

بررسی ظرفیت بهینه‌ی تولید انرژی با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی (مطالعه‌ی موردی نیروگاه سیکل ترکیبی شریعتی)

محمد رضا لطفعلی پور*

استاد، دانشکده‌ی علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه فردوسی مشهد، lotfalipour@um.ac.ir

فریده حلوائی

کارشناس ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، f.halvaei@gmail.com

مرتضی بستام

کارشناسی ارشد توسعه‌ی اقتصادی و برنامه‌ریزی، دانشگاه فردوسی مشهد،
morteza.bastam@gmail.com

چکیده

فعال‌تر شدن خصوصی‌سازی در بازار برق کشور، ضرورت توجه به سودآوری نیروگاه‌های تولید برق و حرکت به سمت رقابت را جایگزین انحصار دولتی کرده است. در فرایند حداکثر سازی سود بازار برق، عواملی با ویژگی عدم صراحت وجود دارند. این عدم صراحت باید در مدل‌های بهینه‌سازی بنگاه وارد شود. یکی از راه‌های آن استفاده از منطق و ریاضیات فازی می‌باشد. در این مقاله مسأله‌ی برنامه‌ریزی تولید نیروگاه برق شریعتی با استفاده از منطق و ریاضیات فازی انجام گرفته است. بر این اساس در بررسی مجموعه‌ی بهینه‌ی جواب‌ها، از روش NSGAI استفاده شده است. میزان بهینه‌ی تولید برق برای ژنراتورها در فاصله‌ی زمانی ۲۴ ساعت و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود به‌گونه‌ای تعیین شده است که اولاً، در هر ساعت میزان تقاضای بار نیروگاه برآورد شود، ثانیاً نوعی از تخصیص که بتواند بیش‌ترین سود را برای نیروگاه ایجاد کند، در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از روش فازی می‌توان سود بیش‌تری را نسبت به وضعیت فعلی نیروگاه به‌دست آورد.

طبقه بندی JEL: C61, D24

کلید واژه: منطق فازی، بهینه‌یابی، سود، نیروگاه سیکل ترکیبی شریعتی.

۱- مقدمه

تجدید ساختار به مفهوم دور شدن از انحصار و ایجاد شرایط رقابتی برای به‌دست آوردن سود بیش‌تر اقتصادی در بازارهای رقابتی است. اهداف مهمی که قانون‌گذاران بازار برق به دنبال آن هستند فراهم آوردن شرایطی است که افزایش رفاه اجتماعی و کاهش قیمت برق را به دنبال داشته باشد. از سویی ایجاد محدودیت در بازار برای بازیگران و دخالت در بازار سبب کاهش رفاه اجتماعی خواهد شد (دبیرخانه‌ی هیأت تنظیم بازار برق، ۱۳۸۷). یکی از محدودیت‌های پیش روی تولیدکنندگان در بازار برق ایران، عدم اختیار مالک نیروگاه به تغییر آرایش تولید واحدهای نیروگاهی تحت مالکیت خود در بازارهای روز بعد^۱ می‌باشد. این محدودیت می‌تواند سبب بهره‌برداری از واحدهای نیروگاهی در نقطه‌ای دورتر از نقطه‌ی بهینه‌ی اقتصادی شود. هم‌چنین، با توجه به عدم قطعیت‌های موجود برای ارائه‌ی پیشنهاد، مالک نیروگاه با چند واحد نیروگاهی، از مجموع ظرفیت پذیرفته شده‌ی واحدهای خود در هر یک از ساعات بازه‌ی ۲۴ ساعته‌ی روز بازار اطلاع و یقین نخواهد داشت (این عدم قطعیت با افزایش سطح رقابت بازار، بیش‌تر نیز خواهد شد) و نمی‌تواند پله‌های قیمت‌دهی واحدهای نیروگاهی خود را به گونه‌ای انتخاب کند که با توجه به ظرفیت پذیرفته شده در بازه‌ی مورد نظر، از واحدهای خود در نقطه‌ی بهینه بهره‌برداری نماید.

مطالعه‌ی شرایط حاکم بر بازار برق نشان دهنده‌ی عدم قطعیت داده‌ها و مؤلفه‌های مؤثر در تصمیم‌گیری مربوط به تولید برق می‌باشد، بنابراین لازم است در برنامه‌ریزی برای تولید برق، از روش‌هایی استفاده شود که در ورودی آن‌ها عدم قطعیت داده‌ها لحاظ شود. از جمله‌ی این روش‌ها نظریه‌ی منطق و ریاضیات فازی است. برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی تولید یک نیروگاه می‌توان مسأله‌ی تخصیص واحد در سیستم‌های انحصاری را برای یک بنگاه با چند ژنراتور و با هدف حداکثر کردن سود آن انجام داد. تخصیص واحد^۲، یک مسأله‌ی تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای با هدف تعیین زمان‌بندی ساعت روشن و خاموش بودن و سطح تولید هر واحد سیستم قدرت در یک افق زمانی مشخص است (پاترا و همکاران^۳، ۲۰۰۹). در سیستم‌های انحصاری تولید و بازار برق، هدف تخصیص واحد، کاهش هزینه‌های تولید برق است و به دنبال آن

1- Day Ahead Market

2- Unit Commitment (UC)

3- Patra et. al.

هزینه‌های تولیدی حداقل می‌شود. با تجدید ساختار صنعت برق، مسأله‌ی تخصیص واحد که توسط اپراتور بازار انجام می‌شود، می‌تواند توسط هر واحد تولیدی و با هدف حداکثر کردن سود تولیدکنندگان نیروی برق انجام گیرد. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای حل این مسأله پیشنهاد شده است که معیار برتری آن‌ها جهت استفاده، به‌دست آوردن بهترین جواب تابع هدف و کم‌ترین زمان لازم برای حل مسأله است، زیرا در این مسأله برنامه و الگوریتم مورد استفاده به جستجو در ترکیبات مختلف ممکن می‌پردازد و از بین آن‌ها ترکیبی انتخاب می‌شود که هدف مسأله را بیش از سایرین برآورده می‌کند.

تئوری جدید عدم حتمیت در سال ۱۹۶۵ توسط لطفی عسگر زاده^۱ ابداع شده که به تئوری ریاضیات فازی معروف است. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های فازی در حوزه‌های مختلف کاربرد فراوانی یافته است. در ریاضیات معمول اعداد به صورت صریح وارد مدل‌ها می‌شوند، درحالی‌که در ریاضیات فازی، از اعداد فازی استفاده می‌شود که دارای مرکز و پهنا است و هر عدد فازی با یک تابع عضویت نمایش داده می‌شود. بدین منظور می‌توان از روش فازی برای بهینه‌یابی مدل استفاده کرد.

در ادامه، در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع و پیشینه‌ی تحقیق انجام می‌شود. بخش ۳، به روش‌شناسی تحقیق می‌پردازد. در بخش ۴، مدل برآورد شده و نتایج تجربی بیان شده و سرانجام در بخش ۵ خلاصه‌ای از نتایج و پیشنهادات ارائه می‌شود.

۲- مروری بر ادبیات موضوع و پیشینه‌ی تحقیق

بهینه‌سازی یا بهینه‌یابی فرآیند، یافتن شرایطی است که طی آن مقدار بیشینه یا کمینه‌ی یک تابع در شرایط داده شده به دست می‌آید و با واژه‌هایی مانند روش‌های جستجوی بهینه و روش‌های برنامه‌ریزی مترادف است. در حقیقت برنامه‌ریزی و بهینه‌یابی در مفهوم ریاضی دارای بار معنایی مشابهی هستند. مفهوم بهینه‌سازی به دو دسته‌ی مسأله‌ی پویا و ایستا تقسیم می‌شود. مسأله‌ی اقتصادی کردن ایستا، عبارت از توزیع منابع کمیاب بین عوامل رقیب در یک لحظه‌ی معین از زمان است. از نظر ریاضی، این مسأله به دنبال تعیین مقدار متغیرهای تابع هدف مسأله در یک بازه مشخص است به طوری که بتواند آن تابع را با توجه به محدودیت‌های موجود، حداکثر

کند. مسأله بهینه‌سازی پویا، عبارت از تخصیص منابع کمیاب بین عوامل رقیب در فاصله‌ی زمانی اولیه تا زمان نهایی است (اینتریلیگیتور، ۱۳۸۷). از دیدگاه برنامه‌ریزی پویا، مسائل تصمیم‌گیری چند مرحله‌ای شامل مجموعه‌ای از مسائل بهینه‌یابی است که در آن، مجموعه‌ی جواب هر مسأله، به عنوان ورودی در مسأله‌ی دیگر وارد می‌شود و هدف نهایی مسأله‌ی را بهینه می‌کند. چنین مسائلی در دنیای واقعی کاربرد فراوان دارند (اس اس راثو، ۱۳۸۴). یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفی را می‌توان به صورت زیر

$$\text{بیان کرد: } X = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{cases} \text{ را به گونه‌ای بیابید:}$$

$$\min f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)$$

$$\text{s.t. } g_j(X) \leq 0; j = 1, 2, \dots, m$$

که در آن اندیس k نشان‌دهنده‌ی تعداد توابع هدفی است که باید حداقل شود. ممکن است هر یک یا همه‌ی توابع $f_i(X)$ و $g_j(X)$ غیرخطی باشند. مسأله‌ی بهینه‌سازی چند هدفی را با عنوان مسأله‌ی کمینه‌سازی یک بردار هم می‌شناسند. مسائل مربوط به بهینه‌یابی ظرفیت تولید را می‌توان به دو دسته‌ی بلندمدت - میان مدت و کوتاهمدت تقسیم کرد. در دسته‌ی اول، در مسائل بهینه‌یابی بلندمدت - میان مدت به انتخاب نوع تکنولوژی مورد استفاده و ظرفیت تولید برای تأسیس و نصب واحدهای انرژی در این صنعت پرداخته می‌شود. دسته‌ی دوم، شامل برنامه‌ریزی در کوتاهمدت، تنها برای انتخاب ظرفیت تولید است. در این مجموعه از مطالعات پس از نصب ظرفیت تولیدی به دست آمده از مطالعات دسته‌ی قبل، هدف، انتخاب میزان تولید بهینه در فواصل کوتاهمدت برای واحدهای تولید برق است، به طوری که از لحاظ اقتصادی بتواند اهداف مورد نظر را برآورده کند. این فاصله‌ی زمانی بین یک روز تا یک هفته است و مسأله‌ی تعیین زمان‌بندی و تخصیص بار تقاضا شده در بازار بین نیروگاه‌های تولید برق (مسأله‌ی تخصیص واحد) مورد بررسی قرار می‌گیرد، بنابراین با یک مسأله‌ی بهینه‌یابی پویا روبه‌رو هستیم. به دلیل تابع هدف پیچیده‌ی مسأله‌ی تخصیص واحد، حل آن پیچیده و مشکل است. تکنیک‌های بهینه‌یابی بسیاری برای حل

مسئله تخصیص واحد وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی^۱ و روش‌های ابتکاری^۲ تقسیم‌بندی کرد. از جمله روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان به روش‌های برنامه‌ریزی خطی، روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی مانند روش تخفیف لاگرانژ، برنامه‌ریزی پویا و روش شاخه و کران^۳ اشاره کرد. پرکاربردترین روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی پیشنهاد شده، برنامه‌ریزی پویا و تخفیف لاگرانژ هستند که برای توسعه‌ی برنامه‌های تخصیص واحد در مقیاس صنعت، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزیت اصلی این روش‌ها کم‌تر (منطقی‌تر) بودن زمان محاسبه‌ی مورد نیاز برای آن‌ها در مقایسه با دیگر روش‌هاست. در سال‌های اخیر تکنیک‌های ریاضی برای حل مسئله (تخصیص واحد به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای توسعه‌ی الگوریتم‌های جدید در محاسبات ریاضی بهبودهایی انجام گرفته است که به تشکیل روش‌هایی مانند گدازندگی شبیه‌سازی شده^۴، جستجوی تابو^۵، الگوریتم ژنتیک^۶، الگوریتم ژنتیک تخفیف لاگرانژ^۷ و برنامه‌ریزی تکاملی^۸ منجر شده است. در بین روش‌های ابتکاری، تکنیک‌های لیست اولیه و شبکه‌ی عصبی^۹ کاربرد کاربرد فراوانی یافته‌اند. استراتژی‌های ابتکاری که برای کاهش زمان محاسبه معرفی شده‌اند، نیاز به جستجوی پویا را محدود می‌کنند. ساده‌ترین روش حل مسئله‌ی تخصیص واحد، روش طرح‌های لیست اولیه^{۱۰} است، که شامل ایجاد یک لیست اولیه از واحدها می‌باشد. لیست اولیه می‌تواند با یک روش ساده و با توجه به هزینه‌ی تولید متوسط بار کامل هر واحد به دست آید. هزینه‌ی تولید متوسط بار کامل به‌صورت نرخ حرارتی خالص در بار کامل ضربدر هزینه‌ی سوخت تعریف شده است. از دیگر روش‌های ابداعی، استفاده از منطق و ریاضیات فازی است (پاترا و همکاران، ۲۰۰۹).

-
- 1- Mathematical Programming Methods
 - 2- Heuristic Methods
 - 3- Branch and Bound Technique
 - 4- Simulated Annealing
 - 5- Tabu Search
 - 6- Genetic Algorithm
 - 7- Lagrangian Relaxation Genetic Algorithm
 - 8 Evolutionary Programming
 - 9- Neural Network
 - 10- Priority-List Schemes

تنها امین‌لویی و قادری^۱ (۲۰۱۰)، در یک افق زمانی فصلی و برای ماه‌های آن، با هدف مینیمم کردن هزینه‌ی تولید، در دو مرحله به تعیین میزان برق تولید شده توسط هر نوع تکنولوژی تولید برق پرداخته‌اند. در مرحله‌ی اول، مقدار تقاضای آبی برای دوره‌ی مورد نظر پیش‌بینی و در مرحله‌ی دوم، مقدار تقاضای هر دوره با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۲ (AHP) و برنامه‌ریزی تولید کل فازی (FAPP)^۳ به روش‌های متفاوت تولید برق - مثل بخار، گاز، سیکل ترکیبی و نیروگاه‌های آبی - تخصیص داده شده است.

لین و همکاران^۴ (۲۰۰۹)، با در نظر گرفتن سه نوع نااطمینانی شامل ارزش‌های فاصله‌ای، مجموعه‌های فازی و توزیع‌های احتمال، ترکیبی از سه مدل برنامه‌ریزی پارامتری - فاصله‌ای^۵ (ILP) برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای (TSP) و برنامه‌ریزی فازی^۶ (FP) را برای برنامه‌ریزی سیستم انرژی ایجاد کرده‌اند که سناریوهای سناریوهای متفاوتی از تقاضای انرژی را ایجاد می‌کند. نویسندگان، ظرفیت تولید را برای هر یک از تکنولوژی‌های تولید در سطح کلان و در ۵ دوره‌ی زمانی مورد مطالعه قرار داده‌اند. سپس مسأله‌ی تخصیص بار به انواع تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است.

هنریچ و همکاران^۷ (۲۰۰۷)، ضمن یادآوری نااطمینانی‌های موجود در صنعت برق، با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی چندهدفه، راه‌حلی را برای عرضه‌ی الکتریسیته ارائه داده‌اند که نااطمینانی مربوط به رشد تقاضا در آن‌ها لحاظ شده است. مدل مورد استفاده در این مقاله، ارزش حال هزینه‌های کل سناریوهای مختلف تولید برق را حداقل می‌کند. برای در نظر گرفتن نااطمینانی و اهداف چندگانه، تکنیک برنامه‌ریزی تصادفی به کار گرفته شده است. نویسندگان مدل را برای بخش انرژی آفریقای جنوبی اجرا کرده‌اند. فولی و همکاران^۸ (۲۰۱۰)، انواع روش‌های بهینه‌یابی در صنعت برق را در حالت‌ها و شرایط مختلف بازار مطرح نموده‌اند. اینگوین و فینگر^۹

1- Tanha Aminloei & Ghaderi.

۲- روشی برای اولویت‌بندی عناصری که تصمیم‌گیری درباره‌ی آن‌ها انجام می‌شود.

3- Analytical Hierarchy Process

4- Fuzzy Aggregate Production Planning

5- Lin et al

6- Interval-Parameter Programming

7- Two-Stage Stochastic Programming

8- Fuzzy Programming

9- Heinrich et al

10- Foley et al

11- Nguene & Finger

(۲۰۰۷)، روش فازی را برای ارزیابی استراتژی‌های مختلف عرضه‌ی انرژی توسط یک توزیع کننده‌ی نیروی برق به کار برده‌اند. سمپر و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، هزینه‌های تولید الکتریسیته را برای روش‌های مختلف تولید با استفاده از روش فازی مقایسه و لیانگ و همکاران^۲ (۲۰۰۶)، مدلی را برای ارزیابی فازی پروژه‌های تولید برق و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی ایجاد کرده‌اند. صادقی و میرشجاعیان حسینی^۳ (۲۰۰۶)، نااطمینانی در عرضه‌ی انرژی در ایران را با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی فازی نشان داده‌اند. آزاده و همکاران^۴ (۲۰۰۸)، با استفاده از روش فازی به تخمین تابع تقاضای برق در ایران پرداخته‌اند. مدینا و مورنو^۵ (۲۰۰۷)، با استفاده از منطق فازی ریسک موجود در بازار برق کلمبیا را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در برخی مقالات میزان خطا در پیش‌بینی تقاضای بار و میزان نیازمندی به رزرو چرخان^۶ به‌عنوان متغیرهای فازی استفاده شده‌اند و خروجی این منطق، با یک نماینده در تابع هدف ظاهر می‌شود. سپس مسأله به‌دست آمده با استفاده از روش‌های مرسوم حل می‌شود (ویکتور و جیاکومار^۷، ۲۰۰۶؛ صابر و همکاران^۸، ۲۰۰۷). در برخی دیگر از مقالات، به‌طور مستقیم از منطق فازی برای حل مسأله‌ی تخصیص واحد استفاده شده است. در این روش‌ها متغیرهای مهم برای تصمیم‌گیری در مدل تخصیص واحد، به‌عنوان ورودی و خروجی منطق فازی به کار رفته‌اند. برای مثال هزینه‌های تولید، میزان تولید، میزان نیازمندی به رزرو چرخان، میزان تقاضا و غیره، که با استفاده از توابع عضویت، به مدل وارد شده‌اند (پاترا و همکاران، ۲۰۰۹). در زیر نمونه‌هایی از مسائل برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ظرفیت تولید برق بیان می‌شود:

راگلند و همکاران^۹ (۲۰۱۰)، مسأله‌ی تخصیص واحد مبنی بر سود^{۱۰} را که در آن هدف حداکثر کردن سود واحدهای تولیدی است، در یک محیط مقررات زدایی شده^۱ و رقابتی برای یک نیروگاه حل کرده‌اند.

- 1- Samper et al
- 2- Liang et al
- 3- Sadeghi & Mirshojaeian Hosseini
- 4- Azadeh et al
- 5- Medina & Moreno

۶- مقدار بار قابل عرضه‌ی یک واحد منهای بار عرضه‌ی شده آن

- 7- Victoire & Jeyakumar
- 8- Saber et al
- 9- Raglend et al
- 10- Profit based Unit Commitment Problem

چاندرام و همکاران^۲ (۲۰۱۱)، به مسأله‌ی تخصیص واحد و توزیع بار بین واحدهای تولیدی تخصیص یافته پرداخته‌اند. هدف، مسأله کمینه‌کردن تابع هزینه‌ی تولید برق است که از مجموع سه نوع هزینه‌ی سوخت، هزینه‌ی روشن‌شدن و هزینه‌ی خاموش‌شدن واحدها به‌دست می‌آید. هم‌چنین میزان تولید به‌دست آمده باید میزان تقاضای برق را تأمین کند. روش ارائه شده در مقایسه با روش‌های قبلی جواب‌های بهتری به‌دست می‌آورد و زمان محاسبه‌ی کم‌تری را صرف می‌کند.

دلارو و هاسلر^۳ (۲۰۰۸)، با استفاده از روشی جدید مسأله‌ی تخصیص واحد را حل کرده‌اند. در این روش بنگاه تولیدی در هر ساعت برای بار تقاضا شده در تعداد ساعت مشخصی پیش‌بینی جدیدی انجام می‌دهد و با فرض این که اولین پیش‌بینی دقیق انجام گیرد، با حل مسأله برای هر ساعت با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی، پیش‌بینی خود را از تقاضای ساعت بعد تعدیل می‌کند.

نیکنام و همکاران^۴ (۲۰۰۹)، مسأله‌ی تخصیص واحد حرارتی را به دو زیر مسأله، یعنی تعیین وضعیت مناسب روشن و خاموش واحدهای تولیدی به عنوان مسأله‌ی اصلی و تعیین مقطع بعدی برای تکرار مسأله اصلی به عنوان زیر مسأله، تقسیم کردند. مسأله‌ی اصلی با روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح و زیرمسأله با استفاده از جواب مسأله‌ی اصلی به نتیجه‌ی بهینه می‌رسد.

۳- روش شناسی تحقیق

منطق فازی، در پی گسترش ریاضیات فازی به وجود آمده است که به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم حتمیت شناخته شده است. این روش، مسائلی را که با قدرت تصمیم‌گیری انسان مرتبط است، مورد خطاب قرار می‌دهد و می‌تواند راه‌حل‌های دقیق را از اطلاعات مشخص یا تقریبی به‌دست آورد. کنترل‌کننده‌های فازی، به عنوان یکی از کاربردهای منطق فازی، برای مدل‌بندی پروسه‌ی تصمیم‌گیری بر اساس دانش، از قوانین ساده‌ای استفاده می‌کنند. طراحی یک

1- Deregulation

2- Chandram et al

3- Delarue & haeseleer

4- Niknam et al

کنترل‌کننده‌ی فازی به جای طراحی الگوریتم‌هایی که عمل کنترل را به‌عنوان تابعی از متغیرهای ورودی کنترل‌کننده تعریف می‌کنند، متغیرهای ورودی را با متغیرهای کنترل و به‌وسیله‌ی قوانین مناسب، در قالب گزاره‌های متغیرهای زبانی مرتبط می‌کند. پس از تعریف متغیرهای ورودی فازی و قوانین، پروسه‌ی کنترل با محاسبه‌ی تمام نتایج ممکن از قوانین انجام می‌شود. سپس تمام نتایج در یک مجموعه به‌عنوان مجموعه‌ی عمل کنترل جمع می‌شوند. از جمله کنترل‌کننده‌های فازی، کنترل‌کننده میدان‌ی است که هدف اصلی آن تشریح وضعیت پروسه‌ها با متغیرهای زبانی و استفاده از این متغیرها به عنوان ورودی قوانین کنترل است. گزاره‌های متغیرهای زبانی، مجموعه‌های فازی با شکلی خاص هستند، که از بین آن‌ها مجموعه‌های فازی مثلثی و دوزنقه‌ای، به‌دلایل محاسباتی، متداول‌ترند.

از آن‌جا که پروسه‌های تکنیکی و عملیاتی به خروجی‌های مشخص نیاز دارد، باید نتایج فازی را به اعداد معین تبدیل کرد. روش‌های متداول برای این منظور عبارتند از: روش COA^۱ (مرکز ناحیه) یا مرکز ثقل^۲، عمل کنترلی را که در مرکز ناحیه قرار دارد و درجه‌ی عضویت آن بزرگ‌تر از صفر است، انتخاب می‌کند. روش COS^۳ (مرکز مجموع) یا دونیم‌کننده^۴، حالت ساده شده‌ای از روش COA است، که مجموعه‌ی فازی نتایج تجمیع شده را به حساب نمی‌آورد، در عوض، مجموعه‌ی فازی نتیجه شده از ارزیابی هر قانون را به‌طور جداگانه در نظر می‌گیرد. روش MOM^۵ (متوسط بیشینه)، تنها قسمتی از مجموعه‌ی فازی، نتیجه را با حداکثر درجه‌ی عضویت در نظر می‌گیرد. نتیجه، میانگین فاصله‌ی مربوطه عمل کنترل ممکن است. روش‌های LOM^۶ و SOM^۷، بزرگ‌ترین و کوچکترین مقدار عمل کنترل با بالاترین عضویت را در نظر می‌گیرند (زیمرمن و براون^۸، ۱۹۹۶).

-
- 1- Center of Area
 - 2- Centroid
 - 3- Center of Sums
 - 4- Bisector
 - 5- Mean of Maxima
 - 6- Largest of Maximum
 - 7- Smallest of Maximum
 - 8- Zimmermann & Braun

شرایط بهینه‌یابی در صنعت برق

در شرایط بازار و صنعت برق انحصاری هدف از مسأله‌ی تخصیص واحد حداقل کردن هزینه‌های تولید برق است و تابع هدف مسأله به صورت زیر می‌باشد:

$$\min \sum_{i \in T} \sum_{i \in I} c_{it}^p + c_{it}^u + c_{it}^d \quad (2)$$

که از سه جزء ساخته شده است: c_{it}^p : هزینه‌ی عملیاتی تولید برق در زمان t برای هر ژنراتور، c_{it}^u : هزینه‌ی روشن کردن هر ژنراتور در زمان t و c_{it}^d : هزینه‌ی خاموش کردن هر ژنراتور در زمان t .

در یک بازار برق تجدیدساختار شده، هدف مسأله تخصیص واحد و برنامه‌ریزی تولید برق به صورت زیر است:

$$\text{Maximize } \sum_i \sum_t F(i, t) \quad (3)$$

که در آن $F(i, t)$ سود (تفاوت دریافتی‌ها و هزینه‌ها) است. برای واحد i و در زمان t ، سود به قرار زیر است:

$$F(i, t) = \begin{cases} \rho_{gm}(t)P(i, t) + \rho_{rm}(t)R(i, t) + \rho_{nm}(t)N(i, t) \\ -C_i(P(i, t) + R(i, t) + N(i, t)) - S(i, t) \end{cases} I(i, t) + \{\rho_{nm}(t)N(i, t) - C_i(N(i, t))\} (1 - I(i, t)) \quad (4)$$

در این مدل، هدف، ماکزیمم کردن سود بنگاه تولید برق است. درآمد تولید برق، فروش برق و محصولات جانبی تولیدی و هزینه‌ی آن، هزینه‌های روشن و خاموش کردن واحدها و هزینه‌ی سوخت مصرفی است. در این مسأله نیز محدودیت‌ها مانند مسأله‌ی قبل می‌باشد. در این مدل درآمد حاصل از فروش برق، فروش رزرو چرخان و رزرو غیرچرخان منهای هزینه‌های تولید برق، رزرو چرخان و رزرو غیرچرخان و هزینه‌ی روشن کردن واحدها، به علاوه‌ی درآمد حاصل از پیش بینی قیمت رزرو غیرچرخان منهای هزینه‌های تولید آن، سود واحد تولیدی را تشکیل می‌دهد (راگلند و همکاران، ۲۰۱۰). هزینه‌ی عملیاتی تولید برق، معمولاً به صورت تابع درجه‌ی ۲ از محصول (میزان برق تولید شده) نشان داده می‌شود، که به شکل زیر است:

$$c_{it}^p = F(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \quad (5)$$

بنا بر گزارش کمیته‌ی مرکزی تحقیقات شرکت برق منطقه‌ای خراسان، در نیروگاه شریعتی، مصرف سوخت گاز در برابر بار خروجی به صورت خطی تغییر می‌کند. از سوی دیگر، فرم تخمین خطی بهینه و تخمین خطی تکه‌ای بهینه می‌تواند جایگزین فرم

غیرخطی هزینه‌ی سوخت شود (زای و همکاران^۱، ۲۰۰۹). مهم‌ترین هزینه‌ی تولید برق، هزینه‌ی سوخت به کار رفته است و سهم بالایی از هزینه‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. از این رو در تابع هدف، هزینه‌ی عملیاتی تولید برق را معادل با هزینه‌ی سوخت مورد استفاده در نظر می‌گیرند. از آن جا که هزینه‌هایی مثل هزینه‌ی تعمیر و نگهداری، در نیروگاه مورد مطالعه، در زمان‌های خاص و بر طبق برنامه از قبل تعیین شده انجام می‌گیرد، جزء هزینه‌های ثابت به حساب می‌آید. هزینه‌ی روشن کردن ژنراتورها به مدت زمانی بستگی دارد که واحد، قبل از روشن کردن، خاموش بوده است. اگر واحد برای مدت زمان کوتاهی خاموش باشد، به طوری که محدودیت حداقل زمان خاموش بودن را برآورده کند، انرژی کم‌تری برای دوباره روشن کردن واحد مورد نیاز خواهد بود (صابر و همکاران، ۲۰۰۷).

$$SU_i = \begin{cases} HSU_i; & T_{i,off}^t \leq T_{i,down} + T_{i,cold} \\ CSU_i; & T_{i,off}^t > T_{i,down} + T_{i,cold} \end{cases} \quad (۶)$$

HSU_i ، هزینه‌ی روشن کردن واحد i در حالت گرم، CSU_i ، هزینه‌ی روشن کردن واحد i در حالت سرد، $T_{i,off}^t$ ، مدت زمان خاموش بودن واحد i در زمان t ، $T_{i,down}$ ، حداقل زمانی که واحد باید خاموش باشد، $T_{i,cold}$ ، حداقل زمانی که طی آن واحد کاملاً سرد می‌شود. برخی تحقیقات هزینه‌ی خاموش کردن ژنراتورها را وارد مدل نکرده‌اند و چنانچه در مدل گنجانده شود، مقدار آن عدد ثابتی خواهد بود (صابر و همکاران، ۲۰۰۷). هدف از تأمین رزروهای چرخان توسط بازیگران بازار (به خصوص واحدهای نیروگاهی)، حفظ امنیت شبکه‌ی تأمین برق و پاسخ‌گویی سریع در برابر حوادث و اغتشاشات مختلف و کنترل فرکانس سیستم است. برای پاسخ‌گویی به حوادث و اغتشاشات شبکه، نیاز به پاسخ‌گویی سریع می‌باشد، این وظیفه برعهده‌ی رزروهای چرخان است. حداقل زمان روشن بودن یا خاموش بودن سیستم در محدودیت زیر گنجانده شده است:

$$\begin{aligned} T_{off,i} &\geq T_{down,i} \\ T_{on,i} &\geq T_{up,i} \end{aligned} \quad (۷)$$

که در آن $T_{up,i}$ ، حداقل زمانی است که واحد باید روشن باشد.

هم‌چنین میزان تولید واحدها باید به گونه‌ای باشد که میزان آلودگی ناشی از تولید برق، کم‌تر از حد معین شده باشد. محدودیت آلودگی سیستم به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{ei}(P_{it}) + S_{eit} \leq E^{\max} \quad (۸)$$

$C_{ei}(P_{it})$ ، آلودگی ناشی از تولید برق نیروگاه، S_{eit} ، آلودگی ثابت ناشی از تولید برق نیروگاه، E^{\max} ، حد مجاز آلودگی یک نیروگاه را نشان می‌دهد.

۴- یافته‌های تحقیق

تابع سود واحد نیروگاهی به صورت زیر است که در آن، PR_{cct} قیمت هر واحد برق تولید شده توسط واحد سیکل ترکیبی در زمان t است. G_{cct} میزان تولید واحد سیکل ترکیبی در زمان t ، PR_{git} قیمت هر واحد برق تولید شده توسط هر واحد گازی در زمان t است. G_{git} میزان تولید هر واحد گازی در زمان t و $cost$ تابع هزینه‌ی تولید برق در واحدهای نیروگاه می‌باشد.

$$\pi = \left(\sum_{t=1}^{24} PR_{cct} \times G_{cct} + \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^6 PR_{git} \times G_{git} \right) - (cost) \quad (۹)$$

تابع هزینه‌ی تولید فرمول بالا $(cost)$ ، از سه نوع هزینه تشکیل شده است:

$$cost = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^7 (c_{it}^p + c_{it}^u + c_{it}^d) \quad (۱۰)$$

روش حل مسأله‌ی برنامه‌ریزی تولید در این تحقیق، شامل دو مرحله است. در مرحله‌ی اول، با استفاده از منطق فازی، بازه‌ی میزان تولید ژنراتورها محدودتر می‌شود و در مرحله‌ی بعد، جستجو برای به‌دست آوردن جواب‌های بهینه در این محدوده انجام می‌گیرد. ورودی‌های تقاضای بار و قیمت پذیرفته شده واحد سیکل ترکیبی و خروجی‌های میزان تولید هر دو نوع ژنراتور با استفاده از قوانین فازی معرفی شده و روش غیرفازی کردن مشخصی (بازه‌ی بین اعداد به دست آمده از روش‌های SOM و LOM) وارد منطق فازی شده و بازه‌ی تولید برای هر ژنراتور به‌دست می‌آید. از آنجا که هیچ قانونی برای برتری و انتخاب یک روش غیرفازی کردن وجود ندارد، بازه‌ی را از کوچک‌ترین جواب تا بزرگ‌ترین جواب به‌دست آورده و از این بازه برای مرحله‌ی بعد استفاده می‌کنیم. سپس با استفاده از روش NSGAI و با وارد کردن پارامترهای ورودی و محدودیت‌های تولید برق، میزان تولید هر ژنراتور در هر ساعت به‌گونه‌ای مشخص

خواهد شد که بتواند بیش‌ترین سود را به‌دست دهد. NSGAI، یکی از جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی چند هدفی است که در سال ۲۰۰۲ توسط دب^۱ پیشنهاد شده است. در این روش پس از رسیدن به بازه‌ی مورد نظر برای تولید هر یک از ژنراتورها، با توجه به هزینه‌ی روشن و خاموش شدن ژنراتورها، درآمد ناشی از فروش برق و هزینه‌ی سوخت ژنراتورها برای تولید برق، که در این کار به‌صورت رگرسیون فازی در نظر گرفته شده است، بهینه‌ی یابی صورت می‌گیرد. در استفاده از ریاضیات فازی برای هزینه‌ی سوخت، از برش فازی ۰/۸ و روش غیرفازی سازی LOM برای رسیدن به جواب استفاده شده است. فرم تابع هزینه خطی در نظر گرفته می‌شود:

$$c_{it}^P = a_i P_{it} + b_i \quad (11)$$

ضرایب تابع هزینه برای هر یک از واحدهای تولید برق نیروگاه شریعتی به‌صورت اعداد فازی در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۱- ضرایب تابع هزینه‌ی سوخت

•	(۲۲۳۵۰/۴۰۶۳, ۲۲۳۵۸/۱۵۸۷۸, ۲۲۳۶۰/۸۱۶۲۸)	واحد ۱
•	(۲۴۱۵۴/۵۹۰۶۹, ۲۴۰۵۶/۳۴۸۱۷, ۲۴۰۵۸/۹۹۷۴۶)	واحد ۲
•	(۲۲۱۶۹/۸۸۰۰۳, ۲۲۱۷۶/۹۷۶۵۴, ۲۲۱۷۹/۸۸۷۳۷)	واحد ۳
•	(۲۴۰۵۳/۰۶۴۸۸, ۲۴۰۶۱/۳۰۰۷۸, ۲۴۰۶۳/۸۱۵۴۹)	واحد ۴
•	(۲۱۹۷۱/۶۶۰۳۷, ۲۱۹۸۰/۱۰۰۳۵, ۲۱۹۸۲/۰۵۹۵)	واحد ۵
•	(۲۳۲۱۶/۹۲۳۲۳, ۲۳۲۲۵/۴۷۵۷, ۲۳۲۲۸/۱۳۰۹۳)	واحد ۶
(۸۵۲۳۲۲۷/۸۱۸, ۸۵۴۰۲۹۷/۶۹, ۸۵۴۳۲۲۷/۸۱۸)	(۹۸۴۱/۲۵۱۱۶۹, ۹۸۴۰/۸۳۵۵۱۲, ۹۸۴۱/۲۵۱۱۶۹)	واحد CC

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در جدول زیر اطلاعات مربوط به واحدهای تولید برق نیروگاه شریعتی مانند وضعیت اولیه‌ی واحدها (خاموش و روشن)، حداقل زمان لازم برای روشن و خاموش شدن (Dt) و U_t و بازه‌ی تولید آن‌ها (\bar{P}, \underline{P}) آورده شده است.

جدول ۲- اطلاعات واحدهای تولید برق در نیروگاه شریعتی

وضعیت واحد	Dt (دقیقه)	Ut (دقیقه)	P	واحد
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۱
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۲
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۳
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۴
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۵
خاموش	۱۵	۱۵	۲-۳	گازی ۶
روشن	۱۵	۲۰	۱۸۰	سیکل ترکیبی

مأخذ: واحد بهره برداری نیروگاه شریعتی

میزان تقاضای برق نیروگاه شریعتی برای ۲۴ ساعت شبانه روز ۱۳۸۹/۱/۱ و قیمت برق تولید شده‌ی واحد سیکل ترکیبی این نیروگاه در جداول زیر آورده شده است.

جدول ۳- تقاضای بار نیروگاه شریعتی (مگاوات ساعت) در ۱۳۸۹/۱/۱

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
تقاضا	۲۸۱/۴۰	۲۸۱/۵۰	۲۸۱/۴۰	۲۸۱/۴۰	۲۸۱/۵۹	۲۸۱/۶۹
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
تقاضا	۲۷۹/۱۳	۲۳۷/۰۳	۲۳۶/۵۴	۲۳۶/۵۴	۲۳۶/۹۳	۲۳۶/۸۳
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
تقاضا	۲۳۶/۸۳	۲۳۷/۳۲	۲۳۷/۲۳	۲۳۶/۷۳	۲۳۷/۲۳	۲۳۶/۸۳
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
تقاضا	۲۷۴/۳۰	۲۸۱/۳۰	۲۸۱/۴۰	۲۸۱/۵۰	۲۸۱/۴۰	۲۸۱/۴۰

مأخذ: شرکت برق منطقه‌ای خراسان - بازار برق

جدول ۴- قیمت برق واحد سیکل ترکیبی به ریال برای هر مگاوات در ۱۳۸۹/۱/۱

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
قیمت	۹۶۶۲۴/۴۵۶	۸۶۸۸۸/۹۶۶	۷۸۷۷۴/۴۵۶	۷۲۸۵۰/۴۵۵	۷۰۳۷۹/۴۱۱	۷۱۵۹۴/۳۲۹
ساعت	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
قیمت	۷۱۳۱۵/۷۸۹	۹۱۰۳۸/۸۵۱	۱۰۵۶۰۶/۵۴۴	۱۰۶۱۵۰/۱۴۵	۱۰۵۸۸۴/۷۶۹	۱۰۵۰۴۶/۳۷۸
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
قیمت	۱۰۲۳۱۲/۵۳۱	۱۰۳۲۴۱/۰۸۸	۹۲۴۳۶/۲۸۴	۹۷۵۸۸/۰۴۶	۹۳۵۰۸/۱۰۴	۹۷۹۱۴/۰۷۱
ساعت	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
قیمت	۱۰۵۷۸۷/۱۶۷	۱۰۵۹۰۹/۶۷۴	۱۰۵۹۱۴/۷۸۶	۱۰۵۴۲۴/۱۳۳	۱۰۶۰۶۰/۴۷۶	۱۰۱۰۴۴/۴۶۳

مأخذ: شرکت برق منطقه‌ای خراسان - بازار برق

هر بار راه‌اندازی واحد سیکل ترکیبی حدود ۲۰ دقیقه زمان نیاز دارد. این راه‌اندازی ۲ نوع هزینه دارد: هزینه سوخت و هزینه برق مصرفی. هر واحد گازی F9، ۵۰۰۰ مترمکعب گاز و ۳۵۰ کیلووات برق مصرف می‌کند. در نتیجه هزینه روشن کردن یک واحد سیکل ترکیبی به صورت زیر است:

(۱۲) تعداد ساعت‌هایی که واحد قبل از این ساعت خاموش است بوده $c^u = 8770000 + 44000$ برای هر بار راه‌اندازی واحدهای گازی F5، که حدود ۲۰ دقیقه طول می‌کشد، مقداری گاز یا گازوئیل مصرف می‌شود تا دور توربین به ۳۰۰۰ در ثانیه برسد و با تحریک دور، بتواند برق تولید کند و به شبکه متصل شود. میزان سوخت مصرفی، ۱۰۰۰ لیتر گازوئیل یا ۱۰۰۰ متر مکعب گاز است. هزینه روشن کردن هر واحد گازی به صورت زیر است:

(۱۳) تعداد ساعت‌هایی که واحد قبل از این ساعت خاموش است بوده $c^u = 8000000 + 11000$ خاموش شدن هر واحد F5، از لحظه‌ی خارج شدن از شبکه تا مرحله‌ی قطع گاز یا گازوئیل، ۳ دقیقه زمان می‌برد. در این زمان، ۱۶۰ مترمکعب گاز مصرف می‌شود که هزینه‌ی آن مقداری ثابت و ۱۲۸۰۰۰ ریال است. برای هر واحد F9 این زمان ۸ دقیقه و میزان سوخت مصرفی ۲۰۰۰ مترمکعب گاز است، که برای سیکل به ۴۰۰۰ مترمکعب می‌رسد. هم‌چنین برای هر ساعت خاموش بودن، میزان ۲۰ کیلووات برق، برای چرخش محور ژنراتور استفاده می‌شود که برای سیکل به ۴۰ کیلووات برای هر ساعت می‌رسد. با ناچیز شمردن هزینه برق مصرفی در هر ساعت و برای مطابقت با ادبیات موجود، هزینه خاموش شدن برای واحد سیکل ترکیبی، ثابت و ۳۲۰۰۰۰۰ ریال است. براساس نمودارهای ارائه شده در پیوست (۱)، توابع عضویت معرفی شده، فرم ساده شده‌ای از توابع عضویتی هستند که وارد برنامه‌ی منطق فازی می‌شوند. درحقیقت برای رسیدن به جواب‌هایی با کیفیت بهتر، هر متغیر زبانی، فرم مخصوصی از تابع عضویت را به خود می‌گیرد. متغیرهای زبانی مربوط به متغیرهای قیمت واحد سیکل ترکیبی و مقدار برق تولیدی واحد سیکل ترکیبی و هر یک از واحدهای گازی شامل VL (خیلی کم)، L (کم)، H (زیاد) و VH (خیلی زیاد) هستند. متغیر مقدار تقاضای بار شامل متغیرهای زبانی VS (خیلی کوچک)، S (کوچک)، M (متوسط)، L (بزرگ) و VL (خیلی بزرگ) است. نتایج حاصل از برنامه‌ی فازی در نرم‌افزار Matlab، مربوط به بازه‌ی تولید برق توسط واحدهای گازی و واحد سیکل ترکیبی به صورت جدول ۵ است.

جدول ۵- بازه‌ی تولید برای واحدهای گازی و سیکل ترکیبی

ساعت	بازه‌ی تولید برای واحد سیکل ترکیبی		بازه‌ی تولید برای واحدهای گازی		ساعت	بازه‌ی تولید برای واحد سیکل ترکیبی		بازه‌ی تولید برای واحدهای گازی	
	SOM	LOM	SOM	LOM		SOM	LOM	SOM	LOM
۱	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۳	۶۷/۲	۱۴۷	۱۲/۴	۱۸/۲
۲	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۴	۶۷/۲	۱۴۷	۱۲/۴	۱۸/۴
۳	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۵	۷۳/۶	۱۴۱	۱۲/۹	۱۷/۹
۴	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۶	۷۰/۴	۱۴۴	۱۲/۷	۱۸/۲
۵	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۷	۷۰/۴	۱۴۱	۱۲/۷	۱۷/۹
۶	۱۷۶	۲۵۰	۱۲/۷	۱۷/۹	۱۸	۷۰/۴	۱۴۴	۱۲/۷	۱۸/۲
۷	۱۷۶	۲۵۳	۱۲/۴	۱۸/۲	۱۹	۱۷۰	۲۵۶	۱۲/۲	۱۸/۴
۸	۷۳/۶	۱۴۱	۱۲/۹	۱۷/۷	۲۰	۱۷۰	۲۵۶	۱۲/۲	۱۸/۴
۹	۶۴	۱۴۷	۱۲/۲	۱۸/۴	۲۱	۱۷۰	۲۵۶	۱۲/۲	۱۸/۴
۱۰	۶۴	۱۵۰	۱۲/۲	۱۸/۴	۲۲	۱۷۳	۲۵۶	۱۲/۲	۱۸/۴
۱۱	۶۴	۱۴۷	۱۲/۲	۱۸/۴	۲۳	۱۷۰	۲۵۶	۱۲/۲	۱۸/۴
۱۲	۶۴	۱۴۷	۱۲/۲	۱۸/۴	۲۴	۱۷۳	۲۵۳	۱۲/۴	۱۸/۲

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج مدل به‌دست آمده از نرم‌افزار Matlab و روش NSGAI نشان می‌دهد سود واحد نیروگاهی در این حالت در سال ۱۳۸۹ معادل ۳۲۶۵۶۳۴۸۰٫۱ ریال است. درحالی‌که عملکرد واقعی نیروگاه در این تاریخ، ۳۲۵۰۲۰۷۲۰٫۸۹ ریال سود ایجاد می‌کند. در این حالت، تمام تقاضای بار توسط واحد سیکل ترکیبی تأمین شده و واحدهای گازی تماماً خاموش بوده‌اند. با مقایسه نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که استفاده از روش فوق می‌تواند سود بیش‌تری را نسبت به عملکرد واقعی بنگاه برای نیروگاه فراهم کند. نتایج به‌دست آمده در این روش، متأثر از ۴ عامل می‌باشد. قیمت فروش برق، که برای واحدهای گازی بیش‌تر از واحد سیکل ترکیبی است. در نتیجه، تولید بیش‌تر برای واحدهای گازی به افزایش سود کمک می‌کند. هزینه‌ی سوخت، که در واحد سیکل ترکیبی به دلیل وجود جزء ثابت بزرگ، تولید در مقادیر بالاتر را به صرفه می‌کند و در واحدهای گازی نسبت به واحد سیکل ترکیبی ضریب بالاتری دارد. از این جهت، با توجه به ضریب پایین‌تر واحد سیکل ترکیبی، تولید بیش‌تر توسط این واحد، سود بیش‌تری را ایجاد می‌کند. هزینه‌ی روشن کردن و هزینه‌ی خاموش کردن، که در

واحدهای سیکل ترکیبی نسبت به گازی بالاتر است. در نتیجه، روشن و خاموش کردن این واحد سود را کاهش می‌دهد و ثبات وضعیت آن به صرفه‌تر است. با توجه به مطالب بالا، تأثیر عامل قیمت در جهتی مخالف با تأثیر سه عامل دیگر، بر سود اثر می‌گذارد. در این روش بهینه‌یابی، با در نظر گرفتن این تأثیرات، بهترین جواب که بیش‌ترین سود را به‌دست می‌دهد، به عنوان جواب نهایی به‌دست می‌آید. بنابر این بر اساس اطلاعات قبل به‌خصوص قیمت و میزان تولید، می‌توان از زمان‌بندی تولید به‌دست آمده در این تحقیق استفاده کرد. و با توجه به اطلاعات همه نیروگاه‌ها و تقاضای کل بازار و قیمت پیشنهادی نیروگاه‌ها اقدام به تخصیص بار تولیدی بین نیروگاه‌ها نمود. با توجه به نتایج این تحقیق، چنان‌چه مدیران نیروگاه در برنامه‌ریزی برای تولید خود از آزادی عمل برخوردار باشند، می‌توانند سود بیش‌تری را به‌دست آورند. لازمه رسیدن به این نتیجه، بازنگری در قوانین و آیین‌نامه‌های موجود، به‌علاوه وجود واحدهای نیروگاهی بزرگ و واحدهای تجمیع شده است.

فهرست منابع

- اینتریلیگیتور، میشل (۱۳۸۷)، بهینه‌سازی ریاضی، ترجمه‌ی حسین‌علی پورکاظمی انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.
- دبیرخانه هیأت تنظیم بازار برق (۱۳۸۷)، بررسی و تحلیل مزایا، مشکلات و ضرورت فراهم‌آوردن شرایط حضور نیروگاه‌ها در بازار برق به‌صورت واحدهای تجمیع شده.
- رائو، اس.اس (۱۳۸۴)، بهینه‌سازی (تئوری و کاربرد)، ترجمه‌ی سیدمحمد مهدی شهیدی‌پور، جلد دوم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- Azadeh.A, Saberi.M, Ghaderi.S.F, Gitiforouz.A, Ebrahimipour.V. (2008), Improved Estimation of Electricity Demand Function by Integration of Fuzzy System and Data Mining Approach, *Energy Conversion and Management* 49:2165-2177.
- Chandram, K, Subrahmanyam, N, Sydulu, M. (2011), Unit Commitment by Improved Pre-Prepared Power Demand Table and Muller Method, *Electrical Power and Energy Systems* 33: 106-114.

Delarue, E, D,haeseleer, W. (2008), Adaptive Mixed-Integer Programming Unit Commitment Strategy for Determining the Value of Forecasting, *Applied Energy* 85:171-181.

Foley, A.M, Gallachoir, B.P.O,Hur, J,Baldick, R ,Mckeogh, E.J. (2010), A Strategic Review of Electricity Systems Models, *Energy* xxx:1-9.

Heinrich, G, Howells, M, Basson, L, Petrie, J. (2007), Electricity Supply Industry Modeling for Multiple Objectives Under Demand Growth Uncertainty, *Energy* 32: 2210-2229.

Raglend, I., Raghuvver, C., Rakesh Avinash, G., Padhy, NP, & Kothari, DP. (2010). Solution to profit based unit commitment problem using particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1247-1256.

Kaur, M. (2008), Optimal Short-Term Thermal Unit Commitment Using Fuzzy Logic, Electrical & Instrumentation Engineering Department, Thapar University.

Liang, Z, Yang, K, Sun, Y, Yuan, J, Zhang, H, Zhang, Z. (2006), Decision Support for Choice Optimal Power Generation Projects: Fuzzy Comprehensive Evaluation Model Based on The Electricity Market, *Energy Policy* 34:3359- 3364.

Lin, Q.G, Huang, G.H, Bass, B, Qin, X.S. (2009), Iftem: An Interval-Fuzzy Two-Stage Stochastic Optimization Model for Regional Energy System Planning Under Uncertainty , *Energy Policy* 37:868-878.

Medina, S, Moreno, J. (2007), Risk Evaluation in Colombian Electricity Market Using Fuzzy Logic, *Energy Economics* 29: 999-1009.

Nguene, G.N, Finger, M. (2007), A Fuzzy-based Approach for Strategic Choices in Electric Energy Supply. The Case of A Swiss Power Provider on The Eve of Electricity Market Opening, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 20:37-48.

Niknam, T, Khodaei, A, Fallahi, F. (2009), A New Decomposition Approach for the Thermal Unit Commitment Problem, *Applied Energy* 86:1667-1674.

Patra, S, Goswami, S.K, Goswami, B. (2009), Fuzzy and Simulated Annealing based Dynamic Programming for The Unit Commitment Problem, *Expert Systems With Applications* 36:5081-5086.

Saber,A.Y, Senjyu, T, Yona, A, Urasaki, N, Funabashi, T. (2007), Fuzzy Unit Commitment Solution- Anovel twofold simulated annealing approach, *Electricity Power Systems Research* 77: 1699-1712.

Sadeghi, M, Mirshojaeian Hosseini, H , (2006), Energy Supply Planning in Iran by Using Fuzzy Linear Programming Approach(regarding uncertainties of investment costs), *Energy Policy* 34:993-1003.

Samper, M.E, Vargas, A, Rivera, S. (2008), Fuzzy Assessment of Electricity Generation Costs Applied to Distributed Generation. Comparison with Retail Electricity Supply Costs, supported by CONICET(Consejo Nacional de Investigaciones Cientificas y Tecnicas), in Argentina.

Tanha Aminloei, R, Ghaderi, S.F. (2010), Generation Planning in Iranian Power Plants With Fuzzy Hierarchical Production Planning, *Energy Conversion and Management* 51: 1230-1241.

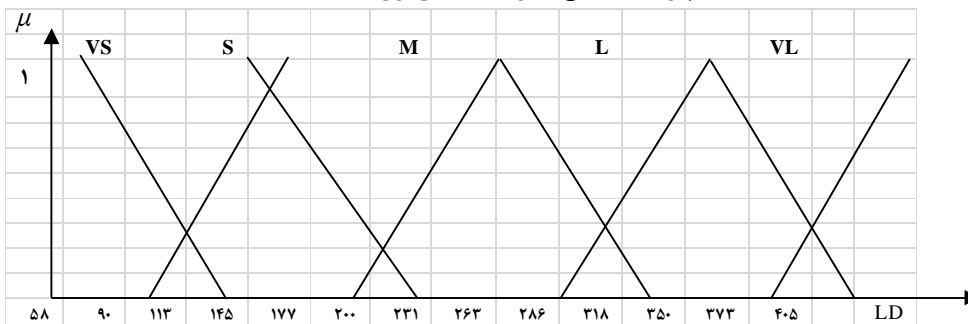
Victoire, T., & Jeyakumar, A. E. (2006). A tabu search based hybrid optimization approach for a fuzzy modelled unit commitment problem. *Electric Power Systems Research*, 76(6), 413-425.

Zimmermann, H., & Braun, N. (1996). Extracellular metabolism of nucleotides in the nervous system. *Journal of autonomic pharmacology*, 16(6), 397-400.

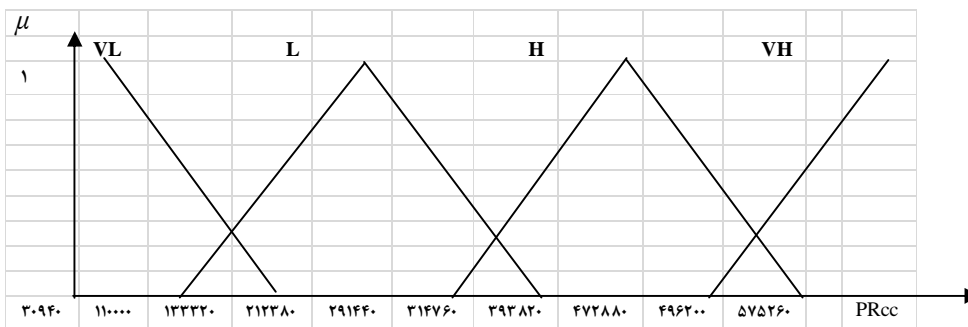
Zhai, Q, Guan, X, Yang, J.(2009), Fast Unit Commitment based on Optimal Linear Approximation to Nonlinear Fuel Cost: Error Analysis and Applications, *Electric Power Systems Research* 79:1604-1613.

پیوست

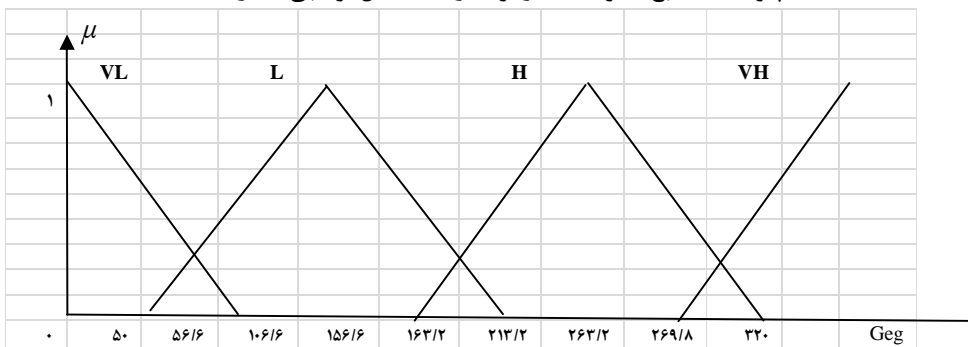
پیوست ۱- تابع عضویت تقاضای برق (مگاوات ساعت)



پیوست ۲- تابع عضویت قیمت برق واحد سیکل ترکیبی (ریال برای هر مگاوات ساعت)



پیوست ۳- تابع عضویت مقدار تولید واحد سیکل ترکیبی (مگاوات ساعت)



پیوست ۴ - تابع عضویت مقدار تولید هر واحد گازی (مگاوات ساعت)

