یکپارچه‌سازی بهینه انرژی باد در برنامه‌ریزی توسعه تولید انرژی الکتریکی با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت

فاطمه جهانبانی اردکانی[۱] **مرتضی محمدی اردهالی**[۲]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
jahanbani@aut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
ardehali@aut.ac.ir

چکیده: یکپارچه‌سازی توان تولیدی باد در یک سیستم تولید الکتریکی باعث ایجاد نوسانات و عدم قطعیت خواهد شد که باید در فرآیند برنامه‌ریزی توسعه تولید (GEP) در نظر گرفته شود. هدف این مطالعه، مدل‌سازی مسئله GEP با یکپارچه‌سازی توان تولیدی بادی با معرفی و پیشنهاد مدل فازی-احتمالاتی به منظور در نظرگرفتن نوسانات و عدم قطعیت موجود در توان تولیدی باد می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی و بهینه‌سازی مسئله GEP، از الگوریتم ژنتیک، جستجوی گرانشی و جستجوی گرانشی بهبود یافته (IGSA) برای یک سیستم نمونه استفاده شده که IGSA به بهترین پاسخ دست یافته است. برای مدل کردن توان تولیدی باد مدل‌سازی فازی-احتمالاتی معرفی و پیشنهاد گردیده است که در آن، از الگوریتم خوشه‌بندی k-means استفاده شده که تعداد خوشه‌های مناسب مبتنی بر روش معیار اطلاعات بیزین انتخاب شده‌اند و سپس اعداد فازی به هر مرکز خوشه اختصاص داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت در توان تولیدی باد ترکیب بهینه واحدهای تولید متناظر با مقادیر هزینه کل(TC) را تغییر می‌دهد به گونه‌ای که با کاهش درصد سهم نیروگاه‌های بادی نصب شده به دلیل کاهش توان تولیدی باد مقدار هزینه TC افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: **انرژی باد، برنامه‌ریزی توسعه تولید، روش برش آلفا، معیار اطلاعات بیزین، مدل فازی-احتمالاتی، الگوریتم جستجوی گرانش بهبودیافته.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۴/۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مرتضی محمدی اردهالی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان حافظ – پلاک ۴۲۴ – دانشگاه صنعتی امیر کبیر – دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۱- مقدمه

نگرانی‌ها در مورد محیط‌زیست، کاهش ذخایر سوخت فسیلی و افزایش تقاضای الکتریسیته موجب افزایش تمایل به بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر همچون باد شده است که در نظرگرفتن خصوصیات ذاتی این منابع برای اهداف برنامه‌ریزی بلندمدت و سیاست‌های گسترش ضروری است [۱].

در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید[1] (GEP)، ظرفیت تولید یک سیستم توان باید به گونه‌ای گسترش داده شود تا بتواند با افزایش تقاضا در زمان، قابلیت اطمینان سیستم را در سطح قابل قبولی نگه دارد [۲]. نتایج مسئله GEP بهینه شده، نصب میزان سهم و ترکیبات مختلف منابع متداول و تجدیدپذیر را در افق برنامه‌ریزی تعیین می‌کند. به هر حال، انرژی باد به عنوان منبع تجدیدپذیر با سریعترین رشد [۳] و با تخمین درصد سهمی حدود ۵ درصد از کل بازار تولید توان در سال ۲۰۴۰ [۴]، با نوسانات و عدم قطعیتی همراه است که ناشی از طبیعت متغیر سرعت باد می‌باشد که موجب پیچیدگی‌های بسیاری در مدل‌سازی‌ها می‌شود که در مطالعات متعددی بررسی شده است [۵و۶].

در برخی از مطالعات مرتبط با سیاست‌های توسعه، نوسانات و عدم قطعیت در توان بادی در نظر گرفته نشده است و در نتیجه پیش‌بینی‌ها با عدم دقت مواجه می‌شوند [۷-۹]. برای کاهش پیچیدگی‌ها در مدل GEP، این مطالعات فرض می‌کنند که نرخ نفوذ منابع تجدیدپذیر پایین باشد و به عبارت دیگر در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌ها و منقطع بودن توان بادی تأثیر زیادی بر مطالعه نخواهد گذاشت [۱۰]. در مطالعه‌ای توسط مزا و همکارانش [۱۱]، مسئله GEP با در نظر گرفتن توان تولیدی باد به عنوان یکی از گزینه‌های تولید، بهینه شده است به این صورت که، ظرفیت توان بادی مورد نیاز همانند دیگر گزینه‌های سوخت فسیلی مدل شده و نوسانات و عدم قطعیت مرتبط با توان تولیدی باد در نظر گرفته نشده است. در مطالعات دیگری، برای مدل کردن قطعی توان تولیدی باد، از ضریب ظرفیت برای مسئله GEP استفاده شده است [۱۲-۱۹, ۸] جین و همکاران مفهوم ارزش ظرفیت را به عنوان معیار پتانسیل تولیدی، به جای ضریب ظرفیت معرفی کردند تا بتوانند توان تولیدی بادی در مسئله GEP را مدل کنند [۲۰]. ارزش ظرفیت مقدار کمترین توان تولیدی بادی که سیستم قدرت الکتریکی می‌تواند در هر زمانی بر آن اعتماد کند و به عبارتی بدترین سناریو تولید را مدل می‌کند. در هر صورت، ضریب ظرفیت و ارزش ظرفیت نمی‌توانند به درستی نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی باد را مدل کنند.

در مطالعه دیگری، برای در نظر گرفتن نوسانات توان تولیدی باد شبیه‌سازی عملکرد برای یک سال و به صورت ساعتی انجام شده است [۲۱]. در یک مطالعه توسط کایل و چندا [۲۲]، توان تولیدی بادی با استفاده از تابع توزیع احتمالاتی ویبال[2] مدل شده است که به بازه‌های مشخصی برای بهینه کردن مکان و اندازه تولید پراکنده بادی و خورشیدی تقسیم شده است. همچنین در مطالعه دیگری، مدل‌سازی احتمالاتی برای مدل کردن توان تولیدی بادی و خورشیدی در سیستم توزیع استفاده شده است [۲۳].

این مطالعات فرض می‌کنند که روند تغییرات توان تولیدی باد در طول سال‌های برنامه‌ریزی ثابت خواهد بود. به هر حال برخی از مطالعات هستند که عدم قطعیت توان تولیدی باد را در مسئله GEP مدل کرده‌اند. برای این منظور، کامالینیا و همکاران فرض کرده‌اند که توان تولیدی باد به صورت توزیع ویبال باشد [۲۴]. در این مطالعه، تعداد زیادی سناریو برای در نظر گرفتن خطاهای مختلف در پیش‌بینی با استفاده از روش مونت کارلو استفاده شده است که برای هر سناریو با فرض داشتن توان تولیدی بادی ساعتی شبیه‌سازی انجام شده است. همچنین، معینی اقطعی و همکارانش نیز از روش مونت کارلو برای پیش‌بینی ساعتی داده‌های سرعت باد در طول سال و در نتیجه توان تولیدی بادی استفاده کرده‌اند [۲۵].

برای مدل‌سازی عدم قطعیت در حل مسئله GEP، از مدل‌سازی فازی می‌توان استفاده کرد. همانگونه که در مطالعه [۲۶] در دسترس بودن انرژی اولیه برای تمام گزینه‌های واحدهای تولید کاندیدا و نیز تقاضای الکتریکی به صورت عدد فازی در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی فازی غیردقیق در مسئله GEP بهینه شده است. در مطالعه‌ای توسط سومیلی و همکاران [۲۷]، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی باد، تعداد زیادی سناریو تولید و سپس بر اساس الگوریتم خوشه‌بندی k-means، سناریوها به چندین خوشه و احتمال متناظر با آن‌ها تقسیم شده است. همچنین روی هسون و همکاران برای مدل کردن عدم قطعیت توان تولیدی باد در مسئله زمان‌بندی تولید در یک مطالعه، عدد فازی را برای ضریب ظرفیت در نظر گرفته و از روش برش آلفا برای حل مسئله استفاده کرده‌اند [۲۸].

۱-۱- نوآوری‌ها

با بررسی ادبیات موضوع مشخص می‌گردد که همچنان پیدا کردن مدل مناسبی برای نوسانات و عدم قطعیت موجود در توان تولیدی باد در مسئله GEP بلند مدت مورد توجه است. مدل‌سازی دقیق توان تولیدی باد، پیچیدگی مسئله GEP را افزایش می‌دهد و با توجه به افزایش استفاده از توان تولیدی باد در آینده، توسعه روشی برای مدل‌سازی مناسب نوسانات و عدم قطعیت ضروری می‌باشد.

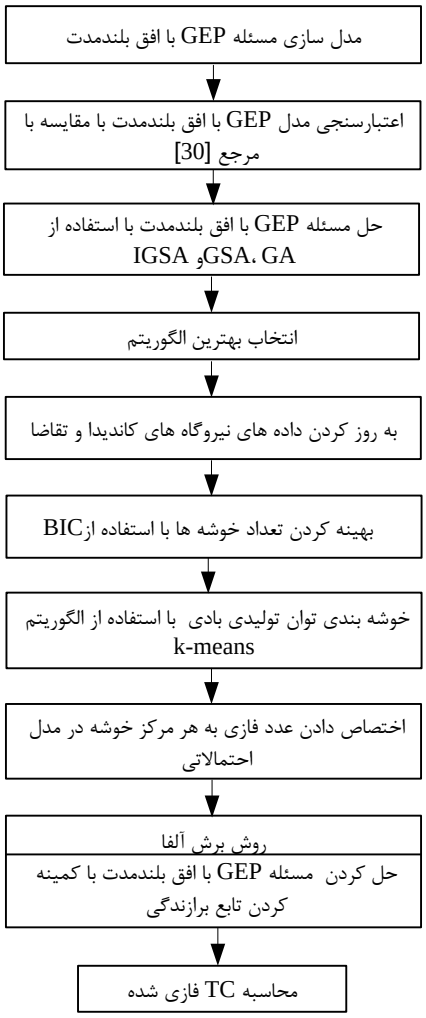
بیشتر مطالعات گذشته از ضریب ظرفیت که مقدار ثابتی است، برای مدل‌سازی رفتار توان تولیدی باد در مسئله GEP استفاده می‌کنند که البته این روش نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی باد را نشان نمی‌دهد. مدل‌سازی احتمالاتی روش متداولی است که برای مدل کردن توان تولیدی بادی استفاده می‌شود [۲۹]. به هر حال، به خاطر امکان تغییر سرعت باد در سال‌های برنامه‌ریزی که می‌تواند منجر به

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

تغییر در مدل احتمالاتی مورد استفاده برای توان تولیدی از انرژی باد شود، عدم قطعیت به صورت ذاتی در این مدل وجود خواهد داشت که استفاده از مدل احتمالاتی آن را در نظر نمی‌گیرید.

هدف این مطالعه، مدل‌سازی مسئله GEP با یکپارچه‌سازی[۳] توان تولیدی بادی با معرفی و پیشنهاد مدل فازی-احتمالاتی به منظور در نظرگرفتن نوسانات و عدم قطعیت موجود در توان تولیدی باد می‌باشد. برای رسیدن به هدف، مسئله GEP مدل شده و سپس با مقایسه با مطالعه جدیدالاسلام و همکاران [۳۰] که سیستمی با ۱۵ واحد تولیدی موجود و ۵ واحد تولیدی کاندیدا از نوع سوخت فسیلی می‌باشد، مدل مورد استفاده اعتبارسنجی شده است. به منظور انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی برای حل مسئله GEP، از الگوریتم‌های ژنتیک[۴] (GA)، جستجوی گرانشی[۵] (GSA)، و جستجوی گرانشی بهبود یافته[۶] (IGSA) استفاده شده است. به منظور مدل کردن نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی بادی با استفاده از روش مدل‌سازی فازی-احتمالاتی، الگوریتم خوشه‌بندی k-means به کار رفته است و مراکز خوشه و احتمال متناظر با هر خوشه محاسبه شده است که برای رسیدن به مدل دقیقتر از معیار اطلاعات بیزین[۷] (BIC) برای تعیین تعداد خوشه‌ها استفاده شده است. سپس، به هر مرکز خوشه در مدل احتمالاتی مرحله قبل یک عدد فازی اختصاص داده شده است. برای حل مسئله GEP، از روش برش آلفا استفاده شده و برای بهینه کردن مقدار TC، از بهترین الگوریتم به دست آمده در مرحله قبل استفاده شده است و مقدار هزینه کل[۸] (TC) شامل مجموع هزینه‌های سرمایه گذاری، تعمیر و نگهداری، میزان بار تأمین نشده، اسقاط و هزینه‌های زیست محیطی، تعریف شده به عنوان شاخص عملکرد، استفاده شده و تعداد واحدهای تولیدی مورد نیاز متناظر با TC بهینه تعیین شده است [۳۰]. در شکل (۱) فلوچارت روند مدل‌سازی GEP با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت در توان تولیدی بادی نشان داده شده است.

ادامه این مطالعه به صورت زیر دسته‌بندی شده است. در بخش بعد، مدل GEP توضیح داده شده است. مدل‌سازی توان تولیدی بادی در بخش سوم آورده شده است. مدل‌سازی فازی-احتمالاتی جهت مدل کردن همزمان نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی بادی در بخش چهارم بیان شده است. بخش پنجم به الگوریتم‌های بهینه‌سازی اختصاص داده شده است. در بخش ششم بهینه‌سازی مسئله GEP بحث شده است. در بخش هفتم نتایج شبیه‌سازی استفاده از مدل پیشنهادی برای توان تولیدی بادی در مسئله GEP مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات در بخش هشتم آورده شده است.



شکل (۱): فلوچارت بهینه‌سازی مسئله GEP با افق بلندمدت.

۲- فرمول‌بندی مسئله GEP

شاخص عملکردی مسئله GEP به صورت هزینه‌های کل، TC، شامل مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری واحدهای تولیدی جدید[۹] (Inv) و هزینه‌های عملکردی و تعمیر و نگهداری (شامل هزینه‌های ثابت و متغیر) واحدهای تولیدی موجود و جدید[۱۰] (OM)، هزینه عدم تأمین بار[۱۱] (ENS)، هزینه‌های اسقاط واحدهای تولیدی جدید[۱۲] (Sal) و نیز هزینه‌های زیست محیطی تعریف شده است. از دید ریاضی، TC به صورت زیر فرمول‌بندی شده است [30-32]:

$$Min\ TC = \sum_{t=1}^{T}\begin{bmatrix} Inv(U_t)+OM(X_t)+ENS(X_t) \\ -Sal(U_t)+Env(G_t) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در آن، T سال افق برنامه‌ریزی است که به تعداد گام‌های مشخصی، نشان داده شده با t، تقسیم شده است. هر گام می‌تواند شامل یک و یا چندین سال باشد که محاسبات بهینه‌سازی هزینه برای هر گام انجام می‌شود. U_t و X_t به ترتیب، بردار ظرفیت اضافه شده همه واحدهای تولیدی کاندیدا و ظرفیت تجمعی همه واحدهای تولیدی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

موجود و کاندیدا در گام tام می‌باشد. X_t از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_t = X_{t-1} + U_t \quad (۲)$$

در رابطه (۱)، اجزائ هزینه TC با در نظر گرفتن نرخ بهره، i، را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Inv(U_t) = \frac{1}{(1+i)^{t'}} \times \sum_{k=1}^{N} \left[Inv_C_k \times U_{t,k} \right] \quad (۳)$$

$$OM(X_t) = \sum_{y=0}^{S-1} \left[\frac{1}{(1+i)^{t'+0.5+y}} \times \sum_{k=1}^{N} \begin{bmatrix} F_C_k \times X_{t,k} \\ +V_C_k \times G_{t,k} \end{bmatrix} \right] \quad (۴)$$

$$ENS(X_t) = \sum_{y=0}^{S-1} \left[\frac{1}{(1+i)^{t'+0.5+y}} \times EENS_t \times ENS_C \right] \quad (۵)$$

که در آن Inv_C_k، F_C_k و V_C_k به ترتیب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر عملکردی واحد kام می‌باشد. همچنین، env_C_k هزینه زیست محیطی واحد kام است. $U_{t,k}$، $X_{t,k}$ و $G_{t,k}$ به ترتیب نشان دهنده، ظرفیت kامین واحد تولیدی کاندیدا، ظرفیت تجمعی kامین واحد و میزان انرژی تولیدی توسط واحد kام در گام t می‌باشد. همچنین هزینه عدم تأمین بار مورد انتظار در گام tام ($EENS_t$) به صورت ENS_C نشان داده شده است. قابل توجه است که برای محاسبه $G_{t,k}$، نرخ خروج اضطراری[۱۳] (FOR) هر واحد تولید در نظر گرفته شده است. همچنین، لازم به ذکر است که در رابطه (۱)، برای محاسبه ارزش فعلی هر یک از اجزاء هزینه، فرض می‌شود که نصب و ساخت هر واحد تولیدی در ابتدای هر گام اتفاق بیافتد. در حالی که هزینه‌های OM و ENS در وسط هر سال محاسبه می‌شود.

برای سرمایه‌گذاری‌هایی با طول عمر بیشتر از افق برنامه‌ریزی، از روش استهلاک تنزیل سرمایه برای محاسبه مقدار ضریب اسقاط در هر گام ($\delta_{k,t}$) استفاده شده است [۳۳]:

$$\delta_{k,t} = \frac{i}{(1+i)^{L_k} - 1} \times (1+i)^t \quad (۸)$$

که L_k طول عمر مفید واحد تولیدی kام می‌باشد. همچنین t' و T' به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$t' = t_0 + S \times (t-1) \quad (۹)$$

$$T' = t_0 + S \times t \quad (۱۰)$$

که S و t_0 به ترتیب، تعداد سال‌ها در هر گام و تعداد سال‌ها بین سال مرجع و اولین سال برنامه‌ریزی برای محاسبات می‌باشد.

برای بهینه‌سازی مسئله GEP چهار دسته از قیود در نظر گرفته شده است. به دلیل مشکلات و محدودیت‌های فیزیکی موجود، تعداد واحدهای تولیدی قابل ساخت در هر گام محدود شده است

$$0 \le U_t \le U_{\max,t} \quad (۱۱)$$

و میزان رزرو برای هر سال به مقدار حداقل ($R_{\min}$) و حداکثر آن ($R_{\max}$) محدود شده است

$$(1+R_{\min}) \times Load_t \le \sum_{k=1}^{N} X_{t,k} \le (1+R_{\max}) \times Load_t \quad (۱۲)$$

ظرفیت تولید هر واحد تولیدی کاندیدا بر اساس نوع سوخت آن به صورت

$$M_{\min}{}^j \le \frac{X_{t,j}}{\sum_{k=1}^{N} X_{t,k}} \le M_{\max}{}^j \quad (۱۳)$$

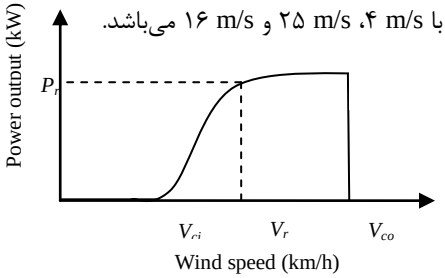
و قید احتمال از دست رفتن بار[۱۴] (LOLP) به صورت

$$LOLP(X_t) \le \varepsilon \quad (۱۴)$$

تعریف شده است. که $U_{\max,t}$ ماکزیمم ظرفیت در دسترس واحدها را در گام t و $load_t$ بار پیک در گام زمانی t است. $M_{\min}{}^j$ و $M_{\max}{}^j$ به ترتیب، حداقل و حداکثر مقدار را برای سوخت نوع jام در گام t را نشان می‌دهد. همچنین LOLP در هر گام به مقدار ε محدود شده است.

۳- مدل‌سازی توان تولیدی باد

برای مدل‌سازی توان تولیدی بادی از داده‌های سرعت باد گذشته برای یک سایت نمونه استفاده شده است. برای محاسبه مقدار توانی که می‌توان از باد به دست آورد، از منحنی توان ژنراتور توربین بادی (WTG) استفاده شده است. در این مطالعه، مدل منحنی WTG با ظرفیت MW ۲ در شکل (۲) نشان داده شده است[2]. پارامترهای سرعت قطع پایین (v_{ci})، سرعت قطع بالا (v_{co}) و نامی (v_r) آن به ترتیب برابر با m/s ۴، m/s ۲۵ و m/s ۱۶ می‌باشد.



شکل (۲): منحنی توان خروجی WTG [۲].

توان خروجی WTG در ترم‌های سرعت باد در رابطه (۱۵) آورده شده است [34].

$$Pwind_t = \begin{cases} 0 & v_t \prec v_{ci} \ and \ v_t \succ v_{co} \\ P_r(A + Bv_t + Cv_t{}^2) & v_{ci} \le v_t \le v_r \\ P_r & v_r \le v_t \le v_{co} \end{cases} \quad (۱۵)$$

که P_r و v_t توان نامی و سرعت باد در زمان t می‌باشد. علاوه بر آن، A، B و C به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4v_{ci}v_r \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right\} \quad (۱۶)$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ \begin{matrix} 4(v_{ci} + v_r) \left[\frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \\ -(3v_{ci} + v_r) \end{matrix} \right\} \quad (۱۷)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

$$C=\frac{1}{(v_{ci}-v_r)^2}\left\{2-4\left[\frac{v_{ci}+v_r}{2v_r}\right]^3\right\} \quad (۱۸)$$

که برای WTG شکل (۲)، پارامترهای A، B و C به ترتیب ۰/۱۲۱۵، ۰/۰۵۸۸- و ۰/۰۰۷۱ محاسبه شده است.

همانگونه که در رابطه (۱۵) نشان داده شده است، توان تولیدی WTG تابعی غیرخطی از سرعت باد است. در این مطالعه، سرعت باد ساعتی برای پنج سال برای منطقه‌ای در شمال غرب اقیانوس آرام جهت مدل‌سازی سرعت باد مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵].

۴- نوسانات و عدم قطعیت در توان تولیدی باد

توان تولیدی باد دارای نوسانات است به گونه‌ای که مقدار آن از ساعتی به ساعت دیگر تغییر می‌کند چرا که وابسته به میزان سرعت باد در هر ساعت است. در روش‌های پیش‌بینی تلاش می‌شود تا بتوان روند تغییرات را با روش‌های آماری و یا احتمالاتی به دست آورد [۲۹]. در این مطالعه، برای مدل کردن توان تولیدی بادی از الگوریتم خوشه‌بندی k-means برای انتخاب بهترین مراکز خوشه برای توان باد تولیدی و نیز محاسبه احتمال متناظر با هر خوشه استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مدل احتمالاتی به دست آمده فرض شده که مراکز خوشه‌ها در افق برنامه‌ریزی تغییری نکند با توجه به اینکه سرعت باد می‌تواند در طول سال‌های مختلف برنامه‌ریزی به دلایلی همچون تغییر سطح پوشش گیاهی منطقه و ... تغییر کند، از طرفی سرعت باد در هر لحظه می‌تواند رفتاری غیرقابل پیش‌بینی داشته باشد، در نتیجه امکان تغییر و جابه‌جایی مرکز خوشه در مدل احتمالاتی به دست آمده وجود خواهد داشت که برای در نظر گرفتن این ویژگی، مدل فازی-احتمالاتی پیشنهاد شده است.

۴-۱- مدل فازی-احتمالاتی پیشنهادی

به منظور مدل کردن احتمالاتی توان تولیدی باد، در ادامه الگوریتم خوشه‌بندی مورد استفاده و روش انتخاب تعداد خوشه‌های بهینه آورده شده است.

۴-۱-۱- الگوریتم خوشه‌بندی k-means

خوشه‌بندی k-means یک الگوریتم تکراری است که برای پیدا کردن مراکز خوشه‌ها در داده‌های توان تولیدی باد استفاده شده است. تعداد خوشه‌ها (K) در الگوریتم k-means هنگامی که تعداد دقیق خوشه‌ها برای مجموعه داده‌های مختلف مشخص نباشد به صورت تصادفی مقداردهی می‌شود. سپس فاصله اقلیدسی بین هر داده توان (p) و مرکز خوشه (CP) محاسبه می‌شود و توان به خوشه‌ای که کمترین فاصله تا داده را دارد تعلق می‌گیرد. در گام بعد، مرکز هر خوشه محاسبه و به روز می‌شود. الگوریتم تا زمانی که مراکز خوشه در دو تکرار متوالی تغییر نکند، ادامه می‌یابد [۳۶].

چون پاسخ الگوریتم خوشه‌بندی k-means اغلب به تعداد خوشه انتخاب شده وابسته است، الگوریتم باید چندین بار برای تعداد خوشه متفاوت اجرا شود. تعداد خوشه‌ها متناظر با بهترین پاسخ با کمترین خطا در اختصاص توان تولیدی بادی به مراکز خوشه در مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما تعیین کردن بهترین مراکز خوشه با استفاده از تعداد خوشه‌های متفاوت نیاز به زمان محاسبات طولانی دارد و از طرفی رسیدن به پاسخ بهینه را تضمین نمی‌کند. بنابراین مناسب‌تر است که تعداد خوشه‌ها با استفاده از روش‌های دیگر بهینه شود.

در این مطالعه، برای انتخاب تعداد خوشه‌های مناسب از روش BIC استفاده شده است که به صورت زیر تعریف شده است [۳۸,۳۷]:

$$BIC=L(p)-\frac{1}{2}K\log n \quad (۱۹)$$

که $L(p)$ تابع log-likelihood برای توان تولیدی باد p، K تعداد خوشه‌ها و n تعداد داده‌های موجود از توان تولیدی باد است. با فرض ساده‌سازی‌های کینپی و همکاران، BIC به صورت زیر به دست آمده است [۳۸]:

$$BIC=\sum_{i=1}^{K}\left(\begin{array}{l} n_i\log n_i-n_i\log n-\frac{n_i*d}{2}\log 2\pi- \\ \frac{n_i}{2}\log\left(\frac{1}{n_i-K}\sum_{j=1}^{n_i}\left\|p_j-CP_i\right\|^2\right)-\frac{n_i-K}{2} \end{array}\right) \quad (۲۰)$$

$$-\frac{1}{2}K\log n$$

که d ابعاد داده‌های توان تولیدی باد و n_i اندازه مرکز خوشه iام است. همچنین p_j jامین داده را در خوشه نشان می‌دهد. BIC برای هر تعداد از خوشه‌ها برای رنج مشخصی تعیین می‌شود و سپس نقطه زانویه در منحنی BIC به عنوان بهترین تعداد خوشه‌ها انتخاب می‌گردد. برای تشخیص نقطه زانویه از منحنی BIC نرمال شده طبق پیشنهاد کینپی و همکاران استفاده شده است [۳۸].

$$C_1=(K_{\max}-K_{\min})(BIC-BIC_{\min})/(BIC_{\max}-BIC_{\min}) \quad (۲۱)$$

$$C_K=C_1/K \quad (۲۲)$$

$$C_2=(K_{\max}-K_{\min})(C_K-C_{K_{\min}})/(C_{K_{\max}}-C_{K_{\min}}) \quad (۲۳)$$

که پارامترهای C_1، C_2 و C_K بر اساس مقدار BIC و K تعیین شده است. لازم به ذکر است که $K_{\min}$ و $K_{\max}$ به ترتیب، تعداد حداقل و حداکثر خوشه‌ها و $BIC_{\min}$ و $BIC_{\max}$ به ترتیب، کمترین و بیشترین مقدار BIC می‌باشد.

برای داشتن تغییرات مشخص‌تر برای انتخاب نقطه زانو از روابط زیر استفاده شده است:

$$BIC\ changes=(C_1+C_2)/2 \quad (۲۴)$$

$$BIC\ changes=|C_1-C_2|/2 \quad (۲۵)$$

در صورتی که منحنی BIC روند افزایشی داشته باشد از رابطه (۲۴) و اگر روند کاهشی داشته باشد از رابطه (۲۵) استفاده خواهد شد. مقدار ماکزیمم به دست آمده برای منحنی $BIC\ changes$، بهترین تعداد خوشه‌ها را مشخص می‌کند.

سپس، یک روش فازی برای مدل احتمالاتی توان خروجی WTG استفاده شده است. برای مسئله GEP، یک مزرعه بادی با تعدادی

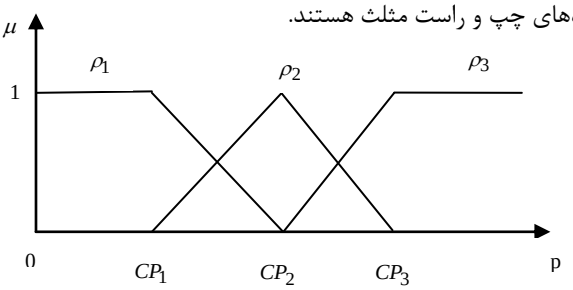
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

WTG به عنوان گزینه تولید کاندیدا استفاده شده است که به منظور مدل کردن توان تولیدی باد از روش فازی-احتمالاتی پیشنهادی، برای هر مرکز خوشه محاسبه شده در مدل احتمالاتی، یک عدد فازی اختصاص داده شده است (شکل (۳)) که این اعداد فازی باید بر هم عمود باشند. به عبارت دیگر، هر توان تولیدی باد یک معیار امکان و احتمال خواهد داشت.

برای داشتن اعداد فازی عمود بر هم (F)، لازم است تا مجموع مقادیر عضویت برای هر p در تمام اعداد فازی برابر با یک باشد [۳۹].

$$\sum_{k=1}^{K} \mu_{F(k)}(p) = 1 \qquad (۲۶)$$

که $F(k)$ عدد فازی kام و p توان تولیدی باد است. قابل توجه است که تعداد اعداد فازی با استفاده از BIC نرمال شده، بیان شده در بخش ۴-۱-۱ مشخص می‌شود. در شکل (۴)، تابع عضویت (μ) از مدل فازی-احتمالاتی توان تولیدی بادی نشان داده شده است که برای یک عدد فازی مثلثی مقدار میانگین برابر با CP_K، و a_k و b_k به ترتیب قاعده‌های چپ و راست مثلث هستند.



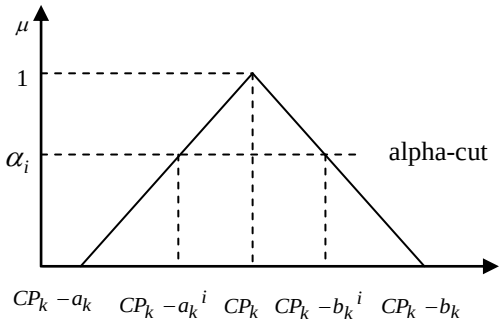
شکل (۳): تابع عضویت مدل فازی-احتمالاتی برای توان تولیدی بادی.

عدد فازی مثلثی بر طبق تعریف زیمرمن به صورت زیر می‌باشد [۲۶].

$$F_k(CP_k - a_k, CP_k, CP_k + b_k) = \begin{cases} 0 & p \le CP_k - a_k \\ \dfrac{p - CP_k + a_k}{a_k} & CP_k - a_k \le p \le CP_k \\ \dfrac{-p + CP_k + b_k}{b_k} & CP_k \le p \le CP_k + b_k \\ 0 & p \ge CP_k + b_k \end{cases} \qquad (۲۷)$$

در یک سطح از α_i، که iامین برش آلفا است، عدد فازی مثلثی شامل داده‌هایی در رنج $a_k^{\,i} + b_k^{\,i}$ است که مقادیر بزرگتر α به رنج‌های باریکتری از محدوده داده‌ها منجر می‌شود که به معنی بالاتر بودن اطمینان در توان تولیدی است به عنوان نمونه هنگامی که مقدار α برابر با یک باشد، توان تولیدی بادی یک مقدار قطعی خواهد داشت.

همانگونه که در شکل (۴) نشان داده شده است در روش برش آلفا، عدد فازی به صورت افقی در تعداد محدودی برش بین صفر و یک بریده می‌شود. برای هر مقدار p در هر بازه مرتبط با برش‌های آلفا لازم است تا مدل اجرا و کمترین و بیشترین مقدار TC در این محدوده محاسبه شود. سپس این داده‌ها به صورت مستقیم برای به دست آوردن مقدار TC فازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۴): درجه عضویت یک عدد فازی.

از آن‌جا که توان تولیدی بادی قابلیت پخش شدن[۱۵] را ندارد، به صورت بار منفی مدل می‌شود و بنابراین مقدار حداقل توان تولیدی باد، مقدار ماکزیمم بار خالص را در بازه متناظر با برش آلفای خاص تعیین می‌کند که بار خالص به صورت تقاضا منهای توان تولیدی باد تعریف می‌شود. بنابراین، تعداد واحدهای تولیدی بیشتری برای نصب مورد نیاز خواهد بود که منجر به مقدار بیشتر TC محاسبه شده می‌شود. بنابراین، محاسبه TCها برای مقادیر ابتدا و انتهای هر بازه از هر برش آلفا منطقی می‌باشد. به عبارت دیگر، برای هر برش آلفا، محاسبات هزینه برای مقادیر ابتدا و انتهای هر بازه انجام شده است.

۵- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

برای رسیدن به ترکیب بهینه واحدهای تولید و تعیین زمان و ظرفیت نصب آن‌ها در مسئله GEP و همچنین به منظور مقایسه، سه الگوریتم بهینه‌سازی مختلف در این مطالعه انجام شده است. الگوریتم ژنتیک در مطالعات زیادی بحث شده است بنابراین در بخش بعد، GSA و IGSA بررسی شده است.

۵-۱- الگوریتم جستجوی گرانشی

GSA یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری است که توسط راشدی و همکارانش ارائه شد [40] که بر اساس قوانین گرانشی نیوتن و تقابل اجرام می‌باشد. GSA با اجرام تصادفی که در فضای پاسخ شدنی پخش شده اند مقداردهی اولیه می شوند. اجرام در نتیجه تقابل بینشان توسط نیروهای گرانشی حرکت می‌کنند که موجب حرکت کلی اجرام به سوی اجرام سنگین‌تر می‌شوند. اجرام سنگین‌تر نیروی بیشتری را بر اجرام دیگر وارد می‌کنند و حرکت کندتری نسبت به دیگر اجرام دارند. اجرام در نظر گرفته شده در GSA بر اساس جرمشان و دو بردار سرعت V_i و موقعیت ψ_i شناخته می‌شوند. بنابراین iامین جرم در فضای جستجو N بعدی و برای $i = 1,....,L$ را می‌توان به صورت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

$\psi_i = \left[x_i{}^1, x_i{}^2, ..., x_i{}^N \right]$ مشخص کرد که L تعداد اجرام و x_i^d موقعیت iامین جرم در بعد dام را نشان می‌دهد. همچنین هر جرم دارای جرم گرانشی است که در هر تکرار الگوریتم و بر طبق مقدار شاخص عملکردی (به دست آمده از رابطه (۱)) به روز می‌شود. سپس نیروی وارده بر هر جرم از طرف دیگر اجرام و متعاقباً شتاب وارده بر هر جرم محاسبه می‌شود. آن‌گاه، موقعیت و سرعت جدید هر جرم به‌روز می‌شود. در هر تکرار، اجرام در فضای شدنی پاسخ حرکت می‌کنند و الگوریتم تا برآورده شدن شرط همگرایی تکرار می‌شود.

۵-۲- الگوریتم جستجوی گرانشی بهبود یافته

بهبود دادن عملکرد GSA هدف چندین مطالعه بوده است. به عنوان نمونه، در مطالعه‌ای توسط راشدی و همکارانش نسخه جدیدی از GSA باینری معرفی شده است [۴۱]. همچنین، یک استراتژی جدید حرکت در فضای جستجوی GSA، مشابه با الگوریتم PSO، معرفی و برای تشخیص پارامترهای سیستم گاورنر توربین هیدرولیکی توسط لی و ژو استفاده شده است [۴۲].

در روند جستجوی GSA، جهت حرکت یک جرم بر اساس نیروی کل وارد شده از طرف تمامی اجرام دیگر محاسبه می‌شود و در نتیجه حجم محاسبات مورد نیاز زیاد و متعاقبا سرعت پردازش الگوریتم کم می‌باشد. برای افزایش عملکرد GSA، راشدی و همکارانش پیشنهاد کردند که در نظر گرفتن درصدی از اجرام برای محاسبه نیروهای وارد بر یک جرم در هر تکرار می‌تواند برای کاهش دادن محاسبات مورد نیاز و متعاقبا بهبود دادن سرعت پردازش GSA موثر باشد [۴۱].

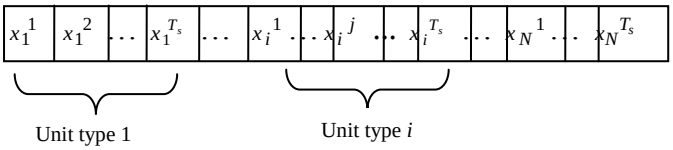
برای بهبود دادن GSA در این مطالعه، پیشنهاد می‌شود تا فضای جستجو، شبیه به پردازش موازی در الگوریتم جهش قورباغه[۱۶] (SFL)، به چند دسته تقسیم شود و سپس از استراتژی در نظر گرفتن درصدی از اجرام برای محاسبه نیروها استفاده شود. بنابراین تمامی جمعیت اجرام به L گروه که هر گروه شامل μ جرم می‌باشد، تقسیم می‌شود که اجرام هر گروه جستجوی محلی را در فضای شدنی بر عهده دارند.

در هر تکرار IGSA، برای دسته‌بندی اجرام، شاخص‌های عملکردی هر جرم براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شوند و سپس اجرام بر اساس مقادیر شاخص عملکردیشان به صورت افزایشی مرتب می‌شوند. سپس، اولین جرم به اولین گروه اختصاص می یابد و دومین جرم به دومین گروه، و به همین ترتیب تا $(L\times\mu)$امین جرم به L امین گروه تعلق می‌یابد.

برای هر گروه حرکت تمامی اجرام محاسبه شده است. اجرام سنگین تر در هر گروه می توانند کاندیداهایی برای پاسخ های کمینه محلی باشند. برای پیدا کردن پاسخ بهتر برهمکنش داخلی اجرام در هر گروه در نظر گرفته شده است. در گام بعد، درصد مشخصی از اجرام سنگین تر از هر گروه انتخاب شده و بر اساس نیروی وارده از طرف این اجرام، موقعیت اجرام محاسبه می‌شود. سپس بهترین پاسخ انتخاب شده و برای شروع گام بعد، تمامی اجرام را در کنار هم جمع کرده و تقسیم‌بندی جدیدی برای فضای شدنی انجام می‌شود. این روند تا همگرایی شرط توقف ادامه می‌یابد.

۶- بهینه‌سازی مسئله GEP

برای استفاده از الگوریتم‌های GA ، GSA و IGSA برای مسئله GEP، هر کروموزوم/جرم به صورت یک بردار $M\times 1$ تعریف شده است که M حاصل‌ضرب تعداد گام‌ها (T_s) و انواع واحدهای تولیدی کاندیدا (N) می باشد. شکل (۵) ساختار یک کروموزوم/جرم استفاده شده در الگوریتم بهینه‌سازی را نشان می‌دهد که هر المان، $x_i{}^j$، یک متغیر صحیح است که نوع واحد تولیدی کاندیدای iام در گام jام را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ساختار یک کروموزوم/جرم الگوریتم بهینه‌سازی.

برای بهینه‌سازی مسئله GEP از GA، GSA، و IGSA استفاده و سپس بهترین الگوریتم برای حل مسئله GEP با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی باد در این مطالعه انتخاب شده است. زمانی که بهترین الگوریتم برای محاسبه محدوده پایین و بالای یک بازه و برای برش آلفای معینی از هر کروموزوم/جرم استفاده می‌شود، متناسب با هر عدد فازی در هر بازه، مقدار TC بر اساس رابطه (۱) (در کل Kتا) محاسبه شده است. سپس، مقدار میانگین TCها با در نظر گرفتن احتمال هر کدام در عدد فازی مربوطه، به عنوان تابع برآزندگی در الگوریتم بهینه‌سازی تعیین شده است.

$$Fitness = \sum_{i=1}^{K} \rho_i TC_i \qquad (۲۸)$$

که ρ_i احتمال عدد فازی iام می‌باشد.

بنابراین، رابطه (۲۸) برای تعیین بهترین برآزندگی یا بهترین گزینه در مسئله توسعه تولید در بین تمام جمعیت می‌باشد.

۷- بحث و نتایج شبیه‌سازی

برای مدل GEP مورد نظر، یک سیستم تست نمونه با ۱۵ واحد تولیدی موجود و ۵ واحد تولید کاندیدا استفاده شده است. داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای تولید موجود و کاندیدا در مرجع [۳۰] آورده شده است.

برای سیستم مورد استفاده برای اعتبارسنجی، نرخ تنزیل ۸/۵٪، مقدار LOLP یک روز در سال (۰/۲۷٪) در هر گام زمانی و مقدار کمینه و بیشینه حاشیه رزرو به ترتیب برابر با ۲۰٪ و ۵۰٪ در نظر گرفته شده است. حداقل و حداکثر ظرفیت‌ها متناسب با انواع سوخت به ترتیب، برای واحد نفت سوز ۰٪ و ۳۰٪، برای گازسوز ۰٪ و ۴۰٪، برای زغال‌سنگ سوز، ۲۰٪ و ۴۰٪ و برای هسته‌ای ۳۰٪ و ۶۰٪ در نظر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

گرفته شده است. همچنین، مقدار هزینه عدم تأمین انرژی الکتریکی (EENS) برابر با ۰/۰۵ $/kWh فرض شده است.

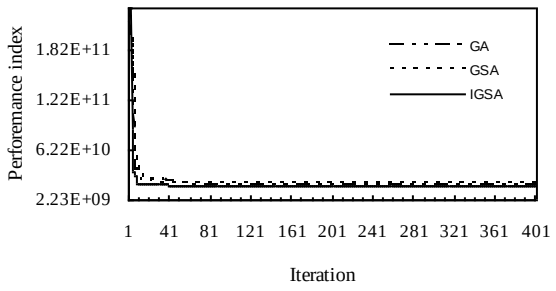
افق برنامه‌ریزی ۲۰ ساله به ۱۰ گام دو ساله تقسیم شده است. علاوه بر آن، تعداد سال‌ها بین سال مرجع و اولین سال برنامه‌ریزی برای محاسبات ۲ سال می‌باشد.

به منظور مقایسه GA، GSA و IGSA، هر سه الگوریتم به مسئله GEP اعمال شده است که در شکل (۶) منحنی‌های همگرایی آن‌ها آورده شده است. همچنین، پاسخ‌های بهینه به دست آمده از GA، GSA و IGSA در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقایسه عملکرد GA، GSA و IGSA.

نوع الگوریتم	TC (M$)	اختلاف TC با بهترین مقدار (%)
SFL [28]	19689.87	2.75
GA	19411.36	0.13
GSA	20508.39	7.01
IGSA	19163.31	-

بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، IGSA به کمترین مقدار TC برابر با ۱۹۱۶۳/۳۱M$ دست یافته در حالیکه GA و GSA به مقدار TC بیشتری به ترتیب برابر با ۰/۱۳ و ۷/۰۱٪ نسبت به IGSA رسیده‌اند. علاوه بر این، پاسخ TC کمینه شده با روش IGSA در مقایسه با مقدار TC به دست آمده از الگوریتم SFL برابر با ۱۹۶۸۹/۸۷M$ در مطالعه جدیدالاسلام و همکاران [30]، کمتر می‌باشد. لازم به ذکر است که برای اعتبارسنجی نتایج با مطالعه جدیدالاسلام و همکاران، هزینه‌های زیست محیطی در نظر گرفته نشده است.



شکل ۶: همگرایی GA، GSA و IGSA در مسئله بهینه‌سازی GEP.

برای مدل کردن مسئله GEP با وجود نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی بادی، ابتدا داده‌های مرجع [30] برای سال ۲۰۱۱ به روز شده و در ادامه شبیه‌سازی از داده‌های جداول (۲) و (۳) استفاده شده است. همچنین هزینه‌های زیست محیطی مربوط به هر واحد تولید بسته به نوع سوخت در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۲): داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای تولیدی کاندیدا به روز شده برای سال ۲۰۱۱ [۴۳].

نوع سوخت	تعداد	ظرفیت (MW)	FOR (٪)	فاکتور ظرفیت (٪)	هزینه سرمایه‌گذاری ($/kW)	هزینه‌های متغیر ($/MWh)	هزینه‌های ثابت ($/kW-yr)	طول عمر
نفت	۶	۲۰۰	۷	-	۲۱۰۰	۱۰/۵	۵۲/۸	۲۵
گاز	۱۰	۸۵	۱۰	-	۹۷۳	۱۵/۴۵	۷/۳۴	۲۰
زغال سنگ	۵	۶۰۰	۹/۵	-	۴۴۰۰	۷/۲۲	۶۲/۲۵	۲۵
هسته‌ای	۳	۱۰۰۰	۹	-	۵۵۳۰	۲/۱۴	۹۳/۲۸	۲۵
بادی	۵	۲۰۰	۲	۲۴/۲	۲۲۱۳	۰	۳۹/۵۵	۲۰

برای مدل کردن توان تولیدی بادی برای مسئله GEP، از داده‌های سرعت باد واقعی در محاسبه توان تولیدی WTG در رابطه (۱۵) استفاده شده است. سپس مقادیر *BIC* با استفاده از رابطه (۲۰) برای تعداد خوشه‌های مختلف محاسبه و در شکل (۷) نشان داده شده است. علاوه بر این، *BIC* نرمال شده با استفاده از رابطه (۲۴) در شکل (۸) آورده شده است. قابل توجه است که بر اساس نوع توربین بادی انتخابی و داده های سرعت باد منطقه مورد نظر، ضریب نفوذ نیروگاه بادی برابربا ۲۴/۲٪ به دست می آید.

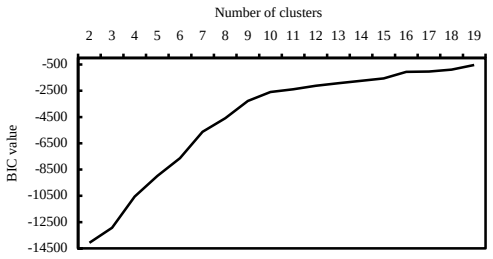
جدول (۳): داده‌های پیش‌بینی تقاضای بار(MW) به روز شده برای سال ۲۰۱۱.

مرحله	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
بار	۵	۷/۵	۹	۱۱/۴	۱۳/۳	۱۴	۱۵/۵	۱۷/۷	۲۰	۲۱/۵	۲۳

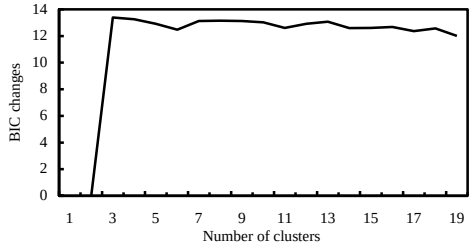
جدول (۴): میزان انتشار آلاینده‌ها بر حسب نوع سوخت [۴۴].

نوع	نفت	گاز	زغال‌سنگ
مقدار ($/MWh)	۹۳/۳۹	۳۹/۴۳	۱۰۵/۷

از آن‌جا که مقدار ماکزیمم *BIC* نرمال شده در $K=۳$ اتفاق می‌افتد، تعداد بهینه خوشه‌ها برای تولید توان بادی برابر با ۳ در نظر گرفته شده است. مراکز خوشه‌ها و احتمال متناظر با آن‌ها برای WTG مورد نظر در جدول (۵) آورده شده است. قابل توجه است که هر مزرعه بادی شامل ۱۰۰ WTG می‌باشد. در جدول (۶)، اعداد فازی برای هر خوشه در مزرعه بادی نشان داده شده است.



شکل (۷): مقدار BIC به ازای تعداد مراکز خوشه مختلف.



شکل (۸): تغییرات مقدار BIC نرمال شده به ازای مراکز خوشه مختلف.

جدول (۵): مراکز خوشه و احتمال متناظر با آن برای WTG.

مراکز دسته (MW)	۰/۰۹	۰/۷۳	۱/۸۹
احتمال	۰/۶۶۳	۰/۱۹۷	۰/۱۴

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

جدول (۶): اعداد فازی متناسب با هر مرکز خوشه برای مزرعه بادی.

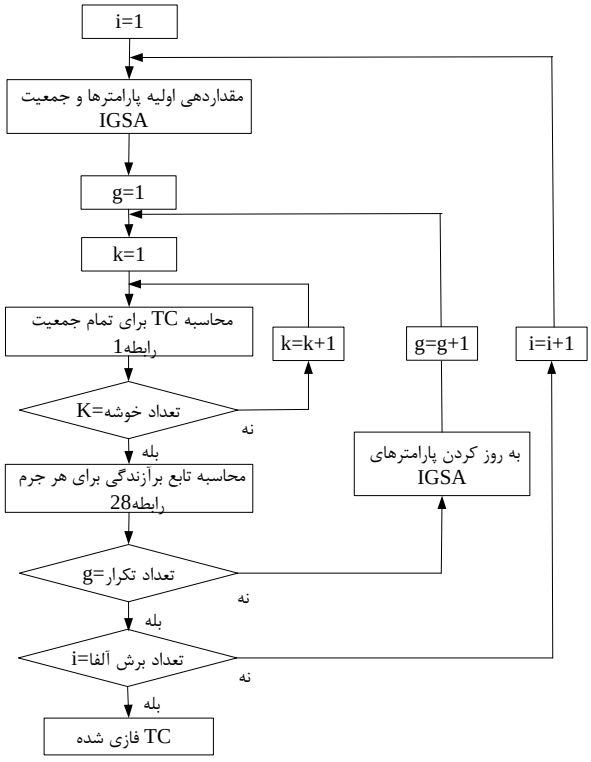
شماره خوشه	مرکز خوشه	عدد فازی
۱	۹	F(۰,۹,۷۳)
۲	۷۳	F(۹,۷۳,۱۸۹)
۳	۱۸۹	F(۷۳, ۱۸۹,۲۰۰)

بر اساس توضیحات در بخش ۴-۲، به هر مرکز خوشه در مدل احتمالاتی، عدد فازی مثلثی اختصاص داده شده که برای بهینه کردن مسئله GEP با در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت از سه برش آلفا استفاده شده است. برای هر برش آلفا و برای هر عدد فازی، مقدار توان تولیدی بادی در شروع و انتهای هر بازه در جدول (۷) نشان داده شده است.

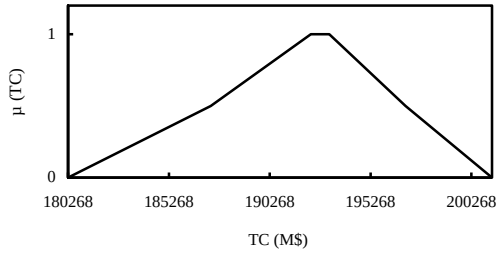
جدول (۷): مقدار توان تولیدی بادی در ابتدا و انتهای هر بازه به ازای هر برش آلفا.

خوشه	α=۰		α=۰/۵		α=۱	
	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها	ابتدا	انتها
۱	۰	۷۳	۰	۴۱	۰	۹
۲	۹	۱۸۹	۴۱	۱۳۱	۷۳	۷۳
۳	۷۳	۲۰۰	۱۳۱	۲۰۰	۱۸۹	۲۰۰

شکل (۹) فلوچارت IGSA استفاده شده برای مدل کردن نوسانات و عدم قطعیت در مسئله GEP را نشان می‌دهد. با استفاده از IGSA، مسئله GEP بهینه شده و مقادیر TC فازی شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. علاوه بر آن، در جدول (۸)، مقدار کمترین TC متناظر با ابتدا و انتهای هر بازه از برش آلفا گزارش شده است.



شکل (۹): فلوچارت استفاده از IGSA در بهینه‌سازی مسئله GEP.



شکل (۱۰): مقدار TC فازی محاسبه شده با استفاده از مدل فازی-احتمالاتی.

جدول (۸): مقدار TC (M$) محاسبه شده برای توان تولیدی در ابتدا و انتهای بازه در هر برش آلفا.

A=0		α=0.5		α=1	
بدترین TC	بهترین TC	بدترین TC	بهترین TC	بدترین TC	بهترین TC
۲۰۱۲۹۱/۴	۱۸۰۲۶۸/۶	۱۹۷۰۰۳/۳	۱۸۷۳۴۱/۲	۱۹۳۲۲۱/۱	۱۹۲۳۱۲/۷

لازم به ذکر است که مقادیر کمینه و بیشینه برای TC به ترتیب در انتها و ابتدای بازه مقدار توان تولیدی بادی از اولین برش اتفاق می‌افتد که به ترتیب برابر با $۱۸۰۲۶۸/۹۱M و ۲۰۱۲۹۰/۹۷ می‌باشد. تعداد بهینه واحدهای تولیدی کاندیدا برای چنین مقادیر توان تولیدی بادی در جداول (۹) و (۱۰) لیست شده است. همانگونه که انتظار می‌رود، تعداد مزارع بادی محاسبه شده برای ابتدای بازه از اولین برش آلفا (جدول (۹)) کمتر از تعداد مزارع بادی برای انتهای بازه است (جدول (۱۰)).

جدول (۹): تعداد بهینه واحدهای توان تولیدی در هر گام از مسئله GEP برای توان تولیدی بادی در ابتدای بازه از اولین برش آلفا.

نوع نیروگاه کاندیدا	تعداد نیروگاه‌های انتخاب شده									
	گام ۱	گام ۲	گام ۳	گام ۴	گام ۵	گام ۶	گام ۷	گام ۸	گام ۹	گام ۱۰
نفت	۶	۰	۴	۲	۱	۳	۳	۳	۱	۲
گاز	۴	۴	۹	۳	۲	۲	۴	۱	۵	۴
زغال‌سنگ	۳	۱	۱	۱	۰	۲	۰	۱	۰	۲
هسته‌ای	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۲	۲	۱	۰
بادی	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱

جدول (۱۰): تعداد بهینه واحدهای توان تولیدی در هر گام از مسئله GEP برای توان تولیدی بادی در انتهای بازه از اولین برش آلفا.

نوع نیروگاه کاندیدا	تعداد نیروگاه‌های انتخاب شده									
	گام ۱	گام ۲	گام ۳	گام ۴	گام ۵	گام ۶	گام ۷	گام ۸	گام ۹	گام ۱۰
نفت	۴	۳	۰	۱	۳	۱	۳	۴	۳	۰
گاز	۲	۵	۵	۱۰	۱	۱	۷	۹	۳	۸
زغال‌سنگ	۲	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۲
هسته‌ای	۲	۰	۲	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰
بادی	۱	۵	۲	۳	۱	۱	۳	۱	۲	۱

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

در جدول (۱۰)، هنگامی که توان تولیدی بادی در بیشترین مقدار تولید خود می‌باشد، مزارع بادی می‌توانند با واحدهای تولیدی دیگر رقابت کنند و به همین دلیل تعداد مزارع بادی بیشتری در افق برنامه‌ریزی انتخاب شده است. همچنین، جداول (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که با افزایش ضریب ظرفیت WTGها، تعداد مزارع بادی انتخاب شده در افق برنامه‌ریزی افزایش می‌یابد. قابل توجه است که ضریب ظرفیت WTG در این مطالعه برابر با ٪۲۳/۴ است که با استفاده از رابطه (۲۹) محاسبه شده است:

$$Capacity\ factor = \sum_{i=1}^{K} \rho_i\, p_i \qquad (۲۹)$$

که داده توان تولیدی بادی (p_i) و احتمالات متناظر با آنها (ρ_i) از جدول (۵) گرفته شده است.

نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی مسئله GEP با مدل کردن فازی-احتمالاتی (مبتنی بر در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت) نشان می‌دهد که TC بهینه شده در محدوده‌ای بین $۱۸۰۲۶۸/۹۱M و $۲۰۱۲۹۰/۹۷ تغییر می‌کند که برابر با $۲۱۰۲۲/۰۶M می‌باشد. با کاهش در مقدار توان تولیدی بادی، درصد سهم نیروگاه‌های بادی کاهش و هزینه کل افزایش یافته است به گونه‌ای که میزان سهم نیروگاه‌های بادی از مقدار ٪۱/۶ در بدترین حالت به ٪۱۷/۱ در بهترین حالت می‌رسد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که امکان رخداد هزینه‌ها در محدوده‌ای برابر با ۱۹۲۳۱۲/۷ تا ۱۹۳۲۲۱/۱ برابر با یک می‌باشد که این امکان برای بقیه هزینه‌ها روندی کاهشی دارد که در نهایت به صفر می‌رسد.

۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک مدل جدید فازی-احتمالاتی به منظور مدل کردن نوسانات و عدم قطعیت توان تولیدی بادی در مسئله GEP استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی، نتایج به دست آمده با نتایج مدل در مرجع مورد مطالعه مقایسه شده است. همچنین، سه الگوریتم بهینه‌سازی مختلف شامل GA، GSA و IGSA برای بهینه کردن مدل GEP استفاده و بهترین الگوریتم برای مدل GEP با وجود مدل فازی-احتمالاتی پیشنهادی برای مدل کردن توان تولیدی بادی استفاده شده است. برای مدل کردن توان تولیدی بادی از الگوریتم خوشه‌بندی k-means استفاده شده است که تعداد خوشه‌ها با استفاده از معیار اطلاعات بیزین برابر با ۳ انتخاب شده است. سپس، به هر مرکز خوشه یک عدد فازی اختصاص داده شده و مقدار TC فازی شده با استفاده از روش IGSA محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن نوسانات و عدم قطعیت در توان تولیدی بادی موجب تغییر TC در محدوده‌ای بین $۱۸۰۲۶۸/۹۱M و $۲۰۱۲۹۰/۹۷ می‌گردد. به عبارت دیگر، مدل تغییرات TC برابر با $۲۱۰۲۲/۰۶M را در نظر بگیرد.

برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود تا عدم قطعیت برای تقاضای توان و دیگر واحدهای تولید توان در نظر گرفته شود و تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر مسئله GEP بررسی گردد.

مراجع

[1] Capellán-Pérez, I., et al., Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach. Energy, Vol. **77,** pp. 641-666, 2014.

[2] Billinton, R. and R. Karki, Capacity expansion of small isolated power systems using PV and wind energy. IEEE Transactions on Power Systems,Vol. 16, No , pp. 892-897, 2001.

[3] Gass, V., et al., Economic assessment of wind power uncertainty, World energy congress, 2011.

[4] EIA.http://www.eia.gov/forecasts/ieo/electricity.cfm, 2013.

[۵] صالحی دوبخشری احمد، فتوحی فیروزآباد محمود، "برنامه‌ریزی توسعه واحدهای تولیدی در حضور نیروگاه‌های بادی از نقطه نظر قابلیت اطمینان"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۵، شماره ۱، صفحات ۴۲-۴۹، ۱۳۸۷.

[۶] صادقی هادی، محمدیان محسن، عبدالهی امیر، رشیدی‌نژاد مسعود. برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر و طرح‌های حمایتی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۲، شماره ۱، صفحات :۴۷-۵۸، ۱۳۹۴.

[7] Jinxu, D. and A. Somani. A long-term investment planning model for mixed energy infrastructure integrated with renewable energy. IEEE Green Technologies Conference, 2010.

[8] Zhou, Y., L. Wang, and J.D. McCalley, Designing effective and efficient incentive policies for renewable energy in generation expansion planning. Applied Energy, Vol. 88, No.6, pp. 2201-2209, 2011.

[9] Saboori, H., M. Mohammadi, and R. Taghe. Composite generation and transmission expansion planning considering the impact of wind power penetration. in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2011.

[10] Alizadeh, B. and S. Jadid, A dynamic model for coordination of generation and transmission expansion planning in power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 65**,** pp. 408-418, 2015.

[11] Meza, J.L.C., M.B. Yildirim, and A.S.M. Masud, A multiobjective evolutionary programming algorithm and Its applications to power generation expansion planning. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, Vol. 39, No.5, pp. 1086-1096, 2009.

[12] Wang, H. and T. Nakata, Analysis of the market penetration of clean coal technologies and its impacts in China's electricity sector. Energy Policy, Vol. 37, No. 1, pp. 338-351, 2009.

[13] Kamalinia, S. and M. Shahidehpour, Generation expansion planning in wind-thermal power systems. IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 4, No. 8, pp. 940-951, 2010.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]

[14] Tekiner-Mogulkoc, H., D.W. Coit, and F.A. Felder, Electric power system generation expansion plans considering the impact of smart grid technologies. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 42, No. 1, pp. 229-239, 2012.

[15] Unsihuay-Vila, C., et al., Multistage expansion planning of generation and interconnections with sustainable energy development criteria: A multiobjective model. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33**,** No.2, pp. 258-270, 2011.

[16] Gitizadeh, M., M. Kaji, and J. Aghaei, Risk based multiobjective generation expansion planning considering renewable energy sources. Energy, Vol. 50, pp. 74-82, 2013.

[17] Ozcan, M., S. Ozturk, and M. Yildirim, Turkey's long-term generation expansion planning with the inclusion of renewable-energy sources. Computers & Electrical Engineering, Vol. 40, No. 7, pp. 2050-2061, 2014.

[18] Nagothu, K.S., M. Arroju, and S. Maheswarapu. A novel approach to sustainable Power System Expansion planning with inclusion of Renewable Energy. 7th International IEEE Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013.

[19] Sigrin, B., et al. Representation of the solar capacity value in the ReEDS capacity expansion model. in 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014.

[20] Jin, S., et al., Modeling and solving a large-scale generation expansion planning problem under uncertainty. Energy Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 209-24, 2011.

[21] De Jonghe, C., et al., Determining optimal electricity technology mix with high level of wind power penetration. Applied Energy, Vol. 88, No. 6, p. 2231-2238, 2010.

[22] Kayal, P. and C.K. Chanda, Optimal mix of solar and wind distributed generations considering performance improvement of electrical distribution network. Renewable Energy, Vol. 75, pp. 173-18, 2015.

[23] Gooding, P.A., E. Makram, and R. Hadidi, Probability analysis of distributed generation for island scenarios utilizing Carolinas data. Electric Power Systems Research, Vol. 107, pp. 125-132, 2014.

[24] Kamalinia, S., M. Shahidehpour, and A. Khodaei, Security-constrained expansion planning of fast-response units for wind integration. Electric Power Systems Research,Vol. 81, No. 1, pp. 107-116, 2011

[25] Moeini-Aghtaie, M., A. Abbaspour, and M. Fotuhi-Firuzabad, Incorporating Large-Scale Distant Wind Farms in Probabilistic Transmission Expansion Planning 2014;Part II: Case Studies. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 1594-1601, 2012

[26] Hu, Q., et al., Feasibility-based inexact fuzzy programming for electric power generation systems planning under dual uncertainties. Applied Energy, Vol. 88, No. 12, pp. 4642-465, 2011.

[27] Sumaili, J., et al. Finding representative wind power scenarios and their probabilities for stochastic models. 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011.

[28] Ruey-Hsun, L. and L. Jian-Hao, A fuzzy-optimization approach for generation scheduling with wind and solar energy systems. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, pp. 1665-1674, 2007.

[29] Widén, J., et al., Variability assessment and forecasting of renewables: A review for solar, wind, wave and tidal resources. Renewable and Sustainable Energy Reviews,.Vol. 44, pp. 356-375, 2015.

[30] Jadidoleslam, M., et al., Application of shuffled frog leaping algorithm to long term generation expansion planning, International Journal of Computer and Electrical Engineering, pp. 115-120, 2012.

[31] Park, J.-B., et al., An improved genetic algorithm for generation expansion planning. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 916-922, 2000.

[32] IAEA (International Atomic Energy Agency), Wien automatic system planning (WASP) package a computer code for power generating system expansion planning 2001: Vienna.

[33] Cole, G.M., Surveyor reference manual. fifth ed. 2009: Professional publications Inc. (PPI).

[34] Giorsetto, P. and K.F. Utsurogi, Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102(1): pp. 134-143, 1983.

[35] http://www.usbr.gov/pn/agrimet/webagdayread.html. 2014.

[36] Hatamlou, A., S. Abdullah, and H. Nezamabadi-pour, A combined approach for clustering based on K-means and gravitational search algorithms. Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 47-52, 2012.

[37] Kass, R.E. and L. Wasserman, A reference Bayesian test for nested hypotheses and its relationship to the Schwarz criterion. Journal of the American Statistical Association, Vol. 90, No. 431, pp. 928-934, 1995.

[38] Qinpei, Z., X. Mantao, and P. Franti. Knee point detection on Bayesian information criterion. IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). 2008.

[39] Nirmala, G. and R.Anju, Decision making of conducting remedial classes for weak students through fuzzy ingredients. International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 3, No. 6, pp. 1-3, 2013.

[40] Rashedi, E., H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, GSA: A Gravitational Search Algorithm .Information Sciences, Vol 179, No. 13, pp. 2232-2248, 2009.

[41] Rashedi, E., H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, BGSA: binary gravitational search algorithm. Natural Computing, Vol. 9, No. 3, pp. 727-745, 2010.

[42] Li, C. and J. Zhou, Parameters identification of hydraulic turbine governing system using improved gravitational search algorithm. Energy Conversion and Management,Vol. 52, No. 1, pp. 374-38, 2011.

[43] EIA. http://www.eia.gov/forecasts/capitalcost/. 2011.

[44] Antunes, C.H., A.G. Martins, and I.S. Brito, A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning. Energy, Vol. 29, No. 4, pp. 613-627, 2004.

زیرنویس‌ها

[1] Generation expansion planning
[2] Weibull probability distribution
[3] Genetic algorithm
[4] Gravitational search algorithm

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

[5] Improved gravitational search algorithm
[6] Bayesian information criterion
[7] Total cost
[8] Investment cost
[9] Operating and maintenance cost
[10] Energy not served cost
[11] Salvage cost
[12] Forced outage rate
[13] Sinking fund depreciation
[14] Loss of load probability
[15] Dispatch
[16] Shuffled frog-leaping

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-16]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.9.1]