

برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با

استفاده از الگوریتم ABC

مرتضی جدیدالاسلام زیدآبادی^{۱*}، اکبر ابراهیمی^۲

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

m.jadidoleslam@ec.iut.ac.ir

^۲ استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

ebrahimi@cc.iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه منابع (IRP) با استفاده از نوعی مدل بهینه‌سازی با حداقل هزینه، مدل‌سازی شده است. در این مدل، تابع هدف مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری منابع سمت تولید و همچنین هزینه اجرای برنامه‌های مدیریت بار است. قابلیت اطمینان سیستم، با استفاده از شاخص‌های مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده (EENS) و احتمال تأمین‌نشدن بار (LOLP)، برآورد و تأمین شده است. برای این منظور، هزینه‌های خروج اجباری واحدها، با استفاده از هزینه انرژی تأمین‌نشده به تابع هدف اضافه گردیده و LOLP به‌عنوان قید مسئله برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است. به‌منظور حل مسئله از الگوریتم تکاملی کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC) بهره گرفته شده است. برنامه‌ریزی یکپارچه منابع در یک سیستم قدرت نمونه و برای افسق‌های برنامه‌ریزی میان‌مدت و نیز بلندمدت (که باعث افزایش ابعاد مسئله و نزدیک شدن به شرایط واقعی می‌گردد) انجام گرفته است. مسئله IRP، توسط الگوریتم ژنتیک (GA)، به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های متداول، نیز حل و جواب‌های به‌دست‌آمده با ABC مقایسه شده است. مقایسه انجام‌شده نشان می‌دهد که عملکرد و کیفیت جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ABC، در هر دو حالت، بهتر از الگوریتم ژنتیک است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکاملی کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)، برنامه‌ریزی توسعه تولید، برنامه‌ریزی یکپارچه منابع (IRP)،

قابلیت اطمینان سیستم قدرت، مدیریت سمت تقاضا (DSM).

1. مقدمه

برنامه‌ریزی توسعه تولید¹ (GEP)، تعیین نوع، ظرفیت، زمان و مکان نصب واحدهای تولیدی جدیدی است که بایستی در یک افق زمانی بلندمدت، به سیستم موجود اضافه شوند تا ضمن تأمین تقاضای بار پیش‌بینی شده با کمترین هزینه، معیارهای قابلیت اطمینان سیستم نیز برآورده گردند [1]. برنامه‌ریزی توسعه تولید یکی از مسائل مهم و استراتژیک در هر کشور است. از آنجایی که تقاضای بار پیوسته در حال افزایش است، یک خطای کوچک در این برنامه‌ریزی، می‌تواند باعث اتلاف هزینه‌های گزاف، علاوه بر تبعات اجتماعی ناشی از عدم تأمین تقاضای بار گردد [2]. در این میان، صنعت برق گزینه‌های دیگری از جمله برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا² (DSM) را در اختیار دارد و از طریق آن‌ها و با اعمال مدیریت صحیح در مصرف، می‌تواند در هزینه‌های سیستم قدرت صرفه‌جویی مؤثری به عمل آورد؛ برای مثال، با اعمال مدیریت بار، می‌توان راندمان اقتصادی استفاده از منابع تولید انرژی الکتریکی را افزایش داد. در این حالت با روش‌های مختلف، الگوی مصرف تغییر داده می‌شود. مثلاً با تخصیص قیمت کمتر برق به ساعات غیر اوج بار، مصرف‌کنندگان به کاهش مصرف برق در ساعات پیک ترغیب می‌شوند و به این ترتیب، هزینه تولید کاهش می‌یابد. همچنین با بالا بردن راندمان وسایل مورد استفاده مصرف‌کنندگان، می‌توان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. استفاده از این گونه برنامه‌های مدیریتی توأم با برنامه‌ریزی، برای احداث نیروگاه‌های جدید، برنامه توسعه اقتصادی تری را فراهم می‌آورد. این نحوه برنامه‌ریزی توسعه تولید، برنامه‌ریزی یکپارچه منابع³ (IRP) نامیده می‌شود.

تمایز اصلی میان IRP و برنامه‌ریزی متداول توسعه تولید، توجه به برنامه‌های DSM در برنامه‌ریزی توسعه است [3]. IRP برخلاف روش سنتی که فقط منابع سمت تولید را مد نظر قرار می‌دهد، چارچوبی برای ارزیابی هم‌تراز منابع سمت تولید و برنامه‌های مدیریت مصرف را فراهم می‌آورد. در IRP تأکید اصلی بر تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز، از ارزان‌ترین منابع است؛ از این رو، تکنیک‌های مدیریت مصرف در زمینه‌های مدیریت بار و بهره‌وری انرژی را می‌توان به‌عنوان منابع کاندیدا تلقی کرد و ظرفیت‌های ناشی از اعمال این تکنیک‌ها را همپای گزینه‌های سمت تولید در برنامه‌ریزی به‌کار گرفت. علاوه بر این، مباحثی همچون دیدگاه‌های زیست‌محیطی و نیز ریسک‌ها و عدم قطعیت‌ها را می‌توان در IRP مد نظر قرار داد.

مقالات مختلفی در زمینه برنامه‌ریزی توسعه تولید وجود دارند [4]-

[9]: با وجود این، تعداد کمی از این مقالات به بحث برنامه‌ریزی یکپارچه منابع پرداخته‌اند [10-14]. در مرجع [4]، یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط با اعداد صحیح (MILP)، برای حل مسئله GEP متمرکز ارائه شده و به‌منظور لحاظ نمودن برنامه تعمیرات واحدها، شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی یک‌ماهه انجام شده است. در مرجع [5]، یک روش دو سطحی برای حل مسئله GEP در محیط بازار برق، با در نظر گرفتن مزارع بادی و قابلیت اطمینان سیستم قدرت، ارائه شده است. در مرجع [6]، مسئله GEP به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی مقید مدل‌سازی شده و با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده SFL به حل آن پرداخته شده است. در مرجع [7]، یک مدل ریاضی مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی برای برنامه‌ریزی هم‌زمان توسعه تولید و بازنشستگی واحدهای تولیدی ارائه شده است. مسئله برنامه‌ریزی مرکب توسعه تولید و انتقال با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده در مرجع [8] مورد توجه قرار گرفته است. مرور مقالات مختلف در زمینه برنامه‌ریزی توسعه تولید در مرجع [9] انجام شده و کارهای انجام‌شده از جنبه‌های مختلف، همچون مدل و روش حل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در مرجع [10]، نویسندگان یک مدل مرکب برنامه‌ریزی خطی و اعداد صحیح برای ترکیب گزینه‌های مدیریت سمت تقاضا (DSM) و منابع تولید ارائه کرده‌اند. در مرجع [11]، یک مدل IRP با در نظر گرفتن تأثیرات زیست‌محیطی در تولید انرژی الکتریکی ارائه شده است. روند پیشرفت IRP در مرجع [12]، مرور گردیده و چگونگی ترکیب عوامل زیست‌محیطی در مدل‌های IRP نشان داده شده است. در مرجع [13]، اهمیت مدیریت سمت تقاضا به‌عنوان فرصتی برای صرفه‌جویی در هزینه‌های سیستم قدرت مطرح شده است. در مرجع [14]، اهمیت لحاظ کردن پتانسیل برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی تولید، به‌منظور ارزیابی سیاست‌های بلندمدت انرژی نشان داده شده است. برای این منظور، مسئله برنامه‌ریزی تولید به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی قطعی، مدل شده است.

در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه منابع به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی غیرخطی، پویا، گسسته و مقید مدل‌سازی شده است. تابع هدف در نظر گرفته‌شده شامل چهار مؤلفه اصلی است که عبارت‌اند از: 1. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث واحدهای جدید؛ 2. هزینه بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و متغیر واحدهای تولید توان؛ 3. هزینه خروج واحدها (هزینه انرژی تأمین‌نشده)؛ 4. هزینه اجرای طرح‌های مدیریت بار. قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از شاخص‌های مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده⁴ (EENS) و احتمال

1. Generation Expansion Planning
2. Demand Side Management
3. Integrated Resource Planning

4. Expected Energy Not Served

۲. مدل سازی مسئله برنامه ریزی یکپارچه منابع

۱.۲. تابع هدف

تابع هدف در نظر گرفته شده برای ارزیابی طرح های مختلف توسعه، به صورت رابطه (۱) است. این تابع از مؤلفه های اصلی هزینه سرمایه گذاری اولیه، برای احداث واحدهای جدید، هزینه بهره برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و متغیر واحدهای تولیدی، هزینه خروج واحدها (یا هزینه انرژی تأمین نشده) و همچنین، هزینه اجرای طرح های مدیریت بار تشکیل شده است.

$$C = \sum_{t=1}^T \{ \bar{I}(U_t) + \bar{M}(X_t) + \bar{O}(X_t) + \bar{L}(D_t) - \bar{S}(U_t) \} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، X_t بردار حالت ظرفیت سیستم است و می توان آن

را به صورت رابطه زیر نشان داد:

$$X_t = X_{t-1} + U_t \quad (2)$$

علامت خط فوقانی متغیرها در رابطه (۱)، به معنی مقادیر هزینه ها

با در نظر گرفتن نرخ بهره i نسبت به تاریخ مرجع محاسبات است.

به منظور مقایسه طرح های توسعه مختلف، از مقدار ارزش کنونی

هزینه ها استفاده شده است [۲۳]. از این رو، برای محاسبه مؤلفه های

هزینه در رابطه (۱)، فرض شده که کل سرمایه گذاری لازم برای

احداث یک نیروگاه، در ابتدای هر مرحله برنامه ریزی انجام شده باشد

و نیروگاه وارد مدار گردد. هزینه های بهره برداری و تعمیرات و

نگهداری شامل هزینه های ثابت و متغیر و همچنین، هزینه اجرای

طرح های مدیریت بار، در وسط هر سال از افق برنامه ریزی فرض شده

است. ارزش بازاریابی هزینه های سرمایه گذاری به صورت بستانکاری

است و در انتهای دوره برنامه ریزی محاسبه می شود. مؤلفه های مختلف

تابع هزینه رابطه (۱) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\bar{I}(U_t) = (1+i)^{-t} \times \sum_{k=1}^N [CI_k \times U_{t,k}] \quad (3)$$

$$\bar{M}(X_t) = \sum_{y=0}^{s-1} [(1+i)^{-(t+0.5+y)}]$$

$$\times \sum_{k=1}^N [FOM_k \times X_{t,k} + VOM_k \times G_{t,k}] \quad (4)$$

$$\bar{O}(X_t) = \sum_{y=0}^{s-1} [(1+i)^{-(t+0.5+y)} \times EENS_t \times CEENS] \quad (5)$$

$$\bar{L}(D_t) = \sum_{y=0}^{s-1} [(1+i)^{-(t+0.5+y)} \times D_{t,l} \times CD_l] \quad (6)$$

عدم تأمین بار^۱ (LOLP) برآورد می شود. به منظور محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان و همچنین، مقدار انتظاری انرژی تولیدی واحدها در هریک از سال های برنامه ریزی، از شبیه سازی احتمالاتی تولید^۲ و روش تابع انرژی معادل^۳، بهره گرفته شده است.

الگوریتم تکاملی کلونی زنبورهای مصنوعی^۴ (ABC) یکی از روش های نوین بهینه سازی مبتنی بر جمعیت اولیه است که از شیوه جست و جوی گروهی از زنبورها که به دنبال غذا هستند، الهام می گیرد [۱۵]. این الگوریتم با اتخاذ یک مکانیزم موزون و انعطاف پذیر به منظور تطبیق فرایندهای جست و جوی محلی و فرامحلی، توانایی و بازده بالایی در حل مسائل با ابعاد بزرگ و پیچیده را داراست [۱۶]. الگوریتم ABC را اولین بار، کارابوگا در سال ۲۰۰۵ ارائه کرد [۱۵] و از آن پس، مورد توجه محققان علوم مختلف قرار گرفت. اخیراً ABC به عنوان روشی مؤثر، کاربردهای موفقیت آمیزی در حل مسائل مختلف سیستم قدرت داشته است. در این میان، می توان به استفاده از ABC در حل مسئله پخش بار بهینه [۱۷]، تعیین ظرفیت بهینه و بهترین محل قرارگیری منابع پراکنده در سیستم های توزیع [۱۸] و طراحی پایدار ساز سیستم قدرت (PSS) [۱۹] اشاره کرد.

در این مقاله، با توجه به مزایای ذکر شده برای الگوریتم ABC و با در نظر گرفتن طبیعت مسئله IRP (ابعاد زیاد، خاصیت غیرخطی شدید و پیچیدگی زیاد)، به منظور حل این مسئله، از الگوریتم ABC استفاده شده است.

تاکنون توانایی الگوریتم ژنتیک^۵ (GA) در حل مسئله برنامه ریزی توسعه تولید و رسیدن به جواب های خوب و نزدیک به بهینه سراسری، در مقالات متعددی نشان داده شده است که برای نمونه می توان به مراجع [۲۰-۲۲] اشاره کرد. لذا به منظور مقایسه نتایج به دست آمده و فراهم سازی مبنایی برای سنجش چگونگی عملکرد و میزان کارایی روش پیشنهادی، جواب های به دست آمده از الگوریتم ABC با نتایج حاصل از GA مقایسه شده است.

روند ارائه مطالب در این مقاله به صورت زیر است:

در بخش دوم، نحوه مدل سازی و فرمول بندی مسئله برنامه ریزی یکپارچه منابع آورده شده است. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی و نحوه پیاده سازی آن روی مسئله، به ترتیب در بخش های سوم و چهارم تشریح شده اند. بخش پنجم به شبیه سازی ها و ارائه نتایج می پردازد و در نهایت، جمع بندی و نتیجه گیری در بخش ششم ارائه شده است.

1. Loss of Load Probability
2. Probabilistic Production Simulation
3. Equivalent Energy Function Method
4. Artificial Bee Colony
5. Genetic Algorithm

CEENS هزینه انرژی تأمین نشده، (\$/MWh)؛

$\delta_{k,t}$ ضریب ارزش بازیافتی واحد نوع k که در سال t ام به سیستم موجود اضافه شده است.

برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان LOLP و EENS و همچنین، محاسبه مقدار انتظاری انرژی تولیدی واحدها در هر یک از سال‌های برنامه‌ریزی، از شبیه‌سازی احتمالاتی تولید و روش تابع انرژی معادل [۲] استفاده شده است. در شبیه‌سازی سیستم تولید، نرخ خروج واحدها در منحنی تداوم بار تأثیر داده می‌شود و واحدها براساس اولویت اقتصادی، به ترتیب تأمین بار را بر عهده می‌گیرند؛ بنابراین، تخمین مقدار انرژی تولیدی این واحدها و محاسبه هزینه سوخت مصرفی، براساس شرایط واقعی بهره‌برداری صورت می‌گیرد. به منظور انجام شبیه‌سازی احتمالاتی تولید و محاسبه شاخص‌های LOLP و EENS، به منحنی تداوم بار (یا معکوس آن) نیاز است. در اینجا از تقریب تکه‌ای-خطی^۱ برای معکوس منحنی تداوم بار استفاده شده است.

۲.۲. قیود

الف. حداکثر ظرفیت قابل ساخت واحدها: ممکن است برخی دلایل فنی، اقتصادی و اجرایی در هر مرحله برنامه‌ریزی، اجازه ساخت بیشتر از یک ظرفیت مشخص از یک نوع واحد را ندهند. در این میان، تصمیم‌گیرندگان بایستی چنین محدودیت‌هایی را در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر بگیرند. محدودیت مذکور، با استفاده از رابطه زیر در مدل پیشنهادی، در نظر گرفته شده است:

$$0 \leq U_t \leq U_{max,t}, \forall t \quad (9)$$

بردار U_t نشان‌دهنده واحدهای جدیدی است که در مرحله t ام طرح توسعه، به سیستم اضافه می‌شوند و بردار $U_{max,t}$ حداکثر ظرفیت ساخت واحدها در مرحله t ام برنامه‌ریزی است.

ب. حاشیه رزرو سیستم: به علت وجود عدم قطعیت بالا در پیش‌بینی تقاضای بار بلندمدت و به منظور کارکرد مطمئن سیستم قدرت، همواره یک مقدار حاشیه رزرو برای ظرفیت نصب‌شده واحدها در نظر گرفته می‌شود تا مشکلی از نظر تأمین تقاضای بار به وجود نیاید. از طرف دیگر، نصب بیش از حد واحدها باعث افزایش هزینه‌های سیستم قدرت می‌گردد. در برنامه‌ریزی توسعه تولید برای رفع این مشکل، حدود بالا و پایین برای حاشیه رزرو سیستم در نظر گرفته می‌شود [۲۱ و ۲۴].

در صورتی که $\sum_{k=1}^N X_{t,k}$ کل ظرفیت نصب‌شده در مرحله t ام، شامل واحدهای موجود و جدید باشد و PD_t حداکثر تقاضای بار

$$\bar{S}(U_t) = (1+i)^{-T'} \times \sum_{k=1}^N [\delta_{k,t} \times CI_k \times U_{t,k}] \quad (7)$$

که در آن:

$$t' = t_0 + s \times (t-1), T' = t_0 + s \times T \quad (8)$$

می‌باشد و I هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه (تجهیزات، هزینه‌های نصب نیروگاه و...);

M هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری ثابت و هزینه‌های بهره‌برداری متغیر (هزینه سوخت مصرفی)؛

O هزینه خروج واحدها (هزینه انرژی تأمین نشده)؛

L هزینه اجرای طرح‌های مدیریت بار؛

S ارزش بازیافتی هزینه‌های سرمایه‌گذاری؛

U_t بردار افزایش ظرفیت سیستم در مرحله t ام، شامل همه انواع واحدهای کاندیدا برای اضافه‌شدن به سیستم موجود (MW)؛

X_t بردار تجمعی ظرفیت سیستم در مرحله t ام شامل همه انواع واحدهای موجود و کاندیدا برحسب (MW)؛

D_t بردار طرح‌های مدیریت سمت تقاضا؛

i نرخ بهره؛

t مرحله برنامه‌ریزی، $t=1,2,\dots,T$ (هر مرحله برنامه‌ریزی می‌تواند شامل یک یا چند سال باشد)؛

T طول دوره مورد مطالعه بر حسب تعداد مراحل؛

s تعداد سال‌های هر مرحله برنامه‌ریزی؛

t_0 تعداد مراحل بین سال مبنای محاسبات و مرحله اول برنامه‌ریزی؛

CI_k هزینه سرمایه‌گذاری واحد نوع k ام، (\$/MW)؛

$U_{t,k}$ ظرفیت واحدهای کاندیدا از نوع k ، در مرحله t ام، (MW)؛

N تعداد واحدهای کاندیدا از انواع مختلف؛

y متغیر مورد استفاده برای نشان دادن اینکه هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری واحدها در وسط هر کدام از سال‌های برنامه‌ریزی محاسبه می‌شود؛

FOM_k هزینه ثابت بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری واحد نوع k ، (\$/MW)

$X_{t,k}$ ظرفیت تجمعی واحدهای نوع k در مرحله t ام، (MW)؛

VOM_k هزینه متغیر بهره‌برداری و تعمیرات و نگهداری واحد نوع k ، (\$/MWh)

$G_{t,k}$ میزان انرژی تولیدی واحدهای نوع k در مرحله t (MWh)؛

$D_{t,l}$ میزان توان مصرفی کاهش‌یافته در اثر اجرای برنامه مدیریت بار l در مرحله t ام، (MW)؛

CD_l هزینه اجرای برنامه مدیریت بار l ، (\$)؛

$EENS_t$ مقدار انتظاری انرژی تأمین‌نشده در مرحله t ام، (MWh)؛

مرحله t ام، آنگاه هر طرح توسعه قابل قبول، بایستی قید زیر را در هر یک از مراحل برنامه‌ریزی برآورده سازد:

$$PD_t + R_{\min} \leq \sum_{k=1}^N X_{t,k} \leq PD_t + R_{\max}, \forall t \quad (10)$$

به عبارت ساده‌تر، تفاضل ظرفیت نصب‌شده و حداکثر تقاضای بار در مرحله t ام، بایستی بین حداقل و حداکثر حاشیه رزرو، یعنی به ترتیب R_{\min} و R_{\max} قرار داشته باشد.

پ. نرخ ترکیب سوخت: در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید، انواع مختلف واحدهای تولیدی که از سوخت‌های مختلفی مانند نفت کوره، گاز طبیعی، زغال‌سنگ و سوخت هسته‌ای استفاده می‌کنند، وجود دارند. با استفاده از قید نرخ ترکیب سوخت، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با در نظر گرفتن منابع سوخت در دسترس، ترکیب تولید سیستم را به گونه‌ای انتخاب کنند که ریسک وابستگی به یک نوع سوخت کاهش یابد. با توجه به توضیحات فوق، قید نرخ ترکیب سوخت به صورت زیر، در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید در نظر گرفته شده که واحدهای کاندیدا به همراه واحدهای موجود بایستی آن را برآورده کنند:

$$M_{\min}^j \leq \frac{X_{t,j}}{\sum_{k=1}^N X_{t,k}} \leq M_{\max}^j, \forall j, t \quad (11)$$

که در آن:

M_{\min}^j نرخ ترکیب سوخت مینیمم مربوط به واحد نوع j ام؛
 M_{\max}^j نرخ ترکیب سوخت ماکزیمم مربوط به واحد نوع j ام؛
 j نوع واحدها برحسب نوع سوخت (نفت کوره، گاز طبیعی، زغال‌سنگ، هسته‌ای) و $j=1,2,\dots,N$ می‌باشد.

ت. معیار قابلیت اطمینان: معیار قابلیت اطمینان احتمال عدم تأمین بار (LOLP) یکی از شاخص‌های مهم و متداول در ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم تولید است که با توجه به قوانین و استانداردهای مورد پذیرش در هر کشور، باید رعایت گردد؛ بنابراین، با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان در مدل برنامه‌ریزی توسعه تولید، استانداردهای در نظر گرفته شده، در طرح توسعه آتی سیستم تولید، رعایت می‌گردد. برای این منظور، واحدهای انتخاب‌شده به همراه واحدهای موجود باید معیار LOLP زیر را برآورده کنند:

$$LOLP(X_t) \leq \varepsilon, \forall t \quad (12)$$

که در آن، ε استاندارد قابلیت اطمینان برای حداکثر مقدار مجاز LOLP است.

۳. الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)

الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی (ABC)، یک الگوریتم بهینه‌سازی

مبتنی بر شبیه‌سازی رفتار جمعی زنبورهای عسل در حین جست‌وجوی غذاست [۲۵]. این الگوریتم را نخستین بار، کارابوگا در سال ۲۰۰۵ ارائه کرد و به منظور بهینه‌سازی در یک مسئله، با پارامترهای حقیقی مورد استفاده قرار گرفت [۱۵].

در کلونی زنبورها در طبیعت، وظایف مشخصی وجود دارد که توسط افراد متخصص انجام می‌گیرد. هدف این زنبورهای متخصص، بیشینه‌کردن میزان شهد ذخیره‌شده در کندو می‌باشد. مدل پایه‌ای هوش جمعی زنبورهای عسل، که الگوریتم ABC از آن استفاده می‌کند، از سه نوع زنبور تشکیل شده است: زنبورهای کارگر، زنبورهای دیده‌ور و زنبورهای پیش‌آهنگ. زنبورهای کارگر فقط با منبع غذایی که در حال حاضر، مشغول استخراج شهد از آن می‌باشند، در ارتباط‌اند. به علاوه این زنبورها اطلاعاتی نظیر فاصله، جهت و میزان سودبخشی منبع را با خود حمل می‌کنند و در کندو، این اطلاعات را با دیگران به اشتراک می‌گذارند. زنبورهای دیده‌ور در کندو منتظر رسیدن اطلاعات از سوی کارگرها هستند و بر مبنای این اطلاعات، درباره بهره‌برداری از یک منبع غذایی تصمیم‌گیری می‌کنند. پیش‌آهنگ‌ها به صورت تصادفی، محیط پیرامون را به منظور یافتن منبع غذایی جدید جست‌وجو می‌کنند. گام‌های اصلی الگوریتم ABC که رفتار فوق را شبیه‌سازی می‌کند، به صورت زیر است:

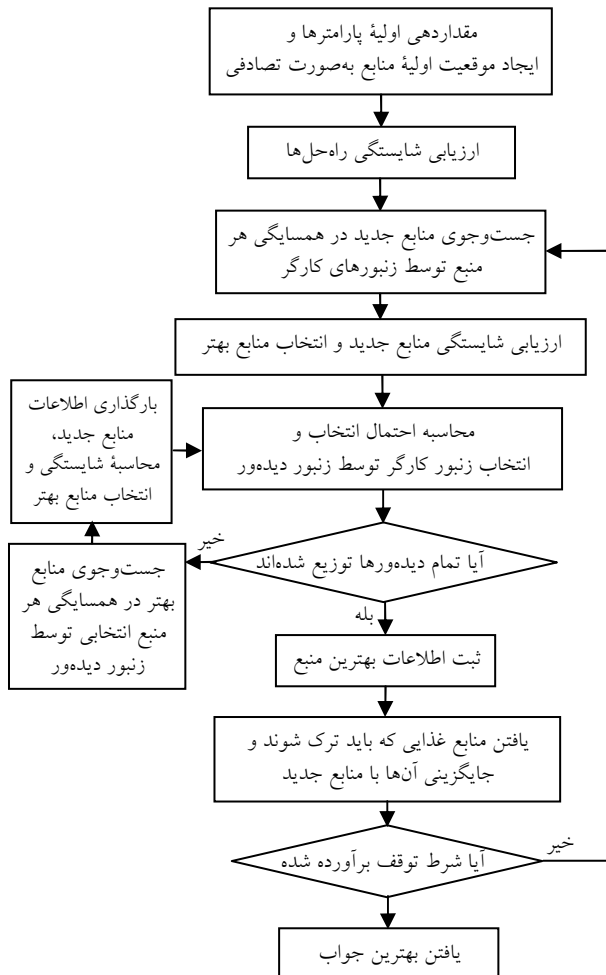
۱. مقداردهی اولیه به موقعیت منابع غذایی.
 ۲. هر زنبور کارگر یک منبع غذایی جدید در همسایگی منبع غذایی خود ایجاد کرده و از منبع بهتر، بهره‌برداری می‌کند.
 ۳. هر زنبور دیده‌ور یک منبع را براساس کیفیت آن انتخاب کرده، یک منبع غذایی جدید در همسایگی منبع انتخاب‌شده ایجاد می‌کند و از منبع بهتر بهره‌برداری می‌کند.
 ۴. منبعی که باید ترک شود، مشخص می‌گردد و زنبور کارگر مربوط به آن، به عنوان زنبور پیش‌آهنگ، به جست‌وجوی منابع غذایی جدید می‌پردازد.
 ۵. بهترین منبع غذایی پیدا شده تا این مرحله ذخیره می‌شود.
 ۶. گام‌های ۲ تا ۵ تا برآورده شدن معیار توقف تکرار می‌شوند.
- در اولین گام از الگوریتم، راه حل‌های $x_i (i=1, \dots, SN)$ به صورت تصادفی تولید می‌شوند که در آن، SN تعداد منابع غذایی است. در گام دوم، برای هر یک از زنبورهای کارگر که تعداد آن‌ها برابر نصف تعداد منابع غذایی است، یک منبع غذایی جدید توسط رابطه زیر ایجاد می‌شود:

$$v_{ij} = x_{ij} + \varphi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (13)$$

که در آن، φ_{ij} یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[-1, 1]$ و

برنامه‌ریزی توسعه تولید با در نظر گرفتن برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا با استفاده از الگوریتم ABC

واحدهای از نوع k و همچنین، اجرا یا عدم اجرای برنامه مدیریت سمت تقاضای l در مراحل مختلف برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد؛ برای مثال، اعداد ۲، ۳، ۰، ۵، ۱ و ۳ که در شکل (۲) با رنگ تیره نشان داده شده‌اند، تعداد واحدهای از نوع ۱ را که باید به ترتیب، در مراحل اول تا هفتم برنامه‌ریزی به سیستم اضافه شوند، نشان می‌دهند.



شکل (۱): فلوچارت الگوریتم ABC

برنامه‌های DSM		واحدهای کاندیدا		
D_2	D_1	...	نوع ۲	نوع ۱
۰۱۰۱۰۱۱	۱۱۰۰۱۱۰	...	۱۴۰۱۳۰۲	۳۱۵۰۰۳۲

۰۱۰۱۰۱۱۱۱۰۰۱۱۰ ... ۱۴۰۱۳۰۲۳۱۵۰۰۳۲

شکل (۲): ساختار یک رشته نوعی

۱.۴. جمعیت اولیه

در این مرحله، جمعیت اولیه‌ای از جواب‌ها به صورت تصادفی تولید می‌شود، به گونه‌ای که قید حداکثر ظرفیت ساخت برای هر نوع از واحدهای کاندیدا، یعنی قید (۹) برآورده شود. به عبارت دیگر، برای هر قسمت از رشته کدبندی شده، تعداد واحدهای از نوع مربوط در هر سال

$j=1, \dots, D$ ابعاد مسئله را نشان می‌دهد. k نشان‌دهنده راه‌حلی است که به صورت تصادفی، از میان جمعیت انتخاب می‌گردد و با استفاده از رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$k = [rand \times SN] + 1 \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، [] نشان دهنده جزء صحیح است. پس از ایجاد \vec{v}_i ، این راه‌حل جدید با راه قبلی یعنی \vec{x}_i مقایسه می‌شود و زنبور کارگر به بهره‌برداری از راه‌حل بهتر می‌پردازد. در گام سوم، یکی از زنبورهای دیده‌ور با احتمال به دست آمده از رابطه (۱۵)، یک منبع غذایی را انتخاب کرده و با استفاده از رابطه (۱۳) یک منبع غذایی جدید ایجاد می‌کند. مشابه عمل زنبور کارگر، در اینجا نیز منبع بهتر برای بهره‌برداری انتخاب می‌شود.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (15)$$

که در آن، fit_i میزان شایستگی جواب \vec{x}_i است. پس از پخش شدن تمامی زنبورهای دیده‌ور در میان منابع، بررسی می‌شود که بهره‌برداری از کدام منبع غذایی باید متوقف شده و منبع ترک شود. اگر تعداد تکرارهایی که در آن، میزان شایستگی یک منبع بهبود پیدا نکرده، از یک مقدار از پیش تعیین شده (*limit*) بیشتر شود، آن منبع رها می‌شود. زنبور کارگر مربوط به منبع غذایی رها شده تبدیل به یک زنبور پیش‌آهنگ شده و با استفاده از رابطه (۱۶) به جست‌وجوی در فضای جواب می‌پردازد [۲۶].

$$x_{ij} = x_j^{\min} + (x_j^{\max} - x_j^{\min}) * rand \quad (16)$$

که در آن، $rand$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰، ۱] است. فلوچارت مربوط به این الگوریتم در شکل (۱)، نشان داده شده است.

۴. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید استفاده از مقادیر صحیح، برای کدبندی متغیرهای تصمیم‌گیری مرسوم است. اگرچه بردار حالت X_t و بردار تصمیم‌گیری U_t در مدل مسئله رابطه (۱)، از جنس مگاوات هستند؛ اما می‌توان آن‌ها را تبدیل به بردارهایی کرد که در بردارنده اطلاعاتی درباره تعداد واحدها در هر نوع نیروگاه باشند. استفاده از این روش نگاشت ساده در کاربرد الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، از جمله ABC و GA، به منظور کدبندی رشته‌ها (جواب‌های مسئله) و اعمال قید (۹) بسیار مفید است. شکل (۲) ساختار یک رشته نوعی را برای یک سیستم با پنج نوع واحد کاندیدا، دو نوع برنامه مدیریت سمت تقاضا و دوره برنامه‌ریزی هفت مرحله‌ای نشان می‌دهد. در اینجا هر المان رشته، متناظر با یک زیررشته است که تعداد

(۱۸)، fit_{max} و fit_{min} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم، مقدار شایستگی در یک نسل و $fit'(n)$ مقدار شایستگی اصلاح شده رشته n است.

۵. نتایج شبیه سازی

۱.۵. سیستم نمونه

به منظور انجام شبیه سازی ها و همچنین، مقایسه الگوریتم ABC و GA که در محیط برنامه نویسی نرم افزار متلب کدنویسی شده اند، از یک سیستم نمونه استفاده شده است. مشخصات این سیستم که از مرجع [۲۱] گرفته شده و مراجع دیگری همچون [۲۴، ۲۷ و ۲۸] نیز از آن برای آزمایش روش پیشنهادی خود بهره گرفته اند، در ادامه تشریح شده است.

این سیستم شامل ۵ نوع واحد کاندیدا برای اضافه شدن به سیستم موجود شامل واحدهای ۲۰۰ مگاواتی با سوخت نفت کوره، واحدهای ۴۵۰ مگاواتی گازسوز، واحدهای ۵۰۰ مگاواتی با سوخت زغال سنگ و دو نوع واحد هسته ای با ظرفیت های ۷۰۰ و ۱۰۰۰ مگاوات است. همچنین، سیستم مذکور دارای ۱۵ واحد موجود از انواع گفته شده با ظرفیت های مختلف است. لازم به توضیح است که به منظور در نظر گرفتن برنامه های مدیریت سمت تقاضا، مشخصات برنامه های مربوط نیز به این سیستم نمونه اضافه شده است. داده های مربوط به بار پیش بینی شده و همچنین برنامه های مدیریت سمت تقاضا، به ترتیب در جدول (۱) و جدول (۲) نشان داده شده اند. سایر مشخصات سیستم فوق، شامل داده های فنی و اقتصادی مربوط به واحدهای موجود و کاندیدا برای اضافه شدن به سیستم، در بخش ضمایم آورده شده است.

جدول (۱): پیک تقاضای بار پیش بینی شده

مرحله (سال)	پیک بار (MW)	مرحله (سال)	پیک بار (MW)
(۲۰۱۲) ۰	۵۰۰۰	(۲۰۲۶) ۷	۱۵۰۰۰
(۲۰۱۴) ۱	۷۰۰۰	(۲۰۲۸) ۸	۱۷۰۰۰
(۲۰۱۶) ۲	۹۰۰۰	(۲۰۳۰) ۹	۱۸۰۰۰
(۲۰۱۸) ۳	۱۰۰۰۰	(۲۰۳۲) ۱۰	۲۰۰۰۰
(۲۰۲۰) ۴	۱۲۰۰۰	(۲۰۳۴) ۱۱	۲۲۰۰۰
(۲۰۲۲) ۵	۱۳۰۰۰	(۲۰۳۶) ۱۲	۲۴۰۰۰
(۲۰۲۴) ۶	۱۴۰۰۰	-	-

جدول (۲): برنامه های مدیریت سمت تقاضا

برنامه های مدیریت سمت تقاضا	میزان توان مصرفی کاهش یافته در اثر اجرای برنامه (MW)	هزینه اجرای برنامه های DSM (میلیون دلار)
D ₁	۴۰	۰/۴۹
D ₂	۱۵	۰/۳۱

برنامه ریزی، به صورت یک عدد تصادفی، با احتمال یکنواخت در بازه $[0, U_{max}]$ انتخاب می شوند که U_{max} بردار حداکثر تعداد واحدهای کاندیدا از انواع مختلف است.

۲.۴. اعمال قیود و ارزیابی راه حل ها

تابع برازندگی که برای ارزیابی میزان شایستگی هریک از اعضای جمعیت (جواب های مسئله) مورد استفاده قرار گرفته از مجموع هزینه کل طرح توسعه که از تابع هزینه رابطه (۱) محاسبه می گردد و هزینه ای که به صورت جریمه برای انحراف از قیود مسئله در نظر گرفته شده، تشکیل شده است. قبل از ارزیابی شایستگی جواب ها، برای همه راه حل های مسئله قیود حاشیه زرو و نرخ ترکیب سوخت یعنی روابط (۱۰) و (۱۱)، مورد بررسی قرار می گیرند. در صورتی که رشته ای از قیود مذکور انحراف پیدا کرده باشد، تنها آن بخش از رشته مورد نظر که این قیود را در مرحله λ نقض کرده باشد، به صورت تصادفی تغییر می یابد تا اینکه قیود مذکور برآورده گردند. از روش تابع جریمه نیز برای اعمال قید قابلیت اطمینان رابطه (۱۲) استفاده شده است. بنابراین تابع جریمه برای n امین رشته به صورت زیر خواهد بود:

$$Penalty(n) = \begin{cases} p \times O(X_t) & LOLP > \varepsilon \\ 0 & oth. \end{cases} \quad (17)$$

در رابطه فوق، $O(x_t)$ هزینه انرژی تأمین نشده طبق رابطه (۵) است. ضریب جریمه p یک عدد بزرگ انتخاب می گردد تا میزان شایستگی جواب هایی که قید LOLP را نقض کرده اند، کاهش چشمگیری یافته و بنابراین، به صورت خودکار از جمعیت جدید حذف شوند.

با توجه به توضیحات فوق، مقدار شایستگی رشته n ام با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

$$fit(n) = \begin{cases} \frac{\alpha}{C(n)+1} & if \ n \ is \ feasible \\ \frac{\alpha}{C(n)+Penalty(n)} & oth \end{cases} \quad (18)$$

که در آن α یک عدد ثابت و $C(n)$ تابع هدف رابطه (۱) است. استفاده از نگاشت ساده ای که در ابتدای بخش ۴ توضیح داده شد، گاهی سبب همگرایی زودرس و تکثیر رشته ها در یک جمعیت می شود. علت این امر غالب شدن رشته های با مقادیر شایستگی زیاد در جمعیت است. به منظور بهبود این مشکل، از تابع برازندگی اصلاح شده زیر که مقدار شایستگی رشته ها را به صورت یک عدد حقیقی بین [۰ و ۱] نرمالیزه می کند، استفاده شده است:

$$fit'(n) = \frac{fit(n) - fit_{min}}{fit_{max} - fit_{min}} \quad (19)$$

که در آن، $fit(n)$ مقدار شایستگی رشته n ام با استفاده از رابطه

۲.۵. پارامترهای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع

در انجام مطالعات برنامه‌ریزی یکپارچه منابع برای سیستم نمونه، پارامترهای مدل (۱) - (۱۲)، به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند. این مقادیر با توجه به مطالعات انجام گرفته در مراجع [۲۱، ۲۴ و ۲۷] انتخاب شده‌اند.

نرخ بهره (i) ، برابر ۸/۵ درصد، حدود بالا و پایین حاشیه رزرو رابطه (۱۰)، به ترتیب ۲۰ درصد و ۵۰ درصد پیک بار در نظر گرفته شده‌اند. حدود بالا و پایین نرخ ترکیب ظرفیت (نرخ ترکیب سوخت) رابطه (۱۱)، برای نیروگاه‌های با سوخت نفت کوره صفر تا ۳۰ درصد، نیروگاه‌های با سوخت LNG صفر تا ۴۰ درصد، نیروگاه‌های با سوخت زغال سنگ صفر تا ۶۰ درصد و برای نیروگاه‌های هسته‌ای ۳۰ تا ۶۰ درصد انتخاب شده‌اند. مقدار هزینه انرژی تأمین نشده ۰/۰۵ دلار بر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.

در حال حاضر، استاندارد کشورهای مختلف برای شاخص LOLP، مقداری بین ۰/۱ تا ۶ روز در سال است [۲۸]. به طور معمول، در مطالعاتی که مقدار استاندارد مربوط وجود ندارد، مقدار یک روز در سال مقدار مناسبی است [۲۸ و ۲۹]؛ بنابراین، معیار قابلیت اطمینان LOLP در رابطه (۱۲)، برابر یک روز در سال یعنی ۰/۲۷ درصد در نظر گرفته شده است. به منظور محاسبه ضریب ارزش بازایافتی هزینه سرمایه‌گذاری واحدها در رابطه (۷)، از روش وجوه استهلاکی [۲۳] استفاده شده است.

۳.۵. برنامه‌ریزی میان مدت

در این حالت، مطالعات برنامه‌ریزی یکپارچه منابع برای یک افق برنامه‌ریزی ۱۴ ساله در سیستم نمونه انجام گرفته است. افق برنامه‌ریزی به مراحل دو ساله تقسیم شده است [۲۱ و ۲۴]؛ بنابراین، تعداد مراحل برنامه‌ریزی ۷ مرحله خواهد بود. تعداد سال‌های میان سال انجام مطالعات و سال شروع برنامه‌ریزی (t_0) ، ۲ سال در نظر گرفته شده است. در این حالت، برای حل مسئله و یافتن جواب بهینه، از کدنویسی و شبیه‌سازی به روش‌های ABC و GA استفاده شده است.

به منظور تعیین پارامترهای الگوریتم ABC، قبل از حل مسئله، آزمایش‌های متعددی انجام و با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر مناسب برای پارامترهای این الگوریتم به دست آمده است. این مقادیر در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. پارامترهای الگوریتم ژنتیک نیز، به صورت تجربی و با انجام آزمایش‌های متعدد به دست آمده‌اند. مقادیر انتخاب شده در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. به منظور ایجاد شرایط یکسان در ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها، تعداد جمعیت و تعداد تکرارها در هر دو الگوریتم، یکسان در نظر گرفته شده است.

به دلیل ماهیت تصادفی الگوریتم‌های ABC و GA، در هر بار اجرای این الگوریتم‌ها ممکن است جواب متفاوتی به دست آید. از این رو، به منظور انجام مقایسه بهتر، هر کدام از این الگوریتم‌ها ده مرتبه اجرا شده و بهترین جواب از میان جواب‌های به دست آمده انتخاب شده است. جدول (۴) جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های ABC و GA برای بهترین طرح توسعه در دو حالت با حضور و عدم حضور برنامه‌های DSM را نشان می‌دهد.

جدول (۳): پارامترهای انتخابی برای الگوریتم‌های ABC و GA

مقادیر		پارامترها
GA	ABC	
۱۰۰	۱۰۰	اندازه جمعیت (تعداد منابع غذایی)
۵۰۰	۵۰۰	تعداد تکرارها
-	۵۰	limit
۰/۰۱ - ۰/۹	-	احتمال ترکیب، احتمال جهش
۰/۲	-	تعداد رشته‌های نخبه

جدول (۴): هزینه‌های مختلف طرح‌های توسعه بهینه به دست آمده از الگوریتم‌های ABC و GA در حالت اول

الگوریتم حل	هزینه کل طرح توسعه (میلیون دلار)		هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (میلیون دلار)	
	با حضور برنامه‌های DSM	بدون حضور برنامه‌های DSM	با حضور برنامه‌های DSM	بدون حضور برنامه‌های DSM
ABC	۱۴۷۴۴/۸۷	۱۴۸۰۹/۲۳	۸۹۰۷/۷۳	۹۴۸۹/۶۸
GA	۱۴۷۹۰/۰۹	۱۴۸۲۶/۰۱	۹۲۸۳/۶۲	۹۳۴۹/۸۷

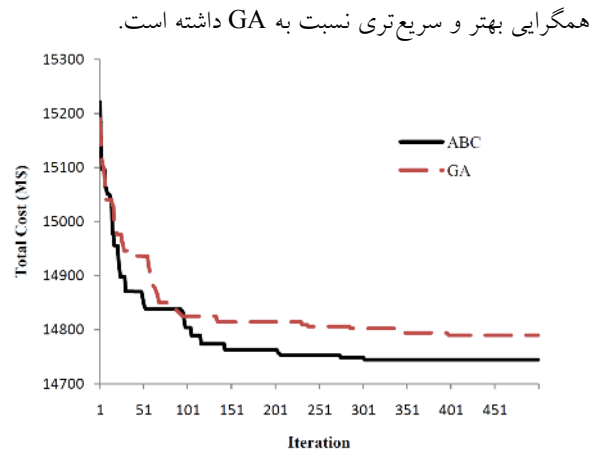
مقایسه جواب‌های به دست آمده در زمان‌های اجرای تقریباً برابر، نشان می‌دهد که عملکرد، دقت و نرخ موفقیت الگوریتم ABC در هر دو حالت، بهتر از GA بوده است. همچنین ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن برنامه‌های DSM در برنامه‌ریزی توسعه تولید، از سرمایه‌گذاری اضافی برای احداث واحدهای جدید جلوگیری شده و باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های توسعه سیستم تولید گردیده است. مقایسه کمی جواب‌ها نشان می‌دهد که هزینه طرح توسعه به دست آمده با استفاده از الگوریتم ABC در حالتی که برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده، نسبت به حالتی که در نظر گرفته نشده، ۰/۴۳ درصد و درباره الگوریتم GA، ۰/۲۴ درصد کاهش یافته است. از آنجایی که طرح‌های برنامه‌ریزی توسعه تولید با مقادیر بزرگ سرمایه‌گذاری همراه‌اند، یک بهبود کوچک در هزینه‌های طرح می‌تواند منجر به صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های شرکت برق شود. مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. مقایسه مشخصه‌های همگرایی نشان می‌دهد که الگوریتم ABC،

برنامه‌های DSM نشان می‌دهند. همان‌طور که از جداول (۵) و (۶) ملاحظه می‌شود، با کاهش ظرفیت نصب‌شده جدید در اثر اعمال برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی توسعه تولید، ضمن کاهش هزینه‌ها، نه تنها وضعیت شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم بدتر نشده که در حالت کلی، باعث بهبود این شاخص‌ها نیز شده است.

۴.۵. برنامه‌ریزی بلندمدت

زمانی که مسئله با K نوع واحد کاندید، l برنامه DSM و T مرحله برنامه‌ریزی در نظر گرفته می‌شود، اگر محدودیت حداکثر تعداد ساخت واحدهای جدید به صورت بردار $U_{max} = [u_1, u_2, \dots, u_k]$ باشد، تعداد ترکیبات ممکن از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$No. of Combinations = (u_1 + 1)^T \times (u_2 + 1)^T \times \dots \times (u_k + 1)^T \times (2)^{T \times l} \quad (20)$$



شکل (۳): مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در حالت اول و با حضور برنامه‌های DSM

جدول (۵) و جدول (۶) جواب‌های به دست آمده از حل مسئله توسط الگوریتم‌های ABC و GA را به ترتیب، با حضور و در غیاب

جدول (۵): طرح توسعه بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های ABC و GA در حالت اول (با حضور برنامه‌های DSM)

شاخص LOLP (درصد)	شاخص EENS (MWh)	تعداد واحدهای طرح توسعه از هر نوع																مراحل برنامه‌ریزی
		برنامه‌های DSM				PHWR (700MW)		PWR (1000MW)		Coal (500MW)		LNG (450MW)		Oil (200MW)				
		D ₂ (15 MW)		D ₁ (45 MW)		GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	
۰/۱۵	۰/۲۵	۴۶۸۳	۷۸۷۳	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۳	۲	۱	۰	مرحله ۱
۰/۱۸	۰/۲۳	۶۰۷۶	۸۰۸۳	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۲	۴	۲	مرحله ۲
۰/۲۵	۰/۲۳	۹۰۶۸	۸۱۶۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۳	مرحله ۳
۰/۲۱	۰/۲۱	۷۷۲۵	۸۰۸۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۳	۲	مرحله ۴
۰/۲۰	۰/۲۲	۸۰۱۰	۸۴۵۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۳	مرحله ۵
۰/۲۰	۰/۲۱	۸۱۱۹	۸۳۰۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	مرحله ۶
۰/۲۳	۰/۲۲	۹۵۱۶	۸۷۳۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۰	۰	۳	مرحله ۷
*۰/۲۰	*۰/۲۲	۵۳۱۹۷	۵۷۶۸۰	-	-	-	-	۲	۱	۳	۳	۸	۷	۶	۷	۱۰	۱۴	مجموع مراحل

* سطر آخر مربوط به شاخص LOLP بیانگر میانگین LOLP در افق برنامه‌ریزی است.

جدول (۶): طرح توسعه بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های ABC و GA در حالت اول (بدون حضور برنامه‌های DSM)

شاخص LOLP (درصد)	شاخص EENS (MWh)	تعداد واحدهای طرح توسعه از هر نوع												مراحل برنامه‌ریزی
		PHWR (700MW)		PWR (1000MW)		Coal (500MW)		LNG (450MW)		Oil (200MW)				
		GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC			
۰/۱۶	۰/۱۸	۴۶۰۸	۵۵۱۳	۲	۱	۰	۱	۲	۲	۳	۳	۲	۱	مرحله ۱
۰/۲۵	۰/۲۶	۸۵۸۲	۹۳۲۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	مرحله ۲
۰/۲۴	۰/۲۵	۸۴۱۷	۹۲۱۰	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳	۲	مرحله ۳
۰/۲۳	۰/۱۹	۸۶۵۳	۷۲۴۱	۱	۰	۱	۰	۰	۳	۱	۲	۱	۰	مرحله ۴
۰/۲۱	۰/۱۹	۸۲۳۵	۷۴۹۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	مرحله ۵
۰/۲۱	۰/۲۷	۸۴۴۰	۱۱۰۰۵	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	مرحله ۶
۰/۲۰	۰/۲۵	۸۰۳۶	۱۰۴۳۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	مرحله ۷
*۰/۲۱	*۰/۲۳	۵۴۹۷۱	۶۰۲۱۱	۳	۳	۳	۳	۶	۷	۷	۷	۱۰	۷	مجموع مراحل

* سطر آخر مربوط به شاخص LOLP بیانگر میانگین LOLP در افق برنامه‌ریزی است.

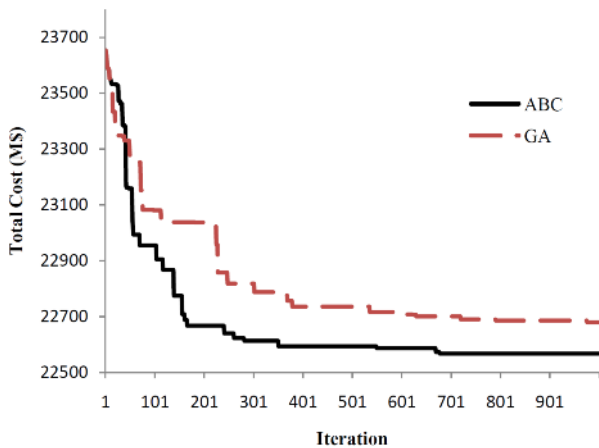
جدول (۷): هزینه‌های مختلف طرح‌های توسعه به دست آمده از

الگوریتم‌های ABC و GA در حالت دوم

الگوریتم حل	هزینه کل طرح توسعه (میلیون دلار)		هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (میلیون دلار)	
	با حضور برنامه‌های DSM	بدون حضور برنامه‌های DSM	با حضور برنامه‌های DSM	بدون حضور برنامه‌های DSM
ABC	۲۲۵۶۷/۲۵	۲۲۶۹۷/۶۳	۱۱۳۰۶/۶۱	۱۱۴۳۴/۶۶
GA	۲۲۶۷۹/۹۳	۲۲۷۰۸/۱۱	۱۱۵۹۶/۵۰	۱۱۸۲۳/۳۲

هزینه طرح توسعه به دست آمده با استفاده از الگوریتم ABC در حالتی که برنامه‌های DSM در برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده، نسبت به حالت بدون حضور DSM، ۵۸٪ درصد و درباره الگوریتم GA، ۱۳٪ درصد کاهش یافته است. این موضوع با توجه به هزینه بالای طرح‌های توسعه، باعث ایجاد صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سیستم می‌شود.

مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. مقایسه مشخصه‌های همگرایی در این حالت نشان می‌دهد که الگوریتم ABC همگرایی بهتر و سریع‌تری نسبت به GA داشته است.



شکل (۴): مشخصه همگرایی الگوریتم‌ها در حالت دوم و با حضور برنامه‌های DSM

جدول‌های (۸) و (۹) جواب‌های به دست آمده از حل مسئله توسط الگوریتم‌های ABC و GA با افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساله را به ترتیب با حضور و عدم حضور برنامه‌های DSM نشان می‌دهند.

برای مثال، اگر بردار حداکثر تعداد ساخت واحدها، $U_{max} = [5, 4, 3, 3, 3]$ باشد و ۲ برنامه DSM وجود داشته باشد، در حالت اول با ۷ مرحله برنامه‌ریزی (۱۴ سال) تعداد حالات برابر $1/5759 \times 10^{27}$ خواهد بود و در حالت دوم، با ۱۲ مرحله برنامه‌ریزی (۲۴ سال) برابر $4/2105 \times 10^{46}$ حالت می‌شود. البته تعداد زیادی از این ترکیبات، محدودیت‌های مسئله را برآورده نمی‌کنند. با این حال، هنوز هم تعداد ترکیبات شدنی مخصوصاً در مسائل برنامه‌ریزی با افق زمانی بلندمدت و تعداد واحدهای کاندیدای زیاد، یعنی در یک سیستم قدرت واقعی بسیار زیاد است. از این رو، استفاده از روشی که در یک مدت زمان معقول بتواند به یک جواب قابل قبول و مطلوب دست یابد، ضروری است.

در اینجا، به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم ABC پیشنهادی در حل مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید با ابعاد بزرگ، مسئله برای یک افق برنامه‌ریزی ۲۴ ساله (۱۲ مرحله) حل شده است [۲۴ و ۲۱]. سایر پارامترهای مدل (۱) - (۱۲)، همانند حالت اول در نظر گرفته شده‌اند. پارامترهای ABC همان پارامترهای جدول (۳) هستند و تنها تعداد تکرارها به ۱۰۰۰ تکرار افزایش پیدا کرده است. به منظور ایجاد شرایط مقایسه یکسان، تعداد تکرارهای الگوریتم GA نیز به ۱۰۰۰ تکرار افزایش پیدا کرده است. سایر پارامترهای GA همانند جدول (۳) در نظر گرفته شده‌اند.

در این حالت نیز هر کدام از الگوریتم‌ها، ده مرتبه اجرا شده‌اند و بهترین جواب از میان جواب‌های به دست آمده انتخاب شده است. جدول (۷) جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های ABC و GA برای طرح توسعه بهینه در دو حالت، با حضور و عدم حضور برنامه‌های DSM را نشان می‌دهد. مقایسه جواب‌های به دست آمده در این حالت نشان می‌دهد که نسبت به حالت با افق برنامه‌ریزی دوازده ساله، عملکرد، دقت و کیفیت جواب‌های به دست آمده از الگوریتم ABC خیلی بهتر از GA بوده است. در واقع، با زیاد شدن ابعاد مسئله، عملکرد بهتر این الگوریتم نسبت به GA، نمایان‌تر شده است.

جدول (۸): طرح توسعه بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های ABC و GA در حالت دوم (با حضور برنامه‌های DSM)

شاخص LOLP (درصد)		شاخص EENS (MWh)		تعداد واحدهای طرح توسعه از هر نوع												مراحل برنامه‌ریزی		
				DSM های برنامه‌های				PHWR (700MW)		PWR (1000MW)		Coal (500MW)		LNG (450MW)			Oil (200MW)	
				D ₂ (15 MW)		D ₁ (45 MW)		GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC		GA	ABC
۰/۱۳	۰/۲۱	۳۹۳۵	۶۵۰۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۲	۱	۲	۱	۲	۲	۳	۵	مرحله ۱
۰/۱۵	۰/۱۷	۵۰۸۵	۴۷۶۵	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۳	۲	۱	۰	۱	مرحله ۲
۰/۲۳	۰/۲۱	۸۱۶۲	۷۲۶۸	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۰	مرحله ۳
۰/۱۹	۰/۱۳	۷۲۴۰	۴۸۲۳	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۳	مرحله ۴
۰/۱۷	۰/۱۴	۶۲۵۰	۵۱۲۳	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۲	مرحله ۵
۰/۱۸	۰/۱۱	۶۸۱۹	۴۰۵۳	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۳	۲	۰	۱	۰	مرحله ۶
۰/۱۳	۰/۱۶	۴۸۲۷	۶۲۲۴	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	مرحله ۷
۰/۰۷	۰/۱۰	۲۸۵۲	۲۷۶۵	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۰	۲	۳	۲	مرحله ۸
۰/۰۸	۰/۱۲	۳۵۱۲	۴۸۰۸	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۱	۰	۲	مرحله ۹
۰/۰۷	۰/۱۴	۳۱۹۹	۶۲۰۲	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	مرحله ۱۰
۰/۱۰	۰/۱۷	۴۰۸	۷۳۴۵	۰	۰	۱	۱	۲	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۳	مرحله ۱۱
۰/۰۹	۰/۱۹	۴۳۳۹	۹۶۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۲	۱	مرحله ۱۲
*۰/۱۳	*۰/۱۵	۵۶۶۲۸	۶۹۵۰۱	-	-	-	-	۶	۴	۴	۶	۱۳	۱۰	۱۳	۱۲	۱۶	۲۱	مجموع مراحل

* سطر آخر مربوط به شاخص LOLP بیانگر میانگین LOLP در افق برنامه‌ریزی است.

جدول (۹): طرح توسعه بهینه به دست آمده با استفاده از الگوریتم‌های ABC و GA در حالت دوم (بدون حضور برنامه‌های DSM)

شاخص LOLP (درصد)		شاخص EENS (MWh)		تعداد واحدهای طرح توسعه از هر نوع												مراحل برنامه‌ریزی	
				PHWR (700MW)		PWR (1000MW)		Coal (500MW)		LNG (450MW)		Oil (200MW)					
				GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC	GA	ABC		
۰/۲۳	۰/۱۸	۷۰۲۱	۵۶۵۲	۲	۱	۰	۱	۳	۲	۲	۲	۱	۳	۱	۳	۱	مرحله ۱
۰/۱۶	۰/۱۰	۵۴۱۷	۳۱۵۴	۰	۱	۲	۰	۰	۱	۱	۳	۱	۰	۰	۰	۰	مرحله ۲
۰/۲۳	۰/۲۷	۸۴۵۲	۹۳۴۹	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۳	۱	۳	مرحله ۳
۰/۱۳	۰/۲۲	۴۷۷۰	۸۰۹۴	۰	۱	۰	۰	۲	۲	۳	۰	۱	۳	۰	۱	۳	مرحله ۴
۰/۱۱	۰/۲۱	۴۱۴۵	۷۷۶۹	۰	۰	۰	۰	۲	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	مرحله ۵
۰/۱۲	۰/۰۹	۴۳۹۹	۳۱۰۷	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۲	۰	۱	۰	۱	۰	۰	مرحله ۶
۰/۱۷	۰/۲۰	۶۶۱۳	۷۸۵۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۱	۲	۱	۱	مرحله ۷
۰/۲۵	۰/۱۸	۱۰۶۰۷	۷۵۱۷	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۴	۳	۳	۳	مرحله ۸
۰/۲۴	۰/۱۸	۱۰۱۷۴	۷۴۷۷	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۳	۰	۳	۳	مرحله ۹
۰/۱۴	۰/۱۶	۵۹۵۹	۶۶۷۸	۰	۰	۱	۰	۲	۲	۱	۳	۱	۰	۰	۰	۰	مرحله ۱۰
۰/۱۸	۰/۱۰	۸۱۴۷	۴۶۷۸	۲	۰	۰	۲	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	مرحله ۱۱
۰/۱۶	۰/۱۲	۷۶۵۵	۵۴۵۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۰	۰	۰	مرحله ۱۲
*۰/۱۸	*۰/۱۷	۸۳۳۵۹	۷۶۷۷۶	۷	۶	۴	۴	۱۱	۱۲	۱۳	۱۳	۱۶	۱۸	۱۶	۱۸	۱۸	مجموع مراحل

* سطر آخر مربوط به شاخص LOLP بیانگر میانگین LOLP در افق برنامه‌ریزی است.

۶. نتیجه گیری

یک مسئله بهینه‌سازی مدل گردید که در آن، تابع هدف، کمینه‌کردن مجموع کل هزینه‌های برنامه‌ریزی، شامل هزینه اجرای طرح‌های

در این مقاله، برنامه‌ریزی یکپارچه منابع در سیستم قدرت، به صورت

همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در نظر گرفتن برنامه‌های مدیریت سمت تقاضا در برنامه‌ریزی توسعه تولید، نه تنها باعث جلوگیری از سرمایه‌گذاری‌های غیر ضروری و در نتیجه، کاهش هزینه‌های کلی طرح توسعه سیستم تولید می‌شود، بلکه باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم نیز می‌گردد.

ضمایم

الف. مشخصات سیستم نمونه

داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای موجود در سیستم نمونه در جدول (الف-۱) نشان داده شده‌اند. همچنین جدول (الف-۲) داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای کاندیدا را برای سیستم مذکور نشان می‌دهد.

مدیریت بار است. در حل مسئله، قابلیت اطمینان با استفاده از شاخص‌های EENS و LOLP برآورد و تأمین شد. شاخص EENS توسط هزینه انرژی تأمین نشده در تابع هدف لحاظ گردید و LOLP به عنوان قید مسئله برنامه‌ریزی در نظر گرفته شد.

برای حل مسئله، الگوریتم ABC پیشنهاد شد. جهت ارزیابی روش پیشنهادی، برنامه‌ریزی توسعه تولید در یک سیستم قدرت نمونه و برای افق‌های برنامه‌ریزی چهارده ساله و نیز ۲۴ ساله (که باعث افزایش ابعاد مسئله و نزدیک شدن به شرایط واقعی می‌گردد)، انجام گرفت. مسئله برنامه‌ریزی توسعه تولید توسط الگوریتم ژنتیک (به عنوان یکی از موفق‌ترین روش‌های متداول) نیز حل گردید و جواب‌های به دست آمده با ABC مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه انجام شده نشان می‌دهد که عملکرد، کیفیت جواب به دست آمده و همچنین نرخ موفقیت الگوریتم ABC در هر دو حالت بهتر از الگوریتم GA است. این برتری خصوصاً در حالت دوم یعنی جایی که مطالعات در یک افق ۲۴ ساله انجام شد، نمایان‌تر است.

جدول (الف-۱): داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای موجود [۲۱]

نام نیروگاه	نوع سوخت	تعداد واحدها	ظرفیت واحدها (MW)	نرخ خروج اجباری (درصد)	هزینه بهره‌برداری (\$/kWh)	هزینه‌های ثابت تعمیرات و نگهداری (\$/kW-mon)
Oil #1	Heavy Oil	۱	۲۰۰	۷/۰	۰/۰۲۴	۲/۲۵
Oil #2	Heavy Oil	۱	۲۰۰	۶/۸	۰/۰۲۷	۲/۲۵
Oil #3	Heavy Oil	۱	۱۵۰	۶/۰	۰/۰۳۰	۲/۱۳
LNG G/T #1	LNG	۳	۵۰	۳/۰	۰/۰۴۳	۴/۵۲
LNG G/T #2	LNG	۱	۴۰۰	۱۰/۰	۰/۰۳۸	۱/۶۳
LNG G/T #3	LNG	۱	۴۰۰	۱۰/۰	۰/۰۴۰	۱/۶۳
LNG G/T #4	LNG	۱	۴۵۰	۱۱/۰	۰/۰۳۵	۲/۰۰
Coal #1	Anthracite	۲	۲۵۰	۱۵/۰	۰/۰۲۳	۶/۶۵
Coal #2	Bituminous	۱	۵۰۰	۹/۰	۰/۰۱۹	۲/۸۱
Coal #3	Bituminous	۱	۵۰۰	۸/۵	۰/۰۱۵	۲/۸۱
Nuclear #1	PWR	۱	۱۰۰۰	۹/۰	۰/۰۰۵	۴/۹۴
Nuclear #2	PWR	۱	۱۰۰۰	۸/۸	۰/۰۰۵	۴/۶۳

جدول (الف-۲): داده‌های فنی و اقتصادی واحدهای کاندیدا [۲۱]

نوع واحدهای کاندیدا	حداکثر تعداد ساخت	ظرفیت (MW)	نرخ خروج اجباری (درصد)	هزینه بهره‌برداری (\$/kWh)	هزینه‌های ثابت تعمیرات و نگهداری (\$/kW-mon)	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (\$/kW)	طول عمر (سال)
Oil	۵	۲۰۰	۷/۰	۰/۰۲۱	۲/۲۰	۸۱۲/۵	۲۵
LNG C/C	۴	۴۵۰	۱۰/۰	۰/۰۳۵	۰/۹۰	۵۰۰/۰	۲۵
Coal (Bit.)	۳	۵۰۰	۹/۵	۰/۰۱۴	۲/۷۵	۱۰۶۲/۵	۲۵
Nuc. (PWR)	۳	۱۰۰۰	۹/۰	۰/۰۰۴	۴/۶۰	۱۶۲۵/۰	۲۵
Nuc. (PHWR)	۳	۷۰۰	۷/۰	۰/۰۰۳	۵/۵۰	۱۷۵۰/۰	۲۵

- [1] Ceciliano-Meza, J. L., Yildirim, M. B., "A Multiobjective Evolutionary Programming Algorithm and Its Applications to Power Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol. 39, No. 5, 2009.
- [2] Wang, X., and McDonald, J. R., *Modern Power System Planning*, MCGRAW-HILL Publication, 1994.
- [3] Wang, C. H., and Min, K. J., "An Integrated Resource Planning Model for Utilities with Quantified Outage Costs", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 8, pp. 517-524, 1998.
- [4] Bakirtzis, G.A., Biskas, P. N., Chatziathanasiou, V., "Generation Expansion Planning by MILP Considering Mid-term Scheduling Decisions", Electric Power Systems Research, Vol. 86, pp. 98-112, 2012.
- [5] Hemmati, R., Hooshmand, R.A., Khodabakhshian, A., "Reliability Constrained Generation Expansion Planning with Consideration of Wind Farms Uncertainties in Deregulated Electricity Market", Energy Conversion and Management, Vol. 76, pp. 517-526, 2013.
- [6] Jadidoleslam, M., Ebrahimi, A., "Reliability Constrained Generation Expansion Planning by a Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 743-751, 2015.
- [7] Tohidi, Y., Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., "Generation Expansion and Retirement Planning Based on the Stochastic Programming", Electric Power Systems Research, Vol. 104, pp. 138-45, 2013.
- [8] Rouhani, A., Hosseini, S.H., Raoofat, M., "Composite Generation and Transmission Expansion Planning Considering Distributed Generation", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 62, pp. 792-805, 2014.
- [9] Hemmati, R., Hooshmand, R.A., Khodabakhshian, A., "Comprehensive Review of Generation and Transmission Expansion Planning", IET Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 7, No. 9, pp. 955-64, 2013.
- [10] Hobbs, B. F., "Optimization Methods for Electric Utility Resource Planning", European Journal of Operational Research, Vol. 83, pp. 1-20, 1995.
- [11] Hobbs, B. F., Centolella, P., "Environmental Policies and Their Effects on Utility Planning and Operations" Energy, Vol. 20, No. 4, pp. 255-271, 1995.
- [12] Hirst, E., Goldman, C., "Creating the Future: Integrated Resource Planning for Electric Utilities", Annual Review Energy Environment, Vol. 16, p. 91-121, 1991.
- [13] Fotuhi-Firuzabad, M., Billinton, R., "Impact of Load Management on Composite System Reliability Evaluation Short-Term Operating Benefits", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 858-864, 2000.
- [14] GuChoi, D., Thomas, V.M., "An Electricity Generation Planning Model Incorporating Demand Response", Energy Policy, Vol. 42, pp. 429-441, 2012.
- [15] Karaboga, D., "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [16] Sabat, S. L., Udgata, S. K., Abraham, A., "Artificial Bee Colony Algorithm for Small Signal Model Parameter Extraction of MESFET", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, No. 5, pp. 689-694, 2010.
- [17] Sumpavakup, C., Srikun, I., Chusanapitutt, s., "A Solution to the Optimal Power Flow Using Artificial Bee Colony Algorithm", International Conference on Power System Technology, 2010.
- [18] Abu-Mouti, F. S., El-Hawary, M. E., "Modified Artificial Bee Colony Algorithm for Optimal Distributed Generation Sizing and Allocation in Distribution Systems", IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009.
- [19] Abedinia, O., Wynn, B., Ghasemi, A., "Robust Fuzzy PSS Design Using ABC", International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2011.
- [20] Fukuyama, Y., Chiang, H. D., "A Parallel Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 955-961, 1996.
- [21] Park, J. B., Park, Y. M., Won, J. R., Lee, K. Y., "An Improved Genetic Algorithm for Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 916-922, 2000.
- [22] Firmo, H. T., Legey, L. F. L., "Generation Expansion Planning: An Iterative Genetic Algorithm Approach", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 901-906, 2002.
- [23] International Atomic Energy Agency: Wien Automatic System Planning (WASP) package: A Computer Code for Power Generating System Expansion Planning, version WASP-IV user's manual, IAEA, Vienna, 2006.
- [24] Kannan, S., Slochanal, S.M.R., Padhy, N. P., "Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 466-475, 2005.

- [25] Karaboga, D., Akay, B., "A Comparative Study of Artificial Bee Colony Algorithm", Applied Mathematics and Computation, Vol. 214, No. 1, pp. 108-132, 2009.
- [26] Karaboga, D., Akay, B., "Artificial Bee Colony (ABC), Harmony Search and Bees Algorithms on Numerical Optimization", Proceedings of IPROMS Innovative Production Machines and System Virtual Conference, 2009.
- [27] Kannan, S., Baskar, S., McCalley, J. D., Murugan, P., "Application of NSGA-II Algorithm to Generation Expansion Planning", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 454-461, 2009.
- [28] Liu, Y., Yan, W., "The Study and Application of Power Plant Planning based on Evolutionary Programming", Power and Energy Engineering Conference, (APPEEC), 2009.
- [29] The European Union's CARDS programme for the Balkan region, Volume 3: Generation and Transmission Main Report, December 2004.