برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال در حضور نیروگاه های بادی مبتنی بر الگوریتم ICA

حمدی عبدی [۱]، منصور مرادی [۲]، علی رستمی [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۹/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۲۶

چکیده:

نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم قدرت بویژه مزارع بادی به دلیل مزایای متعدد آن به سرعت در حال افزایش است. لزوم لحاظ اثرات این مزارع در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه انتقال (TEP) به عنوان یکی از بخش‌های بسیار مهم در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت امری اجتناب ناپذیر است. در این مقاله، یک روش بهینه سازی چند هدفه برای حل مساله TEP با بهره‌گیری از پخش‌بار DC پیشنهاد و در آن عدم قطعیت‌های تولید مزارع بادی و بار شبکه به صورت احتمالاتی مدل شده و توابع هدف مشتمل بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری لحاظ شده‌اند. روش چند هدفه پیشنهادی با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری (ICA) روی شبکه تست اصلاح شده ۲۴ باسه IEEE-RTS شبیه‌سازی و نتایج آن جهت بررسی و صحت‌سنجی با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک (GA) مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی:

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال، بهینه‌سازی چند هدفه، مزارع بادی، الگوریتم رقابت استعماری (ICA)، الگوریتم ژنتیک (GA)

۱) استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی (نویسنده مسئول) Hamdiabdi@razi.ac.ir
۲) باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی Mansour.Moradi.Ir@gmail.com
۳) دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد، واحد تهران جنوب Ali.Rostami.Ir@gmail.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مقدمه

در طول چند دهه گذشته برای حل مشکلاتی که در بخش تولید انرژی الکتریکی به شکل سنتی از قبیل هزینه‌های بالای تولید، اثرات زیست محیطی، تلفات بالا و قابلیت اطمینان پایین موجود بوده‌اند، از سیستم‌های تولید پراکنده استفاده شده است که در مجاورت مراکز مصرف نصب شده و دارای توان، تلفات و هزینه کمتر و نیز قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به اشکال سنتی تولید انرژی الکتریکی می‌باشند [۲۵ و ۱۰]. یکی از منابع انرژی که امروزه مورد توجه فراوانی قرار گرفته، انرژی باد می‌باشد. بررسی تأثیرات منابع انرژی بادی بر شبکه‌های قدرت از جنبه‌های گوناگونی مانند متغیر بودن و کنترل ناپذیری توان تولیدی در مقایسه با منابع مرسوم تولید انرژی به عنوان یکی از چالشهای مهم و مطرح در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. بر این موارد باید دوری از مراکز تقاضا و وابستگی شدید توان تولیدی توربین‌های بادی به سرعت باد را به عنوان بزرگترین موانع استفاده از این انرژی اضافه نمود [۱۶ و ۱۲].

هدف مطالعات برنامه‌ریزی توسعه انتقال (TEP[1]) که یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت است، تعیین زمان، مکان و چگونگی سرمایه‌گذاری برای احداث خطوط جدید به منظور عرضه مطمئن انرژی به مشتریان، با لحاظ رشد بار و پیش بینی تقاضا با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه گذاری[2] و بهره‌برداری[3] می‌باشد [۲۳، ۱۷، ۱۵، ۱۰]. با توجه به افزایش سهم تولید مزارع بادی نسبت به کل تولید انرژی الکتریکی به شکل سنتی، لازم است برنامه‌ریزی سیستم قدرت با لحاظ عدم قطعیت‌ها[4] و جهت تأمین مطمئن انرژی برای حفظ رضایت مشتریان در بخش TEP صورت پذیرد [۱۵، ۱۴، ۹].

مروری بر روشهای حل TEP

عدم توانایی در پیش بینی دقیق بار به علت تنوع تقاضا [۲۴ و ۱۸]، ورود فناوری‌های جدید در بخش تولید انرژی الکتریکی مانند مزارع بادی با توجه به تصادفی بودن توان تولیدی این منابع به دلیل وابستگی توان تولیدی به سرعت باد [۲۲ و ۱۲]، عدم قطعیت هایی را سبب شده‌اند که نمی‌توان از اثرات آنها بر عملکرد سیستم قدرت صرفنظر کرد. بنابراین، مدلسازی این عدم قطعیت‌ها در برنامه‌ریزی‌های مربوط به سیستم‌های قدرت منجر به ایجاد طرحی قوی‌تر خواهد شد که بتواند شرایط مختلف را برآورده سازد [۲۵ و ۱۶]. باید توجه داشت که عدم قطعیت‌های فوق سبب افزایش پیچیدگی ساختار شبکه شده و فرایند تصمیم‌گیری را مشکل می‌سازد. در برنامه‌ریزی سنتی، هدف عمدتا حداقل نمودن هزینه‌های

1) Transmission Expansion Planning
2) Investment Cost
3) Operation Cost
4) Uncertainty

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

سرمایه‌گذاری می‌باشد. اما در برنامه‌ریزی‌های نوین، چند هدف مخلتف به صورت همزمان با هم بهینه[۱] می‌شوند که در این موارد، روشهای سنتی دیگر قادر به ارائه جواب‌های قابل قبول نمی‌باشند.

روشهای پیشنهادی برای حل مساله TEP عموما به سه دسته ریاضی[۲]، ابتکاری[۳] و فرا ابتکاری[۴] تقسیم می‌شوند که هرکدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند [۱۰ و ۳]. در مطالعات امروزی TEP با توجه به رشد عدم قطعیت‌ها جهت بهینه‌سازی مسائل، از ادغام ویژگی‌های روشهای بهینه‌سازی ریاضی و ابتکاری که به روشهای فرا ابتکاری موسوم هستند، استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها دارای راهکارهای برون رفت از بهینه محلی بوده و کاربرد وسیعی در طیف گسترده‌ای از مسائل را دارا هستند و نیز دست یابی به جوابهای بهتر در زمان کوتاه‌تری را میسر می‌سازند.

الگوریتم رقابت استعماری[۵] به عنوان یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری که در حوزه محاسبات تکاملی قرار می گیرد، به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف بهینه سازی برمبنای مدلسازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی ـ سیاسی می‌پردازد. از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم های بهینه سازی تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک (GA[۶])، بهینه سازی انبوه ذرات (PSO[۷])، بهینه سازی کلونی مورچگان(ACO[۸])، تبرید فلزات شبیه سازی شده (SA[۹]) و ... قرار می‌گیرد و همانند همه الگوریتم‌های مشابه، مجموعه اولیه‌ای از جوابهای احتمالی را تشکیل می‌دهد. این جوابهای اولیه مشابه الگوریتم های ژنتیک و ازدحام ذرات که به ترتیب به عنوان "کروموزوم" و "ذره" شناخته می شوند، در الگوریتم رقابت استعماری با عنوان "کشور" نامگذاری شده اند. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی که توضیحات بیشتر در رابطه با چگونگی روند بهینه سازی و نحوه مدلسازی‌ها در مراجع [۸ و ۷ و ۱] ذکر شده‌اند، فرایند بهینه‌سازی را شروع می‌کند. الگوریتم جوابهای اولیه (کشور ها) را بتدریج بهبود داده و در نهایت، جواب مناسب مساله بهینه‌سازی (کشور مطلوب[۱۰]) را ارائه می‌دهد.

مقایسه نتایج بررسی‌های مراجع [۱۱و ۵، ۴، ۲] در حل مسائل پیچیده نیز نشان می‌دهد که در مقایسه با GA، PSO، SA، الگوریتم جستجوی هارمونی (HSA[۱۱]) و الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی (HA[۱۲])، الگوریتم ICA پیشنهادی

1) Quasioptimal
2) Mathematical Optimization
3) Heuristic Optimization
4) Meta-Heuristic
5) Imperialist Competitive Algorithm- ICA
6) Genetic Algorithm- GA
7) Particle Swarm Optimization- PSO
8) Ant colony optimization- ACO
9) Simulated Annealing- SA
10) Desired country
11) Harmony Search Algorithm- HSA
12) Hierarchy Analysis- HA

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

دارای ویژگی‌های برتر از جمله جوابهای بهتر، روند محاسباتی سریع‌تر و مشخصه همگرایی پایدارتر می‌باشد. نتایج مطالعات نشان می دهد الگوریتم ICA در حل مسائل پیچیده به عنوان یک روش بهینه سازی قدرتمند به کار گرفته شده است.

مدل پیشنهادی این مقاله یک طرح بهینه با هدف حداقل نمودن هزینه مساله TEP در حضور نیروگاه‌های بادی، توسط ICA با لحاظ کردن عدم قطعیت باد و بار سیستم قدرت و هزینه‌های متشکل از دو جزء اصلی سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری می‌باشد. این طرح منجر به تعیین روش سرمایه‌گذاری در آینده با توجه به وضعیت مالی فعلی، اهداف مالی آتی، میزان ریسک پذیری، افزایش قابلیت اطمینان و باعث کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و بهره برداری از سیستم قدرت می‌شود.

مطالعات انجام شده در خصوص مراجع مرتبط با برنامه ریزی توسعه انتقال نشان می دهد که در مرجع [۴] مساله TEP با اعمال الگوریتم ICA و بدون لحاظ اثرات نیروگاههای بادی مورد مطالعه قرار گرفته است. این در حالی است که وجود نیروگاههای بادی نتایج را بشدت تحت تأثیر قرار خواهد داد. مراجع [۲۱ و ۱۵] نیز با وجود لحاظ اثرات نیروگاههای بادی در مساله TEP، از الگوریتم‌های ابتکاری تجزیه Benders[1] و نظریه تصمیم گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی[2]، برای یافتن جوابهای بهینه استفاده نموده اند. بنابر این، به عنوان مهمترین نوآوری مقاله حاضر می‌توان به اعمال الگوریتم ICA به مساله TEP در حضور نیروگاه بادی اشاره نمود.

به منظور صحت سنجی روش پیشنهادی، نتایج حاصل از اعمال سناریوی عدم حضور نیروگاه بادی با لحاظ هزینه های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری به عنوان بخشی از هزینه‌های ثابت، با الگوریتم GA و نتایج بدست آمده در مراجع [۲۰ و ۱۹، ۶] که فقط حالت پایه مساله TEP (در شرایط یکسان اطلاعات شبکه) را در نظر گرفته اند، مقایسه شده است. مقایسه الگوریتم‌های ارائه شده در مراجع [۲۰ و ۱۹، ۶] در قالب یک جدول در مرجع [۴] ارائه گردیده است. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان بیان کرد با وجود اینکه در روش پیشنهادی هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری به عنوان بخشی از هزینه‌های ثابت به هزینه های سیستم اضافه شده است، اما نتایج حاصل از الگوریتم ICA بهتر از سایر روشها می باشد. همچنین همگرایی بهتر الگوریتم ICA در یافتن طرح بهینه نسبت به GA و الگوریتم های بیان شده در مراجع [۲۰ و ۱۹، ۶] نکته مهمی است که باید به آن اشاره نمود. در نهایت، روش پیشنهادی سبب یافتن طرحی با کمترین هزینه و با کاهش چشمگیر در زمان انجام محاسبات شده است.

ساختار مقاله بدین شرح است که در بخش دوم به تشریح مساله پرداخته شده و الگوریتم ICA در بخش سوم ارائه

1) Benders Decomposition
2) Information-Gap Decision Theory- IGDT

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

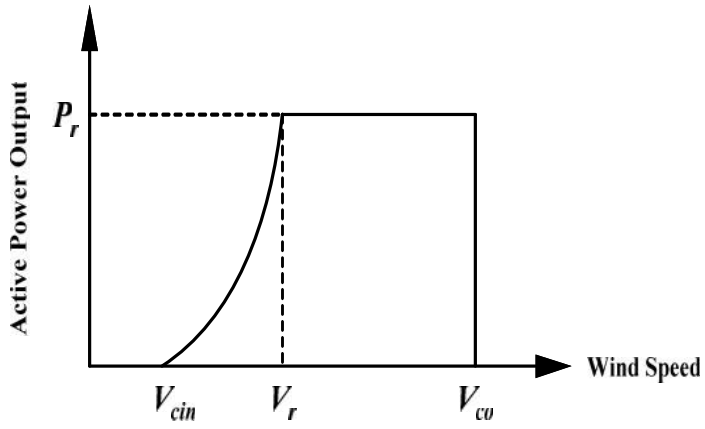
شده است. الگوریتم پیشنهادی مساله TEP در بخش چهارم بیان شده و در پخش پنجم شبیه سازی ارائه گردیده و سرانجام نتیجه گیری به تفصیل آورده شده است.

تشریح مساله

مدل باد و بار

استفاده بهینه از توان تولیدی مزارع بادی[1] وابسته به میزان انرژی باد و بار شبکه می‌باشد. لزوم لحاظ این دو متغیر به صورت همزمان در مطالعات TEP امری ضروری می‌باشد. از این رو، ابزار مناسبی برای مدلسازی این دو پارامتر متغیر نیاز می باشد. روش‌های مختلفی از جمله شبکه‌های عصبی[2]، روش سری‌زمانی[3] و رگرسیون[4] برای پیش‌بینی بارهای آینده در سیستم‌های قدرت پیشنهاد شده است. هر کدام از این روشها به علت برخی خطاهای مدلسازی باعث تحمیل عدم قطعیت‌هایی در مطالعات آینده سیستم قدرت می‌شوند. در این مقاله، برای مدلسازی تصادفی پیش بینی بار از توابع توزیع چگالی احتمال (PDF[5]) استفاده شده است [۱۲].

از آنجا که مشخصه توان خروجی یک توربین بادی متأثر از سرعت باد است، یک رابطه غیر خطی بین این دو پارامتر وجود دارد. بنابراین، توان خروجی این منبع تولید با یک واحد تولید انرژی سنتی معمولی کاملا متفاوت است. این رابطه که مشخصه "توان ـ سرعت" نام دارد (شکل ۱)، به پارامترهای بهره‌برداری توربین وابسته است.



شکل ۱) مشخصه "توان- سرعت" توربین بادی

1) Wind Farm
2) Neural Networks
3) Time series
4) Regression
5) Probability Density Function- PDF

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

معادله ریاضی مربوط به منحنی مشخصه "توان–سرعت" از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \le V \le V_{ci} \\ (A + B \times V + C \times V^2) P_r & V_{ci} \le V \le V_r \\ P_r & V_r \le V \le V_{co} \\ 0 & V \ge V_{co} \end{cases} \qquad (۱)$$

در این رابطه، ضرایب A و B و C مقادیر ثابتی هستند و به مشخصات توربین بستگی دارند [۲].

به دلیل وجود متغیرهای احتمالاتی نمی‌توان از روشهای سنتی پخش‌بار جهت مطالعات شبکه قدرت استفاده نمود و لازم است از ابزارهای احتمالاتی استفاده شود. یکی از مرسوم‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های پخش بار احتمالاتی[1]، استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو[2] می‌باشد. این روش متکی بر نمونه‌برداری مکرر به منظور دستیابی به نتایج محاسباتی دقیقتر می‌باشد. در فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو، ابتدا شبکه مبنا که در آن ساختار شبکه، میزان توان اکتیو تولیدی، ژنراتورها و مقدار بار مربوط به هر شین مشخص است، انتخاب می‌شود و سپس پخش بار احتمالاتی اعمال می‌گردد.

روند مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در حل مساله TEP به صورت زیر می باشد:

۱- تنظیم زمان اولیه (NS = 0)
۲- اصلاح توان اکتیو نیروگاه بادی توسط رابطه ۱ (تنظیم xi)
۳- اصلاح بار شین‌ها، توان تولیدی نیروگاه ها و توان خروجی نیروگاه بادی با توجه به مقادیر جدید
۴- ارزیابی وضعیت شبکه با استفاده از پخش بار نیوتن–رافسون
۵- بررسی معیار توقف، (در این مقاله ۱۰۰۰ تکرار مد نظر بوده است) اگر معیار توقف بر آورده شده، حرکت به مرحله بعد، در غیر اینصورت NS = NS +1 و برگشت به مرحله دوم.
۶- پایان شبیه سازی

با اتمام شبیه‌سازی، می‌توان مقدار متوسط پارامترهای خروجی را به عنوان بهترین تخمین بدست آمده از شبیه‌سازی از رابطه (۲) به دست آورد.

$$VAR = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} VAR_k \qquad (۲)$$

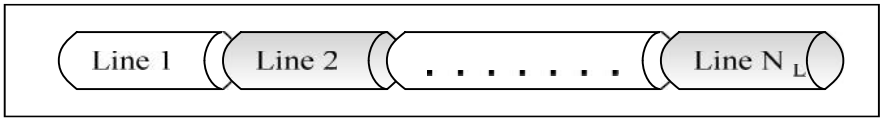
حل مساله TEP توسط الگوریتم ICA

در حل مساله TEP توسط الگوریتم ICA، یک پاسخ مساله، رشته‌ای از اعداد صحیح است که هر بیت آن

1) Probabilistic Load Flow- PLF
2) Monte Carlo Simulation- MCS

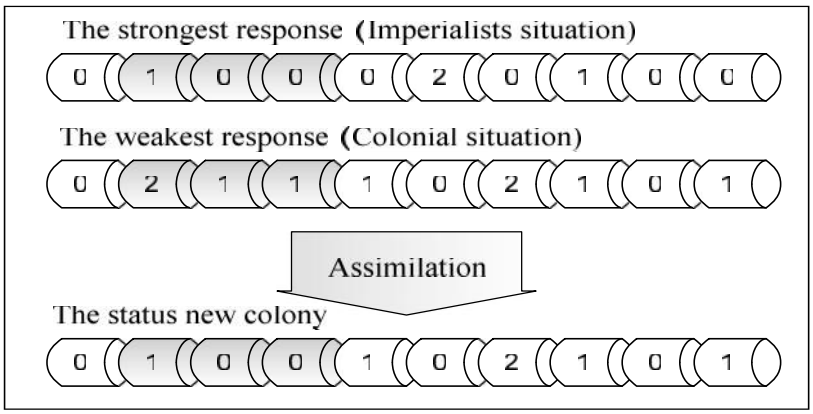
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

نشان‌دهنده تعداد خطوط جدیدی است که باید به مسیر متناظر آن بیت اضافه شود. بنابراین، تعداد بیت های این رشته برابر تعداد خطوط کاندیدا برای اضافه شدن به شبکه خواهد بود. در شکل (۲) نمونه ای از جواب ممکن مساله نشان داده شده است.



شکل ۲) جواب ممکن مساله

این فرایند تا پایان یافتن الگوریتم ادامه می یابد. البته به دلیل طبیعت گسسته متغیرهای مساله، پیاده سازی حرکت نقاط (سیاست جذب) در اینجا متفاوت است. در روش پیشنهادی برای پیاده‌سازی سیاست جذب[1]، (معادل حرکت نقاط ضعیفتر به سمت یکی از نقاط مطلوبتر) تعدادی از بیت های کشور استعمارگر[2] جایگزین بیت‌های کشور مستعمره[3] مطابق شکل (۳) می شوند. این جایگزینی باعث شبیه شدن مستعمره به استعمارگر می‌شود. از نظر ریاضی این کار معادل نزدیک شدن پاسخ به پاسخ مطلوبتر خواهد بود [۱].



شکل ۳) سیاست جذب

بررسی عملکرد الگوریتم ICA در حل مساله TEP

جهت بررسی عملکرد الگوریتم ICA در حل مساله TEP، چندین سناریو برای سیستم ۲۴ باسه IEEE-RTS که خطوط کاندیدا در ۳۴ حریم کنونی به اضافه ۷ حریم جدید با حداکثر تعداد ۳ خط نصب شده در هر محدوده مطابق

1) Assimilation
2) Imperialist
3) Colony

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

مراجع [۲۰ و ۱۹]، در نظر گرفته شده است، لحاظ گردیده اند. نتایج حاصل از الگوریتم ICA در مقایسه با الگوریتم GA و الگوریتم های ارائه شده در مراجع [۲۳ و ۱۹، ۶] برای تابع هدف (۳) با در نظر گرفتن قیود (۴) تا (۸) در جدول (۱) ارائه شده است. در نظر گرفتن قیود مساوی و نامساوی (۴) تا (۸) سبب می‌شود خروجی الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، طرح توسعه‌ای باشد که کمترین "هزینه سرمایه گذاری برای احداث خطوط جدید" را مشخص کند.

$$Min \sum_{i,j=1}^{n} Cl_{ij} N_{ij} \quad (۳)$$

$$Sf + g = d \quad (٤)$$

$$f_{ij} - r(N_{ij}^{0} + N_{ij})(\bar{}_{i} - \bar{}_{j}) = 0 \quad \forall (i,j) \in L \quad (۵)$$

$$\left| f_{ij} \right| \le (N_{ij}^{0} + N_{ij})\,\overline{f_{ij}} \quad \forall (i,j) \in L \quad (٦)$$

$$0 \le N_{ij} \le \overline{N_{ij}} \quad \forall (i,j) \in L \quad (۷)$$

$$0 \le g \le \bar{g} \quad (۸)$$

نتایج حاصل در جدول (۱) نشان می‌دهد طرح توسعه پیشنهادی TEP، حاصل از تابع هدف (۳)، توسط الگوریتم ICA در مقایسه با الگوریتم GA و الگوریتم های ارائه شده در مراجع [۲۳ و ۱۹، ۶] دارای هزینه کمتری بوده و در نتیجه، طرح بهتری می‌باشد. این نتایج حاکی از قدرت و کارایی الگوریتم ICA در حل مساله TEP می‌باشد.

روش پیشنهادی

سرمایه‌گذاری، فرایندی است که روش و میزان سرمایه‌گذاری در آینده را با توجه به وضعیت مالی فعلی، اهداف مالی آتی و میزان ریسک پذیری[1] مشخص می‌کند. تعمیر و نگهداری نیز یکی از مهم‌ترین ابزارهای افزایش آمادگی تجهیزات در سیستم‌های تولید و انتقال می‌باشد که منجر به افزایش قابلیت اطمینان[2] سیستم و در عین حال، کاهش هزینه‌های نگهداشت، تعمیرات و بهره‌برداری سیستم قدرت می‌شود. لزوم لحاظ این دو عامل به عنوان موارد مهم در برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت امری اجتناب ناپذیر است. در این راستا، تابع هدف به صورت رابطه (۹) با در نظر گرفتن قیود مساوی و نامساوی (۴) تا (۸) تعریف می‌شود.

$$Min \sum_{i,j=1}^{n} (Cl_{ij} N_{ij} + C_{inv_{ij}} N_{ij} + C_{op_{ij}} N_{ij}) \quad (۹)$$

$$C_{inv_{ij}} = C_{inv_{ij}} \times L_{ij} \quad (۱۰)$$

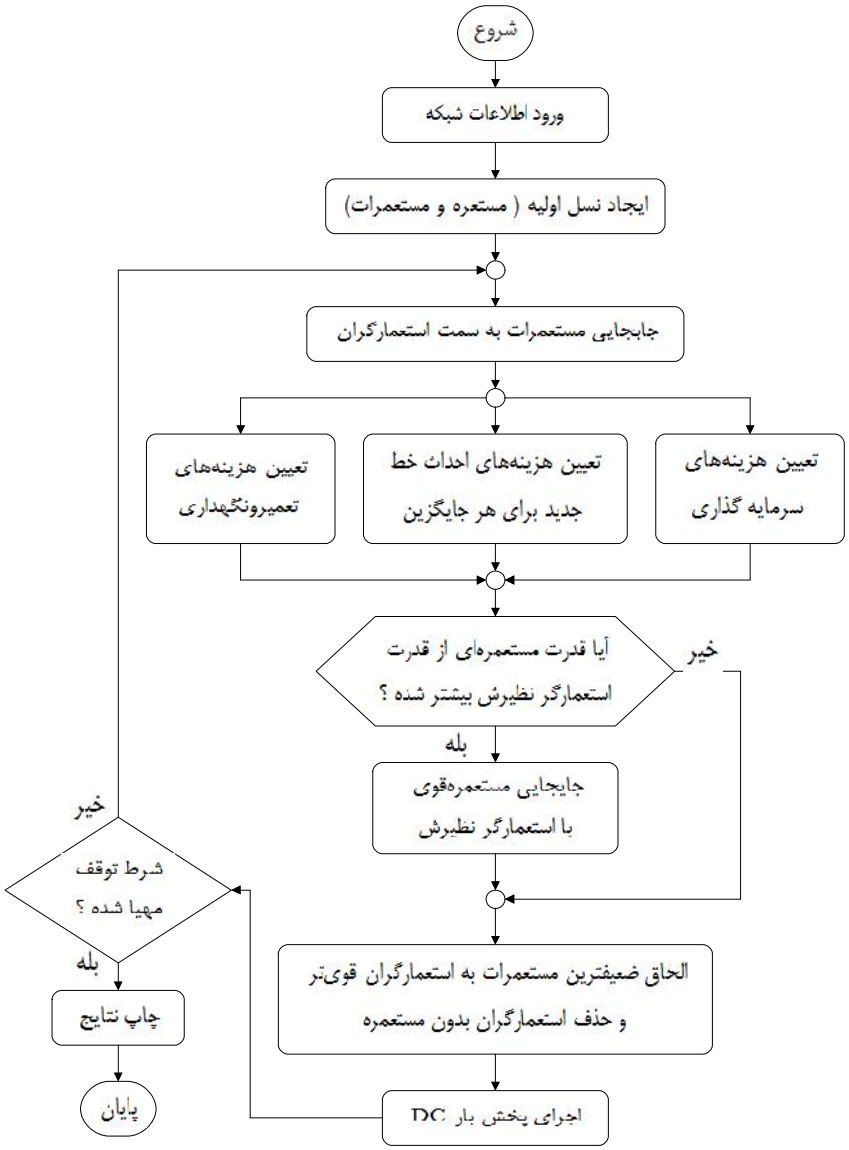
1) Risk-taking
2) Reliability

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

$$C_{op_{ij}} = C_{op_{ij}} \times L_{ij} \qquad (۱۱)$$

الگوریتم روش پیشنهادی

الگوریتم روش پیشنهادی استفاده شده در این مقاله مطابق نمودار جریانی شکل (۴) می‌باشد.



شکل٤) نمودار جریانی الگوریتم پیشنهادی

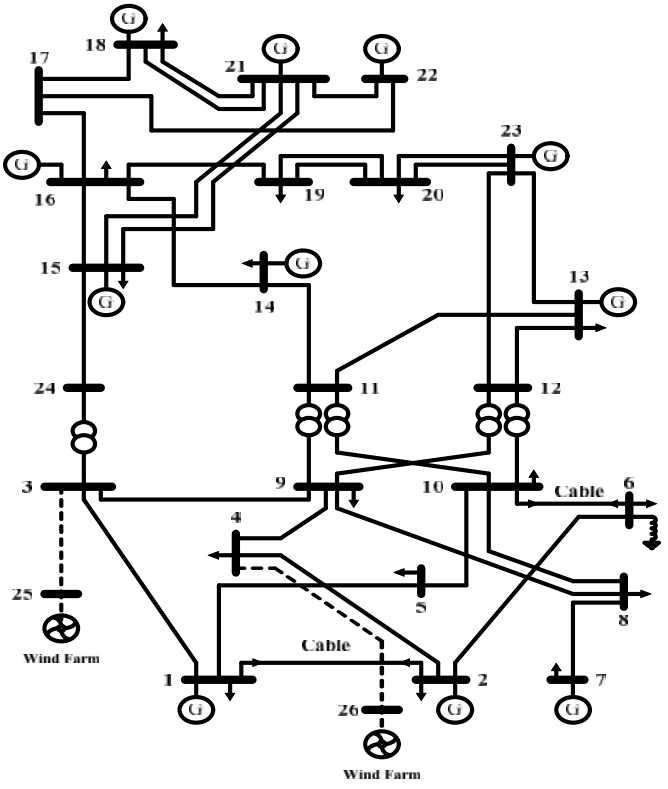
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

شبیه‌سازی و ارائه نتایج

مطالعات TEP با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در محیط نرم‌افزار MATLAB ۷ در یک سیستم با پردازنده GHz 3/4 و 1 GB RAM با استفاده از توابع پخش بار DC انجام شده است. در تمام قسمت‌های شبیه‌سازی فرض شده است که سیستم برای ۱۰ سال آینده، با شرایط میزان تولید و بار ۳ برابر مقدار اولیه آن گسترش خواهد یافت. این شرایط تحت افزایش بار ۱۰ درصد در سال و برای یک افق زمانی ۱۰ ساله در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به شبکه در مراجع [۴] و [۱۹] ارائه شده است. اطلاعات بارها وژنراتورها نیز مطابق داده های بیان شده در جداول (۲) و (۳) می‌باشند.

سیستم تحت مطالعه (شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS اصلاح شده)

سیستم ۲۴ باسه IEEE-RTS اصلاح شده مطابق شکل (۵) می‌باشد. این سیستم با اضافه کردن ۲ مزرعه بادی با ظرفیت‌های ۳۰۰ مگاوات، توسط خطوط انتقال ۱۷۵ مگاولت‌آمپر متصل به شین‌های ۳ و ۴ که نزدیکترین شین سیستم به آنها می‌باشند، تصحیح شده است [۱۳].



شکل ۵) شبکه ٢٤ باسه IEEE-RTS اصلاح شده

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

جدول ۱) اطلاعات ژنراتورها

	Buses											
											Wind Farms	
	۱	۲	۷	۱۳	۱۵	۱۶	۱۸	۲۱	۲۲	۲۳	۲۵	۲۶
Generation (MW)	۵۲۰	۵۲۰	۸۱۲	۱۵۹۹	۵۸۱	۴۱۹	۷۱۸	۱۰۷۷	۹۰۰	۱۴۰۴	۳۰۰	۳۰۰

جدول ۲) اطلاعات بارها

	Busses																
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰
Load (MW)	۳۲۴	۲۹۱	۵۴۰	۲۲۲	۲۱۳	۴۰۸	۳۷۵	۵۱۳	۵۲۵	۵۸۵	۷۹۵	۵۸۲	۹۵۱	۳۰۰	۹۹۹	۵۴۳	۳۸۴

سناریوهای حل مساله

جهت بررسی اثر شرایط مختلف بر روی نتایج حاصل از حل مساله TEP، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، سناریوهای زیر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و بر سیستم استاندارد ۲۴ باسه IEEE_RTS اصلاح شده پیاده‌سازی شده است [۱۳].

- مورد ۱: شبکه اصلاح شده بدون نفوذ انرژی بادی
- مورد ۲: شبکه اصلاح شده با میزان نفوذ انرژی بادی ۱۰ درصد
- مورد ۳: شبکه اصلاح شده با میزان نفوذ انرژی بادی ۲۰ درصد

شبیه‌سازی و ارائه نتایج

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی در سه مورد مطالعه بر روی سیستم ۲۴ باسه IEEE-RTS اصلاح شده، برای الگوریتم های ICA و GA در جدول (۴)، و پارامترهای ارائه شده برای هر دو الگوریتم ICA و GA برای بدست آوردن بهترین جواب در جدول (۵) ارائه شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

جدول ۳) نتایج شبیه سازی Case های مورد بررسی

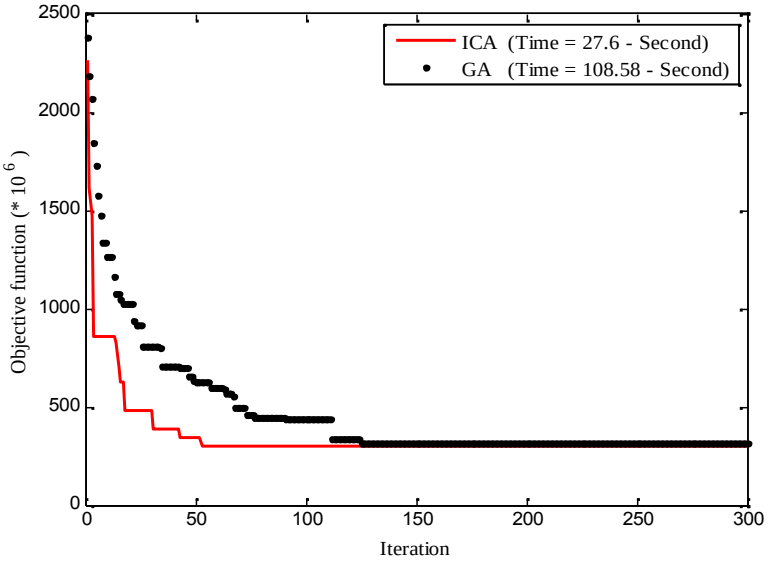
From Bus	To Bus	Cases					
		No-Wind Farms		% 10 Wind Farms		% 20 Wind Farms	
		GA	ICA	GA	ICA	GA	ICA
۱	۵	–	–	۱	–	۱	۱
۲	۴	–	–	–	۱	–	–
۳	۲۴	۱	–	–	–	–	–
۶	۱۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۷	۸	۲	۲	۲	۲	۲	۲
۹	۱۱	۱	–	–	–	–	–
۹	۱۲	–	۱	–	–	–	–
۱۰	۱۱	۱	۱	۱	۱	–	–
۱۱	۱۳	۱	–	–	–	–	–
۱۱	۱۴	–	۱	–	–	–	–
۱۴	۱۶	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱۶	۱۷	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۲۵	۳	–	–	۲	۲	۲	۲
۲۶	۴	–	–	–	–	۲	۲
Total Line		۹	۹	۹	۹	۱۰	۱۰
Cost US $		۳۵۶/۱	۳۵۰	۳۴۳/۱	۳۳۱/۲	۳۷۵/۰۶	۳۶۰/۷۸
Time (Sec)		۱۰۸/۵۸	۲۷/۶	۲۴۱/۱	۲۹/۶	۲۵۹/۲	۲۹/۴

شکل (۶) نمودار حاصل از اجرای تابع هدف (۹) توسط الگوریتم‌های ICA و GA در ۳۰۰ تکرار برای Case 1 (عدم حضور نیروگاه بادی) را نمایش می‌دهد.

جدول ٤) پارامترهای ارائه شده برای الگوریتم های ICA و GA

ICA		GA	
zeta (ξ)	(0.05)	Pop size	(400)
Revolution rate	(0.2)	Max Iterations	(300)
Number of Empires	(5)	Recom Percent	(0.4)
Number of Countries	(50)	Cross Percent	(0.7)
Number of Iterations	(300)	MutatPercent	(0.1)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]



شکل ٦) نمودار حاصل از اجرای مورد ۱ (عدم حضور نیروگاه بادی)

تحلیل نتایج

با توجه به نتایج الگوریتم پیشنهادی در سه مورد مختلف تعریف شده در قسمت قبلی، می‌توان گفت در سناریوهای مختلف، همگرایی الگوریتم ICA در به دست آوردن طرح بهینه بهتر از GA می‌باشد. این در حالی است که زمان اجرای محاسبات نیز کاهش یافته است. به عنوان نمونه، زمان اجرای الگوریتم‌ها برای بهینه کردن تابع هدف (۹) برای مورد ۱ که در شکل (۸) نمایش داده شده، در الگوریتم ICA = ۲۷/۶ ثانیه و در الگوریتم GA = ۱۰۸/۵۸ ثانیه می‌باشد. مهمترین دلیل این موضوع آن است که جهت افزایش دقت انجام محاسبات در روش الگوریتم GA باید تعداد جمعیت را افزایش داد که این نکته سبب افزایش زمان محاسبات خواهد شد. اما در الگوریتم ICA به این شکل نیست و همین نکته خود نیز یکی از دلایل برتری الگوریتم ICA بوده و حاکی از کارایی بهتر این الگوریتم در حل مسائل پیچیده بخصوص در زمانهای پایین می‌باشد. جوابهای حاصل در سه مورد تحت بررسی، توانایی روش پیشنهادی را در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی چند هدفه، در سیستم‌های قدرت بخوبی نمایش می‌دهد. اما با توجه به نتایج ارائه شده جدول (۲)، تعداد خطوط اضافه شده به سیستم آزمایشی در سناریوی سوم بیشتر از دو سناریوی دیگر است. لذا افزایش تعداد خطوط انتقال به طور قطع، افزایش هزینه شبکه را به دنبال خواهد داشت.

نتیجه گیری

با توجه به رشد روز افزون بار و ورود منابع تجدید پذیر به سیستم قدرت، برنامه ریزی توسعه انتقال امری

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این مقاله، حل مساله TEP به عنوان یک مساله بهینه‌سازی چند هدفه در حضور نیروگاه بادی با استفاده از الگوریتم ICA بر روی شبکه ۲۴ باسه IEEE-RTS اصلاح شده بررسی شد. هدف روش پیشنهاده شده حداکثر کردن رفاه اجتماعی و به حداقل رساندن هزینه‌های سرمایه گذاری سیستم به طور همزمان می‌باشد. نتایج مقایسه الگوریتم ICA با GA حاکی از برتری روش پیشنهادی در تحقق هدف می‌باشد. حالات مختلف نفوذ انرژی بادی در نظر گرفته شده در این مطالعه شامل عدم حضور نیروگاه بادی، ۱۰ درصد و ۲۰ درصد از کل تولید می‌باشد. از مزایای مهم این مدل در مقایسه با مدل‌های دیگر، لحاظ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری است که حداقل نمودن آنها از اهداف مهم TEP می‌باشد. لذا در نظرگیری هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری به عنوان بخشی از هزینه‌های ثابت، به عنوان عواملی مهم در فرایند برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. همچنین حضور نیروگاه‌های بادی در مسائل مربوط به TEP باعث بهبود هرچه بیشتر عملکرد شبکه‌های قدرت با توجه به نرخ رشد بار در آینده می‌گردند.

منابع

[۱] صمدی، مهدی. جاویدی، محمد حسین. (۱۳۸۹)، ارائه روشی جدید برای حل مسئله توسعه شبکه انتقال به کمک الگوریتم بهینه سازی رقابت استعماری، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق ایران، ۹-۱..

[2] Chowdhury A.A. 2005. "Reliability model for large wind farms in generation system planning*", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 2, pp1926-1932.*

[3] Dewani B. Daigavane M.B. and Zadgaonkar A.S. 2012. "A Review of various computational intelligence techniques for transmission network expansion planning," *In Proc. IEEE Conf. Power Electronics, Drives and Energy System.*

[4] Duki E.A. Mansoorkhani H.R.A. Soroudi A. Ehsan M. 2010. "A discrete imperialist competition algorithm for transmission expansion planning", *In: 25th International Power System Conference, Tehran Iran, pp. 1-10.*

[5] Ebrahimpourain R. Kazemi M. 2014. "Multiobjective Placement of Multiple Distributed Energy Resources in Distribution System using Imperialist Competitive Algorithm (ICA)", *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, Vol. 6, No. 18, pp. 89-95.*

[6] Fang R. and Hill D.J. 2003. "A new strategy for transmission expansion in competitive electricity markets", *IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, pp. 374–380.*

[7] Gargari E.A. and Lucas C. 2007. "Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", *In Proc. IEEE Congr. Evolutionary Computation, 25-28.*

[8] Hadji M.M. Vahidi B. 2012. "A Solution to the Unit Commitment Problem Using Imperialistic Competition Algorithm", *IEEE Trans. On Power System, Vol. 27, no. 1, pp. 117-124.*

[9] Hamidi V. Li F. and Yao L. 2011. "Value of wind power at different locations in the grid", *IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, pp. 526–537.*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

[10] Hemmati R. Hooshmand R-A. Khodabakhshian A. 2013. “Comprehensive review of generat transmission expansion planning”, *IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 7, Iss. 9, pp. 955–964.*

[11] Khabbazi A. Atashpaz-Gargari E. and Lucas C. (2009) “Imperialist competitive algorithm for minimum bit error rate beamforming”, *Int. J. Bio-Inspired Computation, Vol. 1, Nos. 1/2, pp.125–133.*

[12] Moeini-Aghtaie M. Abbaspour A. Fotuhi-Firuzabad M. 2012. “Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning—Part I: theory and algorithm”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 27, no. 3, pp.1585-1593.*

[13] Moeini-Aghtaie M. Abbaspour A. Fotuhi-Firuzabad M. 2012. “Incorporating large-scale distant wind farms in probabilistic transmission expansion planning–Part II: case studies”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 27, no. 3, pp. 1594–1601.*

[14] Munoz C. Sauma E. Contreras J. Aguado J. and de-La-Torre S. 2012. “Impact of high wind power penetration on transmission network expansion planning”, *IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 6, Iss. 12, pp. 1281–1291.*

[15] Orfanos G.A. Georgilakis P.S. and Hatziargyriou N.D. 2013. “Transmission Expansion Planning of Systems With Increasing Wind Power Integration”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 28, no. 2, pp. 1355-1362.*

[16] Park H. Baldick R. 2013. “Transmission Planning Under Uncertainties of Wind and Load: Sequential Approximation Approach”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 28, no. 3, pp. 2395-2402.*

[17] Rahmani M. Romero R. Rider M.J. 2013. “Strategies to Reduce the Number of Variables and the Combinatorial Search Space of the Multistage Transmission Expansion Planning Problem”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 28, no. 3, pp. 2164-2173.*

[18] Roh, J.H. Shahidehpour M. Wu L. 2009. “Market-based generation and transmission planning with uncertainties”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 24, no. 3, pp. 1587–1598.*

[19] Romero R. Rocha C. Mantovani J.R.S. and Sanchez I.G. 2005. “Constructive heuristic algorithm for the DC model in network transmission expansion planning”, *IEE Proc. Gener. Transom. Distrib., vol. 152, no. 2, pp. 277-282.*

[20] Snchez I.G. Romero R. Antovani J.R.S. and Rider M.J. 2005. “Transmission expansion planning using the DC model and nonlinear programming technique”, *Proc. IEE-Gen. Transm. Dist., vol. 152, pp. 763-769.*

[21] Taherkhani. M and Hosseini. S. H. 2014. "IGDT-based multi-stage transmission expansion planning model incorporating optimal wind farm integration", *International Transactions on Electrical Energy Systems, DOI: 10.1002/etep.1965.*

[22] Yu H. Chung C.Y. Wong K.P. and. Zhang J.H. 2009. “A Chance Constrained Transmission Network Expansion Planning Method With Consideration of Load and Wind Farm Uncertainties”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 24, no. 3, pp. 1568-1576.*

[23] Zhang H. Heydt G.T. Vittal V. and Quintero J. 2013. “An Improved Network Model for Transmission Expansion Planning Considering Reactive Power and Network Losses”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 28, no. 3, pp. 3471-3479.*

[24] Zhao J.H. Dong Z.Y. Lindsay P. Wong K.P. 2009. “Flexible transmission expansion planning with uncertainties in an electricity market”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 24, no. 1, pp. 479–488.*

[25] Zhao J.H. Foster J. Dong Z.Y. and Wong K.P. 2011. “Flexible Transmission Network Planning Considering Distributed Generation Impacts”, *IEEE Trans. On Power System, Vol. 26, no. 3, pp. 1434-1443.*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]

فهرست علائم

Cl_{ij}	هزینه احداث خط جدید بین باس‌های i, j
N_{ij}	تعداد خط اضافه شده به مسیر i-j
$C_{inv_{ij}}$	هزینه سرمایه گذاری احداث خط بین باس های i-j
$C_{op_{ij}}$	هزینه تعمیر و نگهداری احداث خط بین باس های i-j
C_{l_i}	هزینه احداث خط در سطح ولتاژ
L_{ij}	طول احداث خط بین باس های i-j
C_{loss}	هزینه تلفات سالانه شبکه
$loss$	تلفات کل شبکه
C_{loss_u}	هزینه واحد تلفات (دلار بر مگاوات ساعت)
k_{loss_u}	ضریب تلفات
n	مجموعه خطوط نامزد برای اضافه شدن به شبکه
S	ماتریس تلاقی گره -شاخه
f	بردار توان حقیقی جاری در خطوط
g	بردار توان حقیقی تولیدی در باس‌ها
d	بردار مصرف پیش بینی شده برای باس‌ها
f_{ij}	توان جاری در شاخه i-j
$\overline{f_{ij}}$	حد توان جاری در شاخه i-j
N_{ij}^0	تعداد خط اولیه شاخه i-j
N_{ij}	تعداد خط اضافه شده به مسیر i-j
$\overline{N_{ij}}$	حداکثر تعداد خط جدید برای اضافه شدن به شاخه i-j
θ_{ij}	زاویه ولتاژ باس i
P_r	توان توربین
V_{ci}	سرعت قطع پایین نیروگاه بادی
V_r	سرعت قطع نامی نیروگاه بادی
V_{co}	سرعت قطع بالا نیروگاه بادی
NS	تعداد تکرار شبیه سازی مونت کارلو

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-06-11]