

اعمال رویکرد دفاعی در برنامه ریزی مشارکت نیروگاهها و ارائه مدل احتمالی نوین دسترس ناپذیری آنها

رضا غفارپور^۱، یاشار هاشمی^۲، مهدی احسان^{۳*}

۱- مربی و عضو هیات علمی دانشگاه امام حسین (ع)، ۲- دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت، دانشکده فنی- مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت: ۹۳/۱۰/۱۵، پذیرش: ۹۴/۰۱/۰۳)

چکیده

در این مقاله برنامه ریزی مقاوم مشارکت نیروگاهها با رویکرد دفاعی و ارائه مدل احتمالی دسترس ناپذیری واحدهای تولیدی مورد بررسی قرار می گیرد. از منظر استراتژیکی و نظامی بدیهی است که بهره برداری مطمئن از انرژی الکتریکی در گرو مدون سازی تمهیدات و به کارگیری برنامه ریزی های اثربخش در تولید برق است. با توجه به اینکه برای یک شبکه نمونه برخی از نیروگاهها به دلیل متغیر بودن احتمال حمله به آنها، احتمال عدم دسترسی متفاوتی نسبت به سایر نیروگاهها دارند. بنابراین برای یافتن نیروگاههای حساس از روش مؤثر و انعطاف پذیر شناسایی و تخصیص وزن استفاده شده است. در طرح ارائه شده پیشامدهای تصادفی شامل برون رفت ناگهانی واحدها در اثر حملات نظامی در قالب سناریوهایی با در نظر گرفتن احتمال رخداد آنها، لحاظ می شوند. در مقاله حاضر با ارائه یک مدل جامع مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاهها در وضعیت های بحرانی استخراج شده است. روش ارائه شده بر روی سامانه ۳۰ بوسه استاندارد IEEE اجرا شده است. نتایج نشان می دهد که برای رسیدن به برنامه ریزی مطمئن و امن در شرایط جنگی، رعایت سطح مناسب تولید از طرف نیروگاهها برای حفظ تداوم نیروسانی امری اجتناب ناپذیر است.

کلید واژه ها: نرخ خروج اجباری نیروگاهها، برنامه ریزی مشارکت نیروگاهها، پدافند غیرعامل.

Involving Defensive Approach in Unit Commitment Scheduling and Presenting Probability Model of Plants Inaccessibility

R. Gaffarpour, Y. Hashemi, M. Ehsan*

Imam Hossein University

(Received: 05/01/2015; Accepted: 23/03/2015)

Abstract

In this paper, robust unit commitment with defensive viewpoint and probability model of plants inaccessibility have been surveyed. From strategic and military viewpoint, due to the possibility of a military attack, the electrical energy operation depends on arrangements codification and utilization of effective planning in the production part. In a sample power network, because of the variable possibility of attack, some plants have different probability of inaccessibility. Thus, technique of identification and weight assignment has been employed to find sensitive power plants. In the proposed scheme, random contingencies, including sudden unit outage due to military attacks have been considered with scenarios taking into account the probability of their occurrence. In this paper, probability values of plants inaccessibility have been extracted by presenting a comprehensive model. The proposed method has been implemented on IEEE standard 30 bus system. Comparative analysis results indicate that to reach a secure plan, preserving an optimal production level from power plants to maintain feeding continuity is inevitable.

Keywords: Forced Outage Rate, Unit Commitment, Passive Defence.

*Corresponding Author E-mail: mehdi.ehsan@sharif.edu

۱. مقدمه

روز مواجه هستند. از طرف دیگر امروزه با افزایش روزافزون تقاضای انرژی الکتریکی مصرف این انرژی طی یک دوره زمانی ثابت، متغیر است. با توجه به امکان بروز پیشامدهای ناخواسته و متغیر بودن بار و عدم امکان ذخیره انرژی الکتریکی، ارائه روش دقیق در مدار قرار دادن تعداد کافی از واحدهای تولیدی به منظور تأمین بار با امنیت بالا و کمترین هزینه تولید توان و انرژی الکتریکی امری ضروری محسوب می‌شود. توجه به مسائل برنامه‌ریزی ترتیبی امنیتی و اقتصادی ورود و خروج واحدهای تولیدی به بهره‌برداری صحیح و امن شبکه منجر می‌شود که این کار مانع تأمین نشدن تقاضای بار در مواقع اضطراری می‌شود و صرفه‌جویی اقتصادی را نیز به همراه خواهد داشت [۴]. برای دستیابی به روش حلی که علاوه بر رسیدن به پاسخ بهینه و یا نزدیک به بهینه، کارایی محاسباتی لازم را داشته باشد، تلاش‌های زیادی در مقالات پیشین صورت گرفته است. برخی از این روش‌ها عبارت‌اند از: روش لیست تقدم [۵]، برنامه‌ریزی مختلط دودویی [۶]، برنامه‌ریزی پویا [۷]، روش شاخه و کران [۸] و روش رهاسازی لاگرانژ [۹]. از سوی دیگر الگوریتم‌های تکاملی نیز برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها^۱ به کار رفته است [۱۰] و [۱۱]. مرجع [۱۲] یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای مقاوم برای حل مسئله امنیت-مقید^۲ مشارکت واحدهای نیروگاهی با یک تابع هدف از نوع هزینه ارائه کرده است. یک روش برای شرکت دادن دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در مسئله، در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها است که احتمال دسترس ناپذیر بودن نیروگاه‌ها را به صورت یک تابع متشکل از نرخ خرابی نیروگاه‌ها در شرایط عادی فرض کرده است [۱۳]. برای مدیریت تغییرات بارها در مسئله مشارکت نیروگاه‌ها، مرجع [۱۴] روش بهینه‌سازی مقاوم را ارائه کرده است. مرجع [۱۵] شکل‌سازی مقاوم بدون وابستگی به توزیع احتمالی صحیح در جهت یافتن حل مسئله مشارکت واحدها تحت عدم قطعیت‌های خروج نیروگاه‌ها ارائه کرده است. همچنین مسئله مشارکت واحدها در اشل‌های بزرگ در مرجع [۱۶] بحث می‌شود که می‌تواند برای برنامه‌نویسان و اپراتورهای حرفه‌ای سامانه قدرت مفید باشد.

مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای تولیدی یک مسئله ترکیبی است که هدف آن تهیه یک جدول برای برنامه‌ریزی تولید واحدها به طور امنیتی در شرایط جنگی و در کنار آن اقتصادی است. به طوری که مجموعه‌ای از محدودیت‌های مربوط به سامانه قدرت و واحدهای تولیدی را تأمین کند. یافتن یک جواب مناسب برای مسئله در مدار قرار گرفتن واحدهای تولیدی در یک زمان معقول که بتواند امنیت و صرفه‌جویی مناسبی را ایجاد کند، یک چالش مهم در بهره‌برداری از سامانه قدرت از دیدگاه پدافند غیرعامل است.

برای مدل‌سازی خروج نیروگاه‌ها در مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها دو حالت را می‌توان در نظر گرفت: ۱- مدل قطعی و ۲- مدل احتمالی. در دیدگاه قطعی نیروگاه‌ها به صورت قطعی از شبکه خارج

صنعت نیروگاه، صنعتی تخصصی، هزینه‌بر، زمان‌بر و حیاتی برای یک کشور است. جنگ‌ها و دفاع‌های امروزه، جنگ‌های هوشمند و پیچیده‌ای هستند. تمام تلاش مهاجم در این است که با کمترین هزینه نظامی و جانی بیشترین ضربه را به طرف مقابل وارد کند. یکی از این روش‌ها حمله به مراکز نیروگاهی و تأسیسات تولید انرژی است [۱]. این مراکز به واسطه بزرگی و متمرکز بودن تجهیزات نصب شده، ضریب آسیب‌پذیری بالایی را دارند که برای مقابله با این خطر باید به صورت هوشمندانه و با تدبیر عمل شود. به لحاظ اهمیت منابع انرژی در شرایط جنگی، مختل کردن سامانه تولید انرژی الکتریکی و دسترس ناپذیر کردن نیروگاه‌ها و به طور کلی ایجاد بحران انرژی الکتریکی از اهداف اولیه مهاجمان است [۲]. اختلال در یک سامانه زیربنایی چون نیروگاه‌ها می‌تواند سبب آشفتگی روانی ملت، فلج شدن سامانه‌های تدافعی و ملی شود [۳]. در جریان جنگ تحمیلی از آنجایی که نیروگاه‌ها اهداف راهبردی تلقی می‌شدند، حمله به آن‌ها تنها به استان‌های مرزی محدود نشده و طیف وسیعی از نیروگاه‌ها را شامل می‌شد. جدول (۱) نمونه‌ای از سابقه تاریخی حملات نظامی عراق را در جریان جنگ تحمیلی نشان می‌دهد. تجربیات حاصل از جنگ‌های اخیر و خسارت‌های وارده از طرف دشمن به تأسیسات نیروگاه‌ها در جهت مختل کردن نیروسانی به مراکز حساس کشور لزوم توجه به دفاع بهینه غیرعامل را بر همگان روشن ساخته است. پدافند غیرعامل در نیروگاه‌ها باید طوری عمل نماید که در جهت حفظ هدف اصلی یعنی تولید انرژی الکتریکی مطمئن و قابل اطمینان در شرایط و وضعیت‌های بحرانی اقدام نماید [۴].

جدول ۱. سابقه حملات نظامی عراق به برخی از نیروگاه‌های کشور

ردیف	نیروگاه	خسارت وارد شده
۱	نکا	نخستین حمله در سال ۱۹۸۶ و آخرین آن در سال ۱۹۸۸، انجام گرفت؛ و موجب شد که نیروگاه ۵۰ درصد از ظرفیت تولیدی خود را از دست بدهد.
۲	رامین	این نیروگاه ۸ بار مورد حمله قرار گرفت و خسارت‌های گسترده‌ای به همه واحدها و تأسیسات کمکی آن وارد شد.
۳	شهید عباس‌پور	این نیروگاه چهار بار مورد حمله واقع شد. اثر آسیب‌های ناشی از انفجار سطحی بر روی دیواره سد و تجهیزات سویچینگ مشهود بود.
۴	دز	این نیروگاه در سال‌های ۱۹۸۶ و ۱۹۸۷ مورد حمله واقع گردید و خسارت‌های وسیعی به سویچینگ ۲۳۰ کیلوولتی و تبدیل‌کننده‌ها وارد شد.
۵	زرگان	به این نیروگاه چند بار حمله شد؛ و آسیب‌های گسترده‌ای را بر واحدهای توربین‌گازی وارد کرد. انفجار و اثر گلوله بر تمام واحدها و مجموعه مخازن، مشهود بود. بقایای پروانه‌های مجاری دیگ بخار خسارت دیده، تبدیل‌کننده‌ها و سویچینگ انتقال که سوخته بودند، در محل ضایعات نگهداری می‌شدند.

بهترین روش اجرائی پدافند غیرعامل، مهندسی صحیح، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از مراکز نیروگاهی است. واحدهای تولیدی در مواقع جنگی با پیشامدها و رویدادهای ناخواسته در طی

¹ Unit Commitment

² Security-Constraint

است. مقدار احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی متأثر از این فاکتورها و زیرکلاس‌های مربوط به آن‌ها است. در این مقاله به تمام پیشامدهای معقول در سامانه مقادیر احتمالی مقتضی متناسب با مدل ارائه شده نسبت داده می‌شود. با محاسبه احتمال پیشامدها از روی احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها، شاخص قابلیت اطمینان طرح مورد نظر محاسبه می‌شود. در صورتی که این شاخص در محدوده قابل قبول باشد، برنامه تولید نهایی به دست می‌آید. در غیر این صورت انحراف از شاخص یاد شده به صورت یک ضریب جریمه در تابع هدف لحاظ می‌شود. مسئله مورد نظر یک مدل ریاضی ناپیوسته غیرخطی دارد که در این طرح برای حل آن از روش الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مدل ارائه شده برای تعیین مقدار احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی

در حالت عادی برای مدل‌سازی احتمال در دسترس نبودن نیروگاه‌ها داده‌های ورودی شامل میانگین زمان تعمیر و نرخ‌های خرابی آماری المان‌های واحدهای تولیدی است. این نرخ خرابی کاملاً تصادفی فرض شده و عمدتاً ناشی از حوادث طبیعی، مشکلات مداری و خطاهای انسانی است. حال اگر این نرخ معرف خرابی‌های ناشی از تهاجمات و اقدامات مخرب عمدی باشد، آنالیز قابلیت اطمینان در خروجی خود شاخص‌های قابلیت اطمینان سامانه در وضعیت تهاجم را ارائه خواهد داد. این شاخص‌ها می‌توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سامانه در مقابل حملات و اختلالات عمدی باشند.

پیش از ارائه یک مدل احتمالی مناسب ابتدا باید بررسی‌ها و مطالعاتی در مورد تحلیل ریسک یک نیروگاه در شرایط جنگی ارائه شود و استراتژی‌های پیشنهادی نیز با توجه به نتایج و اولویت این مطالعات برنامه‌ریزی شود. به طور کلی تحلیل ریسک یک مجموعه شامل شناسایی تهدیداتی که یک واحد تولیدی را متأثر می‌سازند، اولویت‌بندی تهدیدات، بررسی و تحلیل سناریوهای تهدید و در نهایت محاسبه میزان ریسک برای نیروگاه است. به طور کمی میزان ریسک یک نیروگاه در برابر تهدید از حاصل ضرب عوامل به وجود آورنده آن تهدید به دست می‌آید. به عبارت دیگر از حاصل ضرب مقادیر احتمالی عواملی که باعث می‌شود دشمن به یک نیروگاه حمله کرده و باعث دسترس ناپذیری آن شود، مقدار احتمالی دسترس ناپذیری یک نیروگاه به دست خواهد آمد. عوامل اساسی که می‌تواند در مدل‌سازی احتمال خروج اجباری نیروگاه در شرایط جنگی تأثیر داشته باشد را می‌توان به سه گروه جغرافیایی، فنی و عمومی تقسیم‌بندی کرد. هر یک از این عوامل به نوبه خود به چند زیرکلاس طبقه‌بندی می‌شوند که هر یک از این کلاس‌ها را نیز می‌توان به چند دسته تقسیم‌بندی کرد و وزن‌های متفاوتی را می‌توان به آن‌ها اختصاص داد. بنابراین اگر وزن سه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی را برای یک نیروگاه به صورت $SC_i^{Technical}$ ، $SC_i^{Geographic}$ و $SC_i^{General}$ و ضریب اهمیت

شده و اثرات آن بررسی می‌شود. در دیدگاه احتمالی با در نظر گرفتن احتمال خروج برای هر یک از نیروگاه‌ها بررسی‌ها به صورت احتمالی انجام می‌شود. در حالت عادی احتمال در دسترس نبودن نیروگاه‌ها تحت تأثیر عوامل گوناگونی قرار دارد. به طور معمول در شرایط غیرجنگی احتمال دسترس نبودن نیروگاه‌ها با مدت زمان خرابی، میانگین زمان تعمیرات، نرخ خرابی و نرخ تعمیرات مدل‌سازی می‌شود. در شرایط جنگی احتمال در دسترس نبودن نیروگاه‌ها با آنچه در حالت عادی مدل‌سازی می‌شود، متفاوت است. در وضعیت‌های بحرانی جنگی احتمال در دسترس نبودن نیروگاه‌ها وابسته به تعدادی پارامترهای استراتژیکی، پدافندی و جغرافیایی نیروگاه مورد نظر است که شناسایی این پارامترها و مدل‌سازی نرخ احتمالی خروج واحدها در این مقاله ارائه شده است.

در این مقاله برای حل مسئله در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها در شرایط بحرانی جنگی موضوع قابلیت اطمینان^۱ تأسیسات تولید دخالت داده می‌شود. مسئله مشارکت واحدها به صورت یک مسئله بهینه‌سازی^۲ با هدف تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و سطح بهینه تولید واحدها تعریف می‌شود. در این مدل پیشامدهای احتمالی شامل خروج ناگهانی نیروگاه‌ها در اثر حملات نظامی^۳ در چارچوب حوادثی با در نظر گرفتن احتمال رویداد آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. در این روش برای هر ساعت که به طور جداگانه لحاظ می‌شود، با در نظر گرفتن واحدهای در مدار برای یک برنامه‌ریزی نوعی، پیشامدهای ممکن ایجاد می‌شود و با استفاده از مقادیر احتمال دسترس ناپذیری واحدهای تولیدی، مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان برای هر ساعت محاسبه می‌شود. به طور معمول عوامل خروج یا دسترس ناپذیری یک نیروگاه در یک شبکه نمونه در چهار گروه می‌توان دسته‌بندی کرد: خطای تجهیزات نیروگاه، اضافه بار، اتصال زمین یا اتصال فاز توسط حیوانات در پست اصلی نیروگاه، خروج برنامه‌ریزی شده به منظور نصب تجهیزات جدید، خروج برنامه‌ریزی شده به منظور سرویس و نگهداری، خطای کارکنان، خطا در اثر عوامل ناشناخته و فرهنگ محیطی. عامل خروج یا دسترس ناپذیری یک نیروگاه در این مقاله جزء دسته آخر یعنی دسترس ناپذیری به واسطه حملات نظامی دشمن است. با توجه با اینکه برای یک شبکه نمونه در شرایط جنگی نیروگاه‌های موجود به دلیل احتمال متفاوت حمله به آن‌ها، احتمال عدم دسترسی متفاوتی نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارند، بنابراین در جهت یافتن مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها یک مدل برپایه موقعیت‌های فنی و جغرافیایی نیروگاه‌های موجود ارائه شده است. پارامترهایی که می‌تواند در مدل‌سازی احتمال خروج، خروج اجباری واحدها تأثیر داشته باشد و در قالب سه فاکتور جغرافیایی، فنی و عمومی دسته‌بندی شده است که هر یک از این فاکتورها به نوبه خود به چند زیرکلاس تقسیم‌بندی و وزن‌های متفاوتی به این کلاس‌ها اختصاص داده شده

^۱ Reliability

^۲ Optimization Problem

^۳ Military Attack

تسریع در دسترس ناپذیری نیروگاه در مواقع جنگی خواهد شد. به طوری که نیروگاه‌های با طول عمر بالا در برابر حملات کم رنگ دشمن هم آسیب‌پذیر خواهند بود. یک دسته‌بندی کلی از این کلاس و اختصاص وزن به هر کدام از این دسته‌ها در جدول (۳) داده شده است.

جدول ۳. قدمت و طول عمر نیروگاه (کلاس ۲ از زیر گروه عامل فنی)

ردیف	طول عمر	ω_{Tech}^{HL}
۱	نیروگاه‌های با طول عمر بیشتر از ۵۰ سال	۱
۲	نیروگاه‌های با طول عمر ۴۵ تا ۵۰ سال	۰/۹
۳	نیروگاه‌های با طول عمر ۴۰ تا ۴۵ سال	۰/۸
۴	نیروگاه‌های با طول عمر ۳۵ تا ۴۰ سال	۰/۷
۵	نیروگاه‌های با طول عمر ۳۰ تا ۳۵ سال	۰/۶
۶	نیروگاه‌های با طول عمر ۲۵ تا ۳۰ سال	۰/۵
۷	نیروگاه‌های با طول عمر ۲۰ تا ۲۵ سال	۰/۴
۸	نیروگاه‌های با طول عمر ۱۵ تا ۲۰ سال	۰/۳
۹	نیروگاه‌های با طول عمر ۱۰ تا ۱۵ سال	۰/۲
۱۰	نیروگاه‌های با طول عمر کمتر از ۵ سال	۰/۱

کلاس ۳ (سه‌م تولید نیروگاه طی یک سال): توزیع امتیاز این عامل به نسبت کل انرژی تولید شده در هر یک نیروگاه‌ها طی یک دوره مشخص نسبت به کل تولید کشور تعیین شود. با توجه به جدول (۴) و نسبت‌های هر نیروگاه می‌توان نیروگاه‌های با تولید بالا را در جایگاه نیروگاه‌های حساس قرار داد.

جدول ۴. شاخص سه‌م تولید نیروگاه طی یک سال (کلاس ۳ از زیر گروه عامل فنی)

ردیف	سه‌م تولید	ω_{Tech}^{SP}
۱	نیروگاه‌هایی با تولید بیش از ۲۰۰۰ گیگاوات ساعت	۱
۲	نیروگاه‌هایی با تولید ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ گیگاوات ساعت	۰/۸
۳	نیروگاه‌هایی با تولید ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ گیگاوات ساعت	۰/۶
۴	نیروگاه‌هایی با تولید ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ گیگاوات ساعت	۰/۴
۵	نیروگاه‌هایی با تولید کمتر از ۵۰۰ گیگاوات ساعت	۰/۲

کلاس ۴ (دسته‌بندی نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته): سطح زیر منحنی بار که میزان مصرف انرژی الکتریکی را در طول زمان معین می‌کند، به سه ناحیه تقسیم می‌شود. این نواحی را ناحیه بار پایه، ناحیه بار میانی و ناحیه بار پیک می‌نامند که به آن‌ها بار پایه، بار میانی و بار پیک نیز می‌گویند. برای احداث یک نیروگاه می‌بایست هدف از احداث آن تأمین انرژی الکتریکی برای یکی از نواحی سطح زیر منحنی مصرف شبکه باشد. با توجه به مطالب فوق و جدول (۵) نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته به چهار دسته عمده تقسیم‌بندی می‌شوند. بدیهی است نیروگاه‌هایی که برای تأمین بار پایه کاربرد دارند عمدتاً بار بیشتری را تحت پوشش قرار می‌دهند و عمدتاً به عنوان نیروگاه‌های حساس شناخته می‌شوند که ممکن است مورد حمله دشمن قرار بگیرد.

هر عامل را به صورت $\Gamma^{Technical}$ ، $\Gamma^{Geographic}$ و $\Gamma^{General}$ در نظر بگیرید، مقدار احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاه i ام در شرایط جنگی یا FOV_i^{MI} به صورت زیر تعیین خواهد شد:

$$FOV_i^{MI} = (\Gamma^{Technical} SC_i^{Technical}) \times (\Gamma^{Geographic} SC_i^{Geographic}) \times (\Gamma^{General} SC_i^{General}) \quad (1)$$

که وزن هر کدام از عوامل به نوبه خود از ضرب وزن‌های زیرکلاس مربوط به همان عامل به دست خواهد آمد:

$$SC_i^{Technical} = \prod (\omega_{Tech,i}^{PR}, \omega_{Tech,i}^{HL}, \omega_{Tech,i}^{SP}, \omega_{Tech,i}^{EP}) \quad (2)$$

$$SC_i^{Geographic} = \prod (\omega_{Geo,i}^M, \omega_{Geo,i}^{AL}, \omega_{Geo,i}^{DPS}, \omega_{Geo,i}^{DBS}, \omega_{Geo,i}^{DMC}, \omega_{Geo,i}^{DMS}, \omega_{Geo,i}^{CDR}, \omega_{Geo,i}^{FI}) \quad (3)$$

$$SC_i^{General} = \omega_{Ge,i} \quad (4)$$

مقادیر وزنی هر کدام از زیرکلاس‌های عامل‌های فنی، جغرافیایی و عمومی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

الف) عامل فنی

کلاس ۱ (میزان قدرت نیروگاه): با توجه به قدرت و ظرفیت هر یک از واحدهای نیروگاهی و همچنین اهمیت و حساسیت هر یک از واحدهای نیروگاهی توزیع وزن این عامل را می‌توان با توجه به مشخصات واحدها از قبیل تعداد و ظرفیت واحدها تعیین کرد. همان طوری که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، کلاس ۱ از گروه عامل فنی به چند دسته تقسیم‌بندی شده و بر حسب اهمیت هر یک از این دسته‌ها وزن‌های متفاوتی اختصاص داده شده است. به عنوان مثال نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ مگاوات نسبت به نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات احتمال دسترس ناپذیری بیشتری را دارند. زیرا در زمان جنگی دشمن بیشتر تمایل به هدف قرار دادن نیروگاه‌های با ظرفیت بالاتر را دارد. یا به عبارت دیگر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌های با ظرفیت بالاتر نسبت به نیروگاه‌های با ظرفیت پایین‌تر در زمان جنگی بیشتر است.

جدول ۲. میزان قدرت نیروگاه (کلاس ۱ از زیر گروه عامل فنی)

ردیف	میزان قدرت	ω_{Tech}^{PR}
۱	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ مگاوات	۱
۲	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ مگاوات	۰/۸
۳	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ مگاوات	۰/۶
۴	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ مگاوات	۰/۴
۵	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ مگاوات	۰/۲
۶	نیروگاه‌های با ظرفیت مابین ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات	۰/۱
۷	نیروگاه‌های با ظرفیت کمتر از ۵۰۰ مگاوات	۰/۰۵

کلاس ۲ (قدمت و طول عمر نیروگاه): بسیاری از نیروگاه‌های تحت پوشش قدمت و طول عمر زیادی دارند که این عامل خود باعث

جدول ۵. دسته‌بندی نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته (کلاس ۴ از زیر گروه عامل فنی)

ردیف	نوع نیروگاه	ω_{Tech}^{EP}
۱	نیروگاه‌هایی که برای تأمین بار پایه به کار می‌روند	۱
۲	نیروگاه‌هایی که برای تأمین بار میانی به کار می‌روند	۰/۷۵
۳	نیروگاه‌هایی که برای تأمین بار پیک به کار می‌روند	۰/۵
۴	نیروگاه‌هایی که جهت تولید برق اضطراری مجتمع‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد	۰/۲۵

(ب) عامل جغرافیایی

کلاس ۱ (کوهستانی بودن منطقه نیروگاه): کوهستانی بودن مکان یک نیروگاه باعث می‌شود که از تیررس موشک‌های دشمنان بیشتر در امان باشد. استفاده مناسب از عوارض زمین و احداث تأسیسات در محلی که توسط دشمن به سهولت قابل تشخیص و رویت نباشد، جزء عوامل جغرافیایی هستند. با توجه به جدول (۶) احتمال هدف قرار دادن نیروگاه‌هایی که در منطقه‌های دشت و هموار قرار دارد، بیشتر از منطقه‌های دیگر است. از دیدگاه پدافند غیرعامل نیروگاه‌های احداث شده در دشت‌های مسطح یا به نسبت هموار را نمی‌توان از دید دشمن مخفی و پنهان نگاه داشت که این امر آسیب‌پذیری نیروگاه را افزایش خواهد داد.

جدول ۶. دسته‌بندی محل جغرافیایی نیروگاه‌ها از نظر کوهستانی بودن منطقه (کلاس ۱ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع منطقه	ω_{Geo}^M
۱	منطقه‌های دشت مانند، منطقه‌های بیابانی و مسطح	۱
۲	منطقه‌های جلگه‌ای، منطقه‌های معمولی	۰/۶
۳	منطقه‌های کوهستانی شدید، منطقه‌های دره مانند یا منطقه‌های دارای رشته کوه	۰/۲

کلاس ۲ (ارتفاع از سطح دریا): نیروگاه‌هایی که در منطقه‌های مرتفع احداث و ساخته شده‌اند، با احتمال کم می‌توانند مورد هدف قرار بگیرند (جدول ۷).

کلاس ۳ (پراکندگی ساختارهای نیروگاهی): در طراحی و چیدمان اجزای نیروگاه‌ها باید اصل پراکندگی را لحاظ نمود. بدین منظور تجهیزات حیاتی و پشتیبان آن‌ها و همچنین موقعیت قرارگیری مخازن سوخت باید به گونه‌ای باشند که در اثر آتش‌سوزی یا موج ناشی از انفجار سایر تجهیزات و تأسیسات، حتی‌الامکان آسیب نبینند. با توجه به جدول (۸) یک دسته‌بندی کلی برای این کلاس انجام شده است.

جدول ۷. دسته‌بندی محل جغرافیایی نیروگاه‌ها از نظر ارتفاع (کلاس ۱ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع ارتفاع	ω_{Geo}^{AL}
۱	نیروگاه‌هایی با ارتفاع ۲۵۰۰ متر به بالا	۰/۱
۲	نیروگاه‌هایی با ارتفاع ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر از سطح دریا	۰/۲
۳	نیروگاه‌هایی با ارتفاع ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از سطح دریا	۰/۴
۴	نیروگاه‌هایی با ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا	۰/۶
۵	نیروگاه‌هایی با ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا	۰/۸
۶	نیروگاه‌هایی با ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر از سطح دریا	۱

جدول ۸. پراکندگی ساختارهای نیروگاهی (کلاس ۳ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع وسعت	ω_{Geo}^{DPS}
۱	نیروگاه‌هایی با وسعت ۵۰ هکتار	۱
۲	نیروگاه‌هایی با وسعت ۵۰ تا ۱۰۰ هکتار	۰/۸
۳	نیروگاه‌هایی با وسعت ۱۰۰ تا ۱۵۰ هکتار	۰/۶
۴	نیروگاه‌هایی با وسعت ۱۵۰ تا ۲۰۰ هکتار	۰/۴
۵	نیروگاه‌هایی با وسعت ۲۰۰ تا ۳۰۰ هکتار	۰/۲
۶	نیروگاه‌هایی با وسعت ۳۰۰ هکتار به بالا	۰/۱

کلاس ۴ (فاصله نیروگاه از مرز کشور): چنانچه محل استقرار نیروگاه بر اساس تقسیم‌های به عمل آمده در منطقه‌های مرزی و استان‌های محروم قرار داشته باشند احتمال دسترس ناپذیری بیشتری در زمان حملات نظامی دارند (جدول ۹). ایجاد تأسیسات نیروگاهی در نزدیکی مرزها موجب سادگی شناسایی و هدف یابی آسان آن‌ها توسط دشمن می‌شود.

جدول ۹. دسته‌بندی فاصله نیروگاه‌ها از مرز کشور (کلاس ۴ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Geo}^{DBS}
۱	نیروگاه‌هایی با فاصله کمتر از ۲۰۰ کیلومتر	۱
۲	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر	۰/۷۵
۳	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلومتر	۰/۵
۵	نیروگاه‌هایی با فاصله بیشتر از ۶۰۰ کیلومتر	۰/۲۵

کلاس ۵ (فاصله نیروگاه از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش): دسته‌بندی نیروگاه‌ها با توجه به این کلاس می‌تواند با در نظر گرفتن مواردی همچون نزدیکی به مراکز بار، نزدیکی به مراکز سوخت‌رسانی و تأمین انرژی اولیه و کوریدورهای امکان انتقال برق تولیدی انجام شود. با توجه به جدول (۱۰) بعد مسافت و فاصله بین نیروگاه با مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش می‌تواند این پارامتر را توصیف کند.

جدول ۱۰. دسته‌بندی فاصله نیروگاه‌ها از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش (کلاس ۵ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Geo}^{DMC}
۱	نیروگاه‌هایی با فاصله بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر	۱
۲	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر	۰/۸
۳	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر	۰/۶
۴	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر	۰/۴
۵	نیروگاه‌هایی با فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر	۰/۲

جدول ۱۲. دسته‌بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه استتار (کلاس ۷ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Geo}^{CDR}
۱	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع ضعیف (D)	۱
۲	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع خوب (B)	۰/۷۵
۳	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع متوسط (C)	۰/۵
۴	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع عالی (A)	۰/۲۵

جدول ۱۳. دسته‌بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه استحکامات به کار رفته (کلاس ۸ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Geo}^{FI}
۱	نیروگاه‌هایی با درجه استحکام نوع ضعیف (F ₁)	۱
۲	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع خوب (F ₂)	۰/۷۵
۳	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع متوسط (F ₃)	۰/۵
۴	نیروگاه‌هایی با درجه استتار نوع عالی (F ₄)	۰/۲۵

کلاس ۸ (درجه‌بندی استحکامات نیروگاه‌ها): با توجه به شرایط و امکانات، میزان اهمیت و آسیب‌پذیری نقاط حیاتی و حساس، در محل‌های مناسب و در اطراف تجهیزات، سازه‌های موقتی ایجاد می‌شود تا مانع اصابت مستقیم موشک، بمب یا ترکش این مهمات به تجهیزات یا تأسیسات شده و اثرات ترکش یا موج انفجار را به طور نسبی خنثی نماید. برای ایجاد این استحکامات در شرایط اضطراری از کیسه‌های شنی آماده استفاده می‌شود که در اطراف تجهیزات قرار می‌گیرد. در مورد تجهیزات بزرگ نیز از شبکه‌های پر از شن استفاده می‌شود. در اطراف ترانسفورماتورها دیوار بتنی محکم به نام دیوار آتش کشیده می‌شود. حتی در شرایط اضطراری و جنگی می‌بایست برای ترانسفورماتورها در بتونی متحرک ساخت. برای نمونه، دیوار بتونی محافظ ترانسفورماتور قدرت اصلی در نیروگاه از سرایت آتش و موج انفجار از یک ترانس آسیب دیده به ترانس دیگر و دیگر تجهیزات مجاور آن جلوگیری می‌نماید. چنانچه تجهیزات در فضای باز چیده شده باشند یا در درون ساختمان‌های با مقاومت معمولی قرار گرفته باشند، با ایجاد خاکریز با ارتفاع و قطر مناسب می‌توان در مواردی از اصابت مستقیم بمب و موشک به تجهیزات جلوگیری کرد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نیروگاه‌ها را از دیدگاه استحکامات ضروری مطابق جدول (۱۳) دسته‌بندی کرد.

ج) عامل عمومی

کلاس ۱: سابقه تاریخی حملات نظامی در حوزه عوامل عمومی می‌تواند سابقه تاریخی حملات نظامی به یک نیروگاه را عنوان کرد. با توجه به جنگ‌های اتفاق افتاده در سال‌های اخیر و تعداد حملات نظامی به یک نیروگاه می‌توان بعد استراتژیک و حساس یک نیروگاه پی برد به طوری که تعداد حملات بیشتر نشان دهنده توجه بیش از پیش دشمن به یک نیروگاه و حساس بودن آن است (جدول ۱۴).

کلاس ۶ (فاصله نیروگاه از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی): برای مقابله با تهدیدات نظامی استفاده از ابزارهای دفاعی نظامی نظیر سامانه‌های موشکی و پدافند هوایی امری اجتناب ناپذیر است. هرچه فاصله نیروگاه از محل این سایت‌ها کمتر باشد احتمال هدف قرار دادن نیروگاه کمتر و احتمال دسترس پذیری نیروگاه بیشتر خواهد بود. دسته‌بندی فاصله نیروگاه از سایت‌های دفاعی در جدول (۱۱) انجام شده است.

جدول ۱۱. دسته‌بندی فاصله نیروگاه‌ها از سایت‌های دفاعی (کلاس ۶ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Geo}^{DMS}
۱	نیروگاه‌هایی با فاصله بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر	۱
۲	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر	۰/۸۵
۳	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر	۰/۷
۴	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر	۰/۵۵
۵	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر	۰/۴
۶	نیروگاه‌هایی با فاصله بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر	۰/۲۵
۷	نیروگاه‌هایی با فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر	۰/۱

کلاس ۷ (درجه‌بندی استتار نیروگاه): استتار در نیروگاه‌ها دو جنبه دارد: اول همگون بودن تأسیسات و تجهیزات با محیط اطراف که به وسیله رنگ آمیزی یا استفاده از مواد طبیعی و مصنوعی امکان‌پذیر است. دوم منحرف کردن توجه دشمن با تغییر شکل ظاهری تأسیسات است. برای تشخیص تأسیسات و تجهیزات در عکس‌های هوایی و همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده توسط تیم اطلاعات و شناسایی زمینی، به عناصر و علائم شناسایی نیاز است. این عوامل که شامل کلیه علائم شناسایی اعم از زمینی یا هوایی می‌باشند، عبارت‌اند از:

- ✓ حرکت، صدا، اندازه (تأسیسات)، بو، رنگ (ناهماهنگی رنگ با محیط)، وضعیت (استقرار در محل نامناسب)، شکل استقرار (استقرار منظم و سازمان یافته)
 - ✓ بافت (بافت کویری، شهری، روستایی و قطبی)، دود و آتش
 - ✓ انعکاس، سایه (هنگام تابش خورشید)
- مطابق با موارد ذکر شده می‌توان برای هر نیروگاه یک درجه‌بندی معین از لحاظ استتار مطابق جدول (۱۲) تعیین نمود.

هم‌رنگ بودن تجهیزات و ساختمان‌ها به رنگ محیط یکی از اقداماتی است که باعث اختفای تجهیزات می‌شود. این هم‌رنگ‌سازی در سطوح سقف ساختمان‌های اداری، اتاق‌های اسکالان و مخازن سوخت انجام می‌گیرد. همچنین نشان ندادن نمای خارجی نیروگاه در رسانه‌ها به ویژه در ارتباط با محیط اطراف و جاده‌ها و کاشت درختان بلند در اطراف نیروگاه‌ها می‌تواند تا حدودی باعث اختفاء نیروگاه شود.

جدول ۱۴. دسته‌بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه سابقه تاریخی حملات نظامی (کلاس ۱ از زیر گروه عامل عمومی)

ردیف	نوع مسافت	ω_{Ge}
۱	نیروگاه‌هایی با تعداد حملات بیش از ۲۰ بار	۱
۲	نیروگاه‌هایی با تعداد حملات بین ۱۵ تا ۲۰ بار	۰/۸
۳	نیروگاه‌هایی با تعداد حملات بین ۱۰ تا ۱۵ بار	۰/۶
۴	نیروگاه‌هایی با تعداد حملات بین ۵ تا ۱۰ بار	۰/۴
۵	نیروگاه‌هایی با تعداد حملات کمتر از ۵ بار	۰/۲

به طور معمول انتخاب ضرایب باید برحسب اولویت‌دهی به وضعیت یک نیروگاه باشد. به عنوان مثال وزن انتخابی برای یک نیروگاه با ظرفیت ۱۰۰۰ مگا وات قطعاً باید از وزن انتخابی نیروگاه مثلاً ۲۰۰ مگاواتی بیشتر باشد، اما اینکه این وزن چقدر باید بیشتر باشد در دست برنامه‌ریز یا طراح سامانه خواهد بود. در وضعیت در نظر گرفته شده چون دسته‌بندی بر اساس گام‌های مساوی است. مقدار عددی یک را به تعداد گام‌ها تقسیم کرده و آن را به نام وزن هر گام، نام‌گذاری می‌شود. به بدترین دسته عددی یک را اختصاص می‌دهند و برای دسته‌های بعدی از عددی یک به مقدار وزن هر گام کم می‌شود. این روش، یک روش در نظر گرفته شده در حالتی است که بخواهند تمام عوامل را به یک نسبت در مقدار احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها دخالت دهند. برای مواردی که برنامه‌ریز بخواهد یک عامل یا یک کلاس را بیشتر مد نظر قرار دهد، می‌بایست ضرایب را به گونه‌ای انتخاب کند که FOV نیروگاه بیشتر متأثر از ضرایب همان کلاس یا عامل باشد. به عبارت دیگر این ضرایب خود یک نوع انعطاف‌پذیری را در طراحی سامانه ایجاد خواهد کرد که با تعیین صحیح و دقیق این ضرایب توسط برنامه‌ریز به نوعی طراحی مناسبی را داشته باشد.

۲-۲. فرمول‌بندی مسئله SCUC برای وضعیت‌های جنگی

در سامانه قدرت هدف مسئله SCUC حداقل کردن مجموع هزینه عملیاتی با توجه به مجموعه قیدهای امنیتی موجود در سامانه در یک افق زمانی است. فرض شده است که هزینه تولید برای واحد i در هر فاصله زمانی یک تابع درجه دوم از توان خروجی ژنراتور است که از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$GC_{i,t} = a_i + b_i OP_{i,t} + c_i OP_{i,t}^2 \quad (5)$$

که در آن، $OP_{i,t}$ تولید توان برحسب MW برای واحد i در ساعت t و a_i ، b_i ، c_i ضرایب هزینه سوخت هستند. هزینه تولید هزینه سوخت مورد نیازی است که توسط مجموعه واحدهای تولید کننده آنلاین برای برآوردن تقاضای بار در سامانه مصرف می‌شود. از آنجایی که در مسئله SCUC موضوع کاهش هزینه کل در کنار قیدهای امنیتی مطرح است، بنابراین باید هزینه سوخت را کاهش داد.

هزینه شروع به کار به مدت زمان خاموشی قبل از شروع به کار یعنی PE_{off} بستگی دارد. هزینه شروع به کار در هر ساعت به صورت

نمایی فرض می‌شود:

$$BC_i = \phi_i + \kappa_i (1 - e^{-\lambda_i PE_{off,i}}) \quad (6)$$

که در آن، ϕ_i هزینه شروع به کار داغ، κ_i هزینه شروع به کار سرد، λ_i ثابت زمانی خنک‌سازی است.

هزینه مجموع برای برنامه زمان‌بندی TH دوره از مجموع هزینه تولید و هزینه شروع به کار به‌دست می‌آید.

$$OF = \sum_{t=1}^{TH} \sum_{i=1}^{NU} GC_{i,t} BV_{i,t} + BC_{i,t} (1 - BV_{i,t-1}) BV_{i,t} \quad (7)$$

متغیر باینری است که حالت‌های خاموش/روشن $BV_{i,t}$ که در آن، اگر واحد روشن $BV_{i,t} = 1$ را نشان می‌دهد. t در زمان نبودن واحد $BV_{i,t} = 0$ باشد در غیر این صورت.

در SCUC هدف کلی حداقل کردن OF با توجه به تعدادی از قیدهای سامانه و واحدها است. فرض شده است که تمام ژنراتورها به باس یکسان متصل شده‌اند و تقاضای بار را تغذیه می‌کنند. بنابراین، قیدهای سامانه مطالعه شده در بالا به طور مختصر به صورت زیر خواهد بود.

برای تلفیق قید قابلیت اطمینان LOLP در ساختار مسئله SCUC از کمیت جریمه PV به عنوان جریمه مربوط به تجاوز از حد مجاز شاخص قابلیت اطمینان استفاده شده است که با افزودن آن به هزینه کل تابع هدف تکمیل یافته زیر حاصل خواهد شد:

$$TF_{compt} = OF + PV \times RRI \quad (8)$$

که مقدار RRI از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$RRI = \begin{cases} (LOLP_{GE} - LOLP_{max})^2, & LOLP_{GE} > LOLP_{max} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (9)$$

مقدار $LOLP_{GE}$ از حاصل جمع مقادیر LOLP هر ساعت به‌دست می‌آید و به صورت زیر خواهد بود:

$$LOLP_{GE} = \sum_{t=1}^{TH} LOLP_t \quad (10)$$

تفاوت روش برنامه‌ریزی ارائه شده در این مقاله با روش‌های قبلی در روش محاسبه مقدار LOLP است. در روش‌های قبلی مقدار LOLP از روی نرخ خرابی تصادفی (FOR) که بیانگر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط عادی است، محاسبه می‌شود. در روش ارائه شده مقدار LOLP از روی مقادیر دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی که در بخش قبلی ارائه و به صورت FOV^{MI} نامگذاری شد، به‌دست خواهد آمد. اگر طبق شکل (۱) ورودی آنالیز قابلیت اطمینان مقدار FOV^{MI} باشد، شاخص LOLP احتمال تأمین نشدن بار در وضعیت تهاجم را نشان خواهد داد. بدین ترتیب کلیه اقداماتی که در جهت مقاومت در برابر تهدیدات و عملکرد صحیح در وضعیت بحرانی

در SCUC هدف کلی حداقل کردن TF_{compl} با توجه به تعدادی از قیدهای سامانه و واحدها است. فرض شده است که تمام ژنراتورها به باس یکسان متصل شده‌اند و تقاضای بار را تغذیه می‌کنند. بنابراین، قیدهای سامانه مطالعه شده در بالا به طور مختصر به صورت زیر خواهد بود:

قید توازن توان

مجموع تولید توان در هر ساعت باید برابر بار متناظر همان ساعت PD_t باشد.

$$PD_t = \sum_{i=1}^{NU} OP_{i,t} BV_{i,t} \quad (13)$$

محدوده تولید توان

توان تولیدی هر واحد باید در محدوده حداقل و حداکثر خود باشد.

$$OP_i^{\min} \leq OP_{i,t} \leq OP_i^{\max} \quad (14)$$

حداقل زمان روشن بودن

این قید به خاموش کردن یک واحد در مدار قرار داده شده دلالت دارد:

$$T_i^{on} \geq MUT_i \quad (15)$$

حداقل زمان خاموش بودن

$$T_i^{off} \geq MDT_i \quad (16)$$

قیدهای شیب واحدها

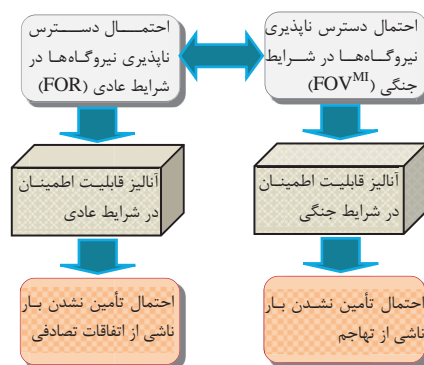
$$\begin{aligned} OP(i,t) - OP(i,t-1) &\leq UR(i) \\ OP(i,t-1) - OP(i,t) &\leq DR(i) \end{aligned} \quad (17)$$

۲-۳. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات^۴ غیرخطی متغیر با زمان

گام‌های اساسی الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات غیرخطی متغیر با زمان به صورت مقداردهی اولیه، محاسبه سرعت، به‌روزرسانی موقعیت ذرات و به‌روزرسانی موقعیت ذرات بهینه سراسری را می‌توان نام برد. اگر موقعیت و سرعت ذره i ام در فضای جست‌وجوی n بعدی به صورت $SP_i = [SP_{i,1} \ SP_{i,2} \ \dots \ SP_{i,n}]$ و $PA_i = [PA_{i,1} \ PA_{i,2} \ \dots \ PA_{i,n}]$ تعریف شود، در اینصورت موقعیت بهینه محلی و سراسری ذره i ام را می‌توان به صورت $PA_i^l = [PA_{i,1}^l \ PA_{i,2}^l \ \dots \ PA_{i,n}^l]$ و $PA_i^g = [PA_1^g \ PA_2^g \ \dots \ PA_n^g]$ نشان داد. در هر تکرار سرعت جدید ذرات با توجه به رابطه زیر به‌روزرسانی می‌شود:

$$\begin{aligned} SP_i(k+1) &= C(\phi) \{ \omega(k) SP_i(k) + c_1(k) \phi_1 \\ &\quad (PA_i^l(k) - PA_i(k)) + c_2(k) \phi_2 (PA_i^g(k) - PA_i(k)) \} \quad (18) \\ &\text{for } i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

انجام می‌گیرد موجب بهبود شاخص‌هایی خواهد شد که بیانگر سطح پدافند غیرعامل نیروگاه‌ها هستند.



شکل ۱. مدل آنالیز قابلیت اطمینان با رویکرد پدافند غیرعامل

برای هر ساعت برنامه‌ریزی که به طور جداگانه در نظر گرفته می‌شود، با در نظر گرفتن واحدهای در مدار برای یک برنامه‌ریزی، نوعی پیشامدهای ممکن ایجاد و احتمال هر پیشامد^۱ با استفاده از مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها و مدل ارائه شده در قسمت قبل محاسبه می‌شود.

برای به‌دست آوردن مقادیر LOLP در هر ساعت از ترکیب ظرفیت واحدهای تولیدی و آمادگی واحدهای تولیدی برای تخمین میزان تولید آماده در سامانه با استفاده از جدول COPT^۲ استفاده می‌شود. این جدول آرایه‌ای از سطوح ظرفیت تولید و احتمال مربوط به وجود این ظرفیت است. اگر مقادیر احتمالی عدم دسترس پذیری تمامی واحدهای موجود در سامانه با یکدیگر برابر باشد، می‌توان این جدول را با استفاده از توزیع دو جمله‌ای^۳ محاسبه کرد. اما در مسئله UC مورد نظر ما امکان تساوی مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری تمامی واحدهای تولیدی عملاً مقدور نمی‌باشد. در این حالت با استفاده از مفاهیم پایه احتمال، داده‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند به طوری که در این روش واحدها به صورت متوالی در سامانه اضافه می‌شوند. برای هر ساعت t یک جدول COPT با استفاده از مقادیر احتمال دسترس ناپذیری هر واحد تشکیل می‌شود. هر ردیف احتمال $j = 1, 2, \dots, n$ از جدول COPT یک سطح تولیدی که ممکن است خارج شود، ظرفیت کل CR_j که در سرویس می‌باشد و احتمال PR_j مرتبط با این حالت را نشان می‌دهد. LOLP برای هر ساعت t از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$LOLP_t = \sum_{j=1}^n PR_j LOSS_j, \quad t \in [1, TH] \quad (11)$$

که در آن، $LOSS_j$ به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$LOSS_j = \begin{cases} 1 & , CR_j < PD_t \\ 0 & , otherwise \end{cases} \quad (12)$$

^۱ Contingency

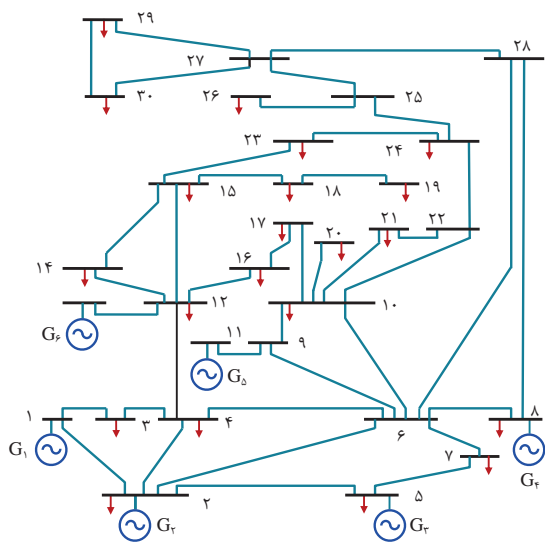
^۲ Capacity Outage Probability Table

^۳ Binomial Distribution

^۴ Particle Swarm Optimization Algorithm

مشکلات مداری و خطاهای انسانی است. در وضعیت در نظر گرفته شده در این مقاله، احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها معرف خرابی‌های ناشی از تهاجمات و اقدامات مخرب عمدی است. در این حالت آنالیز قابلیت اطمینان در خروجی خود شاخص‌های قابلیت اطمینان سامانه در وضعیت تهاجم را ارائه خواهد کرد که این شاخص‌ها می‌توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سامانه در مقابل حملات و اختلالات عمدی باشند.

با در نظر گرفتن مدل پیشنهادی برای محاسبه احتمال دسترس ناپذیری واحدها، مهم‌ترین وظیفه برای یک متخصص پدافند غیرعامل در سامانه‌های قدرت برای برنامه‌ریزی امن در مدار قرار گرفتن واحدها، تعیین و استخراج ضرایب وزنی برای هر یک از کلاس‌های سه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی است. تخصیص وزن برای هر یک از این کلاس‌ها می‌تواند با بررسی آماری، میدانی، دریافت اطلاعات از سازمان‌های مربوطه، تخمین داده و به‌دست آوردن سابقه هر واحد انجام می‌گیرد. جدول (۱۷) بیانگر وزن‌های اختصاص یافته به هر یک از ۶ نیروگاه مربوطه در سامانه آزمون را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای نیروگاه شماره ۱، با بررسی وزن‌های اختصاص یافته می‌توان دریافت که این نیروگاه در سه حوزه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی تحت کلاس‌های زیر در نظر گرفته است:



شکل ۲. سامانه ۳۰ باسه مورد مطالعه

عامل فنی (کلاس ۱): نیروگاه با ظرفیت کمتر از ۵۰۰ مگاوات، کلاس ۲: طول عمر ۲۵ تا ۳۰ سال، کلاس ۳: تولید کمتر از ۵۰۰ گیگاوات ساعت، کلاس ۴: کاربرد نیروگاه برای تأمین بار.

عامل جغرافیایی (کلاس ۱): قرار داشتن در منطقه‌های دشت مانند، منطقه‌های بیابانی و مسطح، کلاس ۲: نیروگاه با ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا، کلاس ۳: وسعت مابین ۱۵۰ تا ۲۰۰ هکتار، کلاس ۴: فاصله از مرز کشور مابین ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر، کلاس ۵: فاصله از مراکز اصلی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر کلاس ۶: فاصله از سایت‌های دفاعی بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر، کلاس ۷: درجه استتار نوع ضعیف (D)، کلاس ۸: درجه استحکام نوع ضعیف (F1).

در معادله بالا، عبارت اول سرعت ذره را در موقعیت جاری نشان می‌دهد. عبارت دوم قسمت محلی یا به عبارتی به‌روزرسانی محلی سرعت را می‌رساند و عبارت سوم به‌روزرسانی سرعت را با توجه به موقعیت اجتماعی یا سراسری ذره نشان می‌دهد. هر ذره از موقعیت جاری خود به سمت موقعیت بعدی با سرعت اصلاح شده به صورت زیر حرکت خواهد کرد:

$$PA_i(k+1) = PA_i(k) + SP_i(k+1) \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

در الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات غیرخطی متغیر با زمان مقدار وزن اینرسی به صورت معادله نوشته شده در پایین به‌دست می‌آید. پارامتر شناخت و اجتماعی c_1 و c_2 با یک مقدار بزرگ c_{1max} و c_{2max} شروع می‌شود و به صورت غیرخطی به c_{1min} و c_{2min} به صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$\omega(k) = \omega_{min} + \left(\frac{iter_{max} - k}{iter_{max}} \right)^\alpha (\omega_{max} - \omega_{min}) \quad (20)$$

$$c_1(k) = c_{1min} + \left(\frac{iter_{max} - k}{iter_{max}} \right)^\beta (c_{1max} - c_{1min}) \quad (21)$$

$$c_2(k) = c_{2max} + \left(\frac{iter_{max} - k}{iter_{max}} \right)^\gamma (c_{2min} - c_{2max}) \quad (22)$$

$$C(\phi) = \frac{2}{|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}|}, \quad 4.1 \leq \phi \leq 4.2 \quad (23)$$

که در آن، $iter_{max}$ بیشینه تعداد تکرارها را بیان می‌کند. α, β و γ پارامترهای ثابتی هستند که وابسته به مجموعه زیر هستند:

$$\alpha, \beta, \gamma \in \{0, 0.5, 1, 1.5, 2\} \quad (24)$$

۳. نتایج و بحث

در این قسمت روش برنامه‌ریزی ارائه شده بر روی یک سامانه نمونه اجرا می‌شود. هدف از برنامه‌ریزی پیشنهادی مقاوم سازی شبکه در جهت تداوم نیرورسانی به مراکز و بارهای حساس در مواقع اضطراری جنگی است. سامانه قدرت ۳۰ باسه IEEE برای مطالعه انتخاب شده است. این سامانه مشتمل بر ۶ نیروگاه تولیدی، ۴۱ خط انتقال، ۲۰ بار و ۳۰ باس است. شماتیک تک خطی سامانه آزمون ۳۰ باسه در شکل (۲) نشان داده شده است. جدول (۱۵) اطلاعات مربوط به واحدها و جدول (۱۶) تقاضای مصرف را نشان می‌دهد.

روندنامی امنیت-مقید مشارکت واحدهای تولیدی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طوری که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد، احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی متأثر از سه عامل اصلی فنی، جغرافیایی و عمومی است. در آنالیز قابلیت اطمینان سامانه در حالت عادی داده‌های ورودی برای محاسبه دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها، میانگین زمان تعمیر و نرخ‌های خرابی آماری واحدهای تولیدی است. این نرخ خرابی کاملاً تصادفی فرض شده و عمدتاً ناشی از حوادث طبیعی،

¹ Robust

جدول ۱۵. مشخصات واحدهای تولیدی

MDT_i (hrs)	MUT_i (hrs)	λ_i (hrs)	κ_i (\$)	ϕ_i (\$)	c_i (\$/MWh ²)	b_i (\$/MWh)	a_i (\$)	OP_i^{max} (MW)	OP_i^{min} (MW)	Unit NO.
۱	۱	۲	۱۷۶	۷۰	۰	۲	۰/۰۰۳۷۵	۸۰	۵۰	۱
۱	۱	۱	۱۸۷	۷۴	۰	۱/۷	۰/۰۱۷۵	۸۰	۲۰	۲
۱	۱	۱	۱۱۳	۵۰	۰	۱	۰/۰۶۲۵	۵۰	۱۵	۳
۱	۱	۱	۲۶۷	۱۱۰	۰	۳/۲۵	۰/۰۰۸۳۴	۵۵	۱۰	۴
۱	۱	۱	۱۸۰	۷۲	۰	۳	۰/۰۲۵	۳۰	۱۰	۵
۱	۱	۱	۱۱۳	۴۰	۰	۳	۰/۰۲۵	۴۰	۱۲	۶

واحدهای روشن توان تولیدی هر واحد نوشته شده است. در صورت خاموش بودن واحد، توان تولیدی صفر در نظر گرفته شده است. در این جدول ردیف اول که با پارامترهای TH_1 تا TH_6 مشخص شده است، نشان دهنده ساعت‌های ۱-۶ است. میزان تولید واحدها طی چهار نوع الگوریتم حل مشخص شده در ستون اول جدول‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ستون دوم، واحدهای موجود در سامانه آزمون در نظر گرفته شده است و با واحدهای Unit ۱ تا Unit ۲ مشخص شده‌اند. ستون‌های سوم تا هشتم مقادیر عددی توان‌های تولیدی هر واحد را ارائه کرده است که یک مقدار صفر و غیر صفر را نشان می‌دهد. صفر بودن هر عنصر از این ستون‌ها نشان دهنده غیرفعال بودن واحد تولیدی مورد نظر است. طبق جدول‌های (۱۹-۲۲) تمامی واحدهای تولیدی در محدوده بیشینه و کمینه تولید خود قرار گرفته‌اند و تمامی محدودیت‌های موجود در تابع هدف ارضا شده است.

جدول ۱۶. میزان بار ۶ ساعت

TH ₆	TH	TH _r	TH _r	TH _r	TH ₁	Time
۱۱۸/۵۹	۱۱۴/۵۹	۱۱۴/۳۵	۱۱۷/۲۶	۱۲۲/۰۵	۱۲۹/۴۳	PD (MW)

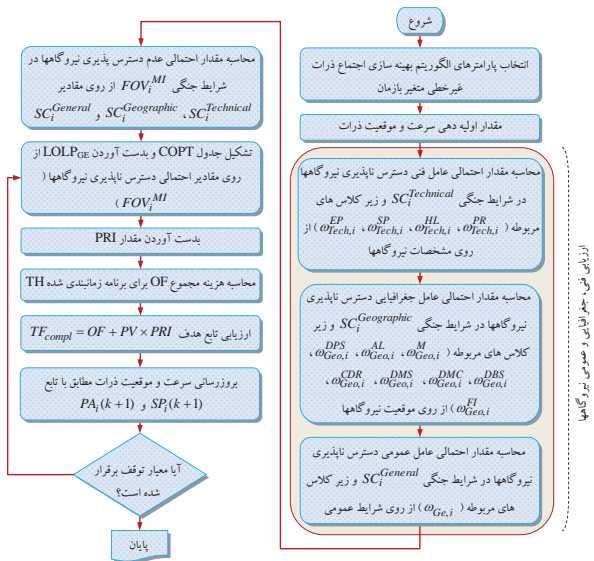
عامل عمومی (کلاس ۱: سابقه حملات نظامی بین ۱۵ تا ۲۰ بار. با توجه به جدول (۱۸) چهار سناریو برای ارزیابی روش ارائه‌شده در نظر گرفته می‌شود. در چارچوب اول فرض بر این است که مقدار دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن مدل ارائه شده در این مقاله به‌دست می‌آید. در چارچوب دوم مقدار دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها به‌طور یکسان برابر ۰/۰۲ برای تمام نیروگاه‌ها فرض شده است. برای مقاوم بودن روش برنامه‌ریزی پیشنهادی از چهار نوع الگوریتم استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات غیرخطی متغیر با زمان (NTVE-PSO) [۱۷-۱۹]، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات وزن اینرسی متغیر با زمان (TVIW-PSO) [۲۰]، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات مقدار رندوم (RANDW-PSO) [۲۱]، و الگوریتم بهینه‌سازی ضریب شتاب دهنده متغیر با زمان (TVAC-PSO) [۲۱]. جدول‌های (۱۹-۲۲) نتیجه به‌دست آمده از اجرای برنامه طی چهار نوع الگوریتم بهینه‌سازی NTVE-PSO، TVIW-PSO، RANDW-PSO و TVAC-PSO را نشان می‌دهد و میزان تولید هر واحد را در هر ساعت از دوره مورد بررسی ارائه می‌کند. جدول‌های (۱۹-۲۲) چگونگی روشن و خاموش بودن واحدها و وضعیت مشارکت واحدها را طی ۶ ساعت، با توجه به بار مورد نظر نشان می‌دهد. برای

جدول ۱۷. تخصیص وزن به هریک از ۶ نیروگاه مربوطه در سامانه آزمون

Unit ۶	Unit ۵	Unit ۴	Unit ۳	Unit ۲	Unit ۱	Weight	
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	ω_{Tech}^{PR}	عامل فنی
۰/۹	۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	ω_{Tech}^{HL}	
۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	ω_{Tech}^{SP}	
۱	۱	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	ω_{Tech}^{EP}	
۱	۱	۰/۲	۰/۶	۰/۶	۱	ω_{Geo}^M	عامل جغرافیایی
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۶	۰/۸	ω_{Geo}^{AL}	
۰/۶	۰/۶	۰/۸	۰/۸	۰/۴	۰/۴	ω_{Geo}^{DPS}	
۰/۷۵	۰/۵	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	ω_{Geo}^{DBS}	
۰/۴	۰/۴	۰/۶	۰/۲	۰/۴	۰/۶	ω_{Geo}^{DMC}	
۰/۵۵	۰/۷	۰/۷	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	ω_{Geo}^{DMS}	
۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	ω_{Geo}^{CDR}	
۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	ω_{Geo}^{FI}	
۰/۶	۰/۸	۰/۸	۰/۶	۰/۶	۰/۸	ω_{Ge}	عامل عمومی
۰/۲۱۱۷	۰/۲۳۹۵	۰/۱۳۹۶	۰/۱۰۱۴	۰/۱۰۷۵	۰/۰۷۶۵	FOV ^{MI}	احتمال

جدول ۱۸. سناریوهای در نظر گرفته شده

سناریو	چارچوب	مقدار $LOLP_{max}$ در نظر گرفته شده
S_1	چارچوب ۱	$LOLP_{max}=10\%$
S_2	چارچوب ۱	$LOLP_{max}=20\%$
S_3	چارچوب ۲	$LOLP_{max}=10\%$
S_4	چارچوب ۲	$LOLP_{max}=20\%$



شکل ۳. روند نمای الگوریتم ارائه شده

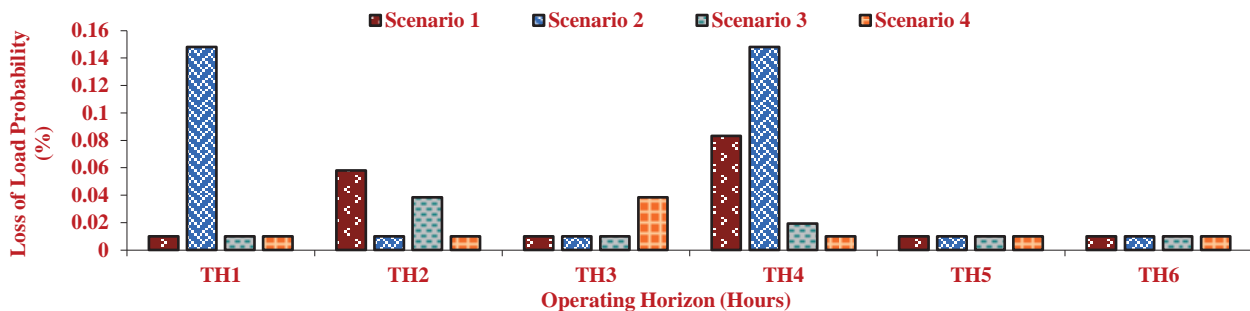
مقادیر عددی $LOLP$ برای ساعاتی مختلف برنامه‌ریزی TH_1 تا TH_6 برای سناریوهای مختلف و با روش‌های مختلف حل مسئله در شکل‌های (۴-۷) داده شده است. با مقایسه دو چارچوب طی سناریوهای مختلف نتیجه گرفته می‌شود که با افزایش مقدار احتمال عدم دسترس پذیری واحدها در شرایط جنگی، مقدار $LOLP$ برای هر ساعت افزایش خواهد یافت و این به معنای افزایش سطح تولید کل خواهد بود. به عبارت دیگر برای شرایط بحرانی برای رسیدن به سامانه مطمئن، امن و مقاوم باید با برنامه‌ریزی صحیح واحدهای تولیدی طبق روش ارائه شده عمل کرد. در شکل‌های (۴-۷) محور افقی شش ساعت در نظر گرفته شده یعنی TH_1 تا TH_6 و محور عمودی مقادیر $LOLP$ را برحسب درصد نشان می‌دهند.

جدول ۱۹. وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه با استفاده از چهار روش حل برای سناریوی اول S_1

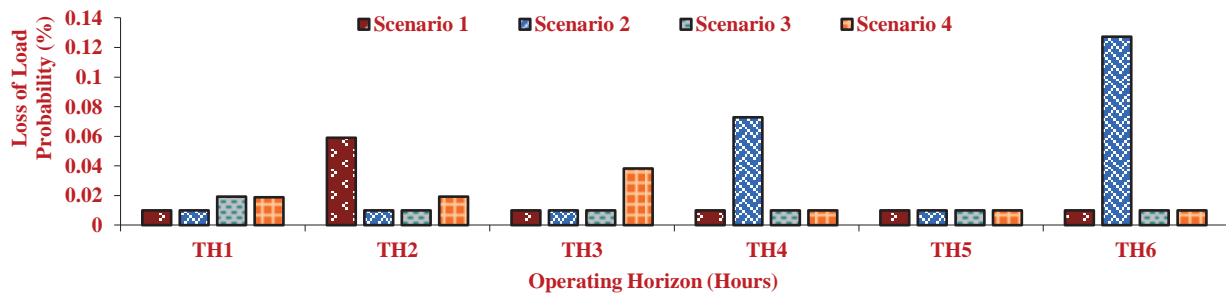
TH_6	TH_5	TH_4	TH_3	TH_2	TH_1		
۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۶۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۱	NTVE-PSO
۰/۴۱۱۹	۰/۲۰۵۷	۰/۴۶۶۳	۰/۳۵۵۵	۰/۲۰۰۰	۰/۳۷۵۹	Unit ۲	
۰/۳۲۰۸	۰/۰۰۰۰	۰/۴۲۳۴	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۳۶۱۴	Unit ۳	
۰/۰۰۰۰	۰/۲۵۰۴	۰/۴۹۶۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۹۶۱	Unit ۴	
۰/۳۰۰۰	۰/۲۹۹۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۷۶۵	۰/۲۴۰۶	Unit ۵	
۰/۱۵۳۵	۰/۳۶۰۸	۰/۰۰۰۰	۰/۳۱۶۰	۰/۳۵۵۴	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	
۰/۷۹۹۷	۰/۵۰۰۰	۰/۶۰۵۶	۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۷۳۷۲	Unit ۱	TVIW-PSO
۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰	Unit ۲	
۰/۱۶۶۶	۰/۱۵۰۰	۰/۲۴۳۵	۰/۵۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۳۱	Unit ۳	
۰/۱۰۰۰	۰/۵۵۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۲۸۰۴	۰/۱۰۰۰	Unit ۴	
۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۵	
۰/۳۷۸۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	Unit ۶	
۰/۶۴۰۶	۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	Unit ۱	RANDW-PSO
۰/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۳۴۲	۰/۲۰۰۰	۰/۶۰۳۳	۰/۲۰۰۰	Unit ۲	
۰/۱۵۰۰	۰/۲۴۶۶	۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	Unit ۳	
۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۵۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۴	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۷۲	Unit ۵	
۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۴۰۰۰	Unit ۶	
۰/۷۳۸۶	۰/۶۱۱۴	۰/۰۰۰۰	۰/۷۰۰۱	۰/۷۱۷۲	۰/۶۴۵۰	Unit ۱	TVAC-PSO
۰/۰۰۰۰	۰/۷۰۰۰	۰/۳۹۴۱	۰/۲۱۱۶	۰/۲۱۲۰	۰/۲۸۹۷	Unit ۲	
۰/۱۶۳۸	۰/۴۱۷۹	۰/۴۱۶۷	۰/۴۱۵۲	۰/۰۰۰۰	۰/۲۶۴۴	Unit ۳	
۰/۳۳۵۶	۰/۱۱۲۴	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۷۰	۰/۱۴۱۱	۰/۰۰۰۰	Unit ۴	
۰/۱۳۴۳	۰/۰۰۰۰	۰/۲۱۴۷	۰/۱۸۱۹	۰/۰۰۰۰	۰/۲۳۲۲	Unit ۵	
۰/۳۲۲۱	۰/۲۳۹۷	۰/۳۵۶۳	۰/۰۰۰۰	۰/۱۹۵۸	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	

جدول ۲۰. وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه با استفاده از چهارروش حل برای سناریوی دوم S₂

		TH ₁	TH ₂	TH ₃	TH ₄	TH ₅	TH ₆
NTVE-PSO	Unit ۱	۰/۷۱۸۲	۰/۵۸۵۰	۰/۵۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۱	۰/۰۰۰۰
	Unit ۲	۰/۰۰۰۰	۰/۳۷۸۹	۰/۲۷۴۲	۰/۰۰۰۰	۰/۷۸۲۴	۰/۶۲۸۰
	Unit ۳	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۸۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۴	۰/۴۷۱۰	۰/۲۲۹۳	۰/۰۰۰۰	۰/۳۲۰۷	۰/۱۰۰۰	۰/۱۲۴۱
	Unit ۵	۰/۲۷۴۸	۰/۱۷۹۵	۰/۱۲۳۲	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۲۹۳۵
	Unit ۶	۰/۰۰۰۰	۰/۱۷۷۹	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۳۴۷۵
TVIW-PSO RANDW-PSO	Unit ۱	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۶۶۷۴	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۱۰
	Unit ۲	۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۴۰۵۵	۰/۷۸۵۸	۰/۸۰۰۰	۰/۸۰۰۰
	Unit ۳	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۴	۰/۵۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۵۵۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۶	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۱	۰/۵۱۶۲	۰/۷۲۰۶	۰/۵۰۶۶	۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۰۰۰۰
TVAC-PSO	Unit ۲	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۳۵۵۵	۰/۴۶۶۳	۰/۲۰۵۷	۰/۴۱۱۹
	Unit ۳	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۴۲۳۴	۰/۰۰۰۰	۰/۳۲۰۸
	Unit ۴	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۶۴	۰/۰۰۰۰	۰/۴۹۶۰	۰/۲۵۰۴	۰/۰۰۰۰
	Unit ۵	۰/۳۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۹۹۶	۰/۳۰۰۰
	Unit ۶	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۱۶۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۶۰۸	۰/۱۵۳۵
	Unit ۱	۰/۷۴۹۷	۰/۵۸۲۱	۰/۷۳۷۷	۰/۷۶۷۷	۰/۶۸۵۹	۰/۷۱۰۵
TVIW-PSO	Unit ۲	۰/۵۴۵۶	۰/۴۳۱۸	۰/۵۷۴۱	۰/۵۷۴۷	۰/۳۰۳۲	۰/۷۴۳۴
	Unit ۳	۰/۰۰۰۰	۰/۲۸۵۴	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۷۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۴	۰/۰۰۰۰	۰/۳۵۵۹	۰/۰۰۰۰	۰/۱۹۵۴	۰/۲۷۶۰	۰/۰۰۰۰
	Unit ۵	۰/۱۶۱۷	۰/۱۱۶۲	۰/۰۰۰۰	۰/۱۶۴۱	۰/۱۷۹۱	۰/۰۰۰۰
	Unit ۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۵۷	۰/۰۰۰۰	۰/۲۴۲۳
	Unit ۱	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۶۶۷۴	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۱۰



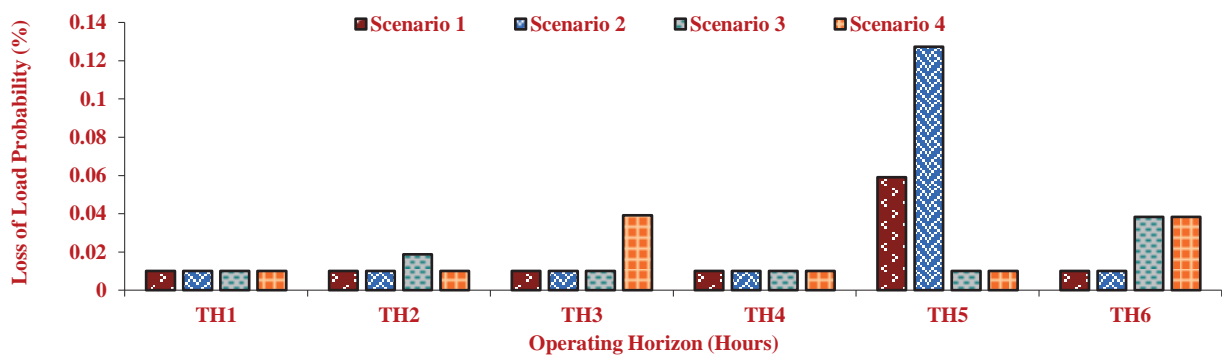
شکل ۴. مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل NTVE-PSO



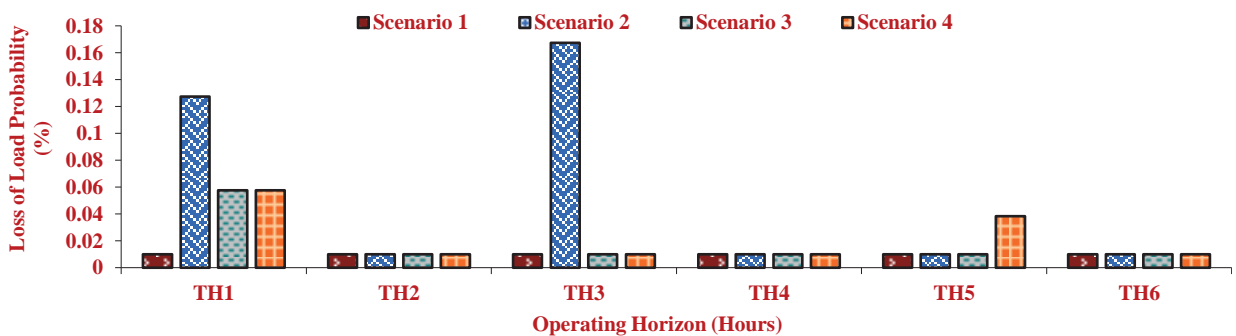
شکل ۵. مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل TVIW-PSO

جدول ۲۱. وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه با استفاده از چهار روش حل برای سناریوی سوم S₃

TH _۶	TH _۵	TH _۴	TH _۳	TH _۲	TH _۱		
۰/۵۹۹۵	۰/۵۰۲۱	۰/۰۰۰۰	۰/۵۴۱۴	۰/۵۴۷۳	۰/۷۲۰۶	Unit ۱	NTVE-PSO
۰/۳۸۹۰	۰/۴۹۵۸	۰/۴۷۲۹	۰/۳۰۲۸	۰/۵۸۲۳	۰/۲۰۱۱	Unit ۲	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۱۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۳	
۰/۱۰۰۰	۰/۲۶۸۰	۰/۳۳۳۳	۰/۴۱۹۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۷۲۴	Unit ۴	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۷۳۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۳۸۲	Unit ۵	
۰/۳۰۰۳	۰/۱۲۰۰	۰/۳۳۷۹	۰/۰۰۰۰	۰/۲۳۲۷	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	
۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۲۸۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۱	TVIW-PSO
۰/۲۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۹۶۵	Unit ۲	
۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۲۲۳۸	۰/۱۵۰۰	Unit ۳	
۰/۵۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۵۵۰۰	Unit ۴	
۰/۳۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۵	
۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	
۰/۵۸۴۷	۰/۵۰۹۱	۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۸۰۰۰	Unit ۱	RANDW-PSO
۰/۴۰۶۰	۰/۷۹۷۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰	Unit ۲	
۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۸۱۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۳	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۳۸۳	Unit ۴	
۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۱۶۲۶	۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۵	
۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	
۰/۶۴۴۲	۰/۵۸۵۰	۰/۵۳۷۰	۰/۰۰۰۰	۰/۷۳۱۵	۰/۰۰۰۰	Unit ۱	TVAC-PSO
۰/۵۰۷۴	۰/۴۵۷۳	۰/۷۸۲۴	۰/۳۵۸۰	۰/۲۶۷۰	۰/۳۳۵۳	Unit ۲	
۰/۲۲۹۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۵۲۸	۰/۳۸۷۴	۰/۰۰۰۰	Unit ۳	
۰/۰۰۰۰	۰/۴۲۰۴	۰/۲۱۸۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۴	
۰/۲۲۷۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۸۸۷	۰/۱۸۰۲	۰/۲۹۶۸	Unit ۵	
۰/۰۰۰۰	۰/۲۶۴۹	۰/۱۹۵۹	۰/۳۶۰۵	۰/۱۷۶۶	۰/۱۲۷۸	Unit ۶	



شکل ۶. مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل RANDW-



شکل ۷. مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل TVAC-PSO

جدول ۲۲. وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه با استفاده از چهار روش حل برای سناریوی چهارم S₄

TH _۶	TH _۵	TH _۴	TH _۳	TH _۲	TH _۱		
۰/۵۰۰۰	۰/۶۰۴۲	۰/۵۰۰۰	۰/۷۰۱۰	۰/۶۶۵۳	۰/۷۹۰۶	Unit ۱	NTVE-PSO
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۳۵۵	۰/۲۲۶۰	۰/۲۷۷۱	Unit ۲	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۴۶۳۹	۰/۰۰۰۰	۰/۲۲۶۵	۰/۰۰۰۰	Unit ۳	
۰/۱۷۸۸	۰/۲۴۶۵	۰/۲۲۳۵	۰/۰۰۰۰	۰/۱۴۶۶	۰/۰۰۰۰	Unit ۴	
۰/۳۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۷۶۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۶۲	Unit ۵	
۰/۲۶۳۳	۰/۲۱۲۳	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۷۲	Unit ۶	
۰/۵۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۸۰۰۰	Unit ۱	TVIW-PSO
۰/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۴۳۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۲	
۰/۱۵۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	Unit ۳	
۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۴	
۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	Unit ۵	
۰/۱۲۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	Unit ۶	
۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۸۰۰۰	۰/۵۰۰۰	Unit ۱	RANDW-PSO
۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۶۷۲۶	۰/۲۰۰۰	۰/۲۰۰۰	Unit ۲	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۵۰۰۰	۰/۱۵۰۰	Unit ۳	
۰/۰۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۵۵۰۰	۰/۱۰۰۰	Unit ۴	
۰/۱۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۰۰۰	Unit ۵	
۰/۴۰۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۴۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۲۰۰	۰/۱۲۰۰	Unit ۶	
۰/۷۵۵۲	۰/۷۴۵۴	۰/۷۹۰۰	۰/۶۹۰۶	۰/۶۵۷۵	۰/۰۰۰۰	Unit ۱	TVAC-PSO
۰/۶۲۳۶	۰/۳۷۱۵	۰/۳۹۰۸	۰/۳۵۱۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	Unit ۲	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۳۹۶۱	۰/۲۲۷۸	۰/۱۹۸۸	۰/۱۹۸۹	Unit ۳	
۰/۲۴۵۷	۰/۰۰۰۰	۰/۱۱۸۷	۰/۰۰۰۰	۰/۲۰۹۲	۰/۱۵۹۳	Unit ۴	
۰/۱۷۷۲	۰/۳۱۷۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۵۹۰	۰/۰۰۰۰	۰/۲۱۱۹	Unit ۵	
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۴۵۱	۰/۱۹۶۰	۰/۲۶۹۱	۰/۰۰۰۰	Unit ۶	

جدول ۲۳. مقایسه مقادیر تابع هدف سناریوهای مختلف تحت چهار روش حل متفاوت

سناریو ۴	سناریو ۳	سناریو ۲	سناریو ۱	سناریو/روش حل
۳۶۸۷۱۰	۴۱۵۸۹۰	۴۶۰۴۹۰	۴۶۶۷۶۰	NTVE-PSO
۴۱۶۲۶۰	۴۲۶۳۳۰	۴۳۶۵۶۰	۴۹۳۳۶۰	TVIW-PSO
۶۱۲۲۱۰	۶۱۵۵۲۰	۶۲۰۴۵۰	۶۹۰۴۹۰	RANDW-PSO
۴۱۳۴۳۰	۴۲۴۴۳۰	۴۸۳۷۹۰	۵۰۶۹۹۰	TVAC-PSO

سناریوهای اول و دوم در مقایسه با سناریوهای سوم و چهارم مقادیر هزینه بیشتری را دارند. در نتیجه مقدار تابع هدف با استفاده از چهار روش حل مختلف برای چارچوب اول بیشتر از چارچوب دوم است. افزایش مقدار دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در چارچوب دوم نسبت به چارچوب اول باعث شده است تا نیروگاه‌ها برای رسیدن به مقدار شاخص قابلیت اطمینان LOLP مطلوب سطح تولید خود را افزایش دهند. افزایش سطح تولید نیروگاه‌ها به معنای افزایش هزینه است. پس برای رسیدن به سامانه مطمئن و قابل اطمینان لزوم افزایش هزینه‌ها یک امر غیرقابل اجتناب است. با مقایسه مقادیر هزینه‌ها طی سناریوهای مختلف می‌توان دریافت که در بیشتر موارد تابع هدف به‌دست آمده با استفاده از روش حل NTVE-PSO در مقایسه با سایر

با توجه به شکل‌های (۷-۴) برای سناریوهای اول و دوم که در آن مقادیر دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها افزایش یافته و مقادیر متفاوتی دارند، مقادیر بیشینه LOLP برای سناریوهای اول و دوم یا به عبارتی چارچوب اول نسبت به سناریوهای دوم و چهارم یا چارچوب دوم، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را دارد. مقدار بیشینه LOLP ثبت شده برای سناریوهای دوم و چهارم طی روش‌های حل مختلف و ساعت‌های ۱ تا ۶، ۰/۱۶ درصد است. حال آنکه مقدار بیشینه LOLP ثبت شده برای سناریوهای سوم و چهارم طی روش‌های حل و ساعت‌های مختلف، ۰/۰۶ است. این افزایش قابل ملاحظه در مقادیر LOLP در چارچوب اول ناشی از افزایش مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها است. مقادیر هزینه یا تابع هدف طی سناریوها و روش‌های حل متفاوت در جدول (۲۳) ارائه شده است. با توجه به این جدول

$SC_i^{Geographic}$	وزن عامل جغرافیایی
$SC_i^{General}$	وزن عامل عمومی
$\Gamma^{Technical}$	ضریب اهمیت عامل فنی
$\Gamma^{Geographic}$	ضریب اهمیت عامل جغرافیایی
$\Gamma^{General}$	ضریب اهمیت عامل عمومی
FOV_i^{MI}	احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاه i ام در شرایط جنگی
ω_{Tech}^{PR}	وزن مربوط به میزان قدرت نیروگاه
ω_{Tech}^{HL}	وزن مربوط به قدمت و طول عمر نیروگاه
ω_{Tech}^{SP}	وزن مربوط به سهم تولید نیروگاه طی یک سال
ω_{Tech}^{EP}	وزن مربوط به دسته‌بندی نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته
ω_{Geo}^M	وزن مربوط به کوهستانی بودن منطقه نیروگاه
ω_{Geo}^{AL}	وزن مربوط به ارتفاع از سطح دریا
ω_{Geo}^{DPS}	وزن مربوط به پراکندگی ساختارهای نیروگاهی
ω_{Geo}^{DBS}	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مرز کشور
ω_{Geo}^{DMC}	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش
ω_{Geo}^{DMS}	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی
ω_{Geo}^{CDR}	وزن مربوط به درجه‌بندی استتار نیروگاه
ω_{Geo}^{FI}	وزن مربوط به درجه‌بندی استحکامات نیروگاه‌ها
ω_{Ge}	وزن مربوط به سابقه تاریخی حملات نظامی
$OP_{i,t}$	تولید توان برحسب MW برای واحد i در ساعت t
a_i, b_i, c_i	ضرایب هزینه سوخت
PE_{off}	مدت زمان خاموشی قبل از شروع به کار
BC_i	هزینه شروع به کار
φ_i	هزینه شروع به کار داغ
κ_i	هزینه شروع به کار سرد
λ_i	ثابت زمانی خنک‌سازی
$BV_{i,t}$	متغیر باینری حالت‌های خاموش/روشن بودن واحد i در زمان t
$GC_{i,t}$	هزینه تولید برای واحد i در هر فاصله زمانی
PV	کمیت جریمه
CR_j	ظرفیت کل در سرویس
PD_t	دیماندر در ساعت t
PA_i	موقعیت ذره i ام در فضای جست و جوی n بعدی
SP_i	سرعت ذره i ام در فضای جست و جوی n بعدی
$PA_i^l(k)$	موقعیت ذره بهینه محلی i ام در تکرار k ام
PA^g	موقعیت ذره بهینه سراسری
m	شمارنده تکرارها
$PA_i(k)$	موقعیت ذره i ام در تکرار k ام
$SP_i(k)$	سرعت ذره i ام در تکرار k ام
c_1	پارامتر شناخت
c_2	پارامتر اجتماعی
φ_1, φ_2	مقادیر رندوم مابین صفر و یک
$iter_{max}$	بیشینه تعداد تکرارها

روش‌های حل دارای مقدار کمتری است. بنابراین روش NTVE-PSO دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های حل است.

۴. نتیجه‌گیری

در راستای اجرای اصول پدافند غیرعامل در روند برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها و افزایش امنیت تولید و انرژی در شرایط بحران یک روش مقاوم برای طرح‌ریزی مشارکت واحدها در این مقاله ارائه شده است. استمرار برق‌رسانی به مراکز حساس جزء موارد با اهمیت مضاعف در شرایط جنگی است. در این پژوهش سعی شده است تا با فراهم آوردن تمهیدات و رعایت اصول پدافند غیرعامل ضمن کاهش سطح آسیب‌پذیری واحدهای تولیدی امکان تداوم نیرورسانی به مراکز ویژه تضمین شود.

برای رسیدن به این هدف آنالیز قابلیت اطمینان شبکه‌های تولید در حل مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها بررسی شده است. با استفاده از شاخص قابلیت اطمینان احتمال تأمین نشدن بار LOLP و اعمال قیدهای متناظر با آن وضعیت‌های روشن و خاموش بودن واحدها و ظرفیت‌های مربوط به آن‌ها تعیین شده است. در آنالیز قابلیت اطمینان ارائه شده نرخ معرف خرابی‌های واحدهای تولیدی، ناشی از حملات نظامی فرض شده است. خروجی آنالیز قابلیت اطمینان پیشنهادی شاخص قابلیت اطمینان سامانه در وضعیت تهاجم را ارائه می‌دهد. این شاخص ارائه شده بیانگر تراز دفاع غیرعامل و مقاومت سامانه در مقابل حملات نظامی است. نیاز به یک مدل جامع و فراگیر جهت استخراج نرخ‌های واحدهای تولیدی، یک نیاز اساسی در آنالیز قابلیت اطمینان مشارکت واحدها است. مدل‌سازی پیشنهادی برای تهیه مقادیر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی مبتنی بر ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل ریسک نیروگاه‌های برق است. معیارهای ارائه شده در این مقاله معیارهای فنی، جغرافیایی و عمومی بوده که برای هر معیار، زیرمعیارهایی نیز معرفی شده است. مدل‌سازی ارائه شده می‌تواند به عنوان یک مدل دومنظوره نیز مطرح باشد. برای اولویت‌بندی نیروگاه‌های حساس دشمن نیز این مدل می‌تواند کاربرد داشته باشد. به عبارت دیگر نیروهای خودی برای هدف قرار دادن نیروگاه‌های حساس دشمن می‌توانند از این مدل استفاده کنند. یک مطالعه مقایسه‌ای بر روی سامانه ۳۰ باسه استاندارد IEEE انجام شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داده است که روش ارائه شده به طور مؤثر می‌تواند در برنامه‌ریزی صحیح در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها در مواقع جنگی به کار رود.

علامه و اختصارات

SCUC	Security-constrained unit commitment
LOLP	Loss of load probability
FOR	Force outage rate
COPT	Capacity outage probability table
PSO	Particle swarm optimization
NTVE-PSO	Nonlinear time-varying evolution PSO
TVIW-PSO	Time varying inertia weight PSO
RANDW-PSO	Random inertia weight PSO
TVAC-PSO	Time-varying acceleration coefficients PSO

$SC_i^{Technical}$

وزن عامل فنی

۵. مراجع

- [11] Li, Y. "Discussion of Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem"; IEEE Trans. on Power Syst. 2014, 29, 996-996.
- [12] Wang, Q.; Watson, J. P.; Guan, Y. "Two-Stage Robust Optimization for Nk Contingency-Constrained Unit Commitment"; IEEE Trans. on Power Syst. 2013, 28, 2366-2375.
- [13] Simopoulos, D. N.; Kavatza, S. D.; Vournas, C. D. "Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing"; IEEE Trans. on Power Syst. 2006, 21, 1699-1706.
- [14] An, Y.; Zeng, B. "Exploring the Modeling Capacity of Two-Stage Robust Optimization: Variants of Robust Unit Commitment Model"; IEEE Trans. on Power Syst. 2014, 2, 1-14
- [15] Xiong, P.; Jirutitijaroen, P. "Two-stage Adjustable Robust Optimisation for Unit Commitment Under Uncertainty"; IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 8, 573-582.
- [16] Fu, Y.; Li, Z.; Wu, L. "Modeling and Solution of the Large-scale Security-constrained Unit Commitment"; IEEE Trans. on Power Syst. 2013, 28, 3524 - 3533.
- [17] Ratnaweera, A.; Halgamuge, S.; Watson, H. C. "Self-organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer with Time-varying Acceleration Coefficients"; IEEE T. Evolut. Comput. 2004, 8, 240-255.
- [18] Chatterjee, A.; Siarry, P. "Nonlinear Inertia Weight Variation for Dynamic Adaptation in Particle Swarm Optimization"; Comput. Oper. Res. 2006, 33, 859-871.
- [19] Hashemi, Y.; Valipour, K. "FDM-Based Multi-Objective Optimal Siting and Design of TC-FLSFCL for Study of Distribution System Reliability"; Int. J. Elec. Power 2014, 61, 463-473.
- [20] Eslami, M.; Shareef, H. Taha, M. R.; Khajehzadeh, M.; "Adaptive Particle Swarm Optimization for Simultaneous Design of UPFC Damping Controllers"; Int. J. Elec. Power 2014, 57, 116-128.
- [21] Chang, Y.-P. "Optimal the Tilt Angles for Photovoltaic Modules in Taiwan"; Int. J. Elec. Power 2010, 32, 956-964.
- [1] Rajabi, M.; Golmeh, E.; Majid, D. "Developing a TOPSIS-Based Model for Hydropower Dam Site Selection in Isfahan Province"; Passive Defence Sci. Tech. 2011, 2, 315-324 (In Persian).
- [2] Khanzade, M. H. "A New PMU Placement Method with Improved Observability in Order to Managing the Electrical Energy in Critical Situations"; Passive Defence Sci. Tech. 2014, 4, 255-263 (In Persian).
- [3] Karbasian, M.; Dashti, M.; Asadollahi, A. "Providing a Combination Facility Location Model for Locating Critical and Important Facilities with Consider of Passive Defence Principles"; Passive Defence Sci. Tech. 2012, 2, 161-167 (In Persian).
- [4] 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. Tech. 2013, 3, 231-241 (In Persian).
- [5] Chung, C.; Yu, H.; Wong, K. P. "An Advanced Quantum-inspired Evolutionary Algorithm for Unit Commitment"; IEEE Trans. on Power Syst. 2011, 26, 847-854.
- [6] Barati, M.; Farsangi, M. M. "Solving Unit Commitment Problem by a Binary Shuffled Frog Leaping Algorithm"; IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8, 1050 - 1060.
- [7] Hargreaves, J. J.; Hobbs, B. F. "Commitment and Dispatch with Uncertain Wind Generation by Dynamic Programming"; IEEE Trans. on Sustainable Energy, 2012, 3, 724-734.
- [8] Wu, L. "An Improved Decomposition Framework for Accelerating LSF and BD Based Methods for Network-Constrained UC Problems"; IEEE Trans. on Power Syst. 2013, 28, 3977 - 3986.
- [9] Dieu, V.; Ongsakul, W. "Improved Merit Order and Augmented Lagrange Hopfield Network for Unit Commitment"; IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1, 548-556.
- [10] Bertsimas, D.; Litvinov, E.; Sun, X. A.; Zhao, J.; Zheng, T. "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem"; IEEE Trans. on Power Syst. 2013, 28, 52-63.