

## اثرات محدودیت منابع آبی بر برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق: کاربرد الگوی چند هدفه تحت شرایط نااطمینانی

یحیی حاتمی\*، زین‌العابدین صادقی\*\*، سیدعبدالمجید جلائی\*\*\*، امیر عبدالهی\*\*\*\*

تاریخ پذیرش  
۱۳۹۷/۰۸/۰۳

تاریخ دریافت  
۱۳۹۷/۰۵/۰۱

### چکیده

هدف مطالعه حاضر، برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی تحت نااطمینانی جهت تأمین تقاضای برق است. نااطمینانی تقاضا و ضریب ظرفیت تولیدی برق (نااطمینانی عرضه) به صورت یک مجموعه فازی بیان شد. همچنین، اثرات محدودیت منابع آبی بر برنامه گسترش ظرفیت تولید بررسی گردید. الگوی غیرخطی چند هدفه فازی برای یک نمونه واقعی سیستم برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان برای یک دوره ۱۲ ساله با و بدون محدودیت منابع آبی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که محدودیت منابع آبی باعث تغییر برنامه گسترش ظرفیت استان خواهد شد. با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی، ظرفیت نیروگاه‌های بادی، گاز-چرخه ترکیبی و فتوولتائیک در طول افق برنامه‌ریزی به ترتیب ۱۰۰۰، ۹۲۴/۹۵۰ و ۵۰۰ مگاوات افزایش خواهد یافت. این در حالی است که نتایج الگو بدون محدودیت منابع آبی نشان داد که در طول افق برنامه‌ریزی ظرفیت نیروگاه‌های بادی، آبی و زغال سنگ به ترتیب ۱۰۰۰، ۹۸۳/۱۳۰ و ۱۶۳/۷۲۰ مگاوات افزایش می‌یابد. بنابراین برای مناطقی که در شرایط بحرانی منابع آب قرار دارند، تولید کمتر برق با سوخت زغال سنگ و آبی پیشنهاد می‌شود. تفاوت در نتایج، اهمیت تحلیل یکپارچه و جامع برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق را نمایان می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق، الگوی غیرخطی چند هدفه فازی، محدودیت منابع آبی.  
طبقه‌بندی JEL: C61، Q25، Q41.

\* دانشجوی دکتری علوم اقتصادی دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان (این مقاله مستخرج از بخشی از رساله دکتری نامبرده است)  
yahyahatami@yahoo.com

\*\* دانشیار گروه اقتصاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان (نویسنده مسئول)

z\_sadeghi@uk.ac.ir

jalaee@uk.ac.ir

\*\*\* استاد گروه اقتصاد دانشکده مدیریت و اقتصاد دانشگاه شهید باهنر کرمان

a.abdollahi@uk.ac.ir

\*\*\*\* دانشیار گروه مهندسی برق - قدرت دانشکده مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

## ۱. مقدمه

با توجه به رشد تقاضای برق، برنامه‌ریزی در زمینه گسترش ظرفیت تولید برق ضروری است (منسف و همکاران، ۲۰۱۵، ص: ۵۷؛ اوری و همکاران، ۲۰۱۷، ص: ۷۹۲). رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، افزایش سطح زندگی و رفاه، توسعه صنعتی و تجاری موجب گردیده که دامنه تقاضای انرژی برق در ایران گسترش یابد (رضوی و احمدی شادمهری، ۱۳۹۳، ص: ۱۱۳). هدف عمده برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید<sup>۱</sup> برق فراهم کردن یک سیستم بهینه، قابل اعتماد، مقرون به صرفه و با کیفیت است (الخاتم و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۵، ص: ۱۱۵۹؛ منسف و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۵، ص: ۵۸).

گزارش‌های بین المللی انرژی در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که ایران با تولید ۶۳۳،۷ میلیون تن با سهم ۱،۹ درصد الودگی جهانی، بیشترین میزان انتشار دی اکسید کربن در خاورمیانه را دارد. به طوری که در سالهای ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۷ انتشار دی اکسید کربن به میزان ۲،۷ درصد رشد داشته است (بی پی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷). بنابراین با توجه به این روند صعودی صعودی مصرف سوختهای نیروگاه‌های کشور به نظر می‌رسد مسئله تخریب زیست محیطی در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید به طور جدی مطرح است. امروزه توسعه پایدار محیط زیست با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان راه حل قابل قبول در سراسر جهان در حال مطالعه است (عدالتی و همکاران، ۲۰۱۷، ص: ۱۲۷۲). برخی از مطالعات، علاوه بر در نظر گرفتن هدف اقتصادی تولید، شرایط زیست محیطی را نیز بعنوان یک هدف مشخص در برنامه‌ریزی در نظر گرفته‌اند و نااطمینانی‌ها را نیز در الگوهای برنامه‌ریزی وارد کرده‌اند (لین و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹، ص: ۸۷۳؛ جین و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۵،

۱- Generation Capacity Expansion Planning

۲ -El-Khattam et al.

۳- Monsef et al.

۴ www.bp.com

۵- Lin et al.

۶- Jin et al.

ص: ۷۰۰؛ چاریتوپولوس و دوآ<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷، ص: ۵۴۳؛ ژانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷، ص: ۶۵۰).  
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<sup>۳</sup>، ۲۰۱۰، ص: ۴۷۱؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۵، ص: ۲۰۷). منابع آبی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. حدود ۶۰ کشور جهان بیش از نیمی از نیازهای برق خود را با استفاده از نیروی برق آبی تامین می‌کنند (شریفی و همکاران، ۲۰۱۳، ص: ۱۰۱۵). این فناوری به دلایل زیادی از محبوب‌ترین منابع تجدیدپذیر تولید برق به شمار می‌آید. اثرات زیست محیطی کم و پایین بودن هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری آن در سراسر جهان به ویژه در کشورهای در حال توسعه باعث افزایش استفاده از این فناوری شده است (شریفی و همکاران، ۲۰۱۳، ص: ۱۰۱۶).

این نیروگاه‌ها برای تولید الکتریسته به آب فراوانی نیاز داشته که این آب هم برای در مدار نگه داشتن توربین‌های برق آبی و هم برای خنک‌سازی بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد (مک نیک و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۲، ص: ۸) افزایش کمیابی آب، کاهش در تولید برق بوسیله‌ی نیروگاه‌ها با مصرف آب فراوان و تولید بیشتر برق بوسیله‌ی نیروگاه‌ها با نیاز آبی کمتر را توجیه می‌سازد. از اینرو، محدودیت آب در دسترس، تولید برق از طریق نیروگاه‌های برق آبی را به شدت کاهش (ریکاردو و سیلور<sup>۵</sup>، ۱۹۹۸، ص: ۱۴۶۵) و هزینه نهایی تولید برق را افزایش خواهد داد (مائولیچ و میشاییل<sup>۶</sup>، ۲۰۰۶ و مک در موت و نیلسن<sup>۷</sup>، ۲۰۱۴، ص: ۱۴۵).

- 
- ۱- Charitopoulos and Dua
  - ۲- Zhang et al.
  - ۳- Beard et al.
  - ۴- Macknick et al.
  - ۵- Ricardo et al.
  - ۶- Maulbetsch and Michael
  - ۷- McDermott and Nilsen

تغییرات آب و هوایی و خشکسالی خطرات فوری را برای عرضه آب برای تولید برق ایجاد می‌کنند (مک نیک و همکاران، ۲۰۱۲، ص: ۲؛ اسپیو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴، ص: ۳۲۴۷)

در این مطالعه، اثرات محدودیت منابع آبی بر برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت در شرایط نااطمینانی و با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست محیطی بررسی خواهد شد. جهت برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق، استان کرمان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد.

میزان مصرف برق استان کرمان در سال ۱۳۹۶ برابر با ۴۵۸۶٫۶ گیگاوات ساعت بوده است که نسبت به سال ۱۳۹۵ ۶٫۹ درصد رشد داشته است. سهم مصرف الکتریسته استان کرمان از مصرف کل کشور ۱۱٫۶ درصد بوده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). تولید ناخالص استان کرمان در سال ۱۳۹۳ برابر با ۳۹۰۰۸۴ میلیارد ریال است که سهم ۳٫۵ درصدی از تولید ناخالص ملی ایران را دارد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۶).

در سال پایه ۱۳۹۴، برق استان کرمان از طریق تکنولوژی‌های تولید گاز-چرخه ترکیبی، سوخت زغال سنگ-نفت کوره و آب تأمین می‌شود. ظرفیت اولیه تولید برق به تفکیک هریک از نیروگاه‌ها و تکنولوژی‌های تولیدی مختلف در جدول (۱) آمده است. اطلاعات جدول (۱) نشان می‌دهد که کل ظرفیت تولید برق استان کرمان در سال پایه مدنظر ۱۳۶۴/۴ مگاوات ساعت است که سهم نیروگاه‌های سوخت گاز حدود ۹۳ درصد از کل ظرفیت تولیدی است و برای انرژی‌های نو (انرژی بادی، فتوولتائیک) هیچ ظرفیتی جهت تولید برق وجود ندارد.

---

۱- Schewe et al.

جدول (۱): اطلاعات نیروگاه‌های تولید برق استان کرمان

نیروگاه	واحد	تکنولوژی تولید	ظرفیت تولیدی (MW)
سیکل ترکیبی باغین	۸	سوخت گازی	۱۲۷۲
نیروگاه حرارتی زرنند	۲	زغال سنگ-نفت کوره	۶۰
سد جیرفت <sup>۱</sup>	---	برق آبی	۳۲/۴

منبع: شرکت تولید نیروی برق کرمان ۱۳۹۴ (سهامی عام)

این مطالعه در ادامه شامل بخش‌های زیر است: در بخش دوم، مبانی نظری پژوهش ارائه و به مرور مطالعات گذشته پرداخته می‌شود. در قسمت سوم، الگوی چند هدفه برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید فرموله و یک روش حل جهت بهینه‌سازی الگوی برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه فازی<sup>۲</sup> پیشنهاد می‌شود. در بخش چهارم، نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق برای استان کرمان تحلیل می‌شود. در پایان نیز نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادات ارائه خواهد شد.

## ۲. ادبیات نظری

برای الگوسازی نااطمینانی، راه حل‌های متفاوتی وجود دارد، اهم آن: شامل برنامه‌ریزی تصادفی<sup>۳</sup>، برنامه‌ریزی ریاضی فازی<sup>۴</sup> و بهینه‌سازی چند دوره‌ای<sup>۵</sup> است (چاریتوپولوس و دوآ، ۲۰۱۷، ص: ۵۴۴). نظریه جدید نااطمینانی در سال ۱۹۶۵ توسط لطفعلی عسگرزاده

۱- سد جیرفت در استان کرمان منبع تولید برق آبی این استان با ظرفیت اسمی ۳۲/۴ مگاوات می‌باشد. این سد در ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهر جیرفت، در محلی بنام تنگ نراب بر روی رودخانه هلیل رود احداث شده است. بررسی آخرین آمار مربوط به وضعیت این سد حکایت از کاهش ۹۲ درصدی ورودی آب به این سازه دارد. کل حجم آب ورودی به این سد از ابتدای سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ تاکنون ۶۶ مترمکعب بوده است که سال گذشته در همین بازه زمانی حجم ورودی روان آب ها به سد از مرز ۸۷۹ میلیون مترمکعب گذشته بود. افت ورودی روان آب ها به این سد که به دلیل افزایش مصارف مختلف از جمله مصارف شهری، مصارف کشاورزی و همچنین تغییرات آب و هوایی و خشکسالی‌های اخیر بوده است، باعث شده تا حجم ذخیره این سد در سال ۱۳۹۷ به ۱۸۴ میلیون مترمکعب برسد که در مقایسه با سال گذشته ۴۵ درصد افت پیدا کرده است. (پایگاه اطلاع رسانی وزرات نیرو، ۱۳۹۷).

۲- Fuzzy Multi-objective Non-linear Programming

۳- Stochastic Programming

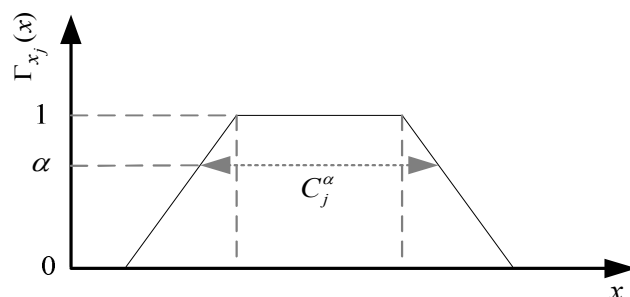
۴- Fuzzy Mathematical Programming

۵- Multi-period Optimization

ابداع شده که به نظریه ریاضیات فازی معروف است. در سالهای اخیر استفاده از روشهای فازی در حوزه‌های مختلف کاربرد فراوانی یافته است. در ریاضیات معمول اعداد به صورت صریح وارد الگو می‌شوند، در حالی که در ریاضیات فازی، از اعداد فازی استفاده می‌شود که دارای مرکز و پهناست و هر عدد فازی با یک تابع عضویت نمایش داده می‌شود و می‌توان از روش فازی برای بهینه‌یابی استفاده نمود.

در برنامه‌ریزی ریاضی فازی، پارامترهای تصادفی را بصورت اعداد گنگ و محدودیت‌ها را بصورت مجموعه‌های گنگ فرض می‌کنند و برخی از تناقضات محدودیت‌ها پذیرفته می‌شود. برنامه‌ریزی ریاضی فازی با توجه به اینکه ناطمینانی در کجای مساله بهینه‌سازی وجود دارد می‌تواند انعطاف‌پذیر باشد (چاریتوپولوس و دوآ، ۲۰۱۷، ص: ۵۴۳). در بیشتر مسائل، متغیر فازی خروجی سیستم را می‌توان به صورت تابعی چند متغیره از متغیرهای غیرقطعی فازی ورودی به شکل  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n)$  بیان نمود. در این حالت، هدف این است که تابع عضویت متغیر خروجی، وقتی که توابع عضویت متغیرهای ورودی در دسترس است، پیدا گردد. در این صورت، برای محاسبه تابع عضویت متغیرهای خروجی از روش برش آلفا استفاده می‌شود. برش آلفا برای متغیر فازی  $\tilde{x}_j$  که دارای تابع عضویت  $\Gamma_{x_j}(x)$  است و روی مجموعه  $\tilde{C}_j$  تعریف شده است، مطابق شکل (۱) به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$C_j^\alpha = \{x \mid \Gamma_{x_j}(x) \geq \alpha, 0 \leq \alpha \leq 1\} \quad (1)$$



شکل (۱): برش آلفا تابع عضویت

منبع: یافته‌های پژوهش

با داشتن برش آلفای متغیر ورودی، برش آلفای متغیر خروجی طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \underline{y}^\alpha &= \text{Min}(f(x_1^\alpha, \dots, x_n^\alpha)) \\ \bar{y}^\alpha &= \text{Max}(f(x_1^\alpha, \dots, x_n^\alpha)) \\ y^\alpha &= [\underline{y}^\alpha, \bar{y}^\alpha] \end{aligned} \quad (۲)$$

در نهایت طبق رابطه (۳)، با اجتماع برش‌های آلفا، تابع عضویت متغیر خروجی محاسبه می‌گردد.

$$\bar{y} = \bigcup_{\alpha=0}^{\alpha=1} y^\alpha, \quad \forall \alpha = \{0, \Delta\alpha, 2\Delta\alpha, \dots, 1\} \quad (۳)$$

پس از الگوسازی نااطمینانی بصورت مجموعه فازی، نیاز به حل مسائل است که روش حل در بخش روش پژوهش ارائه شده است. از طرف دیگر، علاوه بر نااطمینانی‌های موجود در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید، اهداف متفاوت نیز می‌تواند منجر به سیاست‌گذاری‌های متفاوت در این زمینه شود. در عمل تصمیم‌گیرندگان اغلب با بهینه‌سازی اهداف متفاوت مانند هزینه اقتصادی، اثرات زیست محیطی و ... سروکار دارند.

بهینه‌سازی چندهدفه، با ارائه روش‌های متنوع با در نظر گرفتن این اهداف و مسائل مختلف، بهترین راه حل است (مارلر و ارورا<sup>۱</sup>، ۲۰۰۴، ص: ۳۹۴). در دهه‌های اخیر، با ادامه روند فزاینده میانگین دمای جهانی و تغییرات اقلیم، مسائل محیط‌زیستی به ویژه گازهای گلخانه‌ای که توسط فعالیت‌های انسانی تولید می‌شود به تدریج توجه همه را به خود جلب کرده است (تونگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۶، ص: ۶۸؛ هووانگ و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷، ص: ۲۹۱). از اینرو، حل مسئله بهینه‌یابی از طریق تأمین همزمان اهداف مختلف که گاهاً در تضاد با یکدیگر هستند با در نظر گرفتن نااطمینانی‌های موجود ضروری به نظر می‌رسد. مسئله بهینه‌یابی چندهدفه برای این منظور به گونه‌ای فرمولسازی می‌گردد که هم هزینه تولید برق و هم آلودگی زیست محیطی با در نظر گرفتن نااطمینانی‌های مربوط به شرایط آب و هوایی، قیمت‌ها، سیاست‌های اقتصادی و زیست محیطی و ... باشد.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

یکی از توابع هدف در اقتصاد به حداقل رساندن ارزش حال هزینه سیستم است که مربوط به هزینه‌های منابع انرژی، هزینه‌های متغیر برای تولید برق و هزینه سرمایه برای گسترش ظرفیت فناوری‌های تولید برق است. تابع هدف دوم مربوط به حداقل کردن ارزش حال هزینه‌های آلودگی دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) ناشی از تولید برق است. متغیرهای تصمیم شامل، متغیرهای مربوط به مصرف انرژی مانند زغال سنگ، گاز طبیعی، باد، آب و فتوولتائیک و توسعه ظرفیت تولید برق است. محدودیت‌ها نیز تعدادی از نابرابری‌ها برای تعریف روابط بین متغیرهای مختلف تصمیم‌گیری، شرایط سیستم و محدودیت منابع آبی جهت تولید برق هستند. از اینرو، توابع هدف بصورت زیر است (لی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰، ص: ۴۷۷):

۱- Marler and Arora

۲- Tong et al.

۳- Huang et al.

۴- Li et al.



$$Min f_1 = \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T ERC_{kt} * CO_{kt} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T RE_{kt} * CD_{kt} + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T AK_{kt} * X_{kt} \right] * ( \quad (4)$$

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

به طوری که محدودیت‌ها شامل (لی و همکاران، ۲۰۱۰، ص: ۴۷۷):

الف) محدودیت‌های تعادلی برای انواع مختلف حامل‌های انرژی

$$(i) le * CD_{kt} \leq [QF_{kt} * (RCO_k + X_{kt})] \quad (5)$$

$$[QF_{kt} * (RCO_k + X_{kt})] * EC_{kt} \leq CO_{kt} \quad \forall k, t$$

ب) محدودیت مربوط به توازن عرضه و تقاضای برق

$$le * \sum_{k=1}^K CD_{kt} \geq D_t \quad \forall t \quad (6)$$

ج) محدودیت مربوط به توسعه ظرفیت

$$X_{kt} \leq M_{kt} \quad \forall k, t \quad (7)$$

د) محدودیت منابع آبی در دسترس برای تکنولوژی‌های تولیدی مختلف

$$\sum_{k=1}^K Wr_k * CD_{kt} \leq WA_t \quad \forall t \quad (8)$$

ه) محدودیت منابع آبی سد (مخزن) جهت تولید برق آبی:

$$Cw_{hydro} * CD_{hydro,t} \leq RW_t \quad \forall t \quad (9)$$

به طوری که  $k$  نوع تکنولوژی تولید برق است ( $k=1, 2, \dots, K$ ) و  $t$  دوره زمانی است

که  $t=1, 2, \dots, T$ ، همچنین پارامترها و متغیرهای تصمیم در جدول (۲) تعریف شده

است.

جدول (۲): تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم

پارامترها	تعریف
$ERC_{kt}$	قیمت خرید منابع انرژی (دلار آمریکا به ازای هر گیگا ژول)
$RE_{kt}$	هزینه‌های عملیاتی شامل تعمیر، نگهداری و بهره برداری از تکنولوژی تولیدی $k$ در دوره زمان $t$ (دلار آمریکا به ازای هر کیلو وات)
$AK_{kt}$	هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای گسترش ظرفیت از تکنولوژی تولیدی $k$ در دوره زمان $t$ (دلار آمریکا به ازای هر کیلو وات)
$D_t$	متغیر تقاضای کل برق در دوره $t$ (مگاوات ساعت)
$PCE_{kt}$	هزینه آلودگی $CO_2$ به ازای هر واحد تولید برق
$QF_{kt}$	میزان تولید برق به ازای هر واحد ظرفیت برای تکنولوژی تولیدی $k$ در دوره زمان $t$ (درصد)
$EC_{kt}$	مصرف انرژی به ازای هر واحد تولید برق برای تکنولوژی تولیدی $k$ در دوره زمان $t$ (گیگاژول به کیلو وات)
$b_k$	نرخ یادگیری تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر (درصد)
$le$	ضریب بار برق تولیدی
$RC_{0k}$	ظرفیت اولیه تولید برق (مگاوات)
$M_{kt}$	حداکثر ظرفیت تکنولوژی (مگاوات)
$WR_k$	میزان آب مصرفی تکنولوژی تولیدی $k$ (متر مکعب به ازای هر مگاوات ساعت)
$WA_t$	میزان آب در دسترس جهت تولید برق در دوره زمان $t$ (معادل میزان آب مصرفی بر حسب متر مکعب)
$C^{hydro}$	ضریب تبدیل هر مترمکعب آب پشت سد به برق تولیدی از طریق تکنولوژی برق آبی (متر مکعب به مگاوات ساعت)
$RW_t$	میزان آب پشت سد جهت تولید برق آبی در دوره زمان $t$ (معادل میزان آب مصرفی پشت سد بر حسب متر مکعب)
متغیرهای تصمیم	تعریف
$CO_{kt}$	مصرف انواع مختلف انرژی در دوره $t$ (گیگاژول)
$CD_{kt}$	تولید برق توسط نیروگاه‌های تولیدی در دوره $t$ (مگاوات)
$CD^{hydro,t}$	تولید برق توسط نیروگاه تولیدی برق آبی در دوره $t$ (مگاوات)
$X_{kt}$	میزان گسترش ظرفیت تکنولوژی تولیدی $k$ در دوره زمان $t$ (مگاوات)
$\rho$	نرخ تنزیل (درصد)

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی، وزارت نیرو و بانک مرکزی

اگرچه روش‌های مختلفی برای حل الگوهای غیرخطی چندهدفه فازی ارائه شده‌اند. اما هنوز هم تبدیل این الگوها به یک فرم قطعی توسط محققان زیادی بکار گرفته می‌شود

(لای و هوانگ، ۱۹۹۴). از مزیت‌های تبدیل الگوهای فازی به فرم قطعی اینست که به راحتی می‌توان با روش‌ها و الگوریتم‌های ساده بهینه‌یابی کرد. ابتدا الگوی خطی چند هدفه فازی در زیر توضیح داده می‌شود (وو و گوو، ۲۰۰۱<sup>۵</sup>، ص: ۸۸):

$$\begin{aligned} \max Z(x) &= [Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_n(x)]^T \\ \text{s.t.} \\ (Ax)_j &\leq \tilde{b}_j, j = 1, 2, \dots, m; x \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه (۵)،  $Z_i(x)$  بیانگر توابع هدف،  $(Ax)_j$  توابع محدودیت و  $x$  بردار متغیرهای تصمیم است.  $\tilde{b}_j$  مقادیر سمت راست محدودیت‌ها و فازی است که بصورت دامنه  $[Z_i^0, Z_i^1]$  تعریف می‌شود. از اینرو برای هر تابع هدف یک دامنه ممکن  $[b_j, b_j + p_j]$  بدست می‌آید که بصورت زیر است (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۸):

$$\begin{aligned} Z_i^0 &= \max Z_i(x) \\ \text{s.t.} \quad (Ax)_j &\leq b_j, \quad \forall j \\ x &\geq 0; \\ \text{and} \\ Z_i^1 &= \max Z_i(x) \\ \text{s.t.} \quad (Ax)_j &\leq b_j + p_j \quad \forall j \\ x &\geq 0; \end{aligned} \quad (11)$$

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  $\mu_{0i}$  به قرار زیر است (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۸):

$$\mu_{0i}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_i(x) > Z_i^1 \\ \frac{(Z_i(x))^2 - (Z_i^0)^2}{(Z_i^1)^2 - (Z_i^0)^2} & \text{if } Z_i^0 \leq Z_i(x) \leq Z_i^1 \\ 0 & \text{if } Z_i(x) < Z_i^0 \end{cases} \quad (12)$$

چنانچه تابع هدف حداقل سازی باشد، تابع عضویت بصورت خطی غیر افزایشی می‌گردد. بدین صورت که اگر  $Z_i(x) < Z_i^0$  ، مقدار یک و اگر  $Z_i(x) > Z_i^1$  ، مقدار صفر برای تابع عضویت تعیین می‌شود. برای هریک از محدودیت‌های الگو نیز تابع عضویت خطی غیر افزایشی  $(\mu_j(x))$  تعیین می‌شود. چرا که محدودیت‌ها به صورت کوچکتر مساوی هستند. از اینرو تابع عضویت برای تابع هدف  $\lambda$ م به صورت زیر است (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۸):

$$\mu_j(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } (Ax)_j > b_j \\ \frac{(b_j + p_j)^2 - (Ax)_j^2}{p_j^2} & \text{if } b_j \leq (Ax)_j \leq b_j + p_j \\ 0 & \text{if } (Ax)_j < b_j + p_j \end{cases} \quad (13)$$

چنانچه تابع محدودیت به صورت بزرگتر مساوی باشد، تابع عضویت بصورت خطی غیر کاهشی تعیین می‌شود. بدین صورت که اگر  $A(x)_j < b_j$  ، مقدار صفر و اگر  $A(x)_j > b_j + p_j$  ، 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  $\alpha$  به فرم زیر تبدیل کرد (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۹):

$$\begin{aligned} \max \quad & \alpha \\ \text{s.t.} \quad & 1 \geq \mu_{0i}(x) \geq \alpha, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ & 1 \geq \mu_j(x) \geq \alpha, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \\ & \alpha \in [0, 1] \text{ and } x \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

از این رو میزان بهینه  $\alpha$  بدست می‌آید که بیانگر سطح تأمین تمامی توابع عضویت بطور همزمان است. هرچه میزان  $\alpha$  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  $\alpha$  بهینه ( $\alpha^*$ ) برای تمامی توابع عضویت حاصل می‌شود. سپس در مرحله دوم با استفاده از روش عملگر متوسط، میزان بهینه میانگین  $\alpha$  ( $\bar{\alpha}$ ) بدست می‌آید. به گونه‌ای که برای هر تابع هدف و محدودیت یک  $\alpha$  متفاوت و در دامنه  $\alpha^*$  تا یک در نظر گرفته می‌شود (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۹):

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{\alpha} = \frac{1}{n+m} \sum_{k=1}^{n+m} \alpha_k \\ \text{s.t.} \quad & 1 \geq \mu_{0i}(x) \geq \alpha_i \geq \alpha^* \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ & 1 \geq \mu_j(x) \geq \alpha_j \geq \alpha^* \geq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (15)$$

در ادامه روش توافقی که از ترکیب دو روش دو مرحله‌ای و عملگر میانگین حاصل می‌شود توسط وو و گوو (۲۰۰۱) پیشنهاد شده است. در این روش در مرحله اول با استفاده از روش عملگر حداقل میزان  $\alpha$  بهینه ( $\alpha^*$ ) برای تمامی توابع استخراج می‌شود. سپس توابع عضویت برای تمامی توابع هدف و محدودیت بصورت تابعی از متغیرهای تصمیم ( $X$ ) محاسبه می‌گردد. در مرحله دوم تابع هدف بصورت میانگین توابع عضویت با توجه به محدودیت‌های الگو حداکثر می‌گردد. لازم به ذکر است که برای مرحله دوم در اینجا برخلاف روش دو مرحله‌ای و روش عملگر حداقل یک  $\alpha$  پارامتریک برای تمامی توابع عضویت در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در دو روش قبل  $\alpha$  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  $\alpha^*$  قرار دارند. این مقادیر  $\alpha$  مختلف، توابع عضویت مختلفی را ایجاد می‌کند که بسته به ترجیحات تصمیم‌گیرندگان انتخاب می‌شوند (وو و گوو، ۲۰۰۱، ص: ۸۸ و مارتین و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۱، ص: ۷۸۳۴):

$$\begin{aligned} \max \quad & \tilde{\alpha} = \frac{1}{n+m} \left[ \sum_{i=1}^n \mu_{0i}(x) + \sum_{j=1}^m \mu_j(x) \right] \\ \text{s.t.} \quad & 1 \geq \mu_{0i}(x) \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ & 1 \geq \mu_j(x) \geq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

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.

#### ۴. یافته‌های پژوهش

میانگین هزینه‌های تولید (شامل هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و سرمایه‌گذاری نصب و گسترش ظرفیت تولید) و هزینه‌های آلودگی دی اکسید کربن ناشی از تولید برق به تفکیک تکنولوژی‌های تولیدی مختلف در جدول (۳) گزارش شده است. اطلاعات جدول (۳) نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در نصب و ایجاد ظرفیت تکنولوژی فتوولتائیک و سوخت زغال سنگ به ترتیب بیشترین و کمترین هزینه را به دنبال دارد. این بدین مفهوم است که در مقایسه با سایر تکنولوژی‌های تولیدی، گسترش ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتائیک بسیار هزینه‌بر و حال آنکه گسترش ظرفیت نیروگاه‌های زغال سنگ مقرون به صرفه است. همچنین مقایسه هزینه‌های بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات نیز نشان می‌دهد که نیروگاه‌های سوخت زغال سنگ و بادی به ترتیب دارای کمترین و بیشترین هزینه هستند. اما مقایسه هزینه آلودگی تکنولوژی‌های تولیدی مختلف بیانگر آنست که زغال سنگ بیشترین هزینه آلودگی را دارا است. از اینرو، تضاد در میان تکنولوژی‌های مختلف جهت تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی جهت گسترش ظرفیت تولید برق مشخص می‌شود.

جدول (۳): هزینه‌های تکنولوژی‌های تولیدی مختلف

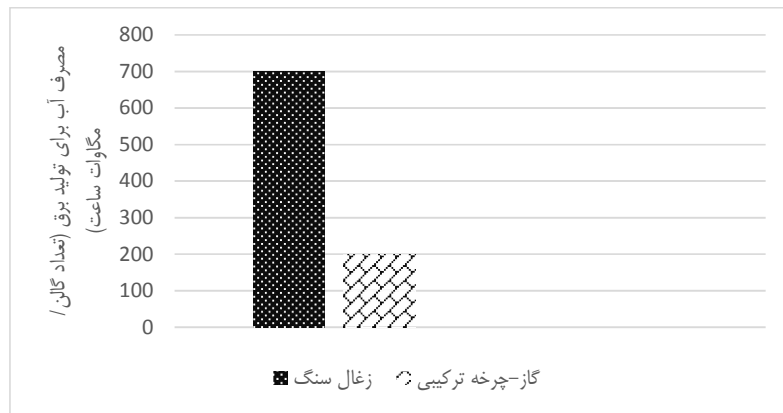
تکنولوژی تولید	هزینه بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات (USD per kw)	هزینه سرمایه‌گذاری نصب ظرفیت (USD per kw)	هزینه آلودگی (USD per kw)
نیروگاه بخار با سوخت زغال سنگ <sup>۱</sup>	۴۵	۱۳۰۰	۰/۳۳۳
نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی	۱۶۰	۲۳۰۰	۰/۱۸۵
نیروگاه برق آبی	۸۰	۲۷۷۵	۰/۰۰۵
نیروگاه بادی	۱۷۰	۴۸۵۰	۰/۰۱۳
نیروگاه فتوولتائیک	۸۰	۵۲۵۰	۰/۰۱۹

منبع: آژانس بین‌المللی انرژی و بانک جهانی (۲۰۱۵).

عمده مصرف آب نیروگاه‌ها در سامانه‌های خنک‌کننده، جبران نشستی آب در سیکل بویلرها، سامانه تزریق آب به توربین‌های گاز برای خنک‌کاری هوای ورودی، سیستم آتش‌نشانی، شست‌وشو و آبیاری فضای سبز و اخیراً سامانه‌های حذف آلاینده‌ها از گازهای خروجی دودکش است. در نیروگاه‌های آبی، کل آب مجدداً به منبع اصلی بر می‌گردد و در فرآیند تولید، مصرف آب وجود ندارد. همچنین در نیروگاه‌های بادی و فتوولتائیک نیز مصرف آب در فرایند تولید صفر است. میانگین مصرف آب جهت تولید برق از طریق دو تکنولوژی سوخت زغال سنگ و گاز-چرخه ترکیبی برای سیستم خنک‌کننده‌ی گردشی (چرخشی)<sup>۲</sup> در نمودار (۱) ارائه شده است. نمودار (۱) نشان می‌دهد که سوخت زغال سنگ برای تولید برق نیاز به مصرف آب بیشتری دارد.

۱- Steam Coal - Subcritical

۲- Recirculating



نمودار (۱): میزان مصرف آب جهت تولید برق از طریق تکنولوژی‌های تولیدی مختلف

منبع: یافته‌های پژوهش

در ادامه مطالعه‌ی حاضر، برنامه گسترش ظرفیت تولید برق با تأمین همزمان هر دو هدف اقتصادی (حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های تولید) و زیست محیطی (حداقل‌سازی ارزش حال هزینه‌های دی اکسید کربن) تحت شرایط نااطمینانی با و بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی برای استان کرمان تدوین و نتایج آن با یکدیگر مقایسه گردید.

۴-۱. برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت الگوی غیر خطی چندهدفه فازی بدون محدودیت منابع آبی الگوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان با اهداف اقتصادی و زیست محیطی تحت شرایط نااطمینانی تقاضا و عرضه حل شد که نتایج آن در جدول (۴) آمده است. سطح برش آلفا ( $\alpha$ ) بهینه از حل الگوی چندهدفه غیر خطی فازی  $0/608$  است. با توجه به این سطح برش آلفا ( $\alpha$ )، میزان حداقل ارزش حال هزینه‌های تولیدی و هزینه‌های آلودگی دی اکسید کربن با نرخ تنزیل ۳ درصد به ترتیب  $10^6 * 146/987$  و  $10^3 * 11/982$  میلیون دلار برآورد شد.

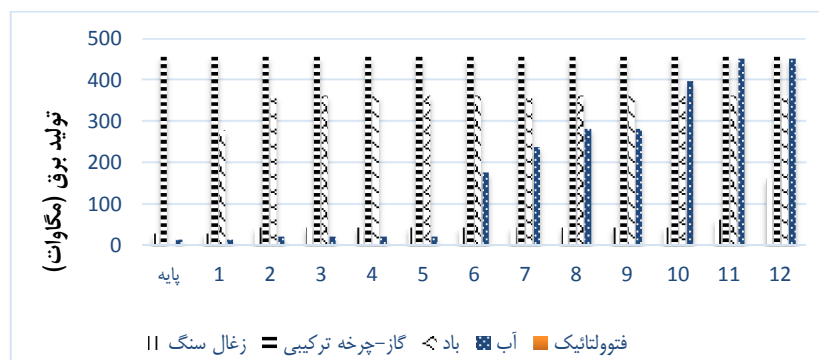
نتایج جدول (۴) و نمودار (۲) نشان می‌دهد که در سال‌های اول تا پنجم افق برنامه‌ریزی، تولید برق تکنولوژی نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی دارای بیشترین سهم تولید



است (۴۵۵/۰۱۰ مگاوات ساعت). در این سال‌ها سرمایه‌گذاری گسترش ظرفیت تکنولوژی بادی صورت گرفته و این انرژی، دومین منبع مهم پس از تکنولوژی سوخت گاز-چرخه ترکیبی جهت تولید برق است. به گونه‌ای که ظرفیت تولید برق تکنولوژی بادی در سال اول ۷۶۹/۸۴۰ مگاوات و در سال دوم ۲۳۰/۱۶۰ مگاوات گسترش یافته و تولید برق از این تکنولوژی به ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات افزایش یافته است. تولید برق با تکنولوژی زغال سنگ سومین منبع تولید برق در طی این سال‌ها است که ظرفیت این تکنولوژی به مانند سال پایه بوده و گسترشی پیدا نکرده است. کم‌ترین سهم تولید برق در این سال‌ها نیز مربوط به تکنولوژی تولیدی برق آبی است. ظرفیت این تکنولوژی 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 رسیده است. همچنین تکنولوژی فتوولتائیک جهت تولید برق طی این سال‌ها بکار نرفته است. از سال ششم تا سال نهم، همچنان دو تکنولوژی تولیدی سوخت گاز-چرخه ترکیبی و بادی به ترتیب ۴۴۵/۰۱۰ و ۳۶۰/۵۵۴ مگاوات بیشترین سهم تولید را دارا هستند. اما طی این سال‌ها، ظرفیت تولید برق تکنولوژی آبی گسترش یافته و به سومین منبع تولید برق تبدیل شده است. به گونه‌ای که تولید برق تکنولوژی آبی از ۲۰/۷۵۷ مگاوات در سال پنجم به ۲۸۰/۶۲۷ در سال نهم افزایش یافته است. طی این سال‌ها مجموع گسترش ظرفیت تولیدی تکنولوژی آبی ۵۸۷/۰۵۱ مگاوات است. در طی این سال‌ها تولید برق تکنولوژی سوخت زغال سنگ (۴۳/۳۸۶ مگاوات) با همان ظرفیت تولیدی سال‌های گذشته ثابت باقی مانده است. اما همچنان تکنولوژی فتوولتائیک طی این سال‌ها در تولید برق به کار نمی‌روند. از سال دهم تا سال دوازدهم، تولید برق تکنولوژی با نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی با همان ظرفیت تولید سال پایه ۴۵۵/۰۱۰ مگاوات است که دارای بیشترین سهم در تولید برق است. در طی این سال‌ها مجدداً ظرفیت تولیدی تکنولوژی آبی معادل ۳۸۱/۵۹۰ مگاوات گسترش و میزان تولید برق تکنولوژی آبی از ۲۸۰/۶۲۷ مگاوات در سال نهم به ۴۴۹/۵۵۱ مگاوات در سال دوازدهم افزایش یافته

است. در این سال‌ها، تکنولوژی تبدیلی بادی پس از دو تکنولوژی سوخت گاز-چرخه ترکیبی و آبی، 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 تکنولوژی سوخت زغال سنگ نیز طی این سال‌ها به میزان ۱۶۳/۷۲۰ گسترش و میزان برق تولیدی این تکنولوژی از ۴۳/۳۸۶ مگاوات طی سال‌های گذشته به ۱۶۱/۷۷۴ مگاوات در سال دوازدهم افزایش یافته است. همچنین تکنولوژی فتوولتائیک طی این سال‌ها در تولید برق بکار نرفته است.

به طور کلی می‌توان بیان کرد که تکنولوژی فتوولتائیک در افق برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید با تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی تحت شرایط نااطمینانی تقاضا و عرضه جای ندارد. این بدین دلیل است که تکنولوژی فتوولتائیک، هزینه‌ی نصب و ایجاد ظرفیت تولیدی بسیار بالایی دارد. اما ظرفیت تولیدی سایر تکنولوژی‌های تجدیدپذیر (تکنولوژی‌های بادی و آبی) در این برنامه‌ریزی توسعه یافته است. به گونه‌ای که تکنولوژی بادی با گسترش ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات و تکنولوژی آبی با ۹۸۳/۱۳۰ مگاوات، سهم معنی‌داری در تولید برق دارند. این بدین مفهوم است که تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی در تولید برق، زمانی ممکن است که ظرفیت تولیدی تکنولوژی‌های تجدیدپذیر از جمله بادی و آبی افزایش یابد تا در کنار تولید برق از طریق تکنولوژی‌های تجدیدناپذیر، تقاضای برق را پوشش دهد.



نمودار (۲): میزان برق تولیدی تکنولوژی‌های مختلف تحت الگوی برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی بدون محدودیت منابع آبی

منبع: یافته‌های پژوهش

جدول (۴): نتایج الگوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت الگوی غیر خطی چند هدفه فازی بدون محدودیت منابع آبی<sup>۲</sup>

دوره زمانی							تکنولوژی‌های تبدیلی (MW)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	پایه	
۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۲۸/۲۸	۲۸/۲۸	تولید برق با سوخت زغال سنگ
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال سنگ
۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	تولید برق با سوخت گاز-چرخه ترکیبی
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز-چرخه ترکیبی
۱۷۶/۳۴	۲۰/۷۵	۲۰/۷۵	۲۰/۷۵	۲۰/۷۵	۱۴/۳۴	۱۴/۳۴	تولید برق آبی
۳۵۱/۲۶	۰	۰	۰	۱۴/۴۸	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق آبی
۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۲۷۷/۵۶	۰	تولید برق بادی
۰	۰	۰	۰	۲۳۰/۱۶	۷۶۹/۸۴	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی

۳- مدل غیرخطی چند هدفه فازی با نرم‌افزار GAMS 24.9.1 حل شده‌است

تولید برق فتوولتائیک	.	.	.	.	.	.
گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک	.	.	.	.	.	.

ادامه جدول (۴).

تکنولوژی‌های تبدیلی (MW)	دوره زمانی					
	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷
تولید برق سوخت زغال سنگ	۱۶۱/۷۷	۶۱/۵۰۹	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸	۴۳/۳۸
گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال سنگ	۱۳۸/۶۵	۲۵/۰۶	.	.	.	.
تولید برق با گاز-چرخه ترکیبی	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱
گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز-چرخه ترکیبی	.	.	.	.	.	.
تولید برق آبی	۴۴۹/۵۵	۴۴۹/۵۵	۳۹۶/۳۳	۲۸۰/۶۲	۲۸۰/۶۲	۲۳۶/۸۴
گسترش ظرفیت نیروگاه برق آبی	.	۱۲۰/۲۲	۲۶۱/۳۷	.	۹۸/۹۲	۱۳۶/۸۸
تولید برق بادی	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵	۳۶۰/۵۵
گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی	.	.	.	.	.	.
تولید برق فتوولتائیک	.	.	.	.	.	.
گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک	.	.	.	.	.	.
سطح برش آلفا						۰/۶۰
ارزش حال هزینه‌های تولیدی (میلیون دلار)						$۱۴۶/۹۸ * ۱۰^۶$
ارزش حال هزینه‌های آلودگی CO2 (میلیون دلار)						$۱۱/۹۸ * ۱۰^۳$

منبع: یافته‌های پژوهش

۴-۲. برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت الگوی غیر خطی چندهدفه فازی با محدودیت منابع آبی الگوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق استان کرمان با اهداف اقتصادی و زیست محیطی تحت شرایط نااطمینانی تقاضا و عرضه و با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی حل شد که نتایج آن در جدول (۵) آمده است. سطح برش آلفا ( $\alpha$ ) بهینه از حل الگوی چندهدفه غیر خطی فازی ۰/۵۲۲ است. با توجه به این سطح برش آلفا ( $\alpha$ )، میزان حداقل ارزش حال هزینه‌های تولیدی و هزینه‌های آلودگی دی اکسیدکربن با نرخ تنزیل ۳ درصد به ترتیب  $۱۵۱/۶۸۷ * ۱۰۶$  و  $۱۲/۱۳۶ * ۱۰۳$  میلیون دلار برآورد شد.

نتایج جدول (۵) و نمودار (۳) نشان می‌دهد که در تمامی سال‌های افق برنامه‌ریزی به جزء سال اول، تولید برق نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی دارای بیشترین سهم تولید است. میزان تولید از طریق تکنولوژی گاز-چرخه ترکیبی طی سال‌های برنامه‌ریزی روند افزایشی داشته است. به گونه‌ای که در سال دوازدهم، میزان تولید از طریق این تکنولوژی به ۱۲۲۵/۹۰۰ مگاوات رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که تولید برق نیروگاه بادی در سال اول افق برنامه‌ریزی معادل ۵۱۷/۰۲۰ مگاوات است که به عنوان اصلی‌ترین تکنولوژی تولید برق در این سال به حساب می‌آید. از سال دوم تا دوازدهم، تولید برق بادی تقریباً روند ثابتی داشته است و پس از تکنولوژی تولیدی گاز-چرخه ترکیبی، دارای بیشترین سهم تولید برق است. از سال ششم افق برنامه‌ریزی، تولید برق فتوولتائیک به برنامه گسترش ظرفیت اضافه شده است و در پایان افق برنامه‌ریزی با میزان تولید ۱۸۰/۲۰۰ مگاوات، پس از دو تکنولوژی تولیدی گاز-چرخه ترکیبی و بادی بیشترین سهم تولید را به خود اختصاص داده است. نتایج نشان می‌دهد که تولید برق با سوخت زغال‌سنگ و برق آبی دارای کمترین سهم تولید هستند. به گونه‌ای که در پایان افق برنامه‌ریزی، میزان تولید از طریق این دو تکنولوژی به ترتیب ۵۴/۳۲۳ و ۲۱/۱۴۹ مگاوات است.

در پایان نتایج بیانگر آن است که ظرفیت نیروگاه برق بادی طی سال‌های برنامه‌ریزی به ۱۰۰۰ مگاوات افزایش یافته است. این در حالی است که در سال پایه، این تکنولوژی

نقشی در تولید برق استان نداشته است. ظرفیت نیروگاه گاز-چرخه ترکیبی با افزایش ۹۲۴/۹۵۰ مگاواتی همراه بوده و در پایان افق برنامه‌ریزی، ظرفیت آن به ۲۱۴۲/۹۵۰ مگاوات رسیده است و به مانند سال پایه بیشترین سهم تولید برق در سطح استان را به خود اختصاص داده است. در برنامه گسترش ظرفیت با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی، نیروگاه فتوولتائیک که در سال پایه هیچ ظرفیتی برای تولید برق در سطح استان را دارا نیست، با افزایش ظرفیت ۵۰۰ مگاواتی در پایان افق برنامه‌ریزی به عنوان سومین منبع مهم تولید برق استان به حساب می‌آید. نیروگاه برق آبی با گسترش ظرفیت بسیار ناچیز ۱۴/۴۸۹ مگاواتی طی این سال‌ها همراه بوده است و برای نیروگاه تولید برق با سوخت ذغال سنگ هیچ افزایش ظرفیتی در برنامه لحاظ نشده است.

به طور کلی نتایج برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی نشان می‌دهد که تولید برق با سوخت ذغال سنگ به دلیل استفاده زیاد از آب در فرایند تولید به نسبت سایر تکنولوژی‌های تولیدی، سهم کمی از تولید را به خود اختصاص داده است. همچنین تولید برق آبی به دلیل در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی سد جیرفت کمترین سهم تولید را دارا است.

جدول (۵): نتایج الگوی برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت الگوی غیر خطی چند هدفه فازی با محدودیت منابع آبی

دوره زمانی							تکنولوژی‌های تبدیلی (MW)
۶	۵	۴	۳	۲	۱	پایه	
۵۴/۳۲	۴۳/۳۲	۴۳/۳۲	۴۳/۳۲	۴۳/۳۲	۴۳/۳۲	۲۸/۲۸	تولید برق با سوخت زغال سنگ
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال سنگ
۶۹۶/۸	۵۸۱/۴۶	۵۸۱/۴۶	۵۸۱/۴۶	۵۸۱/۴۶	۴۵۵/۰۱	۴۵۵/۰۱	تولید برق با سوخت گاز- چرخه ترکیبی
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز- چرخه ترکیبی
۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۱۴/۳۴	تولید برق آبی
۰	۰	۰	۰	۰	۱۴/۴۸	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق آبی
۵۵۲/۱۵	۵۴۹/۹	۵۴۹/۹	۵۴۹/۹	۵۴۹/۹	۵۱۷/۰۲	۰	تولید برق بادی
۴/۰۸۰	۰	۰	۰	۵۹/۵۴	۹۳۶/۳۸	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی
۱۰۹/۵۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	تولید برق فتوولتائیک
۳۰۳/۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک

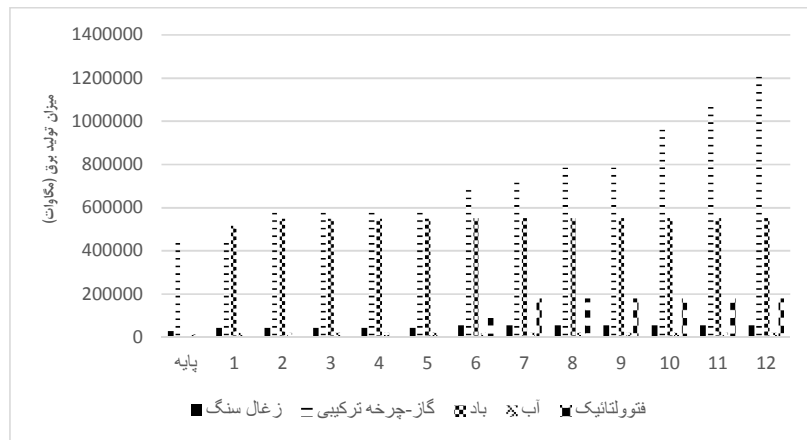
ادامه جدول (۵):

دوره زمانی							تکنولوژی‌های تبدیلی (MW)
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷		
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷		تولید برق سوخت زغال سنگ
۵۴/۳۲	۵۴/۳۲	۵۴/۳۲	۵۴/۳۲	۵۴/۳۲	۵۴/۳۲		گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال

							سنگ
.	.	.	.	.	.		تولید برق با گاز- چرخه ترکیبی
۱۲۲۵/۹	۱۰۷۲/۴	۹۶۳/۱۵	۷۸۵/۹۶	۷۸۵/۹۶	۷۱۸/۹		گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز- چرخه ترکیبی
۲۶۸/۴۱	۱۹۰/۹۷	۳۰۹/۷۲	.	۱۱۷/۲۱	۳۸/۶۳		تولید برق آبی
۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴	۲۱/۱۴		گسترش ظرفیت نیروگاه برق آبی
.	.	.	.	.	.		تولید برق بادی
۵۵۲/۱۵	۵۵۲/۱۵	۵۵۲/۱۵	۵۵۲/۱۵	۵۵۲/۱۵	۵۵۲/۱۵		گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی
.	.	.	.	.	.		تولید برق فتوولتائیک
۱۸۰/۲۱	۱۸۰/۲۱	۱۸۰/۲۱	۱۸۰/۲۱	۱۸۰/۲۱	۱۸۰/۲۱		گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک
.	.	.	.	.	۱۹۶/۱۳		سطح برش آلفا
						۰/۵۲	ارزش حال هزینه‌های تولیدی (میلیون دلار)
						۱۵۱/۶۸*۱۰ <sup>۶</sup>	ارزش حال هزینه‌های آلودگی CO <sub>2</sub> (میلیون دلار)
						۱۲/۱۳*۱۰ <sup>۳</sup>	

منبع: یافته‌های پژوهش





نمودار (۳): میزان برق تولیدی تکنولوژی‌های مختلف تحت برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه فازی با محدودیت منابع آبی

منبع: یافته‌های پژوهش

##### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

این مطالعه سهم معناداری در الگوسازی چند هدفه فازی تحت نااطمینانی‌های طرف تقاضا و عرضه جهت برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق دارد. در این مطالعه، اهداف هزینه‌های اقتصادی و زیست محیطی عرضه‌ی نامطمئن برق با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی جهت تامین تقاضای نامطمئن برق حداقل‌سازی شد و نتایج آن با الگوی بدون محدودیت منابع آبی مقایسه گردید. برای این تحلیل، بازار برق استان کرمان با استفاده از الگوی فازی چند هدفه شبیه‌سازی شد. مقایسه نتایج برنامه‌های گسترش ظرفیت تولید برق با و بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی در جدول (۶) ارائه شده است.

## جدول (۶): مقایسه نتایج الگوی چندهدفه فازی بدون (با) محدودیت منابع آبی

الگوی دو هدفه فازی با محدودیت منابع آبی	الگوی دو هدفه فازی بدون محدودیت منابع آبی	تکنولوژی‌های تبدیلی (MW)
۰	۱۶۳/۷۲۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت زغال سنگ
۹۲۴/۹۵۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه با سوخت گاز-چرخه ترکیبی
۱۴/۴۸۹	۹۸۳/۱۳۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق آبی
۱۰۰۰	۱۰۰۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق بادی
۵۰۰	۰	گسترش ظرفیت نیروگاه برق فتوولتائیک

منبع: یافته‌های پژوهش

نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که برای تأمین همزمان اهداف اقتصادی و زیست محیطی بدون در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی بایستی ظرفیت تکنولوژی‌های تجدیدپذیر بادی و آبی جهت تولید برق افزایش یابد. نتایج این برنامه نشان می‌دهد که ظرفیت تولید برق از طریق باد، آب و ذغال‌سنگ به ترتیب ۱۰۰۰، ۹۸۳/۱۳۰ و ۱۶۳/۷۲۰ مگاوات افزایش یافته است.

اما نتایج با در نظر گرفتن محدودیت منابع آبی بیانگر آنست که تکنولوژی‌های بادی، گاز-چرخه ترکیبی و فتوولتائیک به ترتیب با گسترش ظرفیت ۱۰۰۰، ۹۲۴/۹۵۰ و ۵۰۰ مگاوات نقش به‌سزایی در تولید برق استان دارند. به عبارتی محدودیت منابع آبی باعث شده است که طی افق برنامه‌ریزی ۱۲ ساله، دو تکنولوژی گاز-چرخه ترکیبی و فتوولتائیک جایگزین تکنولوژی‌های تولیدی آبی و زغال‌سنگ در فرایند تولید شود. بنابراین چنانچه محدودیت منابع آبی در برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت لحاظ نگردد، منجر به تغییر ساختار برنامه خواهد شد و این برای مناطقی به مانند استان کرمان که در وضعیت بحرانی منابع آب قرار دارد، می‌تواند خطرناک شود. از اینرو به دلیل تفاوت در نتایج، نگاه جامع و همه‌جانبه به مسأله برنامه‌ریزی گسترش ظرفیت تولید برق با در نظر گرفتن تمامی ابعاد و ویژگی‌های منطقه‌ای بایستی مورد توجه سیاست‌گذاران در این

عرصه قرار گیرد. بر اساس نتایج این مطالعه پیشنهاد می‌شود سیاست گذران با توجه به محدودیت منابع آب استان در نقشه راه صنعت برق استان کرمان ضمن توجه به گسترش نیروگاه گازی چرخه ترکیبی و فتوولتایک، بدلیل وجود دو کانون اصلی باد استان بردسیر و شهر بابک بر اساس اطلس باد کشور، اقدامات لازم برای سرمایه‌گذاری در انرژی باد در استان را مد نظر قرار دهند، از طریق شراکت با شرکت‌های برق بادی در دنیا از طریق سرمایه‌گذاری مشترک زمینه ورود تکنولوژی انرژی باد را به استان فراهم نمایند.

#### منابع

- 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.
- Bistline, J. E. (2016). Electric sector capacity planning under uncertainty: Climate policy and natural gas in the US. *Energy Economics*, 51, 236-251.
- Charitopoulos, V. M., & Dua, V. (2017). A unified framework for model-based multi-objective linear process and energy optimisation under uncertainty. *Applied Energy*, 186, 539-548.
- Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M. & Sadeghi, Z. (2017). Solar photovoltaic power plants in five top oil-producing countries in Middle East: A case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 1271-1280.
- 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.
- Fazlollahi, S. & Maréchal, F. (2013). Multi-objective, multi-period optimization of biomass conversion technologies using evolutionary algorithms and mixed integer linear programming (MILP). *Applied Thermal Engineering*, 50 (2), 1504-1513.
- Hu, Y., Bie, Z. H., Ding, T. & Lin, Y. (2016). An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning. *Applied Energy*, 167, 280-293.
- 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.
- Jin, S. W., Li, Y. P., Huang, G. H., Hao, Q. and Nie, S. (2015). Development

of an integrated optimization method for analyzing effect of energy conversion efficiency under uncertainty – A case study of Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, China. *Energy Conversion and Management*, 106, 687-702.

- Li, Y. F., Huang, G. H., Li, Y. P., Xu, Y. & Chen, W. T. (2010). Regional-scale electric power system planning under uncertainty—A multi stage interval-stochastic integer linear programming approach. *Energy Policy*, 38, 475-490.

- Li, FF. & Qiu, J. (2015). Multi-objective optimization for integrated hydro-photovoltaic power system. *Applied Energy*, 167, 377-384.

- Lin, Q.G., Huang, G.H., Bass, B. & Qin, X.S. (2009). An interval-fuzzy two-stage stochastic optimization model for regional energy system planning under uncertainty. *Energy Policy*, 37, 868-878.

- Macknick, J., Sattler, S., Averyt, K., Clemmer, S., & Rogers, J. (2012). The water implications of generating electricity: water use across the United States based on different electricity pathways through 2050. *Environmental Research Letters*, 7(4), 1-10.

- Marler, RT. & Arora, JS. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395.

- Martin, M. A., Cuadrado, M. L. & Romero, C. (2011). Computing efficient financial strategies: An extended compromise programming approach. *Applied Mathematics and Computation*, 217, 7831-7837.

- Maulbetsch, S. & Michael, N. (2006). Cost and Value of Water Use at Combined Cycle Power Plants, California Energy Commission.

- McDermott, R. & Nilsen, A. (2014). Electricity prices, river temperatures, and cooling water scarcity. *Land Economics*, 90 (1), 131–148.

- 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.

- Razavi, S. A. & Ahmadi-Shadmehri, M. T. (2014). Investigating the factors influencing the demand for electricity in service providing sector using Firefly and Cuckoo algorithms. *Journal of Economics and Modelling*, 5, 111-134. (In Persian).

- Ricardo, J., Sailor, J. (1998) .A modelling methodology for assessing the impact of climate variability and climatic change on hydro-electric generation. *Energy Conversion Management*, 39 (14), 1459–1469.

- 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.

- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, W., Clark, B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, M., Colón-González, J. & et al. (2014). Multi

model assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (9), 3245–3250.

- Sharifi, A. R., Kalin, L. & Tajrishi, M. (2013). A system dynamics approach for hydropower generation assessment in developing watersheds: A case study of Karkheh river basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18 (8), 1007-1017.

- Statistical Review of World Energy. (2016). <http://www.bp.com/statistical> review.

- 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.

- Wu, Y. & Guu, S. (2001). A compromise model for solving fuzzy multiple objective linear programming problems. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 18 (5), 87-93.

- Zhang, X. Y., Huang, G. H., Zhu, H. & Li, Y. P. (2017). A fuzzy-stochastic power system planning model: Reflection of dual objectives and dual uncertainties. *Energy*, 123, 664-676.

- [www.Tavanir.org/latin/Iran's power Industry annual reports/](http://www.Tavanir.org/latin/Iran's%20power%20Industry%20annual%20reports/)

- [www.amar.tavanir.org.ir/pages/report/stat96/rahbordi.pdf](http://www.amar.tavanir.org.ir/pages/report/stat96/rahbordi.pdf)

- [www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir)