

Flashover Voltage Prediction of Polymeric Insulators in Presence of Surface Charge and Pollution using Artificial Neural Network

Jamshid Mahmoodi ¹, Mohammad Mirzaie ², Amir Abbas Shayegani Akmal³

¹ Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

³ Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, the effect of surface charges and pollution on flashover voltage of polymeric insulators under DC voltage have been investigated and analyzed. For this purpose, four types of polymeric insulators with different profiles have been selected and then experimental tests of DC flashover voltage have been performed. According to the obtained results, with increasing pollution in presence of positive surface charges flashover voltage reduce, but negative charges increase it. Also in this paper, a model based on geometric parameters including specific leakage distance, shed spacing to shed depth ratio, amount of surface charges and pollution is proposed using an artificial neural network. The comparison of the obtained results from experimental tests and ANN model show that the results of ANN are consistent with experimental tests.

Keywords: Polymeric Insulator, Surface Charge, Pollution, Flashover Voltage, Modeling, Artificial Neural Network (ANN).

پیش‌بینی ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره‌های پلیمری با ملاحظه بر تأثیر بارهای

سطحی و آلودگی به کمک شبکه عصبی مصنوعی

جمشید محمودی^۱، محمد میرزائی^۲، امیرعباس شایگانی اکمل^۳

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

jamshidmahmoodi68@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران

mirzaie@nit.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران

shayegani@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، اثر حضور همزمان بارهای سطحی و آلودگی بر تخلیه الکتریکی مقره‌های پلیمری تحت ولتاژ DC بررسی و تحلیل شده است. بدین منظور چهار نوع مقره‌های پلیمری با پروفیل متفاوت، انتخاب و سپس تست‌های آزمایشگاهی تخلیه الکتریکی DC انجام شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، افزایش مقدار آلودگی در حضور بارهای سطحی مثبت باعث کاهش ولتاژ شکست مقره‌ها شده است. این درحالی است که بارهای منفی باعث افزایش ولتاژ شکست الکتریکی می‌شود. در این مقاله مدلی به‌منظور پیش‌بینی ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره براساس پارامترهای هندسی آن شامل فاصله خزشی مخصوص و نسبت فاصله به عمق چترک‌ها، آلودگی و مقدار بارهای سطحی با استفاده از شبکه عصبی معرفی شده است. مقایسه نتایج تست‌های آزمایشگاهی گرادیان ولتاژ شکست الکتریکی برای یک مقره با پارامترهای هندسی مشخص با نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی نشان می‌دهد پیش‌بینی گرادیان ولتاژ شکست به روش شبکه عصبی، انطباق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده دارد.

واژه‌های کلیدی: مقره‌های پلیمری، بارهای سطحی، آلودگی، ولتاژ تخلیه الکتریکی، مدلسازی، شبکه عصبی.

۱- مقدمه

به علت مزایایی نظیر سبکی، آبگریزی، مقاومت سطحی بالا و جریان خزشی کم، کاربرد بسیار فراوانی در خطوط هوایی پیدا کرده‌اند [۱].

آلودگی یکی از پارامترهای مهم است که اثر چشمگیری بر عملکرد مقره‌ها دارد. به عبارتی آلودگی از جمله عوامل و معیارهای مهم در طراحی عایق‌های بیرونی تجهیزات محسوب می‌شود. با وجود آلودگی روی مقره‌ها، میدان و ولتاژ الکتریکی در طول مقره تغییر می‌یابد و با افزایش جریان ناشی، موجبات فرسودگی مقره‌ها و شکست الکتریکی آنها فراهم می‌شود. از دیگر مسائل مهم در

یکی از انواع مقره‌های استفاده‌شده در شبکه قدرت، مقره‌های پلیمری یا کامپوزیت اند که امروزه جنس بیشتر این نوع مقره‌ها از لاستیک سیلیکون است. این نوع مقره‌ها

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹

نام نویسنده مسئول: محمد میرزائی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

عملکرد مقره‌ها، تجمع بار الکتریکی است که در خطوط انتقال ولتاژ بالا اثر آن نیز بیشتر می‌شود. بار الکتریکی می‌تواند در اثر یونیزاسیون طبیعی یا وجود تخلیه الکتریکی پدید آید [۲]. وجود و استقرار بارهای الکتریکی روی عایق‌ها به تغییرات میدان الکتریکی و در نتیجه استقامت الکتریکی آنها منجر می‌شود [۳]؛ بنابراین نشست بارهای روی مقره‌ها بسیار حائز اهمیت است. اگرچه پدیده بارهای سطحی عامل تأثیرگذار بر ولتاژ تخلیه الکتریکی در مقره‌ها شناخته شده است، هنوز پژوهش‌های جامعی درباره آن صورت نگرفته است. در [۴] اثر بارهای سطحی روی ولتاژ تخلیه الکتریکی DC در یک عایق استوانه‌ای پلیمری بررسی شده است. سطح عایق با دشارژ سوزن‌های متقارن در اطراف آن باردار می‌شود. براساس نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داده شد حضور بارهای منفی در سمت کاتد باعث کاهش میدان الکتریکی می‌شود؛ در حالی که وجود بارهای مثبت روی سطح عایق، سبب افزایش میدان الکتریکی خواهند شد. در [۵] از شش نمونه ماده عایق پلیمری شامل SIR^۱، EPDM^۲ برای انجام تست‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. بارهای الکتریکی انباشته شده روی سطح نمونه‌های مورد آزمایش، با ولتاژهای ضربه با دامنه کم ایجاد شد و نتایج نشان دادند ولتاژ تخلیه الکتریکی ضربه، به قطبیت بارهای انباشته شده روی سطح نمونه عایقی وابسته است که نوع بار (مثبت یا منفی) آن نیز بستگی به قطبیت ولتاژ ضربه و نوع ماده عایقی دارد. در [۶] پارامترها و مکانیسم تجمع بارهای سطحی در یک عایق مخروطی شکل تحت ولتاژ DC بررسی شده است. پتانسیل سطحی به کمک پراب الکترواستاتیکی، اندازه‌گیری و سپس با استفاده از روابط ریاضی، مقدار بار روی سطح عایق مخروطی محاسبه شد. در این مقاله نشان داده شد بارهای سطحی عامل اصلی ایجاد تخلیه جزئی در عایق‌اند. در مرجع [۷] تأثیر بارهای سطحی انباشته شده روی عایق PTFE^۳ استوانه‌ای بر ولتاژ تخلیه الکتریکی DC در هوا مطالعه شد. پژوهش‌ها برای هر دو نوع میدان الکتریکی یکنواخت و غیریکنواخت با استفاده از الکترودهای مختلف انجام شد. نتایج نشان دادند کاهش ولتاژ تخلیه الکتریکی منفی در حضور بارهای سطحی، در حالت میدان یکنواخت

تأثیر زیادی بر نتایج دارد؛ در حالی که در میدان غیریکنواخت اثر چشمگیری روی ولتاژ تخلیه الکتریکی گزارش نشد. با توجه به موارد بیان شده، برای جلوگیری از وقوع تخلیه الکتریکی غیرمنتظره، باید درک کاملی از بارهای سطحی و رفتار دینامیکی آن وجود داشته باشد تا تأثیر آن روی رفتار عایق تحت تنش‌های الکتریکی مختلف بررسی شود.

در [۸] اثر بارهای سطحی روی نتایج تست‌های ضربه بررسی شده است. با انجام تست‌های ولتاژ ضربه روی عایق مشاهده شد قبل از شکست جزئی یا شکست کامل، مقداری بار روی سطح عایق انباشته می‌شود. تجمع این بارها روی سطح عایق به افزایش ولتاژ شکست ضربه در طول آزمایش‌های بعدی منجر خواهد شد. درخصوص اثر آلودگی بر تخلیه الکتریکی تا کنون پژوهش‌های زیادی انجام شده است که به مراجع [۹-۱۳] طی چند سال اخیر اشاره می‌شود. در [۹] به بررسی آلودگی غیریکنواخت قطاعی بر ولتاژ تخلیه الکتریکی DC پرداخته شده است. در [۱۰] نیز مدل دینامیکی براساس مقاومت لایه آلوده برای ولتاژ تخلیه الکتریکی معرفی شده است.

در این مقاله، تأثیر همزمان وجود بارهای سطحی و آلودگی بر ولتاژ تخلیه الکتریکی چهار نوع مقره پلیمری با پروفیل مختلف بررسی می‌شود. بدین منظور در این مقاله براساس پارامترهای هندسی مقره شامل فاصله خزشی مخصوص و نسبت فاصله به عمق چترک‌ها، آلودگی و مقدار بارهای سطحی، مدلی با استفاده از شبکه عصبی برای تخمین ولتاژ تخلیه الکتریکی براساس تست‌های آزمایشگاهی مختلف معرفی می‌شود. بر اساس این، در قسمت دوم مقاله، عوامل ایجاد بارهای سطحی و اثر آلودگی بر عملکرد مقره‌ها، در قسمت سوم تست‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری آلودگی و بارهای سطحی و اثر آن بر گرایان ولتاژ تخلیه الکتریکی و در قسمت چهارم، مدلسازی براساس پارامترهای بیان شده با استفاده از شبکه عصبی بیان خواهد شد.

۲- اثر آلودگی و بارهای سطحی بر تخلیه

الکتریکی مفرها

آلودگی یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر تخلیه الکتریکی در مفرها است. درواقع آلودگی به همراه رطوبت شرایط لازم را برای وقوع تخلیه الکتریکی فراهم می‌کند؛ ازاین‌رو، برای شناخت فرآیند وقوع تخلیه الکتریکی، شناخت آلودگی و چگونگی ایجاد آن روی سطح مفر ضروری به نظر می‌رسد. نیروی جاذبه، باد و میدان الکتریکی، عمده نیروهایی اند که به ذرات گردوغبار نزدیک مفر وارد می‌شوند. نیرویی که به دلیل میدان الکتریکی وارد می‌شود، ناشی از دو مؤلفه است؛ یک مؤلفه متناسب با میدان الکتریکی (E) و دیگری متناسب با مجذور میدان الکتریکی (E^2) به دلیل دیورژانس میدان الکتریکی است [۱۴]. در مفرهای استفاده‌شده در خطوط AC، مؤلفه نیروی متناسب با E به دلیل طبیعت متناوب بودن ولتاژ، صفر است؛ اما در مؤلفه دومی، دیورژانس میدان همواره مقدار مثبتی دارد و اندازه آن با میدان الکتریکی افزایش می‌یابد. روی مفرهای خطوط DC، هر دو مؤلفه مقدار مثبتی دارند؛ به همین دلیل، تجمع آلودگی روی مفرهای خطوط DC بیشتر از مفرهای استفاده‌شده در خطوط AC است. در میدان الکتریکی DC و AC، میدان الکتریکی اطراف مفره غریب‌نواخت است؛ به طوری که نزدیک ترمینال فشارقوی بیشترین شدت میدان وجود دارد؛ بنابراین طبیعی است این بخش از مفره استقرار آلودگی بیشتر باشد [۱۴].

چندین تئوری درباره مکانیزم توسعه تخلیه الکتریکی محلی و تبدیل شدن به شکست الکتریکی روی سطوح آلوده پیشنهاد شده است [۱۵ و ۱۶]:

- نیروی خارجی کششی جرقه است؛ بدین صورت که نیروهای خارجی مانند نیروی الکترواستاتیک، باعث حرکت و گسترش جرقه در طول سطح آلوده و وقوع تخلیه الکتریکی می‌شوند.

- تئوری دیگری به این صورت است که شدت میدان الکتریکی زیاد در ستون جرقه باعث یونیزاسیون هوا در جلوی آن می‌شود؛ درنتیجه، این یونیزاسیون است که باعث توسعه جرقه و تخلیه الکتریکی می‌شود.

- تئوری شکست حرارتی است که دمای بالای ستون جرقه باعث تشدید یونیزاسیون هوا می‌شود و درنتیجه، جرقه گسترش می‌یابد و تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد.

همان‌طور که گفته شد آلودگی در مفرهای DC نسبت به AC اهمیت بیشتری دارند؛ زیرا ماهیت استاتیک میدان الکتریکی DC باعث تجمع آلودگی بیشتری نسبت به حالت AC روی مفرهای DC می‌شود و تعداد شکست الکتریکی و نرخ فرسودگی را افزایش می‌دهند. همچنین تجمع بار الکتریکی در میدان DC باعث شده است مفرهای DC نیازمند مطالعه بیشتر باشند. مفرهای شیشه‌ای و سرامیکی سابقه بیشتری نسبت به انواع غیرسرامیکی آن در خطوط HVDC دارند. به همین علت پژوهش‌های کمتری نیز روی مفرهای کامپوزیتی در ولتاژ DC انجام شده است.

در میان عوامل موثر بر بارهای سطحی، کرونا به دلیل نوع مکانیسم ایجاد بار سطحی روی عایق اهمیت بالایی دارد [۱۷]. از سوی دیگر، امروزه نیز به پدیده‌های مرتبط با کرونا در ارتباط با توسعه سیستم‌های عایق پلیمری در فضای باز که در معرض اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی و صاعقه‌اند، توجه ویژه‌ای می‌شود.

به‌طورکلی پتانسیل سطحی اندازه‌گیری‌شده روی سطح یک عایق تنها به دلیل وجود بار سطحی روی آن نیست، بلکه منابع دیگری از جمله پلاریزاسیون دوقطبی، بارهای فضایی نیز در ایجاد پتانسیل سطحی نقش دارند.

بسته به شرایط می‌توان فقط یکی از عوامل ایجاد پتانسیل سطحی را در نظر گرفت و از بقیه عوامل صرف‌نظر کرد. در این بین یکی از راه‌های تجزیه و تحلیل فرآیندهای ایجاد بار سطحی، توسعه مدلسازی‌های کامپیوتری است. امروزه این مدل‌ها ابزار قدرتمندی برای درک مکانیسم فیزیکی پتانسیل و بار سطحی بروی عایق‌ها هستند.

در بسیاری از مراجع برای مدلسازی پتانسیل سطحی ناشی از حضور بارهای سطحی فرض می‌شود که عایق مدنظر در لحظه $t=0$ ، باردار و پس از آن به صورت سیستم مدار باز نگه داشته می‌شود. برای چنین حالتی، می‌توان معادلات پیوستگی جریان را در هر نقطه در داخل عایق به صورت رابطه (۱) نوشت [۱۷]:

پیش‌بینی ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره‌های پلیمری با ملاحظه بر تأثیر بارهای سطحی و آلودگی به کمک ...

که در آن J چگالی جریان، E میدان الکتریکی، q مقدار بار اولیه، ε ضریب دی الکتریک، K_B ثابت بولتزمن ϕ_B ولتاژ مانع و T دما است.

در مرجع [۲۰] از مدل نمایی هدایت برای مطالعه اندازه گیری پتانسیل سطحی روی عایق EPDM و لاستیک سیلیکون استفاده شد؛ با این فرض که به میدان هدایت عایق بستگی دارد (براساس تعریف مدل Poole-Frenkel) و با توجه به اینکه هدایت الکتریکی خود از رابطه نمایی (۶) به دست می‌آید:

$$\sigma(V) = \sigma_0 \exp(\beta_{PF} \sqrt{V}) \quad (6)$$

که در آن $\sigma(V)$ هدایت الکتریکی وابسته به ولتاژ (یا میدان) است و این رابطه به هدایت اولیه (σ_0) و ضریب Poole-Frenkel وابسته است.

۳- تست‌های آزمایشگاهی

مجموعه تست های آزمایشگاهی و مراحل انجام آن روی انواع مقره‌ها با پروفیل های مختلف شامل بخش های زیر است که در ذیل بیان می‌شوند:

۳-۱- ایجاد آلودگی مصنوعی

به منظور ایجاد آلودگی مصنوعی روی سطح مقره ها و بررسی اثر انواع آلودگی بر عملکرد آنها، تکنیک های مختلفی وجود دارد. در این مقاله، آلوده سازی مقره ها براساس استاندارد IEC60507 صورت گرفته است. مطابق این استاندارد، آلودگی مصنوعی به دو روش مه نمکی و لایه جامد انجام می‌شود. روشی که در این مقاله برای آلوده کردن مقره‌ها استفاده شده، روش لایه جامد است. شایان ذکر است در روش لایه جامد، محلول آلودگی شامل ترکیبی از سدیم کلرید (NaCl) با درصد خلوص تجاری به همراه آب مقطر و کاتولین است. از نمک و کاتولین به ترتیب به منظور ایجاد هدایت الکتریکی آلودگی و چسبندگی سطحی لایه آلودگی استفاده می‌شود. پس از ساخت محلول آلودگی باید آلودگی را روی مقره ها پاشیده شود. برای این کار با استفاده از اسپری محلول آلودگی، لایه به لایه روی مقره نشاندن می‌شود؛ به این صورت که پس از هر بار اسپری کردن، لایه خشک و

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \sigma E + \sum_i \mu_i \rho_i E = 0 \quad (1)$$

در این رابطه، جمله اول مربوط به بردار جابجایی دی الکتریک (D) می‌باشد که نشان دهنده چگالی جریان ناشی از پلاریزاسیون داخل ماده عایق است بطوری که مطابق رابطه (۲) داریم:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2)$$

در رابطه فوق E شدت میدان الکتریکی، P پلاریزاسیون و ε_0 ضریب گذردهی خلاء می‌باشد. جمله دوم رابطه (۱)، نشان دهنده چگالی جریان ناشی از هدایت ذاتی ماده است. جمله سوم نیز توصیف کننده چگالی جریان ناشی از تریق حامل های بار درون عایق می‌باشد که در آن μ تحرک بار و ρ هم چگالی حامل بار خاص است. مطابق رابطه (۱) مجموع این چگالی جریان ها برابر صفر است و با توجه به مدار باز بودن سیستم، هر سه جمله به افت پتانسیل کمک می‌کند. هنگامی که در رابطه (۱) از اثر بارهای فضایی صرف نظر شود، به رابطه کاهش یافته (۳) و (۴) خواهیم رسید که به طور کلی به هدایت ذاتی عایق وابسته می‌باشد.

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E = 0 \quad (3)$$

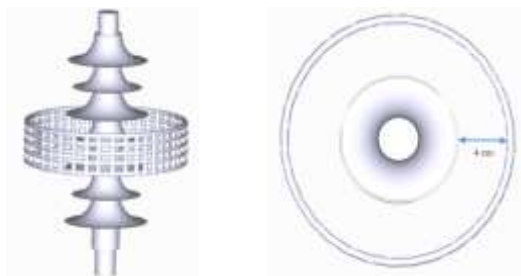
$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، E شدت میدان الکتریکی، ε ضریب گذردهی، σ هم چگالی حامل بار و V پتانسیل الکتریکی می‌باشد. مطابق معادله (۴) ضریب هدایت ذاتی باید به صورت یک رابطه نمایی با ثابت زمانی وابسته به ضریب گذردهی خلاء برای محاسبه پتانسیل سطحی ظاهر می‌شود [۱۸]. در مرجع [۱۹] عوامل ایجاد بار سطحی، بررسی و تفسیری از عامل افت پتانسیل سطحی ارائه شد؛ با این فرض که بارهای سطحی با توجه به هدایت عایق به مرور زمان، حذف و زمینه افت پتانسیل سطحی را آماده می‌کند. این تفسیر براساس مدل معروف Poole-Frenkel بیان شده است. مدل Poole-Frenkel به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$J \propto E \exp \left(\frac{-q \left(\phi_B - \sqrt{\frac{qE}{\pi \varepsilon}} \right)}{k_B T} \right) \quad (5)$$

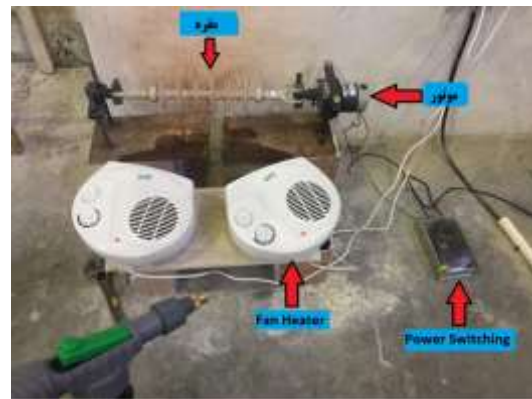
شکل (۲): سیستم آزمایشگاهی برای باردار کردن سطح مقره

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری بار سطحی وجود دارند. در بیشتر مراجع با استفاده از اندازه‌گیری پتانسیل سطحی و استفاده از روابط ریاضی، بار سطحی اندازه‌گیری شده است. بدین منظور برای اندازه‌گیری پتانسیل سطحی، از ولت‌متر الکترواستاتیکی استفاده می‌شود. در جدیدترین پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه اندازه‌گیری بار سطحی، روش استفاده از سنسور بار، معرفی و در مراجع [۲۱-۲۳] استفاده شده قرار گرفته است. در این مقاله نیز از سنسور بار برای اندازه‌گیری بار سطحی استفاده شده است. شرکت Vernier در سال ۲۰۱۲ این سنسور و نمایشگر را به بازار عرضه کرد. در این روش، با استفاده از شبکه مشبک استیلی تمامی بار الکتریکی روی سطح مقره، القا و سپس با کمک سنسور این بار الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. شبکه مشبک استیلی می‌باید در فاصله مناسبی از مقره قرار گیرد تا بتوان بارهای سطحی روی مقره را اندازه‌گیری کرد. بدین منظور، شبکه مشبک استیل در فاصله ۴ سانتی‌متری از مقره قرار داده شده است. مقدار بار الکتریکی اندازه‌گیری شده با نمایشگر Labquest 2 نشان داده می‌شود. این روش علاوه بر دقت بیشتر، امکان اندازه‌گیری به صورت Real-Time را نیز فراهم می‌کند. به منظور کاهش زمان بین ایجاد بار الکتریکی و اندازه‌گیری بار، کمر بند کرونا و شبکه مشبک استیل به دو قسمت تقسیم شد تا فرآیند جداسازی کمر بند کرونا و اتصال شبکه مشبک استیلی در کمترین زمان ممکن انجام پذیرد. شکل (۳) نمای کلی از شبکه مشبک استیلی برای اندازه‌گیری بار الکتریکی سطحی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شبکه مشبک استیلی برای اندازه‌گیری بار الکتریکی سطحی

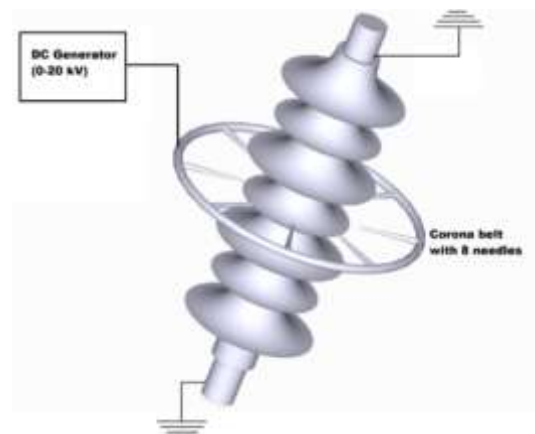
سپس لایه بعدی آلودگی اسپری می‌شود. برای سریع‌تر خشک شدن هر لایه اسپری شده، از سیستم‌های گرمایشی (هیترها) استفاده شده است، به صورتی که به مقره آسیبی نرسد. همچنین مقره به یک موتور DC با دور کم (۱۵ دور در دقیقه) متصل شده است تا با گردش مقره‌ها در فرآیند آلوده‌سازی، سطح مقره به صورت یکنواخت آلوده شود. شکل (۱) نمای کلی از سیستم پیاده‌سازی شده برای آلوده کردن سطح مقره را نشان می‌دهد.



شکل (۱): سیستم آلوده‌سازی مصنوعی مقره‌ها

۲-۳- باردار کردن سطح مقره و اندازه‌گیری بار سطحی

در این مقاله، برای باردار کردن سطح مقره از کمر بند کرونا به قطر ۱۲ سانتی‌متر استفاده شده است که دارای ۸ سوزن کرونا با فاصله ۴ سانتی‌متر از هم قرار دارند. این حلقه تحت ولتاژهای مختلف DC قرار می‌گیرد و باعث ایجاد بار سطحی روی سطح مقره می‌شود. شکل (۲) نمای کلی از روش باردار کردن سطح مقره را نشان می‌دهد.

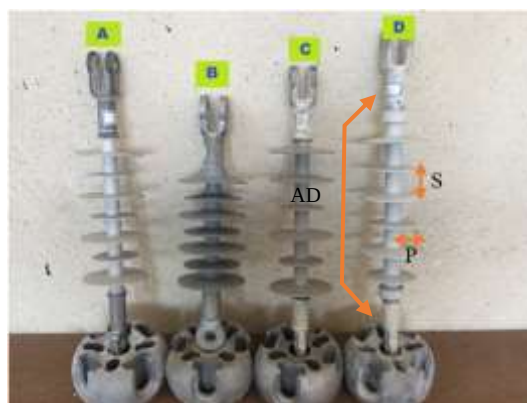


۳-۳- اندازه‌گیری ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره‌ها

برای انجام تست تخلیه الکتریکی، از مدار دو برابر کننده (مدار گرایناخر) استفاده شده است. این مدار ولتاژ ورودی را دو برابر و شرایط را برای انجام تست ولتاژ تخلیه الکتریکی فراهم می‌کند. با توجه به استفاده از ترانسفورماتور ۱۰۰ کیلوولت، با استفاده از مدار دو برابر کننده DC می‌توان این ولتاژ را تا حدود ۲۸۰ کیلوولت افزایش داد. برای ثابت نگه داشتن شرایط محیطی در طول انجام آزمایش‌ها از یک محفظه استفاده شده که اسکلت این محفظه از چوب و پوشش آن از پلاستیک ضخیم و شفاف است. متوسط دمای هوا در محیط آزمایشگاه در حین انجام تست‌ها ۲۵ درجه سانتیگراد و رطوبت بین ۸۵ تا ۹۰ درصد بوده است.

۴-۳- مشخصات مقره‌های پلیمری مورد مطالعه

مجموعه تست‌های تخلیه الکتریکی انجام‌شده روی چهار نوع مقره پلیمری ۲۰ کیلوولت با پروفیل‌های متفاوت و از نوع لاستیک سیلیکونی انجام شده است. این چهار نوع مقره در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمونه مقره‌های مورد مطالعه

همچنین در جدول (۱) اطلاعات و مشخصات فنی چهار نوع مقره لاستیک سیلیکونی مورد مطالعه، نشان داده شده است.

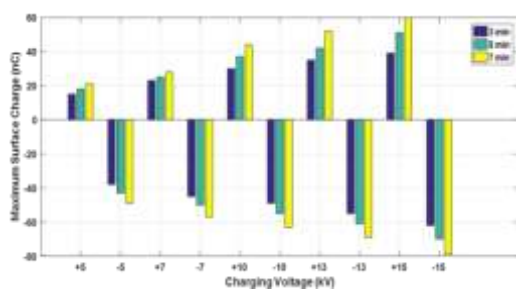
جدول (۱): مشخصات مقره‌های ۲۰ کیلوولت لاستیک

نوع	تعداد چترک‌ها خزشی	فاصله خشک	فاصله جرقه شمع چترک بزرگ (P)	فاصله بین دو چترک (S)	سیلیکونی مورد مطالعه بر حسب میلی‌متر
A	۷	۶۶۰	۲۸۵	۵۰	۴۵
B	۷	۶۵۴	۲۴۵	۵۵	۲۵
C	۶	۶۳۴	۳۲۸	۵۲	۴۵
D	۶	۷۱۰	۳۲۵	۵۱	۴۸

۴-۴- نتایج آزمایش‌های عملی و بحث

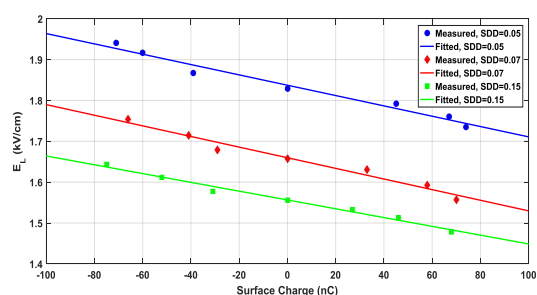
در این مقاله اندازه‌گیری ولتاژ تخلیه الکتریکی مقره‌های مورد مطالعه در چهار حالت بدون آلودگی، آلودگی سبک، متوسط و سنگین در حضور بارهای سطحی مثبت و منفی انجام می‌شود. شایان ذکر است تست ولتاژ قوس الکتریکی مقره‌ها تحت انواع آلودگی‌ها و در حضور بارهای سطحی مثبت و منفی و برای تمام نمونه‌ها با فواصل زمانی منظم و با نرخ ۳ کیلوولت بر ثانیه و دست کم پنج مرتبه تکرار شده و مقدار میانگین آنها به‌عنوان ولتاژ تخلیه الکتریکی ثبت شده است.

به‌منظور اندازه‌گیری حداکثر بار الکتریکی، مقره A به‌عنوان مقره نمونه، انتخاب و سطح آن با کمر بند کرونا تحت ولتاژهای DC و زمان‌های اعمال مختلف، چترک میانی مقره باردار شد. ولتاژهای ۵±، ۷±، ۱۰±، ۱۳± و ۱۵± کیلوولت طی زمان‌های ۳، ۵ و ۷ دقیقه به سطح مقره، اعمال و سپس اندازه‌گیری بار الکتریکی انجام شد. شکل (۵) مقدار حداکثر بار الکتریکی در هر کدام از حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

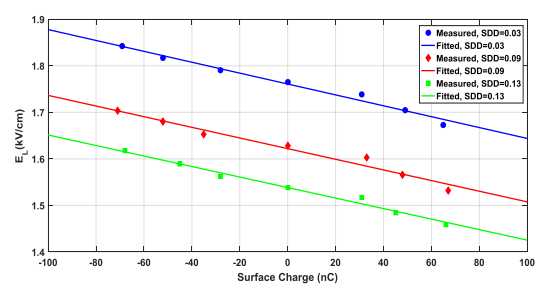


شکل (۵): حداکثر بار الکتریکی اندازه‌گیری شده در ولتاژها و زمان‌های شارژ مختلف

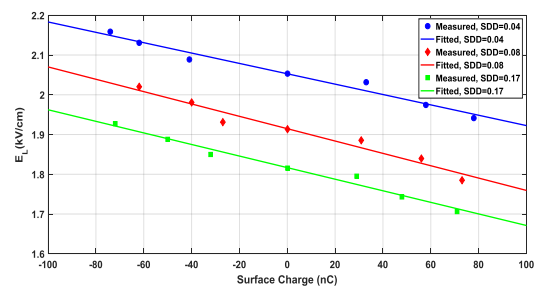
فاصله قوس خشک استفاده می‌شود؛ با این حال فاصله خزشی برای مطالعات آلودگی مرسوم‌تر است [۱۳]. در ادامه نیز از همین تعریف استفاده می‌شود. شکل (۷) اثر بارهای سطحی مثبت و منفی در سه سطح مختلف آلودگی بر حسب میلی گرم بر سانتی متر مربع را بر گرادیان ولتاژ تخلیه الکتریکی مفره‌های A تا D نشان می‌دهد.



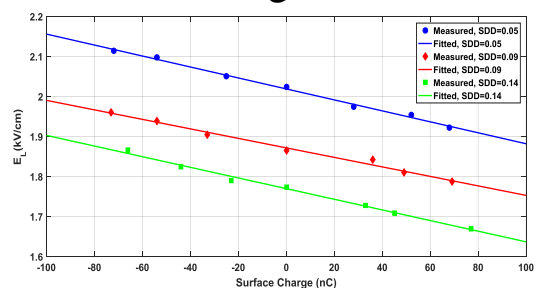
(الف)



(ب)



(ج)

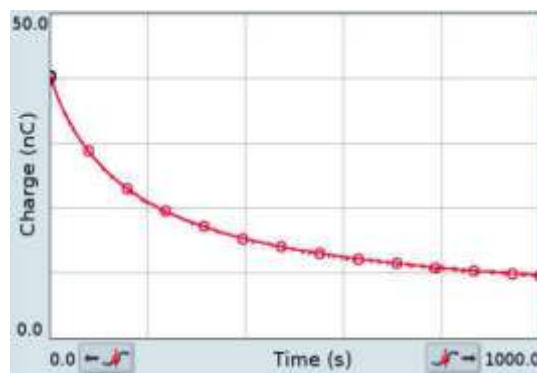


(د)

شکل (۷): اثر بارهای سطحی مثبت و منفی در سه سطح مختلف آلودگی بر گرادیان ولتاژ تخلیه الکتریکی الف) مفره A (ب) مفره B (ج) مفره C (د) مفره D

با توجه به نتایج به دست آمده در ولتاژهای ثابت، با افزایش زمان اعمال ولتاژ، مقدار بار الکتریکی روی سطح مفره نیز در هر دو حالت ولتاژهای مثبت و منفی افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد در ولتاژهای منفی مقدار بار الکتریکی اندازه‌گیری شده نسبت به ولتاژهای مثبت بیشتر است که این امر ناشی از پدیده انتشار میدانی الکترون^۵ است.

فاصله زمانی بین اندازه‌گیری بار سطحی تا انجام ولتاژ تخلیه الکتریکی حدود یک دقیقه است؛ بنابراین می‌باید مقدار واقعی بار سطحی در لحظه اعمال ولتاژ تخلیه الکتریکی در نظر گرفته شود. شکل (۶) روند زوال بارهای الکتریکی سطحی مثبت اندازه‌گیری شده روی سطح مفره A بعد از اعمال ولتاژ کرونا ۱۵ کیلوولت مثبت در مدت ۳ دقیقه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) بعد از یک دقیقه حدود ۸ درصد از مقدار اولیه بارهای مثبت و منفی کاسته می‌شود.



شکل (۶): زوال بارهای الکتریکی سطحی مثبت اندازه‌گیری شده روی سطح مفره

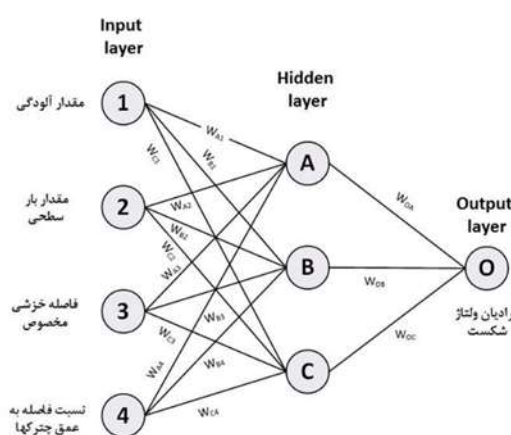
برای آنکه بتوان عملکرد مفره‌های مختلف را در آلودگی و حضور بارهای سطحی یکسان با یکدیگر مقایسه کرد، ولتاژ شکست به تنهایی جوابگوی عملکرد بهترین مفره نیست. یک روش برای تعیین مفره با بهترین عملکرد، استفاده از رابطه (۷) است:

$$E_L = \frac{U_f}{L} \quad (kV/cm) \quad (7)$$

که در آن E_L گرادیان ولتاژ شکست در فاصله خزشی، U_f ولتاژ شکست و L فاصله خزشی مفره است. در این تعریف گاهی از گرادیان ولتاژ شکست در ارتفاع مفره یا

پارامترهای هندسی شامل فاصله خزشی مخصوص و نسبت فاصله چترک‌ها به عمق چترک‌های مقره در نظر گرفته شده است. همچنین توابع تحریک مختلفی برای یافتن حالت بهینه آن ارزیابی شده که بهترین پاسخ‌ها برای توابع تانژانت هذلولوی و لگاریتمی شکل حاصل شده است. شکل (۸) شبکه عصبی طراحی شده با یک لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی را نشان می‌دهد.

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \Delta w_{ij}(k)$$



شکل (۸): شبکه عصبی طراحی شده دارای چهار ورودی، سه نورون و یک خروجی

هر لایه از چندین نورون ساخته شده است که تعداد آنها به پیچیدگی مسئله بستگی دارد. این نورون‌ها توسط کانال‌های ارتباطی به یکدیگر متصل می‌باشند. خروجی نورون‌ها با عبور از این کانال‌ها در وزن‌های ارتباطی ضرب شده و به ورودی نورون بعدی داده می‌شوند. نورون‌ها مانند یک تابع انتقال عمل می‌کنند به این صورت که ورودی را به خروجی نگاشت می‌کنند.

عمل آموزش شبکه و محاسبه خطا برای تعداد نورون‌ها، از یک تا n ، به تعداد متناهی تکرار می‌شود و مشخصات شبکه ذخیره می‌شود. مشخصات (تعداد نورون، وزنها و غیره) شبکه‌ای که دارای کمترین خطا است ارزیابی شده و به عنوان مدل استفاده می‌شود. بدین صورت می‌توان گفت که اندازه شبکه نیز بهینه شده است. در طی فرآیند آموزش، ابتدا محاسبات از ورودی شبکه به سوی خروجی انجام می‌شود و سپس مقادیر خطای محاسبه شده به

مطابق شکل (۷) با افزایش آلودگی در هر حالت بدون بار سطحی و یا در حضور بارهای مثبت و منفی، ولتاژ شکست نیز کاهش می‌یابد. از طرفی می‌توان مشاهده کرد بارهای منفی باعث افزایش حدود ۵ درصدی (متناسب با مقدار بار موجود روی سطح مقره) ولتاژ تخلیه الکتریکی می‌شوند که در واقع ناشی از کاهش میدان الکتریکی سمت کاتد مقره می‌باشد. از طرفی بارهای مثبت باعث کاهش حدود ۶ درصدی ولتاژ تخلیه الکتریکی می‌شوند که ناشی از افزایش میدان الکتریکی سمت کاتد مقره می‌باشد.

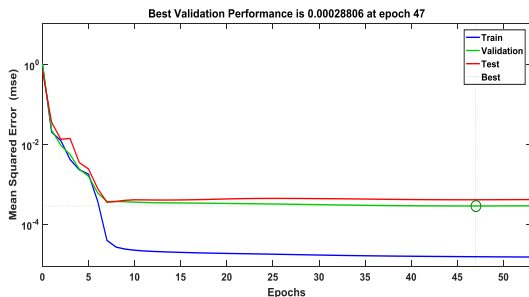
به‌طور کلی کاهش ولتاژ شکست ناشی از افزایش آلودگی با افزایش ولتاژ شکست ناشی از حضور بارهای سطحی منفی جبران می‌شود؛ برای مثال در مقره A، گرادین ولتاژ شکست در حضور بار سطحی ۱۰۰- نانوکولن و آلودگی ۰/۱۵ میلی گرم بر سانتی متر مربع تقریباً با حالت بدون بار سطحی و آلودگی ۰/۰۷ میلی گرم بر سانتی متر مربع برابر است.

۵- شبکه عصبی

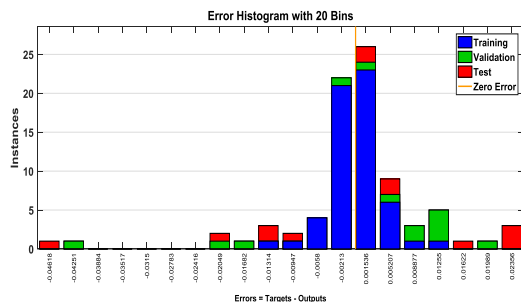
شبکه عصبی یکی از زیر شاخه‌های یادگیری ماشینی است که از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی به حساب می‌آید. روش‌های یادگیری ماشینی مبتنی بر آموزش سیستم براساس اطلاعات موجود است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشگر به هم پیوسته با نام نورون تشکیل شده است که به صورت هماهنگ و با انتقال اطلاعات یک مسئله را حل می‌کنند. درواقع شبکه عصبی مصنوعی، به کمک نورون‌ها و فرآیند یادگیری تلاش می‌کند با شناخت روابط ذاتی بین داده‌ها نگاهیستی میان فضای ورودی و فضای خروجی ارائه دهد. این شبکه‌ها برای کاهش خطای خود قادر به یادگیری تطبیقی اند. بدین صورت که با استفاده از داده‌های موجود، وزن‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که سیستم برای داده‌های جدید، خروجی صحیحی تولید کند [۲۴].

در این مقاله، مدل مدنظر به منظور داشتن حداکثر احتمال همگرایی به نقطه کمینه مطلق، از روش پس انتشار خطا در نرم‌افزار MATLAB استفاده و آزموده شده است. خروجی شبکه عصبی گرادین ولتاژ شکست (E_L) و ورودی‌های آن شامل میزان آلودگی، مقدار بار الکتریکی و

یافت. از ۷۰ درصد کل مشاهدات برای آموزش شبکه، ۱۵ درصد برای ارزیابی و ۱۵ درصد برای آزمودن شبکه انتخاب شده است. با به کارگیری فرایند نشان داده شده در شکل (۹)، ابتدا بهترین مقادیر اولیه وزن های ارتباطی و تعداد نرون در لایه پنهان پیدا می شود. به ازای یک نرون در لایه پنهان، کوچک ترین تفاوت بین مقادیر مدل شده و اندازه گیری شده، حاصل می شود. در این شبکه، جواب بهینه در تکرار ۴۷ به دست آمد که در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل خطای ناشی از داده های آموزش، ارزیابی و آزمون مشاهده پذیر است. در واقع تکرار ۴۷ نقطه ای است که در ۶ تکرار بعد از آن، خطای ارزیابی افزایش داشته است که نشانه از دست رفتن قابلیت تعمیم است. به علت استفاده از روش توقف زودهنگام آموزش شبکه در تکرار ۴۷ فرآیند بهینه سازی به پایان رسیده است. در این حالت میانگین مربعات خطا به ازای کل مشاهدات برابر ۰/۰۰۰۲۸۸ است. شکل (۱۰) تعداد تکرار در خطای مشخص برای داده های آموزش، ارزیابی و آزمون در مدل به دست آمده از شبکه عصبی را نشان می دهد.



شکل (۹): خطای خروجی برای داده های آموزش، ارزیابی و آزمون و انتخاب نقطه بهینه



شکل (۱۰): مجموعه خطای داده های آموزش، ارزیابی و آزمون در مدل به دست آمده از شبکه عصبی

لایه های قبل انتشار یافته و وزن ها اصلاح می گردد. روابط (۸) و (۹) روند کلی اصلاح را می توان با تغییر وزن Δw_{ij} به صورت زیر نوشت:

$$\Delta w_{ij} = -n \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (8)$$

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (9)$$

که در آن E تابع خطا، w_{ij} وزن ارتباطی بین نرون های i و j ، n نرخ یادگیری و y'_i مقدار تخمین زده شده خروجی می باشد. به طور کلی نرخ یادگیری بسیار کوچک موجب زمان بردن همگرایی الگوریتم و نرخ یادگیری بسیار بزرگ باعث ناپایداری الگوریتم می شود. مقدار تخمین زده شده خروجی (y'_i) از رابطه (۱۰) به دست می آید:

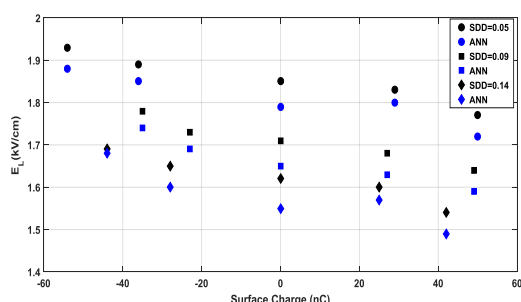
$$y' = g \left(f \left(\sum_{i=1}^3 w_{Ai} x_i + b_A \right) w_{OA} + f \left(\sum_{i=1}^3 w_{Bi} x_i + b_B \right) w_{OB} + b_O \right) \quad (10)$$

که در آن f و g به ترتیب توابع تحریک لایه پنهان و خروجی اند. وزن های ارتباطی به صورت زیر به هنگام می شوند:

$$w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) + \Delta w_{ij}(k) \quad (11)$$

عملیات به روز رسانی وزن ها تا رسیدن به میزان خطای از قبل تعیین شده، ادامه می یابد [۲۵]. یکی از نکات شایان توجه به هنگام طراحی شبکه عصبی، مقادیر اولیه وزن های ارتباطی است که پاسخ شبکه به آنها حساس است. به عبارت دیگر، دو شبکه با معماری یکسان و مقادیر اولیه مختلف پاسخ های متفاوت اما نزدیک به هم می دهند. همچنین تقسیم بندی مشاهدات به سه گروه آموزش، ارزیابی و آزمون نیز برای یافتن جواب بهینه به صورت تصادفی انجام می شود؛ بنابراین هر آموزش شبکه به علت تفاوت در مقدار اولیه وزن ها و تقسیم بندی اولیه مشاهدات به جواب متفاوت منجر خواهد شد. بدین منظور می توان شبکه را با مقادیر اولیه متفاوت و به صورت مکرر آموزش داد و آن مقادیر اولیه که به کمترین خطای خروجی منجر می شود را

گرایان ولتاژ شکست اندازه‌گیری شده در شکل (۱۲) مقایسه شده‌اند.



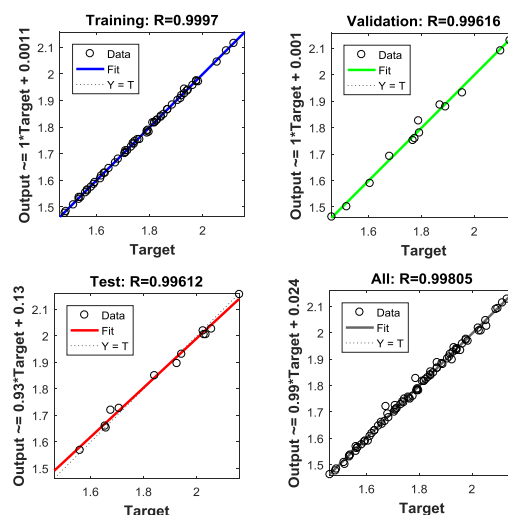
شکل (۱۲): مقایسه گرایان ولتاژ شکست به دست آمده از شبکه عصبی و اندازه‌گیری شده برای مقره پنجم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی براساس پارامترهای هندسی مقره، آلودگی و مقدار بارهای الکتریکی سطحی به منظور پیش‌بینی گرایان ولتاژ تخلیه الکتریکی با استفاده از شبکه عصبی معرفی شده است. بدین منظور اثر بارهای سطحی و آلودگی بر تخلیه الکتریکی DC چهار نوع مقره پلیمری ۲۰ کیلوولتی با پروفیل‌های مختلف، بررسی و گرایان تخلیه الکتریکی اندازه‌گیری شده خروجی مدل شبکه عصبی در نظر گرفته شد. میزان آلودگی، مقدار بارهای سطحی مثبت و منفی و همچنین پارامترهای هندسی مقره‌ها شامل فاصله خزشی مخصوص و فاصله به عمق چترک‌ها ورودی‌های شبکه عصبی انتخاب شدند. مقایسه نتایج تست‌های آزمایشگاهی گرایان ولتاژ شکست الکتریکی برای یک مقره با پارامترهای هندسی مشخص با نتایج حاصل از شبکه عصبی نشان می‌دهد پیش‌بینی گرایان ولتاژ شکست به روش شبکه عصبی انطباق بسیار مناسبی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده دارد.

همچنین براساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با افزایش آلودگی در هر حالت بدون بار سطحی یا در حضور بارهای مثبت و منفی، ولتاژ شکست الکتریکی کاهش می‌یابد. همچنین بارهای مثبت باعث کاهش ولتاژ شکست الکتریکی و بارهای منفی باعث افزایش ولتاژ شکست می‌شود. بر اساس این، می‌توان گفت آلودگی مقره بیشترین سهم را نسبت به بارهای سطحی در پیش‌بینی ولتاژ شکست دارد. نتایج به دست آمده معیار مناسبی برای بهبود طراحی

مدل توصیف‌کننده گرایان ولتاژ شکست بر حسب چهار متغیر ورودی، به صورت همزمان است. متغیرهای ورودی شامل آلودگی، مقدار بار الکتریکی، فاصله خزشی مخصوص و نسبت فاصله به عمق چترک‌های مقره است. در این مقاله، نسبت بین طول خزشی و ارتفاع مقره، فاصله خزشی مخصوص نام گذاری می‌شود. پیاده‌سازی این نوع مدل با روش برازش تقریباً غیرممکن است؛ زیرا تعداد متغیرهای ورودی زیاد بوده است و جواب قابل اطمینان نیست. از مزیت‌های شبکه عصبی توانایی مدل‌سازی با وجود ورودی‌های متعدد است. شکل (۱۱) رگرسیون خطی مقادیر گرایان ولتاژ تخلیه الکتریکی حاصل از شبکه عصبی و داده‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): رگرسیون خطی نتایج حاصل از شبکه عصبی و داده‌های اندازه‌گیری شده

در نتیجه با کمک داده‌های حاصل از نتایج تست‌های آزمایشگاهی گرایان ولتاژ شکست مقره‌های پلیمری مورد مطالعه با پروفیل مختلف، مدلی با چهار ورودی یک خروجی طراحی شد. به منظور ارزیابی مدل به دست آمده، مقره پنجمی با پارامترهای هندسی متفاوت شامل فاصله خزشی مخصوص ۲/۸ و فاصله چترک‌ها به عمق چترک ۰/۹، انتخاب و نتایج گرایان ولتاژ شکست الکتریکی در آلودگی‌ها و مقدار بار الکتریکی سطحی مختلف اندازه‌گیری و با نتایج به دست آمده از شبکه عصبی تخمین زده شد. گرایان ولتاژ شکست به دست آمده از شبکه عصبی و

مقره های پلیمری تحت ولتاژ DC در حضور بارهای سطحی و آلودگی است.

مراجع

- [13] Zhang D, "Study on Insulator Flashover Voltage Gradient Correction Considering Soluble Pollution Constituents". *Energies* Vol. 9, No. 6, pp. 954-961, 2016.
- [14] Wang F, Qiu Y, Pfeiffer W., Kuffel F. "Insulator surface charge accumulation under impulse voltage". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 3, pp. 847-854, 2004.
- [19] V. Adamec and J. H. Calderwood, "The interpretation of potential decay on the surface of a charged dielectric specimen", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 20, No. 6, pp. 803- 804, 1987.
- [21] N.A.Othmana, M.A.M. Piahb, Z. Adzishb "Charge distribution measurement of solid insulator materials: A review and new approach "Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.70, No. 6, pp.413-426. 2017
- [22] N.A.Othmana, M.A.M. Piahb, Z. Adzishb "Space charge distribution and leakage current pulses for contaminated glass insulator strings in power transmission lines "IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.70, No. 4, pp.876-888. 2016.
- [23] Jamshid Mahmoodi, Mohammad Mirzaie, Amir Abbas Shayegani Akmal, "Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 105, No. 3, pp. 283-296, 2019.
- [24] ShariatiNasab, R, Akafi ,M . Farshad, M "Estimating switching overvoltages in transmission lines using the neural-fuzzy method", *Intelligent Systems in Electrical Engineering*, Third Year, No. 3, Autumn 1391.
- [25] Abbasi. A.H , Shaygani Akmal. A , Nayesh, K "Modeling based on Surface Electrical Failure Testing in DC Resistive DC Voltage and Contaminated Volatile Composite Insulators", Ph.D., Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, 2013.
- [1] Abbasi, A., Shayegani Akmal, A., Niayesh, K. "Contribution of Design Parameters of SiR Insulators to Their DC Pollution Flashover Performance", *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 29, No. 4, pp. 1814–1821.
- [2] Omid, A., Ra'isi, A. "HVDC Transmission Lines, Benefits, Applications and Problems", 8th Electrical Engineering Conference, Kerman, Shahid Bahonar University of Kerman, June 10-12, 2005.
- [3] Ondoua M., Zebouchi N., Giam H.. "Study of space charge effect on dielectric dc breakdown of synthetic insulators with the pressure wave propagation method" *Journal of Electrostatics*, Vol. 40, No. 6, pp. 355-361, 1997.
- [4] Kumara S., Alam S., Yuriy V., Gubanski S. "DC Flashover Characteristics of a Polymeric Insulator in Presence of Surface Charges", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19, No.3, pp. 212-220, 2012.
- [8] Wang F, Qiu Y, Pfeiffer M, Kuffel E, "Insulator surface charge accumulation under impulse voltage", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No.4, pp. 847-854, 2004.
- [11] Zhang, X . "Method for recoating RTV anti-pollution flashover coating on insulator coated with RTV anti-pollution flashover coating". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 23, No .6, pp,245-254, 2018.
- [12] Ahmad, F., Khan Q., and Alam A. "Analysis of Flashover Voltages of Disc Type Insulator under Artificial Pollution Condition". *International Journal of Engineering-Transactions* Vol. 29, No. 1, pp.762. 770, 2016.

¹ Silicone Rubber

² Ethylene propylene diene monomer

³ Poly tetra fluor ethylene

⁴ Barrier voltage

⁵ Field Electron Emission

