# برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدهای تولیدی و ارائه مدل احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری

رضا غفارپور[1] یاشار هاشمی[2] حبیب اله اعلمی[3]

۱- مربی و عضو هیات علمی دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

rghaffarpour@ihu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳- استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه ایوانکی، تهران، ایران

halami@ihu.ac.ir

**چکیده:** این مقاله به تدوین راهبرد دفاع غیرعامل چندهدفه در برنامه‌ریزی مقاوم مشارکت واحدهای تولیدی با هدف کاهش آسیب‌پذیری، تداوم نیرورسانی، افزایش قابلیت اطمینان تولید و ارتقای بازدارندگی پرداخته است. یکی از مهمترین اصول مقابله با تهدیداتخرابکارانه، ملاحظات پدافند غیرعامل چندهدفه در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری واحدهای تولیدی است. در طرح ارائه شده با ارائه یک مدل جامع چندهدفه مقید به محدودیت‌های مختلف به برنامه‌ریزی در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری پرداخته و استراتژی‌های بهینه جهت تعیین سطح بهینه تولید و روشن خاموش‌بودن هر نیروگاه در ساعات معین ارائه شده است. اهداف اصلی از تکنیک برنامه‌ریزی پیشنهادی مینیمم‌سازی هزینه کل تولید و ماکزیمم‌سازی معیار پایداری ولتاژ با درنظرگرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مورد نظر است. برای محاسبه معیار قابلیت اطمینان با توجه به احتمال عدم دسترسی متفاوت هر نیروگاه یک روش انعطاف‌پذیر و موثر مبتنی بر تشخیص و اختصاص وزن ارائه شده است. بواسطه ماهیت چندهدفه روش پیشنهادی، الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه برای حل مساله استفاده می‌شود. از دیدگاه تصمیم‌گیرنده، انتخاب یک حل مابین مجموعه جوابهای پارتوی بدست آمده از الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه درک و مدیریت سطح بالایی را نیاز دارد. در این مقاله از تکنیک تحلیل چندمعیاره تصمیم‌گیری فازی برای پیداکردن بهترین حل استفاده می‌شود.

**کلمات کلیدی:** تصمیم‌گیری فازی، احتمال خروج اجباری نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری ، برنامه‌ریزی مشارکت نیروگاه‌ها

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۳۹۴/۰۴/۰۸

**تاریخ پذیرش مشروط مقاله:** ۱۳۹۵/۰۸/۰۲

**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۳۹۴/۰۹/۱۲

**نام نویسنده‌ی مسئول:** مهندس رضا غفارپور

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** ایران – تهران –دانشگاه امام حسین(ع)– دانشکده‌ی مهندسی برق

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

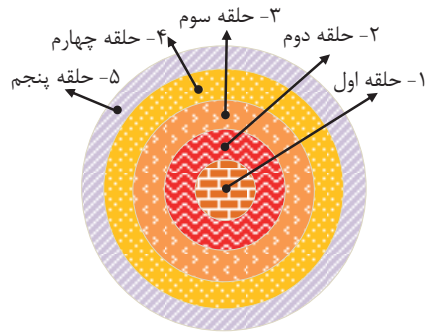
**علائم و اختصارات**

| | |
|---|---|
| SCUC | Security-constrained unit commitment |
| LOLP | Loss of load probability |
| FOR | Force outage rate |
| COPT | Capacity outage probability table |
| UC | Unit commitment |
| MOGSA | Multi-objective gravitational search algorithm |
| MADM | Multi-attribute decision making |
| NSGA | Non-dominated sorting genetic algorithm |
| $TF_{compl}$ | Complete target function |
| $OF$ | Objective function |
| $PV$ | Penalty value |
| $RRI$ | Reliability rate index |
| $FOV^{MI}$ | Forec outage value realated to military index |
| $PR$ | Probability rate |
| $CR$ | Capacity rate |
| $PD$ | Power of demand |
| $BV$ | Binay variable |
| $OP$ | Output power |
| $MUT$ | Minimum up time |
| $MDT$ | Minimum down time |
| $STC$ | Stability criterion |
| $VS$ | Voltage stability |
| $SC$ | Security criterion |
| $AL$ | Altitude |
| $SP$ | Share of production |
| $EP$ | Electricity production |
| $DPS$ | Dispersion of plant structure |
| $DMC$ | Distance of main center |
| $DMS$ | Distance of military site |
| $DBS$ | Distance of border site |
| $FI$ | Fortifications index |
| $OP$ | Operating point |

| | |
|---|---|
| $SC_i^{Technical}$ | وزن عامل فنی |
| $SC_i^{Geographic}$ | وزن عامل جغرافیایی |
| $SC_i^{General}$ | وزن عامل عمومی |
| $\Gamma^{Technical}$ | ضریباهمیت عامل فنی |
| $\Gamma^{Geographic}$ | ضریباهمیت عامل جغرافیایی |
| $\Gamma^{General}$ | ضریباهمیت عامل عمومی |
| $FOV_i^{MI}$ | احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاهi ام در شرایط جنگی |
| $\omega_{Tech}^{PR}$ | وزن مربوط به میزان قدرت نیروگاه |
| $\omega_{Tech}^{HL}$ | وزن مربوط به قدمت و طول عمر نیروگاه |
| $\omega_{Tech}^{SP}$ | وزن مربوط به سهم تولید نیروگاه طبیک سال |
| $\omega_{Tech}^{EP}$ | وزن مربوط به دسته بندی نیروگاهها از نظر تولید الکتریسیته |
| $\omega_{Geo}^{M}$ | وزن مربوط به کوهستانی بودن منطقه نیروگاه |
| $\omega_{Geo}^{AL}$ | وزن مربوط به ارتفاع از سطح دریا |
| $\omega_{Geo}^{DPS}$ | وزن مربوط به پراکندگی استراکچرهای نیروگاهی |
| $\omega_{Geo}^{DBS}$ | وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مرز کشور |
| $\omega_{Geo}^{DMC}$ | وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش |
| $\omega_{Geo}^{DMS}$ | وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی |
| $\omega_{Geo}^{CDR}$ | وزن مربوط به درجه بندی استتار نیروگاه |
| $\omega_{Geo}^{FI}$ | وزن مربوط به درجه بندی استحکامات نیروگاهها |
| $\omega_{Ge}$ | وزن مربوط به سابقه تاریخی حملات نظامی |
| $OP_{i,t}$ | تولید توان برحسب MW برای واحد $i$ در ساعت $t$ |
| $a_i,b_i,c_i$ | ضرایبهزینه سوخت |
| $PE_{off}$ | مدت زمان خاموشی قبل از شروع به کار |
| $BC_i$ | هزینه شروع به کار |
| $\varphi_i$ | هزینه شروع به کار داغ |
| $\kappa_i$ | هزینه شروع به‌کار سرد |
| $\lambda_i$ | 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 |
| $PD_t$ | دیماند در ساعت $t$ |
| $V_i$ | ولتاژ شین$i$ام |
| $STC$ | معیارپایداری ولتاژ |
| $M_i(t)$ | جرم عامل $i$ در تکرار $t$ |
| $fitness_j$ | سازگاری عامل $j$ در تکرار $t$ |
| $R_{ij}(t)$ | فاصله اقلیدسی مابین دو عامل $i$ و $j$ |
| $G(t)$ | ثابت گرانش در تکرار $t$ |
| $a_i^d(t)$ | شتاب عامل $i$ |

## ۱- مقدمه

براساس تئوری واردن، مراکز ثقل یک کشور شامل پنج حلقه و دوایر متحدالمرکزی هستند که مجموعا ساختارهای اصلی قدرت یک کشور را تشکیل می‌دهند. با توجه به شکل (۱) در تئوری مذکور مراکز ثقل یک کشور شامل موارد مقابل هستند و در صورت انهدام هریک از حلقه‌های یاد شده، پیکره و کالبد کشور مورد هدف فلج گردیده و قادر به ادامه فعالیت و حیات نخواهد بود. از جمله زیر مجموعه‌های اهداف مورد نظر در حلقه دوم از تئوری واردن حمله به تاسیسات تولید انرژی الکتریکی یا نیروگاه‌های برق است. با انهدام و تخریب این هدف سایر ارگانها و سازمانها فلج گردیده و زیر ساختهای اقتصادی، عملیاتی و پشتیبانی متوقف می‌گردند.




**شکل (۱): حلقه‌های تئوری واردن**




[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

این مراکز به واسطه بزرگی و متمرکز بودن تجهیزات نصب شده در آن ضریب بالایی را دارند که برای مقابله با این خطر باید بصورت هوشمندانه و با تدبیر عمل نمود [۱]. به لحاظ اهمیت منابع انرژی در شرایط جنگی، مختل کردن سامانه تولید انرژی الکتریکی و دسترس‌ناپذیر کردن نیروگاه‌ها و بطور کلی ایجاد بحران انرژی الکتریکی از اهداف اولیه مهاجمان است [۲]. اختلال در یک سیستم زیربنایی چون نیروگاه‌ها می تواند سبب آشفتگی روانی ملت، فلج شدن سیستم‌های تدافعی و ملی شود [۳].

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]. بهترین روش اجرائی پدافند غیرعامل، مهندسی صحیح و برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه مراکز نیروگاهی است. واحدهای تولیدی در مواقع جنگی با پشامدها و رویدادهای ناخواسته در طی روز مواجه هستند. با توجه به امکان بروز پیشامدهای ناخواسته و متغیر بودن بار و عدم امکان ذخیره انرژی الکتریکی، ارائه روش دقیق جهت در مدار قرار دادن تعداد کافی از واحدهای تولیدی بمنظور تامین بار با امنیت بالا و کمترین هزینه تولید توان و انرژی الکتریکی امری ضروری محسوب می شود. توجه به مسائل برنامه‌ریزی ترتیبی امنیتی و اقتصادی ورود و خروج واحدهای تولیدی به بهره‌برداری صحیح و امن از شبکه با ورود و خروج به موقع واحدها منجر می شود که این کار مانع تامین نشدن تقاضای بار در مواقع اضطراری می شود و صرفه جویی اقتصادی را نیز بهمراه خواهد داشت[۴]. برای دستیابی به روش حلی که علاوه بر رسیدن به پاسخ بهینه و یا نزدیک به بهینه، کارآیی محاسباتی لازم را داشته باشد، تلاش‌های زیادی در مقالات پیشین در جهت حل صحیح در مدار قرارگرفتن واحدهای نیروگاهی صورت گرفته است. برخی از این روش ها عبارتند از: روش لیست تقدم [۵]، برنامه ریزی مختلط دودوئی [۶]، برنامه ریزی پویا [۷]، روش شاخه و کران [۸] و روش رهاسازی لاگرانژ [۹]. از سوی دیگر الگوریتم‌های تکاملی نیز برای حل مساله در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها بکار رفته است [۱۰-۱۲]. تاکنون در مراجع مساله در مدار قرار گرفتن واحدها با درنظر گرفتن دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها مبتنی بر پدافند غیرعامل بحث نشده است. مقدار احتمالی دسترس ناپذیری واحدها تاکنون بااستفاده از نرخ خرابی و نرخ تعمیر واحدها تعیین میشد.

براساس سوابق واحدهای نیروگاه‌های و اینکه در چند سال اخیر چند بار واحد نیروگاهی موردنظر تعمیر و یا خراب شده است، نرخ خرابی و تعمیر هر واحد مشخص شده و براساس آن مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری واحد محاسبه می‌شد. در این مقاله مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری واحدها براساس شاخصهای پدافند غیرعامل تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته است و مدل مناسب برای آن استخراج شده است. با استفاده از مدل مذکور و براساس بهینه‌سازی چند هدفه به برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدها پرداخته شده است.

مرجع [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای مقاوم برای حل مساله امنیت-مقید مشارکت واحدهای نیروگاهی ارائه کرده است. در این مقاله مساله دسترس‌ناپذیری واحدهای تولیدی بحث نشده است. یک روش برای شرکت دادن دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در مساله در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها در مرجع [۱۴] ارائه شده است. در این مرجع مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری واحدهای تولیدی بصورت یک تابع برحسب نرخ خرابی و نرخ تعمیر درنظر گرفته شده است. برای مدیریت تغییرات بارها در مساله مشارکت نیروگاه‌ها مرجع [۱۵] روش بهینه‌سازی مقاوم را ارائه کرده است. این مرجع موضوع قابلیت اطمینان سرویس‌دهی را مورد ارزیابی قرار نداده است. مرجع [۱۶] فرمول‌سازی مقاوم بدون وابستگی به توزیع احتمالی صحیح را در جهت یافتن حل مساله مشارکت واحدها تحت عدم قطعیت های خروج نیروگاه‌ها ارائه کرده است. در این مرجع یک تعداد سناریوهای مشخص خروج نیروگاه‌ها بدون وابستگی به مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری آنها مشخص شده و برنامه‌ریزی مقاوم برای مشارکت واحدها ارائه شده است. همچنین مساله مشارکت واحدها در اشل‌های بزرگ در مرجع [۱۷] بحث می شود که می تواند برای برنامه‌نویسان و اپراتورهای حرفه‌ای سیستم قدرت مفید باشد.

در حالت عادی احتمال در دسترس‌نبودن نیروگاه‌ها تحت تاثیر عوامل گوناگونی قرار دارد. بطور 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 دسترس‌نبودن نیروگاه‌ها با آنچه در حالت عادی مدل سازی می شد متفاوت خواهد بود. در وضعیت های بحرانی جنگی احتمال در دسترس نبودن نیروگاه‌ها وابسته به تعدادی پارامترهای استراتژیکی، پدافندی و جغرافیایی نیروگاه مورد نظر خواهد بود که شناسایی این پارامترها و مدل‌سازی نرخ احتمالی خروج واحدها در این مقاله ارائه خواهد شد.

در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه، هدف از حل مساله، بهبود یک شاخص عملکرد یگانه است که مقدار کمینه یا بیشینه آن، کیفیت پاسخ بدست آمده را بطور کامل منعکس می‌کند. اما در برخی موارد نمی‌توان صرفا با اتکا به یک شاخص، یک پاسخ فرضی برای مساله بهینه‌سازی را امتیازدهی نمود. در این نوع مسائل ناگزیریم که چندین تابع هدف یا شاخص عملکرد را تعریف نماییم و بطور همزمان، مقدار همه آنها را بهینه نماییم. دراین مقاله مساله در مدارقرار گرفتن نیروگاه‌ها بصورت یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی می‌شود. در این حالت غلاوه بر موضوع قابلیت اطمینان تاسیسات تولید، مساله امنیت و پایداری ولتاژ نیز دخالت داده می‌شود. دو تابع هزینه کل تولید واحدها و شاخص پایداری ولتاژ توابع هدف اصلی درنظر گرفته‌شده را تشکیل خواهند داد. بنابراین مساله مشارکت واحدها بصورت یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه با هدف تعیین وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و سطح بهینه تولید واحدها

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

تعریف می‌شود. برنامه‌ریزی چندهدفه اجازه می دهد که چندین تابع هدف را بطور همزمان بهینه نماییم. طراحی چندهدفه به تصمیم گیرنده کمک می‌کند که قضاوت‌های منطقی و ارزشمند برای تعیین طرح بهینه را ارائه کند. از آنجا که روش برنامه‌ریزی چندهدفه چندین روش حل بهینه را در مساله وارد می‌کند، می‌تواند یک مجموعه توزیع شده‌ی گسترده‌ای از جوابها را بنام مجموعه جوابهای پارتو با یک‌بار اجرای شبیه‌سازی بدست آورد. انعطاف‌پذیری طراحی و بدست‌آوردن جوابهای شایسته و مناسب از جمله مزایای برنامه‌ریزی چندهدفه است. بهینه سازی چندهدفه در مقالات متعدد برای حل مسائلی که سیستم قدرت با آن روبرو است، مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۱۸] پخش بار چند هدفه با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته است. برنامه‌ریزی چندهدفه واحدهای نیروگاهی با درنظر گرفتن آلودگیهای زیست محیطی در مرجع [۱۹] ارائه شده است. در مرجع [۲۰] پخش توان راکتیو بهینه و کنترل ولتاژ با بهینه‌سازی چند هدفه مطالعه شده است. در این مرجع یک راه‌حل برای رهایی از مینیمم محلی در الگوریتم بهینه‌سازی جست و جوی گرانش چندهدفه ارائه شده است.

در مدل ارائه شده پیشامدهای احتمالی شامل خروج ناگهانی نیروگاه‌ها در اثر حملات نظامی در چارچوب حوادثی با در نظر گرفتن احتمال رویداد آنها در نظر گرفته می‌شوند. در این روش برای هر ساعت که بطور جداگانه لحاظ می‌شود، با درنظرگرفتن واحدهای در مدار برای یک برنامه‌ریزی نوعی، پیشامدهای ممکن ایجاد می‌شود و با استفاده از مقادیر احتمال دسترس‌ناپذیری واحدهای تولیدی، مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان برای هر ساعت محاسبه می‌شود. عامل خروج یا دسترس‌ناپذیری یک نیروگاه در این مقاله بواسطه حملات نظامی دشمن است. با توجه به اینکه برای یک شبکه نمونه در شرایط جنگی نیروگاه‌های موجود بدلیل احتمال متفاوت حمله به آنها احتمال عدم دسترسی متفاوتی نسبت به سایر نیروگاه‌ها دارند لذا در جهت یافتن مقادیر احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها یک مدل برپایه موقعیت‌های فنی و جغرافیایی نیروگاه‌های موجود ارائه شده است. پارامترهایی که می‌تواند در مدل‌سازی احتمال خروج اجباری واحدها تاثیر داشته باشد در قالب سه فاکتور جغرافیایی، فنی و عمومی دسته‌بندی شده است که هریک از این فاکتورها بنوبه خود به چند زیر کلاس تقسیم‌بندی و وزن‌های متفاوتی به این کلاس‌ها اختصاص داده شده است. مقدار احتمالی عدم دسترس‌پذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی متاثر از این فاکتورها و زیر کلاس‌های مربوط به آنها است. در این مقاله به تمام پیشامدهای معقول در سیستم مقادیر احتمالی مقتضی متناسب با مدل ارائه شده نسبت داده می‌شود. با محاسبه احتمال پیشامدها از روی احتمال دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها، شاخص قابلیت اطمینان طرح مورد نظر محاسبه می‌شود. در صورتی که این شاخص در محدوده قابل قبول باشد برنامه تولید نهایی بدست می‌آید در غیر اینصورت انحراف از شاخص یاد شده بصورت یک ضریب جریمه در تابع هدف لحاظ می‌شود. مساله مورد نظر یک مدل ریاضی ناپیوسته غیرخطی دارد. که در این طرح برای حل آن از روش الگوریتم بهینه سازی چند هدفه جستجوی گرانش استفاده می‌شود.فرآیند تصمیم گیری بر اساس روش تصمیم گیری فازی برای پیدا کردن بهترین راه حل از بین مجموعه جواب‌های پارتوی بدست آمده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانش چندهدفه است که بهترین جواب را در یک محیط قطعی با یک تابع تصمیم‌گیری مشخص می‌کند.

## ۲- فرمول‌بندی مساله چندهدفه SCUC برای وضعیت‌هایاضطراری

**تابع هدف اول:**

در سیستم قدرت هدف مسئله SCUCحداقل کردن مجموع هزینه عملیاتی با توجه به مجموعه قیود امنیتی موجود در سیستم 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 استکه از رابطه (۱) بدست می‌آید.

$$GC_{i,t} = a_i + b_i OP_{i,t} + c_i OP_{i,t}^2 \qquad (۱)$$

که $OP_{i,t}$ 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 تولیدکننده آنلاین برای برآوردن تقاضای بار در سیستم مصرف می‌شود. از آنجایی که در مسئله SCUCموضوع کاهش هزینه کل در کنار قیود 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[۲۱] و [۲۲]:

$$BC_i = \varphi_i + \kappa_i(1 - e^{\frac{-PE_{off,i}}{\lambda_i}}) \qquad (۲)$$

که $\varphi_i$ هزینه شروع به کار داغ، $\kappa_i$ هزینه شروع به‌کار سرد، $\lambda_i$ ثابت زمانی خنک‌سازی است.

هزینه مجموع برای برنامه زمانبندی $TH$ دوره از مجموع هزینه تولید و هزینه شروع به‌کار بدست می‌آید[۲۳]:

$$OF = \sum_{t=1}^{TH}\sum_{i=1}^{NU} GC_{i,t}BV_{i,t} + BC_{i,t}(1 - BV_{i,t-1})BV_{i,t} \qquad (۳)$$

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

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



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

برای تلفیق قید قابلیت اطمینان LOLPدر ساختار مساله SCUC از کمیت جریمه $PV$ بعنوان 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[۲۱]:

$$TF_{compl} = OF + PV \times RRI \qquad (۴)$$

که مقدار $RRI$ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$RRI = \begin{cases} (LOLP_{GE} - LOLP_{\max})^2 \ , & LOLP_{GE} > LOLP_{\max} \\ 0 \ , & otherwise \end{cases} \qquad (۵)$$

مقدار $LOLP_{GE}$ از حاصل جمع مقادیر LOLP هر ساعت بدست می‌آید و بصورت زیر خواهد بود:

$$LOLP_{GE} = \sum_{t=1}^{TH} LOLP_t \qquad (۶)$$

تفاوت روش برنامه ریزی 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 دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط عادی است، محاسبه می‌شود. در روش ارائه شده مقدار LOLP از روی مقادیر دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی که در بخش قبلی ارائه و بصورت $FOV^{MI}$ نامگذاری شد بدست خواهد آمد. اگر 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 انجام می‌گیرد موجب بهبود شاخص‌هایی خواهد شد که بیانگر سطح پدافند غیرعامل نیروگاه‌ها هستند.

برای هر ساعت برنامه‌ریزی که بطور جداگانه در نظر گرفته می‌شود با درنظر گرفتن واحدهای در مدار برای یک برنامه ریزی نوعی پیشامدهای ممکن ایجاد و احتمال هر پیشامد با استفاده از مقادیر احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها و مدل ارائه شده در قسمت قبل محاسبه می‌شود.

برای بدست آوردن مقادیر LOLP در هر ساعت از ترکیب ظرفیت واحدهای تولیدی و آمادگی واحدهای تولیدی جهت تخمین میزان تولید آماده در سیستم با استفاده از جدول COPT 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 سیستم با یکدیگر برابر باشدمی‌توان این جدول را با استفاده از توزیع دو جمله‌ای محاسبه نمود اما در مساله UC مورد نظر ما امکان تساوی مقادیر احتمالی دسترس‌ناپذیری تمامی واحدهای تولیدی عملاً مقدور نمی‌باشد. دز این حالت با استفاده از مفاهیم پایه احتمال، داده‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند بطوریکه در این روش واحدها بصورت متوالی درسیستم اضافه می‌گردند. برای هر ساعت $t$ یک جدول COPT با استفاده از مقادیر احتمال دسترس ناپذیری هر واحد تشکیل می‌شود. هر ردیف $j = 1, 2, \cdots, n$ از جدول COPTیک 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.

LOLPبرای هر ساعت $t$ از رابطه زیر بدست می‌آید[۲۱]:

$$LOLP_t = \sum_{j=1}^{n} PR_j LOSS_j \ , \qquad t \in [1, TH] \qquad (۷)$$

که در آن $LOSS_j$ بصورت زیر بدست می‌آید:

$$LOSS_j = \begin{cases} 1 \ , & CR_j < PD_t \\ 0 \ , & otherwise \end{cases} \qquad (۸)$$

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

قید توازن توان، محدوده تولید توان، حداقل زمان روشن و خاموش بودن و قیود شیب واحدها[۲۴]:

$$\begin{cases} PD_t = \sum_{i=1}^{NU} OP_{i,t} \, BV_{i,t} \\ OP_i^{\min} \le OP_{i,t} \le OP_i^{\max} \\ T_i^{on} \ge MUT_i \\ T_i^{off} \ge MDT_i \\ OP(i,t) - OP(i,t-1) \le UR(i) \\ OP(i,t-1) - OP(i,t) \le DR(i) \end{cases} \qquad (۹)$$

**تابع هدف دوم:**

هدف از تابع هدف دوم مینیمم‌سازی شاخص STC برای تضمین پایداری ولتاژ سیستم است و با رابطه زیر داده شده است[۲۵]:

$$STC = Min\left\{ \sum_{for\ studied\ hour} VS \right\} \qquad (۱۰)$$

برای یافتن مینیمم STC بهینه نیاز است تا مقدار VS برای همه باس بارها محاسبه شود. با بازنویسی معادله بالا خواهیم داشت[۲۵, ۲۶]:

$$STC = Min\left\{ \sum_{for\ studied\ hour} \ \underset{j \in N_L}{Max} \left| \frac{V_j - \sum_{i \in N_G} H_{ji} V_i}{V_j} \right| \right\} \qquad (۱۱)$$

مقادیر $H_{ji}$ از ماتریس $H_{LG}$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$H_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1}[Y_{LG}] \qquad (۱۲)$$

که $Y_{LL}$ و $Y_{LG}$ جزئی از ماتریس $Y_{bus}$ شبکه هستند.

ستون‌های ماتریس $H_{LG}$ با تعداد باس‌های ژنراتور و ردیف ها با تعداد باس‌بارها در ارتباط است. این ماتریس اطلاعاتی در مورد هر باس‌بار در ارتباط با مقدار توانی که باید از هر ژنراتور شبکه گرفته شود، می دهد. برای تضمین پایداری شرط $VS \le 1$ برای $j$امین باس باید برقرار شود. به صورت کلی و بعد از جمع اهداف و محدودیت ها، مساله می تواند بصورت یک عملیات بهینه‌سازی دوهدفه بصورت زیر بیان شود:

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

$$Min\,F(x,u,p)=Min\{TF_{compl},STC\} \quad (۱۳)$$

$$h(x,u,p)=0 \quad \text{(equality constraints)} \quad (۱۴)$$

$$g(x,u,p)>0 \quad \text{(inequality constraints)} \quad (۱۵)$$

که $g(x,u)$ و $h(x,u)$ به ترتیب محدودیت‌های مساوی و نامساوی هستند. این مساله بهینه‌سازی دوهدفه می تواند با استفاده از روش الگوریتم بهینه‌سازی چند گانه حل شود.

## ۳- بهینه سازی چندهدفه

### ۳-۱- مفهوم غلبه

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بیش از یک تابع هدف دارند. اگر $\vec{x}=[x_1,x_2,\ldots,x_n]$ آرایه متغیرهای ورودی یا بعبارتی بردار تصمیم باشد و $f_i:R^n\to R,\ i=1,\ldots,k$ در این صورت $k$ هدف و تابع شایستگی تعریف می‌شود و هدف کمینه‌کردن $\vec{f}(\vec{x})=[f_1(\vec{x}),f_2(\vec{x}),\cdots,f_k(\vec{x})]$ است. البته شرایط و قیدهای زیر را نیز می‌توان در نظر گرفت[۲۷]:

$$g_i,h_j:R^n\to R, i=1,\ldots,m, j=1,\ldots,p$$
$$g_i(\vec{x})\le 0,\ h_i(\vec{x})=0 \quad (۱۶)$$

همانطوری که مشخص است مسائل چندهدفه مجموعه‌ای از جوابها را تولید می‌کنند که نسبت بهم برتری ندارند و این مجموعه را بهینه پارتو می‌نامند.

تعریف ۱: برای دو بردار $\vec{x},\vec{y}\in R^k$ گفته می‌شود که $\vec{x}$ بردار $\vec{y}$ را مغلوب می‌کند ($\vec{x}\prec\vec{y}$)، در صورتی که رابطه $x_i<y_i$ برای $i=1,\ldots,k$ برقرار باشد، آنگاه $f(\vec{x})<f(\vec{y})$ . بعبارت دیگر در هیچ بعدی $\vec{x}$ بدتر از $\vec{y}$ نباشد. بدین ترتیب بردار تصمیم $x$ متعلق به مجموعه مجاز یک پاسخ بهینه پارتو است، اگر بردار تصمیم دیگری مانند $y$ متعلق به مجموعه مجاز $F$ وجود نداشته باشد که بر آن غلبه کند.

### ۳-۲- الگوریتم جست و جوی گرانش چندهدفه

الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه برای برآورده کردن اهداف از سه روش استفاده می‌کند: الف) برنامه تخصیص برازندگی. این برنامه برای هر فرد در نظر می‌گیردکه چه تعداد از اجرام را مغلوب و خودش توسط چه تعداد ازاجرام مغلوب می‌شود. ب) برآورد تراکم نزدیکترین همسایه. این روش، اجازه راهنمایی دقیقتر فرایند جستجو را می‌دهد. ج) روش برش آرشیو که نگهداری راه حله ای حدی را تضمین می‌کند. الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه از یک جمعیت منظم و یک آرشیو، برای نگهداری بهترین راه حل ها استفاده می‌کند.

## ۴- ابزار تصمیم گیری

هنگامی که جواب‌ها بر مبنای مجموعه بهینه‌سازی پارتو توسط الگوریتم MOGSA تخمین زده شد، نیاز است که یکی از آنها را برای اجرا و پیاده‌سازی انتخاب کنیم. از دیدگاه تصمیم‌گیرنده، انتخاب یک جواب از بین جوابهای بهینه‌سازی پارتو یک روش استقرائی نامیده می‌شود و روش تصمیم‌گیری سطح بالایی را نیاز دارد. مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه یا MADM در ارزیابی چنین مسائلی بکار گرفته می‌شوند.

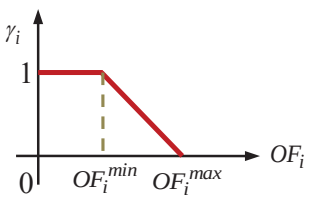
**ایجاد تصمیم گیری فازی:** مجموعه‌های فازی با معادلاتی که توابع عضویت نامیده می‌شود، تعریف می‌شوند. این توابع درجه عضویت را در مجموعه‌های فازی با استفاده از مقادیر از ۰ تا ۱ نشان می‌دهند. مقدار صفر نشان‌دهنده ناسازگاری با مجموعه است، در صورتیکه مقدار ۱ سازگاری کامل را نتیجه می‌دهد. زمانیکه مجموعه بهینه پارتو حاصل می‌شود، نیاز است که یک جواب را از میان آرشیو جواب‌ها انتخاب کنیم. برای این منظور توابع عضویت برای نشان دادن مقصود هر تابع هدف معرفی می‌شود. هر تابع عضویت با دانش ذاتی و تجربی از تصمیم‌گیرنده تعریف شده است. یک تابع عضویت خطی ساده برای هر تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. تابع عضویت برای توابع هدف مینیمم‌شده به صورت زیر تعریف می‌شود[۲۸, ۲۹]:

$$\gamma_i=\begin{cases}1 & , \quad OF_i\le OF_i^{min}\\ \dfrac{OF_i^{max}-OF_i}{OF_i^{max}-OF_i^{min}} & , OF_i^{min}<OF_i<OF_i^{max}\\ 0 & , \quad OF_i\ge OF_i^{max}\end{cases} \quad (۱۷)$$

و برای توابع هدف ماکزیمم شده:

$$\gamma_i=\begin{cases}0 & , \quad OF_i\le OF_i^{min}\\ \dfrac{OF_i-OF_i^{max}}{OF_i^{max}-OF_i^{min}} & , OF_i^{min}<OF_i<OF_i^{max}\\ 1 & , \quad OF_i\ge OF_i^{max}\end{cases} \quad (۱۸)$$

که $OF_i^{max}$ و $OF_i^{min}$ به ترتیب مقادیر ماکزیمم و مینیمم از تابع هدف $i$ام در میان همه جوابهای ممکن است. تابع عضویت $\gamma$ بین ۰ و ۱ تغییر می‌کند. شکل (۲) یک نمای کلی از تابع عضویت استفاده شده را نشان می‌دهند.




**شکل (۲): تابع عضویت خطی**

برای هر جواب $k$، تابع عضویت نرمالیزشده $\gamma^k$ بصورت زیر محاسبه می‌شود:




[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

$$\gamma^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ob}} \gamma_i^k}{\sum_{k=1}^{M}\sum_{i=1}^{N_{ob}} \gamma_i^k} \quad (۱۹)$$

که $M$ و $N_{ob}$ به ترتیب تعداد جوابها و توابع هدف هستند.

## ۵- مدل ارائه شده برای تعیین مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی

در حالت عادی برای مدل‌سازی احتمال در دسترس‌نبودن 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 سیستم در وضعیت تهاجم را ارائه خواهد داد. که این شاخص‌ها می‌توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سیستم 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 برنامه ریزی شود. بطور کلی تحلیل ریسک یک مجوعه شامل شناسایی تهدیداتی که یک واحد تولیدی را متأثر می‌سازند، اولویت بندی تهدیدات، بررسی و تحلیل سناریوهای تهدید و در نهایت محاسبه میزان ریسک برای نیروگاه است. بطور کمی میزان ریسک یک نیروگاه در برابر تهدید از حاصل ضرب عوامل بوجود آورنده آن تهدید بدست می‌آید. بعبارت 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 بدست خواهد آمد. عوامل اساسی که می‌تواند در مدلسازی احتمال خروج اجباری نیروگاه در شرایط جنگی تأثیر داشته باشد را می‌توان به سه عامل جغرافیایی، فنی و عمومی تقسیم بندی کرد. هر یک از این عوامل بنوبه خود به چند زیر کلاس طبقه بندی می‌شوند که هریک از این کلاس‌ها را نیز می‌توان به جند دسته تقسیم بندی نمود و وزن‌های متفاوتی را می‌توان به آن‌ها اختصاص داد. بنابراین اگر وزن سه عامل فنی، جغرافیایی، و عمومی را برای یک نیروگاه بصورت $SC_i^{Technical}$، $SC_i^{Geographic}$ و $SC_i^{Genera}$ و ضریب اهمیت هر عامل را بصورت $\Gamma^{Technical}$، $\Gamma^{Geogra}$ و $\Gamma^{Gene}$ در نظر بگیریم، مقدار احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاه $i$ ام در شرایط جنگی یا $FOV_i^{MI}$ بصورت زیر تعیین خواهد شد:

$$FOV_i^{MI} = (\Gamma^{Technical}\ SC_i^{Technical})\times (\Gamma^{Geographic}\ SC_i^{Geographic})\times(\Gamma^{General}\ SC_i^{General}) \quad (۲۰)$$

که وزن هر کدام از عوامل بنوبه خود از ضرب وزن‌های زیر کلاس مربوط به همان عامل بدست خواهد آمد:

$$SC_i^{Technical} = \prod(\omega_{Tech,i}^{PR}, \omega_{Tech,i}^{HL}, \omega_{Tech,i}^{SP}, \omega_{Tech,i}^{EP}) \quad (۲۱)$$

$$SC_i^{Geographic} = \prod(\omega_{Geo,i}^{M}, \omega_{Geo,i}^{AL}, \omega_{Geo,i}^{DPS}, \omega_{Geo,i}^{DBS}, \omega_{Geo,i}^{DMC}, \omega_{Geo,i}^{DMS}, \omega_{Geo,i}^{CDR}, \omega_{Geo,i}^{FI}) \quad (۲۲)$$

$$SC_i^{General} = \omega_{Ge,i} \quad (۲۳)$$

مقادیر وزنی هرکدام از زیر کلاس‌های عامل‌های فنی، جغرافیایی و عمومی بصورت زیر تعریف می‌شوند:

### الف) عامل فنی

**کلاس ۱:** میزان قدرت نیروگاه

با توجه به قدرت و ظرفیت هر یک از واحدهای نیروگاهی و هم چنین 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. همانطوری که در جدول (۱) مشاهده می‌شود کلاس ۱ از گروه عامل فنی به چند دسته تقسیم بندی شده و بر حسب اهمیت هر یک از این دسته‌ها وزن‌های متفاوتی اختصاص داده شده است. بعنوان 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 به‌عبارت دیگر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌های با ظرفیت بالاتر نسبت به نیروگاه‌های با ظرفیت پایین‌تر در زمان جنگی بیشتر است.

**جدول (۱): میزان قدرت نیروگاه (کلاس ۱ از زیر گروه عامل فنی)**

| ردیف | میزان قدرت | $\omega_{Tech}^{PR}$ |
|---|---|---|
| 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 تسریع در دسترس ناپذیری نیروگاه در مواقع جنگی خواهد شد. طوریکه‌که نیروگاه‌های با طول عمر بالا در برابر حملات کم رنگ دشمن هم آسیب پذیر خواهد بود. یک دسته بندی کلی از این کلاس و اختصاص وزن به هر کدام از این دسته‌ها در جدول (۲) داده شده است.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

**جدول (۲)**: قدمت و طول عمر نیروگاه (کلاس ۲ از زیر گروه عامل فنی)

| ردیف | طول عمر | $\omega_{Tech}^{HL}$ |
|---|---|---|
| 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 ۱۰ سال | ۰/۳ |
| ۹ | نیروگاه‌های با طول عمر ۱۰ تا ۵ 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 (۳) و نسبت‌های هر نیروگاه می‌توان نیروگاه‌های با تولید بالا را در جایگاه نیروگاه‌های حساس قرار داد.

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

| ردیف | سهم تولید | $\omega_{Tech}^{SP}$ |
|---|---|---|
| ۱ | نیروگاه‌های با تولید بیش از ۲۰۰۰ گیگاوات ساعت | ۱ |
| ۲ | نیروگاه‌های با تولید ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ گیگاوات ساعت | ۰/۸ |
| ۳ | نیروگاه‌های با تولید ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ گیگاوات ساعت | ۰/۶ |
| ۴ | نیروگاه‌های با تولید ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ گیگاوات ساعت | ۰/۴ |
| ۵ | نیروگاه‌های با تولید کمتر از ۵۰۰ گیگاوات ساعت | ۰/۲ |

**کلاس ۴:** دسته بندی نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته

سطح زیر منحنی بار که میزان مصرف انرژی الکتریکی را در طول زمان معین می‌کند، به سه ناحیه تقسیم می‌گردد. این نواحی را ناحیه بار پایه، ناحیه بار میانی و ناحیه بارپیک می‌نامیم که به آن‌ها بار پایه، بار میانی و بار پیک نیز می گویند. برای احداث یک نیروگاه می‌بایستی هدف از احداث آن تأمین انرژی الکتریکی برای یکی از نواحی سطح زیر منحنی مصرف شبکه باشد. با توجه به مطالب فوق و جدول (۴) نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته به چهار دسته عمده تقسیم بندی می‌شوند. بدیهی است نیروگاه‌هایی که برای تأمین بار پایه کابرد دارند عمدتاً بار بیشتری را تحت پوشش قرار می‌دهند و عمدتاً بعنوان نیروگاه‌های حساس شناخته می‌شوند که ممکن است مورد حمله دشمن قرار بگیرد.

**جدول (۴): دسته بندی نیروگاه‌ها از نظر تولید الکتریسیته (کلاس ۴ از زیر گروه عامل فنی)**

| ردیف | نوع نیروگاه | $\omega_{Tech}^{EP}$ |
|---|---|---|
| ۱ | نیروگاه‌هائی که برای تأمین بار پایه بکار می‌روند | ۱ |
| ۲ | نیروگاه‌هائی که برای تأمین بار میانی بکار می‌روند | ۰/۷۵ |
| ۳ | نیروگاه‌هائی که برای تأمین بار پیک بکار می‌روند | ۰/۵ |
| ۴ | نیروگاه‌هائی که جهت تولید برق اضطراری مجتمع ها 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 تاسیسات در محلی که توسط دشمن به سهولت قابل تشخیص و رویت نباشد، جزو عوامل جغرافیایی هستند. با توجه به جدول (۵) احتمال هدف قرار دادن نیروگاه‌هایی که در مناطق دشت و هموار قرار دارد بیشتر از مناطق دیگر است. از دیدگاه پدافند غیرعامل نیروگاه‌های احداث شده در دشت‌های مسطح یا نسبتاً هموار را نمی‌توان از دید دشمن مخفی و پنهان نگاه داشت که این امر آسیب پذیری نیروگاه را افزایش خواهد داد.

**جدول (۵): دسته بندی محل جغرافیایی نیروگاه‌ها از نظر کوهستانی بودن منطقه (کلاس ۱ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع منطقه | $\omega_{Geo}^{M}$ |
|---|---|---|
| ۱ | مناطق دشت مانند، مناطق بیابانی و مسطح | ۱ |
| ۲ | مناطق جلگه ای، مناطق معمولی | ۰/۶ |
| ۳ | مناطق کوهستانی شدید، مناطق دره مانند یا مناطق دارای رشته کوه | ۰/۲ |

کلاس ۲: ارتفاع از سطح دریا

نیروگاه‌هایی که در مناطق مرتفع احداث و ساخته شده‌اند با احتمال کم می‌توانند مورد هدف قرار بگیرند (جدول (۶)).

**جدول (۶): دسته بندی محل جغرافیایی نیروگاه‌ها از نظر ارتفاع (کلاس ۱ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع ارتفاع | $\omega_{Geo}^{AL}$ |
|---|---|---|
| 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 |

کلاس ۳: پراکندگی استراکچرهای نیروگاهی

در طراحی و چیدمان اجزای نیروگاه‌ها باید اصل پراکندگی را لحاظ نمود. بدین‌منظور تجهیزات حیاتی و پشتیبان آن‌ها و همچنین موقعیت قرارگیری مخازن سوخت باید به‌گونه‌ای باشند که دراثر آتش سوزی یا موج ناشی از انفجار سایر تجهیزات و تاسیسات، حتی‌الامکان



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017

آسیب نبینند. با توجه به جدول (۷) یک دسته بندی کلی برای این کلاس انجام شده است.

**جدول (۷): پراکندگی استراکچرهای نیروگاهی (کلاس ۳ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع وسعت | $\omega_{Geo}^{DPS}$ |
|---|---|---|
| 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 ۱۵۰ تا ۲۰۰ هکتار | ۰/۲ |
| ۶ | نیروگاه‌هایی با وسعت ۲۰۰ هکتار به بالا | ۰/۱ |

**کلاس ۴:** فاصله نیروگاه از مرز کشور

چنانچه محل استقرار نیروگاه بر اساس تقسیمات بعمل آمده در مناطق مرزی و استان‌های محروم قرار داشته باشند احتمال دسترس ناپذیری بیشتری در زمان حملات نظامی دارند جدول (۸). ایجاد تاسیسات نیروگاهی در نزدیکی مرزها موجب سادگی شناسایی و هدف‌یابی آسان آن‌ها توسط دشمن می‌گردد.

**جدول (۸): دسته بندی فاصله نیروگاه‌ها از مرز کشور (کلاس ۴ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Geo}^{DBS}$ |
|---|---|---|
| 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

دسته بندی نیروگاه‌ها با توجه به این کلاس می‌تواند با درنظر گرفتن مواردی همچون نزدیکی به مراکز بار، نزدیکی به مراکز سوخت رسانی و تأمین انرژی اولیه و کوریدورهای امکان انتقال برق تولیدی انجام شود. با توجه به جدول (۹) بعد مسافت و فاصله بین نیروگاه با مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش می‌تواند این پارامتر را توصیف کند.

**جدول (۹): دسته بندی فاصله نیروگاه‌ها از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی شرکت تحت پوشش (کلاس ۵ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Geo}^{DMC}$ |
|---|---|---|
| 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 |

**کلاس ۶:** فاصله نیروگاه از مراکز نظامی و سایت‌های موشکی

جهت 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. دسته بندی فاصله نیروگاه از سایت‌های دفاعی در جدول (۱۰) انجام شده است.

**جدول (۱۰): دسته بندی فاصله نیروگاه‌ها از سایت‌های دفاعی (کلاس ۶ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Geo}^{DMS}$ |
|---|---|---|
| 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:** درجه بندی استتار نیروگاه

استتار در نیروگاه‌ها دو جنبه دارد: اول همگون بودن تاسیسات و تجهیزات با محیط اطراف که بوسیله رنگ آمیزی یا استفاده از مواد طبیعی و مصنوعی امکان پذیر است. دوم منحرف کردن توجه دشمن با تغییر شکل ظاهری تاسیسات. برای تشخیص تاسیسات و تجهیزات در عکس‌های هوایی و همچنین اطلاعات جمع آوری 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 (تاسیسات)، 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 درجه بندی معین از لحاظ استتار مطابق جدول (۱۱) تعیین نمود.

همرنگ بودن تجهیزات و ساختمان‌ها به رنگ محیط یکی از اقداماتی است که باعث اختفای تجهیزات می‌گردد. این همرنگ سازی در سطوح سقف ساختمان‌های اداری، اتاق فرمان و مخازن سوخت انجام می‌گیرد.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

همچنین نشان ندادن نمای خارجی نیروگاه در رسانه‌ها به ویژه در ارتباط با محیط اطراف و جاده‌ها و کاشت درختان بلند در اطراف نیروگاه ها می‌تواند تا حدودی باعث اختفاء نیروگاه شود.

**جدول (۱۱): دسته بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه استتار (کلاس ۷ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Geo}^{CDR}$ |
|---|---|---|
| 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 |

**کلاس ۸:** درجه بندی استحکامات نیروگاه‌ها

با توجه به شرایط و امکانات، میزان اهمیت و آسیبپ ذیری نقاط حیاتی و حساس، در محل های مناسب و در اطراف تجهیزات، سازه‌های موقتی ایجاد می‌گردد تا مانع اصابت مستقیم موشک، بمب یا ترکش این مهمات به تجهیزات یا تاسیسات گردیده و اثرات ترکش یا موج انفجار را به‌طور نسبی خنثی نماید. برای ایجاد این استحکامات در شرایط اضطراری از کیسه‌های شنی آماده استفاده می‌شود که در اطراف تجهیزات قرار می‌گیرد. درمورد تجهیزات بزرگ نیز از بشکه‌های پر از شن استفاده می‌شود. دراطراف 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 نمود. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نیروگاه‌ها را از دیدگاه استحکامات ضروری مطابق جدول (۱۲) دسته بندی نمود.

**جدول (۱۲): دسته بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه استحکامات بکار رفته (کلاس ۸ از زیر گروه عامل جغرافیایی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Geo}^{FI}$ |
|---|---|---|
| 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 |

**ج) عامل عمومی**

کلاس ۱: سابقه تاریخی حملات نظامی

در حوزه عوامل عمومی می‌توان 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 بطوریکه تعداد حملات بیشتر نشان دهنده توجه بیش از پیش دشمن به یک نیروگاه و حساس بودن آن است (جدول (۱۳)).

**جدول (۱۳): دسته بندی نیروگاه‌ها از دیدگاه سابقه تاریخی حملات نظامی (کلاس ۱ از زیر گروه عامل عمومی)**

| ردیف | نوع مسافت | $\omega_{Ge}$ |
|---|---|---|
| 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 |

بطور معمول انتخاب ضرایب باید برحسب اولویت دهی به وضعیت یک نیروگاه باشد. بعنوان 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 برنامه ریز یا طراح سیستم خواهد بود. در وضعیت درنظر گرفته شده چون دسته بندی براساس گام‌های مساوی است. مقدار عدد یک را به تعداد گام‌ها تقسیم کرده و آن را بنام وزن هر گام نام گذاری می‌کنیم. به بدترین دسته عدد یک را اختصاص می‌دهیم و برای دسته‌های بعدی از عدد یک به مقدار وزن هر گام کم می‌کنیم. این روش، یک روش در نظر گرفته شده در حالتی است که بخواهیم تمام عوامل را به یک نسبت در مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها دخالت دهیم. برای مواردی که برنامه ریز بخواهد یک عامل یا یک کلاس را بیشتر مد نظر قرار دهد می‌بایست ضرایب را بگونه ای انتخاب بکند که FOV نیروگاه بیشتر متأثر از ضرایب همان کلاس یا عامل باشد. بعبارت دیگر این ضرایب خود یک نوع انعطاف پذیری را در طراحی سیستم ایجاد خواهد کرد که با تعیین صحیح و دقیق این ضرایب توسط برنامه ریز به نوعی طراحی مناسبی را داشته باشیم.

## ۶- پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی برای حل مساله

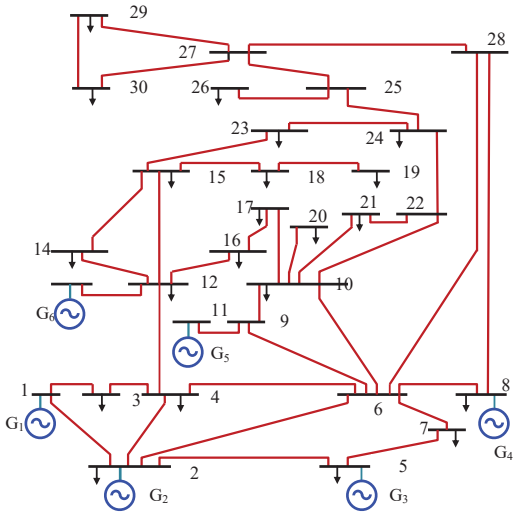
سیستم قدرت ۳۰ باسه IEEE برای مطالعه انتخاب شده است. این سیستم مشتمل بر ۶ نیروگاه تولیدی، ۴۱ خط انتقال، ۲۰ بار و ۳۰ باس است. شماتیک تک خطی سیستم تست ۳۰ باسه در شکل (۳) نشان داده شده است. در این بخش روش برنامه ریزی ارائه شده بر روی سیستم نمونه ۳۰ باسه IEEE اجرا می شود. هدف از برنامه ریزی پیشنهادی مقاوم سازی شبکه در جهت تداوم نیرورسانی به مراکز و بارهای حساس در مواقع جنگی است. اطلاعات مربوط به واحدها و تقاضای مصرف در پیوست الف داده شده است.



Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.3 Fall 2017

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]




**شکل (۳): سیستم ۳۰ باسه مورد مطالعه**

روندنمای امنیت-مقید مشارکت واحدهای تولیدی در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطوری که در بخش های قبلی به آن اشاره شد احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی متاثر از سه عامل اصلی فنی، جغرافیایی و عمومی است. در آنالیز قابلیت اطمینان سیستم در حالت عادی داده های ورودی جهت محاسبه دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها، میانگین زمان تعمیر و نرخ های خرابی آماری واحدهای تولیدی است. این نرخ خرابی کاملا تصادفی فرض شده و عمدتا ناشی از حوادث طبیعی، مشکلات مداری و خطاهای انسانی است. در وضعیت درنظر 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 شاخص های قابلیت اطمینان سیستم در و ضعیت تهاجم را ارائه خواهد کرد که این شاخص ها می توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سیستم در مقابل حملات و اختلالات عمدی باشند. با درنظر گرفتن مدل پیشنهادی برای محاسبه احتمال دسترس ناپذیری واحدها، مهمترین وظیفه برای یک متخصص پدافند غیرعامل در سیستم های قدرت برای برنامه ریزی امن در مدار قرار گرفتن واحدها، تعیین و استخراج ضرایب وزنی برای هریک از کلاس های سه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی است. تخصیص وزن برای هر یک از این کلاس ها می تواند با بررسی آماری، میدانی، دریافت اطلاعات از سازمان های مربوطه، تخمین داده و بدست آوردن سابقه هر واحد انجام گیرد. جدول (۱۴) بیانگر وزن های اختصاص یافته به هریک از ۶ نیروگاه مربوطه در سیستم تست را نشان می دهد. بعنوان مثال برای نیروگاه شماره ۱، با بررسی وزن های اختصاص یافته می توان دریافت که این نیروگاه در سه حوزه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی تحت کلاس های زیر در نظر گرفته است:

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 تامین بار

عامل جغرافیایی)

کلاس ۱: قرار داشتن در مناطق دشت مانند، مناطق 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 بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر،

کلاس ۵: فاصله از مراکز اصلی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر

کلاس ۶: فاصله از سایت های دفاعی بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر،

کلاس ۷: درجه استتار نوع ضعیف (D)، کلاس ۸: درجه استحکام نوع ضعیف ($F_1$)

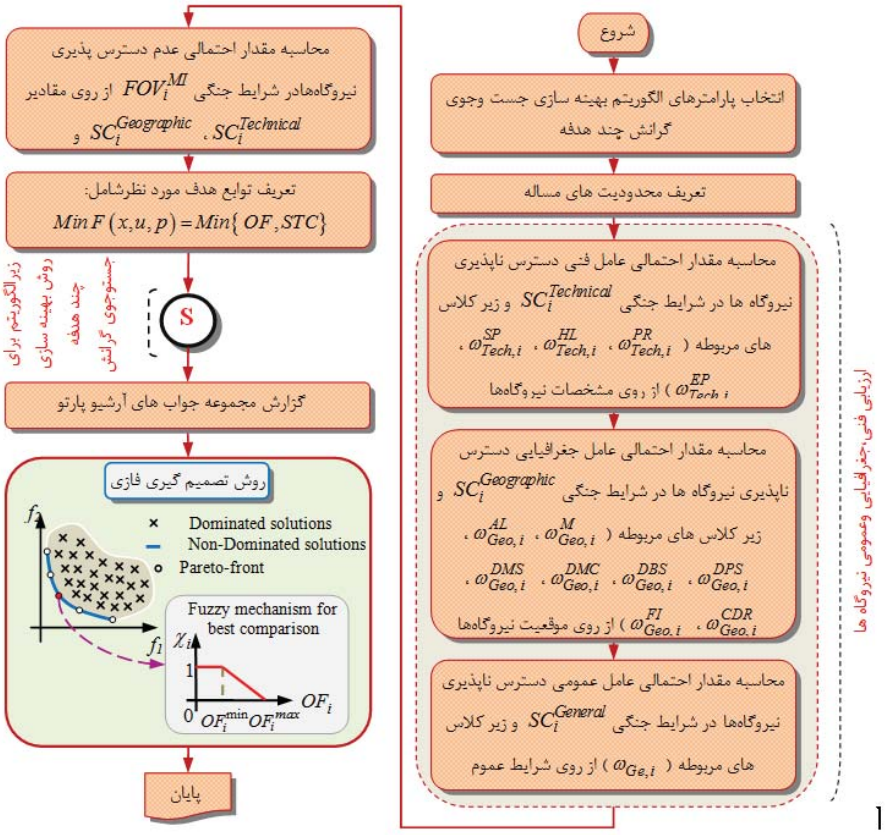
عامل عمومی) کلاس ۱: سابقه حملات نظامی بین ۱۵ تا ۲۰ بار

با توجه به جدول (۱۵) و (۱۶) چهار سناریو و سه نقطه کار برای ارزیابی روش ارائه شده در نظر گرفته می شود. در چارچوب اول فرض براین است که مقدار دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن مدل ارائه شده در این مقاله بدست می آید. در چارچوب دوم مقدار دسترس ناپذیری نیروگاه‌ها بطور یکسان برابر ۰/۰۲ برای تمام نیروگاه‌ها فرض شده است.

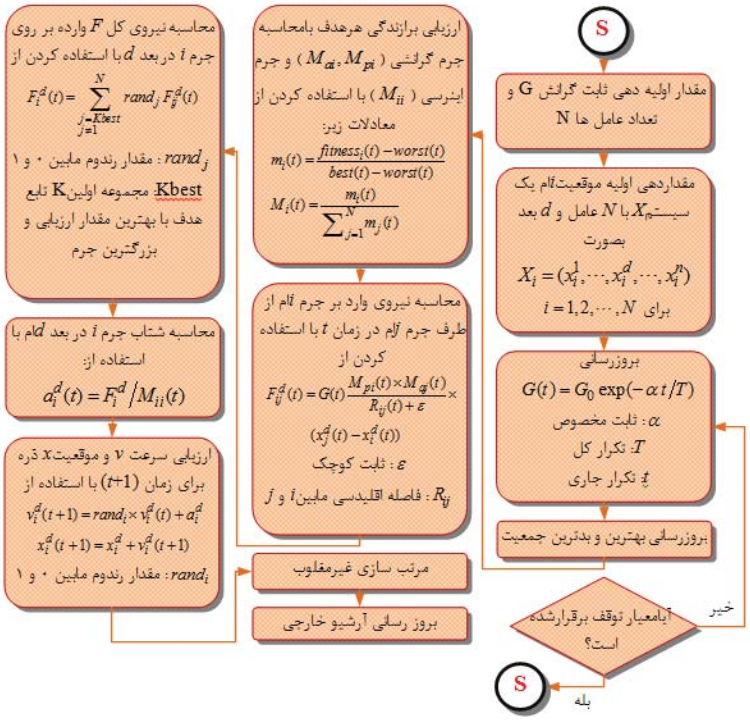
جهت مقاوم بودن روش برنامه ریزی پیشنهادی از دو نوع الگوریتم استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)[۳۰] و الگوریتم بهینه سازی جست‌وجوی گرانش چندهدفه (MOGSA). جداول شماره (۱۷)-(۲۰) نتیجه بدست آمده از اجرای برنامه طی الگوریتم بهینه سازی MOGSA برای چهار سناریوی در نظر گرفته شده و سه نقطه کار را نشان می دهد و میزان تولید هر واحد را در هر ساعت از دوره مورد بررسی ارائه می کند.

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]




**شکل (۴): روند نمای الگوریتم ارائه شده**




**شکل (۵): زیر الگوریتم S درنظر گرفته شده در شکل ۴**

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

**جدول (۱۴): تخصیص وزن به هرنیروگاه سیستم تست**

| | | Unit ۱ | Unit ۲ | Unit ۳ | Unit ۴ | Unit ۵ | Unit ۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| عامل فنی | $\omega_{Tech}^{PR}$ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۰۵۰۰ | ۰/۰۵۰۰ |
| | $\omega_{Tech}^{HL}$ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۳۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۹۰۰۰ |
| | $\omega_{Tech}^{SP}$ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ |
| | $\omega_{Tech}^{EP}$ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ |
| عامل جغرافیایی | $\omega_{Geo}^{M}$ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{AL}$ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{DPS}$ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{DBS}$ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۲۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{DMC}$ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۲۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ | ۰/۴۰۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{DMS}$ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۸۵۰۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۷۰۰۰ | ۰/۵۵۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{CDR}$ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۲۵۰۰ |
| | $\omega_{Geo}^{FI}$ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۵۰۰۰ | ۰/۷۵۰۰ | ۰/۲۵۰۰ |
| عامل عمومی | $\omega_{Ge}$ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۸۰۰۰ | ۰/۶۰۰۰ |
| احتمال | $FOV^{MI}$ | ۰/۰۷۶۵ | ۰/۱۰۷۵ | ۰/۱۰۱۴ | ۰/۱۳۹۶ | ۰/۲۳۹۵ | ۰/۲۱۱۷ |

**جدول (۱۵): سناریوهای در نظر گرفته شده**

| سناریو | چارچوب | مقدار $LOLP_{max}$ درنظر 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 % |

**جدول (۱۶): نقاط کار درنظر گرفته شده**

| نقطه کار (Operating point) | شرایط |
|---|---|
| Operating point ۱ | نقطه ای از منحنی پارتو که تابع هدف OF در آن مینیمم است |
| Operating point ۲ | نقطه ای از منحنی پارتو که از اعمال تصمیمگیریفازی بدست میآید |
| Operating point ۳ | نقطه ای از منحنی پارتو که تابع هدف STC در آن مینیمم است |

برای مقایسه مقادیر توابع هدف طی سناریوها، نقاط عملکرد و روش های حل مختلف نامگذاریهای زیر درنظر گرفته می شود:

- $OP_1$: نقطه کار ۱
- $OP_2$: نقطه کار ۲
- $OP_3$: نقطه کار ۳

- $C_1$: سناریوی ۱ مبتنی بر روش حل MOGSA
- $C_2$: سناریوی ۲ مبتنی بر روش حل MOGSA
- $C_3$: سناریوی ۳ مبتنی بر روش حل MOGSA
- $C_4$: سناریوی ۴ مبتنی بر روش حل MOGSA
- $C_5$: سناریوی ۱ مبتنی بر روش حل NSGA-II

**جدول (۱۷): وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی اول $S_1$ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه**

| | | | $TH_1$ | $TH_2$ | $TH_3$ | $TH_4$ | $TH_5$ | $TH_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Multi-objective Gravitational Search Algorithm | OP۱ | Unit ۱ | ۰,۵۵۳۶ | ۰,۷۴۸۷ | ۰,۶۰۳۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۶۷۶۴ | ۰,۷۵۲۸ |
| | | Unit ۲ | ۰,۴۶۴۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۱۹۸ | ۰,۵۷۳۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۵۰۸ |
| | | Unit ۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۷۷۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۴۶۲ | ۰,۴۷۵۰ | ۰,۲۶۱۶ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۰۰۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۴۲۱ | ۰,۱۴۶۴ | ۰,۲۶۷۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۰۱۵ | ۰,۱۳۰۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۱۰۸ | ۰,۱۵۱۴ | ۰,۱۳۲۹ |
| | OP۲ | Unit ۱ | ۰,۵۵۳۲ | ۰,۷۴۸۲ | ۰,۶۰۳۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۶۷۶۴ | ۰,۷۵۱۹ |
| | | Unit ۲ | ۰,۴۶۵۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۴۲۵ | ۰,۵۷۰۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۸۰۵ |
| | | Unit ۳ | ۰,۳۸۶۹ | ۰,۴۷۶۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۴۶۷ | ۰,۴۷۳۱ | ۰,۲۲۸۷ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۱۷۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۸۲۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۴۲۵ | ۰,۱۹۹۱ | ۰,۲۶۶۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۰۰۸ | ۰,۱۳۱۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۱۱۴ | ۰,۱۵۲۲ | ۰,۲۷۲۴ |
| | OP۳ | Unit ۱ | ۰,۵۵۳۶ | ۰,۷۴۸۶ | ۰,۶۰۳۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۶۷۶۸ | ۰,۷۵۱۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۴۶۴۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۱۹۸ | ۰,۵۷۳۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۵۰۹ |
| | | Unit ۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۷۶۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۴۶۲ | ۰,۴۷۵۰ | ۰,۲۶۱۶ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۴۶۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۰۰۳ |
| | | Unit ۵ | ۰,۱۴۵۳ | ۰,۱۴۲۱ | ۰,۱۴۶۸ | ۰,۲۶۷۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۰۱۴ | ۰,۱۳۰۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۱۰۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۳۴۰ |

**جدول (۱۸): وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی دوم $S_2$ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه**

| | | | $TH_1$ | $TH_2$ | $TH_3$ | $TH_4$ | $TH_5$ | $TH_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Multi-objective Gravitational Search Algorithm | OP۱ | Unit ۱ | ۰,۶۶۸۹ | ۰,۶۶۵۲ | ۰,۷۷۲۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۴۳۱ | ۰,۷۲۱۵ |
| | | Unit ۲ | ۰,۴۸۰۴ | ۰,۶۱۴۸ | ۰,۲۷۴۷ | ۰,۷۱۶۷ | ۰,۲۱۳۲ | ۰,۲۵۰۳ |
| | | Unit ۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۹۰۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۱۶۷ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۴ | ۰,۴۹۶۵ | ۰,۴۹۷۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۰۳۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۱۹۳ |
| | | Unit ۵ | ۰,۲۶۹۲ | ۰,۲۸۳۴ | ۰,۱۶۲۳ | ۰,۱۳۴۳ | ۰,۱۹۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۱۴۹۰ | ۰,۱۴۱۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۸۱۹ | ۰,۱۹۳۶ | ۰,۲۰۱۳ |
| | OP۲ | Unit ۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۸۴۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۴۹۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۹۳۳ |
| | | Unit ۲ | ۰,۸۰۰۰ | ۰,۵۵۳۸ | ۰,۷۴۴۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۶۰۰۰ | ۰,۶۶۳۶ |
| | | Unit ۳ | ۰,۵۰۰۰ | ۰,۴۴۸۴ | ۰,۳۲۷۱ | ۰,۱۶۰۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۵۱۳ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۶۶۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۰۳۶ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۱۱۳ | ۰,۱۷۵۹ | ۰,۲۷۷۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۲۵۱ |
| | | Unit ۶ | ۰,۴۰۰۰ | ۰,۳۵۵۸ | ۰,۱۴۷۲ | ۰,۱۴۹۱ | ۰,۳۲۶۹ | ۰,۱۷۸۰ |
| | OP۳ | Unit ۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۸۴۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۴۹۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۹۵۸ |
| | | Unit ۲ | ۰,۶۲۳۹ | ۰,۵۵۳۷ | ۰,۷۵۰۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۵۹۸۹ | ۰,۶۶۳۰ |
| | | Unit ۳ | ۰,۳۹۹۱ | ۰,۴۵۵۹ | ۰,۳۲۷۱ | ۰,۱۶۰۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۵۱۲ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۶۷۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۷۸۸ | ۰,۴۵۱۱ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۱۱۱۲ | ۰,۲۷۷۷ | ۰,۲۷۷۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۲۵۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۰۲۲ | ۰,۳۵۵۹ | ۰,۱۴۶۹ | ۰,۱۴۳۴ | ۰,۳۲۶۹ | ۰,۱۷۷۸ |



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017

**جدول (۱۹): وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی سوم $S_3$ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه**

| | | $TH_1$ | $TH_2$ | $TH_3$ | $TH_4$ | $TH_5$ | $TH_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Multi-objective Gravitational Search Algorithm | OP۱ | Unit ۱ | ۰,۷۸۵۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۰۳۳ | ۰,۵۰۲۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۲۳۱۵ | ۰,۶۳۲۷ | ۰,۲۴۷۲ | ۰,۴۴۱۳ | ۰,۵۹۲۲ | ۰,۴۴۸۸ |
| | | Unit ۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۸۰۳ | ۰,۱۷۳۷ | ۰,۳۸۹۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۴ | ۰,۱۲۰۲ | ۰,۱۰۱۸ | ۰,۱۱۱۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۱۳۹ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۳۵۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۷۹۷ | ۰,۲۸۲۵ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۱۰۷ | ۰,۱۸۹۰ | ۰,۳۵۱۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۵۲۵ | ۰,۳۸۵۹ |
| | OP۲ | Unit ۱ | ۰,۷۸۴۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۰۲۰ | ۰,۵۰۲۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۲۳۱۷ | ۰,۶۳۲۷ | ۰,۲۵۱۴ | ۰,۴۴۱۵ | ۰,۵۹۲۱ | ۰,۴۴۸۷ |
| | | Unit ۳ | ۰,۳۳۰۸ | ۰,۴۸۰۳ | ۰,۱۷۳۷ | ۰,۳۸۹۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۴ | ۰,۱۲۰۲ | ۰,۱۰۲۰ | ۰,۱۱۱۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۱۳۹ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۳۵۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۷۹۷ | ۰,۲۸۲۵ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۱۰۶ | ۰,۱۹۱۱ | ۰,۳۵۲۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۵۲۴ | ۰,۳۸۵۸ |
| | OP۳ | Unit ۱ | ۰,۷۸۵۱ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۰۲۸ | ۰,۵۰۲۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۲۳۱۵ | ۰,۶۳۲۷ | ۰,۲۵۶۷ | ۰,۴۴۱۷ | ۰,۵۹۲۲ | ۰,۴۴۸۶ |
| | | Unit ۳ | ۰,۳۲۹۵ | ۰,۴۸۰۳ | ۰,۱۷۳۷ | ۰,۳۸۹۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۴ | ۰,۱۲۰۲ | ۰,۱۰۱۸ | ۰,۱۱۱۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۱۳۹ |
| | | Unit ۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۳۵۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۸۳۹ | ۰,۲۸۲۵ |
| | | Unit ۶ | ۰,۳۱۰۶ | ۰,۱۹۰۱ | ۰,۳۵۳۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۵۲۵ | ۰,۳۸۵۹ |

**جدول (۲۰): وضعیت روشن خاموش بودن واحدها طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی چهارم $S_4$ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه**

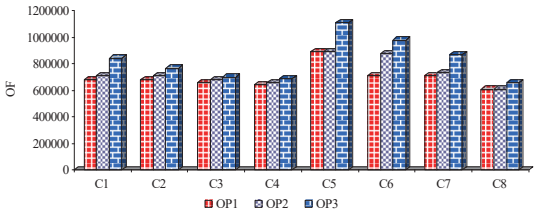
| | | $TH_1$ | $TH_2$ | $TH_3$ | $TH_4$ | $TH_5$ | $TH_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Multi-objective Gravitational Search Algorithm | OP۱ | Unit ۱ | ۰,۵۹۲۵ | ۰,۵۱۳۶ | ۰,۶۵۸۲ | ۰,۵۶۷۹ | ۰,۵۵۹۶ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۵۲۴۸ | ۰,۵۵۷۳ | ۰,۲۹۹۰ | ۰,۵۳۸۳ | ۰,۵۴۲۵ | ۰,۵۰۱۳ |
| | | Unit ۳ | ۰,۲۰۹۳ | ۰,۲۷۸۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۳۶۷ | ۰,۳۴۹۵ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۱۷۷۷ | ۰,۱۲۳۵ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۳۲۹ |
| | | Unit ۵ | ۰,۱۰۴۵ | ۰,۱۶۴۹ | ۰,۲۲۷۴ | ۰,۱۵۷۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۶ | ۰,۱۲۵۹ | ۰,۱۶۸۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۰۸۹ | ۰,۰۰۰۰ |
| | OP۲ | Unit ۱ | ۰,۶۹۶۹ | ۰,۵۱۳۵ | ۰,۶۵۸۲ | ۰,۵۶۷۸ | ۰,۵۵۸۴ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۲ | ۰,۵۲۴۹ | ۰,۵۵۷۵ | ۰,۲۹۸۸ | ۰,۵۳۸۳ | ۰,۵۴۲۶ | ۰,۵۰۱۲ |
| | | Unit ۳ | ۰,۲۰۹۱ | ۰,۲۷۸۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۷۱۳ | ۰,۲۳۶۷ | ۰,۳۴۹۵ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۱۵۰ | ۰,۱۲۳۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۴۳۳۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۱۸۹۵ | ۰,۱۵۷۳ | ۰,۲۲۷۴ | ۰,۱۵۷۹ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۹۳۳ |
| | | Unit ۶ | ۰,۱۲۵۸ | ۰,۱۶۷۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۰۸۸ | ۰,۰۰۰۰ |
| | OP۳ | Unit ۱ | ۰,۶۸۷۳ | ۰,۷۵۸۸ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۷۲۲۸ |
| | | Unit ۲ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۰۱۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۶۱۵۹ | ۰,۶۰۰۳ |
| | | Unit ۳ | ۰,۲۱۳۰ | ۰,۳۶۹۳ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۵۰۲ | ۰,۳۸۲۹ | ۰,۴۳۴۳ |
| | | Unit ۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۳۶۳۴ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ |
| | | Unit ۵ | ۰,۲۳۱۲ | ۰,۱۱۳۰ | ۰,۲۲۱۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۶۳۹ | ۰,۱۶۲۴ |
| | | Unit ۶ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۶۳۷ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۰۰۰۰ | ۰,۲۰۹۷ |

- $C_6$: سناریوی ۲ مبتنی بر روش حل NSGA-II
- $C_7$: سناریوی ۳ مبتنی بر روش حل NSGA-II
- $C_8$: سناریوی ۴ مبتنی بر روش حل NSGA-II

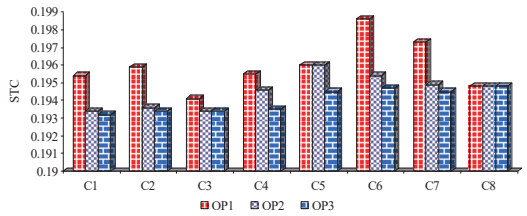
مقادیر توابع هدف طی سناریو، نقاط عملکرد و روش های حل مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده و مقایسه شده اند. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ و مقایسه سه نقطه کار $OP_1$، $OP_2$ و $OP_3$ طی سناریوها و روش‌های حل مختلف به این نتیجه می‌رسیم که نقطه کار $OP_1$ دارای مقدار OF کمتر و مقدار STC بیشتری نسبت به دو نقطه کار دیگر است. این در حالی است که نقطه کار $OP_3$ دارای مقدار OF بالا و STC کمتر نسبت به دو نقطه کار دیگر است. نقطه کار $OP_2$ در یک شرایط میانی قراردارد که بین دو تابع هدف یک مصالحه برقرار می‌کند. می توان نتیجه گرفت که نقطه کار $OP_2$ که از اعمال روش تصمیم گیری فازی بر روی منحنی پارتو بدست می‌آید دارای عملکرد بهتری نسبت به دو نقطه کار دیگر است.

با مقایسه دو چارچوب طی سناریوهای مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ نتیجه گرفته می‌شود که برای رسیدن به مقدارLOLPمناسب و پایین ناگزیر خواهیم بود که واحدهای تولیدی سطح تولید بهینه خود را برای رسیدن به مقدار قابلیت اطمینان مطلوب افزایش دهند و این بمعنای افزایش سطح تولید کل و افزایش هزینه ها خواهد بود. بعبارت دیگر برای شرایط بحرانی اگر بخواهیم سیستم مطمئن، امن و مقاومی داشته باشیم باید با برنامه ریزی صحیح واحدهای تولیدی شرایط مورد نظر فراهم شود. مقایسه توابع OF و STC به ازای الگوریتم‌های حل مختلف در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ انجام شده است. با توجه به این دو شکل الگوریتم MOGSA در اکثر موارد دارای جواب بهتری نسبت به NSGA-II است.

مقادیر شاخص پایداری ولتاژ VS تحت شرایط کاری و سناریوهای مختلف برای ساعت های ۱ تا ۶ ساعت در شکل (۸) مقایسه شده است. باتوجه به این شکل مقادیر VS برای تمامی ساعت ها در مقدار مطلوب قرار داشته و از محدوده ی خود یعنی مقدار کمتر از ۱ هیچ انحرافی را ندارد. بزرگترین مقدار برای VS با مقدار ۰/۰۴ برای ساعت سوم برای شرایط کاری C3 اتفاق می افتد.

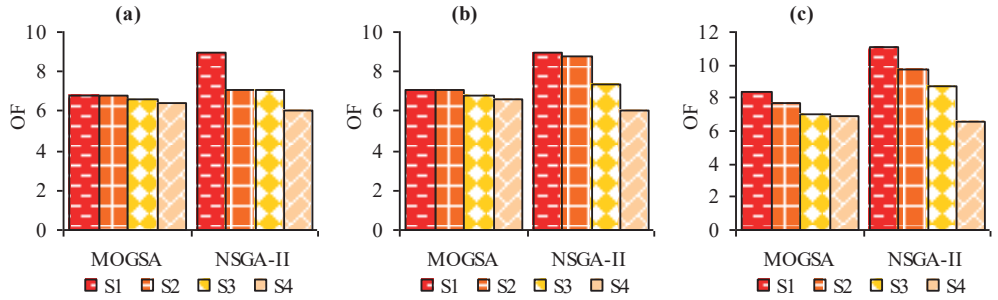



**شکل (۶): مقایسه تابع OF تحت سناریوها، نقاط عملکرد و روش های حل مختلف**

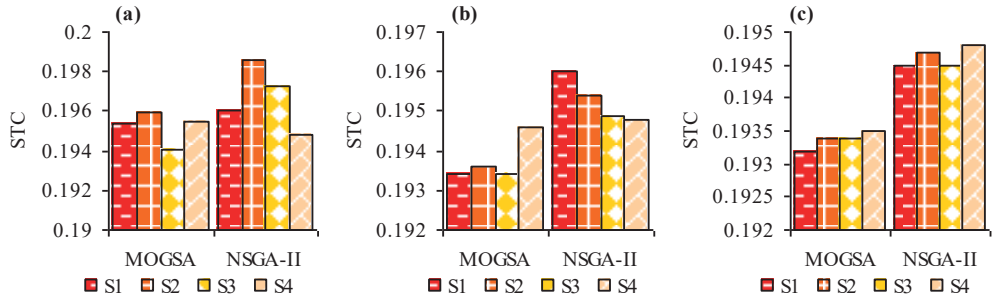



**شکل (۷): مقایسه تابع STC تحت سناریوها، نقاط عملکرد و روش های حل مختلف**

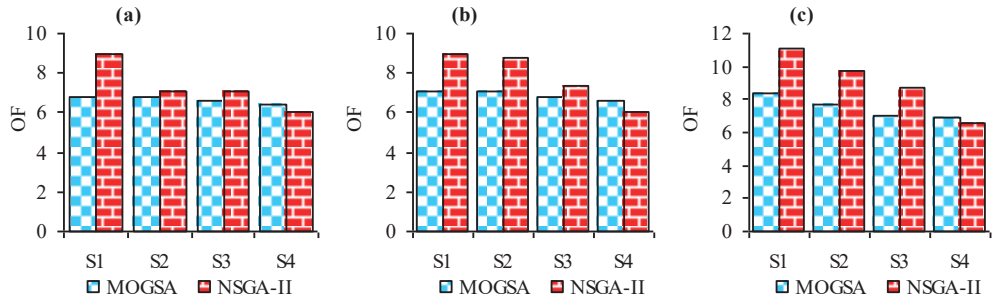
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]



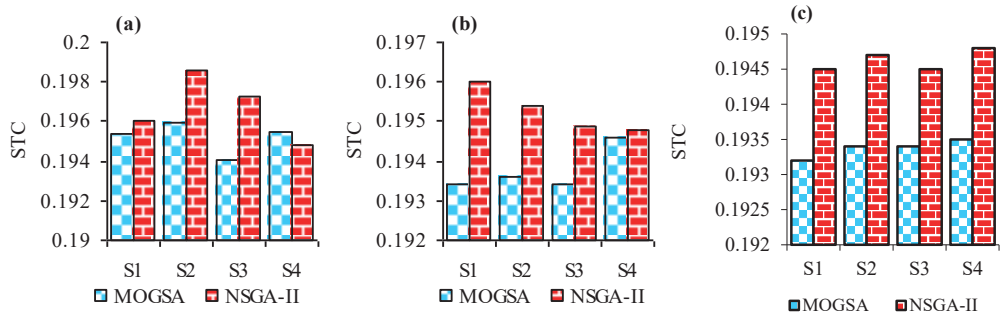

شکل (۸): مقایسه تابع OF (5^10×)برای چهار سناریوی مختلف طی دو الگوریتم بهینه‌سازی با نقطه کار a) $OP_1$، b) $OP_2$ و c) $OP_3$




شکل (۹): مقایسه تابع STC برای چهار سناریوی مختلف طی دو الگوریتم بهینه‌سازی با نقطه کار a) $OP_1$، b) $OP_2$ و c) $OP_3$



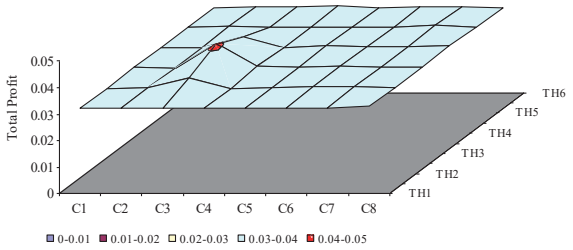

شکل (۱۰): مقایسه تابع OF (5^10×)برای دو الگوریتم بهینه‌سازی طی چهار سناریو با نقطه کار a) $OP_1$، b) $OP_2$ و c) $OP_3$




شکل (۱۱): مقایسه تابع STC برای دو الگوریتم بهینه‌سازی طی چهار سناریو با نقطه کار a) $OP_1$، b) $OP_2$ و c) $OP_3$

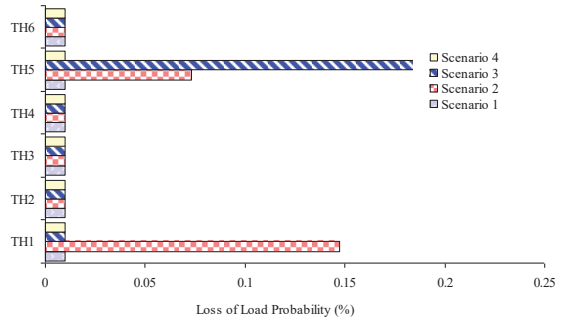
[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

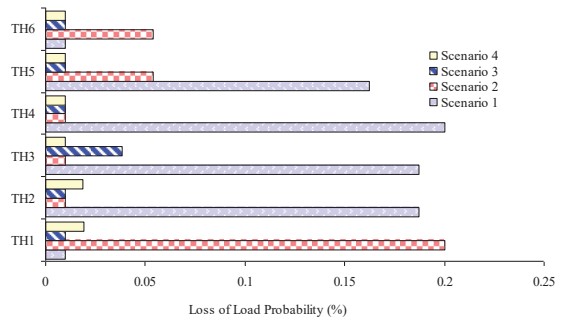



**شکل (۸): مقایسه مقادیر STC تحت ساعت‌ها و سناریوهای مختلف**

مقادیر عددی LOLP برای ساعت های مختلف برنامه ریزی $TH_1$ تا $TH_2$ برای سناریوهای مختلف و با روشهای مختلف حل مساله برای حالتی که از تصمیم‌گیری فازی استفاده می‌کنیم در شکل-های (۹) و (۱۰) داده شده است. با مقایسه دو چارچوب طی سناریوهای مختلف نتیجه گرفته می شود 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 اگر بخواهیم سیستم مطمئن، امن و مقاومی داشته باشیم باید با برنامه ریزی صحیح واحدهای تولیدی شرایط مورد نظر فراهم شود.




**شکل (۹): مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل MOGSA**




**شکل (۱۰): مقایسه مقادیر LOLP برای سناریوهای مختلف با روش حل NSGA-II**

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی جامع و چندهدفه برای برنامه‌ریزی در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها براساس اصول پدافند غیرعامل ارائه گردیده است. این مدل این قابلیت را دارد که طرح بهینه اشتراک واحدها را طوری استخراج کند که سیستم مورد نظر دارای بیشترین مقاومت در برابر حملات تصادفی دشمن را داشته باشد. روش طراحی چندهدفه ارائه شده در این پژوهش به برنامه‌ریز این اجازه را خواهد داد که بطور همزمان چندین تابع هدف را در مساله پدافند غیرعامل در مدار قرارگرفتن واحدها اعمال کند. توابع هدف درنظر گرفته‌شده در این مقاله هزینه تولید کل نیروگاه‌ها و شاخص پایداری ولتاژ سیستم با رعایت قیود قابلیت اطمینان و دیگر محدودیت‌های سیستم است. بمنظور اعمال قیود قابلیت اطمینان در مساله پدافند غیرعامل چندهدفه اشتراک واحدها، یک مدل جامع و گسترده جهت استخراج مقادیر احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط جنگی ارائه شده است. ایده اصلی فرمول‌بندی مدل مقادیر احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری وابسته به این تئوری است که بمنظور کاهش آسیب‌پذیری، مداومت خدمات و افزایش توان مقاومتی واحدهای تولیدی باید معیارهای اصلی پدافند غیرعامل از جمله شاخص‌های فنی و جغرافیایی و زیرمعیارهای مربوط به آنها را برای پایین‌آوردن مقدار احتمالی دسترس‌ناپذیری نیروگاه‌ها در شرایط اضطراری رعایت کرد. یک روش بهینه‌سازی چندهدفه متشکل از هزینه کل تولید و شاخص پایداری ولتاژ فرمول‌بندی شده است و روش بهینه‌سازی جست‌وجوی گرانش چندهدفه جهت یافتن حل بهینه استفاده شده است. از دیدگاه تصمیم‌گیری روش تصمیم‌گیری فازی برای مشخص کردن بهترین حل مابین مجموعه جوابهای پارتوی بدست آمده از الگوریتم جست‌وجوی گرانش چندهدفه بکار گرفته شده است. یک مطالعه مقایسه‌ای طی سناریوها، نقاط عملکرد و روش‌های حل مختلف روی سیستم ۳۰ باسه استاندارد IEEE انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده می‌تواند بصورت موثر جهت پدافند غیرعامل چندهدفه در مبانی برنامه‌ریزی در مدار قرارگرفتن نیروگاه‌ها بکار رود.

### پیوست الف

اطلاعات مربوط به واحدها و تقاضای مصرف:

**جدول(۲۱): مشخصات واحدهای تولیدی**

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

**جدول (۲۲): میزان بار ۶ ساعت**

| Time | $TH_1$ | $TH_2$ | $TH_3$ | $TH_4$ | $TH_5$ | $TH_6$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PD (MW) | ۱۲۹,۴۳ | ۱۲۲,۰۵ | ۱۱۷,۲۶ | ۱۱۴,۳۵ | ۱۱۴,۵۹ | ۱۱۸,۵۹ |



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

## مراجع


[1] m. Rajabi, et al., "Developing a TOPSIS-based Model for Hydropower Dam Site Selection in Isfahan Province," Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 2, pp. 315-324 (In Persian), 2011.

[2] M. H. Khanzade, "A New PMU Placement Method with Improved Observability in Order to Managing the Electrical Energy in Critical Situations," Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 4, pp. 255-263 (In Persian), 2014.

[3] M. Karbasian, et al., "Providing a Combination Facility Location Model for Locating Critical and Important Facilities with Consider of Passive Defense Principles," Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 2, pp. 161-167 (In Persian), 2012.

[4] h. a. Aalami and h. Ramezani, "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions," Journal of Passive Defense Science and Technology, vol. 3, pp. 231-241 (In Persian), 2013.

[5] C. Chung, et al., "An Advanced Quantum-inspired Evolutionary Algorithm for Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Systems vol. 26, pp. 847-854, 2011.

[6] M. Barati and M. M. Farsangi, "Solving Unit Commitment Problem by a Binary Shuffled Frog Leaping Algorithm," IET Generation, Transmission & Distribution vol. 8, pp. 1050 - 1060, 2014.

[7] J. J. Hargreaves and B. F. Hobbs, "Commitment and Dispatch with Uncertain Wind Generation by Dynamic Programming," IEEE Transactions on Sustainable Energy vol. 3, pp. 724-734, 2012.

[8] L. Wu, "An Improved Decomposition Framework for Accelerating LSF and BD Based Methods for Network-Constrained UC Problems," IEEE Transactions on Power Systems vol. 28, pp. 3977 - 3986, 2013.

[9] V. Dieu and W. Ongsakul, "Improved Merit Order and Augmented Lagrange Hopfield Network for Unit Commitment," IET Generation, Transmission & Distribution vol. 1, pp. 548-556, 2007.

[10] D. Bertsimas, et al., "Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," IEEE Transactions on Power Systems vol. 28, pp. 52-63, 2013.

[11] Y. Li, "Discussion of Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem," IEEE Transactions on Power Systems vol. 29, pp. 996-996, 2014.

[۱۲] ابراهیم زارعی، محسن محمدیان، علی اکبر قره ویسی، "مشارکت پاسخ بار در برنامه ریزی تولید نیروگاه ها،" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، شماره ۱۳، صفحه ۷۳-۸۱، ۱۳۹۵.

[13] Q. Wang, et al., "Two-stage Robust Optimization for Nk Contingency-constrained Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Systems vol. 28, pp. 2366-2375, 2013.

[14] D. N. Simopoulos, et al., "Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing," IEEE Transactions on Power Systems vol. 21, pp. 1699-1706, 2006.

[15] Y. An and B. Zeng, "Exploring the Modeling Capacity of Two-Stage Robust Optimization: Variants of Robust Unit Commitment Model," IEEE Transactions on Power Systems vol. 2, pp. 1-14 2014.

[16] P. Xiong and P. Jirutitijaroen, "Two-stage Adjustable Robust Optimisation for Unit Commitment Under Uncertainty," IET Generation, Transmission & Distribution vol. 8, pp. 573-582, 2013.

[17] Y. Fu, et al., "Modeling and Solution of the Large-scale Security-constrained Unit Commitment," IEEE Transactions on Power Systems vol. 28, pp. 3524 - 3533, 2013.

[18] A. Bhattacharya and P. Roy, "Solution of multi-objective optimal power flow using gravitational search algorithm," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, pp. 751-763, 2012.

[19] G. Nadakuditi, et al., "Application of non-dominated sorting gravitational search algorithm with disruption operator for stochastic multiobjective short term hydrothermal scheduling," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, pp. 862-872, 2016.

[20] T. Niknam, et al., "Multiobjective optimal reactive power dispatch and voltage control: a new opposition-based self-adaptive modified gravitational search algorithm," IEEE Systems Journal, vol. 7, pp. 742-753, 2013.

[21] S. Jalilzadeh, et al., "Integrating generation and transmission networks reliability for unit commitment solution," Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 777-785, 2009.

[22] M. Pourakbari-Kasmaei, et al., "A New Hybrid Heuristic Technique for Unit Commitment and Generation Scheduling," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 7, pp. 41-49, 1389.

[23] J. Lyu, et al., "A new approach to security-constrained generation scheduling of large-scale power systems with a piecewise linear ramping model," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 34, pp. 121-131, 2012.

[24] A. Grey and A. Sekar, "Unified solution of security-constrained unit commitment problem using a linear programming methodology," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 2, pp. 856-867, 2008.

[25] G. Yesuratnam and D. Thukaram, "Congestion management in open access based on relative electrical distances using voltage stability criteria," Electric power systems research, vol. 77, pp. 1608-1618, 2007.

[26] H. Shayeghi and Y. Hashemi, "Technical–economic analysis of including wind farms and HFC to solve hybrid TNEM–RPM problem in the deregulated environment," Energy Conversion and Management, vol. 80, pp. 477-490, 2014.

[27] C. C. Coello, et al., Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems. Kluwer Academic, Springer: Springer Science & Business Media, 2007.

[28] A. L. Ara, et al., "Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, pp. 481-490, 2012.

[29] S. Christa and P. Venkatesh, "Multi-objective optimization problem for the Thyristor Controlled Series Compensators placement with multiple decision-making approaches," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 23, pp. 249-269, 2013.

[30] S. Ramesh, et al., "Application of modified NSGA-II algorithm to multi-objective reactive power planning," Applied Soft Computing, vol. 12, pp. 741-753, 2012.



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20 ]



[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.3.2.7 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.3 Fall2017