



پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری

دوره ۶، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صص ۷۴-۵۵

نوع مقاله: پژوهشی

ارائه یک مدل دوسطحی برای برنامه‌ریزی تعهد واحدهای نیروگاهی در ایران با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

حمیدرضا حداد^۱، محمدرضا تقی زاده یزدی^{۲*}، مصطفی زندیه^۳، جلیل حیدری دهنوی^۴،
سید حسین رضوی حاجی آقا^۵

۱-دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲-دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳-دانشیار، گروه مدیریت صنایع، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴-دانشیار، مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵-استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

چکیده

مدیریت بهینه تولید و توزیع انرژی الکتریکی در زمره مهم‌ترین مسائل کشورهای در حال توسعه و زمینه‌ساز ایجاد بستری جهت توسعه پایدار کشورها می‌باشد. به دلیل وجود محدودیت‌ها و تکنولوژی‌های گوناگون و همچنین وجود عوامل متعدد در فرآیند تولید و توزیع، در نظر گرفتن کلیه عوامل تحت یک بستر در قالب یک مدل یک سطحی، مسئله را از شرایط واقعی دور می‌سازد. بدین منظور در این مقاله به ارائه یک مدل دو سطحی پرداخته شده است که در آن سطح رهبر، شرکت مدیریت شبکه برق ایران (به‌عنوان متولی برنامه‌ریزی تولید و توزیع در سطح دولتی) و سطح پیرو مجموعه‌ای از بهره‌برداران نیروگاه‌ها به‌منظور تولید برق می‌باشند. تابع هدف سطح رهبر شامل کمینه نمودن هزینه‌های توزیع برق تولید شده و انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین تابع هدف سطح پیرو شامل کمینه کردن هزینه‌های سوخت مصرفی و راه‌اندازی واحدهای نیروگاهی می‌باشد. با توجه به NP-Hard بودن مدل ارائه شده، برای حل آن روش فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید به‌کار رفته است. نتایج این پژوهش دارای کاربرد وسیع برای مدیریت بهتر شبکه برق ایران خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی دو سطحی، تولید و توزیع برق، شرکت مدیریت شبکه برق ایران



۱- مقدمه

در بین انواع مختلف انرژی، انرژی الکتریکی به‌طور ویژه‌ای با زندگی بشر عجین شده است و بدون آن حتی انجام فعالیت‌های ساده روزمره نیز با مشکل مواجه می‌گردد. در این میان، مدیریت تولید، توزیع و مصرف انرژی الکتریکی اهمیت بسیار بالایی دارد. به این صورت که با توجه به میزان برق روزانه لازم، به یک برنامه دقیق به‌منظور تولید برق با کمترین هزینه، کمترین آلاینده‌گی محیطی و در چارچوب محدودیت‌های فنی و محیطی موجود نیاز است. در بحث مدل‌سازی این حوزه روش‌های متفاوتی اعم از مدل‌سازی قطعی، احتمالی، چندهدفه و ... لحاظ شده است. با این وجود تقریباً تمامی مطالعات یک رویه واحد و یکپارچه جهت برنامه‌ریزی را لحاظ نموده‌اند. به این مفهوم که کل فرآیند تصمیم‌گیری تحت یک مدیریت یکپارچه در نظر گرفته شده و تضاد منافع وجود ندارد. در صورتی که در شرایط واقعی این موضوع برقرار نیست. برای نمونه، فرآیند تولید برق با مجموعه‌ای از بهره‌برداران نیروگاه (شرکت‌های خصوصی) بوده و وظیفه انتقال برق از طریق دولت و با راهبری وزارت نیرو، اجرا خواهد گردید. در این خصوص، مدل‌سازی مسئله با در نظر گرفتن شرایط کلاسیک و در قالب یک سیر برنامه‌ریزی یک سطحی، منطقی و کارا نمی‌باشد. برای حل این موضوع در این پژوهش، مسئله تأمین و توزیع برق موردنیاز به‌صورت یک مدل دوسطحی شامل وزارت نیرو (به عنوان رهبر) و مجموعه‌ای از بهره‌برداران (به عنوان پیرو) مدل‌سازی خواهد گردید. سطح بهره‌بردار قابلیت به‌کارگیری مجموعه‌ای از نیروگاه‌های تولید برق (شامل برق آبی، سوخت فسیلی، گازی و ...) را داراست. ضرورت انجام این امر، این موضوع است که در شرایط واقعی، بیش از یک بازیگر با اهداف متفاوت و گاه متناقض، دخالت دارند و لذا مدل‌سازی تک سطحی مسئله را از شرایط واقعی دور می‌سازد. روال مسئله به این صورت است که وزارت نیرو هر روز در قالب برنامه‌های یک ساعته، تقاضای برق را به بهره‌بردار، ابلاغ نموده و سپس بهره‌بردار با توجه به نیاز اعلامی از مجموعه نیروگاه‌های خود اقدام به تولید برق نموده و با توجه به مکان فیزیکی تولید، برق تولید شده از یکی از مسیرهای شبکه انتقال برق به منطقه تقاضا تحویل داده می‌شود. بر این اساس، وزارت نیرو در قالب رهبر مدل، به‌صورت روزانه تقاضای برق را به بهره‌بردار ابلاغ می‌کند، پس بر روی عملکرد بهره‌بردار تأثیرگذار است. از سوی دیگر، بهره‌بردار این آزادی عمل را داراست که با ترکیب دلخواه از مجموعه نیروگاهی (اعم از گازی، بخاری، برق آبی و ...) برق موردنیاز را با کمترین هزینه تولید کند. در صورتی که با هر ترکیب انتخابی هزینه متفاوتی به وزارت نیرو از جهت تولید گازهای گلخانه‌ای و توزیع



برق سراسری تحمیل می‌گردد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

با گسترش روز افزون تکنولوژی و رشد جوامع و صنایع، به‌کارگیری منابع انرژی پایدار و پاک، امری لازم و غیرقابل اجتناب می‌باشد. در این راستا، دو موضوع کلیدی باید مورد توجه قرار گیرد. موضوع اول، لزوم استفاده از منبعی دائمی و پایدار که تولید انرژی را با کمترین هزینه و به‌صورت یک سیکل دائمی فراهم می‌آورد و موضوع دوم، مربوط به مسائل زیست‌محیطی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. در مسئله برنامه‌ریزی تعهدی واحدهای نیروگاهی^۱، مجموعه‌ای از واحدهای نیروگاهی در دسترس است و لازم است مشخص گردد در هر بازه زمانی، کدام واحد نیروگاهی روشن و کدام خاموش باشد؛ به‌نحوی که بیشترین برق ممکن تولید گردیده و کمترین هزینه‌های تولید و زیست‌محیطی ایجاد گردد. مسئله برنامه‌ریزی تعهدی، با توجه به کاربرد فراگیر در حوزه تولید و توزیع انرژی الکتریکی، دارای پیشینه موضوع بسیار غنی بوده و در دو حوزه مدل‌سازی کلاسیک (صرفاً بررسی مسئله از منظر تئوری) و مدل‌سازی با رویکرد مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. در حوزه مطالعه موردی با رویکرد عملی، انواع نیروگاه‌ها شامل گازی، گرمایی، آبی، بادی، تلمبه ذخیره‌ای و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در مسائل دسته اول، یک مدل ریاضی ارائه گردیده و سعی شده است به کمک روش‌های حل مختلف، نسبت به یافتن جواب مدل ارائه شده اقدام گردد. در این میان با توجه به این نکته که مسئله، از نوع NP-hard است، روش‌های معمول بهینه‌سازی اغلب کارایی مناسبی ندارند و از این رو، از روش‌های هیوریستیک و یا متاهوریستیک به‌کار می‌رود. در مقالات دسته دوم، یک مشکل و یا ناکارآمدی در سیستم واقعی مطرح شده و با ارائه مدل و حل آن، پژوهشگر به دنبال بهبود در شرایط واقعی و ایجاد کارایی و اثربخشی بهتر در سیستم خواهد بود. ایی هونگ و همکاران^۲ [۱] در مقاله خود، به بررسی و مطالعه الگوی تقاضای برق سراسری در کشور تایوان پرداختند. بر پایه این پژوهش، سیاست‌های مربوط به انرژی در آن کشور از سال ۲۰۰۵ دچار تغییر شده و این تغییرات در میان مدت الگوی مصرف را تغییر داده است. در نتیجه لازم است تا این تغییرات، تدبیرات خود را روی مسئله روزانه برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی در نظر بگیرد. در راستای این تغییرات، دو هدف مهم لحاظ گردیده که یکی کاهش گازهای گلخانه‌ای



مربوط به پیمان کیوتو و دیگری افزایش سهم استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر است. نویسندگان به مدل‌سازی شرایط مسئله و حل آن با نرم‌افزار CPLEX پرداختند. دادا و همکاران^۲ [۲] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی مختلط اعداد صحیح با در نظر گرفتن نیروگاه‌های برق آبی پرداختند. هدف مقاله پیشینه نمودن کل انرژی تولیدی برای همه توربین‌ها بود. نعمتی و همکاران^۳ [۳] در مقاله خود به بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی تعهدی واحدهای نیروگاهی و توزیع اقتصادی بار در شبکه‌های کوچک پرداختند. فرضیه اصلی آن‌ها با توجه به بازار برق موجود در ایران، استفاده از رویکرد Day Ahead بود که بر پایه تقاضایی که برای مصرف تخمین زده می‌شود، برای روز بعد برنامه‌ریزی تولید و توزیع برق صورت می‌پذیرد. آن‌ها ضمن ارائه یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح، برای حل از روش الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. همچنین در مدل ارائه شده، تأثیر باتری به‌عنوان وسیله‌ای جهت ذخیره‌سازی انرژی لحاظ شده بود. آناند و همکاران^۴ [۴] در مقاله خود به بررسی و مدل‌سازی مسئله کلاسیک برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی پرداخته و جهت حل از یک روش هیبریدی فراابتکاری شامل دو روش BSA و CSO را به‌کار بردند. بر پایه پژوهش ایشان، به‌طور کلی، با رشد سریع تکنولوژی‌های صنعتی و افزایش تقاضا برای حمل‌ونقل، وسایل برقی و سایر موارد مشابه مدیریت تولید برق جایگاه ویژه‌تری پیدا خواهد کرد و این موضوع تولید و توزیع برق را با چالش جدی مواجه خواهد نمود. بر پایه مفروضات پژوهش ایشان، اهم تصمیماتی که در مسائل برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی بررسی می‌شوند، عبارت‌اند از:

- برنامه‌ریزی تولید بار
- محدودیت بالانس نیروگاهی در تولید بار
- تعیین واحدی که در هر ساعت به تولید بپردازد
- محدودیت کمینه و بیشینه توان تولیدی
- محدودیت روشن و خاموش نمودن تدریجی

تریودی^۵ و همکاران [۶] در مقاله خود به ارائه یک روش فراابتکاری هیبریدی مبتنی بر روش الگوریتم ژنتیک و روش تحول دیفرانسیلی (Differential Evolution) برای حل مسئله تعهد واحدهای نیروگاهی در ابعاد بزرگ مسئله پرداختند. در مدل ارائه شده، تعیین و بهینه‌سازی متغیرهای باینری به عهده الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی متغیرهای پیوسته با روش دیگر صورت می‌پذیرد. به‌منظور حصول اطمینان از کارایی روش ارائه شده، چهار نمونه داده



اطلاعاتی از پیشینه موضوع مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است. سالوینی^۷ و موناچیا [۷] در مقاله خود به تبیین این موضوع پرداختند که ماهیت عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر تولید انرژی، باعث بروز پیچیدگی در حوزه تأمین و توازن انرژی الکتریکی می‌گردد. یکی از راهکارها جهت رفع چنین چالش‌هایی، به‌کارگیری رویکردهای سیستم‌های ذخیره انرژی است که البته به‌کارگیری آن هزینه بسیار بالایی در پی خواهد داشت. روک و همکاران^۸ [۸] در مقاله خود به بررسی مسائل زیست‌محیطی پرداختند و نشان دادند این موضوع تأثیر غیرقابل اجتنابی بر عملکرد واحدهای نیروگاهی خواهد داشت. مسائل سنتی و قدیمی برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی، به دلیل عدم در نظر گرفتن چنین فاکتورهایی، در دنیای واقعی بسیار ناکافی و نابالغ می‌باشند. آن‌ها در مقاله خود یک مسئله چندهدفه را در نظر گرفته و به‌منظور حل آن از یک روش فراابتکاری مبتنی بر جستجوی تصادفی و روش الگوریتم ژنتیک بهره بردند. اساس توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی با در نظر گرفتن فاکتور محیط زیست را می‌توان پیمان کیوتو و بعد از آن توافقنامه پاریس به‌منظور جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای لحاظ نمود. یانگ و همکاران^۹ [۹] نشان دادند مسئله برنامه‌ریزی تعهدی نیروگاهی، به‌صورت یک مسئله برنامه‌ریزی اعداد صحیح مختلط نمایی قابل ارائه است که در دسته مسائل NP-Hard قرار می‌گیرد. از این رو، حل آن‌ها در ابعاد بزرگ پیچیده است. لبوستا و همکاران^{۱۰} [۱۰] در راستای تدقیق هر چه بیشتر اطلاعات ورودی مسئله برنامه‌ریزی تعهد واحدهای نیروگاهی خصوصاً تقاضا، به استفاده از مدل‌های رگرسیون برای برق دوره‌های کوتاه‌مدت در زمان پیک برق پرداختند. به‌منظور بررسی کارایی و اثربخشی مدل ارائه شده، داده‌های سال ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۲ کشور آفریقای جنوبی مورد بررسی قرار گرفت. دال سانتو و سیموئز کاستا^{۱۱} [۱۱] برخلاف اکثر مطالعات که تنها با یک نوع نیروگاه (اعم از بادی، خورشیدی، گرمایی و ...) مسئله را مدل کرده بودند، چندین نوع نیروگاه جهت تولید برق به‌صورت همزمان در نظر گرفتند. این موضوع، گرچه در بحث تولید، قابلیت اطمینان سیستم و توان تولیدی کل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، ولی نیاز به برنامه‌ریزی دقیقی به‌منظور جلوگیری از اتلاف و تداخل در یک زمان مشخص دارد. پژوهش ترکیبی دیگر در این زمینه مربوط به آوارز و همکاران^{۱۲} [۱۲] می‌باشد. آن‌ها در مقاله خود به استفاده از هم‌زمان نیروگاه‌های گرمایی و تلمبه ذخیره‌ای آبی پرداختند. نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای، با داشتن دو مخزن سد، نقش مهمی در تنظیم فرکانس برق تولیدی در زمان پیک و غیرپیک ایفا می‌نمایند.



مقالات متعددی موضوع مدیریت تولید انرژی الکتریکی در ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند. انوری و همکاران^{۱۳} [۱۳] بحث شبکه لجستیک برق را به‌عنوان یک عامل مهم در مدیریت تولید برق لحاظ نمودند و با بررسی مطالعه موردی در شرکت برق شیراز، به ارائه یک سیاست‌گذاری استراتژیک استوار پرداختند. پژوهش دیگر مربوط به لطفی دمیچی^{۱۴} و همکاران [۱۴] است که به کمک مدل کارت امتیازی متوازن، به ارزیابی راهبردهای کلان وزارت نیرو به‌منظور مدیریت مؤثر تولید برق پرداختند. نیوشا و همکاران^{۱۵} [۱۵] به بررسی تولید برق با سوخت پاک پرداختند و نشان دادند طی سالیان آینده نیاز به یک عزم جدی از دولت به‌منظور کاهش به‌کارگیری انرژی‌های سوخت فسیلی خواهد بود. در غیر این‌صورت در بحث آلاینده‌های زیست‌محیطی کشور با چالش روبه‌رو خواهد بود. همچنین در همین زمینه مقاله مرزبان و محمدی [۱۶] قابل‌عنوان است که به کمک علم آینده‌پژوهی، سناریوهای مختلف مدیریت برق در کشور را مورد نقد و بررسی قرار دادند. با توجه به مفروضات ارائه شده، بررسی مسئله تعهد نیروگاهی در پیشینه موضوع تاکنون در قالب یک مسئله دو سطحی رهبر/پیرو مورد بررسی قرار نگرفته است. مهمترین ویژگی‌های این مقاله که آن را از سایر پژوهش‌های موجود در پیشینه موضوع متمایز می‌سازد، به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- به دلیل ماهیت خاص بازار برق و لزوم توجه هم‌زمان به همه بازیگران تولید و توزیع برق، پژوهش حاضر به دنبال ایجاد یک نگرش جدید در قالب مدل دوسطحی رهبر/پیرو می‌باشد. این رویکرد به عنوان اولین پژوهش جهت مسئله تولید و توزیع انرژی الکتریکی با رویکرد مذکور قابل طرح است که با الزامات و استانداردهای کشور ایران، هماهنگ شده است.
- اکثر مقالات پیشینه موضوع، بحث به‌کارگیری انرژی بادی را مطرح نموده‌اند، در صورتی که با توجه به سیاست‌های متخذه در کشور ایران، تنها نیروگاه‌هایی در شبکه توزیع دخالت داده می‌شوند که ظرفیت بالای صد مگاوات دارند و از این رو، نیروگاه‌های بادی در پژوهش فعلی نقشی نخواهد داشت.
- دولت‌ها در استفاده از سوخت‌های فسیلی که باعث گرم شدن تدریجی کره زمین می‌شود، محدودیت دارند. برای همین لازم است بحث انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شود که در مقالات کمی در این حوزه لحاظ شده است.
- مقالات بسیار محدودی، بحث هزینه‌های تعمیرات و قابلیت اطمینان را لحاظ نمودند، در صورتی که این موضوع، نقش انکار ناپذیری در ایجاد پایداری در شبکه‌های تولید برق و



جلوگیری از خاموشی‌های احتمالی خواهند داشت.

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- روش‌شناسی حل

با توجه به مفروضاتی که در قسمت قبل بیان شد، مسئله برنامه‌ریزی تعهد نیروگاهی در حالت تک سطحی نیز NP-Hard است. از این رو، با توسعه مسئله به صورت یک مسئله دو سطحی رهبر/ پیرو نیز با یک مسئله NP-Hard روبه‌رو خواهیم بود. در نتیجه حل مدل ارائه شده با روش‌های معمول تحقیق در عملیات ممکن نبوده و لازم است روش‌های فراابتکاری به کار رود. روش‌های فراابتکاری قادر هستند در مدت زمان مناسبی به جواب نزدیک به بهینه دست یابند. هر چند تضمین بهینگی جواب آن‌ها ممکن نخواهد بود.

روش شبیه‌سازی تبرید یکی از روش‌های مشهور فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی است که ایده اصلی آن مبتنی بر سرد شدن تدریجی مواد می‌باشد. الگوریتم این روش بر پایه فرآیند سرد شدن تدریجی مواد به وسیله کاهش دمای سیستم (ماده) تا زمانی که به یک حالت ثابت منجمد تبدیل شود، شبیه‌سازی شده است. این روش با ایجاد و ارزیابی جواب‌های متوالی به صورت گام‌به‌گام به سمت جواب بهینه حرکت می‌کند. برای حرکت، یک همسایگی جدید به صورت تصادفی ایجاد شده و جواب آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که نقطه جدید، نقطه بهتری باشد (تابع هزینه را کاهش دهد)، به‌عنوان نقطه جدید در فضای جستجو انتخاب می‌شود و اگر بدتر باشد (تابع هزینه را افزایش دهد)، براساس یک تابع احتمالی باز هم امکان انتخاب آن وجود دارد.

به‌منظور حل مسئله ارائه شده به کمک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، در هر بازه زمانی t یک رشته تصادفی مانند شکل زیر تشکیل می‌گردد:

شکل ۱. رشته ایجاد شده توسط روش شبیه‌سازی تبرید

۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰
			۰	۰	۱	۰	۰	۰
			۰	۱	۰	۰	۰	۱
			۰	۰	۱	۰	۰	۰



قسمت اول رشته ایجاد شده مربوط به تعیین روشن یا خاموش بودن هر واحد در زمان مشخص می‌باشد. برای نمونه بر پایه شکل فوق، در این بازه زمانی، واحد اول و سوم روشن و واحد دوم خاموش هستند. قسمت دوم رشته مربوط به تخصیص برق تولید شده به مناطق مختلف هست که بر این اساس برای نمونه، برق منطقه اول از خط یک، برق منطقه دوم از خط انتقال سه، برق منطقه سوم از خط انتقال دو و ... تولید می‌گردد.

این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که الگوریتم در آن دما به تعادل برسد. شرط تعادل زمانی تحقق می‌یابد که مقدار حاصل جمع اختلاف تابع هدف در تعداد تکرارهای متوالی مشخص بسیار ناچیز باشد. با تحقق یافتن این شرط، دمای سیستم یک واحد کاهش می‌یابد و این فرآیند تا تحقق شرط تعادل برای دمای جدید تکرار می‌گردد. شرط پایان الگوریتم نیز رسیدن به دمای صفر در نظر گرفته می‌شود.

دلیل به‌کارگیری روش شبیه‌سازی تیرید حساسیت بسیار کم آن نسبت به رشته اولیه ایجاد شده در آن می‌باشد که این موضوع کمک می‌کند تا روش ارائه شده تا حد زیادی از ارائه جواب‌های بهینه محلی به‌عنوان جواب بهینه نهایی در امان باشد.

۲-۳- معیار ارزیابی جواب‌های الگوریتم ارائه شده

به منظور ارزیابی جواب‌های الگوریتم ارائه شده، در این قسمت به دو صورت به بررسی حل مسئله پرداخته می‌شود. یکی برای نمونه‌های با اندازه کوچک و در حالت دوم برای نمونه‌های متوسط و بزرگ.

برای حل مسئله در ابعاد کوچک، حل مدل پیرو به‌صورت بهینه امکان‌پذیر بوده و برای حل آن از مدل‌سازی در نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو^{۱۶} استفاده می‌گردد. سپس خروجی‌های مدل پیرو به‌صورت پارامتر ورودی به مدل رهبر وارد شده و مدل رهبر به کمک روش فراابتکاری حل می‌گردد. برای ابعاد متوسط و بزرگ مسئله، امکان حل مدل پیرو به کمک نرم‌افزارهای بهینه‌سازی فراهم نیست. لذا مدل پیرو نیز به کمک روش‌های فراابتکاری حل خواهد شد. معیارهای مورد بررسی به‌منظور ارزیابی نتایج الگوریتم ارائه شده به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- درصد خطای نسبی که هر چه دارای مقدار کمتری باشد، الگوریتم عملکرد بهتری داراست.

- مدت زمان حل



- معیار تعداد که عبارت است از تنوع جواب‌هایی که الگوریتم در ۱۰۰ بار تکرار ارائه می‌دهد. هر چه این مقدار بزرگتر باشد، بیانگر این نکته است که الگوریتم درصد بیشتری از فضای حل را جستجو کرده و لذا عملکرد مناسبتری داراست.
- معیار فاصله: اختلاف جبری بین کمترین و بیشترین مقدار بهینه در ۱۰۰ بار تکرار الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. هر چه این معیار مقدار کمتری داشته باشد، الگوریتم کیفیت جواب بهتری داراست.

۴- بیان مسئله و مدل‌سازی

- بر پایه مطالعات انجام شده، نحوه کارکرد سیستم تولید و توزیع برق در ایران به صورت روزانه^{۱۷} اتفاق می‌افتد. به این مفهوم که پیش‌بینی تقاضا، اعلام ظرفیت پیشنهادی نیروگاه‌ها و همین طور قیمت آن‌ها در هر روز به سیستم مدیریت شبکه برق ایران اعلام شده و بر پایه این اطلاعات، مدیریت و برنامه‌ریزی تولید برای روز بعدی انجام می‌گردد.
- در این میان یک مدل دو سطحی قابل ارائه است که در آن سطح اول (رهبر)، شرکت دولتی مدیریت شبکه برق ایران و سطح دوم (پیرو)، بهره‌بردار واحدهای نیروگاهی می‌باشد. بر این اساس، این دو سطح به صورت زیر با هم تعامل دارند:
- سطح رهبر (شرکت مدیریت شبکه برق ایران) از تصمیمات پیرو (بهره‌بردار) تأثیر می‌پذیرد و باید آمادگی عکس‌العمل نسبت به هر تصمیم آن را داشته باشد.
 - سطح پیرو، کاملاً متأثر از تصمیمات رهبر می‌باشد.
- برای شرکت مدیریت شبکه برق ایران اهمیت دارد که بهره‌بردار با به‌کارگیری چه ترکیبی از نیروگاه‌ها برق مورد نیاز را تأمین می‌کند؛ زیرا ترکیب نیروگاه‌ها بر روی موارد زیر تأثیر دارد:
- هزینه‌های توزیع (مربوط به شرکت مدیریت شبکه برق)
 - انتشار گازهای گلخانه‌ای (مسئولیت انتشار بر عهده شرکت مدیریت شبکه برق)
 - مفروضات مدل ریاضی:
 - برق تولیدی نیروگاه‌هایی وارد شبکه تولید برق سراسری می‌شوند که ظرفیت آن نیروگاه‌ها حداقل ۱۰۰ مگاوات باشد.
 - تقاضای برق در هر روز و برای هر ساعت، بر پایه پیش‌بینی شرکت مدیریت شبکه برق ایران، به واحدهای بهره‌بردار ابلاغ می‌شود و واحدهای بهره‌بردار موظف هستند که بر



پایه تقاضای ابلاغی، نسبت به تولید برق، اقدام نمایند.
 - مقادیر تقاضا، توسط شرکت مدیریت شبکه برق ایران تخمین زده می‌شود و در مدل مورد بررسی، به‌عنوان پارامترهای ورودی لحاظ می‌گردند.

جدول ۱. مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

مجموعه‌ها			
مناطق تحت پوشش برق تولید شده	$j=1,2,\dots, M$	افق‌های زمانی	$t=1,2,\dots, T$
انواع گازهای آلاینده	$k=1,2,\dots, K$	واحدهای نیروگاهی	$i=1,2,\dots, N$
پارامترها			
هزینه نگهداری واحد i	com_i	تقاضای برق در بازه زمانی t	d_t
ثابت‌های محاسبه هزینه سوخت برای واحد i	a_i, b_i, c_i	حداکثر توان تولیدی واحد i	p_i^{max}
قابلیت اطمینان واحد i در زمان t	$re_{i,t}$	حداقل توان تولیدی واحد i	p_i^{min}
هزینه انتقال از واحد i به محل j	co_{ij}	مقدار بار مازاد تولید شده در زمان t	r_t
هزینه راه‌اندازی گرم واحد i	HSC_i	حداقل تعداد واحد زمانی که واحد i باید روشن باشد	mu_i
هزینه راه‌اندازی سرد واحد i	CSC_i	حداقل تعداد واحد زمانی که واحد i باید خاموش باشد	md_i
هزینه راه‌اندازی واحد i در زمان t'	$Sc_{it'}$	نرخ تصاعد گاز آلاینده نوع k در نیروگاه i	β_{ik}
		حداقل قابلیت اطمینان مورد انتظار	re_{min}
متغیرهای تصمیم			
مدت زمانی که به صورت پیوسته، واحد i خاموش است	X_i^{off}	توان تولید شده واحد i در زمان t	p_{it}
اگر واحد i در زمان t فعال باشد مقدار یک و در غیراینصورت مقدار صفر را داراست	$u_{i,t}$	زمانی که واحد i شروع به سرد شدن می‌کند	CST_i



اگر برق منطقه z در واحد زمانی t توسط واحد i تأمین گردد مقدار q_{ijt} یک و در غیر اینصورت مقدار صفر را داراست.	q_{ijt}	مدت زمانی که به صورت پیوسته، واحد i روشن است	X_i^{on}
---	-----------	--	------------

مدل ریاضی به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

$$\min \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T co_{ij} q_{ijt} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \beta_{ik} p_{it} \right) \quad 1$$

s.t:

$$\sum_{i=1}^N q_{ijt} = 1$$

۲ به ازای همه مقادیر z
به ازای همه مقادیر t

$$\sum_{t=1}^T \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - re_{it} \cdot u_{it}) \right) \geq re_{min} \quad 3$$

$$q_{ijt} \leq u_{it}$$

۴ به ازای همه مقادیر i
به ازای همه مقادیر z
به ازای همه مقادیر t

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (u_{it} F_{it} + Sc_{it}) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N com_i p_{it} \quad 5$$

s.t:

$$\sum_{i=1}^N u_{it} p_{it} \geq d_t$$

۶ به ازای همه مقادیر t

$$\sum_{i=1}^N u_{it} p_i^{max} - d_t \geq r_t$$

۷ به ازای همه مقادیر t

$$u_{it} p_i^{min} \leq p_{it} \leq u_{it} p_i^{max}$$

۸ به ازای همه مقادیر i
به ازای همه مقادیر t

$$mu_i \leq X_i^{on}$$

۹ به ازای همه مقادیر i

$$md_i \leq X_i^{off}$$

۱۰ به ازای همه مقادیر i

$$F_{it} = a_i (p_{it})^\gamma + b_i (p_{it}) + c_i$$

۱۱ به ازای همه مقادیر i
به ازای همه مقادیر t



$$sc_{it} = \begin{cases} HSC_i & \text{if } md_i \leq X_i^{off} \leq md_i + CST_i & \text{به ازای همه مقادیر } i \\ CSC_i & \text{if } X_i^{off} > md_i + CST_i & \text{به ازای همه مقادیر } t \end{cases} \quad ۱۲$$

معادله ۱ نشان دهنده تابع هدف مسئله در سطح رهبر است که عبارت است از کمینه نمودن کل هزینه انتقال برق تولید شده و همچنین هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای. محدودیت ۲ نشان می‌دهد که برق مورد نیاز هر منطقه در هر واحد زمانی خاص، توسط یک واحد نیروگاهی تأمین خواهد گردید. محدوده ۳ بیانگر قابلیت اطمینان کل سیستم می‌باشد که همیشه باید از مقدار کمینه مورد نظر بالاتر باشد. محدودیت ۴ بیان می‌کند وقتی قرار باشد برق یک منطقه، توسط یک واحد نیروگاهی خاص تأمین شود، لازم است که در آن بازه زمانی آن واحد روشن باشد. محدودیت ۵ تابع هدف مسئله در سطح پیرو را بیان می‌کند که به دنبال کاهش هزینه تولید، هزینه راه‌اندازی و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات است. محدودیت‌های ۶ و ۷ مربوط به تأمین تقاضای برق و همچنین تولید برق مازاد، به‌منظور کاهش احتمال مواجهه با خاموشی است. ذکر این نکته لازم است که در شرایط واقعی، برق مازادی تولید نمی‌شود ولی بر پایه برنامه‌ریزی صورت گرفته، همیشه این آمادگی وجود دارد که در صورت نیاز، تولید برق مازاد به‌صورت آنی در برنامه تولید لحاظ گردد. محدودیت ۸ نشان می‌دهد که توان تولیدی هر واحد باید بین مقدار حداقل و حداکثر ظرفیت اسمی نیروگاه باشد. محدودیت ۹ و ۱۰ نشان دهنده برنامه خاموش کردن و راه‌اندازی مجدد نیروگاه‌ها می‌باشد. در این خصوص باید توجه گردد در تمامی نیروگاه‌ها (خصوصاً نیروگاه‌های گرمایی) وقتی واحد از مدار تولید خارج شود، سریعاً و بدون وقفه نمی‌توان آن را به مدار بازگرداند و این امر نیاز به یک وقفه زمانی دارد. از سوی دیگر هر چه این وقفه بیشتر باشد، هزینه راه‌اندازی مجدد آن افزایش خواهد یافت. محدودیت ۱۱ نشان دهنده نحوه محاسبه هزینه سوخت نیروگاه‌ها را نشان می‌دهد که تابعی از توان تولیدی بوده و در نهایت محدودیت ۱۲ بیان‌کننده نحوه محاسبه هزینه راه‌اندازی هر واحد خواهد بود.

۵- تحلیل نتایج حل و یافته‌های پژوهش

فرآیند کنوئوسی این پژوهش به کمک نرم‌افزار MATLAB انجام شده و بر روی سیستمی با پردازشگر Core I ۷ و حافظه ۴ گیگابایت اجرا شده است. همچنین جهت تولید نمونه جهت حل مسئله، تا حد امکان از داده‌های واقعی بدست آمده از شرکت مدیریت شبکه برق ایران استفاده شده است. (مانند تقاضای روزانه، مشخصات فنی واحدهای نیروگاهی، ضرایب هزینه‌های سوخت

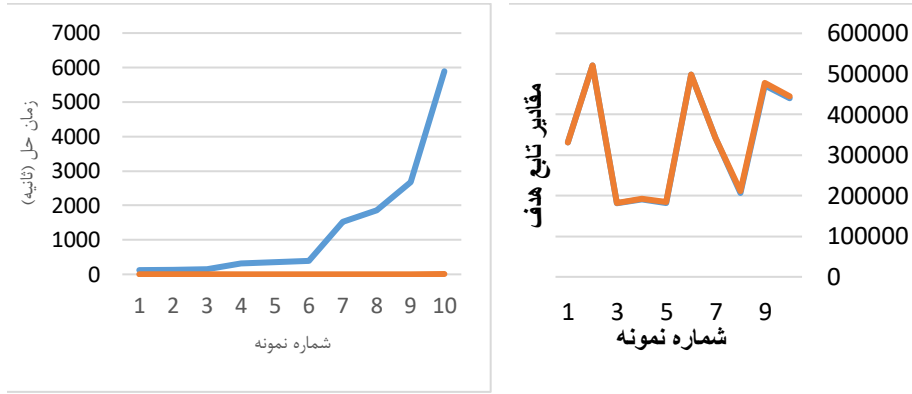


و ... ولی به دلیل نبود اعداد دقیق برای مقادیر قابلیت اطمینان، این اعداد به صورت تصادفی و در بازه ۰.۶ تا ۰.۹ به صورت تصادفی تولید شده‌اند. برای حل ابعاد کوچک مسئله، این امکان وجود دارد که مسئله به کمک نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو مدل شده و سپس جواب بهینه قطعی بدست آمده است. بر این اساس نتایج حل مدل برای نمونه‌های کوچک در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۲. مقایسه مقادیر تابع هدف و زمان حل

درصد خطای نسبی	الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (صد بار تکرار)		نرم‌افزار بهینه‌سازی لینگو		دوره زمانی (ساعت)، تعداد واحد نیروگاهی، تعداد منطقه برق رسانی	ردیف
	متوسط مدت زمان حل (ثانیه)	متوسط مقدار تابع هدف	مدت زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف		
۰	۳	۳۳۱۹۴۷	۱۲۳	۳۳۱۹۴۷	۲*۵*۶	۱
۰	۳	۵۲۰۹۷۷	۱۲۶	۵۲۰۹۷۷	۴*۵*۶	۲
۰	۳	۱۸۲۰۳۸	۱۵۳	۱۸۲۰۳۸	۸*۵*۶	۳
۰.۰۱	۵	۱۹۲۱۲۱	۳۲۱	۱۹۰۱۱۶	۲*۱۰*۶	۴
۰.۰۱	۵	۱۸۴۵۲۳	۳۵۶	۱۸۱۷۹۷	۴*۱۰*۶	۵
۰	۶	۴۹۷۷۹۸	۳۸۲	۴۹۷۷۹۸	۸*۱۰*۶	۶
۰	۸	۳۴۱۶۰۸	۱۵۳۲	۳۴۱۶۰۸	۲*۵*۱۲	۷
۰.۰۱	۸	۲۱۰۵۹۲	۱۸۶۲	۲۰۷۲۰۵	۴*۵*۱۲	۸
۰.۰۱	۹	۴۷۸۲۶۳	۲۶۸۱	۴۷۲۰۶۴	۸*۵*۱۲	۹
۰.۰۱	۱۰	۴۴۵۳۲۵	۵۸۹۲	۴۴۰۴۵۷	۲*۱۰*۱۲	۱۰
--	۱۰	۲۹۹۰۲۱	>۱۰۸۰۰	--	۴*۱۰*۱۲	۱۱
--	۱۰	۱۴۳۴۴۲	>۱۰۸۰۰	--	۸*۱۰*۱۲	۱۲

همان طوری که ملاحظه می‌گردد، امکان حل مدل برای نمونه شماره ۱۱ و ۱۲ فراهم نشده است. از سوی دیگر، روش حل ارائه شده به خوبی در پیدا کردن جواب مناسب (و بعضاً بهینه) عمل نموده است و در مواردی که به جواب بهینه نرسیده است، جواب ارائه شده دارای خطای بسیار پایینی است. از سوی دیگر، زمان حل در روش هیبریدی ارائه شده بسیار کوتاه‌تر از نرم‌افزار لینگو می‌باشد. در نمودارهای زیر کیفیت جواب روش ارائه شده و زمان حل مورد بررسی قرار می‌گیرد:



شکل ۳. مقایسه مقادیر زمان‌های حل

شکل ۲. مقایسه مقادیر تابع هدف مسئله

همان طوری که ملاحظه می‌گردد، با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل نرم افزار لینگو به صورت نمایی افزایش می‌یابد ولی به کمک روش ارائه شده، در مدت زمان کوتاهی می‌توان به جواب مناسبی دست یافت. به منظور بررسی کارایی و اثر بخشی روش ارائه شده برای ابعاد بزرگتر مسئله، یک حد پایین برای مدل لحاظ گردیده و بر پایه مقایسه نتایج با حد پایین، کیفیت روش حل بررسی می‌گردد.

قضیه ۱: با حذف یک محدودیت از مدل ریاضی، جواب بهینه مسئله قطعاً بدتر نمی‌شود.

اثبات: بر پایه مبانی پایه‌ای پژوهش در عملیات، وقتی محدودیتی از مدل ریاضی حذف گردد، فضای حل شدنی یا ثابت می‌ماند (یعنی محدودیت حذف شده بر روی جواب بهینه بی‌اثر است) و یا بزرگتر می‌شود. در نتیجه جواب بهینه یا ثابت مانده و یا بهبود می‌یابد. بر پایه قضیه ارائه شده، محدودیت زیر از مدل ریاضی حذف شده و این کار منجر به ایجاد یک حد پایین برای مدل اصلی می‌گردد.

$$\sum_{t=1}^T \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - re_{it} \cdot u_{it}) \right) \geq re_{min}$$

جدول زیر نتایج حل دو مدل اصلی و حد پایین را به کمک الگوریتم ترکیبی ارائه شده نشان می‌دهد:



جدول ۳. مقایسه مقادیر تابع هدف بر پایه حد پایین ارائه شده (صد بار تکرار)

درصد خطای نسبی	نتایج الگوریتم شبیهه-سازی تیرید برای حد پایین مسئله		نتایج الگوریتم شبیهه-سازی تیرید برای مدل اصلی		دوره زمانی (ساعت)، تعداد واحد نیروگاهی، تعداد منطقه برقرسانی	ردیف
	متوسط مدت زمان حل (ثانیه)	متوسط مقدار تابع هدف	مدت زمان حل (ثانیه)	مقدار تابع هدف		
۰.۰۶۳۶۴۵	۶	۵۲۴۶۳۱	۵	۵۵۸۰۲۱	۴*۱۵*۶	۱
۰.۰۴۸۳۹۵	۵	۳۵۳۶۵۱	۵	۳۷۰۷۶۶	۸*۱۵*۶	۲
۰.۱۲۵۵۳۸	۵	۵۰۱۵۷۷	۵	۵۶۴۵۴۴	۴*۲۵*۶	۳
۰.۰۲۴۸۸۳	۵	۴۸۸۳۲۱	۴	۵۰۰۴۷۲	۸*۲۵*۶	۴
۰.۰۲۸۶۶	۵	۴۲۳۵۴۸	۶	۴۳۵۶۸۷	۴*۵۰*۶	۵
۰	۴	۳۵۹۳۱۶	۴	۳۵۹۳۱۶	۸*۵۰*۶	۶
۰.۰۲۳۶۲۱	۵	۳۰۰۷۰۲	۵	۳۰۷۸۰۵	۴*۱۰۰*۶	۷
۰.۰۷۸۵۰۶	۵	۳۳۵۰۰۰	۶	۴۶۹۱۵۰	۸*۱۰۰*۶	۸

بر پایه تحقیقات انجام شده، درصد خطا تا حدود ۳۰ درصد در مقایسه بین حد پایین و مدل اصلی، قابل قبول بوده و همان طوری که ملاحظه می‌گردد، در همه نمونه‌هایی که توسط روش ارائه شده حل گردیده است، مقدار درصد خطا زیر ۳۰ درصد می‌باشد.

جدول ۴. مقایسه معیار تعداد جواب بهینه برای الگوریتم بر پایه حد پایین ارائه شده (صد بار تکرار)

متوسط مدت زمان حل (ثانیه)	نتایج الگوریتم شبیهه-سازی تیرید برای حد پایین مسئله		نتایج الگوریتم شبیهه-سازی تیرید برای مدل اصلی		دوره زمانی (ساعت)، تعداد واحد نیروگاهی، تعداد منطقه برق-رسانی	ردیف
	تعداد جواب بهینه شناسایی شده در ۱۰۰ بار تکرار	تعداد جواب بهینه شناسایی شده در ۱۰۰ بار تکرار	مدت زمان حل (ثانیه)	تعداد جواب بهینه شناسایی شده در ۱۰۰ بار تکرار		
۶	۷	۵	۵	۴*۱۵*۶	۱	
۵	۱۸	۵	۱۸	۸*۱۵*۶	۲	
۵	۲۵	۵	۱۵	۴*۲۵*۶	۳	
۵	۱۵	۴	۱۵	۸*۲۵*۶	۴	
۵	۳۰	۶	۲۰	۴*۵۰*۶	۵	
۴	۱۸	۴	۲۰	۸*۵۰*۶	۶	



۵	۱۵	۵	۱۵	۴*۱۰۰*۶	۷
۵	۱۸	۶	۱۸	۸*۱۰۰*۶	۸

همان طوری که ملاحظه می‌شود، الگوریتم ارائه شده در مواجهه با داده‌های با حجم کوچک، فضای حل زیاد و مناسبی را جستجو کرده و در قسمت قبل نشان داده شد که در اغلب موارد موفق شده است به مقادیر بهینه نیز دست یابد. از سوی دیگر، با افزایش حجم داده‌ها، تعداد نقاط بهینه ارائه شده تفاوت ملموسی پیدا نمی‌کند که این موضوع را نیز می‌توان مربوط به قدرت الگوریتم در فرار از نقاط بهینه موضعی و نیز در امان ماندن از تکرارهای بیهوده دانست.

جدول ۵. مقایسه معیار فاصله برای بیشترین و کمترین جواب بهینه برای الگوریتم بر پایه حد پایین ارائه شده (صد بار تکرار)

ردیف	دوره زمانی (ساعت)، تعداد واحد نیروگاهی، تعداد منطقه برق- رسانی	نتایج الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای مدل اصلی		نتایج الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حد پایین مسئله	
		بیشترین فاصله برای مقادیر بهینه ارائه شده در ۱۰۰ بار تکرار	مدت زمان حل (ثانیه)	بیشترین فاصله برای مقادیر بهینه ارائه شده در ۱۰۰ بار تکرار	متوسط مدت زمان حل (ثانیه)
۱	۴*۱۵*۶	۳۶۹۵	۶	۲۸۰۶	۶
۲	۸*۱۵*۶	۲۲۹۷	۵	۲۰۸۱	۴
۳	۴*۲۵*۶	۶۲۰۸	۵	۵۴۴۳	۴
۴	۸*۲۵*۶	۸۲۷۱	۴	۷۷۹۱	۵
۵	۴*۵۰*۶	۵۹۳۸	۶	۵۴۲۸	۵
۶	۸*۵۰*۶	۱۸۹۷	۴	۱۰۸۵	۴
۷	۴*۱۰۰*۶	۷۵۲۴	۵	۷۱۵۹	۵
۸	۸*۱۰۰*۶	۵۹۸۰	۶	۵۰۹۰	۵

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله مدیریت تولید و توزیع برق در ایران به‌عنوان یک مدل دو سطحی رهبر/پیرو مدل‌سازی شد. پژوهش حاضر با توجه به محدودیت‌ها و ضوابط خاص تولید برق در ایران، به‌عنوان اولین مدل بومی در قالب مسئله دو سطحی مطرح می‌باشد. طی جلسات متعدد با صاحب‌نظران شرکت مدیریت شبکه برق ایران، مشخص گردید رویه موجود به‌عنوان رابط



اصلی بدنه دولتی و مجموعه بهره‌برداران نیروگاه‌ها، وظیفه اصلی مدیریت تولید و توزیع واحدها را به عهده دارد که دارای زمینه‌هایی جهت بهبود عملکرد است. مهمترین این موارد عبارت‌اند از:

- در نظر گرفتن منافع کاملاً مشترک برای دولت و بخش خصوصی و عدم توجه به تعارض آن‌ها
- عدم توجه به مسائل زیست محیطی
- عدم دقت به موارد نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات
- دقت ناکافی نرم‌افزار در ارائه جواب بهینه به منظور تخصیص

با توجه به پیچیدگی بالای مدل ارائه شده، به‌کارگیری روش‌های فراابتکاری مورد نیاز می‌باشد که در این مسئله روش شبیه‌سازی تبرید به کار رفته است. همچنین به منظور بررسی کیفیت جواب‌های ارائه شده توسط روش حل، مسئله در مقیاس کوچک توسط نرم‌افزار لینگو حل شده است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد روش به کار رفته شده در مدت زمان کوتاهی قادر به تولید جواب‌هایی با درصد خطای بسیار پایین بوده و برای حل برای ابعاد متوسط و بزرگ، به واسطه حذف یکی از محدودیت‌ها، یک حد پایین برای مسئله در نظر گرفته شد و داده‌های متوسط و بزرگ به کمک الگوریتم پیشنهادی بر روی جواب اصلی و جواب حد پایین، مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین، علاوه بر مقایسه بر مبنای زمان حل و کیفیت جواب بهینه، دو معیار دیگر شامل تعداد جواب بهینه شناسایی شده الگوریتم طی ۱۰۰ تکرار و همچنین بیشترین فاصله جبری بین مقادیر هدف شناسایی شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام شده، الگوریتم ارائه شده دارای عملکرد مناسبی بوده و در مورد داده‌های با حجم کم، متوسط و بزرگ، موفق به ارائه جواب‌های با کیفیت مناسبی شده است. پژوهش حاضر را می‌توان به- عنوان اولین گام به منظور ارائه یک دید جدید در زمینه تولید و توزیع برق در قالب یک مدل دو سطحی رهبر، پیرو برشمرد که با توجه به محدودیت‌ها و ویژگی‌های خاص این موضوع در کشور ایران (نظیر عدم به‌کارگیری نیروگاه‌های بادی و خورشیدی و سایر نیروگاه‌های با ظرفیت نصب کمتر از ۱۰۰ مگاوات در شبکه برق سراسری) بومی‌سازی شده است. بر پایه این چارچوب جدید، شرکت مدیریت شبکه برق ایران نقش رهبر و بهره‌برداران خصوصی نیروگاه-ها نقش پیرو را ایفا می‌نمایند و دو سطح با هم در تعامل هستند.

نتایج این پژوهش به منظور بهینه‌سازی نرم‌افزار EMIS و همچنین سایر تصمیم‌سازان و مدیران حوزه برق قابل استفاده می‌باشد.



به‌منظور توسعه مسئله در تحقیقات آتی، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- توسعه مسئله در فضای عدم اطمینان به کمک رویکردهای تئوری احتمال
- در نظر گرفتن نقش قیمت فروش برق به‌عنوان یکی دیگر از عوامل تصمیم‌گیری در فرآیند تولید
- لحاظ نمودن شبکه‌های برق محلی در کنار شبکه سراسری تولید و توزیع برق
- مطالعه وجود نقش باتری به عنوان وسیله‌ای جهت ذخیره‌سازی انرژی
- در نظر گرفتن ریسک در مسئله به‌منظور نزدیک کردن مسئله به فضای واقعی

۷- پی‌نوشت‌ها

- | | |
|---------------------|--------------------|
| ۱۰. Lebosta et al | ۱. Unit Commitment |
| ۱۱. Santo and Costa | ۲. Yi Hong et al |
| ۱۲. Alvarez et al. | ۳. Daadaa et al |
| ۱۳. Anvari et al | ۴. Nemati et al |
| ۱۴. Lotfi Damirchi | ۵. Anand et al. |
| ۱۵. Niussha et al | ۶. Trivedi et al |
| ۱۶. LINGO | ۷. Salvini |
| ۱۷. Day Ahead | ۸. Roque et al |
| | ۹. Yang et al |

۸- منابع

- [۱] Ying-YiHong; Gerard Francesco DG. Apolinario; Chen-NienChung; Tai-Ken Lu; Chia-ChiChu . Effect of Taiwan's energy policy on unit commitment in ۲۰۲۰. Applied Energy ۲۲۷(۲۰۲۰)
- [۲] Daadaa M; Séguin S; Demeester K; Anjos M. An optimization model to maximize energy generation in short-term hydropower unit commitment using efficiency points. International Journal of Electrical Power & Energy Systems ۱۲۵ (۲۰۲۱)
- [۳] Nemati, M. Braun, M. Tenbohlen S. Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming. Applied Energy ۲۱۰ (۲۰۱۸): ۹۴۴-۹۶۳
- [۴] Anand H, Narang N., Dhillon J, Profit Based Unit Commitment using Hybrid Optimization Technique, Energy (۲۰۱۸), doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.energy.۲۰۱۸.۰۱.۱۳۸



- [۵] Panwar, L.K., Swarm and Evolutionary Computation (۲۰۱۷), <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2017.08.002>
- [۶] A. Trivedi et al., A genetic algorithm – Differential evolution based hybrid framework: Case study on unit commitment scheduling problem, Information Sciences (۲۰۱۶), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2016.03.023>
- [۷] *Salvini C and Monacchia S.* A Memetic Computing Approach for Unit Commitment with Energy Storage Systems. *Energy Procedia 107 (2017) 377 – 382*
- [۸] *L.A.C. Roque et al..* A multi-objective unit commitment problem combining economic and environmental criteria in a metaheuristic approach *Energy Procedia 136 (2017) 362–368*
- [۹] L. Yang et al. A novel projected two-binary-variable formulation for unit commitment in power systems. / *Applied Energy 187 (۲۰۱۷) ۷۳۲–۷۴۰*
- [۱۰] Lebosta et al. Short term electricity demand forecasting using partially linear additive quantile regression with an application to the unit commitment problem. *Applied Energy 222 (۲۰۱۸) ۱۰۴–۱۱۸*
- [۱۱] Dal Santo D, Simoes Costa A. Hydroelectric unit commitment for power plants composed of distinct groups of generating units. *Electric Power Systems Research 137:16–20 (۲۰۱۶) DOI/10.1016/j.epsr.2016/03/037*
- [۱۲] G.E. Alvarez et al. .Security-Constrained Unit Commitment Problem including thermal and pumped storage units: An MILP formulation by the application of linear approximations techniques *Electric Power Systems Research 104 (۲۰۱۸) 67–74*
- [۱۳] Anvari A, Azar A, Kordnaeij A, Amiri M. Combining Robust Analysis and Fuzzy Screening to Develop a Robust Strategic Planning Model for Service Logistics Network; a Case of Shiraz Electric Distribution Co. *Journal of Modern Research in Decision Making*, [Volume: ۶ Issue: ۱, ۲۰۱۷](#): ۱–۲۸
- [۱۴] Lotfi Demirchi M. Mir Fakhraei H, Naser Sadr Abadi A. Strategy Evaluation



Based on D Numbers and BSC Framework (Case Study: Electrical Industry).
Journal of Modern Research in Decision Making , [Volume: ۲ Issue: ۳](#), ۲۰۱۷-
۷۷:۹۷

- [۱۵] Niusha A ,Azar A ,Moazzez H ,Heydari K. A Multi-objective Optimization Model for Iran's Renewable Power Portfolio. Management Research in Iran IQBQ. ۲۰۱۹; ۱۷۱-۱۹۱: (۱) ۲۳
- [۱۶] Marzban E, Mohammadi M. Future Scenarios for power Management in Iran. Management Research in Iran , [Volume: ۲ Issue: ۳](#), ۲۰۱۶. ۱۷۱:۲۰۴