Archive of SID

چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۲۲ ـ بهار ۱۳۹۵
ص‌ص ۹۰ – ۶۷

طراحی مدل برنامه‌ریزی احتمالی چندهدفه ظرفیت بهینه انرژی برق با رویکرد تقریب میانگین نمونه و روش کوآنتایل

عزت ا... اصغری‌زاده*، علی محقر، نعیمه تقوی*****

چکیده

در این مقاله مدل برنامه‌ریزی خطی احتمالی با هدف برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق و با توجه به محدودیت‌های آن در بازه زمانی مورد مطالعه طراحی شده است. در این الگو برای دستیابی به ظرفیت، مکان و زمان‌بندی بهینه تجهیزات شبکه انرژی برق و همچنین مدیریت مصرف انرژی و افزایش رضایت مشترکین تلاش شده است. افق زمانی ۱۰ ساله و متغیرهای غیرقطعی، تقاضای سالانه و میزان خاموشی مجاز تعیین شده است. نوآوری پژوهش توجه به روش‌های مختلف رویارویی با تقاضا با درنظرگرفتن مدیریت مصرف و خاموشی در کنار آن است. مدل حاضر از نظر تمرکز بر عوامل اقتصادی، محیطی و اجتماعی دارای جامعیت است. از نتایج پژوهش، پیش‌بینی ظرفیت ایجاد تجهیزات انرژی و آماده‌سازی زیرساخت‌های آن است. بدین منظور مدل احتمالی خطی ای طراحی گردید؛ سپس از روش تقریب میانگین نمونه و روش کوآنتایل ظرفیت‌های بهینه محاسبه و درنهایت توسط سناریوهایی ظرفیت مراکز بار منطقه در زمان مناسب تعیین شد.

کلیدواژه: برنامه‌ریزی ظرفیت؛ برنامه‌ریزی احتمالی چندهدفه؛ روش تقریب میانگین نمونه؛ روش کوآنتایل.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۹/۲۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۵/۳.

* دانشیار، دانشگاه تهران.
** استاد، دانشگاه تهران
*** دانشجوی دکتری، پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران (نویسنده مسئول).
E-mail: naeimat@yahoo.com

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

برنامه‌ریزی ظرفیت سیستم انرژی برق به‌منظور تعیین شبکه بهینه تولید و انتقال بر اساس تخمین رشد بار و برنامه مشخصی برای بازه زمانی تعیین‌شده، انجام می‌گیرد [۲۷]. با توجه به رشد جمعیت و توسعه صنایع و به‌تبع آن رشد تقاضای بار مصرفی، در بعضی مواقع امکانات موجود برای تولید و انتقال انرژی برق جوابگوی مصرف موجود یا مصرف در آینده نزدیک نیست. در چنین شرایطی باید امکانات موجود را توسعه داد یا تجهیزات جدیدی را جایابی و نصب کرد؛ همچنین می‌توان از طریق مدیریت مصرف و گسترش فرهنگ استفاده بهینه از انرژی برق، بخشی از تقاضای افراد را کاهش داد. برای دستیابی به اهداف برنامه‌ریزی ظرفیت باید نوع تجهیزات، مکان اجزای شبکه، ظرفیت مناسب و زمان بهره‌برداری از آن‌ها تعیین شود [۲۰]. در مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌های ساخت‌وساز، موفقیت در کنترل هزینه و زمان برای کمک به پیمانکاران امری حیاتی است. افزایش هزینه و زمان پروژه‌ها از برنامه تعریف‌شده، ممکن است به کاهش سود و حتی برخی اوقات به شکست پروژه‌ها منجر شود [۱].

در بسیاری از مدل‌های ارائه‌شده تاکنون، برای مسئله توسعه شبکه انرژی، تمرکز بر ایجاد و توسعه سیستم‌های تولیدی و همچنین خطوط انتقال به‌صورت مجزا و مبادله انرژی برق برای تأمین تقاضای مشترکان بوده است و در این راستا اهدافی چون هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و آلودگی با رعایت محدودیت‌های فنی اعمال شده است. برنامه‌ریزی توأم ظرفیت تولید و انتقال انرژی، درنظرگرفتن مقداری انرژی موردانتظار تأمین‌نشده (خاموشی) و مدیریت‌کردن مصرف برق می‌تواند از دیگر راه‌های برخورد با تقاضا در نظر گرفته شود؛ همچنین در این راستا هزینه خواب سرمایه به‌عنوان اهداف برنامه‌ریزی ظرفیت و حداقل‌سازی خاموشی برای تأمین رضایت اجتماعی و افزایش رفاه و آسایش مشترکان موردتوجه است که اعمال این موارد به جامع‌ترشدن مدل نسبت به مدل‌های گذشته منجر می‌شود. در این مقاله ابتدا مروری بر پژوهش‌های گذشته صورت می‌گیرد که شامل مفاهیمی چون برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق، مدل‌های برنامه‌ریزی و روش‌های حل مدل احتمالی است. در بخش‌های بعدی طراحی مدل، بررسی وتحلیل آن و اعتبارسنجی مدل ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در این بخش ابتدا مروری به مبانی نظری موضوع و پژوهش‌های گذشته در زمینه برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق صورت می‌گیرد؛ سپس با توجه به هدف مقاله، یعنی طراحی مدل ریاضی برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق، مقالات گذشته در زمینه مدل‌سازی و روش‌های حل مدل موردنظر ارزیابی می‌شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق. هدف کلی در برنامه‌ریزی ظرفیت تولید در سیستم‌های قدرت، ارائه سطح قابل‌قبولی از قابلیت اطمینان برای مشترکان با حداقل هزینه و حداکثر کارایی است [۱۰]. کارایی عملکردی در گرو افزایش در کارایی مدیریت و برنامه‌ریزی می‌باشد [۸]. برنامه‌ریزی توسعه ظرفیت تولید انرژی برق با انتخاب گزینه‌های مختلف تأمین انرژی تقاضاشده در زمان و مکان مناسب و برنامه‌ریزی توسعه انتقال با تصمیم‌های مناسب برای تعیین زمان، مکان و نوع خطوط مناسب در ارتباط است. در محیط‌های متمرکز مطلوبیت انرژی برق درگرو سرمایه تولید و انتقال به‌صورت توأم است [۲۳]. مقدار افزونگی ظرفیت باید متناسب با نیاز بوده و منبع نیز تا حد ممکن اقتصادی باشد؛ بنابراین سؤال این است که چه مقدار افزونگی، در کجا، چه زمانی و یا چه قیمتی لازم است. احتمال قطعی و خاموشی مصرف‌کننده‌ها به‌وسیله افزایش در سرمایه‌گذاری در بخش فاز طراحی، فاز بهره‌برداری یا هر دو می‌تواند کاهش داده شود؛ همچنین افزایش سرمایه‌گذاری می‌تواند به افزایش قیمت بهره‌برداری منجر شود و باید در ساختار تعرفه منعکس گردد؛ درنتیجه اگرچه ممکن است سیستم بسیار مطمئن باشد [۵]؛ اما نتیجه به‌کارگیری آن ایجاد فشارهای اقتصادی است. از طرف دیگر سرمایه‌گذاری کم به طرف نقطه مخالف حرکت می‌کند؛ بنابراین بدیهی است که فشارهای اقتصادی و قابلیت اطمینان می‌توانند با هم رقابت داشته باشند و این مسئله به بحث‌های مشکل مدیریتی در فازهای طراحی و بهره‌برداری منجر می‌شود [۳]. شرکت‌های برق به علت رویارویی با ریسک زیاد، در مقابل تصمیم‌های خود مسئولیت مهمی دارند؛ درنتیجه شرکت‌های تولیدی برای تصمیم‌گیری به مدل‌های مناسب تصمیم‌گیری نیاز دارند [۲۵].

پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی ظرفیت تولید و انتقال انرژی با درنظرگرفتن جنبه‌های گوناگون است. آلارکن (۲۰۰۹)، چالش انطباق با شرایط جدید در صنعت برق و استفاده از تولید پراکنده با هدف استفاده بهینه از منابع طبیعی را بررسی کرد [۱۵]. سربندی (۱۳۸۹)، رابطه بین ورود به عرصه الکترونیک و توسعه کشور به سرمایه‌گذاری هر چه بیشتر در صنعت تولید، انتقال و مصرف انرژی و استفاده بهینه از این منابع را بررسی کرد که هدف آن برنامه‌ریزی بهینه برای ساخت نیروگاه با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا بود [۱۷].

تقی‌زاده (۱۳۹۳)، مدل ریاضی غیرخطی برای توسعه ظرفیت نیروگاه‌ها با هدف کنترل دی‌اکسیدکربن و با درنظرگرفتن واحدهای تولید پراکنده طراحی کرد [۲۱]. سیریکم و همکاران (۲۰۰۷)، انواع نیروگاه‌ها، مکان و زمان راه‌اندازی آن‌ها را با هدف برنامه‌ریزی توسعه تولید انرژی برق بررسی کردند که نتیجه آن طراحی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای توسعه تولید بود [۱۹]. آلکواسیل و همکاران (۲۰۰۳)، برنامه‌ریزی توسعه انتقال از طریق تعیین زمان، مکان و نوع ساخت خطوط انتقالی را به‌منظور افزایش فرصت انتقال انرژی و با هدف کمینه‌کردن هزینه

www.SID.ir

Archive of SID

احداث خطوط جدید و هزینه عملیاتی واحدهای تولیدی انجام دادند [۲]. نصیری و هانگ (۲۰۰۷)، مدل یکپارچه‌ای برای برنامه‌ریزی ظرفیت تولید انرژی برق با توابع هدف هزینه تولید امواج و برون‌فشانی انرژی، مصرف انرژی، هدف زیست‌محیطی و محدودیت ظرفیت فعال برای پاسخگویی به حداکثر تقاضا و حد بالا و پایین تولید طراحی کردند [۱۴].

روو و همکاران (۲۰۰۷)، بررسی هماهنگی بین برنامه‌ریزی توسعه انتقال و برنامه‌ریزی ظرفیت تولید رقابتی در بازار برق انجام دادند که هدف آن بررسی ناهمخوانی انرژی در هر ایستگاه و محاسبات مربوط به راهنمای ظرفیت برای ساخت واحدهای تولید و خطوط انتقال هنگامی که ظرفیت تولید و انتقال موجود نتواند جوابگوی بار تقاضا شده هر ایستگاه باشد، بود. نتیجه این پژوهش‌ها طراحی مدل GENCO[1]، TRANSCO[2] و ISO[3] است [۱۶]. فلقی و همکاران (۲۰۰۸)، ظرفیت بهینه نیروگاه‌های تولید پراکنده را با هدف طراحی مدلی برای افزایش فواید اقتصادی شامل تعویق در توسعه ظرفیت پست، کاهش هزینه تأمین توان، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش هزینه‌ها شامل احداث و بهره‌برداری، هزینه تولید توان تعیین کردند [۴].

عالیه کاظمی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه، تخصیص بهینه منابع انرژی کشور به بخش های مختلف خانگی، تجاری، حمل و نقل، صنایع، کشاورزی، صادرات، تزریق به مخازن نفتی و نیروگاه‌ها به عنوان تولیدکننده انرژی ثانویه را مورد بررسی قرار داده اند که در این راستا اهداف سیاسی، اقتصادی و زیست محیطی نیز مورد توجه قرار گرفته اند [۹]. همچنین حسینی (۱۳۹۱) اندازه‌گیری کارایی و روند آن را در شرکت‌های مدیریت تولید برق با استفاده از مدل تحلیل پوششی داده‌ها انجام داد[۸].

در مدل طراحی‌شده برای تطبیق با دنیای واقعی پارامترهایی چون تقاضا و خاموشی به‌صورت احتمالی بوده که با درنظرگرفتن روش‌های گوناگون پاسخگویی به تقاضای مشترکان ازجمله تولید نیروگاهی، تولید پراکنده، انتقال از خارج، انتقال از داخل، مدیریت مصرف و خاموشی شکل گرفته است. ویژگی‌های متمایزکننده این مدل را می‌توان توجه به تجهیزات تولید و انتقال به‌صورت توأم و همچنین درنظرگرفتن مدیریت مصرف و خاموشی در کنار آن تعریف کرد؛ همچنین مدل حاضر از نظر تمرکز بر عوامل اقتصادی، محیطی و اجتماعی جامعیت دارد که از بُعد اقتصادی توجه به خواب سرمایه و از بُعد اجتماعی توجه به رضایت مشتری قابل‌ذکر است. توجه به هدف خواب سرمایه و میزان خاموشی و همچنین درنظرگرفتن میزان رضایت مشترکان از دیگر ویژگی‌های متمایزکننده مدل است.

1. Generation Capacity Planning
2. Transmission Capacity Planning
3. Security Assessment

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های برنامه‌ریزی: الگوهای برنامه‌ریزی انواع مختلفی دارند که هر یک با توجه به شرایط حل مسئله قابل اجرا است. مدل برنامه‌ریزی خطی از سی سال پیش تاکنون کاربردهای موفقی در حل مسئله گسترش ظرفیت تولید برق، داشته‌اند. برتری برنامه‌ریزی خطی، قابلیت الگوکردن مسائل بزرگ و پیچیده و همچنین اجرای ساده آن به کمک الگوریتم‌های موجود است [۲۹]؛ همچنین برنامه‌ریزی چندهدفه برای تصمیم‌گیری با وجود چند تابع هدف متناقض از طریق تبدیل آن به مسئله‌ای با یک تابع هدف انجام می‌شود. اهداف مختلف در یک مسئله گسترش سیستم قدرت می‌تواند کمینه‌سازی هزینه، کمینه‌سازی آلودگی محیطی و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان سیستم و غیره باشد [۲۳]. از انواع دیگر برنامه‌ریزی، «مدل‌سازی احتمالی» است؛ زیرا در شرایط تکنولوژیکی امروز عوامل مختلفی در سیستم، با عدم‌اطمینان همراه هستند. درنتیجه مدل‌های کنونی به‌صورت احتمالی و مبنی بر شانس طراحی شده‌اند تا بتوانند تأثیر عوامل نامطمئن را نیز در برنامه‌ریزی‌های خود در نظر بگیرند [۲۶].

روش‌های حل مدل احتمالی. روش‌های گوناگونی برای حل مدل احتمالی مطرح شده که در اینجا چند مورد از پرکاربردترین آن‌ها آورده شده است:

ـ روش کاهش سناریو. در مدل‌های احتمالی هر سناریو دارای یک خروجی مشخص بر اساس مقدار تصادفی است که تحقق یک فرایند احتمالی را نشان می‌دهد. در این روش توزیع احتمال سناریوهای مختلف و احتمال رخداد هر یک تعریف می‌شود؛ سپس الگوریتم کاهش سناریو، تعدادی سناریو از میان سناریوهای موجود با احتمال‌های جدید ایجاد می‌کند [۶].

ـ روش کوآنتایل. با استفاده از کوآنتایل‌های توابع توزیع، قاعده‌ای که یک معادله قطعی معادل را برای یک معادله محدودکننده شانس بیان می‌کند، به‌کار گرفته می‌شود. در این روش با استفاده از تابع توزیع احتمال و محاسبه میانگین و واریانس آن می‌توان با توجه به احتمال رخداد محدودیت، مقدار قطعی متغیر را محاسبه و مدل را به‌صورت یک مدل قطعی حل کرد [۲۴].

ـ روش تقریب میانگین نمونه. اساس روش تقریب میانگین نمونه[1]، نمونه‌گیری و تقریب تابع هدف است. شبیه‌سازی «مونت کارلو» تقریب‌هایی را از طریق میانگین نمونه‌های گرفته‌شده، ایجاد می‌کند و بردار تصادفی حاصل از میانگین نمونه‌ها جاگذاری می‌شود [۱۸].

1. Sample Average Approximation

www.SID.ir

Archive of SID

ـ روش الگوریتم ژنتیک. در الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیت تصادفی به‌عنوان جمعیت اولیه ایجاد شده و برای هر یک از کروموزوم‌های ایجادشده از طریق روش «مونت کارلو» محدودیت‌ها بررسی می‌شود. در صورت عدم‌تخطی آن‌ها، مقدار تابع هدف محاسبه و در صورت تخطی آن تابع هدف با مقداری جریمه به‌دست آورده می‌شود؛ سپس فرزندان جدید به‌وجود می‌آید که در صورت ارضای محدودیت‌ها روش «مونت کارلو» آن‌ها را بررسی می‌کند. این عمل تا n تکرار مجاز اعمال شده و سپس از میان جواب‌های به‌دست‌آمده بهینه‌ترین جواب انتخاب می‌شود [۲۶].

ـ روش شبیه‌سازی «مونت کارلو». در این روش مدل‌سازی عدم‌قطعیت‌ها از طریق تولید نقاط تصادفی با توجه به تابع چگالی احتمال متغیرهای غیرقطعی سیستم صورت می‌گیرد؛ سپس با انجام شبیه‌سازی برای هر یک از نقاط کاندید، متغیرهای خروجی مسئله و توابع چگالی احتمال هر یک با توجه به نمودار توزیع فراوانی محاسبه می‌شود [۷].

۳. روش‌شناسی پژوهش

تحقیق حاضر توسعه‌ای با رویکرد استقرایی برای طراحی مدل است. اطلاعات موردنیاز برای طراحی مدل با استفاده از اطلاعات کسب‌شده از اسناد و مدارک و همچنین مصاحبه با متخصصان صنعت برق برای تعیین عوامل مؤثر بر صنعت برق و همچنین خبرگان دانشگاهی برای تعیین انواع مدل برنامه‌ریزی و روش‌های حل آن گردآوری شد که انتخاب بر اساس «کفایت تئوریک» صورت گرفت. بر این اساس از نظرهای ۱۶ متخصص در تعیین اطلاعات مربوط به مسئله استفاده شد.

پژوهش حاضر برای رویارویی بهینه با تقاضای مشترکان برق در پی طراحی مدل برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی است؛ بدین منظور ابتدا بر اساس راهبرد مطالعه موردی عوامل مؤثر بر این مقوله بررسی شدند؛ سپس با توجه به پژوهش‌های پیشین، شکاف موجود و عوامل مؤثر استخراج شدند؛ ویژگی‌های مدل جدید، مشخص و مدل برنامه‌ریزی خطی احتمالی طراحی شد. «شرکت برق منطقه‌ای استان یزد» برای اجرای مدل در در نظر گرفته شد. برای وصول به اینکه انرژی موردنیاز به چه روشی، با چه ظرفیتی و در چه زمانی باید تأمین شود حل مدل به روش تقریب میانگین نمونه و با رویکرد الگوریتم ژنتیک صورت گرفت؛ سپس مدل اعتبارسنجی شد و نتایج تحلیل شدند.

مدل‌سازی. در این بخش ساختار مدل طراحی‌شده، شامل مفروضات و ویژگی‌ها، عوامل مؤثر، توابع هدف و محدودیت‌های مدل تشریح می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

مفروضات و ویژگی‌های مدل. در این پژوهش با توجه به شکاف موجود در تعیین فناوری‌های رویارویی با تقاضای مشترکان، علاوه بر روش‌های تولید و تبادل انرژی، به اعمال مدیریت مصرف و تحمیل میزانی خاموشی توجه شده است. برای برنامه‌ریزی بهینه ظرفیت علاوه بر ابعاد اقتصادی و فنی، ابعاد اجتماعی، محیطی و بودجه نیز در نظر گرفته شده است. مرکز توجه مطالعات اخیر بر عوامل اقتصادی شامل هزینه‌های تولید و سرمایه‌گذاری و همچنین عوامل محیطی است [۷]؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر هزینه مربوط به خواب سرمایه و عوامل اجتماعی ازجمله کاهش میزان خاموشی، افزایش رضایت مشترکان و بودجه در اختیار سازمان نیز لحاظ شده است. در پژوهش‌های پیشین برنامه‌ریزی ظرفیت، پارامترهای مدل ثابت بود که در اینجا پارامترهای تقاضا و خاموشی احتمالی فرض شد و مدل احتمالی طراحی‌شده از طریق روش تقریب میانگین نمونه و روش کوآنتایل توسط الگوریتم ژنتیک حل گردید. روش تقریب میانگین نمونه به علت استفاده از دسته‌های گوناگون نمونه‌های تصادفی و میانگین‌گیری از آن‌ها نسبت به سایر روش‌های حل مدل‌های احتمالی جامعیت بیشتری دارد [۱۴].

تعیین عوامل مؤثر در مدل. در این پژوهش پدیده موردمطالعه سنجش ظرفیت و طراحی مدل برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق است؛ بدین منظور ابتدا عوامل مؤثر بر این پدیده شناسایی شد. برای استخراج این عوامل از راهبرد پژوهشی مطالعه موردی استفاده شده است. در مطالعه موردی درک یک موضوع یا مسئله، هدف پژوهش قرار می‌گیرد؛ بنابراین این راهبرد دربرگیرنده اکتشاف موضوعی خاص از طریق بررسی یک یا چند مورد، در قالب سیستمی با حدومرز مشخص (یعنی یک موقعیت، یک زمینه) است. عوامل مؤثر به‌صورت جدول ۱ در دو دسته عوامل اصلی و عوامل فرعی مؤثر تعیین شده است.

طراحی یک مدل مناسب هنگامی معتبر است که نتیجه آن اجرایی و اقتصادی باشد و مباحث فنی و اجتماعی را مدنظر قرار دهد. الگوی حاضر به علت وجود برخی از پارامترهای غیرقطعی از روش برنامه‌ریزی خطی احتمالی برای حل مسئله گسترش ظرفیت‌ها استفاده کرده است. در اینجا متغیرهای تصمیم شامل ظرفیت‌های منابع (فناوری‌های)، برآوردن تقاضا از قبیل تولید نیروگاهی، تولید پراکنده، مبادله خارجی، مبادله داخلی، مدیریت مصرف و خاموشی در زمان موردبررسی است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. عوامل فرعی مؤثر بر برنامه‌ریزی ظرفیت

عوامل اصلی	عوامل محیطی	عوامل اقتصادی	عوامل اجتماعی	عوامل فنی
عوامل فرعی	۱. موقعیت مکانی ۲. منابع دردسترس ۳. آلودگی	۱. هزینه سرمایه‌گذاری ۲. هزینه نصب و راه‌اندازی واحدهای جدید ۳. بازار رقابتی ۴. مدیریت سرمایه ۵. هزینه تولید	۱. ایمنی و رفاه ۲. رضایت مشترکان ۳. مدیریت مصرف ۴. خاموشی	۱. انواع فناوری تولید ۲. تجهیزات انتقال ۳. نگهداری و تعمیرات ۴. کارایی سیستم ۵. کیفیت توان ۶. ظرفیت فعال تجهیزات ۷. اتلاف بار ۸. قابلیت اطمینان ۹. ظرفیت تولید ۱۰. راندمان شبکه

برنامه‌ریزی احتمالی محدود[1] (CCP) یکی از انواع نگرش‌های بهینه‌سازی احتمالی به‌شمار می‌رود که برای حل مسائل بهینه‌سازی دارای پارامتر یا متغیر تصادفی در محدودیت‌ها و یا تابع هدف مناسب است. در این موارد محدودیت‌ها متعهد به برآورده‌سازی همراه با یک احتمال مشخص هستند.

مدل کلی مسائل CCP به‌صورت رابطه ۱، است:

رابطه (۱)

$$\min f(x)$$

St:

$$p_r\{g_j(x,\xi) \le 0, j = 1,2,\dots,k\} \ge 1-\alpha$$

در مدل بالا $x \in R^n$ بردار متغیرهای تصمیم، ξ بردار احتمالی دارای تابع توزیع احتمال $\varphi(\xi)$ و $f(x)$ تابع احتمال و $g_j(x,\xi)$ $(j = 1,2,\dots,k)$ تابع محدودیت و $p_r\{0\}$ احتمال رخداد $\{0\}$ و $1-\alpha$ سطح اطمینان تابع محدودیت برای برآورده‌شدن را نشان می‌دهد. در صورت امکان بهترین روش برای حل مدل CCP تبدیل محدودیت احتمالی به محدودیت قطعی و با درنظرگرفتن سطح اطمینان مشخص است. این روش برای کلیه مدل‌ها کارایی ندارد و روش «مونت کارلو» یک دیدگاه عمومی برای مسائل احتمالی به‌شمار می‌رود. در مدل طراحی‌شده، متغیر تصادفی تنها در محدودیت‌ها وجود دارد و در تابع هدف متغیرها قطعی هستند. اجزای این مدل شامل موارد زیر است.

1. Chance Constrained Programming

www.SID.ir

Archive of SID

نمادها. متغیرها و پارامترهای به‌کاررفته در مدل طراحی‌شده را می‌توان به‌صورت زیر معرفی کرد:

i: انواع روش‌های رویارویی با تقاضای مشترکان شامل تولید توسط نیروگاه بزرگ، تولید توسط نیروگاه پراکنده، انتقال از خارج، انتقال از داخل، مدیریت مصرف و خاموشی

k: افق برنامه‌ریزی

x_{ik}: ظرفیت ایجادشده از نوع i در سال Kام

α_{ik}: هزینه عملیاتی ظرفیت ایجادشده از نوع i در سال K

γ_{ik}: هزینه جاری و خواب سرمایه‌ی ظرفیت ایجادشده از نوع i در سال Kام

β_{ik}: ضریب آلودگی ایجاد ظرفیت از نوع i در سال K

MD_k: بیشینه تقاضا (مگاوات) در سال Kام

M_k: بودجه سالانه

S: خاموشی یا ظرفیت تأمین‌نشده مجاز(مگاوات)

توابع هدف. توابع هدف مسئله، کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و هزینه خواب سرمایه برای پاسخگویی به تقاضا، میزان آلودگی و خاموشی است که می‌توان آن را به‌صورت رابطه ۲، مدل‌سازی کرد:

رابطه (۲)

$$Min\ Z_1 = \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{10} Y_i\alpha_{ik}\left|x_{ik} - Max^{\mathrm{xim}}_{(1\le m\le(k-1))}\right| + \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{10}(1-Y_i)\gamma_{ik}\left|x_{ik} - Max^{\mathrm{xim}}_{(1\le m\le(k-1))}\right| + \sum_{i=5}^{6}\sum_{k=1}^{10}\alpha_{ik}x_{ik}$$

$$\text{If} \quad (x_{ik} - Max^{\mathrm{xim}}_{(1\le m\le(k-1))}) \ge 0 \quad \text{then } Y_i = 1 \qquad (i = 1,2,3,4)$$

$$\text{If} \quad (x_{ik} - Max^{\mathrm{xim}}_{(1\le m\le(k-1))}) < 0 \quad \text{then } Y_i = 0 \qquad (i = 1,2,3,4)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{10}\beta_{ik}\ x_{ik}$$

$$Min\ Z_3 = \sum_{k=1}^{10} x_{4k}$$

با توجه به اینکه میزان ظرفیت ایجادشده از نوع نیروگاهی و مبادله در هر سال به سال بعد انتقال می‌یابد؛ درنتیجه با درنظرگرفتن حداکثر تقاضا اگر ظرفیت‌های بهینه به‌دست‌آمده از مقدار بیشینه ظرفیت‌های ایجادشده سال‌های قبل افزایش داشت، هزینه سرمایه‌گذاری به‌وجود خواهد آمد؛ ولی اگر نتیجه این مقایسه کاهشی بود، این کاهش نشان می‌دهد که ظرفیت بهینه کمتر از حداکثر مقدار ظرفیت ایجادشده برای تأمین تقاضای آن سال خواهد بود. ازآنجاکه ظرفیت

www.SID.ir

Archive of SID

بلااستفاده باقی می‌ماند، مقداری خواب سرمایه به‌وجود خواهد آمد؛ به همین دلیل رخداد همزمان هزینه خواب سرمایه و هزینه عملیاتی امکان‌پذیر نخواهد بود؛ درنتیجه تابع هدف مربوط به این مقوله به‌صورت صفر و یک فرموله شده است. این موضوع برای ظرفیت بهینه خاموشی و مدیریت مصرف صادق نیست.

محدودیت‌های مدل. در این بخش محدودیت‌های مدل توضیح داده می‌شود.

محدودیت برآورده‌کردن حداکثر تقاضای سالانه. برای تقاضای انرژی برق سالانه حداکثر مقداری باعنوان «بیشینه تقاضا» تعریف شد است که از راه‌های گوناگون برآورده‌سازی انرژی، تأمین می‌شود. مجموع انواع ظرفیت ایجادشده در سال باید میزان پیک تقاضا را ارضا کند که این عبارت با رابطه ۳، نشان داده شده و در آن MD میزان بیشینه تقاضا است.

$$\sum_{i=1}^{4} x_{ik} = MD_k \qquad (k = 1,2,\dots,10)$$ رابطه (۳)

در پژوهش حاضر ازآنجاکه مقدار بیشینه تقاضا یک مقدار احتمالی و همراه با عدم‌قطعیت است؛ بنابراین مدل بالا به یک مدل احتمالی تبدیل می‌شود که این عدم‌قطعیت در محدودیت تأمین تقاضا به‌صورت رابطه ۴، نمایان شد. θ_k احتمال رخداد مقدار تعیین‌شده اوج تقاضا در سال i است که برابر با سطح اطمینان است.

$$p_r\{\sum_{i=1}^{6} x_{ik} = MD_k\} \geq \theta_k \qquad (k = 1,2,\dots,10)$$ رابطه (۴)

محدودیت بودجه سالانه. میزان بودجه تخصیص‌داده‌شده برای ایجاد و گسترش ظرفیت‌های تأمین تقاضای سالانه مقدار مشخصی است که در رابطه ۵، مشخص و M معرف بودجه است.

رابطه (۵)

$$\sum_{i=1}^{4}\sum_{k=1}^{10} Y_i \alpha_{ik} \left| x_{ik} - Max^{\mathrm{xim}}_{(1\leq m\leq (k-1))} \right| + \sum_{i=5}^{6}\sum_{k=1}^{10} \alpha_{ik} x_{ik} \leq M_k \quad (k = 1,2,\dots,10)$$

www.SID.ir

Archive of SID

محدودیت خاموشی مجاز سالانه. سالانه میزانی از تقاضای انرژی برق به‌صورت انرژی تأمین‌نشده پاسخ داده می‌شود؛ به‌طوری‌که متقاضیان با خاموشی روبه‌رو می‌شوند. مقدار این خاموشی نباید از حد مشخصی تجاوز کند؛ در غیر این صورت موجب بروز اختلال در صنعت و نارضایتی اجتماعی می‌شود. رابطه ۶، نشان‌دهنده این حد است که S میزان خاموشی مجاز را نشان می‌دهد.

$$pr\{x_{4k} \le S_k\} \ge \theta_k \qquad (k = 1,2,\dots,10) \qquad \text{رابطه (۶)}$$

ازآنجاکه گاهی تعیین میزان خاموشی با قطعیت کامل امکان‌پذیر نیست، می‌توان با احتمال مشخصی و با سطح اطمینان معین این میزان را تخمین زد.

حل مدل. حل مدل خطی احتمالی پژوهش حاضر به‌دلیل وجود حجم زیادی از متغیرها بسیار زمان‌بر است؛ درنتیجه از روش‌های رایج در حل مسائل با متغیرهای بالا، روش ابتکاری تقریب میانگین نمونه[1] و روش کوآنتایل[2] استفاده شده است. روش تقریب میانگین نمونه یک روش آماری مبتنی بر نمونه‌برداری است که برای حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی با تعداد زیاد متغیر استفاده می‌شود. ایده اصلی این روش تقریب مقدار تابع هدف مسئله برنامه‌ریزی احتمالی با انتخاب N نمونه و تکرار چندین بار این عمل است [۲۸]. معمولاً حل مدل‌های احتمالی تا حدی دشوار است؛ زیرا برای $x \in X$ انتخاب‌شده محاسبه مقدار $prob\{G(x,\xi) \le 0\}$ سخت است و به یکپارچگی چندبُعدی نیاز دارد و تنها راه برای بررسی امکان‌پذیری یک جواب، استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو است؛ همچنین مجموعه ممکن مسئله احتمالی ممکن است غیرمحدب بوده؛ درحالی‌که مجموعه جواب ممکن و مقدار تابع $G(x,\xi)$ در نقطه مشخص x به‌صورت محدب تعریف شده باشد؛ درنتیجه بررسی‌ها در دو زمینه صورت گرفته است: ۱. محاسبه توزیع احتمالی P و محاسبه مسئله و ۲. به‌کارگیری تقریب محدب برای محدودیت احتمالی [۱۳].

یکی از راه‌حل‌های عددی برای مدل‌های احتمالی بر اساس روش «مونت‌کارلو»، باعنوان روش تقریب میانگین نمونه است. اساس این روش نمونه‌گیری و تقریب تابع هدف است. «شبیه‌سازی مونت‌کارلو» تقریب‌هایی را توسط میانگین نمونه‌های گرفته شده، ایجاد می‌کند و از طریق آن بردار تصادفی توسط میانگین حاصل از نمونه‌ها جاگذاری می‌شود [۱۹].

1. Sample Average Approximation Method (SAA)
2. Quantile Method

www.SID.ir

Archive of SID

در این روش محدودیت احتمالی $prob\{G(x,\xi)\le 0\}\ge 1-\alpha$ را می‌توان به‌صورت رابطه ۷، بازنویسی کرد.

رابطه (۷)
$$\min f(x)$$
$$x\in X$$
$$s.t$$
$$p(x)\le \alpha$$

به‌طوری‌که $p(x)=p\{G(x,\xi)>0\}$ است. $\xi^1, \xi^2,\ldots, \xi^N$ ، N نمونه از بردار تصادفی ξ با توزیع یکسان مستقل[1] (IID) بوده و $p_N := N^{-1}\sum_{j=1}^{N}\Delta(\xi^j)$ توزیع تجربی نمونه مربوط به مسئله SAA است. در اینجا $\mathrm{p_N}$ نشان‌دهنده احتمال $\frac{1}{\mathrm{N}}$ از هر ξ^j، $j=1,\ldots,N$ است. تخمین میانگین نمونه $\hat{\mathrm{p}}_{\mathrm{N}}(\mathrm{x})$ از تابع $p(x)$ از طریق جاگذاری توزیع واقعی توسط توزیع تجربی p_N به‌دست می‌آید.

رابطه (۸)
$$\hat{p}_N(x) := p_N\{G(x,\xi)>0\}$$

$1_{(0,\infty)}$ برای نشان دادن تابع $(0,\infty)$ به کار برده می‌شود به‌طوری‌که

رابطه (۹)
$$1_{(0,\infty)}(t) := \quad 1 \quad if \quad t>0$$

$$0 \quad if \quad t\le 0$$

درنتیجه می‌توان نوشت:

و
$$p(x)=EP\,[1_{(0,\infty)}(G(x,\xi)]$$
$$\hat{p}_N(x) := EP\,[1_{(0,\infty)}(G(x,\xi)] = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}1_{(0,\infty)}(G(x,\xi^j)).$$

در اینجا $\hat{\mathrm{p}}_{\mathrm{N}}(\mathrm{x})$ معادل با نسبت حالت‌هایی است که $G(x,\xi^j)>0$ است و مسئله با تولید نمونه $\xi^1, \xi^2,\ldots,\xi^N$ در ارتباط بوده و رابطه ۱۰، برقرار است.

رابطه (۱۰)
$$\min f(x)$$
$$x\in X$$

1. Independent Identically Distributed

www.SID.ir

Archive of SID

$s.t$
$\hat{p}_N(x) \leq \gamma$

با درنظرگرفتن حجم نمونه بزرگ برای هر x، $\hat{p}_N(x)$ به ازای $p(x)$ همگرایی دارد. اگر سطح معناداری مسئله اصلی و مسئله SAA یکسان فرض شود ؛ به عبارتی $\alpha = \gamma$ و $f(x)$ یک تابع پیوسته در نظر گرفته باشد؛ درنتیجه $\hat{v}_N \to v^*$ است و جواب مسئله SAA همگرا به جواب مسئله اصلی خواهد بود و حجم نمونه به سمت ∞ میل می‌کند. با فرض اینکه $\gamma > \alpha$ باشد، انتظار می‌رود با افزایش حجم نمونه، جواب بهینه مسئله SAA، جواب بهینه مسئله اصلی با سطح معناداری γ بزرگ‌تر از α باشد. افزایش سطح معناداری[1] به بزرگ‌ترشدن مجموعه ممکن مسئله اصلی منجر می‌شود؛ اما ممکن است باعث کاهش ارزش جواب بهینه مسئله اصلی شود. برای نقطه $\bar{x} \in X$، $\hat{p}_N(x) \leq \gamma$ است که $\bar{x}$ یک نقطه ممکن از مسئله SAA می‌باشد. اگر γN مرتبه عبارت $G(\bar{x}, \xi) > 0$ در مسئله SAA در N آزمایش برقرار باشد؛ آنگاه احتمال رخداد $G(\bar{x}, \xi) > 0$ برابر با $p(\bar{x})$ خواهد بود. درنتیجه رابطه ۱۱، برقرار خواهد بود.

$$\text{prob}\{\hat{p}_N(\bar{x}) \leq \gamma)\} := b(\lfloor \gamma N \rfloor; p(x), N) \qquad \text{رابطه (۱۱)}$$

اگر $\gamma > \alpha$ باشد؛ آنگاه احتمال اینکه جواب بهینه مسئله SAA کوچکتر از جواب بهینه مسئله اصلی باشد ($\hat{v}_N \leq v^*$) به یک نزدیک می‌شود؛ همچنین اگر $p(\bar{x}) = \alpha$ و $\gamma < \alpha$ باشد؛ آنگاه احتمال اینکه $\bar{x}$ یک نقطه ممکن از مسئله SAA باشد به صفر نزدیک می‌شود. برای محاسبه حد پایین برای ارزش بهینه v^* طبق مراحل زیر عمل می‌شود:

۱. ابتدا دو عدد مثبت M و N انتخاب شود؛ به‌طوری‌که $\theta_N := B(\lfloor \gamma N \rfloor; \alpha, N)$ و L بزرگ‌ترین عدد صحیح به‌صورت $B(L-1; \theta_N, M) \leq \beta$ باشد؛

۲. M دسته نمونه مستقل با حجم N برای هر دسته از بردار تصادفی ξ تولید شود؛

۳. برای هر دسته نمونه مسئله بهینه‌سازی زیر حل و ارزش بهینه آن $\hat{v}_N^m$، $m = 1, \dots, M$ محاسبه شود. این محاسبات M مرتبه برای مسئله SAA مشابه و در سطح معناداری γ انجام می‌گیرد.

$$\min f(x) \qquad \text{رابطه (۱۲)}$$
$$x \in X$$
$$s.t$$
$$\sum_{j=1}^{N} 1_{(0,\infty)}(G(x, \xi^{j,M})) \leq \gamma N$$

1. Significance

www.SID.ir

Archive of SID

۴. ارزش‌های بهینه محاسبه‌شده از کوچک به بزرگ مرتب شو؛ به‌طوری‌که $\hat{v}_N^1 \leq \cdots \leq \hat{v}_N^m$؛ سپس با استفاده از یک مقدار تصادفی $\hat{v}_N^L$ به‌عنوان حد پایین جواب بهینه مسئله اصلی v^* انتخاب شود. ممکن است با احتمال $1-\beta$ نشان داده شود که v_L^* کمتر از ارزش بهینه اصلی v^* باشد [۱۴].

دلیل استفاده از γ به جای α این است که برای α ثابت، فرصت‌های مختلف مقادیر γ ممکن است مناسب باشد. برای تعیین مقدار حد پایین دو روش بیان شده است: ۱. انتخاب تصادفی یک جواب از میان ارزش‌های محاسبه‌شده مسئله SAA و ۲. تخمین حد پایین تابع هدف با محاسبه میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از حل M بار تابع هدف به‌صورت رابطه ۱۳ [۱۱].

$$\bar{v}^M = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} v^m \qquad \text{رابطه (۱۳)}$$

مقادیر درنظرگرفته‌شده برای α توسط تصمیم‌گیرنده تعیین‌شده و مقدار N از طریق $\frac{1}{\alpha}$ یا $\frac{2}{\alpha}$ محاسبه می‌شود؛ همچنین γ برابر با $\frac{\alpha}{2}$ در نظر گرفته می‌شود؛ علاوه بر آن مدل طراحی‌شده توسط یک روش قطعی باعنوان «روش کوآنتایل» نیز حل شد. کوآنتایل‌های توابع توزیع قاعده‌ای که یک معادله قطعی معادل را برای یک معادله محدودکننده شانس نشان می‌دهند، به‌کار گرفته خواهد شد. معادله محدودکننده شانس به‌صورت رابطه ۱۴، در نظر گرفته می‌شود:

$$prob\,(ax \leq b) \geq \alpha \qquad \text{رابطه (۱۴)}$$

به‌طوری‌که متغیر تصادفی b دارای توزیع معلوم به‌صورت رابطه ۱۵، باشد.

$$prob\,(ax \leq b) = F_b(Z) \qquad \text{رابطه (۱۵)}$$

کوچک‌ترین مقدار $B_{1-\alpha}$ به‌طوری‌که تساوی رابطه ۱۶، برای آن برقرار باشد، پیدا می‌شود.

$$F_b(B_{1-\alpha}) = 1-\alpha \qquad \text{رابطه (۱۶)}$$

به‌طوری‌که $1-\alpha$ نشان‌دهنده سطح اطمینان است. این تساوی را می‌توان به شکل فرمول ۱۷، نشان داد:

www.SID.ir

Archive of SID

$$B_{1-\alpha} = F_b^{-1}(1-\alpha)$$ رابطه (۱۷)

به همین دلیل است که اگر رابطه $ax \geq B_\alpha$ برقرار باشد آنگاه ax کوچکتر از (ممکن است بزرگتر هم باشد) هر مقدار b بوده که از B_α بزرگتر می‌باشد و احتمال اینکه یک چنین مقداری برای b وجود داشته باشد مساوی α است. از سوی دیگر اگر ax از B_α کوچکتر باشد آنگاه احتمال اینکه $ax \geq b$ باشد از α کوچکتر است[۲۳].

مورد مطالعه. «شرکت برق منطقه‌ای یزد» پیشتاز در سطح ملّی با ایجاد بستری مناسب برای سرمایه‌گذاری، فعالیت و پیشرفت هم‌راستا با توسعه پایدار است. این شرکت مأموریت خود را تأمین برق مطمئن و پایدار برای مشتریان از طریق توسعه و بهره‌برداری بهینه از تأسیسات شبکه برق در راستای رضایتمندی ذی‌نفعان قرار داده است. ازآنجاکه مدل‌های کنونی برای پیش‌بینی ظرفیت موردنیاز، کارایی لازم را ندارد؛ بنابراین در این بخش به بررسی و اجرای مدل پیشنهادی در «شرکت برق منطقه‌ای یزد» پرداخته می‌شود. مقادیر پارامترهای مدل طبق نظر متخصصان این شرکت و پیش‌بینی‌های انجام‌گرفته برای ۱۰ سال آینده مطابق جدول ۲ است؛ همچنین اطلاعات ارائه‌شده اطلاعات واقعی شرکت است که توسط آن‌ها و مدل ارائه‌شده برای یک دوره ۱۰ ساله پیش‌بینی ظرفیت صورت می‌گیرد.

مدل در نرم‌افزار «متلب» کدگذاری؛ سپس مسئله نمونه با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. در این مورد متغیرهای تصمیم که تعیین ظرفیت تولید نیروگاهی، تولید پراکنده، انتقال خارجی و داخلی، مدیریت مصرف و خاموشی است برای ۱۰ سال آتی در نظر گرفته شده است. احتمال رخداد محدودیت مربوط به تقاضا و میزان خاموشی به‌عنوان یک پارامتر غیرقطعی، توسط تصمیم‌گیرندگان حداقل ۹۵ درصد تعیین شد. برای حل مدل به روش SAA تعداد نمونه انتخاب‌شده برای مقدار تصادفی تقاضا و خاموشی برابر با $\frac{2}{\alpha} = \frac{2}{0.05} = 40$ در نظر گرفته شد که این مقادیر بر اساس تقاضای دوره‌های گذشته و با درنظرگرفتن سری‌های زمانی تقاضا و خاموشی محاسبه شد؛ همچنین مقدار γ برابر با $\frac{\alpha}{2} = \frac{0.05}{2} = 0.025$ و مقدار M برابر با ۱۰۰ تعیین گردید.

با انجام طرح غربال‌گری پارامترهایی که بر تابع برازش در الگوریتم ژنتیک تأثیرگذار بودند، شناسایی و مقدار مناسب آن‌ها تنظیم شد که عبارت‌اند از:

اندازه جمعیت (۳۰۰)؛ حداکثر تعداد نسل (۲۰۰)؛ احتمال تقاطع (۰/۲)؛ احتمال جهش (۰/۱۵) و اندازه مسئله.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲. مقادیر پارامترهای مدل

سال / پارامتر	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴
	بر حسب یک‌صد میلیون تومان									
α_{1k}	۴۰۰	۴۱۰	۴۲۰	۴۲۰	۴۵۰	۴۷۰	۴۸۰	۴۸۰	۴۸۰	۴۹۰
α_{2k}	۴۰	۴۱	۴۱	۴۲	۴۴	۴۶	۴۶	۴۷	۴۸	۵۲
α_{3k}	۱/۵	۱/۶	۱/۸	۱/۹	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۹	۱/۹	۱/۹
α_{4k}	۰/۴	۴/۵	۴/۵	۵/۰	۰/۶	۰/۶	۰/۸	۱	۱/۲	۱۳/۵
γ_{1k}	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۵	۱۳۵	۱۴۲	۱۵۰
γ_{2k}	۱۰	۱۱	۱۱/۵	۱۲	۱۳	۱۳	۱۳/۵	۱۴	۱۴/۸	۱۵/۲
	بر حسب مگاوات									
MD_k	۴۵۷۵	۴۷۰۲	۴۸۳۰	۴۹۵۷	۵۰۸۴	۵۲۱۲	۵۳۳۹	۵۴۶۶	۵۵۹۴	۵۷۲۱
	بر حسب یک هزار میلیون تومان									
M_{1k}	۱۲۰۰۰	۹۰۰۰	۹۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
M_{2k}	۹۰۰۰	۹۲۰۰	۹۰۰۰	۹۵۰۰	۱۰۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰	۶۷۰۰	۵۰۰۰	۴۲۰۰
M_{3k}	۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۷۱	۰/۸۲	۰/۹۲	۱/۱	۱/۲۵
	بر حسب مگاوات									
S	۸۰۰	۷۸۰	۷۵۰	۷۰۰	۶۸۰	۶۵۰	۶۰۰	۵۴۰	۵۲۰	۵۰۰
	استنباط بین ۱۰-۱									
β_{1k}	۷	۷	۷	۶	۶	۶	۵	۵	۵	۴
β_{2k}	۳	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲	۲

٤. تحلیل داده ها و یافته های پژوهش

با توجه به احتمالی‌بودن مدل برنامه‌ریزی خطی به علت وجود عدم‌قطعیت در میزان تقاضا و خاموشی و احتمالی‌بودن محدودیت مربوط به آن‌ها، ۱۰۰ نمونه چهل‌تایی به‌صورت تصادفی بر اساس روند تقاضاهای گذشته برای دوره مورد مطالعه انتخاب شدند و پس از اعمال روش SAA بر روی مدل احتمالی و حل آن بر اساس یکی از روش‌های فراابتکاری باعنوان الگوریتم ژنتیک جواب متغیرهای تصمیم مسئله طبق جدول ۳ محاسبه شد. مقادیر به‌دست‌آمده نشان‌دهنده ظرفیت اختصاص داده شده به هر یک از روش‌های رویارویی با تقاضا است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. ظرفیت محاسبه‌شده با روش SAA (برحسب مگاوات)

سال / متغیر	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴
نیروگاه	۱۵۰۵	۱۲۴۷	۱۲۷۶	۹۹۵	۱۵۴۷	۱۳۶۰	۱۶۷۵	۱۵۵۴	۱۷۷۳	۱۹۲۲
تولید پراکنده	۱۶۹۸	۱۸۲۸	۱۸۰۸	۱۸۷۲	۲۳۰۲	۲۳۳۲	۱۹۱۹	۲۴۳۲	۱۷۸۱	۱۱۷۳
انتقال از خارج	۶۰۵	۱۴۳	۸۸۴	۹۸۰	۵۰۰	۶۵۴	۹۴۹	۲۶۰	۹۲۷	۹۸۴
انتقال از داخل	۴۹۶	۶۴۷	۴۰۸	۴۸۴	۵۹۸	۳۴۲	۴۲۷	۶۷۴	۸۵۱	۷۸۹
مدیریت مصرف	۴۵	۴۲۳	۲۵۸	۴۵۶	۸۴	۱۴۴	۱۰۹	۱۷۳	۱۴۷	۴۹۴
خاموشی	۲۲۶	۴۱۴	۱۹۷	۱۷۱	۵۵	۳۸۰	۲۶۲	۳۷۴	۱۱۵	۳۵۹
تابع هدف	۸۴۴۶۵۰۰ (میلیون ریال)									

مدل احتمالی طراحی‌شده با تبدیل آن به یک مدل قطعی با استفاده از روش کوآنتایل حل شد. نتایج ظرفیت‌های بهینه تعیین‌شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. ظرفیت محاسبه‌شده با روش کوآنتایل (برحسب مگاوات)

سال / متغیر	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴
نیروگاه	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۲۰۰	۹۹۵	۱۴۰۰	۱۲۰۰	۱۹۰۰	۱۷۰۰	۱۷۵۶	۲۳۷۵
تولید پراکنده	۲۷۵۷	۱۶۴۷	۱۸۰۸	۱۸۷۲	۲۳۰۲	۲۶۵۷	۱۹۱۹	۳۷۵۶	۱۷۵۸	۱۱۷۳
انتقال از خارج	۵۸۷	۱۴۳	۹۵۷	۹۸۰	۶۷۴	۶۵۴	۹۴۹	۲۶۰	۴۷۶	۹۸۴
انتقال از داخل	۶۴۵	۵۴۶	۴۹۷	۳۷۶	۵۹۸	۳۶۵	۵۳۶	۷۴۵	۹۴۶	۸۳۴
مدیریت مصرف	۵۶	۶۵۴	۱۵۴	۸۷۶	۵۹	۲۶۷	۸۷	۲۸۷	۱۴۷	۴۹۴
خاموشی	۳۶۶	۳۸۷	۲۶۵	۱۷۱	۵۹	۳۸۰	۲۶۲	۴۹۸	۱۱۵	۳۵۹
تابع هدف	۹۴۷۶۴۰۰									

www.SID.ir

Archive of SID

براس سنجش اعتبار مدل جدید، ظرفیت‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های فعلی مورداستفاده در «شرکت برق منطقه‌ای یزد» از طریق مدل طراحی‌شده حل شد که به نتایج بدتر منجر شد. ظرفیت‌های مدل فعلی در جدول ۵ ارائه شده است.

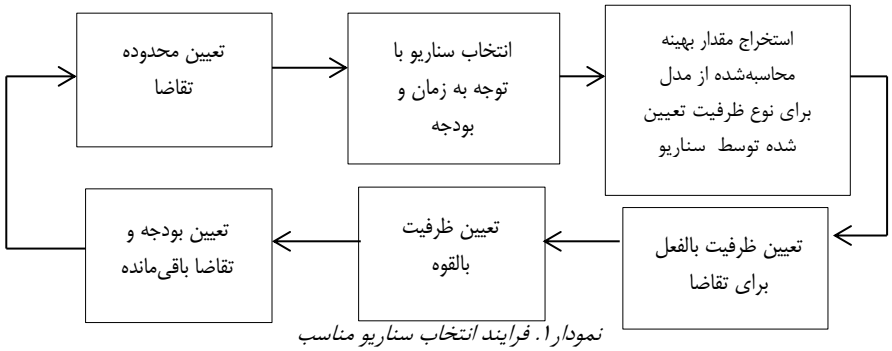
جدول ۵. ظرفیت پیش‌بینی‌شده با روش مورداستفاده فعلی (برحسب مگاوات)

سال / متغیر	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴
نیروگاه	۱۵۲۳	۲۰۱۱	۱۶۶۹	۲۰۶۰	۱۷۴۴	۱۸۳۳	۱۹۴۳	۱۵۶۲	۲۱۱۲	۱۸۲۵
تولید پراکنده	۱۵۱۵	۱۲۵۰	۱۷۶۷	۲۰۸۸	۱۱۰۰	۱۶۵۳	۱۳۵۴	۲۵۱۵	۱۵۲۰	۲۴۸۵
انتقال از خارج	۴۱۰	۷۷۷	۶۲۳	۳۵۴	۶۱۵	۵۴۹	۹۴۰	۵۲۵	۱۶۷	۲۹۰
انتقال از داخل	۵۷۹	۳۸۸	۴۸۶	۳۴۸	۹۶۱	۷۳۶	۴۶۵	۶۰۷	۹۰۰	۳۷۳
مدیریت	۹۴	۶۷	۱۳۷	۶۶	۲۱۵	۲۱۸	۳۰۳	۴۳	۴۳۷	۴۲۹
خاموشی	۴۵۴	۲۰۸	۱۵۱	۴۰	۴۵۰	۲۲۴	۳۳۴	۲۱۵	۴۵۷	۳۱۹
تابع هدف	۱۱۴۴۱۰۰۰(میلیون ریال)									

برای اجرای فاز دوم پژوهش، ظرفیت‌های تعیین‌شده با روش SAA در نظر گرفته شد؛ زیرا این روش نسبت به روش کوآنتایل واقعیت پذیرتر بوده و توابع هدف محاسبه‌شده با آن در وضعیت مطلوب‌تری قرار گرفته است. در این بخش با توجه به میزان تقاضای سالانه، روش‌های پاسخگویی به تقاضا، زمان و بودجه در دست برای هر سال، سناریوهایی تعریف شد که انتخاب هر سناریو با درنظرگرفتن امکان اجرای آن صورت گرفت. برای امکان‌سنجی هر سناریو ابتدا مقدار تقاضا، زمان موجود و بودجه تخصیص‌داده‌شده به سال بررسی و بودجه استفاده‌نشده از سال قبل تعیین شد تا با توجه به امکانات موجود سناریوی ممکن انتخاب شود. فرایند انتخاب سناریو را می‌توان با نمودار ۱ نشان داد.

www.SID.ir

Archive of SID



نمودار۱. فرایند انتخاب سناریو مناسب

پس از تعیین نوع و مقدار ظرفیت‌های هر سال از طریق تعریف سناریو، محل اجرای آن‌ها با توجه به مراکز بار استان یزد مشخص شد؛ زیرا امکان احداث و توسعه هر یک از این ظرفیت‌ها با توجه به خصوصیات فنی، محیطی، فرهنگی و اجتماعی است. در برخی از مراکز بار به علت شرایط فنی و محیطی امکان احداث نیروگاه و خطوط انتقال وجود نداشت؛ همچنین برخی از مراکز از نظر اجتماعی و فرهنگی قابلیت اجرای مدیریت مصرف یا خاموشی را ندارد که با کسب اطلاعات از خبرگان و کارشناسان صنعت برق و بررسی‌های محلی هر مرکز، مکان اجرای ظرفیت‌های تعیین‌شده، مشخص شد. خلاصه‌ای از محاسبات ذکرشده در جدول ۶ با رخداد شوک تقاضا در سال ۱۴۰۱ ارائه شده است.

جدول ۶. روند انتخاب سناریو مناسب

سال	تقاضا	ظرفیت سال قبل	بودجه	بازه انتخابی	سناریو	مقدار بهینه	بودجه باقیمانده
۱۳۹۵	۴۵۷۵	۴۰۰۰	۳۰۰	$D \geq ۵۰۰$ $t \leq ۱$ $B \geq ۴۰۰$	انتقال از داخل	۴۹۶	۷۶/۸
۱۳۹۵	۹۷	–	۷۶٫۸	$D \leq ۵۰$ $t \leq ۱$ $۶۰ \leq B \leq ۲۰۰$	مدیریت مصرف	۲۲۶	۶۴/۱۶
۱۳۹۶	۴۷۰۲	۴۴۹۶	۳۵۰	$۲۰۰ \leq D \leq ۳۰۰$ $۱ \leq t < ۲$ $۲۰۰ \leq B \leq ۴۰۰$	تولید پراکنده	۱۸۲۸	۲۴۴/۹۴
۱۳۹۷	۴۸۳۰	۴۷۰۲	۳۷۵	$۵۰ \leq D \leq ۱۵۰$ $۲ \leq t < ۵$ $۲۰۰ \leq B \leq ۴۰۰$	خاموشی	۴۰۸	۳۱۴/۸۴

www.SID.ir

Archive of SID

۱۳۹۸	۴۹۵۷	۴۷۰۲	۴۰۰	$۲۰۰ \le D \le ۳۰۰$ $۲ \le t < ۵$ $B \ge ۴۰۰$	تولید پراکنده	۱۸۷۲	۲۶۴/۸۵
۱۳۹۹	۵۹۸۴	۴۹۵۷	۴۵۰	$۵۰ \le D \le ۱۵۰$ $۲ \le t < ۵$ $B \ge ۴۰۰$	خاموشی	۵۵	۴۳۴/۰۵
سال	تقاضا	ظرفیت سال قبل	بودجه	بازه انتخابی	سناریو	مقدار بهینه	بودجه باقیمانده
۱۳۹۹	۷۲	-	۴۳۴/۰۵	$D \le ۵۰$ $۲ \le t < ۵$ $۶۰ \le B \le ۲۰۰$	۵۰۰ مدیریت مصرف	۸۴	۴۲۱/۰۹
۱۴۰۰	۵۲۱۲	۴۹۵۷	۵۰۰	$۲۰۰ \le D \le ۳۰۰$ $t \ge ۵$ $B \ge ۴۰۰$	تولید پراکنده	۲۳۳۲	۳۶۲/۳
۱۴۰۱	۵۳۳۹ + ۱۰۰۰	۵۲۱۲	۵۵۰	$D \ge ۵۰۰$ $t \ge ۵$ عدم بودجه	انتقال از خارج	۹۴۹	۰
۱۴۰۱	۱۷۸	-	مازاد سال‌های قبل	$۱۵۰ \le D \le ۲۰۰$ $t \ge ۵$ $B \ge ۴۰۰$	انتقال از داخل	۴۲۷	۰
۱۴۰۲	۵۴۶۶ + ۱۰۰۰	۶۳۳۹	۶۰۰	$۵۰ \le D \le ۱۵۰$ $t \ge ۵$ $B \ge ۴۰۰$	خاموشی	۳۷۴	۵۷۳/۳۳
۱۴۰۳	۵۵۹۴ + ۱۰۰۰	۶۳۳۹	۷۰۰	$۲۰۰ \le D \le ۳۰۰$ $t \ge ۵$ $B \ge ۴۰۰$	تولید پراکنده	۱۷۸۱	۵۵۴/۶۵
۱۴۰۴	۵۷۲۱ + ۱۰۰۰	۶۵۹۴	۸۰۰	$۵۰ \le D \le ۱۵۰$ $t \ge ۵$ $B \ge ۴۰۰$	خاموشی	۳۵۹	۷۷۲/۰۶

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف از برنامه‌ریزی ظرفیت تولید و انتقال انرژی برق، جست‌وجو برای انتخاب اقتصادی‌ترین طرح گسترش ظرفیت، مطابق با پیش‌بینی افزایش تقاضا، در یک دوره زمانی خاص با هدف دستیابی به سطح قابلیت اعتماد و رضایت مشترکان است. در این مقاله مدل بهینه‌سازی ظرفیت انرژی برق به‌عنوان یک محصول راهبردی ذخیره‌ناپذیر توسعه داده شد که شامل کمینه‌سازی

www.SID.ir

Archive of SID

هزینه عملیاتی برای پاسخگویی به تقاضا، میزان آلودگی، خاموشی و هزینه خواب سرمایه است. مقاله حاضر با توسعه یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی به انتخاب بهترین ترکیب از روش‌های مختلف برآورده‌سازی تقاضا شامل تولید، انتقال و تبادل، مدیریت مصرف و خاموشی پرداخته است. در این پژوهش روش شبیه‌سازی SAA برای حل مدل احتمالی به‌کار رفت و جواب متغیرها از طریق روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک محاسبه شد. مدل در «شرکت برق منطقه‌ای استان یزد» اجرا شد و ارزیابی اعتبار آن از طریق مقایسه ظرفیت‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل جدید با ظرفیت‌های پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های فعلی به‌کار برده‌شده در آن سازمان صورت گرفت. از طریق مطالعه تطبیقی با حالات موجود و ازآنجاکه جواب‌های مدل جدید دارای تابع هدف بهینه‌تری نسبت به جواب‌های مدل فعلی است و توابع هدف را بهتر ارضا می‌کند؛ بنابراین می‌توان اعتبار مدل را تأیید کرد.

جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل نشان‌دهنده ظرفیت بهینه برای هر یک از روش‌های پاسخگویی به تقاضا است که این ظرفیت‌ها نمایانگر ظرفیت قابل‌ایجاد یا توسعه برای ۱۰ سال آینده است. ازآنجاکه ظرفیت ایجادشده تولید و مبادله در هر سال نسبت به سال آتی از بین نمی‌رود و به سال بعد انتقال می‌یابد؛بنابراین برای انتخاب سناریو مناسب ظرفیت‌های محاسبه‌شده هر سال با توجه به سال‌های قبل در نظر گرفته شد؛ البته این فرضیه‌ها برای ظرفیت مدیریت مصرف و خاموشی صدق نمی‌کند؛ همچنین بر اساس نتایج، برای مثال در سال ۹۶ ظرفیت تولید نیروگاهی به میزان ۱۲۴۷ مگاوات نسبت به سال قبل با ظرفیت ۱۵۰۵ دارای مقداری کاهش است وچون ظرفیت دوره‌های گذشته از بین نمی‌رود؛ درنتیجه این کاهش نشان‌دهنده مقداری خواب سرمایه است؛ بدین معنا که در سال ۱۳۹۵ با وجود افزایش تقاضا، مقداری از ظرفیت نیروگاه بلااستفاده مانده است؛ بنابراین تقاضا باید از طریق روش‌های دیگر پاسخ داده شود که بر اساس تعریف سناریوهایی و با درنظرگرفتن مقدار تقاضا، زمان دردسترس و بودجه بهترین حالت ممکن انتخاب شد؛ به عبارتی به علت ارتباط بین سال‌ها و تعدیل ظرفیت‌ها، سناریوهایی تعریف شد که تولیدات سال‌های قبل، بودجه مازاد هر سال و سایر عوامل مرتبط بین سال‌ها را در نظر گرفته است. بر اساس این سناریوها، ظرفیت مناسب برای مراکز بار منطقه یزد مشخص شد.

برای تخصیص ظرفیت تعیین‌شده به مرکز بار مناسب، ویژگی‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی هر منطقه بررسی و بر اساس این اطلاعات امکان اجرا و توسعه ظرفیت مشخص شد. به‌منظور سنجش اعتبار مدل، نتیجه حاصل از ظرفیت‌های به‌دست‌آمده از مدل جدید با نتیجه حل مدل توسط ظرفیت‌های پیش‌بینی‌شده از طریق مدل‌های فعلی مورداستفاده در «شرکت برق منطقه‌ای استان یزد» مقایسه شد و ازآنکه جواب‌های مدل طراحی‌شده دارای تابع هدف بهینه‌تری

www.SID.ir

Archive of SID

نسبت به جواب‌های مدل فعلی بود و توابع هدف را بهتر ارضا می‌کرد؛ بنابراین اعتبار مدل تأیید شد؛ همچنین نتایج مدل پیشنهادی از نظر صحت و دقت موردتأیید خبرگان صنعت برق و دانشگاهی قرار گرفت که دلیلی بر اعتبار مدل پیشنهادی است.

با توجه به پژوهش حاضر ازجمله پیشنهادهایی که می‌توان برای پژوهش‌های آتی ارائه داد، احتمالی درنظرگرفتن توابع هدف و محدودیت‌های دیگر مؤثر بر برنامه‌ریزی ظرفیت انرژی برق است؛ زیرا در این مقاله تنها محدودیت تقاضا و خاموشی به‌صورت احتمالی فرض شد؛ همچنین در پژوهش‌های آتی می‌توان مدل احتمالی طراحی‌شده را از طریق روش‌های گوناگون حل کرد؛ سپس جواب بهینه هر روش را با جواب‌های فعلی مقایسه کرده و بهترین روش را برای برنامه‌ریزی ظرفیت تعیین کرد.

می‌توان علاوه بر روش‌های ذکرشده در این پژوهش که شامل تولید، انتقال، مدیریت مصرف و خاموشی است، برای رویارویی با تقاضای مشترکان، نوع نیروگاه بر اساس مکانیسم کارکرد و سوخت موردنیاز را در نیز نظر گرفت.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

1. Alam Tabriz, A., Farokh, M., & Ahmadi, E. (1393) A model for project cost estimation and final time with meta-heuristic approach. *Journal of Industrial Management Perspective-JIMP, 4(13)*(In Persion).

2. Alguacil, N., Motto, A. L., & Conejo, A. J. (2003). Transmission expansion planning: a mixed-integer LP approach. Power Systems. *IEEE Transactions on, 18(3),* 1070-1077.

3. Billinton, R., Allan R.N., (1387). Evaluation of power systems reliability, translated by Mohammad Reza Haghifam, Mohammad Ismail Honarmand, the publisher (SID)

4. Falaghi, H., Haghifam, M. R., Parsa Moghaddam, M. (2008). Determine the optimal capacity of DG for installation in distribution network. Twenty-third International Conference on Electrical, p. 2-5

5.García-Bertrand, R., Kirschen, D., & Conejo, A. J. (2008). Optimal investments in generation capacity under uncertainty. In 16th Power Systems Computation Conference, 1-7.

6. Gröwe-Kuska, N., Heitsch, H., & Römisch, W. (2003). Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems. In Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna (Vol. 3, pp. 7-pp). IEEE.

7. Hojat, M., Javidi, M. H. , contingency management with uncertainty power system based on chance. *Journal of Iranian Electrical and Computer Engineering, 10,* 6-18

8. Hosseini, M. H. (1391). Measuring of efficiency changes with DEA and Malmquist Index in power generation management companies. *Journal of Industrial Management Perspective, 6,* p. 129(In Persion).

9. Kazemi, A.,Mehregan, M. R., Shakouri G., H. (1390) presented a multi-objective linear planning model for optimal allocation of energy resources. *Journal of Industrial Management* Perspective, 1(3), p. 43(In Persion).

10. Li, W. (2014). Risk assessment of power systems: models, methods, and applications. John Wiley & Sons.

11. Mak, W. K., Morton, D. P., & Wood, R. K. (1999). Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs. *Operations Research Letters, 24(1),* 47-56.

12. Nasiri, F., & Huang, G. (2007). Capacity Planning for Electricity Generation with Energy-Environmental Targets.

13. Nemirovski, A., Shapiro, A. (2006). Convex approximations of chance constrained programs. SIAM Journal on Optimization, 17(4), 969-996.

14. Pagnoncelli, B. K., Ahmed, S., & Shapiro, A. (2009). Sample average approximation method for chance constrained programming: theory and applications. *Journal of optimization theory and applications, 142(2),* 399-416.

15. Rodríguez, A. D. (2009). A multi-objective planning framework for analysing the integration of distributed energy resources (Doctoral dissertation, University of Strathclyde Glasgow).

16. Roh, J. H., Shahidehpour, M., & Fu, Y. (2007). Market-based coordination of transmission and generation capacity planning. Power Systems, *IEEE Transactions on, 22(4),* 1406-1419.

www.SID.ir

Archive of SID

17.Sarbandi, S. (1389), Construction planning of power plant in the period 1388- 1398 using dynamic programming

18. Shapiro, A. (2000). Stochastic programming by Monte Carlo simulation methods. School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0205, USA

19. Sirikum, J., Techanitisawad, A., & Kachitvichyanukul, V. (2007). A new efficient GA-benders' decomposition method: For power generation expansion planning with emission controls. Power Systems. *IEEE Transactions on, 22(3),* 1092-1100.

20. Taghipour Rezvan, A. R., Seifi, A. (1388). Planning for expand power generation capacity in Iran by stochastic programming. *Journal of Mechanical Engineering Technology, 1,* 87-97 (In Persion).

21. Taghi Zadeh, M. (1393). Designing nonlinear model for power plant capacity expantion with the object of CO2 control, PhD thesis production and operations management, Tehran University (In Persion).

22. Tekiner, H., Coit, D.W., & Felder, F. A. (2010). Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. *Electric Power Systems Research, 80(12),* 1394-1405.

23. Tzeng, G. H., Shiau, T. A., & Teng, J. Y. (1994). Multi objective decision-making approach to energy supply mix decisions in Taiwan. *Energy Sources, 16(3),* 301-316.

24. Vajda, S. (1972) Probabilistic Programming, Academic Press, New York.

25. Ventosa, M., Denis, R., & Redondo, C. (2002). Expansion planning in electricity markets. Two different approaches. In Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference (PSCC), Seville. 24-28.

26. Xufeng Xu, Joydeep Mitra,(2011), Transmission System Planning Based On Uncertainty theory, 17th power system computation conference, 22-26.

27. Yang, N., & Wen, F. (2005). A chance constrained programming approach to transmission system expansion planning. *Electric Power Systems Research, 75(2),* 171-177.

28. Zendedel, M., Bozorgi amiri, A. , Omrani, H., (1393), Location model for blood donation with impairment emplacement, Journal of Industrial Engineering, Volume 48, tenth international conference on Industrial engineering, page 33-43

29. Zhu, J., & Chow, M. Y. (1997). A review of emerging techniques on generation expansion planning. Power Systems. *IEEE Transactions on, 12(4),* 1722-1728.

www.SID.ir