نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹؛ ص ۲۱-۱

پاسخ‌گویی هوشمند بار الکتریکی به‌منظور تداوم برق‌رسانی در شرایط جنگی

رضا غفارپور[1*]، عماد زارعی[2]، عباس خان احمدی[3]، حبیب‌اله اعلمی[4]

۱- استادیار، ۳- کارشناسی ارشد و ۴- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: ۹۶/۱۱/۰۶، پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۳)

چکیده

تلاش برای برنامه‌ریزی هرچه بهینه‌تر سامانه‌های قدرت از دیدگاه‌های مختلف، اعم از اقتصادی، فنی، و زیست‌محیطی، در راستای تأمین تقاضا به‌صورت مطمئن، پیوسته ادامه دارد. از جمله این برنامه‌ریزی‌ها، برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی است. در این مقاله، برنامه‌ریزی مشارکت امنیت- مقید واحدهای نیروگاهی با تمرکز بر اهمیت راهبردی انرژی الکتریکی در بستر شبکه‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ابتدا مدلی جامع برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، توأم با برنامهٔ پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP) ارائه شده است. برای تطبیق مدل مزبور با شرایط جنگی، مدل جدیدی از برنامه EDRP، تحت عنوان برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری راهبردی (SEDRP) نیز ارائه شده است. سپس با استفاده از یک مدل احتمالی برای تخمین برون‌رفت واحدها متأثر از عوامل مختلف در شرایط جنگی،طی سناریوهای متعدد، مدل موردنظر، در قالب یک مسئله بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد صحیح، با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌ساز GAMS حل شده است. در انتها، با توجه به نتایج حاصله، اثربخشی منابع پاسخ‌گویی بار هوشمند بر تداوم برق‌رسانی و هزینه‌های سیستم در شرایط موردنظر مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهدات حاکی از آن است که مشارکت هوشمند سمت تقاضا، می‌تواند منجر به افزایش تداوم برق‌رسانی و کاهش هزینه‌ها در شرایط بحرانی منجر گردد.

کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی مشارکت، منابع پاسخ‌گویی بار، شرایط بحرانی، پدافند غیرعامل

Smart Demad Response of the Electrical Load to Increase the Continuity of Load Meeting under War Condition

R. Ghaffarpour*, E. Zarei, A. Khan Ahmadi, H. Alami
Imam Hossain University
(Received: 26/01/2018; Accepted: 04/03/2019)

Abstract

The efforts for better planning of power systems from various viewpoints, such as economic, technical, and environmental, for reliably meeting the demand are continued. The unit commitment (UC) is one of these planning problems. In this paper, the security-constrained unit commitment problem is addressed with focusing on the strategic importance of electrical energy in the presence of smart grids. To achieve this, firstly, a comprehensive UC model, amalgamating with emergency demand response programs (EDRP), is presented. To adapt the model with war condition, a modified form of EDRP, the so called strategic EDRP, is also proposed. The problem is formulated as a mixed integer linear programming problem solved via the GAMS. Then, to investigate the impacts of smart demand response programs on the reliability of load meeting, several scenarios are conducted regarding a stochastic contingency model for generating units under war condition. It is found in result evaluation that smart demand side contribution under war condition can increase reliability and so decreases the costs.

Keywords: UC, Demand Response, Critical Condition, Passive Defence

*Corresponding Author E-mail: rghaffarpour@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

نقش زیربنایی انرژی در حیات اقتصادی صنعتی جوامع، بر هیچ‌کس پوشیده نیست؛ به‌طوری‌که توسعه اقتصادی منوط بر دسترسی به‌موقع و به اندازه به انرژی است. در میان سایر صورت‌های انرژی، انرژی الکتریکی همواره از اهمیت ویژه‌ای، متأثر از نقش بسزای آن در بخش‌های مختلف جامعه، برخوردار بوده که از این حیث حمله به تأسیسات مربوطه، همواره در جنگ‌ها مدنظر طرفین بوده است. این موضوع مؤید اهمیت راهبردی صنعت برق در سطح ملی است. بااین‌وجود، این موضوع کمتر از سوی برنامه‌ریزان و طراحان صنعت برق، در برنامه‌ریزی‌های توسعه و بهره‌برداری دیده شده است. از طرفی، امروزه، عملیات آفندی و پدافندی، نه به‌صورت ساده و قابل پیش‌بینی، بلکه به‌صورت پیچیده و هوشمند انجام می‌شوند. به‌گونه‌ای که تمام تلاش مهاجم در این است که با کمترین هزینه نظامی و کمترین تلفات انسانی، بیش‌ترین خسارت جانی و مالی را به‌طرف مقابل وارد نماید. حمله به شبکه انتقال انرژی الکتریکی و نیروگاه‌های تولید برق، در زمره مهم‌ترین این حملات قرار دارند [۱]. تأسیسات نیروگاهی، درواقع، به‌واسطه مقیاس بزرگ و پراکندگی کم تجهیزات نصب‌شده، از آسیب‌پذیری بالایی برخوردارند که برای حفاظت از آن‌ها در شرایط جنگی، لازم است اقدامات لازم مبتنی بر اصول پدافند غیرعامل انجام شود. جمهوری اسلامی ایران، از جمله کشورهایی است که این قبیل حملات و راهبردها را از سوی دشمن تجربه کرده است. نگاهی به تاریخچه هشت سال جنگ تحمیلی نشان می‌دهد که اهمیت راهبردی انرژی الکتریکی در آن دوران نیز به حدی بوده که هجمه رژیم بعث عراق به نیروگاه‌های کشور تنها به استان‌های مرزی محدود نبوده و طیف متنوعی از نیروگاه‌ها در نیمه غربی کشور، بارها مورد حمله قرار گرفته‌اند [۲]. نیروگاه‌های نکا، دز، رامین، و شهید عباسپور، اهم این نیروگاه‌ها را شامل می‌شوند. البته، قدمت موضع‌گیری دشمن در برابر تأسیسات انرژی الکتریکی، دیرینه‌تر از دوران جنگ تحمیلی ایران و فراتر از مقیاس آن بوده و در سایر جنگ‌های مختلف، صورت گرفته بین کشورهای مختلف دنیا، نمونه‌های مشابه به چشم می‌خورد.

نکته‌ای که اشاره به آن در کنار تاریخچه اهداف نظامی کشورها در جنگ‌های مختلف به آشکارسازی بهتر و بیشتر اهمیت راهبردی انرژی الکتریکی و تأسیسات آن کمک می‌کند، رشد روزافزون وابستگی رفاه و امنیت جوامع بشری، به انرژی الکتریکی است. بنابراین، به‌صراحت می‌توان اذعان داشت که اگرچه شکل جنگ‌های امروزی از حالت متعارف در میدان‌های نبرد به جنگ نرم تغییر پیدا کرده است، اما بدون شک تأسیسات الکتریکی جزء اولین گزینه‌های دشمن، در صورت وقوع جنگ به شکل متعارف خواهد بود. ازاین‌رو، امروزه اهمیت بحث پدافند غیرعامل و اجرای اصول آن در خصوص تأسیسات انرژی الکتریکی، بر دولت‌های مختلف آشکار شده است. پدافند غیرعامل در مورد صنعت برق باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی و اعمال شود که قابلیت اطمینان سیستم در شرایط بحرانی و جنگی را تا حد امکان افزایش دهد. به بیانی دیگر، با تکیه بر اصول پدافند غیرعامل [۳]، برنامه‌ریزی‌های سیستم قدرت باید به‌گونه‌ای باشند تا تداوم برق‌رسانی در شرایط بحران هرچه بیشتر گردد و حداقل دسترس‌پذیری تضمین شود.

بهترین روش اجرایی پدافند غیرعامل در مورد تأسیسات انرژی الکتریکی، مهندسی صحیح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از مراکز نیروگاهی است[۴]. برنامه‌ریزی مشارکت واحدها که درواقع راهبرد زمان‌بندی واحدها در طول شبانه‌روز را مشخص می‌کند، در زمره اهم برنامه‌ریزی‌های بهره‌برداری سامانه‌های قدرت قرار دارد. دیدگاه‌های اقتصادی، فنی، و زیست‌محیطی، از جمله دیدگاه‌هایی محسوب می‌شوند که در بسیاری از مطالعات انجام‌شده در زمینه برنامه‌ریزی زمان‌بندی واحدها به آن‌ها پرداخته شده است[۷-۵]. حال آنکه با توجه به آنچه که از اهمیت راهبردی انرژی الکتریکی به آن اشاره شد، لازم است دیدگاه نظامی نیز در برنامه‌ریزی‌ها لحاظ گردند تا در شرایط بحران بتوان خسارات و هزینه‌های به بار آمده از حملات احتمالی دشمن به تأسیسات الکتریکی را به حداقل رساند.

ویژگی دیگری که امروزه عجین نمودن اهداف نظامی در چهارچوب پدافند غیرعامل با برنامه‌ریزی‌های سامانه‌های قدرت را طلب می‌کند، پیشرفت در زیرساخت‌های کنترلی و نظارتی سامانه‌های الکتریکی، در سایه مفهومی با عنوان شبکه‌های هوشمند انرژی الکتریکی است. در یک تعریف ساده می‌توان شبکه هوشمند را صورت تجمیع‌شده زیرساخت‌های شبکه قدرت با زیرساخت‌های مخابراتی دانست [۸]. این نوع شبکه امکان ارتباط دوطرفه و استفاده از حسگرهای پیشرفته را به‌منظور بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سیستم، امنیت انتقال و مصرف توان را فراهم می‌کند. این مجموعه امکان پایش صحت عملکرد خود را دارا بوده و در صورت بروز مشکل می‌تواند آن را به‌مراتب بالاتر اطلاع دهد و با انجام اقدامات اصلاحی، مانع از تبدیل یک پیشامد اتفاقی محلی، به خروج سلسله مراتبی شود. بنابراین، ویژگی اصلی و یا حتی هدف اصلی از اجرای هوشمندسازی سامانه‌های قدرت را می‌توان کنترل و پایش سیستم قدرت مطرح نمود [۹].

برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا، مشتمل بر برنامه‌های افزایش کارایی انرژی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، از جمله راه‌کارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی، کاهش هزینه‌ها، و

حتـی کـاهش آلاینـده‌هـای انتشـاریافته از بخـش تولیـد انـرژی الکتریکی به شمار می‌روند که امروزه به لطف شبکه‌های هوشمند، در سمت تقاضا به طرق مختلفی اجرا می‌شوند. پاسخ‌گـویی بـار را می‌توان ایجاد تغییر در مصرف انرژی الکتریکی توسط مشـترکین از حالت طبیعی مصرف آن‌ها در پاسخ به تغییرات قیمت بـرق در طول زمان تعریف کرد. انجمن انرژی آمریکا، پاسخ‌گویی تقاضـا را تغییر در الگوی مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان، در پاسخ بـه تغییر قیمت برق در طول زمـان، یـا برنامـه‌هـای تشـویق- محـور تدوین‌شده برای ترغیب سمت تقاضـا بـه عـدم مصـرف در زمـان افزایش قیمت و یا کاهش قابلیت اطمینان معرفی مـی‌کنـد [۱۰]. انواع برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، اعم از تشویق محور و برنامـه‌هـای وابسته به زمان یا تعرفه زمانی، قبلاً تشریح شده است [۱۱].

برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضـطراری[1] (EDRP) یکـی از انـواع برنامـه‌هـای پاسـخ‌گـویی بـار تشـویق محـور اسـت کـه در آن مصرف‌کننده در شرایط اضطراری، مانند افزایش ناگهانی تقاضا، در راستای حفظ قابلیت اطمینان سیستم در حـداقل سـطح تعریـف شده، درازای دریافت تشویق‌های مالی، اقدام بـه کـاهش بارهـای غیرضروری خود می‌نماید. صورت دیگری از برنامه‌های پاسخگویی بار، برنامه‌های ظرفیت بازار یا (CAP) هستند که در آن قطع بار از سوی مشترک نه به‌صورت دلخواه و تشویقی، بلکه به‌صورت اجبار و طی قراردادهای مشخص بین مشـترکین و بهـره‌بـردار مسـتقل سیستم اجرا می‌شود؛ بـدین ترتیـب کـه، مشـترکین مایـل، طـی قراردادی مجبور به کاهش تضمینی بار خـود در مواقـع بحرانـی و حساس، بعد از مطلع شدن از سوی بهـره‌بـردار مسـتقل سیسـتم خواهنـد بـود و در صـورت عـدم رعایـت قـرارداد و قطـع بـار در زمان‌های موردنظر، ملزم به پرداخت جریمه می‌گردند. چنانچـه از ماهیت برنامه‌هایEDRP و CAP برمی‌آیـد، ایـن برنامـه‌هـا شـاید مناسب برای شرایط بحرانی شـبکه، یعنـی سـاعات اوج بـار و یـا افـزایش غیرمنتظـره بـار باشـند، امـا اضـطرار و اجبـار در نظـر گرفته‌شده در آن‌ها، به‌هیچ‌وجه برای شرایط جنگی مکفی نیسـت؛ مادامی‌که برق‌رسانی به پادگـان‌هـای نظـامی و مراکـز راهبـردی فرماندهی، در شرایط مزبور، در اولویت‌ها قرار دارند. البته، با نگـاه به انگیزه تدوین برنامه‌های پاسخگویی بار، عـدم تطـابق آن‌هـا بـا شرایط جنگی دور از انتظار نیست؛ چراکه در تدوین و اجرای آن‌ها تنها شاخص‌های الکتریکی مانند افت ولتاژ درنتیجه افزایش بـار و یا هزینه‌های مربوط به تلفات در ساعت اوج مصرف، و یـا قابلیـت اطمینان شبکه، آن‌هم بدون توجـه بـه جایگـاه راهبـردی انـرژی الکتریکی برای پادگان‌ها و مراکز نظامی و نیـز توجـه بـه اهمیـت آن‌ها از حیث حمله دشمن در شرایط جنگ، دیده شده است.

مانند سایر آرمـان‌هـای یـک جامعـه، تـأمین امنیـت انـرژی، خصوصاً انرژی الکتریکی، نیز مستلزم برنامه‌ریزی است. به‌طورکلی مطالعات برنامه‌ریزی سـامانه‌هـای قـدرت در دو دسـته مطالعـات برنامه‌ریزی بهره‌برداری (کوتاه‌مدت) و مطالعات برنامه‌ریزی توسعه (بلندمدت) جای می‌گیرند. با توجه بـه اهمیـت راهبـردی انـرژی الکتریکی، این برنامه‌ریزی‌ها علاوه بر نقش مـؤثر و تعیـین‌کننـده اقتصادی، در ارتقاء سطح امنیت و رفاه اجتماعی، و لـذا در حفـظ اقتدار و شایستگی ملی اثرگذار هستند. از جمله برنامه‌ریـزی‌هـای مهم در حیطه بهره‌برداری از سامانه‌هـای قـدرت، تعیـین راهبـرد بهینه زمان‌بندی واحـدهای نیروگاهی،یـا اصـطلاحاً برنامـه‌ریـزی مشارکت واحدها[2](UC) اسـت کـه لازم اسـت در راسـتای تـأمین انرژی الکتریکی به‌صورت مطمئن و اقتصادی، در کنار راهبردهای کلان برنامه‌ریزی اقتصادی ملی و سیاست‌های انـرژی موردتوجـه واقع شود؛ مادامی‌که آثار و تبعات اقتصـادی و اجتمـاعی ناشـی از قطع برق در اثر بـروز بحـران‌هـای نظـامی و یـا بلایـای طبیعـی، می‌تواند زیان قابل‌توجهی برای شرکت‌های برق، مصرف‌کننـدگان، و به‌طورکلی جامعه و کشور، به همراه داشته باشد. امروزه، رشـد و توسـعه فنـاوری، خصوصـاً در کشـورهای درحـال‌توسـعه، لـزوم برنامه‌ریزی دقیق سامانه‌های قدرت، جهت تأمین مطمئن و بهینه تقاضای روزافزون مصرف‌کننـدگان، را بـیش از پـیش بـر همگـان مبرهن ساخته است. در همین راستا، توجه به نبردهـای در حـال انجام در بسیاری از کشورهای منطقه خاورمیانه متـأثر از دخالـت کشـورهای اسـتعمارگر و بیگانـه و زیادشـدن حساسـیت‌هـا و موضع‌گیری‌ها، و لذا افـزایش احتمـال کشـیده شـدن جنـگ بـه مرزهـای کشـور عزیزمـان ایـران، در کنـار آنچـه کـه از اهمیـت راهبردی انرژی الکتریکی به آن اشاره شد، لزوم برنامه‌ریزی دقیق سامانه‌های قدرت، خصوصاً در شرایط جنگـی و بحرانـی را بیشـتر آشکار می‌سازد. از این حیث، در مقاله حاضر به ارائـه چهـارچوبی بـرای برنامـه‌ریـزی بهینـه مشـارکت واحـدها در راسـتای تـداوم برق‌رسانی در شرایط جنگی، در بستر شبکه‌های هوشـمند انـرژی الکتریکی پرداخته شده است.

برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، یک مسئله ترکیبـی اسـت کـه هدف آن تدوین یک جدول برای برنامه‌ریزی تولید واحدها، بـا در نظر داشتن دیدگاه‌های فنی و اقتصادی، و در این مقالـه، دیـدگاه امنیتی و نظامی، است. نوع خاص برنامه‌ریزی مشارکت واحدها که در آن تأکید مسئله نه صرفاً بر هزینه، بلکه بر امنیـت انـرژی نیـز است، برنامه‌ریزی مشارکت امنیـت-مقیـد واحـدها[3] یـا اصـطلاحاً SCUC است. تأمین تقاضا در حـداقل هزینـه و حـداکثر امنیـت، درواقع، محوریت اصلی این نوع از برنامه‌ریزی مشـارکت را شـامل

[1] Emergency Demand Response Programs

[2] Unit Commitment

[3] Security Constrained Unit Commitment

می‌شود [۱۲]. این حالت از برنامه‌ریزی،یکی از پیچیده‌ترین مسائل برنامه‌ریزی در میان مجموعه برنامه‌ریزی‌های کوتاه و بلندمدت سامانه‌های قدرت است که در آن در کنار قید برآوری تقاضا، به قیود تولید، انتقال، و امنیت شبکه در تعیین راهبرد زمان‌بندی واحدها طی شبانه‌روز، نیز توجه می‌شود.

علی‌رغم اهمیت راهبردی انرژی الکتریکی، تاکنون مطالعات جامعی در راستای شفاف‌سازی دیدگاه‌های نظامی و اجتماعی در برنامه‌ریزی‌های بهره‌برداری صورت نگرفته است که ازاین‌رو در مطالعه حاضر سعی بر آشکارسازی هرچه بیشتر این موضوع خواهد شد. اما برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با اهداف مختلف، با و بدون در نظر گرفتن مسائلی چون امنیت انرژی، مسائل زیست‌محیطی، و هوشمندسازی سامانه‌های قدرت، تاکنون در پژوهش‌های متعدد بررسی شده است. با در نظر گرفتن سامانه‌های تلمبه‌ای-ذخیره‌ای و منابع پاسخ‌گویی بار به‌عنوان سرویس‌های خدمات جانبی، ارزیابی اثربخشی این سرویس‌ها بر افزایش مشارکت واحدهای بادی در برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای نیروگاهی بررسی شده است [۱۳]. با اشاره به اثر منفی عدم قطعیت مربوط به پاسخ‌گویی تقاضا بر تعیین راهبرد زمان‌بندی واحدها، مسئله SCUC در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی آمیخته با اعداد صحیح حل می‌شود [۱۴]. افزایش رفاه اجتماعی و دستیابی به یک بازار کاملاً رقابتی،از اهداف اصلی مشارکت منابع سمت تقاضا در قالب برنامه‌های پاسخ‌گویی بار معرفی شده و با در نظر داشتن عدم قطعیت‌های مختلف در سامانه‌های قدرت، مانند خروج خطی واحدهای نیروگاهی از مدار، مدلی جامع برای تعیین راهبرد بهینه زمان‌بندی واحدهای نیروگاهی در یک محیط رقابتی، ضمن در نظر داشتن برنامه‌های پاسخگویی بار اضطراری و قیود شبکه ارائه می‌شود [۱۵]. اثر مدل‌های مختلف برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر بهره‌برداری از سامانه‌های قدرت و عملکرد بازار نیز در موردبررسی قرار گرفته است [۱۶] و مشخص شده که منابع پاسخ‌گویی بار قادرند با کاهش قیمت الکتریسیته در بازار مربوطه، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر افزایش رفاه اجتماعی اثرگذار باشند.

علی‌رغم آن‌که برنامه‌های پاسخ‌گویی بار تشویق-محور امروزه به‌صورت گسترده در کشورهای مختلف دنیا در حال اجرا هستند و تأثیر مثبت آن‌ها بر بهبود بهره‌برداری از سامانه‌های قدرت بر هیچ‌کس پوشیده نیست، اما پاسخ واقعی از سمت مشترکین در شرایط مختلف، با عدم قطعیت‌های زیادی روبرو است که ناشی از محدود بودن اطلاعات بهره‌بردار مستقل سیستم از رفتار مصرف‌کنندگان است. در همین راستا، برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، نه با توجه به عدم قطعیت مربوط به واحدهای تجدید پذیر، بلکه با توجه به عدم قطعیت‌های مربوط به خود برنامه‌های پاسخ‌گویی بار انجام شده است [۱۷]. برنامه‌ریزی مشارکت امنیت- مقید واحدهای نیروگاهی با در نظر داشتن اثر توان راکتیو در خطوط انتقال و بازآرایی شبکه در حضور نفوذ بالای واحدهای بادی نیز مطالعه شده است [۱۸ و ۱۹].

همان‌طور که از پیشینه تحقیق برمی‌آید، در اغلب مطالعات صورت گرفته، اهمیت راهبردی صنعت برق از دیدگاه نظامی، نه در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار و نه در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها دیده شده است. در این راستا، تنها در مطالعه معدودی ، در کنار معیارهای فنی و اقتصادی متعارف در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، به رویکردهای دفاعی مبتنی بر اصول پدافند غیرعامل نیز توجه شده است [۲۰]. در پژوهش موردنظر، درواقع سعی شده است تا با فراهم آوردن تمهیدات و رعایت اصول پدافند غیرعامل، با کاهش سطح آسیب‌پذیری واحدهای تولیدی، تداوم نیرورسانی به بارهای راهبردی، مانند پادگان‌های نظامی، تضمین گردد.

به‌عنوان یک مسئله غیرخطی غیر محدب، تاکنون روش‌های بسیاری، اعم از ریاضی محور (کلاسیک) و ابتکاری، برای حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدها در مطالعات مختلف استفاده شده است؛ از آن جمله می‌توان به روش لاگرانژ ارتقاءیافته [۲۱]، روش برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح [۳ و ۴]، روش تجزیه بندرز [۲۲ و ۲۳]، الگوریتم اجتماع پرندگان [۲۰ و ۲۴]، الگوریتم ژنتیک [۲۵]، الگوریتم سرد شدن فلزات [۲۶]، و روش جستجوی باکتریایی [۲۷] اشاره کرد. با توجه به ماهیت مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها که در بالا به آن اشاره شد، و با توجه به اهمیت راهبردهای زمان‌بندی در کنار پیشرفت‌های امروزی درزمینهٔ علوم کامپیوتر، امروزه در بیشتر مطالعات، روش‌های ریاضی محور به روش‌های ابتکاری، به خاطر قطعیت در بهینگی جواب‌های مسئله بهینه‌سازی، ترجیح داده می‌شوند.

در مقاله حاضر، با ارائه مدلی جامع برای برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدهای نیروگاهی در فضای تجدید ساختاریافته صنعت برق،به ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری برافزایش تداوم برق‌رسانی در شرایط جنگی و بحرانی پرداخته می‌شود؛ مادامی‌که از شاخص‌های قابلیت اطمینان سامانه‌های قدرت، برای ارزیابی وضعیت تداوم برق‌رسانی در شرایط مختلف استفاده می‌شود. در چهارچوب پیشنهادی، رخداد شکست در واحدهای تولیدی بر اساس نرخ خروج اجباری[1] (FOR) آن‌ها در شرایط عادی مدل‌سازی می‌شود. اما برای در نظر گرفتن شرایط جنگی، تعیین مقدار احتمال دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها با استفاده از مدل قبلاً ارائه‌شده [۲۰]، به‌صورت

[1] Force Outage Rate

ارتقاءیافته، صورت می‌گیرد که در بخش‌های بعدی به‌تفصیل به آن پرداخته خواهد شد. در راستای نیل به اهداف در نظر گرفته‌شده، ابتدا مدلی جامع برای برنامه‌ریزی مشارکت امنیت- مقید واحدها، ترکیب‌شده با برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، ارائه می‌شود. مدل مزبور در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح[1] (MILP)، طی سناریوهای مختلفی، با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازGAMSحل خواهد شد؛ سپس با توجه به نتایج حاصله، به ارزیابی اثر مشارکت سمت تقاضا بر راهبردهای زمان‌بندی واحدها و نیز تداوم برق‌رسانی در شرایط جنگی پرداخته می‌شود.

به‌منظور پوشش کامل مطالب، بخش‌های بعدی مقاله بدین ترتیب در نظر گرفته می‌شوند: در بخش دوم، سازوکار برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری و صورت جدید پیشنهادی برای این برنامه، به‌عنوان نوآوری‌های مقاله، به‌منظور تطابق بیشتر آن با شرایط و اضطرار به بار آمده از شرایط جنگی تشریح می‌گردد. بخش سوم به مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت- مقید واحدها با در نظر داشتن منابع پاسخ‌گویی بار اختصاص می‌یابد؛ در این بخش همچنین، به مدل به‌کار گرفته‌شده برای تعیین احتمال دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی نیز اشاره می‌شود. بخش چهارم به شبیه‌سازی و ارائه نتایج می‌پردازد و نهایت نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها در بخش پنجم ارائه خواهد شد.

۲. برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری (EDRP)

به ماهیت برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری قبلاً به‌اختصار اشاره شد؛ به‌طوری‌که بر طبق آن، مشترک بدون هرگونه تعهد یا قرارداد و تنها در پاسخ به اعلام نیاز شبکه به کاهش بار از سوی بهره‌بردار مستقل سیستم، درازای دریافت تشویق، اقدام به کاهش بار خود در زمان موردنظر می‌کند. بنابراین، این نوع مشارکت از سمت تقاضا، عدم قطعیت مربوط به اینکه چه تعداد از مشترکین به سیگنال بهره‌بردار مستقل سیستم پاسخ می‌دهند را به همراه دارد. در شرایط جنگی، اما، ممکن است با تغییر رفتار مصرف و تقاضا، به مشارکت تمام مشترکین در پاسخ‌گویی بار نیاز باشد. بر این اساس، نوآوری اصلی مقاله، به تعریف صورت جدیدی از برنامه EDRP، تحت عنوان برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری راهبردی[2]، یعنیSEDRP، می‌پردازد که در آن میزان مشارکت، نه‌تنها به سیگنال قیمت و درواقع کشش تقاضا، بلکه به‌احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی نیز بستگی دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش احتمال از دست رفتن مجموعه واحدها، میزان مشارکت نیز افزایش یابد. اجرای این حالت از برنامه EDRP در عمل می‌تواند با توجه به آگاه بودن جامعه از میزان اهمیت در دسترس بودن انرژی الکتریکی برای مراکز حساس و نظامی در شرایط جنگی و احتمال هجمه دشمن به آن‌ها توجیه‌پذیر باشد. از طرفی می‌توان چنین فرض کرد که در صورت عدم مشارکت سمت تقاضا به کاهش مصرف در شرایط جنگی، بهره‌بردار سیستم اقدام به سرریزی بارهای غیر حساس خواهد کرد. در این مقاله فرض می‌شود که در شرایط جنگی، متناسب با افزایش احتمال خروج واحدها متأثر از هجمه‌های دشمن، با همکاری لازم از سوی مصرف‌کنندگان برای حفظ امنیت ملی،میزان مشارکت نیز افزایش می‌یابد. در بخش چهارم، این موضوع به‌صورت کامل‌تر در قالب مدل‌سازی بررسی می‌شود.

نوآوری دیگر مقاله، مربوط به نحوه در نظر گرفتن کشش قیمتی تقاضا در برنامه پاسخ‌گویی بار موردنظر است. برخلاف مطالعات بسیاری که در آن‌ها، کشش قیمتی تقاضا، که نشان‌دهنده برهمکنش بین قیمت و تقاضا است، در دوره‌های مختلف شبانه‌روز به‌صورت ثابت و از پیش تعیین‌شده در نظر گرفته شده است [۶ و ۲۸]، در این مقاله یک کشش قیمتی پویا در برنامه EDRP لحاظ می‌گردد. در نظر گرفتن کشش قیمت به‌صورت پویا، در مقابل صورت ثابت یا استاتیک، درواقع، باعث افزایش دقت مدل‌سازی و لذا دستیابی به نتایج عملی‌تر می‌گردد. در بخش بعد، به ارائه مدل پیشنهادی برای ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هوشمند بر تداوم برق‌رسانی در برنامه‌ریزی مشارکت واحدها پرداخته می‌شود.

۳. مدل‌سازی مسئله

در این بخش از مقاله حاضر، ضمن ارائه مدل پیشنهادی برای برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری راهبردی، نحوه ترکیب آن با مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدها نیز ارائه می‌شود. علاوه بر این، به‌منظور شبیه‌سازی مسئله به‌صورت هرچه نزدیک‌تر به شرایط واقعی، قیود مختلفی نیز در نظر گرفته شده‌اند که در ادامه مدل‌سازی، به آن‌ها نیز پرداخته خواهد شد. بعد از ارائه مدل مسئله برای شرایط عادی (غیرجنگی)، با در نظر گرفتن یک مدل احتمالاتی برای خروج واحدها در شرایط جنگی، به ارتقاء مدل اولیه و تطبیق آن با شرایط جنگی، در راستای ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تداوم برق‌رسانی در شرایط بحرانی، پرداخته خواهد شد.

۳-۱. مدل‌سازی برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری پویا

در بسیاری از مقالات، همانند مرجع [۲۹]، مدل کاملی از برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اضطراری با در نظر داشتن ضریب

[1] Mixed Integer Linear Programming
[2] Strategic Emergrncy Demand Response Program

کشش ثابت ارائه شده است. به‌منظور فرمول‌بندی کشش قیمتی تقاضا، می‌توان حساسیت قیمتی تقاضا را به قیمت انرژی الکتریکی را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$Elast(t) = \frac{\Pr_0(t)\Delta D(t)}{D_0(t)\Delta \Pr(t)} \quad (۱)$$

از جابجایی صورت و مخرج در طرفین تساوی رابطه فوق می‌توان نوشت:

$$Elast(t) = \frac{\Pr_0(t)\Delta D(t)}{D_0(t)\Delta \Pr(t)} \quad (۲)$$

برخلاف مدل در نظر گرفته‌شده برای برنامه EDRP در [۲۹]، کشش تقاضا به‌صورت پویا در این مقاله به‌کار گرفته می‌شود. در نظر گرفتن کشش به‌صورت پویا، درواقع امکان ارزیابی پاسخ مصرف‌کننده به حالت‌های مختلف برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، بر اساس الگوی بار مصرف‌کنندگان، قیمت‌های پیشنهادی، مدل‌های تشویق تقاضا و جریمه‌های متناظر با قراردادهای پاسخ‌گویی بار، و نهایتاً کشش قیمتی تقاضا را به‌دست می‌دهد.

برای نشان دادن رابطه بین قیمت و تقاضا، مدل‌های متنوعی چون، مدل خطی، مدل درجه دو، مدل نمایی، و مدل لگاریتمی، ارائه شده است [۳۲-۳۰]. در اینجا، از مدل خطی رابطه تقاضا و قیمت، به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$D_{DR}(t) = j_{lin} + h_{lin}\Pr(t) \quad (۳)$$

که در آن، $D(t) = h_{lin}\Pr(t)$، معرف بخش کششی تقاضا است. علت انتخاب مدل خطی تابع قیمت-تقاضا را می‌توان در دو مورد برشمرد: اول اینکه در مطالعات نشان داده شده است که بهترین مدل ریاضی سوار شده (Fitted) بر روی اطلاعات ثبت‌شده از رفتار تقاضا در برابر تغییرات قیمت، با بیش‌ترین مقادیر مطلق کشش قیمت برای مقادیر بالای قیمت انرژی الکتریکی، در میان سایر مدل‌های یادشده در بالا، مدل خطی بوده است؛ دوم اینکه، مدل در نظر گرفته‌شده برای بهینه‌سازی،یک مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح (MILP) است که حل آن با استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی چون GAMS، بسیار راحت و مطمئن‌تر است؛ حال آنکه استفاده از مدل‌های دیگر تابع تقاضا، باعث تبدیل مدل مسئله به حالت غیرخطی،یعنی MINLP می‌گردد که با حل آن، نه‌تنها بهینه بودن جواب‌های حاصل از بهینه‌سازی با عدم قطعیت همراه است بلکه باعث افزایش قابل‌توجه زمان محاسبات نیز می‌گردد.

با جایگذاری رابطه (۳) در (۱)، بعد از ساده‌سازی، کشش پویا به‌صورت خطی مطابق با رابطه (۴) فرمول‌بندی می‌گردد.

$$Elast(t) = h_{lin}\frac{\Pr_0(t)}{j_{lin} + h_{lin}\Pr_0(t)} \quad (۴)$$

مطابق با نتایج قبلاً ارائه‌شده [۳۲-۳۰]، به‌منظور حداکثر ساختن رفاه اجتماعی،یعنی حداقل ساختن هزینه تولید با فراهم آوردن تشویق‌های مناسب برای کاهش تقاضا، لازم است کشش تقاضا در پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته شود. در این راستا، با تعریف $A(t)$ به‌عنوان یک مقدار تشویقی، مقدار تقاضا متأثر از قیمت را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$D_{DR}(t) = D_0(t)\left\{1 + Elast(t)\frac{A(t)}{\Pr_0(t)}\right\} \quad (۵)$$

توضیحات بیشتر در مورد نحوه استخراج قسمت مربوط به کشش در رابطه تقاضا، به‌طوری‌که رفاه مصرف‌کنندگان افزایش یابد، قبلاً ارائه شده است[۳۲-۳۰]. از ترکیب روابط (۴) و (۵) می‌توان نوشت:

$$D_{DR}(t) = D_0(t)\left\{1 + h_{lin}\frac{A(t)}{j_{lin} + h_{lin}\Pr_0(t)}\right\} \quad (۶)$$

کل تشویق پرداختی نیز خواهد بود [۲۹]؛

$$Cost_{Inc}(t) = A(t)[D_0(t) - D_{DR}(t)] \quad (۷)$$

با جایگذاری رابطه (۶) در (۷)، بعد از ساده‌سازی، برای محاسبه کل مقدار تشویق‌هایی که باید به مصرف‌کنندگان شرکت‌کننده در برنامه پاسخ‌گویی بار موردنظر پرداخت شود، خواهیم داشت:

$$Cost_{Inc}(t) = -\frac{D_0(t)h_{lin}A^2(t)}{j_{lin} + h_{lin}\Pr_0(t)} \quad (۸)$$

که در آن، h_{lin} یک ضریب ذاتاً منفی مربوط به تابع خطی تقاضا-قیمت است. مطابق با [۳۴-۳۳]، فرم خطی‌شده رابطه قبل خواهد بود:

$$Cost_{Inc}(t) = D_{\min}r(t) + \sum_{n=1}^{N_{seg}} dlp(n)dr(n,t) \quad (۹)$$

که در آن، $D_{\min}r(t)$، یعنی ترم اول سمت راست تساوی در رابطه فوق، درواقع اولین بلوک تابع خطی هزینه مربوط به تشویق‌های مربوطه و ترم دوم، نشان‌دهنده مجموع بلوک‌های بالایی تابع موردنظر است.

۳-۲. تابع هدف

در این بخش از مقاله، مدل پیشنهادی برای تجمیع برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدها با برنامه پاسخ‌گویی بار هوشمند، با توجه به شاخص‌های در نظر گرفته‌شده برای سنجش تداوم برق‌رسانی در قالب قابلیت اطمینان، در شرایط مختلف، (عادی و جنگی)، ارائه می‌شود. در این راستا، فرضیات در نظر گرفته در مدل‌سازی به شرح ذیل هستند:

- در مدل پیشنهادی، زمان‌بندی بهینه تولید واحدهای تولیدی در نظر گرفته می‌شود و از حداقل رزرو غیر چرخان موردنیاز صرف‌نظر می‌شود؛ چراکه در ارزیابی موردنظر، یعنی ارزیابی

اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هوشمند بر تداوم برق‌رسانی، تأثیری ندارد.

- هزینه مربوط به خاموشی واحدها در برابر هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه راه‌اندازی، قابل‌اغماض فرض می‌شود.

بدین ترتیب، با توجه به ماهیت مسئله برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدها، تابع هدف مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min \sum_{t=1}^{T} \left\{ \sum_{i=1}^{N_{Gen}} (SU(i,t) + Cost_{Gen}(i,t)) + Cost_{Inc}(t) + VOLL(t) \sum_{b=1}^{N_B} \times \sum_{k=1}^{N_K} LS(b,t,k) \right\} \quad (۱۰)$$

که در آن، $Cost_{Gen}(i,t)$، هزینه سوخت مربوط به واحدهای حرارتی متعارف است. خطی شده تابع هزینه سوخت، آن‌گونه که مانع از غیرخطی شدن مدل مسئله گردد، به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$Cost_{Gen}(i,t) = P_{\min}(i)u(i,t) + \sum_{n=1}^{N_{seg}} slp(n,i)\,p(n,i,t) \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۰)، $Cost_{Inc}(t)$، نشان‌دهنده مقدار تشویق پرداخت‌شده به مشترکین شرکت‌کننده در برنامه پاسخ‌گویی بار و آخرین عبارت تابع هدف، مربوط به سرریزی‌های ناخواسته بار است.

۳-۳. قیود

در این بخش، به ارائه قیود در نظر گرفته‌شده برای مسئله SCUC پرداخته می‌شود. بدیهی است ازآنجاکه سعی شده است تا مدل مسئله به‌صورت خطی باشد، ساده‌سازی در بعضی از قیود صورت گرفته است.

- **قید توازن توان:** مسئله مشارکت امنیت-مقید واحدها، دارای قیود مختلفی است. در اینجا، مطابق با آنچه قبلاً گزارش‌شده [۳۵]، به‌منظور استخراج یک مدل خطی، از پخش بار DCبرای مدل‌سازی روابط توازن توان، به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{Gen(b)}} P(i,t) - D_{DR}(b,t) = \sum_{t=1}^{L_b} F(l,t) \quad \forall b, \forall t \quad (۱۲)$$

طرف سمت چپ رابطه فوق، درواقع، مقدار توان خالص تزریقی به شین b در زمان t، با در نظر داشتن مقدار بار کاهش‌یافته درنتیجه مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ‌گویی بار را نشان می‌دهد. طرف سمت راست تساوی نیز، نمایانگر توان عبوری از خط در هر شین و هر زمان است. $D_{DR}(b,t)$ قبلاً در (۶) تعریف شده است. $F(l,t)$ نیز خواهد بود:

$$F(l,t) = \frac{1}{X(l)}(\delta_s(l) - \delta_r(l)) \quad \forall l,t \quad (۱۳)$$

- **قید محدودیت خط انتقال:** محدودیت توان عبوری از خطوط انتقال به‌صورت رابطه (۱۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$F(l,t) \le \left| F^{\max}(l,t) \right| \quad \forall l,t \quad (۱۴)$$

- **قیود محدودیت تولید توان:** به خاطر محدودیت‌های فیزیکی، در عمل، هر واحد تولیدی نمی‌تواند مادامی‌که روشن است از یک حد مشخص کمتر و از یک حد مشخص بیشتر، توان تولید نماید. این محدودیت‌ها، اصطلاحاً محدودیت تولید توان نامیده می‌شود که در اینجا به‌صورت روابط (۱۵) و (۱۶) در نظر گرفته شده‌اند.

$$P(i,t) \le P^{\max}(i)u(i,t) \quad \forall l,t \quad (۱۵)$$

$$P(i,t) \ge P^{\min}(i)u(i,t) \quad \forall l,t \quad (۱۶)$$

- **قید حاشیه رزرو سیستم:** مجموع رزرو چرخان کل سیستم، اعم از بارهای ثابت و بارهای الاستیک، در هر بازه از برنامه‌ریزی (هر ساعت)، لازم است از مجموع حداکثر ظرفیت واحدهای تولیدی کوچک‌تر باشد. این محدودیت به‌صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته شده است.

$$\sum_{i=1}^{N_{Gen}} P^{\max}(i,t) \ge SR(t) + \sum_{b=1}^{N_B} D_{DR}(b,t) \quad (۱۷)$$

- **محدودیت زمانی روشن/خاموش شدن واحدها:** مادامی‌که یک واحد تولیدی از مدار خارج یا به مدار وارد می‌شود، لازم است حداقل ساعات مشخصی را در وضعیت جدید باقی بماند تا قادر به تغییر وضعیت مجدد خود باشد. این محدودیت‌ها که با عنوان قیود حداقل زمان لازم برای خاموش/روشن ماندن شناخته می‌شوند، در اینجا طی روابط (۱۸) و (۱۹) در نظر گرفته شده‌اند [۳۵].

$$\sum_{t=1}^{UT(i)} (1 - u(i,t)) = 0 \quad \forall i \in N_{Gen} \quad (۱۸)$$

$$y(i,t) + \sum_{m=t+1}^{\max[T,t+MU(i)-1]} z(i,m) \le 1 \quad \forall t = UT(i)+1,\ldots,T \ \ \forall i \in N_{Gen} \quad (۱۹)$$

که در آن، $y(i,t)$ و $z(i,t)$، متغیرهای باینری به ترتیب مربوط به وضعیت‌های راه‌اندازی و خاموشی واحدها هستند. $UT(i)$ نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$UT(i) = \max\{0, \min[T, MU(i) - TU(i,0)u(i,0)]\} \quad (۲۰)$$

بر این اساس، محدودیت مربوط به زمان خاموشی واحدها را می‌توان به‌صورت زیر، طی روابط (۲۱) تا (۲۳) در نظر گرفت:

$$\sum_{t=1}^{DT(i)} u(i,t) = 0 \quad \forall i \in N_{Gen} \tag{۲۱}$$

$$z(i,t) + \sum_{m=t+1}^{\max[T,t+MD(i)-1]} y(i,m) \le 1 \quad \forall t = UT(i)+1,...,T \quad \forall i \in N_{Gen} \tag{۲۲}$$

که در آن:

$$DT(i) = \max\{0, \min[T, MD(i) - TD(i,0)u(i,0)]\} \tag{۲۳}$$

روابط منطقی بین شاخص‌های راه‌اندازی و خاموشی واحدها نیز به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند [۳۵]:

$$y(i.t+1) - z(i,t+1) = u(i,t+1) - u(i,t) \tag{۲۴}$$

$$y(i,t) + z(i,t) \le 1 \tag{۲۵}$$

• **قیود مربوط به پاسخ‌گویی بار:** به‌منظور مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر برنامه پاسخ‌گویی بار در سمت تقاضا، در ادامه به ارائه قیودی پرداخته می‌شود که در واقعیت، با مشارکت سمت تقاضا همراه هستند. با در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار در قالب یک واحد تولیدی مجازی، قیود حداقل حد بالا و پایین می‌توانند نامطلوب بودن اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار را از دید مصرف‌کننده کاهش دهد. در اینجا، قیود موردنظر طی روابط (۳۱-۲۶) در نظر گرفته شده‌اند.

$$\sum_{t=1}^{UT(i)} (1 - r(t)) = 0 \quad \forall t = UT_d + 1,...,T \tag{۲۶}$$

$$y_d(t) + \sum_{m=t+1}^{\max[T,t+MU_d(i)-1]} z_d(m) \le 1 \quad \forall t = UT_d(i)+1,...,T \tag{۲۷}$$

که در آن، $y_d(t)$ و $z_d(t)$، متغیرهای باینری، به ترتیب معرف وضعیت‌های روشن و خاموش (مشارکت یا عدم مشارکت) هستند؛ UT_d نیز عبارت است از:

$$UT_d = \max\{0, \min[T, MU_d - r(0)]\} \tag{۲۸}$$

بر این اساس، قیود مربوط به خاموشی واحد تولیدی مجازی را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\sum_{t=1}^{DT_d} r(t) = 0 \quad \forall t \in UT_d + 1,...,T \tag{۲۹}$$

$$z_d(t) + \sum_{m=t+1}^{\max[T,t+MD_d-1]} y_d(m) \le 1 \quad \forall t = UT_d + 1,...,T \tag{۳۰}$$

و لذا DT_d خواهد بود:

$$DT_d = \max\{0, \min[T, MD_d - (1 - r(0))]\} \tag{۳۱}$$

ارتباط بین شاخص‌های زمانی مشارکت و عدم مشارکت سمت تقاضا را نیز می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

$$y_d(t+1) - z_d(t+1) = r(t+1) - r(t) \tag{۳۲}$$

$$y_d(t) + z_d(t) \le 1 \tag{۳۳}$$

• **قید محدودیت بار زدایی:** در عمل، از دست رفتن ظرفیت، ممکن است در راستای حفظ امنیت سیستم، از روی ناچار، به بار زدایی منجر شود. حال با توجه به بالا بودن هزینه‌های مربوط به این اقدام، یعنی هزینه‌های مربوط به از دست رفتن بار، میزان سرریزی بار نباید از یک حد مشخص تجاوز نماید. این امر به‌صورت قید ارائه‌شده طی رابطه (۳۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$0 \le LS(b,t,k) \le LS^{\max}(b,t) \tag{۳۴}$$

لازم به ذکر است که حد بالای سرریزی بار در رابطه فوق، نباید از بیشتر از تقاضای مربوط به آن ساعت در شین موردنظر باشد.

۳-۴. دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط عادی

به‌منظور در نظر داشتن احتمال مربوط به رخداد خطا برای واحدهای تولیدی به‌صورت تصادفی در مدل مسئله SCUC، از نرخ خروج اجباری واحدهای تولیدی، طبق رابطه (۳۵)، استفاده می‌شود [۱۴]. ضابطه مربوطه، درواقع، احتمال خروج تصادفی هر واحدها را، نه در شرایط جنگی، بلکه در شرایط عادی، یعنی خروج در اثر رخدادهای تصادفی رایج در خود سامانه‌های قدرت را به‌دست می‌دهد. شایان‌ذکر است که در اینجا، از دست رفتن بار، تنها متأثر از خروج واحدهای تولیدی در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، در (۳۵)، k یا شاخص برون‌رفت، درواقع همان i یا همان شماره واحد تولیدی است. در اینجا، علت استفاده از نماد k به‌جای i، ایجاد امکان توسعه و بسط مدل از حیث در نظرگیری برون‌رفت‌های مختلف دیگر است.

$$\pi(k) = \frac{FOR(k)}{1 - FOR(k)} \prod_{i=1}^{N_{Gen}} (1 - FOR(k)) \tag{۳۵}$$

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در محاسبه مقدار بار ازدست‌رفته (در شرایط عادی)، تنها نرخ خروج اجباری واحدها در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، بار زدایی در شین b در طول دوره خطا k در زمان (ساعت) t به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LS(b,t,k) = D_{DR}(b,t) - \sum_{i=1}^{N_{Gen(b)}} P(i,t)w(i,k) + \sum_{l=1}^{N_b} \frac{1}{X(l)} (\delta_s(l) - \delta_r(l)) \quad \forall b \in N_B, t \in T, k \in N_k \tag{۳۶}$$

در هنگام بروز خطا در سیستم که در آن تولید باید تقاضا را برآورده سازد، تقاضا ناشی از عدم‌کفایت کافی بخش تولید، ممکن است تأمین نشود؛ بنابراین، تفاوت بین تولید هر ساعت با تقاضای متناظر، یک ضریب جریمه، تحت عنوان «جریمه بار زدایی»، را به دنبال دارد. در رابطه بالا، زمانی که پارامتر $w(i,k)$ برابر با صفر باشد (یعنی خروج واحد رخ داده باشد)، $P(i,t)$ نیز به خاطر خروج واحد i در زمان t صفر باقی می‌ماند.

پارامتر مقدار انتظاری بار تامین‌نشده[1] (ELNS) که درواقع امکان اعتماد و اطمینان به برنامه زمان‌بندی بهینه واحدها را فراهم می‌سازد از ضرب احتمال خروج واحد در مقدار سرریزی بار به ازای هر خروج در هر شین در زمان t، به‌صورت زیر، به‌دست می‌آید.

$$ELNS(t) = \sum_{b=1}^{N_B} \sum_{k=1}^{N_k} \pi(k) LS(b,t,k) \quad (۳۷)$$

$$ELNS(t) \le ELNS^{MAX} \quad (۳۸)$$

با توجه به مدل ارائه‌شده در این بخش، می‌توان دید که در مسئله بهینه‌سازی موردنظر، تابع هدف مسئله، ارائه‌شده طی رابطه (۱۰)، مقید به قیود (۱۲) تا (۳۸)، در طول دوره برنامه‌ریزی بهینه می‌شود؛ مادامی‌که پارامترهای $P(i,t),\ D_{DR}(b,t), LS(b,t,k)$ و $u(i,t)$، متغیرهای مسئله بهینه‌سازی را در برمی‌گیرند. در ادامه، بعد از ارائه مدل احتمالاتی خروج واحدها در شرایط جنگی، به تعمیم مدل ارائه‌شده برای تعیین راهبرد بهینه زمان‌بندی امنیت-مقید واحدها در حضور منابع پاسخ‌گوی بار اضطراری راهبردی پرداخته خواهد شد.

۳-۵. مدل احتمالاتی دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی

همان‌طور که می‌دانیم در شرایط عادی، احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در قالب شاخص FOR بیان می‌گردد. این شاخص درواقع بر اساس زمان تعمیرات و نرخ خرابی آماری المان‌های واحد تولیدی، منتج از حوادث طبیعی، مشکلات مداری، و خطاهای انسانی است. حال چنانچه در تخمین این شاخص، احتمال هجمه‌ها و اقدامات خرابه‌کاری عمدی از سوی دشمن نیز لحاظ گردد، می‌توان قابلیت اطمینان سیستم در وضعیت‌های بحرانی را نیز بررسی نمود. بر این اساس می‌توان ادعا کرد که شاخص مزبور درواقع بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سامانه در برابر حمله و خرابه‌کارهای دشمن است.

به‌منظور ارائه یک مدل احتمالاتی مناسب برای تعیین میزان دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی، لازم است بررسی‌ها و مطالعاتی در زمینهٔ تحلیل میزان ریسک یک نیروگاه در شرایط جنگی انجام شود. مدل احتمالاتی در نظر گرفته‌شده در این مقاله، شکل تکامل‌یافته مدل قبلاً ارائه‌شده [۲۰] است. به‌طورکلی، برای تخمین احتمال خروج یک واحد در شرایط بحران، لازم است کلیه تهدیداتی که برای آن نیروگاه محتمل است شناسایی و اولویت‌بندی شده و بعد از تعریف سناریوهای متعدد که درواقع مبتنی بر رخداد حالت‌های مختلف از مجموعه عوامل در نظر گرفته‌شده است، میزان ریسک موردنظر برای آن نیروگاه محاسبه گردد. میزان دسترس‌ناپذیری یک نیروگاه در شرایط موردنظر، درواقع حاصل‌ضرب احتمال مربوط به کلیه عواملی است که باعث هجمه دشمن به آن نیروگاه می‌شود.

مجموعه عوامل در نظر گرفته‌شده در تخمین احتمال خروج اجباری واحدها در شرایط جنگی، به سه گروه جغرافیایی، فنی و عمومی تقسیم‌بندی شده است که هر یک به‌نوبه خود عوامل متعددی را در خود جای می‌دهند [۲۰]، در اینجا، دسته‌بندی عوامل به‌صورت دیگر و به‌جای عوامل عمومی، عوامل سیاسی در نظر گرفته می‌شوند. به‌عنوان‌مثال، در مورد عوامل جغرافیایی، می‌توان به نوع منطقه‌ای که در آن نیروگاه احداث‌شده (از لحاظ دشت یا کوهستانی بودن منطقه)، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از مرزهای کشور، در مورد عوامل فنی، می‌توان به ظرفیت نیروگاه، نوع نیروگاه (از حیث تناسب برای تأمین بار پایه، بارمیانی و بار اوج) و در مورد عوامل سیاسی، می‌توان به تاریخچه حملات نظامی به نیروگاه‌ها و یا موقعیت سیاسی آن‌ها (از حیث نزدیکی به پایتخت یا مطرح‌شدن آن‌ها به دلایل مختلف، مثل پیاده‌سازی یک فناوری ملی و نوین در آن‌ها، و اشاره به موضوع در رسانه‌های داخل و خارج) اشاره کرد.

در مقاله حاضر، به‌منظور ارتقاء مدل احتمالاتی قبلاً ارائه‌شده [۲۰]، در تخمین نرخ خروج اجباری واحدها در شرایط جنگی، علاوه بر سایر عوامل در نظر گرفته‌شده در مطالعه موردنظر که در ادامه به‌اختصار به آن‌ها پرداخته خواهد شد، عوامل حائز اهمیت دیگری، چون میزان خسارات زیست‌محیطی ناشی شده از تخریب یک نیروگاه (هسته‌ای بودن یا نبودن واحدها) و میزان نزدیکی به ذخایر سوخت‌های فسیلی در کنار نزدیکی به مراکز ویژه تجاری، نیز به ترتیب در زمره عوامل فنی و جغرافیایی در نظر گرفته خواهند شد. علاوه بر این، اصل پراکندگی واحدها در کنار مساحت زمین به‌کار گرفته‌شده برای احداث، وابسته به ظرفیت واحدها و تعداد آن‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود و بر این اساس ضرایب وزنی مختلفی به هر حالت اختصاص داده می‌شود. به بیانی کامل‌تر، اگر در تخمین نرخ خروج اجباری واحدها در شرایط موردنظر، میزان اهمیت سه دسته عوامل در نظر گرفته‌شده، یعنی عامل فنی، جغرافیایی و سیاسی، به ترتیب با IF^{Tech}، IF^{Geo} و IF^{Pol} و وزن هر عامل به ترتیب با PR_i^{Tech}، PR_i^{Geo} و PR_i^{Pol}، تعریف گردد، در این حالت احتمال دسترس‌ناپذیری واحد i در شرایط بحرانی، یعنی FOR_i^{CC}، به‌صورت زیر قابل‌محاسبه خواهد بود.

$$FOR_i^{CC} = IF^{Tech} PR_i^{Tech} IF^{Geo} PR_i^{Geo} IF^{Pol} PR_i^{Pol} \quad (۳۹)$$

در مورد هر دسته از عوامل فوق‌الذکر، وزن هر دسته از حاصل‌ضرب وزن مربوط به سایر عوامل در نظر گرفته‌شده در آن دسته قابل‌محاسبه است. در ادامه، ضمن تشریح عوامل مختلف در

[1] Expected Load Not Served

نظر گرفته‌شده در سه دسته کلی موردنظر، به نحوه اثرگذاری آن‌ها بر نرخ خروج واحدها و نیز اوزان در نظر گرفته‌شده برای هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

• عوامل فنی

ظرفیت، عمر و طول عمر مفید، نوع بار در نظر گرفته‌شده در طراحی نیروگاه (یعنی نوع سوخت و تناسب نیروگاه با زمان بار اوج، بار پایه، و بارمیانی)، و مهم‌تر از همه، نوع نیروگاه از حیث هسته‌ای بودن یا نبودن آن‌ها، اهم عوامل یا دیدگاه‌هایی را شامل می‌شوند که در زمره عوامل فنی جای می‌گیرند. از دیدگاه ظرفیت، بدیهی است هرچه ظرفیت یک نیروگاه بیشتر باشد، اهمیت راهبردی آن، و متعاقباً، احتمال هجمه دشمن به آن نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین، می‌توان گفت هرچه ظرفیت یک نیروگاه بیشتر باشد، احتمال دسترس‌ناپذیری آن نیز بیشتر است.

در عمل، ارزش حرارتی سوخت یک نیروگاه یا آهنگ تولید حرارت سوخت درنتیجه احتراق، درواقع، سرعت یک نیروگاه در پاسخ به تغییرات بار را نشان می‌دهد. ازاین‌رو، نیروگاه‌هایی که دارای سرعت پاسخ پایین هستند، بیش‌ترین ساعات کارکرد را در طول سال داشته و مناسب برای تأمین بار پایه هستند. نیروگاه‌های هسته‌ای، و یا نیروگاه‌های حرارتی مبتنی بر سوخت زغال‌سنگ از این قبیل هستند. در مقابل، واحدهای حرارتی با سوخت گاز طبیعی، در زمره واحدهای سریع-پاسخ بوده و تغییرات بار را پوشش می‌دهند. ازاین‌رو، این واحدها متناسب برای بار اوج هستند.

شایان‌ذکر است که در کنار نوع سوخت، قیمت آن نیز در به‌کارگیری واحدهای نیروگاهی در تأمین بارهای پایه، میانی، و بار اوج اثرگذار است. بر این اساس، واضح است که نیروگاه‌های در نظر گرفته‌شده برای بار پایه، یعنی نیروگاه‌های هسته‌ای و زغال‌سوز، در معرض تهدید بیشتری قرار دارند؛ مادامی‌که در مقایسه با دیگر نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های مزبور میزان انرژی بیشتری را در طول سال تولید می‌کنند. بنابراین، هرچه سهم تولید انرژی یک نیروگاه در طول سال در یک کشور بیشتر باشد، در برآوردهای دشمن، از اهمیت بیشتری برای حمله برخوردار بوده و ازاین‌رو احتمال دسترس‌ناپذیری آن نیز بیشتر خواهد بود.

عمر و طول عمر مفید یک نیروگاه را می‌توان از دیگر عوامل فنی مؤثر در میزان دسترس‌ناپذیری آن دانست؛ به‌گونه‌ای که آن دسته از واحدهایی که مقدار بیشتری از طول عمر مفید خود را سپری کرده باشند، در اثر هجمه‌های دشمن، از آسیب‌پذیری بیشتر و لذا احتمال دسترس‌ناپذیری بیشتری برخوردار خواهند بود. این عامل قبلاً نیز در نظر گرفته شده است [۲۰]؛ اما به طول عمر مفید واحدها در تخصیص وزن به عوامل مختلف مؤثر در دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی توجه نشده است. به‌عنوان‌مثال، یک نیروگاه هسته‌ای با طول عمر مفید ۴۵ سال، در مقایسه با یک واحد زغالی با طول عمر مفید ۲۵ سال [۳۶]، نمی‌تواند فرضاً در زمره نیروگاه‌هایی که بیش از ۲۰ سال از عمر آن‌ها می‌گذرد، احتمال دسترس‌ناپذیری برابری را به خود اختصاص دهد.

از میان مجموعه عوامل فنی در نظر گرفته‌شده، عاملی که علی‌رغم اهمیت بسیار بالای آن، تاکنون در مطالعات انجام‌شده به آن توجه نشده است، خسارات به بار آمده در اثر تخریب، یا به عبارتی، هسته‌ای بودن یا نبودن یک نیروگاه است. به‌عبارتی‌دیگر، گذشته از تاریخچه نحوه دستیابی دانشمندان کشور عزیزمان به انرژی هسته‌ای و سنگ‌اندازی و توطئه کشورهای بیگانه در راستای جلوگیری از دستیابی به فناوری هسته‌ای در زمینهٔ تولید انرژی الکتریکی، جبران‌ناپذیر بودن تبعات ناشی از انفجار و آسیب راکتورهای هسته‌ای و مساحتی که می‌تواند تحت‌الشعاع این آسیب قرار گیرد، بی‌شک واحدهای نیروگاهی مربوطه را در صدر اولویت‌ها برای حمله از سوی دشمن قرار می‌دهد.

بنا به آنچه که در بالا به آن اشاره شد، اگر در مجموعه واحدهای نیروگاه‌های یک کشور، واحدهای هسته‌ای نیز موجود باشند، از حیث پسامدهای بعد از تخریب، یعنی نه‌تنها بی‌برق شدن بار تحت پوشش، بلکه آسیب‌های زیست‌محیطی به بار آمده، از بیش‌ترین احتمال دسترس‌ناپذیری برخوردار خواهند بود. اگر $PR_{1,i}^{Tech}$، $PR_{2,i}^{Tech}$، $PR_{3,i}^{Tech}$ و $PR_{4,i}^{Tech}$، ضرایب وزنی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد iام در برابر هجمه دشمن، به ترتیب متأثر از ظرفیت نیروگاه، میزان انرژی تولیدی در سال (نوع کاربرد نیروگاه متناسب با پایه، میان باری و بار اوج)، عمر و طول عمر مفید و نهایتاً هسته‌ای بودن یا نبودن آن نیروگاه باشد، ضریب وزنی کلی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد مربوطه در شرایط جنگی متأثر از عوامل فنی در نظر گرفته‌شده طی رابطه (۴۰) قابل‌محاسبه خواهد بود.

$$PR_i^{Tech} = \prod_{TC=1}^{4} PR_{TC,i}^{Tech} \qquad (۴۰)$$

ضرایب وزنی در نظر گرفته‌شده برای خروج یک نیروگاه در شرایط بحرانی متأثر از عوامل مختلف فنی در نظر گرفته‌شده در جدول (۱) ارائه شده است.

در ادامه، به بررسی عوامل جغرافیایی مؤثر بر احتمال خروج واحدها در شرایط جنگی پرداخته خواهد شد.

جدول ۱. ضرایب وزنی در نظر گرفته‌شده برای دسترس‌ناپذیری واحدها متأثر از عوامل مختلف فنی در شرایط بحران

CAP_i (GW)

وزن	≤۰/۲	۰/۲۱ تا ۰/۳	۰/۳۱ تا ۰/۵	۰/۵۱ تا ۰/۸	۰/۸۱ تا ۱/۲	۱/۲۱ تا ۱/۶	۱/۶۱ تا ۲/۱
$PR_{1,i}^{Tech}$	۰/۱	۰/۲	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۶۵	۰/۸	۱

YG_i (TWh)

وزن	≤۰/۵	۰/۵-۱	۱-۱/۵	۱/۵-۲	۲-۲/۵	≥۲/۵
$PR_{2,i}^{Tech}$	۰/۱۵	۰/۳	۰/۴۵	۰/۶۰	۰/۸۰	۱

LT_i (Year)

وزن	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۴۵	عمر (سال)
$PR_{3,i}^{Tech}$	۱	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۲۰	≤ ۱۰
	۱	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۲۰	۱۰-۱۵
	۱	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۲۰	۱۵-۲۰
	–	۱	۰/۷۵	۰/۵۰	۰/۲۵	۲۰-۲۵
	–	–	۱	۰/۶۵	۰/۳۵	۲۵-۳۰
	–	–	–	۱	۰/۵۰	۳۰-۳۵
	–	–	–	–	۰/۸۰	۳۵-۴۰

نوع نیروگاه

احتمال	غیرهسته‌ای	هسته‌ای
$PR_{4,i}^{Tech}$	۰/۵	۱

• عوامل جغرافیایی

در مورد عوامل مختلف جغرافیایی مؤثر در احتمال خروج واحدهای نیروگاهی در شرایط جنگی، قبلاً به‌تفصیل بحث شده است [۲۰]. در مقاله حاضر، علاوه بر ۸ عامل اشاره‌شده قبلی [۲۰]، یعنی نوع منطقه (کوهستانی، دشت مسطح، جلگه‌ای، و ...)، ارتفاع از سطح دریا، پراکندگی ساختار نیروگاهی، فاصله از مرزهای کشور، فاصله از مراکز اصلی شهرها، فاصله از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی، استتار، و استحکامات به‌کاررفته، به میزان نزدیکی به ذخایر سوخت، نزدیکی به مراکز صنعتی و مناطق ویژه تجاری، و میزان نزدیکی به دریا نیز توجه می‌شود. در مورد ۸ عامل اول، به‌جز پراکندگی ساختار، از ضرایب وزنی ارائه‌شده قبلی [۲۰] در مقاله حاضر استفاده شده است؛ توضیحات کامل در راستای توجیه عوامل موردنظر نیز در مقاله مزبور موجود است. در مورد سه عامل جدید در نظر گرفته‌شده در این مقاله، در ادامه توضیحات لازم ارائه خواهد شد. علاوه بر این، همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، پراکندگی ساختار نیروگاه‌ها، نه‌تنها بر اساس وسعت زمین احداث، بلکه بر اساس تعداد و ظرفیت واحدهای آن نیروگاه در نظر گرفته شده و بر این اساس در مقاله حاضر اوزان جدیدی به حالات مختلف مربوطه تخصیص داده می‌شود.

از عمده بخش‌های مصرف‌کننده سوخت‌های فسیلی، در کنار بخش حمل‌ونقل، بخش تولید انرژی الکتریکی است. از این حیث، با توجه به هزینه‌بر بودن سوخت‌رسانی به نیروگاه‌ها، نزدیکی به ذخایر سوخت که مسلماً درازای فراهم بودن حداقل شرایط معیشت، سکونت اجتماعات انسانی را نیز به همراه دارد، می‌تواند در انتخاب زمین برای احداث یک نیروگاه مؤثر باشد. بر این اساس، اگر دشمن در هجمه‌های خود به دنبال وارد آوردن حداکثر خسارات ممکن باشد، نیروگاه‌های نزدیک به ذخایر سوخت در اولویت بیشتری در مقایسه با نیروگاه‌های دور از ذخایر سوخت و تأسیسات نفتی قرار دارند. از این حیث می‌توان گفت نیروگاه‌های نزدیک به تأسیسات نفتی، از احتمال خروج بیشتری در شرایط جنگی برخوردارند.

به‌طور مشابه، در مورد نیروگاه‌های حرارتی، عامل اشاره‌شده در بالا، به‌نوعی در ارتباط با نیاز نیروگاه به حجم آب زیاد و مشکل‌تر بودن حفاظت از مرزهای آبی در برابر حمله‌های دشمن نیز صادق است. به بیانی کامل‌تر، نیاز به حجم بالای آب در برج‌های خنک‌کننده نیروگاه‌های حرارتی، از دیگر عوامل مهم در انتخاب محل احداث یک نیروگاه بوده و چنانچه از توضیحات فوق برمی‌آید، نزدیکی هرچه بیشتر نیروگاه‌های حرارتی به دریا، می‌تواند در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مؤثر باشد. حال از طرفی، حفاظت از مرزهای آبی در مقابل مرزهای خشکی، بعضاً دشوارتر است. البته این موضوع، به تاکتیک رزمی دشمن و اینکه در کدام نیروی ارتش (زمینی، هوایی، و دریایی) قوی‌تر است نیز بستگی دارد. بنابراین، می‌توان چنین اظهار داشت که در شرایط جنگی، واحدهای نزدیک به دریا، از احتمال خروج بیشتری در مقایسه با واحدهای دور از دریا، برخوردار هستند.

دیدگاه حائز اهمیت دیگری که می‌تواند در زمره عوامل جغرافیایی مؤثر بر دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی مثمر ثمر باشد، هم‌جواری نیروگاه‌ها در مناطق ویژه اقتصادی است. به بیانی کامل‌تر، نیاز قابل‌توجه مناطق ویژه اقتصادی، که اغلب تجمع معادن و کارخانه‌ها را در خود دارند، به انرژی الکتریکی باقابلیت اطمینان قابل‌قبول، امروزه باعث شده است که در نزدیکی این مناطق، ظرفیت‌های نیروگاهی قابل‌توجهی نصب گردد. مناطق ویژه اقتصادی پارس جنوبی عسلویه و سیرجان، که به ترتیب مربوط به استان‌های بوشهر و کرمان هستند، نمونه‌ای از این مناطق در کشور هستند. پرواضح است وارد آوردن آسیب به این نیروگاه‌ها، باعث از دست رفتن بارهای حساس شده که به تبع، خسارات بیشتری در مقایسه با از دست رفتن بارهای دیگر، مانند بارهای خانگی، را به دنبال دارد که این جنبه می‌تواند در محاسبات دشمن، باعث افزایش احتمال دسترس‌ناپذیری بیشتر نیروگاه‌های مربوطه، در مقایسه با سایر دیگر نیروگاه‌ها گردد.

با تعریف پارامترهای $PR_{1,i}^{Geo}, PR_{2,i}^{Geo}, ..., PR_{8,i}^{Geo}$ به‌عنوان ضرایب وزنی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد iام در برابر هجمه دشمن، به ترتیب متأثر از نوع منطقه، ارتفاع از سطح دریا، پراکندگی ساختار نیروگاهی، فاصله از مرزهای کشور، فاصله از مراکز اصلی شهرها، فاصله از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی، استتار، و درجه استحکامات به‌کاررفته و $PR_{9,i}^{Geo}, PR_{10,i}^{Geo}$ و $PR_{11,i}^{Geo}$، به‌عنوان ضرایب وزنی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد iام در برابر حمله دشمن به ترتیب متأثر از فاصله تا تأسیسات نفتی (ذخایر سوخت)، فاصله تا دریا، و میزان فاصله تا مناطق ویژه اقتصادی باشد، ضریب وزنی کلی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد مربوطه در شرایط جنگی متأثر از عوامل جغرافیایی در نظر گرفته‌شده طی رابطه (۴۱) قابل‌محاسبه خواهد بود.

$$PR_i^{Geo} = \prod_{GC=1}^{11} PR_{GC,i}^{Geo} \qquad (۴۱)$$

ضرایب وزنی در نظر گرفته‌شده برای خروج یک نیروگاه در شرایط بحرانی متأثر از عوامل جدید جغرافیایی در نظر گرفته‌شده در مطالعه حاضر نیز در جدول (۲) ارائه شده است. جدول (۳) نیز، ضرایب اصلاح‌شده برای عامل پراکندگی ساختار به‌ازای وسعت تحت پوشش تجهیزات نیروگاه، ظرفیت، و تعداد واحدها را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ضرایب وزنی در نظر گرفته‌شده برای دسترس‌ناپذیری واحدها متأثر از بعضی عوامل جغرافیایی در شرایط جنگی

فاصله نیروگاه تا تأسیسات نفتی (ذخایر سوخت) برحسب km					
احتمال	≤۲۵	۲۶-۵۰	۵۱-۷۵	۷۶-۱۰۰	۱۰۱≤
$PR_{9,i}^{Geo}$	۰/۹۹	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۰	۰/۲۰

فاصله نیروگاه تا دریا برحسب km						
احتمال	≤ ۱۰	۱۱-۲۰	۲۱-۳۰	۳۱-۴۰	۴۱-۵۰	۵۱≤
$PR_{10,i}^{Geo}$	۰/۹۹	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۱۵

فاصله نیروگاه تا مناطق ویژه اقتصادی برحسب km						
احتمال	≤ ۱۰	۱۱-۲۰	۲۱-۳۰	۳۱-۴۰	۴۱-۵۰	۵۱≤
$PR_{11,i}^{Geo}$	۰/۹۹	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۱۵

• عوامل سیاسی

در کنار عوامل فنی و جغرافیایی مؤثر بر احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، عوامل متفرقه دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند از دیدگاه موردنظر، یعنی احتمال دسترس‌ناپذیری درنتیجه هجمه دشمن، بعضی از نیروگاه‌ها را از سایر دیگر نیروگاه‌های موجود در ترکیب تولید متمایز سازند.

از جمله این عوامل می‌توان به تاریخچه حمله به نیروگاه‌ها، نزدیکی به بارهایی که ازلحاظ راهبردی بسیار حائز اهمیت هستند (مانند پایتخت یک کشور)، اشاره نمود. البته عوامل دیگری مانند به‌کارگیری یک فناوری خاص و هزینه‌بر در نیروگاه و تبدیل‌شدن آن به یک نماد ملی در سطح جهانی توسط رسانه‌ها (به نوعی میزان شهرت نیروگاه) نیز می‌تواند از حیث سیاسی بر اهمیت راهبردی یک نیروگاه نیز مؤثر باشد. در اینجا تنها به دو عامل تاریخچه حملات و نزدیکی به پایتخت اکتفا شده و از در نظر گرفتن عواملی چون میزان شهرت نیروگاه اجتناب می‌شود.

جدول ۳. احتمالات در نظر گرفته‌شده برای دسترس‌ناپذیری واحدها متأثر از پراکندگی ساختار در شرایط جنگی

احتمال	وسعت نیروگاه (هکتار) ۵۰	۵۰ تا ۱۰۰	۱۰۰ تا ۱۵۰	۱۵۰ تا ۲۰۰	تعداد واحد	CAP_i (MW)
$PR_{3,i}^{Geo}$	۰/۱	–	–	–	۱	≥۲۰
	۰/۲	۰/۱	–	–	۲	
	۰/۳	۰/۲	۰/۱	–	۳	
	۰/۴	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۴	
	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲	≤۵	
	۰/۱۵	–	–	–	۱	۲۱-۵۰
	۰/۳۳	۰/۱۵	–	–	۲	
	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۱۵	–	۳	
	۰/۶	۰/۴۵	۰/۳۳	۰/۱۵	۴	
	۰/۸	۰/۶	۰/۴۵	۰/۳۳	≤۵	
	۰/۱۸	–	–	–	۱	۵۱-۱۰۰
	۰/۳۶	۰/۱۸	–	–	۲	
	۰/۵	۰/۳۶	۰/۱۸	–	۳	
	۰/۷	۰/۵	۰/۳۶	۰/۱۸	۴	
	۰/۹۵	۰/۷	۰/۵	۰/۳۶	≤۵	
	۰/۲	۰/۱۵	–	–	۱	۱۰۱-۱۵۰
	۰/۴	۰/۲	۰/۱۵	–	۲	
	۰/۵۵	۰/۴	۰/۲	۰/۱۵	۳	
	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۴	۰/۲	۴	
	۱	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۴	≤۵	
	۰/۲۵	۰/۱۸	–	–	۱	۱۵۱-۲۰۰
	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۱۸	–	۲	
	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۲۵	۰/۱۸	۳	
	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۲۵	۴	
	۱	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۴۵	≤۵	
	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۸	–	۱	۲۰۱-۳۰۰
	۰/۵	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۸	۲	
	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۲۵	۳	
	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۴	
	۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	≤۵	
	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۲	۰/۱	۱	۳۰۱-۴۰۰
	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۳	۰/۲۲	۲	
	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۳۵	۰/۳	۳	
	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۳۵	۴	
	۱	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۵۵	≤۵	
	۰/۴	۰/۳	۰/۲۵	۰/۱۵	۱	۴۰۱-۵۰۰
	۰/۴۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲۵	۲	
	۰/۶	۰/۴۵	۰/۴	۰/۳	۳	
	۰/۹۸	۰/۶	۰/۴۵	۰/۴	۴	
	۱	۰/۹۸	۰/۶	۰/۴۵	≤۵	

شایان ذکر است که عامل نزدیکی به پایتخت اگرچه می‌تواند در زمره عوامل جغرافیایی نیز قرار گیرد اما در اینجا به دلیل اهمیت بالای راهبردی شهر پایتخت که درواقع مرکزیت دولت و حاکمیت را در خود دارد، عامل موردنظر از دیدگاه سیاسی مورد توجه قرار گرفته است.

با تعریف پارامترهای $PR_{1,i}^{Pol}$ و $PR_{2,i}^{Pol}$ به‌عنوان ضرایب وزنی مربوط به‌دسترس‌ناپذیری واحد iام در برابر هجمه دشمن، به ترتیب متأثر از تاریخچه تعداد حملات نظامی به آن‌ها و نزدیکی به پایتخت، ضریب وزنی کلی مربوط به سری عوامل موردنظر به‌صورت مشابه با روابط (۴۰) و (۴۱) قابل محاسبه خواهد بود. جدول (۴)، اوزان در نظر گرفته‌شده برای خروج یک نیروگاه در شرایط بحرانی متأثر از عوامل سیاسی موردنظر را ارائه می‌کند.

جدول ۴. احتمالات در نظر گرفته‌شده برای دسترس‌ناپذیری واحدها متأثر از عوامل سیاسی در نظر گرفته‌شده در شرایط جنگی

تعداد دفعات حمله به نیروگاه					
احتمال	≤۲	۳-۵	۶-۸	۹-۱۱	≥۱۲
$PR_{1,i}^{Pol}$	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸	۰/۹۹
فاصله تا پایتخت (km)					
احتمال	≤۱۰	۱۱-۱۵	۱۶-۲۰	۲۱-۲۵	≥۲۶
$PR_{2,i}^{Pol}$	۰/۹۹	۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲

بعد از یافتن احتمال خروج واحدها در شرایط بحرانی، لازم است پاسخ‌گویی بار در شرایط موردنظر به‌گونه‌ای مدل‌سازی شود که حس مسئولیت جامعه در شرایط جنگی، بعد از اعلام وضعیت قرمز، در آن دیده شود. چراکه با توجه به ماهیت برنامه‌های پاسخ‌گویی بار که اغلب برحسب تشویق تعریف می‌شوند، در نظر گرفتن تشویق بیشتر در راستای کاهش تقاضا در شرایط بحرانی، به نوعی خلاف آنچه که در عمل انتظار می‌رود است. به بیانی بهتر، مادامی‌که در شرایط عادی عکس‌العمل سمت تقاضا بعد از دریافت سیگنالی از سوی بهره‌بردار مستقل سیستم مبنی بر درخواست اصلاح رفتار مصرف مطابق با وضعیتی از پیش تعریف‌شده در ازای دریافت تشویق مالی است، انتظار عین این فرایند در شرایطی که امنیت ملی یک کشور در حال تهدید و تعرض است، چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. از طرفی، بدیهی است با اعلام وضعیت اضطراری یا قرمز از سوی دولت به مردم، مسلماً رفتار مصرف خودبه‌خود تغییر پیدا کرده و باعث تغییر منحنی تقاضا می‌گردد. حالت در نظر گرفته‌شده برای پاسخ‌گویی در اینجا، پاسخ‌گویی بار اضطراری راهبردی یا SEDRP نامیده شده است.

به‌منظور نشان دادن اثر شرایط جنگی، ابتدا بر منحنی تقاضا، و پس از آن بر عملکرد برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، رابطه (۳) را در نظر بگیرید. در رابطه مزبور، h_{lin} درواقع شیب منحنی تقاضا را نشان می‌دهد که هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد حساسیت تقاضا به قیمت بیشتر خواهد بود. با بزرگ‌تر شدن ضریب h_{lin}، به تبع، طبق رابطه (۶)، مقدار بار متأثر از اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار در شرایط موردنظر نسبت به شرایط عادی کاهش بیشتری خواهد داشت؛ مادامی‌که فرض می‌شود قیمت و مقدار تشویق‌های در نظر گرفته‌شده ثابت باقی بمانند. از سوی دیگر، در شرایط بحرانی، با توجه به عواملی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها بسیار بیشتر از شرایط عادی خواهد بود. از حیث سعی شده است ضریب h_{lin} به نحوی متناسب با احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی مدل گردد. بر این اساس، تغییرات منحنی تقاضا در شرایط بحرانی به‌صورت رابطه (۴۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$h_{lin}^{CC} = h_{lin}(1+\mu\frac{\sum_{i}^{N_{Gen}}(FOR_i^{CC}-\pi(k))}{i}) \qquad (۴۲)$$

که در آن، h_{lin}^{CC}، شیب منحنی تقاضا در شرایط بحرانی، و μ یک ضریب ثابت و قابل تنظیم است. با دقت در رابطه (۴۲) می‌توان گفت که در شرایط بحرانی، به نحوی متناسب با میانگین افزایش احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی، با تغییر منحنی تقاضا و لذا رفتار مصرف، میزان تقاضا کاهش می‌یابد. به ازای شیب جدید منحنی تقاضا، مقدار بار جدید سیستم در ازای اجرای برنامه SEDRP به‌صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$D_{DR}(t) = D_0(t)\left\{1+h_{lin}^{CC}\frac{A(t)}{j_{lin}+h_{lin}^{CC}\,\mathrm{Pr}_0(t)}\right\} \qquad (۴۳)$$

رابطه فوق، در واقع، اصلاح‌شده رابطه (۶) است. مقدار انتظاری بار تأمین نشده در شرایط جنگی نیز، به‌طور مشابه، طی روابط (۳۶) و (۳۷) قابل محاسبه است؛ با این تفاوت که در رابطه (۳۷) FOR_i^{CC} جایگزین $\pi(k)$ می‌گردد.

در بخش بعد، به نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل ارائه‌شده در این بخش طی سناریوهای متنوع پرداخته می‌شود.

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش از مقاله، به‌منظور نشان دادن اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هوشمند بر تداوم برق‌رسانی در برنامه‌ریزی امنیت- مقید مشارکت واحدها، مدل ارائه‌شده در بخش قبل، به سامانه نمونه استاندارد، یعنی سامانه سنجش قابلیت اطمینان ۲۴ شین IEEE اعمال می‌گردد. مدل موردنظر، در قالب یک مسئله بهینه‌سازی خطی آمیخته با اعداد صحیح، در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی و با استفاده از بهینه‌ساز CPLEX 11.2.0 طی

سناریوهای متعدد حل می‌گردد. سناریوهای شبیه‌سازی‌شده عبارت‌اند از:

• **سناریو اول:** برنامه‌ریزی مشارکت واحدها بدون در نظر گرفتن منابع پاسخ‌گویی بار. به‌منظور ایجاد امکان مقایسه و درک بهتر اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تداوم برق‌رسانی در شرایط مختلف، اعم از شرایط عادی و بحرانی یا جنگی، در چهارچوب مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها، سناریو اول به حل مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها (UC) بدون در نظر داشتن قابلیت اطمینان و برنامه EDRP اختصاص می‌یابد.

• **سناریو دوم:** برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با توجه به برنامه‌های پاسخ‌گویی بار اما بدون در نظر داشتن قابلیت اطمینان. در این سناریو به‌منظور بررسی اثر در برنامه‌های پاسخ‌گویی با کشش پویا بار بر برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، از دیدگاه قابلیت اطمینان (محدودیت مربوط به حداکثر سرریزی مجاز) صرف‌نظر می‌شود.

• **سناریو سوم:** برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با در نظر داشتن برنامه EDRP و شاخص قابلیت اطمینان. در این سناریو، در واقع، اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار هوشمند و محدودیت قابلیت اطمینان، به‌صورت هم‌زمان، بر قابلیت اطمینان سیستم در شرایط عادی موردبررسی قرار می‌گیرد.

• **سناریو چهارم:** برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با در نظر داشتن برنامه SEDRP و شاخص قابلیت اطمینان. این سناریو، به‌منظور ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در شرایط بحرانی بر برنامه‌ریزی مشارکت واحدها توأم با دیدگاه قابلیت اطمینان، شبیه‌سازی شده است. بدیهی است مقایسه نتایج حاصل از این سناریو با سناریو دوم، نمایانگر اثر برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تداوم برق‌رسانی در شرایط جنگی خواهد بود.

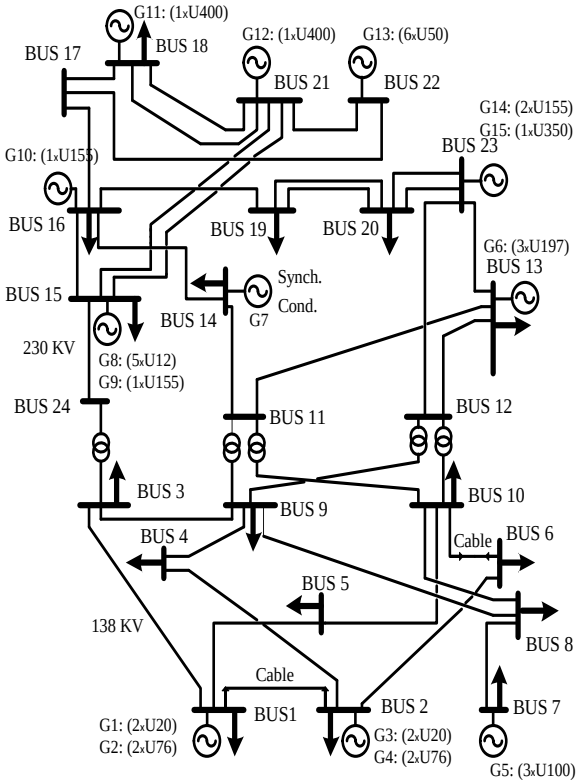
در تمامی سناریوهای در نظر گرفته‌شده، سامانه ۲۴ شین IEEE-RTS[۳۷] که نمای سیستمی آن در شکل (۱) نشان داده شده است، به‌عنوان سامانه آزمون استفاده خواهد شد. اطلاعات مربوط به سایر واحدهای تولیدی این سامانه در جدول (۵) آورده شده است.

در مدل پیشنهادی، فرض می‌شود تمام شش واحد برق‌آبی، از مجموع ۳۲ واحد موجود، همواره در حداکثر خروجی خود بهره‌برداری می‌شوند و ازاین‌رو در فرایند بهینه‌سازی شرکت داده نمی‌شوند. لازم به ذکر است که فرض فوق تأثیری بر محوریت اصلی دنبال شده در این مقاله ندارد. در ادامه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در نظر گرفته‌شده پرداخته می‌شود.

۴-۱. سناریو اول: بهره‌برداری عادی بدون در نظر داشتن پاسخ‌گویی بار و قابلیت اطمینان

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، هدف از شبیه‌سازی این سناریو، تعیین هزینه‌های سیستم و نحوه تولید واحدها بدون توجه به محدودیت قابلیت اطمینان و برنامه پاسخ‌گویی بار است. بدیهی است هزینه‌ها و وضعیت واحدها در این حالت می‌تواند معیاری برای مقایسه و ارزیابی سناریوهای بعدی باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از سناریو اول، واحدهای ۲۳ تا ۲۶ در کنار واحدهای ۳۱ و ۳۲ همواره در طول دوره زمان‌بندی در مدار هستند. در مقابل، واحدهای ۱ تا ۹ و ۱۶ تا ۱۹، در هیچ‌یک از ساعات شبانه‌روز مورد بهره‌برداری قرار نمی‌گیرند. واحد برنامه‌ریزی‌شده برای زمان اوج بار نیز واحد شماره ۲۰ بوده که از ساعت ۹ الی ۱۶ با تولید ۳۲ مگاوات در مدار است. کل هزینه‌های تولید در طول دوره برنامه‌ریزی (۲۴ ساعت) نیز ۸۲۶۷۵۰ دلار به‌دست‌آمده که در واقع کل هزینه‌های سیستم بدون در نظر داشتن هزینه‌های مربوط به پاسخ‌گویی بار و بارهای ازدست‌رفته است. البته طی این سناریو، کل تقاضای پیش‌بینی‌شده تأمین شده و ضریب بار برابر با ۸۲/۹٪ به‌دست آمده است.



شکل ۱. نمای تک‌خطی سامانه مورد مطالعه

جدول ۵. مشخصات واحدهای موجود در سامانه مورد مطالعه [۳۷]

مشخصات واحد			محدودیت تولید (MW)		ضرایب تابع هزینه		
شماره	نوع		P^{min}	P^{max}	c_i	b_i	a_i
۱-۵	فسیلی – نفت		۲	۱۲	۳۸/۹	۰/۰۸	۵۶
۶-۹	توربین احتراقی		۱۶	۲۰	۴۸/۴	۰/۴۴	۶۳۳
۱۳-۱۰	فسیلی- زغال‌سنگ		۱۵	۷۶	۱۱	۰/۰۱	۱۴۵
۱۹-۱۴	برق‌آبی		۰	۵۰	۰	۰	۰
۲۲-۲۰	فسیلی – نفت		۲۵	۱۰۰	۲۵/۴	۰/۰۷	۶۱۵
۲۶-۲۳	فسیلی- زغال‌سنگ		۵۴	۱۵۵	۹/۳	۰/۰۱	۲۲۰
۲۹-۲۷	فسیلی – نفت		۶۹	۱۹۷	۲۸/۵	۰/۰۲	۷۳۹
۳۰	فسیلی- زغال‌سنگ		۱۴۰	۳۵۰	۸/۶	۰/۰۱	۴۴۰
۳۲-۳۱	هسته‌ای		۱۰۰	۴۰۰	۱۳/۵	۰	۶۲۱

همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشاهده می‌شود، مطابق با [۳۷]، به‌منظور اجتناب از ذکر نام کامل واحدهای موجود بر روی شین‌های سامانه قدرت مورد مطالعه، برای هر یک از آن‌ها یک کد اختصاری تعریف شده است. این کدها برای انواع واحدهای مشخص‌شده در جدول فوق در نه دسته مشخص‌شده، به ترتیب از بالا (یعنی واحدهای ۱ تا ۵) تا پایین (یعنی واحدهای ۳۱ و ۳۲)، عبارت‌اند از:U12، U20، U76، U50، U100، U155، U197، U350، U400.

۴-۲. سناریو دوم: برنامه‌ریزی مشارکت با در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار (کشش پویا)

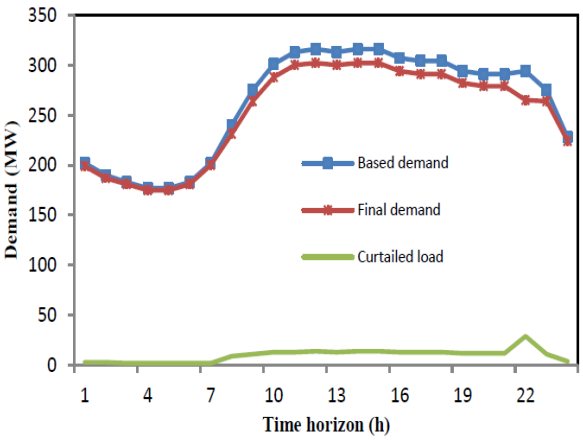
در این بخش از مقاله حاضر، به ارزیابی اثر کشش تقاضا در قالب برنامه EDRP بر بهره‌برداری از واحدها در شرایط عادی پرداخته می‌شود. در اینجا، مطابق با گزارش قبلی [۳۲]، ضرایب کشش تقاضا که در واقع j_{lin} و h_{lin} هستند، به‌صورت اصلاح‌شده، به ترتیب برابر با ۲۰۹/۳۸ و ۱/۵- در نظر گرفته می‌شوند. باید توجه داشت که این ضرایب برای سامانه‌های مختلف متفاوت بوده و بر اساس عواملی چون نوع بار (یعنی اینکه سهم بیشتر بار صنعتی، خانگی، کشاورزی، یا تجاری باشد)، فرهنگ و وضعیت معیشت جامعه، رفتار بازار، و غیره می‌توانند تغییر یابند. ازآنجاکه این پارامترها می‌توانند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج خروجی داشته باشند، در مقاله حاضر، بعد از بررسی مقادیر مختلفی، بیشتر و کمتر از مقادیر به‌کار برده شده در گزارش قبلی [۳۲]، مقادیر فوق‌الذکر برای ضرایب j_{lin} و h_{lin}در نظر گرفته شده است.

از میان سایر شین‌های موجود در شبکه، تنها شین‌های ۱۵ و ۱۸ در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار مشارکت داده می‌شوند. این انتخاب بر اساس مقادیر مندرج در جدول (۶)، که در واقع پیک بار ساعتی در حضور پیک بار روزانه شین‌ها را نشان می‌دهد و انتخاب شین‌های که بیش‌ترین سهم بار را پوشش می‌دهند انجام شده است. از طرفی، اجرای برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر روی تمامی شین‌های شبکه ممکن است در عمل به خاطر عواملی چون نوع بار یا هزینه‌های هنگفت مربوط به سرمایه‌گذاری بر روی زیرساخت‌های اندازه‌گیری پیشرفته (Advanced Metering Infrastructures) امکان‌پذیر یا حتی مقرون‌به‌صرفه نباشد. بااین‌وجود، به‌راحتی می‌توان دید که اجرا برنامه‌های پاسخ‌گویی حتی تنها در بعضی از شین‌های سیستم، می‌تواند کاهش قابل‌توجهی در هزینه‌های روزانه سیستم در راستای تأمین بار به دنبال داشته باشد. طی سناریو شبیه‌سازی‌شده، کل هزینه‌های تولید و تشویق‌های پرداخت‌شده در قالب برنامه EDRP به ترتیب برابر با ۸۶۶۰۴۵ و ۶۵۶۴ دلار است. مجموع این هزینه‌ها در مقایسه با کل هزینه‌های سیستم در سناریو اول، مقدار ٪۵/۵۴ کاهش را نشان می‌دهد که ناشی از مشارکت سمت تقاضا طی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار است.

شکل (۲) میزان کاهش تقاضای شین ۱۵ در ازای دریافت تشویق را طی دوره برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که چنین کاهشی در بار باس ۱۸ نیز از نتایج به‌دست‌آمده قابل‌مشاهده است. با توجه به شکل (۲) به‌وضوح می‌توان گفت که تقاضا به آرامی از ساعات کم‌باری در صبح شروع به کاهش کرده و تا زمان‌های میان باری و پرباری، به ترتیب در ظهر و بعدازظهر ادامه و افزایش می‌یابد. این رفتار تقاضا کاملاً منطقی به نظر می‌رسد؛ مادامی‌که هیچ کاهشی در تقاضا طی ساعات کم‌باری مشاهده نمی‌شود؛ از طرفی، بیش‌ترین مشارکت و لذا کاهش تقاضا، با بیش از ۱۴ مگاوات کاهش تقاضا، در طول ساعت پرباری شبکه یعنی ساعت ۱۱، رخ داده است.

جدول ۶. پیک بار ساعتی شین‌های سامانه آزمون در برابر پیک بار روزانه

شماره شین	بار (Mw)	درصد از بار پیک	شماره شین	بار (Mw)	درصد از بار پیک
۱	۱۰۸	٪۳/۸	۱۰	۱۹۵	٪۶/۸
۲	۹۷	٪۳/۴	۱۳	۲۶۵	٪۹/۳
۳	۱۸۰	٪۶/۳	۱۴	۱۹۴	٪۶/۸
۴	۷۴	٪۲/۶	۱۵	۳۱۷	٪۱۱/۱
۵	۷۱	٪۲/۵	۱۶	۱۰۰	٪۳/۵
۶	۱۳۶	٪۴/۸	۱۸	۳۳۳	٪۱۱/۷
۷	۱۲۵	٪۴/۴	۱۹	۱۸۱	٪۶/۴
۸	۱۷۱	٪۶	۲۰	۱۲۸	٪۴/۵
۹	۱۷۵	٪۶/۱			



شکل ۲. میزان کاهش تقاضای شین ۱۵ در ازای دریافت تشویق طی دوره برنامه‌ریزی

۴-۳. سناریو سوم: برنامه‌ریزی مشارکت با در نظر گرفتن برنامه EDRP و قابلیت اطمینان

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، از جمله اهداف مطالعه حاضر، ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر قابلیت اطمینان سیستم قدرت با تمرکز بر بخش تولید است. بدین منظور، در این سناریو از برنامه‌ریزی مشارکت واحدها، اثر خروج واحدها (به‌صورت تکی - Single Contingensy) در حضور محدودیت مربوط به شاخص قابلیت اطمینان در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، به‌عنوان اولین قدم، مسئله برنامه‌ریزی امنیت-مقید واحدها بدون در نظر گرفتن برنامه EDRP حل می‌شود. بدین منظور، مقادیر $ELNS^{MAX}$ و $VOLL$ به ترتیب برابر با ۳ مگاوات‌ساعت و ۱۵۰۰ دلار بر مگاوات‌ساعت در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این فرض می‌شود که واحدهای مناسب برای بار پایه (Must-run units) که تقریباً همیشه در مدار هستند (به دلیلی مانند تعمیرات دوره‌ای منظم) دچار خروج نمی‌شوند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریو سوم در اولین گام حاکی از آن است که در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان باعث افزایش هزینه‌های سیستم می‌گردد؛ به‌طوری‌که طی سناریو مزبور، راهبرد بهینه زمان‌بندی و تولید واحدها به‌منظور تأمین تقاضای پیش‌بینی‌شده، دارای هزینه‌ای معادل با ۸۸۸۴۲۹ دلار بوده که در مقایسه با سناریو اول، ۷/۴٪ افزایش داشته است که در واقع همان هزینه قابلیت اطمینان منعکس‌شده در هزینه بهره‌برداری واحدها است.

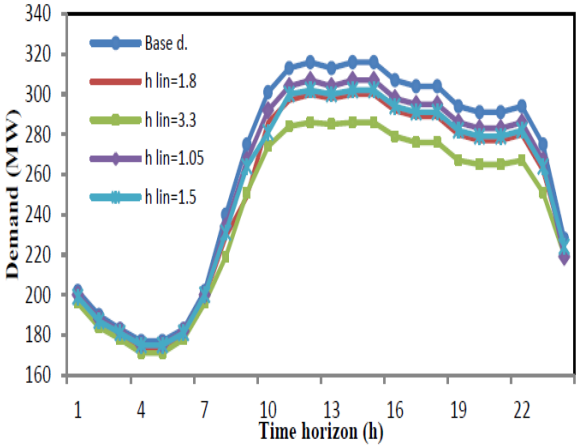
به‌منظور اجرای برنامه EDRP، مشابه سناریو قبل، تنها شین‌های ۱۵ و ۱۸ که در واقع به‌طور تقریبی ۱۰٪ از شین‌هایی از سیستم که تحت بارگذاری سنگین هستند را شامل می‌شوند، با قابلیت پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته می‌شوند. نتایج حاصل از تصفیه قیمت در بازار، به‌دست‌آمده از سناریو اول، در جدول (۷) ارائه شده است. بر این اساس، کل هزینه بهره‌برداری از سیستم و هزینه تشویق‌های پرداختی، به ترتیب برابر با ۸۸۰۴۸۴ و ۶۵۴۰ دلار در سناریو سوم به‌دست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اجرای برنامه پاسخ‌گویی بار باعث کاهش هزینه‌های بهره‌برداری به مقدار ۷۹۴۵ دلار و کاهش کل هزینه‌ها به میزان ۱۴۰۵ دلار شده است که حاکی از مثمر ثمر بودن برنامه‌های پاسخ‌گویی بار در بهبود قابلیت اطمینان است؛ مادامی‌که با صرف هزینه‌های کاسته شده، می‌توان به سطح بالاتری از قابلیت اطمینان (سطح پایین‌تر $ELNS^{MAX}$) دست یافت.

جدول ۷. قیمت‌های به‌دست‌آمده از تصفیه بازار (طی اجرای سناریو اول)

قیمت ($/Mwh)	شماره شین	قیمت ($/Mwh)	شماره شین
۳۶/۳۲	۱۳	۱۴/۳۴	۱
۳۸/۴۲	۱۲ ،۱۴ ،۱۵	۱۳/۵۰	۲-۷ ،۲۴
۳۶/۳۲	۱۶-۱۸	۳۵/۲۰	۸
۳۶/۳۰	۱۹ ،۲۲	۳۵/۳۴	۹ ،۲۳
۳۵/۸۶	۱۰ ،۲۰ ،۲۱	۳۷/۳۰	۱۱

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ضرایب j_{lin} و h_{lin} در تابع تقاضا در ارزیابی‌ها نقش بسیار حساسی را ایفا کرده و به پارامترهای بسیاری مرتبط می‌شوند. در تابع تقاضا، این دو پارامتر بر اساس اطلاعات تاریخی در نظر گرفته می‌شوند. ازاین‌رو، در این مقاله، یک مطالعه حساسیت در مورد اثر پارامتر h_{lin} که در واقع اصلی‌ترین پارامتر در انواع توابع تقاضا اعم از لگاریتمی، درجه ۲ و خطی است نیز انجام شده است.

اثر این پارامتر بر نتایج خروجی حاصل از شبیه‌سازی سناریو سوم در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به ازای مقادیر مختلف h_{lin}، میزان کاهش تقاضا در ساعات اولیه صبح قابل‌اغماض است. در نظر گرفتن قیمت انرژی در فرمول‌بندی کشش تقاضا را می‌توان توجیهی برای این امر دانست. علاوه بر این می‌توان دید که با دو برابر شدن مقدار h_{lin}، میزان کاهش در تقاضا طی ساعات اوج بار نیز تقریباً دو برابر شده است که نشان‌دهنده اهمیت مقدار این پارامتر در شبیه‌سازی‌ها است. از این حیث می‌توان گفت که انتخاب این پارامتر برای دخیل کردن حساسیت شرایط جنگی در برنامه‌های پاسخ‌گویی بار، انتخاب مناسبی بوده است.



شکل ۳. اثر پارامتر h_{lin} بر نتایج خروجی حاصل از شبیه‌سازی سناریو سوم

۴-۴. سناریو چهارم: برنامه‌ریزی مشارکت با در نظر گرفتن برنامه SEDRP و قابلیت اطمینان

در این بخش به ارزیابی اثربخشی پاسخ‌گویی بار بر قابلیت اطمینان سیستم در شرایط جنگی پرداخته می‌شود. بدین منظور، همانند سناریو قبل، ابتدا برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها بدون در نظر گرفتن پاسخ‌گویی بار در شرایط جنگی صورت می‌پذیرد؛ با این تفاوت که در اینجا، مقدار مجاز در نظر گرفته‌شده برای سرریزی بار به بهانه حفظ قابلیت اطمینان و تداوم بیشتر برق‌رسانی در شرایط موردنظر، کمتر از حالت مشابه در سناریو قبل در نظر گرفته می‌شود. در گام بعد، به ازای همان سطح مطلوب از قابلیت اطمینان، برنامه‌ریزی مشارکت با در نظر داشتن برنامه SEDRP انجام می‌پذیرد. مادامی‌که به خاطر ایجاد امکان مقایسه این سناریو با سناریوهای قبل، تنها بارهای شین‌های ۱۵ و ۱۸ انعطاف‌پذیر فرض می‌گردند. در انتها نیز، برای سنجش واقعی ارزش پاسخ‌گویی بار در تداوم برق‌رسانی، شبیه‌سازی‌ها با فرض اینکه کل سیستم به نحوی قابلیت پاسخ‌گویی را داشته باشند انجام می‌گردد. قبل از انجام شبیه‌سازی‌های در نظر گرفته‌شده در قالب سناریو حاضر، لازم است ابتدا وضعیت نیروگاه‌های موجود در شبکه مورد مطالعه از حیث احتمال دسترس‌ناپذیری و مدل در نظر گرفته‌شده در این رابطه، مشخص گردد. در ادامه، قبل از ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالات مختلف سناریو چهارم، به این موضوع پرداخته می‌شود.

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، احتمال دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی، می‌تواند تحت تأثیر سه دسته از عوامل مشتمل بر عوامل فنی، جغرافیایی و عوامل سیاسی قرار گیرد. با توجه به مدل در نظر گرفته‌شده برای محاسبه احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در این مقاله، تعیین و استخراج ضرایب وزنی مربوط به احتمال حمله دشمن به نیروگاه‌ها متأثر از عوامل مختلف فنی، جغرافیایی و سیاسی، در برنامه‌ریزی امن در مدار قرار گرفتن واحدها، می‌تواند در زمره مهم‌ترین وظایف بهره‌بردار سیستم یا یک متخصص پدافند غیرعامل در سامانه‌های قدرت باشد. تخصیص وزن به هریک از سری عوامل در نظر گرفته‌شده در دسته‌های مختلف می‌تواند با بررسی آماری، میدانی، دریافت اطلاعات از سازمان‌های مربوطه و بررسی سابقه هر واحد انجام گیرد. در اینجا، به دلیل مشخص نبودن عواملی چون محل پایتخت، وضعیت جغرافیایی هر واحد و غیره، در سامانه مورد مطالعه، تخصیص اوزان به واحدهای متصل به شین‌های در نظر گرفته‌شده، بنا به یکسری مفروضات، مطابق جدول (۹) صورت می‌پذیرد.

شایان ذکر است که در سامانه مورد مطالعه، به دلیل زیاد بودن تعداد نیروگاه‌ها و متعدد بودن عوامل تأثیرگذار بر احتمال خروج واحدها در شرایط جنگی، ذکر مشخصات در نظر گرفته‌شده برای هر نیروگاه از حیث عوامل فنی، جغرافیایی و سیاسی، نیازمند ارائه تعداد جداول قابل‌توجهی است. ازاین‌رو، به‌عنوان نمونه، مشخصات در نظر گرفته‌شده برای نیروگاه متصل به شین ۱۸ و به دنبال آن اوزان در نظر گرفته‌شده برای هر عامل از سه دسته عوامل در نظر گرفته‌شده در مورد این نیروگاه، طی جدول (۸) ارائه شده است. در مورد سایر دیگر نیروگاه‌ها، به ذکر اوزان در نظر گرفته‌شده مطابق با جدول (۹) اکتفا می‌شود.

به‌منظور انجام برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها در شرایط جنگی، بدون در نظر داشتن پاسخ‌گویی بار، مقادیر $ELNS^{MAX}$ و $VOLL$ به ترتیب برابر با ۲ مگاوات‌ساعت و ۱۵۰۰ دلار بر مگاوات‌ساعت در نظر گرفته می‌شوند. توجه داشته باشید که در اینجا، برخلاف گام اول در سناریو قبل، احتمال خروج برای تمامی واحدها در نظر گرفته می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برنامه‌ریزی امنیت-مقید واحدها در شرایط جنگی افزایش قابل‌توجه هزینه‌ها را نشان می‌دهد. کل هزینه‌های سیستم در این حالت از برنامه‌ریزی برابر ۹۱۲۵۴۱ دلار بوده که به در مقایسه با حالت قبل (گام اول در سناریو سوم) و سناریو اول، به ترتیب ۲/۷۱٪ و ۱۰/۴٪ افزایش داشته است.

علت افزایش هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم را نه‌تنها می‌توان در سخت‌تر شدن محدودیت قابلیت اطمینان در نظر گرفته‌شده، بلکه می‌توان از افزایش احتمال خروج واحدها متأثر از عوامل مختلف در نظر گرفته‌شده در شرایط جنگی، دانست. در گام دوم از سناریو چهارم، اثر برنامه پاسخ‌گویی بار در قالب مدل ارائه‌شده، یعنی برنامه SEDRP، بر تداوم برق‌رسانی در برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ مادامی‌که تنها بار شین‌های ۱۵ و ۱۸ از شبکه موردنظر انعطاف‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند.

بر این اساس، بـه ازای همـان مقـادیر شـبیه‌سـازی قبـل در سناریو چهارم برای پارامترهـای $ELNS^{MAX}$ و $VOLL$ و بـا در نظر داشتن قیمت‌های انرژی به‌کار گرفته‌شده در سناریو سوم، کل هزینه‌های سیستم ۸۵۹۷۲۷ دلار و کـل هزینـه‌هـای مربـوط بـه تشـویق‌هـای پرداختـی ۴۱۰۵ دلار اسـت کـه مجمـوع آن‌هـا در مقایسه با حالت مشابه در سـناریو قبـل، ۲۳۱۹۲ دلار، معـادل بـا ۲/۶۱٪ کاهش را نشان می‌دهد؛ این میزان کاهش در حالی اسـت که در سناریو قبل، میزان $ELNS^{MAX}$ برابر با ۳ مگاوات‌سـاعت، اما در سناریو حاضر، مقدار این پارامتر که در واقع سطح مطلـوب قابلیت اطمینان و لذا تداوم برق‌رسانی را نشان می‌دهد، برابر بـا ۲ مگاوات بر ساعت، آن‌هم در شرایط جنگـی کـه افـزایش احتمـال دسترس‌ناپذیری واحدها را بـه دنبـال دارد، در نظـر گرفتـه شـده است.

از حیث، اثربخشی پاسخ‌گویی بار بر بهبـود قابلیـت اطمینـان سیستم و لذا تداوم برق‌رسـانی در شـرایط بحرانـی محـرز اسـت؛ مادامی‌که دست‌یابی به سطح بـالاتری از قابلیـت اطمینـان را، بـه ازای هزینه‌های کمتر در شرایط بحران فراهم می‌سازد. شایان ذکر است که از دلیل اصلی بازدارندگی در طراحی سامانه‌های قدرت با سطح قابلیت اطمینان بسیار بالا، هزینه‌های بالای آن است.

جدول ۸. نمونه ویژگی‌های در نظر گرفته‌شده برای یکی از نیروگاه‌هـای سامانه مورد مطالعه برای تخمین احتمـال دسـترس‌ناپـذیری در شـرایط جنگی

شماره شین: ۱۸–شماره نیروگاه: G11– نوع واحد (های) متصل: $1\times U400$

عوامل فنی				
نوع نیروگاه	YG_i (TWh)	LT_i (Year)	عمر (سال)	CAP_i (GW)
هسته‌ای	۲-۲/۵	۴۵	۲۰	۰/۴

عوامل جغرافیایی				
نوع منطقه	ارتفاع از سطح دریا	وسعت ساختار	فاصله از مرز	فاصله از مراکز شهر	فاصله از مراکز نظامی
دشت مانند	۲ تا ۲/۵ km	۵۰ هکتار	۲۰۰ تا ۴۰۰km	۵۰ تا ۱۰۰km	بیشتر از ۳۰۰ km
استتار	استحکامات به‌کاررفته	فاصله از ذخایر سوخت	فاصله از مراکز صنعتی و مناطق ویژه تجاری		فاصله از دریا
ضعیف	خوب	۴۰۰Km	۴۵ Km		۳۰۰Km

عوامل سیاسی	
تعداد دفعات حمله به نیروگاه	فاصله تا پایتخت
۵ بار	۱۶۰Km

جدول ۹. اوزان تخصیص‌یافته به نیروگـاه‌هـای مختلـف موجـود در سـامانه آزمون به‌منظور تخمین FOR^{CC}

	G8	G6	G5	G4	G3	G2	G1
$PR_{1,i}^{Tech}$	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱
$PR_{2,i}^{Tech}$	۰/۳	۱	۰/۴۵	۰/۳	۰/۱۵	۰/۳	۰/۱۵
$PR_{3,i}^{Tech}$	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۸	۱
$PR_{4,i}^{Tech}$	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
$PR_{1,i}^{Geo}$	۰/۲	۰/۶	۱	۱	۱	۱	۱
$PR_{2,i}^{Geo}$	۰/۲	۰/۸	۱	۰/۸	۰/۸	۰/۶	۰/۶
$PR_{3,i}^{Geo}$	۰/۴	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۳۶	۰/۲	۰/۳۶	۰/۲
$PR_{4,i}^{Geo}$	۰/۵	۱	۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۵
$PR_{5,i}^{Geo}$	۰/۴	۰/۴	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۱	۱
$PR_{6,i}^{Geo}$	۰/۷	۰/۴	۰/۲۵	۰/۴	۰/۴	۰/۵۵	۰/۵۵
$PR_{7,i}^{Geo}$	۰/۲۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵
$PR_{8,i}^{Geo}$	۱	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵
$PR_{9,i}^{Geo}$	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۸	۰/۸
$PR_{10,i}^{Geo}$	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
$PR_{11,i}^{Geo}$	۰/۴۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۶	۰/۶
$PR_{1,i}^{Pol}$	۰/۸	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
$PR_{2,i}^{Pol}$	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲

	G15	G14	G13	G12	G11	G10	G9
$PR_{1,i}^{Tech}$	۰/۳۵	۰/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۱	۰/۱
$PR_{2,i}^{Tech}$	۰/۸	۰/۶	۰/۴۵	۱	۰/۸	۰/۳	۰/۳
$PR_{3,i}^{Tech}$	۰/۸	۰/۸	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۸	۰/۸
$PR_{4,i}^{Tech}$	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۰/۵	۰/۵
$PR_{1,i}^{Geo}$	۱	۱	۰/۶	۰/۶	۱	۰/۲	۰/۲
$PR_{2,i}^{Geo}$	۰/۶	۰/۶	۰/۴	۰/۴	۰/۲	۰/۶	۰/۲
$PR_{3,i}^{Geo}$	۰/۳	۰/۲۵	۰/۴۵	۰/۱	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۵
$PR_{4,i}^{Geo}$	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۵
$PR_{5,i}^{Geo}$	۱	۱	۰/۲	۱	۰/۴	۰/۸	۰/۴
$PR_{6,i}^{Geo}$	۰/۷	۰/۷	۰/۱	۰/۴	۱	۰/۸۵	۰/۷
$PR_{7,i}^{Geo}$	۰/۵	۰/۵	۱	۰/۲۵	۱	۰/۵	۰/۵
$PR_{8,i}^{Geo}$	۰/۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۵
$PR_{9,i}^{Geo}$	۰/۶	۰/۶	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۱۵
$PR_{10,i}^{Geo}$	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
$PR_{11,i}^{Geo}$	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۸	۰/۱۵	۰/۳	۰/۱۵	۰/۴۵
$PR_{1,i}^{Pol}$	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۸
$PR_{2,i}^{Pol}$	۰/۲	۰/۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲

نکته دیگری که از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالات مشابه در این سناریو با سناریو سوم قابل‌توجه است، تفاوت در هزینه‌های تشویق پرداختی در شرایط موردنظر است. به بیانی دیگر، علی‌رغم افزایش تداوم برق‌رسانی در کنار افزایش احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی در برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها تحت اجرای برنامه SEDRP در مقایسه با برنامه‌ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها تحت اجرای برنامه EDRP، کاهش در هزینه‌های سیستم و تشویق‌های پرداختی به سمت تقاضا را می‌توان نتیجه مدل نمودن حس مسئولیت‌پذیری مردم در کاهش تقاضا در شرایط جنگی در قالب منحنی تقاضا و ضریب کشش، دانست؛ مادامی‌که قیمت انرژی در شین‌های مختلف و نیز میزان تشویق‌ها طی دو سناریو ثابت بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

با ارائه مدلی جامع و جدید برای برنامه‌ریزی مشارکت امنیت-مقید واحدها در شرایط جنگی در بستر شبکه‌های هوشمند، در مقاله حاضر به ارزیابی اثربخشی برنامه‌های پاسخ‌گویی بار بر تداوم برق‌رسانی پرداخته شد. در این راستا، کشش قیمتی رفتار سمت تقاضا در قالب برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، نه به‌صورت استاتیک (ثابت)، بلکه به‌صورت پویا در نظر گرفته شد. علاوه بر ارتقاء مدل احتمالی ارائه‌شده در مطالعات پیشین به‌منظور تخمین احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها در شرایط جنگی، به‌منظور مدل نمودن واکنش سمت تقاضا در قالب برنامه پاسخ‌گویی بار در شرایط بحرانی نیز، مدل جدیدی از برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری، تحت عنوان برنامه پاسخ‌گویی بار اضطراری راهبردی ارائه گردید. در انتها، سناریوهای متعددی متناظر با شرایط بهره‌برداری عادی و بحرانی با حل مدل مزبور در قالب یک مسئله خطی آمیخته با اعداد صحیح توسط نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS شبیه‌سازی گردیدند که نتایج حاصله حاکی از اثر قابل‌توجه مشارکت سمت تقاضا در بهبود قابلیت اطمینان سیستم و لذا تداوم برق‌رسانی در شرایط بحرانی و نیز کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، علی‌رغم افزایش احتمال دسترس‌ناپذیری واحدها، است.

ضمایم و نشانه‌ها

میزان تشویق	$A(.)$
ضرایب تابع هزینه یک واحد	$a(.), b(.), c(.)$
شاخص شین	b
کل هزینه‌های تشویق	$Cost_{Inc}(.)$
هزینه سوخت یک واحد در یک ساعت	$Cost_{Gen}(.)$
میزان تقاضای اولیه در هر ساعت	$D_0(.)$
مقدار نهایی مجموع بار الاستیک و ثابت در هر ساعت	$D_{DR}(.)$
حداقل میزان کاهش بار	$D_{\min}$
شیب یک تکه در تابع خطی‌شده تقاضا	$dlp(.)$
پاسخ‌گویی بار در تکه n در هر ساعت	$dr(.)$
تغییرات بار بر ساعت	$\Delta D(.)$
تغییرات قیمت بر ساعت	$\Delta \Pr(.)$
کشش قیمتی تقاضا	$Elast(.)$
حداکثر مقدار مجاز سرریزی بار	$ELNS^{\max}$
توان عبوری از خط انتقال در هر ساعت	$F(.)$
محدودیت توان عبوری از خط انتقال	$F^{\max}(.)$
شاخص واحدهای متعارف	i
شاخص برون‌رفت	k
بارزدایی شین bدر طول دوره خطای kدر هر ساعت	$LS(.)$
حداکثر مقدار بارزدایی	$LS^{\max}(.)$
شماره خط انتقال متصل به شین	$b\ L_b$
حداقل زمان روشن و خاموش‌ماندن واحدها	MU, MD
حداقل زمان روشن و خاموش‌ماندن واحد	؟ MU_d, MD_d
تعداد شین‌ها	N_B
تعداد تکه‌های تابع هزینه سوخت خطی‌سازی شده	N_{seg}
تعداد واحدهای حرارتی متعارف	N_{Gen}
تعداد واحدهای متصل به شین	$b\ N_{Gen(b)}$
توان تولیدی هر واحد	$p(.)$
حداقل و حداکثر ظرفیت تولید هر واحد	$P^{\min}(.), P^{\max}(.)$
قیمت اولیه الکتریسیته بر ساعت	$\Pr_0(.)$
احتمال برون‌رفت هر واحد	$\pi(.)$
وضعیت باینری پاسخ‌گویی بار	$r(.)$
محدودیت شیب افزایش/کاهش هر واحد	$RU(.), RD(.)$
رزرو چرخان بر ساعت	$SR(.)$
شیب هر تکه از تابع هزینه خطی‌شده هر واحد	$slp(.)$
زوایای ولتاژ شین‌های انتقال و دریافت	$\delta_s(.), \delta_r(.)$
شاخص زمان (ساعت)	t
مقدار زمان روشن/خاموش (ساعت) یک واحد در ابتدای دوره زمان‌بندی	$UT(.), TD(.)$
شاخص باینری مربوط به وضعیت در مداربودن یک واحد	$u(.)$
ارزش بار ازدست‌رفته (\$/MWh)	$VOLL(.)$

راکتانس خط انتقال	$X(.)$
شاخص راه‌اندازی	$y(.)$
شاخص راه‌اندازی	$DR\ y_d(.)$
شاخص خروج از مدار	$z(.)$
شاخص خروج از مدار	$DR\ z_d(.)$

۶. مرجع‌ها

[1] "National Memorial Institute for the Prevention of Terrorism in the US"; http://MIPT.org, 2001.

[2] Aalami, H. A.; Ramezani, H. "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions"; Passive Defence Sci. Technol. 2013, 3, 231-241 (In Persian).

[3] Namazi, H.; Fakoori, M. "Process for Detecting Passive Defence Acpects"; Department of Sustaining Human Resources, Central Education and Military Service Office, Iran, 2008.

[4] Firouzi, H. "Introduction of Strategic Aspects of Electricity Network's Reliable Management from the Perspective of Crisis Management"; Passive Defence Quarterly 2013, 14, 11-18 (In Persian).

[5] Aghaei, J.; Nikoobakht, A. "Exploring the Reliability Effects on the Short Term AC Security-Constrained Unit Commitment: A Stochastic Evaluation"; Energy 2016**,** 114, 1016-1032.

[6] Govardhan, M.; Roy, R.; "Economic Analysis of Unit Commitment with Distributed Energy Resources"; Int. J. Elec. Power Energ Syst. 2015, 71, 1-14.

[7] Wang, B.; Zhou, X.; Wang, S.; Watada, J. **"**Multi-Objective Unit Commitment with Wind Penetration and Emission Concerns Under Stochastic and Fuzzy Uncertainties"; Energy 2016, 111, 18-31.

[8] Bayindir, R.; Colak, I.; Fulli, G. K.; Demirtas, K. "Smart Grid Technologies and Applications"; Renew. Sust. Energ. Rev. 2016, 66, 499-516.

[9] Luis, M. "Collaborative Smart Grids – A Survey on Trends"; Renew. Sust. Energ. Rev. 2016, 65, 283-294, 2016.

[10] http://energy.gov/oe/services/technologydevelopment/smart-grid/ demand-response, 2009.

[11] Losi, A.; Mancarella, P.; Vicino, A. "Integration of Demand Response into the Electricity Chain Challenges"; Opportunities and Smart Grid Solutions, 2015.

[12] Hu, B.; Wu, L.; Guan, X.; Gao, F.; Zhai, Q. "Comparison of Variant Robust SCUC Models for Operational Security and Economics of Power Systems under Uncertainty"; Elec. Power Syst. Res. 2016, 133, 121-131.

[13] Durga Hari Kiran, B.; Sailaja Kumari, M. "Demand Response and Pumped Hydro Storage Scheduling for Balancing Wind Power Uncertainties: A Probabilistic Unit Commitment Approach"; Int. J. Electrical Power Energ. Syst. 2016, 81, 114-122.

[14] Partovi, F.; Nikzad, M.; Mozafari, B.; Ranjbar, A. "Stochastic Security Approach Toenergy and Spinning Reserve Scheduling Considering Demand Response Program"; Energy 2011, 295-313.

[15] Sahebi, M. M.; Hosseini, S. H. "Stochastic Security Constrained Unit Commitment Incorporating Demand Side Reserve"; Int. J. Elec. Power Energ. Syst. 2014, 56, 175-184.

[16] Magnago, F. H.; Alemany, J.; Lin, J. "Impact of Demand Response Resources on Unit Commitment and Dispatch in a Day-Ahead Electricity Market"; Int. J. Elec. Power Energ. Syst. 2015, 68, 142-149.

[17] Liu, G.; Tomsovic, K. "Robust Unit Commitment Considering Uncertain Demand Response"; Elec. Power Syst. Res. 2015, 119, 126-137.

[18] Bai, Y.; Zhong, H.; Xia, Q.; Kang, C.; Xie, L. "A Decomposition Method for Network-Constrained Unit Commitment with AC Power Flow Constraints"; Energy 2015, 88, 595-603.

[19] Nasrolahpour, E.; Ghasemi, H. "A Stochastic Security Constrained Unit Commitment Model for Reconfigurable Networks With High Wind Power Penetration"; Elec. Power Syst. Res. 2015, 121, 341-350.

[20] Ghaffarpour, R.; Hashemi, Y.; Ehsan, M. "Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility"; Passive Defence Sci. Technol. 2015, 4, 231-246.

[21] Guan, X.; Guo, S.; Zhai, Q. "The Conditions For Obtaining Feasible Solutions to Security-Constrained Unit Commitment Problems"; IEEE Trans. Power Syst. 2005, 20, 1746-1756.

[22] Fu, Y.; Shahidehpour, M.; Li, Z. "Security-Constrained Optimal Coordination of Generation and Transmission Maintenance Outage Scheduling"; IEEE Trans. Power Syst. 2007, 22, 1302-1313.

[23] Fu, Y.; Shahidehpour, M.; Li, Z. "Security-Constrained Unit Commitment with AC Constraints"; IEEE Trans. Power Syst. 2005, 20, 1538-1550.

[24] Jeong, Y. W.; Park, J. B.; Jang, S. H. "A New Quantum-Inspired Binary PSO: Application to Unit Commitment Problems for Power Systems"; IEEE Trans. Power Syst. 2010, 25, 1486-1495.

[25] Arroyo, J. M.; Conejo, A. J. "Parallel Repair Genetic Algorithm to Solve the Unit CommitmentProblem"; IEEE Trans. Power Syst. 2002, 17, 1216-1224.

[26] Dudek, G. "Adaptive simulated annealing schedule to the unit commitment problem"; Elec. Power Syst. Res. 2010, 80, 465-472.

[27] Eslamian, M.; Hosseinian, S. H.; Vahidi, B. "Bacterial Foraging-Based Solution to the Unit Commitment Problem"; IEEE Trans. Power Syst. 2009, 24, 1478-1488.

[28] Mohammadi, F.; Abdi, H.; Dehnavi, E. "Solving Dynamic Economic Emission Dispatch Problem with Optmal Emergency Demand Response Program Considering Spinning Reserve and Valve Point-effect Constraintsm"; Tabriz J. Elec. Eng. 2016, 46, 343-356.

[29] Abdollahi, A.; Moghaddam, M. P.; Rashidinejad, M. "Investigation of Economic and Environmental-Driven Demand Response Measures Incorporating UC"; IEEE Trans. Smart Grid 2011, 3, 12-25.

[30] Aalami, H.; Moghaddam, M. P.; Yousefi, G. "Demand Response Modeling Considering Interruptible/Curtailable Loads and Capacity Market Programs"; Appl. Energy 2010, 87, 243-250.

[31] Aalami, H.; Moghaddam, M. P.; Yousefi, G. "Modeling and Prioritizing Demand Response Programs in Power Markets"; Elec. Power Syst. Res. 2010, 80, 426-435.

[32] Yousefi, S.; Moghaddam, M. P.; Majd, V. J. "Optimal Real Time Pricing in an Agent-Based Retail Market Using a Comprehensive Demand Response Model"; Energy 2011, 36, 5716-5727.

[33] Bisanovic, S.; Hajro, M.; Dlakic, M. "Hydrothermal Self-Scheduling Problem in a Day-Ahead Electricity Market"; Elec. Power Syst. Res. 2008, 78, 1579-1596.

[34] Aghaei, J.; Alizadeh, M. I. "Critical Peak Pricing With Load Control Demand Response Program in Unit Commitment Problem"; IET Generation, Transmission & Distribution 2013, 7, 681-690.

[35] Carrion, M.; Arroyo, J. M. "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem"; IEEE Trans. Power Syst. 2006, 21, 1371-1378.

[36] Careri, F.; Genesi, C.; Marannino, P.; Montagna, M.; Rossi, S.; Sivierom, I. "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 2214-2223.

[37] Wong, P.; Albrecht, P.; Allan, R.; Billinton, R.; Chen, Q.; Fong, C. "The IEEE Reliability Test System-1996. A Report Prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee"; IEEE Trans. Power Syst. 1999, 14, 1010-1020.