

طراحی بهینه‌ی برقگیرهای اکسید روی با هدف توزیع میدان الکتریکی با بکارگیری الگوریتم‌های تکاملی و المان محدود

مرتضی قایدی^۱

^۱ استادیار، دانشگاه بیرجند، بیرجند، m.ghayedi@birjamd.ac.ir

چکیده

قسمت‌های مختلف برقگیر صورت نگرفته باشد باعث سوختن آن خواهد شد. از طرف دیگر، مدل‌سازی میدان الکتریکی طراحان را در شناختن و در نظر گرفتن عامل‌های مهم و مؤثر بر حداکثر شدت میدان در برقگیر و جلوگیری از افزایش بیش از حد شیب پتانسیل داخل و خارج که باعث خسارت در سیستم عایقی برقگیر می‌شود به تأمل واداشته است.

بیشتر مقاله‌ها طراحی مدل گذرای قرص‌های اکسید فلزات را در نظر گرفته‌اند [۱]-[۵]، اما توجه این مقاله به بحث طراحی الکترواستاتیکی برقگیرهای اکسید فلزات معطوف است. برای این که به توزیع یکنواخت میدان الکتریکی دست یابیم نیاز به ابعاد و شکل هندسی مناسب قسمت‌های مختلف برقگیر مانند Grading Ring, Spacers, FRP و ... می‌باشد. مقاله‌ی [۶] جایابی مناسب Spacers و Grading Ring را در دو برقگیر ۲۲۰ و ۴۰۰ کیلوولت نشان می‌دهد.

در این مقاله هدف آن است که بتوان با استفاده از تئوری تکرار و الگوریتم‌های تکاملی، طراحی بهینه‌ای برای قسمت‌های ذکر شده‌ی برقگیر اکسید فلزات بدست آورد. محاسبه میدان به روش المان محدود انجام می‌گیرد و تغییر پارامترهای مختلف هندسی ماده عایقی، با یک فرم کلی پیش فرض برای برقگیر، به منظور دستیابی به توزیع مناسب میدان در نظر گرفته شده است. برای انجام محاسبات میدان الکتریکی با روش المان محدود از بسته‌ی نرم‌افزاری COMSOL Multiphysics که قابل اتصال به MATLAB می‌باشد، استفاده می‌شود [۷]. پارامترهای طراحی شامل P1-P5 هستند که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

روش ارائه شده، یک روش کلی بهینه‌سازی برای توابع هدف متفاوت برقگیر است و نه تنها در بهینه‌سازی اهداف مربوط به هندسه‌ی برقگیر مناسب می‌باشد بلکه با ملاحظات و ویژگی‌های مواد به کار برده شده و انواع مختلف مواد عایقی پیرامون اجرا شود. در ادامه نتایج مربوط به الگوریتم‌های تکاملی تفاضلی (DE) و اجتماع ذرات (PSO) در اعمال به مسأله‌ی بهینه‌سازی مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. نتایج نشان

این مقاله طراحی بهینه‌ی یک برقگیر اکسید روی را در حالت الکترواستاتیکی با هدف توزیع میدان الکتریکی مناسب بر روی ستون عایق پرسلین با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند و آنالیز عددی دو بعدی روش المان محدود در نظر دارد. المان‌هایی از برقگیر که در طراحی لحاظ می‌شوند عبارتند از: Grading ring, Spacer. لایه‌ی عایقی فایبرگلاس. با ادغام روش المان محدود و الگوریتم‌های تکاملی می‌توان روشی برای طراحی بهینه‌ی المان‌های ذکر شده ارائه کرد. در مدل کردن برقگیر مورد آزمایش از دو الگوریتم تکاملی تفاضلی و اجتماع ذرات استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت برای هر دو الگوریتم اعمال شده و هر یک به جواب‌های قابل قبولی دست یافتند. همه‌ی خواسته‌ها و قیدهایی که در طراحی برقگیر باید در نظر داشت برای هر دو الگوریتم ارضا شد.

واژه‌های کلیدی

اکسید روی، برقگیر، روش المان محدود، روش‌های بهینه‌سازی، میدان الکتریکی.

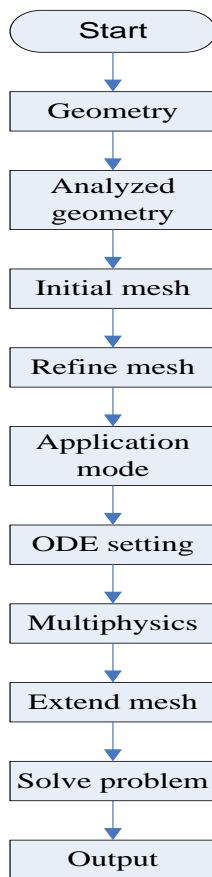
مقدمه

برقگیر یک المان حفاظتی است که اضافه ولتاژهای ناشی از رعدوبرق را هدایت و مانع آسیب دیدن شبکه و تجهیزات آن می‌شود. آسیب‌دیدگی این تجهیزات از یک طرف موجب تحمیل هزینه‌های سنگین بر صنعت برق می‌شود و از طرف دیگر تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز مصرف‌کننده‌ها را دچار اشکال می‌کند. مهمترین اختلالات موجود در برقگیر اکسید فلزات در حالت استاتیکی اختلال الکتریکی و حرارتی می‌باشد. نوع پیشرفته‌ی برقگیرها که به اسم برقگیرهای اکسید فلزات شناخته شده‌اند، از قرص‌های اکسید فلزات مانند اکسیدروی که دارای خاصیت غیرخطی هستند، ساخته می‌شوند. برقگیر اکسید فلزات فاقد فاصله‌ی هوایی است و همیشه تحت ولتاژ شبکه قرار دارد و این موضوع باعث عبور جریان ناشی می‌شود که آن را به تدریج گرم می‌کند. اگر طراحی مناسب در شکل، ابعاد و جنس

می‌دهد. P_{min} و P_{max} به ترتیب حد بالا و پایینی برای پارامترهای طراحی می‌باشد.

محاسبات میدان الکتریکی و الگوریتم های هوشمند

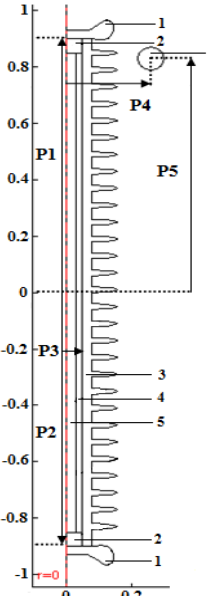
برای محاسبات میدان از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics استفاده می‌شود. روند طراحی بدین صورت است که در قسمت محاسبات میدان COMSOL ابتدا شکل هندسی برقگیر از مقادیر اولیه‌ای تصادفی که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در محیط MATLAB تولید می‌شود، پیاده‌سازی می‌شود.



شکل ۲: فلوجارت محاسبات نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

در مرحله‌ی بعد، نوع مش‌بندی مشخص می‌شود و بعد از آن مد مورد مطالعه (در اینجا الکترواستاتیکی)، شرایط مرزی و ضرایب دی‌الکتریک مواد مختلف به کار برده شده تعیین می‌شود. حال نوع حل معادلات دیفرانسیل معمولی شامل روش المان محدود دو-بعدی تعیین می‌شود. پس از آن فایل مربوط به طرح مسأله‌ی مورد مطالعه بازخوانی می‌شود تا در صورت وجود مشکلاتی هم‌چون هم‌پوشانی زیردامنه‌ها، قابل اصلاح کردن پارامترهای اولیه باشد. با توجه به نوع المان محدود یک مش توسعه داده می‌شود و مش‌بندی برقگیر را کامل می‌کند. لازم به

می‌دهد روش استفاده شده در توزیع میدان بر روی ستون عایق پرسلین مفید و قابل قبول می‌باشد.



شکل ۱: مدل بریده شده دو-بعدی برقگیر اکسید فلزات و تعریف پارامترهای

بهینه‌سازی

1: Electrode, 2: Spacer, 3: Porcelain housing, 4: FRP, 5: ZnO block, 6: Grading ring

مدل مسأله و قیدهای آن

در این مسأله‌ی بهینه‌سازی، هدف توزیع میدان الکتریکی بر روی قرص‌های اکسید فلز می‌باشد که به صورت زیر قابل بیان می‌باشد:

Objective function =

$$\min \left(\max(E_{tot}) / \text{average}(E_{tot}) \right) \quad (1)$$

E_{tot} معرف میدان الکتریکی کل می‌باشد.

قیدی که باید در روند مسأله‌ی طراحی برقگیر مورد توجه قرار گیرد مربوط به استقامت دی‌الکتریک عایق است، در نتیجه باید ماکزیمم میدان الکتریکی که بر روی سطح خارجی عایق پرسلین قرار می‌گیرد از استقامت الکتریکی هوا (۲,۴ کیلوولت بر میلی‌متر) کمتر باشد. دو قید دیگر مربوط به متغیرهای طراحی می‌باشند که به قرار زیرند است:

$$P1 + |P2| \leq 2400 \quad (2)$$

$$P_{min} < P < P_{max} \quad (3)$$

رابطه‌ی ۲ نشان دهنده‌ی طول برقگیر می‌باشد که از حد مجاز فراتر نرود و رابطه‌ی ۳ محدوده‌ی تغییرات هر یک از پارامترها را نشان



اگر مقدار برازندگی جواب جدید تولید شده بهتر از جواب قبلی باشد، جایگزین آن می‌گردد در غیر این صورت همان جواب قبلی در تکرار بعد جستجو باقی می‌ماند.

$$X_i(t+1) = \begin{cases} Z_i(t) & \text{if } fit(X_i(t)) \geq fit(Z_i(t)) \\ X_i(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن، $fit(\cdot)$ میزان برازندگی جواب‌ها را نشان می‌دهد.

(د) توقف:

فرآیند جستجو تا زمانی که معیار توقف الگوریتم برآورده شود، ادامه می‌یابد. معمولاً معیار توقف الگوریتم می‌تواند بر مبنای ثابت ماندن تغییرات برازندگی بهترین جواب یا تکرار الگوریتم تا یک تعداد مشخص انتخاب شود.

الگوریتم اجتماع ذرات: الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که برای اولین بار توسط Kennedy و Eberhart پیشنهاد شد. ایده‌ی اصلی در الگوریتم PSO، مدل‌سازی و شبیه‌سازی حرکت و رفتار گروهی پرندگان در جستجوی غذا می‌باشد. در PSO هر یک از ذرات به عنوان یک کاندید حل برای جواب نهایی در فضای چند بعدی مسأله می‌باشد [۱۳].

در الگوریتم PSO کلاسیک، هر ذره i دارای دو قسمت اصلی، شامل موقعیت فعلی ذره (x_i) و سرعت فعلی ذره (v_i) می‌باشد که در فضای n -بعدی مسأله بهینه‌سازی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} X_i(t) &= (x_i^1(t), x_i^2(t), \dots, x_i^n(t)) \\ V_i(t) &= (v_i^1(t), v_i^2(t), \dots, v_i^n(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

موقعیت بعدی هر ذره در فضای جستجو به وسیله موقعیت فعلی و سرعت بعدی آن تعیین می‌شود. سرعت بعدی هر ذره نیز از طریق چهار عامل اصلی یعنی، سرعت فعلی ذره، موقعیت فعلی ذره، بهترین موقعیت قبلی ذره P_{best} که تاکنون توسط آن تجربه شده باشد و در حافظه آن نیز ذخیره می‌گردد و بهترین موقعیت در میان ذرات گروه G_{best} ، که به عنوان تجربه گروهی یاد می‌شود، تعیین می‌گردد. با توجه به تعاریف ذکر شده، سرعت بعدی هر ذره i از طریق رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$v_{i,j} = \omega \cdot v_{i,j} + c_1 r_1 (\cdot) [pbest_{i,j} - x_{i,j}] + c_2 r_2 (\cdot) [gbest_j - x_{i,j}] \quad (8)$$

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times iter \quad (9)$$

ذکر است که تعداد المان‌های محدود در هر مرحله‌ی محاسبه با توجه به هندسه‌ی طرح برای هر تولید متفاوت می‌باشد. حال با روش تعیین شده مسأله‌ی معادله‌ی دیفرانسیل جزئی ساکن با روش خطی یا غیرخطی حل می‌شود. در نهایت خروجی‌های مورد نیاز مانند میدان الکتریکی کل، پتانسیل الکتریکی و ... را می‌توان فراخوان کرد. فلوجارت مراحل بالا در شکل ۲ آمده است.

الگوریتم تکاملی تفاضلی: الگوریتم تکامل تفاضلی (Differential Evolution-DE) یکی از سریع‌ترین، دقیق‌ترین و در عین حال ساده‌ترین روش‌های بهینه‌سازی تکاملی موجود برای حل مدل‌های ریاضی می‌باشد. این روش اولین بار توسط پرایس و استورن در سال ۱۹۹۵ ابداع شد [۸].

به همین دلیل در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی با استفاده از الگوریتم DE انجام شده است [۹]–[۱۲].

این الگوریتم تکاملی فرایند جستجو را از یک جمعیت اولیه تصادفی شروع می‌کند. در DE سه عامل جهش، تقاطع و انتخاب و سه پارامتر کنترلی شامل اندازه جمعیت NP ، ضریب مقیاس F و احتمال تقاطع CR وجود دارد. مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم به شرح زیر است:

(الف) تولید جمعیت اولیه:

جمعیت اولیه شامل NP عضو به صورت تصادفی تولید می‌شود به طوری که هر یک از اعضا در محدوده فضای جواب مسأله باشند. در یک مسأله با فضای جستجوی D -بعدی ساختار i امین عضو به صورت $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D})$ می‌باشد.

(ب) عمل جهش:

برای هر عضو X_i در جمعیت، یک جواب جدید در هر تکرار t مطابق رابطه زیر تولید می‌شود.

$$Y_i(t) = X_{r_3}(t) + F \cdot (X_{r_1}(t) - X_{r_2}(t)) \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, NP$

که در آن، $r_1, r_2, r_3 \in [1, NP]$ سه عدد صحیح تصادفی نامساوی هستند. ضریب مقیاس F یک عدد ثابت مثبت و حقیقی است که اغلب برابر ۰.۵ در نظر گرفته می‌شود.

(ج) عمل تقاطع:

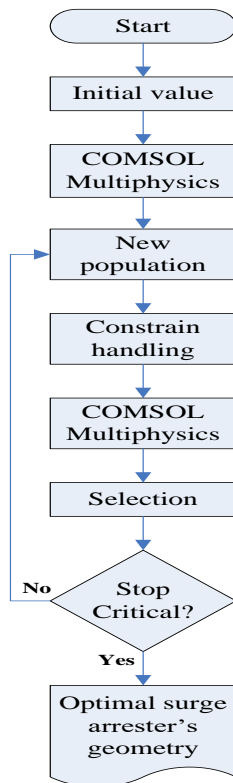
جواب جدید Z_i با ترکیب جواب‌های X_i و Y_i مطابق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$z_j(t) = \begin{cases} y_j(t) & \text{if } rand \leq CR \text{ or } j = jrand \\ x_j(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه $jrand \in [1, 2, \dots, D]$ است.

(د) عمل انتخاب:

می‌شود و این روند تا آنجا تکرار می‌شود که الگوریتم به مقدار بهینه همگرا شود.



شکل ۳: فلوجارت طراحی برقگیر اکسید فلزات ۰۷۲۲۰kV

برای ارضای قید حداکثر طول برقگیر (رابطه ۲)، P1 به صورت تصادفی تولید می‌شود و P2 با توجه به رابطه ۱۱، براساس P1 به وجود می‌آید:

$$P2 = rand(P1, 2.4) \quad (11)$$

و همچنین برای برآورده شدن قید رابطه ۳، در جواب‌هایی که از حد بالا و یا حد پایین تجاوز کرده باشند به احتمال ۰,۷ در حد بالا و پایین تثبیت (fix) می‌شوند و به احتمال ۰,۳ جواب مجازی در محدوده تولید شده و جایگزین جواب غیرممکن (infeasible) خواهد شد.

سیستم مورد مطالعه و نتایج عددی

به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی در طراحی یک برقگیر نمونه انجام شده است. برقگیر مورد مطالعه، یک برقگیر اکسید روی ۲۲۰ کیلوولت با مشخصات داده شده در [۱۴] می‌باشد. همچنین ضرایب دی‌الکتریک قسمت‌های متفاوت برقگیر در جدول ۱ آمده

در رابطه (۸) $pbest_j$ بعد زام بهترین موقعیت ذره i و $gbest_j$ ، بعد زام بهترین موقعیت در میان ذرات گروه می‌باشد همچنین در رابطه ۹، ω ضریب اینرسی ذره برای حرکت با سرعت قبلی، ω_{max} مقدار نهایی ضریب اینرسی، ω_{min} مقدار اولیه ضریب اینرسی، $iter$ تکرار فعلی، $iter_{max}$ حداکثر تعداد تکرار الگوریتم، c_1 و c_2 به ترتیب ضرایب یادگیری فردی و گروهی ذره، $r1$ و $r2$ اعداد تصادفی در بازه صفر و یک در جهت حفظ خاصیت احتمالی الگوریتم می‌باشند. با تعیین سرعت بعدی هر ذره موقعیت بعدی آن نیز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$x_{i,j+1} = x_{i,j} + v_{i,j} \quad (10)$$

تشریح مسأله و ارزیابی مدل

در حل این مسأله‌ی بهینه‌سازی هر یک از ذرات در PSO یا جواب‌ها در جمعیت اولیه‌ی DE به عنوان یک کاندید جواب در حل نهایی مسأله هستند. مراحل زیر نشان دهنده‌ی گام‌های اجرای این برنامه هستند:

گام اول: تولید جمعیت اولیه

نحوه‌ی تعریف یک جواب نمونه در روش پیشنهادی به صورت رشته‌ی زیر می‌باشد:

P1	P2	P3	P4	P5
----	----	----	----	----

گام دوم: برازش جمعیت اولیه با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

گام سوم: تولید جمعیت جدید

گام چهارم: ارضای قیود

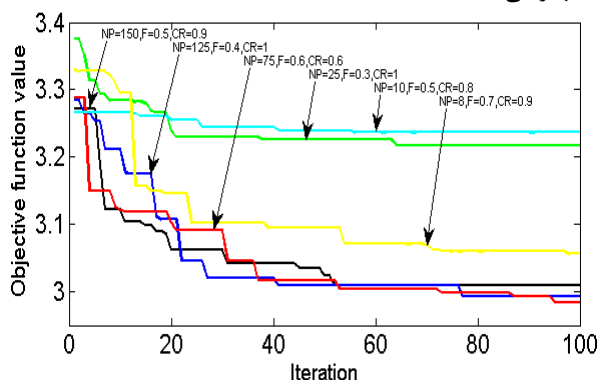
گام پنجم: انتخاب

گام ششم: در صورت برآورده شده شرایط همگرایی خارج شود در غیر این صورت به مرحله‌ی سوم برود
فلوجارت مراحل بالا در شکل ۳ داده شده است.

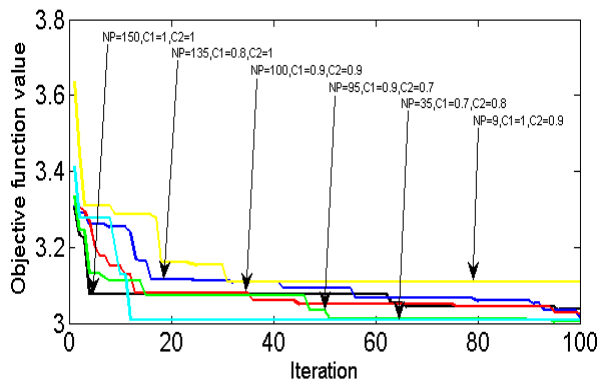
با برقراری ارتباط بین COMSOL و MATLAB Multiphysics، مدلی براساس این پارامترها در محیط COMSOL شبیه‌سازی می‌شود و کمیات میدان الکتریکی با استفاده از آنالیز المان محدود محاسبه می‌شود و کمیات مورد نیاز محاسبه‌ی تابع هدف به الگوریتم‌های بهینه‌سازی در محیط MATLAB فرستاده می‌شود. با توجه به پارامترهای اولیه و کمیات محاسبه شده، پارامترهای بعدی از طریق الگوریتم‌های هوشمند تولید



برای نشان دادن تأثیر پارامترهای الگوریتم DE و PSO در رسیدن به جواب از آنالیز حساسیت استفاده شده است. جدول ۳ مقادیر بهینه‌ی متفاوت تابع هدف برای الگوریتم DE را به ازای جمعیت اولیه‌ی (NP)، ضریب مقیاس (F) و ثابت تقاطع (CR) مختلف بیان می‌کند. در جدول ۴ نتایج مربوط به PSO با تعداد ذرات (NP)، C1 و C2 به ترتیب ضرایب یادگیری فردی و گروهی ذره‌ی متفاوت مشاهده می‌شود. اجرایی با تعداد جمعیت $NP=125$ ، ضریب مقیاس $F=0.4$ و ثابت تقاطع $CR=1$ با مقدار تابع هدف $2,9931$ دارای بهترین جواب می‌باشد (جدول ۳). مقدار تابع هدف $3,2174$ و $3,2365$ به ترتیب با تعداد جمعیت $NP=25$ ، $NP=10$ و $NP=8$ با $CR=1$ ، $F=0.3$ و $F=0.5$ ، $CR=0.8$ و $CR=0.9$ دارای مقدار بهینه‌ی سراسری نمی‌باشند (جدول ۳). شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمودار همگرایی جدول‌های ۳ و ۴ را نشان می‌دهند. شکل ۶ نمایشی از نمودار همگرایی DE و PSO به ترتیب با جمعیت $NP=125$ ، $NP=10$ و $CR=1$ و تعداد ذرات $C1=0.9$ و $C2=0.7$ می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۶ پیداست مقدار تابع هدف از الگوریتم DE از PSO بهتر می‌باشد.



شکل ۴: نمودار همگرایی الگوریتم DE در مقادیر مختلف NP، F و CR



شکل ۵: نمودار همگرایی الگوریتم PSO در مقادیر مختلف NP، F و CR

است. لازم به ذکر است که تمام اندازه‌های میدان الکتریکی برحسب ولتاژ اعمالی یک پریونیت می‌باشد.

مقادیر اولیه، محدوده‌ی تعریف تغییر پارامترها و مقادیر بهینه الگوریتم‌های DE و PSO با تعداد تولید ۱۵۰ و تکرار ۱۰۰ در جدول ۲ آمده است و لازم به ذکر است تمام اندازه‌ها براساس میلی‌متر می‌باشد. همان‌طوری که از جدول ۲ پیداست محدوده‌ی مجاز و کافی برای جستجوی الگوریتم‌ها وجود دارد تا به مقدار بهینه‌ی مطلق دست یابد.

جدول ۱: ضرائب دی‌الکتریک مواد مختلف به کار برده شده در برقگیر مورد

مطالعه

Relative permittivity	ZnO block	Porcelain housing	Spacer	FRP	Electrode	Grading ring
ϵ_r	150	3.6	10^3	4.6	10^6	10^3

جدول ۲: مقادیر بهینه از طراحی پارامترها

Parameter	Min (mm)	Max (mm)	Init. (mm)	Optim. DE (mm)	Optim. PSO (mm)
P1	861	1539	900	863.6	862.7
P2	-861	-1539	-900	-943.6	-1025.2
P3	40	79	50	42.7	44.8
P4	221	500	260	405.1	347.5
P5	500	1539	830	1100.9	972.8

جدول ۳: مقایسه‌ی نتایج برای پارامترهای بهینه‌سازی الگوریتم DE

NP	F	CR	Objective function value	Iteration
150	0.5	0.9	3.0084	100
125	0.4	1	2.9931	100
75	0.6	0.6	2.9938	100
25	0.3	1	3.2174	100
10	0.5	0.8	3.2365	100
8	0.7	0.9	3.0563	100

جدول ۴: مقایسه‌ی نتایج برای پارامترهای بهینه‌سازی الگوریتم PSO

NP	C1	C2	Objective function value	Iteration
150	1	1	3.0368	100
135	0.8	1	3.0133	100
100	0.9	0.9	3.0255	100
95	0.9	0.7	3.0036	100
35	0.7	0.8	3.0069	100
9	1	0.9	3.1089	100



دانشگاه ولایت



metal-oxide surge arresters,” IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 4, pp. 1214–1220, Oct. 2003.

[6] Vahidi, B., Shariatinasab, R. and Moghani, J. S. “Effect of grading ring and spacers on potential distribution of ZnO arrester,” WSEAS International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility, Sept. 14-16, Izmir, turkey.

[7] Farin, G. “Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design”, Fourth Edition, San Diego: Academic Press, 1997.

[8] Storn, R. and Price, K. “Differential evolution – A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces,” International Computer Science Institute, Berkeley, CA, 1995.

[9] Coelho L. S. and Mariani, V. C. “Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 989–996, 2006.

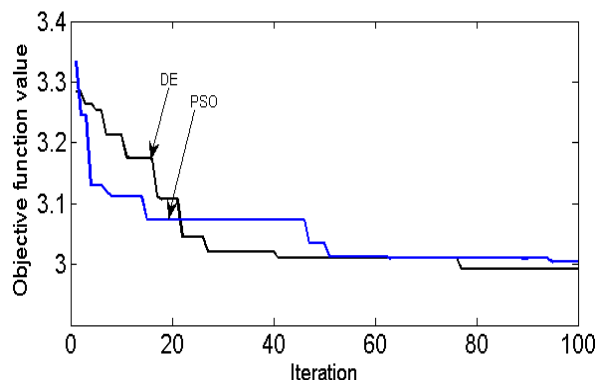
[10] Chiou, J. P. “A variable scaling hybrid differential evolution for solving large-scale power dispatch problems,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, no. 2, pp. 154–163, 2009.

[11] Bhattacharya, A. and Chattopadhyay, P. K. “Hybrid Differential Evolution With Biogeography-Based Optimization for Solution of Economic Load Dispatch”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 4, pp. 1955-1964, 2010.

[12] Duvvuru, N. and Swarup, K. S. “A Hybrid Interior Point Assisted Differential Evolution Algorithm for Economic Dispatch,” IEEE Transactions on Power Systems, 26, no. 2, pp. 541-549, 2011.

[13] Kennedy, J. and Eberhart, R. “Particle swarm optimization,” IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.

[14] Hinrichsen, V. “Metal oxide Surge Arrester Fundamentals, in: Handbook on High Voltage Metal Oxide Surge Arrester”, SIEMENS AG, 2001.



شکل ۶: مقایسه‌ی نمودار همگرایی الگوریتم DE و PSO در مسأله‌ی مورد بررسی

مراجع و منابع

[1] He, J., Hu, J., Gu, S., Zhang, B. and Zeng, R. “Analysis and improvement of potential distribution of 1000-kv ultra-high-voltage metal-oxide arrester,” IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 4, pp. 1214–1220, Oct. 2003.

[2] Csendes Z. J. and Hamann, J. R. “Surge arrester voltage distribution analysis by the finite element method,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 4, pp. 1806–1813, Apr. 1981.

[3] Han, S. J., Zou, J., Gu, S. Q., He, J. L., and Yuan, J. S. “Calculation of the potential distribution of high voltage metal oxide arrester by using an improved semi-analytic finite element method,” IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 5, pp. 1392–1395, May 2005.

[4] Kumar U. and Mogaveera, V. “Voltage distribution studies on ZnO arresters,” in Proc. Inst. Elect. Eng., Sci. Meas. Technol., Jul. 2002, vol. 149, no. 4, pp. 457–462.

[5] He, J. L., Zeng, R., Chen, S. M. and Guan, Z. C. “Potential distribution analysis of suspended-type