

بررسی تاثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر در تامین تقاضای شبکه‌ی برق با ارائه‌ی یک مدل ریاضی دو هدفه

محسن باقری^{۱*}، احسان زارع علی آبادی^۲، امیر حسین انضباطی^۳

۱- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

۳- مربی، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

* مشهد، کد پستی: ۹۱۸۸۱۴۸۸۴۸، m_bagheri@sadjad.ac.ir

چکیده

روند افزایشی میزان تقاضای برق و هزینه‌های استفاده از سوخت‌های فسیلی سبب شده است تا استفاده از منابع تجدیدپذیر و توسعه‌ی انرژی پاک به عنوان یکی از راه‌های تامین انرژی و مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی اهمیت ویژه‌ای یابد. به تبع آن وجود انرژی‌های تجدیدپذیر باعث شده است تا پیچیدگی برنامه‌ریزی برای تامین انرژی برق، که یکی از مسائل مهم در زمینه‌ی زنجیره‌ی تامین انرژی است، روز به روز افزایش یابد. در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه که دارای اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی است، ارائه کرده‌ایم، به گونه‌ای که بتوانیم تاثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر را بر روی میزان سود حاصل شده از فروش انرژی، میزان انتشار گازهای آلاینده و مصرف سوخت مورد استفاده‌ی نیروگاه‌ها بررسی کنیم. با توجه به دو هدفه بودن مدل مطرح شده، از روش محدودیت افسیلون برای به دست آوردن جواب‌های پارتو استفاده شده است. در نهایت با توجه به جواب‌های حاصله به این نتیجه رسیده‌ایم که چه با رویکرد اقتصادی و چه با رویکرد زیست‌محیطی نیروگاه‌های با ظرفیت زیاد سهم بیش‌تری در تامین تقاضای شبکه دارند و نیروگاه‌های با ظرفیت کم تنها برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه و مقابله با نوسانات تقاضا استفاده می‌شوند. در عین حال استفاده از منابع تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ، علاوه بر کاهش انتشار گازهای آلاینده، باعث افزایش سود حاصل از فروش برق نیز شده است. به علاوه نتایج حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که توسعه‌ی استفاده از ریزشبکه‌ها و تولیدات پراکنده رویکرد مناسبی برای تامین تقاضای انرژی برق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زنجیره‌ی تامین انرژی، زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی خطی چند هدفه، روش محدودیت افسیلون



Investigating the Effect of Using Renewable Resources on Electricity Supply Demand Presenting a two-objective Mathematical Model

Mohsen Bagheri^{1*}, Ehsan Zare Ali Abadi², Amir Hossein Enzebati³

1, 2, 3- Department of Industrial Engineering, Sadjad University of Technology, Mashhad, Iran

* P.O.B. 9188148848, Mashhad, m_bagheri@sadjad.ac.ir

Received: July 2018 Accepted: December 2018

Abstract

The increasing demand for electricity and the cost of using fossil fuels has led to the use of renewable resources and the development of clean energy as a means of securing energy and counteracting the negative effects of climate change. Consequently, the presence of renewable energies has increased the complexity of planning for electricity supply, which is one of the most important issues in the energy supply chain. In this paper, we present a two-objective mixed-integer linear programming model that has environmental and economic objectives, so that we can measure the impact of the use of renewable resources on the amount Earnings from energy sales, polluting emissions and fuel consumption of power plants. Since the proposed model follows two objectives, the ϵ -constraint method is used to obtain Pareto solutions. Finally, according to the solutions, we have concluded that high capacity plants have a larger share in supplying the grid demand either with an economic approach or with an environmental approach, and low capacity power plants are only used to increase network reliability and to cope with fluctuations in demand. At the same time, the use of large-scale renewable resources, in addition to reducing emissions, will increase the profits from the sale of electricity. In addition, the results show that the development of the use of microgrids and distributed generation is a suitable approach for supplying electricity demand.

Keywords: energy supply chain, environmental, multi-objective mixed integer programming, ϵ -constraint method

۱- مقدمه

به طوری که جریان سوخت مورد نیاز برای تامین انرژی و همین طور جریان انرژی تولیدی در شبکه‌ی انرژی بهینه گردد. در ادامه‌ی این مقاله به ترتیب به مرور ادبیات موضوع، شرح ساختار زنجیره‌ی تامین مورد بررسی، فرمول‌بندی مسئله‌ی مورد نظر و بررسی صحت مدل می‌پردازیم.

۲- مرور ادبیات

از آنجا که اهمیت مدیریت تولید و مصرف انرژی برای توسعه‌ی پایدار، که به معنای کاهش تاثیرات منفی زیست‌محیطی و اجتماعی می‌باشد، روز به روز افزایش یافته است، مدل‌های ریاضی مختلفی به منظور طراحی و برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تامین انرژی ارائه شده است که بخشی از آن‌ها برای در نظر گرفتن نگرانی‌های زیست‌محیطی و اجتماعی از مدل‌های ریاضی چندهدفه استفاده کرده‌اند و برخی با یک رویکرد اقتصادی به مدل‌سازی این زنجیره پرداخته‌اند. در رابطه با در نظر گرفتن ابعاد پایداری در تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی در زنجیره‌ی تامین انرژی، استفاده از مدل‌های چندهدفه بیش‌ترین توجه را به خود جلب کرده است. وانگ و سینگ [۵] در شرایط عدم قطعیت و با توجه به سه هدف کاهش هزینه‌ها، افزایش قابلیت اطمینان سیستم تامین انرژی و کاهش آلودگی ایجاد شده توسط گازهای آلاینده از نیروگاه‌های بادی، پانل‌های فتوولتائیک و باتری‌های ذخیره‌سازی برای مدل‌سازی سیستم تولید برق استفاده کردند. محدودیت‌های مدل شامل تعادل انرژی و ظرفیت‌های تولید می‌باشد. اکتگول و همکاران [۶] برای طراحی بهینه‌ی یک زنجیره‌ی تامین بیوالکتریکی، یک مدل دو هدفه‌ی عدد صحیح مختلط غیرخطی نوشتند که مینیم‌سازی کل گازهای آلاینده‌ی تولیدی سالانه یکی از اهداف مدل است. بالامان و سلیم [۷] یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری را برای طراحی و مدیریت زنجیره‌های تامین بیوماس به انرژی بر اساس هضم بی‌هوازی با یک رویکرد اقتصادی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست و در شرایط عدم قطعیت توسعه دادند. برای این هدف، یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه‌ی خطی عدد صحیح مختلط فازی ساخته شده است که یکی از اهداف آن مینیم‌سازی میزان زباله‌ی بیوماس استفاده نشده است و دیگری افزایش سود می‌باشد. در این مدل از محدودیت‌های بخش تامین مواد بیوماس، تعادل جریان مواد بیوماس در واحد موجودی و تولید، ظرفیت تولید و موجودی استفاده شده است. کامبرا و صولتی [۸] به برنامه‌ریزی در یک زنجیره‌ی تامین بیوماس با در نظر گرفتن سه هدف اجتماعی (افزایش شغل ایجاد شده)، زیست‌محیطی (افزایش ذخیره‌سازی گازهای گلخانه‌ای) و اقتصادی (افزایش ارزش فعلی خالص سود) پرداختند تا در مورد میزان مواد بیوماس استفاده شده و مکان نصب کارخانه‌های بیوانرژی و میزان تولید بیوانرژی و سوخت زیست توده تصمیم‌گیری کنند. پرز-فورتر و همکاران [۹] از یک مدل ریاضی برای زنجیره‌های تامین مبتنی بر زیست استفاده کردند که این زنجیره محصولات زیستی در دسترس و نزدیک به مکان مصرف را به منظور تولید الکتریسیته استفاده می‌کند. این مدل تصمیم‌هایی در مورد مکان و ظرفیت تکنولوژی‌ها، ارتباط بین موجودی‌های تامین، دوره‌ی ذخیره‌سازی محصولات زیستی و موضوع حمل‌ونقل را پشتیبانی می‌کند. رن و همکاران [۱۰] یک مدل برای طراحی زنجیره‌ی تامین سوخت‌زیستی را تحت عدم قطعیت توسعه دادند که کاهش مصرف انرژی و گاز CO₂ را به عنوان هدف در نظر می‌گیرد. مدل آن‌ها دارای چند ماده‌ی خام، چند حالت حمل‌ونقل، چند سایت برای ساخت کارخانه‌های تولید سوخت‌زیستی و چند تکنولوژی برای تولید می‌باشد. محدودیت‌های مدل آن‌ها شامل در دسترس بودن محصول، ظرفیت کارخانه، تقاضای بازار، تعادل مواد و ظرفیت حمل‌ونقل می‌شود. شبانی و همکاران [۱۱] برای زنجیره‌ی تامین نیروگاه

توسعه‌ی زنجیره‌ی تامین انرژی پایدار منجر به پیشرفت در زمینه‌ی مهندسی سیستم‌های انرژی شده است، که شامل تمام مراحل تصمیم‌گیری از منابع انرژی اولیه تا تحویل انرژی نهایی به مشتری می‌شود. اهداف اصلی و چالش‌های مدیریت سیستم‌های انرژی شامل کاهش هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از شبکه‌ی انرژی، کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید و انتقال انرژی و تامین تقاضای انرژی با وجود اختلالات داخلی و خارجی غیرمنتظره می‌باشد [۱]. تحت مفهوم واقعی که بر طبق آن انرژی به عنوان یک منبع محدود در نظر گرفته می‌شود که باید این منابع استراتژیک کنترل شود و راه حلی را برای استقلال جامعه از آن‌ها در نظر گرفت و یا تحت مفهوم کالای نرمال که در آن انرژی به عنوان یک کالای معمولی در نظر گرفته می‌شود، در هر دو صورت باید گفت که انرژی و توسعه به‌طور جدایی‌ناپذیری به یکدیگر مرتبط هستند [۲]. برنامه‌ریزی انرژی شامل شناسایی معیارهای مختلف، ذی‌نفعان و اهداف در یک محیط تعاملی می‌باشد. مسائل برنامه‌ریزی انرژی سنتی که بر اساس یک رویکرد معیار واحد ایجاد می‌شوند و هدفشان شناسایی ساختار زنجیره‌ی تامین انرژی بهینه تحت ملاحظات فنی-اقتصادی است به تدریج کم شده‌اند، چراکه نگرانی‌های زیست‌محیطی و پیامدهای اجتماعی نیز باید همانند پارامترهای اقتصادی در مسئله به حساب آیند. برای گذار به سمت یک بخش انرژی پایدار، سیاست‌گذاران باید به تدریج تعادلی بین تولید انرژی و حداقل اثرات زیست‌محیطی برقرار کنند، در حالی که به فرصت‌های اجتماعی در هر سطح تولید (محلی/ منطقه‌ای، کشوری/ ملی، جهانی) نیز توجه داشته باشند. این دلیلی است که تصمیم‌گیری با استفاده از روش‌ها و ابزارهایی مانند تصمیم‌گیری چند معیاره، روش‌های مدل‌سازی، سیستم‌های خبره و بهینه‌سازی چند هدفه توجه قابل ملاحظه‌ای را به دست آورده‌اند [۳].

برای مقابله با تغییرات اقلیمی، کمبود تامین انرژی و همین طور دستیابی به هدف کاهش گازهای گلخانه‌ای، کشورهای توسعه یافته باید استراتژی‌های توسعه را پی‌درپی تنظیم کنند، الگوهای کم‌کربن توسعه‌ی اقتصادی را مدل‌سازی کنند و به سمت اقتصاد کم‌کربن حرکت نمایند. به عنوان یک کشور با مصرف انرژی بالا، امریکا عمدتاً از نیروگاه‌های حرارتی (۶۸/۴ درصد) برای تامین برق استفاده می‌کند و بر اساس طرح انرژی آینده‌ی این کشور تا سال ۲۰۳۰، ۲۰ درصد برق از نیروگاه‌های بادی و ۱۰ درصد آن توسط پنل‌های خورشیدی تامین می‌شود. آلمان نیز تا سال ۲۰۳۴ میزان تولید برق از طریق نیروگاه‌های بادی و پنل‌های خورشیدی را به ۱۷۳ گیگاوات خواهد رساند [۴]. در ایران نیز به صورت قابل‌تصوری برق بزرگترین حامل چند منظوره انرژی در اقتصاد است و بنابراین عمدتاً به توسعه سیاسی، اجتماعی و اقتصادی پیوند خورده است. با این وجود تاکنون نیازمندی‌های انرژی این کشور اکثراً از طریق سوخت فسیلی تامین شده است و تاثیر این موضوع را بر روی آلودگی هوا و منابع طبیعی می‌بینیم. بنابراین توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر (سوخت‌های جایگزین و گزینه‌های تامین مانند باد و فتوولتائیک) و برنامه‌ریزی مؤثر سیستم‌های انرژی یک راه حل برای حفظ محیط زیست از گسترش تولید بی‌رویه‌ی انرژی و مصرف آن می‌باشد. این موضوع به توازن بین تامین انرژی و بخش‌های مصرف کمک می‌کند، منابع انرژی و فناوری‌ها را در چهارچوبی کلی یکپارچه کرده و از اقتصاد، محیط زیست و توسعه‌ی پایدار حمایت می‌نماید.

بنابراین، به طور مشخص این مقاله به دنبال ارائه‌ی یک مدل ریاضی برای برنامه‌ریزی بهینه در یک زنجیره‌ی تامین انرژی برق است. در این مقاله، یک مدل‌سازی ریاضی با هدف مدیریت بهینه‌ی یک شبکه‌ی انرژی ارائه شده است. این مدل ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌ریزی پایدار را در نظر می‌گیرد،



بیوماس یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی را با تبدیل به یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح بازنویسی کردند. مدل برای یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی تولید چند دوره‌ای توسعه داده شده است و تامین و ذخیره‌ی بیوماس و تولید برق را در نظر می‌گیرد. در این مقاله به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در دسترس بودن بیوماس از یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی دو مرحله‌ای استفاده شده است و همین‌طور برای ایجاد تعادل بین ریسک و سود نیز یک مدل دو هدفه مطرح گردیده است. دو مفهوم به عنوان ریسک در مدل در نظر گرفته شده است که یکی با عنوان شاخص تغییر تعریف شده است و به معنای پراکندگی سود می‌باشد و باید کاهش یابد و دیگری با عنوان ریسک ضعف تعریف شده است و به معنای احتمالی است که در آن سود واقعی از سود هدف کم‌تر است. محدودیت‌های مدل شامل تامین مواد بیوماس، ظرفیت ذخیره‌سازی مواد بیوماس، تعادل ذخیره‌سازی و مصرف مواد بیوماس، ظرفیت تولید و تامین تقاضا می‌باشد. دی‌امور و بزو [۱۲] یک زنجیره‌ی تامین چند سطحی شامل تولید مواد بیوماس، حمل‌ونقل، تبدیل به بیواتانول و بیوالکتریسته، توزیع و استفاده‌ی نهایی را با یک مدل برنامه‌ریزی دو هدفه‌ی چند دوره‌ای مختلط عدد صحیح خطی بررسی کردند. تصمیمات کلیدی این مدل شامل مکان‌یابی سایت‌های تولید بیوماس، نرخ تولید بیوماس و ترکیب مواد اولیه به کارخانه، انتخاب تکنولوژی تجهیزات بیواتانول و مکان‌یابی و مقیاس آن‌ها، انتخاب تکنولوژی تجهیزات بیوالکتریسته و مکان‌یابی و مقیاس آن‌ها، تعیین لجستیک حمل‌ونقل، تعیین عملکرد اقتصادی زنجیره‌ی تامین، تعیین تاثیر سیستم بر روی محیط‌زیست می‌باشد.

مدل‌هایی نیز تنها با هدف اقتصادی نوشته شده‌اند که برخی از آن‌ها نیز به نوعی رویکرد زیست‌محیطی دارند. سیلون و همکاران [۱] بر روی توسعه‌ی استراتژی‌های زمان‌بندی مبتنی بر بهینه‌سازی برای هماهنگی ریزشک‌ها تمرکز کردند که به این منظور یک مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با رویکرد افق غلطان ارائه شده است. کار اصلی آن‌ها مدیریت هم‌زمان تولید انرژی و تقاضای انرژی از طریق یک رویکرد زمان‌بندی واکنشی است که عدم قطعیت مرتبط با تولید و مصرف را در نظر می‌گیرد. ساختار ریزشک‌های عمومی در نظر گرفته شده در مدل آن‌ها شامل سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر (پانل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی) و واحدهای ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. زاماریا و همکاران [۱۳] یک مدل ریاضی برای تعیین سطح ذخیره‌سازی و تولید انرژی با توجه به تامین تقاضا توسعه دادند که هدف آن کاهش هزینه‌های عملیاتی است. این مدل برای یک ریزشک شامل نیروگاه‌های سوخت و پانل‌های خورشیدی و سیستم ذخیره‌سازی نوشته شده است. هدف مدل کاهش هزینه‌های تولید و ذخیره‌سازی انرژی است و محدودیت‌های آن شامل ظرفیت تولید و ظرفیت ذخیره‌سازی می‌باشد. زاندروان و همکاران [۱۴] مسئله‌ای را برای شبکه‌ای از نیروگاه‌های برق که از نفت و گاز استفاده می‌کنند، بررسی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط را برای تصمیم‌گیری در مورد میزان تولید هر نیروگاه برق با توجه به مقدار تقاضای مشخص ارائه کردند. هدف مدل نیز کاهش هزینه‌های تولید، خاموش شدن و آماده‌سازی می‌باشد، با این نکته که مدل حد تولید گازهای آلاینده را در قالب محدودیت در نظر گرفته است. کاریون و آرویو [۱۵] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی را برای واحدهای حرارتی ارائه کردند. تابع هدف مدل شامل هزینه‌های تولید، که تابعی درجه‌ی دو دارد و هزینه‌های روشن کردن و خاموش کردن، که وابسته به زمان هستند، می‌باشد. تعادل انرژی و ظرفیت ذخیره‌ی انرژی از محدودیت‌های مدل است. بالامان و سلیم [۱۶] با هدف توسعه‌ی یک مدل طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تامین موثر برای تولید

بیوگاز از طریق هضم بی‌هوازی زیست توده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده کردند که هدف آن افزایش سود زنجیره می‌باشد و باید در مورد تعیین مکان‌های مناسب برای کارخانه‌های بیوگاز و ذخیره‌سازی زیست توده و میزان تولید برق و کود شیمیایی تصمیم‌گیری کند. مدل شامل محدودیت‌های در دسترس بودن مواد، ظرفیت تولید کود و انرژی، ظرفیت ذخیره‌سازی مواد بیوماس می‌باشد.

با این اوصاف، تاکنون اکثر پژوهشگرانی که در زمینه‌ی برنامه‌ریزی در زنجیره‌ی تامین انرژی کار کرده‌اند، برای در نظر گرفتن دغدغه‌های زیست‌محیطی و اجتماعی سعی کرده‌اند تا مدل‌های خود را بر اساس ساختار زنجیره‌های تامین انرژی تجدیدپذیر (انرژی‌های بادی، خورشیدی، بیوماس و ...) بنویسند. بنابراین تا به حال توجه زیادی به نیروگاه‌های تولید انرژی که از سوخت فسیلی استفاده می‌کنند و یکی از عوامل اصلی افزایش گازهای آلاینده می‌باشند، نشده است و به طبع آن، هدف کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در زنجیره‌ی تامین انرژی مد نظر قرار نگرفته است. از این رو توجه به استفاده‌ی بهینه از این‌گونه نیروگاه‌ها در شبکه‌هایی که انرژی‌های تجدیدپذیر نقش زیادی در آن‌ها ندارند، ضروری به نظر می‌رسد.

در این مقاله سعی می‌شود تا برای برنامه‌ریزی در یک شبکه‌ی زنجیره‌ی تامین انرژی با مقیاس بزرگ، مجموعه‌ی سوخت‌های مورد استفاده در مجموعه‌ای از نیروگاه‌ها را در مدل خود مد نظر قرار دهیم. ترکیبی از نیروگاه‌ها را برای تامین انرژی تقاضا شده بررسی کنیم و در مورد متغیرهای تصمیم مورد نظر (از جمله میزان تولید انرژی، میزان انرژی فروخته شده به شبکه‌های دیگر) تصمیم‌گیری نماییم.

۲- شرح مسئله

سعی شده است تا با ارائه‌ی یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط دو هدفه برای شبکه‌ی برق و با یک رویکرد زیست‌محیطی، سود حاصل از تولید برق در شبکه‌ی برق را به حداکثر برسانیم. شبکه‌ای که بر اساس آن مدل برنامه‌ریزی خطی نوشته شده است، شامل مجموعه‌هایی از عناصر به هم پیوسته مانند نیروگاه‌های برق و مصرف‌کنندگان انرژی می‌باشد و همچنین مجموعه‌هایی از تصمیمات، مانند میزان تولید برق توسط هر نیروگاه و میزان مصرف سوخت توسط هر یک از آن‌ها را در بر می‌گیرد.

مدل‌سازی پیشنهادی سطوح تولید انرژی و موجودی سوخت و ذخیره‌سازی سوخت را برای مدیریت شبکه‌ی برق در نظر می‌گیرد و فروش انرژی را به شبکه‌های برق دیگر، همانند هزینه‌های مربوطه از جمله هزینه‌های تولید انرژی، به منظور به حداکثر رساندن سود مد نظر قرار می‌دهد. همچنین هدف دیگری به عنوان هدف زیست‌محیطی که به دنبال کاهش انتشار گازهای آلاینده و مصرف سوخت شبکه‌ی برق مورد نظر می‌باشد، در نظر گرفته شده است. مدل ریاضی شامل محدودیت‌های ظرفیت تولید انرژی توسط نیروگاه‌ها، ظرفیت ذخیره‌سازی سوخت برای هر نیروگاه و تعادل انرژی و سوخت در شبکه ی برق می‌شود. سیستم شامل مجموعه‌های زیر است:

- مجموعه‌ای از نیروگاه‌های انرژی $i \in I$ ، که توسط یک ظرفیت تولید انرژی مینیمم و ماکزیمم، P_i^{min} و P_i^{max} ، و یک هزینه‌ی عملیاتی مشخص $cpro_i$ ، مشخص شده‌اند.
- مجموعه‌ای مشخص از شبکه‌های برق $r \in R$ ، که بخشی از برق تولیدی به آن‌ها فروخته می‌شود.
- مجموعه‌ای از سوخت‌های مصرفی نیروگاه‌ها $f \in F$ ، که باید میزان مصرف آن‌ها در هر بازه‌ی مورد نظر مشخص گردد.

واحد هزینه‌ی تولید در میزان انرژی تولید شده به دست می‌آید و همین‌طور عبارت پنجم مربوط به هزینه‌ی ذخیره‌سازی می‌شود و عبارات ششم و هفتم به ترتیب برای هزینه‌ی راه‌اندازی و خاموش کردن می‌باشند. معادله‌ی (۲) مربوط به تابع هدف زیست‌محیطی است. این تابع هدف شامل کاهش مصرف سوخت توسط نیروگاه‌ها در شبکه در بازه‌ی زمانی موجود و کاهش انتشار گازهای آلاینده به ازای تولید هر واحد انرژی می‌باشد. معادله‌ی (۳) بیان می‌کند که کل انرژی تولیدی توسط نیروگاه‌ها که از سوخت‌های متفاوتی استفاده می‌کنند، باید کل تقاضای شبکه را در بازه‌ی زمانی t پوشش دهد. حدود تولید انرژی برای هر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t با معادلات (۴) و (۵) مشخص شده است. معادله‌ی (۶) میزان سوخت f موجود برای نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t را به ظرفیت ذخیره‌ی سوخت f در نیروگاه i محدود می‌کند. معادله‌ی (۷) تعادل موجودی سوخت f در هر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t را در نظر می‌گیرد. معادله (۸) بیان می‌کند که در هر بازه‌ی زمانی t باید مقدار ذخیره‌ی چرخان در شبکه رعایت شود. مقدار انرژی در هر ذخیره‌ی انرژی k در بازه‌ی زمانی t از طریق یک مقدار ماکزیمم و مینیمم محدود می‌شود که در معادله‌ی (۹) آمده است. معادله‌ی (۱۰) تعادل انرژی را در سیستم‌های ذخیره‌سازی نشان می‌دهد. معادله‌ی (۱۱) نشان می‌دهد که تغییرات مقدار انرژی در هر ذخیره‌ی انرژی k در بازه‌ی زمانی t توسط یک سطح تغییر ماکزیمم محدود می‌گردد. معادله‌ی (۱۲) برای در نظر گرفتن شرایط منطقی برای پرداخت هزینه‌ی راه‌اندازی نوشته شده است و بیان می‌کند که اگر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t فعال باشد ($u_{it} = 1$) و در بازه‌ی $t-1$ غیر فعال باشد ($u_{i,t-1} = 0$)، آن‌گاه باید هزینه‌ی راه‌اندازی پرداخت گردد. معادله‌ی (۱۳) برای در نظر گرفتن شرایط منطقی برای پرداخت هزینه‌ی خاموش کردن نوشته شده است و بیان می‌کند که اگر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t غیرفعال باشد ($u_{it} = 0$) و در بازه‌ی $t-1$ فعال باشد ($u_{i,t-1} = 1$)، آن‌گاه باید هزینه‌ی خاموش کردن پرداخت گردد. برای هر یک از نیروگاه‌ها یک حداقل زمان روشن بودن (TU_i) در نظر گرفته شده است، با این توضیح که اگر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t روشن شود ($u_{it} = 1$)، آن‌گاه نیروگاه i باید تا بازه‌ی $t + TU_i$ روشن بماند ($u_{i,t+1} = 1, u_{i,t+2} = 1$ و تا $u_{i,t+TU_i} = 1$). این مورد توسط معادله‌ی (۱۴) در مدل لحاظ شده است. همین‌طور برای هر یک از نیروگاه‌ها یک حداقل زمان خاموش بودن (TD_i) در نظر گرفته شده است، با این توضیح که اگر نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t خاموش شود ($u_{i,t+1} = 0$)، آن‌گاه نیروگاه i باید تا بازه‌ی $t + TD_i$ خاموش بماند ($u_{i,t+1} = 0, u_{i,t+2} = 0$ و تا $u_{i,t+TD_i} = 0$). این مورد توسط معادله‌ی (۱۵) در مدل لحاظ شده است. معادلات (۱۶) و (۱۷) میزان افزایش و کاهش تولید برق در نیروگاه‌ها را در نظر می‌گیرند و روابط (۱۸) و (۱۹) بیان‌گر نوع متغیرهای تصمیم‌گیری مدل هستند.

- مجموعه‌ای از بازه‌های زمانی $t \in T$
- تصمیمات اصلی به منظور دستیابی به اهداف مورد نظر در شبکه عبارت‌اند از:
 - میزان برق تولیدی هر نیروگاه i در هر بازه‌ی زمانی t .
 - میزان برق فروخته شده به هر شبکه‌ی برق در هر بازه‌ی زمانی t .
 - میزان مصرف هر نوع سوخت f در شبکه.

۴- مدل ریاضی

در جدول ۱ نمادهای استفاده شده در مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط معرفی شده‌اند. مدل شبکه‌ی مورد نظر در ادامه آمده است.

$$\max \sum_{i=1}^R \sum_{t=1}^T price_t P_{g_{rt}} + \sum_{t=1}^T price_t Dem_t - \sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T cpro_i P_{ift} - \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T cpro_e P_{et} - \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T csto_k SE_{kt} - y_{it} CSU_i - z_{it} CSD_i \quad (1)$$

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T EMF_{if} P_{ift} + \sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T F_{if} P_{ift} \quad (2)$$

به طوری که،

$$\sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^F P_{ift} + \sum_{k=1}^K SP_{kt} = Dem_t + \sum_{r=1}^R P_{g_{rt}} \quad \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{f=1}^F P_{ift} \leq u_{it} P_i^{max} \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$P_{et} \leq P_e^{max} \quad \forall e, t \quad (5)$$

$$I_{ift} \leq cap_{if} \quad \forall i, f, t \quad (6)$$

$$I_{ift} = I_{if(t-1)} + A_{ift} - F_{if} P_{ift} \quad \forall i, f, t \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I u_{it} P_i^{max} = R_t + Dem_t \quad \forall t \quad (8)$$

$$SE_k^{min} \leq SE_{kt} \leq SE_k^{max} \quad \forall k, t \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^K SE_{kt} = \sum_{k=1}^K SE_{k,t-1} + \eta_k^{in} (\sum_{e=1}^E P_{et}) - \eta_k^{out} (\sum_{k=1}^K SP_{kt}) \quad \forall t \quad (10)$$

$$SE_{kt} - SE_{k,t-1} \leq \alpha_k SE_k^{max} \quad \forall k, t \quad (11)$$

$$u_{it} - u_{i,t-1} \leq y_{it} \quad \forall i, t \quad (12)$$

$$u_{i,t-1} - u_{it} \leq z_{it} \quad \forall i, t \quad (13)$$

$$y_{it} \leq u_{i,t+j} \quad \forall i, t, j \quad (14)$$

$$z_{it} + u_{i,t+j} \leq 1 \quad \forall i, t, j \quad (15)$$

$$P_{ift} \leq P_{i,f,t-1} + RU_i \quad \forall i, f, t \quad (16)$$

$$P_{ift} \geq P_{i,f,t-1} - RD_i \quad \forall i, f, t \quad (17)$$

$$u_{it}, y_{it}, z_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i, t \quad (18)$$

$$P_{g_{rt}}, P_{ift}, P_{et}, I_{ift}, SE_{kt}, SP_{kt}, A_{ift} \geq 0 \quad \forall i, f, t \quad (19)$$

معادله‌ی (۱) مربوط به تابع هدف اقتصادی است. عبارت اول درآمد انرژی شبکه‌ی برق است. عبارت دوم نیز مربوط به فروش برق به متقاضیان برق موجود در شبکه است و عبارت سوم و چهارم مربوط به هزینه‌ی تولید است که از ضرب

جدول ۱ نمادهای مورد استفاده در مدل

مجموعه‌ها	
$i \in I$	نیروگاه‌های فسیلی
$e \in E$	نیروگاه‌های تجدیدپذیر
$r \in R$	شبکه‌های برق
$k \in K$	سیستم‌های ذخیره‌سازی
$f \in F$	سوخت‌های مصرفی
$t \in T$	بازه‌های زمانی
$j \in D_i, j \in U_i$	بازه‌های زمانی
$U_i \in \{1, 2, \dots, TU_i\}$	تعداد بازه‌هایی که نیروگاه i بعد از راه‌اندازی باید روشن بماند.
$D_i \in \{1, 2, \dots, TD_i\}$	تعداد بازه‌هایی که نیروگاه i بعد از خاموش شدن باید خاموش بماند.



پارامترها

$cpro_i$	هزینه‌ی تولید انرژی توسط نیروگاه i (\$/MWh)
$cpro_e$	هزینه‌ی تولید انرژی توسط نیروگاه e (\$/MWh)
$csto_k$	هزینه‌ی ذخیره‌سازی انرژی (\$/MWh)
$price_t$	قیمت انرژی فروخته شده در بازه‌ی زمانی t (\$/MWh)
CSU_i	هزینه‌ی راه‌اندازی نیروگاه i (\$/h)
CSD_i	هزینه‌ی خاموش کردن نیروگاه i (\$/h)
F_{if}	میزان مصرف سوخت f توسط نیروگاه i برای تولید یک واحد انرژی (m^3/MWh)
EMF_{if}	ضریب انتشار گازهای آلاینده‌ی نیروگاه i با استفاده از سوخت f به ازای تولید هر واحد انرژی (kg/MWh)
p_i^{max}	حداکثر برق تولیدی نیروگاه i (MWh)
cap_{if}	ظرفیت ذخیره‌ی سوخت f توسط نیروگاه i (m^3)
Dem_t	تقاضای مصرف انرژی کل در بازه‌ی زمانی t (MWh)
TU_i	حداقل زمان روشن بودن برای نیروگاه i بعد از روشن شدن (h)
TD_i	حداقل زمان خاموشی برای نیروگاه i بعد از خاموش شدن (h)
RU_i	حداکثر افزایش تولید نیروگاه i (MWh)
RD_i	حداکثر کاهش تولید نیروگاه i (MWh)
R_t	میزان ذخیره‌ی چرخان در بازه‌ی زمانی t (MWh)
p_e^{max}	حداکثر برق تولیدی نیروگاه e (MWh)
SE_k^{min}	حداقل ذخیره‌ی برق سیستم k در بازه‌ی زمانی t (MWh)
SE_k^{max}	حداکثر ذخیره‌ی برق سیستم k در بازه‌ی زمانی t (MWh)
α_k	درصدی از ماکزیمم ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی انرژی k
η_k^{in}	کارایی شارژ سیستم ذخیره‌سازی انرژی k
η_k^{out}	کارایی دشارژ سیستم ذخیره‌سازی انرژی k

متغیرها

P_{ift}	میزان برق تولیدی نیروگاه i با استفاده از سوخت f در بازه‌ی زمانی t (MWh)
P_{et}	میزان برق تولیدی نیروگاه e در بازه‌ی زمانی t (MWh)
SP_{kt}	برق تامین شده توسط سیستم k در بازه‌ی زمانی t برای مصرف‌کنندگان (MWh)
Pg_{rt}	برق فروخته شده به شبکه‌ی برق r در بازه‌ی زمانی t (MWh)
I_{ift}	میزان سوخت f موجود در نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t (m^3)
A_{ift}	میزان خرید سوخت f برای نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t (m^3)
u_{it}	متغیر صفر و یک است و بیانگر روشن (حالت یک) یا خاموش بودن (حالت صفر) نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t می‌باشد.
y_{it}	متغیر صفر و یک است و اگر یک باشد، به معنای روشن شدن نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t می‌باشد و باید هزینه‌ی راه‌اندازی پرداخت شود.
z_{it}	متغیر صفر و یک است و اگر یک باشد، به معنای خاموش شدن نیروگاه i در بازه‌ی زمانی t می‌باشد و باید هزینه‌ی خاموشی پرداخت شود.

در نظر گرفتن محدودیت‌های (۵)، (۹)، (۱۰) و (۱۱) و هزینه‌های مربوط به بخش منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی حل می‌نماییم و سپس مدل را با وجود این محدودیت‌ها و هزینه‌ها اجرا می‌کنیم.

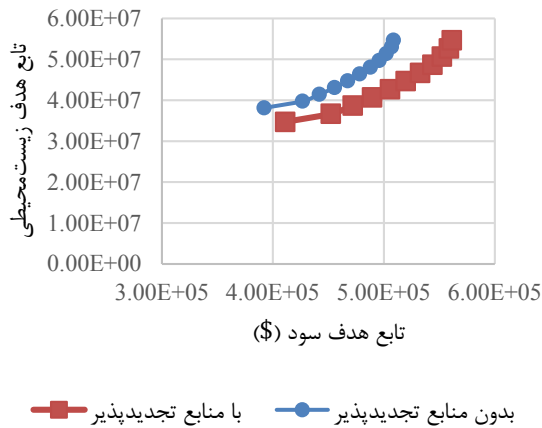
۵-۱ نتایج محاسباتی

جواب‌های پارتوی مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط معرفی شده، که با استفاده از روش محدودیت پسيلون به دست آمده‌اند، در ادامه می‌آید. در جداول ۲ و ۳ و شکل ۱ جواب‌های پارتوی حاصل شده از این روش برای هر دو حالت در نظر گرفته شده (بدون منابع تجدیدپذیر و با وجود آن‌ها)، نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با وجود بهبود تابع هدف اقتصادی که به دنبال ماکزیمم‌سازی سود است، تابع هدف زیست‌محیطی در وضعیت بدتری قرار می‌گیرد و این به معنای آن است که برای کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای آلاینده باید میزان تولید را کنترل نمود. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، استفاده از منابع تجدیدپذیر نه تنها منجر به کاهش انتشار گازهای

۵- مثال عددی

برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحيح مختلط معرفی شده، شبکه‌ای با مجموعه‌ای از ۱۱ نیروگاه انرژی (۸ نیروگاه گازسوز هستند، ۲ نیروگاه از گازوئیل استفاده می‌کنند و یک نیروگاه تجدیدپذیر است) و ۱۰ سیستم ذخیره‌سازی در نظر گرفته شده است که باید برای یک افق زمانی ۲۴ ساعته تقاضای مورد نیاز شبکه را تامین نمایند. داده‌های ورودی مدل از مقاله‌ی نیکنام و همکاران [۱۷] استخراج شده است. لازم به ذکر است که مقدار ذخیره‌ی چرخان ۱۰ درصد مقدار تقاضا در هر دوره‌ی زمانی است و پارامترهای شاخص مصرف سوخت و شاخص انتشار گازهای آلاینده برای تولید هر واحد انرژی توسط نیروگاه‌ها و مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی با استفاده از ترازنامه‌ی انرژی ایران به دست آمده‌اند. داده‌های ورودی مثال عددی در جداول ۶، ۷ و ۸ و در ضمیمه‌ی ۱ آمده است. مدل با استفاده از روش محدودیت پسيلون و در نرم‌افزار گمز حل شده است. برای بررسی تاثیر استفاده از منابع تجدیدپذیر در تامین تقاضای برق شبکه مدل را در دو حالت حل می‌کنیم. ابتدا مدل را بدون





شکل ۱ نمودار جواب‌های پارتو

برای نشان دادن چگونگی تاثیر تابع هدف زیست محیطی بر روی میزان تولید نیروگاه‌ها، نتایج مربوط به جواب‌های پارتوی (۱) و (۲) را برای، به ترتیب، حالت بدون منابع تجدیدپذیر (حالت ۱) و با منابع تجدیدپذیر (حالت ۲) بررسی می‌کنیم. با توجه به این جواب‌ها، نتایج حاصل شده برای میزان تولید هر نیروگاه در جداول ۴ و ۵ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، نیروگاه‌های ۱ تا ۴ در هر دو حالت (جواب‌های پارتوی (۱) و (۲)) تقریباً با حداکثر ظرفیت کار می‌کنند و به طبع آن مصرف سوخت بیش‌تری نیز دارند. تولید نیروگاه‌های ۵ تا ۱۰ با افزایش اهمیت تابع هدف زیست محیطی تغییرات ملموس‌تری داشته است. مضاف بر این‌که وجود منبع تجدیدپذیر سبب کاهش تولید دیگر نیروگاه‌ها شده است.

آلاینده و مصرف سوخت شده است، بلکه سود حاصل از فروش برق را افزایش داده است. دلیل این امر کم بودن هزینه‌ی تولید برق از طریق منابع تجدیدپذیر و تولید این نوع انرژی در مقیاس بزرگ برای این نمونه‌ی عددی است.

جدول ۲ جواب‌های پارتو بدون در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر

جواب‌های پارتو	تابع هدف سود (\$)	تابع هدف زیست محیطی
۱	۳۹۲۲۰۱/۰۶۰	۳۸۱۲۹۸۹۰
۲	۴۲۶۸۰۰/۲۵۰	۳۹۷۸۵۰۰۸۰
۳	۴۴۱۹۶۶/۵۸۰	۴۱۴۴۰۲۶۰
۴	۴۵۵۵۹۴/۴۷۰	۴۳۰۹۵۴۵۰
۵	۴۶۷۴۳۷/۷۵۰	۴۴۷۵۰۶۳۰
۶	۴۷۸۳۴۵/۷۸۰	۴۶۴۰۵۸۱۰
۷	۴۸۷۹۶۲/۶۴۰	۴۸۰۶۱۰۰۰
۸	۴۹۵۸۶۴/۱۶۰	۴۹۷۱۶۱۸۰
۹	۵۰۲۲۰۶/۵۲۰	۵۱۳۷۱۳۷۰
۱۰	۵۰۶۹۵۵/۷۱۰	۵۲۰۲۶۵۵۰
۱۱	۵۰۸۶۸۳/۵۴۰	۵۴۶۸۱۷۴۰

جدول ۳ جواب‌های پارتو با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر

جواب‌های پارتو	تابع هدف سود (\$)	تابع هدف زیست محیطی
۱	۴۱۱۰۳۱/۷۲۸	۳۴۷۰۵۸۳۰
۲	۴۵۲۳۳۹/۱۹۹	۳۶۷۰۳۴۲۰
۳	۴۷۱۹۴۹/۵۲۸	۳۸۷۰۱۰۱۰
۴	۴۸۹۴۵۶/۸۲۰	۴۰۶۹۸۶۰۰
۵	۵۰۵۴۸۹/۳۵۰	۴۲۶۹۶۱۹۰
۶	۵۱۹۶۶۲/۵۲۰	۴۴۶۹۳۷۸۰
۷	۵۳۲۶۶۹/۶۲۰	۴۶۶۹۱۳۷۰
۸	۵۴۳۷۷۳/۵۴۰	۴۸۶۸۸۹۶۰
۹	۵۵۲۳۴۹/۷۹۰	۵۰۶۸۶۵۵۰
۱۰	۵۵۸۶۵۹/۵۴۰	۵۲۶۸۴۱۵۰
۱۱	۵۶۱۳۴۹/۱۹۰	۵۴۶۸۱۷۴۰

جدول ۴ میزان تولید نیروگاه‌ها (MWh)

بازه‌های زمانی	نیروگاه ۱		نیروگاه ۲		نیروگاه ۳		نیروگاه ۴		نیروگاه ۵	
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲
۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲	۴۰۰	۴۰۰	۹۰	۰	۱۳۰	۱۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۳	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۵	۰	۱۳۰	۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۴	۴۵۵	۴۵۵	۲۳۵	۲۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۵	۴۵۵	۴۵۵	۲۸۵	۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۶	۴۵۵	۴۵۵	۳۸۵	۱۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۷	۴۵۵	۴۵۵	۴۳۵	۲۲۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۸	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۲۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰
۹	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۳۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰
۱۰	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰
۱۱	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۷۰
۱۲	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۱۲۰
۱۳	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۲۰
۱۴	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۳۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۱۷	۰
۱۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۲۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۳۰	۰
۱۶	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰



جدول ۴ ادامه

بازه‌های زمانی	نیروگاه ۱		نیروگاه ۲		نیروگاه ۳		نیروگاه ۴		نیروگاه ۵	
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲
۱۷	۴۵۵	۴۵۵	۲۸۵	۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۱۸	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۰۰	۰
۱۹	۴۵۵	۴۵۵	۴۲۳	۲۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۶۲	۰
۲۰	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۰
۲۱	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۳۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۰
۲۲	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۵	۱۷۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۶۲	۰
۲۳	۴۵۵	۴۵۵	۴۵۲/۷۰	۰	۱۰۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰
۲۴	۴۵۵	۴۵۵	۲۵۲/۷۰	۰	۵	۳۰	۱۳۰	۱۳۰	۰	۰

جدول ۵ میزان تولید نیروگاه‌ها (MWh)

بازه‌های زمانی	نیروگاه ۶		نیروگاه ۷		نیروگاه ۸		نیروگاه ۹		نیروگاه ۱۰	
	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۱	حالت ۲
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۴/۹۹۷
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۹	۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۰	۶۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۱	۸۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۲	۸۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳	۵۵
۱۳	۶۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۴	۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۱۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۰	۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵
۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۵۵

شیکه‌های دیگر اولویت بیش‌تری پیدا می‌کند. همین‌طور، استفاده از منابع تجدیدپذیر برای افزایش سود و کاهش انتشار گازهای آلاینده و مصرف سوخت به صرفه است. البته با ذکر این نکته که نتایج عددی نشان می‌دهد که سیستم‌های ذخیره‌سازی تنها برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه به کار می‌روند. به نظر می‌رسد که با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده‌ی هرچه بیش‌تر از منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی و تامین تقاضای شبکه و کاهش انتشار گازهای آلاینده از این طریق، راه حل مناسب‌تری نسبت به بکارگیری نیروگاه‌های فسیلی با ظرفیت کم باشد. به علاوه می‌توان مسائل هم‌چون کاهش اتلاف انرژی در شبکه‌های انرژی را به عنوان مسائل تکمیلی در مدل‌سازی‌ها در نظر گرفت. بررسی مدل‌های زنجیره‌ی تامین انرژی، به خصوص

۶- نتیجه‌گیری
مدل برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط مطرح شده مجموعه‌ای از تصمیمات کلیدی از جمله میزان تولید انرژی توسط هر نیروگاه در شبکه را با تاکید بر مصرف سوخت برای برنامه‌ریزی زنجیره‌ی تامین انرژی اتخاذ می‌کند، به طوری که مصرف سوخت و جریان انرژی در شبکه بهینه گردد. مثال عددی در نظر گرفته شده برای اجرای مدل شامل ۱۱ نیروگاه است که سوخت مصرفی ۸ نیروگاه، گاز، ۲، نیروگاه گازوئیل و یک نیروگاه تجدیدپذیر است. با توجه به جواب‌های به دست آمده برای شبکه‌ی در نظر گرفته شده، به این نتیجه رسیده‌ایم که هر چه هدف کاهش انتشار گازهای آلاینده و مصرف سوخت اهمیت بیش‌تری داشته باشند، تامین تقاضای شبکه نسبت به فروش برق به



پارامترهایی نظیر مصرف انرژی در شبکه و ظرفیت تولید انرژی نیروگاه‌های تجدیدپذیر، در حالت غیرقطعی نیز می‌تواند به واقعی‌تر شدن و جامع‌تر شدن نتایج کمک شایانی نماید.

جدول ۶ وضعیت تقاضا و قیمت انرژی در افق زمانی

بازه زمانی (h)	تقاضا (MW)	قیمت انرژی (\$/MWh)
۱	۷۰۰	۳۱/۷۱
۲	۷۵۰	۲۹/۶۹
۳	۸۵۰	۲۷/۱۲
۴	۹۵۰	۲۷/۳۲
۵	۱۰۰۰	۲۸/۲۹
۶	۱۱۰۰	۲۷/۰۳
۷	۱۱۵۰	۳۰/۵۴
۸	۱۲۰۰	۲۲/۱۲
۹	۱۳۰۰	۳۴/۶۷
۱۰	۱۴۰۰	۳۴/۹۳
۱۱	۱۴۵۰	۳۵/۹۷
۱۲	۱۵۰۰	۳۵/۴۹
۱۳	۱۴۰۰	۳۶
۱۴	۱۳۰۰	۳۱/۹۲
۱۵	۱۲۰۰	۳۱/۶۳
۱۶	۱۰۵۰	۳۱/۹۸
۱۷	۱۰۰۰	۲۸/۸۲
۱۸	۱۱۰۰	۳۴/۶۹
۱۹	۱۲۰۰	۲۹/۸۲
۲۰	۱۴۰۰	۳۲/۹۲
۲۱	۱۳۰۰	۳۵/۹۷
۲۲	۱۱۰۰	۲۲/۵۶
۲۳	۹۰۰	۳۲/۵۵
۲۴	۸۰۰	۳۱/۰۹

جدول ۷ مشخصات سیستم‌های ذخیره‌سازی

واحد	Csto (\$/MWh)	SE_{kt}^{min} (MWh)	SE_{kt}^{max} (MWh)	η_k^{out}	η_k^{in}	α_k
سیستم‌های ذخیره‌سازی	۵	۰	۱۰	۱	۱	۱

جدول ۸ داده‌های نیروگاه‌های در نظر گرفته شده در شبکه

نیروگاه	P_i^{max} (MWh)	RD_i (MWh)	RU_i (MWh)	TD_i (h)	TU_i (h)	cap_{if} (m^3)	F_{if} (m^3/MWh)	EMF_{if} (kg/MWh)	$cpro_i$ (\$/MWh)	CSU_i (\$/h)	CSD_i (\$/h)
۱	۴۵۵	۲۰۰	۲۰۰	۸	۸	۱۵۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۱۶/۱۹	۱۰	۱۰
۲	۴۵۵	۲۰۰	۲۰۰	۸	۸	۱۵۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۱۷/۲۶	۱۰	۱۰
۳	۱۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	۵	۵۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۱۶/۶۰	۸	۸
۴	۱۳۰	۱۰۰	۱۰۰	۵	۵	۵۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۱۶/۵۰	۸	۸
۵	۱۶۲	۱۰۰	۱۰۰	۶	۶	۵۵۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۱۹/۷۰	۸	۸
۶	۸۰	۵۰	۵۰	۳	۳	۳۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۲۲/۲۶	۱۰	۱۰
۷	۸۵	۵۰	۵۰	۳	۳	۳۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۲۷/۷۴	۱۰	۱۰
۸	۵۵	۵۰	۵۰	۱	۱	۲۰۰۰۰	۱۱۱۱/۶۹۳	۳۱۵	۲۵/۹۲	۸	۸
۹	۵۵	۵۰	۵۰	۱	۱	۲۰	۱۲۲۳/۵۳۱	۰/۳۱۵	۲۷/۲۷	۸	۸
۱۰	۵۵	۵۰	۵۰	۱	۱	۲۰	۱۲۲۳/۵۳۱	۰/۳۱۵	۲۷/۷۹	۸	۸
۱۱	۱۰۰	-	-	-	-	-	-	-	۱۰	-	-



۸- مراجع

- [1] J. Silvente, G. M. Kopanos, E. N. Pistikopoulos, A. Espuña, A rolling horizon optimization framework for the simultaneous energy supply and demand planning in microgrids, *Applied Energy*, vol. 155, pp. ۴۸۵ – ۵۰۱, ۲۰۱۵.
- [2] C. Papapostolou, E. Kondili, J. K. Kaldellis, Energy Supply Chain Optimization: Special Considerations for the Solution of the Energy Planning Problem, *24th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Budapest, Hungary*, June 15-18, 2014.
- [3] C. Papapostolou, E. Kondili, I. K. Kaldellis, W. G. Früh, Energy Supply Chain modeling for the optimization of a large-scale energy planning problem, *12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Copenhagen, Denmark, 31 May – 4 June, 2015.
- [4] C. Zhang, Y. L. Wei, P. F. Cao, M. C. Lin, Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3091 – 3109, 2018.
- [5] L. Wang, C. Singh, Multicriteria Design of Hybrid Power Generation Systems Based on a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 24, pp. 163 – 172, 2009.
- [6] O. Akgul, N. Mac Dowell, L. G. Papageorgiou, N. Shah, A mixed integer nonlinear programming (MINLP) supply chain optimization framework for carbon negative electricity generation using biomass to energy with CCS (BECCS) in the UK, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 28, pp. 189 – 202, 2014.
- [7] S. Y. Balaman, H. Selim, A fuzzy multiobjective linear programming model for design and management of anaerobic digestion-based bioenergy supply chains, *Energy*, vol. 74, pp. 928 – 940, 2014.
- [8] C. Cambero, T. Sowlati, incorporating social benefits in multi-objective optimization of forestbased bioenergy and biofuel supply chains, *Applied Energy*, vol. 178, pp. 721 – 735, 2016.
- [9] M. Pérez-Fortes, J. M. Lainez-Aguirre, P. Arranz-Piera, E. Velo, L. Puigjaner, Design of regional and sustainable bio-based networks for electricity generation using a multi-objective MILP approach, *Energy*, vol. 44, pp. 79 – 95, 2012.
- [10] J. Ren, D. An, H. Liang, L. Dong, Z. Gao, Y. Geng, Q. Zhu, S. Song, W. Zhao, Life cycle energy and CO2 emission optimization for biofuel supply chain planning under uncertainties, *Energy*, vol. 103, pp. 151 – 166, 2016.
- [11] N. Shabani, S. Sowlati, M. Ouhimmou, M. Ronnqvist, Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty, *Energy*, vol. 78, pp. 346 – 355, 2014.
- [12] F. d'Amore, F. Bezzo, Strategic optimization of biomass-based energy supply chains for sustainable mobility, *Computer and Chemical Engineering*, vol. 87, pp. 68 – 81, 2016.
- [13] M. Zamarripa, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Graells, Detailed Operation Scheduling and Control for Renewable Energy Powered Microgrids, *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 2011.
- [14] E. Zondervan, I.E. Grossmann, A.B. de Haan, Energy optimization in the process industries: Unit Commitment at systems level, *20st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, ۲۰۱۰.
- [15] M. Carrión, J. M. Arroyo, A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 21, pp. 1371 – 1378, 2006.
- [16] S. Y. Balaman, H. Selim, A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems, *Applied Energy*, vol. 130, pp. 289 – 304, 2014.
- [17] T. Niknam, A. Khodaei, F. Fallahi, A new decomposition approach for the thermal unit commitment problem, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1668 – 1674, 2009.

