

هماهنگی نگهداری واحدهای تولید انرژی در سیستم‌های چندحاملی

سید نقی حسینی^۱، دانشجو دکتری؛ عبدالرضا شیخ الاسلامی^۲، دانشیار؛ تقی بارفوروشی^۳، استادیار؛ محمد امین لطیفی^۴، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - naghi.hoseini@chmail.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - asheikh@nit.ac.ir

۳- گروه پژوهشی پست‌های فشارقوی- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - barforoshi@nit.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶ - ایران - latify@cc.iut.ac.ir

چکیده: در بهره‌برداری میان‌مدت از شبکه‌های چندحاملی در شرایط خصوصی‌سازی، ایجاد هماهنگی نگهداری در میان واحدهای تولید از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده به‌نحوی که چالش اساسی در این امر، وجود منابع تولید هم‌زمان و رفتار مالکان منابع تولید می‌باشد. منابع تولید هم‌زمان به سبب تولید چندحامل انرژی، نقشی کلیدی در برنامه تولید شبکه‌های چندحاملی را ایفا نموده و تحت تأثیر رفتار مالکان و سیاست بهره‌برداری آنان می‌باشند. در این مقاله، مدلی به‌منظور ایجاد سازوکار هماهنگی تعمیر و نگهداری منابع تولید در سیستم‌های چندحاملی انرژی در شرایط رقابتی و با در نظر گرفتن اهداف بازیگران اصلی شامل مالکان و بهره‌بردار سیستم ارائه می‌شود. مدل پیشنهادی یک مدل چندهدفه شامل حداقل‌سازی هزینه های میان‌مدت از دید مالکان و تأمین قابلیت اطمینان شبکه در بازه میان‌مدت از دید بهره‌بردار کل سیستم می‌باشد. برای حل مسئله چندهدفه فوق از روش ϵ -constraint استفاده شده و جبهه پارتو مسئله حاصل گردید. برای یافتن یک پاسخ یکتا برای مسئله از روش فازی بهره گرفته شد. مدل پیشنهادی بر روی یک سیستم چندحاملی بومی (منطقه ویژه عسلویه) مورد آزمون قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که پنجره زمانی خروج واحدهای تولید، چالش برنامه‌ریزی برای خروج واحدهای تولید هم‌زمان در این شبکه‌ها را مرتفع می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های چندحاملی انرژی، منابع تولید هم‌زمان برق، گرما و سرما (CCHP)، هماهنگی تعمیر و نگهداری، بهینه‌سازی چندهدفه.

Generation Units Maintenance Coordination in Multi-Carrier Energy System

N. Hosseini¹, A. R. Sheikholeslami, Associate Professor², T. Barforoushi, Assistant Professor³, M. A. Latify, Assistant Professor⁴

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: naghi.hoseini@chmail.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, mail: asheikh@nit.ac.ir

3- HV substations research group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: barforoshi@nit.ac.ir

4- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan 84156-83111, Iran, Email: latify@cc.iut.ac.ir

Abstract: In the mid-term operational management of multi-carrier energy systems (MCES) in a deregulated system, coordination among owners of production units is very important. Scheduling the CCHP resources and also the behavior of the owners of production resources are the main coordinating challenges. The cogeneration resources play a key role in energy generation networks and are affected by the behavior of the owners and their operation policies. In this paper, a model is presented that coordinates resources in MCES in competitive conditions. It takes the objectives of key players, including system operator into account. The proposed model is a multi-objective model and aims to minimize mid-term costs for the resource owners and ensures the reliability of the network over the medium term from the perspective of the operator of the whole system. To solve the multi-objective problem, the Epsilon-constraint method has been used and the Pareto front has been solved. The Fuzzy method was used to find a unique answer to the problem. The proposed model is tested on a local MCES (Special Economic Zone in Assaluyeh), and the simulation results indicate that coordinated outage window, eliminates the scheduling challenge for the output of concurrent production units in these networks.

Keywords: Multi-Carrier Energy System (MCES), CCHP & CHP, maintenance coordination, multi-objective optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷، ۱۳۹۸/۰۶/۰۲، ۱۳۹۸/۰۸/۲۸ و ۱۳۹۸/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

نام نویسنده مسئول: دکتر عبدالرضا شیخ‌الاسلامی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

در سالیان اخیر استفاده از راه‌کارهای بازیابی و افزایش راندمان در فرآیندهای تولید انرژی، در مرکز توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است. از دلایل مهم برای این توجه، افزایش هزینه‌های مرتبط با سوخت اولیه، تعمیر و نگهداری تجهیزات و نیروی انسانی و همچنین افزایش میزان تولید آلودگی بوده‌است [۱-۲]. از این رو، بسیاری از تولیدکنندگان درصدد تسریع استفاده حداکثری از منابع اولیه موجود با بهره‌گیری منابع تولید هم‌زمان^۱ انرژی می‌باشند [۳].

بر اساس ایده کلی مطرح شده در [۴] به شبکه‌هایی که در آن‌ها چند نوع مختلف انرژی (الکتریکی، حرارتی، سرمایی و ...) توسط منابع مختلف تولید و مصرف می‌شود، شبکه‌های چندحاملی انرژی^۲ می‌گویند که مهم ترین ویژگی این شبکه‌ها انعطاف بالا در نحوه مصرف و راندمان بالاتر تولید حامل‌ها به سبب وجود منابع تولید هم‌زمان می‌باشد. این ویژگی‌ها سبب افزایش کارایی این شبکه‌ها در مقایسه با شبکه‌های تک‌حاملی انرژی شده‌است [۵]. با توجه به به‌کارگیری منابع تولید هم‌زمان در این شبکه‌ها، توجه پژوهشگران به مسئله سرمایه‌گذاری، برنامه‌ریزی در تولید، تعمیر و نگهداری، توسعه منابع و شبکه‌های چندحاملی در شرایط بازار انحصاری و تجدید ساختار جلب شده‌است. در این میان محققان توجه خاصی به مسائل برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت این منابع با توجه به ویژگی ارتباط آن‌ها با چند نوع انرژی نشان داده‌اند [۶-۷].

در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از شبکه‌های MCES، قابلیت چندحاملی بودن سبب می‌گردد تا منابع مختلف تولید (شامل منابع تولید گرما، سرما، الکتریسیته و ...) به صورت یک‌پارچه مورد بررسی قرار گیرند [۹-۸]. در حالت کلی اگر فرض بر عدم وابسته بودن تولید و مصرف حامل‌ها از یکدیگر و تک‌حامل بودن انرژی تولیدی یک منبع باشد، می‌توان آن حامل را با استفاده از مدل‌های موجود، مورد تحلیل قرار داده و برای بهره‌برداری و توسعه و جذب سرمایه‌گذار آن برنامه‌ریزی نمود [۱۰]. این موضوع در حالی است که در شبکه‌های چندحاملی انرژی، به سبب وابستگی تولید حامل‌ها به یکدیگر به علت وجود منابع تولید هم‌زمان، تحلیل و برنامه‌ریزی با مدل‌ها و ساختارهای موجود دارای معایبی بوده که مهم‌ترین عیب آن، عدم بهینه بودن پاسخ نهایی به علت رفتارهای دوگانه منابع می‌باشد.

اکثر تحقیقات انجام‌شده با محوریت شبکه‌های چندحاملی انرژی (MCES) بر روی بهینه‌سازی طراحی و جذب سرمایه‌گذاری و سوددهی تولید در بلندمدت و بهره‌برداری در کوتاه‌مدت [۱۱-۱۲] متمرکز و به مقوله برنامه‌ریزی میان‌مدت این شبکه‌ها کمتر توجه شده‌است. در این میان تحقیقاتی نظیر مشارکت واحدها [۱۳]، توزیع اقتصادی توان میان واحدهای تولیدی براساس هزینه هر تولیدکننده [۱۴] و پخش بار بهینه با در نظر گرفتن خواص حامل‌های انرژی [۱۵] از توجه بیشتری برخوردار بوده‌اند. تحقیقاتی نیز در زمینه قابلیت اطمینان MCES انجام‌شده که تمرکز اصلی آن‌ها مدل‌سازی و ارتقاء قابلیت اطمینان و امنیت در عمل

کرد این شبکه‌ها [۱۶] بوده‌است. برخی از این مقالات تنها به مدل‌سازی قابلیت اطمینان شبکه گاز و برق با تمرکز بر تجزیه و تحلیل عمل‌کرد شبکه گاز طبیعی [۱۷] و یا تنها مدل‌سازی یک حامل انرژی در MCES مانند برق [۱۸] و یا تأثیر قابلیت اطمینان CHP بر کل شبکه [۳] پرداخته‌اند.

با توجه به این که منابع تولید هم‌زمان (CCHP) نقش مهمی در تولید و ارتباط میان حامل‌ها در MCES دارند [۱۹]؛ بررسی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی میان‌مدت این منابع با توجه اهمیت تعمیر و نگهداری آن‌ها و با عنایت به ایده بیان‌شده در [۳] در خصوص قابلیت اطمینان این نوع تولیدکنندگان، ضرورت می‌یابد. به بیان دیگر، اگر منابع تولید هم‌زمان به صورت تولیدکننده یک حامل در نظر گرفته شوند، براساس مدل‌های ارائه‌شده در مراجع، می‌توان برنامه‌ریزی برای تعمیر و نگهداری آن‌ها را انجام داد [۲۰]، اما در شرایط واقعی منابع تولید هم‌زمان در شبکه چندحاملی توانایی تولید چندین حامل انرژی (مانند برق، گرما، سرما و ...) را دارا بوده و عملاً مدل‌های موجود کارایی لازم برای تحلیل خروج این منابع برای انجام فرایندهای تعمیر و نگهداری را ندارند. این عدم کارایی مربوط به کاهش قابلیت اطمینان شبکه‌ها به سبب خروج این منابع می‌باشد. به عنوان نمونه و با فرض این که یک منبع، توانایی تولید دو حامل انرژی را دارا باشد، براساس مدل‌های ارائه‌شده [۲۰]، ابتدا باید منبع را در برنامه‌ریزی یک حامل و سپس در برنامه‌ریزی حامل بعد شرکت داد. این امر به گونه‌ای می‌باشد که ممکن است در برنامه حامل اول واحد تولید خاموش شده، ولی در همان مقطع زمانی در برنامه حامل دوم، بنا به نیاز، منبع در بیشینه توان خود قرار گیرد. بر این اساس می‌توان انتظار داشت هنگامی که یک منبع، چندحامل انرژی مختلف را تولید می‌نماید، رفتار آن تابعی از ترکیب رفتار منابع موجود برای تولید هر حامل می‌باشد. در نتیجه اگر بهره‌بردار بخواهد مانند شرایط تک‌حاملی از این منابع بهره‌برداری نماید، بهره‌برداری غیر بهینه و در برخی از موارد نشدنی (مانند خاموش شدن در یک برنامه و روشن بودن در برنامه دیگر) خواهد بود.

در زمینه برنامه‌ریزی میان‌مدت، تمرکز مراجع بر روی هماهنگی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری واحدها برای یک حامل می‌باشد [۲۱]. در بسیاری از این مراجع، مسئله هماهنگی واحدهای تولید برق به عنوان چالش اصلی مدنظر قرار گرفته‌است [۲۲-۲۱]. هم‌چنین تأمین قابلیت اطمینان و رزرو در شرایط تعمیر و نگهداری و خروج واحدها براساس یک نوع حامل [۲۱] و [۲۵-۲۳] و یا کاهش هزینه‌های مرتبط با برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری [۲۶-۲۷] به عنوان اهداف اصلی برخی دیگر از مراجع مورد توجه بوده‌است. در برخی از تحقیقات تجهیزات دیگری مانند شبکه گاز [۲۸]، شبکه انتقال [۲۶] و [۳۰-۲۹] و مسائلی مانند امنیت در تأمین بار [۳۲-۳۱] و منابع ذخیره انرژی [۳۳] مورد مطالعه قرار گرفته اما چالش هماهنگی برای تعمیر و نگهداری واحدهای CCHP در شبکه MCES با توانایی تولید حامل‌های گوناگون، با نگاه تأثیرپذیری این حامل‌ها از یکدیگر و ارتباط میان تولید آن‌ها بررسی نشده‌است.

از سوی دیگر ISO نهادی مستقل از سایر بازیگران و نهادهای بوده و از آنجاکه در MCES عموماً مصرف‌کنندگان بارهای مهمی می‌باشند که از دست رفتن قابلیت‌اطمینان در تأمین انرژی و خاموشی آن‌ها، سبب وارد آمدن خسارات مالی زیادی می‌گردد، ISO سعی بر آن دارد تا قابلیت‌اطمینان سیستم را در بیشینه مقدار ممکنه نگاه دارد.

بر این اساس و با توجه به تفاوت در اهداف بازیگران و همچنین ذات منابع تولید، نیاز به ساختاری برای ایجاد پنجره خروج هماهنگ برای بازیگران با توجه به حفظ ماهیت بازار وجود دارد. با عنایت به این موضوع، در این مقاله از روش جبهه پارتو برای یافتن پاسخ‌های بهینه برای مسئله چندهدفه بهره‌گیری خواهد شد. پس از این مرحله با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری فازی پاسخ نهایی مسئله و پنجره خروجی وابسته به آن، حاصل می‌گردد. شایان ذکر است با توجه به این که تعیین پاسخ باید توسط یک نهاد بی‌طرف انجام پذیرد، فرض بر آن شده است که از یک شرکت ثالث که منفعتی از تعیین زمان خروج و حل این مسئله برای بازیگران اصلی آن نمی‌برد، بهره گرفته شده است.

به صورت خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل بیان نمود:

- ارائه مدلی برای تعیین پنجره زمانی خروج واحدهای تولید GENCO در یک MCES با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان؛
 - بیان ریاضی برای مدل MCES و برخی منابع در شرایط بهره‌برداری میان مدت با تمرکز بر منابع تولید هم‌زمان؛
 - ارائه مفهوم و مدل رزرو تجمعی برای شاخص قابلیت اطمینان MCES با در نظر گرفتن اثر حامل‌های گوناگون بر یکدیگر؛
 - ارائه مفهوم ضریب اقبال و کاربرد آن در بخش رزرو تجمعی بر اساس میل به استفاده از یک حامل خاص در شرایط خارج از دسترس بودن حامل دیگر؛
 - بهره‌گیری از قدرت تصمیم‌گیری فازی شرکت ثالث برای تعیین پنجره خروج بر اساس نتایج جبهه پارتو؛
- در ادامه و در بخش دوم به بیان مدل پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در بخش سوم نیز بررسی نتایج عددی و در بخش پایانی جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی منابع MCES در برنامه تعمیر و نگهداری

در یک MCES منابع تولید و مصرف گوناگونی وجود دارند و فرض بر آن است که تولیدکنندگان یا GENCOها به صورت کامل در رقابت با یکدیگر بوده و از شرایط یکدیگر در نحوه ارائه خدمات و زمان‌بندی‌های تولید و خاموشی اطلاعی ندارند. همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، شرکت ثالث در برنامه‌ریزی میان‌مدت قصد دارد که با کم‌ترین میزان هزینه و با بیش‌ترین مقدار قابلیت اطمینان، تمامی مجموعه‌های تولید (برق، گرما و سرما) را در یک دوره زمانی معین (یک‌ساله) برای تعمیر و نگهداری خاموش نموده و یک پنجره زمانی برای خروج ارائه نماید. برای این امر در حالت کلی، شرکت ثالث با دو رویکرد کاری مواجه خواهد بود:

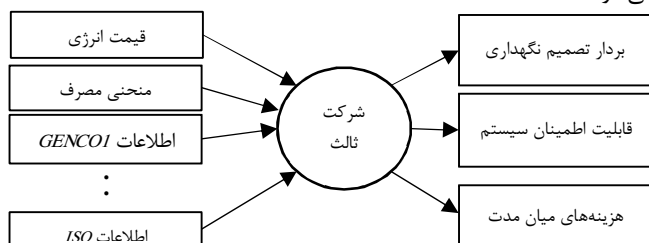
مقوله خاص دیگری که با توجه به تجدید ساختار در صنایع ارائه خدمات انرژی در چند دهه گذشته به وجود آمده است نگرش به مسئله برنامه‌ریزی منابع با در نظرگیری مالکیت خصوصی آن‌ها می‌باشد. با توجه به این که در شرایط تجدیدساختار اهداف مالکان منابع تولید و بهره‌بردار شبکه از یکدیگر جدا شده است، مسئله برنامه‌ریزی به مسئله ایجاد هماهنگی میان بازیگران اصلی تبدیل و ایجاد یک سازوکار شفاف میان بازیگران برای تعیین نحوه خروج منابع در اولویت فعالیت محققان قرار گرفته است [۳۲]. در [۳۳-۳۴] یک بازار جداگانه برای بررسی رفتار تولیدکنندگان در شرایط رقابتی، در [۲۸] یک سازوکار مبتنی بر تکرار با توجه به نیاز منابع گاز و شبکه آن برای تعمیرات، [۳۴-۳۶] به بررسی اثر عدم قطعیت در قیمت و میزان مصرف انرژی الکتریکی پرداخته شده است. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته بسیاری از مقالات تنها بر روی یک حامل انرژی در شبکه تمرکز نموده و در خصوص بررسی مسئله هماهنگی خروج واحدهای تولید هم‌زمان در شبکه‌های چندحاملی در شرایط تجدید ساختار و خصوصی بودن منابع تولید با در نظر گرفتن تأثیر منابع مختلف بر روی قابلیت اطمینان حامل‌ها در شبکه تحقیق خاصی ارائه نشده است.

در حالت کلی مسئله هماهنگی تعمیر و نگهداری به صورت برنامه‌ریزی برای خروج واحدهای تولید شبکه (با اولویت‌دهی به منابع الکتریکی) و به صورت متمرکز و در شرایط انحصاری بودن سیستم، در بسیاری از مراجع مدل شده است. با توجه به رشد روزافزون استفاده از منابع چندحاملی و تولید هم‌زمان (مانند استفاده از منابع CHP و CCHP) حل مسئله هماهنگی تعمیر و نگهداری به صورت مجزا برای هر حامل با مشکلات عمده روبه‌رو خواهد بود. همچنین با آغاز خصوصی‌سازی و جذب سرمایه‌گذار برای واحدهای تولید و رفتار سود محورانه مالکان و بهره‌برداران این مجموعه‌ها که در برخی از موارد در تناقض با تصمیمات ISO در جهت حفظ قابلیت اطمینان می‌باشد [۲۸] و [۳۷-۳۹]، مشکلات فوق پیچیده‌تر نیز خواهد شد. این مشکلات به صورت کلی شامل، نحوه هماهنگی خروج واحدهای تولید هم‌زمان و کاهش میزان قابلیت اطمینان به سبب خروج منابع و به طبع آن کاهش میزان سطح رزرو می‌باشد که در مراجع به بررسی این چالش‌ها با در نظرگیری چندحاملی بودن منابع و شبکه و شرایط بازار انرژی پرداخته نشده است. با عنایت به وجود این خلأ تحقیقاتی در تحقیقات پیشین، در این مقاله از یک رزرو تجمعی برای پشتیبانی بار و مصرف‌کننده در MCES با توجه به واقعیت جاری و ذات فیزیکی این شبکه‌ها استفاده می‌شود.

با توجه به مطالب فوق به صورت خلاصه می‌توان اهداف بازیگران اصلی MCES را با توجه به ماهیت آن‌ها به دودسته کلی کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان دسته‌بندی نمود. با عنایت به این امر که مجموعه‌های تولید در شبکه چندحاملی به صورت خصوصی مدیریت و برنامه‌ریزی می‌گردد، هدف اصلی GENCOها در مسئله بهینه‌سازی کمینه‌نمودن هزینه‌های میان‌مدت وابسته به تولید و تعمیر می‌باشد.

۲-۱- چهارچوب پیشنهادی

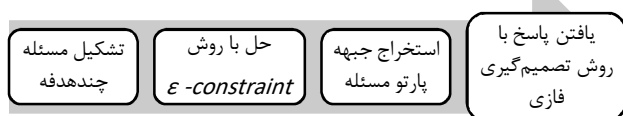
همان گونه که در بخش قبل بیان گردید، شرکت ثالث با یک مسئله چندهدفه شامل: کمینه کردن هزینه‌های میان‌مدت (شامل بهره‌برداری و نگهداری) و بیشینه کردن قابلیت اطمینان MCES باتوجه به حساسیت بار به خاموشی مواجه است. براین اساس، مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت از نگاه شرکت ثالث به دو بخش کلی با دید ISO و GENCO تقسیم می‌شود.



شکل ۱: چهارچوب کلی طرح پیشنهادی

شکل (۱) چهارچوب پیشنهادی حل مسئله چندهدفه را نشان می‌دهد. در این مدل ابتدا ISO و GENCO ها پارامترهای مسئله را در اختیار شرکت ثالث قرار می‌دهند. در مرحله بعد مطابق شکل (۲) این نهاد با استفاده از روش ϵ -constraint، جبهه پارتو چندبعدی مسئله چندهدفه فوق را استخراج می‌نماید [۴۲-۴۱]. در ادامه با استفاده از الگوریتم‌های فازی، پاسخی یکتا از این مجموعه پاسخ‌های بهینه استخراج می‌نماید. خروجی مسئله شامل پنجره زمانی خروج واحدها، بردار تصمیم تعمیر و نگهداری واحدها $M_{ij}(t)$ و بردار میزان رزرو چرخان $R^{SR}(t, s)$ بوده و در اختیار بازیگران قرار می‌گیرد.

ورودی مدل، پارامترهای مسئله مانند مقدار بار، پیش‌بینی از قیمت در دوره زمانی برنامه‌ریزی، اطلاعات مربوط به واحدهای تولید و حدود مربوط به قیود واحدها می‌باشد. پنجره زمانی هماهنگ خروج منابع تولید در MCES، میزان شاخص قابلیت اطمینان و مقدار رزرو چرخان در بازه‌های زمانی تعمیر و نگهداری و هزینه میان‌مدت بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری از خروجی‌های قابل توجه در این چهارچوب بشمار می‌روند.



شکل ۲: چهارچوب کلی حل مسئله توسط شرکت ثالث

۲-۲- مدل ریاضی

براساس چهارچوب ارائه شده، شرکت ثالث برای حل مسئله به یک مدل ریاضی نیاز خواهد داشت. باتوجه به این نیاز و همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، در مسئله بهینه‌سازی هدف GENCO ها مجموعه‌های تولیدی کاهش هزینه‌ها با در نظر گرفتن قیود تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری واحدهای تولید در میان‌مدت می‌باشد. از سویی دیگر از دید ISO، در این شبکه‌ها تأمین انرژی مصرف‌کنندگان مقوله‌ای

منابع تولید هر حامل را به صورت جداگانه برای نگهداری هماهنگ نماید. به بیان بهتر منابع تولید برق را در برنامه نگهداری الکتریکی، منابع تولید گرما را در برنامه نگهداری گرمایش و منابع تولید سرما را در برنامه نگهداری سرمایش به صورت هماهنگ و با در نظرگیری قابلیت اطمینان از چرخه تولید خارج نماید که این امر علاوه بر بهینه نبودن، در مورد منابعی که چندحامل انرژی را تولید می‌نمایند، مشکل آفرین بوده و ممکن است سبب خروج غیر بهینه و متناقض آن‌ها شود. این خروج غیر بهینه و تناقض در تصمیم‌گیری سبب نارضایتی GENCO ها خواهد شد. هم‌چنین از سوی دیگر در بعضی از موارد این امر سبب کاهش میزان قابلیت اطمینان تولید برخی از حامل‌های انرژی شده که با مخالفت ISO مواجه می‌گردد. به عنوان نمونه اگر منابع تولید هم‌زمان با برنامه نگهداری الکتریکی از چرخه تولید خارج شوند، در برخی از بازه‌های زمانی شبکه حرارت و یا سرما دچار کمبود تولید توان و کاهش میزان شاخص قابلیت اطمینان خواهند شد.

کل شبکه و منابع تولید حامل‌های گوناگون انرژی با هم در یک برنامه هماهنگ تعمیر و نگهداری قرار گیرند که این برنامه به نتیجه مطلوب‌تری (نسبت به رویه اول) منتهی خواهد شد.

براین اساس در MCES اگر شرکت ثالث از رویکرد اول بهره ببرد، برنامه‌ریزی خروج واحدهای تولید، به چند برنامه جداگانه تبدیل شده و آن‌گاه می‌توان براساس زمان‌های خروج در نظر گرفته شده در هر برنامه، منابع را خارج نمود. نکته قابل توجه وجود منابع تولید هم‌زمان است که مالک آن می‌تواند با یک بازبینی در برنامه خروج آن‌ها برای تعمیرات، تنها یک‌بار (و در یک برنامه معین و یا با اولویت، به عنوان نمونه در برنامه شبکه الکتریکی) این منابع را خارج نماید. مهم‌ترین مشکل این طرح خروج غیر بهینه منابع و کاهش شاخص قابلیت اطمینان در دیگر شبکه‌ها خواهد بود. به عبارت دیگر، در این روش، ممکن است واحد تولید هم‌زمان i در برنامه الکتریکی باتوجه به شرایط شبکه الکتریکی به تعمیرات رود، ولی در برنامه شبکه گرمایش که به انرژی این واحد نیاز دارد در بیشینه توان خود برنامه‌ریزی شده باشد و خروج آن برای تعمیرات سبب کاهش قابلیت اطمینان شبکه گرمایش از دید ISO و ضرر مالی ناشی از عدم نفع فروش انرژی گرمایشی باقیمت بالاتر در آن بازه زمانی توسط مالک GENCO به بازار شود. هم‌چنین در مقیاس کلان باتوجه به کاهش قابلیت اطمینان شبکه در آن بازه زمانی و رفتار منطقی تولیدکنندگان، قیمت آن حامل افزایش داشته و ممکن است تا چندین برابر قیمت واقعی بالا برود. این امر در زمینه انرژی الکتریکی در سال ۲۰۰۲ در ایالت کالیفرنیا رخ داده است [۴۰].

براساس وجود چالش‌های فوق در رویکرد اول و پاسخ بهینه‌تر، هماهنگ‌تر و سازگار خواست بازیگران در رویکرد دوم، در این مقاله و در ادامه به بیان و مدل‌سازی این رویکرد هماهنگی در تعمیر و نگهداری پرداخته می‌شود.

شرکت ثالث باید رابطه (۱) را باتوجهبه قیود حاکم بر واحدهای تولید، به کمینه مقدار خود برساند. باتوجهبه قیود ارائه شده در [۲۴] و [۴۳] که درزمینه بهره برداری CHP و برنامه ریزی نگهداری یک شبکه الکتریکی بودند و با در نظرگیری ساختاری پیشنهادی در این مقاله و به سبب وجود حامل های گوناگون در MCES، قابلیت های فیزیکی تولیدکننده ها و شرایط اجرای برنامه تعمیر و نگهداری، محدودیت ها بیان شده به صورت ذیل بازنویسی و توسعه داده شده اند:

$$\sum_i \sum_j G_{ij}(t,s) = DN(t,s), \forall t, \forall s \quad (۲)$$

$$U_{ij}(t,s) - U_{ij}(t,s-1) \leq \omega_{ij}(t,s), \forall i, \forall j, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (۳)$$

$$U_{ij}(t,1) - U_{ij}(t-1,N) \leq \omega_{ij}(t,s), \forall i, \forall j, t = 2, \dots, N \quad (۴)$$

$$G_{ij}(t,s-1) - G_{ij}(t,s) \leq R_{Gij}^{down}, \forall j, \forall i, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (۵)$$

$$G_{ij}(t-1,N) - G_{ij}(t,1) \leq R_{Gij}^{down}, \forall j, \forall i, t = 2, \dots, N \quad (۶)$$

$$G_{ij}(t,s) - G_{ij}(t,s-1) \leq R_{Gij}^{up}, \forall i, \forall j, \forall t, s = 2, \dots, N \quad (۷)$$

$$G_{ij}(t,1) - G_{ij}(t-1,N) \leq R_{Gij}^{up}, \forall i, \forall j, t = 2, \dots, N \quad (۸)$$

$$\left(\underline{Flg}_{ij}(t,s-1) - \underline{UPT}_{ij} \right) \left(U_{ij}(t,s-1) - U_{ij}(t,s) \right) \leq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۹)$$

$$\left(\underline{Flg}_{ij}(t-1,N) - \underline{UPT}_{ij} \right) \left(U_{ij}(t-1,N) - U_{ij}(t,s) \right) \leq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (۱۰)$$

$$\left(\underline{Flg}_{ij}(t,s-1) - \underline{DOWT}_{ij} \right) \left(U_{ij}(t,s) - U_{ij}(t,s-1) \right) \leq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۱)$$

$$\left(\underline{Flg}_{ij}(t-1,N) - \underline{DOWT}_{ij} \right) \left(U_{ij}(t,s) - U_{ij}(t-1,N) \right) \leq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (۱۲)$$

$$M_{ij}(t) + U_{ij}(t,s) \leq 1, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۳)$$

$$U_{ij}(t,s) G_{ij}^{min} \leq G_{ij}(t,s) \leq U_{ij}(t,s) G_{ij}^{max}, \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۴)$$

$$\left(\frac{1}{E_{ij}^{max}} \right) G_{ij_{Ei}}(t,s) \leq G_{ij_{Hi}}(t,s) \leq \left(\frac{1}{E_{ij}^{min}} \right) G_{ij_{Ei}}(t,s) \quad \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۵)$$

$$\partial - \left(\frac{1}{H_{ij}^{min}} \right) G_{ij_{Hi}}(t,s) \leq G_{ij_{Ci}}(t,s) \leq \partial - \left(\frac{1}{H_{ij}^{max}} \right) G_{ij_{Hi}}(t,s) \quad \forall i, \forall j, \forall t, \forall s \quad (۱۶)$$

رابطه (۲) نشان دهنده تعادل میان تولید و مصرف است. رابطه (۳) به بررسی راه اندازی واحد j تولیدکننده i در یک بازه زمانی و رابطه (۴) به بررسی راه اندازی واحد j میان دو بازه زمانی پشت سر هم t و $t-1$ می پردازد. در روابط (۵-۸) قیدهای حاکم بر نرخ تغییرات مجاز در سطح تولید برای حامل های مختلف مدل شده است. در رابطه (۵) قید نرخ کاهش توان برای هر زیر بازه در بازه زمانی t مدل و رابطه (۶) قید نرخ کاهشی توان مابین دو بازه زمانی را مدل می سازد. روابط (۷ و ۸) نیز مانند روابط (۵ و ۶) به مدل سازی قید نرخ افزایش توان می پردازد. این قیود با توجه به این که برخی مولدها به سبب ماهیت کاری (مانند

اساسی بوده و از دست دادن انرژی، هزینه های جانبی بسیار زیادی به همراه دارد. بر این اساس مسئله بیشینه سازی قابلیت اطمینان MCES با در نظر گرفتن برخی از قیود بهره برداری و میزان رزرو باقی مانده منابع تولید در شبکه در صورت خروج واحدها برای تعمیر و نگهداری، به عنوان هدف دیگر این مدل ریاضی مدنظر خواهد بود. در ادامه به بیان جزئیات مدل سازی مسئله چندهدفه پرداخته می شود.

۲-۱-۲-۱- مسئله GENCO

هدف GENCO ها، کمینه کردن هزینه های برنامه ریزی میان مدت در طول دوره زمانی معین، برای کلیه واحدهای تولید تحت تملک خود می باشد. مسئله کمینه سازی از دید GENCO ها را می توان به صورت رابطه (۱) برای GENCO i مدل سازی نمود.

objective function: $Min MCOST_i$

$$MCOST_i = \sum_{\gamma} \sum_j \sum_{t=1}^T \left[\sum_{s=1}^N \left[\pi_{ij}^{P\gamma}(t,s) \times G_{ij}(t,s) + \pi_{ij}^{F\gamma} \times U_{ij}(t,s) + \pi_{ij}^{S\gamma} \times \omega_{ij}(t,s) \right] + \pi_{ij}^{m\gamma} \times M_{ij}(t) G_{ij}^{max} \right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱) اندیس j نشان دهنده مؤلفه های بردارهای تصمیم می باشد. در بخش اول رابطه (۱) هزینه تولید در دوره برنامه ریزی، بخش دوم هزینه ثابت مربوط به در مدار بودن واحد تولید، هزینه راه اندازی به عنوان بخش سوم و هزینه تعمیر و نگهداری بخش چهارم هزینه های میان مدت می باشد. با این رابطه می توان هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری واحدهای تولید در افق زمانی برنامه ریزی GENCO ها را مدل سازی نمود.

در رابطه (۱) فرض بر آن شده است که هر تولیدکننده i شامل چندین واحد تولید j بوده که هر واحد j توانایی تولید تمامی حامل های انرژی را دارا می باشد. بر این اساس می توان متغیر تصمیم توان تولیدی هر GENCO در هر بازه زمانی t و زیر بازه زمانی s به صورت زیر توسط یک بردار به نام $G_{ij}(t,s)$ نشان داد. در این رابطه i نماد تولیدکننده و j نماد واحدهای تولید است:

$$G_{ij}^T(t,s) = [E_{ij}(t,s) \quad H_{ij}(t,s) \quad C_{ij}(t,s) \quad \dots]$$

هم چنین برای بررسی روشن و خاموش بودن این مؤلفه ها در ساعات تولید نیاز به بیان یک متغیر باینری می باشد. $U_{ij}(t,s)$ بردار باینری نشان دهنده وضعیت تولید واحدها است. اگر عنصری از $U_{ij}(t,s)$ یک باشد به معنی روشن بودن واحد j از تولیدکننده i در بازه زمانی t و زیر بازه s است. بردار تصمیم گیری دیگری که در مدل بیان می شود، بردار باینری تعمیرات، $M_{ij}(t)$ است. اگر عنصری از $M_{ij}(t)$ یک باشد به معنی در تعمیرات بودن واحد j در بازه زمانی t و زیر بازه s است. هم چنین، بازه زمانی t معرف هفته های افق برنامه ریزی می باشند. هر بازه برنامه ریزی (هفته) از ۶ زیر بازه تشکیل شده است که شامل روزهای کار و آخر هفته و ساعات پیک، غیر پیک و میان باری می باشد.

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij(\tau_1)} (\tau-1) - M_{ij(\tau_2)} (t) \geq 0, \quad \forall i, \forall j, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in \underline{G}_{ij}, \forall t \quad (21)$$

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij} (\tau - dur_{ij_1} + OVI_{ij_1, j_2}) - M_{ij_2} (t) \geq 0 \quad \forall i, \forall \{j_1, j_2\} \in \varphi_i^p, \forall t \quad (22)$$

$$\sum_{\tau=1}^t [dur_{ij_2}^{min} M_{ij} (\tau - dur_{ij_1} + OVI_{j_1, j_2})] - \sum_{\tau=1}^t [dur_{ij_2}^{max} M_{ij_2} (\tau)] \leq 0, \forall i, \forall \{j_1, j_2\} \in \varphi^o, \forall t \quad (23)$$

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij(\tau_1)} (\tau - dur_{ij(\tau_1)} + OVI_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}) - M_{ij(\tau_2)} (t) \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in \underline{G}_{ij}, \forall t \quad (24)$$

$$\sum_{\tau=1}^t [dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{min} M_{ij(\tau_1)} (\tau - dur_{ij(\tau_1)} + OVI_{ij(\tau_1), j(\tau_2)})] - \sum_{\tau=1}^t [dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{max} M_{ij(\tau_2)} (\tau)] \leq 0, \quad \forall i, \forall j, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in \underline{G}_{ij}, \forall t \quad (25)$$

$$dur_{ij_2}^{min} = \min \{dur_{ij_1}, dur_{ij_2}\}, \quad dur_{ij_2}^{max} = \max \{dur_{ij_1}, dur_{ij_2}\}$$

$$dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{min} = \min \{dur_{ij(\tau_1)}, dur_{ij(\tau_2)}\},$$

$$dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{max} = \max \{dur_{ij(\tau_1)}, dur_{ij(\tau_2)}\}$$

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij} (\tau - dur_{ij_1} - SEP_{ij_1, j_2}) - M_{ij_2} (t) \geq 0, \quad \forall i, \forall \{j_1, j_2\} \in \varphi^s, \forall t \quad (26)$$

$$\sum_{\tau=1}^t [dur_{ij_2}^{min} M_{ij} (\tau - dur_{ij_1} - SEP_{ij_1, j_2})] - \sum_{\tau=1}^t [dur_{ij_2}^{max} M_{ij_2} (\tau)] \leq 0, \forall i, \forall \{j_1, j_2\} \in \varphi^s, \forall t \quad (27)$$

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij(\tau_1)} (\tau - dur_{ij(\tau_1)} - SEP_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}) - M_{ij(\tau_2)} (t) \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in \underline{G}_i, \forall t \quad (28)$$

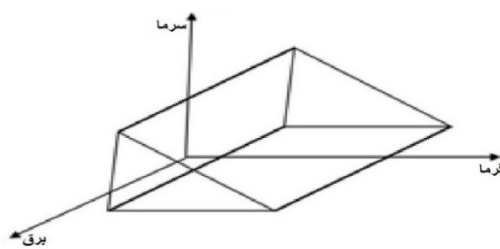
$$\sum_{\tau=1}^t [dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{min} M_{ij(\tau_1)} (\tau - dur_{ij(\tau_1)} - SEP_{ij(\tau_1), j(\tau_2)})] - \sum_{\tau=1}^t [dur_{ij(\tau_1), j(\tau_2)}^{max} M_{ij(\tau_2)} (\tau)] \leq 0, \quad \forall i, \forall j, \forall \{\gamma_{i1}, \gamma_{i2}\} \in \underline{G}_i, \forall t \quad (29)$$

در معادلات فوق، رابطه (۱۷) مدت زمان تعمیرات واحد تولید را بیان می‌کند. رابطه (۱۸) الزام می‌کند که بازه‌های زمانی تعمیرات، تعمیراتی پیوسته را ایجاد نماید. رابطه (۱۹) بیان‌کننده محدودیت نیروی انسانی و تجهیزات برای تعمیرات می‌باشد.

باتوجه به این‌که در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری واحدها، در برخی از شرایط باید برخی از واحدها زودتر از واحدهای دیگر تعمیر شوند و یا در برخی از تولیدکنندگان که چند حامل انرژی را تولید می‌کنند ممکن است مؤلفه‌های نسبت به مؤلفه‌های دیگر در رفتن به تعمیرات تقدم داشته‌باشد. این محدودیت‌ها توسط روابط (۲۰) و (۲۱) مدل می‌شوند. رابطه (۲۰) مربوط به محدودیت تقدم دو واحدهای تولیدی نسبت به هم می‌باشد. مجموعه φ_i^p ، مجموعه واحدهایی تولیدکننده i است که نسبت

مولدهای تولید بخار)، نرخ افزایش و یا کاهش توان آن‌ها بسیار پایین بوده و گاهی چند زیر بازه زمانی را پوشش می‌دهد، مدل‌سازی شده‌اند. روابط (۹-۱۲) حداقل میزان بازه زمانی موردنیاز برای روشن‌بودن و یا خاموش‌بودن مؤلفه‌های واحدهای تولید را نشان می‌دهند. بردار $Flg_{ij}(t, s)$ بیانگر بردار تعداد ساعات روشن بودن (+) و یا خاموش بودن (-) واحد j تولیدکننده i می‌باشد. UPT_{ij} بردار حداقل زمان مجاز برای روشن‌ماندن و بردار $DOWT_{ij}$ بیانگر حداقل زمان مجاز برای خاموش‌ماندن واحد j تولیدکننده i می‌باشد. این مقادیر با توجه به حامل انرژی و قابلیت‌های ترمودینامیکی و فیزیکی تجهیزات به دست می‌آید که شرکت ثالث باید این موارد را مورد توجه قرار دهد. رابطه (۱۳) ارتباط در مدار بودن واحدهای تولید را با وضعیت تعمیرات نشان می‌دهد. رابطه (۱۴) به بررسی حداکثر و حداقل میزان توان تولیدی یک واحد می‌پردازد.

باتوجه به توسعه روابط بیان‌شده در [۴۳] روابط (۱۶-۱۵) شامل قیدهای مربوط به حد بالا و پایین نسبت تولید قدرتی و قدرتی (و نسبت تولید حرارت و سرما) در سیستم می‌باشند. در یک سیستم تولید هم‌زمان برق، حرارت و سرما یک منحنی قابلیت تولید مطابق شکل (۳) وجود دارد که رفتار CCHP می‌تواند براساس شرایط کاری در هر لحظه، در یک نقطه خاص از این مشخصه قابلیت، قرار گیرد. در حالت کلی این نسبت به صورت یک تابع درجه دوم از شرایط کاری سیستم و عوامل محیطی مانند رطوبت نسبی، ارتفاع از سطح دریا، دمای محیط و... می‌باشد؛ ولی در مدل‌سازی این رابطه به صورت یک تابع خطی با یک فضای شدنی تقریب زده شده است که پاسخ خروجی کل مدل‌سازی را سریع‌تر و با یک دقت مناسبی از پاسخ واقعی سیستم ارائه می‌دهد.



شکل (۳): منحنی قابلیت تولید منابع CCHP

در رابطه (۱۶) θ یک عدد ثابت می‌باشد که به فتاوری تولید سرما وابسته است. قیود مربوط به مقوله تعمیر و نگهداری واحدهای تولیدی تولیدکنندگان نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{t=1}^T M_{ij} (t) = dur_{ij}, \forall i, \forall j \quad (17)$$

$$M_{ij} (t) - M_{ij} (t-1) \leq M_{ij} (t + dur_{ij} - 1), \forall i, \forall j, \forall t \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J M_{ij} (t) \leq N_i (t), \forall i, \forall t \quad (19)$$

$$\sum_{\tau=1}^t M_{ij_1} (\tau-1) - M_{ij_2} (t) \geq 0, \forall i, \forall \{j_1, j_2\} \in \varphi_i^p, \forall t \quad (20)$$

تعمیرات نبودن واحد می‌باشد که این محدودیت‌ها در قیود مسئله بیان می‌گردد.

در حالت کلی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مسئله که با استفاده از پیش‌بینی و تحلیل بار حاصل می‌شود، میزان تقاضای بار مصرفی مشترکین می‌باشد که به صورت بردار $\underline{D}(t,s)$ نمایش داده می‌شود. این بردار میزان مصرف حامل‌ها توسط مصرف‌کنندگان بوده و تعداد درایه‌های آن می‌تواند با درایه‌های بردار تولید $\underline{G}_{ij}(t,s)$ تفاوت داشته‌باشد. به بیان بهتر مصرف‌کننده‌ها انرژی الکتریکی، گرمایی، سرمایی و گاز را مصرف نموده و برای خود گرما، سرما، روشنایی و مصرف برق برای وسایل الکتریکی دیگر مانند موتورها را تأمین می‌نمایند. در این شرایط می‌توان هر یک از این مؤلفه‌ها را توسط رابطه‌ای (۳۱) با مؤلفه‌های اصلی موجود در شبکه ارتباط داد.

$$\begin{aligned} \underline{D}(t,s) &= \underline{C} \times \underline{DN}(t,s) \\ \underline{D}^T(t,s) &= [E_b(t,s) \quad H_b(t,s) \quad C_b(t,s) \quad \dots] \\ \underline{DN}^T(t,s) &= [E_{DN}(t,s) \quad H_{DN}(t,s) \quad C_{DN}(t,s) \quad \dots] \end{aligned} \quad (31)$$

در رابطه (۳۱) ماتریس تبدیل مؤلفه شبکه به مؤلفه بار است. هم چنین بردار $\underline{DN}(t,s)$ بردار مؤلفه‌های مصرفی از دید شبکه بوده و برنامه‌ریزی تولید باید بر پایه این بردار انجام شود. باتوجه به این مطالب می‌توان گفت که بار از دو بخش تشکیل شده‌است. بخش اول، آن دسته از حامل‌های مصرفی است که نیازی نیست که از تبدیل حامل‌های اولیه حاصل شوند. بخش دوم، شامل مقداری از مصرف می‌باشد که از تبدیل حامل‌های اولیه به دست می‌آید. به بیان دیگر رابطه (۳۱) را می‌توان به صورت (۳۲) بازنویسی نمود.

$$\underline{D}(t,s) = \underline{D}_1(t,s) + \underline{D}_2(t,s), \begin{cases} \underline{D}_1(t,s) = \underline{C} \times \underline{DN}_1(t,s) \\ \underline{D}_2(t,s) = \underline{DN}_2(t,s) \end{cases} \quad (32)$$

براین اساس می‌توان مقدار مصرف موردنیاز از شبکه را به صورت (۳۳) و بر اساس پیش‌بینی بار مشترکین به دست آورد.

$$\begin{aligned} \underline{DN}(t,s) &= \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s) \\ \underline{DN}(t,s) &= \underline{C}^{-1} \times \underline{D}_1(t,s) + \underline{D}_2(t,s) \end{aligned} \quad (33)$$

در $MCES$ همواره میزان مصرف حامل‌ها با یکدیگر رابطه دارد که در صورت مشکل برای تأمین حاملی، مقدار تقاضای برای مصرف آن مؤلفه به سمت مؤلفه‌های دیگر سوق پیدا می‌کند. علت این امر، وجود امکان تبدیل (متبلور در ماتریس تبدیل \underline{C}) میان میزان مصرف واقعی مصرف‌کنندگان (\underline{D}_i) و مصرف دیده‌شده از سوی شبکه تولید (\underline{DN}_i) است. به بیان بهتر هنگامی که حاملی از دست می‌رود، مصرف‌کننده‌ها به صورت خودکار می‌توانند (در صورت وجود امکان تبدیل) نیاز به آن حامل را از طریق مصرف حامل‌های دیگر برآورده می‌نمایند و در نتیجه می‌توان یک رزرو کلی برای کل حامل‌ها در نظر گرفت. بر این اساس روابط (۱۹-۲۰) میزان حداقلی برای رزرو چرخان به واسطه رابطه‌ای میان حداقل رزرو برای تک تک حامل‌ها را بیان می‌نماید.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \underline{U}_{ij}(t,s) \underline{G}_{ij}(t,s) (1 - \underline{M}_{ij}(t)) + \underline{R}^{SR}(t,s) \\ - (\underline{C}^{-1} \times \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s)) \geq \underline{R}^{min}(t,s), \forall t, \forall s \end{aligned} \quad (34)$$

به هم حق تقدم دارند و $\underline{I}j_2$ و $\underline{I}j_1$ عضو این مجموعه می‌باشند و $\underline{I}j_1$ نسبت به $\underline{I}j_2$ دارای حق تقدم است. رابطه (۲۱) همانند رابطه (۲۰) است با این تفاوت که در یک واحد تولیدی مانند i یکی از مؤلفه‌ها مانند γ_{i1} نسبت به مؤلفه دیگری مانند γ_{i2} دارای تقدم است.

روابط (۱۷-۲۵) هم‌زمانی برنامه تعمیر و نگهداری را نشان می‌دهد. این قیود وضعیت‌هایی را نشان می‌دهند که یک واحد و یا مؤلفه تولید در زمان تعمیرات حتماً باید با یک واحد و یا مؤلفه دیگر هم‌زمان باشد. به عنوان نمونه در برنامه‌ریزی واحد $CCHP$ نمی‌توان واحد تولید انرژی حرارتی را در یک بازه زمانی و واحد تولید انرژی الکتریکی را در بازه زمانی دیگر برای تعمیر خاموش کرد. در این شرایط و یا شرایط مشابه این واحدها و مؤلفه‌ها باید باهم برای تعمیر از مدار تولید خارج شوند. در روابط فوق $OV_{ij_1j_2}$ میزان هم‌زمانی دو واحد و $OV_{ij_1j_2}^0$ میزان هم‌زمانی دو مؤلفه و مجموعه φ_i^0 نشان‌دهنده مجموعه واحدهای تولیدکننده i دارای هم‌زمانی می‌باشد.

مانند قیود مربوط به هم‌زمانی برای خروج واحدها و یا مؤلفه‌ها، در برخی موارد باید یک واحد خاص تعمیر شود و پس از بازه زمانی معینی، واحد دیگری و یا مؤلفه دیگری از یک واحد تولیدی به تعمیرات برود. براساس این فرض روابط (۲۶-۲۷) محدودیت را برای واحدهای تولید و روابط (۲۸-۲۹) محدودیت را برای مؤلفه‌های یک منبع تولید بیان می‌دارند. در روابط فوق $SEP_{ij_1j_2}$ میزان فاصله زمانی بین تعمیرات دو واحد و $SEP_{ij_1j_2}^0$ میزان فاصله زمانی بین تعمیرات دو مؤلفه و مجموعه φ_i^f نشان‌دهنده مجموعه واحدهای تولیدکننده i که باهم اختلاف‌زمانی دارند، می‌باشد.

۲-۲-۲- مسئله ISO

براساس مطالب بیان‌شده، در مسئله برنامه‌ریزی میان‌مدت چندهدفه، هدف ISO بیشینه‌نمودن شاخص قابلیت‌اطمینان و بیشینه نمودن میزان رزرو تولید، در بازه‌های زمانی برنامه‌ریزی می‌باشد [۲۴] و [۳۲]. در این مقاله باتوجه به چندحاملی بودن شبکه، وابستگی بار به حامل‌های مختلف (توانایی تأمین بار با استفاده از حامل‌های گوناگون) و وجود ماتریس تبدیل حامل‌ها، می‌توان ساختار دیگری برای تعیین سطح حداقل رزرو و شاخص رزرو تولید قابلیت‌اطمینان ارائه نمود.

در رابطه (۳۰) مقدار ظرفیت تولید باقی‌مانده در کل بازه‌های زمانی نشان داده شده‌است و هدف این است که در طول مدت برنامه‌ریزی میزان ذخیره باقی‌مانده (چرخان و غیر چرخان) در شبکه بیشینه مقدار خود باشد.

$$\begin{aligned} \text{objective function : Max } RIX(t,s) \\ RIX(t,s) = \frac{\underline{R}^{SR}(t,s) + \underline{R}^{NSR}(t,s)}{\sum_{i=1}^I G_i^{max} - \underline{DN}(t,s)} \end{aligned} \quad (30)$$

صورت کسر رابطه (۳۰)، میزان کل ذخیره شبکه چندحاملی (چرخان و غیر چرخان) را نشان می‌دهد که در دسترس ISO برای افزایش سطح قابلیت‌اطمینان قرار دارد. شاخص فوق از دو بخش رزرو چرخان که وابسته به میزان ظرفیت تولید واحد روشن و رزرو غیر چرخان تشکیل یافته‌است. میزان رزرو غیر چرخان وابسته به برنامه میان‌مدت و در

و (34-36) که در بخش قبل توضیح داده شده‌اند، نیز گنجانده شده‌است. باتوجه به این که در مسئله ارائه شده چندین نهاد تولیدکننده حضور دارند و به ازای هر یک از این نهادها مسئله دارای یک بعد جدید می‌گردد، می‌توان جنبه پارتو فوق را یک ابر نقاط در فضایی چندبعدی تصور نمود که یک بعد آن هدف ISO و دیگر بعدها را هدف GENCO تشکیل می‌دهند.

۲-۴- تصمیم‌گیری فازی

با حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با روش ε -constraint و تشکیل جنبه پارتو از پاسخ‌های بهینه مسئله فوق، لازم است یک استراتژی مناسب برای تعیین بهترین پاسخ و راه‌حل از مجموعه پاسخ‌های بهینه پارتو انتخاب شود. این استراتژی باید به نحوی توسط شرکت ثالث برای بازیگران شفاف و بدون ابهام باشد که آن‌ها پاسخ نهایی را مورد قبول قرار داده و با نتایج آن سازگاری داشته و از آن تبعیت نمایند.

برای ایجاد این سازگاری از روش تصمیم‌گیری فازی در این مقاله، استفاده شده‌است. در این روش به هر پاسخ موجود در جنبه پارتو یک تابع عضویت فازی در فاصله [0, 1]، اختصاص داده می‌شود. براساس [41] توابع عضویت فازی خطی، می‌تواند برای λ امین تابع هدف $O.F_i$ با استفاده از معادله (38) به دست آید.

$$O.F_i = \begin{cases} 1 & O.F_i \leq O.F_i^{\min} \\ \frac{O.F_i - O.F_i^{\max}}{O.F_i^{\min} - O.F_i^{\max}} & O.F_i^{\min} \leq O.F_i \leq O.F_i^{\max} \\ 0 & O.F_i^{\max} \leq O.F_i \end{cases} \quad (38)$$

بهترین پاسخ سازگار را می‌توان با استفاده از روش Min-Max ارائه شده در [42] از مجموعه فوق انتخاب نمود. بر این اساس در ابتدای امر و پس از فازی‌سازی جنبه پارتو، کم‌ترین مقدار هر تابع عضویت فازی برای هر $\overline{O.F_i}$ را در هر تکرار به‌عنوان عدد نشان‌دهنده آن تکرار انتخاب می‌گردد. سپس بیش‌ترین مقدار، این کمینه‌ها تعیین‌کننده پاسخ خروجی بوده و نتایج $O.F_i$ آن تکرار پاسخ مسئله می‌باشد.

باتوجه به این مدل‌سازی و تفاوت در اهداف بازیگران، می‌توان انتظار داشت تا پاسخ این مدل (با در نظرگیری شرایط تجدیدساختار) نسبت به حالتی که تمامی شبکه و تولیدکنندگان برای یک نهاد (monopole) باشد [21] و [32]، تفاوت داشته‌باشد. در ادامه برای بررسی این موضوع یک مطالعه عددی ارائه و نتایج آن تحلیل خواهد شد.

۳- مطالعات عددی

برای شبیه‌سازی و پایش مدل ارائه شده و تحلیل نتایج مدل از اطلاعات یک شبکه چندحاملی بومی استفاده شده‌است. شبکه چندحاملی مذکور، در منطقه ویژه اقتصادی عسلویه در استان بوشهر واقع شده و شامل چندین پالایشگاه، پتروشیمی، نیروگاه برق و بخار و سرما و منطقه مسکونی می‌باشد. در این ناحیه 3 تولیدکننده اصلی در مجموع دارای 10 منبع تولید هم‌زمان، 14 واحد تولید انرژی الکتریکی و 15 واحد تولید حرارت و سرما وجود می‌باشند که در ادامه، اطلاعات این منابع و تولیدکنندگان در جداول (1-6) ارائه شده‌است:

$$\underline{R}^{\min}(t,s) = \underline{\alpha} \times \text{loadIdx} \times \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^N \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G_{ij}^{\max} (1 - \underline{M}_{ij}(t)) - \text{loadIdx} \right)}{\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^N \text{loadIdx}} \quad (35)$$

$$\text{loadIdx} = (C^{-1} \times \delta \underline{DN}_1(t,s) + \underline{DN}_2(t,s)) \quad (35)$$

$$\underline{R}^{\text{NSR}}(t,s) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (1 - \underline{U}_{ij}(t,s)) G_{ij}^{\max} (1 - \underline{M}_i(t)) \quad (36)$$

در رابطه (34) میزان تولید واحدهای روشن با میزان رزرو چرخان باید از مقدار بار به‌اندازه $\underline{R}^{\min}(t,s)$ بیشتر باشد. رابطه (35) نشان‌دهنده میزان حداقلی رزرو برای هر حامل است. در این رابطه بردار $\underline{\alpha}$ ضریب کلی تعیین میزان حداقلی رزرو شبکه و بردار $\underline{\delta}$ ضریب مقبولیت استفاده و سوق به سمت مؤلفه‌ها در شبکه می‌باشد. این ضرایب توسط ISO و با استفاده از تحلیل حساسیت حامل‌های انرژی و تحلیل میزان طریقه مصرف آن‌ها با توجه به سابقه بار حاصل می‌گردد.

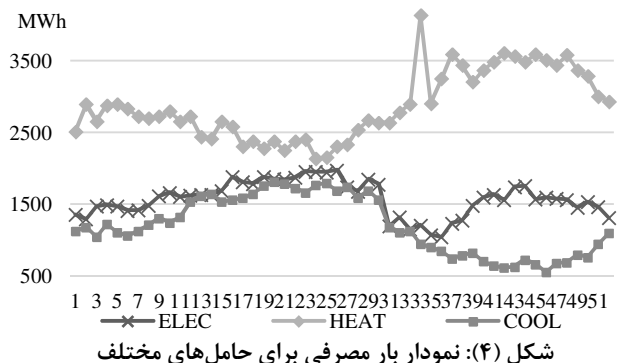
با استفاده از این ضرایب، بهره‌بردار می‌تواند با توجه به مقبولیت استفاده از حامل‌ها، میزان رزرو اختصاص داده شده به آن حامل را تعیین نماید. به‌عنوان مثال در یک شبکه مصرف خانگی، تمایل افراد برای مصرف انرژی الکتریکی به‌عنوان جایگزین انرژی‌های دیگر بسیار بالاست. این امر به‌گونه‌ای است که حتی در صورت وجود سایر حامل‌ها، مصرف‌کنندگان تمایل فراوانی به استفاده از انرژی الکتریکی دارند. این موضوع سبب افزایش ضریب مقبولیت و در نتیجه میزان رزرو برای انرژی الکتریکی شده و میزان رزرو برای حامل‌های دیگر را کاهش می‌دهد. ازسوی دیگر این نحوه محاسبه رزرو این اختیار را به بهره‌بردار خواهد داد تا با صرف انرژی و هزینه کمتر میزان رزرو موردنیاز خود را با توجه به تبدیلات بار تعیین کند.

۲-۳- روش ε -constraint

روش ε -constraint رویکردی است که در آن مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسئله تک‌هدفه تبدیل می‌شود. در این روش، تمامی توابع هدف‌ها، به‌جز یکی، به‌عنوان محدودیت‌های نابرابری با تعیین ارزش مناسب برای پارامتر کنترل نابرابری (به‌عنوان پارامتر ε) به‌عنوان محدودیت لحاظ می‌گردند. بر این اساس و در مسئله بیان شده در این مقاله، هدف قابلیت اطمینان به‌عنوان هدف اصلی حفظ شده و سایر اهداف به‌عنوان محدودیت با کران ε لحاظ می‌گردد.

$$O.F : \text{Max RIX}(t,s) \\ \text{ST} : \begin{cases} \text{MCOST}_i O.F \leq \varepsilon_i \\ (2-29), (34-36) \end{cases} \quad (37)$$

همان‌گونه که در معادلات (37) مشاهده می‌شود، مسئله کمینه‌سازی هزینه تولیدکنندگان (به‌عنوان مثال MCOST_i) با پارامتر ε_i محدود می‌شود. این پارامتر به تدریج از حداقل مقدار به حداکثر مقدار هزینه تولید هر بازیگر (از MCOST_i^{\min} تا MCOST_i^{\max}) تغییر می‌نماید و برای هر مقدار از ε ، مسئله بهینه‌سازی فوق برای یک قید اصلاح شده مجدداً حل شده و نقطه بهینه برای آن قید را ارائه می‌دهد. قابل ذکر است که در رابطه فوق محدودیت‌های مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، (2-29)



برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی از روش تحلیل مدل براساس مدل‌های مشابه استفاده شده‌است. برای این کار، در ابتدا شبیه‌سازی با مثال عددی مراجع [۲۳-۲۴] و با فرض وجود حامل‌های الکتریکی (در غیاب سایر حامل‌ها) انجام و نتایج آن با نتایج مراجع مذکور برای بررسی صحت عمل کرد مدل پیشنهادی و نحوه شبیه‌سازی تطبیق داده‌شد. پس از اطمینان از پاسخ، مثال عددی مرتبط به $MCES$ عسلویه به مدل افزوده و به بررسی قیود با استفاده از تحلیل فضای‌شدنی، بررسی تغییر در پارامترها و کران روابط، پرداخته‌شد. سپس تأثیر حامل‌ها در حالت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت و از صحت نتایج خروجی شبیه‌سازی در نرم‌افزار اطمینان کامل به دست آمد.

۳-۱- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

برای شبیه‌سازی مجموعه در ابتدا باتوجه‌به حضور سه $GENCO$ و یک ISO شرکت ثالث با یک جبهه پارتو ۴ بعدی مواجه خواهدبود که بااستفاده از روش تصمیم‌گیری فازی جواب پایانی را ارائه خواهدداد. باتوجه‌به این‌که این جواب، نتیجه تصمیم‌گیری می‌باشد، انتظار می‌رود پاسخ حاصله با پاسخ بهینه مطلق $MCES$ در شرایط انحصاری در مقدار قابلیت‌اطمینان و هزینه میان‌مدت و به طبع آن پنجره خروجی برای تعمیرات واحدهای تولید تفاوت داشته‌باشد. برای تحلیل بهتر این موضوع، در این مقاله برای داشتن دیدی نسبت به تفاوت دو حالت فوق، علاوه‌بر پاسخ بر اساس مدل رقابتی و جبهه پارتو، پاسخ $MCES$ در شرایط انحصاری نیز باتوجه‌به این‌که ISO برنامه‌ریز تعمیر و نگهداری تمام مجموعه را باهدف بیشینه‌نمودن قابلیت اطمینان انجام دهد، ارائه می‌گردد. مدل‌ها در نرم‌افزار $GAMS$ شبیه‌سازی و توسط موتور $CPLEX$ حل‌شده [۴۴] که با حدود ۶۷ هزار متغیر در حدود ۲۵ ساعت توسط یک کامپیوتر با RAM 4G و CPU Ci7 2.8GHz به طول انجامیده‌است.

۳-۱-۱- جبهه پارتو مسئله

باتوجه‌به وجود چهار بازیگر اصلی در شبیه‌سازی فوق، جبهه پارتو حاصله چهاربعدی خواهدبود. بر این اساس و برای ارائه پاسخ با استفاده از روش‌های کاهش پاسخ و استفاده از الگوریتم‌های ϵ -constraint تقویت‌شده [۴۵] جبهه حاصله به‌صورت جدول (۷) ارائه می‌شود.

جدول (۷): جبهه پارتو شبیه‌سازی

تکرار	$GENCO3$	$GENCO2$	$GENCO1$	RIX
۱	۲۸۲۳۶۱۰۲۰	۲۹۱۱۷۰۴۱۵	۶۵۲۵۴۴۸۶۴	۰/۹۴۲۲۰۶۳
۲	۲۸۲۸۲۵۸۴	۲۸۶۸۵۶۸۶۴	۶۵۲۵۶۳۶۴۰	۰/۹۴۲۸۰۷۳

جدول (۱): مشخصات منابع تولید انرژی الکتریکی

واحد الکتریکی	۱-۲	۳-۶	۷-۹	۱۰-۱۴
G_i^{max}	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰
G_i^{min}	۱۱۰	۷۰	۲۵	۱۰
dur_i	۳	۲	۱	۱
UPT_{ij}	۷۲	۴۸	۱	۱
$DOWNT_{ij}$	۹۶	۴۸	۱	۱
R_{Gi}^{up}	۲۰	۵۰	۱۰۰	۵۰
R_{Gi}^{down}	۵۰	۷۵	۱۰۰	۵۰
π_j^m	۸۰۰۰۰	۱۲۱۰۰۰	۱۸۱۰۰۰	۲۰۱۰۰۰
π_j^{Fx}	۹۴۰۰۰	۸۷۴۰۰	۴۷۲۰۰	۴۳۷۰۰
π_j^{Su}	۱۴۹	۷۳	۳۶	۵۴

جدول (۲): مشخصات منابع تولید انرژی گرمایی

واحد گرما	۱-۴	۵-۸	۹-۱۱	۱۲-۱۵
G_i^{max}	۴۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰
G_i^{min}	۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰
dur_i	۱	۱	۱	۱
UPT_{ij}	۱۴۴	۹۶	۹۶	۳۴
$DOWNT_{ij}$	۱۲۰	۹۶	۴۸	۲۴
R_{Gi}^{up}	۱۰۰	۱۲۵	۵۰	۵۰
R_{Gi}^{down}	۲۵۰	۱۲۵	۱۰۰	۱۰۰
π_j^m	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۲۰۰۰
π_j^{Fx}	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰
π_j^{Su}	۴۵	۳۴۷	۱۹/۸	۲۲/۵

جدول (۳): مشخصات منابع تولید انرژی سرمایی

واحد سرما	۱-۳	۴-۶	۷-۹	۱۰-۱۵
G_i^{max}	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰
G_i^{min}	۱۰۰	۷۰	۵۰	۲۵
dur_i	۳	۳	۲	۲
UPT_{ij}	۱۲۰	۱۴۴	۹۶	۴۸
$DOWNT_{ij}$	۱۶۸	۱۶۸	۱۲۰	۱۲۰
R_{Gi}^{up}	۲۰	۱۵	۱۰	۵
R_{Gi}^{down}	۳۰	۲۵	۱۵	۱۰
π_j^m	۹۵۰۰۰	۴۷۲۰۰	۳۷۵۰۰	۳۴۰۰۰
π_j^{Fx}	۶۷۰۰۰	۶۵۳۰۰	۵۹۸۰۰	۴۵۷۰۰
π_j^{Su}	۹۵	۸۹/۷	۵۷/۲۱	۶۱/۴۷

جدول (۴): مشخصات منابع تولید انرژی هم‌زمان

واحد $CCHP$	۱-۴	۵-۶	۷-۱۰
MAX Electric	۱۵۰	۷۵	۵۰
MIN Electric	۷۰	۳۰	۱۰
MAX Heat	۱۳۵	۶۵	۷۰
MIN Heat	۵۰	۲۰	۱۰
MAX Cool	۱۰۰	۵۵	۰
MIN Cool	۳۰	۱۵	۰
DURation	۲	۲	۱

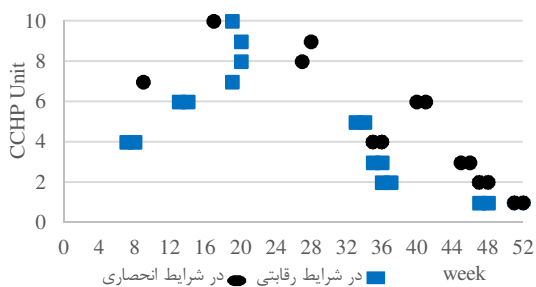
جدول (۵): ضریب تولید منابع تولید هم‌زمان

واحد $CCHP$	۱-۴	۵-۶	۷-۱۰
E_{min}	۱/۱۳	۱/۱۷	۰/۶۹۷
E_{max}	۱/۴۶	۱/۳۹	۰/۹۷۳
H_{min}	۱/۳۷۲	۱/۱۹۳	---
H_{max}	۱/۶۴	۱/۲۸۴	---

جدول (۶): مشخصات $GENCO$

$GENCO$	$CCHP$	منابع الکتریکی	منابع گرمایی	منابع سرمایی
$GENCO1$	۱-۴	۱-۲	۵-۸	۱-۳ و ۱۰-۱۵
$GENCO2$	۵-۶	۳-۶	۹-۱۵	۷-۹
$GENCO3$	۷-۱۰	۷-۱۴	۱-۴	۴-۶

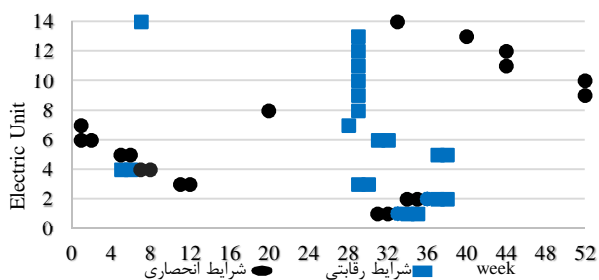
شکل (۳) نمودار میزان پیک بار مصرفی هفتگی در بخش‌های گرما، سرما و الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل (۵): برنامه زمان‌بندی تعمیر و نگهداری منابع تولید هم‌زمان

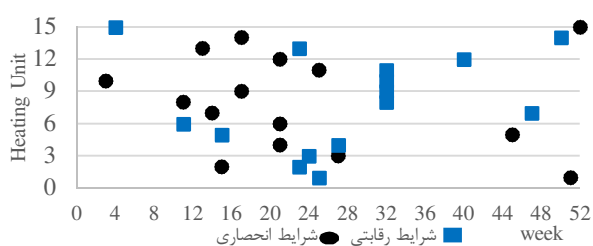
شکل فوق ارائه‌دهنده پنجره زمانی خروج واحدهای تولید هم‌زمان در دو شرایط رقابتی و انحصاری می‌باشد. باتوجه‌به این‌که در برنامه‌ریزی خروج در شرایط انحصاری تنها، هدف قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد، برنامه خروج واحدهای تولید هم‌زمان به نحوی در برنامه‌ریزی قرار گرفته تا در صورت خروج ژنراتورها، چیلرها و بویلرها، قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی، گرمایش و سرمایش در بیشینه مقدار ممکن باشد.

این موضوع در تحلیل برنامه‌ریزی در شرایط رقابتی به نحوی دیگر بوده و علت آن ناشی از رفتار مالکان و تأثیر هزینه‌های آن‌ها ناشی می‌شود. به بیان بهتر باتوجه‌به این‌که مالکان تمایل دارند که در ساعاتی که محصول آن‌ها کمترین میزان مشتری و به طبع آن کمترین مقدار قیمت را دارد، برای تعمیرات از برنامه تولید خارج شوند. بر این اساس می‌توان انتظار داشت که خروج واحدها در هفته‌هایی صورت پذیرد که کمترین میزان تقاضا برای بارها وجود داشته‌باشد. بر این اساس در مورد منابع تولید هم‌زمان بیش‌تر در هفته‌های ۳۰ الی ۴۳ صورت پذیرفته که مطابق شکل (۴) این هفته‌ها کمترین میزان انرژی الکتریکی و سرمایش در MCES مصرف می‌شود. در شکل (۶) نیز این موضوع به‌نحوی دیگر نشان داده‌شده و تمرکز خاموشی منابع تولید الکتریکی باتوجه‌به ظرفیت تولید و هماهنگی با برنامه خروج CCHPها نشان داده شده‌است.



شکل (۶): برنامه زمان‌بندی نگهداری منابع تولید انرژی الکتریکی

نکته دیگری که در شکل (۶) وجود دارد تلاقی دو برنامه خاموشی واحدهای یک، دو و چهار GENCO1 در برخی از هفته‌ها می‌باشد.



شکل (۷): برنامه زمان‌بندی نگهداری منابع تولید انرژی حرارتی

۲۸۲۹۲۵۱۵۴	۲۸۷۰۷۲۵۴۲	۶۵۲۶۹۷۲۲۸	۰/۹۴۲۹۸۳۵	۳
۲۸۳۰۲۷۷۲۳	۲۸۷۲۵۵۲۲۰	۶۵۲۸۳۰۸۱۷	۰/۹۴۳۰۴۲۵	۴
۲۸۳۰۷۹۰۷۸	۲۸۷۳۹۶۰۵۸	۶۵۲۸۹۷۶۱۱	۰/۹۴۳۲۹۷۳	۵
۲۸۳۱۳۰۲۹۳	۲۸۷۵۰۳۸۹۷	۶۵۲۹۶۴۴۰۵	۰/۹۴۳۲۹۳۲	۶
۲۸۳۱۸۱۵۷۸	۲۸۷۶۱۱۷۳۶	۶۵۳۰۳۱۱۹۹	۰/۹۴۳۲۰۳۹	۷
۲۸۳۲۳۲۸۶۳	۲۸۷۷۱۹۵۷۲	۶۵۳۰۹۷۹۹۳	۰/۹۴۳۲۹۷۳	۸
۲۸۳۲۸۴۱۴۸	۲۸۷۸۲۷۴۱۳	۶۵۳۱۶۴۷۸۷	۰/۹۴۳۱۶۱۴	۹
۲۸۳۳۳۵۴۹۷	۲۸۷۹۰۵۸۰۱	۶۵۳۲۳۲۷۲۸	۰/۹۴۳۳۱۳۹	۱۰
۲۸۳۳۸۶۸۲۸۲	۲۸۸۰۱۳۶۴۰	۶۵۳۲۹۹۵۲۲	۰/۹۴۳۲۳۵۸	۱۱
۲۸۳۴۳۸۲۸۶۳	۲۸۸۱۲۱۴۷۹	۶۵۳۳۶۶۳۱۶	۰/۹۴۳۲۳۱۲	۱۲
۲۸۳۴۸۹۵۶۷	۲۸۸۲۳۰۲۹۳	۶۵۳۴۳۳۰۸۱۷	۰/۹۴۳۲۳۱۲	۱۳
۲۸۳۵۴۰۸۱۷	۲۸۸۳۳۹۱۰۷	۶۵۳۵۰۰۰۰۰	۰/۹۴۳۲۳۱۲	۱۴

براساس اسلوب ارائه‌شده در الگوریتم تصمیم‌گیری فازی مبتنی بر تکنیک Min-Max می‌توان جدول (۸) را برای اعداد فازی و انتخاب بهترین پاسخ ارائه داد.

جدول (۸): اعداد فازی جبهه پارتو و کمینه هر ردیف

تکرار	GENCO1	GENCO2	GENCO3	RIX	Min
۱	۰/۶۳۲۷	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۷۸	۰/۱۰۰۰
۲	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۸۱۶۳	۰/۰۳۷۲	۰/۰۳۷۲
۳	۰/۹۵۰۰	۰/۹۵۱۲	۰/۷۷۵۵	۰/۰۲۴۲	۰/۰۲۴۲
۴	۰/۹۰۰۰	۰/۸۹۹۹	۰/۷۳۴۷	۰/۰۱۹۹	۰/۰۱۹۹
۵	۰/۸۷۵۰	۰/۸۵۵۰	۰/۷۱۴۳	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱
۶	۰/۸۵۰۰	۰/۸۶۰۰	۰/۶۹۳۹	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۴
۷	۰/۸۲۵۰	۰/۸۳۶۱	۰/۶۷۳۵	۰/۰۰۸۰	۰/۰۰۸۰
۸	۰/۸۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۶۵۳۱	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱
۹	۰/۷۷۵۰	۰/۷۷۴۸	۰/۶۳۲۷	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۱۱
۱۰	۰/۵۲۵۰	۰/۵۲۴۶	۰/۴۲۸۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۱۱	۰/۵۰۰۰	۰/۴۹۹۸	۰/۴۰۸۲	۰/۰۲۷۷	۰/۰۲۷۷
۱۲	۰/۴۷۵۰	۰/۴۷۵۰	۰/۳۸۷۸	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۶۷
۱۳	۰/۰۵۰۰	۰/۰۵۰۰	۰/۰۰۱۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۰۰

براساس تکنیک Min-Max پس از آن که مقدار فازی هر عدد استخراج گردید، کمینه مقدار هر ردیف به‌عنوان نماینده آن ردیف انتخاب می‌شود. در گام بعد ردیف مربوط به بیش‌ترین مقدار این کمینه‌های فازی به‌عنوان پاسخ تعیین می‌گردد که در این شبیه‌سازی، پاسخ منصوب به تکرار ۲ به‌عنوان پاسخ مسئله انتخاب شده‌است. بر این اساس شرکت ثالث می‌تواند پنجره زمانی تعمیر و نگهداری، مقدار شاخص قابلیت اطمینان و هم‌چنین هزینه میان‌مدت تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری از این مجموعه‌ها را در اختیار GENCOها قرار دهد. با توجه به این مطالب می‌توان پنجره زمانی‌های مربوط به خروج واحدها را به‌صورت شکل (۵) تا شکل (۸) ارائه نمود.

۳-۲- پنجره زمانی خروج واحدها

برای ارائه یک مقایسه میان برنامه‌های خروج، تحت شرایط این‌که MCES در شرایط انحصاری [۴۶] (و باهدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان) و مالکیت یک‌نهاد باشد، نسبت به شرایط رقابتی (و حل مسئله توسط یک‌نهاد ثالث)، در شکل‌های (۵) الی (۸) دو برنامه خروج واحدها ارائه شده‌است.

مختلف در جدول (۷) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود میزان میانگین شاخص و مقدار حداقل آن در دو برنامه متفاوت است. علت اصلی این موضوع نیز ناشی از هدف و ساختارهای برنامه ریزی می باشد. در شرایط انحصاری به علت این که هدف مالک شبکه بیشینه نمودن میزان قابلیت اطمینان برنامه ریزی شده بود و هم چنین اختیار کل منابع را در اختیار داشت، میزان شاخص بالاتر از مقدار شاخص در شرایط رقابتی می باشد. براساس این موضوع، در جداول (۸) و (۹) وضعیت این شاخص ها را در حامل های دیگر موجود در *MCES* نیز قابل مشاهده می باشد.

جدول (۸): مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان شبکه

گرمایش

در شرایط انحصاری	در شرایط رقابتی	متوسط
۰/۹۴۱	۰/۹۳۵	
۰/۶۳۵	۰/۵۵	حداقل

در خصوص شبکه سرمایه گذاری نیز در این شبیه سازی عددی، مقدار متوسط شاخص قابلیت اطمینان در شرایط رقابتی بیشتر از مقدار متوسط در شرایط انحصاری می باشد.

جدول (۹): مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان شبکه

سرمایش

در شرایط انحصاری	در شرایط رقابتی	متوسط
۰/۸۹۹	۰/۹۲۸	
۰/۵۵۱	۰/۵۸۸	حداقل

۳-۳-۱- هزینه تعمیر و نگهداری در برنامه ها

در برنامه اجرا شده، هزینه تولیدکنندگان به عنوان ملاکی برای بررسی وضعیت تولید در دو شرایط انحصاری و رقابتی قابل مقایسه می باشد. باتوجه به این که در شرایط انحصاری هدف اصلی مالک *MCES* تأمین انرژی مصرف کنندگان و بالابودن شاخص قابلیت اطمینان می باشد در نتیجه امر هزینه تولید، اندکی مغفول مانده و به طبع با توجه به افزایش میزان قابلیت اطمینان افزایش خواهد یافت. این موضوع در مورد شرایط رقابتی و ارائه برنامه ریزی توسط شرکت ثالث با توجه به چندهدفه بودن مدل، به گونه ای دیگر می باشد. همان گونه که در جدول (۱۰) مشاهده می شود، هزینه مجموع تولیدکنندگان در شرایط رقابتی در مقایسه با شرایط انحصاری بنا به دلایل ارائه شده کاهش یافته است.

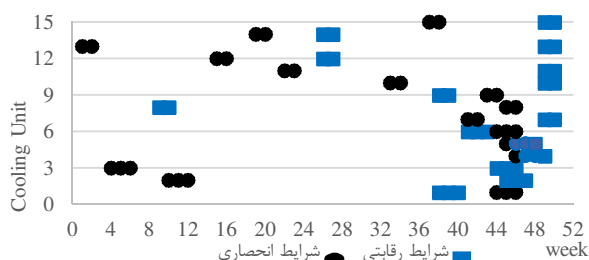
جدول (۱۰): میزان هزینه برنامه های نگهداری مختلف بر حسب (M\$)

۱۲۲۲/۲۴	۶۵۲	هزینه <i>GENCO1</i> در برنامه رقابتی
	۲۸۶	هزینه <i>GENCO2</i> در برنامه رقابتی
	۲۸۲	هزینه <i>GENCO3</i> در برنامه رقابتی
۱۲۲۳/۷		هزینه برنامه در شرایط انحصاری

۴- نتیجه گیری

در برنامه ریزی میان مدت شبکه های چندحاملی، هماهنگی تعمیر و نگهداری واحدهای تولید به سبب ارتباط میان حامل ها و وجود منابع تولید هم زمان، پیچیده خواهد بود. در این مقاله، مدلی به منظور زمان بندی تعمیر و نگهداری منابع تولید در سامانه های چندحاملی انرژی با ملاحظه هزینه های بهره برداری و معیار قابلیت اطمینان ارائه شد و

شکل (۷) و (۸) به مقایسه دو برنامه خروج برای منابع گرمایی و سرمایه شبکه می پردازد. شایان ذکر است که این برنامه های خروج منابع الکتریکی، گرمایی، سرمایه در هماهنگی باهم قرار دارند. علت این موضوع وجود منابع تولید هم زمان به عنوان منابع تلافی دهنده شبکه ها در *MCES* می باشد. به بیان بهتر در صورت جابه جاشدن وضعیت خروج واحدهای تولید هم زمان، وضعیت خروج دیگر انواع تولید نیز تغییر نموده و برنامه خروج آن ها متفاوت خواهد شد. به عنوان نمونه اگر منبع تولید هم زمان ۲ در هفته ۱۷ از مدار تولید خارج شود برنامه خروج دیگر واحدهای گرما، الکتریکی و سرمایه به صورت کلی تغییر نموده و پنجره زمانی آن ها جابه جا می شود.



شکل (۸): برنامه زمان بندی نگهداری منابع تولید انرژی سرما

برنامه خروج منابع تولید سرما نیز از وضعیت مصرف این حامل و همچنین وضعیت خروج منابع تولید هم زمان تولیدکننده سرما، متأثر بوده و به همین دلیل تمرکز خاموشی این منابع بر روی ماه های آخر و هفته های ۴۲ تا ۵۰ متمرکز شده است.

نکته قابل توجه در این مثال عددی این است که باتوجه به ویژگی های برخی از منابع و میزان توان تولیدی واحدها برنامه خروج در برخی هفته ها متمرکز شده که در نتیجه آن میزان شاخص قابلیت اطمینان سیستم در آن هفته ها را متأثر خواهد نمود.

۳-۳-۲- شاخص قابلیت اطمینان

باتوجه به روابط (۳۰) و (۳۴)، میانگین شاخص قابلیت اطمینان و میزان حداقل این شاخص در طول دوره اجرای برنامه های تعمیر و نگهداری را می توان در دو شرایط رقابتی و انحصاری مورد بررسی قرار داد. این بررسی بر روی این موضوع استوار است که در شرایط بهره برداری انحصاری، هدف مالک سیستم حداکثر سازی قابلیت اطمینان می باشد و از سوی دیگر در شرایط تجدید ساختار و وجود بازار رقابتی، شرکت ثالث باید هدف سایر نهادهای مرتبط با *MCES* را نیز در نظر بگیرد. براین اساس میزان شاخص قابلیت اطمینان در *MCES* و در بخش حامل الکتریکی، در دو شرایط بهره برداری انحصاری و رقابتی به صورت جدول (۷) خواهد بود.

جدول (۷): مقدار متوسط و حداقل شاخص قابلیت اطمینان شبکه

الکتریکی

در شرایط انحصاری	در شرایط رقابتی	متوسط
۰/۹۲۱	۰/۹۱۸	
۰/۷۴۸	۰/۲۴۳	حداقل

مقدار شاخص قابلیت اطمینان شبکه الکتریکی باتوجه به برنامه خروج منابع *CHP* و *CCHP* (که در شکل (۵) و (۶) ارائه شد) در دو ساختار

$\underline{A}^{SR}(t,s)$ متغیر تصمیم رزرو چرخان در بازه زمانی t و زیر بازه s

مراجع

[1] A. Shabanpour-Haghighi, A.R. Seifi, "Effects of district heating networks on optimal energy flow of multi-carrier systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, pp. 379-387, 2016.

[2] C. Unsuhay, J.M. Lima, A.Z. de Souza, "Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow," Power engineering society general meeting, 2007 IEEE, pp. 1-7, 2007.

[3] M. R. Haghifam and M. Manbachi, "Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, pp. 385-393, 2011.

[4] P. Mancarella, "MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models," Energy, vol. 65, pp.0360-5442, 2014.

[5] X. Zhao, F. Liu, F. Bo, "Reliability analysis of hybrid multi-carrier energy systems based on entropy-based Markov model," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, vol. 230, PP. 561-569, 2016.

[6] M. Salimi, H. Ghasemi and M. Adelpour, "Optimal planning of energy hubs in interconnected energy systems: a case study for natural gas and electricity," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 695-707, 2015.

[7] R. Evins, K. Orehoung and J. Carmeliet "New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints," Energy, vol. 73, pp. 387-398, 2014.

[8] A. Shahmohammadi, M. Moradi-Dalvand, H. Ghasemi, "Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, pp. 878-886, 2015.

[9] B. Rezaie, MA. Rosen "District heating and cooling: review of technology and potential enhancements," Appl Energy; vol. 93, pp. 2-10, 2012.

[10] H. Barot and K. Bhattacharya, "Security coordinated maintenance scheduling in deregulation based on genco contribution to unserved energy," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, pp. 1871-1882, 2008.

[11] T. Krause, G. Andersson and K. Frohlich, "Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption," Proceedings of the IEEE, vol. 99, pp. 15-27, 2011.

[۱۲] داود روشن دوست؛ رحمت‌الله هوشمند؛ اسکندر قلی‌پور؛ مصطفی نصرت‌آبادی، «طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای یک ریزشبکه صنعتی مبتنی بر منابع CHP از طریق برنامه‌ریزی تولید و پاسخ تقاضا»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۳، صفحه ۱۹۷-۲۰۹، ۱۳۹۵.

[13] L. M. Ramirez-Elizondo and G. C. Paap, "Unit commitment in multiple energy carrier systems," In Proc. North American Power Symposium (NAPS), Starkville, MS, USA, pp. 1-6, 2009.

[14] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power dispatch and conversion in systems with multiple energy carriers," In proc. 15TH Power systems computation conference, Liège, Belgium, 2005.

[15] M. Moeini-Aghaie, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and E. Hajipour, "Multi-agent genetic algorithm: an online probabilistic view on economic dispatch of energy hubs constrained by wind availability," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, pp. 699-708, 2014.

[16] M. Almassalkhi and I.A. Hiskens, "Cascade mitigation in energy hub networks," Proceedings of the 2011 50th IEEE conference on design and control and European control conference (CDC-ECC), Orlando, FL, 12-15 December 2011, pp. 2181-2188. New York.

[17] A. Helseth and A.T. Holen, "Reliability modeling of gas and electric power distribution systems; similarities and differences," Proceedings of the 9th international conference on probabilistic methods applied to power systems KTH, Stockholm, 11-15 June 2006, pp.1-5. New York.

[18] G. Koepfel and G. Andersson, "Reliability modeling of multi-carrier energy systems," Energy; vol. 34, no. 3, pp. 235-244, 2009.

[19] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, pp. 145-155, 2007.

مشاهده گردید که با حفظ شاخص‌های قابلیت اطمینان و با در نظر گرفتن هدف تولیدکنندگان در کاهش هزینه‌های میان‌مدت برنامه تعمیر و نگهداری، می‌توان یک پنجره زمانی برای خروج هماهنگ و سازگار واحدهای تولید GENCOها توسط یک شرکت ثالث ارائه داد. این برنامه از یک سو چالش تعیین زمان خروج بهینه برای واحدهای تولید هم‌زمان در شبکه‌های مختلف انرژی را مرتفع ساخته و از سوی دیگر مدل پیشنهادی برای حل مسئله چندهدفه در شرایط رقابتی در مقایسه با مدل ارائه‌شده برای MCES انحصاری باهدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان، دارای هزینه اجرا کمتر و تفاوتی در قابلیت اطمینان بوده‌است.

پیوست

علائم و نمادها

اندیس‌ها	I	اندیس واحد تولید
	N	اندیس زیربازه‌های زمانی
	T	اندیس بازه‌های زمانی
مجموعه‌ها	Φ^P	مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای حق تقدم برای تعمیرات.
	Φ^S	مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای فاصله زمانی برای تعمیرات
	Φ^O	مجموعه واحدهایی که نسبت به هم دارای هم‌پوشانی در تعمیرات
پارامترها	π_j^{Fx}	هزینه ثابت ($\$/h$)
	π_j^m	هزینه تعمیرات ($\$/MW$)
	$\pi_j^p(t, s)$	هزینه تولید ($\$/MWh$)
	π_j^{Su}	هزینه روشن شدن ($\$$)
	$duri$	زمان تعمیرات واحد i
	$N_i(t)$	حداکثر تعداد واحدهایی که می‌توانند در تعمیرات باشند
	$R_{min}(t,s)$	حداقل مقدار شاخص قابلیت اطمینان در هر بازه زمانی
	OVL_{i_1, i_2}	میزان هم‌پوشانی زمان تعمیرات برای واحدهای i_1 و i_2
	$OVL_{i_1(\gamma_{i1}), i_2(\gamma_{i2})}$	میزان هم‌پوشانی زمان تعمیرات برای مؤلفه‌های ۱ و ۲ واحد i
	$DN(t,s)$	بردار تقاضا شبکه (MW)
	R_{Gi}^{down}	شیب مجاز کاهش تولید مؤلفه‌های واحد i
	R_{Gi}^{up}	شیب مجاز افزایش تولید مؤلفه‌های واحد i
	G_i^{max}	حداکثر ظرفیت تولید واحد i (MW)
	G_i^{min}	حداقل ظرفیت تولید واحد i (MW)
	$R_{total}^{min}(t, s)$	حداقل میزان رزرو شبکه (MW)
	$SEP_{i_1(\gamma_{i1}), i_2(\gamma_{i2})}$	بازه زمانی میان پایان تعمیرات مؤلفه ۱ و آغاز تعمیر مؤلفه ۲ برای واحد i
	SEP_{i_1, i_2}	بازه زمانی میان پایان تعمیرات واحد ۱ و آغاز تعمیرات واحد ۲
	E_i^{min}	حداقل نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
	E_i^{max}	حداکثر نسبت تبدیل تولید گرما به برق در CCHP
	H_i^{min}	حداقل نسبت تبدیل تولید سرما به گرما در CCHP
	H_i^{max}	حداکثر نسبت تبدیل تولید سرما به گرما در CCHP
توابع و متغیرها	$RIX(t,s)$	شاخص قابلیت اطمینان در بازه t و زیر بازه s
	$G_i(t, s)$	بردار متغیر تولید واحد i در بازه t و زیر بازه s
	$U_i(t, s)$	متغیر باینری تعیین وضعیت روشن و خاموشی واحد i در بازه t و زیربازه s (۱ برای روشن بودن و ۰ برای خاموشی)
	$M_i(t)$	متغیر باینری تعیین وضعیت تعمیرات واحد i در بازه t و زیر بازه s (۱ برای در تعمیر بودن و ۰ برای در مدار کار بودن)
	$\omega_i(t, s)$	متغیر باینری روشن شدن واحد i

- based on global criterion method", IET Smart Grid, pp. 2515-2947, 2019.
- [۳۳] عباس مارینی، محمدامین لطیفی، محمدصادق قاضی‌زاده، «زمان‌بندی توأم تعمیرات واحدهای تولیدی و منابع ذخیره‌ساز انرژی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۲۸۵-۲۹۷، ۱۳۹۵.
- [34] M. Manbachi, A.H. Parsaeifard, and M.R. Haghifam, "A new solution for maintenance scheduling using maintenance market simulation based on game theory" IEEE Electrical Power & Energy Conference 2009.
- [35] U. E. Ekpenyong, J. Zhang, X. Xia "An improved robust model for generator maintenance scheduling". Electric Power System Restructurer; vol. 92, pp.29-36, 2012.
- [36] S. D. Manshadi and M. E. Khodayar, "Risk-Averse Generation Maintenance Scheduling with Microgrid Aggregators," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6470-6479, 2018.
- [37] K. Bhattacharya, M.H Bollen, J.E Daalder, "Operation of restructured power systems," Springer Science & Business Media, 2012.
- [38] M. Shahidehpour, M. Alomoush, "Restructured electrical power systems: Operation: Trading, and volatility," CRC Press, 2001.
- [39] R. Lusby, L. Muller, B. Petersen, "A solution approach based on Benders decomposition for the preventive maintenance scheduling problem of a stochastic large-scale energy system". J Sched, pp. 1-24, 2013.
- [40] J. L. Sweeney, 'California Electricity Crisis' Hoover Press, 2013.
- [41] P. M. Pardalos, A. Migdalas and L. Pitsoulis., Pareto optimality, game theory and equilibria vol. 17: Springer Science & Business Media, 2008.
- [42] A. Rabiee, A. Soroudi, B. Mohammadi-ivatloo, M. Parniani, 'Corrective voltage control scheme considering demand response and stochastic wind power', IEEE Transaction Power System vol. 29, pp. 2965-2973, 2014.
- [43] R. Hashemi, "A Developed Offline Model for Optimal Operation of Combined Heating and Cooling and Power Systems" IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. 24, pp. 222-229, 2009.
- [44] The GAMS Software Website (<http://www.gams.com>). 2013
- [45] G. Mavrotas and K. Florios, "AUGMECON2: A novel version of the ϵ -constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems," 2016.
- [۴۶] سید نقی حسینی، عبدالرضا شیخ الاسلامی، تقی بارفروشی، محمدامین لطیفی، «زمان‌بندی تعمیرات واحدهای تولید انرژی در سیستم‌های چندحاملی انرژی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۸، شماره ۳، صفحه ۱۰۹۴-۱۰۸۳، ۱۳۹۷.
- [20] S Amiri, M Honarvar, "Providing an Integrated Model for Planning and Scheduling Energy Hubs and Preventive Maintenance," Energy, vol. 163, pp. 1093-1114, 2018.
- [21] N. Prajapat, A. Tiwari, "Preventive Maintenance Scheduling Optimization: A Review of Applications for Power Plants", Springer, Cham, Advances in Through-life Engineering Services, pp 397-415, 2017.
- [22] W. GU, W. Zhi and B. Rui, "Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 54, pp. 26-37, 2014.
- [23] A. Froger, M. Gendreau, J. Mendoza and E. Pinson, "Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review," European Journal of Operational Research, vol. 251, pp. 695-706, 2016.
- [24] A. J. Conejo, R. Garcia-Bertrand and M. Díaz-Salazar, "Generation maintenance scheduling in restructured power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, pp. 984-992, 2005.
- [25] A. Badri and A. N. Niazi, "Preventive generation maintenance scheduling considering system reliability and energy purchase in restructured power systems," International Journal of Basic and Applied Scientific Research, vol. 12, pp. 12773-12786, 2012.
- [26] M. El-Sharkh and A. El-Keib, "Maintenance scheduling of generation and transmission systems using fuzzy evolutionary programming," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, pp. 862-866, 2003.
- [27] J. Yellen, T. Al-Khamis, S. Vemuri and L. Lemonidis, "A decomposition approach to unit maintenance scheduling," IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 2, pp. 726-733, May 1992.
- [28] M. A. Latify, H. Seifi and H. R. Mashhadi, "An integrated model for generation maintenance coordination in a restructured power system involving gas network constraints and uncertainties," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 46, pp. 425-440, 2013.
- [29] M. Marwali and S. Shahidehpour, "Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 13, pp. 1063-1068, 1998.
- [30] E. Da Silva, M. TH. Schilling and MC. Rafael, "Generation maintenance scheduling considering transmission constraints," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, pp. 838-843, 2000.
- [31] L. Garver, "Adjusting maintenance schedules to levelize risk," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-91, no. 5, pp. 2057-2063, 1972.
- [32] O. Sadeghian, A. Oshnoei, "Multi-objective optimisation of generation maintenance scheduling in restructured power systems

زیر نویس‌ها

² Multi-Carrier Energy System (MCES)

¹ Combine Cooing, Heating and Power