

مدل سازی رفتار استاتیکی تخلیه‌های حاصل دی الکتریک و دینامیک باردار شدن این دی الکتریک‌ها در کاربردهای فشار قوی الکتریکی

مونا قاسمی^{۱*}، حسین محسنی^۲، کاوه نیایش^۳، امیرعباس شایگانی اکمل^۴

۱- دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۴- استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

m.ghassemi@ece.ut.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۹، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۹)

چکیده- اگرچه در دو دهه اخیر مفاهیم تخلیه‌های حاصل دی الکتریک^۱ (DBDs) به خوبی در کاربردهای نظری تولید ازون، کترول آلودگی هوا، صفحات نمایش پلاسما و کترول فرایندهای شیمیایی، زیستی و پزشکی توسعه داده شده، اما استفاده از آن در فن فشار قوی الکتریکی برای بهبود عملکرد عایقی سیستم (به عنوان جایگزین سیستمهای با عایقی گاز پرفشار SF₆) هنوز کاربردی نشده است. در این روش با ترکیب عایق جامد (به عنوان پوشش دی الکتریک بر روی الکترودهای فلزی) و هوا و با توجه به تولید بارهای فضایی بر اثر تخلیه الکتریکی غیر حرارتی و نشست آن بر روی سطوح پوشش، استقامت عایقی مجموعه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در این مقاله افزایش استقامت عایقی سیستم در صورت استفاده از DBD و با افزایش نشست بار سطحی بر روی پوشش دی الکتریک در میدان الکتریکی یکنواخت، نخست به صورت استاتیکی مدل سازی شده است؛ یعنی از دینامیک تشکیل بارهای فضایی و نشستن آنها بر روی پوشش حاصل دی الکتریک صرفنظر شده و مفاهیم DBD با درنظر گرفتن مقادیر مختلف بار سطحی روی پوشش حاصل دی الکتریک ارزیابی شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضربی نفوذپذیری ماده دی الکتریک، ضخامت آن و طول فاصله هوایی بر میزان افزایش استقامت عایقی مجموعه عایق بررسی شده است. سپس باز فضایی حاصل محاسبه شده و با توجه به آن میدان در فاصله هوایی و پوشش دی الکتریک اصلاح شده است. همچنین پوشش‌های دی الکتریک به صورت غیر عایق و با هدایت الکتریکی در نظر گرفته شده و کاهش بار سطحی حاصل از این هدایت الکتریکی و اثر آن مدل سازی شده است. همچنین تغییرات شدت میدان الکتریکی در پوشش دی الکتریک علاوه بر فاصله هوایی مدل سازی شده است. این مدل دینامیکی به شکل فایل m در MATLAB برنامه‌نویسی شده و از آن برای شبیه‌سازی رفتار دینامیکی DBD در اعمال سه نوع ولتاژ AC و DC و ضربه صاعقه استفاده شده است.

کلید واژگان: DBD، مدل سازی استاتیکی و دینامیکی، میدان الکتریکی یکنواخت، کاربردهای فشار قوی الکتریکی.

۱- مقدمه

لذا در موافقنامه Kyoto, SF₆ به عنوان گازی که باید انتشار آن محدود شود، ثبت شده است [۱]. یکی از راهکارهای حل مسائل زیست محیطی سیستمهای SF₆، جستجو برای جایگزین‌ها است. جستجو برای گاز یا مخلوط گازی که خواص الکتریکی و شیمیایی شبیه به SF₆ داشته و نیز از دید اقتصادی مناسب باشد، هنوز به نتیجه‌ای نرسیده است. اکنون بیشتر تحقیقات بر مخلوط‌های گازی که SF₆ یکی از تشکیل‌دهنده‌های اصلی آن باشد، متمرکز است [۲] و [۳]. این مخلوط‌ها اثر منفی کمتری در گرم کردن جهانی نسبت به SF₆ داشته و به عنوان گزینه‌های سازگار با محیط زیست در کاربردهای الکتریکی شناخته می‌شوند. البته داشتن این مزیت در حال حاضر با هزینه بالاتری همراه است.

راه حل دیگر استفاده از ترکیب هوا و دی‌الکتریک جامد به عنوان محیط عایقی است. البته چنین سیستمی باید ویژگیهایی شبیه به سیستمهای SF₆ داشته باشد. اگر از این روش به درستی استفاده شود، می‌توان به بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد عایقی رسید. دو ساختار مطرح شده عبارتند از: (الف) حاصل دی‌الکتریک در فاصله هوایی بین دو الکترود [۴] و (ب) حاصل دی‌الکتریک به صورت پوشش الکترود(ها)، [۱۵-۱۶] که در این مقاله وضعیت دوم بررسی شده است.

اگرچه تاکنون کاربردهای متنوعی از DBD مطرح شده مانند تولید ازون [۹]، کنترل آلودگی هوا نظیر کاهش ترکیبات NO_x خروجی موتورهای دیزلی [۱۰]، تبدیل گاز متان به سوخت مایع متانول [۱۱]، صفحات نمایش پلاسما و کنترل فرایندهای شیمیایی، زیستی و پزشکی [۱۲] اشاره کرد. اما در کاربردهای فشارقوی هنوز به کار نرفته است. در صورتی که بعضی یا تمامی هادی‌های فلزی با پوشش‌های دی‌الکتریک پوشانده شوند، استقامت

یکی از پرکاربردترین فناوری‌های عایقی فشار قوی، استفاده از گازهای دی‌الکتریک خود بازیاب^۱ به عنوان محیط عایقی است. دو کاربرد معمول این فناوری عبارتند از: استفاده از هوا در فشار اتمسفر به عنوان گاز دی‌الکتریک و سیستمهای با عایق گاز پرفسار (GIS) یا مخلوط گازی که SF₆ یکی از اجزای آن است.

سیستمهای با عایق هوا به خوبی توسعه یافته‌اند و به طور وسیعی استفاده می‌شوند. ابعاد فیزیکی این طرحها به دلیل پایین بودن سطح تحمل عایقی هوا، بزرگ بوده و لذا هزینه آنها در مکانهایی که زمین ارزش زیادی دارد، بالا است.

در مقابل، طرحهای GIS فشرده، تجاری و قابل اعتماد بوده و خواص دی‌الکتریک و عملکرد عایقی مطلوبی را از نظر فنی و اقتصادی ارائه می‌دهند. به عنوان محیط عایقی، SF₆ استقامت دی‌الکتریک نسبتاً بالا، هدایت حرارتی خوب و تلفات پایینی دارد. در مقابل SF₆ بعضی ویژگیهای نامطلوبی نیز دارد: هنگامی که در معرض تخلیه الکتریکی قرار می‌گیرد، موادی سمی با خاصیت خورنده‌گی تشکیل می‌شود. این گاز در فشار استفاده شده در پستهای گازی در درجه حرارت‌های نه چندان پایین (حدود دمای ۲۰-۲۰ مایع می‌شود. ایراد اصلی فناوری SF₆ سهم زیاد آن در گرم شدن جهانی (اشر گلخانه‌ای) در هنگام آزاد شدن در اتمسفر است، زیرا SF₆ جاذب اشعه مادون قرمز بوده و بسیار آهسته تجزیه می‌شود. اگرچه در حال حاضر سهم آن کم است، اما پیش‌بینی شده که حضور طولانی مدت آن در استراتوسفر تهدیدی جدی با تأثیری بدون برگشت روی آب و هوای آینده در طی چندین هزار سال خواهد داشت.

1. Self-restoring

بی نهایت و متقارن فرض و تحلیل در حالت یک بعدی انجام شده است. فاصله دو الکترود صفحه‌ای با پوشش عایق برابر d_g و ضخامت پوشش دی الکتریک برابر $2d_c$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ ساختار در مدل‌سازی DBD

با حضور پوشش دی الکتریک و با فرض وجود بار سطحی برابر ρ_s بر روی پوشش های دی الکتریک در سمت فاصله هوایی، شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی و داخل پوشش دی الکتریک برابر است با:

$$E_{die} = \frac{v + \frac{d_g \rho_s}{\epsilon_r}}{\gamma d_c + \epsilon_r d_g}, \quad (1-\text{الف})$$

$$E_{air} = \frac{\epsilon_r v - \frac{\gamma d_c \rho_s}{\epsilon_r}}{\gamma d_c + \epsilon_r d_g} \quad (1-\text{ب})$$

که v ولتاژ اعمال شده به الکترود بالایی و ϵ_r ضریب نفوذپذیری نسبی پوشش دی الکتریک است. الکترود پایینی زمین در نظر گرفته شده است. در ابتدا که $\rho_s = 0$ ، توزیع شدت میدان الکتریکی در دو محیط مذکور به صورت توزیع خازنی است. شکل (۲) تغییرات شدت میدان الکتریکی را در دو محیط در فاصله دو الکترود بر حسب مقادیر مختلف بار سطحی با توجه به معادلات (۱-الف) و (۱-ب)

دی الکتریک سیستم با عایق هوا به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. علت این موضوع نشستن بار فضایی (حاصل از تخلیه‌های غیرحرارتی) بر روی سطوح پوشش دی الکتریک و در نتیجه اصلاح توزیع میدان و پتانسیل الکتریکی بر روی قسمتهای مختلف مجموعه عایقی در راستای افزایش استقامت الکتریکی مجموعه است.

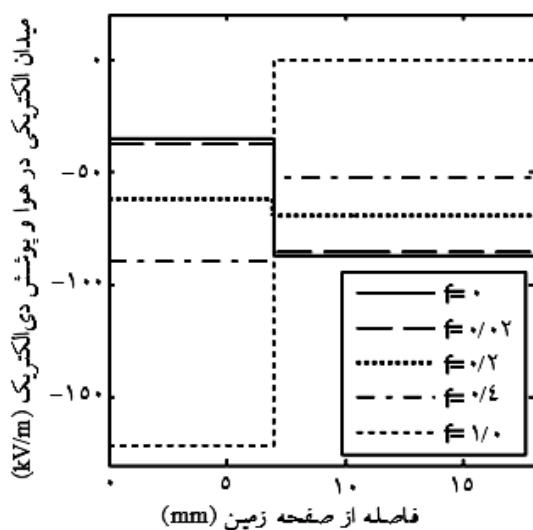
در این مقاله، نخست به مدل‌سازی دینامیک تشکیل بارهای فضایی مذکور [۸] و نحوه نشستن آنها بر روی سطوح دی الکتریک پرداخته نشده، بلکه بررسی این پدیده به صورت استاتیک (با فرض نشست بار فضایی با مقادیر مختلف بر روی سطوح دی الکتریک) مورد توجه قرار گرفته و نقش تغییر پارامترهای مختلف نظیر ضریب نفوذپذیری ماده دی الکتریک، ضخامت آن و طول فاصله هوایی بر میزان افزایش استقامت عایقی مجموعه عایق بررسی شده است. سپس با ارائه الگوریتمی برای توصیف تشکیل بارهای فضایی، دینامیک نشست بارهای فضایی بر روی پوشش‌های دی الکتریک و سپس تصحیح میدان در فاصله هوایی بر اثر اعمال سه نوع ولتاژ AC، DC و ضربه صاعقه، شبیه‌سازی و ارزیابی شده است.

۲- مدل‌سازی ریاضی رفتار استاتیکی DBD

برای مدل‌سازی ریاضی رفتار استاتیکی DBD، ساختار شکل (۱) برای تحلیل در نظر گرفته شده است. ساختار یک بعدی، در مختصات دکارتی، با الکترودهای صفحه‌ای موازی یعنی با فرض میدان الکتریکی یکنواخت و با دی الکتریک دو لایه که به صورت یکنواخت روی الکترودها پوشش داده شده در نظر گرفته شده است. ابعاد ساختار در دو بعد دیگر

تفاوت مؤلفه عمودی جابه‌جایی الکتریکی (D_n)، یعنی رابطه (۲) نتیجه خواهد شد. از شکل (۲) همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی بار سطحی از صفر تا مقدار بیشینه، اختلاف بین شدت میدانهای الکتریکی در دو محیط کاهش و سپس افزایش می‌یابد. به همین علت در شکل (۳)، این موضوع را بررسی می‌کنیم. شکل (۳) تغییرات شدت میدانهای الکتریکی را در پوشش دی‌الکتریک و فاصله هوایی به‌ازای تغییرات f و بر حسب دو مقدار مختلف $5 = f$ و $20.5 = \epsilon_r$ نشان می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر گفته‌یم با افزایش چگالی بار سطحی از صفر (در حالتی که چگالی بار سطحی برابر صفر است شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی بیشتر از پوشش دی‌الکتریک است) اندازه شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی کاهش یافته و به عکس، در پوشش دی‌الکتریک افزایش می‌یابد.



شکل ۲ تغییرات شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی و داخل پوشش دی‌الکتریک بر حسب ضریب f

نشان می‌دهد. تغییرات بار سطحی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\rho_s = f \rho_{\max} \quad (2)$$

که در آن $\rho_{\max} = \epsilon_r \epsilon_0 v / 2 d_c$. مقدار ρ_{\max} با توجه به برقراری شرایط مرزی در دو محیط به این صورت محاسبه شده که مؤلفه‌های مماسی شدت میدان الکتریکی در دو محیط با یکدیگر برابرند و تفاوت مؤلفه عمودی جابه‌جایی الکتریکی (D_n) در دو محیط برابر با چگالی بار سطحی است؛ بنابراین:

$$E_t(die) = E_t(air) \quad (3)$$

$$D_n(die) - D_n(air) = \rho_s \Rightarrow \\ \epsilon_r \epsilon_0 E_n(die) - \epsilon_0 E_n(air) = \rho_s$$

$E_n(die)$ و $E_n(air)$ با توجه به شکل (۱) و از معادلات (۱) به دست می‌آیند. در رابطه (۲) $1 \leq f \leq 10$. در شکل

$$d_g + 2d_c = 18 \text{ mm}, 2d_c = 7 \text{ mm}, v = -1.2 \text{ kV}$$

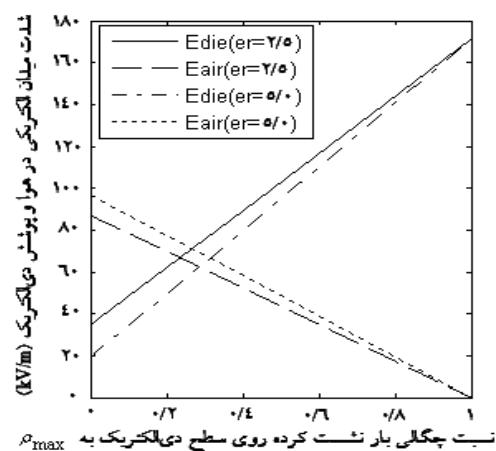
و $\epsilon_r = 20.5$ (کل پوشش دی‌الکتریک روی یکی از الکترودها فرض شده) و f برابر $0, 0.02, 0.2, 0.4, 0.02, 1, 10$ در نظر گرفته شده است. در این شکل در محور افقی فاصله ۰ تا ۷ مربوط به پوشش دی‌الکتریک و از آن به بعد مربوط به فاصله هوایی است و دیده می‌شود که با افزایش چگالی بار سطحی، شدت میدان در عایق افزایش و به همان نسبت در هوا کاهش یافته است. بیشینه چگالی بار الکتریکی متناظر با حالتی است که کل اختلاف پتانسیل بین دو الکترود فلزی بر روی پوشش دی‌الکتریک قرار گیرد که در نتیجه شدت میدان در فاصله هوایی به حداقل مقدار یعنی به صفر خواهد رسید. در این حالت از رابطه دوم (۳)، رابطه‌ای برای

دیالکتریک با بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دیالکتریک توجیه می‌شود. نتیجه دیگری که از شکل (۳) استنباط می‌شود آن است که با چگالی سطحی یکسان و $\epsilon_r = 4$ بزرگتر، شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی بیشتر و در پوشش دیالکتریک کمتر است. البته شبیه این افزایش یا کاهش نیز در حالت $\epsilon_r = 4$ بزرگتر، بیشتر است. با توجه به نتایج تا این مرحله، چنین نتیجه می‌گیریم که در صورت استفاده از پوشش دیالکتریک می‌توان ولتاژ شکست مجموعه عایقی را بالاتر برد.

۳- شبیه‌سازی‌های عددی دینامیکی

در شبیه‌سازی‌های دینامیکی، دینامیک باردارشدن دیالکتریک‌ها در نظر گرفته می‌شود و برای این منظور، با اعمال ولتاژ‌های AC و DC و صاعقه $1.2/50 \mu\text{s}$ مسئله حل می‌شود. فرض می‌شود که هیچ عامل خارجی یونیزه کننده‌ای وجود نداشته و بنابراین پوششهای دیالکتریک قادر بار سطحی اولیه هستند و تنها عامل به وجود آورنده بار سطحی، یونیزاسیون بر اثر افزایش ولتاژ به الکترودها و افزایش شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی تا مقدار بحرانی آن است. ذرات باردار حاصل از این افزایش ولتاژ که در فاصله هوایی تولید شده، بر روی پوششهای دیالکتریک با پتانسیل مخالف نشست خواهد کرد. این نشست بارها به نوبه خود باعث اصلاح شدت میدان الکتریکی شده و از حد بروز شکست در ولتاژ مورد انتظار برای عایق هوا جلوگیری خواهد کرد. شدت میدان الکتریکی بحرانی در صورت استفاده از هوا به عنوان ماده عایقی در فاصله بین دو الکترود و فرض یکنواخت بودن شدت میدان در فاصله هوایی با توجه به قانون پاشن از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$E_{critical} = 1.01 \left(6.72 \sqrt{\frac{p}{d_g}} + 24.4p \right) \quad (5)$$



شکل ۳ تغییرات شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی و در داخل پوشش دیالکتریک بر حسب چگالی بار سطحی، برای دو مقدار مختلف ϵ_r

در نقطه تلاقی دو منحنی شدت میدان الکتریکی (در هوا و عایق)، شدت میدان الکتریکی در هوا و عایق برابر شده و چگالی بار سطحی که با نشست آن بر روی عایق این اتفاق می‌افتد از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن معادله (۴)، معادلات (۱-الف) و (۱-ب) برابر قرار داده می‌شوند و از این برابری داریم:

$$\rho_s = \epsilon_r (\epsilon_r - 1) E = \rho_{ps} \quad (4)$$

شدت میدان الکتریکی در غیاب پوشش دیالکتریک و E ، ρ_{ps} چگالی بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دیالکتریک است. به بیانی دیگر نقطه‌ای است که در آن، چگالی بار سطحی نشسته بر روی پوشش دیالکتریک، با چگالی بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دیالکتریک برابر شود. جالب است که اگر ρ_s رابطه (۴) در رابطه (۱) جایگزین شود، شدت میدان الکتریکی برابر E نتیجه می‌شود که این، با توجه به برابری و خشی شدن بار سطحی نشسته بر روی پوشش

اصلاح شده که $E_{critical}$ از مؤلفه میدان ناشی از $\Delta\rho_{discharge}$ (محاسبه شده از رابطه (۶)) و با توجه به روابط (۱-الف) و (۱-ب) کم شده است. شدت میدان الکتریکی در دی‌الکتریک با تأثیر بار سطحی نشست کرده و با توجه به روابط (۱-الف) و (۱-ب) به صورت زیر اصلاح شده است:

$$E_{air-modified}(k) = E_{critical} - \frac{\varepsilon_0}{2d_c + \varepsilon_r d_g} \frac{d g \Delta\rho_{disch} \arg e}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

$$E_{die-modified}(k) = E_{die} + \frac{\varepsilon_0}{2d_c + \varepsilon_r d_g} \quad (7)$$

- رابطه (۷) بر اساس این واقعیت نوشته شده که در زمانی بین $-t_1$ و $t=t_k$ ، شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی به $E_{critical}$ می‌رسد و در این لحظه، یونیزه شدن و تولید $\Delta\rho_{discharge}$ و نشست آنی بر روی پوشش‌های دی‌الکتریک و اصلاح میدان رخ می‌دهد که این اتفاقات با تقریب خوبی برای زمان $t=t_k$ در نظر گرفته شده است.

توجه دارید که ρ_s در روابط (۱) جمع تمامی بارهای فضایی تولید شده از رابطه (۶) و نشست کرده بر روی پوشش دی‌الکتریک است. البته پوشش دی‌الکتریک عایق کامل نیست و با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی σ برای پوشش دی‌الکتریک، میزان کاهش بار سطحی برابر است با:

$$\rho_s = \rho_s \exp(-\sigma t / \varepsilon_r \varepsilon_0) \quad (8)$$

این کاهش بار سطحی در محاسبه روابط (۱-الف) و (۱-ب) در نظر گرفته شده است. در این صورت با توجه به کم شدن بار سطحی، شدت میدان الکتریکی در فاصله

که p فشار هوا بر حسب بار و d طول فاصله هوایی بر حسب cm و $E_{critical}$ استقامت الکتریکی بحرانی بر حسب kV/cm است. ضریب $1/01$ در معادله (۵) برای در نظر گرفتن پوشش‌های دی‌الکتریک است [۹]، (در این مدل‌سازی فاصله هوایی با دی‌الکتریک پوشیده شده است). با افزایش ولتاژ اعمال شده به مرحله تولید بارهای فضایی بر اثر یونیزه شدن و نشست این بارها بر روی پوشش‌های دی‌الکتریک وارد شده و میدان الکتریکی در فاصله هوایی به $E_{chocking}$ کاهش خواهد یافت. مقدار بار فضایی تولید شده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\rho_{disch} \arg e = \varepsilon_0 \left(\frac{\varepsilon_r d_g}{2d_c} \right) (E_{critical} - E_{chocking}) \quad (9)$$

با توجه به [۶]، $E_{chocking} = 28.2881$ kV/cm درصد 90 برابر $E_{critical}$ در نظر گرفته شده است [۶]. برای فشار اتمسفر (۱ بار) و فاصله هوایی 10 mm داریم:

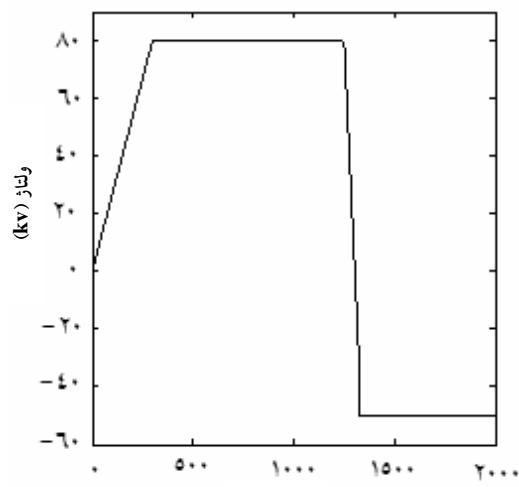
$$E_{critical} = 31.4312 \text{ kV/cm}$$

$$E_{chocking} = 28.2881 \text{ kV/cm}$$

الگوریتم حل به شرح زیر است :

- بار سطحی نشست کرده بر روی پوشش (های) دی‌الکتریک برابر صفر در نظر گرفته شده است.
- شدت میدان الکتریکی در پوشش دی‌الکتریک و فاصله هوایی از روابط (۱-الف) و (۱-ب) با در نظر گرفتن $\rho_s = 0$ ، برای ولتاژ اعمال شده در $t=0$ محاسبه شده است.
- تا هنگامی که شدت میدان محاسبه شده از $E_{critical}$ کمتر شود، محاسبات برای زمانهای بعدی ادامه داده شده است.
- اگر شدت میدان فاصله هوایی محاسبه شده در زمان $t=t_k$ از $E_{critical}$ بیشتر شود، آن به این صورت

تا زمان $s = 1250$ در این مقدار ثابت مانده و سپس تا زمان $s = 1330$ با شیب خطی به مقدار -50 - کیلوولت کاهش یافته و تا زمان $s = 2000$ در این مقدار ثابت باقی مانده است. فرض شده که پوشش دی الکتریک ($\epsilon_r = 3$) بر روی سطح هر دو الکترود با مجموع ضخامت 2 mm قرار گرفته باشد. طول فاصله هوایی برابر 10 mm فرض شده است. شکل (۵) شدت میدان شبیه‌سازی شده در فاصله هوایی را با توجه به الگوریتم ارائه شده نشان می‌دهد (لازم است ذکر شود که در شبیه‌سازی $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ (طول بازه نمونه‌برداری) در نظر گرفته شده است، بنابراین تقریب استفاده شده در رابطه (۸) دقت کافی دارد).



شکل ۴ ولتاژ DC اعمال شده

با توجه به شکل (۵) با رسیدن شدت میدان الکتریکی $\Delta \rho_{discharge}$ در فاصله هوایی به $E_{critical}$ ، تولید $\Delta \rho_{discharge}$ و اصلاح میدان را داریم. این وضعیت را در نواحی انتهایی شیب افزایشی و کاهشی ولتاژ داریم. همچنین در نواحی ولتاژ ثابت با توجه به کاهش بارهای سطحی، افزایش شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی و انجام تخلیه را داریم.

هوایی افزایش افزوده و فرکانس تخلیه در فاصله هوایی افزایش خواهد یافت.

در مدل سازی دینامیکی ارائه شده فرض می‌شود که به محض وقوع یونیزه شدن، بار سطحی بر روی پوشش‌های دی الکتریک نشست کرده و شدت میدان الکتریکی در هوای را برای همان لحظه تصحیح می‌کند. درستی این فرض را با توجه به رابطه زیر می‌توان بررسی کرد:

$$v_d = \mu E \quad (9)$$

که v_d سرعت یونها با قابلیت تحرک μ در شدت میدان الکتریکی E است.

با درنظر گرفتن $\mu^+ = 2.1 \text{ cm}^2/Vs$ و $\mu^- = 1.36 \text{ cm}^2/Vs$ [۱۶] و توجه به این که در زمانهای تخلیه، شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی کمی بیش از $E_{critical}$ است، سرعت حرکت یون‌های منفی و مثبت در فاصله هوایی به ترتیب بیش از $4/2746 \times 10^4 \text{ cm/s}$ و $6/606 \times 10^4 \text{ cm/s}$ خواهد بود که با توجه به طول فاصله هوایی برابر 1 cm زمان رسیدن یون‌های منفی و مثبت به سطح پوشش (های) دی الکتریک کمتر از $15/1502$ و $23/3938$ میکروثانیه خواهد بود که بسیار کم بوده و بنابراین فرض نشست آنی یون‌های تولید شده بر اثر یونیزاسیون بر روی پوشش (های) معقول است.

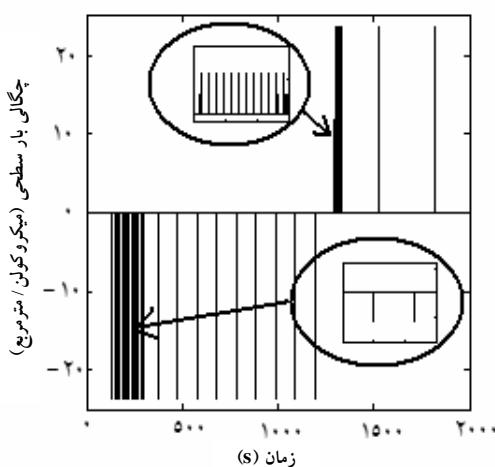
۴- شبیه‌سازی

۴-۱- اعمال ولتاژ DC

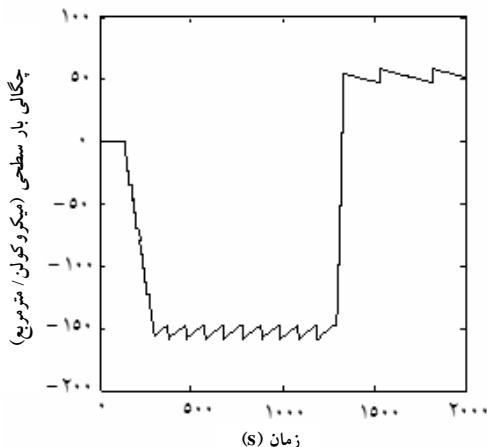
در این قسمت فرض می‌شود که مجموعه الکترودها به ولتاژ DC مطابق شکل (۴) متصل شده باشند (الکترود بالایی به قطب مثبت متصل است).

در این شکل، ولتاژ با شیب خطی از زمان صفر تا $s = 300$ از مقدار صفر تا 80 کیلوولت افزایش یافته و سپس

شکل (۷) منحنی تولید $\Delta\rho_{discharge}$ و شکل (۸) بار سطحی جمع شده بر روی پوشش دی الکتریک بالای را نشان می دهد. با توجه به شکل های (۶) تا (۸) دیده می شود که با افزایش بار سطحی بر روی پوششهای دی الکتریک، شدت میدان الکتریکی در پوشش دی الکتریک افزایش می یابد.



شکل ۷ منحنی تولید $\Delta\rho_{discharge}$ با اعمال ولتاژ DC

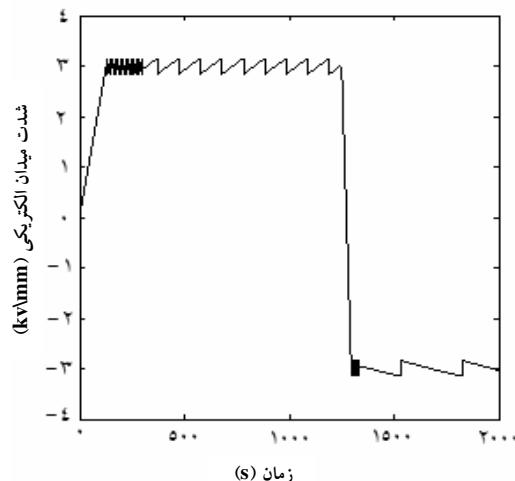


شکل ۸ مقدار بار سطحی جمع شده روی پوشش دی الکتریک بالایی با اعمال ولتاژ DC

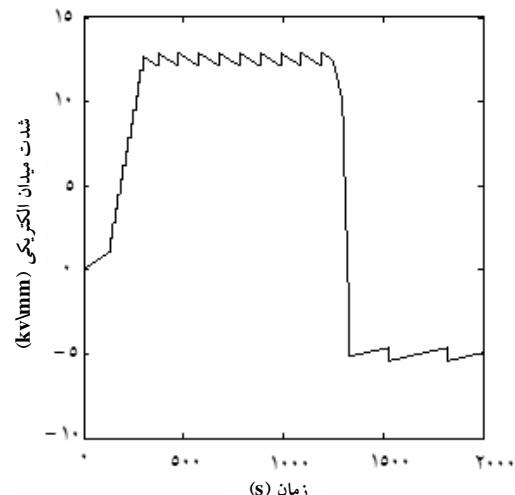
۴-۲- اعمال ولتاژ AC

در این قسمت فرض می شود ولتاژ AC با دامنه حدود ۸۰ کیلوولت مطابق شکل ۹ به مجموعه الکترودها اعمال شده

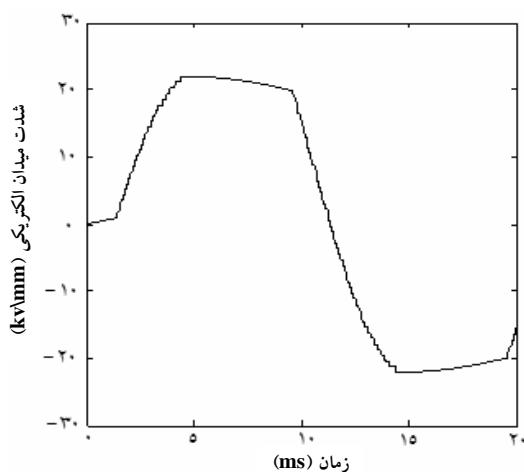
شکل (۶) تغییرات شدت میدان الکتریکی در دی الکتریک را نشان می دهد. اگر فرض کنیم که استقامت الکتریکی ماده عایق پوشش دی الکتریک برابر 20 kV/mm باشد، با توجه به شکل (۶) بیشینه شدت میدان الکتریکی به 15 kV/mm نمی رسد. در صورتی که اگر فاصله بین دو الکترود (12 mm) قادر پوشش دی الکتریک باشد، با بیشینه ولتاژ 80 kV شدت میدان به 7.67 kV/mm خواهد رسید که در نتیجه شکست الکتریکی رخ میدهد.



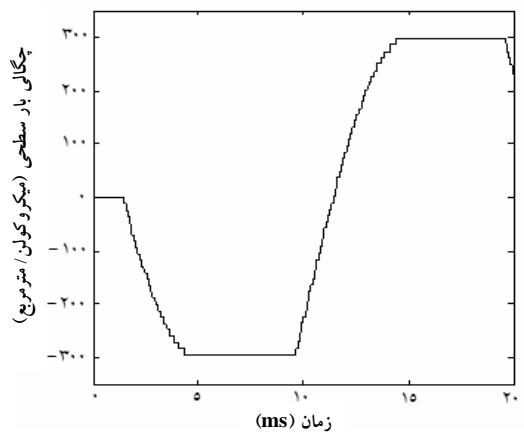
شکل ۵ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ DC



شکل ۶ شدت میدان در پوشش دی الکتریک با اعمال ولتاژ DC



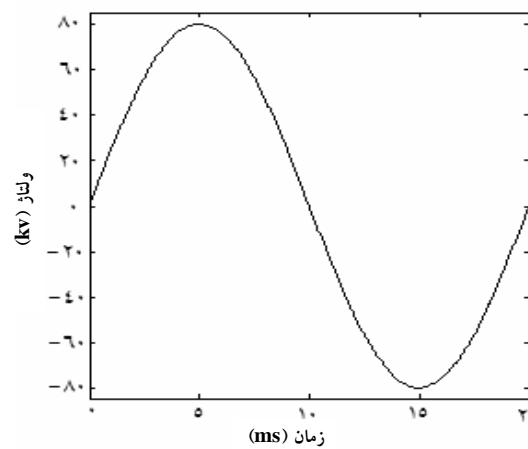
شکل ۱۱ شدت میدان در پوشش دی الکتریک با اعمال ولتاژ AC



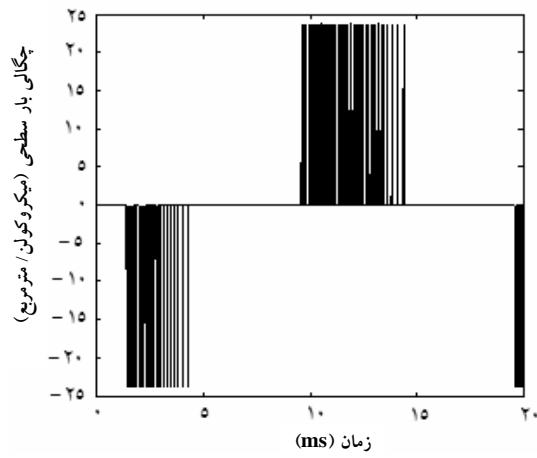
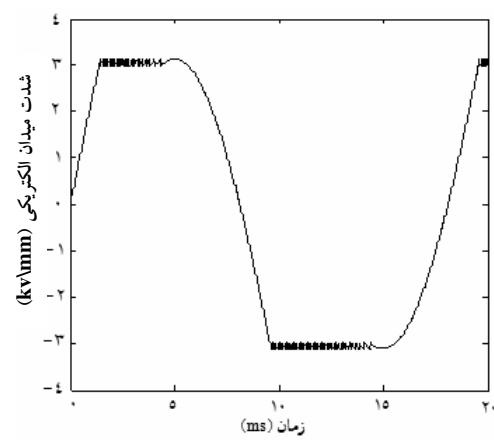
شکل ۱۲ بار سطحی جمع شده بر روی دی الکتریک بالایی با اعمال ولتاژ AC

است. با همان فرضهای قسمت ۱-۴، شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) به ترتیب شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی، شدت میدان الکتریکی در پوشش دی الکتریک، بار سطحی جمع شده بر روی پوشش دی الکتریک قرار گرفته بر روی سطح الکترود بالایی و $\Delta\rho_{discharge}$ را نشان می‌دهند.

با توجه به شکل (۱۱) شدت میدان الکتریکی در پوشش دی الکتریک فراتر از استقامت عایقی آن رفته و در نتیجه شکست الکتریکی مجموعه رخ می‌دهد. در بخش ۴-۴ برنامه‌ای برای محاسبه بیشینه دامنه ولتاژ اعمال شده به مجموعه نوشته و نتایج آن ارائه شده است.

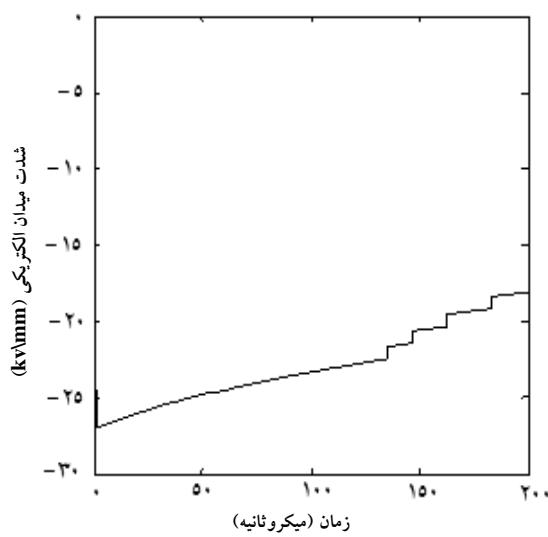


شکل ۹ شکل موج ولتاژ AC اعمال شده

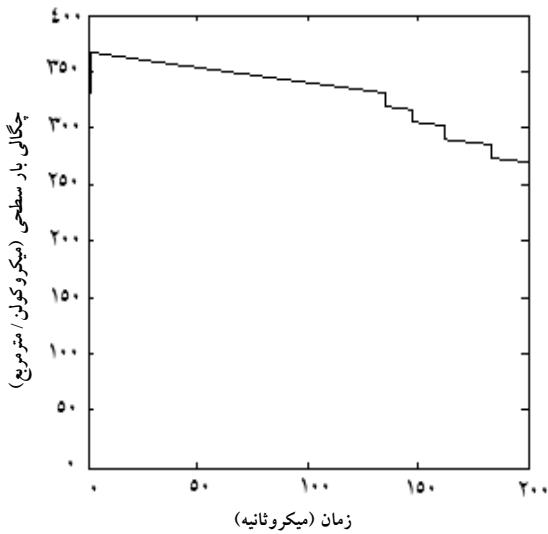
شکل ۱۳ منحنی تولید $\Delta\rho_{discharge}$ با اعمال ولتاژ AC

شکل ۱۰ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ AC

با همان فرضهای قسمت ۱-۴، شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) به ترتیب شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی، شدت میدان الکتریکی در پوشش دی‌الکتریک، بار سطحی جمع شده بر روی پوشش دی‌الکتریک قرار گرفته بر روی سطح الکترود بالایی و $\Delta\rho_{\text{discharge}}$ را نشان می‌دهند.



شکل ۱۶ شدت میدان در پوشش دی‌الکتریک با اعمال ولتاژ ضربه



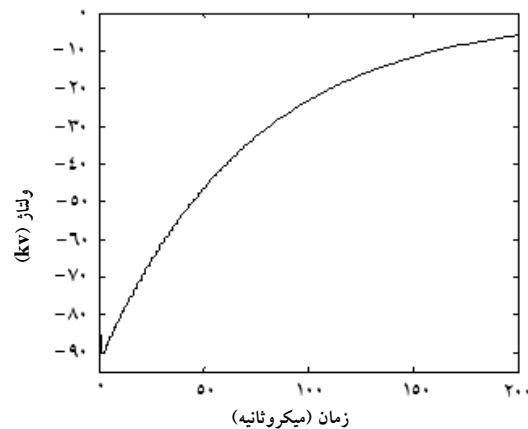
شکل ۱۷ بار سطحی جمع شده بر روی پوشش دی‌الکتریک بالایی با اعمال ولتاژ ضربه

۴-۳-۴ اعمال ولتاژ ضربه صاعقه

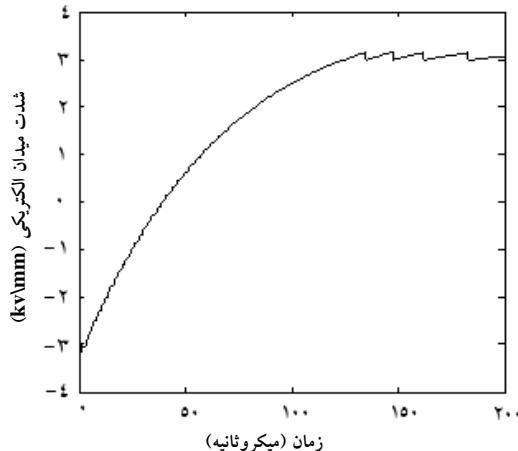
در این قسمت اثر اعمال ضربه صاعقه $U = -90 \text{ kV}$ با حداکثر مقدار $90 \mu\text{s}$ (شکل ۱۴) به الکترودها بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی صاعقه، از معادله زیر استفاده شده است [۱۷].

$$u(t) = 1.034U \left(\exp\left(\frac{-t}{72}\right) - \exp\left(\frac{-t}{0.382}\right) \right)$$

در این رابطه t بر حسب μs بود و $U = -90 \text{ kV}$.

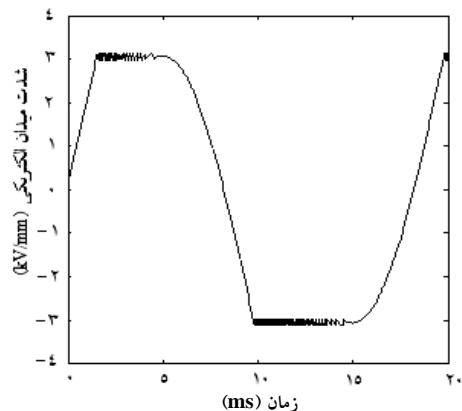


شکل ۱۴ ولتاژ ضربه اعمال شده

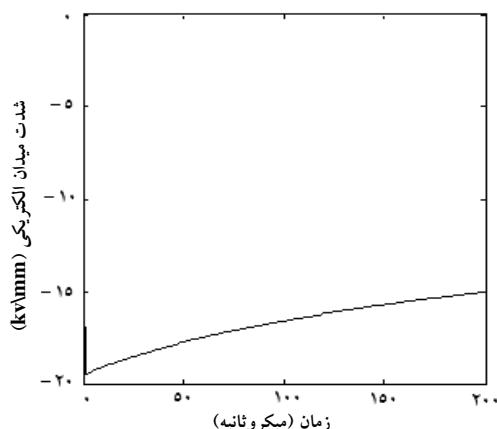


شکل ۱۵ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ ضربه

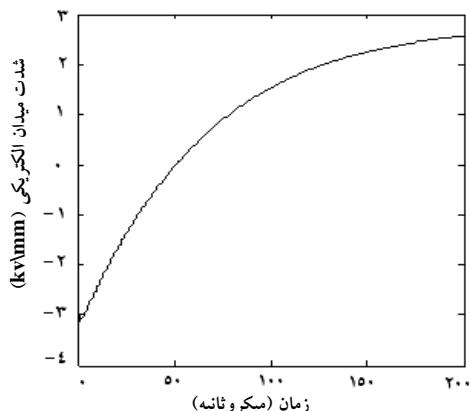
الکتریکی را در پوشش دیالکتریک و فاصله هوایی نشان می‌دهند.



شکل ۲۰ شدت میدان در فاصله هوایی (برای ولتاژ شکست)

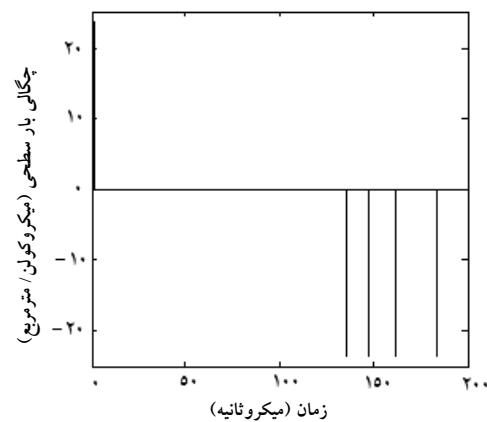


شکل ۲۱ شدت میدان در پوشش دیالکتریک (برای ولتاژ شکست)

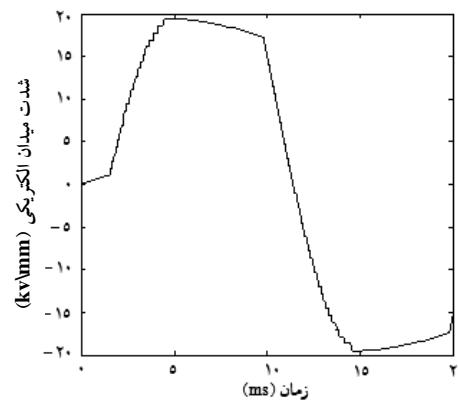


شکل ۲۲ شدت میدان در فاصله هوایی (برای ولتاژ شکست)

۴-۴- تعیین ولتاژ شکست
در این قسمت روتین تهیه شده به نحوی توسعه داده شده است که با استفاده از آن بتوان ولتاژ شکست (که برابر با استقامت الکتریکی پوشش دیالکتریک $U = 20 \text{ kV/mm}$ باشد) را تعیین نمود. در مورد ولتاژ اعمالی در قسمت ۲-۴ با همان مشخصات ساختار مجموعه، ولتاژ شکست برابر $U = 74 \text{ kV}$ است. برای این مقدار، شدت میدان الکتریکی در پوشش دیالکتریک و فاصله هوایی به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۸ منحنی تولید $\Delta\rho_{\text{discharge}}$ با اعمال ولتاژ ضربه



شکل ۱۹ شدت میدان در پوشش دیالکتریک (برای ولتاژ شکست)

برای ولتاژ ضربه قسمت ۳-۴، شکست در $U = 74 \text{ kV}$ رخ می‌دهد. شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به ترتیب شدت میدان

Mag. Vol. 13, No. 5, 1997, pp20–4.

- [4] Boubakeur A., Mokhnache L., Boukhtache S., Feliachi A., “Theoretical investigation on battier effect on point-plane air gap breakdown voltage based on streamers criterion”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.* Vol. 151, No. 3, May 2004.
- [5] Blennow H. J., Sjoberg M., Leijon M. A. S., Gubanski S. M., “Electric field reduction due to charge accumulation in a dielectric-covered electrode system”, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Ins.*, Vol.7, No. 3, June 2000, pp. 340–5.
- [6] Blennow H. J., Leijon M. A. S., Gubanski S. M., “Active high voltage insulation”, *J. Electrostatics*, Vol. 55, 2002, pp159–72.
- [7] Abdel-Salam M., Singer H., Ahmed A., “On the static behaviour of dielectric barrier discharges in uniform fields”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.34, 2001, pp1974–81.
- [8] Serdyuk Y. V., Gubanski S. M., “Computer modeling of interaction of gas discharge plasma with solid dielectric barriers”, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Ins.*, Vol. 12, No. 4, Aug. 2005, pp725–35.
- [9] Braun D., Kuchler U., Piettsch G., “Microdischarges in air-fed ozonizers”, *J. Phys.* Vol. 24, 1991, pp546-72.
- [10] S. Mohapatro, B. S. Rajanikanth,

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر پوشش دی‌الکتریک بر افزایش ولتاژ شکست (بهبود عملکرد عایقی مجموعه) بررسی شد. برای این منظور رفتار DBD به صورت استاتیکی و با درنظر گرفتن مقادیر مختلف بار سطحی نشسته بر روی پوشش دی‌الکتریک مدل‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در صورتی که فاصله بین دو الکترود با پوشش دی‌الکتریک پر شود، ولتاژ شکست مجموعه عایق نزدیک به دو برابر و یا بیشتر خواهد شد، بسته به اینکه جه مقدار از فاصله هوایی با عایق پر شده باشد و در صورتی که بار سطحی قرارگرفته بر روی پوشش دی‌الکتریک بیشینه مقدار خود را داشته باشد. هچنین با ارائه الگوریتمی برای تشکیل بارهای فضایی بر اثر یونیزه شدن و نشست آنها بر روی پوشش‌های دی‌الکتریک، دینامیک تشکیل بارهای سطحی و تصحیح میدان در فاصله هوایی بر اثر اعمال سه نوع ولتاژ AC, DC و ضربه صاعقه شبیه‌سازی و ارزیابی شده است.

۶- منابع

- [1] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, December 11, 1997.
- [2] Yamamoto O., Takuma T., Hamada S., Yamakawa Y., Yashima M., “Applying a gas mixture containing c-C4F8 as an insulation medium”, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* No. 6, 2001, pp1075–81.
- [3] Christophorou L. G., Olthoff J. K., Van Brunt R. J., “Sulfur hexafluoride and the electric power industry”, *IEEE Elect. Ins.*

- Touchard, "Electrostatic precipitation of submicron particles using a DBD in axisymmetric and planar configurations ", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, Vol. 16, No. 2, April 2009, pp. 343–51.
- [15] N. Takeuchi, K. Yasuoka, "Effect of extension length in a surface barrier discharge on the driving force of electrohydrodynamic gas flow", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, Vol. 16, No. 2, April 2009, pp. 364–71.
- [16] Kuffel E., Zaengl W. S., Kuffel J., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [۱۷] حسین محسنی، مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷.
- "Cascaded cross flow DBD-adsorbent technique for NO_x abatement in diesel engine exhaust", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, Vol. 17, No. 5, Aug. 2010, pp. 1543–1550.
- [11] A. Indarto, "A review of direct methane conversion to methanol by dielectric barrier discharge", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, Vol. 15, No. 4, Aug. 2008, pp. 1038–43.
- [12] U. Kogelschatz, B. Eliasson and W. Egli, "From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges", *Pure Appl. Chem.*, Vol. 71, pp. 1819-1828, 1999.
- [13] E. Panousis, N. Merbahi, F. Clement, M. Yousfi, J. F. Loiseau, O. Eichwald, B. Held, "Analysis of dielectric barrier discharges under unipolar and bipolar pulsed excitation", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Ins.*, Vol. 16, No. 3, June 2009, pp. 734–41.
- [14] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, G.