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

سعید باقری[1]، دانشجوی دکتری، حمید فلقی[2]، 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 ازجمله چالش‌های بزرگ برای حل این مسأله است. باتوجه 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 خطا 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؛ به‌طوری‌که نیاز به زمان و حجم محاسباتی زیادی نباشد. به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، بهینه‌سازی این مسأله با استفاده از روش پیشنهادی برای شبکه‌ی تغییر یافته‌ی گارور به‌وسیله‌ی 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.

واژه های 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

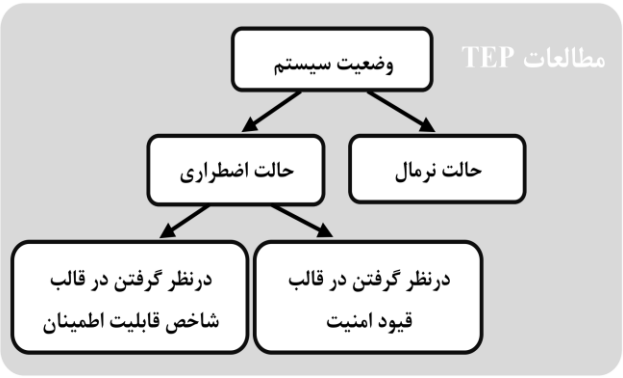
۱- مقدمه

شبکه‌ی انتقال وظیفه‌ی رساندن توان تولیدی واحدهای نیروگاهی به نواحی بار را بر عهده دارد و برنامه‌ریزی توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال[1] (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 شبکه‌ی 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 مسأله در دو محیط سنتی و رقابتی با لحاظ اهداف مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. کمینه کردن هزینه‌های سرمایه‌گذاری [۵-۳]، افزایش سطح رفاه عمومی [۶-۷]، کمینه کردن میزان تراکم خطوط انتقال [۸-۱۰] و حفظ یا ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال [۹-۱۲] ازجمله اهداف اصلی در توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال می‌باشند که متناسب با محیط مورد مطالعه در این مقالات بررسی شده‌اند. وجود اهداف و معیارهای مختلف و گاه متناقض که از نظر بُعد و درجه‌ی اهمیت با یکدیگر متفاوت بوده و در فرایند تصمیم‌گیری این مسأله مدنظر هستند، سبب شده است که امکان بهینه‌سازی همزمان آنها دشوار شود. لذا برنامه‌ریزان در بسیاری از مطالعات انجام شده نظیر [۱۳-۸]، روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه را برای حل و تجزیه و تحلیل دقیق و هم‌زمان این مسأله پیشنهاد کرده‌اند.

یکی از ملاحظات مهم و اهداف اساسی که همواره در طرح‌های توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال مدنظر است، حفظ و یا ارتقاء قابلیت اطمینان شبکه در اجرای این طرح‌ها می‌باشد. درواقع وظیفه‌ی اصلی سیستم قدرت، تغذیه‌ی مشترکین به اقتصادی‌ترین 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.

به‌صورت 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

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

در برخی دیگر از مطالعات TEP همچون [۱۴-۱۶]، از معیارهای امنیت مانند N-1 یا N-2 برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال استفاده شده است. با لحاظ این معیارهای قطعی، شبکه‌ای حاصل می‌شود که با بروز رخدادهای یگانه 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 [۱۳ و ۱۷].

در برخی دیگر از مطالعات TEP برای درنظرگرفتن شرایط واقعی سیستم قدرت و رفتار احتمالی تجهیزات نیروگاهی و شبکه‌ی انتقال و همچنین غلبه بر مشکلاتی که با لحاظ معیارهای قطعی فوق‌الذکر ایجاد می‌شود، از شاخص‌های قابلیت اطمینان نظیر LOLC[2] [۱۷]، LOLE[3] [۱۸] و EENS[4] [۱۱, ۱۲, ۱۹, ۲۰] برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت بهره گرفته شده و برای محاسبه‌ی این شاخص‌ها نیز از روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو یا یکایک‌شماری رخدادهای خطا 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 خطا برای تمام طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین حل مسأله‌ی TEP تقریباً غیرممکن است [۹]. برای غلبه بر این مشکل، در اغلب مطالعات TEP مانند [۱۱, ۱۷, ۱۸, ۲۰] که از روش‌های شبیه‌سازی مانند مونت‌کارلو استفاده کرده‌اند، تعداد رخدادهای خطا برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان بسیار محدود درنظر گرفته شده است. در مطالعاتی مانند [۹, ۱۰, ۲۱] نیز که از روش یکایک‌شماری رخدادهای خطا 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 مسأله‌ی TEP برخوردار نباشد و در نتیجه جواب بهینه برای این مسأله حاصل نشود.

باتوجه به پرهزینه بودن توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال و ضرورت انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه در مسأله‌ی TEP، ارزیابی دقیق شاخص

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

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.

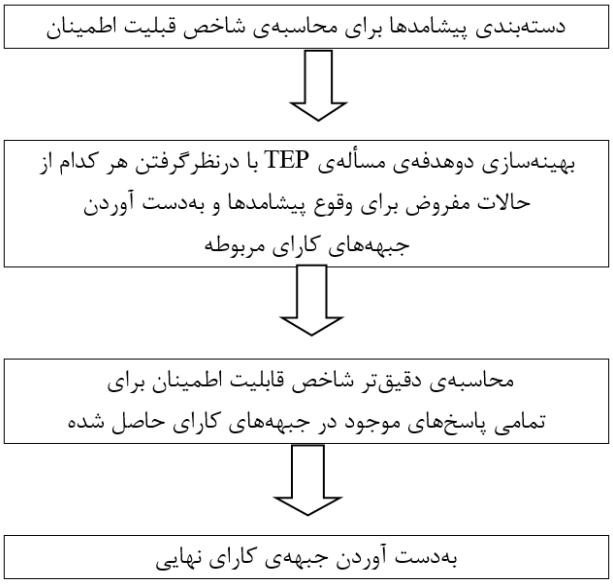
باتوجه به موارد ذکر شده، ارائه‌ی روش و ایده‌های جدیدی که بتواند با حفظ نسبی دقت، از پیچیدگی و حجم محاسباتی ارزیابی قابلیت اطمینان در حل مسأله‌ی TEP بکاهد و طراحان را به طرح‌های توسعه‌ی بهینه‌تر رهنمون سازد، بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. به همین جهت در این مقاله برای کاهش حجم و زمان محاسبات بهینه‌سازی چندهدفه‌ی 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 به‌عنوان 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 چندهدفه‌ی 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 مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی TEP و رسیدن به پاسخ دقیق‌تر می‌باشد؛ به‌طوری‌که نیاز به زمان و حجم محاسباتی زیادی نباشد.

در ادامه، روش پیشنهادی این مقاله جهت ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی 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 شبکه‌ی مورد مطالعه به چند دسته تقسیم‌بندی می‌شوند و سپس با درنظرگرفتن هر کدام از حالات مفروض برای وقوع پیشامدها، بهینه‌سازی چندهدفه 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 معمولا شامل طرح‌های متفاوتی برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال می‌باشند. حال باتوجه به اینکه طرح‌های پیشنهادی برای توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال محدود شده (طرح‌های موجود در جبهه‌های کارا) و فضای جستجو کاهش پیدا کرده است؛ ارزیابی قابلیت اطمینان برای این طرح‌های توسعه‌ی حاصل شده می‌تواند به‌صورت 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.



شکل (۲): روند حل مسأله با استفاده از روش پیشنهادی

۳- مدل‌سازی ریاضی مسأله‌ی TEP

در این مقاله مسأله‌ی TEP به‌صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه مدل‌سازی و حل شده است. لازم به‌توضیح 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.

۳-۱- 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.

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{(i-j)\in\Omega_C} c_{i-j} \times n_{i-j}^{\text{new}} \qquad (۱)$$

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؛

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

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 قبلاً بیان شد برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال شاخص‌های متعددی ارائه شده است که از این میان، شاخص EENS شاخصی کارا و معتبر 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 مسأله به صورت زیر خواهد بود.

$$\min \ \text{EENS} \qquad (۲)$$

در بخش ۳-۳ نحوه‌ی محاسبه‌ی این شاخص آمده است. لازم به‌توضیح 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 مسأله استفاده کرد.

۳-۲- قیود حاکم بر مدل AC مسأله‌ی TEP

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

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{n\in\Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), \ \forall i \in \Omega_B \qquad (۳)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = \sum_{n\in\Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), \ \forall i \in \Omega_B \qquad (۴)$$

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max}, \ \forall i \in \Omega_G \qquad (۵)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max}, \ \forall i \in \Omega_G \qquad (۶)$$

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max}, \ \forall i \in \Omega_B \qquad (۷)$$

$$S_{i-j}^{f} \le S_{i-j}^{\max}, \ \forall (i-j) \in \Omega_L \qquad (۸)$$

$$0 \le n_{i-j} \le n_{i-j}^{\max}, \ \forall (i-j) \in \Omega_C \qquad (۹)$$

$$|\delta_i - \delta_j| \le \theta_{\max}, \ \forall (i-j) \in \Omega_L \qquad (۱۰)$$

که در این روابط:

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

θ_{in} زاویه‌ی Y_{in}؛

δ_i زاویه‌ی ولتاژ باس i؛

Ω_L مجموعه خطوط موجود و جدید شبکه؛

Ω_B مجموعه باس‌های شبکه؛

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

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

V_i دامنه‌ی ولتاژ باس i (pu)؛

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

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

$Q_{Gi}^{\min}$,$Q_{Gi}^{\max}$ حد پایین و بالای تولید توان راکتیو نیروگاه i (MVAr)؛

S_{i-j}^{f} توان ظاهری عبوری از خط انتقال $i-j$ (MVA)؛

$S_{i-j}^{\max}$ حد حرارتی بردار خط انتقال $i-j$ (MVA)؛

$n_{i-j}^{\max}$ بیشترین تعداد خط انتقال قابل احداث در مسیر بین باس‌های i و j؛

$\theta_{\max}$ حداکثر اختلاف زاویه‌ی ولتاژ باس‌های دو طرف خط انتقال $i-j$ (رادیان)؛

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. محدوده‌ی دامنه‌ی ولتاژ باس‌ها نیز با رابطه‌ی (۷) نشان داده شده است. محدودیت ظرفیت توان انتقالی خطوط با رابطه‌ی (۸) بیان شده است. در ادامه، رابطه‌ی (۹) بیانگر حداکثر تعداد خطوطی است که می‌توانند 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 رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{EENS} = \sum_{j\in\phi} LC_j \,.\, p_j \,.\, T_j \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه:

EENS انرژی تغذیه نشده‌ی سیستم؛

LC_i^j مجموع میزان بار قطع شده‌ی سیستم با وقوع رخداد jام؛

p_j احتمال وقوع رخداد jام؛

ϕ مجموعه‌ی رخدادها؛

T_j مدت زمانی که طول می‌کشد تا بار قطع شده به واسطه‌ی وقوع رخداد jام دوباره تأمین شود؛

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

$$\min \ LC_j = \sum_{j\in\phi} C_i \qquad (۱۲)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

subject to:

$$P_{Gi} - (P_{Di} - C_i) = \sum_{n\in\Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i),\ \forall i \in \Omega_B \quad (۱۳)$$

$$Q_{Gi} - (Q_{Di} - (C_i \times \frac{Q_{Di}}{P_{Di}})) = \sum_{n\in\Omega_B} |Y_{in}V_iV_n| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i),\ \forall i \in \Omega_B \quad (۱۴)$$

$$P_{Gi}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{\max},\ \forall i \in \Omega_G \quad (۱۵)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \le Q_{Gi} \le Q_{Gi}^{\max},\ \forall i \in \Omega_G \quad (۱۶)$$

$$S_{i-j}^{f} \le S_{i-j}^{\max},\ \forall (i-j) \in \Omega_L \quad (۱۷)$$

$$V_i^{\min} \le V_i \le V_i^{\max},\ \forall i \in \Omega_B \quad (۱۸)$$

$$0 \le C_i \le P_{Di} \quad \forall i \in \Omega_B \quad (۱۹)$$

در این روابط C_i میزان بار قطع شده در باس 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 وقوع هر رخداد 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 به‌ترتیب معادل روابط (۴)، (۵)، (۶) و (۷) می‌باشند که قبلا معرفی شده است. رابطه‌ی (۱۹) نیز بیانگر محدودیت میزان بار قابل قطع درهر باس می‌باشد.

لازم به‌ذکر است مدل قطع بار بهینه که در قالب روابط (۱۲) تا (۱۹) بیان شده است، به‌ازای 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

به‌صورت کلی روش‌های حل مسأله‌ی TEP به دو گروه اصلی شامل روش‌های بهینه‌سازی تکاملی و روش‌های بهینه‌سازی ریاضی تقسیم می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی ریاضی متعارف، الگوهای موفقی برای حل مدل‌های ساده و ایده‌آل ارائه می‌دهند؛ اما درواقعیت، مسأله‌ی TEP بسیار پیچیده و دشوار بوده و این روش‌ها اغلب نمی‌توانند به راحتی پاسخ مناسب برای شرایط حقیقی شبکه ارائه کنند. ازجمله روش‌های تحلیلی و ریاضی که در حل این مسأله به‌کار 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 مسأله‌ی TEP به خود اختصاص داده‌اند. الگوریتم‌های اجتماع مورچگان [۱۷]، جستجوی ممنوعه [۲۷]، تکامل تفاضلی [۲۸]، ژنتیک [۲۹]، بهینه‌سازی تجمع ذرات گسسته [۳۰] و جستجوی هارمونی [۳۱] ازجمله روش‌های بهینه‌سازی تکاملی هستند که برای حل این مسأله به‌کار گرفته شده‌اند. ازطرفی باتوجه به وجود اهداف مختلف و متناقضی که در حل مسأله‌ی TEP مدنظر است؛ امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری چندهدفه برای حل این مسأله پرکاربرد شده است. الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب[5] (NSGA-II) توانایی بالایی برای حل مسائل غیرخطی، غیرمحدب و آمیخته با متغیرهای صحیح دارد [۱۰ و ۳۲]. لذا در این پژوهش از این روش برای حل مسأله‌ی TEP استفاده شده است. جزئیات این الگوریتم در [۹ و ۱۰] آمده است.

گام‌های این الگوریتم برای حل مسأله‌ی چندهدفه‌ی TEP به‌صورت زیر می‌باشد:

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

گام ۲) محاسبه‌ی توابع هدف مسأله 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 مسأله 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 کارا؛

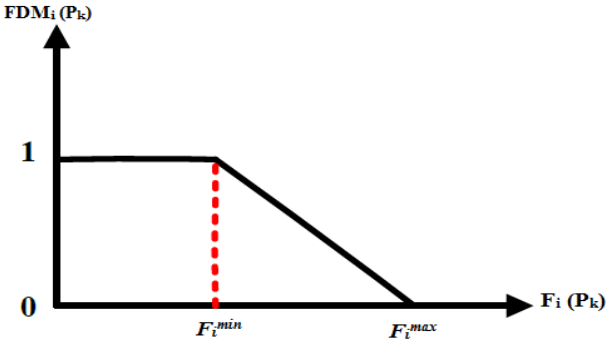
گام ۱۰) انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه‌ی نهایی با تصمیم‌گیری فازی.

۴-۱- انتخاب جواب نهایی با تصمیم‌گیری فازی

پاسخ یک مسأله‌ی چندهدفه، درواقع یک مجموعه‌جواب می‌باشد که هر یک از نقاط این مجموعه باتوجه به‌نظر بهره‌بردار می‌تواند به‌عنوان طرح نهایی انتخاب گردد. روش‌های زیادی برای انتخاب یک جواب سازش‌کارانه بین مجموعه‌جواب‌های بهینه‌ی کارا وجود دارد. روش رضایت‌مندی فازی به دلیل سادگی و شباهت به منطق انسان یکی از روش‌های مناسب است [۳۳]. هر یک از مجموعه‌های فازی توسط معادلاتی که تابع عضویت نام دارند، نمایش داده می‌شوند و مقدار بالاتر این تابع بیانگر سطح رضایت بالاتر خواهد بود. به بیان دیگر، برای هر پاسخ از مجموعه‌ی جبهه‌ی بهینه‌ی کارا مانند P_k، یک تابع عضویت مانند $FDM_i(P_k)$ تعریف می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده‌ی سطحی از P_k می‌باشد که متعلق است به مجموعه‌ای که تابع هدف i را کمینه می‌کند. مقدار تابع عضویت بین ۰ و ۱ متفاوت است و ارزش عضویت صفر نشانگر ناسازگاری با مجموعه و ارزش یک به معنای سازگاری و رضایت‌مندی کامل با مجموعه است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

تاکنون انواع مختلفی از توابع عضویت مانند توابع عضویت خطی، نمایی و سایر موارد پیشنهاد شده‌اند. در این مطالعه از تابع عضویت خطی برای حل مسأله استفاده شده است. این تابع دارای یک حد پایین و یک حد بالا است و به‌صورت 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 به‌ازای هر تابع هدف i یک مقدار رضایتمندی تخصیص داده می‌شود که از رابطه‌ی (۲۰) به‌دست می‌آید.

$$FDM_i(P_k)=\begin{cases}1 & F_i(P_k)\le F_i^{\min}\\ \dfrac{F_i^{\max}-F_i(P_k)}{F_i^{\max}-F_i^{\min}} & F_i^{\min}\le F_i(P_k)\le F_i^{\max}\\ 0 & F_i(P_k)\ge F_i^{\min}\end{cases} \qquad (۲۰)$$

در این صورت برای جواب kام، معیار نهایی تصمیم‌گیری به‌صورت رابطه‌ی (۲۱) می‌باشد.

$$FDMN\ \ P_k=\frac{\sum_{i=1}^{n}FDM_i(P_k)}{\sum_{j=1}^{s}\sum_{i=1}^{n}FDM_i^j(P_k)} \qquad (۲۱)$$

که در روابط فوق، s تعداد جواب موجود در جبهه‌ی کارا، n تعداد توابع هدف، P_k جواب kام موجود در جبهه‌ی کارا، $F_i(P_k)$ مقدار تابع هدف iام به‌ازای جواب kام، $F_i^{\max}$ و $F_i^{\min}$ حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف iام می‌باشد که باتوجه به‌نظر 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 به‌توضیح است که در این آزمایش، پیشامدها برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان به‌صورت 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 دوگانه‌ی خروج هم‌زمان دو ژنراتور؛

حالت ۳: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه و پیشامدهای دوگانه‌ی خروج هم‌زمان دو خط؛

حالت ۴: درنظر گرفتن پیشامدهای یگانه و پیشامدهای دوگانه‌ی خروج هم‌زمان یک خط و یک ژنراتور؛

در این آزمایش با لحاظ هر یک از حالت‌های فوق برای پیشامدها که برای محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان درنظر گرفته شده، بهینه‌سازی دوهدفه انجام شده است. با انجام این مرحله، چهار جبهه‌ی کارای مختلف به‌دست آمده است. سپس فقط برای طرح‌های توسعه‌ی موجود در این جبهه‌های کارا، شاخص قابلیت اطمینان با بررسی رخدادهای خطا تا 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 به‌منظور معیار ارزیابی روش پیشنهادی تدوین شده است و شیوه‌ی مرسوم را دربردارد، شاخص قابلیت اطمینان برای تمامی طرح‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین بهینه‌سازی چندهدفه‌ی مسأله‌ی TEP، به‌وسیله‌ی روش یکایک‌شماری و با بررسی رخدادهای خطا تا سطح خروج هم‌زمان سه تجهیز (N-3) محاسبه شده و جبهه‌ی کارای نهایی در یک مرحله به‌دست آمده است. لازم به‌توضیح 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 أ ارائه شده است.

۵-۱- 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 به‌ترتیب در شکل‌های (۴) تا (۷) نمایش داده شده است. زمان صرف شده برای به‌دست آوردن این جبهه‌های کارا به‌ترتیب برابر با ۱۱۹۸۹ ثانیه (تقریباً معادل با ۳ ساعت و ۲۰ دقیقه)، ۲۵۲۳۴ ثانیه (تقریباً معادل با ۷ ساعت و ۱ دقیقه)، ۳۵۳۷۷ ثانیه (تقریباً معادل با ۹ ساعت و ۵۰ دقیقه) و ۳۳۴۳۹ ثانیه (تقریباً 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 هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، طرح توسعه با کمترین

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

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

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

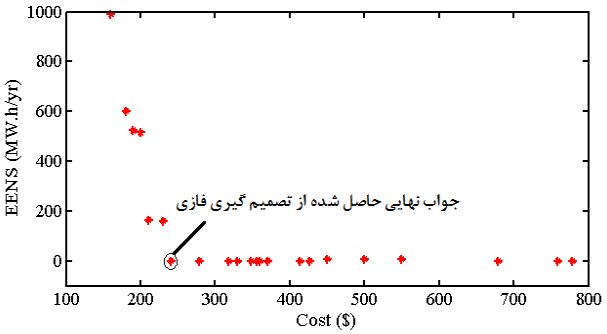
	هزینه سرمایه‌گذاری	EENS (MW.h/yr)	خطوط انتخابی توسعه شبکه
طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶۰ ($)	۹۸۹/۳۲	$n_{3-5}=2,\ n_{2-6}=2,\ n_{4-6}=2$
طرح انتخابی با کمترین مقدار EENS	۷۷۹ ($)	۰/۰۰۵۶	$n_{1-2}=1,\ n_{1-5}=1,\ n_{2-4}=2,\ n_{3-5}=3,\ n_{1-3}=2,\ n_{2-5}=3,\ n_{4-5}=2,\ n_{1-6}=1,\ n_{2-6}=2,\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

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

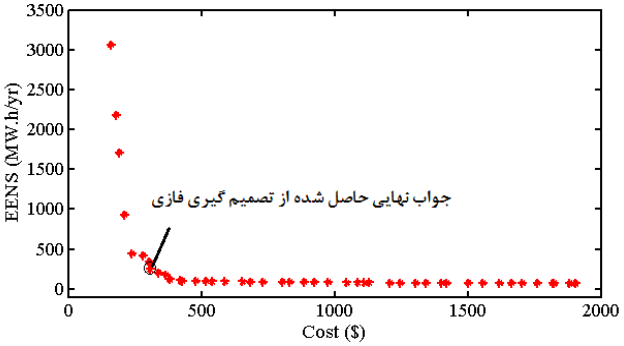
	هزینه سرمایه‌گذاری	EENS (MW.h/yr)	خطوط انتخابی توسعه شبکه
طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶۰ ($)	۲۶۱۲/۰۵	$n_{3-5}=2,\ n_{2-6}=2,\ n_{4-6}=2$
طرح انتخابی با کمترین مقدار EENS	۱۹۰۵ ($)	۶۹/۸۳	$n_{1-2}=3,\ n_{1-4}=3,\ n_{1-5}=3,\ n_{2-3}=3,\ n_{2-4}=3,\ n_{3-5}=3,\ n_{1-3}=2,\ n_{2-5}=4,\ n_{3-4}=3,\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

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

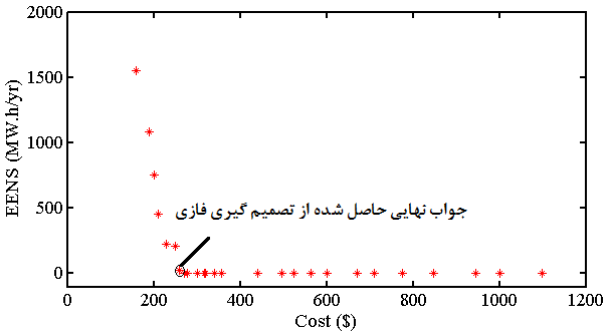
	هزینه سرمایه‌گذاری	EENS (MW.h/yr)	خطوط انتخابی توسعه شبکه
طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶۰ ($)	۱۲۶۷/۰۱۸	$n_{3-5}=2,\ n_{2-6}=2,\ n_{4-6}=2$
طرح انتخابی با کمترین مقدار EENS	۱۰۹۹ ($)	۰/۰۰۹۳۱	$n_{1-2}=3,\ n_{1-5}=2,\ n_{2-3}=3,\ n_{2-4}=1,\ n_{3-5}=3,\ n_{2-5}=1,\ n_{3-4}=3,\ n_{4-5}=1,\ n_{1-6}=2,\ n_{2-6}=2,\ n_{3-6}=4,\ n_{4-6}=4$
مناسب‌ترین طرح انتخابی	۲۷۱ ($)	۵/۳۳	$n_{3-5}=3,\ n_{2-6}=2,\ n_{4-6}=3,\ n_{5-6}=1$



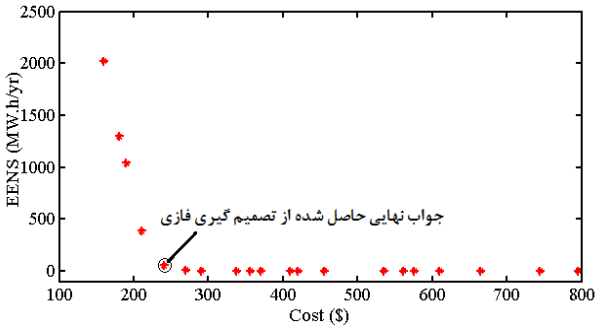
شکل (۴): جبهه کارای آزمایش الف- حالت ۱



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



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



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

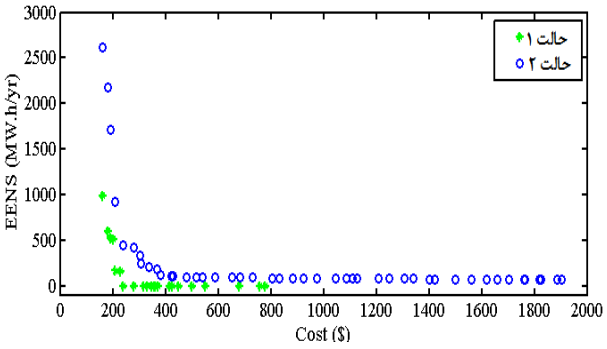
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

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

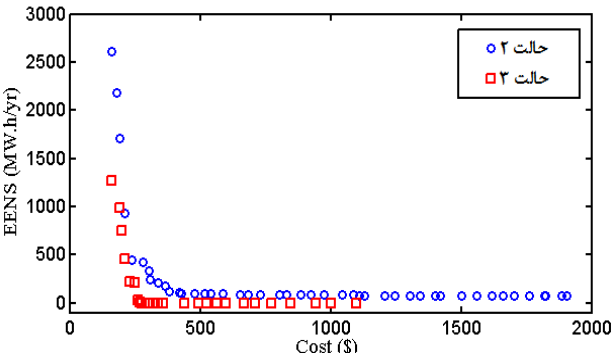
	هزینه سرمایه‌گذاری	EENS (MW.h/yr)	خطوط انتخابی توسعه شبکه
طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶۰ ($)	۱۷۴۲/۰۰۳	$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$
طرح انتخابی با کمترین مقدار EENS	۷۹۰ ($)	۰/۰۲	$n_{1-4} = 2, n_{1-5} = 3, n_{2-3} = 3, n_{1-3} = 4, n_{2-5} = 2, n_{4-5} = 2, n_{2-6} = 4, n_{4-6}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

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.



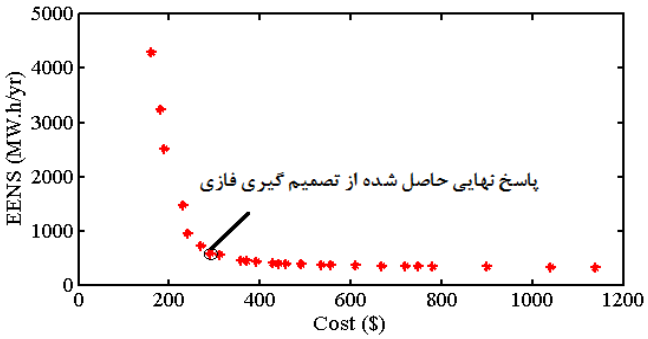
شکل (۸): مقایسه‌ی نتایج حالت‌های ۱ و ۲ آزمایش الف



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

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 چندهدفه‌ی TEP جهت انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه می‌باشد. درواقع نتایج به‌دست آمده، ضرورت ارائه روش‌های جدید برای حل دقیق این مسأله را نشان می‌دهد.

مطابق 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 باتوجه به مدل پیشنهادی این مقاله حاصل شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است زمان صرف شده برای به‌دست آوردن این جبهه‌ی کارا برابر با ۱۲۳۲۳ ثانیه (تقریباً 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.

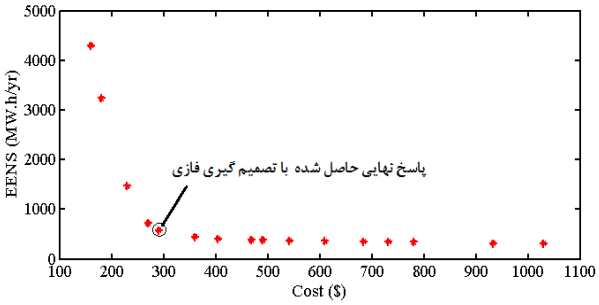
جدول (۵): نتایج عددی متناظر با جبهه کارای نهایی آزمایش الف

	هزینه سرمایه‌گذاری	EENS (MW.h/yr)	خطوط انتخابی توسعه شبکه
طرح انتخابی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری	۱۶۰ ($)	۴۲۹۸/۴۳	$n_{3-5} = 2, n_{2-6} = 2, n_{4-6} = 2$
طرح انتخابی با کمترین مقدار EENS	۱۱۳۸ ($)	۳۱۳/۰۱۴	$n_{1-2} = 1, n_{1-5} = 3, n_{2-3} = 3, n_{2-4} = 3, n_{3-5} = 3, n_{3-4} = 1, n_{4-5} = 1, n_{2-6} = 4, n_{3-6} = 4, n_{4-6} = 4, n_{5-6} = 4$
مناسب‌ترین طرح انتخابی	۲۹۰ ($)	۵۷۷/۷۶	$n_{3-5} = 3, n_{2-6} = 4, n_{4-6} = 3, n_{1-5} = 1$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

۵-۲- نتایج عددی آزمایش ب

در این آزمایش، شاخص قابلیت اطمینان برای تمامی شبکه‌های توسعه‌ی پیشنهادی در حین بهینه‌سازی مسأله‌ی 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.



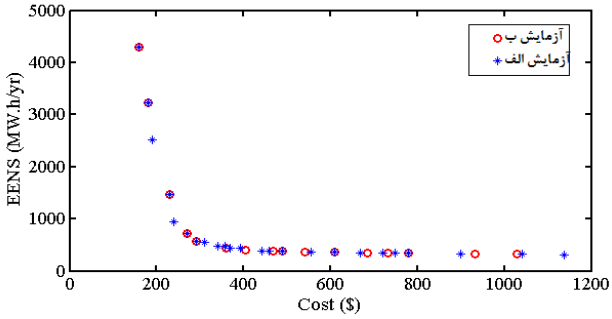
شکل (۱۱): جبهه کارای نهایی آزمایش ب

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

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

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

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 وسیع‌تری از فضای جستجو را نسبت به جبهه کارای آزمایش ب پوشش داده و تعداد طرح‌های توسعه‌ی به‌دست 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 مسأله به‌شدت 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 خطا محاسبه شده با نتایج آزمایش ب که با روش پیشنهادی این مقاله حاصل شده است؛ نشان می‌دهد که روش پیشنهادی توانمندی بالایی 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 مسأله‌ی دوهدفه‌ی TEP با درنظرگرفتن قابلیت اطمینان داشته و این مدل توانسته با حفظ نسبی دقت، باعث کاهش حجم و زمان محاسباتی حل مسأله شود.

۶- نتیجه‌گیری

ازآنجاکه توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال در زمره‌ی پروژه‌هایی قرار می‌گیرد که بسیار پرهزینه است؛ لذا انتخاب طرح توسعه‌ی بهینه در این مسأله بسیار ضروری است. ازسوی‌دیگر، 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، مسأله‌ی TEP با درنظر گرفتن اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ارتقاء سطح قابلیت اطمینان شبکه‌ی انتقال به‌صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه، مدل‌سازی و حل شد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

ازسوی‌دیگر به‌دلیل اینکه برای شبکه‌های انتقال واقعی، محاسبه‌ی دقیق شاخص‌های قابلیت اطمینان به‌وسیله‌ی روش‌های شبیه‌سازی یا یکایک‌شماری رخدادهای خطا 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 بهسنه‌سازی 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 جبهه‌ی کارای بهینه‌ی نهایی به‌دست آمد. درادامه 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 خطا تا سطح خروج یک تجهیز برخوردار است که با توجه به پرهزینه بودن توسعه‌ی شبکه‌ی انتقال، بسیار حائز اهمیت است. همچنین نتایج به‌دست 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.

ضمیمه أ

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

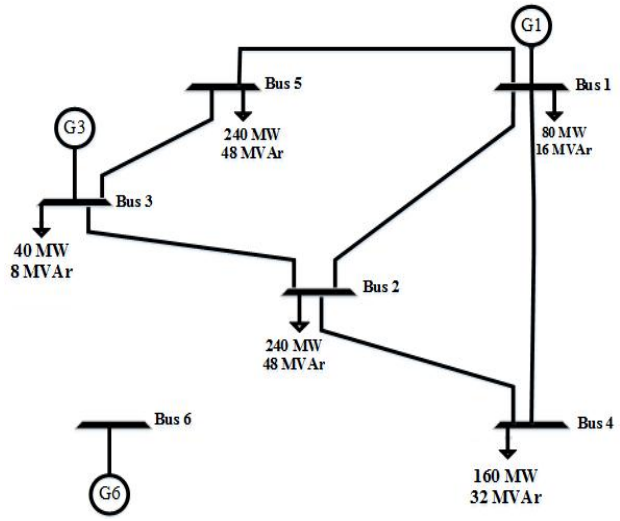
جدول (أ- ۱): اطلاعات ژنراتورها برای شبکه‌ی ۶ باسه‌ی گارور

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

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

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

لازم به‌ذکر است در هر مسیر، تعداد خطوط مجاز برای توسعه‌ی شبکه حداکثر برابر با ۴ خط درنظر گرفته شده است. همچنین برای هر خط T_j برابر با (h/Km) ۰/۵ 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 I ncremental 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*

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

[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.

transmission network expansion planning using GA", Energy conversion and Management, Vol. 49, No. 5, pp. 1119-1125, 2008.

[4] 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.

[5] El-Bages, 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.

[6] 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.

[7] 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.

[۸] کاظم عاملی، محمدرضا آقاابراهیمی 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Arabali, A., Ghofrani, M., Etezadi-Amoli, M., Fadali, M. S., and Moeini-Aghtaie, 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]

[۳۲] نوید خلیل‌پور تیلمی، جواد رضائیان و ایرج مهدوی، **"بهینه‌سازی چندهدفه 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 ۱۰۲-۱۱۳، 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

[1] Transmission Expansion Planning- TEP
[2] Loss of Load Cost - LOLC
[3] Loss of Load Expectation - LOLE
[4] Expected Energy Not Supplied - EENS
[5] Nondominated Sorting Genetic Algorithm- NSGAII

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.2.1.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.2.1]