

برنامه‌ریزی امنیت مقید مشارکت واحدهای تولیدی و ارائه مدل احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط اضطراری

رضا غفارپور^۱ یashar hshmi^۲ حبیب الله اعلمی^۳

۱- مری 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 آیانکی، 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 نیروسانی، افزایش قابلیت اطمینان تولید و ارتقای بازدارندگی پرداخته است. یکی از مهمترین اصول مقابله با تهدیدات خرابکارانه، 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 بینه‌جهت تعیین سطح بینه‌جهت تولید و روشن خاموش‌بودن هر نیروگاه در ساعت 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

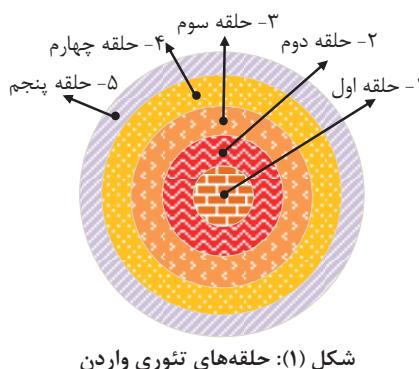
نام نویسنده‌ی مسئول: مهندس رضا غفارپور

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



ω_{Ge}	وزن مربوط به سابقه تاریخی حملات نظامی	علمایم و اختصارات
$OP_{i,t}$	تولید توان بر حسب MW برای واحد i در ساعت t	Security-constrained unit commitment
a_i, b_i, c_i	ضرابهای ساختاری	Loss of load probability
PE_{off}	مدت زمان خاموشی قبل از شروع به کار	Force outage rate
BC_i	هزینه شروع به کار	Capacity outage probability table
φ_i	هزینه شروع به کار داغ	Unit commitment
K_i	هزینه شروع به کار سرد	Multi-objective gravitational search algorithm
λ_i	ثابت زمانی خنکسازی	Multi-attribute decision making
$BV_{i,t}$	متغیر بازتری حالت‌های خاموشی روشی بودن واحد ندر زمان t	Non-dominated sorting genetic algorithm
$GC_{i,t}$	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	ولتاز شینن ثام	
STC	معیار یاداری ولتاز	
$M_i(t)$	جزم عامل i در تکرار t	
$fitness_j$	سازگاری عامل j در تکرار t	
$R_{ij}(t)$	فاصله اقیدسی مابین دو عامل i و j	
$G(t)$	ثابت گرانش در تکرار t	
$a_i^d(t)$	شتان عامل i	
۱ - مقدمه		
SCU	SC	وزن عامل فنی
$LOLP$	Geographic	وزن عامل جغرافیایی
FOR	General	وزن عامل عمومی
$COPT$	Technical	ضریباهیت عامل فنی
UC	Geographic	ضریباهیت عامل جغرافیایی
$MOGSA$	General	ضریباهیت عامل عمومی
$MADM$	FOV ^{MI}	احتمالی عدم دسترسی پذیری نیروگاه ام در شرایط جنگی
$NSGA$	PR	وزن مربوط به میزان قدرت نیروگاه
	CR	وزن مربوط به قدمت و طول عمر نیروگاه
	PD	وزن مربوط به سهم تولید نیروگاه طبیک سال
	BV	وزن مربوط به دسته پندی نیروگاهها از نظر تولید کتریسیته
	OP	وزن مربوط به کوهستانی بودن منطقه نیروگاه
	MUT	وزن مربوط به ارتفاع از سطح دریا
	MDT	وزن مربوط به پراکندگی استراکچرهای نیروگاهی
	STC	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مرز کشور
	VS	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز اصلی شهرها یا محل اصلی
	SC	شرکت تحت پوشش
	AL	وزن مربوط به فاصله نیروگاه از مراکز نظامی و سایتها موسکی
	SP	وزن مربوط به درجه بندی استارت نیروگاه
	DPS	وزن مربوط به درجه بندی استحکامات نیروگاهها
	DMC	
	DMS	
	DBS	
	FI	
	OP	

براساس تئوری واردن، مراکز ثقل یک کشور شامل پنج حلقه و دوازده متعدد مرکزی هستند که مجموعاً 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 فلک 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 فلک گردیده و زیر ساختهای اقتصادی، عملیاتی و پشتیبانی متوقف می‌گردند.



شکل (۱): حلقه‌های تئوری واردن

مرجع [۱۳] یک مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای مقاوم برای حل مساله امنیت-مقید مشارکت واحدهای نیروگاهی ارائه کرده است. در این مقاله مساله دسترسنپذیری واحدهای تولیدی بحث نشده است. یک روش برای شرکت دادن دسترسنپذیری نیروگاهها در مساله در مدار قرارگرفتن نیروگاهها در مرجع [۱۴] ارائه شده است. در این مرجع مقدار احتمالی دسترسنپذیری واحدهای تولیدی بصورت یک تابع بر حسب نرخ خرابی و نرخ تعمیر در نظر 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] فرمول سازی مقاوم بدون وابستگی به توزیع احتمالی صحیح را در جهت یافتن حل مساله مشارکت واحدها تحت عدم قطعیت‌های خروج نیروگاهها ارائه کرده است. در این مرجع یک تعداد سناریوهای مشخص خروج نیروگاهها بدون وابستگی به مقدار احتمالی دسترسنپذیری آنها مشخص شده و برنامه‌ریزی مقاوم برای مشارکت واحدها ارائه شده است. همچنین مساله مشارکت واحدها در اشلهای بزرگ در مرجع [۱۷] بحث می‌شود که می‌تواند برای برنامه‌نویسان و اپراتورهای روحهای سیستم قدرت مفید باشد.

در حالت عادی احتمال در دسترسنبودن نیروگاهها تحت تاثیر عوامل گوناگونی قرار دارد. بطور معمول در شرایط غیرجنگی احتمال دسترسنبودن 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 می‌شد متفاوت خواهد بود. در وضعیت‌های بحرانی جنگی احتمال در دسترسنبودن نیروگاهها وابسته به تعدادی پارامترهای استراتژیکی، پدافندی و جرافیایی 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 صرفاً با انکا 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. در این مقاله مساله در مدار قرارگرفتن 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 در نظر گرفته شده 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 وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها و سطح بهینه تولید واحدها

این مراکز به واسطه بزرگی و متتمرکز 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 دسترسنپذیر کردن نیروگاهها و بطور کلی ایجاد بحران انرژی الکتریکی از اهداف اولیه مهاجمان است [۲]. اختلال در یک سیستم زیربنایی چون نیروگاهها می‌تواند سبب آشفتگی روانی ملت، فلنج 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 وضعیت‌های بحرانی اقدام نماید [۴]. بهترین روش اجرائی پدافند غیرعامل، مهندسی صحیح و برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه مراکز نیروگاهی است. واحدهای تولیدی در موقع 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 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 از شبکه با ورود و خروج به موقع واحدها منجر می‌شود که این کار مانع تامین نشدن تقاضای بار در موقع اضطراری می‌شود 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 روش‌ها عبارتند از: روش لیست تقدم [۵]، برنامه‌ریزی مختلط دودوئی [۶]، برنامه‌ریزی 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 قرارگرفتن واحدها با درنظر گرفتن دسترسنپذیری نیروگاهها مبتنی بر پدافند غیرعامل بحث نشده است. مقدار احتمالی دسترسنپذیر واحدها تاکنون باستفاده از نرخ خرابی و نرخ تعمیر واحدها تعیین می‌شود.

براساس سوابق واحدهای نیروگاهها 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 دسترسنپذیر واحد محاسبه می‌شود. در این مقاله مقدار احتمالی دسترسنپذیر 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 قرارگرفتن واحدها پرداخته شده است.



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 قطبی با یک تابع تصمیم گیری مشخص می‌کند.

۲- فرمول‌بندی مساله چندهدفه SCUC برای وضعیت‌های اضطراری

تابع هدف اول:

در سیستم قدرت هدف مسئله SCUC حداقل کردن مجموع هزینه عملیاتی با توجه به مجموعه قبیوامنیتی 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.

$$GC_{i,t} = a_i + b_i OP_{i,t} + c_i OP_{i,t}^2 \quad (1)$$

که $OP_{i,t}$ تولید توان بر حسب 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 آنانین برای برآوردن تقاضای بار در سیستم مصرف می‌شود. از آنجایی که در مسئله SCUC موضوع کاهش هزینه کل در کنار قبیوامنیتی 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]:

$$BC_i = \varphi_i + \kappa_i (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (2)$$

که 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 بدست می‌آید [۲۳]:

$$OF = \sum_{t=1}^{TH} \sum_{i=1}^{NU} GC_{i,t} BV_{i,t} + BC_i (1 - BV_{i,t-1}) BV_{i,t} \quad (3)$$

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 روش باشد در غیر اینصورت $BV_{i,t} = 0$.

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

تعریف می‌شود. برنامه‌ریزی چندهدفه اجازه می‌دهد که چندین تابع هدف را بطور همزمان بهینه نماییم. طراحی چندهدفه به تصمیم گیرنده کمک می‌کند که قضایات‌های 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 شده گسترده‌ای از جوابها را بنام مجموعه جواب‌های پارتو با یکبار اجرای شبیه‌سازی بدست آورد. انعطاف‌پذیری طراحی و بدست آوردن جواب‌های شایسته و مناسب از جمله مزایای برنامه‌ریزی چندهدفه است. بهینه‌سازی چندهدفه در مقالات متعدد برای حل مسائلی که سیستم قدرت با آن روپرتو است، مورد استفاده قرار گرفته است. در مرجع [۱۸] پخش بار چند هدفه با استفاده از الگوریتم جستجوی 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 راه حل 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 دسترس‌نایزیری واحدهای تولیدی، مقادیر شخص‌های قابلیت اطمینان برای هر ساعت محاسبه می‌شود. عامل خروج یا دسترس‌نایزیری 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 دسترس‌نایزیری نیروگاهها یک مدل برپایه موقعیت‌های فنی و جغرافیایی نیروگاههای موجود ارائه شده است. پارامترهایی که می‌تواند در مدل‌سازی احتمال خروج اجرایی واحدها تأثیر داشته باشد در قالب سه فاکتور جغرافیایی، فنی و عمومی دسته‌بندی شده است که هریک از این فاکتورها بنویه خود به چند زیر کلاس تقسیم‌بندی و وزن‌های متفاوتی به این کلاس‌ها اختصاص داده شده است. مقدار احتمالی عدم دسترس‌نایزیری 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 دسترس‌نایزیری 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

سرویس می باشد و احتمال PR_j مرتبط با این حالت را نشان می دهد.
برای هر ساعت t از رابطه زیر بدست می آید [۲۱]:

$$LOLP_t = \sum_{j=1}^n PR_j LOSS_j, \quad t \in [1, TH] \quad (7)$$

که در آن $LOSS_j$ بصورت زیر بدست می آید:

$$LOSS_j = \begin{cases} 1, & CR_j < PD_t \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (8)$$

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 شده اند و تقاضای بار را تغذیه می کنند. 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 شبیب واحدها [۲۴]:

$$\begin{cases} PD_t = \sum_{i=1}^{NU} OP_{i,t} BV_{i,t} \\ OP_i^{\min} \leq OP_{i,t} \leq OP_i^{\max} \\ T_i^{on} \geq MUT_i \\ T_i^{off} \geq MDT_i \\ OP(i,t) - OP(i,t-1) \leq UR(i) \\ OP(i,t-1) - OP(i,t) \leq DR(i) \end{cases} \quad (9)$$

تابع هدف دوم:

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

$$STC = \text{Min} \left\{ \sum_{\text{for studied hour}} VS \right\} \quad (10)$$

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

$$STC = \text{Min} \left\{ \sum_{\text{for studied hour}} \max_{j \in N_L} \left| \frac{V_j - \sum_{i \in N_G} H_{ji} V_i}{V_j} \right| \right\} \quad (11)$$

مقادیر H_{ji} از ماتریس H_{LG} به صورت زیر بدست می آید:

$$H_{LG} = -[Y_{LL}]^{-1} [Y_{LG}] \quad (12)$$

که Y_{LG} جزئی از ماتریس Y_{bus} شبکه هستند.
ستون های ماتریس H_{LG} با تعداد باس های ژنراتور و ردیف ها با تعداد باس بارها در ارتباط است. این ماتریس اطلاعاتی در مورد هر باس بار در ارتباط با مقدار توانی که باید از هر ژنراتور شبکه گرفته شود، می دهد. برای تضمین پایداری شرط $\sum_{i \in N_G} VS \leq 1$ برای زامین باس باید برقرار شود.
به صورت کلی و بعد از جمع اهداف و محدودیت ها، مساله می تواند بصورت یک عملیات بهینه سازی دو هدفه بصورت زیر بیان شود:

برای تلفیق قید قابلیت اطمینان LOLP در ساختار مساله از 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]:

$$TF_{compl} = OF + PV \times RRI \quad (4)$$

که مقدار RRI از رابطه زیر بدست می آید:

$$RRI = \begin{cases} (LOLP_{GE} - LOLP_{\max})^2, & LOLP_{GE} > LOLP_{\max} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (5)$$

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

$$LOLP_{GE} = \sum_{t=1}^{TH} LOLP_t \quad (6)$$

تفاوت روش برنامه ریزی ارائه شده در این مقاله با روش های قبلی در روش محاسبه مقدار LOLP است. در روش های قبلی مقدار LOLP از روی نرخ خرابی تصادفی (FOR) که بیانگر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط عادی است، محاسبه می شود. در روش ارائه شده مقدار LOLP از روی مقادیر دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط جنگی که در بخش قبلی ارائه و بصورت FOV^{MI} نامگذاری شد بدست خواهد آمد. اگر ورودی آتالیز 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 می گیرد موجب بهبود شاخص هایی خواهد شد که بیانگر سطح پدافند غیرعامل نیروگاهها هستند.

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

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 می شود. این جدول آرایه ای 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 باشند می توان این جدول را با استفاده از توزیع دو جمله ای محاسبه نمود اما در مساله UC مورد نظر ما امکان تساوی مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری تمامی واحدهای تولیدی عملأ مقدور نمی باشد. دز این حالت با استفاده از مفاهیم پایه احتمال، داده ها با یکدیگر ترکیب می شوند بطوریکه در این روش واحدها بصورت متوالی در سیستم اضافه می گرددن. برای هر ساعت t یک جدول COPT با استفاده از مقادیر احتمال دسترس ناپذیری هر واحد تشکیل می شود. هر ردیف $n = j$ از جدول COPT یک سطح تولیدی که ممکن است خارج شود، ظرفیت کل CR_j که در



$$\text{Min } F(x, u, p) = \text{Min} \{TF_{compl}, STC\} \quad (13)$$

$$h(x, u, p) = 0 \quad (\text{equality constraints}) \quad (14)$$

$$g(x, u, p) > 0 \quad (\text{inequality constraints}) \quad (15)$$

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

۳- بهینه سازی چندهدفه

۱-۳- مفهوم غلبه

مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بیش از یک تابع هدف دارند. اگر

$\rightarrow x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ آرایه متغیرهای ورودی یا عبارتی بردار تصمیم باشد و $f_i : R^n \rightarrow R$, $i=1, \dots, k$ در این صورت k هدف و تابع شایستگی تعریف می‌شود و هدف کمینه‌کردن $\rightarrow f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$ است. البته شرایط و قیدهای زیر را نیز می‌توان در نظر گرفت [۲۷]:

$$g_i, h_j : R^n \rightarrow R, i=1, \dots, m, j=1, \dots, p \quad (16)$$

$$\rightarrow g_i(x) \leq 0, h_j(x) = 0$$

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

تعريف ۱: برای دو بردار $\rightarrow x, y \in R^k$ گفته می‌شود که $\rightarrow y$ بردار \rightarrow را مغلوب می‌کند ($x < y$), در صورتی که رابطه $x_i < y_i$ برای $i=1, \dots, k$ برقرار باشد، آنگاه $\rightarrow f(x) < f(y)$. عبارت دیگر در هیچ بعدی x بدتر از 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.

۲-۳- الگوریتم جست و جوی گرانش چندهدفه

الگوریتم جست و جوی گرانش چندهدفه برای برآورده کردن اهداف از سه روش استفاده می‌کند: (الف) برنامه تخصیص برازنده‌گی. این برنامه برای هر فرد در نظر می‌گیرد که چه تعداد از اجرام را مغلوب و خودش

توسط چه تعداد از اجرام مغلوب می‌شود. (ب) برآورد تراکم نزدیکترین همسایه. این روش، اجازه راهنمایی دقیق‌تر فرایند جستجو را می‌دهد.

(ج) روش آرشیو که نگهداری راه حل ای حدی را تضمین می‌کند.

الگوریتم جست و جوی گرانش چندهدفه از یک جمعیت منظم و یک آرشیو، برای نگهداری بهترین راه حل‌ها استفاده می‌کند.

۴- ابزار تصمیم‌گیری

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 کیم. 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 چندشاخه یا MADM در ارزیابی چنین مسائلی بکار گرفته می‌شوند.

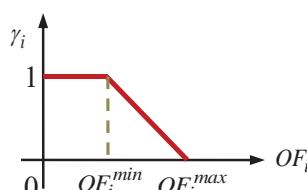
ایجاد تصمیم‌گیری فازی: مجموعه‌های فازی با معادلاتی که توابع عضویت نامیده می‌شود، تعریف می‌شوند. این توابع درجه عضویت را در مجموعه‌های فازی با استفاده از مقادیر از ۰ تا ۱ نشان می‌دهند. مقدار صفر نشان‌دهنده ناسازگاری با مجموعه است، در صورتیکه مقدار ۱ سازگاری کامل را نتیجه می‌دهد. زمانیکه مجموعه بهینه پارتو حاصل می‌شود، نیاز است که یک جواب را از میان آرشیو جواب‌ها انتخاب کنیم. برای این منظور تابع 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]:

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & OF_i \leq OF_i^{min} \\ \frac{OF_i^{max} - OF_i}{OF_i^{max} - OF_i^{min}}, & OF_i^{min} < OF_i < OF_i^{max} \\ 0, & OF_i \geq OF_i^{max} \end{cases} \quad (17)$$

و برای توابع هدف ماقزیم شده:

$$\gamma_i = \begin{cases} 0, & OF_i \leq OF_i^{min} \\ \frac{OF_i - OF_i^{max}}{OF_i^{max} - OF_i^{min}}, & OF_i^{min} < OF_i < OF_i^{max} \\ 1, & OF_i \geq OF_i^{max} \end{cases} \quad (18)$$

که OF_i^{min} و OF_i^{max} به ترتیب مقادیر ماقزیم و مینیمم از تابع هدف i ام در میان همه جوابهای ممکن است. تابع عضویت γ 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 γ^k بصورت زیر محاسبه می‌شود:

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

$$SC_i^{Technical} = \prod (\omega_{Tech,i}^{PR}, \omega_{Tech,i}^{HL}, \omega_{Tech,i}^{SP}, \omega_{Tech,i}^{EP}) \quad (21)$$

$$SC_i^{Geographic} = \prod (\omega_{Geo,i}^M, \omega_{Geo,i}^{AL}, \omega_{Geo,i}^{DPS}, \omega_{Geo,i}^{DBS}, \omega_{Geo,i}^{DMC}, \omega_{Geo,i}^{DMS}, \omega_{Geo,i}^{CDR}, \omega_{Geo,i}^{FI}) \quad (22)$$

$$SC_i^{General} = \omega_{Ge,i} \quad (23)$$

مقداری وزنی هر کدام از زیر کلاس های عامل های فنی، جغرافیایی و عمومی بصورت زیر تعریف می شوند:

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 می توان با توجه به مشخصات واحدها از قبیل تعداد و ظرفیت واحدها تعیین کرد. همانطوری که در جدول (۱) مشاهده می شود کلاس ۱ از گروه عامل فنی به چند دسته تقسیم بندی شده و بر حسب اهمیت هر یک از این دسته ها وزن های متفاوتی اختصاص داده شده است. بعنوان مثال نیروگاه های با ظرفیت مابین ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ مگاوات نسبت به نیروگاه های با ظرفیت مابین ۵۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات احتمال دسترس ناپذیری بیشتری را دارند زیرا در زمان جنگی دشمن بیشتر تمایل به هدف قرار دادن نیروگاه های با ظرفیت بالاتر را دارد. یا به عبارت دیگر احتمال دسترس ناپذیری نیروگاه های با ظرفیت بالاتر نسبت به نیروگاه های با ظرفیت پایین تر در زمان جنگی بیشتر است.

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

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

کلاس ۲: قدمت و طول عمر نیروگاه

بسیاری از نیروگاه های تحت پوشش قدمت و طول عمر زیادی دارند که این عامل خود باعث تسریع در دسترس ناپذیری نیروگاه در موقعیت جنگی خواهد شد. طوریکه که نیروگاه های 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 دسته ها در جدول (۲) داده شده است.

$$\gamma^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ob}} \gamma_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{ob}} \gamma_i^k} \quad (19)$$

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

۵- مدل ارائه شده برای تعیین مقدار احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط جنگی

در حالت عادی برای مدل سازی احتمال در دسترس نبودن نیروگاهها داده های ورودی شامل میانگین زمان تمیز و نرخ های خرابی آماری المان های واحدهای تولیدی است. این نرخ خرابی کاملاً تصادفی فرض شده و عمداً ناشی از حوادث طبیعی، مشکلات مداری و خطاهای انسانی است. حال اگر این نرخ معرف خرابی های ناشی از تهاجمات و اقدامات مخرب عمدى باشد، آنالیز قابلیت اطمینان در خروجی خود شاخص های قابلیت اطمینان سیستم در وضعیت تهاجم را ارائه خواهد داد. که این شاخص ها می توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سیستم در مقابل حملات و اختلالات عمدى باشند. پیش از ارائه یک مدل احتمالی مناسب ابتدا باید بررسی ها و مطالعاتی در مورد تحلیل ریسک یک نیروگاه در شرایط جنگی ارائه شود و استراتژی های پیشنهادی نیز با توجه به نتایج و اولویت این مطالعات برنامه ریزی شود. بطور کلی تحلیل ریسک یک مجموعه شامل شناسایی تهدیداتی که یک واحد تولیدی را متأثر می سازند، 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 آورده آن تهدید بدست می آید. بعبارت دیگر از حاصل ضرب مقادیر احتمالی عواملی که باعث می شود دشمن به یک نیروگاه حمله کرده و باعث دسترس ناپذیری آن شود، مقدار احتمالی دسترس ناپذیری یک نیروگاه بدست خواهد آمد. عوامل اساسی که می تواند در مدل سازی احتمال خروج اجرای نیروگاه در شرایط جنگی تأثیر داشته باشد را می توان به سه عامل جغرافیایی، فنی و عمومی تقسیم بندی کرد. هر یک از این عوامل بنوبه خود به چند زیر کلاس طبقه بندی می شوند که هر یک از این کلاس ها را نیز می توان به جند دسته تقسیم بندی نمود و وزن های متفاوتی را می توان به آن ها اختصاص داد. بنابراین اگر وزن سه عامل فنی، جغرافیایی، و عمومی را برای یک نیروگاه بصورت $SC_i^{Technical}$, $SC_i^{General}$ و $SC_i^{Geographic}$ و ضریب اهمیت هر عامل را بصورت $\Gamma^{Technical}$, $\Gamma^{General}$ و $\Gamma^{Geographic}$ در نظر بگیریم، مقدار احتمالی عدم دسترس پذیری نیروگاه i ام در شرایط جنگی یا FOV_i^{MI} بصورت زیر تعیین خواهد شد:

$$FOV_i^{MI} = (\Gamma^{Technical} SC_i^{Technical}) \times (\Gamma^{Geographic} SC_i^{Geographic}) \times (\Gamma^{General} SC_i^{General}) \quad (20)$$



۰/۷۵	نیروگاههایی که برای تأمین بار میانی بکار می‌rond	۲
۰/۵	نیروگاههایی که برای تأمین بار پیک بکار می‌rond	۳
۰/۲۵	نیروگاههایی که جهت تولید برق اضطراری مجتمع ها مورد استفاده قرار می‌گیرد	۴

جدول (۲): 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	۲
۳	نیروگاههای با طول عمر ۴۰ تا ۴۵ سال	۳
۴	نیروگاههای با طول عمر ۳۵ تا ۴۰ سال	۴
۵	نیروگاههای با طول عمر ۳۰ تا ۳۵ سال	۵
۶	نیروگاههای با طول عمر ۲۵ تا ۳۰ سال	۶
۷	نیروگاههای با طول عمر ۲۰ تا ۲۵ سال	۷
۸	نیروگاههای با طول عمر ۱۵ تا ۲۰ سال	۸
۹	نیروگاههای با طول عمر ۱۰ تا ۱۵ سال	۹
۱۰	نیروگاههای با طول عمر کمتر از ۵ سال	۱۰

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	ω_{Geo}^M
۱	مناطق دشت مانند، مناطق بیابانی و مسطح	۱
۲	مناطق جلگه‌ای، مناطق معمولی	۲
۳	مناطق کوهستانی شدید، مناطق دره مانند یا مناطق دارای رشته کوه	۳

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

کلاس ۳: پراکندگی استراکچرهای 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 دراثر آتش سوزی یا موج ناشی از انفجار سایر تجهیزات و تاسیسات، حتی الامکان

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

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

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 بار پیک می‌نامیم که به آن‌ها بار پایه، بار میانی و بار پیک نیز می‌گویند. 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 تقسیم بندی می‌شوند. بدیهی است نیروگاههایی که برای تأمین بار پایه کابرد دارند عمدها بار بیشتری را تحت پوشش قرار می‌دهند و عمدها 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	ω_{Tech}^{EP}
۱	نیروگاههایی که برای تأمین بار پایه بکار می‌رond	۱



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

۰/۶	نیروگاههایی با فاصله بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلومتر	۳
۰/۴	نیروگاههایی با فاصله بین ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر	۴
۰/۲	نیروگاههایی با فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر	۵

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)

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

کلاس ۷: درجه بندی استثار نیروگاه

استثار 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 عنصر و علائم شناسایی نیاز است. این عوامل که شامل کلیه علائم شناسایی اعم از زمینی یا هوایی می‌باشند، عبارت‌اند از:

- ✓ حرکت، صدا، اندازه (TASISAT)، بو، رنگ (ناهمانگی 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 استثار مطابق جدول (۱۱) تعیین نمود.

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

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

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

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 هدف‌بایی آسان آن‌ها توسط دشمن می‌گردد.

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

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

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)

ω_{Geo}^{DMC}	نوع مسافت	ردیف
۱	نیروگاههایی با فاصله بیشتر از ۲۰۰ کیلومتر	۱
۰/۸	نیروگاههایی با فاصله بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر	۲



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)

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

بطور معمول انتخاب ضرایب باید بر حسب اولویت دهی به وضعیت یک نیروگاه باشد. بعنوان مثال وزن انتخابی برای یک نیروگاه با ظرفیت ۱۰۰۰ مگاوات 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 دسترس ناپذیری نیروگاهها دخالت دهیم. برای مواردی که برنامه ریز بخواهد یک عامل یا یک کلاس را بیشتر مدنظر قرار دهد می‌بایست ضرایب را بگونه‌ای انتخاب بکند که FOV نیروگاه بیشتر متأثر از ضرایب همان کلاس یا عامل باشد. عبارت 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 می‌شود. هدف از برنامه ریزی پیشنهادی مقاوم سازی شبکه در جهت تداوم نیروسانی به مراکز و بارهای حساس در موقع جنگی است. اطلاعات مربوط به واحدها و تقاضای مصرف در پیوست الف داده شده است.

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 (۱۱): دسته بندی نیروگاهها از دیدگاه استارتار (کلاس ۷ از زیر گروه عامل جغرافیایی)

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

کلاس ۸: درجه بندی 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 می‌گردد تا مانع اصابت مستقیم موشك، بمب یا ترکش این مهمات به تجهیزات یا تاسیسات گردیده 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 مرور تجهیزات بزرگ نیز از بشکه‌های 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 جهیزات 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 موشك 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)

ω_{Geo}^{FI}	نوع مسافت	ردیف
۱	نیروگاههایی با درجه استحکام نوع ضعیف (F1)	۱
۰/۷۵	نیروگاههایی با درجه استارتار نوع خوب (F2)	۲
۰/۵	نیروگاههایی با درجه استارتار نوع متوسط (F3)	۳
۰/۲۵	نیروگاههایی با درجه استارتار نوع عالی (F4)	۴

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

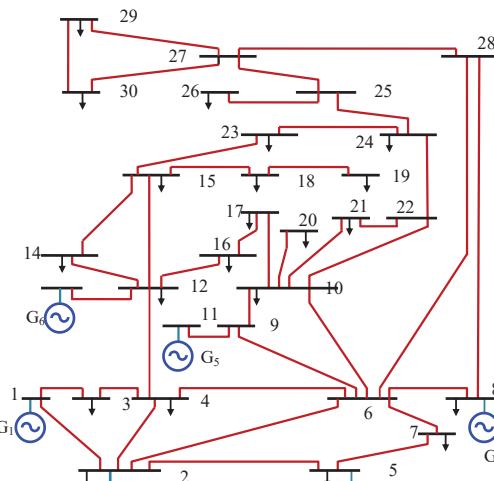


انجام گیرد. جدول (۱۴) بیانگر وزن های اختصاص یافته به هریک از ۶ نیروگاه مربوطه در سیستم تست را نشان می دهد. بعنوان مثال برای نیروگاه شماره ۱، با بررسی وزن های اختصاص یافته می توان دریافت که این نیروگاه در سه حوزه عامل فنی، جغرافیایی و عمومی تحت کلاس های زیر در نظر گرفته است:

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 مایبین ۱۵۰ تا ۲۰۰ هکتار،
 کلاس ۴: فاصله از مرز کشور مایبین 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 استثمار نوع ضعیف (D)، کلاس ۸: درجه استحکام نوع ضعیف (F₁)

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.

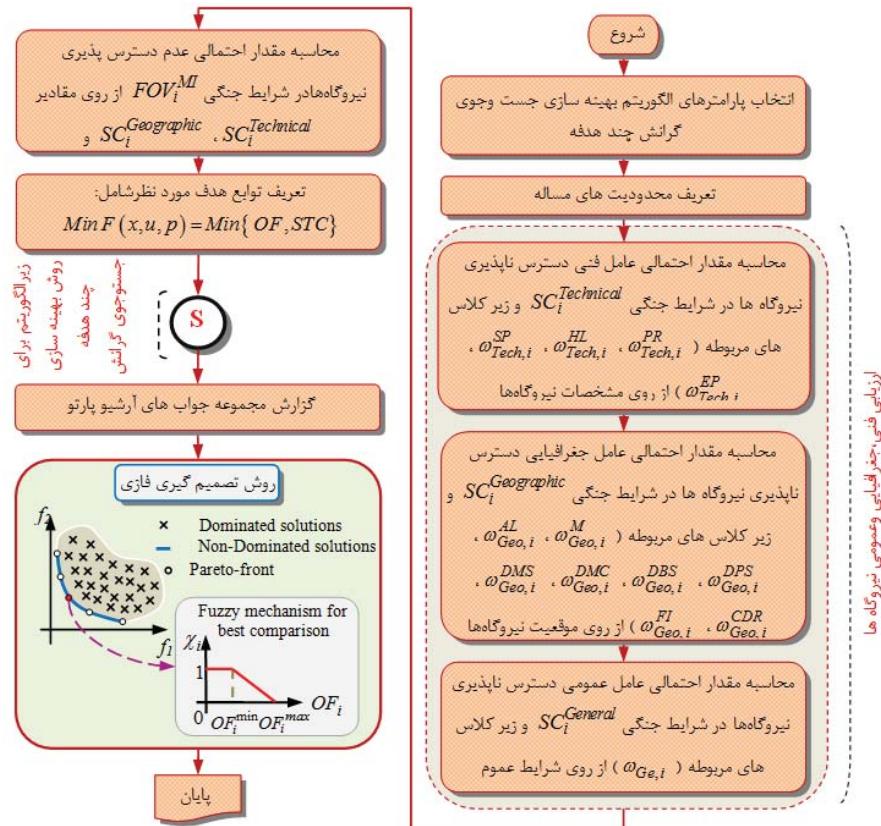
جهت مقاوم بودن روش برنامه ریزی پیشنهادی از دو نوع الگوریتم استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب [۳۰] و الگوریتم بهینه سازی جستجوی گرانش چند هدفه (MOGSA). جداول شماره (۱۷)-(۲۰) نتیجه بدست آمده از اجرای برنامه طی الگوریتم بهینه سازی MOGSA برای چهار سناریوی در نظر گرفته شده و سه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



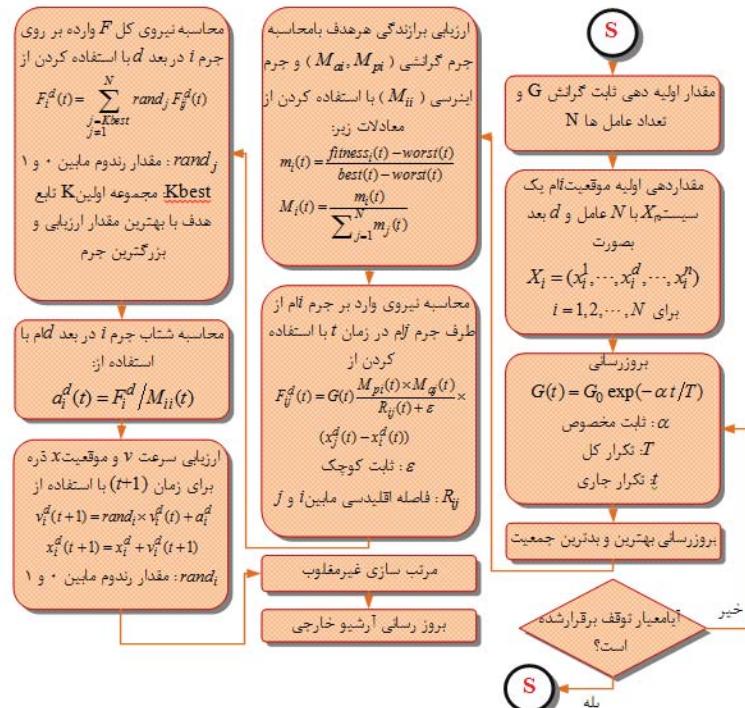
شکل (۳): سیستم ۳۰ با سه مورد مطالعه

رونوندی 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 خرای آماری واحدهای تولیدی است. این نرخ خرای کاملاً تصادفی فرض شده و عمدها ناشی از حوادث طبیعی، مشکلات مداری و خطاهای انسانی است. در وضعیت درنظر گرفته شده در این مقاله احتمال دسترس ناپذیری نیروگاهها معرف خرای های ناشی از تهاجمات و اقدامات مخرب عمده است. در این حالت آنالیز قابلیت اطمینان در خروجی خود شاخص های قابلیت اطمینان سیستم در وضعیت تهاجم را ارائه خواهد کرد که این شاخص ها می توانند بیانگر سطح پدافند غیرعامل و مقاومت سیستم در مقابل حملات و اختلالات عمده باشند. با درنظر گرفتن مدل پیشنهادی برای محاسبه احتمال دسترس ناپذیری واحدهای، مهمترین وظیفه برای یک متخصص پدافند غیرعامل در سیستم های قدرت برای برنامه ریزی امن در مدار قرار گرفتن واحدهای تعیین و استخراج ضرایب وزنی برای هر یک 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

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



شکل (۴): روند نمای الگوریتم ارائه شده



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

- MOGSA 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
 NSGA-II C_5 : سناریوی ۱ مبتنی بر روش حل

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

TH _۶	TH _۵	TH _۴	TH _۳	TH _۲	TH _۱	OP _۱	Multi-objective Gravitational Search Algorithm
۰,۷۵۲۸	۰,۶۷۶۴	۰,۶۰۳۲	۰,۷۴۸۷	۰,۵۵۳۶	Unit ۱		
۰,۷۵۰۸	۰,۵۱۹۸	۰,۵۷۳۶	۰,۴۶۴۹	۰,۵۱۹۸	Unit ۲		
۰,۷۶۱۶	۰,۴۷۵۰	۰,۲۴۶۲	۰,۴۷۷۰	۰,۴۷۷۰	Unit ۳		
۰,۱۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	Unit ۴		
۰,۰۰۰۰	۰,۲۶۷۰	۰,۱۴۶۴	۰,۱۴۲۱	۰,۱۴۲۱	Unit ۵		
۰,۱۳۲۹	۰,۱۵۱۴	۰,۲۱۰۸	۰,۱۳۰۷	۰,۳۰۱۵	Unit ۶		
۰,۷۵۱۹	۰,۶۷۶۴	۰,۶۰۳۲	۰,۷۴۸۲	۰,۵۵۳۲	Unit ۱		
۰,۷۸۰۵	۰,۴۶۵۰	۰,۵۷۰۳	۰,۲۴۲۵	۰,۴۶۵۰	Unit ۲		
۰,۲۲۸۷	۰,۴۷۳۱	۰,۲۴۶۷	۰,۴۷۶۵	۰,۳۸۶۹	Unit ۳		
۰,۱۸۲۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	Unit ۴		
۰,۰۰۰۰	۰,۲۶۶۶	۰,۱۹۹۱	۰,۱۴۲۵	۰,۱۴۲۵	Unit ۵		
۰,۲۷۲۴	۰,۱۵۲۲	۰,۲۱۱۴	۰,۱۳۱۶	۰,۳۰۱۸	Unit ۶		
۰,۷۵۱۰	۰,۶۷۶۸	۰,۶۰۳۲	۰,۷۴۸۶	۰,۵۵۳۶	Unit ۱		
۰,۷۵۰۹	۰,۵۱۹۸	۰,۵۷۳۶	۰,۴۶۴۹	۰,۵۱۹۸	Unit ۲		
۰,۷۶۱۶	۰,۴۷۵۰	۰,۲۴۶۲	۰,۴۷۶۹	۰,۴۷۶۹	Unit ۳		
۰,۱۰۰۳	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	Unit ۴		
۰,۰۰۰۰	۰,۲۶۷۰	۰,۱۴۶۸	۰,۱۴۲۱	۰,۱۴۵۳	Unit ۵		
۰,۱۳۴۰	۰,۱۵۲۲	۰,۲۱۱۴	۰,۱۳۱۶	۰,۳۰۱۸	Unit ۶		

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

TH _۶	TH _۵	TH _۴	TH _۳	TH _۲	TH _۱	OP _۱	Multi-objective Gravitational Search Algorithm
۰,۷۲۱۵	۰,۵۴۳۱	۰,۰۰۰۰	۰,۷۷۲۹	۰,۶۶۵۲	۰,۶۶۸۹	Unit ۱	
۰,۲۵۰۳	۰,۲۱۲۲	۰,۷۱۶۷	۰,۲۷۴۷	۰,۶۱۴۸	۰,۴۸۰۴	Unit ۲	
۰,۰۰۰۰	۰,۴۱۶۷	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۰۰۰۰	۰,۱۹۰۷	Unit ۳	
۰,۲۱۹۳	۰,۰۰۰۰	۰,۵۰۳۳	۰,۰۰۰۰	۰,۴۹۷۸	۰,۴۹۶۵	Unit ۴	
۰,۰۰۰۰	۰,۱۹۰۰	۰,۱۳۴۳	۰,۱۶۲۲	۰,۲۸۲۴	۰,۲۶۹۲	Unit ۵	
۰,۲۰۱۳	۰,۱۹۳۶	۰,۲۸۱۹	۰,۱۴۱۲	۰,۱۴۹۰	۰,۱۴۹۰	Unit ۶	
۰,۷۹۳۳	۰,۶۶۳۶	۰,۰۰۰۰	۰,۷۴۹۷	۰,۵۸۴۸	۰,۵۸۴۸	Unit ۱	
۰,۲۵۱۳	۰,۱۶۰۹	۰,۳۲۷۱	۰,۴۴۸۴	۰,۵۰۰۰	۰,۵۵۳۸	Unit ۲	
۰,۰۰۰۰	۰,۳۰۳۶	۰,۰۰۰۰	۰,۱۶۶۹	۰,۰۰۰۰	۰,۱۶۶۹	Unit ۳	
۰,۱۲۵۱	۰,۰۰۰۰	۰,۲۷۷۱	۰,۱۷۵۹	۰,۱۱۱۳	۰,۱۱۱۳	Unit ۴	
۰,۱۷۸۰	۰,۱۴۹۱	۰,۱۴۷۲	۰,۳۵۵۸	۰,۰۴۰۰	۰,۳۵۵۸	Unit ۵	
۰,۷۹۵۸	۰,۵۸۴۸	۰,۰۰۰۰	۰,۷۴۹۷	۰,۵۸۴۶	۰,۵۸۴۶	Unit ۶	
۰,۶۶۳۰	۰,۵۵۳۷	۰,۶۲۳۹	۰,۷۵۰۴	۰,۵۵۳۷	۰,۵۶۳۰	Unit ۱	
۰,۲۵۱۲	۰,۱۶۰۶	۰,۳۲۷۱	۰,۴۵۵۹	۰,۳۹۹۱	۰,۴۵۱۱	Unit ۲	
۰,۰۰۰۰	۰,۱۶۷۰	۰,۰۰۰۰	۰,۱۷۸۸	۰,۰۰۰۰	۰,۱۷۸۸	Unit ۳	
۰,۱۲۵۰	۰,۱۱۱۲	۰,۲۷۷۳	۰,۲۷۷۳	۰,۱۱۱۲	۰,۱۱۱۲	Unit ۴	
۰,۱۷۷۰	۰,۱۴۳۴	۰,۳۲۶۹	۰,۳۵۵۹	۰,۳۰۲۲	۰,۳۰۲۲	Unit ۵	

جدول (۱۴): تخصیص وزن به هر نیروگاه سیستم تست

Unit ۶	Unit ۵	Unit ۴	Unit ۳	Unit ۲	Unit ۱	ω_{Tech}^{PR}
۰,۰۵۰۰	۰,۰۵۰۰	۰,۰۵۰۰	۰,۰۵۰۰	۰,۰۵۰۰	۰,۰۵۰۰	ω_{Tech}^{PR}
۰,۹۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۳۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۵۰۰۰	ω_{Tech}^{HL}
۰,۲۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۲۰۰۰	۰,۲۰۰۰	ω_{Tech}^{SP}
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰,۵۰۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	ω_{Tech}^{EP}
۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰,۶۰۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	ω_{Geo}^M
۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۶۰۰۰	۰,۶۰۰۰	۰,۸۰۰۰	ω_{Geo}^{AL}
۰,۹۰۰۰	۰,۹۰۰۰	۰,۸۰۰۰	۰,۸۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	ω_{Geo}^{DPS}
۰,۷۵۰۰	۰,۵۰۰۰	۰,۲۵۰۰	۰,۵۰۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	ω_{Geo}^{DBS}
۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۴۰۰۰	۰,۹۰۰۰	۰,۹۰۰۰	ω_{Geo}^{DMC}
۰,۵۵۰۰	۰,۷۰۰۰	۰,۷۰۰۰	۰,۸۰۰۰	۰,۸۵۰۰	۰,۸۵۰۰	ω_{Geo}^{DMS}
۰,۲۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۵۰۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	ω_{Geo}^{CDR}
۰,۲۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۵۰۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	۰,۷۵۰۰	ω_{Geo}^{FI}

جدول (۱۵): سناریوهای در نظر گرفته شده

سناریو	چارچوب	LOLP _{max}	مدار
S_1	۱	LOLP _{max} =10 %	چارچوب ۱
S_2	۱	LOLP _{max} =20 %	چارچوب ۱
S_3	۲	LOLP _{max} =10 %	چارچوب ۲
S_4	۲	LOLP _{max} =20 %	چارچوب ۲

جدول (۱۶): نقاط کار در نظر گرفته شده

نقاط کار (Operating point)	نقاط کار (Operating point)
نقطه ای از منحنی پارتو که تابع OF در آن مینیمم است	Operating point ۱
نقطه ای از منحنی پارتو که از اعمال تصمیمگیری‌پذیری بدست می‌آید	Operating point ۲
نقطه ای از منحنی پارتو که تابع STC در آن مینیمم است	Operating point ۳

برای مقایسه مقادیر توابع هدف طی سناریوها، نقاط عملکرد و روش‌های حل مختلف نامگذاریهای زیر در نظر گرفته می‌شود:

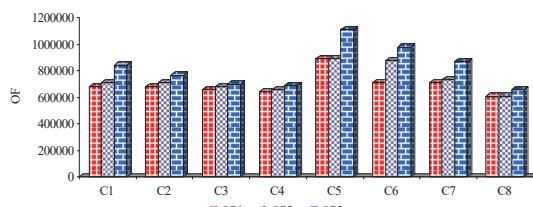
- ۱. OP₁: نقطه کار ۱
- ۲. OP₂: نقطه کار ۲
- ۳. OP₃: نقطه کار ۳



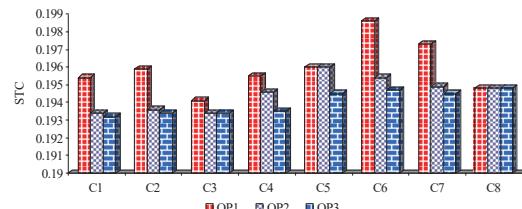
سناریوها و روش‌های حل مختلف به این نتیجه می‌رسیم که نقطه کار دارای مقدار OF کمتر و مقدار OP₁ بیشتری نسبت به دو نقطه کار دیگر است. این در حالی است که نقطه کار OP₃ دارای مقدار OF بالا و STC کمتر نسبت به دو نقطه کار دیگر است. نقطه کار OP₂ در یک شرایط میانی قراردارد که بین دو تابع هدف یک مصالحه برقرار می‌کند. می‌توان نتیجه گرفت که نقطه کار OP₂ 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 مقدار LOLP مناسب و پایین ناگزیر خواهیم بود که واحدهای تولیدی سطح تولید بهینه خود را برای رسیدن به مقدار قابلیت اطمینان مطلوب افزایش دهند و این معنای افزایش سطح تولید کل و افزایش هزینه‌ها خواهد بود. عبارت دیگر برای شرایط بحرانی اگر بخواهیم سیستم مطمئن، امن و مقاومی داشته باشیم باید با برنامه ریزی صحیح واحدهای تولیدی شرایط موردنظر فراهم شود. مقایسه تابع 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 ساعت‌های ۱ تا ۶ ساعت در شکل (۸) مقایسه شده است. با توجه به این شکل مقادیر VS برای تمامی ساعت‌ها در مقدار مطلوب قرار داشته و از محدوده‌ی 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 می‌افتد.



شکل (۶): مقایسه تابع OF تحت سناریوهای، نقاط عملکرد و روش‌های حل مختلف



شکل (۷): مقایسه تابع STC تحت سناریوهای، نقاط عملکرد و روش‌های حل مختلف

جدول (۱۹): وضعیت روش خاموش بودن واحدهای طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی سوم S₃ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه

TH _۱	TH _۲	TH _۳	TH _۴	TH _۵	TH _۶	TH _۷	TH _۸	OP _۱	OP _۲	OP _۳	Mult-objective Gravitational Search Algorithm
...	...	...	...	...	...	...	...	Unit 1			
0.4488	0.5922	0.4413	0.2477	0.6227	0.2315	0.7851	0.7851	Unit 2			
...	...	...	...	...	...	...	...	Unit 3			
0.1139	0.5921	0.4415	0.2514	0.6227	0.2317	0.7848	0.7848	Unit 4			
0.2825	0.5797	0.5000	0.1354	0.5000	0.5000	0.7848	0.7848	Unit 5			
0.3859	0.5525	0.5000	0.2514	0.1890	0.3107	0.7851	0.7851	Unit 6			
...	...	...	...	...	...	...	...	Unit 1			
0.4487	0.5921	0.4415	0.2514	0.6227	0.2317	0.7848	0.7848	Unit 2			
...	...	...	...	...	...	...	...	Unit 3			
0.1139	0.5921	0.4415	0.2514	0.6227	0.2317	0.7848	0.7848	Unit 4			
0.2825	0.5797	0.5000	0.1354	0.5000	0.5000	0.7848	0.7848	Unit 5			
0.3858	0.5524	0.5000	0.2522	0.1911	0.3106	0.7851	0.7851	Unit 6			

جدول (۲۰): وضعیت روش خاموش بودن واحدهای طی دوره مورد مطالعه برای سناریوی چهارم S₄ با روش حل جست وجوی گرانش چندهدفه

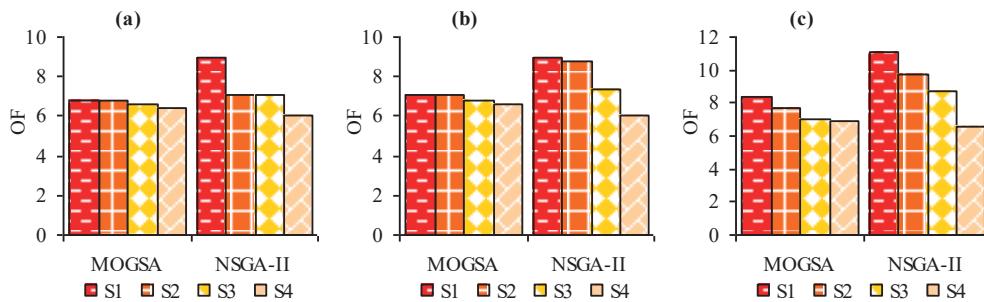
TH _۱	TH _۲	TH _۳	TH _۴	TH _۵	TH _۶	TH _۷	TH _۸	OP _۱	OP _۲	OP _۳	Mult-objective Gravitational Search Algorithm
...	...	...	...	...	...	...	...	Unit 1			
0.5013	0.5425	0.5382	0.2990	0.5573	0.5248	0.7851	0.7851	Unit 2			
0.3495	0.3367	0.3367	0.3367	0.3367	0.3367	0.7848	0.7848	Unit 3			
0.4329	0.4329	0.4329	0.4329	0.4329	0.4329	0.1235	0.1777	0.1777	0.1777	0.1777	Unit 4
...	...	...	...	...	...	0.1579	0.2274	0.1649	0.1649	0.1649	Unit 5
...	...	...	...	...	...	0.2089	0.2089	0.1684	0.1684	0.1684	Unit 6
...	...	...	...	...	...	0.5584	0.5678	0.5678	0.5678	0.5678	Unit 1
0.5012	0.5426	0.5382	0.2988	0.5575	0.5249	0.7851	0.7851	Unit 2			
0.3495	0.3367	0.3367	0.3367	0.3367	0.3367	0.7848	0.7848	Unit 3			
0.4320	0.4320	0.4320	0.4320	0.4320	0.4320	0.1233	0.2150	0.2150	0.2150	0.2150	Unit 4
0.2913	0.2913	0.2913	0.2913	0.2913	0.2913	0.1579	0.2274	0.1573	0.1573	0.1573	Unit 5
...	...	...	...	...	...	0.2088	0.2088	0.1678	0.1678	0.1678	Unit 6
...	...	...	...	...	...	0.7228	0.7228	0.7228	0.7228	0.7228	Unit 1
0.6003	0.6159	0.6159	0.6159	0.6159	0.6159	0.3010	0.3010	0.3010	0.3010	0.3010	Unit 2
0.4343	0.3829	0.3829	0.3829	0.3829	0.3829	0.3693	0.3693	0.3693	0.3693	0.3693	Unit 3
...	...	...	...	...	...	0.3634	0.3634	0.3634	0.3634	0.3634	Unit 4
0.1624	0.2639	0.2639	0.2639	0.2639	0.2639	0.2217	0.2217	0.2217	0.2217	0.2217	Unit 5
0.2097	0.2097	0.2097	0.2097	0.2097	0.2097	0.2637	0.2637	0.2637	0.2637	0.2637	Unit 6

NSGA-II • C₆: سناریوی ۲ مبتنی بر روش حل

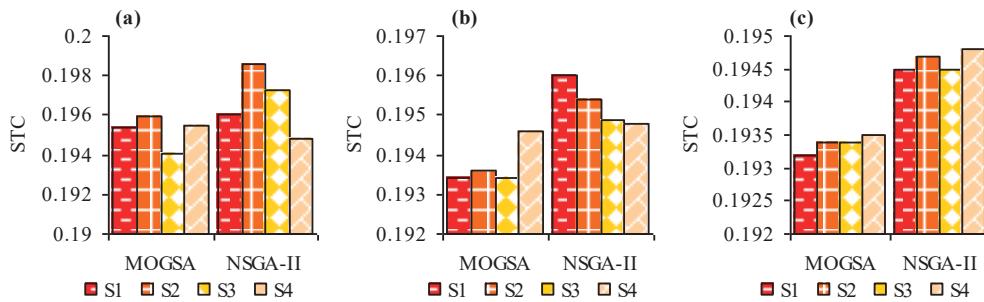
NSGA-II • C₇: سناریوی ۳ مبتنی بر روش حل

NSGA-II • C₈: سناریوی ۴ مبتنی بر روش حل

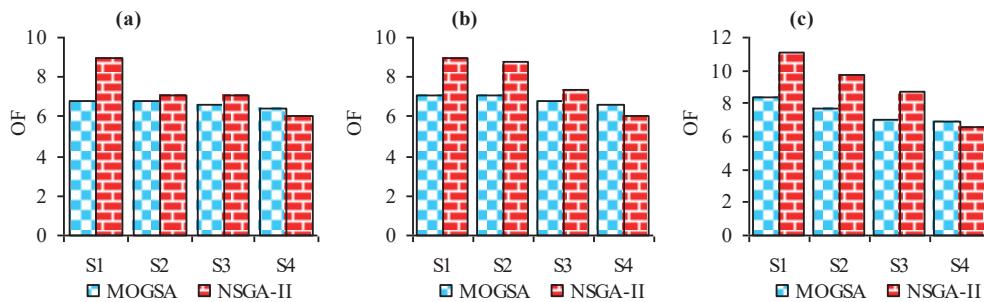
مقادیر تابع هدف طی سناریو، نقاط عملکرد و روش‌های حل مختلف در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده و مقایسه شده اند. با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ و مقایسه سه نقطه کار OP₁, OP₂ و OP₃ طی



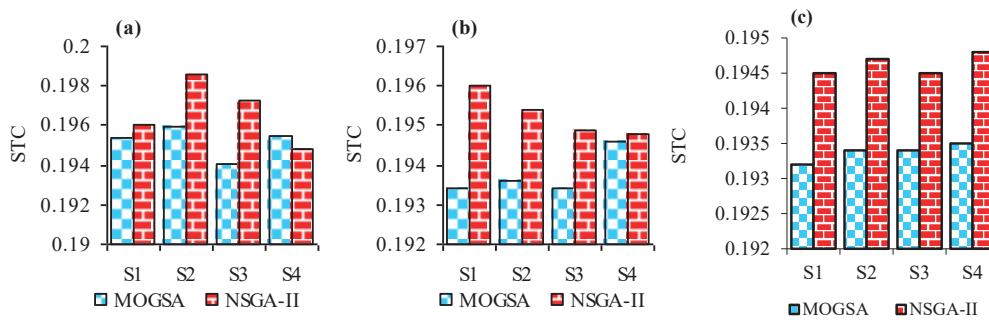
شکل (۸): مقایسه تابع $OF \times 10^5$ برای چهار سناریوی مختلف طی دو الگوریتم بهینه‌سازی با نقطه کار (a).OP₁ و (b).OP₂ و (c).OP₃



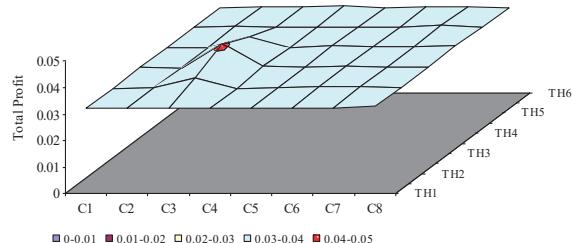
شکل (۹): مقایسه تابع STC برای چهار سناریوی مختلف طی دو الگوریتم بهینه‌سازی با نقطه کار (a).OP₁ و (b).OP₂ و (c).OP₃



شکل (۱۰): مقایسه تابع $OF \times 10^5$ برای دو الگوریتم بهینه‌سازی طی چهار سناریو با نقطه کار (a).OP₁ و (b).OP₂ و (c).OP₃

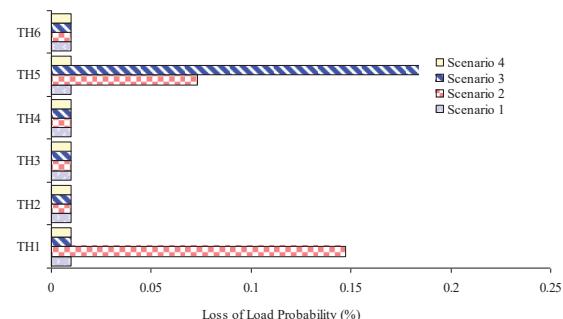


شکل (۱۱): مقایسه تابع STC برای دو الگوریتم بهینه‌سازی طی چهار سناریو با نقطه کار (a).OP₁ و (b).OP₂ و (c).OP₃

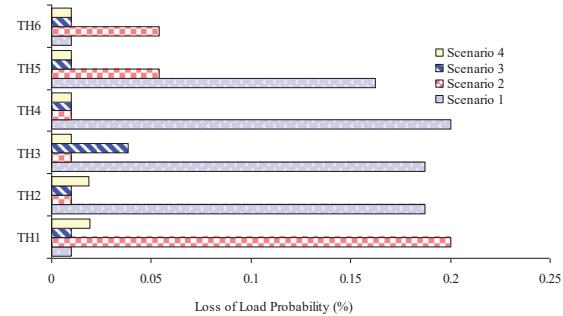


شکل (۸): مقایسه مقادیر STC تحت ساعت ها و سناریوهای مختلف

مقادیر عددی LOLP برای ساعت های مختلف برنامه ریزی TH₁ تا TH₆ برای سناریوهای مختلف و با روشهای مختلف حل مساله برای حالتی که از تصمیم گیری فازی استفاده می کنیم در شکل - های (۹) و (۱۰) داده شده است. با مقایسه دو چارچوب طی عدم دسترس پذیری واحدها در شرایط جنگی، مقدار LOLP برای هر ساعت افزایش خواهد یافت و این به معنای افزایش سطح تولید کل واحدهای تولیدی شرایط مورد نظر فراهم شود.



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



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

۷- نتیجه گیری

در این مقاله مدلی جامع و چنددهفه برای برنامه ریزی در مدار قرار گرفتن 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 چنددهفه ارائه شده در این پژوهش به برنامه ریزی این اجازه را خواهد داد که بطور همزمان چندین تابع هدف را در مساله پدافند غیرعامل در مدار قرار گرفتن واحدها اعمال کند. تابع هدف درنظر گرفته شده 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 چنددهفه اشتراک واحدها، یک مدل جامع و گسترده جهت استخراج مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط جنگی ارائه شده است. ایده اصلی فرمول‌بندی مدل مقادیر احتمالی دسترس ناپذیری 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 دسترس ناپذیری نیروگاهها در شرایط اضطراری رعایت کرد. یک روش بهینه‌سازی چنددهفه مشتمل از هزینه کل تولید و شاخص پایداری ولتاژ فرمول‌بندی شده است و روش بهینه‌سازی جستجوی گرانش چنددهفه جهت یافتن حل بهینه استفاده شده است. از دیدگاه تصمیم‌گیری روش تصمیم‌گیری فازی برای مشخص کردن بهترین حل مابین مجموعه جوابهای پارتوبی بدست آمده از الگوریتم جستجوی گرانش چنددهفه بکار گرفته شده است. یک مطالعه مقایسه‌ای طی سناریوهای 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 چنددهفه در مبانی برنامه ریزی در مدار قرار گرفتن نیروگاهها بکار رود.

پیوست الف

اطلاعات مربوط به واحدها و تقاضای مصرف:

جدول (۲۱): مشخصات واحدهای تولیدی

Unit NO.	OP_i^{min}	OP_i^{max}	a_i (\$)	b_i (\$/M Wh)	c_i (\$/M Wh ²)	φ_i (\$)	κ_i (\$)	λ_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	۱۱۲	۱	۱	۱

جدول (۲۲): میزان بار ۶ ساعت

Time	TH _۱	TH _۲	TH _۳	TH _۴	TH _۵	TH _۶
PD (MW)	۱۲۹,۴۳	۱۲۲,۰۵	۱۱۷,۲۶	۱۱۴,۳۵	۱۱۴,۵۹	۱۱۸,۵۹

مراجع

- [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.
- [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.
- [12] 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.

