Archive of SID

فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد/ سال ششم/ شماره ۱/ بهار ۱۳۹۸/ صفحات ۲۴۰-۲۱۵

برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تحت شرایط عدم‌حتمیت: مطالعه موردی استان کرمان[۱]

یحیی حاتمی
دانشجوی دکتری اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، yahyahatami@yahoo.com
زین‌العابدین صادقی *
دانشیار اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، Abed_sadeghi@yahoo.com
سید عبدالمجید جلایی
استاد اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، jalaee44@gmail.com
امیر عبداللهی
دانشیار مهندسی برق- قدرت دانشگاه شهید باهنر کرمان، a.abdollahi@uk.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷ /۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۰۱

چکیده

برنامه‌ریزی برای گسترش تولید (GEP)، مساله تعیین استراتژی بهینه برای برنامه‌ریزی ساخت نیروگاه‌های جدید با رعایت محدودیت‌های فنی و اقتصادی است. در طی چند سال اخیر مسایل زیست-محیطی نیز به دغدغه‌های اصلی برنامه‌ریزان نیروگاه‌ها اضافه شده‌است. هدف این مطالعه بررسی مدل برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق چند هدفه برای مطالعه تغییرات در تصمیم‌های تولید و آلودگی دی‌اکسیدکربن تحت عدم حتمیت در تقاضا و عرضه برق می‌باشد. عدم حتمیت‌های تقاضا و ضریب ظرفیت تولیدی برق (عدم حتمیت عرضه‌ی برق) به‌صورت یک مجموعه فازی بیان شد. مدل فازی چند هدفه برای سیستم برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان برای یک دوره‌ی ۱۲ ساله به کار گرفته شد. نتایج مطالعه نشان داد که برای پاسخ به تقاضا و تأمین همزمان اهداف اقتصادی (حداقل‌سازی هزینه‌های تولید) و زیست‌محیطی (حداقل‌سازی هزینه‌های آلودگی دی‌اکسیدکربن) تحت شرایط عدم حتمیت تقاضا و ضریب ظرفیت تولید، بایستی ظرفیت فناوری‌های برق بادی، برق‌آبی و سوخت زغال‌سنگ به ترتیب باید بیشترین گسترش را یابد. این در حالی است که اگر تنها هدف اقتصادی در نظر گرفته شود، برنامه‌ریزی به‌صورت افزایش ظرفیت تولید برق از انرژی زغال‌سنگ خواهد بود. همچنین برای تأمین هدف زیست‌محیطی، به ترتیب بیشترین گسترش در ظرفیت فناوری‌های تجدیدپذیر برق بادی، برق‌آبی و فتوولتائیک در برنامه‌ریزی قرار دارد. تفاوت در نتایج، اهمیت تحلیل یکپارچه و جامع برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق را نمایان می‌سازد. بنابراین، تصمیم‌سازان می‌توانند در چارچوب نگاه همه جانبه اقتصادی و زیست‌محیطی و لحاظ عدم حتمیت‌های طرف تقاضا و عرضه به برنامه‌ریزی پایدار گسترش ظرفیت تولید برق بپردازند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید، عدم حتمیت، آلودگی دی‌اکسید کربن، مدل برنامه‌ریزی فازی چندهدفه.
طبقه‌بندی JEL: C61،D81،Q53،Q31.

---

[۱] مقاله حاضر مستخرج از رساله دکترای نویسنده اول در دانشگاه شهید باهنر کرمان است.
* نویسنده مسئول مکاتبات

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر رشد تقاضای برق، برنامه‌ریزی در زمینه گسترش ظرفیت تولید برق را ضروری ساخته‌است (منسف و همکاران[۱]، ۲۰۱۵؛ اوری و همکاران[۲]، ۲۰۱۷). هدف عمده برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید[۳] برق فراهم کردن یک سیستم بهینه، قابل‌اعتماد، مقرون‌به‌صرفه و باکیفیت می‌باشد (الخاتم و همکاران[۴]، ۲۰۰۵؛ منسف و همکاران، ۲۰۱۵). در واقع رسیدن به این هدف می‌بایستی از طریق تقویت خطوط در دسترس، نیروگاه‌های تولید و یافتن بهترین گزینه تصمیم‌گیری بر مبنای پیش‌بینی تقاضای برق محقق شود (فرانکو و همکاران[۵]، ۲۰۱۴؛ لو و همکاران[۶]، ۲۰۱۶).

امروزه، برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق در فضای رقابتی موجود بسیار پیچیده می‌باشد (پیندا و همکاران[۷]، ۲۰۱۴؛ هینوجسا و ولاسکز[۸]، ۲۰۱۶). پیچیدگی در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق ناشی از سه دلیل عمده است. اول اینکه همواره در برنامه‌ریزی، عدم حتمیت‌هایی از طرف تقاضا و عرضه وجود دارد. دوم اینکه اهداف متفاوت می‌تواند منجر به تغییرات اساسی در برنامه‌ریزی شود و دلیل سوم طول افق برنامه‌ریزی[۹] است که ممکن است نتایج متفاوت را به دنبال داشته باشد. لازم به ذکراست توجه به عدم حتمیت برای مساله گسترش ظرفیت تولید برق از اهمیت زیادی برخوردار است.

در دهه‌های اخیر، با ادامه روند فزاینده میانگین دمای جهانی و تغییرات اقلیم، مسائل زیست‌محیطی به ویژه گازهای گلخانه‌ای که توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود به تدریج توجه همگان را به خود جلب کرده است (تونگ و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۶؛ هووانگ و همکاران[۱۱]، ۲۰۱۷). بیش از یک سوم انتشار گاز دی‌اکسید کربن (CO_2) در جهان، ناشی از تولید برق می‌باشد. از طرفی ایران یکی از کشورهای با منابع انرژی غنی در جهان

[1] Monsef et al.
[2] Oree et al.
[3] Generation capacity expansion planning
[4] El-Khattam et al.
[5] Franco et al.
[6] Lu et al.
[7] Pineda et al.
[8] Hinojosa and Velásquez
[9] Planning horizon
[10] Tong et al.
[11] Huang et al.

www.SID.ir

Archive of SID

می‌باشد که استفاده روزافزون از سوخت‌های فسیلی به عنوان انرژی اولیه و کهنگی فناورهای استفاده از انرژی منجر به ایجاد آلودگی قابل توجهی شده‌است، بنابراین علاوه برتوجه به مسئله عدم حتمیت‌ها، در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی نیز برای مسئله گسترش ظرفیت تولید برق از اهمیت زیادی برخوردار است.

گزارش‌های بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که ایران با تولید ۶۳۳/۷ میلیون تن با سهم ۱/۹ درصد آلودگی جهانی، بیشترین میزان انتشار دی‌اکسید کربن در خاورمیانه را دارد. به‌طوری‌که در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ انتشار دی‌اکسید کربن به میزان ۲/۷ درصد رشد داشته است (بی پی،۲۰۱۸). بر اساس آمار منتشر شده وزارت نیرو متوسط شدت انرژی[1] سوخت‌های فسیلی برای تولید یک مگاوات ساعت برق سال ۱۳۹۶ در کشور ۳۱/۲ میلیون BTU است در حالی این عدد برای استان کرمان حدود ۳۸ میلیون BTU از سوخت‌های فسیلی می‌باشد. همچنین متوسط شدت آلودگی[2] برای هر مگاوات انرژی برق در کشور ۲/۳ تن در حالی برای استان کرمان ۳ تن می‌باشد (گزارش تفصیلی صنعت برق ایران، ۱۳۹۶). این شاخص وابستگی بالای صنعت برق استان کرمان را به سوخت‌های فسیلی نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به این شاخص‌ها مصرف سوخت‌های نیروگاه‌های کشور به نظر می‌رسد توجه به مسئله زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید اهمیت بالایی دارد.

گسترش ظرفیت تولید برق از طریق سرمایه‌گذاری در منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند منجر به کاهش آلودگی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (برد و همکاران[3]، ۲۰۱۰؛ صادقی و همکاران[4]، ۲۰۱۵).

در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق برخی از عدم حتمیت‌ها وجود دارد. این عدم حتمیت‌ها شامل تغییرات جمعیت و در نتیجه تغییر تقاضا، قیمت انرژی، تأخیر ساخت و ساز، سیاست‌های دولت برای حفاظت محیط زیست، ظرفیت تولید، دسترسی به داده‌ها، اندازه‌گیری سیستماتیک، برآورد پارامترها و دیگر عوامل می‌باشد (میزا و همکاران[5]،

[1] Energy Intensity
[2] Carbon Intensity
[3] Beard et al.
[4] Sadeghi et al.
[5] Meza et al.

www.SID.ir

Archive of SID

۲۰۰۷؛ تکنر و همکاران[1]، ۲۰۱۲). بنابراین، توجه به مسئله عدم حتمیت برای مسئله گسترش ظرفیت تولید برق از اهمیت زیادی برخوردار است.

بنابراین، توجه به مسئله عدم حتمیت‌ها و شرایط زیست‌محیطی برای مسئله گسترش ظرفیت تولید برق از اهمیت زیادی برخوردار است. در کل، روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی تصادفی[2]، برنامه‌ریزی ریاضی فازی[3] و برنامه‌ریزی ریاضی فاصله‌ای برای حل مسائلی مربوط به عدم حتمیت مورد استفاده قرار می‌گیرند (ژانگ و همکاران[4]، ۲۰۰۹). برنامه‌ریزی تصادفی یک مدل بهینه‌سازی است که در آن پارامترها دارای توزیع احتمالی مشخص می‌باشند (فو و همکاران[5]، ۲۰۱۷). در برنامه‌ریزی فازی تصمیم‌گیران با ابهام در دانش یا اطلاعات مواجه هستند. بنابراین، پارامترهای تصادفی و محدودیت‌ها به عنوان مجموعه‌های فازی محسوب می‌شوند (زیمرمن[6]، ۲۰۰۱). برنامه‌ریزی فاصله‌ای نیز فقط حدهای بالا و پایین در صورت نبودن اطلاعات کافی با توجه به عدم حتمیت نشان می‌دهد. امروزه، بیشتر مطالعات از برنامه‌ریزی خطی فازی چندهدفه برای لحاظ عدم حتمیت استفاده می‌کنند. اما با توجه به وجود اهداف متعدد و متناقض در مسئله بهینه‌سازی، می‌توان با تعریف توابع عضویت غیرخطی کارایی حل این مسائل را افزایش داد (رانی و همکاران[7]، ۲۰۱۶).

افق برنامه‌ریزی نیز به مانند عدم حتمیت‌ها و اهداف برنامه در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید تأثیرگذار است و منجر به پیچیدگی‌های این برنامه‌ریزی می‌شود. افق برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید ممکن است یک سال، چند سال و یا حتی چندین دهه را در برگیرد. افق زمانی در مطالعات جیروتیتیجارون و سینگ[8] (۲۰۰۸)، بارینگو و کونجو[9] (۲۰۱۲) و پارک و بالدیک[10] (۲۰۱۶) مورد استفاده قرار گرفته است. مدل‌های برنامه‌ریزی بلندمدت اطلاعات بیشتری را به نسبت مدل‌های کوتاه‌مدت در اختیار تصمیم‌گیران قرار می‌دهد. هدف این مطالعه تعیین ظرفیت بهینه تولید برق نیروگاه‌های کشور با در نظر

[1] Tekiner et al.
[2] Stochastic mathematical programming
[3] Fuzzy mathematical programming
[4] Zhang et al.
[5] Fu et al.
[6] Zimmermann
[7] Rani et al.
[8] Jirutitijaroen and Singh
[9] Baringo and Conejo
[10] Park and Baldick

www.SID.ir

Archive of SID

گرفتن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در شرایط قطعیت و مقایسه آن با شرایط کنونی می‌باشد.

این مطالعه در ادامه شامل بخش‌های زیر است: در بخش دوم، مدل چند هدفه برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید فرموله می‌شود. در بخش سوم، یک روش حل برای بهینه‌سازی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی[1] پیشنهاد می‌شود. در بخش چهارم، نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق برای یک مطالعه موردی تحلیل می‌شود. در پایان نیز نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها ارائه خواهد شد.

۲- طراحی الگوی تحقیق

یک بازار برق با دو تولید کننده (نیروگاه) برق[۲] که از فناوری‌های مختلف استفاده می‌کنند را در نظر بگیرید:

جدول (۱): تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم

پارامترها	تعریف
ERCkt	خرید منابع انرژی (دلار آمریکا به ازای هر گیگا ژول)
REkt	هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری از فناوری تولیدی k در دوره زمان t (دلار آمریکا به ازای هر کیلو وات)
AKkt	هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گسترش ظرفیت فناوری تولیدی نوع k در دوره زمان t (دلار آمریکا به ازای هر کیلو وات)
Dt	متغیر تقاضای کل برق در دوره t (مگا وات ساعت)
PCEkt	هزینه آلودگی CO_2 به ازای هر واحد تولید برق
QFkt	میزان تولید برق به ازای هر واحد ظرفیت برای فناوری تولیدی نوع k در دوره زمان t (درصد)
ECkt	مصرف انرژی به ازای هر واحد تولید برق برای فناوری تولیدی نوع k در دوره زمان t (گیگا ژول به کیلو وات ساعت)
bk	نرخ یادگیری فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر (درصد)
le	ضریب بار برق تولیدی
Rc0k	ظرفیت اولیه تولید برق (مگا وات)
Mkt	حداکثر ظرفیت فناوری (مگا وات)
متغیرهای تصمیم	تعریف
COkt	مصرف انواع مختلف انرژی در دوره t (گیگاژول)
CDkt	تولید برق توسط نیروگاه‌های تولیدی نوع k در دوره t (مگا وات)
Xkt	میزان گسترش ظرفیت فناوری تولیدی نوع k در دوره زمان t (مگا وات)
rho	نرخ تنزیل (درصد)

[1] Fuzzy multi-objective non-linear programming

[۲] برای سادگی مدل‌سازی فرض می‌شود که دو نیروگاه وجود دارد.

www.SID.ir

Archive of SID

نیروگاه W از یک منبع تجدیدپذیر (به عنوان مثال باد یا خورشید) استفاده می‌کند، در حالی‌که نیروگاه G با استفاده از یک فناوری سوخت فسیلی معمول (به عنوان مثال توربین گازی از نوع سیکل ترکیبی) برق تولید می‌کند. تولید نیروگاه در هر دوره توسط ظرفیت تولید محدود می‌شود. همان‌طورکه اغلب بنگاه‌ها علاقه¬مند به سرمایه‌گذاری در ظرفیت پشتیبان می‌باشند، فرض می‌شود که تصمیم‌گیری برای ظرفیت انرژی تجدیدپذیر یعنی (Kw) به‌صورت برون‌زا است، در حالی‌که تصمیم‌گیری راهبردی برای ظرفیت تولید مربوط به منابع انرژی متعارف توسط تولیدکننده معمولی صورت می‌گیرد.

از نظر مصرف‌کنندگان، الکتریسیته به عنوان یک محصول همگن محسوب می‌شود برای مثال خصوصیات آن به فناوری مورد استفاده برای تولید آن وابسته نیست. با این حال، هزینه‌های تولیدی به طور عمده به فناوری‌های تولید بستگی دارد. برای مثال در حالی که تولید برق با استفاده از نیروی باد، هزینه‌های ظرفیت بالا اما هزینه‌های متغیر کمی دارد؛ اما تولید برق با استفاده از توربین‌های سیکل‌ترکیبی گازی هزینه‌های ظرفیت کم، و هزینه¬های متغیربسیار بالایی دارد.

هزینه کل تولید بنگاه $k\in\{W,G\}$ در طول دوره زمانی T به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$C(kt) = \mathrm{AK_{kt}}.K_{kt} + \mathrm{RE}_{kt}\sum_{t=1}^{T} CD_{kt,} \qquad (۱)$$

که در آن

$\mathrm{AK_{kt}} > 0$ نشان‌دهنده هزینه سرمایه‌گذاری یک واحد اضافی ظرفیت فناوری در دوره اولیه $t = 0$

K_{kt} نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت تولید بنگاه k ، $\mathrm{RE}_{kt} \geq 0$ نشان‌دهنده هزینه تولید نهایی بنگاه k است.

در نهایت، CD_{kt} مقدار برق فروخته شده توسط نیروگاه k را در دوره $t \in \{1, \ldots, T\}$نشان می‌دهد

برای ایجاد ظرفیت جدید از طریق احداث نیروگاه و تولید برق حداقل دو سرفصل هزینه‌های سرمایه و هزینه‌های سالیانه وجود دارد. سرفصل هزینه‌های سرمایه شامل هزینه‌های زیر می‌شود:

ـ تجهیزات الکتریکی و مکانیکی تولید در نیروگاه؛

ـ ساختمان‌ها و زیربناها؛

www.SID.ir

Archive of SID

ـ کارهای مهندسی و شهرسازی (راه‌سازی، کانال‌کشی و نظایر آن)؛
ـ ماشین افزار (لوکوموتیو، واگن، تراک‌های زغال و خاکستر و ماشین‌آلات و مانند آن)؛
ـ وسایل و ابزار داخلی (دفتر فروش)؛
ـ متفرقه.

سرفصل هزینه سالیانه شامل موارد ذیل است:
ـ سوخت، روغن، آب و انبارهای ذخیره موتور
ـ حقوق و دستمزد که به موارد زیر تقسیم می‌شود.

عملیات: شامل R and M (تعمیرات و نگهداری) . مولدهای اولیه، R and M برای تمام تجهیزات مکانیکی و برقی دیگر نیروگاه و R and M برای تمام ساختمان‌ها و کارهای مهندسی شهرسازی
ـ اجاره‌بهای نیروگاه‌ها، مالیات، نرخ بهره و بیمه
ـ جایگزینی ابزار و تعمیرات
ـ متفرقه (سازمان ملل، ۱۹۷۲)

بنابراین هزینه سرمایه را می‌توان به عنوان هزینه‌های ثابت و هزینه‌های سالیانه را به عنوان هزینه‌های متغیر در نظر گرفت.

در هر دوره، هر دو بنگاه ممکن است در بازارفعال باشند، اما ظرفیت تولید محدودی دارند. در نهایت، از آن‌جایی که در تولید الکتریسیته توسط نیروی باد هزینه‌های متغیر تقریبا صفر هستند. فرض می کنیم که $\mathrm{RE}_w = 0$ است. درمقابل، فرض می‌کنیم که تولید انرژی الکتریسیته با استفاده از توربین گازی سیکل-ترکیبی هزینه‌های متغیر کاملا مثبت را نشان می‌دهد، یعنی $\mathrm{RE}_G > 0$

یک تابع تقاضای تصادفی $\mathrm{D_t}$ که در قیمت‌ها خطی است در نظر می‌گیریم، تابع تقاضای معکوس در دوره t عبارتست از:

$$\mathrm{P_t}(\mathrm{Q_t}) = \begin{cases} 1+\varepsilon_t-\mathrm{Q_t} & \text{if} \quad \mathrm{Q_t} \le 1+\varepsilon_t \\ 0 & \text{if} \quad \mathrm{Q_t} > 1+\varepsilon_t \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن:

$\mathrm{P_t}$:قیمت برق عمده‌فروشی است (که به طور درون‌زا در بازار به دست می‌آید)،

$Q_t = Q_{wt} + Q_{Gt}$.کل برق فروش رفته در دوره t؛

Q_{wt} مقدار برقی که توسط بنگاه W فروخته می‌شود.

Q_{Gt} مقدار فروش برق بنگاه G در دوره t.

www.SID.ir

Archive of SID

متغیر تصادفی، ε_t، برای نوسانات تقاضا محاسبه می‌شود و آن از عوامل فصلی مثل دما ناشی می‌شود. این متغیر تصادفی دارای توزیع یکنواخت است.

تولید الکتریسیته به وسیله باد تحت تاثیر شرایط جوی قرار دارد. جهت ساده‌سازی فرض می‌شود با احتمال $\rho \in [0,1]$ به اندازه‌ی کافی باد می‌وزد و بنگاه W می‌تواند تا ظرفیت نصبی‌اش الکتریسیته تولید کند. با احتمال $1-\rho$ در روز t هیچ بادی نمی‌وزد بنگاه W قادر به تولید الکتریسیته نخواهد بود. بنابراین حداکثر مقدار برق تولید شده توسط بنگاه W در دوره t به صورت زیر می‌باشد:

$$g_{wt} = \begin{cases} K_w & \text{با احتمال } \rho \\ 0 & \text{با احتمال } 1-\rho \end{cases} \quad (۳)$$

بنابراین پارامتر ρ تقریبا ویژگی‌های مرتبط با تولید الکتریسیته به وسیله باد را در خود دارد. (پاینو و همکاران، ۲۰۱۸)[1] .

مسائل بهینه‌سازی چند هدفه (MOP) با برنامه‌های ریاضی با فرم زیر به کار می‌رود:

$$\text{Min } (f_1(x). \dots . f_k(x))^T \quad (۴)$$
$$\text{s.t. } x \in X$$

که در آن:

فرض می‌شود $X \subseteq R^n$ مجموعه‌ای فشرده وغیر تهی می‌باشد. هر تابع هدف $f_i: R^n \longrightarrow R$ برای $i = 1,.,k$ و $k \geq 2$. برای هر بردار تصمیم‌گیری $x \in X$ یک عدد واقعی $f_i(x)$ اختصاص می‌دهد. در MOP توابع هدف به عنوان متضاد فرض شده و احتمالا غیر قابل اندازه‌گیری هستند. از این‌رو هیچ راه‌حل مطلوبی به طور معمول برای این مشکل وجود ندارد. حل MOP به معنی پیدا کردن مجموعه‌ای از راه‌حل‌های کارآمد است، یک راه‌حل $x \in X$ در MOP کارآمد است، اگر و فقط اگر $x' \in X$ دیگری وجود نداشته باشد مانند $f_i(x') \leq f_i(x)$ برای همه‌ی $i = 1,.,k$

هر راه‌حل $x \in X$ که کارآیی را تامین نکند، راه‌حل مغلوب نامیده می‌شود. راه‌حل $x' \in X$ مغلوب راه‌حل‌های دیگر گفته می‌شود اگر $f_i(x') \leq f_i(x)$، برای همه $i = 1,.,k$باشد (این شرط برای حداقل برخی از iها برقرار باشد). مجموعه‌ی X، مجموعه‌ای است از تمام راه‌حل‌های کارآمد برای MOP[2] که به عنوان مجموعه‌ای کارآمد نامیده شده و فرض می‌شود که غیر تهی است (جورنادا و لئون، ۲۰۱۶)[3].

[1] Pinho et al.
[2] Multi objective optimization(MOP)
[3] Jornada & Leon,2016

www.SID.ir

Archive of SID

یکی از توابع هدف مطرح در مدل‌سازی سیستم‌های انرژی، هدف حداقل رساندن ارزش تنزیل شده هزینه‌های سیستم‌های انرژی می‌باشد. که شامل: هزینه حامل‌های انرژی، هزینه‌های متغیر برای تولید برق و هزینه سرمایه‌گذاری برای گسترش ظرفیت فناوری‌های تولید برق می‌باشد. تابع هدف دوم مربوط به حداقل کردن ارزش تنزیل شده هزینه‌های آلودگی دی‌اکسید کربن (CO_2) ناشی از تولید برق است. متغیرهای تصمیم شامل، متغیرهای مربوط به مصرف انرژی مانند زغال‌سنگ، گاز طبیعی، باد، آب، فتوولتائیک، و توسعه ظرفیت تولید برق می‌باشد. محدودیت‌ها نیز تعدادی از نابرابری‌ها برای تعریف روابط بین متغیرهای مختلف تصمیم گیری و شرایط سیستم هستند. لذا داریم:

$$Min\ f_1 = \left[\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} ERC_{kt} * CO_{kt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} RE_{kt} * CD_{kt} + \sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} AK_{kt} * X_{kt}\right] * (1+rho)^t \quad (۵)$$

$$Min\ f_2 = \left[\sum_{k=1}^{K}\sum_{t=1}^{T} PCE_{kt} * CD_{kt}\right] * (1+rho)^t$$

به‌طوری که محدودیت‌ها شامل:

الف) محدودیت‌های تعادلی برای انواع مختلف انرژی:

$$le * CD_{kt} \le [QF_{kt} * (RC0_k + X_{kt})] \quad (۶)$$

$$\text{(ii)}[QF_{kt} * (RC0_k + X_{kt})] * EC_{kt} \le CO_{kt} \qquad \forall\ k,t$$

ب) محدودیت مربوط به توازن عرضه و تقاضای برق:

$$le * \sum_{k=1}^{K} CD_{kt} \ge D_t \qquad \forall\ t \quad (۷)$$

ج) محدودیت مربوط به توسعه ظرفیت:

$$X_{kt} \le M_{kt} \qquad \forall\ k,t \quad (۸)$$

که k نوع فناوری تولید برق است k=1, 2, …, K و t دوره زمانی است که t=1, 2, …, T، پارامترها و متغیرهای تصمیم در جدول (۱) تعریف شده‌است.

اگرچه روش‌های مختلفی برای حل مدل‌های غیرخطی چندهدفه فازی ارائه شده‌اند. اما هنوز هم تبدیل این مدل‌ها به یک فرم قطعی توسط محققان زیادی صورت می‌گیرد (لای

www.SID.ir

Archive of SID

و هوانگ[1]، ۱۹۹۴). از مزیت‌های تبدیل مدل‌های فازی به فرم قطعی این است که به راحتی می‌توان با روش‌ها و الگوریتم‌های ساده بهینه‌یابی آنها را حل کرد. ابتدا مدل خطی چند هدفه فازی در زیر توضیح داده می‌شود:

$$\begin{aligned} &\max Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), ..., Z_n(x)]^T \\ &s.t. \\ &(Ax)_j \le \tilde{b}_j,\ j = 1,2,...,m; x \ge 0 \end{aligned} \qquad (۹)$$

در رابطه (۹)، $Z_i(x)$ بیانگر توابع هدف، $(Ax)_j$ توابع محدودیت و x بردار متغیرهای تصمیم است. $\tilde{b}_j$ مقادیر سمت راست محدودیت‌ها که به‌صورت فازی است و در دامنه $[b_j, b_j + p_j]$ تعریف می‌شود. از این‌رو برای هر تابع هدف یک دامنه ممکن $[Z_i^0, Z_i^1]$ بدست می‌آید که به‌صورت زیر است.

$$\begin{aligned} &Z_i^0 = \max\ Z_i(x) \\ &s.t.\quad (Ax)_j \le b_j,\ \forall j \\ &\qquad x \ge 0; \\ &and \\ &Z_i^1 = \max\ Z_i(x) \\ &s.t.\quad (Ax)_j \le b_j + p_j\ \forall j \\ &\qquad x \ge 0; \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

با Z_i^0 و Z_i^1 بدست آمده برای هر تابع هدف یک تابع عضویت خطی غیرکاهشی ($\mu_{0i}(x)$) به دلیل اینکه هدف حداکثرسازی است، حاصل می‌شود. تابع عضویت برای تابع هدف iام به قرار زیر است:

$$\mu_{0i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if}\quad Z_i(x) > Z_i^1 \\ \frac{(Z_i(x))^2 - (Z_i^0)^2}{(Z_i^1)^2 - (Z_i^0)^2} & \text{if } Z_i^0 \le Z_i(x) \le Z_i^1 \\ 0 & \text{if } Z_i(x) < Z_i^0 \end{cases} \qquad (۱۱)$$

چنانچه تابع هدف حداقل‌سازی باشد، تابع عضویت به‌صورت خطی غیر افزایشی می‌گردد. بدین صورت که اگر $Z_i(x) \succ Z_i^1$ ، مقدار یک و اگر $Z_i(x) \prec Z_i^0$، مقدار صفر برای تابع

[1] Lai and Hwang

www.SID.ir

Archive of SID

عضویت تعیین می‌شود. برای هر یک از محدودیت‌های مدل نیز تابع عضویت خطی غیر افزایشی ($\mu_j(x)$) تعیین می‌شود. چرا که محدودیت‌ها به‌صورت کوچکتر مساوی هستند. از این‌رو تابع عضویت برای تابع هدف jام به‌صورت زیر است:

$$\mu_j(x)=\begin{cases}1 & if \quad (Ax)_j > b_j \\ \dfrac{(b_j+p_j)^2-(Ax)_j{}^2}{p_j{}^2} & if\ b_j \le (Ax)_j \le b_j+p_j \\ 0 & if\ \ (Ax)_j < b_j+p_j\end{cases} \qquad (۱۲)$$

چنانچه تابع محدودیت به‌صورت بزرگتر مساوی باشد، تابع عضویت به‌صورت خطی غیر کاهشی تعیین می‌شود. بدین صورت که اگر $A(x)_j \prec b_j$، مقدار صفر و اگر $A(x)_j \succ b_j + p_j$، مقدار یک برای تابع عضویت انتخاب می‌گردد. پس از تعیین توابع عضویت برای تمامی اهداف و محدودیت‌ها، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی را می‌توان با روش عملگر حداقل به فرم زیر تبدیل کرد.

$$\begin{aligned}&\max \quad \alpha \\ &s.t. \quad 1 \ge \mu_{0i}(x) \ge \alpha, \qquad \forall i = 1,2,...,n \\ &\qquad 1 \ge \mu_j(x) \ge \alpha, \qquad \forall j = 1,2,...,m \\ &\qquad \alpha \in [0,1] and\ \ x \ge 0.\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

از این‌رو میزان بهینه α بدست می‌آید که بیانگر سطح تأمین تمامی توابع عضویت به‌طور همزمان است. هرچه میزان α به یک نزدیکتر باشد باعث نزدیکتر شدن توابع عضویت به سمت یک می‌گردد و نزدیکتر شدن توابع عضویت به سمت یک نشان‌دهنده‌ی تأمین بهتر توابع است. گوو و وو نشان دادند که روش دو مرحله‌ای یک روش کارا برای حل مسائل چندهدفه فازی است. روش دو مرحله‌ای بدین صورت است که ابتدا و در مرحله اول با استفاده از روش عملگر حداقل میزان α بهینه (α^*) برای تمامی توابع عضویت حاصل می‌شود. سپس در مرحله دوم با استفاده از روش عملگر متوسط، میزان بهینه میانگین α ($\overline{\alpha}$) بدست می‌آید. به گونه‌ای که برای هر تابع هدف و محدودیت یک α متفاوت و در دامنه α^* تا یک در نظر گرفته می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

$$\begin{aligned} \max \quad & \overline{\alpha} = \frac{1}{n+m}\sum_{k=1}^{n+m}\alpha_k \\ s.t. \quad & 1 \geq \mu_{0i}(x) \geq \alpha_i \geq \alpha^* \geq 0, \qquad \forall i = 1,2,...,n \\ & 1 \geq \mu_j(x) \geq \alpha_j \geq \alpha^* \geq 0, \qquad \forall j = 1,2,...,m \\ & x \geq 0. \end{aligned} \tag{۱۴}$$

در ادامه روش توافقی که از ترکیب دو روش، دو مرحله‌ای و عملگر میانگین بدست می‌آید. که توسط وو و گوو[1] (۲۰۰۱) پیشنهاد شده، مطرح می‌شود. در این روش در مرحله اول با استفاده از روش عملگر حداقل میزان α بهینه (α^*) برای تمامی توابع استخراج می‌شود. سپس توابع عضویت برای تمامی توابع هدف و محدودیت به‌صورت تابعی از متغیرهای تصمیم (x) محاسبه می‌گردد. در مرحله دوم تابع هدف به‌صورت میانگین توابع عضویت با توجه به محدودیت‌های مدل حداکثر می‌گردد. لازم به ذکر است که برای مرحله دوم در اینجا برخلاف روش دو مرحله‌ای و روش عملگر حداقل یک α پارامتریک برای تمامی توابع عضویت در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در دو روش قبل α به عنوان یک متغیر شناخته می‌شد که حداکثرسازی آن مد نظر بود. از این‌رو، مقادیر متفاوتی برای آن می‌توان در نظر گرفت که بین بازه صفر و α^* قرار دارند. این مقادیر α مختلف، توابع عضویت مختلفی را ایجاد می‌کند که بسته به ترجیحات تصمیم گیرندگان انتخاب می‌شوند.

$$\begin{aligned} \max \quad & \widetilde{\alpha} = \frac{1}{n+m}\left[\sum_{i=1}^{n}\mu_{0i}(x) + \sum_{j=1}^{m}\mu_j(x)\right] \\ s.t. \quad & 1 \geq \mu_{0i}(x) \geq 0, \qquad \forall i = 1,2,...,n \\ & 1 \geq \mu_j(x) \geq 0, \qquad \forall j = 1,2,...,m \\ & x \geq 0. \end{aligned} \tag{۱۵}$$

مزیت این روش در این است که به نحوی از یک شاخص پارامتریک استفاده می‌کند و مجموعه‌ای از توابع عضویت را استخراج می‌کند که در بازه بدون اثرات جبرانی و اثرات جبرانی کامل قرار می‌گیرند. لذا، تصمیم‌گیرنده بر اساس ترجیحات خود می‌تواند بین آن‌ها انتخاب انجام دهد.

۳- یافته‌های تحقیق

[1] Wu and Guu

www.SID.ir

Archive of SID

برای برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق، استان کرمان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده‌است. در سال پایه مد نظر، برق استان کرمان از طریق فناوری‌های تولید گاز- چرخه‌ترکیبی، حرارتی سوخت زغال‌سنگ- گازوئیل و آب تأمین می‌شود. کل ظرفیت تولید برق استان کرمان در سال پایه مدنظر ۱۳۶۴/۴ مگاوات ساعت می‌باشد که سهم نیروگاه‌های سوخت گاز حدود ۹۳ درصد از کل ظرفیت تولیدی است و برای انرژی‌های نو (انرژی بادی، فتوولتائیک) هیچ ظرفیتی برای تولید برق وجود ندارد(وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

میانگین هزینه‌های تولید (شامل هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت تولید) و هزینه‌های آلودگی دی‌اکسید کربن ناشی از تولید برق به تفکیک فناوری‌های تولیدی مختلف در جدول (۱) ارایه شده‌است. اطلاعات جدول (۱) نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در نصب و ایجاد ظرفیت فناوری فتوولتائیک و سوخت زغال سنگ به ترتیب بیشترین و کمترین هزینه را به دنبال دارد. این بدین مفهوم است که در مقایسه با سایر فناوری‌های تولیدی، گسترش ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک بسیار سرمایه‌بر و حال آنکه گسترش ظرفیت نیروگاه‌های زغال سنگ[1] مقرون به صرفه است. همچنین مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات نیز نشان می‌دهد که نیروگاه‌های سوخت زغال‌سنگ و بادی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین هزینه می‌باشند. اما مقایسه هزینه آلودگی فناوری‌های تولیدی مختلف بیانگر آن است که زغال-سنگ بیشترین هزینه آلودگی را دارا است. از این‌رو، تفاوت در میان فناوری‌های مختلف برای تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی برای گسترش ظرفیت تولید برق مشخص می‌شود.

[1] بدون لحاظ کردن هزینه‌های تخریب محیط زیست

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۱): هزینه‌های فناوری‌های تولیدی مختلف

فناوری تولید	هزینه بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات (USD per kw)	هزینه سرمایه‌گذاری نصب ظرفیت (USD per kw)	هزینه آلودگی (USD per kw)
نیروگاه سوخت زغال سنگ[1]	۴۵	۱۳۰۰	۰/۳۳۳
نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی	۱۶۰	۲۳۰۰	۰/۱۸۵
نیروگاه برق‌آبی	۸۰	۲۷۷۵	۰/۰۰۵
نیروگاه بادی	۱۷۰	۴۸۵۰	۰/۰۱۳
نیروگاه فتوولتائیک	۸۰	۵۲۵۰	۰/۰۱۹

منبع: آژانس بین المللی انرژی و بانک جهانی (۲۰۱۵).

بنابراین، در ابتدا سناریوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های تولید شامل مجموع هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات، هزینه‌های سرمایه‌گذاری نصب و توسعه ظرفیت تولیدی جدید و هزینه‌های سوخت مصرفی تحت شرایط عدم حتمیت در تقاضا و ضریب ظرفیت فناوری‌های مختلف تولیدی (عدم حتمیت در عرضه) صورت گرفته‌است. سپس سناریوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل شده هزینه‌های دی‌اکسید کربن (آلودگی محیط زیست) ناشی از مصرف سوخت‌های مختلف تولیدی (فناوری‌های تولیدی مختلف) تحت شرایط عدم حتمیت انجام می‌شود. در پایان، سناریوی برنامه توسعه ظرفیت تولید برق با تأمین همزمان هر دو هدف اقتصادی (حداقل‌سازی ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های تولید) و زیست‌محیطی (حداقل‌سازی ارزش تنزیل شده هزینه‌های دی‌کسید-کربن) تحت شرایط عدم حتمیت تدوین شد.

۱-۳- سناریوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل-شده هزینه‌های تولیدی

مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های تولیدی با در نظر گرفتن عدم حتمیت‌های مربوط به تقاضای برق و ضریب ظرفیت تولیدی تکنولوژی‌های مختلف حل گردید[2] که با انتخاب سطح آلفای مناسب، ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های تولیدی بهینه و

[1] Steam Coal – SUBCRITICAL, Supercritical Steam Generator

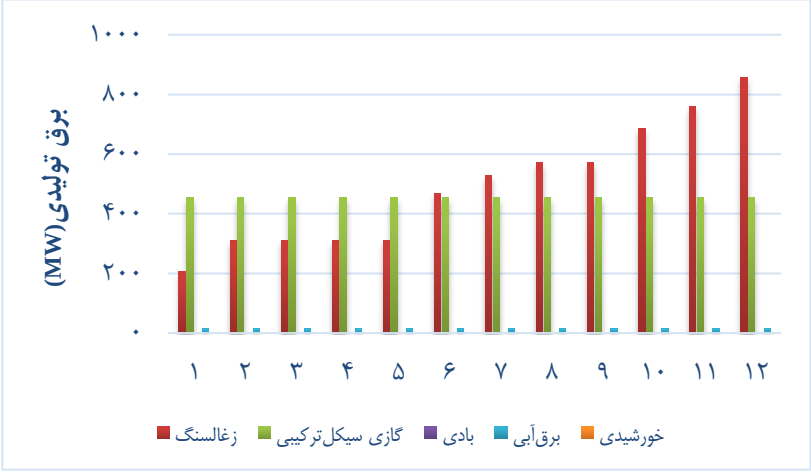
[۲] مدل برنامه ریزی غیر خطی چند هدفه فازی در نرم افزار GAMS 24.9.1 حل گردید.

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت در یک افق ۱۲ ساله بدست آمده که سطح برش آلفا (α) بهینه ناشی از حل مدل فازی ۰/۷۲۰ می‌باشد. با توجه به این سطح برش آلفا (α)، میزان حداقل ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های تولید با نرخ تنزیل ۳ درصد برای افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله ۱۲۵/۵ میلیون دلار برآورد شد (نمودار۶ و ۷). چنانچه هدف حداقل‌سازی هزینه‌های تولیدی مد نظر باشد برای تأمین تقاضای استان در افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله، تنها نیاز به سرمایه‌گذاری در گسترش ظرفیت فناوری سوخت زغال‌سنگ است. به‌طوری که مجموع گسترش ظرفیت فناوری سوخت زغال‌سنگ طی این دوره، حدود ۱۱۲۷ مگاوات برآورد شد و برق تولیدی از طریق این فناوری در طول افق برنامه‌ریزی از ۲۸/۲۸۸ به ۸۵۸/۶۹۵ مگاوات افزایش یافته است. تولید برق با فناوری گاز-چرخه ترکیبی و برق‌آبی طی این سال‌ها به ترتیب میزان ثابت ۰۱۰/ ۴۵۵ و ۱۴/۳۴۳ مگاوات را نشان می‌دهد. از همان ظرفیت موجود این فناوری‌ها در سال پایه برای این تولید استفاده شده است و گسترش ظرفیتی برای آنها صورت نگرفته‌است.

میزان برق تولیدی طی افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد که سه نیروگاه سوخت زغال‌سنگ، گاز-چرخه ترکیبی و برق‌آبی در تولید برق سهم دارند که سهم فناوری برق‌آبی بسیار کم است و فناوری‌های بادی، فتوولتائیک در چرخه تولید بکار نمی‌روند (نمودار (۱)).



نمودار (۱): میزان برق تولیدی فناوری‌های مختلف تحت مدل برنامه‌ریزی حداقل سازی هزینه‌های تولید

منبع: یافته‌های تحقیق

۲-۳- برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل شده هزینه‌های دی‌اکسید کربن

www.SID.ir

Archive of SID

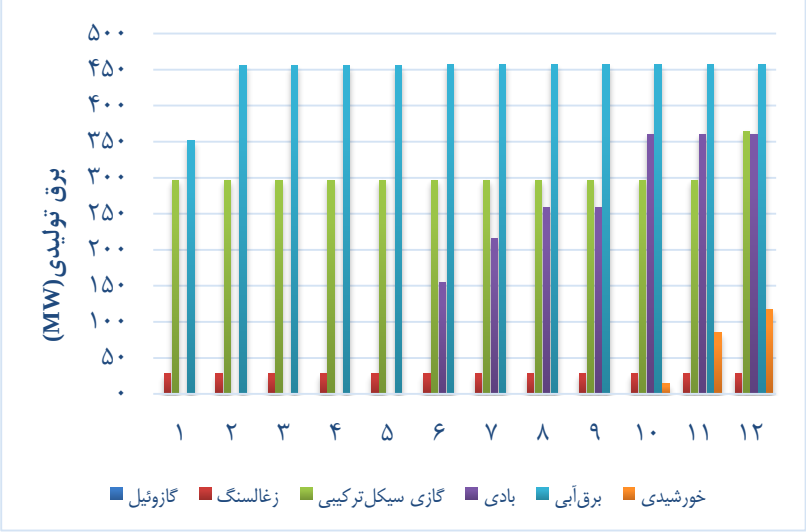
مدل با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های دی‌اکسید کربن ناشی از تولید برق با در نظر گرفتن عدم حتمیت‌های مربوط به تقاضای برق و ضریب ظرفیت تولیدی فناوری‌های مختلف حل شده[1] که سطح آلفای مناسب، ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های آلودگی بهینه و نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت در یک افق ۱۲ ساله محاسبه شده‌است. سطح برش آلفای (α) بهینه از حل مدل فازی ۰/۵۴۰ می‌باشد. با توجه به این سطح برش آلفا (α)، میزان حداقل ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های آلودگی دی‌اکسید کربن با نرخ تنزیل ۳ درصد برای افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله ۱۱/۲ میلیون دلار برآورد شد (نمودار ۶ و ۷). چنانچه هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های آلودگی دی‌اکسید کربن مد نظر باشد، برای تأمین تقاضای برق استان در افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله، نیاز به سرمایه‌گذاری در گسترش ظرفیت فناوری‌های تجدیدپذیر برق‌آبی، بادی و فتوولتائیک است. تولید برق‌آبی طی این سال‌ها از ۱۴/۳۴۳ مگاوات در سال پایه به ۴۵۷/۰۲۲ مگاوات در پایان افق برنامه‌ریزی افزایش یافته است. برق بادی که در سال پایه هیچ ظرفیتی برای تولید آن وجود ندارد، طی سال‌های برنامه‌ریزی روند افزایشی داشته و در پایان افق برنامه‌ریزی به ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات افزایش یافته است. تولید برق فناوری فتوولتائیک نیز که در سال پایه هیچ ظرفیتی برای آن وجود ندارد، طی سال‌های دهم تا دوازدهم افق برنامه‌ریزی با گسترش ظرفیت همراه بوده و برق تولیدی این فناوری به ۱۱۷/۶۷۷ مگاوات افزایش یافته‌است.

تولید برق فناوری سوخت زغال‌سنگ طی تمامی سال‌های افق برنامه‌ریزی به مانند سال پایه، ۲۸/۲۸۸ مگاوات است؛ و در افق برنامه‌ریزی، گسترش ظرفیتی برای این فناوری به چشم نمی‌خورد. تولید برق فناوری گاز-چرخه ترکیبی در سال پایه بیشتر از سال‌های افق برنامه‌ریزی است. این بدین مفهوم است که برای حفظ محیط زیست نباید از کل ظرفیت این نیروگاه‌ها که سهم بالایی در تولید برق استان دارند، بهره برد. بنابراین با در نظر گرفتن هدف زیست‌محیطی، بیشترین سهم تولید به ترتیب مربوط به فناوری‌های نیروگاه برق‌آبی، نیروگاه گاز- چرخه ترکیبی، نیروگاه بادی، نیروگاه فتوولتائیک و نیروگاه زغال‌سنگ است (نمودار (۲)).

[1] مدل برنامه ریزی غیر خطی چند هدفه فازی در نرم افزار GAMS 24.9.1 حل گردید.

www.SID.ir

Archive of SID



تمودار (۲): میزان برق تولیدی فناوری‌های مختلف تحت مدل برنامه‌ریزی حداقل-سازی هزینه‌های آلودگی CO_2

منبع: یافته‌های تحقیق

۳-۳- برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت مدل غیرخطی چندهدفه فازی

مدل برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان با اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تحت شرایط عدم حتمیت تقاضا و عرضه حل شده‌است. سطح برش آلفای (α) بهینه از حل مدل چندهدفه غیرخطی فازی ۰/۶۰۸ می‌باشد. با توجه به این سطح برش آلفا (α)، میزان حداقل ارزش تنزیل‌شده هزینه‌های چندهدفه فازی با نرخ تنزیل ۳ درصد ۱۴۶/۹۸ میلیون دلار برآورد شد (نمودار ۶ و ۷).

نتایج جدول (۵) و نمودار (۳) نشان می‌دهد که در سال‌های اول تا پنجم افق برنامه‌ریزی، تولید برق فناوری نیروگاه گاز- چرخه ترکیبی دارای بیشترین سهم تولید است (۴۵۵/۰۱۰ مگاوات ساعت). در این سال‌ها سرمایه‌گذاری گسترش ظرفیت فناوری بادی صورت گرفته و این انرژی، دومین منبع مهم پس از فناوری سوخت گاز- چرخه ترکیبی برای تولید برق می‌باشد. به گونه‌ای که ظرفیت تولید برق فناوری بادی در سال اول ۷۶۹/۸۴۰ مگاوات و در سال دوم ۲۳۰/۱۶۰ مگاوات گسترش یافته و تولید برق از این فناوری به ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات افزایش یافته است. تولید برق با فناوری زغال‌سنگ سومین منبع تولید برق در طی این سال‌ها می‌باشد که ظرفیت این فناوری به مانند سال پایه بوده و گسترشی پیدا نکرده‌است.

www.SID.ir

Archive of SID

کم‌ترین سهم تولید برق در این سال‌ها نیز مربوط به فناوری تولیدی برق‌آبی است. ظرفیت این فناوری در سال دوم ۱۴/۴۸۹ مگاوات افزایش یافته و برق تولیدی از ۱۴/۳۴۳ مگاوات در سال اول به ۲۰/۷۵۷ مگاوات در سال دوم رسیده‌است. همچنین فناوری فتوولتائیک برای تولید برق طی این سال‌ها به‌کار نرفته است. از سال ششم تا سال نهم، همچنان دو فناوری تولیدی سوخت گاز- چرخه ترکیبی و بادی به ترتیب ۴۴۵/۰۱۰ و ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات بیشترین سهم تولید را دارا می‌باشند. اما طی این سال‌ها، ظرفیت تولید برق فناوری برق‌آبی گسترش یافته و به سومین منبع تولید برق تبدیل شده است. به گونه‌ای که تولید برق فناوری برق‌آبی از ۲۰/۷۵۷ مگاوات در سال پنجم به ۲۸۰/۶۲۷ در سال نهم افزایش یافته است. طی این سال‌ها مجموع گسترش ظرفیت تولیدی فناوری برق‌آبی ۵۸۷/۰۵۱ مگاوات می‌باشد. در طی این سال‌ها تولید برق فناوری سوخت زغال‌سنگ (۴۳/۳۸۶ مگاوات) با همان ظرفیت تولیدی سال‌های گذشته ثابت باقی مانده‌است. اما همچنان فناوری فتوولتائیک طی این سال‌ها در تولید برق به کار نمی‌روند.

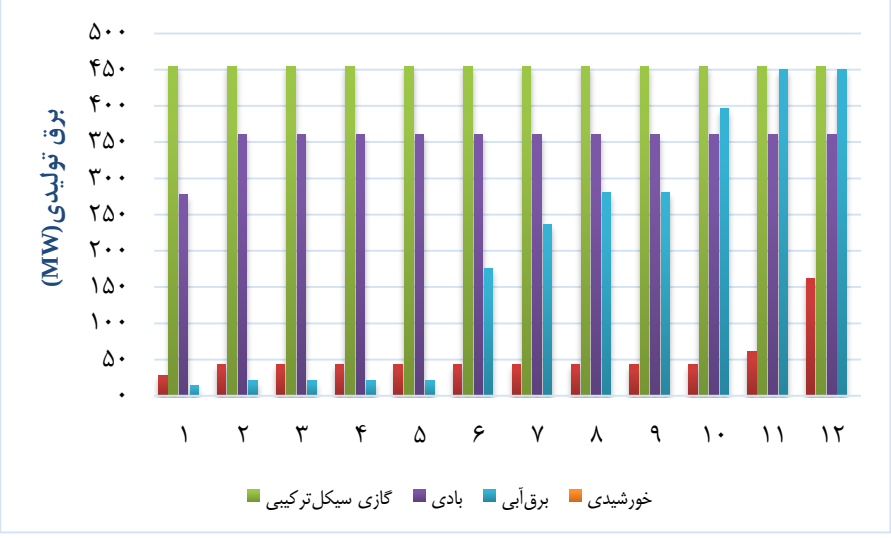
از سال دهم تا سال دوازدهم، تولید برق فناوری با نیروگاه گاز- چرخه ترکیبی با همان ظرفیت تولید سال پایه ۴۵۵/۰۱۰ مگاوات می‌باشد که دارای بیشترین سهم در تولید برق است. در طی این سال‌ها مجدداً ظرفیت تولیدی فناوری برق‌آبی معادل ۳۸۱/۵۹۰ مگاوات گسترش و میزان تولید برق فناوری برق‌آبی از ۲۸۰/۶۲۷ مگاوات در سال نهم به ۴۴۹/۵۵۱ مگاوات در سال دوازدهم افزایش یافته است. در این سال‌ها، فناوری تبدیلی بادی پس از دو فناوری سوخت گاز- چرخه ترکیبی و برق‌آبی، با تولید ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات برق و با گسترش ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات طی سال‌های اول و دوم در چرخه تولید قرار گرفته است. ظرفیت تولیدی فناوری سوخت زغال‌سنگ نیز طی این سال‌ها به میزان ۱۶۳/۷۲۰ گسترش و میزان برق تولیدی این فناوری از ۴۳/۳۸۶ مگاوات طی سال‌های گذشته به ۱۶۱/۷۷۴ مگاوات در سال دوازدهم افزایش یافته است. همچنین فناوری فتوولتائیک طی این سال‌ها در تولید برق بکار نرفته‌است.

به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که فناوری فتوولتائیک در افق برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید با تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تحت شرایط عدم حتمیت تقاضا و عرضه جای ندارد. این بدین دلیل است که فناوری فتوولتائیک، هزینه‌ی نصب و ایجاد ظرفیت تولیدی بسیار بالایی دارد. اما ظرفیت تولیدی سایر فناوری‌های تجدیدپذیر (فناوری‌های بادی و برق‌آبی) در این برنامه‌ریزی توسعه یافته است. به گونه‌ای که فناوری

www.SID.ir

Archive of SID

بادی با گسترش ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات و فناوری برق‌آبی با ۹۸۳/۱۳۰ مگاوات، سهم معنی‌داری در تولید برق دارند. این بدین مفهوم است که تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در تولید برق، زمانی ممکن است که ظرفیت تولیدی فناوری‌های تجدیدپذیر افزایش یابد تا در کنار تولید برق از طریق فناوری‌های تجدیدناپذیر، تقاضای برق را پوشش دهد.



نمودار (۳): میزان برق تولیدی فناوری‌های مختلف تحت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی

منبع: یافته‌های تحقیق

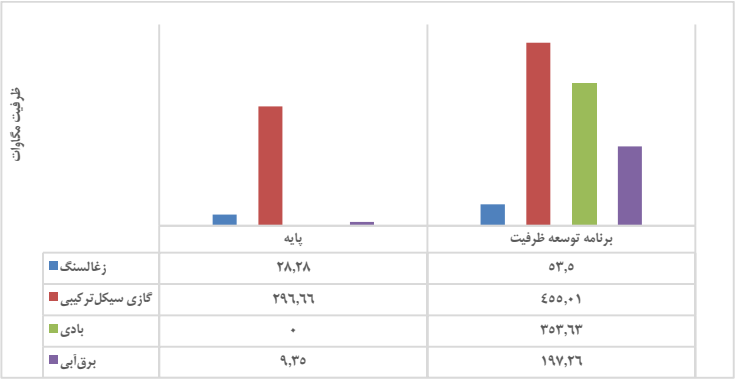
برای درک بهتر یافته‌ها، نتایج دوره برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق مدل برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی با شرایط پایه مقایسه شده‌است. نتایج در نمودار (۴) نشان می‌دهد که بیشترین افزایش تولید مربوط به فناوری بادی است که در سال پایه در چرخه تولید قرار ندارد اما در برنامه‌ریزی بلندمدت گسترش ظرفیت، میانگین تولید برق از طریق این فناوری ۳۵۳/۶۳۸ مگاوات می‌باشد. تولید برق فناوری برق‌آبی پس از فناوری بادی بیشترین افزایش را به نسبت شرایط پایه دارد. میانگین تولید برق فناوری برق‌آبی، طی سال‌های برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید ۱۹۷/۲۶۲ مگاوات است که به نسبت شرایط پایه افزایش ۱۸۷/۹۱۱ مگاوات را نشان می‌دهد. میزان تولید برق فناوری گازی- چرخه ترکیبی نیز طی سال‌های برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت روند افزایشی داشته است. میانگین تولید برق فناوری سوخت گاز- چرخه ترکیبی در برنامه گسترش ظرفیت

www.SID.ir

Archive of SID

۴۵۵/۰۱۰ مگاوات است که نسبت به شرایط پایه ۱۵۸/۳۴۳ مگاوات افزایش یافته است. کم‌ترین افزایش تولید برق نیز طی سال‌های برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت مربوط به فناوری سوخت زغال‌سنگ است که میانگین تولید این فناوری از ۲۸/۲۸۸ مگاوات در سال پایه به ۵۳/۵۰۴ مگاوات طی سال‌های برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت افزایش یافته‌است.

نمودار (۵) نشان می‌دهد که سهم فناوری سوخت گاز- چرخه ترکیبی در سال پایه ۸۹ درصد است. حال آنکه در برنامه گسترش ظرفیت تولید به ۴۳ درصد کاهش یافته‌است. سهم فناوری‌های نیروگاه بادی و برق‌آبی به نسبت شرایط پایه افزایش یافته‌است. به گونه‌ای که در برنامه گسترش ظرفیت مجموع سهم این دو فناوری تجدیدپذیر در تولید برق به ۵۲ درصد رسیده‌است. حال آنکه در شرایط پایه تنها حدود ۳ درصد تولید برق مربوط به فناوری تبدیلی برق‌آبی بود و فناوری تبدیلی بادی در چرخه تولید وجود نداشت. بنابراین نتایج مشخص می‌کند که برای تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تولید برق، بایستی به سمت گسترش ظرفیت فناوری‌های تجدیدپذیر حرکت کرد؛ تا بتوان افزایش تقاضای آینده را با حفظ پایداری شرایط زیست‌محیطی از طریق ظرفیت فناوری‌های تجدیدپذیر تامین کرد.

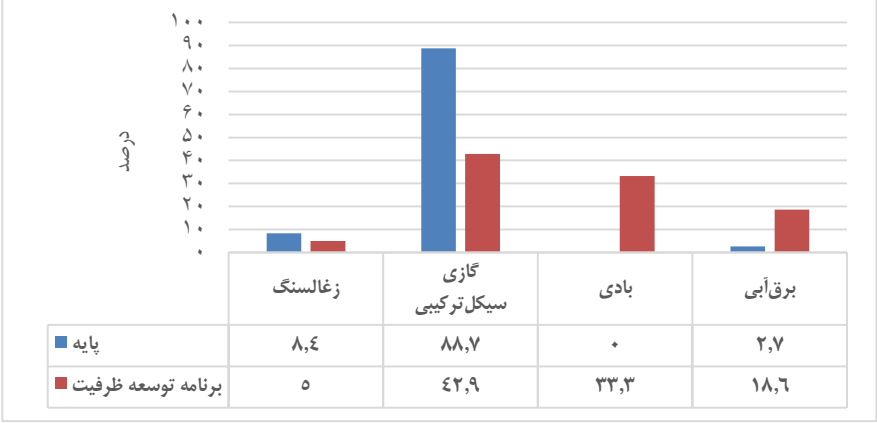


نمودار (۴): مقایسه تولید برق فناوری‌های تولیدی مختلف در شرایط پایه و برنامه گسترش ظرفیت

منبع: یافته‌های تحقیق

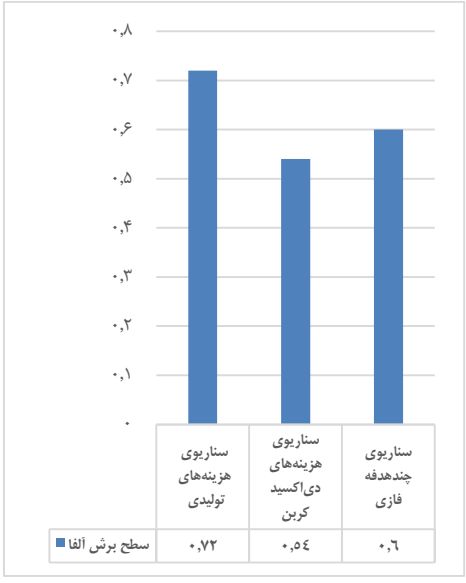
www.SID.ir

Archive of SID



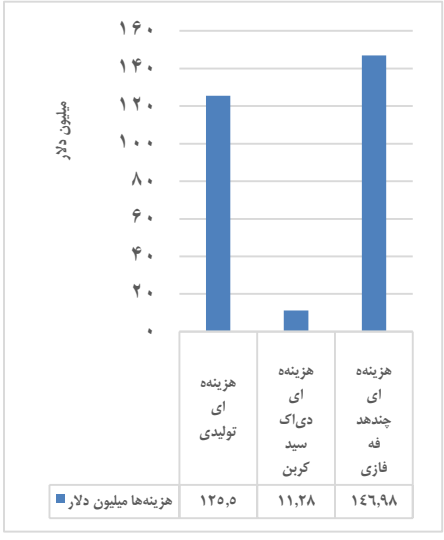
نمودار (۵): مقایسه سهم تولید برق فناوری‌های تولیدی مختلف در شرایط پایه و برنامه گسترش ظرفیت

منبع: یافته‌های تحقیق



نمودار (۶): مقایسه سطح برش آلفا سه سناریو

منبع: یافته‌های تحقیق



نمودار (۷): مقایسه هزینه‌های سه سناریو

منبع: یافته‌های تحقیق

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (۶): مقایسه برنامه‌ریزی‌های گسترش ظرفیت تولید برق با مدل‌های مخلف

فناوری‌های تبدیلی (MW)	مدل تک هدفه اقتصادی فازی	مدل تک هدفه زیست‌محیطی فازی	مدل دو هدفه فازی
گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال سنگ	۱۱۲۷	۰	۱۶۳/۷۲۰
گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز-چرخه ترکیبی	۰	۰	۰
گسترش ظرفیت نیروگاه برق‌آبی	۰	۱۰۰۰	۹۸۳/۱۳۰
گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی	۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک	۰	۵۰۰	۰

منبع: محاسبات تحقیق.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه به دنبال مدل‌سازی چندهدفه فازی تحت عدم حتمیت‌های طرف تقاضا و عرضه الکتریسیته، و تبادل بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در سیستم برق استان کرمان است. در این پژوهش ارزش تنزیل شده هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی عرضه نامطمئن برق به دلیل عدم حتمیت در ضریب ظرفیت تولید، برای تأمین تقاضای نامطمئن برق حداقل شده‌است. از این‌رو، یک مدل فازی چند هدفه برای برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید مورد تحلیل قرار گرفت که هم عدم حتمیت‌های طرف تقاضا و عرضه و هم اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی را در نظر گرفته‌ست. برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با استفاده از دو مدل تک هدفه با اهداف جداگانه حداقل‌سازی ارزش تنزیل شده هزینه تولید و ارزش تنزیل شده هزینه آلودگی و یک مدل دو هدفه اقتصادی-زیست‌محیطی تحت شرایط عدم حتمیت در تقاضا و عرضه صورت گرفته و گسترش ظرفیت فناوری‌های تولیدی مختلف در هر برنامه با یکدیگر مقایسه شده‌است.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اگر تنها هدف، حداقل‌سازی هزینه‌های تولید برق باشد، نیروگاه‌های با سوخت زغال‌سنگ و نیروگاه‌های گازی- چرخه ترکیبی به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تولید برق در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت انتخاب می‌شوند. اما با هدف حداقل‌سازی ارزش تنزیل شده هزینه‌های آلودگی دی‌اکسید کربن، سه فناوری تجدیدپذیر بدون انتشار

www.SID.ir

Archive of SID

آلودگی فناوری برق‌آبی، بادی و فتوولتائیک در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت استفاده می‌شوند.

اما نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت مدل چندهدفه فازی نشان داد که برای پاسخ به تقاضا بایستی با آرایش متنوع‌تر نیروگاه‌ها از طریق نیروگاه‌های بادی، برق‌آبی و سوخت زغال‌سنگ ظرفیت مورد نیاز تامین شود. آنچه که از نتایج این مطالعه استنتاج می‌شود با تامین همزمان اهداف ترکیب نیروگاه‌ها متنوع‌تر از حالت تامین یکی از اهداف می‌باشد. بنابراین به دلیل تفاوت در نتایج، نگاه جامع و همه جانبه به مسئله برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق بایستی مورد توجه سیاست‌گذاران در این عرصه قرار گیرد. از این‌رو، توجه به گسترش ظرفیت تولید برق از طریق نیروگاه‌های تجدیدپذیر از جمله بادی و برق‌آبی برای رسیدن به اهداف اقتصادی و پایداری زیست‌محیطی الزامی است.

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست منابع

۱.صنعت برق ایران (۱۳۹۶). ناشر: شرکت توانیر

1. Baringo, L., & Conejo, AJ. (2012). Wind power investment: A benders decomposition approach. *IEEE Transaction on Power Systems*, 27(1), 433–441.
2. Beard, L. M., Cardell, J. B., Dobson, I., Galvan, F., Hawkins, D., Jewell, W, & Tylavsky, D. J. (2010). Key technical challenges for the electric power industry and climate change. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(2), 465-473.
3. Betancourt-Torcat, A., & Almansoori, A. (2015). Design multi-period optimization model for the electricity sector under uncertainty – a case study of the Emirate of Abu Dhabi. *Energy Conversation Management*, 100, 177–90.
4. El-Khattam, W., Hegazy, YG., & Salama, MMA. (2005). An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning. *IEEE Transaction on Power Systems*, 20(2):1158–65.
5. Franco, J. F., Rider, M. J., & Romero, R. (2014). A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning. *Electrical Power and Energy System*, 62, 265–72.
6. Fu, Q., Li, M., Singh, V., Ma, M., & Liu, X. (2017). An intuitionistic fuzzy multi objective non-linear programming model for sustainable irrigation water allocation under the combination of dry and wet conditions. *Journal of Hydrology*, 555, 80–94.
7. Hinojosa, V, & Velásquez, J. (2016). Improving the mathematical formulation of security-constrained generation capacity expansion planning using power transmission distribution factors and line outage distribution factors, *Electric Power Systems Research*. 140, 391–400.
8. Huang, G.H., Zhang, X.Y., Zhu, H., & Li, Y.P. (2017). A fuzzy-stochastic power system planning model: Reflection of dual objectives and dual uncertainties. *Energy*, 123, 664-676.
9. Jornada, D., & Leon, V. J. (2016). Robustness methodology to aid multiobjective decision making in the electricity generation capacity expansion problem to minimize cost and water withdrawal. *Applied energy*, 162, 1089-1108.
10. Jirutitijaroen, P., & Singh, C. (2008). Reliability constrained multi-area adequacy planning using stochastic programming with sample-average approximations. *IEEE Transaction on Power Systems*, 23(2):504–13.

www.SID.ir

Archive of SID

11. Iran electric power industry (2017). Publisher: *Tavanir holding company* (In Persian)
12. Kheawhom, S., & Kittisupakorn, P. (2005). Multi-objective design space exploration under uncertainty. In: European symposium on computer-aided process engineering-15, 38th European symposium of the working party on computer aided process engineering. *Computer Aided Chemical Engineering*, 20, 145–50.
13. Klein, G., Moskowitz, H., & Ravindran, A. (1990). Interactive multi-objective optimization under uncertainty. *Management Science*, 36(1), 58–75.
14. Lai, Y. J. & Hwang, C. L. (1994). Fuzzy Multiple Objective Decision Making. *Springer*, New York.
15. Lu, Z., Qi, J., Wen, B., & Li, X. (2016). A dynamic model for generation expansion planning based on Conditional Value-at-Risk theory under Low-Carbon Economy. *Electric Power Systems Research*, 141, 363–371
16. Meza, J. L. C., Yildirim, M. B., & Masud, A. S. (2007). A model for the multi period multi objective power generation expansion problem. *IEEE Transaction on Power Systems*, 22(2), 871–8.
17. Monsef, H., Bagheri, A., & lesani, H. (2015). Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions. *Electrical Power and Energy Systems*, 73, 56-70.
18. Oree, V., Hasen, S.Z.S., & Fleming, P.J. (2017). Generation expansion planning optimization with renewable energy integration: *A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 790–803.
19. Osmani, A. and Zhang, J. (2014). Optimal grid design and logistic planning for wind and biomass based renewable electricity supply chains under uncertainties. *Energy*, 70, 514-528.
20. Park, H., & Baldick, R. (2016). Stochastic generation capacity expansion planning reducing greenhouse gas emissions. IEEE *Transaction on Power Systems*, 30(2), 1026–1034.
21. Pineda, S., Morales, J., Ding, Y., & Ostergaard, J. (2014). Impact of equipment failures and wind correlation on generation expansion planning. *Electric Power Systems Research*, 116, 451–458.
22. Pinho, J., Resende, J., & Soares, I. (2018). Capacity investment in electricity markets under supply and demand uncertainty. *Energy*, 150, 1006-1017.
23. Rani, D., Gulati, T. R., & Garg, H. (2016). Multi-objective non-linear programming problem in intuitionistic fuzzy environment: Optimistic and pessimistic view point. *Expert Systems with Applications*, 64, 228-238.
24. Sabio, N., Pozo, C., Guillen-Gosabez, G., Jimenez, L., Karuppiah, R., Vasudevan, V., Sawaya, N, & Farrell, J. T. (2014). Multi-objective

www.SID.ir

Archive of SID

optimization under uncertainty of the economic and life-cycle environmental performance of industrial processes. *AIChE Journal*, 60(6), 2098–2121.

25. Sadeghi, H., Abdollahi, A., & Rashidinejad, M. (2015). Evaluating the impact of FIT financial burden on social welfare in renewable expansion planning. *Renewable Energy*, 75, 199-209.
26. Samper, M.E., Vargas, A, & Rivera, S. (2008). Fuzzy Assessment of Electricity Generation Costs Applied to Distributed Generation. Comparison with Retail Electricity Supply Costs, supported by *CONICE, in Argentina*.
27. Statistical Review of World Energy. (2018). http://www.bp.com/statistical review.
28. Tekiner, H., Coit, D., Felder, F. (2012). Electric power system generation expansion plans considering the impact of smart grid technologies. *International Journal Electric Power and Energy* System, 42, 229–239.
29. Tong, LI., Saminathan, R. & Chang, CW. (2016). Uncertainty assessment of non-normal emission estimates using non-parametric bootstrap confidence intervals. *Journal Environmental of Informatics*, 28(1), 61-70.
30. Wu, Y. K, & Guu, S. M. (2001). A compromise model for solving fuzzy multiple objective linear programming problems. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 18(5), 87-93.
31. Zhang, Y.M. et al., (2009). Inexact de Novo programming for water resources planning. *European Journal of Operational Research*, 199, 531–541.
32. Zimmermann, HJ. (2001). Fuzzy set theory and its applications. *Springer Science & Business Media.*
33. United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs (1972). Electricity Costs and Tariffs: A General Study. *Publisher Department Economic and Social Affair.*

www.SID.ir