیوگاز) جهت تولید برق به کار گرفته شده و ظرفیت نیروگاه‌های آبی کوچک، بادی، خورشیدی و بیوگاز به ترتیب ۴۸,۹۳، ۹۰,۶، ۰,۱ و ۱,۹ مگاوات بوده

است. در رابطه با انرژی زمین گرمایی دو نیروگاه در استان اردبیل در دست احداث است باشد که تا پایان سال ۱۳۹۳ به بهره برداری خواهند رسید. در ارتباط با استفاده از انرژی امواج هنوز برنامه‌ای در رابطه با بهره برداری از پتانسیل موجود در کشورمان تدوین نشده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

انرژی خورشیدی: در حال حاضر بر اساس آخرین آمار منتشر شده توسط وزارت نیرو در سال ۱۳۸۸ در مجموع ۷۲ هزار کیلووات ساعت برق خورشیدی توسط پروژه‌های ۳۰ کیلووات فتوولتائیک، نیروگاه‌های دربید یزد و سرکویر سمنان و خورشیدی تبریز در کشور تولید شده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

انرژی زیست توده: بر اساس آخرین اطلاعات منتشره توسط وزارت نیرو، دو نیروگاه زیست توده در دو منطقه شهرهای شیراز و مشهد به ترتیب با قابلیت تولید ۷۴۵۵ و ۴۸۷۵ مگاوات ساعت در سال ۱۳۸۸ به بهره برداری رسیده است. توان عملی این دو نیروگاه به ترتیب برابر ۱۰۶۵ و ۶۰۰ کیلووات است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

انرژی آبی کوچک: هم اکنون از کل ظرفیت نیروگاه‌های برق آبی در حال بهره‌برداری، ۰,۶۴درصد به نیروگاه‌های آبی کوچک تعلق داشته و سهم تولید ناویژه این نیروگاه‌ها با احتساب رقم ۴۴,۲۷۱ گیگاوات ساعت در سال ، ۰,۶۱ درصد است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

انرژی بادی: بر اساس آخرین اطلاعات موجود در ترازنامه انرژی وزارت نیرو در سال ۱۳۸۸ در مجموع با ۱۵۸ توربین بادی در استان‌های گیلان، خراسان، آذربایجان شرقی و سیستان و بلوچستان، ظرفیت انرژی بادی در کشور معادل ۹۰۵۵۰ کیلووات، همراه با تولید ناویژه ۲۶۶,۷ گیگاوات ساعت است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

انرژی زمین گرمایی: در حال حاضر وزارت نیرو دو پروژه احداث نیروگاه زمین‌گرمایی مشکین شهر و احداث پکیج ۳-۵ مگاواتی را در دست اجرا دارد. ظرفیت طرح این دو پروژه در مجموع حدود ۵۵ مگاوات و میزان تولید سالانه آنها ۴۱۰ میلیون کیلووات ساعت برآورد شده است (ترازنامه انرژی، ۱۳۸۸).

٤- مطالعات انجام شده

در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تاکنون مطالعه داخلی مبنی بر بهینه‌سازی ترکیب این نوع از انرژی انجام نشده است. اما در این حوزه مطالعات مختلفی در سراسر دنیا با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی استوار صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

آرنت و زوبل[1] (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به ارائه الگویی بهینه برای توسعه منطقه‌ای انرژی‌های تجدیدپذیر در شرق آمریکا پرداخته‌اند. شفیع‌الله و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه خود با عنوان «چشم‌اندازی به انرژی‌های تجدیدپذیر» به بررسی پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند و مناطقی از استرالیا که پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی و بادی دارند را شناسایی کرده‌اند. آنها به ارائه 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 پرداختند. اکسیدیس و کرونس[2] (۲۰۱۲)، 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 برآوردن نیاز انرژی کشور یونان با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر و بالاخص تمرکز در پتانسیل تولید انرژی از مواد زائد جامد شهری (*MSW*)[3] در هر منطقه بوده است. کو و همکاران[4] (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به بررسی یکپارچه‌سازی فناوری *CCS*، تجارت انتشار و بی‌ثباتی قیمت سوخت به منظور برنامه‌ریزی پایدار انرژی با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار[5] پرداخته‌اند. چن و همکاران[6] (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای با عنوان «بهینه‌سازی استوار، تکنیکی برای برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت در مقیاس منطقه‌ای و

1- Arnette & Zobel
2- Xydis & Koroneos
3- Municipal Solid Waste
4- Koo & *et al.*
5- Robust Optimization
6- Chen & *et al.*

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[1] (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای از تکنیک بهینه‌سازی استوار بازه‌ای برای برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی و مدیریت انتشار آلاینده CO_2 در کشور چین از طریق ترکیب دو تکنیک برنامه‌نویسی پارامتری- بازه‌ای و بهینه‌سازی استوار استفاده کرده‌اند. فریرا و همکاران[2] (۲۰۱۲) 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[3] (۲۰۱۲) 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 کرده‌اند و تابع هدف سود را در این مطالعه ماکزیمم کرده‌اند. ریموند[4] (۲۰۱۱) 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[5] (۲۰۱۱) 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[6] (۲۰۱۰)، 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

1- Chen & *et al.*
2- Ferreira & *et al*.
3- Domingues & *et al.*
4- Raymond
5- Arnette & Zobel
6- Muis& *et al*.

و همکاران[1] (۲۰۱۰) در مطالعه خود به طراحی مدلی به منظور برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی تحت شرایط عدم قطعیت پرداختند. کی و همکاران[2] (۲۰۰۹) 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[3] (۲۰۰۹)، 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.

۵- روش تحقیق

برنامه‌ریزی ریاضی یکی از روش‌های بهینه‌سازی است. بهینه‌سازی، هنر و علم تخصیص منابع محدود به بهترین وضعیت ممکن و برنامه‌ریزی خطی یکی از زیرمجموعه‌های برنامه ریزی ریاضی است. پاسخی که از حل یک مسئله برنامه‌ریزی خطی به دست می‌آید، معمولا عبارت است از: یک برنامه یا طرح مشخص که شامل مقادیر بهینه فعالیت‌های انتخاب شده است (صبوحی، ۱۳۹۱).

۵-۱- استواری

استواری[4] به این مفهوم است که خروجی مدل نباید خیلی نسبت به مقادیر دقیق پارامترها و ورودی‌های مدل حساس باشد (کلیجنین[5]، ۲۰۰۱). به بیان دیگر، «استواری» یا «استوار» صفتی است که به ظرفیتی برای پایداری تخمین‌های مبهم و یا نقاط نامشخص به منظور ممانعت از اثرات نامطلوب تنزل ویژگی‌هایی که مورد نظر است و باید آن را حفظ

1- Li & *et al*.
2- Cai& *et al*
3- Lin & Huang
4- Robustness
5-Kleijnen

کرد گفته می‌شود (روی[1]، ۲۰۱۰). مسائل تصمیم‌گیری اغلب به دلیل عدم دقت، تغییرپذیری مستمر و ناتوانی در دیدن وقایع آینده با عدم اطمینان‌هایی موجه هستند. نویسندگان بسیاری بحث استواری را مورد تحقیق و بررسی قرار داده و نتیجه کار آنها منجر به حوزه تحقیقاتی وسیعی شده است (هیتث و همکاران[2]، ۲۰۰۶). بحث استواری مدل از مباحث بسیار مهمی بوده که در «اخلاق در مدلسازی» و متعاقبا «اخلاق در تحقیق در عملیات» مطرح است. در حقیقت اگر مدل‌ها استوار باشند، خطر بکارگیری اشتباه یا استفاده غلط آن بسیار کمتر خواهد شد.

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

اما رویکردی که در سال‌های اخیر برای مقابله با عدم قطعیت داده‌ها، بسط داده شده، بهینه‌سازی استوار است که در آن به بهینه‌سازی هنگام رخ دادن بدترین موارد پرداخته می‌شود و ممکن است منجر به یک تابع هدف کمینه کردن ماکسیمم[3] شود. در این رویکرد به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه‌ای هستیم که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر، با کمی صرفنظر کردن از بهینگی تابع هدف، موجه بودن جواب به دست آمده را تضمین می‌کنیم. البته در مورد عدم قطعیت در ضرایب تابع هدف با کمی صرفنظر کردن از مقدار تابع هدف بهینه به دنبال جوابی هستیم که با احتمال بالایی جواب‌های واقعی بهتر از آن جواب باشند (فیض الهی، ۱۳۸۶).

به طور کلی در برنامه‌ریزی ریاضی قطعی فرض می‌شود داده‌های ورودی به طور مشخص و معادل با مقادیر اسمی است. این نگرش، تأثیر عدم اطمینان را روی کیفیت و

---

1 -Roy

2- Hites & *et al.*

3- Min-Max

موجه بودن مدل مدنظر قرار نمی‌دهد. در حقیقت داده‌هایی که مقادیر متفاوتی را از مقادیر اسمی‌شان اختیار می‌کنند، ممکن است منجر به این مسئله شوند که تعدادی از محدودیت‌ها نقض شوند و جواب بهینه ممکن است مدت طولانی بهینه نمانده یا حتی موجه بودن آن از بین برود. این بحث خواسته‌ای طبیعی را به ذهن متبادر می‌سازد مبنی بر اینکه روش‌های حلی طراحی و ارائه شوند که در مقابل عدم اطمینان داده‌ها ایمنی ایجاد کنند و این روش‌ها، «حل استوار» نامیده می شوند (برتسیمس و سیم[1]، ۲۰۰۴).

اولین گام و تحقیق در این راستا از روی سویستر[2] (۱۹۷۳) ارائه شد که یک مدل برنامه‌ریزی خطی را برای تولید جوابی که برای همه داده‌های متعلق به یک مجموعه محدب موجه است، ارائه کرد. مدل فوق جواب‌هایی ارائه می کند که در قبال بهینگی مسئله اسمی به منظور اطمینان از استواری به شدت محافظه‌کارانه (با محافظه کاری بالا[3]) عمل می‌کند، به این معنی که در این رویکرد برای اطمینان از استوار بودن جواب به مقدار زیادی از بهینگی مسئله اسمی دور می‌شود. در این مدل هر داده ورودی می تواند هر مقداری از یک بازه[4] را بگیرد (بن تال و نمیروفسکی[5]، ۲۰۰۰ و برتسیمس و سیم، ۲۰۰۴). پس از این، گام‌های مهم دیگری به طور مستقل در توسعه تئوری بهینه‌سازی استوار توسط بن تال و نمیروفسکی، ال قاووی و لبرنت، ال قاووی و همکاران صورت گرفته است. در کل مدل‌های استوار به دو دسته کلی مدل‌های برنامه‌ریزی استوار با داده‌های بازه‌ای و مدل‌های استوار سناریویی تقسیم می‌شوند.

مدل‌های برنامه‌ریزی استوار با داده‌های بازه‌ای خود به سه مدل ریاضی «مدل استوار سویستر» (۱۹۷۳)، « مدل استوار بن تال و نمیروفسکی» و « مدل برتسیمس و سیم» تقسیم می‌شوند که مدل «برتسیمس و سیم» مدنظر این مطالعه است.

1- Bertsimas & Sim
2- Soyster
3- Over-Conservative
4- Interval
5- Ben-Tal &Nemirovski

۵-۲- مدل برتسیمس و سیم

در مباحث بهینه‌سازی استوار به ازای هر مسئله اسمی (مسئله حاوی پارامترهای نامطمئن) یک مدل استوار ارائه می‌شود که همتای استوار نام دارد. به عبارت دیگر، با حل مدل همتای استوار جواب‌های استوار برای مسئله اصلی ارائه می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط اسمی زیر (مدل (۱)) با مجموعه n متغیر که kتای اول آن متغیرهای عدد صحیح هستند در نظر گرفته شده است.

مدل (۱)

$$
\begin{aligned}
&Minimize && c'x \\
&subject\ \ to: && Ax \le b \\
&l \le x \le u \\
&x_i \in Z, \quad i = ۱,...,k
\end{aligned}
$$

بدون از دست دادن کلیت مسئله فرض می‌شود، ماتریس A و c شامل داده‌های غیرقطعی و بردار b شامل اعداد قطعی باشد. با فرض اینکه هر کدام از ضرایب $a_{ij}\ j \in N$ به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کراندار $\tilde{a}_{ij}\ j \in N$ مدل می‌شود که در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ مقدار می‌گیرد. هر کدام از $c_j, j \in N$ در بازه $[c_j - d_j, c_j + d_j]$ مقدار می گیرد، به طوری که d_j بیانگر انحراف از ضریب هزینه اسمی c_j است. همچنین تنها فرض برای توزیع ضرایب a_{ij} متقارن بودن آن است. علاوه بر این، اگر عدد سمت راست همانند ضرایب فنی در بازه‌ای متقارن نوسان کند، هیچ خللی به بحث وارد نمی‌شود و مدلسازی استوار آن شبیه ضرایب فنی صورت می‌گیرد. در راستای تحقق استواری جواب، اعداد $\Gamma_i, i = ۰,۱,...,m$ تعریف می‌شود که در بازه $[۰, |J_i|]$ مقدار می‌گیرند به طوری که $|J_i|$ برابر با تعداد داده‌های غیرقطعی در محدودیت iام است. نقش پارامتر Γ_i در محدودیت‌ها، تنظیم میزان استواری در مقابل سطح محافظه‌کاری جواب است. پارامتر $\Gamma_۰$ سطح استوار بودن را برای تابع هدف کنترل می کند. اگر $\Gamma_۰ = ۰$ باشد، اثر تغییرات در ضرایب هزینه به طور کامل لحاظ نمی‌شود اما اگر $\Gamma_۰ = |J_i|$ باشد، همه تغییرات ممکن لحاظ

می شود که محافظه‌کارانه‌ترین حالت است. همتای استوار برتسیمس و سیم برای مدل (۱) به شکل مدل (۲) است (برتسمیس و سیم، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶):

مدل (۲)

$$
\begin{aligned}
&Min\ z = c'x + z_{\cdot}\Gamma_{\cdot} + \sum_{j\in j_{\cdot}} p_{\cdot j} \\
&S.t: \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j\in ji} p_{ij} \le b_i \qquad \forall_i \\
&z_{\cdot} = p_{\cdot j} \ge d_j y_j \qquad \forall_j \in j_{\cdot} \\
&z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij}\, y_i \qquad \forall_i \ne 0, j \in J_i \\
&p_{ij} \ge 0 \qquad \forall_i, j \in J_i \\
&y_{ij} \ge 0 \qquad \forall_j \\
&z_i \ge 0 \qquad \forall_i \\
&-y_i \le x_j \le y_i \qquad \forall_j \\
&l_j \le x_j \le u_j \qquad \forall_j \\
&x_i \in z \qquad i = 1,\dots,k
\end{aligned}
$$

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 مدل (۳) خواهد بود:

مدل (۳)

$$
\begin{aligned}
&Min\ z = c'x + z_{\cdot}\Gamma_{\cdot} + \sum_{j\in j_{\cdot}} p_{\cdot j} \\
&S.t: \sum_j a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j\in ji} p_{ij} \le b_i \qquad \forall_i \\
&z_{\cdot} = p_{\cdot j} \ge d_j y_j \qquad \forall_j \in j_{\cdot} \\
&z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij}\, y_i \qquad \forall_i \ne 0, j \in J_i \\
&z_i + p_{i\cdot} \ge \hat{b}_i \qquad \forall_i \\
&p_{ij} \ge 0 \qquad \forall_i, j \in J_i \\
&y_{ij} \ge 0 \qquad \forall_j \\
&z_i \ge 0 \qquad \forall_i \\
&-y_i \le x_j \le y_i \qquad \forall_j \\
&l_j \le x_j \le u_j \qquad \forall_j \\
&x_i \in z \qquad i = 1,\dots,k
\end{aligned}
$$

٦- طراحی مدل

٦-١- صورت کلی مدل اسمی تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر

در این قسمت با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی خطی و با انتخاب تابع هزینه به عنوان تابع هدف و با توجه به محدودیت‌های پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر (محدودیت منابع)، میزان مصرف انرژی برق در هر یک از مناطق ۱۶گانه برق (محدودیت تقاضا) و محدودیت ضریب اطمینان تولید انرژی از انرژی‌های تجدیدپذیر (محدودیت فنی)، الگوی بهینه استفاده از انرژی-های تجدیدپذیر را ارائه می‌دهیم. شایان ذکر است، بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر در دو مقیاس کلان و خرد امکان‌پذیر است. در مقیاس خرد انرژی‌های تجدیدپذیر به صورت محلی و پراکنده مورد استفاده قرار می‌گیرند و از آنجا که در این مدل هدفگذاری شده که تنها ۱۰ درصد از انرژی برق کشور از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود، این رقم می‌تواند از طریق بهره‌برداری در سطح خرد تأمین شود، بنابراین مسئله مبادله انرژی در مقیاس بالا و به صورت متمرکز مدنظر نبوده و مسئله تبادل انرژی در این مدل وارد نشده است.

همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده است متغیرهای x_1 تا $x_{۹۶}$ میزان تولید برق از هر یک از انرژی‌های تجدیدپذیر در هر برق منطقه‌ای را نشان می‌دهد.

جدول (۱)- متغیرهای تصمیم مدل (۱)

استان	انرژی خورشیدی تولیدی در برق	انرژی زیست توده تولیدی در برق	انرژی زمین گرمایی تولیدی در برق	انرژی باد تولیدی در برق	انرژی برق آبی تولیدی در برق	انرژی جزرومد تولیدی در برق
سیستان	X_1	X_{17}	X_{33}	X_{49}	X_{65}	X_{81}
آذربایجان	X_2	X_{18}	X_{34}	X_{50}	X_{66}	X_{82}
باختر	X_3	X_{19}	X_{35}	X_{51}	X_{67}	X_{83}
فارس	X_4	X_{20}	X_{36}	X_{52}	X_{68}	X_{84}
غرب	X_5	X_{21}	X_{37}	X_{53}	X_{69}	X_{85}
گیلان	X_6	X_{22}	X_{38}	X_{54}	X_{70}	X_{86}
هرمزگان	X_7	X_{23}	X_{39}	X_{55}	X_{71}	X_{87}
خراسان	X_8	X_{24}	X_{40}	X_{56}	X_{72}	X_{88}
مازندران	X_9	X_{25}	X_{41}	X_{57}	X_{73}	X_{89}
سمنان	X_{10}	X_{26}	X_{42}	X_{58}	X_{74}	X_{90}
زنجان	X_{11}	X_{27}	X_{43}	X_{59}	X_{75}	X_{91}
اصفهان	X_{12}	X_{28}	X_{44}	X_{60}	X_{76}	X_{92}
تهران	X_{13}	X_{29}	X_{45}	X_{61}	X_{77}	X_{93}
خوزستان	X_{14}	X_{30}	X_{46}	X_{62}	X_{78}	X_{94}
کرمان	X_{15}	X_{31}	X_{47}	X_{63}	X_{79}	X_{95}
یزد	X_{16}	X_{32}	X_{48}	X_{64}	X_{80}	X_{96}

تابع هدف

در این مدل به منظور به دست آوردن الگوی بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از تابع هزینه تولید برق در راستای حداقل هزینه تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر، شامل؛ انرژی خورشیدی، انرژی زیست توده، انرژی زمین گرمایی، انرژی بادی، انرژی برق آبی کوچک و انرژی جزرومد استفاده شده است.

$$Min\ (A\sum_{i=۱}^{۱۶}x_i + B\sum_{i=۱۷}^{۳۲}x_i + C\sum_{i=۳۲}^{۴۸}x_i + D\sum_{i=۴۹}^{۶۴}x_i + E\sum_{i=۶۵}^{۸۰}x_i + F\sum_{i=۸۱}^{۹۶}x_i)$$

در این مدل ضرایب تابع هدف، شامل هزینه تولید برق از انرژی خورشیدی، زیست توده، زمین گرمایی، باد، برق آبی کوچک و جزرومد بوده است. به دلیل اینکه تجهیزات و فناوری استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور ما اغلب وارداتی بوده، بنابراین هزینه تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در مناطق ۱۶گانه برق منطقه‌ای در کشور یکسان در نظر گرفته شده است. جدول (۲) متوسط هزینه تولید یک کیلووات ساعت برق از هر یک از انرژی‌های تجدیدپذیر را نشان می‌دهد.

جدول (۲): هزینه یک واحد تولید برق از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر (ریال/کیلوات ساعت)

انرژی تجدیدپذیر	قیمت
انرژی خورشیدی	۳۳۳۰
انرژی زیست توده	۱۹۶۰
انرژی زمین گرمایی	۱۷۵۰
انرژی باد	۱۴۳۰
انرژی برق آبی	۱۱۸۰
انرژی جزرومد	۱۴۳۰

ماخذ: سازمان انرژی‌های نو ایران- ۱۳۸۹

محدودیت‌ها

محدودیت پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در کل کشور: یکی از مهم‌ترین محدودیت های در نظر گرفته شده در این مدل، محدودیت پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر در کشور بوده است. بر اساس محاسبات صورت گرفته، پتانسیل انرژی خورشیدی، زیست توده، زمین گرمایی، بادی، برق آبی کوچک و جزرومد را مطابق مقادیر R_1 تا R_6 بر اساس جدول (۳) می‌توان در نظر گرفت.

جدول(۳)- مقادیر سمت راست محدودیت پتانسیل

انرژی تجدیدپذیر	متغیر	تراوات ساعت
انرژی خورشیدی	R_1	۱۹۳۱۶۱
انرژی زیست توده	R_2	۱۹۶,۲
انرژی زمین گرمایی	R_3	۲۴,۷
انرژی بادی	R_4	۲۶۵,۹
انرژی برق آبی	R_5	۱۲,۲
انرژی جزرومد	R_6	۲۶,۱

ماخذ: خاکسارآستانه، ۱۳۹۱

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

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

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

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

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

$$\sum_{i=81}^{96} x_i \le R_6$$

محدودیت پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در هر برق منطقه‌ای: همچنین مقادیر سمت راست محدودیت پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر در هر برق منطقه‌ای که مقادیر $R_{۸}$ تا $R_{۱۰۲}$ را شامل می‌شود، در جدول (۴) مربوط به پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر هر برق منطقه ای آورده شده است.

$$x_i \le R_{i+۶} \; ; \; i = ۱,...,۹۶$$

جدول (٤)- پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر در برق منطقه ای های مختلف (گیگاوات ساعت)

	پتانسیل خورشیدی	پتانسیل زیست توده	پتانسیل زمین گرمایی	پتانسیل باد	پتانسیل برق آبی	پتانسیل جزرومد
سیستان	۲۳۳٦٥۲۲۲	۳۹۸۳,٤	۱۷٥۲	۳٦٥۲۹,۲	۰	٦٤۳۷,۱
آذربایجان	۹٦٤٥٤٦۷	۲۹۸٦۱,۹	۷۲۲۷	۹۱۱۹,۱	۸٦۷,٥	۰
باختر	۸٥۰٦۰۰۹	۱۷٥۰۱	۰	٥٤۳,۱	۳۰٥,۹	۰
فارس	۱۹۳۸۸۷۳۰	۱۸٦۰۲,۱	۳٥۰٤	۱٦۱۹۷,۲	۲۱۱,۹	۱٥٥۳,۰٤
غرب	۸۲٤٤۱۲٥	۱٤۹۲۹,۸	۰	٦۷۲۷,٦	۱۷٥۲,۷	۰
گیلان	۷۲٥۸۹٤	۱۰٥۲۰,٥	۰	۲۹٦۲٦,۳	۳٤۱٦,۳	۱۷۷۲,۲
هرمزگان	۹۲۷٤٤۷۷	۲۱٥۹,٥	۱۷٥۲	۱٤۷۷۸,۱	۰	۸٥٥۳,۱
خراسان	۲٦۲۷۱۷۱۰	۲۰۹٦٤,۷	۱۷٥۲	۷۱۳٥۸,۹	۲۳,۸	۰
مازندران	۲۹٥٥٤۰٤	۲۰۰٦٥,۲	۱۷٥۲	۲۹۱۷	۲۰٦۱,۱	۲٦۷۰,۸
سمنان	۱۲۰۰٥۲۹۷	۱۹٦٥,۱	۰	٦۲۷۱۲,۸	٥۳,۱	۰
زنجان	۳٥٦۱٥۳۱	٥۳۷۷,۷	۰	۱٥٤٥۲,٦	۳۸۱	۰
اصفهان	۱٥۷۰٥۳۱۰	۱۱۹۱٥,۲	۳٥۰٤	۰	۱۲۰٤,٤	۰
تهران	۳۷۱۸۷۰۰	۱۳۷۸۹,٤	۱۷٥۲	۰	٦۱۱,۱	۰
خوزستان	۸۷۳۷۰۰۸	۱٦۷۲٤,٥	۰	۰	۱٤۷۲,٤	٥۱۱٥,۷
کرمان	۲٤٤۲۳۰۲٦	٦۳۷٤,۹	۰	۰	۰	۰
یزد	۱٦٦۳۳۰۹۰	۱٤٦٦,۸	۱۷٥۲	۰	۰	۰
جمع	۱۹۳۱٦۱۰۰۰	۱۹٦۲۰۱,۷	۲٤۷٤۷	۲٦٥۹٦۱,۹	۱۲۳٦۱,۲	۲٦۱۰۱,۰٤

ماخذ: خاکسارآستانه، ۱۳۹۱

محدودیت ماکزیمم مصرف برق در هر یک از مناطق ۱٦ گانه برق: مقادیر سمت راست دسته محدودیت مصرف برق منطقه‌ای ($R_{۱۰۳}$ تا $R_{۱۱۸}$) به عنوان حداکثر

میزان استفاده انرژی الکتریسیته در هر یک ازمناطق ۱۶گانه برق بر اساس آخرین آمار و اطلاعات موجود در ترازنامه انرژی سال ۱۳۸۹و با توجه به فرض ۱۰ درصدی تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است.

$$x_1+x_{17}+x_{33}+x_{49}+x_{65}+x_{81}\geq R_{۱۰۳}$$
$$x_2+x_{18}+x_{34}+x_{50}+x_{66}+x_{82}\geq R_{۱۰۴}$$
$$x_3+x_{19}+x_{35}+x_{51}+x_{67}+x_{83}\geq R_{۱۰۵}$$
$$x_4+x_{20}+x_{36}+x_{52}+x_{68}+x_{84}\geq R_{۱۰۶}$$
$$x_5+x_{21}+x_{37}+x_{53}+x_{69}+x_{85}\geq R_{۱۰۷}$$
$$x_6+x_{22}+x_{38}+x_{54}+x_{70}+x_{86}\geq R_{۱۰۸}$$
$$x_7+x_{23}+x_{39}+x_{55}+x_{71}+x_{87}\geq R_{۱۰۹}$$
$$x_8+x_{24}+x_{40}+x_{56}+x_{72}+x_{88}\geq R_{۱۱۰}$$
$$x_9+x_{25}+x_{41}+x_{57}+x_{73}+x_{89}\geq R_{۱۱۱}$$
$$x_{10}+x_{26}+x_{42}+x_{58}+x_{74}+x_{90}\geq R_{۱۱۲}$$
$$x_{11}+x_{27}+x_{43}+x_{59}+x_{75}+x_{91}\geq R_{۱۱۳}$$
$$x_{12}+x_{28}+x_{44}+x_{60}+x_{76}+x_{92}\geq R_{۱۱۴}$$
$$x_{13}+x_{29}+x_{45}+x_{61}+x_{77}+x_{93}\geq R_{۱۱۵}$$
$$x_{14}+x_{30}+x_{46}+x_{62}+x_{78}+x_{94}\geq R_{۱۱۶}$$
$$x_{15}+x_{31}+x_{47}+x_{63}+x_{79}+x_{95}\geq R_{۱۱۷}$$
$$x_{16}+x_{32}+x_{48}+x_{64}+x_{80}+x_{96}\geq R_{۱۱۸}$$

محدودیت ضریب اطمینان[1] در هر یک از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر:

محدودیت های مربوط به ضریب اطمینان به منظور برآورد الگوی بهینه عرضه قابل اطمینان برق ناشی از انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه شده است. این ضرایب ۰,۱ در ۱۰۰۰۰ساعت برای انرژی خورشیدی و زمین گرمایی، ۰,۵ در ۱۰۰۰۰ ساعت برای انرژی بادی و

1-Reliability Factor

جزرومد، ۰٫۲ در ۱۰۰۰۰ ساعت برای انرژی زیست توده و ۰٫۶۷ در ۱۰۰۰۰ ساعت برای انرژی برق آبی در نظر گرفته شده‌اند (اکسیدیس و کرونس، ۲۰۱۰).

$$۱۰\sum_{i=۱}^{۱۶} x_i \le R_۱$$

$$۵\sum_{i=۱۷}^{۳۲} x_i \le R_۲$$

$$۱۰\sum_{i=۳۳}^{۴۸} x_i \le R_۳$$

$$۲\sum_{i=۴۹}^{۶۴} x_i \le R_۴$$

$$۱.۵\sum_{i=۶۵}^{۸۰} x_i \le R_۵$$

$$۲\sum_{i=۸۱}^{۹۶} x_i \le R_۶$$

محدودیت ضمنی: در نهایت محدودیت نامنفی بودن متغیرهای تصمیم مدل یا به عبارتی محدودیت ضمنی ارائه شده است.

$$x_i \ge ۰ \; ; \; i = ۱,...,۹۶$$

۶-۲- همتای استوار مدل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

در این مطالعه از مدل برتسیمس و سیم جهت استوارسازی و ارائه همتای استوار مدل استفاده شده است. در این مدل عدم قطعیت در ضرایب تابع هدف (پارامترهای هزینه) در نظر گرفته شده است.

$$Min\ (A\sum_{i=1}^{16} x_i + B\sum_{i=17}^{32} x_i + C\sum_{i=32}^{48} x_i + D\sum_{i=49}^{64} x_i + E\sum_{i=65}^{80} x_i + F\sum_{i=81}^{96} x_i + \Gamma.P.\sum_{i=1}^{96} Q_i)$$

$$Subject\ to:$$

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

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

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

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

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

$$x_i \le R_{i+6}\ ;\ i = 1,\ldots,96$$

$$x_1 + x_{17} + x_{33} + x_{49} + x_{65} + x_{81} \ge R_{103}$$

$$x_2 + x_{18} + x_{34} + x_{50} + x_{66} + x_{82} \ge R_{104}$$

$$x_3 + x_{19} + x_{35} + x_{51} + x_{67} + x_{83} \ge R_{105}$$

$$x_4 + x_{20} + x_{36} + x_{52} + x_{68} + x_{84} \ge R_{106}$$

$$x_5 + x_{21} + x_{37} + x_{53} + x_{69} + x_{85} \ge R_{107}$$

$$x_6 + x_{22} + x_{38} + x_{54} + x_{70} + x_{86} \ge R_{108}$$

$$x_7 + x_{23} + x_{39} + x_{55} + x_{71} + x_{87} \ge R_{109}$$

$$x_8 + x_{24} + x_{40} + x_{56} + x_{72} + x_{88} \ge R_{110}$$

$$x_9 + x_{25} + x_{41} + x_{57} + x_{73} + x_{89} \ge R_{111}$$

$$x_{10} + x_{26} + x_{42} + x_{58} + x_{74} + x_{90} \ge R_{112}$$

$$x_{11} + x_{27} + x_{43} + x_{59} + x_{75} + x_{91} \ge R_{113}$$

$$x_{12} + x_{28} + x_{44} + x_{60} + x_{76} + x_{92} \ge R_{114}$$

$$x_{13} + x_{29} + x_{45} + x_{61} + x_{77} + x_{93} \ge R_{115}$$

$$x_{14} + x_{30} + x_{46} + x_{62} + x_{78} + x_{94} \ge R_{116}$$

$$x_{15} + x_{31} + x_{47} + x_{63} + x_{79} + x_{95} \ge R_{117}$$

$$x_{16} + x_{32} + x_{48} + x_{64} + x_{80} + x_{96} \ge R_{118}$$

$$۱۰\sum_{i=۱}^{۱۶} x_i \le R_۱$$

$$۵\sum_{i=۱۷}^{۳۲} x_i \le R_۲$$

$$۱۰\sum_{i=۳۳}^{۴۸} x_i \le R_۳$$

$$۲\sum_{i=۴۹}^{۶۴} x_i \le R_۴$$

$$۱.۵\sum_{i=۶۵}^{۸۰} x_i \le R_۵$$

$$۲\sum_{i=۸۱}^{۹۶} x_i \le R_۶$$

$$P_۰ + Q_i \ge eAy_i \quad ; \ i = ۱,...,۱۶$$
$$P_۰ + Q_i \ge eBy_i \quad ; \ i = ۱۷,...,۳۲$$
$$P_۰ + Q_i \ge eCy_i \quad ; \ i = ۳۳,...,۴۸$$
$$P_۰ + Q_i \ge eDy_i \quad ; \ i = ۴۹,...,۶۴$$
$$P_۰ + Q_i \ge eEy_i \quad ; \ i = ۶۵,...,۸۰$$
$$P_۰ + Q_i \ge eFy_i \quad ; \ i = ۸۱,...,۹۶$$
$$-y_i \le x_i \le y_i \quad ; i = ۱,...,۱۶$$
$$x_i, Q_i \ge ۰ \qquad ; i = ۱,...,۱۶$$

در این مدل:

$\Gamma_۰$، سطح محافظه کاری مربوط به پارامترهای هزینه و e، درصد انحراف در ضرایب تابع هدف (پارامترهای غیرقطعی هزینه) است که پس از مشورت با خبرگان، اساتید و کارشناسان سازمان انرژی‌های نو ایران، این عدد حداکثر ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین $P_۰$، Q_i و y_i متغیرهای استواری هستند که به مدل اضافه شده‌اند.

لازم به ذکر است دسته محدودیت‌های ۲۹ تا ۳۵ شامل محدودیت‌های استواری است که در حین تبدیل مدل اصلی به همتای استوار به مدل اضافه شده‌اند.

۷- حل مدل

به منظور افزایش کارایی محاسباتی، مدل در فضای مجموعه‌ها در نرم‌افزار لینگو لینـک با اکسل برنامه‌نویسی شد. داده‌های ورودی مدل از اکسل فراخوانی و مدل حل شد.

به علت بالا بودن تعداد پارامترهای غیرقطعی در مدل طراحی شده (۹۶ پارامتر غیرقطعی در تابع هدف مدل) تعداد سطوح حفاظت از طریق مشورت با اساتید به صـورت بـازه‌ای در نظر گرفته شدند. در مجموع، ۱۳ سطح حفاظت در نظر گرفته شد. به ازای هر حالت سـطح حفاظت یک مدل حل می‌شود کـه تعـداد پارامترهـای سـطوح مختلـف حفاظـت، اعـدادی هستند که در جدول (۵) آورده شده‌اند.

جدول (۵)- سطوح حفاظت پارامترهای استواری مدل‌ها

سطوح مختلف	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
سطح حفاظت پارامتر هزینه در مدل (۱)	۰	۸	۱٦	۲٤	۳۲	٤۰	٤۸	٥٦	٦٤	۷۲	۸۰	۸۸	۹٦

برای بررسی تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مسئله همتـای اسـتوار فـرض مـی‌کنـیم کـه تعداد k ضریب از ماتریس $m \times n$ اسمی A دارای عدم قطعیـت باشـند. اگـر مسـئله اسـمی اصلی دارای m محدودیت و n متغیر باشد، بر اساس مدل برتسیمس و سیم دارای $m+n+k$ محدودیت و $n+k+1$ متغیر است (برتسیمس و سیم،۲۰۰۴).

در جدول (۶) آمار مـدل شـامل تعـداد محـدویت‌هـای اصـلی، تعـداد محـدودیت‌هـای استواری، تعداد متغیرهای اصلی و تعداد متغیرهای استواری ارائه شده است.

جدول (٦)- آمار مدل

	مدل
محدودیت‌های اصلی	۱۲٥
محدودیت‌های استواری	۱۹۲
متغیرهای اصلی	۹٦
متغیرهای استواری	۱۹۳

ماخذ: یافته‌های تحقیق

۷-۱- جواب حاصله از حل مدل

در جدول (۷) جواب‌های به دست آمده از حل مدل در سطوح مختلف حفاظت ارائه شده است. به بیان دیگر، ابتدا مقادیر تابع هدف و انحراف از بهینه‌ها ارائه شده و در ادامه به ارائه جواب‌های بهینه متغیرها پرداخته می‌شود.

جدول (۷)- مقادیر تابع هدف همتای استوار مدل در حالت‌های مختلف سطح حفاظت

سطوح حفاظت	مقادیر بهینه تابع هدف (ریال)	انحراف از بهینه
۰	۲,۷٤e +۱۳	۰
۸	۳,۰٤e+۱۳	۰,۱۰۸
۱٦	۳,۱۷ e+۱۳	۰,۱٥٦
۲٤	۳,۲٦e+۱۳	۰,۱۸۷
۳۲	۳,۲۸ e+۱۳	۰,۱۹۹
٤۰	۳,۲۹ e +۱۳	۰,۲
٤۸	۳,۲۹ e+۱۳	۰,۲
٥٦	۳,۲۹e+۱۳	۰,۲
٦٤	۳,۲۹e+۱۳	۰,۲
۷۲	۳,۲۹e+۱۳	۰,۲
۸۰	۳,۲۹e+۱۳	۰,۲
۸۸	۳,۲۹ e+۱۳	۰,۲
۹٦	۳,۲۹ e+۱۳	۰,۲

ماخذ: یافته‌های تحقیق

براساس اطلاعات جدول (۷) با افزایش سطح حفاظت مقدار انحراف از بهینه و همچنین تابع هدف بدتر می‌شود که این امر با منطق ریاضیات استوار سازی مدل کاملا سازگار است به نحوی که هر چقدر تصمیم‌گیرنده بخواهد عدم اطمینان بیشتری را برای مدل درنظر بگیرد، جواب‌های محافظه‌کارانه‌تری را دریافت خواهد کرد و این افزایش محافظه‌کاری در تابع هدف هزینه به معنی هزینه بیشتر خواهد بود.

واضح است با افزایش سطح حفاظت، مقدار انحراف از بهینه بدتر می‌شود. به عبارت دیگر، 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 در نهایت جواب تابع هدف بدتر می‌شود، بنابراین تغییر سطح محافظه کاری می تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عایدی تصمیم‌گیرنده داشته باشد. سطح حفاظت از اهمیت قابل توجهی حکایت دارد به نحوی که تصمیم‌گیرنده با برقراری توازنی بین سطح ریسک و میزان دستیابی به اهداف، تصمیمی معقولانه اتخاذ کند.

در این مطالعه با توجه به نتایج جدول (۷) و همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل که در جدول (۹) خلاصه شده و گویای کاهش ریسک تصمیم با توجه به افزایش سطوح حفاظت است. همچنین مشورت با اساتید، سطح حفاظت ۸ به منظور تحلیل نتایج در نظر گرفته شده است.

جدول (۸)- مقادیر بهینه متغیرهای مدل (مگاوات ساعت)

X_1	۰	X_{25}	۰	X_{49}	۳۳۵۳۰۰	X_{73}	۸۵۶۵۵۰
X_2	۰	X_{26}	۰	X_{50}	۲۱۰۲۷۳,٤	X_{74}	۵۳۳۱۷۳,۲
X_3	۰	X_{27}	۰	X_{51}	٥٤۳۱۲	X_{75}	۳۸۱۰۶۰
X_4	۰	X_{28}	٥۲۲۲۹۸,٤	X_{52}	٥۷٦۳۳۳	X_{76}	۱۲۰٤٤۷٤
X_5	۰	X_{29}	۱۰۸۸٤۳۷	X_{53}	۰	X_{77}	٦۱۱۱۳۲,٦
X_6	۰	X_{30}	۰	X_{54}	۰	X_{78}	۱٤۷۲٤۹۰
X_7	۰	X_{31}	٦۳۷٤۹۸,٥	X_{55}	۲۲۸۲۰۲,٤	X_{79}	۰
X_8	۰	X_{32}	۰	X_{56}	۱٥۰۹٥۷۹	X_{80}	
X_9	۰	X_{33}	۰	X_{57}	۰	X_{81}	۰
X_{10}	۰	X_{34}	۰	X_{58}	۱۹۹۰۸٦,۸	X_{82}	۰
X_{11}	۰	X_{35}	۰	X_{59}	۲٤٤۲۰۰	X_{83}	۰

ادامه جدول (۸)- مقادیر بهینه متغیرهای مدل (مگاوات ساعت)

X_{12}	۰	X_{36}	۰	X_{60}	۰	X_{84}	۷۱۵۸۷۷,٦
X_{13}	۰	X_{37}	۰	X_{61}	۰	X_{85}	۰
X_{14}	۰	X_{38}	۰	X_{62}	۰	X_{86}	۰
X_{15}	۱۸۱۵۱۱,۵	X_{39}	۰	X_{63}	۰	X_{87}	۷۱۵۸۷۷,٦
X_{16}	۰	X_{40}	۰	X_{64}	۰	X_{88}	۰
X_{17}	۰	X_{41}	۰	X_{65}	۰	X_{89}	۰
X_{18}	۰	X_{42}	۰	X_{66}	۸٦۷۵٤٦,٦	X_{90}	۰
X_{19}	۹۱۵۲٤۱,۳	X_{43}	۰	X_{67}	۳۰۵۹۸٦,۷	X_{91}	۰
X_{20}	۰	X_{44}	۲۵۰۰۷۷,۹	X_{68}	۲۱۱۹۳۹,٤	X_{92}	۰
X_{21}	۰	X_{45}	۱۷۵۲۰۰۰	X_{69}	۵۳۵۵۱۰	X_{93}	۰
X_{22}	۰	X_{46}	۰	X_{70}	٤۰٤۳۰۰	X_{94}	۸۷۷۷٦۰,۳
X_{23}	۰	X_{47}	۰	X_{71}	۰	X_{95}	۰
X_{24}	۰	X_{48}	٤۷۲٦۲۲,۱	X_{72}	۲۳۸۷۱	X_{96}	۰

ماخذ: یافته‌های تحقیق

۸- شبیه‌سازی

در مدل‌های کلاسیک برنامه‌ریزی خطی برای تست اعتبارسنجی نتایج از تکنیک تحلیل حساسیت استفاده می‌کردند. در روش برنامه‌ریزی استوار برای تست اعتبارسنجی نتایج از روش شبیه‌سازی استفاده می‌کنند که بیان ساده شبیه‌سازی تولید تکرارهایی از واقعیت‌های موجود در طبیعت است. در پاره‌ای موارد، انجام تکرارهای یک واقعیت طبیعی مشکل و یا غیرممکن است از این رو شبیه‌سازی، یک ابزار کارآمد برای مهندسان و طراحان است تا با هزینه ناچیزی تکرارهایی از پدیده‌ها را تولید کنند.

روش شبیه‌سازی مونت کارلو

یکی از روش‌های مناسب برای شبیه‌سازی، روش مونت کارلو (*MCS*) است که کاربرد زیادی در علوم مختلف دارد. در بحث تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، روش شبیه‌سازی مونت کارلو دارای اهمیت خاصی بوده و مورد توجه محققان است.

امروزه روش مونت کارلو نه تنها در تحلیل فرآیندهای 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 را پیش‌بینی کرد. 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 مقاله 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 نظرگرفته شده به طور تصادفی در قالب تابع توزیع یکنواخت برای ۱۰۰۰۰ 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 گرفته، تعداد حالت‌های بدتر شدن تابع هدف را در نظر گرفته می‌شود و به آن عدد یک را اختصاص می‌یابد، در غیر این صورت مقدار صفر لحاظ می‌شود بنابراین با هر بار شبیه‌سازی تعداد حالت‌های بدتر شدن تابع هدف مشخص می‌شود. 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 (۹۶ بار).

۸-۱- شبیه‌سازی مدل قطعی با پارامترهای نامطمئن

به منظور نمایش ضرورت استوار کردن مدل طراحی شده، به شبیه‌سازی مدل قطعی پرداختیم تا متوجه شویم اگر از مدل قطعی استفاده شود 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 ۱۰۰۰۰ بار شبیه‌سازی شد که نتایج نشان داد در ۵۰,۱۸ درصد موارد احتمال بدتر شدن جواب وجود دارد.به این ترتیب استوار کردن مدل امری ضروری بوده تا با بهره‌گیری از منطق ریاضیاتی مباحث استواری، ریسک تصمیم‌گیری (احتمال نقض مدل) کاهش یابد.

۸-۲- شبیه‌سازی مدل استوار با پارامترهای نامطمئن

مدل 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 شبیه سازی قرار گرفت. جدول (۹) بیانگر ۱۰۰۰۰ بار شبیه‌سازی مدل استوار با پارامترهای نامطمئن بوده که به ازای هر سطح حفاظت صورت گرفته است.

جدول (۹)- نتایج ۱۰۰۰۰ بار شبیه‌سازی مدل استوار به ازای هر سطح حفاظت (درصد)

سطح حفاظت	احتمال بدترشدن جواب در مدل	سطح حفاظت	احتمال بدترشدن جواب در مدل
۰	٤۹,۹۱	۱۳	۰,۱۵
۱	۳٦,۸۷	۱٤	۰,۱۲
۲	۲۵,٦	۱۵	۰,۰٤
۳	۱۷,۲٤	۱٦	۰,۰۳
٤	۱۱,۰۲	۱۷	۰,۰۳
۵	٦,۸٤	۱۸	۰,۰۱
٦	۵,۰۱	۱۹	۰
۷	۳,۲۵	۲۰	۰
۸	۱,۸۳	۲۱	۰
۹	۱,٤۹	۲۲	۰
۱۰	۰,۹۱	۲۳	۰
۱۱	۰,۵۷	۲٤	۰
۱۲	۰,۲۱	--	--

ماخذ: یافته‌های تحقیق

۹- تجزیه و تحلیل نتایج

بر اساس نتایج مدل بهینه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر که طبق هدف برنامه چهارم توسعه -با فرض تولید ۱۰ درصد از برق شبکه، طراحی شده است- بیشترین سهم مربوط به تولید انرژی از برق آبی کوچک با **۳۷,۶۱**درصد و بعد از آن تولید برق از انرژی‌های بادی، زیست توده، زمین گرمایی، جزرومد و خورشیدی به ترتیب با **۱۸,۲۲، ۱۷,۱۹، ۱۳,۴۳، ۱۲,۵۳** و **۱** درصد است.

مقادیر بهینه به دست آمده معادل با **۵۶,۰۴** درصد از کل پتانسیل برق آبی کوچک، **۱,۲۶** درصد از پتانسیل باد کشور، **۱,۶۱** درصد از پتانسیل زیست توده کشور، **۱۰** درصد از پتانسیل زمین‌گرمایی کشور و **۸,۸۴**درصد از پتانسیل جزرومد کشور است.

در واقع این ۱۰ درصد تولید برق تجدیدپذیر تنها ۳,۴ درصد از کل پتانسیل این انرژی‌ها در کشور (بدون در نظر گرفتن پتانسیل انرژی خورشیدی) را شامل می‌شود که معادل ۱۰,۵ میلیون بشکه نفت خام در سال و به معنی صرفه‌جویی ۱۰,۵ میلیون بشکه نفت خام و آزاد شدن این تعداد به منظور فروش و کسب درآمد بیشتر دولت است. همچنین با توجه به میانگین ۶۷۸ گرمی تولید دی‌اکسیدکربن به ازای هر کیلووات ساعت برق، این مقدار تولید انرژی تجدیدپذیر به معنی کاهش ۱۲۴۸۷۳۵۰ تن آلاینده CO_2 است.

از طرفی با توجه به پتانسیل بسیار بالایی که کشور در دریافت انرژی خورشیدی دارد، نتایج این الگو تنها سهم یک درصدی استفاده از انرژی خورشیدی را نشان می‌دهد. در واقع این نتیجه الگو به دلیل هزینه بالای تکنولوژی، تجهیزات و فناوری استفاده از انرژی خورشیدی در کشورمان است که باعث شده هزینه تولید یک مگاوات برق خورشیدی در مقابل سایر انرژی‌ها قابل توجه باشد. بنابراین لازمه توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بالاخص انرژی خورشیدی به عنوان نماینده این دسته از انرژی‌ها به دلیل پتانسیل بسیار بالا در کشور، زمینه‌سازی رشد صنعت به منظور بومی‌سازی انواع تجهیزات فتوولتائیک و انواع نیروگاه‌های خورشیدی است تا هزینه تولید برق از این منبع انرژی کاهش یابد.

جدول (۱۰)- سهم مقادیر بهینه انرژی های تجدیدپذیر از ۱۰درصد مصرف برق هر منطقه (درصد)

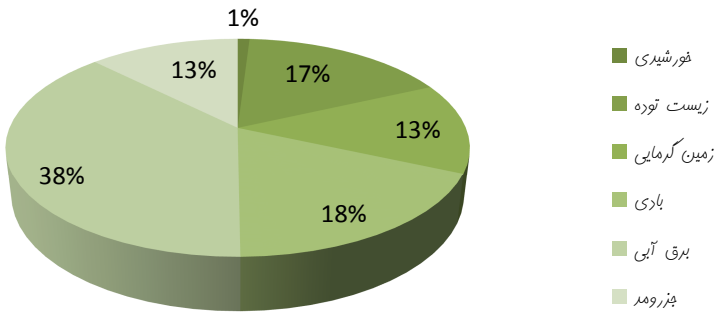
برق منطقه‌ای	انرژی خورشیدی	انرژی زیست توده	انرژی زمین گرمایی	انرژی باد	انرژی برقآبی کوچک	انرژی جزرومد
سیستان	۰	۰	۰	۱۰۰	۰	۰
آذربایجان	۰	۰	۰	۱۹,۵	۸۰,٤۹	۰
باختر	۰	۷۱,۷۵	۰	٤,۲۵	۲۳,۹۸	۰
فارس	۰	۰	۰	۳۸,۳۱	۱٤,۰۹	٤۷,۵۹
غرب	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰
گیلان	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰
هرمزگان	۰	۰	۰	۲٤,۱۷	۰	۷۵,۸۲
خراسان	۰	۰	۰	۹۸,٤٤	۱,۵۵	۰
مازندران	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۰
سمنان	۰	۰	۰	۷۸,۹۲	۲۱,۰۷	۰
زنجان	۰	۰	۰	۳۹,۰۵	٦۰,۹٤	۰
اصفهان	۰	۲٦,٤۲	۱۲,٦۵	۰	٦۰,۹۲	۰
تهران	۰	۳۱,۵۳	۵۰,۷۵	۰	۱۷,۷۰	۰
خوزستان	۰	۰	۰	۰	٦۲,٦۵	۳۷,۳٤
کرمان	۲۲,۱٦	۷۷,۸۳	۰	۰	۰	۰
یزد	۰	۰,۷۱	۹۹,۲۸	۰	۰	۰

ماخذ: یافته های تحقیق

جدول (۱۱)- سهم مقادیر بهینه انرژی‌های تجدیدپذیر از ۱۰ درصد مصرف برق کشور (درصد)

	سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از ۱۰درصد کل مصرف برق کشور
انرژی جزرومد	۱۲,۵۳
انرژی برق آبی کوچک	۳۷,۶۱
انرژی باد	۱۸,۲۲
انرژی زمین گرمایی	۱۳,۴۳
انرژی زیست توده	۱۷,۱۹
انرژی خورشیدی	۱

ماخذ: یافته‌های تحقیق



نمودار (۱)- سهم مقادیر بهینه انرژی های تجدیدپذیر از ۱۰ درصد کل مصرف برق کشور

در برنامه چهارم توسعه مقرر شده است تا پایان سال ۱۳۸۸، ۱۰درصد از تولید برق کشور از انرژی‌های تجدیدپذیر تأمین شود، برای این منظور در این مطالعه مدل بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بر طبق این هدف طراحی شده است.

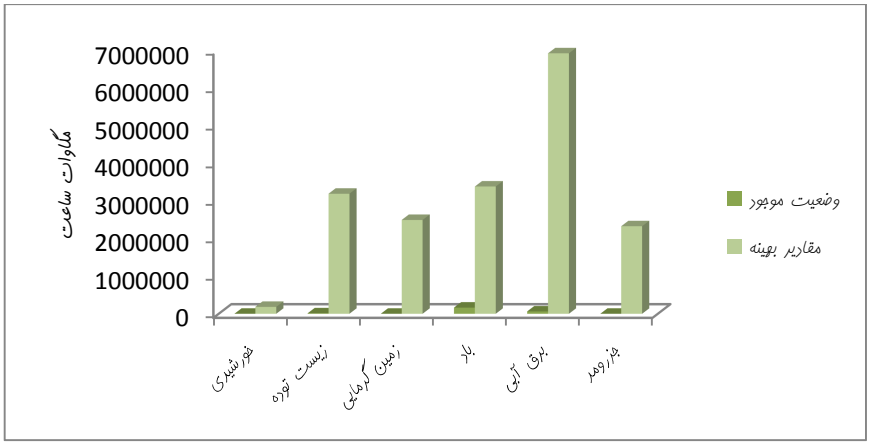
نتایج حاصل از مقایسه مقادیر نتایج حاصل از الگوی بهینه توسعه ۱۰ درصدی انرژی‌های تجدیدپذیر با وضعیت تولید برق از این انرژی‌ها در سال ۱۳۸۹ در جدول (۱۲) نشان داده شده است.

جدول (۱۲)- مقایسه مقادیر خروجی الگوی بهینه و وضعیت موجود (مگاوات ساعت)

انرژی	مقادیر بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	وضعیت موجود استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر
خورشیدی	۱۸۱۵۱۱	۹٤,٦
زیست توده	۳۱٦٦۸۷۳	۱۲۳۳۰
زمین گرمایی	۲٤۷٤۷۰۰	۰
باد	۳۳٥۷۲۸۷	۱٦۲٦۰۰
برق آبی	٦۹۲۸۰۳٤	٦۱٤۰۰
جزرومد	۲۳۰۹٥۱٦	۰
سهم	٪۱۰	٪۰,۲

ماخذ: محاسبات تحقیق و ترازنامه انرژی ۱۳۸۹

طبق نتایج جدول (۱۲) و با توجه به عدم دستیابی به هدف تعیین شده برنامه چهارم توسعه در رابطه با توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین عقب‌ماندگی وضع کنونی تک تک انرژی‌های تجدیدپذیر در مقایسه با مقادیر بهینه الگو، ترکیب کنونی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور در مقایسه با مدل بهینه دارای انحراف است (نمودار (۲)).



نمودار (۲)- مقایسه مقادیر بهینه الگو با وضعیت موجود تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر

۱۰- جمع‌بندی و پیشنهادات

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 سوخت های فسیلی و آلودگی محیط زیست می‌توانند به اولین گزینه برای تولید انرژی تبدیل شوند، چرا که این نوع از انرژی‌ها پاک، ارزان و بالاخص تجدیدپذیر است. کشور ما به دلیل موقعیت جغرافیایی، ظرفیت‌های متعددی در حوزه تولید انرژی های نوین و تجدیدپذیر دارد و همین موضوع باعث شده ضرورت توسعه انرژهای تجدیدپذیر در دستور کار مسئولین قرار گیرد . در کشورهای اروپایی تا سال ۲۰۲۰ برنامه‌ریزی شده است 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 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 مسئله به ضرورت وجود یک الگوی بهینه جهت توسعه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر تأکید می‌کند از این رو در این مطالعه هدف اصلی، ارائه الگوی بهینه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که علاوه بر تأمین برق مورد نیاز، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی می‌شود.

نتایج حاصل از الگوی بهینه (که بر اساس برنامه چهارم توسعه طراحی شده و سهم ۱۰ درصدی از انرژی‌های تجدیدپذیر را در تولید برق کشور نشان می‌دهد) حاکی از تولید ۳۶,۷۱ درصدی انرژی برق آبی کوچک، ۱۸,۲۲ درصدی انرژی باد، ۱۷,۱۹ درصدی انرژی زیست توده، ۱۳,۴۳ درصدی انرژی زمین گرمایی، ۱۲,۵۳ درصدی انرژی جزرومد و یک درصدی انرژی خورشیدی است. مقادیر بهینه به دست آمده معادل با ۵۶,۰۴ درصد از کل پتانسیل برق آبی کوچک، ۱,۲۶ درصد از پتانسیل باد کشور، ۱,۶۱ درصد از پتانسیل زیست توده کشور، ۱۰ از پتانسیل زمین‌گرمایی کشور و ۸,۸۴ درصد از پتانسیل جزرومد کشور است.

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 با سایر کشورهای جهان توسعه نیابد در حوزه پیشرفت‌های فنی این منبع انرژی جایگاهی نخواهیم داشت و در نتیجه باعث عقب‌ماندگی فنی و تکنولوژیکی در این زمینه خواهد شد از این رو:

- دانش فنی و تکنولوژی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در داخل کشور باید هر چه سریع‌تر توسعه یابد و رفع محدودیت‌ها در این زمینه به خصوص در فن‌آوری استفاده از انرژی خورشیدی انجام شود.
- ترکیب بهینه برای توسعه میان‌مدت ۱۰ درصدی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر حاکی از تولید ۳۶,۷۱ درصدی انرژی برق آبی کوچک، ۱۸,۲۲ درصدی انرژی باد، ۱۷,۱۹ درصدی انرژی زیست توده، ۱۳,۴۳ درصدی انرژی زمین گرمایی، ۱۲,۵۳ درصدی انرژی جزرومد و یک درصدی انرژی خورشیدی است.
- با جایگزین کردن تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر می‌توان 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 کسب کرد.
- با توسعه استفاده از انواع انرژی های تجدیدپذیر می‌توان به میزان قابل توجهی از آلودگی زیست محیطی کاهش داد.

۱۱- منابع

الف) فارسی

۱- سازمان انرژی های نو ایران - سانا (۱۳۸۸)، «براورد پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر با استفاده از منابع باد، موج، جریان و جزرومد».
۲- سمینار «توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، ضرورت نیل به توسعه پایدار» (۱۳۸۷)، مرکز تحقیقات استراتژیک، مجمع تشخیص مصلحت نظام.

۳- خاکسارآستانه، سمانه (۱۳۹۱) «ارائه الگوی بهینه توسعه انرژی های تجدیدپذیر در ایران با استفاده از رویکرد استوار»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- معینی، سام؛ جوادی، شهرام دهقان منشادی، محسن، اسماعیلی، رضا (۱۳۸۹)، «برآورد تابش پتانسیل خورشیدی در شهر یزد». *نشریه انرژی ایران*، دوره۱۳، شماره ۱.

۵- صبوحی، محمود (۱۳۹۱)، *کاربرد برنامه‌ریزی ریاضی در اقتصادکشاورزی با تاکید بر استفاده از اکسل*، انتشارات دانشگاه زابل و نورالعلم.

۶- فیض الهی، محمدجواد، (۱۳۸۶)، «بهینه‌سازی استوار و کاربرد آن در مهندسی مالی و صنایع»، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعت شریف تهران.

۷- وزارت نیرو، (۱۳۸۹)، ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی.

۸- وزارت نیرو (۱۳۹۰) ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، معاونت امور برق و انرژی.

ب) انگلیسی

1- Arnette, A., Zobel, Ch. (2012), "An Optimization Model For Regional Renewable Energy Development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 4606-4615.

2- 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, pp. 183-197.

3- 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, PP. 369-378.

4- Koo, J., Han, K., Yoon, E. (2011), "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, PP. 665-672.

5- Chen, C., Li, Y.P., Huang, G.H., Li, Y.H.(2012), "Arobust Optimization Method for Planning Regional-Scale Electric Power Systems and Managing Carbon Dioxid", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 44, pp. 70-84.

6- 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, pp. 55-66.

7- 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, pp. 133-149.

8- Dominguez, R., Baringo, L., Conejo, A.j., (2012), "Optimal Offering Strategy For a Concentrating Solar Power Plant", *Applied Energy*, Vol. 98, pp. 316-325.

9- Raymond, R.Ten., (2011), "A Ggeneral Source-Sink Model With Inoperability Constraints For Robust Energy Sector Planning", *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 3759-3764.

10- 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, PP. 3690-3702.

11- 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, PP. 2562-2570.

12- 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, PP. 3189-3211.

13- 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, PP. 1836-1853.

14- 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, PP. 1833-1847.

15- 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 Oprational Research*, Vol. 174, PP. 322-332.

16- Kleijnen, J.P.C. (2001), "Ethical Issues in Modeling: Some Reflections", *E.J of Oprational Research*, Vol. 130, PP. 223-230.

- Bertsimas, D., Sym, M., (2004), "The Price of Robustness", *Operations Research*. Vol. 52, pp.35-53.

17- Ben-Tal, A., Nemirovski, A., (2000), "Robust Solution of Linear Programming Problem Scontaminated With Uncertain Data", *Math. Program*, Vol. 88, PP. 411-424.