

تعیین نواحی با بیشترین احتمال برخورد صاعقه در ساختارهای پیچیده به منظور بهینه‌سازی سیستم حفاظت

مصطفی یحیی‌آبادی^۱، دانشجوی دکتری؛ علیرضا صدوقی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - اصفهان - ایران - yahyaabadi_aut@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و اویونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - اصفهان - ایران - sadoughi@mut-es.ac.ir

چکیده: در زمینه مدل‌سازی صاعقه روش‌های تحلیلی متعددی از قبیل مدل الکتریکی-هندسی و روش گوی غلطان ارائه شده است که در آن‌ها نواحی حفاظت‌شده و حفاظت‌نشده تفکیک می‌شوند. اما در هیچکدام نمی‌توان شدت آسیب‌پذیری نواحی مختلف را در برابر برخورد صاعقه مشخص نمود. در این مقاله با استفاده از روش تحلیل عددی انتشار گام‌به‌گام صاعقه در فضای سه‌بعدی و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، روشی نوین به منظور شناسایی نواحی با بیشترین احتمال برخورد صاعقه ارائه می‌شود. ساختار موردنظر برای حفاظت در این مقاله یک سازه نامتقارن در نظر گرفته شده است. به منظور مدل‌سازی صاعقه، اجسام روی زمین و پیش‌موج بالارونده از اشکال مختلف بارهای الکتریکی استفاده شده و محاسبات میدان به روش بارهای فرضی انجام شده است. تعیین مسیر انتشار صاعقه و آغاز و حرکت پیش‌موج بالارونده تا برخورد نهایی به صورت گام‌به‌گام انجام گرفته است. در نهایت با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی نواحی پرخطر آغاز صاعقه در فضای بالای ساختار و نقاط آسیب‌پذیر معادل آن‌ها روی ساختار تعیین شده‌اند و به استناد نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بهترین موقعیت صاعقه‌گیرهای میله‌ای مشخص شده است. روش ارائه‌شده می‌تواند برای طراحی سیستم حفاظت هر ساختار پیچیده استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: صاعقه، روش انتشار گام‌به‌گام، روش بارهای فرضی، الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، پیش‌موج بالارونده.

Identification of The Most Vulnerable Area on Complex Structures for Optimizing Lightning Protection System

M. Yahyaabadi¹, PhD Student; A. Sadoughi², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering and Avionics, University of Malek Ashtar, Isfahan, Iran, Email: yahyaabadi_aut@yahoo.com

2- Faculty of Electrical Engineering and Avionics, University of Malek Ashtar, Isfahan, Iran, Email: sadoughi@mut-es.ac.ir

Abstract: To calculate shielding failure of a lightning protection system, several analytical methods such as Electro-Geometric Model and Rolling Sphere Method have been proposed. These methods are used to determine protected and unprotected areas, but they can't show the frequency of shielding failure to determine more risky areas. In this paper, a new numerical model is proposed by using Leader Progression Model and Artificial Bee Colony Algorithm to identify the most vulnerable area on complex structures. The progression of lightning downward leader, the inception and propagation of upward leaders are considered step by step until final jump. Structures, air terminals, downward and upward leaders are modeled by different shapes of charges, and the electric field in an environment is computed by charge simulation method. Lightning is assumed as artificial bee, and areas with high shielding failure are the best food sources with high nectar amount. So the result produced by ABC algorithm is the most lightning risky area. Finally, lightning performance of an asymmetric structure protection system is evaluated, and based on simulation results the best position of air terminals is determined. The proposed method can be used for protection system design of any complex structure.

Keywords: Lightning, leader progression model, charge simulation method, artificial bee colony algorithm, upward leader.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۹، ۱۳۹۴/۰۱/۱۷ و ۱۳۹۴/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۵

نام نویسنده مسئول: علیرضا صدوقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - شاهین‌شهر - دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر - دانشکده مهندسی برق و اویونیک.

۱- مقدمه

[۶ و ۷]. نقطه آغاز شبیه‌سازی مسیر صاعقه، از آنجایی که اثر اشپای روی زمین قابل صرف‌نظر است، یعنی بالاتر از دو برابر ارتفاع بلندترین نقطه جسم در نظر گرفته می‌شود [۸]. ابرها در ارتفاع ۲۰۰۰ متری فرض شده‌اند و مسیر حرکت پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه از ابر تا نقطه شروع شبیه‌سازی به صورت پاره‌خط مستقیم عمودی و با چگالی بار متغیر می‌باشد [۹].

با توجه به شکست الکتریکی هوا در هنگام صاعقه، مسیر پیش‌موج پایین‌رونده در هر گام در جهتی است که گرادیان ولتاژ بیشینه است. در شرایطی که هوا وضعیت یکنواختی داشته باشد و زمین نیز کاملاً مسطح و بدون عوارض سطحی و ساختارهای مزاحم باشد و یا عوارض سطح زمین در مقایسه با ارتفاع نوک پیش‌موج صاعقه بسیار کوچک باشند، جهت این گرادیان بیشینه، خطی مستقیم از نوک صاعقه و عمود بر سطح زمین است. اما با نزدیک شدن نوک صاعقه به زمین باید گرادیان ولتاژ را با توجه به عوارض سطحی روی زمین محاسبه نمود. به منظور محاسبه این گرادیان ولتاژ، در هر مرحله یک نیم‌کره فرضی در زیر پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه، به مرکز نوک آن در نظر گرفته می‌شود (شکل ۱). سپس شدت میدان الکتریکی بر روی این نیم‌کره فرضی محاسبه می‌شود و مسیر صاعقه به سمت نقطه‌ای تعیین خواهد شد که بیش‌ترین شدت میدان الکتریکی را دارد. بدین ترتیب مسیر حرکت پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه به صورت گام‌به‌گام تعیین می‌گردد [۸].

طول گام پیش‌موج صاعقه با توجه به نتایج آزمایش‌ها و نیز مشاهده‌های ثبت‌شده در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود. هرچه طول گام پیش‌موج کوتاه‌تر در نظر گرفته شود، محاسبه دقیق‌تر اما وقت‌گیرتر است. این طول گام را می‌توان در ارتفاعات بالا بیش‌تر و در نزدیکی زمین حدود ۱۰ متر در نظر گرفت [۱۰]. در این شبیه‌سازی طول هر گام پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه از نقطه شروع شبیه‌سازی تا هنگام برخورد نهایی برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. این طول گام به منظور اطمینان داشتن از تطبیق محاسبات با نتایج تحقیقات آزمایشگاهی در مورد شکست فواصل هوایی طولانی و افزایش دقت محاسبات انتخاب شده است.

چگالی بار الکتریکی پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه با استفاده از رابطه (۱) که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های الکترواستاتیک شکل موج‌های جریان صاعقه است محاسبه می‌شود [۱۱].

$$\rho(z) = I \left\{ m_0 \left(1 - \frac{z - z_0}{H_C - z_0} \right) \left(1 - \frac{z_0}{H_C} \right) + \frac{m_1 + m_2(z - z_0)}{1 + m_3(z - z_0) + m_4(z - z_0)^2} \right. \\ \left. \times \left[0.3e^{\frac{10-z_0}{75}} + 0.7 \left(1 - \frac{z_0}{H_C} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

در این رابطه $m_1 = 4.857 \times 10^{-5}$ ، $m_0 = 1.476 \times 10^{-5}$ ، $m_2 = 3.9097 \times 10^{-6}$ ، $m_3 = 0.522$ ، $m_4 = 3.73 \times 10^{-3}$ ، z_0

صاعقه پدیده‌ای است طبیعی که احتمال وقوع آن امری تصادفی است و از یک قانون کلاسیک تبعیت نمی‌کند بلکه تابع شرایط آماری و احتمالی است. از جمله عوامل نسبی که در بروز صاعقه در یک منطقه مؤثر هستند می‌توان به موقعیت محل، مانند ارتفاع از سطح دریا، کوهستانی بودن یا واقع شدن در منطقه مسطح، وضعیت وزش باد، رطوبت محل، ارتفاع ابر و نوع آب و هوا (از قبیل استوایی، مدیترانه‌ای، قطبی و یا کویری) اشاره نمود. علاوه بر این بروز صاعقه در یک منطقه خاص نیز از نظر جریان (بار الکتریکی) و موقعیت وقوع (طول و عرض و ارتفاع نقطه شروع) می‌تواند در گستره وسیعی از مقادیر متغیر باشد. بنابراین به منظور مدل‌سازی این پدیده طبیعی و محاسبه احتمال برخورد آن به تجهیزات و ساختارهای پیچیده می‌بایست تمام حالت‌های ممکن جریان و موقعیت وقوع را در نظر گرفت و برای تمام این حالات، محل برخورد نهایی را تعیین نمود. این امر بسیار زمان‌بر بوده و نیاز به حجم بسیار بالایی از محاسبات دارد [۵-۱].

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل عددی انتشار گام‌به‌گام صاعقه در فضای سه‌بعدی و الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، نواحی پرخطر و نقاط آسیب‌پذیر در ساختارهای پیچیده مشخص می‌گردد. طبق تعریف، ناحیه پرخطر عبارت است از ناحیه‌ای در صفحه شروع شبیه‌سازی که در صورت قرار گرفتن نوک صاعقه در آن، احتمال برخورد صاعقه به ساختار بیش‌تر از نواحی دیگر است. نقطه آسیب‌پذیر نیز نقطه‌ای از ساختار است که احتمال برخورد صاعقه به آن بیش‌تر از نقاط دیگر است.

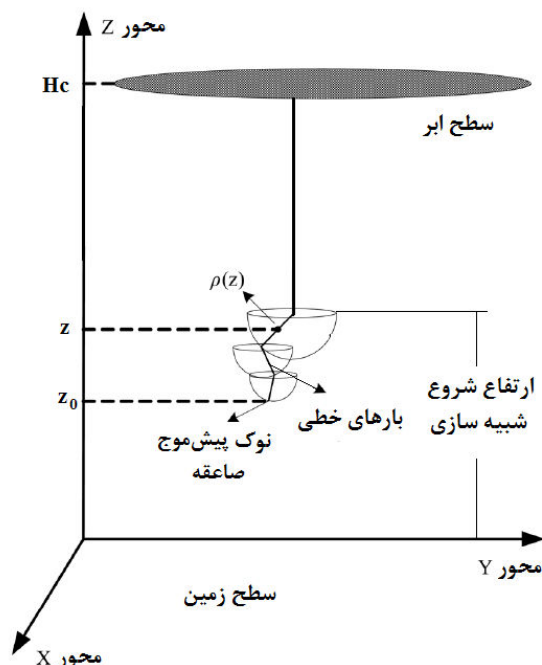
به کارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی در ترکیب با یک روش تحلیل عددی می‌تواند به ابزاری قوی و سریع تبدیل شده و در طراحی سیستم‌های حفاظت در برابر صاعقه کاربرد مؤثر داشته باشد. در واقع روش پیشنهادی تکمیل‌کننده روش‌های تحلیل عددی شبیه‌ساز صاعقه بوده و نقصان‌های روش تحلیلی گوی غلطان^۱ (RSM) را برطرف نموده است. زیرا می‌تواند با حجم محاسبات کم‌تر، مقیاسی عددی جهت ارزیابی نواحی پرخطر و نقاط آسیب‌پذیر که بیش‌ترین احتمال برخورد صاعقه را دارند به دست دهد. نواحی پرخطر در واقع همان مناطقی هستند که در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، گل‌های با شهد بیش‌تر در آن‌ها وجود دارند. یعنی هرچه شهد گل‌های ناحیه‌ای بیش‌تر باشد، احتمال فرار صاعقه از آن ناحیه و اصابت آن به نقاط آسیب‌پذیر بیش‌تر است. فرار صاعقه از سیستم حفاظتی به معنای عدم برخورد صاعقه به زمین و عدم جذب آن توسط صاعقه‌گیرها و در نتیجه برخورد مستقیم آن به سازه است.

۲- تحلیل عددی انتشار گام‌به‌گام صاعقه

در روش انتشار گام‌به‌گام صاعقه، تعیین مسیر انتشار پیش‌موج پایین‌رونده صاعقه^۲ و بررسی نقطه آغاز و مسیر حرکت پیش‌موج بالارونده تا برخورد نهایی، کاملاً به صورت مرحله‌به‌مرحله انجام می‌گیرد

ارتفاع نوک پیش موج صاعقه نسبت به زمین به متر، H_c ارتفاع ابر به متر، I جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر، ρ چگالی بار الکتریکی صاعقه بر حسب کولن بر متر و Z ارتفاع نقطه‌ای بر روی صاعقه است که چگالی بار الکتریکی در آن نقطه محاسبه می‌گردد (شکل ۱).

ارتفاع نوک پیش موج صاعقه نسبت به زمین به متر، H_c ارتفاع ابر به متر، I جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر، ρ چگالی بار الکتریکی صاعقه بر حسب کولن بر متر و Z ارتفاع نقطه‌ای بر روی صاعقه است که چگالی بار الکتریکی در آن نقطه محاسبه می‌گردد (شکل ۱).



شکل ۱: تعیین مسیر صاعقه با استفاده از محاسبه گرادیان ولتاژ بر روی نیمکره فرضی

در حین شکل‌گیری صاعقه در قسمت بالایی اجسام روی زمین، مانند درختان، ساختمان‌ها و دکل‌های بلند شدت میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. لذا هوای اطراف این نقاط یونیزه شده و پیش موج بالارونده از سطح زمین شروع به حرکت می‌کند که به منظور ارزیابی دقیق و قابل اطمینان رفتار صاعقه می‌بایست مورد توجه قرار گرفته و با دقت بررسی شوند [۱۲].

پارامترهای متعددی از قبیل جریان صاعقه، فاصله طولی نقطه مورد ارزیابی از صاعقه، شکل هندسی و جغرافیایی محیط و ... می‌توانند بر زمان شروع پیش موج بالارونده مؤثر باشند. برای تشخیص صحیح زمان و مکان شروع پیش موج بالارونده می‌بایست رشد گرادیان ولتاژ در نقاط مختلف اجسام روی زمین از جمله ساختمان‌ها، تجهیزات، سیستم حفاظتی و سطح زمین به طور لحظه‌ای و همزمان با حرکت پیش موج پایین‌رونده صاعقه مورد بررسی قرار گیرد.

در این مقاله، معیار شروع پیش موج بالارونده از نقاط مختلف اجسام روی زمین مطابق مرجع [۱۳] در نظر گرفته شده است. بدین صورت که یک نیم‌کره فرضی به مرکز نقطه مورد بررسی و به شعاع ۲/۲ متر در نظر گرفته می‌شود. اگر شدت میدان الکتریکی در این فاصله به ۴۰۰ کیلوولت بر متر برسد، پیش موج بالارونده از آن نقطه شروع خواهد شد و در جهتی که بیش‌ترین گرادیان ولتاژ را دارد حرکت خواهد نمود.

سرعت پیش موج پایین‌رونده صاعقه معمولاً از عوامل روی زمین تأثیر نمی‌گیرد. این در حالی است که پیش موج بالارونده تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی ایجاد شده توسط پیش موج پایین‌رونده می‌باشند و به‌طور کلی مشخصات اصلی آن‌ها (جریان، گرادیان ولتاژ و سرعت انتشار) بستگی به جریان و سرعت حرکت پیش موج پایین‌رونده دارد. آنچه در مدل‌سازی انتشار پیش موج پایین‌رونده و بالارونده از اهمیت برخوردار است نسبت سرعت پیش موج پایین‌رونده به پیش موج بالارونده (RV) می‌باشد. در واقع نسبت طول گام پیش موج پایین‌رونده به طول گام پیش موج بالارونده در هر مرحله را سرعت انتشار پیش موج‌ها مشخص می‌نماید. Eriksson [۱۷ و ۱۸] نسبت سرعت حرکت پیش موج پایین‌رونده به پیش موج بالارونده را برابر یک فرض کرده است. Dellera [۱۴ و ۱۵] نسبت سرعت پیش موج پایین‌رونده به پیش موج بالارونده را در ابتدا برابر ۴ در نظر گرفته و فرض کرده است که این نسبت به مرور کاهش می‌یابد تا وقتی که در هنگام برخورد نهایی برابر یک خواهد شد. اما در مورد روند این تغییر اشاره‌ای نکرده است. Rizk [۱۹-۲۴] نیز در شبیه‌سازی‌هایی که انجام داده است همواره سرعت پیش موج پایین‌رونده و بالارونده را برابر فرض کرده است. با توجه به اینکه مراجع متعددی [۱۳، ۲۴-۱۷] این نسبت را برابر یک در نظر گرفته‌اند در این مقاله نیز نسبت سرعت پیش موج پایین‌رونده به پیش موج بالارونده (RV) برابر یک فرض شده است.

همان‌طور که اشاره شد مسیر پیش موج پایین‌رونده به‌صورت گام‌به‌گام دنبال شده و در هر مرحله شرایط آغاز پیش موج بالارونده از اشیای روی زمین ارزیابی می‌شود. در صورتی که شرط آغاز پیش موج بالارونده در نقطه یا نقاطی فراهم شود، پیش موج بالارونده از آن نقطه یا نقاط حرکت نموده و مسیر حرکت آن در گام‌های بعدی دنبال خواهد شد. علاوه بر این در هر مرحله شدت میدان الکتریکی بین نوک صاعقه و نوک هر یک از پیش موج‌های بالارونده یا اجسام روی زمین بررسی شده و در صورتی که یکی از شدت‌های میدان الکتریکی از شدت میدان الکتریکی شکست بحرانی هوا (۵۰۰ کیلوولت بر متر) بیشتر شود، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود [۲۵].

از آنجایی که صاعقه‌های با جریان کم می‌توانند بدون برآورده شدن معیار برخورد نهایی (منظور از برآورده شدن معیار برخورد نهایی تجاوز شدت میدان الکتریکی بین صاعقه و تجهیزات از شدت میدان الکتریکی

بعد از این مرحله، جواب‌ها (موقعیت‌ها) در معرض سیکل‌های تکراری $Cycle = 1, 2, \dots, MCN$ فرآیندهای جستجوی زنبورهای کارگر، ناظر و کاشف به شرح زیر قرار می‌گیرد.

هر زنبور کارگر منبع غذایی جدیدی در اطراف منبع غذایی قبلی خود را جستجو می‌کند و با استفاده از رابطه (۲) منابع غذایی را با یکدیگر مقایسه نموده و سپس بهترین منبع را به خاطر سپرده و جهت اطلاع به زنبورهای ناظر به کلونی باز می‌گردد.

$$v_i^j = x_i^j + \phi_i^j (x_i^j - x_k^j) \quad (2)$$

در این رابطه $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ و $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ به طور تصادفی انتخاب می‌شوند و $k \neq i$ و ϕ_i^j عددی تصادفی در بازه $[0, 1]$ می‌باشد. اگر مقدار پارامتر تولیدی از این طریق از حد از پیش تعیین شده‌اش فراتر رود، پارامتر می‌تواند مقدار قابل‌پذیرشی به خود بگیرد مثلاً مقدار حد را به خود بگیرد.

زنبورهای ناظر منبع غذا را با توجه به مقدار احتمال مرتبط با آن منبع غذا (p_i) انتخاب می‌کنند.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (3)$$

در این رابطه fit_i مقدار برازندگی جواب i می‌باشد که متناسب است با حجم شهد منبع غذا در مکان i و SN تعداد منابع غذا می‌باشد که با تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر است.

در صورتی که منبع x_i ترک شود، زنبور کارگر مناظر با آن به زنبور کاشف تبدیل شده و با استفاده از رابطه ذیل منبع غذای جدیدی را می‌یابد.

$$x_i^j = x_{\min}^j + rand(0,1)(x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (4)$$

گام‌های اصلی به منظور مدل‌سازی یک مسئله با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی به شرح زیر است [۳۳]:

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه جواب‌ها (x_i^j)
- ۲- ارزیابی برازندگی جواب‌ها (x_i^j)
- ۳- Cycle = 1
- ۴- ایجاد جواب‌های جدید (v_i^j) برای زنبورهای کارگر در همسایگی (x_i^j) با استفاده از رابطه (۲)
- ۵- انتخاب جواب بهینه بین (x_i^j) و (v_i^j)
- ۶- محاسبه احتمال p_i برای جواب‌ها با استفاده از رابطه (۳)
- ۷- ایجاد جواب‌های جدید (v_i^j) برای زنبورهای ناظر از جواب‌های (x_i^j) بر اساس بهترین p_i ها
- ۸- انتخاب جواب بهینه بین (x_i^j) و (v_i^j)
- ۹- اگر جواب ترک شده‌ای وجود دارد، با جواب جدیدی به طور تصادفی طبق رابطه (۴) ایجاد شود.
- ۱۰- بهترین جواب یافت شده ذخیره شود.
- ۱۱- به مقدار Cycle یکی اضافه شود.

شکست بحرانی هوا است) به تجهیزات و تأسیسات نزدیک شوند، در مراحل متوالی حرکت پیش‌موج پایین‌رونده، همواره فاصله مکانی نوک پیش‌موج پایین‌رونده نسبت به پیش‌موج بالا‌رونده و نیز نسبت به کلیه اجسام روی زمین محاسبه می‌گردد. در صورتی که قبل از برآورده شدن معیار شدت میدان الکتریکی برخورد نهایی، این فاصله برای جسمی کمتر از فاصله‌ای معین گردد، صاعقه به آن جسم برخورد خواهد نمود. به این فاصله، فاصله بحرانی برخورد می‌گویند که با استفاده از روش الکتریکی - هندسی^۲ (EGM) محاسبه می‌گردد [۲۶].

از سوی دیگر صاعقه‌های در موقعیت مکانی دور می‌توانند بدون برآورده شدن معیار برخورد نهایی از کنار پیش‌موج بالا‌رونده گذشته و به سمت زمین حرکت نمایند. بنابراین اگر صاعقه به حرکت خود ادامه داده و ارتفاع نوک پیش‌موج پایین‌رونده از ارتفاع پیش‌موج بالا‌رونده از اجسام روی زمین کمتر شود و برخوردی بین پیش‌موج‌ها اتفاق نیفتد، شبیه‌سازی ادامه داده نخواهد شد و برخورد صاعقه با زمین در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

۳- الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی

الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی^۳ (ABC) یک روش بهینه‌سازی است و بر رفتار هوشمند زنبورهای عسل در جستجوی بهترین منابع غذایی و گل‌های با شهد فراوان مبتنی می‌باشد. این روش به منظور حل مسائل بهینه‌سازی عددی در سال ۲۰۰۵ توسط کارابوگا پیشنهاد شد [۲۷].

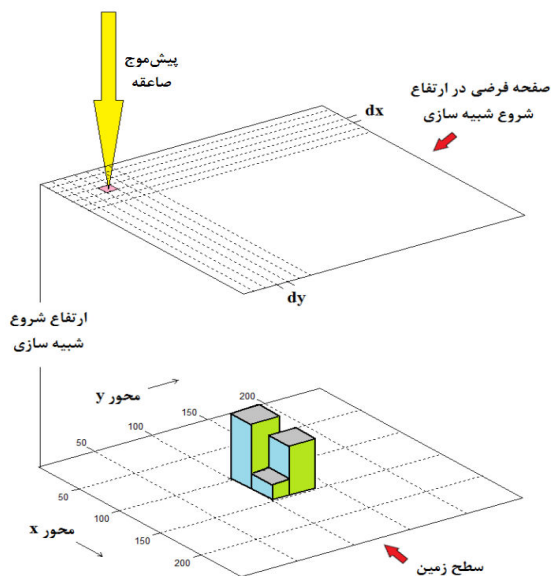
هر جواب در فضای جستجو، نشان‌دهنده یک منطقه غذایی و کیفیت جواب معادل با کیفیت آن منبع غذایی است. زنبورهای عسل مصنوعی (عامل‌ها) به جستجو و بهره‌برداری از منابع غذایی در فضای جستجو می‌پردازند. در این روش، کلونی زنبورهای مصنوعی دارای سه گروه از زنبورها شامل زنبورهای کارگر^۴، زنبورهای ناظر^۵ و زنبورهای کاشف^۶ است. زنبورهای کارگر با جواب‌های فعلی الگوریتم در ارتباط هستند و در هر گام تلاش می‌کنند جوابی را که ارائه می‌کنند به وسیله جستجوی محلی بهبود دهند. همچنین زنبورهای ناظر را از وضعیت مکان فعلی خود آگاه می‌کنند. زنبورهای ناظر از میان مکان‌های بهبودیافته، طبق کیفیت آن‌ها بهترین‌ها را انتخاب می‌کنند یعنی جواب‌های بهتر زنبورهای ناظر بیش‌تری را به سمت خود جذب می‌کنند. اگر یک زنبور کارگر در تعداد معینی گام قادر نباشد مکان خود را بهبود دهد (به این تعداد گام، حد^۷ گفته می‌شود)، مکان خود را ترک خواهد کرد و به زنبور کاشف تبدیل می‌شود. بدین معنی که مکانی جدید به طور تصادفی در فضای جستجو انتخاب می‌کند [۳۲-۲۸]. علاوه بر این در هر سیکل از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی یک زنبور کاشف برای جستجوی منابع غذایی جدید فرستاده می‌شود و تعداد زنبورهای کارگر و ناظر برابر است.

در گام اول، جمعیتی اولیه از جواب‌ها x_i^j به طور تصادفی تولید می‌شود. که $i = 1, \dots, SN$ و $j = 1, \dots, D$ و بیانگر تعداد زنبورهای کارگر یا ناظر می‌باشند. D و $j = 1, \dots, D$ تعداد پارامترهای بهینه‌سازی است.

در صورتی که صاعقه‌های از این نوار مرزی به سازه مورد بررسی برخورد می‌کرد ابعاد صفحه شروع شبیه‌سازی را افزایش می‌دادیم. در بسیاری از کارهای قبلی نیز ابعاد صفحه فرضی در همین حدود در نظر گرفته شده است [۱ و ۵ و ۹].

این ابعاد در هر جهت به ۲۵۰۰ قسمت مساوی تقسیم شده است. جریان صاعقه در محدوده ۳ تا ۲۰۰ کیلوآمپر در نظر گرفته شده که تغییر گام‌های آن ۰/۱ کیلوآمپر است. بدین ترتیب بیش از ۱۲ میلیارد حالت مختلف برای جریان و موقعیت صاعقه متصور است که می‌بایست مسیر حرکت و محل برخورد آن‌ها را تعیین نمود. محل برخورد برای هر صاعقه از طریق انتشار گام‌به‌گام پیش‌موج‌های پایین‌رونده و بالا‌رونده و با استفاده از روش بارهای فرضی^۱ تعیین می‌شود [۳۴-۳۶]. روش بارهای فرضی همراه با مدل انتشار گام‌به‌گام صاعقه یک روش مسلط در فعالیت‌های تحقیقاتی مربوط به صاعقه است اما اجرای آن مستلزم حجم بالایی از محاسبات می‌باشد. چنین حجم بالایی از محاسبات حتی با وجود کامپیوترهای قدرتمند امروزی بسیار زمان‌بر خواهد بود. هدف از به‌کارگیری روش ABC کاهش فضای جستجو و رسیدن به جواب در زمان کوتاه‌تر است. با به‌کارگیری این الگوریتم، می‌توان با ارزیابی حداقل ممکن صاعقه‌ها ناحیه پرخطر را در صفحه فرضی شروع شبیه‌سازی مشخص نموده و زمان دست‌یابی به پاسخ را با حفظ دقت مورد نیاز کوتاه نمود. بدین ترتیب نقاط آسیب‌پذیر روی ساختمان تعیین می‌گردند.

در ذیل استراتژی اصلی که به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی دنبال می‌شود تشریح شده است.



شکل ۳: مدل تحلیل عددی ساختار پیچیده به‌منظور محاسبه احتمال فرار صاعقه

استراتژی: به‌منظور تولید جمعیت اولیه جواب‌ها (X_i ها)، تعداد SN صاعقه به‌طور تصادفی در مش‌های سطح فوقانی ساختار (سازه) قرار داده می‌شود (شکل ۳). وقتی نوک پیش‌موج صاعقه در مش هاشور خورده (با طول dx و پهنا dy) قرار گرفت، محدوده جریان‌های

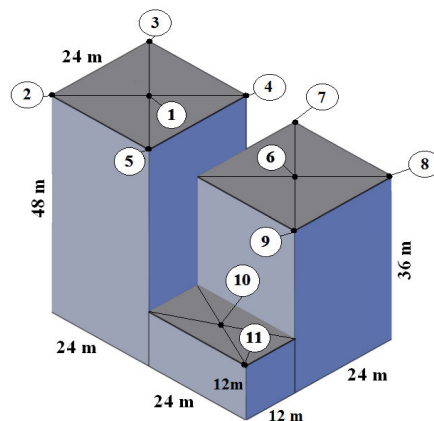
۱۲- پروسه تا Cycle = MCN ادامه یابد.

چگونگی به‌کارگیری و پیاده‌سازی الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی با توجه به هدف مسئله و نتایج موردانتظار انجام می‌شود.

۴- پیاده‌سازی الگوریتم ABC

هدف اصلی در شبیه‌سازی و تحلیل صاعقه، حفاظت بهینه تجهیزات و تأسیسات و جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه است. بنابراین تعیین نقاط حساس و آسیب‌پذیر در هر ساختار یا تجهیز و به ویژه در ساختارهای پیچیده از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً در ساختمان‌های بلند و ساختارهای پیچیده به‌منظور جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه از میله‌های صاعقه‌گیر استفاده می‌شود. محل قرارگیری، ارتفاع و تعداد این میله‌های صاعقه‌گیر از پارامترهای اصلی طراحی حفاظت به شمار می‌روند که سطح حفاظت و مقدار هزینه را مشخص می‌نمایند و همواره می‌بایست مدنظر قرار داده شوند.

در این مقاله یک ساختار سه‌بعدی با مشخصات ابعادی نشان داده شده در شکل ۲ به‌منظور شبیه‌سازی و ارزیابی سیستم حفاظت در برابر صاعقه در نظر گرفته شده است. نقاط ۱ تا ۱۱ نقاط کاندیدای نصب صاعقه‌گیر می‌باشند. انتظار می‌رود پس از اجرای شبیه‌سازی بهترین نقاط به‌منظور قرار دادن صاعقه‌گیر تعیین شوند.



شکل ۲: نمونه ساختار سه‌بعدی جهت جایابی صاعقه‌گیر مناسب

در فضای بالای این ساختار سه‌بعدی و در ارتفاع شروع شبیه‌سازی صفحه‌های در نظر گرفته شده و به مش‌های مربعی تقسیم‌بندی شده است (شکل ۳). محدوده این مش‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که صاعقه‌های خارج از این محدوده با هر جریانی به زمین برخورد نمایند و درواقع با اطمینان بتوان گفت که تمام صاعقه‌هایی که تهدیدی برای تجهیزات و تأسیسات به شمار می‌روند از این مش‌ها عبور می‌کنند. محدوده این مش‌ها بر اساس تجربه تعیین می‌شود. در این مقاله ابعاد صفحه فرضی در ارتفاع شروع شبیه‌سازی ۲۵۰ متر در ۲۵۰ متر در نظر گرفته شده است. به‌منظور اطمینان از کافی بودن ابعاد صفحه شروع شبیه‌سازی، نوار مرزی این صفحه کنترل گردیده و مشاهده شده است که صاعقه‌های این محدوده به زمین برخورد می‌کنند بنابراین می‌توان مطمئن بود که محدوده شبیه‌سازی درست انتخاب شده است.

حداکثری صاعقه‌گیرها یا مقدار قابل قبول احتمال برخورد صاعقه برآورده شود.

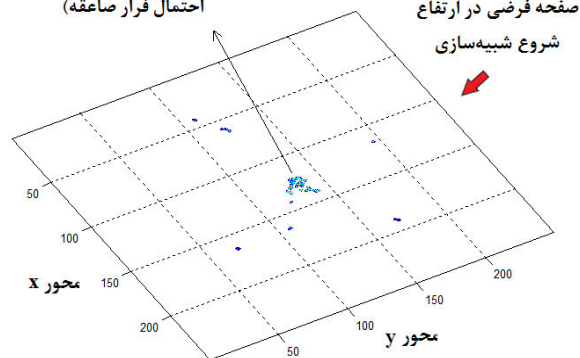
در این مقاله ارتفاع صاعقه‌گیرها به‌عنوان نمونه ۲ متر انتخاب شده است و این مقدار به‌عنوان یک فرض ساده‌کننده در نظر گرفته شده است. اثر صاعقه‌گیر به‌صورت ایمن نمودن نقطه پرخطر لحاظ شده است. البته هر صاعقه‌گیر می‌تواند اثراتی در بهبود سطح حفاظت نقاط و نواحی دیگر نیز داشته باشد اما آنچه در اینجا به‌عنوان هدف مدنظر قرار گرفته است ایمن‌سازی آسیب‌پذیرترین نقاط می‌باشد.

۵- نتایج مدل‌سازی و اجرای استراتژی

الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی در ۴ مرحله و به‌منظور تعیین بهترین محل نصب برای ۴ صاعقه‌گیر ۲ متری اجرا شده است. مرحله ۱: اجرای الگوریتم ABC در این مرحله تجمع زنبورها را در حوالی طول و عرض [۱۳۰ و ۱۳۰] متر در صفحه فرضی در ارتفاع شروع شبیه‌سازی نشان می‌دهد (شکل ۴). به‌عبارت‌دیگر، در صورت قرارگیری نوک پیش‌موج صاعقه در این ناحیه، احتمال برخورد آن به ساختار بیش‌تر است. همان‌طور که در جدول ۱ آمده است تعداد ۲۹ زنبور دارای جواب بهینه‌ای در این محدوده هستند و برخورد نهایی صاعقه را به حوالی نقطه ۴ نشان می‌دهند. این نقطه با استفاده از روش انتشار گام‌به‌گام پیش‌موج صاعقه مشخص شده است. زنبوری که بیش‌ترین شهاد را دارد (SFN_{max}) نیز مطابق جدول ۲ در همین ناحیه قرار داشته و آسیب‌پذیرترین نقطه سازه را در اطراف نقطه ۴ گزارش می‌کند. بنابراین صاعقه‌گیر مناسب می‌بایست در نقطه ۴ نصب گردد.

تجمع زنبورها (ناحیه با بیش‌ترین

احتمال فرار صاعقه)



شکل ۴: اجرای مرحله ۱ تعیین ناحیه آسیب‌پذیر در برابر صاعقه

مرحله ۲: پس از نصب یک صاعقه‌گیر دو متری در نقطه ۴ و اجرای مجدد الگوریتم ABC، محل تجمع زنبورها در صفحه فرضی در ارتفاع شروع شبیه‌سازی به حوالی طول و عرض [۷۰ و ۱۰۰] متر منتقل گردیده است (شکل ۵). در این مرحله آسیب‌پذیرترین ناحیه از نظر تعداد زنبورها و همچنین زنبور دارای حداکثر شهاد، ناحیه‌ای است که صاعقه‌های آن نهایتاً به نقطه ۲ بر روی سازه برخورد می‌کنند. بنابراین صاعقه‌گیر بعدی می‌بایست در نقطه ۲ نصب گردد.

فرارکننده از سیستم حفاظتی به ازای آن مش که به‌طور مستقیم به تجهیزات و تأسیسات برخورد می‌کنند $[I_a, I_b]$ ، محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از رابطه زیر احتمال برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات SFN_k هنگامی که نوک پیش‌موج صاعقه در مش k قرار گرفته، محاسبه می‌شود.

$$SFN_k = 10^{-6} \gamma \cdot T_d \times A \times \int_{I_a}^{I_b} P(I) dI \quad (5)$$

در این رابطه: γ و T_d ، احتمال بروز صاعقه در یک روز صاعقه‌ای و تعداد روزهای صاعقه‌ای در سال می‌باشند که به ترتیب برابر ۰/۱۵ و صاعقه بر کیلومتر مربع بر روز صاعقه‌ای و ۴۰ روز در سال در نظر گرفته شده‌اند [۴ و ۹].

A ، مساحت مش k ام بر حسب مترمربع می‌باشد.

$$A = dx \cdot dy \quad (6)$$

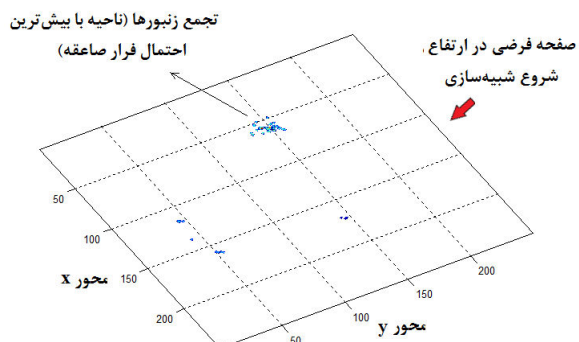
$P(I)$ احتمال جمع‌ی جریان‌های صاعقه تجاوزکننده از I می‌باشد، که می‌تواند به وسیله فرمول تقریبی زیر محاسبه شود [۹].

$$\log_{10} P(I) = 0.05 - \frac{I}{74} \quad (7)$$

I ، دامنه جریان صاعقه بر حسب واحد کیلوآمپر است.

این احتمال در واقع همان معیار تعیین برآزدگی جواب است. بدین ترتیب با ادامه فرآیند و اجرای الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی نواحی با بیش‌ترین احتمال فرار صاعقه شناخته می‌شوند. هرچه ناحیه‌ای از نظر فرار صاعقه آسیب‌پذیرتر باشد در واقع شهاد آن بیش‌تر فرض می‌شود.

در این شبیه‌سازی $SN=20$ و $MCN=100$ در نظر گرفته شده است. بنابراین کلونی شامل ۲۰ زنبور کارگر، ۲۰ زنبور ناظر و ۱ زنبور کاشف خواهد بود که در طی حداکثر ۱۰۰ سیکل سعی می‌کنند یک منبع غذایی با شهاد بیش‌تر بیابند. درنهایت هر یک از زنبورها به یک جواب بهینه دست خواهد یافت که نشان‌دهنده ناحیه‌ای پرخطر در صفحه شروع شبیه‌سازی و متعاقباً نقطه‌ای آسیب‌پذیر در ساختار یا سازه موردبررسی است. بهترین جواب که در واقع همان آسیب‌پذیرترین نقطه است با مقایسه نتایج مربوط به تمام زنبورها به دست می‌آید. بنابراین به ازای ناحیه‌ای که بیش‌ترین تجمع زنبورها را دارد، نقطه آسیب‌پذیر معادل آن روی ساختار یا سازه موردبررسی مشخص می‌شود. در نظر گرفتن نقاط متعدد برای نصب صاعقه‌گیرهای کوتاه و امکان افزایش پلکانی طول صاعقه‌گیرها با گام‌های کوتاه حجم محاسبات را بسیار زیاد می‌کند. در اینجا با فرض اینکه صاعقه‌گیرهایی با ارتفاع ۲ متر در اختیار است نسبت به قرار دادن صاعقه‌گیر در محل مناسب به‌نحوی که نقطه آسیب‌پذیر حفاظت شود اقدام می‌گردد. آنگاه الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی مجدداً اجرا شده و ناحیه پرخطر بعدی و نقطه آسیب‌پذیر متناظر آن مشخص می‌شود و صاعقه‌گیر مناسب قرار داده می‌شود. این فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که یکی از دو شرط تعداد



شکل ۷: اجرای مرحله ۴ (صاعقه گیر در نقاط ۴ و ۲ و ۸ نصب شده است)

جدول ۱: تعیین پرخطرترین ناحیه از نظر تجمع زنبورها و آسیب پذیرترین نقاط متناظر بر روی ساختار یا سازه مورد بررسی

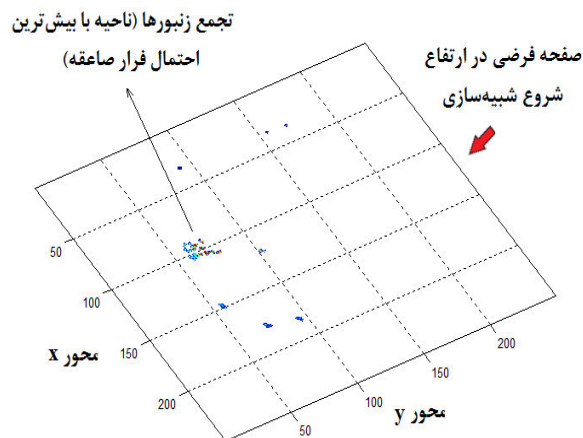
محل صاعقه گیر نصب شده	پرخطرترین ناحیه در صفحه مش بندی شروع شبیه سازی (از نظر تعداد زنبور)	آسیب پذیرترین نقطه متناظر روی سازه مورد بررسی
مرحله اول -	حوالی مختصات (۱۳۰ و ۱۳۰) (۲۹ زنبور)	نقطه ۴
مرحله دوم - نقطه ۴	حوالی مختصات (۷۰ و ۱۰۰) (۲۳ زنبور)	نقطه ۲
مرحله سوم - نقاط ۲ و ۴	حوالی مختصات (۱۶۰ و ۱۸۰) (۳۰ زنبور)	نقطه ۸
مرحله چهارم - نقاط ۲ و ۴ و ۸	حوالی مختصات (۱۵۰ و ۶۰) (۲۶ زنبور)	نقطه ۳

جدول ۲: تعیین آسیب پذیرترین نقطه از نظر حداکثر احتمال فرار صاعقه

محل صاعقه گیر	آسیب پذیرترین ناحیه (از نظر حداکثر شهد)	SFN_{max}
مرحله اول -	اطراف نقطه ۴	$4/9273 \times 10^{-5}$
مرحله دوم - نقطه ۴	اطراف نقطه ۲	$3/8699 \times 10^{-5}$
مرحله سوم - نقاط ۲ و ۴	اطراف نقطه ۸	$2/4466 \times 10^{-5}$
مرحله چهارم - نقاط ۲ و ۴ و ۸	اطراف نقطه ۳	$1/6633 \times 10^{-5}$

کاهش مقدار (SFN_{max}) که در جدول ۲ طی مراحل نصب صاعقه گیرهای جدید رخ می دهد رابطه مستقیم با کاهش تعداد اصابت مستقیم صاعقه به سازه مورد بررسی دارد. این روند می تواند تا برآورده شدن نیازهای مربوط به سطح حفاظت مورد نیاز ادامه یابد. در یک مثال واقعی می توان تعداد نقاط بیش تری برای نصب میله های صاعقه گیر و امکان افزایش پلکانی طول صاعقه گیرها را نیز در نظر گرفت.

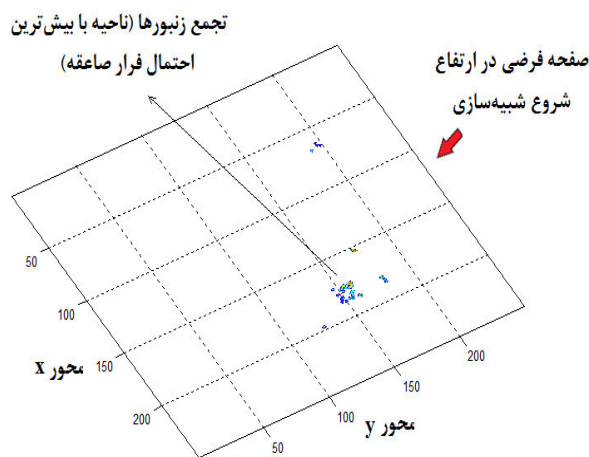
همان طور که در بخش ۴ اشاره شد یافتن جواب مسئله ارائه شده در این مقاله بدون استفاده از روش ABC، تنها با محاسبه همه حالت های ممکن (حدود ۱۲ میلیارد حالت برای هر مرحله از مراحل بخش ۵) امکان پذیر است. به کارگیری روش ABC به این منظور صورت گرفته است که حجم محاسبات را بسیار کاهش دهد. در روش جدید در



شکل ۵: اجرای مرحله ۲ (صاعقه گیر در نقطه ۴ نصب شده است)

مرحله ۳: هنگامی که صاعقه گیر دوم در نقطه ۲ نصب شد، نتایج حاصله نشان دهنده تجمع زنبورها در حوالی طول و عرض [۱۶۰ و ۱۸۰] متر در صفحه مش بندی شده است و آسیب پذیرترین محل سازه نقطه ۸ است (شکل ۶). پس صاعقه گیر مناسب بعدی می بایست در نقطه ۸ قرار گیرد.

مرحله ۴: تا اینجا سه صاعقه گیر در نقاط ۴ و ۲ و ۸ نصب شده اند. به منظور جایابی صاعقه گیر چهارم الگوریتم مجدداً اجرا شده و مطابق شکل ۷ ناحیه ای که صاعقه های آن بیشترین احتمال فرار را دارد در حوالی [۱۵۰ و ۶۰] متر به دست آمده است. برخورد نهایی این صاعقه ها به حوالی نقطه ۳ خواهد بود و صاعقه گیر مناسب می بایست در نقطه ۳ قرار گیرد.



شکل ۶: اجرای مرحله ۳ (صاعقه گیر در نقاط ۲ و ۴ نصب شده است)

در طی مراحل چهارگانه، پرخطرترین نواحی و همچنین آسیب پذیرترین نقاط ساختار مورد بررسی در برابر اصابت صاعقه از نظر تعدد پاسخها (زنبورها) و همچنین از نظر حداکثر احتمال فرار صاعقه مشخص شده و نتایج حاصله در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود با افزایش تعداد صاعقه گیرها حداکثر احتمال فرار صاعقه کاهش یافته است.

- [4] M.R. Bank Tavakoli, and B. Vahidi, "Transmission-lines shielding failure-rate calculation by means of 3-D leader progression models," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 2, pp. 507-516, 2011.
- [5] M.R. Bank Tavakoli, and B. Vahidi, "A metamodeling approach for leader progression model-based shielding failure rate calculation of transmission lines using artificial neural networks," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 6, no. 6, pp. 760-768, 2011.
- [6] Yzhong Xu, and Mingli Chen, "An improved 3-D self-consistent stochastic stepped leader model," *7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, pp. 699-705, pp. 1-4, 2011.
- [7] Yazhong Xu, and Mingli Chen, "Striking distance calculation for flat ground and lightning rod by a 3D self-organized Leader Propagation Model," *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1-5, 2-7, 2012.
- [8] T. Horvath, *Computation of Lightning Protection*, London, U.K. Research Studies Press, 1991.
- [9] J. He, Y. Tu, R. Zeng, J.B. Lee, S.H. Chang, and Z. Guan, "Numerical analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 815-821, 2005.
- [10] V. Cooray, "The mechanism of the lightning flash," *The Lightning Flash*, V. Cooray, ed. London, U.K.: Inst. Elect. Eng., pp. 144-159, 2003.
- [11] V. Cooray, V. Rakov, and N. Theethayi, "The lightning striking distance- revisited", *J. Electrostat.*, vol. 67, pp. 296-306, 2007.
- [12] M. Becerra, and V. Cooray, "A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 2, pp. 897-908, 2006.
- [13] U. Kumar, P.K. Bokka, and J. Padhii, "A macroscopic inception criterion for the upward leaders of natural lightning," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 904-911, 2005.
- [14] L. Deller, and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model Part I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 4, pp. 2009-2022, 1990.
- [15] L. Deller, and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model PART II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 4, pp. 2023-2029, 1990.
- [16] M. Becerra, and V. Cooray, "On the velocity of lightning upward connecting positive leaders," *IX International Symposium on Lightning Protection*, 2007.
- [17] A.J. Eriksson, "The incidence of lightning strikes to power lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 3, pp. 859-870, 1987.
- [18] A.J. Eriksson, "An improved electro geometric model for transmission line shielding analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 3, pp. 871-886, 1987.
- [19] F.A.M. Rizk, "Switching impulse strength of air insulation: leader inception criterion," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 4, no. 4, pp. 2187-2195, 1989.
- [20] F.A.M. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 4, pp. 1983-1997, 1990.

هر سیکل ۴۱ زنبور موقعیت‌های متفاوتی را ارزیابی می‌کنند و در هر ارزیابی حدود ۲۰۰۰ نمونه جریان را برای ۵ موقعیت (مرکز و گوشه‌های) هر مش در صفحه شروع شبیه‌سازی بررسی می‌کنند. بدین ترتیب مسیر حرکت و نقطه برخورد نهایی ۴۱۰ هزار صاعقه تعیین می‌گردد. با توجه به اینکه جواب‌ها در هر مرحله طی ۱۰۰ سیکل همگرا شده‌اند، تعداد حالت‌های بررسی شده حدود ۴۱ میلیون حالت است که در مقایسه با روش مستقیم بسیار کم‌تر خواهد بود.

با توجه به اینکه حجم محاسبات در روش ارائه شده بسیار کم‌تر از روش مستقیم است، الگوریتم پیشنهادی چند بار اجرا شده و نتایج حاصل تقریباً مشابه بوده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از یک روش پیشنهادی نوین، نواحی با بیش‌ترین احتمال برخورد صاعقه در ساختارهای پیچیده شناسایی شده و با قرار دادن صاعقه‌گیرهای میله‌ای در محل مناسب بهبود حفاظت ارزیابی گردیده است. به‌منظور تعیین نواحی پرخطر در فضای بالای ساختار و نقاط با بیش‌ترین احتمال برخورد مستقیم صاعقه از روش حرکت گام‌به‌گام پیش‌موج صاعقه در ترکیب با الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور مصنوعی استفاده شده است. نواحی پرخطر در صفحه شروع شبیه‌سازی در واقع همان مناطقی هستند که در الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، گل‌های با شهد بیش‌تر در آن‌ها وجود دارند. یعنی هر چه شهد گل‌های ناحیه‌ای بیش‌تر باشد، احتمال فرار صاعقه از آن بیش‌تر است. در پایان می‌توان اشاره نمود که به‌کارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی در ترکیب با روش تحلیل عددی صاعقه ابزاری قوی و سریع در طراحی سیستم حفاظت در برابر صاعقه است. این روش تکمیل‌کننده روش‌های تحلیل عددی بوده و نقصان‌های روش‌های تحلیلی را از نظر حجم محاسبات و شبیه‌سازی‌ها نیز برطرف نموده است. روش پیشنهادی می‌تواند برای ارزیابی و همچنین طراحی سیستم حفاظت در برابر صاعقه ساختارهای نامتقارن پیچیده به کار گرفته شود.

مراجع

- [1] B. Vahidi, M. Yahyaabadi, M.R. Bank Tavakoli, and S.M. Ahadi, "Leader progression analysis model for shielding failure computation by using charge simulation method," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2201-2206, 2008.
- [2] M. Yahyaabadi, B. Vahidi, and M.R. Bank Tavakoli, "Estimation of shielding failure number of different configurations of double-circuit transmission lines using leader progression analysis model," *Electrical Engineering*, vol. 92, no. 2, pp. 79-85, 2010.
- [3] M. Yahyaabadi, and B. Vahidi, "Estimation of shielding failure number of transmission lines for different trace configurations using leader progression analysis," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 38, pp. 27-32, 2012.

- [21] F.A.M. Rizk, "Modeling of lightning incidence to tall structures Part I: Theory," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 162-171, 1994.
- [22] F.A.M. Rizk, "Modeling of lightning incidence to tall structures Part II: Application," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 172-193, 1994.
- [23] F.A.M. Rizk, "Modeling of lightning exposure of buildings and massive structures," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 4, pp. 1987-1998, 2009.
- [24] F.A.M. Rizk, "Modeling of lightning exposure of sharp and blunt rods," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 3122-3132, 2010.
- [25] R.H. Golde, *Lightning Protection*, Edward Arnold Publishing Co., London, Britain, 1973.
- [26] M.A. Uman, *the Art and Science of Lightning Protection*, Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 2008.
- [27] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization," *Technical Report TR06*, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [28] D. Karaboga, and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, vol. 39, pp. 459-471, 2007.
- [29] D. Karaboga, and B. Basturk, *Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 789-798, 2007.
- [30] D. Karaboga, and B. Akay, "A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 214, pp. 108-132, 2009.
- [31] M. Marinaki, Y. Marinakis, and C. Zopounidis, "Honey bees mating optimization algorithm for financial classification problems," *Applied Soft Computing*, vol. 10, pp. 806-812, 2010.
- [32] P.B. Ketan, Y. Shi, and M.H. Lim, *Handbook of Swarm Intelligence*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [33] D. Karaboga, and C. Ozturk, "A novel clustering approach: Artificial Bee Colony (ABC) algorithm," *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 652-657, 2011.
- [34] H. Singer, H. Steinbigler, and P. Weiss, "A charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Power Apparatus and Systems*, pp. 1660-1668, 1974.
- [35] A. Yializis, E. Kuffel, and P.H. Alexander, "An optimized charge simulation method for the calculation of high voltage fields," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 97, no. 6, pp. 2434-2438, 1978.
- [36] N.H. Malik, "A review of the charge simulation method and its application," *IEEE Trans. Elect. insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 3-20, 1989.

زیر نویس ها

- ∨ Rolling Sphere Method
- ∨ Downward Lightning Leader
- ∨ Electro-Geometric Model
- ∨ Artificial Bee Colony
- ◊ Employed Bees
- * Onlookers
- ∨ Scouts
- ^ Limit
- ^ Charge Simulation Method
- ∨ Shielding Failure Number