

یک روش کاربردی برای ارزیابی قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی چندهدفه‌ی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال

سعید باقری^۱، دانشجوی دکتری، حمید فلقی^۲، دانشیار

۱- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران
s.baqeri@birjand.ac.ir

۲- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران
falaghi@birjand.ac.ir

چکیده: حفظ یا ارتقاء قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال یکی از اهداف اساسی در برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال است و ارزیابی قابلیت اطمینان طرح‌های پیشنهادی برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال از جمله چالش‌های بزرگ برای حل این مسأله است. با توجه به ابعاد بزرگ شبکه‌های انتقال و حجم محاسبات فرایند ارزیابی قابلیت اطمینان برای هر ساختار شبکه، آنالیز دقیق قابلیت اطمینان برای تمام طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی طی بهینه‌سازی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال تقریباً غیرممکن و غیرعملی است. در این مقاله ابتدا ضرورت ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال در حین بهینه‌سازی چندهدفه‌ی این مسأله نشان داده شده و سپس یک روش کاربردی برای حل این مسأله پیشنهاد شده است. هدف اصلی روش پیشنهادی که مبتنی بر دسته‌بندی پیشامدها و رخدادهای خطأ است، ایجاد امکان ارزیابی دقیق‌تر قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال برای تصمیم‌گیری در مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و رسیدن به پاسخ دقیق‌تر می‌باشد؛ به طوری که نیاز به زمان و حجم محاسباتی زیادی نباشد. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی این مسأله با استفاده از روش پیشنهادی برای شبکه‌ی تغییر یافته‌ی گارور به وسیله‌ی روش بهینه‌سازی NSGAII انجام و نتایج حاصل از آن با روش معمول حل این مسأله مقایسه شده است. نتایج حاصله مؤید صحت رویکرد روش پیشنهادی برای حل این مسأله است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، بهینه‌سازی چندهدفه، قابلیت اطمینان، روش بهینه‌سازی NSGAII

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: حمید فلقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: بیرجند، انتهای بلوار دانشگاه، دانشگاه بیرجند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

مسئله‌ی TEP ذاتاً یک مسئله‌ی پیچیده، غیرخطی، غیرمحدب و آمیخته با متغیرهای صحیح است و حل آن بسیار دشوار می‌باشد؛ حال چنانچه مطالعات قابلیت اطمینان که حجم محاسباتی بسیار بالای دارد نیز در این مسئله لاحظ شود، حل آن بسیار دشوارتر و پیچیده‌تر می‌شود. از همین رو در برخی مطالعات برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه انتقال نظری [۳-۵]، از ملاحظات امنیت و قابلیت اطمینان شبکه صرف نظر شده و مسئله‌ی TEP برای شرایط نرمال شبکه حل شده است. اما صرف نظر کردن از این ملاحظات با توجه به اهمیت تغذیه‌ی پیوسته و باکیفیت مشترکین در شرایط وقوع خطا، ایده‌ی مناسبی نیست.

در برخی دیگر از مطالعات TEP همچون [۱۶-۱۴]، از معیارهای امنیت مانند N-1 یا N-2 برای توسعه‌ی شبکه انتقال استفاده شده است. با لحاظ این معیارهای قطعی، شبکه‌ای حاصل می‌شود که با بروز رخدادهای یکانه یا دوگانه امکان بهره‌برداری از شبکه بدون مشکل وجود داشته باشد. اما لحاظ این معیارها معمولاً منجر به انتخاب طرح توسعه‌ای با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بسیار بالا می‌شود و حتی ممکن است برای بعضی از باس‌های شبکه سطح مطلوب قابلیت اطمینان حاصل نشود [۱۷ و ۱۳].

در برخی دیگر از مطالعات TEP برای درنظرگرفتن شرایط واقعی سیستم قدرت و رفتار احتمالی تجهیزات نیروگاهی و شبکه انتقال و همچنین غلبه بر مشکلاتی که با لحاظ معیارهای قطعی فوق الذکر ایجاد می‌شود، از شاخص‌های قابلیت اطمینان نظری^c LOLC [۱۷]، LOLE^d [۱۸] و EENS^e [۱۱، ۱۲، ۱۹] برای ارزیابی قابلیت اطمینان می‌باشد. این شاخص‌ها نیز از روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو یا یکایک‌شماری رخدادهای خط استفاده شده است.

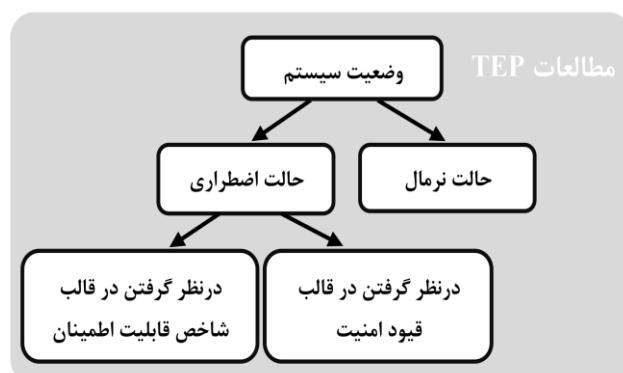
باتوجه به ابعاد بزرگ شبکه‌های انتقال واقعی و تعداد بسیار زیاد حالات خطا که ممکن است بروز کند، محاسبه‌ی دقیق شاخص‌های قابلیت اطمینان بهوسیله‌ی روش‌های شبیه‌سازی یا یکایک‌شماری رخدادهای خط برای تمام طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین حل مسئله‌ی TEP نقراضاً غیرممکن است [۹]. برای غلبه بر این مشکل، در اغلب مطالعات TEP مانند [۲۰، ۱۷، ۱۱] که از روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو استفاده کرده‌اند، تعداد رخدادهای خط برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان بسیار محدود درنظر گرفته شده است. در مطالعاتی مانند [۲۱، ۱۰، ۹] نیز که از روش یکایک‌شماری رخدادهای خط بهره گرفته‌اند به دلیل مشابه، شاخص‌های قابلیت اطمینان با بررسی پیشامدها تا سطح خروج همزمان یک تجهیز محاسبه شده است. اما محدود کردن پیشامدها برای محاسبه‌ی شاخص‌های قابلیت اطمینان باعث می‌شود که شاخص محاسبه شده از دقت کافی برای تصمیم‌گیری در مسئله‌ی TEP برخوردار نباشد و در نتیجه جواب بهینه برای این مسئله حاصل نشود. باتوجه به پرهزینه بودن توسعه‌ی شبکه انتقال و ضرورت انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه در مسئله‌ی TEP، ارزیابی دقیق شاخص

شبکه انتقال وظیفه‌ی رساندن توان تولیدی واحدهای نیروگاهی به نواحی بار را بر عهده دارد و برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه انتقال^f (TEP) یکی از بخش‌های اساسی در طراحی بلندمدت سیستم‌های قدرت محسوب می‌شود. هدف TEP تعیین تعداد و مسیر احداث خطوط جدیدی است که باید به شبکه انتقال اضافه شود تا بار پیش‌بینی شده برای شبکه، با رعایت قیود بهره‌برداری و امنیت بهصورت اقتصادی و بهینه تأمین گردد [۱].

تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی TEP انجام شده و این مسئله در دو محیط سنتی و رقابتی با لحاظ اهداف مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. کمینه کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری [۳-۵]، افزایش سطح رفاه عمومی [۶-۷]، کمینه کردن میزان تراکم خطوط انتقال [۸-۱۰] و حفظ یا ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه انتقال [۹-۱۲] از جمله اهداف اصلی در توسعه‌ی شبکه انتقال می‌باشند که متناسب با محیط مورد مطالعه در این مقالات بررسی شده‌اند. وجود اهداف و معیارهای مختلف و گاه متناقض که از نظر بعد و درجه‌ی اهمیت با یکدیگر متفاوت بوده و در فرایند تصمیم‌گیری این مسئله مدنظر هستند، سبب شده است که امکان بهینه‌سازی همزمان آنها دشوار شود. لذا برنامه‌ریزان در بسیاری از مطالعات انجام شده نظری [۱۳-۸]، روش‌های بهینه‌سازی چنددهده را برای حل و تجزیه و تحلیل دقیق و همزمان این مسئله پیشنهاد کرده‌اند.

یکی از ملاحظات مهم و اهداف اساسی که همواره در طرح‌های توسعه‌ی شبکه انتقال مدنظر است، حفظ یا ارتقاء قابلیت اطمینان شبکه در اجرای این طرح‌ها می‌باشد. درواقع وظیفه‌ی اصلی سیستم قدرت، تغذیه‌ی مشترکین به اقتصادی ترین شکل ممکن و با سطح مطلوبی از پایایی و کیفیت است و قابلیت اطمینان معیاری است که بهوسیله‌ی آن می‌توان میزان توانایی کلی سیستم برای تغذیه‌ی پیوسته و باکیفیت مشترکین را ارزیابی کرد.

به صورت کلی، مطالعاتی که تاکنون در زمینه‌ی TEP انجام شده است را می‌توان بهصورت شکل (۱) دسته‌بندی کرد.



شکل (۱): وضعیت سیستم قدرت در مطالعات TEP

موجود در جبهه‌های کارا) و فضای جستجو کاهش پیدا کرده است؛ ارزیابی قابلیت اطمینان برای این طرح‌های توسعه‌ی حاصل شده می‌تواند به صورت دقیق‌تری انجام شود تا از مجموع پاسخ‌های به‌دست آمده، یک جبهه‌ی کارا به‌دست آید. روند حل مسأله با استفاده از روش پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است.



۳- مدل‌سازی ریاضی مسأله‌ی TEP

در این مقاله مسأله‌ی TEP به صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه مدل‌سازی و حل شده است. لازم به توضیح است فرمول‌بندی پیشنهادی در این مقاله بر مبنای مدل AC تدوین شده که در آن مدل کامل سیستم با جزئیات و بدون تقریب درنظرگرفته شده است.

۱-۳- توابع هدف

الف) کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری

کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری از اصلی‌ترین اهداف در مطالعه‌ی TEP می‌باشد. در این مقاله تابع هدف مرتبط با هزینه‌های سرمایه‌گذاری طبق رابطه (۱) درنظرگرفته شده است.

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{(i-j) \in \Omega_c} c_{i-j} \times n_{i-j}^{\text{new}} \quad (1)$$

که در این رابطه:

C_{total} هزینه‌ی کل طرح (واحد پول)؛

c_{i-j} هزینه‌ی احداث یک خط انتقال جدید در مسیر

کاندیدای بین باس‌های i و j (واحد پول)؛

n_{i-j}^{new} تعداد خطوط انتقال جدید احداث شده در مسیر

کاندیدای بین باس‌های i و j ؛

Ω_c مجموعه مسیرهای کاندیدا برای توسعه و احداث خطوط انتقال جدید؛

قابلیت اطمینان برای حل این مسأله بسیار ضروری است. اما در مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده، این موضوع مدنظر قرار نگرفته و برای ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان از روش‌های ساده شده‌ی فوق استفاده شده است.

باتوجه به موارد ذکر شده، ارائه‌ی روش و ایده‌های جدیدی که بتواند با حفظ نسبی دقت، از پیچیدگی و حجم محاسباتی ارزیابی قابلیت اطمینان در حل مسأله‌ی TEP بکاهد و طراحان را به طرح‌های توسعه‌ی بهینه‌تر رهنمون سازد، بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. به همین جهت در این مقاله برای کاهش حجم و زمان محاسبات بهینه‌سازی چنددهفته‌ی TEP که قابلیت اطمینان نیز با دقت مطلوبی در آن لحاظ شده باشد، یک روش جدید ارائه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر دسته‌بندی پیشامدها جهت محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد و در این روش، بهینه‌سازی در چند مرحله انجام می‌شود.

در این مقاله قابلیت اطمینان به عنوان یکی از اهداف توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال مدنظر قرار گرفته و باتوجه به تناقض اهداف کمینه کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه، برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در قالب یک مسأله بهینه‌سازی دوهدفه، مدل‌سازی و حل شده است. در این مقاله ابتدا ضرورت ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال در بهینه‌سازی چنددهفته‌ی TEP برای رسیدن به جواب بهینه نشان داده شده و سپس یک روش کاربردی جهت تحقق این هدف مهم ارائه شده است. هدف اصلی روش پیشنهادی، ایجاد امکان ارزیابی دقیق‌تر قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال برای تصمیم‌گیری در مسأله بهینه‌سازی چنددهفته‌ی TEP و رسیدن به پاسخ دقیق‌تر می‌باشد؛ به‌طوری‌که نیاز به زمان و حجم محاسباتی زیادی نباشد.

در ادامه، روش پیشنهادی این مقاله ارائه ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی چنددهفته‌ی TEP در بخش ۲ تشریح شده است. فرمول‌بندی مسأله در بخش ۳ ارائه شده است. کاربرد الگوریتم NSGA-II برای حل این مسأله در بخش ۴ آمده است. نتایج عددی حاصل از روش پیشنهادی در بخش ۵ ارائه شده و نتیجه‌گیری کار نیز در بخش ۶ آمده است.

۲- تشریح روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی، ابتدا پیشامدها متناسب با ابعاد شبکه مورد مطالعه به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس با درنظرگرفتن هر کدام از حالات مفروض برای وقوع پیشامدها، بهینه‌سازی چنددهفته‌ی انجام و جبهه‌ی کارای مربوطه به‌دست می‌آید. پس از انجام بهینه‌سازی با درنظرگرفتن تمام حالات مفروض برای وقوع پیشامدها، چند جبهه‌ی کارا به‌دست می‌آید که هر کدام از آنها معمولاً شامل طرح‌های متفاوتی برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال می‌باشند. حال باتوجه به اینکه طرح‌های پیشنهادی برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال محدود شده (طرح‌های

i	(MW)	$Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$
i	$(MVar)$	$S_{i-j}^f, S_{i-j}^{\max}$
i	(MVA)	n_{i-j}^{\max}
i	(MVA)	θ_{\max}
i	i و j	
i	i (رادیان)	
i	روابط (۳) و (۴) بیانگر معادلات پخش بار AC سیستم می‌باشند؛ این روابط تعادل توان‌های اکتیو و راکتیو در باس‌های شبکه را نشان می‌دهند. روابط (۵) و (۶) بیانگر محدودیت‌های تولید توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم می‌باشند. محدودیت دامنه‌ی ولتاژ باس‌ها نیز با رابطه (۷) نشان داده شده است. محدودیت ظرفیت توان انتقالی خطوط با رابطه (۸) بیان شده است. در ادامه، رابطه‌ی (۹) بیانگر حداقل تعداد خطوطی است که می‌تواند در هر مسیر کاندیدا احداث شود. رابطه‌ی (۱۰) مدل پیشنهادی بیانگر این امر است که اختلاف زاویه ولتاژ بین دو باس متصل نباید از حد مشخصی (که در این مقاله $\frac{\pi}{6}$ رادیان فرض شده است [۲۲]) بزرگتر باشد.	

۳-۳- محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان EENS

در این مقاله برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال از شاخص EENS استفاده شده است که مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$EENS = \sum_{j \in \phi} LC_j \cdot p_j \cdot T_j \quad (11)$$

که در این رابطه:

انرژی تغذیه نشده‌ی سیستم؛ $EENS$

مجموع میزان بار قطع شده‌ی سیستم با وقوع رخداد زام؛

احتمال وقوع رخداد زام؛ LC_i^j

مجموعه‌ی رخدادها؛ p_j

مدت زمانی که طول می‌کشد تا بار قطع شده به

واسطه‌ی وقوع رخداد زام دوباره تأمین شود؛ T_j

مطابق رابطه (۱۱)، برای محاسبه EENS لازم است به‌ازای هر رخداد زام، میزان بار قطع شده در هر باس محاسبه شود. در این پژوهش به منظور کمینه کردن میزان بار قطع شده با وقوع هر رخداد خطای زام، یک زیرمسأله مبتنی بر پخش بار بهینه‌ی AC به صورت زیر تدوین و حل شده است:

$$\min LC_j = \sum_{j \in \phi} C_i \quad (12)$$

ب) ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال یکی دیگر از اهداف مهم و اساسی توسعه‌ی خطوط انتقال، حفظ یا ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال می‌باشد. همان‌گونه که قبلًا بیان شد برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال شاخص‌های متعددی ارائه شده است که از این میان، شاخص EENS شاخصی کارا و معترض در سطح تولید و انتقال می‌باشد. لذا در این پژوهش برای ارزیابی سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال از این شاخص استفاده شده است. بنابراین تابع هدف دوم مسئله به صورت زیر خواهد بود.

$$\min EENS \quad (2)$$

در بخش ۳-۳ نحوه محاسبه این شاخص آمده است. لازم به توضیح است که اگر چه در این مقاله از شاخص EENS برای هدف بهبود قابلیت اطمینان استفاده شده است، اما بدون هیچ‌گونه تغییری در روش پیشنهادی می‌توان از سایر شاخص‌های قابلیت اطمینان نیز در مدل‌سازی این هدف مسئله استفاده کرد.

۲-۳- قیود حاکم بر مدل AC مسئله TEP

توابع هدف مطرح شده در بخش قبل به همراه مجموعه‌ی محدودیت‌های زیر، مدل ریاضی پیشنهادی مسئله را تشکیل می‌دهند.

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{n \in \Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_m + \delta_n - \delta_i), \forall i \in \Omega_B \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{n \in \Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_m + \delta_n - \delta_i), \forall i \in \Omega_B \quad (4)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \forall i \in \Omega_G \quad (5)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \forall i \in \Omega_G \quad (6)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (7)$$

$$S_{i-j}^f \leq S_{i-j}^{\max}, \forall (i-j) \in \Omega_L \quad (8)$$

$$0 \leq n_{i-j} \leq n_{i-j}^{\max}, \forall (i-j) \in \Omega_C \quad (9)$$

$$|\delta_i - \delta_j| \leq \theta_{\max}, \forall (i-j) \in \Omega_L \quad (10)$$

که در این روابط:

درایه‌ی (i, n) ماتریس ادمیتانس باس شبکه؛ Y_{in}

زاویه‌ی Y_{in} ؛ θ_m

زاویه‌ی ولتاژ باس i ؛ δ_i

مجموعه خطوط موجود و جدید شبکه؛ Ω_L

مجموعه باس‌های شبکه؛ Ω_B

توان اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه i (MW) و P_{Gi}, Q_{Gi}

($MVar$)؛

توان اکتیو و راکتیو مصرفی در باس i (MW) و P_{Di}, Q_{Di}

($MVar$)؛

دامنه‌ی ولتاژ باس i (pu)؛ V_i

حد پایین و بالای دامنه‌ی ولتاژ باس‌ها (pu)؛ V_i^{\min}, V_i^{\max}

حد پایین و بالای تولید توان اکتیو نیروگاه i (MW) و $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$

[۳۱] از جمله روش‌های بهینه‌سازی تکاملی هستند که برای حل این مسئله به کار گرفته شده‌اند. از طرفی با توجه به وجود اهداف مختلف و متناقضی که در حل مسئله‌ی TEP مدنظر است؛ امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرالبتکاری چندهدفه برای حل این مسئله پرکاربرد شده است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب^۵ (NSGA-II) توانایی بالایی برای حل مسائل غیرخطی، غیرمحدد و آمیخته با متغیرهای صحیح دارد [۱۰ و ۳۲]. لذا در این پژوهش از این روش برای حل مسئله‌ی TEP استفاده شده است. جزئیات این الگوریتم در [۹ و ۱۰] آمده است.

گام‌های این الگوریتم برای حل مسئله‌ی چندهدفه‌ی TEP به صورت زیر می‌باشد:

گام (۱) تولید جمعیت اولیه (متناسب با شبکه‌ی مورد مطالعه)؛

گام (۲) محاسبه‌ی توابع هدف مسئله‌ی برای هر طرح توسعه؛

گام (۳) مرتب‌سازی نامغلوب پاسخ‌ها؛

گام (۴) تولید جمعیت فرزندان با استفاده از عملگرهای جهش و برش؛

گام (۵) محاسبه‌ی توابع هدف مسئله‌ی برای فرزندان؛

گام (۶) مرتب‌سازی نامغلوب پاسخ‌ها؛

گام (۷) انتخاب نسل جدید از میان بهترین پاسخ‌های جمعیت والد و فرزندان بر اساس مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله‌ی ازدحامی؛

گام (۸) اگر همه‌ی تکرارهای الگوریتم انجام شده به گام ۹ برو و در غیر این صورت به گام ۴ برگرد.

گام (۹) انتخاب بهترین جبهه‌ی کار؛

گام (۱۰) انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه‌ی نهایی با تصمیم‌گیری فازی.

subject to:

$$P_{Gi} - (P_{Di} - C_i) = \sum_{n \in \Omega_B} |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), \forall i \in \Omega_B \quad (13)$$

$$Q_{Gi} - (Q_{Di} - (C_i \times \frac{Q_{Di}}{P_{Di}})) = \sum_{n \in \Omega_B} |Y_{in} V_i V_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), \forall i \in \Omega_B \quad (14)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, \forall i \in \Omega_G \quad (15)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, \forall i \in \Omega_G \quad (16)$$

$$S_{i-j}^f \leq S_{i-j}^{\max}, \forall (i-j) \in \Omega_L \quad (17)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, \forall i \in \Omega_B \quad (18)$$

$$0 \leq C_i \leq P_{Di} \quad \forall i \in \Omega_B \quad (19)$$

در این روابط C_i میزان بار قطع شده در بسیار i را نشان می‌دهد. دیگر پارامترهای این روابط در بخش‌های قبل تشریح شده‌اند. در روابط فوق، رابطه‌ی (۱۲) کمینه کردن میزان بار قطع شده با موقعیت هر خداداد خطا را نشان می‌دهد. رابطه‌ی (۱۳) و (۱۴) قیود تساوی پخش بار AC می‌باشند. در رابطه‌ی (۱۴) فرض شده است که اگر مقدار مشخصی از توان اکتیو در محل بار قطع شود، همان مقدار توان راکتیو باید قطع گردد تا فاکتور پخش بار ثابت باقی بماند. روابط (۱۵)، (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب معادل روابط (۴)، (۵)، (۶) و (۷) می‌باشند که قبل معرفی شده است. رابطه‌ی (۱۹) نیز بیانگر محدودیت میزان بار قابل قطع در هر بس می‌باشد.

لازم به ذکر است مدل قطع بار بهینه که در قالب روابط (۱۲) تا (۱۹) بیان شده است، به ازای هر رخداد از مجموعه‌ی رخدادهای سیستم (Φ) لازم است اجرا شود تا در نهایت بتوان طبق (۱۱) شاخص EENS را محاسبه نمود.

۴- روش حل

به صورت کلی روش‌های حل مسئله‌ی TEP به دو گروه اصلی شامل روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و روش‌های بهینه‌سازی ریاضی تقسیم می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی ریاضی متعارف، الگوهای موقتی برای حل مدل‌های ساده و ایده‌آل ارائه می‌دهند؛ اما در واقعیت، مسئله‌ی TEP بسیار پیچیده و دشوار بوده و این روش‌ها اغلب نمی‌توانند به راحتی پاسخ مناسب برای شرایط حقیقی شبکه کاره کنند. از جمله روش‌های تحلیلی و ریاضی که در حل این مسئله به کار گرفته شده‌اند می‌توان به روش‌های شاخه و کران [۲۳]، برنامه‌ریزی خطی [۲۴]، برش بندر [۲۵] و برنامه‌ریزی پویا [۲۶] اشاره کرد.

باتوجه به محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های روش‌های تحلیلی و ریاضی، روش‌های بهینه‌سازی تکاملی جایگاه مناسبی برای حل مسئله‌ی TEP به خود اختصاص داده‌اند. الگوریتم‌های اجتماعی مورچگان [۱۷]، جستجوی منوعه [۲۷]، تکامل تفاضلی [۲۸]، ژنتیک [۲۹]، بهینه‌سازی تجمع ذرات گسسته [۳۰] و جستجوی هارمونی

آزمایش، پیشامدها برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان به صورت

زیر دسته‌بندی شده‌اند:

حالت ۱: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه (خطاهای هر کدام از خطوط

و یا هر کدام از ژنراتورهای سیستم);

حالت ۲: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه و پیشامدهای دوگانه خروج

هم‌زمان دو ژنراتور؛

حالت ۳: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه و پیشامدهای دوگانه خروج

هم‌زمان دو خط؛

حالت ۴: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه و پیشامدهای دوگانه خروج

هم‌زمان یک خط و یک ژنراتور؛

در این آزمایش با لحاظ هر یک از حالت‌های فوق برای پیشامدها

که برای محاسبه شاخص قابلیت اطمینان درنظر گرفته شده،

بهینه‌سازی دوهدفه انجام شده است. با انجام این مرحله، چهار جبهه‌ی

کارای مختلف به دست آمده است. سپس فقط برای طرح‌های توسعه‌ی

موجود در این جبهه‌های کارا، شاخص قابلیت اطمینان با بررسی

رخدادهای خط‌تا سطح خروج هم‌زمان سه تجهیز (N-3) محاسبه

شده و بر اساس نتایج حاصل از آن، جبهه کارای نهایی حاصل شده

است.

آزمایش ب) در این آزمایش که به منظور معیار ارزیابی روش

پیشنهادی تدوین شده است و شیوه‌ی مرسوم را دربردارد، شاخص

قابلیت اطمینان برای تمامی طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین

بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مسئله TEP، بوسیله‌ی روش یکایک‌شماری

و با بررسی رخدادهای خط‌تا سطح خروج هم‌زمان سه تجهیز (N-3)

محاسبه شده و جبهه‌ی کارای نهایی در یک مرحله به دست آمده است.

لازم به توضیح است که در این مقاله مطالعات بر روی شبکه‌ی ۶ باسه‌ی

توسعه یافته‌ی گارور انجام شده است. شکل و اطلاعات مربوط به این

شبکه در ضمیمه‌ی آراهه شده است.

۱-۵- نتایج عددی آزمایش الف

در این آزمایش، بهینه‌سازی دوهدفه‌ی TEP با لحاظ هر یک از

حالت‌های مفروض برای وقوع پیشامدها انجام شده و نتایج حاصل از آن به ترتیب در شکل‌های (۴) تا (۷) نمایش داده شده است. زمان

صرف شده برای به دست آوردن این جبهه‌های کارا به ترتیب برابر با ۱۱۹۸۹ ثانیه (تقرباً معادل با ۳ ساعت و ۲۰ دقیقه)، ۲۵۲۳۴ ثانیه

(تقرباً معادل با ۷ ساعت و ۱ دقیقه)، ۳۵۳۷۷ ثانیه (تقرباً معادل با ۹ ساعت و ۵۰ دقیقه) و ۳۳۴۳۹ ثانیه (تقرباً معادل با ۹ ساعت و ۱۸ دقیقه) بوده است.

بر اساس جبهه‌های کارای حاصله، درنظر گرفتن ۴ حالت مختلف

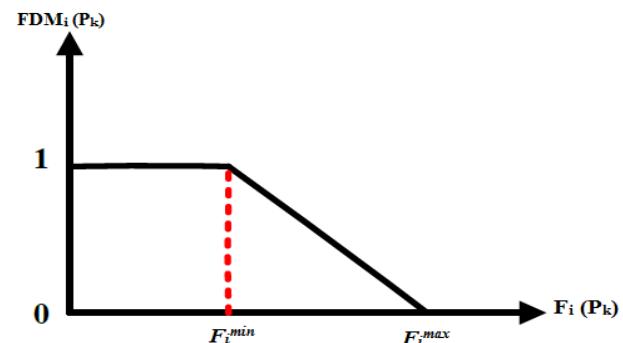
برای پیشامدها منجر به طرح‌های توسعه‌ی بسیار متفاوتی برای

شبکه‌ی انتقال شده است. جهت بررسی دقیق‌تر این موضوع، برای هر

کدام از جبهه‌های کارا نتایج عددی مربوط به سه طرح توسعه شامل

طرح توسعه با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری، طرح توسعه با کمترین

تاكنون انواع مختلفی از توابع عضویت مانند توابع عضویت خطی، نمایی و سایر موارد پیشنهاد شده‌اند. در این مطالعه از تابع عضویت خطی برای حل مسئله استفاده شده است. این تابع دارای یک حد پایین و یک حد بالا است و به صورت یک تابع یکنواخت نزولی نمایش داده می‌شود. شکل (۳) چنین تابع عضویتی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تابع عضویت متناظر با هدف i

در این روش به هر پاسخ P_k از جبهه‌ی کارا بازای هر تابع هدف i یک مقدار رضایتمندی تخصیص داده می‌شود که از رابطه‌ی (۲۰) به دست می‌آید.

$$FDM_i(P_k) = \begin{cases} 1 & F_i(P_k) \leq F_i^{\min} \\ \frac{F_i^{\max} - F_i(P_k)}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} & F_i^{\min} \leq F_i(P_k) \leq F_i^{\max} \\ 0 & F_i(P_k) \geq F_i^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

در این صورت برای جواب k ام، معیار نهایی تصمیم‌گیری به صورت رابطه‌ی (۲۱) می‌باشد.

$$FDMN_{P_k} = \frac{\sum_{i=1}^n FDM_i(P_k)}{\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^n FDM_i^j(P_k)} \quad (21)$$

که در روابط فوق، s تعداد جواب موجود در جبهه‌ی کارا، n تعداد تابع هدف، P_k جواب k ام موجود در جبهه‌ی کارا، $F_i(P_k)$ مقدار تابع هدف i ام بازای جواب k ام، F_i^{\min} و F_i^{\max} حداقل و حداقل مقدار تابع هدف i ام می‌باشد که با توجه به نظر طراح می‌تواند مقادیر مختلفی داشته باشد. با محاسبه‌ی معیار نهایی تصمیم‌گیری برای همه‌ی جواب‌های موجود در دسته جواب مغلوب‌نشدنی، جواب با بیشترین مقدار $FDMN$ به عنوان طرح نهایی انتخاب می‌گردد.

۵- مطالعات عددی و نتایج

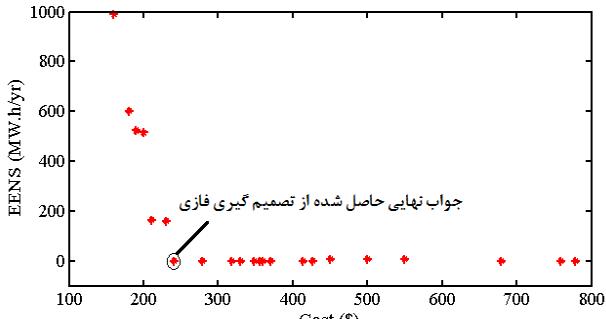
در این مقاله جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، دو آزمایش طراحی شده که به شرح زیر است:

آزمایش الف) در این آزمایش، بهینه‌سازی دوهدفه‌ی TEP با استفاده از روش پیشنهادی انجام شده است. لازم به توضیح است که در این

جدول (۱): نتایج عددی مربوط به حالت ۱ در آزمایش الف

خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$	۹۸۹/۳۲	۱۶۰ (\$)	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{1-2} = 1, n_{1-5} = 1, n_{2-4} = 2, n_{3-5} = 3, n_{1-3} = 2, n_{2-5} = 3, n_{4-5} = 2, n_{1-6} = 1, n_{2-6} = 2, n_{3-6} = 2, n_{4-6} = 2,$	۰/۰۰۵۶	۷۷۹ (\$)	طرح انتخابی با کمترین EENS مقدار
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 3, n_{4-6} = 3$	۰/۰۳۳	۲۴۰ (\$)	مناسب‌ترین طرح انتخابی

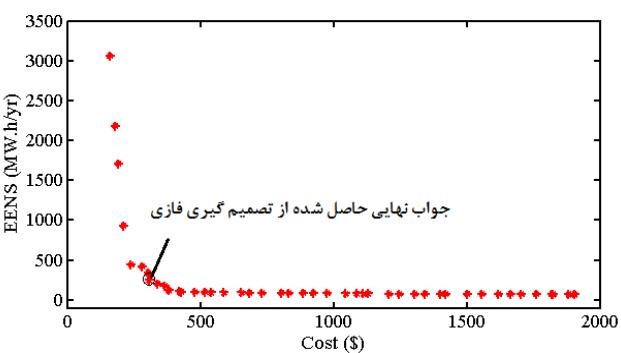
مقدار EENS و طرح توسعه‌ی منتخب نهایی که با روش رضایت‌مندی فازی به دست آمده در قالب جدول‌های (۱) تا (۴) ارائه شده است.



شکل (۴): جبهه کاری آزمایش الف - حالت ۱

جدول (۲): نتایج عددی مربوط به حالت ۲ در آزمایش الف

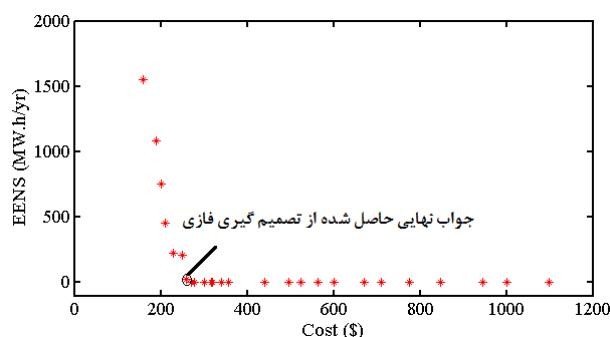
خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$	۲۶۱۲/۰۵	۱۶۰ (\$)	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{1-2} = 3, n_{1-4} = 3, n_{1-5} = 3, n_{2-3} = 3, n_{2-4} = 3, n_{3-5} = 3, n_{1-3} = 2, n_{2-5} = 4, n_{3-4} = 3, n_{4-5} = 4, n_{2-6} = 4, n_{3-6} = 4, n_{4-6} = 4, n_{5-6} = 4$	۶۹/۸۳	۱۹۰۵ (\$)	طرح انتخابی با کمترین EENS مقدار
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 4, n_{4-6} = 3, n_{1-3} = 1$	۲۴۵/۰۰۷۳	۳۰۸ (\$)	مناسب‌ترین طرح انتخابی



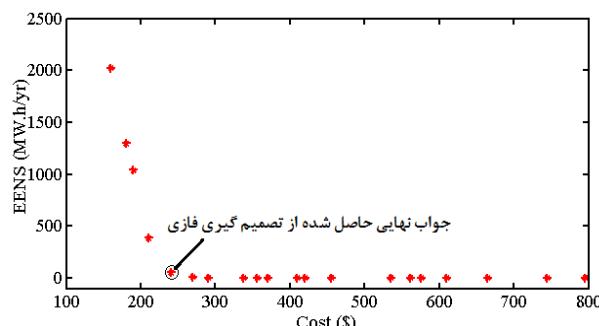
شکل (۵): جبهه کاری آزمایش الف - حالت ۲

جدول (۳): نتایج عددی مربوط به حالت ۳ در آزمایش الف

خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$	۱۲۶۷/۰۱۸	۱۶۰ (\$)	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{1-2} = 3, n_{1-5} = 2, n_{2-3} = 3, n_{2-4} = 1, n_{3-5} = 3, n_{2-5} = 1, n_{3-4} = 3, n_{4-5} = 1, n_{1-6} = 2, n_{2-6} = 2, n_{3-6} = 4, n_{4-6} = 4$	۰/۰۰۹۳۱	۱۰۹۹ (\$)	طرح انتخابی با کمترین EENS مقدار
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 3, n_{5-6} = 1$	۰/۲۳	۲۷۱ (\$)	مناسب‌ترین طرح انتخابی



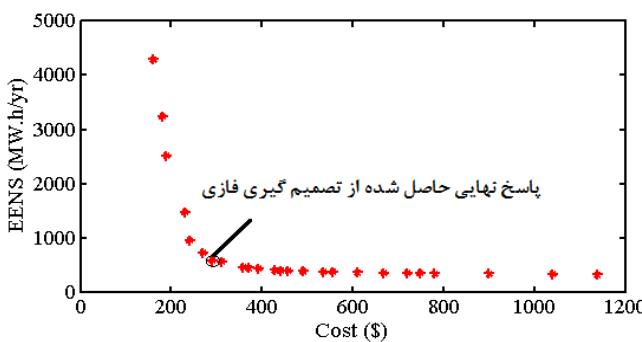
شکل (۶): جبهه کاری آزمایش الف - حالت ۳



شکل (۷): جبهه کاری آزمایش الف - حالت ۴

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، بازه‌ی تغییرات هزینه‌ی سرمایه‌گذاری طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در جبهه‌های کارا مؤید این موضوع است که لحاظ پیشامدهای مختلف برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان منجر به طرح‌های توسعه‌ی بسیار متفاوتی برای شبکه شده است. این نتایج، بیانگر اهمیت محاسبه‌ی دقیق شاخص قابلیت اطمینان در مطالعه‌ی چنددهفته‌ی TEP جهت انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه می‌باشد. درواقع نتایج بهدست آمده، ضرورت ارائه روش‌های جدید برای حل دقیق این مسأله را نشان می‌دهد.

طبقاً روش پیشنهادی، در ادامه‌ی آزمایش ۱ و پس از اینکه جبهه‌های کارا با درنظر گرفتن پیشامدهای مختلف بهدست آمد، جبهه‌ی کارای نهایی آزمایش الف با ارزیابی دقیق‌تر شاخص قابلیت اطمینان برای طرح‌های توسعه‌ی حاصله از این جبهه‌ها بهدست آمده است. جبهه کارای نهایی که با توجه به مدل پیشنهادی این مقاله حاصل شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. لازم بهذکر است زمان صرف شده برای بهدست آوردن این جبهه کارا برابر با ۱۲۳۲۳ ثانیه (نحویاً معادل با ۳ ساعت و ۲۵ دقیقه) بوده است.



شکل (۱۰): جبهه کارای نهایی آزمایش الف

در جدول (۵) نتایج عددی مربوط به سه نقطه از این جبهه کارا شامل نقاط با کمترین هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، کمترین مقدار EENS و مناسب‌ترین جواب مشخص شده است.

جدول (۵): نتایج عددی متناظر با جبهه کارای نهایی آزمایش الف

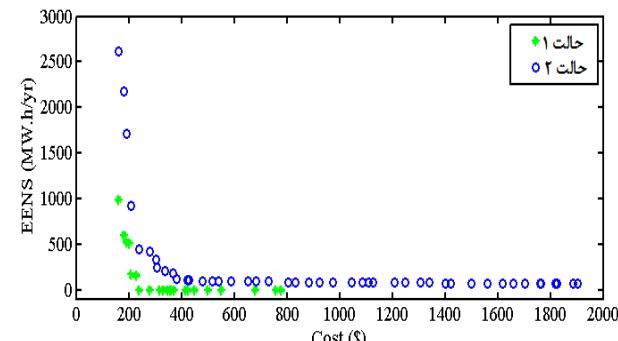
خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$	۴۲۹۸/۴۳	۱۶۰ (S)
$n_{1-2} = 1, n_{1-5} = 3, n_{2-3} = 3, n_{2-4} = 3, n_{3-5} = 3, n_{3-4} = 1, n_{4-5} = 1, n_{2-6} = 4, n_{3-6} = 4, n_{4-6} = 4, n_{5-6} = 4$	۳۱۳۲/۰۱۴	۱۱۳۸ (S)
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 4, n_{4-6} = 3, n_{1-5} = 1$	۵۷۷/۷۶	۲۹۰ (S)

جدول (۴): نتایج عددی مربوط به حالت ۴ در آزمایش الف

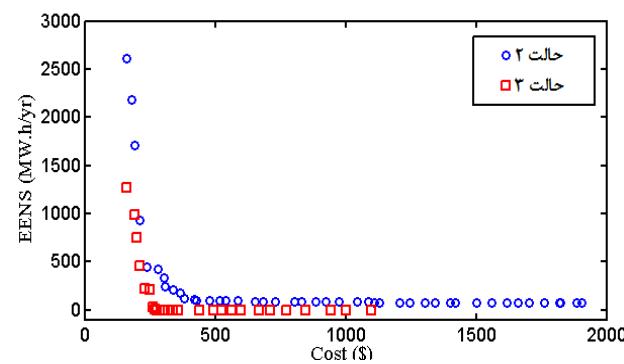
خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$	۱۷۴۲/۰۰۳	۱۶۰ (S)
$n_{1-4} = 2, n_{1-5} = 3, n_{2-3} = 3, n_{1-3} = 4, n_{2-5} = 2, n_{4-5} = 2, n_{2-6} = 4, n_{4-6} = 3$	۰/۰۲	۷۹۰ (S)
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 3, n_{4-6} = 3$	۵۲/۰۰۴۳	۲۴۰ (S)

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول‌های (۱) تا (۴)، لحاظ پیشامدهای مختلف برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان منجر به تغییر زیاد مقدار EENS شده است. تغییرات زیاد مقدار EENS سبب شده تا علی‌رغم یکسان بودن طرح توسعه‌ی با کمترین هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای تمام حالت‌های مفروض، ساختار شبکه‌ی طرح‌های توسعه‌ی با کمترین مقدار EENS و طرح‌های منتخب نهایی، تغییرات زیادی داشته باشند.

برای بهتر نشان دادن میزان تأثیر دقت محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان بر نتایج توسعه‌ی شبکه، جبهه‌های کارای حالت‌های ۱ و ۲ در شکل (۸) و جبهه‌های کارای حالت‌های ۲ و ۳ در شکل (۹) بر روی یک نمودار نشان داده شده و با هم مقایسه شده‌اند.



شکل (۸): مقایسه نتایج حالت‌های ۱ و ۲ آزمایش الف



شکل (۹): مقایسه نتایج حالت‌های ۲ و ۳ آزمایش الف

مقایسه‌ی نتایج بهدست آمده در آزمایش‌های الف و ب نشان می‌دهد که نتایج حاصل از این دو آزمایش نسبت به هم حالت نامغلوب دارند و بر روی یک جبهه‌ی کارا قرار گرفته‌اند. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، جبهه کارای نهایی حاصله از آزمایش الف بازه‌ی وسیع تری از فضای جستجو را نسبت به جبهه کارای آزمایش ب پوشش داده و تعداد طرح‌های توسعه‌ی می‌تواند آمده در جبهه کارای آزمایش الف بیشتر از آزمایش ب بوده است. این یعنی در آزمایش ب باید تعداد تکرارها افزایش یابد تا بتواند به پاسخ‌هایی مشابه آزمایش الف برسد.

همچنین نتایج بهدست آمده نشان می‌دهد که متوسط زمان لازم برای یافتن جبهه کارای نهایی در آزمایش الف درمجموع تقریباً برابر با ۳۲ ساعت و ۵۳ دقیقه بوده است. این در حالی است که متوسط زمان لازم برای یافتن جبهه کارای آزمایش ب تقریباً برابر با ۱۰۷ ساعت و ۲۰ دقیقه بوده است. ازطرفی چون با بزرگ‌تر شدن ابعاد شبکه‌ی انتقال، حجم محاسبات بهصورت نمایی افزایش می‌یابد [۳۱]، باید این نکته را هم لحاظ کرد که ابعاد شبکه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش در مقایسه با شبکه‌های واقعی، کوچک بوده است و چنانچه ابعاد شبکه بزرگ باشد، زمان لازم برای حل مسئله بهشت افزایش خواهد یافت. لذا روش پیشنهادی برای شبکه‌های با ابعاد بزرگ‌تر، بسیار کاربردی‌تر است.

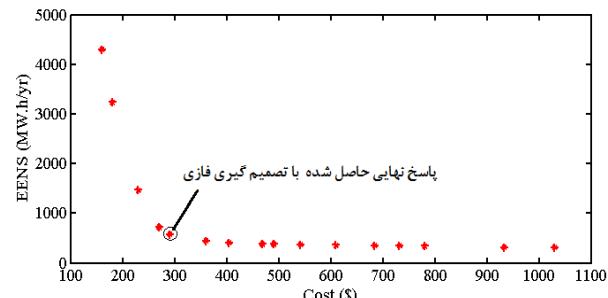
مقایسه‌ی نتایج بهدست آمده از حالت اول آزمایش الف که در آن شاخص قابلیت اطمینان تا سطح خروج یک تجهیز با روش مرسوم یکایک‌شماری رخدادهای خطأ محاسبه شده با نتایج آزمایش ب که با روش پیشنهادی این مقاله حاصل شده است؛ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانمندی بالای برای رسیدن به پاسخ‌های بهتر نسبت به روش‌های مرسوم دارد. بر اساس نتایج بهدست آمده می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی برای حل مسئله‌ی دوهدفه‌ی TEP با درنظر گرفتن قابلیت اطمینان داشته و این مدل توانسته با حفظ نسبی دقت، باعث کاهش حجم و زمان محاسباتی حل مسئله شود.

۶- نتیجه‌گیری

از آنجاکه توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در زمرة‌ی پژوهش‌هایی قرار می‌گیرد که بسیار پرهزینه است؛ لذا انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه در این مسئله بسیار ضروری است. ازسوی دیگر، حفظ و یا ارتقاء قابلیت اطمینان سیستم نیز یکی از اهداف اساسی در برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال است که حصول آن معمولاً مستلزم هزینه‌ی سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا است. در این مقاله باتوجه به اهداف متناقضی که در توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال مطرح است، مسئله‌ی TEP با درنظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال بهصورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه، مدل‌سازی و حل شد.

۵-۲- نتایج عددی آزمایش ب

در این آزمایش، شاخص قابلیت اطمینان برای تمامی شبکه‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین بهینه‌سازی مسئله‌ی TEP با بررسی پیشامدها تا سطح خروج همزمان سه تجهیز (N-3) محاسبه شده و جبهه‌ی کارای مربوط به آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است. زمان صرف شده برای بهدست آوردن این جبهه‌ی کارا برابر با ۳۸۶۲۵۳ ثانیه (تقریباً معادل با ۱۰۷ ساعت و ۱۷ دقیقه) بوده است.



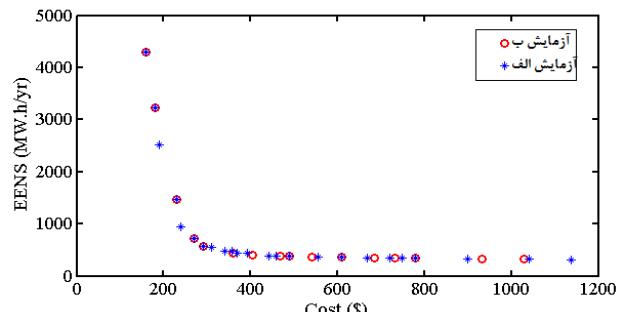
شکل (۱۱): جبهه کارای نهایی آزمایش ب

در جدول (۶) نیز نتایج عددی مربوط به سه نقطه از این جبهه‌ی کارا مشخص شده است.

جدول (۶): نتایج عددی متناظر با جبهه کارای آزمایش ب

خطوط انتخابی توسعه شبکه	EENS (MW.h/yr)	هزینه سرمایه‌گذاری	طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری
$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2,$ $n_{4-6} = 2$	۴۲۹۸/۴۳	۱۶۰ (\$)	
$n_{1-2} = 3, n_{1-5} = 2, n_{2-3} = 3,$ $, n_{3-5} = 2, n_{2-5} = 1, n_{3-4} = 3,$ $n_{4-5} = 1, n_{1-6} = 2, n_{2-6} = 2,$ $n_{3-6} = 4, n_{4-6} = 4$	۳۲۳/۸۴	۱۰۳۹ (\$)	طرح انتخابی با کمترین EENS مقدار
$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 4,$ $n_{4-6} = 3, n_{1-5} = 1$	۵۷۷/۷۶	۲۹۰ (\$)	مناسب‌ترین طرح انتخابی

مقایسه‌ی نتایج جدول‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهد نتایج نهایی حاصل شده از آزمایش‌های الف و ب به یکدیگر نزدیک هستند. برای مقایسه‌ی بهتر نتایج بهدست آمده، نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۲) بر روی یک شکل نمایش داده شده است.

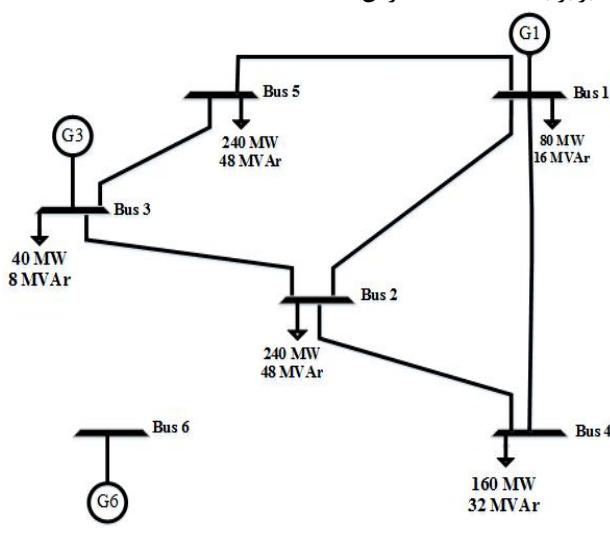


شکل (۱۲): مقایسه‌ی جبهه‌های کارای نهایی آزمایش‌های الف و ب

جدول (۱-۲): اطلاعات خطوط انتقال برای شبکه‌ی ۶ باسه‌ی گارور

λ (year ⁻¹)	C_{ij} (\$)	S_{ij}^{\max} (MVA)	X_{ij} (pu)	r_{ij} (pu)	مسیر
۴	۴۰	۱۲۰	۰/۴	۰/۰۴	۲ ۱
۳/۸	۳۸	۱۲۰	۰/۳۸	۰/۰۳۸	۳ ۱
۶	۶۰	۱۰۰	۰/۶	۰/۰۶	۴ ۱
۲	۲۰	۱۲۰	۰/۲	۰/۰۲	۵ ۱
۶/۸	۶۸	۹۰	۰/۶۸	۰/۰۶۸	۶ ۱
۲	۲۰	۱۲۰	۰/۲	۰/۰۲	۳ ۲
۴	۴۰	۱۲۰	۰/۴	۰/۰۴	۴ ۲
۳/۱	۳۱	۱۲۰	۰/۳۱	۰/۰۳۱	۵ ۲
۳	۳۰	۱۲۰	۰/۳	۰/۰۳	۶ ۲
۵/۹	۵۹	۱۲۰	۰/۵۹	۰/۰۵۹	۴ ۲
۲	۲۰	۱۲۰	۰/۲	۰/۰۲	۵ ۲
۴/۸	۴۸	۱۲۰	۰/۴۸	۰/۰۴۸	۶ ۲
۶/۳	۶۳	۹۵	۰/۶۳	۰/۰۶۳	۵ ۴
۳	۳۰	۱۲۰	۰/۳	۰/۰۳	۶ ۴
۶/۱	۶۱	۹۸	۰/۶۱	۰/۰۶۱	۶ ۵

لازم به ذکر است در هر مسیر، تعداد خطوط مجاز برای توسعه‌ی شبکه حداکثر برابر با ۴ خط در نظر گرفته شده است. همچنین برای هر خط T_j برابر با $0/5$ (h/Km) فرض شده است.



شکل (۱۳): ساختار شبکه‌ی ۶ باسه‌ی گارور

مراجع

- [1] Lei, Y., Zhang, P., Hou, K., Jia, H., Mu, Y., and Sui, B., "An Incremental Reliability Assessment Approach for Transmission Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 3, pp. 2597-2609, 2018.
- [2] Hemmati, R., Hooshmand, R.-A., and Khodabakhshian, A., "Comprehensive review of generation and transmission expansion planning", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 7, No. 9, pp. 955-964, 2013.
- [3] Jalilzadeh, S., Kazemi, A., Shayeghi, H., Madavi, M., "Technical and economic evaluation of voltage level in

ازسوی دیگر به دلیل اینکه برای شبکه‌های انتقال واقعی، محاسبه دقیق شاخص‌های قابلیت اطمینان به وسیله‌ی روش‌های شبیه‌سازی یا یکایک‌شماری رخدادهای خط‌ها برای تمام طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین حل مسأله‌ی TEP تقریباً غیرعملی و غیرممکن است و در اکثر مطالعات توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، این شاخص‌ها با دقت بسیار کمی محاسبه شده است؛ در این مقاله ابتدا ضرورت ارزیابی دقیق قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال در حین حل مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی TEP برای دست‌یابی به جواب بهینه نشان داده شد و سپس یک روش جدید برای ارزیابی قابلیت اطمینان در مسأله بهینه‌سازی چندهدفه‌ی TEP پیشنهاد شد. روش پیشنهادی مبتنی بر محدود کردن فضای جستجوی پاسخ بهینه از طریق دسته‌بندی پیشامدها و رخدادهای خطا بود. درواقع، در روش پیشنهادی ابتدا فضای جستجو کاهش یافت و سپس برای پاسخ‌های موجود در این فضا شاخص قابلیت اطمینان با دقت بالا محاسبه شد و جمهه‌ی کارای بهینه‌ی نهایی به دست آمد. در ادامه نیز صحت رویکرد روش پیشنهادی برای حل این مسأله مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج به دست آمده نشان داد که روش پیشنهادی این مقاله برای ارزیابی قابلیت اطمینان از دقت بسیار بالاتری نسبت به روش مرسوم یکایک‌شماری رخدادهای خط‌ها تا سطح خروج یک تجهیز برخوردار است که با توجه به پرهزینه بودن توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، بسیار حائز اهمیت است. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که روش پیشنهادی توانسته است با حفظ نسبی دقت، باعث کاهش چشمگیر حجم و زمان محاسباتی حل این مسأله شود. درواقع، نتایج عددی حاصله از مطالعات حاکی از آن است که روش پیشنهادی این مقاله می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای ارزیابی قابلیت اطمینان در برنامه‌ریزی توسعه‌ی چندهدفه‌ی شبکه‌های انتقال واقعی مورد استفاده قرار بگیرد.

ضمیمه‌های

در این بخش اطلاعات قطعی و احتمالاتی مربوط به شبکه‌ی توسعه یافته‌ی گارور ارائه شده است. در جدول (۱-۱) اطلاعات باس‌های تولید و ژنراتورها و در جدول (۱-۲) نیز اطلاعات مربوط به خطوط انتقال لیست شده است. همچنین در شکل (۱۳) ساختار این شبکه نشان داده شده است.

جدول (۱-۱): اطلاعات ژنراتورها برای شبکه‌ی ۶ باسه‌ی گارور

T_j (h)	λ (year ⁻¹)	Q^{\min} (MVAr)	Q^{\max} (MVAr)	P^{\max} (MW)	No. of units	باس
۳۰	۱۰	- ۱۰	۴۸	۱۶۰	۱	۱
۳۰	۱۰	- ۱۰	۱۰۱	۳۷۰	۳	۳
۳۰	۱۰	- ۱۰	۱۸۳	۶۱۰	۳	۶

- [17] da Silva, A. M. L., Rezende, L. S., da Fonseca Manso, L. A., and de Resende, L. C., "Reliability worth applied to transmission expansion planning based on ant colony system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32, No. 10, pp. 1077-1084, 2010.
- [18] Hooshmand, R.-A., Hemmati, R., and Parastegari, M., "Combination of AC transmission expansion planning and reactive power planning in the restructured power system", Energy Conversion and Management, Vol. 55, No. 1, pp. 26-35, 2012.
- [19] Zhao, J. H., Dong, Z. Y., Lindsay, P., and Wong, K. P., "Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 479-488, 2009.
- [20] Braga, A., and Saraiva, J., "Dealing with uncertainties in long term transmission expansion planning problems", IEEE Russia on Power technology, pp. 1-7, 2005.
- [21] Xie, M., Zhong, J., and Wu, F. F., "Multiyear transmission expansion planning using ordinal optimization", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 1420-1428, 2007.
- [22] Alhamrouni, I., Khairuddin, A., Ferdavani, A. K., and Salem, M., "Transmission expansion planning using AC-based differential evolution algorithm," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, No. 10, pp. 1637-1644, 2014.
- [23] Choi, J., Mount, T. D., and Thomas, R. J., "Transmission expansion planning using contingency criteria," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 2249-2261, 2007.
- [24] Leou, R.-C., "A multi-year transmission planning under a deregulated market", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, No. 3, pp. 708-714, 2011.
- [25] Akbari, T., Rahimikian, A., and Kazemi, A., "A multi-stage stochastic transmission expansion planning method", Energy Conversion and Management, Vol. 52, No. 8, pp. 2844-2853, 2011.
- [26] Dusonchet, Y., and El-Abiad, A., "Transmission planning using discrete dynamic optimizing", IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, Vol. 1, No. 4, pp. 1358-1371, 1973.
- [27] Da Silva, E. L., Ortiz, J. A., De Oliveira, G. C., and Binato, S., "Transmission network expansion planning under a tabu search approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, pp. 62-68, 2001.
- [28] Sum-Im, T., Taylor, G., Irving, M., and Song, Y., "Differential evolution algorithm for static and multistage transmission expansion planning", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, No. 4, pp. 365-384, 2009.
- [29] Jalilzadeh, S., Kazemi, A., Shayeghi, H., and Madavi, M., "Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA", Energy conversion and Management, Vol. 49, No. 5, pp. 1119-1125, 2008.
- [30] Shayeghi, H., Mahdavi, M., and Bagheri, A., "Discrete PSO algorithm based optimization of transmission lines loading in TNEP problem", Energy Conversion and management, Vol. 51, No. 1, pp. 112-121, 2010.
- [31] Verma, A., Panigrahi, B., and Bijwe, P., "Harmony search algorithm for transmission network expansion planning," IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4, No. 6, pp. 663-673, 2010.
- [32] Ozdemir, O., Munoz, F. D., Ho, J. L., and Hobbs, B. F., "Economic analysis of transmission expansion planning with price-responsive demand and quadratic losses by successive LP", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 1, pp. 1096-1107, 2015.
- [33] El-Bagges, M., and Elsayed, W., "Social spider algorithm for solving the transmission expansion planning problem", Electric Power Systems Research, vol. 143, No. 1, pp. 235-243, 2017.
- [34] Henao, A., Sauma, E., and Gonzalez, A., "Impact of introducing flexibility in the Colombian transmission expansion planning", Energy, Vol. 157, No. 1, pp. 131-140, 2018.
- [35] de la Torre, S., Conejo, A. J., and Contreras, J., "Transmission expansion planning in electricity markets", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 1, pp. 238-248, 2008.
- [36] کاظم عاملی، محمد رضا آقالاهیمی و حمید فلقی، "برنامه‌ریزی دینامیک توسعه انتقال در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار یافته با درنظر گرفتن پاسخ‌گویی بار"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ششم، شماره ۱۲، ص ۵۶-۶۶، ۱۳۹۶.
- [37] Foroud, A. A., Abdoos, A. A., Keypour, R., and Amirahmadi, M., "A multi-objective framework for dynamic transmission expansion planning in competitive electricity market," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32, No. 8, pp. 861-872, 2010.
- [38] Maghouli, P., Hosseini, S. H., Buygi, M. O., and Shahidehpour, M., "A multi-objective framework for transmission expansion planning in deregulated environments", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, pp. 1051-1061, 2009.
- [39] Mori, H., and Kakuta, H., "A CNSGA-II based method for multi-objective probabilistic transmission network expansion planning", in Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2010.
- [40] Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M. S., and Moeini-Aghetaie, M., "A multi-objective transmission expansion planning framework in deregulated power systems with wind generation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 6, pp. 3003-3011, 2014.
- [41] Gomes, P. V., Silva, J. P., and Saraiva, J. T., "Multiyear and multi-criteria AC Transmission Expansion Planning model considering reliability and investment costs", European Energy Market (EEM), pp. 1-5, 2016.
- [42] Zhang, Y., Wang, J., Li, Y., and Wang, X., "An extension of reduced disjunctive model for multi-stage security-constrained transmission expansion planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 1, pp. 1092-1094, 2018.
- [43] Zhang, H., Vittal, V., Heydt, G. T., and Quintero, J., "A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 2, pp. 1125-1133, 2012.
- [44] Silva, I. d. J., Rider, M., Romero, R., Garcia, A., and Murari, C., "Transmission network expansion planning with security constraints", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, pp. 828-836, 2005.

[۳۲] نوید خلیلپور تیلمی، جواد رضائیان و ایرج مهدوی، "بهینه‌سازی چنددهدفه برای تأمین تقاضای برق با استفاده از زمان‌بندی منابع تجدیدپذیر و منابع معمول"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال هفتم، شماره ۱۳، ص ۱۰۲-۱۳۹۷.

[33] Shivaie, M., Sepasian, M., and Sheikh-El-Eslami, M., "Multi-objective transmission expansion planning using fuzzy-genetic algorithm," Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Electrical Engineering, Vol. 35, No. 2, p. 141, 2011.

زیرنویس‌ها

^۱ Transmission Expansion Planning- TEP

^۲ Loss of Load Cost - LOLC

^۳ Loss of Load Expectation - LOLE

^۴ Expected Energy Not Supplied - EENS

^۵ Nondominated Sorting Genetic Algorithm- NSGAII