

برنامه‌ریزی توسعه پویای شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید دو سطحی

مسعود احمدی گرجی^{۱*} و نیما امجدی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: شبکه توزیع، برنامه‌ریزی توسعه پویا، تولید پراکنده، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم اجتماع ذرات.</p>	<p>در این مقاله یک مدل پویا (زمان محور) جهت طرح برنامه‌ریزی توسعه سالانه شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن امکان استفاده از فناوری‌های تولید پراکنده انرژی الکتریکی ارائه گردیده است. مدل پیشنهادی، مکان، ظرفیت و زمان مناسب استفاده از فناوری‌های تولید پراکنده و همچنین برنامه زمانی افزایش ظرفیت خطوط شبکه را مشخص می‌کند. تابع هدف مدل پیشنهادی شامل مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری در طول یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. جهت حل مساله معرفی شده از یک روش حل دو سطحی حاصل از ترکیب الگوریتم باینری و تقویت شده رقابت استعماری و الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات استفاده گردیده است. بطوریکه در سطح اول این روش حل، هزینه سرمایه‌گذاری طرح به کمک الگوریتم رقابت استعماری باینری و تقویت شده بهینه گردیده و در سطح دوم، الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات، هزینه بهره‌برداری متناظر را بهینه می‌سازد. در نهایت، مدل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع نمونه پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل از آن از طریق مقایسه با نتایج دیگر روشهای حل دو سطحی مورد تحلیل قرار گرفته است.</p>

علائم و اختصارات	شمارنده‌ها
D_l زمان تداوم سطح بار l از منحنی تداوم بار	l شمارنده سطح بار l از منحنی تداوم بار
DRC ظرفیت ذخیره DG (MW)	t شمارنده سال t از افق برنامه‌ریزی
IC_{dg} هزینه سرمایه‌گذاری DG (\$/MW)	ثوابت
CR_i هزینه افزایش ظرفیت خط تغذیه‌کننده باس i (\$)	N_b تعداد باس‌های بار شبکه توزیع
C_{om} هزینه بهره‌برداری DG (\$/MWh)	N_B تعداد کل باس‌های شبکه توزیع
PP_{il} توان اکتیو خریداری شده از شبکه بالادست در سطح بار l از سال t (MW)	N_y تعداد سال‌های افق برنامه‌ریزی
QP_{il} توان راکتیو تزریقی از شبکه بالادست در سطح بار l از سال t (MVAR)	N_l تعداد سطوح بار در منحنی تداوم بار
SD_{il} بار شبکه در سطح بار l از سال t (MW)	
EEP_{il} قیمت انرژی الکتریکی در سطح بار l از سال	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m_ahmadigorji@students.semnan.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

SP_i^{it}	سرعت ذره i در تکرار it	$(\$/MWh) t$	
Pb_i^{it}	بهترین خاطره شخصی ذره i تا تکرار it	GP_{it}	توان اکتیو تولیدی DG در باس i ، سطح بار l و سال t (MW)
Gb^{it}	بهترین عضو جمعیت تا تکرار it	GQ_{it}	توان راکتیو تولیدی DG در باس i ، سطح بار l و سال t (MVAR)
ϕ_1	ضریب وزنی بهترین عضو جمعیت	PL_{it}	تلفات شبکه در سطح بار l از سال t (MW)
ϕ_2	ضریب وزنی بهترین خاطره شخصی	V_{it}	ولتاژ باس i در سطح بار l از سال t (p.u.)
$\psi(it)$	ضریب وزنی سرعت ذره در تکرار it	$I_{ij}(tl)$	جریان عبوری از خط بین باسهای i و j در سطح بار l از سال t (A)
r_1, r_2	دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱	Dr	نرخ تنزیل
متغیرها		$\lambda(t)$	تابع تبدیل ارزش مالی در سال t به معادل ارزش خالص فعلی آن بصورت $1/(1+Dr)^t$
β_{gi}	متغیر باینری (۱ یا ۰) مبین انتخاب یا عدم انتخاب باس i جهت نصب DG	$U(.)$	تابع پله واحد
β_{ri}	متغیر باینری (۱ یا ۰) مبین انتخاب یا عدم انتخاب خط تغذیه کننده باس i جهت افزایش ظرفیت	$RP(.)$	تابعی که مولفه حقیقی آرگومان مختلط خود را بر می گرداند
RT_i	سال افزایش ظرفیت خط تغذیه کننده باس i	DP_{it}	میزان بار اکتیو باس i در سطح بار l از سال t (MW)
IT_i	سال نصب DG در باس i	DQ_{it}	میزان بار راکتیو باس i در سطح بار l از سال t (MVAR)
IG_i	ظرفیت نصب DG در باس i (MW)	ad_{ij}	ادمیتانس خط بین باس i و j (p.u.)
۱- مقدمه		θ_{it}	زاویه ولتاژ باس i در سطح بار l از سال t (rad)
<p>شبکه‌های توزیع فشارمتوسط و فشارضعیف برق به عنوان یک واسطه بین شبکه‌های فشار قوی و مصرف‌کنندگان نهایی بوده و نقش بسزایی در شبکه‌های قدرت دارند. شبکه‌های توزیع بطور معمول توسط یک یا چند پست بالادست شامل یک یا تعداد بیشتری ترانسفورماتور فشار قوی/فشارمتوسط تغذیه می‌گردند. با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر ظرفیت محدود تجهیزات شبکه شامل ترانسفورماتورها، خطوط، کلیدها و غیره و همچنین رشد روزافزون مصارف الکتریکی، شرکت‌های توزیع انگیزه زیادی جهت طراحی یک برنامه مناسب توسعه شبکه تحت پوشش خود دارند. بطوریکه با اجرای طرح توسعه فوق، بار الکتریکی رو به رشد مشترکین با سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان و کیفیت پاسخ داده شود. مواردی نظیر خصوصی سازی صنعت برق و تجدید ساختار</p>		φ_{ij}	زاویه ادمیتانس خط بین باس i و j (rad)
		V_m	حداقل مجاز دامنه ولتاژ (p.u.)
		V_M	حداکثر مجاز دامنه ولتاژ (p.u.)
		S_{it}	توان عبوری از خط بین باس i و j در سطح بار l از سال t (MVA)
		$S_{max,i}$	حداکثر توان مجاز عبوری از خط تغذیه کننده باس i (MVA)
		TP_n^{iter}	قدرت کلی استعماری n در تکرار $iter$
		Imp_n^{iter}	استعمارگر استعماری n در تکرار $iter$
		Co_{in}^{iter}	موقعیت کلونی i از استعماری n در تکرار $iter$
		$Co_{in, new}^{iter}$	موقعیت جدید کلونی i متعلق به استعماری n در تکرار $iter$
		Cb_{in}^{iter}	بهترین خاطره (تجربه) شخصی کلونی i متعلق به استعماری n تا تکرار $iter$

شبکه‌های توزیع با هدف تعیین مکان، ظرفیت و زمان مناسب استفاده از DG و همچنین برنامه زمانی مناسب افزایش ظرفیت خطوط موجود در شبکه توزیع را در دستور کار خود قرار داده اند. همچنین مساله DDGEP به کمک ترکیب الگوریتم ژنتیک^۴ و پخش بار بهینه^۵ (OPF) در مرجع [۶] حل گردیده است. به همین ترتیب، مرجع [۷] روشی ترکیبی جهت حل مساله DDGEP با لحاظ قابلیت کاهش پیک بار تولیدات پراکنده پیشنهاد نموده است. همچنین، مساله DDGEP در مراجع [۸ و ۹] با رویکرد کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری جاری در شبکه‌های توزیع در حضور DG مورد توجه قرار گرفته است. مرجع [۱۰] ترکیب دو الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ایمن^۶ (IGA) را بعنوان روش حل پیشنهادی مساله DDGEP با حضور فناوری‌های تولید پراکنده در شبکه توزیع شعاعی ارائه نموده است. همچنین روش حلی مبتنی بر الگوریتم انتشار عقب گرد^۷ ترکیب شده با آنالیز هزینه/ارزش^۸ جهت حل مساله DDGEP در مرجع [۱۱] معرفی گردیده است.

در این مقاله، یک مدل موثر برای مساله DDGEP معرفی گردیده است. با حل مدل پیشنهادی در قالب یک مساله بهینه‌سازی پیچیده‌ی چند متغیره با طیف متنوعی از انواع متغیرهای گسسته و پیوسته، مکان بهینه نصب DG و همچنین استراتژی بهینه افزایش ظرفیت خطوط موجود در شبکه برای یک دوره زمانی مشخص، تعیین می‌گردد. همچنین ماهیت زمان‌محور مدل پیشنهادی، امکان تعیین زمان مناسب سرمایه‌گذاری DG و تقویت خطوط شبکه را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، جهت حل مساله فوق، یک روش حل جدید دو سطحی حاصل از ترکیب دو الگوریتم رقابت استعماری باینری و تقویت شده^۹ (BEICA) و

در شبکه‌های قدرت، اهمیت سرویس مطمئن و با کیفیت برق به مشترکین و همچنین دغدغه جهانی گرمایش کره زمین در سال‌های اخیر، شرکت‌های توزیع برق را به استفاده از فناوری تولید پراکنده انرژی الکتریکی^۱ (DG) بعنوان یک گزینه مطمئن، کارآمد و انعطاف‌پذیر تامین انرژی الکتریکی در اجرای طرح توسعه پویای شبکه‌های توزیع^۲ (DDGEP) سوق داده است.

بطور کلی تولید پراکنده به فرآیند تولید برق در مقیاس متوسط/کوچک در نزدیکی مراکز مصرف در سمت فشار ضعیف و یا در سمت فشار متوسط این شبکه‌ها (اتصال به خطوط فشارمتوسط) اطلاق می‌گردد [۱]. کاهش تلفات انرژی، بهبود پروفیل ولتاژ، تعویق در هزینه و زمان لازم برای توسعه شبکه موجود، ریسک اقتصادی کمتر، زمان کمتر جهت نصب و راه اندازی نسبت به نیروگاه‌های بزرگ شبکه سراسری از جمله مزایای فنی و اقتصادی استفاده از تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع می‌باشد [۲]. با این حال، مزایای مذکور به مکان، ظرفیت، طریقه بکارگیری و تکنولوژی واحدهای تولید پراکنده بستگی دارد. بطوریکه نفوذ سطح بالایی از تولیدات پراکنده بدون یک استراتژی هدفمند و بهینه، ممکن است شبکه‌های توزیع را به چالش‌هایی نظیر تشدید تلفات انرژی، کاهش کیفیت توان و اختلالات حفاظتی وا دارد [۳]. به همین دلیل، مدل‌ها و روش‌های متعددی جهت حل مساله DDGEP با رویکرد استفاده از DG در مراجع و مقالات اخیر پیشنهاد گردیده است.

در مرجع [۴] الگوریتم اصلاح شده اجتماع ذرات^۳ (MPSO) جهت حل مساله DDGEP با در نظر گرفتن DG و منابع ذخیره ساز انرژی الکتریکی معرفی گردیده است. مدل پیشنهادی، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری DG و شبکه توزیع را بطور بهینه انتخاب می‌کند. نویسندگان مرجع [۵] مدلی پویا جهت توسعه

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Optimal Power Flow

⁶ Immune Algorithm

⁷ Back-Propagation Algorithm

⁸ Cost/Benefit Analysis

⁹ Binary Enhance Imperialist Competitive Algorithm

¹ Distributed Generation

² Dynamic Distribution Grid Expansion Planning

³ Modified Particle Swarm Optimization

- به جز باس مرجع^۳، تمامی باس‌های شبکه توزیع اولیه، پتانسیل نصب واحدهای DG را دارند. باس مرجع به باسی از شبکه توزیع اطلاق می‌گردد که مستقیماً به خروجی ترانسفورماتورهای موجود در پست‌های HV/MV متصل است.
- اتصال واحدهای تولید پراکنده به باس‌های شبکه توزیع بصورت یک بار با علامت منفی و با ضریب توان پسفاز در نظر گرفته شده است. این فرضیه برای مدل‌سازی تولیدات پراکنده تجدیدپذیر با ماهیت تصادفی تولید (مانند توربین بادی) معتبر نمی باشد.
- تغییرات دینامیک بار در طول یک سال، بصورت یک منحنی پلکانی تداوم سطح بار^۴ (LDC) با تعداد N_l سطح بار در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ سالانه رشد بار برای تمامی سطوح بار یکسان در نظر گرفته شده است.
- کلیه سرمایه‌گذاری‌ها اعم از نصب DG و یا افزایش ظرفیت خطوط شبکه در ابتدای سال انجام می‌پذیرد.
- علاوه بر ظرفیت انتخابی DG در هر باس از شبکه، ظرفیتی معادل با DRC به عنوان ذخیره (رزرو) در آن باس جهت مواقع اضطراری در نظر گرفته شده است.

۲-۲- تابع هدف مدل پیشنهادی

تابع هدف مدل پیشنهادی برای مساله DDGEP شامل حداقل‌سازی مجموع هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه توزیع و واحدهای DG جهت تامین بهینه مصارف الکتریکی مشترکین در طول یک دوره (افق) برنامه ریزی مشخص می‌باشد. هزینه‌های سرمایه‌گذاری طرح شامل هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای DG و هزینه لازم جهت افزایش ظرفیت خطوط موجود در شبکه توزیع می‌باشد. همچنین هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه تلفات انرژی در شبکه، هزینه انرژی خریداری شده از شبکه بالادست

الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات^۱ (IPSO) استفاده می‌گردد. بطوریکه، طرح بهینه توسعه شبکه شامل تعیین مکان، زمان و ظرفیت بهینه DG در شبکه توزیع و برنامه زمانی بهینه جهت تقویت خطوط موجود در سطح اول روش حل پیشنهادی توسط الگوریتم BEICA تعیین گردیده در حالیکه در سطح دوم بهینه سازی، نقطه کار بهینه شبکه توزیع و DG به کمک الگوریتم IPSO مشخص می‌گردد.

در ادامه این مقاله ابتدا در بخش ۲ مدل پیشنهادی برای مساله DDGEP بطور کامل تشریح می‌گردد. سپس در بخش ۳ روش حل دو سطحی پیشنهادی معرفی و تشریح می‌گردد. در بخش ۴، مدل و روش حل پیشنهادی جهت حل مساله DDGEP بر روی یک شبکه توزیع نمونه شعاعی پیاده سازی شده و نتایج آن از طریق مقایسه با نتایج ۱۲ روش حل دو سطحی دیگر مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت، در بخش ۵ نتایج حاصل از این مقاله به طور اختصار بیان خواهند شد.

۲- مدل پیشنهادی برای مساله DDGEP

در این بخش به ترتیب فرضیات، تابع هدف و قیود مدل معرفی شده برای مساله DDGEP تشریح می‌گردند.

۱-۲- فرضیات مدل

- شبکه‌های توزیع دارای ساختاری شعاعی بوده و از یک یا چند پست فشارقوی/ فشارمتوسط بالادست تغذیه می‌گردند. مدل پیشنهادی در این مقاله به تعیین برنامه بهینه توسعه شبکه‌های توزیع شامل خروجی پست‌های فشارقوی/ فشارمتوسط^۲ (HV/MV) به بعد با نام رایج شبکه‌های توزیع اولیه (فشارمتوسط) پرداخته و توسعه شبکه فشار ضعیف (ثانویه) را شامل نمی‌گردد.

³ Slack Bus

⁴ Load Duration Curve

¹ Improved PSO

² High-Voltage/Medium-Voltage (HV/MV)

$$GP_{it} - DP_{it} = \sum_{j=1}^{N_b} |V_{it}| |V_{jt}| |ad_{ij}| \cos(\theta_{it} - \theta_{jt} - \phi_{ij})$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (8)$$

$$GQ_{it} - DQ_{it} = \sum_{j=1}^{N_b} |V_{it}| |V_{jt}| |ad_{ij}| \sin(\theta_{it} - \theta_{jt} - \phi_{ij})$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (9)$$

قیود (۶) و (۷) تامین کننده توازن نقطه ای تولید و بار در شین اسلک (باس شماره ۱) و همچنین روابط (۸) و (۹) بیانگر قیود توازن بار و تولید در دیگر باس‌های شبکه توزیع می‌باشد.

- ولتاژ همگی باس‌های شبکه بایستی در محدوده مجاز قرار بگیرند:

$$V_m \leq |V_{it}| \leq V_M$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (10)$$

- توان عبوری از خطوط شبکه در محدوده مجاز خود قرار داشته باشند:

$$|S_{it}| \leq (1 + \beta_{ri} \cdot U(t - RT_i + 1)) \cdot |S_{max,i}|$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (11)$$

در این مقاله افزایش ظرفیت خطوط به منزله دو برابر کردن ظرفیت خط قلمداد شده است. به همین رو، در قید (۱۱) برای زمانهای قبل از تقویت خط i ($t < RT_i$)، ظرفیت نامی خط برابر با $S_{max,i}$ و برای همه سالهای بعد از افزایش ظرفیت ($t > RT_i$)، برابر با $2S_{max,i}$ خواهد بود که این مقوله به کمک مفهوم تابع پله واحد $U(t - RT_i + 1)$ لحاظ گردیده است.

- توان تولیدی DG در هر باس شبکه باید در محدوده مجاز بین مقادیر حداقل و حداکثر خود قرار گیرد:

$$\beta_{gi} \cdot U(t - IT_i + 1) \cdot mGP_i \leq GP_{it} \leq \beta_{gi} \cdot U(t - IT_i + 1) \cdot MGP_i$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (12)$$

$$\beta_{gi} \cdot U(t - IT_i + 1) \cdot mGQ_i \leq GQ_{it} \leq \beta_{gi} \cdot U(t - IT_i + 1) \cdot MGQ_i$$

$$\forall i \in N_b, \forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (13)$$

در این مقاله، حداقل تولید هر واحد DG صفر و مقدار حداکثر آن برابر با ظرفیت نامی انتخابی در سطح اول بهینه سازی (IG_i) در نظر گرفته شده است. همچنین در

(انتقال یا فوق توزیع) و هزینه بهره برداری DG می‌باشد. به همین جهت، تابع هدف مدل پیشنهادی برای مساله DDGEP بصورت روابط (۱) تا (۳) ارائه می‌گردد:

$$\text{Min } OF = C_{inv} + C_{oper} \quad (1)$$

$$C_{inv} = \sum_{t=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_b} \lambda(t) \times \left\{ \begin{aligned} & \left[IC_{dg} \times \beta_{gi} \times (IG_i + DRC) \times \right. \\ & \left. (U(t - IT_i + 1) - U(t - IT_i)) \right] + \\ & \left[CR_i \times \beta_{ri} \times \right. \\ & \left. (U(t - RT_i + 1) - U(t - RT_i)) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$C_{oper} = \sum_{t=1}^{N_y} \lambda(t) \times \left\{ \begin{aligned} & \left[\sum_{l=1}^{N_l} [PP_{it} \times EEP_{it} \times D_l] \right] + \\ & \left[\sum_{i=1}^{N_b} \sum_{l=1}^{N_l} [C_{om} \times GP_{it} \times D_l] \right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

بطوریکه PP_{it} در رابطه (۳) به کمک روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌گردد:

$$PP_{it} = SD_{it} + PL_{it} - \sum_{i=1}^{N_b} GP_{it}$$

$$\forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (4)$$

$$PL_{it} = \sum_{i=1}^{N_b} \sum_{j=i+1}^{N_b} RP(V_{it} - V_{jt}) \times I_{ij}^*(t)$$

$$\forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (5)$$

متغیرهای تصمیم مساله بهینه سازی مطرح شده شامل β_{ri} و β_{gi} بعنوان متغیرهای باینری و نیز IG_i ، IT_i و RT_i بعنوان متغیرهای عدد صحیح می‌باشند. همچنین به علت فرض شعاعی بودن ساختار شبکه‌های توزیع اولیه، N_b یک واحد بیشتر از N_b خواهد بود ($N_b = N_b + 1$).

۳-۲- قیود بهینه سازی

- به ازای هر طرح توسعه انتخابی و هر سطح بار از منحنی LDC، معادلات پخش بار و توازن بین تولید و بار به ازای تمامی باس‌های شبکه برقرار می‌باشد:

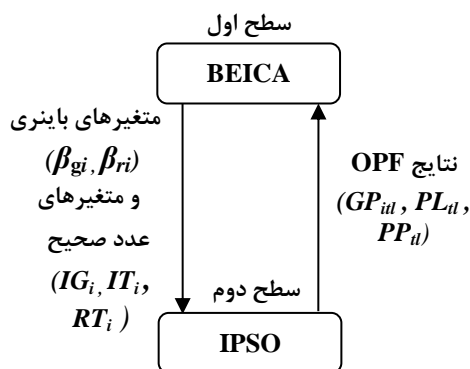
$$PP_{it} = \sum_{j=1}^{N_b} |V_{it}| |V_{jt}| |ad_{1j}| \cos(\theta_{it} - \theta_{jt} - \phi_{1j})$$

$$\forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (6)$$

$$QP_{it} = \sum_{j=1}^{N_b} |V_{it}| |V_{jt}| |ad_{1j}| \sin(\theta_{it} - \theta_{jt} - \phi_{1j})$$

$$\forall l \in N_l, \forall t \in N_y \quad (7)$$

DG و افزایش ظرفیت خطوط شبکه توسط رابطه (۲) محاسبه می‌گردند. بدیهی است از آنجایی که الگوریتم BEICA متغیرهای باینری را پردازش می‌کند، پس از تعیین متغیرهای باینری و عدد صحیح موجود برای هر پاسخ BEICA، متغیرهای عدد صحیح به فرم باینری معادل خود تبدیل می‌گردند. بطور مثال، اگر تعداد سالهای افق برنامه‌ریزی را ۴ در نظر گرفت ($4=2^2$)، هر متغیر عدد صحیح مرتبط با سال (IT_i, RT_i) را می‌توان با دو عدد (بیت) باینری معادل نمایش داد. ساختار کد برای هر پاسخ مساله DDGEP در شکل (۲) به نمایش درآمده است.



شکل ۱- ساختار روش حل دو سطحی پیشنهادی

β_{ri} $\forall i \in N_b$	RT_i $\forall i \in N_b$ به فرم باینری معادل	β_{gi} $\forall i \in N_b$	IG_i $\forall i \in N_b$ به فرم باینری معادل	IT_i $\forall i \in N_b$ به فرم باینری معادل
-------------------------------------	--	-------------------------------------	--	--

شکل ۲- ساختار کد برای هر پاسخ مساله DDGEP

در ادامه روند حل مدل پیشنهادی DDGEP، با توجه به مقادیر تعیین شده جهت متغیرهای سرمایه‌گذاری هر پاسخ تولیدی در سطح اول، مساله OPF بطور جداگانه جهت یافتن نقطه مناسب و بهینه بهره برداری از شبکه و DG شامل توان خروجی واحدهای DG، تلفات شبکه توزیع و میزان توان خریداری شده از شبکه بالادست، در هر سطح بار و برای هر سال از افق برنامه‌ریزی توسعه

قیود (۱۲) و (۱۳) در صورت انتخاب DG جهت نصب در باس i ($\beta_{gi}=1$)، ظرفیت تولید DG در این باس برای همه زمانهای بعد از این سال ($t > IT_i$) به کمک مفهوم تابع پله واحد $U(t-IT_i+1)$ بین دو مقدار حداقل و حداکثر خود قرار می‌گیرد.

۳- روش حل دو سطحی پیشنهادی جهت حل مساله DDGEP

انواع متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی برای مساله DDGEP شامل متغیرهای باینری β_{ri} و β_{gi} و همچنین متغیرهای عدد صحیح IG_i, IT_i و RT_i می‌باشد. لذا حضور چنین متغیرهایی منجر به تشکیل یک مساله مختلط با عدد صحیح^۱ خواهد شد. از سویی دیگر، بعلت وجود قیود پخش بار (۶) تا (۹) مدل فوق بشدت غیرخطی می‌باشد. لذا با در نظر گرفتن مجموعه روابط (۱) تا (۱۳)، مدل بهینه سازی پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی مختلط با اعداد صحیح^۲ (MINLP) خواهد بود. همچنین بدلیل حضور متغیرهای تصمیم باینری، تابع هدف مدل پیشنهادی دارای ساختاری غیرمقعر (محدب)^۳، ناهموار^۴ و مشتق ناپذیر^۵ می‌باشد. لذا حل چنین مدلی به کمک روشهای تحلیلی متداول (بر پایه گرادیان تابع هدف) امری دشوار و تا حد زیادی غیرممکن است. بدین منظور، در این مقاله یک روش حل دو سطحی (BEICA+IPSO) مطابق با شکل (۱) پیشنهاد گردیده است.

مطابق با شکل (۱)، متغیرهای تصمیم باینری (β_{ri}, β_{gi}) و عدد صحیح (RT_i, IT_i, IG_i) برای هر پاسخ مساله DDGEP در سطح اول بهینه سازی (BEICA)، معین می‌گردند. سپس با توجه به مقادیر انتخابی برای این متغیرها (متغیرهای سرمایه‌گذاری)، هزینه سرمایه‌گذاری طرح توسعه انتخابی (C_{inv}) معادل با مجموع هزینه‌های نصب

¹ Mixed-Integer

² Mixed-Integer Non-linear Programming

³ Non-Convex

⁴ Non-Smooth

⁵ Non-Differentiable

⁶ Investment variables

هدف (در مسائل با رویکرد کمینه سازی) به عنوان گروه استعمارگران انتخاب گردیده و باقیمانده کشورها تحت عنوان مستعمره (کلونی) این استعمارگرها در نظر گرفته می‌شوند. سپس، با توجه به قدرت هر استعمارگر، N_{col} کلونی باقیمانده در فضای مساله $(N_{col} = N_{cou} - N_{imp})$ به هر کدام از استعمارگرها برحسب میزان برزندگی آن و بطور تصادفی تخصیص داده می‌شود. بطوریکه استعمارگر قوی‌تر، تعداد کلونی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهد. در مسائل بهینه سازی با رویکرد حداقل سازی، برزندگی هر استعمارگر متناسب با عکس مقدار تابع هدف به ازای آن استعمارگر می‌باشد. همچنین تعداد کلونی اختصاص یافته به هر استعمارگر (N_c) را می‌توان از روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه نمود:

$$P_n = \frac{OF(Imp_{worst}) - OF(Imp_n)}{OF(Imp_{worst}) - OF(Imp_{best})} \quad (14)$$

$$N_c = \text{round}(P_n \times N_{col}) \quad (15)$$

که در آن P_n ، Imp_{best} و Imp_{worst} به ترتیب قدرت استعمارگر n ، بهترین استعمارگر با کمترین مقدار $OF_{ic}(\cdot)$ و بدترین استعمارگر با بیشترین مقدار $OF_{ic}(\cdot)$ در میان استعمارگرهای موجود می‌باشند. بدین ترتیب، استعمارگر n به همراه N_c کلونی اختصاص یافته به خود تشکیل استعماری (امپراطوری) n ام را می‌دهند. پس از این مرحله، تمامی کلونی‌های هر استعماری مطابق با قاعده جذب^۲ به سمت استعمارگر خود حرکت می‌کنند. لذا موقعیت جدید کلونی‌های استعماری n مطابق با رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$Co_{ijn}^{iter+1} = Co_{ijn}^{iter} + \sigma \cdot \text{rand}_1 \cdot (Imp_{nj}^{iter} - Co_{ijn}^{iter}) \quad (16)$$

$$j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, N_c$$

که در آن σ ، rand_1 و $iter$ به ترتیب ضریب وزنی حرکت کلونی به سمت استعمارگر خود، عددی حقیقی و تصادفی در بازه $(0, 1)$ و شمارنده تکرار می‌باشند. همچنین به

حل می‌گردد. در این مقاله، حل مساله OPF به کمک الگوریتم IPSO صورت پذیرفته است. بدین ترتیب، با توجه به مقادیر بدست آمده در سطح دوم بهینه سازی (IPSO)، مجموع هزینه‌های بهره برداری (C_{oper}) مرتبط با هر پاسخ سطح اول (BEICA) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد. در نهایت، مقدار کلی تابع هدف برای هر پاسخ از حاصل جمع C_{oper} و C_{inv} مربوط به آن پاسخ طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. الگوریتم BEICA طی تکرارهای متوالی، مقدار این تابع هدف را بهینه نموده و بهترین پاسخ به لحاظ کمترین مقدار تابع هدف (OF) را در صورت تحقق شرایط خاتمه^۱ ارائه می‌دهد. در ادامه مقاله، روش‌های معرفی شده جهت حل دو سطحی مدل پیشنهادی مساله DDGEP (BEICA و IPSO) به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۱- شرح مختصر الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) یکی از اقسام روش‌های بهینه سازی جمعی، مبتنی بر جستجوی تصادفی فضای پاسخ و برگرفته از رقابت استعمارطلبانه بین استعمارگران (امپراطوری‌های جهان) در راستای کسب قدرت و قلمرو هر چه بیشتر می‌باشد. این الگوریتم برای اولین بار توسط آتشپز گرگری و کارو لوکس در سال ۲۰۰۷ میلادی ابداع گردید [۱۲]. الگوریتم ICA بطور گسترده ای جهت حل مسائل بهینه سازی مهندسی بخصوص در شاخه مهندسی برق قدرت کاربرد داشته است [۱۳ و ۱۴]. در این الگوریتم، هر یک از پاسخ‌های کاندید به عنوان یک کشور (کلونی) شناخته می‌شوند. لذا در یک مساله بهینه‌سازی با تعداد متغیر تصمیم m و تعداد N_{cou} عضو جمعیت (کشور) اولیه، موقعیت هر کشور به صورت $Co_i = [co_{i1}, co_{i2}, \dots, co_{im}]$ و مقدار تابع هدف به ازای آن بصورت $OF_{ic}(Co_i)$ نمایش داده می‌شود. حال پس از مقداردهی تصادفی اولیه کشورها و محاسبه تابع هدف مربوط به هر کدام، تعداد N_{imp} کشور (پاسخ تصادفی اولیه) با کمترین مقدار تابع

² Assimilation

¹ Stopping Criterion

یک کلونی و بطور تصادفی به یکی از استعماری‌های دیگر می‌پیوندد. در صورت وقوع شرایط خاتمه (آخرین تکرار)، بهترین استعمارگر موجود میان مجموعه استعمارگرهای باقیمانده در فضای جستجو با کمترین مقدار $OF_{ic}(\cdot)$ به عنوان پاسخ نهایی ICA برگردانده خواهد شد.

۳-۱-۱- الگوریتم تقویت شده رقابت استعماری

در طول فرآیند بهینه سازی ICA، کلونی های متعلق به هر استعماری طبق قاعده جذب (رابطه ۱۶)) به سمت استعمارگر مربوط به خود حرکت می‌کنند. اگر هر استعمارگر موجود در هر استعماری را معادل با یک مینیمم محلی فرض کنیم، حرکت کلونی‌های دیگر به سمت این استعمارگر را می‌توان معادل حرکت پاسخ‌های موجود در فضای جستجو به سمت مینیمم (چاله)های محلی^۲ دانست. لذا در این حالت، امکان به دام افتادن پاسخ‌ها در این چاله‌های محلی زیاد بوده و بعضاً منجر به همگرایی زودرس^۳ الگوریتم می‌گردد. این امر در مسائل بهینه سازی با حضور طیف متنوعی از متغیرهای تصمیم باینری و عدد صحیح، همانند مدل پیشنهادی DDGEP، مشهود می‌باشد. لذا جهت افزایش قابلیت جستجوی فضای پاسخ توسط ICA و تبدیل آن به EICA، از مفهوم حرکت به سمت بهترین خاطره شخصی (Cb) بر گرفته از الگوریتم PSO [۱۵] در روند جذب هر کلونی به سمت استعمارگر خود استفاده شده است. مفاهیم و جزئیات الگوریتم PSO در بخش ۳-۲ تشریح خواهد شد. بدین ترتیب، علاوه بر حرکت به سمت استعمارگر خود، همگی کلونی‌ها بهترین خاطره شخصی در تکرار قبلی را در نظر گرفته و موقعیت جدید هر کدام از آنها بصورت رابطه زیر تغییر می‌کند:

$$Co_{ijn,new}^{iter} = Co_{ijn}^{iter} + \sigma \cdot rand_1 \cdot (Imp_{nj}^{iter} - Co_{ijn}^{iter}) + u \cdot rand_2 \cdot (Cb_{ijn}^{iter} - Co_{ijn}^{iter})$$

$$j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, N_c \quad (19)$$

منظور افزایش قابلیت جستجوی سراسری^۱ ICA، موقعیت هر کلونی پس از اعمال رابطه (۱۶) بصورت زیر تغییر پیدا می‌کند:

$$Co_{ijn}^{iter+1} = Co_{ijn,new}^{iter+1} + v \cdot Rn(0,1)$$

$$j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, N_c \quad (17)$$

که در آن v عددی تصادفی بین صفر و یک، و $Rn(0,1)$ عددی تصادفی بین صفر و یک با توزیع نرمال دارای میانگین صفر و واریانس یک می‌باشد. با اعمال عملگر (۱۷) به هر مولفه یک کلونی، موقعیت جدیدی برای آن کلونی در استعماری خود بوجود می‌آید. حال اگر پس از اعمال عملگر (۱۶) و (۱۷) و پیدایش موقعیت جدید برای هر کلونی، مقدار تابع هدف کلونی جدید کمتر از مقدار متناظر برای استعمارگر آن استعماری باشد، جای این کلونی و استعمارگر فعلی عوض شده و حرکت کلونی‌های دیگر به سمت استعمارگر جدید خواهد بود. بدین ترتیب پس از اعمال روابط (۱۶) و (۱۷) به همه کلونی‌های یک استعماری، قدرت کلی آن استعماری مطابق با رابطه (۱۸) محاسبه می‌گردد:

$$TP_n^{iter} = OF_{ic}(Imp_n^{iter}) + \alpha \cdot mean(OF_{ic}(Col_n^{iter})) \quad (18)$$

که در آن α عددی تصادفی و حقیقی در بازه (۰ و ۱) و همچنین Col_n^{iter} مجموعه کلونی‌های استعماری n در تکرار $iter$ می‌باشد.

در نهایت، ضعیف‌ترین کلونی مربوط به ضعیف‌ترین استعماری انتخاب شده و بطور تصادفی و بر حسب قدرت استعماری‌ها به یکی از آنها انتقال داده می‌شود. لذا این امر باعث تغییر تعداد کلونی‌های قوی‌ترین (افزایش یک واحد) و ضعیف‌ترین استعماری (کاهش یک واحد) در هر تکرار می‌گردد. در مسائل کمینه سازی، ضعیف‌ترین کلونی مربوط به کلونی با بیشترین مقدار تابع هدف و ضعیف‌ترین استعماری دارای کمترین قدرت (TP) می‌باشد. اگر یک استعماری همه کلونی‌های خود را از دست داده باشد، آن استعماری حذف شده و استعمارگر آن بصورت

² Local minima

³ Premature convergence

¹ Exploration

باینری، نسخه باینری شده ICA تحت عنوان BICA پیشنهاد می‌گردد. بطوریکه پس از اعمال عملگرهای جذب و انقلاب بر روی هر کلونی متعلق به استعماری n مطابق با روابط (۱۶) و (۱۷)، تمامی مولفه های کلونی مورد نظر ($Co_{ijn,new}^{iter} \quad j=1,2,3,\dots,m$) به کمک مفهوم تابع تبدیل سیگموئید^۱ مطابق با رابطه (۲۰) به عددی حقیقی در بازه (۰،۱) نگاشت^۲ می‌گردند. پس از آن، تمامی مولفه های تبدیل یافته با یک عدد تصادفی بین صفر و یک با توزیع یکنواخت ($Rand(0,1)$) مطابق با رابطه (۲۱) مقایسه می‌گردد:

$$S\left(Co_{ijn,new}^{iter+1}\right) = \frac{1}{1 + \exp\left(-Co_{ijn,new}^{iter+1}\right)} \quad (20)$$

$$j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, N_c$$

$$Co_{ijn}^{iter+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } Rand(0,1) < S\left(Co_{ijn,new}^{iter+1}\right) \\ 0, & \text{if } Rand(0,1) > S\left(Co_{ijn,new}^{iter+1}\right) \end{cases} \quad (21)$$

$$j = 1, \dots, m, \quad i = 1, \dots, N_c$$

بدین ترتیب تمام مولفه‌های هر کلونی به معادل باینری با مقدار ۰ یا ۱ تبدیل می‌گردند. الگوریتم باینری و تقویت شده رقابت استعماری (BEICA)، حاصل ترکیب قانون جذب اصلاح شده (۱۹) و عملگر نگاشت (۲۰)-(۲۱) در نسخه اولیه الگوریتم ICA می‌باشد.

۳-۲- شرح مختصر الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) یکی دیگر از روش‌های بهینه سازی گروهی مبتنی بر جستجوی تصادفی بوده که برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت در سال ۱۹۹۷ میلادی معرفی گردید [۱۵]. الگوریتم PSO و نسخه های تقویت (اصلاح) شده آن در حل مسائل پیچیده مهندسی کاربرد فراوانی داشته اند [۱۶ و ۱۷]. در این روش، گروهی از ذرات، فضای جستجوی مساله بهینه سازی را جستجو کرده تا به پاسخ بهینه نهایی یا پاسخی نزدیک به آن

که در آن u ضریب وزنی حرکت کلونی به سمت بهترین خاطره شخصی خود و $rand_2$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰،۱) می‌باشد. با اضافه نمودن Cb در رابطه (۱۹)، احتمال جذب کلونی های ضعیف تر توسط کلونی های قوی تر (استعمارگران) در طول چند تکرار متوالی و همچنین گیر افتادن پاسخ های تصادفی در دام چاله های محلی کمتر می‌گردد. بعبارتی دیگر، به مجموعه پاسخ های ضعیف تر در هر تکرار این فرصت داده می‌شود تا بتوانند موقعیت های دیگر فضای پاسخ مساله را در جهات متفاوت تری جستجو کنند. بدین ترتیب با اعمال عملگر Cb در EICA، احتمال یافتن پاسخ های بهتر توسط هر کلونی نسبت به ICA بیشتر خواهد شد. همچنین با انتخاب مناسب و منطقی ضرایب وزنی σ و u ، می توان قابلیت جستجوی سراسری و محلی EICA را در حد تعادل نگاه داشته که این امر به انعطاف پذیری بیشتر EICA نسبت به ICA می‌انجامد.

لازم به ذکر است پس از اعمال به ترتیب روابط (۱۹) و (۱۷) به هر کلونی و تشکیل یک موقعیت جدید برای آن، در صورتیکه مقدار تابع هدف به ازای این موقعیت جدید از مقدار متناظر برای Cb آن کمتر گردد، موقعیت جدید کلونی جایگزین Cb خود می‌گردد. همچنین در صورت جدایی هر کلونی از استعماری خود طی فرآیند رقابت بین استعماری ها، انتقال آن به استعماری دیگر و بدنبال آن تجربه موقعیت بهتر، Cb مربوط به آن کلونی حذف (ریست) می‌گردد. بدین معنی که بروز شدن Cb هر کلونی در محیط (استعماری) جدید انجام گرفته و کلیه تجارب قبلی در استعماری سابق پاک می‌گردد.

۳-۱-۲- الگوریتم رقابت استعماری باینری و تقویت شده

در طول فرآیند بهینه سازی ICA، کلونی های متعلق به نسخه اولیه الگوریتم ICA با رویکرد مسائل بهینه سازی پیوسته پیشنهاد گردیده است. در این قسمت، جهت حل مسائل بهینه سازی باینری با متغیرهای تصمیم ۰ و ۱ و همچنین قابلیت الگوریتم ICA در پردازش متغیرهای

¹ Sigmoid Transformation Function
² map

نتیجه جستجوی پاسخهای متنوع تر در فضای پاسخ مساله، ضریب وزنی ψ بطور تطبیقی در تکرارهای متوالی و مطابق با رابطه (۲۴) تغییر می کند:

$$\psi(it) = \psi_{max} - \frac{\psi_{max} - \psi_{min}}{it_{max}} \times it \quad (24)$$

که در آن، it_{max} ، ψ_{min} و ψ_{max} به ترتیب حداکثر تعداد تکرار الگوریتم PSO، حداقل و حداکثر مقدار ضریب ψ می باشند. در نهایت، پس از تحقق شرایط خاتمه (حداکثر تعداد تکرار)، بهترین پاسخ از لحاظ کمترین مقدار تابع هدف (در مسائل کمینه سازی) یا همان Gb در تکرار آخر، به عنوان پاسخ نهایی PSO تعیین می گردد.

۳-۲-۱- الگوریتم PSO بهبود یافته

اگر چه متناسب با روند تعریف شده برای حرکت ذرات در الگوریتم PSO این روش از نرخ و سرعت همگرایی خوبی برخوردار است لیکن در مسائل بهینه سازی با تعداد بالای متغیرهای تصمیم و در نتیجه مینیممهای محلی زیاد دچار مشکل شده و غالباً دچار همگرایی زودرس می شود. لذا جهت رفع این مشکل و افزایش قابلیت جستجوی PSO در فضای پاسخ مساله و همچنین افزایش نرخ همگرایی آن جهت نیل به پاسخ های مطلوبتر، عملگر جدیدی برای جستجوی کارآمدتر در اطراف پاسخهای الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) یکی دیگر از روشهای تولیدی هر تکرار پیشنهاد می گردد. بدین ترتیب که پس از بروزرسانی سرعت و موقعیت هر ذره مطابق با روابط (۲۲) و (۲۳)، تعداد K ذره دیگر در همسایگی آن ذره مطابق با رابطه (۲۵) تشکیل می گردد:

$$Y_i^{it+1,k} = P_i^{it+1} + Rand_3 \cdot P_i^{it+1} \quad (25)$$

$$i = 1, \dots, N_p \quad k = 1, 2, \dots, K$$

که در آن، $Rand_3$ عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه (۰-۱) می باشد. لذا با اعمال رابطه (۲۵) به هر ذره و تولید K پاسخ تصادفی دیگر در اطراف (همسایگی) آن، احتمال تولید پاسخ بهتر نسبت به موقعیت ذره مورد نظر بالاتر می رود. به این ترتیب، در تکرار جدید به ازای هر

برسند، هر کدام از این ذرات به عنوان یک پاسخ تصادفی در فضای جستجوی مساله در نظر گرفته می شوند. سرعت و موقعیت هر ذره در الگوریتم PSO را می توان به ترتیب با $SP_i = [sp_{i1}, sp_{i2}, \dots, sp_{ik}]$ و $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}]$ نشان داد که در آن k نشان دهنده تعداد متغیرهای تصمیم مساله بهینه سازی (ابعاد هر ذره) می باشد. همچنین مقدار تابع هدف به ازای موقعیت هر ذره را میتوان با $OF_p(P_i)$ نمایش داد. در طول بهینه سازی PSO، ذرات (اعضای جمعیت) به صورت گروهی به سمت بهترین پاسخ حرکت می کنند. بطوریکه در هر تکرار این الگوریتم، بهترین عضو جمعیت (Gb) اطلاعات توصیفی خود را با دیگر اعضای جمعیت به اشتراک می گذارد. بدین ترتیب، سرعت و موقعیت جدید هر ذره (پاسخ تصادفی) در تکرار جدید به کمک مفهوم Gb و همچنین بهترین خاطره شخصی آن ذره در تکرار قبلی (Pb) مطابق با روابط (۲۲) و (۲۳) بروز می گردد:

$$SP_i^{it+1} = \psi SP_i^{it} + \phi_1 r_1 (Gb^{it} - P_i^{it}) + \phi_2 r_2 (Pb_i^{it} - P_i^{it}) \quad (22)$$

$$i = 1, \dots, N_p$$

$$P_i^{it+1} = P_i^{it} + SP_i^{it+1} \quad i = 1, \dots, N_p \quad (23)$$

که در آن، N_p و it به ترتیب بیانگر تعداد اعضای جمعیت^۱ PSO و شمارنده تکرار این الگوریتم می باشند. پس از بروزرسانی موقعیت تمامی ذرات در هر تکرار و محاسبه مقدار تابع هدف به ازای موقعیت های جدید بدست آمده برای آنها، اگر مقدار تابع هدف هر ذره جدید کمتر از مقدار متناظر برای Pb همان ذره گردد، موقعیت جدید ذره جایگزین Pb خود خواهد شد. به همین ترتیب اگر ذره ای از میان ذرات جدید، دارای مقدار کمتری از تابع هدف ($OF_p(.)$) در مقایسه با مقدار متناظر برای Gb ($OF_p(Gb)$) باشد، جایگزین آن خواهد شد. بدین ترتیب در هر تکرار، مقادیر Gb جمعیت و Pb هر ذره بروز می گردند.

بطور معمول، جهت بهبود همگرایی الگوریتم PSO و در

¹ Population Size

(۳) محاسبه شده و مقدار آن به سطح اول بهینه سازی (BEICA) منتقل می‌شود.

۳- در این مرحله با توجه به مقادیر تعیین شده متغیرهای سرمایه‌گذاری برای هر عضو جمعیت، مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری متناسب با هر عضو (C_{inv}) بر طبق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد. لذا مقدار نهایی تابع هدف برای هر پاسخ بصورت مجموع C_{oper} و C_{inv} مطابق با رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

۴- پس از محاسبه مقدار OF برای همه اعضای جمعیت BEICA، جمعیت نسل بعد به ترتیب توسط روابط (۱۹)، (۱۷) و (۲۰)–(۲۱) تولید می‌گردند.

۵- در صورت تحقق شرایط خاتمه (حداکثر تعداد تکرار یا $iter_{max}$)، بهترین عضو جمعیت الگوریتم BEICA معادل با استعمارگر با کمترین مقدار OF بعنوان پاسخ نهایی مساله DDGEP انتخاب می‌گردد. در غیر اینصورت، یک واحد به شمارنده تکرار ($iter$) اضافه شده و به مرحله ۲ بازگشت می‌شود. مراحل ۲ تا ۵ تا رسیدن به شرایط خاتمه ($iter=iter_{max}$) ادامه پیدا می‌کند.

۴- مطالعه موردی

در این بخش، مدل و روش حل پیشنهادی برای مساله DDGEP بر روی یک شبکه توزیع شعاعی ۳۴ باسه نمونه پیاده سازی شده است. همگی شبیه سازی ها در محیط برنامه نویسی نرم افزار MATLAB7.5 و در یک رایانه شخصی ۵ هسته ای با حافظه ۴GB صورت پذیرفته است. نمایش تک خطی شبکه آزمون در شکل (۳) قابل مشاهده است. ولتاژ نامی این شبکه ۱۱ kV بوده و دارای یک پست فوق توزیع (HV/MV)، ۳۳ باس بار، یک باس مرجع (باس شماره ۱) متصل به خروجی پست فوق توزیع و تعداد ۳۳ خط توزیع می‌باشد [۱۹]. پارامترها و دیتاهای اقتصادی مرتبط شبکه توزیع و واحدهای DG برگرفته از مرجع [۶] می‌باشد. ظرفیت نصب DG برابر با ۴۰۳،۲،۱ مگاوات بصورت ترکیب واحدهای یک مگاواتی در نظر

عضو جمعیت تعداد $K+1$ پاسخ تصادفی موجود می‌باشد. بهترین پاسخ از بین این $K+1$ پاسخ، یعنی پاسخ دارای کمترین مقدار OF_p ، مطابق با رابطه (۲۶) بعنوان موقعیت جدید آن ذره برای تکرار بعد انتخاب می‌گردد:

$$P_i^{i+1} = \operatorname{argmin} \{ OF_p(P_i^{i+1}), OF_p(Y_i^{i+1,k}), \dots, OF_p(Y_i^{i+1,K}) \}$$

$$i = 1, \dots, N_p \quad (26)$$

در این مقاله، نسخه تقویت شده PSO با اضافه کردن روابط (۲۵)–(۲۶) به روند بهینه سازی PSO اولیه بدست آمده و بصورت IPSO نامگذاری شده است.

۳-۳ اعمال روش پیشنهادی BEICA+IPSO جهت حل مساله DDGEP

مراحل اجرای روش حل پیشنهادی (BEICA+IPSO) جهت حل مساله DDGEP مطابق با الگوی نشان داده شده در شکل (۱)، بصورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱- ابتدا در سطح اول بهینه‌سازی (BEICA)، جمعیت اولیه پاسخ‌ها در محدوده مجاز متغیرهای تصمیم (باینری و عدد صحیح) با ساختار کد نشان داده شده در شکل (۲) به طور تصادفی تولید می‌گردند.

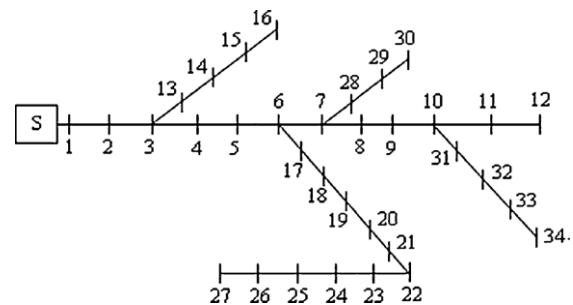
۲- با توجه به مقادیر انتخابی متغیرهای تصمیم برای هر عضو جمعیت BEICA، مساله OPF بطور جداگانه برای هر سطح بار از هر سال افق برنامه ریزی به کمک الگوریتم معرفی شده IPSO حل می‌شود. لذا تعداد مسائل OPF برای هر عضو جمعیت برابر با $N_i * N_y$ خواهد بود. تخطی از قیود مساله OPF ((۶)–(۱۳)) توسط یک ضریب جریمه^۱ نسبتاً بزرگ به تابع هدف OPF اضافه می‌گردد [۱۸]. با حل مساله OPF، توان تولیدی DG واقع در باس i در سطح بار l از سال t (GP_{ilt}) محاسبه می‌گردد. همچنین با تعیین GP_{ilt} ، مقادیر PP_{il} و PL_{il} به ترتیب مطابق با روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌گردند. لذا با توجه به مقادیر بدست آمده برای GP_{ilt} ، PP_{il} و PL_{il} هزینه بهره‌برداری بهینه شده (C_{oper}) برای هر عضو جمعیت توسط رابطه

¹ Penalty coefficient

مورد افزایش ظرفیت خطوط، قسمت دوم در برگرنده ۳۳ متغیر عدد صحیح بین ۱ تا ۴ بعنوان سال افزایش ظرفیت خطوط شبکه، قسمت سوم دارای ۳۳ متغیر باینری دیگر جهت تعیین مکان نصب DG و در نهایت قسمت‌های چهارم و پنجم هر پاسخ شامل ۳۳ متغیر عدد صحیح بین ۱ تا ۴ به ترتیب بعنوان ظرفیت نصب DG در باس‌های شبکه (بر حسب مگاوات) و سال نصب DG می‌باشد. لذا با در نظر گرفتن $4=2^2$ و نمایش هر کدام از متغیرهای عدد صحیح با دو بیت باینری معادل، تعداد متغیرهای باینری موجود در ساختار کد هر پاسخ تصادفی برابر با $264=66+66+66+33$ خواهد بود.

جهت نمایش قابلیت روش حل دو سطحی پیشنهادی، نتایج حاصل از بکارگیری آن جهت حل مساله DDGEP در شبکه نمونه شکل (۳) با نتایج بدست آمده از روش دیگر در جدول (۳) به نمایش درآمده است. مقادیر جدول همگی بر حسب میلیون دلار می‌باشند. همچنین در این جدول، عبارات BPSO, BHS, GSA, DE, BBO به ترتیب بیانگر اسامی الگوریتم زیست جغرافیایی [۲۰]، تفاضل تکاملی [۲۱]، جستجوی جاذبه [۲۲]، الگوریتم جستجوی هارمونی باینری شده [۲۳] و الگوریتم باینری شده اجتماع ذرات [۲۴] می‌باشند. لازم به ذکر است که نتایج جدول (۳)، پس از ۱۰ بار اجرای مستقل هر کدام از روش‌های حل این جدول بدست آمده است. جهت مقایسه عادلانه، دیتاهای فنی و اقتصادی در همگی روش‌های حل این جدول مشابه هم در نظر گرفته شده اند. همانطور که از نتایج جدول (۳) مشخص است، بهترین، میانگین و بدترین پاسخ نهایی در روش حل دو سطحی پیشنهادی (BEICA+IPSO) از بهترین، میانگین و بدترین پاسخ مربوط به ۱۲ روش حل دو سطحی دیگر بهتر می‌باشد. لذا نتایج این مقایسه، نشان از کارایی و قابلیت ویژه روش حل BEICA+IPSO جهت حل مساله DDGEP دارد. جدول (۴) نتایج عددی بدست آمده برای بهترین پاسخ روش BEICA+IPSO برای شبکه توزیع ۳۴ باسه را نشان می‌دهد.

گرفته شده است. نرخ رشد بار در یک دوره برنامه ریزی ۴ ساله برابر با ۵٪ و نرخ تنزیل نیز ۱۲٪ در نظر گرفته شده است. همچنین ظرفیت ذخیره DG برابر با ۱ مگاوات فرض شده است ($DRC=1$). بدین معنی که فارغ از هر مقدار انتخابی جهت ظرفیت DG، یک واحد ۱ مگاواتی تحت عنوان ذخیره در باس انتخاب شده لحاظ می‌گردد. تعداد سطوح بار در منحنی تداوم سالیانه بار برابر با ۳ تحت اسامی به ترتیب بار حداکثر، بار میانه (متوسط) و بار حداقل در نظر گرفته شده است ($N_l=3$). اطلاعات توصیفی هر کدام از سطوح بار یاد شده در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین جدول (۲) شامل پارامترهای تنظیم BEICA و IPSO در مطالعه موردی این مقاله می‌باشد.



شکل ۳- نمایش تک خطی شبکه توزیع نمونه ۳۴ باسه

جدول ۱- اطلاعات توصیفی منحنی تداوم بار

سطح بار	درصدی از پیک بار	زمان تداوم (hrs)	قیمت انرژی الکتریکی (\$/MWh)
حداکثر	۱۰۰	۱۵۰۰	۷۰
میانه	۷۰	۵۰۰۰	۵۰
حداقل	۵۰	۲۲۶۰	۳۵

جدول ۲- مقادیر استفاده شده برای پارامترهای تنظیم در

الگوریتم‌های BEICA و IPSO

پارامترهای تنظیم						روش حل
$iter_{max}$	N_{cou}	N_{imp}	Y	α	u, σ	BEICA
۱۰۰	۲۰۰	۲۰	۰/۴	۰/۴	۰/۳	
it_{max}	N_P	ϕ_2	ϕ_1	ψ_{min}	ψ_{max}	IPSO
۱۰۰	۱۰۰	۲	۲	۰/۴	۰/۹	

با توجه به ساختار کد تعریف شده برای هر پاسخ تصادفی مساله DDGEP، نمایش داده شده در شکل (۲)، قسمت اول هر پاسخ دارای ۳۳ متغیر باینری مبین تصمیم در

۵- نتیجه گیری

برنامه ریزی توسعه پویای شبکه های توزیع (DDGEP) یک مساله بهینه سازی پیچیده و چند متغیره شامل هر دو طیف متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته می باشد. در این مقاله یک مدل جدید برای مساله DDGEP به منظور تعیین طرح بهینه توسعه شبکه های توزیع در یک دوره زمانی مشخص با رویکرد استفاده از فناوری های تولید پراکنده انرژی ارائه گردیده است. به این ترتیب، تابع هدف مدل پیشنهادی معادل با حداقل سازی مجموع هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری طرح در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، قیود فنی حاکم بر شبکه و DG، مدل فوق را به یک مساله بهینه سازی غیر خطی، محدب، ناهموار و مختلط با عدد صحیح تبدیل می کند. لذا حل این مساله با روش های تحلیلی متداول، کاری پیچیده با خواهد بود. به همین دلیل، در این مقاله یک روش حل جدید دو سطحی مبتنی بر ترکیب دو الگوریتم باینری و تقویت شده رقابت استعماری (BEICA) و الگوریتم بهبود یافته اجتماع ذرات (IPSO) معرفی گردیده است. همچنین، مدل و روش حل پیشنهادی بر روی یک شبکه توزیع نمونه پیاده سازی گردیده و جهت نمایش کارایی آن، نتایج بدست آمده با نتایج ۱۲ روش حل دو سطحی دیگر مقایسه گردیده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- مقایسه نتایج BEICA+IPSO با نتایج ۱۲ روش حل دو سطحی دیگر برای حل مساله DDGEP در شبکه توزیع ۳۴ باسه

روش حل	بهترین	میانگین	بدترین
BHS+BBO	۱۵/۱۷۸۴	۱۶/۴۵۹۲	۱۷/۰۸۳۲
BHS+GSA	۱۴/۸۷۸۷	۱۶/۱۷۵۴	۱۶/۸۱۱۲
BHS+DE	۱۴/۲۲۲۷	۱۵/۹۶۷۵	۱۶/۵۰۵۲
BHS+PSO	۱۳/۹۶۲۶	۱۴/۶۳۹۸	۱۶/۲۶۱۲
BICA+DE	۱۳/۱۸۴۲	۱۴/۳۰۲۷	۱۵/۶۶۸۵
BPSO+DE	۱۲/۵۱۱۹	۱۳/۸۲۶۳	۱۵/۳۲۶۵
BPSO+BBO	۱۲/۴۰۲۷	۱۳/۷۲۲۸	۱۵/۱۴۷۸
BICA+GSA	۱۲/۲۹۵۴	۱۳/۴۹۷۷	۱۵/۰۰۵۸
BPSO+PSO	۱۱/۴۲۲۷	۱۳/۲۷۳۹	۱۴/۸۴۹۱
BPSO+GSA	۱۱/۳۳۲۵	۱۲/۵۲۴۷	۱۴/۶۷۸۲
BICA+BBO	۱۰/۸۷۲۴	۱۱/۸۴۶۲	۱۳/۷۲۳۴
BICA+PSO	۱۰/۶۸۷۳	۱۱/۷۰۸۲	۱۳/۲۶۸۹
BEICA+IPSO	۱۰/۲۳۳۵	۱۱/۲۶۹۳	۱۲/۷۳۵۱

جدول ۴- نتایج عددی بهترین پاسخ روش BEICA+IPSO جهت حل مساله DDGEP در شبکه توزیع ۳۴ باسه

هزینه تلفات	۰/۹۳۹۴
هزینه افزایش ظرفیت خطوط	۱/۱۰۱۹
هزینه سرمایه گذاری DG	۲/۲۸۷۹
هزینه انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه بالادست	۵/۷۸۱۷
هزینه بهره برداری DG	۰/۱۲۲۶
مقدار تابع هدف (OF)	۱۰/۲۳۳۵
مکان، ظرفیت و سال بهینه نصب DG در طول افق برنامه ریزی	سال اول: --- سال دوم: --- سال سوم: --- سال چهارم: --- ۱ مگاوات در باسهای ۳ و ۱۷
برنامه زمانی افزایش ظرفیت خطوط شبکه	سال اول: خط ۷ و ۱۳ سال دوم: ۳ و ۱۶ سال سوم: خط ۱۸ و ۲۱ سال چهارم: خطوط ۲۸ و ۱۲، ۲ و ۱۰

۶- مراجع

- [1] Esmaili M., Chaktan Firozjaee, E., Shayanfar, H.A. (2014). "Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints". Appl Energy, Vol. 113, pp.1252-1260.

- [2] AlRashidi, MR., AlHajri MF. (2011). "Optimal planning of multiple distributed generation sources in distribution networks: a new approach". *Energy Convers Manage*, Vol. 52, pp.3301–3308.
- [3] Laghari, J.A., H. Mokhlis, Bakar, A.H.A., Karimi M. (2013). "A new islanding detection technique for multiple mini hydro based on rate of change of reactive power and load connecting strategy ". *Energy Convers Manage*, Vol. 76, pp. 215-224.
- [4] Sedghi, M., Aliakbar-Golkar, M., Haghifam, M.-R. (2013). "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm". *Elect Power Energy Syst.*, Vol. 52, pp. 221-230.
- [5] Ziari, I., Ledwich G., Ghosh, A., Platt, G. (2012). "Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth". *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 27, No. 2, pp.757–765.
- [6] Naderi, E., Seifi, H., Sepasian MS. (2012). "A dynamic approach for distribution system considering distributed generation". *IEEE Trans. Power Del*, Vol. 27, No. 3, pp.1313-1322.
- [7] Ouyang W., Zheng H., Zang X., Yao, L. (2013). "Distribution network planning method considering distributed generation for peak cutting ". *Energy Convers Manage*, Vol. 52, pp. 221-230.
- [8] Gitizadeh, M., Azizi Vahed, A., Aghaei J. (2013). "Multistage distribution system expansion planning considering distributed generation using hybrid evolutionary algorithms ". *Appl Energy*, Vol. 101, pp. 655-666.
- [9] Falaghi, H., Singh, C., Haghifam, M-R., Ramezani, M. (2011). "DG integrated multistage distribution system expansion planning ". *Electr Power Energy Syst*, Vol. 33, pp.1489–1497.
- [10] Soroudi, A., Ehsan, M., Zareipour, H. (2011). "A practical eco-environmental distribution network planning model including fuel cells and non-renewable distributed energy resources ". *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 179-188.
- [11] Bin Humayd, A.S., Bhattacharya, K. (2013). "Comprehensive multi-year distribution system planning using back-propagation approach ". *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 7, No.12, pp.1415–142.
- [12] Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C. (2007). "Imperialist Competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition ". *IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2007*, pp. 4661-4667.
- [13] Jazebi, S., Haji, M.M. , Naghizadeh, R.A. (2014). "Distribution network reconfiguration in the presence of harmonic loads: Optimization Techniques and Analysis". *IEEE Trans. Smart Grid*. Vol. 5, No. 4, pp.1929-1937.
- [14] Safari, M. , Sarvi, M. (2013). "Optimal load sharing strategy for a wind/diesel/battery hybrid power system based on imperialist competitive neural network algorithm ". *IET Renew. Power. Gener.*, Vol. 8, No.8, pp. 937-946.
- [15] Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). "Particle Swarm Optimization", *Proc IEEE Int Conf Neural Networks*, Perth, Australia.
- [16] Gómez-González, M., López, A., Jurado, F. (2013) "Hybrid discrete PSO and OPF approach for optimization of biomass fueled micro-scale energy system ". *Energy Convers Manage*, Vol. 65, pp. 539-545.

- [17] Amjady, N., Rezaei soleymanpour, H. (2010). "Daily hydrothermal generation scheduling by a new modified adaptive swarm optimization technique". *Electric Power Syst Res.*, Vol. 80, No. 6, pp. 723-732.
- [18] Amjady, N., Fatemi, H., Zareipour, H. (2012). "Solution of optimal power flow subject to security constraints by a new improved bacterial foraging method". *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 27, No. 3, pp. 1311-1323.
- [19] Chis, M., Salama, M.M.A., Jayaram, S. (1997). "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies". *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 144, No.3, pp. 225–230.
- [20] Bhattacharya, A., Chattopadhyay, P.K. (2010). "Biogeography-based optimization for different economic load dispatch problems". *IEEE Trans Power Syst*, Vol. 25, No. 2, pp.1046-1077.
- [21] Amrane, Y., Boudour, M., Ladjici, A.A., Elmaouhab, A. (2015). "Optimal VAR control for real loss minimization using differential evolution algorithm". *Int. J of Elect & Energy Syst.*, Vol. 66, pp. 262-271.
- [22] Mohamed Shuaib, Y., Surya Kalavathi, M., Christofer Asir Rajan, C. (2015). "Optimal capacitor placement in radial distribution system using gravitational search algorithm". *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 64, pp. 384-397.
- [23] Zhang, P., Shan, X., Gu, W. (2012). "A Modified harmony search algorithm for 0-1 knapsack problems", *Proceedings of 3rd Int conf on digital manufacturing and automation (ICDMA)*, GuiLin, pp. 85-88.
- [24] Kennedy, J., Eberhart R.C. (1997). "A discrete binary version of the particle swarm algorithm". (1997). *IEEE Int Conf Syst, Man, Cybern, Piscataway*, pp. 4104–4108.