نشـــریه پـــژوهـــش‌های مهنـــدســـی صنـــایع
در سیستـــم‌هـــای تولیـــد

ISSN: 2345-2269

نشـریه پـژوهـش‌های مهنـدسـی صنـــایع
در سیستــم‌هــای تولیـــد

سال هفتم، شماره چهاردهم، بهار و تابستان ۱۳۹۸، صفحـــه ۱–۱۱
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2019.17808.1809

مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار مبتنی بر رویکرد تصادفی p-استوار

فریبا فتحی پور[۱]، محمد سعیدی مهرآباد[۲]*، حامد شکوری گنجوی[۳]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۳۹۷/۹/۱۰
پذیرش ۱۳۹۸/۴/۱

کلمات کلیدی:
برنامه‌ریزی انرژی
پایداری
رویکرد تصادفی p-استوار
پذیرش اجتماعی
انتشار گازهای گلخانه‌ای
آب

خلاصه

در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار با توجه به جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی پایداری مدل‌سازی شده است. توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها به نحوی مدل‌سازی شده است که کمترین هزینه منابع آبی برای تولید الکتریسیته نیاز باشد و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدی کنترل شود. از طرف دیگر سطح پذیرش اجتماعی برنامه توسعه ظرفیت نیروگاهی، باید برآوردکننده حداقل سطح پذیرش قابل‌قبول دولت در هر یک از دوره‌های برنامه‌ریزی باشد. عدم‌قطعیت موجود در مسأله، با تولید سناریوهایی در قالب رویکرد تصادفی p-استوار پوشش داده شده است، در این رویکرد ضمن حداقل کردن متوسط هزینه‌های تمام سناریوها، مقدار تأسف برای هر سناریو از سطح p بیشتر نخواهد شد و استواری جواب ارائه‌شده در سطح p حفظ می‌شود. مدل پیشنهادی برای یک مطالعه موردی از بخش انرژی ایران پیاده‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از رویکرد تصادفی p-استوار می‌توان با اندک افزایشی در متوسط هزینه‌های برنامه‌ریزی انرژی، برای هر یک از سناریوها جواب‌هایی با اختلاف کم از مقادیر بهینه آن‌ها به دست آورد.

۱- مقدمه

انرژی یکی از عوامل مهم در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها است و لذا برنامه‌ریزی برای آن از الزامات اساسی هر کشوری خواهد بود. به‌صورت سنتی برنامه‌ریزی انرژی به مفهوم شناسایی کاراترین منابع تأمین انرژی برای تقاضای پیش‌بینی‌شده انرژی با کمترین هزینه ممکن است [۱]. در این زمینه مدل‌های تخصیص منابع انرژی مختلفی نیز ارائه شده‌اند [۲]. همچنین مدل‌های تجاری انرژی از قبیل MESSAGE، MARKAL، TIMES و LEAP برخی از مدل‌های اقتصادی برنامه‌ریزی انرژی هستند. با گذر زمان، برنامه‌ریزان انرژی با مسائل دیگری در حوزه انرژی مواجه شدند که روال رو به کاهش منابع انرژی فسیلی و تجدیدناپذیر یکی از این مشکلات بود. از طرف دیگر تغییرات اقلیم آب و هوایی ناشی از افزایش گرمایش جهانی و روند رو به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای موضوعاتی بودند که مفهوم جدیدی از برنامه‌ریزی انرژی را پایه‌ریزی کردند. برنامه‌ریزی انرژی علاوه‌بر اینکه باید بر کاهش هزینه‌های تأمین انرژی موردتقاضا متمرکز باشد، لازم است کمترین اثرات مخرب محیط‌زیستی را نیز به همراه داشته باشد [۳]. به این منظور تلاش‌های سازمان‌های بین‌المللی در ایجاد الزاماتی برای کشورها جهت کاهش اثرات محیط‌زیستی از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شکل گرفت که اجلاس کیوتو در سال ۱۹۹۷ و اجلاس پاریس در سال ۲۰۱۵ از شاخص‌ترین آن‌ها می‌باشند؛ بنابراین در این راستا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از قبیل انرژی خورشیدی، انرژی بادی و انرژی آبی به‌منظور جایگزینطی آن‌ها با

---

* نویسنده مسئول: محمد سعیدی مهرآباد

تلفن: ۰۲۱-۷۳۲۲۵۰۲۵؛ پست الکترونیکی: mehrabad@iust.ac.ir

انرژی‌های فسیلی موردتوجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است [۴-۶]. از طرف دیگر توسعه پایدار، مفهومی است که قویاً مسائل اقتصادی–اجتماعی را با محیط‌زیستی مرتبط می‌کند و بیان می‌دارد که روش‌های برآورده کردن نیازهای یک نسل نباید مانع از برآوردن نیازهای نسل آتی شود [۷]. ازاین‌رو، مسأله برنامه‌ریزی انرژی تحت تأثیر مفهوم توسعه پایدار، با عنوان برنامه‌ریزی انرژی پایدار در کشورهای مختلف شکل می‌گیرد تا با درنظرگرفتن ابعاد کامل‌تر در حیطه برنامه‌ریزی انرژی، در جهت توسعه پایدار حرکت شود [۸-۹]. بنابراین، در شرایط کنونی دنیای امروزی، هدف از برنامه‌ریزی انرژی تنها تعیین ترکیب بهینه تکنولوژی‌ها برای تأمین تقاضای برآورده شده انرژی با کمترین هزینه نیست، بلکه لازم است این برنامه‌ریزی به نحوی انجام شود که تأمین انرژی موردنیاز از جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی نیز موردقبول باشد.

برنامه‌ریزی انرژی پایدار در سطح کلان، نیازمند به اطلاعات دوره‌های زمانی آینده است. عدم قطعیت اطلاعات در دوره‌های آینده، مطالعات حوزه انرژی پایدار را به سمت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت پیش برده است. اگر مطالعات حوزه برنامه‌ریزی انرژی پایدار را با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت موردبررسی قرار دهیم، مشاهده می‌شود که دسته‌ای از مطالعات با روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه مسأله را حل نموده‌اند که به‌عنوان نمونه می‌توان به : ویکور فازی و تحلیل سلسله مراتبی [۱۰]، تاپسیس فازی [۱۱]، پرومته II غیرقطعی [۱۲]، فرآیند تحلیل شبکه‌ای و تاپسیس فازی [۱۳] اشاره نمود. دسته دیگر مطالعاتی هستند که با استفاده از روش‌های ریاضی به مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی انرژی در شرایط عدم قطعیت پرداخته‌اند. در این دسته می‌توان به این مطالعات اشاره نمود. صادقی و حسینی (۲۰۰۶) با استفاده از مدل برنامه‌ریزی ریاضی فازی مسأله تخصیص منابع انرژی را برای ایران مدل‌سازی کرده‌اند، نتایج این مطالعه نشان‌دهنده برتری این شیوه مدل‌سازی بر روش‌های دیگر مدل‌سازی عدم‌قطعیت موردبررسی در این مقاله است[۱۴]. کای و همکارانش در سال ۲۰۰۹ یک سیستم تصمیم‌یار مبتنی بر بهینه‌سازی با روش برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای ارائه داده‌اند [۱۵]. کو و همکاران با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر روش یو و لی در سال ۲۰۰۰ ارائه گردیده است، مسأله برنامه‌ریزی انرژی را مدل‌سازی کرده‌اند [۱۶]. دانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به ارائه یک مدل ریاضی غیردقیق که عدم قطعیت داده‌ها بر اساس اعداد بازه‌ای و توزیع‌های احتمال می‌باشند، پرداخته‌اند [۱۷]. خیه و همکاران در سال ۲۰۱۴ نیز روش بهینه‌سازی چندمرحله‌ای غیردقیق استوار را در مدل‌سازی عدم قطعیت مبنای کار خود قرار داده‌اند [۱۸]. قابل‌ذکر است که در اکثر این مطالعات تکیه بیشتر محققان در جنبه‌های محیط‌زیستی توسعه پایدار بوده است و به‌طورمعمول با کنترل کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای در پی کاهش اثرات منفی محیط‌زیستی می‌باشند. ضمن اینکه تلاش برای یافتن جواب استوار، مستلزم صرف هزینه‌های بیشتری است. بنابراین برای تکمیل مطالعات در حوزه برنامه‌ریزی انرژی لازم است با استفاده از یک رویکرد مناسب در لحاظ کردن عدم‌قطعیت داده‌ها در مدل با تأکید بیشتری به جنبه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی برنامه انرژی تحت کمترین هزینه پرداخته شود. در این صورت حوزه برنامه‌ریزی انرژی در جهت توسعه پایدار حرکت خواهد کرد.

ازاین‌رو، در این مقاله مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار به‌صورت کامل‌تر با تکیه بر هر سه بعد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در شرایط عدم قطعیت داده‌های موردنیاز در مدل، مدل‌سازی شده است. براساس اطلاعات نویسنده، برای اولین بار علاوه بر کنترل سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای، مقدار آب مصرفی برای تولید الکتریسیته نیز موردبررسی قرار گرفته است، همچنین در بعد اجتماعی به کنترل سطح پذیرش اجتماعی برنامه انرژی تمرکز شده است و از رویکرد تصادفی p-استوار در مدل‌سازی عدم‌قطعیت داده‌ها، استفاده شده است. در ادامه در بخش ۲ ضمن بیان مسأله، مدل ریاضی پیشنهادی ارائه گردیده است . سپس در بخش ۳ مدل پیشنهادی برای یک مطالعه موردی از بخش انرژی ایران پیاده‌سازی و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است و نهایتاً در بخش نتیجه‌گیری به جمع‌بندی نتایج پرداخته شده است.

۲- بیان مسأله

در این بخش به تعریف دقیق‌تر مسأله موردبررسی خواهیم پرداخت و مدل ریاضی آن را ارائه می‌نماییم.

۲-۱- تعریف مسأله

این مقاله به مدل‌سازی مسأله برنامه‌ریزی انرژی در افق زمانی بلندمدت با در نظر گرفتن رویکرد توسعه پایدار می‌پردازد. این مدل به دنبال تعیین ترکیب بهینه منابع و تکنولوژی‌ها برای تأمین انرژی است. با توجه به سطح دسترسی به منابع اولیه انرژی و ظرفیت موجود از هر تکنولوژی در هر دوره زمانی، مقدار نیاز به توسعه از هر نوع تکنولوژی برای پوشش تقاضا بهینه‌سازی می‌گردد. در این راستا طبیعی است که هزینه تأمین تقاضا از اهمیت بالایی برخوردار است و طبیعی است که برنامه‌ریز به‌دنبال مدلی است که دربرگیرنده کمترین هزینه است. اما اگر به دنبال برنامه‌ریزی در جهت توسعه پایدار باشیم، هدف تنها به دست آوردن ترکیب بهینه تأمین انرژی منطقه با کمترین هزینه نخواهد بود و لازم است برنامه انرژی ارائه شده، دارای کمترین مخاطرات زیست‌محیطی و بیشترین اثرات اجتماعی مثبت نیز باشد تا تأمین نیاز نسل کنونی بازدارنده نیازهای نسل‌های آتی نباشد.

یکی از ابعادی که در زمینه زیست‌محیطی در اغلب مطالعات به آن پرداخته شده است، مقدار تولید گازهای گلخانه‌ای است. توسعه ظرفیت تکنولوژی‌های تولید الکتریسیته به‌نحوی باید صورت گیرد که ضمن تأمین تقاضا، مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در هر یک از دوره‌های برنامه‌ریزی از سقف تعیین شده توسط سیاست‌گذاران حوزه انرژی پیشی نگیرد. از طرف دیگر روند رو به کاهش دسترسی به منابع آبی در جهان، بحران آب را به موضوعات روز دنیا در حیطه محیط‌زیست

تبدیل کرده است [۱۹-۲۱]. ازاین‌رو، در این مقاله تلاش شده است، تأمین انرژی الکتریسیته با کمترین هزینه آب موردنیاز همراه باشد، تا در حد امکان با کمترین مصرف منابع آبی، برنامه‌ریزی انرژی پایدار انجام شود.

بعد دیگر توسعه پایدار که باید به آن پرداخته شود، بعد اجتماعی است، منابع مختلفی بر اهمیت توجه بر مسائل اجتماعی تأمین انرژی پرداخته‌اند. به‌طوری‌که پراساد و همکاران به نقل از تالینی و همکاران (۲۰۱۰) اذعان می‌دارد، از میان عوامل مختلف از قبیل اقتصادی، فنی، اجتماعی و محیط‌زیستی که در چرخه تولید و تبدیل انرژی تأثیرگذار هستند، پذیرش اجتماعی عامل بسیار مهم‌تری از دیدگاه ریسک است [۳]. همچنین، کاردونی و همکاران پذیرش اجتماعی را یک فاکتور تعیین‌کننده در انتشار و گستردگی استفاده از یک تکنولوژی معرفی می‌کنند [۲۲]. بنا به گفته اوفام و همکاران،پذیرش اجتماعی در سه رده دولت، سرمایه‌گذاران و عموم مردم قابل‌بررسی است [۲۳]. در مدل پیشنهادی، سطح پذیرش اجتماعی هر یک از تکنولوژی‌های تولید الکتریسیته، بر اساس تمایل سرمایه‌گذاران به توسعه ظرفیت آن نوع از تکنولوژی محاسبه شده است. دولت نیز برای جذب رضایت سرمایه‌گذاران، در برنامه‌ریزی انرژی یک حداقل سطح پذیرش کلی برای برنامه انرژی در نظر می‌گیرد. شایان توجه است که سرمایه‌گذاران، مجریان برنامه توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها می‌باشند، بنابراین طبیعی است که هر چه این حداقل سطح پذیرش تعریف شده توسط دولت بیشتر باشد، به این مفهوم است سیاست‌گذاران به‌دنبال به‌دست آوردن سطح موفقیت بیشتری در اجرای برنامه انرژی می‌باشند.

دشواری‌های برنامه‌ریزی انرژی و تمایل به ارائه پاسخ مناسب و نزدیک به دنیای واقعی، ضرورت توجه به جنبه‌های غیرقطعی برنامه‌ریزی انرژی را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. تعیین ظرفیت و نوع نیروگاه‌های جدید لازم برای احداث و مقدار انرژی الکتریکی که از هر نیروگاه باید تولید شود، با لحاظ کردن الزامات توسعه پایدار مهم‌ترین سؤال برنامه‌ریزی انرژی پایدار است. مقدار تقاضا برای الکتریسیته و توان الکتریکی در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی به‌صورت قطعی قابل پیش‌بینی نیست. در این مقاله با استفاده از تولید سناریوهای مختلف، عدم قطعیت تقاضا (الکتریسیته و توان) پوشش داده شده است. جنبه‌های غیرقطعی دیگری که در این مدل‌سازی به آن پرداخته شده است، رویکرد تصمیم‌گیران در مواجهه با ابعاد توسعه پایدار در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی است. طبیعی است که تصمیم‌گیران مجاز هستند در چهارچوب قوانین هر کشوری تصمیمات اجرایی خود را برنامه‌ریزی کنند، اما برخی اختیارات نیز در برنامه‌ریزی خود خواهند داشت. این اختیارات به‌راحتی منجر به تفاوت رویکردها در مواجهه با مسائلی از قبیل کاهش میزان انتشار گازهایزا گلخانه‌ای و یا تمایل به جذب رضایت و پذیرش اجتماعی به‌منظور اشاعه تکنولوژی‌های مختلف می‌شود. به‌منظور مدل‌سازی رفتار تصمیم‌گیران در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی که رویکرد قطعی آن‌ها به اجرای سیاست‌های توسعه پایدار نامعلوم است، سناریوهایی برای پوشش این نوع عدم قطعیت تولید می‌شود.

در این مقاله یک مدل ریاضی بهینه‌سازی استوار ارائه می‌گردد که بعد اقتصادی آن به کمینه کردن کل هزینه‌های تأمین انرژی اعم از هزینه تأمین منابع اولیه انرژی، کلیه هزینه تکنولوژی‌های موجود، هزینه تأسیس ظرفیت جدید تکنولوژی‌های موردنیاز و واردات الکتریسیته می‌پردازد. بعد زیست‌محیطی به دنبال کنترل میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در حین تولید الکتریسیته، از طریق سیاست‌گذاری برای سقف انتشار و صرفه‌جویی در مصرف آب لازم برای تولید الکتریسیته از طریق کاهش هزینه‌های آب مصرفی، خواهد بود. بعد اجتماعی آن نیز، به‌دنبال تضمین موفقیت اجرای برنامه پیشنهادی انرژی در دیدگاه پذیرش اجتماعی است.

۲-۲- مدل‌سازی

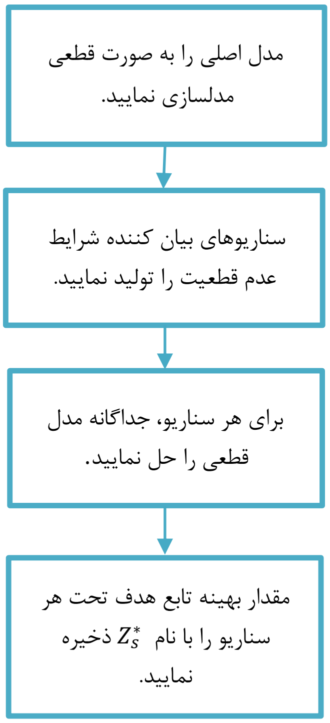
در این بخش به مدل‌سازی ریاضی مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار با رویکرد تصادفی p-استوارمی پردازیم. اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای این مدل در جدول (۱) بیان شده است.

جدول (۱): اندیس‌ها، متغیرهای تصمیم و پارامترهای مدل

اندیس‌ها	
i=1…I	منابع اولیه انرژی
j=1…J	تکنولوژی‌های تولید الکتریسیته
t=1…T	دوره‌های زمانی
s=1…S	سناریوها
U_i	تکنولوژی‌هایی که از منبع انرژی اولیه i استفاده می‌کنند
متغیرهای تصمیم	
X_{ijt}^{s}	مقدار انرژی اولیه i تخصیص داده شده به تکنولوژی j در دوره زمانی t تحت سناریوی s
ZP_{jt}^{s}	انرژی الکتریکی تولید شده از تکنولوژی j در دوره زمانی پیک t تحت سناریوی s (KWh)
ZO_{jt}^{s}	انرژی الکتریکی تولید شده از تکنولوژی j در دوره زمانی غیر پیک t تحت سناریوی s (KWh)
Y_{jt}^{s}	ظرفیت توسعه داده شده از تکنولوژی j در دوره زمانی t تحت سناریوی s (KW)
EY_{jt}^{s}	ظرفیت تجمعی توسعه داده شده از تکنولوژی j در دوره زمانی t تحت سناریوی s (KW)
IP_{t}^{s}	واردات انرژی الکتریکی در دوره زمانی پیک t تحت سناریوی s (KWh)
IO_{t}^{s}	واردات انرژی الکتریکی در دوره زمانی غیرپیک t تحت سناریوی s (KWh)
پارامترهای مدل	
q_s	احتمال سناریوی s
PX_{it}	هزینه هر واحد از انرژی اولیه i در دوره زمانی t
FZ_{jt}	هزینه ثابت تبدیل انرژی در تکنولوژی j در دوره زمانی t (\$/KW)
RC_{jt}	ظرفیت باقیمانده از تکنولوژی j در دوره زمانی t (KW)
VZ_{jt}	هزینه متغیر تبدیل انرژی در تکنولوژی j در دوره زمانی t (\$/KWh)
VY_{jt}	هزینه سرمایه‌گذاری توسعه ظرفیت تکنولوژی j در دوره زمانی t (\$/KW)
PIO_t	هزینه واردات الکتریسیته در دوره زمانی غیرپیک t (\$/KWh)
PIP_t	هزینه واردات الکتریسیته در دوره زمانی پیک t (\$/KWh)
AC_{it}	سطح قابل‌دسترس از انرژی اولیه i در دوره زمانی t

TAP_t	طول مدت‌زمان در منطقه باری پیک در دوره زمانی t (h)
TAO_t	طول مدت‌زمان در منطقه باری غیرپیک در دوره زمانی t (h)
PF_j	ضریب ظرفیت تکنولوژی j
EF_j	بازدهی تکنولوژی j
HV_i	ارزش حرارتی انرژی اولیه i
DO_t^s	مقدار تقاضای الکتریسیته در دوره زمانی غیرپیک t تحت سناریوی s (KWh)
DP_t^s	مقدار تقاضای الکتریسیته در دوره زمانی پیک t تحت سناریوی s(KWh)
P_j^{in}	احتمال قرار گرفتن در مدار در تکنولوژی j
PP_t^s	تقاضای پیک توان الکتریکی در دوره زمانی t تحت سناریوی s(KW)
G_j	نرخ انتشار گازهای گلخانه‌ای در روش تولید الکتریسیته j (mgr/KWh)
TG_t^s	سقف انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره زمانی t تحت سناریوی s (mgr/KWh)
ψ_j	پذیرش اجتماعی تکنولوژی j توسط سرمایه‌گذاران
$T\psi_t^s$	حداقل سطح پذیرش اجتماعی برنامه انرژی در دوره زمانی t تحت سناریوی s
α	ضریب مجاز واردات الکتریسیته
p	ضریب مجاز تأسف

در بهینه‌سازی استوار، عدم قطعیت پارامترها به‌نحوی است که برای مقادیر مختلفی که ممکن است رخ دهد، توزیع احتمال خاصی نسبت داده نمی‌شود، بلکه مقادیر پارامترهای غیرقطعی یا از طریق سناریوهای گسسته و یا از طریق یک بازه پیوسته بیان می‌شود [۲۴]. رویکردهای مختلفی در بهینه‌سازی استوار مطرح می‌شود که یکی از آن‌ها این است که تابع هدف به‌دنبال کمینه کردن هزینه بدترین حالت ممکن است و یا اینکه مقدار تأسف را کمینه نماید. منظور از مقدار تأسف یک جواب تحت یک سناریوی مشخص، اختلاف بین مقدار تابع هدف این جواب تحت این سناریو با مقدار تابع هدف بهینه تحت همان سناریو است. رویکرد تصادفی p–استوار رویکردی است که به‌دنبال جستجو برای جوابی است که هزینه متوسط آن کمینه باشد، درحالی‌که این جواب در سطح p–استوار نیز است[۲۵]. به این معنی که مقدار تأسف در تمامی سناریوها بیشتر از سطح p نیست. اگر مدل به‌نحوی باشد که تابع هدف مسأله فقط کمینه کردن متوسط هزینه‌ها باشد، جواب به‌دست‌آمده ممکن است در برخی از سناریوها به‌خوبی عمل نکرده باشد؛ به‌نحوی‌که مقادیر به‌دست‌آمده برای آن سناریو از مقادیر بهینه همان سناریو تفاوت قابل‌توجهی داشته باشد و استواری جواب مناسب نباشد. به‌عبارت‌دیگر مقدار تأسف زیاد باشد. رویکرد تصادفی p–استوار با اضافه کردن یک محدودیت به مدل فوق، الزام می‌دارد که مقدار تأسف در تمامی سناریوها نمی‌تواند از سطح p بیشتر باشد و این محدودیت کمک شایان توجهی در تمایل جواب نهایی به سمت مقادیر بهینه هر سناریو خواهد داشت. برای به دست آوردن محدودیت موردبحث باید گام‌ها ارائه شده در نمودار (۱) طی شوند.


مدل اصلی را به صورت قطعی مدلسازی نمایید.
سناریوهای بیان کننده شرایط عدم قطعیت را تولید نمایید.
برای هر سناریو، جداگانه مدل قطعی را حل نمایید.
مقدار بهینه تابع هدف تحت هر سناریو را با نام Z_S^* ذخیره نمایید.

نمودار(۱): نحوه ایجاد محدودیت p–استوار

در این صورت، رابطه (۱) قابل ایجاد خواهد بود.

$$Z_s(X) \leq (1+P)Z_S^* \qquad \forall s \in S \qquad (۱)$$

در این محدودیت p پارامتر کنترل‌کننده سطح تأسف برای هر یک از سناریوها است و Z_S^* مقدار بهینه تابع هدف مدل تحت سناریوی s که مطابق توضیحات نمودار(۱) به دست می‌آید و مقدار $Z_S(X)$ ضابطه تابع هدف مدل تحت سناریوی s است. این محدودیت برای هر یک از سناریوهای بیان شده برای پارامترهای دارای عدم قطعیت باید برقرار گردد. با وارد کردن محدودیت (۱)، مدل تضمین می‌نماید که جواب ارائه شده برای هر سناریو، از جواب بهینه آن تبعیت نماید، تا استواری جواب تحت سناریوها برقرار باشد. از طرف دیگر وجود پارامتر p اجازه می‌دهد که یک انحرافی از مقدار بهینه برای تمامی سناریوها وجود داشته باشد. ارزش این انحراف برای سناریوهایی که دربرگیرنده بدترین حالت هستند، بیشتر است. چرا که ارائه پاسخ بهینه برای سناریوی بدترین حالت، لازمه اختصاص هزینه زیادی است، درحالی‌که احتمال رخداد آن در دنیای واقع اندک است. به‌عبارت‌دیگر صرف هزینه زیاد برای سناریویی که احتمال رخداد کمی دارد. مزیت این نحوه مدل‌سازی امکان انحراف از جواب بهینه به نحوی است که هزینه متوسط حداقل مقدار باشد.

با لحاظ کردن ویژگی‌های فنی مدل برنامه‌ریزی انرژی پایدار و الزامات رویکرد مدل‌سازی تصادفی p–استوار مدل پیشنهادی در ادامه بیان می‌گردد:

$$Min\ F = \sum_{s=1}^{S} \mathrm{q_s}\left(\mathrm{F(s)}\right) = \sum_{\mathrm{s=1}}^{\mathrm{S}} \mathrm{q_s}\,(\mathrm{PC(s)+WC(s)+FC(s)+VC(s)} + \mathrm{CC(s)+IC(s)}) \tag{۲}$$

$$\mathrm{PC(s)} = \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{I}}\sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}} \mathrm{PX_{i,t=1}}.X_{ij,t=1} + \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{I}}\sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}}\sum_{\mathrm{t=2}}^{\mathrm{T}}\left(\mathrm{PX_{it}}.X_{ijt}^{s}\right) \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۳}$$

$$\mathrm{WC(s)} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{I}}\sum_{\mathrm{t=1}}^{\mathrm{J}} \mathrm{PW_{t=1}}.\left(ZP_{j,t=1} + ZO_{j,t=1}\right) + \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}}\sum_{\mathrm{t=2}}^{\mathrm{T}}\left(\mathrm{PW_t}.\left(ZP_{jt}^{s} + ZO_{jt}^{s}\right)\right) \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۴}$$

$$\mathrm{FC(s)} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}} \mathrm{FZ_{j,t=1}}.\mathrm{RC_{j,t=1}} + \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}}\sum_{\mathrm{t=2}}^{\mathrm{T}} \left[\mathrm{FZ_{jt}^{s}}.\left(\mathrm{RC_{jt}} + EY_{jt}^{s}\right)\right] \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۵}$$

$$\mathrm{VC(s)} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}} \mathrm{VZ_{j,t=1}}.\left(ZP_{j,t=1} + ZO_{j,t=1}\right) + \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}}\sum_{\mathrm{t=2}}^{\mathrm{T}} \mathrm{VZ_{j,t}}.\left(ZP_{jt}^{s} + ZO_{jt}^{s}\right) \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۶}$$

$$\mathrm{CC(s)} = \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}} \mathrm{VY_{j,t=1}}.Y_{j,t=1} + \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{J}}\sum_{\mathrm{t=1}}^{\mathrm{T}} \mathrm{VY_{jt}}.Y_{jt}^{s} \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۷}$$

$$\mathrm{IC(s)} = \mathrm{PIO_{t=1}}.IO_{t=1} + \mathrm{PIP_{t=1}}.IP_{t=1} + \sum_{\mathrm{t=2}}^{\mathrm{T}}(\mathrm{PIO_t}.IO_t^{s} + \mathrm{PIP_t}.IP_t^{s}) \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۸}$$

$$\sum_{j\in U_i} X_{ijt}^{s} \le \mathrm{AC_{it}} \qquad \forall \mathrm{i,t,s} \tag{۹}$$

$$ZP_{jt}^{s} \le \left(\mathrm{RC_{jt}} + EY_{jt}^{s}\right).\mathrm{TAP_t}\,.\,\mathrm{PF_j} \qquad \forall \mathrm{j,s,t} \tag{۱۰}$$

$$ZO_{jt}^{s} \le \left(\mathrm{RC_{jt}} + EY_{jt}^{s}\right).\mathrm{TAO_t}\,.\,\mathrm{PF_j} \qquad \forall\ \mathrm{j,s,t} \tag{۱۱}$$

$$\left(ZP_{jt}^{s} + ZO_{jt}^{s}\right) * \frac{1}{\mathrm{EF_j}} \le \sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{I}} \mathrm{HV_i} * X_{ijt}^{s} \qquad \forall\ \mathrm{j} \le 3\ ,\mathrm{t,s} \tag{۱۲}$$

$$\sum_{j=1}^{J} ZO_{jt}^{s} + IO_t^{s} \ge \mathrm{DO_t^s} \qquad \forall t,s \tag{۱۳}$$

$$\sum_{j=1}^{J} \mathrm{p_j^{in}}.ZP_{jt}^{s} + IP_t^{s} \ge \mathrm{DP_t^s} \qquad \forall t,s \tag{۱۴}$$

$$\sum_{j=1}^{J} \mathrm{p_j^{in}}.\left(\mathrm{RC_{jt}} + EY_{jt}^{s}\right) \ge \mathrm{PP_t^s} \qquad \forall t,s \tag{۱۵}$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{J} \mathrm{G_j}\left(ZO_{jt}^{s} + ZP_{jt}^{s}\right)}{\sum_{j=1}^{J}\left(ZO_{jt}^{s} + ZP_{jt}^{s}\right)} \le \mathrm{TG_t^s} \qquad \forall\ t,s \tag{۱۶}$$

$$\frac{\sum_{j=1}^{J} \Psi_{\mathrm{j}}.Y_{jt}^{s}}{\sum_{j=1}^{J} Y_{jt}^{s}} \ge T\psi_t^{s} \qquad \forall s,t \tag{۱۷}$$

$$EO_t^{s} \le \alpha.\mathrm{DO_t^s} \qquad \forall t,s \tag{۱۸}$$

$$EP_t^{s} \le \mathrm{\alpha}.\mathrm{DP_t^s} \qquad \forall t,s \tag{۱۹}$$

$$PC(s) + WC(s) + FC(s) + VC(s) + CC(s) + IC(s) \le (1+p) * [PC^*(s) + WC^*(s) + FC^*(s) + VC^*(s) + CC^*(s) + IC^*(s)] \qquad \forall \mathrm{s} \tag{۲۰}$$

$$ZO_{jt}^{s}, ZP_{jt}^{s}, IO_t^{s}, IP_t^{s}, EY_{jt}^{s}, X_{ijt}^{s} \ge 0 \qquad \forall i,j,t,s \tag{۲۱}$$

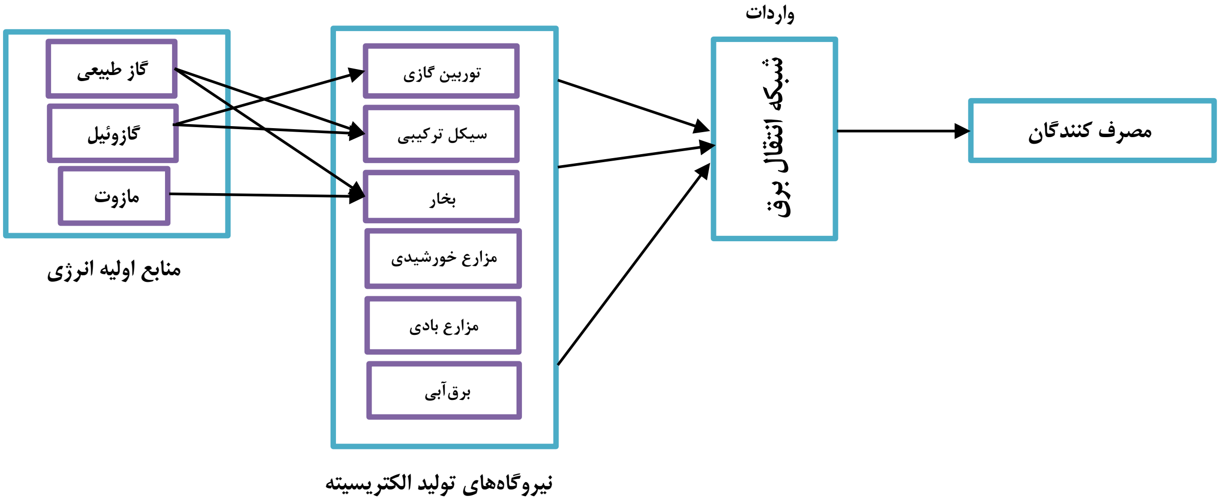
$$Y_{jt}^{s} = EY_{jt}^{s} - EY_{j-1\,t}^{s} \qquad \forall j,t \tag{۲۲}$$

تابع هدف این مدل پیشنهادی، کمینه کردن متوسط هزینه کل است، همان‌طور که در رابطه (۲) بیان شده است، متوسط هزینه کل شامل مجموع چندین بخش هزینه مختلف است، که در ادامه هر یک از این بخش‌ها توضیح داده می‌شود. در رابطه (۳)، هزینه ناشی از مصرف انرژی اولیه برای نیروگاه‌های فسیلی محاسبه می‌شود. در رابطه (۴) هزینه آب لازم برای تولید الکتریسیته بیان شده است. هزینه ثابت نگهداری نیروگاه‌ها در رابطه (۵) و هزینه متغیر تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها در رابطه (۶) مدل‌سازی شده است. هزینه توسعه ظرفیت جدید نیروگاه‌ها در رابطه (۷) قابل‌مشاهده و هزینه واردات الکتریسیته در دوره‌های مختلف تحت هر یک از سناریوها در رابطه (۸) بیان شده است.

در این مدل محدودیت (۹) بیان می‌دارد، استفاده از منابع اولیه انرژی باید از میزان در دسترس هر یک از منابع اولیه انرژی کمتر باشد. در هر دوره زمانی، می‌توان متناسب با ظرفیت تکنولوژی‌های موجود و توسعه داده شده، الکتریسیته تولید نمود، توجه شود که با توجه به عمر مفید نیروگاه‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی، بخشی از ظرفیت کنونی موجود مستهلک شده و از مدار خارج می‌شوند و بنابراین ظرفیت باقی‌مانده در هر دوره مشخص می‌شود. این مفاهیم در محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. چرا که در هر دوره زمانی با توجه به توان الکتریکی موردنیاز بخشی از دوره زمانی، به‌عنوان منطقه باری پیک و بخش مابقی را منطقه باری غیرپیک می‌نامند، محدودیت تقاضای الکتریسیته در منطقه باری پیک در محدودیت (۱۰) و محدودیت تقاضای الکتریسیته در منطقه باری غیرپیک در محدودیت (۱۱) نشان داده شده است. همچنین، علاوه‌براین، مقدار الکتریسیته تولیدی در هر نیروگاه به مقدار دسترسی به منابع اولیه انرژی آن

وابسته است و حداکثر مقدار الکتریسیته تولیدی آن مطابق محدودیت (۱۲) باید کوچک‌تر از مقدار الکتریسته قابل‌تولید در آن نوع نیروگاه باشد.

محدودیت (۱۳) و (۱۴) بیان می‌دارد که برای تأمین تقاضای الکتریسیته به‌ترتیب در منطقه باری غیرپیک و پیک هر دوره، از الکتریسیته تولیدی توسط نیروگاه‌ها با تکنولوژی‌های مختلف یا واردات الکتریسیته می‌توان استفاده کرد. توجه شود که گاه ممکن است به دلایل پیش‌بینی‌نشده‌ای یک نیروگاه از مدار خارج شود، اگر این اتفاق در زمان پیک رخ دهد، تأمین انرژی موردنیاز با مشکل مواجه خواهد شد که تبعات آن مواجهه با خاموشی است. به همین دلیل با اعمال پارامتر p_j^{in} برای هر تکنولوژی، احتمال قرار گرفتن در مدار را مدل‌سازی نموده‌ایم. توان الکتریکی موردنیاز برای هر سناریو در هر دوره زمانی نیز در محدودیت (۱۵) تأمین شده است. محدودیت (۱۶) نرخ انتشار گازهای گلخانه‌ای را به نسبت انرژی الکتریکی تولیدی کنترل می‌نماید و محدودیت (۱۷) تضمین می‌نماید که سطح پذیرش برنامه انرژی به‌دست‌آمده باید بیشتر از حداقل مطلوب سیاستگزاران باشد تا ضامن موفقیت در اجرای پروژه‌های توسعه ظرفیت گردد. محدودیت (۱۸) و (۱۹)، به‌منظور تأمین امنیت انرژی در منطقه باری غیرپیک و پیک، سطح وابستگی به تأمین الکتریسیته موردنیاز را از طریق واردات کنترل می‌نماید. محدودیت (۲۰)، الزام مربوط به استفاده از رویکرد تصادفی p-استوار را که در رابطه (۱) تشریح شد، در مدل پیشنهادی بیان می‌دارد. محدودیت‌های (۲۱) و (۲۲) محدودیت‌های تکنیکی مدل‌سازی را در بر می‌گیرند.



شکل(۱): نمای شماتیک برنامه انرژی موردمطالعه

۳- مطالعه موردی

برای نشان دادن عملکرد مدل، یک مطالعه موردی در مورد کشور ایران انجام شده است، در این مطالعه فرض بر این است که سه نوع منبع اولیه انرژی گاز طبیعی، گازوئیل و مازوت در دسترس است، و تکنولوژی های نیروگاهی ممکن برای تولید الکتریسیته عبارتند از نیروگاه گازی، نیروگاه سیکل ترکیبی، نیروگاه بخاری، مزارع بادی، مزارع خورشیدی و نیروگاه‌های برق‌آبی.

طبیعی است که فقط نیروگاه‌های تجدیدناپذیر نیاز به استفاده از منابع اولیه انرژی دارند، سوخت گاز طبیعی در هر سه نوع نیروگاه تجدیدناپذیر گازی، سیکل ترکیبی و بخاری قابل‌استفاده است درحالی‌که از گازوئیل در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی و بخاری می‌توان استفاده کرد و از مازوت تنها در نیروگاه‌های بخاری شرایط استفاده وجود دارد. شکل (۱) نشان‌دهنده مطالعه موردی بررسی شده در این مقاله است.

جدول (۲): اطلاعات سناریوهای تولیدی

دوره	تقاضای توان الکتریکی MW		تقاضای الکتریسیته پیک 10^6 MWh		تقاضای الکتریسیته غیرپیک 10^6 MWh		سقف انتشار گازهای گلخانه‌ای mgr/KWh		حداقل سطح پذیرش اجتماعی %	
	ابتدای بازه	انتهای بازه	ابتدای بازه	انتهای بازه	ابتدای بازه	انتهای بازه	ابتدای بازه	انتهای بازه	ابتدای بازه	انتهای بازه
۲	۵۷۲۲۷	۷۰۰۸۹	۱۰۹	۲۳۰	۱۰۰۰	۲۰۵۰	۴۵۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	۱۰	۶۰
۳	۷۱۹۴۵	۸۵۰۴۲	۲۲۵	۳۵۰	۲۱۴۰	۳۲۸۰	۴۳۰۰۰۰	۶۷۰۰۰۰	۱۲	۶۵
۴	۸۷۰۵۱	۱۰۰۴۰۴	۳۴۱	۴۶۹	۳۲۵۰	۴۳۷۰	۴۰۰۰۰۰	۶۴۰۰۰۰	۱۴	۷۰

این مطالعه برای ۴ دوره برنامه‌ریزی شده است، دوره اول یک دوره ۲ ساله است که اطلاعات این دوره در دسترس است و هیچ عدم قطعیتی در اطلاعات مربوط به آن وجود ندارد، ۳ دوره بعدی که هر یک دارای طول زمانی ۴ ساله می‌باشند، این دوره برنامه‌ریزی از سال ۱۳۸۹ تا ۱۴۱۲را دربرمی‌گیرد. در پارامترهای تقاضای الکتریسته، توان الکتریکی، رویکرد کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و رویکرد کنترل

پذیرش اجتماعی برنامه انرژی دارای عدم قطعیت می‌باشند. به همین دلیل تعداد ۵۰۰ سناریو برای مواجهه با این عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته شده است. جدول(۲) دامنه تولید این سناریوها را در افق برنامه‌ریزی بیان می‌دارد.

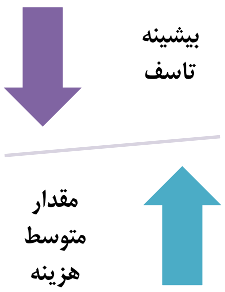
اطلاعات مربوط به انواع تکنولوژی‌های تولید الکتریسیته موردبررسی در این مطالعه در جدول(۳) ذکر شده است.

مدل ریاضی ارائه شده، با استفاده از نرم‌افزار گمز حل شده است و نتایج عددی مقادیر متغیرهای تصمیم دوره اول در جدول (۴) ذکر شده است. مقدار واردات الکتریسته در منطقه باری پیک و غیرپیک برای دوره اول برابر با صفر بوده است.

جدول (۴): نتایج متغیرهای تصمیم دوره اول

Y (MW)	ZP (10^6 MWh)	ZO (10^6 MWh)	نیروگاه‌ها
			گازی
۱۵۹	۲۳	۲۶۱	سیکل ترکیبی
۵۰۰	۱۶	۱۵۴	توربین بخار
	۰,۰۱	۰,۱۳	مزارع خورشیدی
	۰,۰۴	۰,۴۵	مزارع بادی
	۳	۴۰	برقآبی

علاوه‌براین نتایج حاصل از حل مدل مطابق شکل (۲) نشان می‌دهد که به‌منظور کاهش حداکثر مقدار تأسف، لازم است متوسط هزینه‌های برنامه‌ریزی افزایش یابد و برعکس. به‌عبارت‌دیگر کاهش فاصله از مقدار بهینه هر یک از سناریوها مستلزم صرف هزینه بیشتری است. چرا که برآوردن محدودیت‌های مسأله در بدترین حالت ممکن سناریوها، با هزینه بیشتری تأمین می‌شوند، در این حالت واضح است که فاصله از مقادیر بهینه هر سناریو، کمتر خواهد شد و در نهایت بیشینه تأسف کمتر می‌شود.



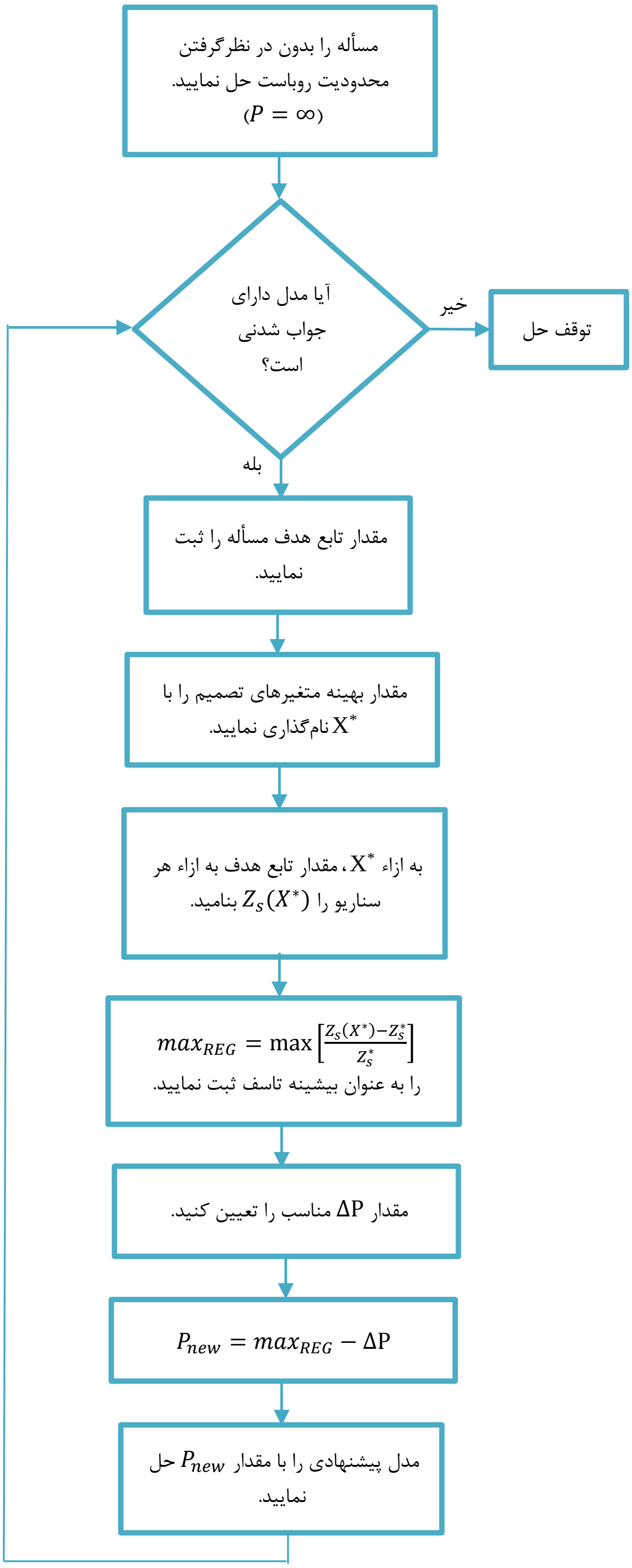
شکل (۲): تأثیر کاهش بیشینه تأسف در متوسط هزینه

برای به‌دست آوردن مقادیر عددی موازنه بین هزینه کل برنامه‌ریزی و بیشینه تأسف، از الگوریتم نمودار (۲) استفاده شده است.

با استفاده از الگوریتم ارائه شده در نمودار (۲)، تحلیل حساسیت مدل به مقادیر p انجام شده است و نتایج جدول (۵) به‌دست می‌آید. در این جدول، ستون p نشان‌دهنده مقدار پارامتر p هست که مدل تحت آن مقدار حل شده است و مقدار تابع هدف به‌دست‌آمده، برای آن گزارش شده است، سپس مقدار بیشینه تأسف برای این حل نیز در ستون مربوطه گزارش شده است. برای بررسی تأثیر متقابل تغییرات در مقادیر تابع هدف و بیشینه تأسف، درصد تغییر تابع هدف در هر سطح p، نسبت به حالتی که مقدار آن برابر بینهایت است، در ستون درصد افزایش تابع هدف ارائه گردیده است. همچنین مقدار تغییر بیشینه تأسف در هر سطح p، نسبت به حالتی که مقدار آن برابر بینهایت است، در ستون درصد کاهش بیشینه تأسف گزارش شده است.

جدول (۱): اطلاعات تکنولوژی‌های تولید الکتریسیته [۲۶]

احتمال عدم خروج از مدار	بازدهی	ضریب ظرفیت	پذیرش اجتماعی	مقدار مصرف آب (gal/MWh)	ظرفیت اولیه نصب شده MW	مقدار انتشار گاز گلخانه‌ای mgr/kwh	هزینه تعمیرات و نگهداری متغیر $/kw-year	هزینه ثابت $/kwyear	هزینه سرمایه‌گذاری $/kw	تکنولوژی
۰,۹۸	۰,۳۲	۰,۸۴	۰,۵۶	۷۱۲۹,۱۲	۲۴۸۷۷	۵۶۰۰۰۰	۵,۸	۳,۴	۵۵۳	توربین گازی
۰,۹۵	۰,۴۷	۰,۹	۰,۷۱	۷۱۲۹,۱۲	۱۷۸۴۸	۴۵۰۰۰۰	۳,۹	۵,۷	۹۳۴	سیکل ترکیبی
۰,۹۵	۰,۳۸	۰,۸۵	۰,۱۷	۷۱۲۹,۱۲	۱۵۸۲۹	۵۶۰۰۰۰	۴,۹۵	۱۲,۳	۱۱۰۰	توربین بخاری
۰,۶	–	۰,۲۵	۰,۸۱	۰	۹۲,۹	۱۷۶۵۲	۰	۴۸	۱۵۰۰	مزارع بادی
۰,۳	–	۰,۳	۰,۷۱	۲۶	۳۲,۱	۴۹۱۷۴	۰	۲۴,۶۹	۳۵۶۴	مزارع خورشیدی
۰,۹	–	۰,۲۷	۰,۳۳	۴۴۹۱	۹۱۶۲	۲۲۶۹۶	۰	۱۵	۱۵۰۰	نیروگاه برقابی

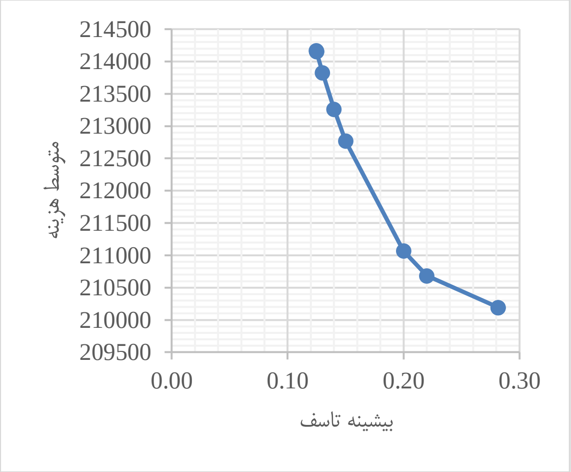

مسأله را بدون در نظرگرفتن
محدودیت روباست حل نمایید.
$(P = \infty)$
آیا مدل دارای
جواب شدنی
است؟
خیر
توقف حل
بله
مقدار تابع هدف مسأله را ثبت
نمایید.
مقدار بهینه متغیرهای تصمیم را با
X^* نام‌گذاری نمایید.
به ازاء X^*، مقدار تابع هدف به ازاء هر
سناریو را $Z_s(X^*)$ بنامید.
$max_{REG} = \max\left[\frac{Z_s(X^*)-Z_s^*}{Z_s^*}\right]$
را به عنوان بیشینه تاسف ثبت نمایید.
مقدار ΔP مناسب را تعیین کنید.
$P_{new} = max_{REG} - \Delta P$
مدل پیشنهادی را با مقدار P_{new} حل
نمایید.

نمودار (۲): مراحل اجرای تحلیل حساسیت

جدول(۵): تحلیل حساسیت

درصد کاهش در بیشینه تأسف	بیشینه تأسف	درصد افزایش در تابع هدف	تابع هدف	P
–	۰,۲۸۱۶	–	۲۱۰۱۹۳	∞
۰	۰,۲۸۱۶	۰	۲۱۰۱۹۳	۰,۲۸۱۶
۲۱,۸۸	۰,۲۲۰۰	۰,۲۳	۲۱۰۶۸۳	۰,۲۲۰۰
۲۸,۹۹	۰,۲۰۰۰	۰,۴۲	۲۱۱۰۶۸	۰,۲۰۰۰
۴۶,۷۴	۰,۱۵۰۰	۱,۲۳	۲۱۲۷۶۸	۰,۱۵۰۰
۵۰,۲۹	۰,۱۴۰۰	۱,۴۶	۲۱۳۲۶۱	۰,۱۴۰۰
۵۳,۸۴	۰,۱۳۰۰	۱,۷۳	۲۱۳۸۲۸	۰,۱۳۰۰
۵۵,۶۲	۰,۱۲۵۰	۱,۸۸	۲۱۴۱۵۳	۰,۱۲۵۰
۵۵,۶۹	۰,۱۲۴۸	۱,۸۹	۲۱۴۱۶۷	۰,۱۲۴۸
–	–	–	نشدنی	۰,۱۲۴۵

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، تغییرات قابل‌توجهی در مقدار بیشینه تأسف، با تغییر اندکی در مقدار تابع هدف قابل حصول است. به‌عنوان‌مثال ۵۵,۶۹٪ بهبود در بیشینه تأسف تنها با ۱,۸۹٪ افزایش در هزینه‌های مدل همراه است و این نشان‌دهنده مزیت بسیار خوب مدل‌سازی عدم قطعیت پارامترها با روش تصادفی p- استوار است. به‌عبارت‌دیگر نتایج نشان می‌دهد که هزینه به‌دست آوردن استواری بیشتر در جواب‌ها، اندک است. شکل(۳) نیز به‌صورت نموداری نشان‌دهنده این نسبت تغییرات است. و شیب زیاد این نمودار حاکی از درصد تغییر بالا در بیشینه تأسف در ازاء درصد تغییر اندک در متوسط هزینه است.



شکل (۳): رابطه بین متوسط هزینه و بیشینه تأسف

۴- نتیجه‌گیری

شرایط کنونی جهانی در حوزه برنامه‌ریزی انرژی، برنامه‌ریزان این حوزه را ملزم کرده است تا به اثرات جنبی برنامه‌ریزی انرژی نیز بپردازند. در این مقاله با وارد کردن اثرات زیست‌محیطی و

اجتماعی، مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار مدل‌سازی شده است. با توجه به محدودیت منابع آبی و لزوم مدیریت بحران آب، توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها به نحوی مدل‌سازی شده است که کمترین هزینه منابع آبی برای تولید الکتریسیته نیاز باشد. از طرف دیگر، با کنترل سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های برنامه‌ریزی تلاش شده است که میزان انتشار از حد مجاز آن فراتر نرود. در بعد اجتماعی برنامه‌ریزی انرژی، پذیرش اجتماعی برنامه انرژی پیشنهادی موردتوجه قرار گرفته است. به این منظور، سیاست‌هایی برای سطح پذیرش قابل‌قبول دولت‌ها در برنامه انرژی تعریف شده است. برنامه توسعه ظرفیت نیروگاهی با در نظرگرفتن سطح پذیرش سرمایه‌گذاران برای تکنولوژی‌های مختلف به‌عنوان مجریان پروژه‌های توسعه ظرفیت، تامین‌کننده این سطح پذیرش قابل‌قبول خواهد بود.

عدم‌قطعیت‌های موجود در برنامه‌ریزی که مربوط به سطوح تقاضای الکتریسیته و توان الکتریکی، رویکرد دولت‌ها در مواجهه با کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و پذیرش اجتماعی برنامه انرژی می‌باشند، با ایجاد سناریوهایی مدل‌سازی شده‌اند. رویکرد مورداستفاده برای مواجهه با عدم قطعیت، رویکرد تصادفی p-استوار است. مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی از بخش انرژی ایران اجرا شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که کمترین مقدار متوسط هزینه کل تحت تمامی سناریوها، در شرایطی به‌دست‌آمده است که جواب به‌دست‌آمده برای هر سناریو از بهینه مقدار مربوط به همان سناریو که اصطلاحاً به آن تأسف گفته می‌شود، اختلاف زیادی نداشته است. مقدار تأسف برای هر سناریو از سطح p تبعیت می‌کند. با انجام تحلیل حساسیت بیشتر بر روی مقادیر p مشاهده می‌گردد که می‌توان با افزایش مقدار کمی در متوسط هزینه‌های برنامه‌ریزی انرژی، به سطح استواری بیشتری نیز دست یافت.

در ادامه می‌توان برای تکمیل این مطالعه، به جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی بیشتری از مسأله برنامه‌ریزی انرژی پایدار پرداخت، علاوه بر این با توجه به اینکه افق زمانی برنامه‌ریزی بلندمدت است، می‌توان عدم قطعیت موجود در پارامترهای دیگر از قبیل هزینه‌ها را نیز در مدل‌سازی لحاظ نمود و با استفاده از رویکردهای تلفیقی مواجهه با عدم قطعیت، مدل‌سازی را تکمیل کرد.

مراجع

[1] Pohekar, SD., Ramachandran M., (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. Renew Sustain Energy Rev; 8: 365–381. doi:10.1016/j.rser.2003.12.007.

[2] Kazemi, A., Mehregan, MR., Ganjavi, HS., Hosseinzadeh, M., (2012). Energy Resource Allocation in Iran: A Fuzzy Multi-Objective Analysis. Procedia - Soc Behav Sci; 41:334–41. doi:10.1016/j.sbspro.2012.04.038.

[3] Prasad, RD., Bansal, RC., Raturi, A., (2014). Multi-faceted energy planning: A review. Renew Sustain Energy Rev; 38: 686–699. doi:10.1016/j.rser.2014.07.021.

[4] Huang, Z., Yu, H., Peng, Z., Zhao, M., (2015). Methods and tools for community energy planning : A review. Renew Sustain Energy Rev; 42: 1335–1348. doi:10.1016/j.rser.2014.11.042.

[5] Cai, YP., Huang, GH., Tan, Q., Yang, ZF., (2009). Planning of community-scale renewable energy management systems in a mixed stochastic and fuzzy environment. Renew Energy 2009; 34: 1833–1847. doi:10.1016/j.renene.2008.11.024.

[6] Li, YP., Huang, GH., (2012). Electric-power systems planning and greenhouse-gas emission management under uncertainty. Energy Convers Manag; 57: 173–182. doi:10.1016/j.enconman.2011.12.018.

[7] Hopwood, B., Mellor, M., O’Brein, G., (2005). Sustainable Development: Mapping Different Approaches. Susutainable Dev; 13: 38–52. doi:10.1016/B978-1-85617-672-9.10008-0.

[8] Fathipour, F., Saidi-Mehrabad, M., (2018). A multi-objective energy planning considering sustainable development by a TOPSIS-based augmented e-constraint. J Renew Sustain Energy; 10. doi:10.1063/1.5008545.

[9] Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., Kiosses, I., (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. Energy Policy; 37: 1587–1600. doi:10.1016/j.enpol.2008.12.011.

[10] Kaya, T., Kahraman, C., (2010). Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & amp; AHP methodology: The case of Istanbul. Energy; 35: 2517-2527.

[11] Kaya, T., Kahraman, C., (2011). Expert Systems with Applications Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. Expert Syst Appl; 38: 6577–6585. doi:10.1016/j.eswa.2010.11.081.

[12] Montajabiha, M,. (2016). An Extended PROMETHE II Multi-Criteria Group Decision Making Technique Based on Intuitionistic Fuzzy Logic for Sustainable Energy Planning. Gr Decis Negot; 25: 221–244. doi:10.1007/s10726-015-9440-z.

[13] Cayir Ervural, B., Zaim, S., Demirel, OF., Aydin, Z., Delen, D., (2018). An ANP and fuzzy TOPSIS-based SWOT analysis for Turkey’s energy planning. Renew Sustain Energy Rev; 82: 1538–1550. doi:10.1016/j.rser.2017.06.095.

[14] Sadeghi, M., Mirshojaeian Hosseini, H., (2006). Energy supply planning in Iran by using fuzzy linear programming approach (regarding uncertainties of investment costs). Energy Policy; 34: 993–1003. doi:10.1016/j.enpol.2004.09.005.

[15] Cai, YP., Huang, GH., Lin, QG., Nie, XH., Tan, Q., (2009). An optimization-model-based interactive decision support system for regional

energy management systems planning under uncertainty. Expert Syst Appl; 36: 3470–3482. doi:10.1016/j.eswa.2008.02.036.

[16] Koo, J., Han, K., Yoon, ES., (2011). Integration of CCS , emissions trading and volatilities of fuel prices into sustainable energy planning , and its robust optimization. Renew Sustain Energy Rev; 15: 665–672. doi:10.1016/j.rser.2010.07.050.

[17] Dong, C., Huang, GH., Cai, YP., Liu, Y., (2013). Robust planning of energy management systems with environmental and constraint-conservative considerations under multiple uncertainties. Energy Convers Manag; 65: 471–486. doi:10.1016/j.enconman.2012.09.001.

[18] Xie, YL., Huang, GH., Li, W., Ji, L., (2014) Carbon and air pollutants constrained energy planning for clean power generation with a robust optimization model-A case study of Jining City, China. Appl Energy; 136: 150–167. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.015.

[19] Famiglietti, JS., (2014). The global groundwater crisis. Nat Clim Chang; 4: 945–8. doi:10.1038/nclimate2425.

[20] Islam, S., Susskind, L., (2015). Understanding the water crisis in Africa and the Middle East: How can science inform policy and practice? Bull At Sci; 71: 39–49. doi:10.1177/0096340215571906.

[21] Gorjian, S., Ghobadian, B., (2015). Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. Renew Sustain Energy Rev; 48: 571–584. doi:10.1016/j.rser.2015.04.009.

[22] Kardooni, R., Yusoff, SB., Kari, FB., (2016). Renewable energy technology acceptance in Peninsular Malaysia. Energy Policy;88: 1–10. doi:10.1016/j.enpol.2015.10.005.

[23] Upham, P., Oltra, C., Boso, À., (2015). Towards a cross-paradigmatic framework of the social acceptance of energy systems. Energy Res Soc Sci; 8: 100–112. doi:10.1016/j.erss.2015.05.003.

[24] Sahinidis, N V., (2004). Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. Comput Chem Eng; 28: 971–983. doi:10.1016/j.compchemeng.2003.09.017.

[25] Snyder, L V., Daskin, MS., (2006). Stochastic p-robust location problems. IIE Trans (Institute Ind Eng ; 38: 971–985. doi:10.1080/07408170500469113.

[26] Shakouri, G. H, Aliakbarisani, S., (2016). At what valuation of sustainability can we abandon fossil fuels? A comprehensive multistage decision support model for electricity planning. Energy; 107: 60–77. doi:10.1016/j.energy.2016.03.124.

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2019, Volume 7., No. 14., pp. 1-11
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/ier.2019.17808.1809

Sustainable Energy Planning Based on Stochastic P-Robust

F. Fathipour[1], M. Saeedimehrabad[2*], H. Shakouri Ganjavi[3]

[1] Industrial engineering, Iran University of Science and Technology
[2] Industrial engineering, Iran University of Science and Technology

ARTICLE INFO

***Article history*:**

Received 1 December 2018
Accepted 22 June 2019

***Keywords*:**

Energy Planning
Sustainability
Stochastic P-Robust Approach
Social Acceptance
Greenhouse Gas Emission
Water

ABSTRACT

In this paper, a new model for energy planning problem is proposed based on environmental and social aspects of sustainability. Power plants capacity expansion is modeled in a way that the water consumption cost is minimized and the greenhouse gases emission rate is controlled. Moreover, social acceptance for the capacity expansion plan must ensure the government's social acceptance level, in the planning periods. Different scenarios generated to cover the variety of uncertainties, based on stochastic P-robust approach. In this approach, the expected cost is minimized and the regret value for each scenario would not be more than P, so the solution is P-robust. The proposed model is applied for a case study from Iran energy sector. The results indicate that a slight increase in expected cost value leads to considerable regret reduction.

---

[*] Corresponding author. M. Saeedimehrabad
Tel.: 021-73225025, E-mail address: mehrabad@iust.ac.ir