

ارائه مدل دوسطحه و چندهدفه جهت پیشنهاددهی راهبردی نیروگاه مجازی در بازار روز بعد

مرتضی شفیع‌خانی^۱، دانشجوی دکترا؛ علی بدری^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - m.shafiekhani@sru.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - ali.badri@sru.ac.ir

چکیده: تجمیع تعداد زیادی از واحدهای تولیدی با ظرفیت‌های کوچک با یکدیگر و تبدیل آن‌ها به نهادی بزرگ‌تر سبب دیده شدن آن‌ها در بازار برق و افزایش بهره‌وری اقتصادی آن‌ها می‌شود. نیروگاه مجازی^۱ سیستم گسترده مدیریت انرژی برای جمع‌آوری ظرفیت بارهای قابل‌قطع^۲، ذخیره‌سازها و تولیدات پراکنده^۳ به‌منظور ایجاد خدمات پشتیبانی از سیستم و بازاریابی انرژی می‌باشد. یکی از اهداف اصلی این مقاله ارائه روشی برای پیشنهاددهی بهینه نیروگاه مجازی در کنار رقبا در بازار روز بعد می‌باشد. برای دستیابی به این هدف یک مدل بهینه‌سازی دوسطحه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی ارائه شده است. سطح اول این مدل، بهینه‌سازی سود نیروگاه مجازی و سطح دوم بهینه‌سازی سطح رفاه اجتماعی را دربر می‌گیرد، مدل دوسطحه با استفاده از تئوری دوگانگی و شرایط بهینگی کروش-کاهن-تاکر^۴ به یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح^۵ تبدیل شده است. هدف دیگر این است که مسئله دوسطحه حاضر، به‌صورت دوهدفه با استفاده از روش محدودیت‌اپسیلون^۶ جهت بهینه‌سازی سود مدل خطی‌شده و کاهش آلاینده‌گی واحدهای نیروگاه مجازی نیز حل گردد. نهایتاً با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی بهترین پاسخ انتخاب گردیده است که مقدار سود در حالت دوهدفه ۴۱۴۲۹/۷ دلار و آلاینده‌گی نیز ۱۹۶۹/۹ پوند گردید که نسبت به حالت تک‌هدفه اعداد معقول‌تری می‌باشند. مدل عنوان‌شده بر روی شبکه ۲۴ شینه استاندارد IEEE مورد آزمون واقع شده و نتایج نشان از کارایی آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: نیروگاه مجازی، مدل دوسطحه، مدل دوهدفه، روش محدودیت اپسیلون، فاکتور توزیع انتقال توان، تصمیم‌گیری فازی، پیشنهاددهی راهبردی.

A Bi-Level Multi-Objective Model for Strategic Offering of Virtual Power Plant in Day-ahead Market

M. Shafiekhani¹, PhD Student; A. Badri², Assistant Professor

1- Electrical Engineering Department, Shahid Rajaee Techer Training University, Tehran, Iran, Email: m.shafiekhani@sru.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Shahid Rajaee Techer Training University, Tehran, Iran, Email: ali.badri@sru.ac.ir

Abstract: The accumulation of a large number of production units with small capacities and transforming them into a larger entity will make them visible in electricity market and increase their economic efficiency. Virtual power plant is a Wide energy management system that incorporates interruptible loads, storage and distributed generation in order to create support services of system and restoring energy. The main objective of this paper is to provide a method for optimizing virtual power plant bid along with other competitors in a day-ahead market. To achieve this goal a bi-level mathematical optimization model is presented in which equilibrium constraints are also taken into account. The first level of this model maximizes profit of virtual power plant and the second level maximizes social welfare problem. Bi-level model with the use of the theory of duality and optimality conditions of Karush-Kuhn-Tucker converts to a linear programming model of mixed-integer. This two level problem is also solved in a two-objective method using Epsilon constraint in order to maximize profits and minimize emission of units in virtual power plants. Finally, using fuzzy decision making the best answer is chosen and profit in two-objective mode is 41429.7d and pollution is 1969.9 pound, which compare with single-objective mode is more reasonable number. Proposed model is tested on IEEE 24-bus system and the results show the effectiveness of proposed method.

Keywords: Virtual power plant, two stage model, two objective model, epsilon constraint method, power transfer distribution factor, fuzzy decision making, strategic Offering.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۲ و ۱۳۹۶/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷

نام نویسنده مسئول: علی بدری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

این روزها، برخی عوامل مانند افزایش مصرف انرژی، استفاده رایج از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منابع ورودی و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با آن، سبب می‌شوند تا منابع انرژی فسیلی موضوع چالش‌برانگیزتری باشند [۱]. استفاده از منابع تولید پراکنده در سیستم برق مزایای ارزشمند و هزینه‌هایی را برای سیستم به دنبال دارند. علاوه بر این، اثرات فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر بر سیستم‌های برق آینده بسیار مؤثر و مهم هستند. هنگامی که منابع تولید پراکنده به بازار معرفی می‌شوند، چالش جدی برای صاحبان منابع تولید پراکنده در پی دارند و آن این است که خروجی پیش‌بینی شده برق منابع تولید پراکنده قطعیت ندارد. واضح است که تحت تأثیر سرعت باد و تابش خورشید و حرکت ابرها، نیروگاه‌های بادی و خروجی نیروگاه‌های خورشیدی به‌طور طبیعی دائمی نیستند [۲]. در این مورد، امکان وقف هدر انتقال برق وجود دارد که امری نگران‌کننده می‌باشد. بنابراین، برای رفع نگرانی‌های فوق، انواع ژنراتور و دستگاه‌های ذخیره‌سازی، تجدیدپذیر و یا غیرقابل تجدید، در قالب یک نیروگاه مجازی متصل می‌شوند. مفهوم نیروگاه مجازی به‌عنوان یک نهاد ناهمگن چند مکانی با چندین فن‌آوری بر اساس مجموع ظرفیت‌های منابع می‌باشد. علاوه بر این، در رابطه با نیروگاه مجازی، پروژه اروپایی فینکس^۷، این تعریف را ارائه می‌دهد: «یک نیروگاه مجازی، مجموعه‌ای از تولید پراکنده‌ها است که می‌تواند برای ایجاد قرارداد در بازار عمده‌فروشی و ارائه خدمات به اپراتور سیستم مورد استفاده قرار گیرد». به‌طور کلی، نیروگاه مجازی به دو دسته، نیروگاه مجازی تجاری^۸ و نیروگاه مجازی فی^۹ تقسیم می‌شود که در آن واحد تولید پراکنده را می‌توان به‌عنوان بخشی از هر دو آن‌ها استفاده کرد [۳].

۲- مروری بر منابع

استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر سبب مشکلات مختلفی در عملکرد و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت می‌شود زیرا این منابع غیرقابل پیش‌بینی هستند و تغییرات بسیاری در میزان سوخت اولیه آن‌ها (سرعت باد و شدت تابش خورشید) وجود دارد که باعث شده این منابع را غیرقابل برنامه‌ریزی بنامند [۴، ۵]. یکی از ویژگی‌های مهم نیروگاه مجازی توانایی شرکت در بازار انرژی است، لذا صاحبان این نیروگاه‌ها می‌توانند با تعیین راهبرد بهینه برای ارائه پیشنهاد به شبکه در راستای بیشینه‌سازی سود خود حرکت نمایند. اگرچه پژوهش‌های زیادی همچون [۶-۸] برای تعیین مدل‌های بهینه‌سازی راهبرد پیشنهادی بازار روز بعد برای نیروگاه‌های سنتی وجود دارد اما برای نیروگاه مجازی مقالات اندکی به این موضوع پرداخته‌اند. براساس پروژه فینکس [۳]، نیروگاه مجازی تجمیع‌کننده ظرفیت‌های چندین منبع انرژی پراکنده است که می‌تواند یک مشخصه عملکرد مجزا از ویژگی‌های پارامترهای مربوط به هر منبع انرژی پراکنده تهیه نماید و تأثیر شبکه را بر خروجی منابع انرژی پراکنده اعمال نماید. در [۹] نشان

داده شده است که مدل‌های تصادفی عملکرد بسیار بهتری نسبت به مدل‌های قطعی که به‌وسیله پیش‌بینی مستقیم مقادیر به‌دست می‌آید، دارند. مرجع [۱۰]، یک نیروگاه مجازی شامل یک منبع با میزان تولید تصادفی، یک وسیله ذخیره‌ساز و یک منبع تولید قابل کنترل می‌باشد. نیروگاه مجازی باهدف بیشینه‌سازی سود مورد انتظار اقدام به خریدوفروش برق، در بازار روز بعد و در بازار لحظه‌ای می‌نماید. مسئله ارائه پیشنهاد به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح دومرحله‌ای باهدف حداکثرسازی سود مورد انتظار ارائه شده است. در این مرجع پارامتر دارای عدم قطعیت خروجی توربین بادی بوده و قیمت‌های بازارها به‌صورت سناریو براساس اطلاعات گذشته به‌دست آمده است که باعث بالا رفتن حجم محاسبات می‌گردد. یک راهبرد پیشنهادی برای یک واحد تولیدکننده بادی با قدرت بازار که به‌صورت قیمت‌گذار در بازارهای روز بعد و تنظیم شرکت کرده در مرجع [۱۱] ارائه شده است. عدم قطعیت‌های مربوط به میزان توان تولیدی واحد بادی و قیمت بازار تنظیم به‌صورت یک مجموعه سناریوی دارای همبستگی ارائه گردیده است. در [۱۲] یک مدل دوسطحی برای یک تولیدکننده سنتی که به‌صورت راهبردی عمل می‌نماید ارائه شده است. اما در این پژوهش به‌جای تبدیل مدل به یک مسئله ریاضی با محدودیت‌های تعادلی از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات استفاده شده است. در [۱۱، ۱۳] مدل‌هایی جهت دستیابی به راهبردهای پیشنهادی بهینه برای یک تولیدکننده بادی که به‌صورت قیمت‌گذار عمل می‌نماید، ارائه شده است. در [۱۳] تولیدکننده بادی تنها در بازار تنظیم به‌صورت راهبردی ارائه پیشنهاد داده و در [۱۱] واحد بادی به‌صورت راهبردی در بازار روز بعد شرکت کرده و در بازار تنظیم تنها جبران گر انحرافات توان می‌باشد. هدف مقاله [۱۴] پیشنهاد یک روش مبتنی بر تعیین بهینه معاملات استراتژیک عامل‌های بازار برق است به‌نحوی که منجر به دستیابی نقطه تعادل نش گردد. در مرجع [۱۵] مدل‌سازی ائتلاف مابین منابع تولید و مصرف در بازار برق مبتنی بر عامل، با استفاده از قابلیت الگوریتم رهاسازی و تابع نیکایدو-ایزودا صورت گرفته است. مرجع [۱۶] یک مدل بهینه‌سازی سه‌مرحله‌ای دوسطحی را برای بهبود راهبرد پیشنهادی یک نیروگاه مجازی تجاری در بازار روز بعد ارائه داده است، این مجموعه شامل مزرعه بادی، دستگاه‌های ذخیره‌ساز و مصرف‌کنندگان مسکونی و یا تجاری است. عدم قطعیت‌های در نظر گرفته‌شده شامل میزان تولید مزرعه بادی، تقاضای مصرف‌کنندگان، منحنی‌های پیشنهادی رقبا و قیمت‌های تنظیم می‌باشد. مشکل اصلی این مدل عدم توجه به بارهای قابل قطع و آلاینده‌های واحدهای تولیدی نیروگاه مجازی می‌باشد، علاوه بر این شبکه و تأثیرات آن مانند پرشدگی خطوط نیز مورد توجه قرار نگرفته است. براین‌اساس در این تحقیق مدلی برای نیروگاه مجازی ارائه شده است که به‌صورت دوسطحه و دوهدفه به حل مسئله برنامه‌ریزی بهینه نیروگاه مجازی در حضور رقبا در بازار روز بعد می‌پردازد. سطح بالایی مدل ارائه‌شده شامل برنامه‌ریزی داخلی نیروگاه مجازی باهدف

استفاده از روش محدودیت اِپسیلون، نوآوری دیگر پیشنهاددهی استراتژیک نیروگاه مجازی با جزئیات مطرح شده در بازار می باشد. یکی دیگر از جنبه های نوآوری مدل ارائه شده این است که نیروگاه مجازی مذکور از طریق سه شین به شبکه اصلی متصل شده و به مبادله توان می پردازد. از فرمول بندی فاکتور توزیع انتقال توان برای مدل نمودن رابطه توان تزریقی به شین ها و توان جاری شده در خطوط استفاده گردیده است که بسیار کاراتر از فرمولاسیون گره ای هست به خصوص در مواقعی که اندازه شبکه بزرگ و تعداد شاخه های دچار تراکم افزایش می یابد. بخش های بعدی مقاله به این صورت است که در قسمت ۴ به فرمول بندی مسئله پرداخته خواهد شد، بخش ۵ به مطالعه موردی اختصاص خواهد داشت، نهایتاً در بخش ۶ به نتیجه گیری خواهیم رسید.

۳- فرمول بندی مسئله

تابع هدف سطح بالا بیشینه کردن سود مجموعه نیروگاه مجازی مشتمل بر واحدهای تولیدکننده سنتی و بارهای قابل قطع می باشد که در رابطه (۱) نشان داده شده است، عبارت $\lambda_{(n,t)} P_{(g,b,t)}^{VPP}$ غیرخطی می باشد، قیود (۲) و (۳) بیانگر شیب افزایش و کاهش تولید در واحدهای نیروگاه مجازی هستند. $\lambda_{(n,t)}$ نشان دهنده قیمت تسویه بازار در ساعت t و در شین n می باشد، عبارت $P_{(g,b,t)}^{VPP}$ توان تولیدی پله b واحد g در ساعت t مربوط به نیروگاه مجازی را نشان می دهد. عبارت $\lambda_{(g,b,t)}^{VPP}$ پله های پیشنهادی قیمت نیروگاه مجازی را نشان می دهد و در آن، t نشان دهنده زمان، b بیانگر پله ها و g نیز نشان دهنده واحد تولیدی نیروگاه مجازی می باشد. عبارات $P_{(il,t)}^{IL}$ و $\lambda_{(il,t)}^{IL}$ به ترتیب مقدار توان بار قابل قطع il در زمان t نیروگاه مجازی و مقدار قیمت آن را نشان می دهند. عبارات $R_{VPP(g)}^{up}$ و $R_{VPP(g)}^{down}$ نیز به ترتیب مقدار شیب افزایش و کاهش توان تولید واحد g نیروگاه مجازی را نشان می دهند.

Maximize Δ^{UL}

$$\left[\sum_{g,b,t} \lambda_{(n,t)} P_{(g,b,t)}^{VPP} - \sum_{il,t} P_{(il,t)}^{IL} \lambda_{(il,t)}^{IL} - \sum_{g,b,t} \lambda_{(g,b,t)}^{VPP} P_{(g,b,t)}^{VPP} \right] \quad (1)$$

$$\sum_b P_{(g,b,t+1)}^{VPP} - \sum_b P_{(g,b,t)}^{VPP} \leq R_{VPP(g)}^{up}, \forall t < T, \forall g \quad (2)$$

$$\sum_b P_{(g,b,t)}^{VPP} - \sum_b P_{(g,b,t+1)}^{VPP} \leq R_{VPP(g)}^{down}, \forall t < T, \forall g \quad (3)$$

تابع هدف سطح پایین (۴) بیانگر مسئله رفاه اجتماعی می باشد که در آن $\lambda_{(r,b,t)}^R$ و $P_{(r,b,t)}^R$ به ترتیب قیمت و توان رقبا در زمان t ، مربوط به پله b و رقیب r را نشان می دهند. در رابطه (۴) عبارت $\lambda_{(a,b,t)}^D$ قیمت پیشنهادی بار a در زمان t و پله b عبارت $P_{(a,b,t)}^D$ نیز توان پیشنهادی بار a در زمان t و پله b را نشان می دهد. رابطه (۵) محدودیت تعادل توان در کل سیستم را نشان می دهد. این معادله

بیشینه سازی سود و سطح پائینی نمایانگر مسئله تسویه قیمت در بازار روز بعد توسط اپراتور مستقل سیستم است، به تعبیر دیگری می توان گفت این مرحله همان مسئله رفاه اجتماعی است. این سطح به صورت خطی مدل شده، در نتیجه می توان گفت محدب است، لذا امکان جایگزینی آن با شرایط کراش-کاهن-تاکر مرتبه اول مهیا است. مدل حاصل شده یک مدل ریاضی با محدودیت های تعادلی هست که می توان آن را به وسیله شرایط بهینگی کاهن-تاکر و تئوری دوگانگی قوی به فرم مدل برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح تبدیل کرد. نهایتاً دو تابع هدف خواهیم داشت، تابع هدف اول همان مدل خطی شده فوق و تابع هدف دوم آلاینده گی واحدهای نیروگاه مجازی می باشد. در این مقاله از روش برنامه ریزی ریاضی چندهدفه^{۱۰} (MMP) برای حل مسئله دوهدفه سود و آلاینده گی استفاده شده است. روش برنامه ریزی ریاضی چندهدفه یک روش تحلیلی بوده و در مسائل برنامه ریزی چندهدفه کاربرد زیادی دارد. در مسائل برنامه ریزی چندهدفه بیشتر از یک تابع هدف وجود دارد و معمولاً یک جواب بهینه وجود ندارد که به طور همزمان تمامی توابع هدف را بهینه سازد. در این گونه مسائل معمولاً مجموعه ای از جواب ها برای مسئله به دست می آید که به هر کدام از این جواب ها، جواب پارتو^{۱۱} یا جواب غیر غالب^{۱۲} یا مرغوب^{۱۳} یا مؤثر^{۱۴} گفته می شود. هر چند که هر یک از جواب های پارتو در واقع برای یکی از توابع هدف، جواب بهینه می باشد، اما حداقل یکی از توابع هدف دیگر را از جواب بهینه دور می نماید. دو روش مرسوم برای حل برنامه ریزی چندهدفه روش ضرایب وزنی و روش محدودیت- اِپسیلون می باشند و با توجه به اینکه روش محدودیت- اِپسیلون در مقایسه با روش ضرایب وزنی مشکل مقیاس توابع را ندارد [۱۷-۱۹]، در این مقالات برای حل مسئله برنامه ریزی ریاضی چندهدفه از روش محدودیت- اِپسیلون استفاده شده است. هدف نهایی بیشینه سازی همزمان سود مدل خطی شده و کمینه سازی آلاینده گی واحدهای نیروگاه مجازی می باشد. در مدل دوسطحی، متغیرهای سطح اول شامل منحنی های چندپله ای پیشنهاد تأمین توان نیروگاه مجازی و مقدار توان قابل قطع بارهای قابل قطع است که از پس پردازش جواب مدل بهینه سازی سطح دوم حاصل می گردد. متغیرهای سطح دوم شامل متغیرهای مسئله رفاه اجتماعی است. این متغیرها شامل پله های پیشنهادی رقبا در بازار است. اجزای نیروگاه مجازی مورد مطالعه شامل بارهای قابل قطع و واحدهای تولیدکننده سنتی می باشد. تفاوت اصلی مدل ما با کار مرجع [۲۰، ۲۱] در پیشنهاددهی استراتژیک نیروگاه مجازی می باشد، این مرجع با توجه با قیمت های پیش بینی شده انرژی و رزرو اقدام به پیشنهاددهی نموده است ولی در مدل حاضر قیمت بازار با توجه به تابع هدف سطح دوم که تسویه بازار می باشد، مشخص می شود و مبنای پیشنهاددهی قرار می گیرد، ضمناً نیروگاه مجازی این مرجع از یک نقطه به شبکه متصل است و به مبادله توان می پردازد ولی در مدل ما از ۳ نقطه به شبکه متصل می باشد. نوآوری های مقاله عبارتند از حل مسئله برنامه ریزی دوهدفه سود و آلاینده گی در نیروگاه مجازی با

بیان شده مسئله تعیین بهترین راهبرد پیشنهادی نیروگاه مجازی به صورت فرم برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح زیر بیان می گردد که عبارت (۱۱) نشان دهنده تابع هدف خطی شده و عبارات (۱۲) تا (۴۵) نیز تمامی قیود مسئله بعد از خطی سازی را نشان می دهند:

$$\text{Maximize } \Delta^{UL} \cup \Delta^{LL}$$

$$f_1 = \sum_{d,b,t} \lambda_{(d,b,t)}^D P_{(d,b,t)}^D - \sum_{g,b,t} \lambda_{(g,b,t)}^{VPP} P_{(g,b,t)}^{VPP} - \sum_{r,b,t} \lambda_{(r,b,t)}^R P_{(r,b,t)}^R - \sum_{il,t} P_{(il,t)}^{IL} \lambda_{(il,t)}^{IL} - \sum_{r,b,t} \mu_{g,b,t}^{Rmax} P_{(r,b,t)}^{Rmax} - \sum_{d,b,t} \mu_{g,b,t}^{Dmax} P_{(d,b,t)}^{Dmax} - \sum_{k,t} f_k^{max} \mu_{k,t}^{max} - \sum_{k,t} f_k^{max} \mu_{k,t}^{min} \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} S_{mo}^k \left\{ \sum_{g,b} P_{(g,b,t)}^{VPP} + \sum_{r,b} P_{(r,b,t)}^R - \sum_{d,b} P_{(d,b,t)}^D \right\} + f_k^{max} \leq (1 - u_{k,t}^{min}) M_k^{max}, \forall m, \forall t \quad (12)$$

$$- \sum_{m \in M} S_{mo}^k \left\{ \sum_{g,b} P_{(g,b,t)}^{VPP} + \sum_{r,b} P_{(r,b,t)}^R - \sum_{d,b} P_{(d,b,t)}^D \right\} + f_k^{max} \leq (1 - u_{k,t}^{max}) M_k^{max}, \forall m, \forall t \quad (13)$$

$$P_{(g,b,t)}^{VPP} \geq 0, \forall g, \forall b, \forall t \quad (14)$$

$$P_{(d,b,t)}^D \geq 0, \forall d, \forall b, \forall t \quad (15)$$

$$P_{(r,b,t)}^R \geq 0, \forall r, \forall b, \forall t \quad (16)$$

$$\mu_{g,b,t}^{VPPmin} \geq 0, \forall g, \forall b, \forall t \quad (17)$$

$$\mu_{r,b,t}^{Rmin} \geq 0, \forall r, \forall b, \forall t \quad (18)$$

$$\mu_{d,b,t}^{Dmin} \geq 0, \forall d, \forall b, \forall t \quad (19)$$

$$\mu_{g,b,t}^{VPPmin} \leq M_{\phi}^{max} u_{g,b,t}^{min}, \forall g, \forall b, \forall t \quad (20)$$

$$\mu_{r,b,t}^{Rmin} \leq M_{\zeta}^{max} u_{r,b,t}^{min}, \forall r, \forall b, \forall t \quad (21)$$

$$\mu_{d,b,t}^{Dmin} \leq M_{\eta}^{max} u_{d,b,t}^{min}, \forall d, \forall b, \forall t \quad (22)$$

$$P_{(g,b,t)}^{VPP} \leq P_{(g,b,t)}^{VPPmax}, \forall g, \forall b, \forall t \quad (23)$$

$$P_{(r,b,t)}^R \leq P_{(r,b,t)}^{Rmax}, \forall r, \forall b, \forall t \quad (24)$$

$$P_{(d,b,t)}^D \leq P_{(d,b,t)}^{Dmax}, \forall d, \forall b, \forall t \quad (25)$$

$$\mu_{g,b,t}^{VPPmax} \geq 0, \forall g, \forall b, \forall t \quad (26)$$

$$\mu_{r,b,t}^{Rmax} \geq 0, \forall r, \forall b, \forall t \quad (27)$$

$$\mu_{d,b,t}^{Dmax} \geq 0, \forall d, \forall b, \forall t \quad (28)$$

$$\mu_{d,b,t}^{Dmax} \leq M_{\eta}^{max} u_{d,b,t}^{max}, \forall d, \forall b, \forall t \quad (29)$$

$$\mu_{g,b,t}^{VPPmax} \leq M_{\phi}^{max} u_{g,b,t}^{max}, \forall g, \forall b, \forall t \quad (30)$$

$$\mu_{r,b,t}^{Rmax} \leq M_{\zeta}^{max} u_{r,b,t}^{max}, \forall r, \forall b, \forall t \quad (31)$$

$$P_{(d,b,t)}^D \leq M_{\eta}^{max} (1 - u_{d,b,t}^{min}), \forall d, \forall b, \forall t \quad (32)$$

متضمن صفر بودن جمع جبری توان تزریقی منهای توان های مصرفی از سیستم است. رابطه (۶) حدود تولید توان توسط واحدهای نیروگاه مجازی و متغیرهای دوگان مرتبط با آن ها را بیان می کند. روابط (۷) و (۸) به ترتیب حدود توان و متغیرهای دوگان مربوط به رقبا و بارها را نشان می دهند. متغیر دوگان مربوط به معادله تعادل توان در کل سیستم، λ_n ، قیمت حاشیه سیستم است که بیانگر افزایش در هزینه (\$/h) عملکرد ساعتی سیستم برای تأمین ۱MW مصرف اضافی بار است. از آن رو که افزایش در تقاضا بایستی توسط تولیدکننده حاشیه ای تأمین گردد، که آن هم در باس مرجع سیستم قرار دارد، قیمت حاشیه ای سیستم با قیمت حاشیه ای باس مرجع یا λ_n برابر است.

$$\text{Minimize } \Delta^{LL}$$

$$\sum_{g,b,t} \lambda_{(g,b,t)}^{VPP} P_{(g,b,t)}^{VPP} + \sum_{r,b,t} \lambda_{(r,b,t)}^R P_{(r,b,t)}^R - \sum_{d,b,t} \lambda_{(d,b,t)}^D P_{(d,b,t)}^D \quad (4)$$

$$\sum_{g,b} P_{(g,b,t)}^{VPP} + \sum_{r,b} P_{(r,b,t)}^R - \sum_{d,b} P_{(d,b,t)}^D = 0: \lambda_n, \forall n, \forall t \quad (5)$$

$$0 \leq P_{(g,b,t)}^{VPP} \leq P_{(g,b,t)}^{VPPmax} : \mu_{g,b,t}^{VPPmin}, \mu_{g,b,t}^{VPPmax}, \forall g, \forall b, \forall t \quad (6)$$

$$0 \leq P_{(r,b,t)}^R \leq P_{(r,b,t)}^{Rmax} : \mu_{r,b,t}^{Rmin}, \mu_{r,b,t}^{Rmax}, \forall r, \forall b, \forall t \quad (7)$$

$$0 \leq P_{(d,b,t)}^D \leq P_{(d,b,t)}^{Dmax} : \mu_{d,b,t}^{Dmin}, \mu_{d,b,t}^{Dmax}, \forall d, \forall b, \forall t \quad (8)$$

محدودیت های مربوط به ظرفیت خطوط که توسط رابطه (۹) بیان شده متضمن محدود شدن توان عبوری از خطوط به میزان ظرفیت آن ها است. متغیرهای دوگان مربوط به کران های بالا و پایین محدودیت ها در زمان t و مربوط به خط k به ترتیب برابر است با $\mu_{k,t}^{min}, \mu_{k,t}^{max}$ این دو متغیر نشان دهنده حق عبور^{۱۵} ظرفیت انتقال (از هر دو جهت) است. محدودیت (۱۰) قیمت حاشیه ای محلی یا گره ای باس m در ساعت t را به وسیله متغیرهای دوگان مسئله سطح دوم یعنی $\lambda_{(o,t)}$ و $\mu_{k,t}^{min}$ و $\mu_{k,t}^{max}$ می دهد.

$$-f_k^{max} \leq \sum_{m \in M} S_{mo}^k \left\{ \sum_{g,b} P_{(g,b,t)}^{VPP} + \sum_{r,b} P_{(r,b,t)}^R - \sum_{d,b} P_{(d,b,t)}^D \right\} \leq f_k^{max}, \forall t, \mu_{k,t}^{min}, \mu_{k,t}^{max} \quad (9)$$

$$\lambda_{(m,t)} = \lambda_{(o,t)} - \sum_{k \in K} S_{mo}^k \{ \mu_{k,t}^{max} - \mu_{k,t}^{min} \}, \forall t, \forall m \quad (10)$$

۳-۱ برنامه ریزی خطی مختلط عدد صحیح

مسئله برنامه ریزی ریاضی بیان شده دارای دو بخش غیرخطی هست:

۱- عبارت $\lambda_{(n,t)} P_{(g,b,t)}^{VPP}$ در تابع هدف (۱).

۲- محدودیت های مربوط به شرایط تکمیلی. [16]

عبارت $\lambda_{(n,t)} P_{(g,b,t)}^{VPP}$ به وسیله تئوری دوگانی قوی و بعضی روابط ریاضی دیگر خطی می گردد [۱۱].

از سویی دیگر محدودیت های غیرخطی موجود در شرایط تکمیلی بایستی توسط فرم خطی معادل که از روش تبدیل فورتونی-امت^{۱۶} [۱۱] به دست می آید بازنویسی گردند. در انتها با استفاده از روابط خطی

هدف به‌طور جداگانه محاسبه می‌گردد. برای تابع هدف f_i این مقدار با f_i^* نشان داده می‌شود. سپس برای جوابی که تابع هدف f_i را بهینه نموده است، $(i = 1, 2, \dots, p)$ ، مقدار سایر توابع هدف دیگر محاسبه می‌گردد. بنابراین سطر f_i از جدول نتیجه نهایی به‌صورت $f_1^i, \dots, f_{i-1}^i, f_i^*, f_{i+1}^i, \dots, f_p^i$ خواهد بود. ستون f_i مذکور مقدار محاسبه‌شده برای تابع هدف f_i می‌باشد. براین اساس جدول نتیجه نهایی تشکیل خواهد شد [۱۶].

در رابطه (۴۷)، \bar{x}_i^* پاسخ بهینه حاصل از اجرای بهینه‌سازی انفرادی تابع هدف f_i می‌باشد. مقدار بیشینه و کمینه هر ستون جدول نتیجه نهایی، در واقع بازه تغییرات تابع هدف f_i خواهد بود. بهترین و بدترین مقدار هر تابع هدف در جدول نتیجه نهایی را به ترتیب، نقطه آرمانی^{۱۸} (f^U) و نقطه ندیر^{۱۹} (f^N) می‌گویند.

$$\emptyset = \begin{bmatrix} f_1^*(\bar{x}_1^*) & \dots & f_p^*(\bar{x}_1^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1^*(\bar{x}_p^*) & \dots & f_p^*(\bar{x}_p^*) \end{bmatrix} \quad (47)$$

براین اساس بازه تغییرات هر تابع را می‌توان براساس روابط زیر استخراج نمود:

$$f^U = [f_1^U, \dots, f_i^U, \dots, f_p^U] = [f_1^*(\bar{x}_1^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_i^*), \dots, f_p^*(\bar{x}_p^*)] \quad (48)$$

$$f^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_p^N] \quad (49)$$

در رابطه (۴۹) اگر قرار باشد تابع هدف f_i حداقل گردد، در این صورت داریم:

$$f_i^N = \text{Max}_{\bar{x}} f_i(\bar{x}), \quad \text{subject to } \bar{x} \in \Omega \quad (50)$$

اما اگر تابع هدف f_i باید حداکثر گردد، خواهیم داشت:

$$f_i^N = \text{Min}_{\bar{x}} f_i(\bar{x}), \quad \text{subject to } \bar{x} \in \Omega \quad (51)$$

Ω ناحیه جواب مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. جهت تعیین محدوده توابع هدف مسئله بهینه‌سازی می‌توان به‌جای استفاده از نقطه ندیر، از مفهوم نزدیک به آن یعنی نقطه ندیر مجازی^{۲۰} (f^{SN}) استفاده نمود. این نقطه را بر اساس نقاط آرمانی، ندیر و ندیر مجازی، برای یک مسئله نمونه با دو تابع هدف در شکل (۱) نشان داده شده است. رابطه زیر را می‌توان تعریف نمود:

$$f^{SN} = [f_1^{SN}, \dots, f_i^{SN}, \dots, f_p^{SN}] \quad (52)$$

$$f_i^{SN} = \text{Max} [f_i^*(\bar{x}_i^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_i^*), \dots, f_i^*(\bar{x}_p^*)] \quad (53)$$

لازم به‌ذکر است در مسئله مورد مطالعه، بازه تغییرات برای تابع هدف f_2 مشخص می‌گردد، زیرا، f_1 تابع هدف اصلی می‌باشد. سپس بازه تغییرات توابع هدف f_2 به q_2 قسمت تقسیم‌بندی می‌شوند.

$$P_{(g,b,t)}^{VPP} \leq M_{\phi}^{\max}(1 - u_{g,b,t}^{\min}), \forall g, \forall b, \forall t \quad (33)$$

$$P_{(r,b,t)}^R \leq M_{\zeta}^{\max}(1 - u_{r,b,t}^{\min}), \forall r, \forall b, \forall t \quad (34)$$

$$P_{(d,b,t)}^{D^{\max}} - P_{(d,b,t)}^D \leq M_{\eta}^{\max}(1 - u_{d,b,t}^{\max}), \forall d, \forall b, \forall t \quad (35)$$

$$P_{(g,b,t)}^{VPP^{\max}} - P_{(g,b,t)}^{VPP} \leq M_{\phi}^{\max}(1 - u_{g,b,t}^{\max}), \forall g, \forall b, \forall t \quad (36)$$

$$P_{(r,b,t)}^{R^{\max}} - P_{(r,b,t)}^R \leq M_{\zeta}^{\max}(1 - u_{r,b,t}^{\max}), \forall r, \forall b, \forall t \quad (37)$$

$$\mu_{k,t}^{\max} \geq 0, \forall m, \forall t \quad (38)$$

$$\mu_{k,t}^{\min} \geq 0, \forall m, \forall t \quad (39)$$

$$\mu_{k,t}^{\max} \leq u_{k,t}^{\max} M_k^{\max}, \forall m, \forall t \quad (40)$$

$$\mu_{k,t}^{\min} \leq u_{k,t}^{\min} M_k^{\max}, \forall m, \forall t \quad (41)$$

$$\lambda_{(r,b,t)}^R - \lambda_{(n,t)} + \mu_{g,b,t}^{R^{\max}} - \mu_{g,b,t}^{R^{\min}} + \sum_{k \in K} S_{mo}^k \{ \mu_{k,t}^{\max} - \mu_{k,t}^{\min} \} = 0, \forall r, \forall b, \forall t \quad (42)$$

$$\lambda_{(g,b,t)}^{VPP} - \lambda_{(n,t)} + \mu_{g,b,t}^{VPP^{\max}} - \mu_{g,b,t}^{VPP^{\min}} + \sum_{k \in K} S_{mo}^k \{ \mu_{k,t}^{\max} - \mu_{k,t}^{\min} \} = 0, \forall g, \forall b, \forall t \quad (43)$$

$$-\lambda_{(d,b,t)}^D + \lambda_{(n,t)} + \mu_{g,b,t}^{D^{\max}} - \mu_{g,b,t}^{D^{\min}} - \sum_{k \in K} S_{mo}^k \{ \mu_{k,t}^{\max} - \mu_{k,t}^{\min} \} = 0, \forall d, \forall b, \forall t \quad (44)$$

$$u_n^{\min}, u_n^{\max}, u_{r,b,t}^{\min}, u_{r,b,t}^{\max}, u_{g,b,t}^{\min}, u_{g,b,t}^{\max}, u_{d,b,t}^{\min}, u_{d,b,t}^{\max}, u_{k,t}^{\min}, u_{k,t}^{\max} \in \{0,1\} \quad (45)$$

همان‌طور که از رابطه (۴۵) مشخص است، مقادیر نشان داده‌شده متغیرهای دودویی هستند. عبارات $M_{\phi}^{\max}, M_{\eta}^{\max}, M_{\zeta}^{\max}, M_k^{\max}$ نیز مقادیر به‌اندازه کافی بزرگ هستند. عبارات $\mu_{g,b,t}^{VPP^{\max}}$ و $\mu_{g,b,t}^{VPP^{\min}}$ به ترتیب متغیرهای دوگان مربوط به بیشترین ظرفیت پله b واحد g و در زمان t نیروگاه مجازی می‌باشند. عبارات $\mu_{r,b,t}^{R^{\max}}$ و $\mu_{r,b,t}^{R^{\min}}$ به ترتیب متغیرهای دوگان مربوط به کمترین و بیشترین ظرفیت پله b رقیب r و در زمان t رقیب می‌باشند. عبارات $\mu_{d,b,t}^{D^{\max}}$ و $\mu_{d,b,t}^{D^{\min}}$ به ترتیب متغیرهای دوگان مربوط به کمترین و بیشترین ظرفیت پله b بار d و در زمان t بارها می‌باشند.

۳-۲ برنامه‌ریزی دوهدفه سود و آلودگی

قالب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به روش محدودیت-اپسیلون به‌صورت زیر می‌باشد [۲۲]:

$$\text{Min } f_1(x) \quad \text{subject to } f_2(x) \leq e_2 \quad (46)$$

برای مسئله دوهدفه سود و آلودگی واحدهای نیروگاه مجازی، f_1 به‌عنوان تابع هدف اصلی و f_2 به‌عنوان قید در نظر گرفته شده است. برای به‌کاربردن روش محدودیت-اپسیلون باید بازه تغییرات توابع هدف f_2 را مشخص نمود تا e_2 در این بازه‌ها مقداردهی شوند. رایج‌ترین رهیافت برای محاسبه این بازه‌ها، استفاده از جدول نتیجه نهایی (بازدهی)^{۱۷} می‌باشد که در ادامه شرح داده خواهد شد. اگر مسئله بهینه‌سازی مورد نظر دارای p تابع هدف باشد، آنگاه $p-1$ تابع هدف باید به‌عنوان قید در نظر گرفته شود. اصولاً برای تهیه جدول نتیجه نهایی برای p تابع هدف، در ابتدا مقدار بهینه هر یک از توابع

عضویت f_n در جواب پارتوی μ^r می‌باشد، در واقع نشان‌دهنده میزان بهینگی تابع هدف در جواب پارتوی μ^r می‌باشد. تابع عضویت کلی جواب پارتوی μ^r را μ^r نامیده که طبق رابطه (۵۹) محاسبه می‌شود، که ضریب وزنی تابع هدف n می‌باشد. مقادیر ضرایب وزنی توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌گردد. به‌عنوان مثال اگر مسائل اقتصادی برای تصمیم‌گیرنده در اولویت باشد، ضریب وزنی بزرگی به f_1 اختصاص می‌دهد. اما اگر آلودگی تولیدی مدنظر باشد، ضریب وزنی کوچکی را برای f_1 اختصاص می‌دهد، این ضریب برای تابع سود مقدار ۲ و برای تابع آلودگی مقدار ۱ را اختیار نموده است. جواب نهایی مسئله، جواب پارتو با بیشترین مقدار μ^r خواهد بود.

$$\mu^r = \frac{\sum_{n=1}^p W_n \mu_n^r}{\sum_{n=1}^p W_n} \quad (59)$$

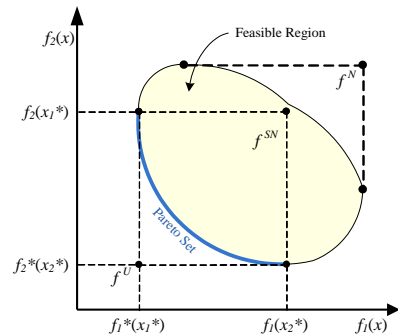
۳-۳- تابع هدف آلودگی:

میزان آلودگی واحدهای نیروگاه مجازی طبق رابطه خطی (۶۰) مدل شده است که مجموع تولیدات تمام پله‌های واحدهای نیروگاه مجازی در ضریب ثابت آلودگی همان واحد ضرب شده و آلودگی آن واحد را به دست می‌دهد.

$$\text{Minimize emission} \\ f_2 = \text{emissionconstant}(g, \alpha E) * \sum_b P_{(g,b,t)}^{VPP} \quad (60)$$

۴- مطالعه موردی:

سیستم مورد مطالعه در این مقاله، سیستم ۲۴ شینه استاندارد IEEE می‌باشد [۷]، نیروگاه مجازی مذکور قسمتی از سیستم ۲۴ شینه می‌باشد. شین‌های ۱، ۲ و ۷ تحت مالکیت نیروگاه مجازی می‌باشند. لازم به ذکر است بارهای نیروگاه مجازی از نوع قابل قطع هستند و قیمت قطع بار برای این بارها به ترتیب ۱۵، ۱۰ و ۱۵ دلار به ازای هر مگاوات ساعت قطع بار می‌باشد. سایر تولیدکنندگان در این سیستم به‌عنوان رقیب در نظر گرفته شده‌اند که عبارت‌اند از: R4, R3, R2, R1, R5, R6 و R7 و به ترتیب در شین‌های ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۲۲، ۲۱ و ۲۳ قرار دارند. این رقبا در کنار نیروگاه مجازی و بارهای موجود منحنی‌های پیشنهادی تولید و مصرف خود را به بازار ارائه می‌کنند که نهایتاً پس از تسویه بازار، مقدار توان و قیمت نهایی هر یک از آن‌ها مشخص خواهد شد. اطلاعات واحدهای تولیدی شامل واحدهای نیروگاه مجازی و سایر واحدها به همراه اطلاعات بارهای مصرفی براساس مرجع [۷] می‌باشند که در جدول (۲) نشان داده شده است. فرض شده است بارهای موجود در شبکه منحنی‌های پیشنهادی مصرف خود را در غالب پله‌های ۵ تایی و واحدهای تولیدی نیز منحنی پیشنهادی تولیدی خود را در غالب پله‌های ۴ تایی به بازار ارائه می‌دهند [۷]. از مجموعه بارهای موجود در شبکه ۲۴ شینه بیان شده که شامل ۱۷ بار در شین‌های مختلف می‌باشد، بارهای شماره ۱، ۲ و ۷ که به ترتیب در همین شین‌ها قرار دارند به‌عنوان بار قابل قطع برای نیروگاه مجازی می‌باشند که می



شکل (۱): نمایش تصویری نقاط آرمانی و ندیر برای یک مسئله نمونه با دو تابع هدف [۱۷]

با در نظر گرفتن مقادیر بیشینه و کمینه برای تابع هدف $(q_2 + 1)f_2$ نقطه وجود داشته و بنابراین مسئله بهینه‌سازی باید به $(q_2 + 1)$ زیرمسئله تبدیل می‌شود که جواب هر کدام از آن‌ها باید به دست آورده شود. بنابراین مسئله به صورت زیر خواهد شد:

$$\text{Max } f_1(x) \quad (54)$$

$$\text{subject to } f_2(x) < e_{2i} \quad (55)$$

$$e_{i,ni} = f_i^{SN} - \left[\frac{f_i^{SN} - f_i^U}{q_i} \right] \times ni \quad i = 1, \dots, p \ \& \ ni = 0, 1, \dots, q_2 \quad (56)$$

در رابطه (۵۶) دقت شود که در حالت کمینه‌سازی، مقادیر f_i^U و f_i^{SN} به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف f_i می‌باشد و در حالت بیشینه‌سازی به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار تابع هدف f_i است. با حل هر زیرمسئله، یک جواب پارتو به دست خواهد آمد. برای مسئله حاضر $q_2 = 10$ در نظر گرفته شده است.

۱-۲-۳- بهینه‌سازی:

$$\mu_n^r = \begin{cases} 0 & f_n^r \leq f_n^{SN} \\ \frac{f_n^r - f_n^{SN}}{f_n^U - f_n^{SN}} f_n^{SN} & f_n^r \leq f_n^U \\ 1 & f_n^r \geq f_n^U \end{cases} \quad (57)$$

۲-۲-۳- کمینه‌سازی:

$$\mu_n^r = \begin{cases} 1 & f_n^r \leq f_n^U \\ \frac{f_n^{SN} - f_n^r}{f_n^{SN} - f_n^U} f_n^U & f_n^r \leq f_n^{SN} \\ 0 & f_n^r \geq f_n^{SN} \end{cases} \quad (58)$$

پس از حل تمامی زیرمسئله‌ها و به دست آوردن کلیه جواب‌های پارتوی مسئله، تصمیم‌گیرنده^{۲۱} می‌بایست از میان جواب‌های پارتو به دست آمده با توجه به اولویت‌ها و همچنین کاربردهای متفاوت، یکی از جواب‌های پارتو را به‌عنوان جواب نهایی مسئله مورد نظر انتخاب نماید. بدین منظور روش پیشنهادی برای انتخاب بهترین جواب استفاده از یک رهیافت فازی با تابع عضویت خطی برای تصمیم‌گیرنده می‌باشد. تابع عضویت روش فازی پیشنهادی به صورت روابط (۵۷) و (۵۸) تعریف می‌شود که به ترتیب برای بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این روابط f_n^r مقدار تابع هدف f_n در جواب پارتوی μ^r ام و μ_n^r تابع

قابل قطع مقادیر نسبتاً بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند که مهم‌ترین دلیل آن پایین بودن قیمت تسویه بازار در این ساعات می باشد، قیمت تسویه بازار از ساعت ۹ رو به فزونی گذاشته است و از همین ساعت مقدار بارهای قابل قطع کمتر شده‌اند.

جدول (۱): مقادیر بار و پله‌های آن در ساعت ۱۰ در حالت تک‌هدفه

زمان	بار	پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴
t10	d1	۳۴/۲	۰	۰	۰
t10	d2	۳۰/۶	۰/۸۵	۰/۸۵	۰
t10	d3	۵۶/۷	۱/۵۷۵	۱/۵۷۵	۱/۵۷۵
t10	d4	۲۳/۴	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵
t10	d5	۲۲/۵	۰/۶۲۵	۰	۰
t10	d6	۴۳/۲	۱/۲	۱/۲	۰
t10	d7	۳۹/۶	۰	۰	۰
t10	d8	۵۴	۱/۵	۰	۰
t10	d9	۵۴/۹	۱/۵۲۵	۱/۵۲۵	۱/۵۲۵
t10	d10	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۱/۷
t10	d11	۸۳/۷	۲/۳۲۵	۲/۳۲۵	۰
t10	d12	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۰
t10	d13	۹۹/۹	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵
t10	d14	۳۱/۵	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵
t10	d15	۱۰۵/۳	۲/۹۲۵	۲/۹۲۵	۰
t10	d16	۵۷/۶	۱/۶	۰	۰
t10	d17	۴۰/۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	۰

مجدداً در ساعت ۲۴ که قیمت تسویه بازار کاهش چشم‌گیری را نشان داده است، مقادیر بار قابل قطع نیز رشد قابل توجهی را در مقایسه با ساعات قبل خود دارد. از ساعت ۱۱ تا ۱۵ و ۱۷ تا ۲۲ بارهای قابل قطع هیچ مقداری را قطع ننموده‌اند، مهم‌ترین دلیل آن مصرف کامل بارها در این ساعت می‌باشد. در میان ۷ واحدی که نقش رقیب برای نیروگاه مجازی را بازی می‌کنند، رقبای R1، R3، R4 و R6 پیشنهادات ارزان‌تری نسبت به رقبای R5، R2 و R7 دارند، لذا همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است، در ساعت اول فقط این ۴ واحد تولید داشته‌اند.

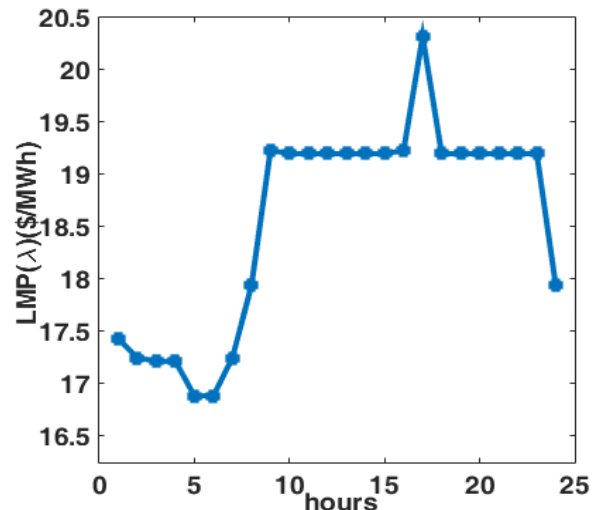
جدول (۲): مشخصات واحدهای تولیدی (نیروگاه مجازی و رقبا)

	VPP(g1)	VPP(g2)	VPP(g3)	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
$P_1^{max}(MW)$	۲۵	۱۵/۲	۲۵	۵۴/۲۵	۱۴۰	۶۸/۹۵	۶۸/۹۵	۱۴۰	۵۴/۲۵	۱۴۰
$P_2^{max}(MW)$	۲۵	۲۲/۸	۲۵	۳۸/۷۵	۹۷/۵	۴۹/۲۵	۴۹/۲۵	۹۷/۵	۳۸/۷۵	۹۷/۵
$P_3^{max}(MW)$	۲۰	۲۲/۸	۲۰	۳۱	۵۲/۵	۳۹/۴	۳۹/۴	۵۲/۵	۳۱	۵۲/۵
$P_4^{max}(MW)$	۲۰	۱۵/۲	۲۰	۳۱	۷۰	۳۹/۴	۳۹/۴	۷۰	۳۱	۷۰
$\lambda_1(\$/MWh)$	۱۸/۶۰	۱۱/۴۶	۱۸/۶۰	۹/۹۲	۱۹/۲	۱۰/۰۸	۱۰/۰۸	۱۹/۲	۹/۹۲	۱۹/۲
$\lambda_2(\$/MWh)$	۲۰/۰۳	۱۱/۹۶	۲۰/۰۳	۱۰/۲۵	۲۰/۳۲	۱۰/۶۶	۱۰/۶۶	۲۰/۳۲	۱۰/۲۵	۲۰/۳۲
$\lambda_3(\$/MWh)$	۶۷/۲۱	۱۳/۸۹	۶۷/۲۱	۱۰/۶۸	۲۱/۲۲	۱۱/۰۹	۱۱/۰۹	۲۱/۲۲	۱۰/۶۸	۲۱/۲۲
$\lambda_4(\$/MWh)$	۲۲/۷۲	۱۵/۹۷	۲۲/۷۲	۱۱/۲۶	۲۲/۱۳	۱۱/۷۲	۱۱/۷۲	۲۲/۱۳	۱۱/۲۶	۲۲/۱۳
$R^{up}(MW)$	۲۱۰	۶۰	۲۱۰	۹۰	۱۲۰	۹۰	۹۰	۱۲۰	۹۰	۱۲۰
$R^{down}(MW)$	۲۱۰	۶۰	۲۱۰	۹۰	۱۲۰	۹۰	۹۰	۱۲۰	۹۰	۱۲۰
emissioncon. (lb/MWh)	۱/۲	۱/۱۳۴۲	۱/۲							

توانند حداکثر تا ۴۰٪ بار خود را قطع نمایند. مسئله موردنظر به صورت تک‌هدفه و دوهدفه حل گردیده است که در ادامه تشریح خواهد شد.

۱-۴- مورد یک: حل تک‌هدفه مسئله (بدون پرشدگی خطوط)

برای این حالت معادلات (۱۱) تا (۴۵) حل گردیده است و زمان حل مسئله ۱۱/۵۹۴ ثانیه گردید. مقدار قیمت تسویه بازار در شکل (۲) نشان داده شده است. از آنجایی که هیچ‌یک از خطوط دچار پرشدگی نشده‌اند، قیمت تسویه بازار برای تمام ساعات در تمام شین‌ها مطابق شکل (۲) می‌باشد. جدول (۱) مقادیر بار پذیرفته‌شده در هر کدام از پله‌های پیشنهادی مصرف‌کنندگان را برای ساعت ۱۰ نشان می‌دهد.



شکل (۲): قیمت تسویه بازار در حالت تک‌هدفه

همان‌طور که از جدول (۱) مشخص است مقادیر پیشنهادی در اکثر بارها در بیش از ۳ پله موردقبول واقع شده است. از آنجایی که بار d2 در کنار واحد دوم نیروگاه مجازی قرار دارد و این واحد ارزان‌ترین واحد نیروگاه مجازی می‌باشد و این واحد در اکثر ساعات تمام پله‌های خود را بفروش رسانده است، لذا بار d2 بارهای بیشتری را نسبت به سایر بارهای موجود در نیروگاه مجازی مانند d1 و d7 مصرف نموده است.

شکل (۳) مقادیر بارهای قابل قطع را نشان می‌دهد، همان‌طور که از این شکل مشخص است، در ساعات ابتدایی بازه برنامه‌ریزی بارهای

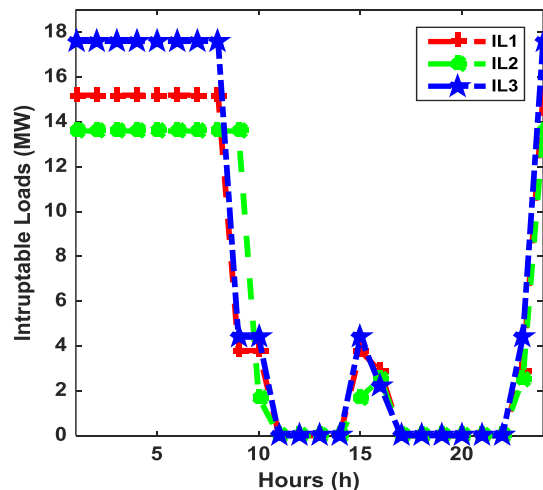
قیمت پیشنهادی در پله‌های دوم به بعد در واحدهای ۱ و ۳ نیروگاه مجازی می‌باشد، لذا این واحدها فقط پله اول پیشنهادی خود را تولید کرده‌اند.

۱-۱-۴- حل مسئله تک‌هدفه با فرض پیرشدگی خطوط:

در این مورد ظرفیت خط شماره ۷ را که بین شین ۳ و ۲۴ قرار دارد از ۴۰۰ مگاوات به ۱۰۰ مگاوات رسانده شد تا این خط دچار فشردگی شده و تأثیر آن مورد مطالعه قرار داده شود. لازم به ذکر است، توان عبوری از این خط در حالت عادی در برخی ساعات مانند ساعت ۱۷ مقدار ۱۴۰/۱ مگاوات بوده است. در این حالت سود مجموعه افزایش داشته است و از مقدار ۴۱۷۱۱/۶ دلار به مقدار ۴۴۲۴۲/۳ دلار رسیده است که مهم‌ترین دلیل آن می‌تواند افزایش قیمت تسویه بازار در شین‌ها و ساعات مختلف باشد که نمونه‌هایی از آن در شکل (۵) نشان داده شده است. مقادیر بار در ساعت ۱۰ در جدول (۴) نشان داده شده است، همان‌طور که از این جدول مشخص است بارهای اندکی در این ساعت پله پنجم خود را مصرف نموده‌اند. بارهای d1، d2 و d7 که جزو بارهای قابل قطع هستند، فقط پله اول خود را مصرف نموده‌اند و این بیانگر این موضوع است که پله‌های دیگر این بارها به‌عنوان بار قابل قطع، مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که توان جاری شده در خط شماره ۷ از سمت شین ۲۴ به سمت شین ۳ بوده است، لذا این فشردگی ایجاد شده توانسته توان مصرفی بار d3 موجود در شین ۳ را کاهش دهد، این مسئله از مقایسه جداول (۱) و (۴) مشهود است. جدول (۵) مقادیر واحدهای تولیدی نیروگاه مجازی را در ۱۲ ساعت ابتدایی برنامه‌ریزی نشان می‌دهد.

جدول (۳): توان تولیدی نیروگاه مجازی در حالت تک‌هدفه

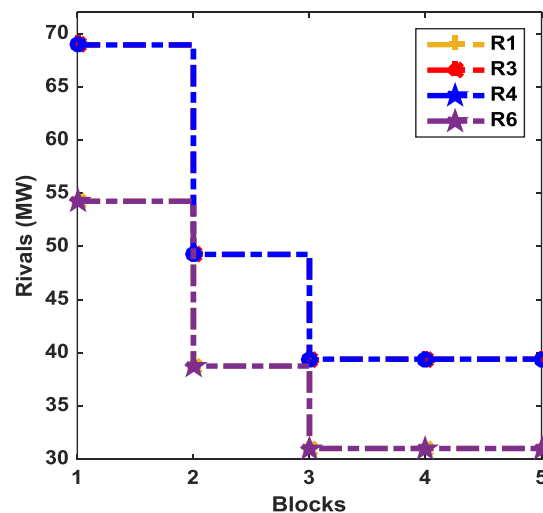
زمان		پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴
t1	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t2	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t3	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t4	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t5	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t6	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t7	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t8	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t9	PVPP(g1)	۲۵	.	.	.
t9	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t9	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.
t10	PVPP(g1)	۲۵	.	.	.
t10	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t10	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.
t11	PVPP(g1)	۲۵	.	.	.
t11	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t11	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.
t12	PVPP(g1)	۲۵	.	.	.
t12	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t12	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.



شکل (۳): بارهای قابل قطع در حالت تک‌هدفه

از جدول اطلاعات این واحدها مشخص است که واحدهای R1 و R6 دارای مشخصات یکسانی هستند، به همین نحو، واحدهای R3 و R4 نیز دارای ویژگی‌های کاملاً یکسانی هستند که این امر از خروجی این واحدها در شکل (۴) نیز قابل برداشت است. تمام این رقبا به‌طور کامل پله‌های پیشنهادی خود را تولید کرده‌اند.

نیروگاه مجازی مورد مطالعه دارای ۳ واحد تولیدی می‌باشد این واحدها به ترتیب در شین‌های ۱، ۲ و ۷ هستند. واحدهای ۱ و ۳ دارای مشخصات یکسانی هستند. در میان این واحدها، واحد ۲ دارای پله‌های قیمت پیشنهادی کمتری نسبت به سایرین می‌باشد. جدول (۳) مقادیر تولیدی نیروگاه مجازی در ۱۲ ساعت ابتدایی بازه برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مذکور مشخص است، در تمامی ساعات واحد ۲ تولید داشته است، تنها در ساعات ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ سایر واحدها در کنار واحد ۲ به تولید پرداخته‌اند.

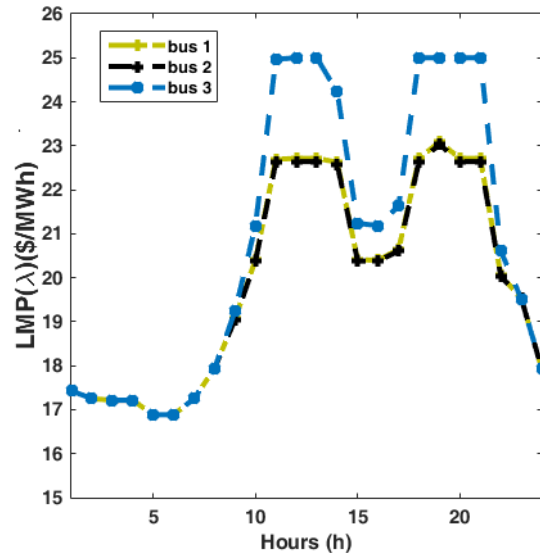


شکل (۴): مقدار توان رقبا در حالت تک‌هدفه در ساعت ۱

واحدهای ۱ و ۳ در زمان‌های تولید توان، فقط پله اول پیشنهادی خود را تولید کرده‌اند، در صورتی که واحد ۲ تمامی پله‌های خود را تولید کرده است. از آنجایی که قیمت تسویه بازار در ساعات ۹ تا ۱۲ کمتر از

جدول (۵): توان تولیدی نیروگاه مجازی در حالت پرشدگی

زمان		پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴
t1	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t2	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t3	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t4	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t5	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t6	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t7	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t8	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t9	PVPP(g1)	۲۵	.	.	.
t9	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t9	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.
t10	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t11	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t11	PVPP(g3)	۲۲/۱	.	.	.
t12	PVPP(g1)	۹/۵	.	.	.
t12	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t12	PVPP(g3)	۲۵	.	.	.



شکل (۵): قیمت تسویه بازار در حالت وجود فشرده‌گی در خط ۷

از آنجایی که واحد دوم نیروگاه مجازی ارزان‌ترین واحد نیروگاه مجازی می‌باشد، لذا در تمام ساعات تمام پله‌های پیشنهادی خود را تولید نموده است، از آنجایی که قیمت تسویه بازار از ساعت ۱۰ رشد پیدا کرده است، سایر واحدهای نیروگاه مجازی نیز شروع به تولید توان کرده‌اند.

۴-۲- مورد دوم: حل مسئله به صورت دوهدفه (بدون پرشدگی)

در این حالت مسئله به صورت دوهدفه حل می‌گردد. برای این امر تابع هدف اصلی و فرعی نیاز است، لذا تابع هدف مورد یک را به عنوان تابع هدف اصلی (f_1) و میزان آلاینده‌گی واحدهای نیروگاه مجازی به صورت قید یا تابع هدف فرعی (f_2) در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از روابط (۴۶) تا (۶۰) و با توجه به تابع هدف اصلی مسئله به صورت دوهدفه حل می‌گردد.

جدول (۴): مقادیر بار و پله‌های آن در حالت پرشدگی

زمان	بار	پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴	پله ۵
t10	d1	۳۳/۷	.	.	.	.
t10	d2	۲۰/۴	.	.	.	.
t10	d3	۵۶/۷	.	.	.	.
t10	d4	۲۲/۴	۰/۶۵	۰/۶۵	.	.
t10	d5	۲۲/۵	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵	.	.
t10	d6	۴۳/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	.
t10	d7	۳۹/۶	.	.	.	.
t10	d8	۵۴	۱/۵	۱/۵	۱/۵	.
t10	d9	۵۴/۹	۱/۵۲۵	۱/۵۲۵	.	.
t10	d10	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۱/۷	.
t10	d11	۸۳/۷	۲/۳۲۵	۲/۳۲۵	۲/۳۲۵	۲/۳۲۵
t10	d12	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۱/۷
t10	d13	۹۹/۹	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵	.
t10	d14	۳۱/۵	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵	۰/۸۷۵	.
t10	d15	۱۰۵/۳	۲/۹۲۵	۲/۹۲۵	۲/۹۲۵	.
t10	d16	۵۷/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶	.
t10	d17	۴۰/۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	.

بر این اساس نتایج متشکل از بیشترین و کمترین سود و همچنین بیشترین و کمترین آلاینده‌گی به صورت جدول (۶) درآمده است. برای استخراج جدول (۶) ابتدا مسئله به صورت تک‌هدفه با در نظر گرفتن سود حل گردید که حاصل آن به دست آمدن مقدار ۴۱۷۱۱/۶ دلار سود گشت، مقدار آلاینده‌گی به دست آمده نیز ۲۸۱۴/۲ پوند گشت که مقدار زیادی است. سپس همین مسئله به صورت تک‌هدفه و تنها با در نظر گرفتن تابع هدف آلاینده‌گی حل شد که مقدار آلاینده‌گی بسیار کاهش یافت و به عدد ۲۸۱/۴۲ پوند رسید و در این حالت مقدار سود به دست آمده نیز ۳۵۶۲۳/۵ دلار گشت که به نسبت حالت قبل عدد کمی است. نهایتاً مسئله با استفاده از روش محدودیت اپسیلون به صورت دوهدفه حل گشت که حاصل آن تعدادی پاسخ پارتو می‌باشد که به تفصیل راجع به آن صحبت خواهد شد.

با توجه با الگوی محدودیت اپسیلون که پیش از این تشریح شد، در این مقاله ۱۰ پاسخ پارتو به دست آمده است که با استفاده از روش فازی بیان شده در ادامه کار بهترین پاسخ انتخاب خواهد شد. با افزایش مقدار سود، مقدار آلاینده‌گی نیز رو به افزایش رفته است، چراکه این دو تابع هدف جهت‌های مخالفی نسبت به یکدیگر دارند.

تولید بیشتر در نیروگاه مجازی سبب رسیدن به سود بالاتری می‌گردد ولی با همین نسبت مقدار آلاینده‌گی واحدهای آن نیز افزایش می‌یابد، چراکه مقدار آلاینده‌گی واحدها با مقدار توان تولیدی آن‌ها رابطه مستقیم دارد (بالتبع اگر همین مقدار توان توسط شرکت‌های تولیدی تولید می‌شد مقدار بیشتری آلاینده‌گی ایجاد می‌گشت).

این بیان در شکل (۶) و جدول (۷) نشان داده شده است، همچنین در جدول (۷) نیز مقادیر این دو تابع هدف در کنار یکدیگر گزارش شده است.

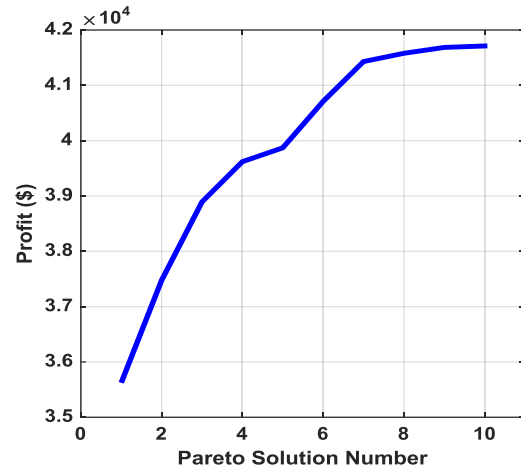
لازم به ذکر است که وجود بارهای قابل قطع و آلاینده‌گی هیچ تأثیری روی قیمت تسویه بازار ندارد، لذا از ترسیم خروجی آن صرف نظر شد، چراکه خروجی آن دقیقاً مشابه شکل (۲) شد.

جدول (۶): جدول خروجی نهایی (توابع هدف سود و آلاینده‌گی)

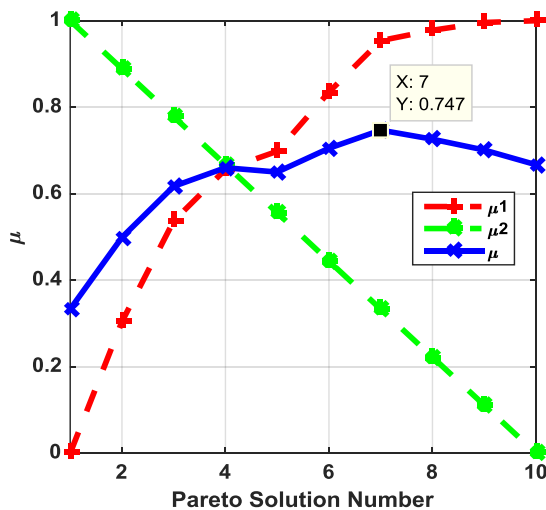
تابع هدف	کمترین مقدار	بیشترین مقدار
سود (\$)	۳۵۶۲۳/۵	۴۱۷۱۱/۶
آلودگی (lb)	۲۸۱/۴۲	۲۸۱۴/۲

جدول (۷): مقادیر توابع هدف سود و آلاینده‌گی

پاسخ پارتو	سود (\$)	آلاینده‌گی (lb)
۱	۳۵۶۲۳/۵	۲۸۱/۴
۲	۳۷۴۷۶/۰۷	۵۶۲/۸
۳	۳۸۸۹۲/۷	۸۴۴/۲
۴	۳۹۶۲۰/۰۴	۱۱۲۵/۶
۵	۳۹۸۷۰/۲	۱۴۰۷/۱
۶	۴۰۷۰۹/۵	۱۶۸۸/۵
۷	۴۱۴۲۹/۷	۱۹۶۹/۹
۸	۴۱۵۷۸/۹	۲۲۵۱/۳
۹	۴۱۶۸۵/۳	۲۵۳۲/۸
۱۰	۴۱۷۱۱/۶	۲۸۱۴/۲



شکل (۶): مقدار سود در حالت دوهده



شکل (۷): توابع عضویت خطی برای انتخاب بهترین پاسخ پارتو

از آنجایی که این دو معکوس یکدیگر هستند، باید مصالح‌های بین آن‌ها برای رسیدن به پاسخ مطلوب از میان پاسخ‌های پارتو برقرار نمود. مقدار کمینه و بیشینه هر یک از توابع هدف در جدول (۶) نیز گزارش شده است.

۳-۴- تصمیم‌گیری فازی

در مسائل با بیش از یک تابع هدف می‌بایست از میان جواب‌های پارتو به‌دست‌آمده با توجه به اولویت موردنظر، یکی از جواب‌ها به‌عنوان جواب نهایی مسئله موردنظر انتخاب گردد. یکی از مفیدترین و در عین حال ساده‌ترین روش‌های انتخاب بهترین پاسخ، روش تصمیم‌گیری فازی با توابع عضویت خطی می‌باشد. در اینجا با استفاده از روابط (۵۹) - (۵۷) و محاسبه مقادیر بهینگی و تابع عضویت، بهترین پاسخ از میان ۱۰ پاسخ پارتوی موجود به‌صورت شکل (۷) به‌دست می‌آید.

همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است، μ^1 مقدار تابع عضویت برای تابع هدف بیشینه‌شونده (سود) و μ^2 مقدار تابع عضویت برای تابع هدف کمینه‌شونده (آلاینده‌گی) می‌باشد، بعد از محاسبه این دو، مقدار تابع عضویت نهایی محاسبه‌شده و پاسخ پارتو شماره ۷ به‌عنوان بهترین پاسخ انتخاب شده است. در این پاسخ مقدار سود نهایی ۴۱۴۲۹/۷ دلار و مقدار آلاینده‌گی نیز ۱۹۶۹/۹ پوند گردیده است.

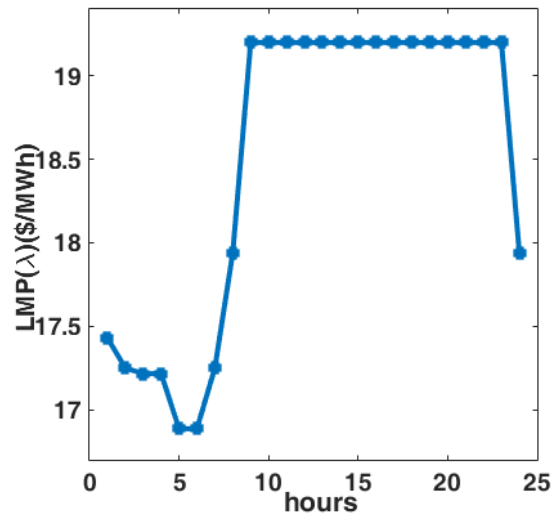
در اینجا نیز چون هیچ‌یک از خطوط دچار پرشدگی نشده‌اند، لذا قیمت تسویه بازار برای تمام شین‌ها یکسان است. در حالت دوهده مقدار تولید واحدها محدود گردیده است، لذا قیمت تسویه بازار نسبت به حالت تک‌هدفه در برخی ساعات کمتر گردیده است.

همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، قیمت تسویه بازار در بسیاری از ساعات دقیقاً مشابه حالت تک‌هدفه، بدون پرشدگی خطوط می‌باشد.

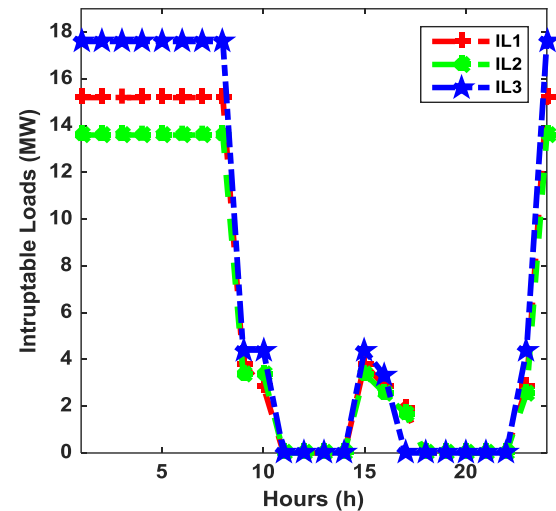
مقادیر بارهای قابل قطع در حالت دوهده در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، از ساعت ۱ تا ۸ بارهای قابل قطع مقادیر نسبتاً بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند، یکی از دلایل آن پایین بودن قیمت تسویه بازار در این ساعات می‌باشد، دلیل دیگر مصرف کم بارهای شماره ۱، ۲ و ۷ می‌باشد. محدودشدن تولید توسط واحدهای آلاینده نیز می‌تواند دلیلی بر این امر باشد. این بارها در این ساعات تقریباً فقط اولین پله پیشنهادی خود را مصرف نموده‌اند، لذا مانند حالت قبل مابقی توان خود را تا سقف ۴۰٪ به‌عنوان بار قابل قطع در اختیار شبکه قرار داده‌اند. در ساعات ۱۱ تا ۱۴ و ۱۷ تا ۲۲ تمام بارها، تقریباً تمام پله‌های پیشنهادی خود را مصرف نموده‌اند، لذا بارهای قابل قطع هیچ مقداری را به خود اختصاص نداده‌اند.

جدول (۸): مقادیر بار و پله‌های آن در ساعت ۱۰ در حالت دوهدفه

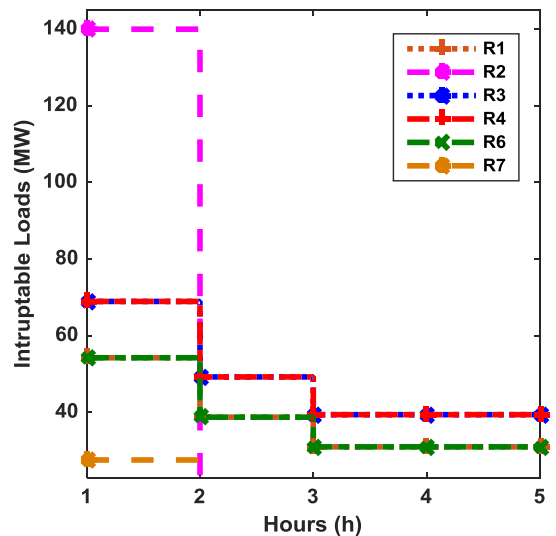
زمان	بار	پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴
t10	d1	۳۴/۲	۰/۹۵	۰	۰
t10	d2	۳۰/۶	۰	۰	۰
t10	d3	۵۶/۷	۱/۵۷۵	۱/۵۷۵	۱/۵۷۵
t10	d4	۲۳/۴	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵
t10	d5	۲۲/۵	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵	۰/۶۲۵
t10	d6	۴۳/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
t10	d7	۳۹/۶	۰	۰	۰
t10	d8	۵۴	۱/۵	۰	۰
t10	d9	۵۴/۹	۱/۵۲۵	۱/۵۲۵	۱/۵۲۵
t10	d10	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۰
t10	d11	۸۳/۷	۲/۳۲۵	۲/۳۲۵	۰
t10	d12	۶۱/۲	۱/۷	۱/۷	۱/۷
t10	d13	۹۹/۹	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵	۲/۷۷۵
t10	d14	۳۱/۵	۰/۸۷۵	۰	۰
t10	d15	۱۰۵/۳	۲/۹۲۵	۲/۹۲۵	۲/۹۲۵
t10	d16	۵۷/۶	۱/۶	۱/۶	۱/۶
t10	d17	۴۰/۵	۱/۱۲۵	۱/۱۲۵	۰



شکل (۸): قیمت تسویه بازار در حالت دوهدفه



شکل (۹): بارهای قابل قطع در حالت دوهدفه



شکل (۱۰): مقدار توان رقبا در حالت دوهدفه در ساعت ۱۰

شکل (۱۰) مقادیر تولید واحدهای رقیب را در ساعت ۱۰ نشان می‌دهد، همان‌طور که از این شکل مشخص است، رقیب‌های R4، R3، R1 و R6 که واحدهای ارزانی هستند، تمام پله‌های خود را به‌فروش رسانده‌اند. در ساعت ده برای اولین بار R2 به تولید توان پرداخته است، البته این رقیب فقط توانسته پله اول پیشنهاد خود را بفروشد. همان‌طور که از جدول (۷) مشخص است به‌جز بارهای d1، d2 و d7 که جزو بارهای قابل قطع هستند، مقادیر پیشنهادی در اکثر بارها در بیش از دو پله مورد مصرف قرار گرفته است. با افزایش قیمت تسویه بازار مقدار بارها نیز رو به افزایش رفته است، این فرایند در ساعت ۲۴ که قیمت تسویه بازار افت پیدا کرده نیز خود را نشان می‌دهد و مقادیر بارها نیز کاهش می‌یابد. از میان ۳ واحد تولیدی نیروگاه مجازی، واحدهای ۱ و ۳ دارای مشخصات یکسانی هستند، حتی ضرایب آلاینده‌های این‌ها نیز با یکدیگر برابر است. جدول (۸) مقادیر تولیدی نیروگاه مجازی در ۱۲ ساعت ابتدایی بازه برنامه‌ریزی برای حالت دوهدفه در پاسخ پارتو شماره ۷ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از جدول مذکور مشخص است، در این حالت نسبت به تک‌هدفه تولید نیروگاه مجازی کاهش یافته است، این به‌دلیل محدود شدن تولید در راستای کاهش مقدار آلاینده‌های این واحدها می‌باشد. باید توجه داشت چون واحد ۲ نسبت به واحدهای ۱ و ۳ نیروگاه مجازی قیمت‌های پایین‌تری را پیشنهاد داده است، لذا فقط همین واحد موفق به تولید توان گشته است.

- [3] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac, "The FENIX vision: The Virtual Power Plant and system integration of distributed energy resources," Imperial College, prosinac, 2006.
- [4] L. Xie et al., "Wind integration in power systems: Operational challenges and possible solutions," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 214-232, 2011.
- [5] B. C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, W. L. Kling, and A. J. Brand, "Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch," IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 1, pp. 44-51, 2007.
- [6] C. K. Simoglou, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, "Optimal self-scheduling of athermal producer in short-term electricity markets by MILP," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 4, pp. 1965-1977, 2010.
- [7] C. Ruiz and A. J. Conejo, "Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 4, pp. 1855-1866, 2009.
- [8] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou, and A. G. Bakirtzis, "Optimal bidding strategy in transmission-constrained electricity markets," Electric Power Systems Research, vol. 109, pp. 141-149, 2014.
- [9] M. Rahimiyan, J. M. Morales, and A. J. Conejo, "Evaluating alternative offering strategies for wind producers in a pool," Applied energy, vol. 88, no. 12, pp. 4918-4926, 2011.
- [10] H. Pandžić, J. M. Morales, A. J. Conejo, and I. Kuzle, "Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming," Applied Energy, vol. 105, pp. 282-292, 2013.
- [11] L. Baringo and A. J. Conejo, "Strategic offering for a wind power producer," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 4, pp. 4625-4655, 2013.
- [12] G. Zhang, G. Zhang, Y. Gao, and J. Lu, "Competitive strategic bidding optimization in electricity markets using bilevel programming and swarm technique," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 6, pp. 2138-2146, 2011.
- [13] M. Zugno, J. M. Morales, P. Pinson, and H. Madsen, "Pool strategy of a price-maker wind power producer," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3440-3450, 2013.

[۱۴] مریم رضانیان لنگرودی، سید مازیار میرحسینی مقدم و

بهنام علیزاده، «استفاده از روش یادگیری رقابتی برای قیمت‌دهی استراتژیک شرکت‌های تولید بر اساس LMP در بازار برق»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۵۴۹-۵۳۷، ۱۳۹۶.

[۱۵] معصومه جوادی، موسی مرزبند و سید مازیار میرحسینی

مقدم، «مدیریت بهینه ریزشبکه‌ها به همراه استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۹۵-۱۰۷، ۱۳۹۵.

- [16] E. G. Kardakos, C. K. Simoglou, and A. G. Bakirtzis, "Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bi-level approach," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, pp. 794-806, 2016.

جدول (۹): توان تولیدی نیروگاه مجازی در حالت دوهدفه

زمان		پله ۱	پله ۲	پله ۳	پله ۴
t1	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t2	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۴/۸۸
t3	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۰
t4	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۰
t5	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۰
t6	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۰
t7	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t8	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t9	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t10	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t11	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲
t12	PVPP(g2)	۱۵/۲	۲۲/۸	۲۲/۸	۱۵/۲

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای پیشنهاددهی بهینه نیروگاه مجازی به بازار روز بعد در کنار رقبا پیشنهاد داده شده است. برای دستیابی به این هدف یک مدل بهینه‌سازی دوسطحه ریاضی با محدودیت‌های تعادلی ارائه شده است. سطح اول این مدل، بیشینه‌سازی سود نیروگاه مجازی و سطح دوم بیشینه‌سازی سطح رفاه اجتماعی را دربر گرفته است. مدل دوسطحه با استفاده از تئوری دوگانگی و شرایط بهینگی کروش-کاهن-تاکر به یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح تبدیل شده است. این مسئله دوسطحه به‌صورت دوهدفه با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون در جهت بیشینه‌سازی سود مدل خطی شده و کاهش آلاینده‌گی واحدهای نیروگاه مجازی نیز حل گردیده است. از آنجایی‌که توان عبوری از خطوط در محدوده مجاز ظرفیت خطوط قرار داشت، لذا هیچ خطی دچار پرشدگی نشده و قیمت‌های گره‌ای در تمام شین‌ها یکسان گردید. در راستای بررسی تأثیر پرشدگی خطوط بر روی قیمت‌های تسویه بازار، ظرفیت یکی از خطوط کاهش داده شد و تأثیر پرشدگی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. به‌جای پخش بار DC از مدل PTDF در راستای ارتباط بین توان تزریقی به شین و توان عبوری از خطوط استفاده گردید. نهایتاً تعدادی پاسخ پارتو به‌دست آمد و با استفاده از روش تصمیم‌گیری فازی بهترین پاسخ انتخاب گردید. در انتخاب این پاسخ مصالحه‌ای بین سود و آلودگی ایجاد گردید و با توجه به اینکه تابع هدف سود از اهمیت بالاتری نسبت به تابع هدف آلاینده‌گی برخوردار می‌باشد، بهترین پاسخ به‌دست آمد.

مراجع

- [1] R. Leão et al., "The future of low voltage networks: Moving from passive to active," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, no. 8, pp. 1506-1512, 2011.
- [2] R. Vigotti, "International energy agency photovoltaic power systems implementing agreement," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 4, no. 5, pp. 389-395, 1996.

- [20] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 949-956, 2011.
- [21] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part II: Numerical analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 957-964, 2011.
- [22] M. Esmaili, N. Amjady, and H. A. Shayanfar, "Multi-objective congestion management by modified augmented ϵ -constraint method," *Applied Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 755-766, 2011.
- [17] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems," *Applied mathematics and computation*, vol. 213, no. 2, pp. 455-465, 2009.
- [18] M. Majidi, S. Nojavan, N. Nourani Esfetanaj, A. Najafi-Ghalelou, and K. Zare, "A multi-objective model for optimal operation of a battery/PV/fuel cell/grid hybrid energy system using weighted sum technique and fuzzy satisfying approach considering responsible load management," *Solar Energy*, vol. 144, no. 2, pp. 79-89, 2017.
- [19] S. Nojavan, M. Majidi, A. Najafi-Ghalelou, M. Ghahramani, and K. Zare, "A cost-emission model for fuel cell/PV/battery hybrid energy system in the presence of demand response program: ϵ -constraint method and fuzzy satisfying approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, no. 3, pp. 383-392, 2017.

زیر نویس ها

- ¹ Virtual Power Plant
- ² Curtailment Load
- ³ Distributed Generation
- ⁴ Karush-Kuhn-Tucker
- ⁵ Mixed-Integer Linear Programming
- ⁶ Epsilon Constraint
- ⁷ Fenix
- ⁸ Commercial VPP
- ⁹ Technical VPP
- ¹⁰ Multi-objective Mathematical Programming
- ¹¹ Pareto Optimal
- ¹² Non-dominated Optimal
- ¹³ Non-inferior
- ¹⁴ Efficient
- ¹⁵ Scarcity
- ¹⁶ Fortuny-Amat
- ¹⁷ Payoff Table
- ¹⁸ Utopia Point
- ¹⁹ Nadir Point
- ²⁰ Pseudo Nadir Point
- ²¹ Decision-maker