

بهره برداری بهینه دینامیکی نیروگاه های برقابی زنجیره ای - حرارتی مبتنی بر الگوریتم ترکیبی بهینه سازی ذرات گروهی - جستجوی گرانشی (PSOGSA) با در نظر گرفتن آلودگی

امین عبایی فر*^۱، حسن براتی^۲،

*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، amin_abae67@yahoo.com

۲- استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، barati216@gmail.com

تاریخ دریافت:

تاریخ پذیرش:

چکیده: الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) یک روش بهینه سازی تصادفی نوین است که از قانون گرانش و اثر متقابل بین جرم های ذره ها الهام گرفته است. در این مقاله از یک مدل نوین ترکیبی اصلاح شده از بهینه سازی ذرات عمومی (PSO) و GSA جهت کنترل پذیری یا کنترل توانایی جستجوی بهینه سازی عمومی و افزایش عملکرد مدل ترکیبی PSOGSA استفاده شده است. بهره گیری از این روش ترکیبی اصلاح شده برای حل مساله توزیع اقتصادی روزانه در سیستم های حرارتی (DHS) در یک مقیاس بزرگ به عنوان یک مساله بهینه سازی می تواند نقش مهمی را در بهره برداری اقتصادی سیستم های قدرت ایفا می کند. که در این مقاله الگوریتم جستجوی گرانشی (PSOGSA^۲) را برای حل مساله (DHS) مطرح می کند. امکان پذیری و استفاده از روش PSOGSA در حل مساله توزیع اقتصادی بار در سیستم های آبی-حرارتی در محیط نرم افزاری MATLAB، شبیه سازی کامپیوتری شده است. نتایج بدست آمده از روش PSOGSA مطرح شده با تکنیک اکتشافی دیگر در متن مقایسه می شوند و نتایج مقایسه نشان می دهد که روش مطرح شده می تواند به یک حل نزدیک به بهینه و بهبود عملکرد روش ترکیبی PSOGSA استاندارد همگرا شود.

واژه های کلیدی: مخازن آبشاری، توزیع اقتصادی، الگوریتم جستجوی گرانشی، استراتژی جستجو اکتشافی

۱- مقدمه

بهینه سازی ذرات عمومی (PSOGSA) را برای حل مساله (DHS) مورد استفاده قرار می دهد. این روش شامل سه مرحله می باشد. اول، بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) که به طور یک پارچه ای کامل کننده الگوریتم جستجوی گرانشی برای به روز رسانی سرعت عوامل است. دوم: استراتژی های جستجوی اکتشافی بر پایه انتخاب تصادفی از میان دشارژ (تخلیه آب) از نیروگاه های آبی و میانگین لیست حق

توزیع اقتصادی روزانه در سیستم های حرارتی (DHS) در یک مقیاس بزرگ به عنوان یک مساله بهینه سازی که محدودیت های دینامیکی غیر خطی را شامل می شود، نقش مهمی را در بهره برداری اقتصادی سیستم های قدرت ایفا می کند. در سیستم های آبی حرارتی منابع آبی برای تولید برق که در واقع نمایندگان جاری شدن به نیروگاه های آبی و ذخیره شده در مخازن هستند، قابل دسترسی می باشد. این مقاله الگوریتم جستجوی گرانشی ترکیبی بالگوریتم

تقدم هزینه دربار کامل از واحدهای حرارتی که با توجه به قیود مساوی مسئله (DHS) به تقویب رسیده اند.

سوم: تکنیک های مقایسه ای انتخاب مبتنی بر امکان سنجی که به طور مؤثری بر کنترل قیود نامساوی در PSO-GSA در حال ابداع هستند، و به ضریب جریمه یا پارامترهای مضاعف دیگر نیاز ندارند و می توانند عامل را به سرعت به منطقه امکان پذیر راهنمایی کنند.

به علت محدودیت های الگوریتم های بهینه سازی سنتی در حل کردن مسائل بهینه سازی با بعدهای بالا، اخیراً الگوریتم های بهینه سازی متاکتشافی مختلفی توسعه یافته اند برای حل این نوع مسائل بهینه سازی این الگوریتم ها را به این شکل می توانیم لیست کنیم. الگوریتم ژنتیک (GA) [۱]، الگوریتم دیفرانسیل تکاملی (DE) [۲]، کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) [۳]، الگوریتم بهینه سازی ذرات عمومی (PSO) [۴]، الگوریتم کلونی مورچگان (AC) [۵]، پختن شبیه سازی شده (SA) [۶]، الگوریتم جستجوی هارمونی (HAS) [۷]، الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیر غالب شده (NSGAI) II [۸]، جستجوی سیستم های شارژ شده (CSS) [۹]، بهینه سازی مبتنی بر جغرافیا (BBO) [۱۰] و الگوریتم بهینه سازی جستجوی غذای باکتری (BFO) [۱۱].

تابع هدف همه الگوریتم های بهینه سازی برای پیدا کردن بهترین جواب (بهینه سازی عمومی) برای مسائل بهینه سازی عمل می نماید. با این حال، این الگوریتم های متاکتشافی باید خودشان دارای ۲ ویژگی اصلی که اکتشاف و بهره برداری است، باشند. اکتشاف به عنوان توانایی الگوریتم برای جستجوی همه قسمت های مشخص شده مسال بهینه سازی در فضای جستجو معرفی می شود. بهره برداری به عنوان قابلیت همگرایی بهترین جواب خروجی بدست آمده نزدیک به راه حل بهینه سازی عمومی توصیف می شود [۱۲]. تابع هدف مساله ELD به عنوان مینیمم ساز مجموعه هزینه سوخت تولید انرژی الکتریکی برای برطرف کردن تقاضای بار مصرفی با مینیمم کردن مجموع هزینه سوخت معرفی می شود در حالی که رضایت همه واحدهای تولیدی و قیود مساوی و نامساوی سیستم را برطرف نماید [۱۳]. یکی از الگوریتم های متاکتشافی بهبود یافته اخیر الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) می باشد، که مبتنی بر قانون گرانش نیوتن و قانون حرکت است. و بوسیله راشدی و همکارانش در سال ۲۰۰۹ مطرح گردیده شد [۱۳]. میرجلیلی و هشیم [۱۲] یک الگوریتم نوین ترکیبی با بهینه سازی ذرات عمومی و الگوریتم جستجوی گرانشی (PSOGSA) را مطرح نمودند. این الگوریتم بدنبال جستجوی راه حل بهینه عمومی خیلی بهتر از روش های PSO, GSA می باشد. که سرعت کل عامل PSO-GSA با الگوریتم قید ماکزیمم سرعت تنظیم می شود.

در این مقاله، مساله توزیع بهینه روزانه کوتاه مدت سیستم های آبی حرارتی (DHS) با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) حل خواهد شد. همچنین روش بهینه سازی ازدحام ذرات به الگوریتم

جستجوی گرانشی برای به روز رسانی سرعت عوامل معرفی می شود که GSA را یک استراتژی حرکتی در فضای جستجو با توجه به تبعیت از قانون جاذبه و دریافت راهنمای حافظه و اطلاعات اجتماعی، می سازد. به منظور بررسی امکان سنجی و تاثیر پذیری روش PSO-GSA مطرح شده، یک سیستم آزمایش آبی حرارتی با مخازن آبخاری زنجیره ای و همچنین با نیروگاه حرارتی، را با روش PSO-GSA حل کرده ایم. نتایج بهینه سازی بدست آمده بوسیله PSO-GSA با دیگر روش های بهینه سازی گزارش شده در منابع مقایسه می شوند. سازمان دهی مقاله به صورت زیر می باشد.

بخش ۲: فرمول های ریاضی مسئله DHS را فراهم می کند.

بخش ۳: به طور خلاصه اصول اولیه GSA را معرفی می کند.

بخش ۴: PSO-GSA را برای حل مساله DHS ارائه می دهد.

بخش ۵: مثال عددی می دهد.

بخش ۶: نتیجه گیری را تشریح می کند.

۲- پخش بار اقتصادی نیروگاه های آبی-حرارتی

یک توزیع اقتصادی موثر نه تنها هزینه تولید سیستم های آبی-حرارتی را کاهش می دهد، بلکه توانایی ذخیره سازی انرژی را نیز حداکثر می کند. بنابر این با توجه به این اهم تابع هدف و قیود مرتبط با مساله توزیع اقتصادی به اختصار در زیر بیان می شود

تابع هدف:

$$\min F = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{N_s} f_i(P_{st}^j) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{N_s} \left\{ a_i + b_i P_{st}^j + c_i (P_{st}^j)^2 + d_{gi} \times \sin \{ e_{gi} \times (PG_{i,\min} - PG_{st}^j) \} \right\} \quad (1)$$

که F تابع هزینه سوخت مرکب است،

$f_i(P_{st}^j)$ هزینه سوخت واحد i ام حرارتی در مدت زمان t،

N_s تعداد واحدهای حرارتی، T مجموع زمان های مورد نظر،

a_i و b_i و c_i ضرایب تولید حرارتی از واحد i ام،

d_{gi} و e_{gi} ضرایب مربوط به اثر شیر بخار از واحد i ام

P_{st}^j توان تولیدی واحد حرارتی i ام در فاصله زمانی t می باشند.

محدودیت تولید توان نیروگاه حرارتی :

$$P_{sj}^{\min} \leq P_{sj}^t \leq P_{sj}^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, N_s; t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

که P_{sj}^{\max} و P_{sj}^{\min} مینیم و ماکزیمم توان تولیدی واحد حرارتی j هستند.

$$i = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots T$$

که Q_i^t آب تخلیه شده از نیروگاه آبی i در فاصله زمانی t ، Q_i^{min} و Q_i^{max} مینیمم و ماکزیمم تخلیه آب نیروگاه هستند.

محدودیت مربوط به بقاء آب:

$$V_i^t = V_i^{t-1} + I_i^t - Q_i^t - S_i^t + \sum_{m=1}^{N_u} [Q_m^{t-\tau_{m,i}} + S_m^{t-\tau_{m,i}}] \quad (9)$$

$$i = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots T$$

که I_i^t جریان طبیعی به مخزن i در دوره t ، S_i^t آب نشت داده شده نیروگاه آبی i در فاصله زمانی t ، N_u تعداد نیروگاه‌های آبی بالا دست مسیر نیروگاه آبی i ، $\tau_{m,i}$ زمان تاخیر انتقال آب از مخزن m به i .

تابع تولید آلودگی:

$$F_{ei}(PG_{it}) = [10^{-2}(a_{Gi} + \beta_{Ci}PG_{it} + Y_{Gi}PG_{it}^2)] + |\eta_{Gi} \exp(\delta_{Gi}PG_{it})| \quad (10)$$

۲- الگوریتم ترکیبی PSO-GSA

۳-۱- الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)

الگوریتم جستجوی گرانشی یکی از جدیدترین الگوریتم جستجوی تصادفی توسعه یافته شده بوسیله گروه راشدی و همکاران می باشد که در سال ۲۰۰۹ بدست آمد [۱۳]. این الگوریتم که بر پایه قانون جاذبه ی نیوتن و اثر متقابل جرم می باشد، دارای یک پتانسیل بسیار زیاد به یک روش بهینه سازی از طریق شکستن است. در GSA، عواملی در نظر گرفته می شوند مانند اشیاء و عملکرد آنها که بوسیله جرم شان اندازه گیری می شوند. همه ی آن اشیاء جذب یکدیگر می شوند بوسیله نیروی گرانشی و این نیرو باعث حرکت عمومی همه اشیاء نسبت به اشیاء با توده ای سنگین تر می شود. از این رو توده با استفاده از یک فرم مستقیم ارتباطی از طریق قدرت گرانشی همبسته می شوند. توده های سنگین راه حل های خوب و حرکت آهسته تر دارد. و بر عکس توده سبک راه حل های ضعیف دارند و حرکت به طرفین آن از توده های سنگین بسیار سریع تر است.

$$\sum_{i=1}^{N_h} P_{hi}^t + \sum_{j=1}^{N_s} P_{sj}^t = P_D^t, \quad t = 1, 2 \dots T \quad (3)$$

که P_D^t بار معرفی سیستم در دوره زمانی t ، N_h تعداد نیروگاه های آبی، P_{hi}^t توان تولیدی نیروگاه آبی i در دوره زمانی t می باشد.

تابع تولید نیروگاه های آبی:

$$P_{hi}^t = C_{1i} \cdot (V_i^t)^2 + C_{2i} \cdot (Q_i^t)^2 + C_{3i} \cdot V_i^t \cdot Q_i^t + C_{4i} \cdot V_i^t + C_{5i} \cdot Q_i^t + C_{6i} \quad (4)$$

که در آن

که $C_{1i}, C_{2i}, C_{3i}, C_{4i}, C_{5i}, C_{6i}$ ضرائب تولید برق نیروگاه برق آبی i ام هستند.

V_{it} : حجم آب ذخیره شده واحد آبی i ام در ساعت t ام

Q_{it} : دبی آب خارج شده از واحد آبی i ام در ساعت t ام

PH_{it} : انرژی تولید شده واحد آبی i ام در ساعت t ام

که البته محدودیت های تولید توان نیروگاه آبی به صورت زیر بیان می گردد

$$P_{hi}^{min} \leq P_{hi}^t \leq P_{hi}^{max}, \quad i = 1, 2 \dots N_h; t = 1, 2 \dots T \quad (5)$$

محدودیت مربوط به حجم مخازن:

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max}, \quad i = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots T \quad (6)$$

که V_i^t اندازه ی آب مخزن i در پایان دوره t ، V_i^{min} و V_i^{max} مینیمم و ماکزیمم اندازه آب مخزن i هستند.

همچنین حجم ذخیره سازی اولیه و عبوری مخزن به صورت زیر معرفی می گردد

$$V_i^0 = V_i^{begin}, \quad V_i^T = V_i^{end} \quad i = 1, 2 \dots N \quad (7)$$

که V_i^{begin} حجم ذخیره اولیه مخزن i ، V_i^{end} حجم ذخیره نهایی مخزن i در پایان توزیع مورد نظر می باشد.

محدودیت مربوط به دبی خروجی سدها:

$$Q_i^{min} \leq Q_i^t \leq Q_i^{max} \quad (8)$$

مرحله چهارم: به روز کردن گرانش و اینرسی جرم: در این مرحله گرانشی و اینرسی جرم‌ها برای هر عامل در هر تکرار به صورت زیر به روز می‌شود.

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

$$m_i(tt) = \frac{fit_i(tt) - worst(tt)}{best(tt) - worst(tt)} \quad (16)$$

که $fit_i(tt)$ تناسب عامل i ام در تکرار tt می‌باشد.

$$M_i(tt) = \frac{m_i(tt)}{\sum_{j=1}^N m_j(tt)} \quad (17)$$

که M_{ai} جرم گرانشی فعال از عوامل i ام، M_{pi} جرم گرانشی غیر فعال از عامل i ام، M_{ii} جرم اینرسی عامل i ام، $M_i(tt)$ جرم عامل i ام در تکرار tt می‌باشند.

مرحله پنجم: محاسبه نیروی کل:

در این مرحله نیروی کل قطعی روی عامل $(F_i^d(tt))$ به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$F_i^d(tt) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j \cdot F_{ij}^d(tt) \quad (18)$$

$$best(tt) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(tt) \quad (11)$$

که $rand_j$ عدد اتفاقی بین فاصله [۰ و ۱] است. نیروی قطعی روی جرم i ام $M_i(tt)$ از جرم j ام $M_j(tt)$ در تکرار خاص tt بر اساس توصیف تئوری گرانشی به شکل زیر می‌باشد:

$$F_{ij}^d(tt) = G(tt) \cdot \frac{M_{pi}(tt) \times M_{aj}(tt)}{R_{ij}(tt) + \varepsilon} (x_j^d(tt) - x_i^d(tt)) \quad (19)$$

که $R_{ij}(tt)$ فاصله اقلیدسی بین عوامل i ام و j ام است $(\|X_i(tt) - X_j(tt)\|_2)$ و ε ثابت کوچک است.

مرحله ششم: محاسبه شتاب و سرعت

در این مرحله شتاب $a_i^d(tt)$ و سرعت $v_i^d(tt)$ از عامل i ام در تکرار (tt) در بعد d از طریق قانون جاذبه و قانون حرکت به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

این گام، بهره بردای الگوریتم را تضمین می‌کند. هر جرمی (عاملی) دارای ۴ خصوصیات در GSA است. موقعیت، اینرسی جرم، جرم گرانشی فعال و جرم گرانشی غیر فعال.

برخی از سرعت و موقعیت طرح به روز شده عوامل در اینجا به کار گرفته شده‌اند. سرعت هر عامل بعد از محاسبه شتاب هر عامل با استفاده از قانون نیوتن به روز می‌شود. در نتیجه مکان هر عامل با استفاده از سرعت اصلاح شده به روز می‌شود.

موقعیت جرم به راه حل بهینه‌سازی مساله مربوط می‌شود و همچنین گرانش و جرم‌های اینرسی (جرمی که از قانون اینرسی نیوتن تبعیت می‌کند) تابع متناسب را نمایش می‌دهد. الگوریتم GSA می‌تواند به صورت مراحل زیر خلاصه شود.

مرحله اول مقداردهی اولیه: که فرض می‌کنیم یک سیستم با N (بعد از فضای جستجو) جرم‌ها، موقعیت جرم i ام به شکل زیر توصیف می‌شود. در ابتدا، موقعیت توده‌ها و جرم‌ها به طور اتفاقی تنظیم می‌شوند. که به صورت $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d, \dots, x_i^N)$ است که x_i^d موقعیت جرم i ام در بعد d ام می‌باشد.

مرحله دوم ارزیابی متناسب کردن همه عوامل:

در این مرحله برای اجرای همه عوامل در هر تکرار و بهترین و بدترین تناسب را در هر تکرار به شرح زیر محاسبه می‌کنند برای یک مسئله مینیمم‌سازی

$$worst(tt) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(tt) \quad (11)$$

برای یک مسئله ماکزیمم‌سازی

$$best(tt) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(tt) \quad (12)$$

$$worst(tt) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(tt) \quad (13)$$

که $fit_j(tt)$ تناسب عامل j ام از تکرار tt . $best(tt)$ و $worst(tt)$ بهترین (مینیمم) و بدترین (ماکزیمم) تناسب همه عوامل هستند.

مرحله سوم: محاسبه ثابت گرانشی $G(tt)$

در این مرحله ثابت گرانشی در تکرار tt به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$G(tt) = G_0 \exp\left(-\alpha \frac{tt}{T_{max}}\right) \quad (14)$$

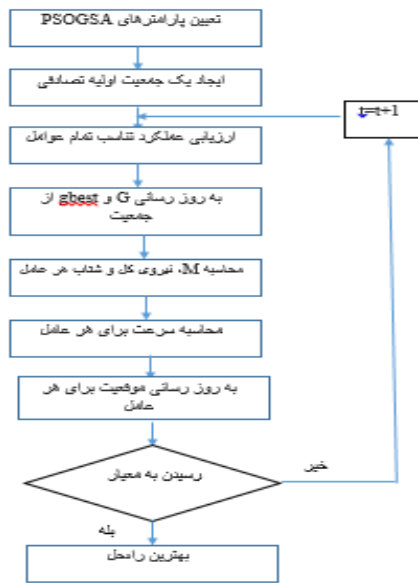
که G مقدار اولیه ثابت گرانشی است که به صورت اتفاقی انتخاب شده است α ثابت است، tt تکراری جاری است، T_{max} مجموع تعداد تکرارها می‌باشند.

۳-۳- ترکیب الگوریتم PSO با الگوریتم GSA

این امر جهت به روز رسانی سرعت عوامل انجام می پذیرد. بر طبق اصل GSA، به روز کردن سرعت عوامل کلیدی برای نفوذ عملکرد GSA است همانطور که برای ما شناخته شده، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (psO) به خوبی با جمعیت مبتنی بر الگوریتم جستجوی تصادفی در هر دوی GSA و PSO، بواسطه فرآیند بهینه‌سازی بدست آمده با حرکت عامل در فضای جستجو و موقعیت عوامل به روز شده با سرعت مشخص می‌شود. PSO استفاده از یک نوع حافظه و اطلاعات جمعی در میان عوامل، که از اعضای جمعیت می‌تواند انتظار برود به حرکت به سمت راه حل بهینه به همان سرعتی که ممکن است، عمل می‌نماید. ما می‌توانیم PSO را به GSA بوسیله معرفی ایده‌ی مموری و اطلاعات جمعی PSO به بهبود کارایی GSA ادغام نمائیم. الگوریتم جستجوی گرانشی افزایش PSO GSA یک استراتژی حرکتی نوین در فضای جستجوگر، اطاعت از قانون جاذبه و دریافت راهنمایی حافظه و اطلاعات جمعی را دارد.

معادله ی به روز رسانی اصلاح سرعت از رابطه (۲۵) برای الگوریتم ترکیبی PSO GSA بدست می آید [12].

$$v_i^d(tt+1) = rand(0,1) \times v_i^d(tt) + a_i^d(tt) + rand(0,1) \cdot (gbest^d(tt) - x_i^d(tt)) + rand(0,1) \cdot (pbest_i^d(tt) - x_i^d(tt)) \quad (25)$$



شکل (۱) روند نمایی مربوط به الگوریتم PSO GSA

$$a_i^d(tt) = \frac{F_i^d(tt)}{M_{ii}(tt)} \quad (20)$$

$$v_i^d(tt+1) = rand_i \times v_i^d(tt) + a_i^d(tt) \quad (21)$$

که $rand_i$ عدد اتفاقی بین فاصله [۰ و ۱] است.

مرحله هفتم: به روز کردن موقعیت عوامل:

در این مرحله موقعیت بعدی عوامل d ام در بعد d ام $x_i^d(tt+1)$ به شکل زیر به روز می‌شوند.

$$x_i^d(tt+1) = x_i^d(tt) + v_i^d(tt+1) \quad (22)$$

مرحله هشتم: تکرار:

در این مرحله، مراحل ۲ تا ۷ تکرار می‌شوند تا وقتی که تکرارها به معیار برسند. در تکرار نهایی، بازده الگوریتم، مقدار موقعیت‌های عامل مربوطه در ابعاد مشخص را می‌دهد. این مقادیر راه‌حل‌های عمومی مسئله بهینه‌سازی هستند.

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی ذرات عمومی (PSO)

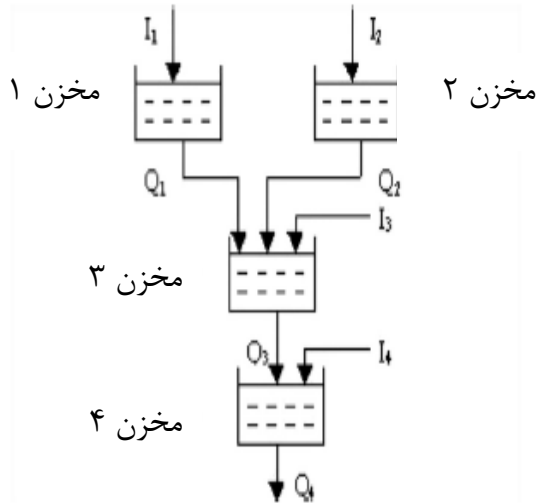
الگوریتم PSO یک روش بهینه‌سازی جستجوی تصادفی جدید است که توسط کندی و آبرهات ابداع شده است [۴]. این الگوریتم از مشاهده رفتار اجتماعی پرندگان، ماهی‌ها و زنبورها نشأت گرفته است. در الگوریتم PSO مجموعه‌ای از ذرات (معادل هر یک از جواب‌های کاندیدا برای حل مسئله بهینه‌سازی) گروه را تشکیل می‌دهند. هر ذره فضای اطرافش را برای پیدا کردن کمینه یا بیشینه محلی جستجو می‌کند. در طی جستجو هر ذره موقعیت خود را طبق تجربه خودش و تجربه بهترین همسایه‌اش اصلاح می‌کند.

برای فرموله کردن الگوریتم PSO دو متغیر x و v به ترتیب با عنوان موقعیت و سرعت ذره تعریف می‌شود. بهترین موقعیت ذره (از لحاظ شایستگی در تابع هدف) با P -best و بهترین موقعیت بهترین ذره در کل گروه با عنوان g -best شناخته می‌شود. برای اطمینان از همگرایی PSO استفاده از ضرایبی موسوم به ضرایب انقباض برای تنظیم مناسب پارامترهای PSO لازم است. روابط اصلاح شده سرعت و موقعیت ذره را با توجه به ضرایب انقباض می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$v_{d+1} = a * (w * v_d + \phi_1 * RAND * (P_best - x_d) + \phi_2 * rand * (g_best - x_d)) \quad (23)$$

$$x_{d+1} = x_d + v_{d+1} \quad (24)$$

۴- شبیه‌سازی کامپیوتری



شکل (۲) سیستم شبکه مورد مطالعه هیدرولیکی

جدول (۱) بار مصرفی (MW)

Hour	PD(MW)	Hour	PD(MW)	Hour	PD(MW)
۱	۷۵۰	۹	۱۰۹۰	۱۷	۱۰۵۰
۲	۷۸۰	۱۰	۱۰۸۰	۱۸	۱۱۲۰
۳	۷۰۰	۱۱	۱۱۰۰	۱۹	۱۰۷۰
۴	۶۵۰	۱۲	۱۱۵۰	۲۰	۱۰۵۰
۵	۶۷۰	۱۳	۱۱۱۰	۲۱	۹۱۰
۶	۸۰۰	۱۴	۱۰۳۰	۲۲	۸۶۰
۷	۹۵۰	۱۵	۱۰۱۹	۲۳	۸۵۰
۸	۱۰۱۰	۱۶	۱۰۶۰	۲۴	۸۰۰

برای سنجش کارایی و بررسی موثر بودن الگوریتم PSO-GSA حل مساله DHS که هدف مساله مینیمم کردن هزینه تولید نیروگاه-های حرارتی با بهره‌گیری از ماکزیمم ظرفیت تولید نیروگاه‌های برقی می‌باشد. یک سیستم هفت نیروگاهی (شامل چهار نیروگاه آبی و سه نیروگاه حرارتی) در این مقاله، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

پیکره بندی این سیستم در شکل (۲) نشان داده شده است. جزئیات اطلاعات استفاده شده برای شبکه آزمایشی ارائه شده در جداول (۱) تا (۶) داده شده است.

اطلاعات بار مصرفی برای ۲۴ ساعت در جدول (۱) داده شده است. در حالی که جدول (۲) اطلاعات مربوط به نیروگاه‌های آبی را می‌دهد. در جدول (۳) واحدهای ذخیره 10^4 m^3 هستند، در حالی که واحدهای میزان تخلیه آب $10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ هستند. اطلاعات مربوط به واحد حرارتی در جدول (۳) آورده شده است. اطلاعات مربوط به زمان تأخیر انتقال آب و تعداد نیروگاه‌های بالا دست در جدول (۴) داده شده است.

الگوریتم ترکیبی PSO-GSA جهت حل مساله توزیع اقتصادی روزانه در سیستم مورد مطالعه در محیط نرم افزاری MATLAB کدنویسی شده است. دوره زمان بندی ۲۴ ساعته با فواصل یک ساعته در نظر گرفته شده است. برای پیاده سازی الگوریتم PSO-GSA برای حل مسئله DHS، تنظیمات بهینه پارامترهای مختلف مورد نیاز هستند. برای این سیستم مورد مطالعه، برنامه کامپیوتری چندین بار اجرا شده است. بر این اساس پارامترهای بهینه ذیر مشخص شده‌اند تا بهترین عملکرد الگوریتم PSO-GSA ارائه شده به دست آیند:

$\alpha = 50$ = اندازه جمعیت

$G0 = 130$ = ثابت گرانشی اولیه

$\alpha = 20$ = فاکتور

2500 = حداکثر تکرار تولید.

جدول (۲) اطلاعات نیروگاه‌های آبی

واحد	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	V_h^{\min} (m^3)	V_h^{\max} (m^3)	V_{hini} (m^3)	V_{hend} (m^3)	Q^{\min} ($\times 10^4$ m^3/h)	Q^{\max} ($\times 10^4$ m^3/h)	Ph_{\min} MW	Ph_{\max} MW
۱	-۰,۰۰۴۲	۰,۴۲	۰,۰۳۰	۰,۹۰	۱۰,۰	-۵۰	۸۰	۱۵۰	۱۰۰	۱۲۰	۵	۱۵	۰	۵۰۰
۲	-۰,۰۰۴۰	۰,۳۰	۰,۰۱۵	۱,۱۴	۹,۵	-۷۰	۶۰	۱۲۰	۸۰	۷۰	۶	۱۵	۰	۵۰۰
۳	-۰,۰۰۱۶	۰,۳۰	۰,۰۱۴	۰,۵۵	۵,۵	-۴۰	۱۰۰	۲۴۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۰	۳۰	۰	۵۰۰
۴	-۰,۰۰۳۰	۰,۳۱	۰,۰۲۷	۱,۴۴	۱۴,۰	-۹۰	۷۰	۱۶۰	۱۲۰	۱۴۰	۶	۲۰	۰	۵۰۰

جدول (۳) اطلاعات نیروگاه های حرارتی

Unit	a_s (\$/h)	b_s (\$/ MWh)	c_s (\$/(MW) ² h)	d_s (\$/h)	e_s (rad / MW)	a_s (ton / h)	β_s (ton / MWh)	γ_s (ton / MW ² h)	η_s (ton / h)	δ_s (1 / MW)	P_s^{\min} (MW)	P_s^{\max} (MW)
۱	۱۰	۲,۰۰	۰,۰۰۳۷	۱۸	۰,۰۳۷	۴,۰۹۱	$-5.554E^{-2}$	$6.49E^{-4}$	$2.0E^{-4}$	$2.857E^{-2}$	۲۰	۱۷۵
۲	۱۰	۱,۷۵	۰,۰۱۷۵	۱۶	۰,۰۳۸	۲,۵۴۳	$-6.047E^{-2}$	$5.638E^{-4}$	$5.0E^{-4}$	$3.333E^{-2}$	۴۰	۳۰۰
۳	۲۰	۱,۰۰	۰,۰۶۲۵	۱۴	۰,۰۴۰	۴,۲۵۸	$-5.94E^{-2}$	$4.586E^{-4}$	$1.0E^{-6}$	$8.000E^{-3}$	۵۰	۵۰۰

τ_d (h) | ۱ ۱ ۲ ۰
 تعداد نیروگاه : R_u زمان تاخیر عبور آب : τ_d

جدول (۵) تخلیه ساعتی نیروگاه آبی ($\times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$)

زمان	نیروگاه ۱	نیروگاه ۲	نیروگاه ۳	نیروگاه ۴
۱	۵	۶	۱۲,۴۷۴	۱۳,۴۰۹
۲	۵,۷۶۲	۶	۱۲,۷۴۶	۱۵,۸۶۱
۳	۵	۶	۱۲,۹۲۵	۱۴,۳۰۲
۴	۵	۶	۱۳,۷۷۴	۱۳,۲۲۸
۵	۵	۶	۱۴,۰۲۲	۲۰
۶	۵	۶	۱۴,۲۳۴	۲۰
۷	۷,۹۵۵	۶	۱۴,۱۸۲	۲۰
۸	۹,۳۵۳	۶	۱۴,۳۲	۲۰
۹	۱۰,۷۹۶	۶,۳۲۷	۱۴,۳۹۲	۲۰
۱۰	۱۰,۶۸۶	۶,۵۰۲	۱۴,۶۹۸	۲۰
۱۱	۱۱,۰۰۱	۷,۵۲۱	۱۴,۹۶	۲۰
۱۲	۱۱,۷۳۱	۹,۲۶۱	۱۵,۱۴	۲۰
۱۳	۱۱,۴۱۷	۸,۹۰۹	۱۵,۶۳۳	۲۰
۱۴	۱۰,۵۱۲	۷,۳۳۳	۱۶,۴۴۱	۲۰
۱۵	۱۰,۴۸۶	۷,۴۶۹	۱۶,۹	۲۰
۱۶	۱۱,۱۷۹	۷,۰۹۷	۱۶,۹۸	۲۰
۱۷	۱۱,۱۸	۹,۴۲۱	۱۷,۳۴۴	۲۰
۱۸	۱۲,۲۱۱	۱۱,۶۵۴	۱۷,۰۲۷	۲۰
۱۹	۱۱,۸۷	۱۱,۴۵۲	۱۷,۶۳۱	۲۰
۲۰	۱۱,۸۶	۱۲,۰۷۱	۱۸,۰۳	۲۰
۲۱	۹,۶۹	۱۵	۲۰,۶۵۶	۲۰
۲۲	۱۴,۱۲۹	۱۵	۲۲,۷۶۶	۲۰
۲۳	۱۴,۵۹۲	۱۵	۲۲,۷۶۱	۲۰
۲۴	۱۴,۸۹	۱۵	۱۴,۷۶۷	۲۰

مقدار آب جاری شده به سد ها از جریان طبیعی رودخانه در مرجع [14*] آورده شده است.

بر اساس پارامترهای انتخاب شده، الگوریتم PSO-GSA را ۲۵ بار از جمعیت های اولیه مختلف به صورت متوالی اجرا و بهترین نتیجه انتخاب می شود. مجموع هزینه نیروگاه حرارتی در فاصله زمانی به دست آمده برابر \$ ۱۰۹۸۵۷ است. ساعت نهایی هر نشت مخزن، ذخیره سازی به دست آمده با GSA به ترتیب در جدول (۵) و جدول (۶) داده شده است.

به منظور اعتبارسنجی حاصل از اجرای الگوریتم PSO-GSA جهت حل مساله DHS، در مقایسه با الگوریتم DE [۱۵]، برنامه کامپیوتری تهیه شده، ۲۵ بار اجرا شده و بر اساس آن ماکزیمم، میانگین و مینیمم، هزینه کلی واحد حرارتی در دو حالت با و بدون اثر موقعیت شیر بخار در جدول (۷) مقایسه شده است و مقادیر هر بار اجرا در جدول (۸) آورده شده است.

جدول (۶) ذخیره سازی ساعتی نیروگاه آبی ($\times 10^4 \text{ m}^3$)

ساعت	نیروگاه ۱	نیروگاه ۲	نیروگاه ۳	نیروگاه ۴
۱	۱۰۰	۸۰	۱۷۰	۱۲۰
۲	۱۰۵	۸۲	۶۲۶/۱۶	۱۰۹/۳۹
۳	۱۰۸/۲۳	۸۴	۱۰۸/۱۶	۹۵/۹۲
۴	۱۱۱/۲۳	۸۷	۱۸۷/۱۸	۸۳/۲۲
۵	۱۱۳/۲۳	۹۰	۱۸۷/۱۷	۷۰
۶	۱۱۴/۲۳	۹۲	۱۸۷/۱۵	۱۶۰
۷	۱۱۶/۲۳	۹۳	۱۸۷/۹۱	۱۶۰
۸	۱۱۶/۲۸	۹۳	۱۸۷/۷۳	۱۶۰
۹	۱۱۵/۹۳	۹۴	۱۸۶/۴۱	۱۶۰
۱۰	۱۱۵/۱۳	۹۵/۶۷	۱۸۶/۹۷	۱۶۰
۱۱	۱۱۵/۴۴	۹۸/۱۷	۱۸۸/۶۳	۱۶۰
۱۲	۱۱۶/۴۴	۹۹/۶۵	۱۹۱/۴۶	۱۶۰
۱۳	۱۱۴/۷۱	۹۸/۳۹	۱۹۵/۳۴	۱۶۰
۱۴	۱۱۴/۳	۹۷/۴۸	۲۰۱/۲۱	۱۶۰
۱۵	۱۱۵/۷۷	۹۹/۱۴	۲۰۷/۰۲	۱۶۰
۱۶	۱۱۶/۳۰	۱۰۰/۶۷	۲۱۳/۷۹	۱۶۰
۱۷	۱۱۵/۱۲	۹۹/۵۸	۲۱۸/۲۴	۱۶۰
۱۸	۱۱۲/۹۴	۹۷/۱۶	۲۲۰/۷۱	۱۶۰
۱۹	۱۰۸/۷۳	۹۱/۵۰	۲۲۴/۳۳	۱۶۰
۲۰	۱۰۳/۸۶	۸۷/۰۵	۲۲۷/۹۸	۱۶۰
۲۱	۹۸/۰۰۲	۸۲/۹۸	۲۳۲/۵۸	۱۶۰
۲۲	۹۵/۳۱	۷۶/۹۸	۲۳۷/۴۵	۱۶۰
۲۳	۸۹/۱۸	۷۰/۹۸	۲۴۰	۱۶۰
۲۴	۸۳/۵۹	۶۳/۹۸	۲۴۰	۱۶۰

جدول (۸) مجموع هزینه نیروگاه حرارتی در ۲۵ بار اجرای برنامه (\$/h)

مرتبۀ اجرای برنامه	۱	۲	۳	۴	۵
هزینه کلی (\$/h)	۱۱۰۰۱۱	۱۰۹۹۱۰	۱۰۹۹۱۹	۱۱۰۱۵۶	۱۱۰۰۰۸
مرتبۀ اجرای برنامه	۶	۷	۸	۹	۱۰
هزینه کلی (\$/h)	۱۰۹۸۵۷	۱۱۰۰۲۰	۱۱۰۱۲۰	۱۱۰۲۱۰	۱۱۰۲۱۵
مرتبۀ اجرای برنامه	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
هزینه کلی (\$/h)	۱۱۰۴۸۹	۱۰۹۸۷۹	۱۱۰۳۴۰	۱۱۰۲۵۶	۱۱۰۳۱۵
مرتبۀ اجرای برنامه	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
هزینه کلی (\$/h)	۱۱۰۴۷۰	۱۰۹۹۵۸	۱۰۹۹۹۸	۱۱۰۲۵۹	۱۱۰۳۵۱
مرتبۀ اجرای برنامه	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵
هزینه کلی (\$/h)	۱۱۰۱۸۰	۱۱۰۳۹۰	۱۱۰۰۱۹	۱۱۰۱۸۷	۱۱۰۳۰۱

جدول (۷) مقایسه هزینه کلی واحد حرارتی در روش GSA (بر حسب \$/h)

روش	مینیمم	متوسط	ماکزیمم
DE بدون اثر شیربخار	۱۲۶۸۹۰	۱۲۷۲۴۵	۱۲۷۷۳۴
PSOGSA بدون اثر شیربخار	۱۰۹۷۸۶	۱۰۹۹۹۷	۱۱۰۴۶۸
PSOGSA با اثر شیربخار	۱۰۹۸۵۷	۱۱۰۲۵۶	۱۱۰۴۸۹

پس از مشخص شدن بهترین جواب برای کمینه کردن هزینه تولید نیروگاه حرارتی، مقادیر تولید هریک از نیروگاه های آبی در جدول (۹) و همچنین میزان تولید نیروگاه های حرارتی و مجموع مقدار آلاینده های این واحدها در جدول (۱۰) برای هریک از ساعات شبانه روز نشان داده خواهد شد.

جدول (۹) میزان تولید نیروگاه‌های آبی

ساعت	Ph1(MW)	Ph2(MW)	Ph3(MW)	Ph4(MW)
۱	۷۷,۱۰۹۲	۶۲,۵۸۹	۱۰,۵۲۸۴	۱۹۲,۵۶۹
۲	۸۵,۱۸۱۸	۶۳,۷۱۰۹	۵۲,۴۸۸۸	۱۷۵,۶۲۰۵
۳	۶۶,۵۳۹۶	۶۱,۴۷۲۹	۱۹,۹۶۸۶	۱۷۷,۱۷۱۹
۴	۵۹,۰۳۳۴	۶۴,۱۳۱۶	۱۱,۵۶۳۲	۱۲۷,۶۸۷۶
۵	۹۲,۱۵۸۸	۶۰,۱۶۶۳	۲۸,۰۶۹۶	۱۸۶,۷۴۶۲
۶	۷۷,۷۴۲۷	۵۲,۵۸۹۱	۳۰,۶۷۱۵	۱۱۷,۵۳۸۶
۷	۵۶,۶۳۱۹	۷۳,۵۴۰۷	۴۲,۶۰۷۱	۱۹۰,۲۲۴۲
۸	۸۳,۶۳۳۳	۵۳,۱۷۵۴	۳۵,۱۳۰۹	۲۴۳,۸۸۷۹
۹	۸۷,۸۱۱۷	۷۷,۲۲۱۷	۴۶,۲۱۳۸	۲۱۴,۴۳۷
۱۰	۷۶,۸۳۴۳	۴۹,۴۸۳۹	۴۴,۴۱۹۴	۲۳۹,۱۸۲۹
۱۱	۶۹,۷۶۱۵	۶۰,۰۶۰۵	۴۹,۷۰۲	۲۷۴,۰۸۵۱
۱۲	۶۵,۶۴۹۸	۶۴,۹۸۳۴	۴۹,۸۱۸۲	۲۴۹,۳۶۷۴
۱۳	۸۹,۹۰۰۶	۷۰,۹۵۲۸	۴۱,۴۴۹۱	۲۶۹,۸۸۲۱
۱۴	۶۴,۶۹۶	۶۳,۲۹۱۷	۵۲,۸۱۴۲	۱۹۷,۸۴۲۹
۱۵	۶۸,۱۰۸۵	۵۳,۲۱۱۲	۵۴,۷۲۰۳	۲۳۵,۲۰۲۹
۱۶	۸۵,۵۴۲۳	۷۰,۰۳۵۵	۵۶,۹۵۷۵	۲۶۲,۶۲۸۱
۱۷	۸۶,۱۰۴۸	۶۱,۳۶۷۱	۵۴,۰۳۰۵	۲۲۵,۰۷۵
۱۸	۸۵,۷۶۷۴	۶۳,۰۹۶۷	۵۵,۸۲۸۵	۱۹۰,۱۷۲۳
۱۹	۶۰,۳۷۶۶	۵۸,۲۶۲۵	۵۵,۶۹۹۸	۲۵۱,۴۵۵۴
۲۰	۷۸,۷۸۲	۵۸,۶۹۶۶	۴۸,۲۴۲۸	۲۲۰,۷۰۸۶
۲۱	۸۲,۲۵۰۶	۵۴,۶۹۵۷	۵۸,۹۲۳۶	۲۷۱,۷۳۰۳
۲۲	۶۶,۹۴۴۶	۵۸,۶۵۰۷	۵۸,۱۲۳۶	۲۱۹,۸۷۶۳
۲۳	۱۰۱,۱۰۱۹	۸۰,۶۳۱	۵۸,۹۰۶	۲۶۹,۴۸۰۹
۲۴	۷۱,۱۴۹۲	۵۶,۵۸۰۶	۴۰,۲۹۴۸	۲۸۴,۸۴۰۲

جدول (۱۰) میزان تولید نیروگاه‌های حرارتی و میزان آلودگی

ساعت	PS1(MW)	PS2(MW)	PS3(MW)	ef(ton)
۱	۱۴۱,۸۰۰۵	۱۳۷,۵۸۳۳	۱۱۲,۲۱۶۷	۰,۴۵۳
۲	۱۰۸,۰۶۲۲	۱۷۹,۲۸۸۷	۱۱۹,۱۲۹۸	۰,۵۴۵
۳	۱۱۳,۹۸۲۱	۱۰۹,۲۳۷۱	۱۹۵,۴۵۳۳	۰,۵۴۰
۴	۱۳۳,۶۱۰۹	۱۲۲,۸۴۰۶	۱۲۸,۳۴۳۸	۰,۵۳۶
۵	۳۳,۹۷۵۱	۱۱۵,۶۶۰۳	۱۵۰,۰۱۷۱	۰,۵۳۷
۶	۱۳۰,۸۷۱۷	۱۳۹,۷۵۴۳	۲۴۴,۶۰۸۱	۰,۵۴۹
۷	۱۲۴,۴۲۹۵	۲۳۷,۵۹۸۶	۲۶۴,۴۹۶	۰,۶۱۰
۸	۱۷۵	۱۴۸,۳۶۱۹	۲۴۴,۸۹۹	۰,۷۲۰
۹	۱۰۸,۴۹۴۲	۲۰۲,۵۸۲۴	۳۳۸,۷۴۵۳	۰,۷۳۲
۱۰	۱۶۲,۰۰۳۲	۱۷۸,۰۳۳۵	۲۹۸,۸۷۸۵	۰,۷۳۱
۱۱	۱۲۷,۷۲۷۲	۲۰۷,۰۶۹۸	۳۱۲,۰۲۷۴	۰,۹۲۰
۱۲	۱۳۷,۶۶۲۸	۱۷۲,۲۴۵۱	۳۷۱,۶۴۳۲	۰,۹۲۷
۱۳	۱۳۹,۱۰۵۷	۲۳۶,۶۳۸۴	۲۷۶,۸۰۹	۰,۹۲۲
۱۴	۱۵۹,۰۳۹۵	۲۰۲,۲۵۲۳	۳۲۰,۰۱۹۱	۰,۷۲۵
۱۵	۱۴۹,۹۲۰۱	۱۷۹,۶۲۰۲	۲۶۸,۷۴۸۳	۰,۷۲۲
۱۶	۱۱۵,۸۱۲۳	۲۲۶,۷۰۸۸	۳۰۳,۷۰۱۳	۰,۷۳۰
۱۷	۱۵۸,۶۵۴۲	۱۹۳,۹۶۷	۲۳۶,۰۳۱۳	۰,۷۲۵
۱۸	۱۵۵,۹۶۷۷	۲۲۹,۸۹۵۶	۳۲۲,۹۵۷۴	۰,۹۲۴
۱۹	۱۴۸,۸۹۱۸	۱۹۰,۲۷۰۲	۲۷۲,۱۱۵	۰,۷۲۸
۲۰	۱۵۹,۶۲۷	۱۸۴,۰۱۱۸	۲۶۹,۶۱۸۹	۰,۷۲۵
۲۱	۱۰۰,۳۹۱۶	۱۶۹,۰۳۲	۱۶۸,۴۷۰۲	۰,۶۰۵
۲۲	۱۵۹,۴۷۴۷	۱۳۷,۹۹۳۳	۱۳۹,۳۸۴	۰,۵۵۳
۲۳	۶۹,۰۶۵۱	۱۴۲,۷۷۰۵	۱۳۹,۰۶۲۸	۰,۵۵۲
۲۴	۱۲۳,۶۰۲۶	۱۰۳,۶۵۳۶	۸۹,۵۲۴۶	۰,۵۳۹

۶- نتیجه‌گیری

از آنجا که در کشورهایی چون ایران نیروگاه‌های برقی و حرارتی در شبکه وجود دارد، برنامه ریزی و پخش بار اقتصادی در این شبکه‌ها امری ضروری است. همچنین با توجه به حضور نیروگاه‌های برقی زنجیره ای و نیز در نظر گرفتن اثر موقعیت شیر بخار در واحد های حرارتی، مساله برنامه ریزی در سیستم های آبی حرارتی، یک مساله غیر خطی می باشد. استفاده از الگوریتم ترکیبی PSO-GSA با توجه به عدم نیاز به پارامترهای اضافی از جمله ضریب جریمه، می تواند برای حل مساله توزیع اقتصادی DHS، جواب های منطقی و قابل قبولی را ارائه نماید.

مراجع

- [1] Goldberg DE. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. Reading: Addison-Wesley; 1989.
- [2] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. J Global Optim 1997;11:341-59.

رزومه



امین عبايي فرسال (۱۳۶۷) در دزفول متولد شد. تحصيلات دانشگاهي خود را در مقطع کارشناسي مهندسي برق- قدرت در سال (۱۳۸۹)، از دانشگاه آزاد اسلامي واحد دزفول، اخذ نمود و در حال حاضر دانشجوی کارشناسي ارشد مهندسي برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامي واحد دزفول مي باشد. فعاليت پژوهشي و علاقه مندي ايشان در زمينه بهره برداري از سيستم هاي قدرت و ادوات فکتس مي باشد.



حسن براتي در دزفول متولد شده است (۱۳۴۸). تحصيلات دانشگاهي خود را در مقطع کارشناسي مهندسي برق- الکترونیک از دانشگاه صنعتي اصفهان (۱۳۷۱)، کارشناسي ارشد مهندسي برق- قدرت از دانشگاه تبريز (۱۳۷۵) و دکتری مهندسي

برق- قدرت از دانشگاه آزاد علوم و تحقيقات تهران (۱۳۸۷) سپري کرده است. فعاليت هاي پژوهشي و علاقه مندي ايشان در زمينه ادوات FACTS، کيفيت توان، و بهره برداري از سيستم هاي قدرت است و در حال حاضر استاديار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامي واحد دزفول مي باشد.

¹ dispatching of hydrothermal system

² Gravitational Search Algorithm

- [3] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *J Global Optim* 2007;39(3):459–71.
- [4] Kenedy J, Eberhart RC. Particle swarm optimization. *IEEE Int Conf Neural Netw* 1995;4:1942–8.
- [5] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part B* 1996;26(1):29–41.
- [6] Kitpatrick S, Gelatto CD, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing. *Science* 1983;220:671–80.
- [7] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. A new heuristic optimization algorithm: harmony search. *Simulation* 2001;76(2):60–8.
- [8] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA II. *IEEE Trans Evol Comput* 2002;6(2):182–97.
- [9] Kaveh A, Talatahari S. A novel heuristic optimization method: charged system search. *Acta Mech* 2010;213:267–89.
- [10] Simon D. Biogeography-Based Optimization. *IEEE Trans Evol Comput* 2008;12(6):712–3.
- [11] Passino KM. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *IEEE Control Syst Mag* 2002:52–67.
- [12] Mirjalili S, Hashim SZM. A new hybrid PSO-GSA algorithm for function optimization. In: *International conference on computer and information application (ICCIA 2010)*; 2010. p. 374–7.
- [13] Rashedi E, Nezamabadi-pour H, Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm. *Inform Sci* 2009;179:2232–48.
- [14] *****
- [15] Xiaohui Yuan , Bin Ji a, Zhijun Chen , Zhihuan Chen , “A novel approach for economic dispatch of hydrothermal system via gravitational search algorithm”, *Applied Mathematics and Computation*, 247 535–546, 2014