

# مدل سازی رفتار استاتیکی تخلیه های حایل دی الکتریک و دینامیک باردار شدن این دی الکتریک ها در کاربردهای فشار قوی الکتریکی

مونا قاسمی<sup>۱\*</sup>، حسین محسنی<sup>۲</sup>، کاوه نیایش<sup>۳</sup>، امیرعباس شایگانی اکمل<sup>۴</sup>

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

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

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

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

m.ghassemi@ece.ut.ac.ir

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

**چکیده** - اگرچه در دو دهه اخیر مفاهیم تخلیه های حایل دی الکتریک<sup>۱</sup> (DBDs) به خوبی در کاربردهایی نظیر تولید ازون، کنترل آلودگی هوا، صفحات نمایش پلاسما و کنترل 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 SF<sub>6</sub>) 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 می یابد. 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 نشست آنها بر روی پوشش حایل دی الکتریک صرف نظر شده و مفاهیم DBD با در نظر گرفتن مقادیر مختلف بار سطحی روی پوشش حایل دی الکتریک ارزیابی شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضریب نفوذپذیری ماده دی الکتریک، ضخامت آن و طول فاصله هوایی بر میزان افزایش استقامت عایقی مجموعه عایق بررسی شده است. سپس بار 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 برنامه نویسی شده و از آن برای شبیه سازی رفتار دینامیکی DBD در اعمال سه نوع ولتاژ AC، DC و ضربه صاعقه استفاده شده است.

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

## ۱- مقدمه

یکی از پرکاربردترین فناوری‌های عایقی فشار قوی، استفاده از گازهای دی‌الکتریک خود بازیاب<sup>۱</sup> به‌عنوان محیط عایقی است. دو کاربرد معمول این فناوری عبارتند از: استفاده از هوا در فشار اتمسفر به‌عنوان گاز دی‌الکتریک و سیستم‌های با عایق گاز پرفشار (GIS)  $SF_6$  یا مخلوط گازی که  $SF_6$  یکی از اجزای آن است.

سیستم‌های با عایق هوا به‌خوبی توسعه یافته‌اند و به‌طور 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. به‌عنوان محیط عایقی،  $SF_6$  استقامت دی‌الکتریک نسبتاً بالا، هدایت حرارتی خوب و تلفات پایینی دارد. در مقابل  $SF_6$  بعضی ویژگی‌های نامطلوبی نیز دارد: هنگامی که در معرض تخلیه الکتریکی قرار می‌گیرد، موادی سمی با خاصیت خوردندگی تشکیل می‌شود. این گاز در فشار استفاده شده در پست‌های گازی در درجه حرارت‌های نه چندان پایین (حدود دمای ۲۰-)- مایع می‌شود. ایراد اصلی فناوری  $SF_6$  سهم زیاد آن در گرم شدن جهانی (اثر گلخانه‌ای) در هنگام آزاد شدن در اتمسفر است، زیرا  $SF_6$  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.

لذا در موافقنامه Kyoto،  $SF_6$  به‌عنوان گازی که باید انتشار آن محدود شود، ثبت شده است [۱]. یکی از راهکارهای حل مسائل زیست محیطی سیستم‌های  $SF_6$ ، جستجو برای جایگزین‌ها است. جستجو برای گاز یا مخلوط گازی که خواص الکتریکی و شیمیایی شبیه به  $SF_6$  داشته و نیز از دید اقتصادی مناسب باشد، هنوز به نتیجه‌ای نرسیده است. اکنون بیشتر تحقیقات بر مخلوط‌های گازی که  $SF_6$  یکی از تشکیل‌دهنده‌های اصلی آن باشد، متمرکز است [۲] و [۳]. این مخلوط‌ها اثر منفی کمتری در گرم کردن جهانی نسبت به  $SF_6$  داشته و به‌عنوان 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 به‌عنوان محیط عایقی است. البته چنین سیستمی باید ویژگی‌هایی شبیه به سیستم‌های  $SF_6$  داشته باشد. اگر از این روش به‌درستی استفاده شود، می‌توان به بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد عایقی رسید. دو ساختار مطرح شده عبارتند از: الف) حایل دی‌الکتریک در فاصله هوایی بین دو الکتروود [۴] و ب) حایل دی‌الکتریک به‌صورت پوشش الکتروود(ها)، [۵-۱۵] که در این مقاله وضعیت دوم بررسی شده است.

اگرچه تاکنون کاربردهای متنوعی از DBD مطرح شده مانند تولید اوزون [۹]، کنترل آلودگی هوا نظیر کاهش ترکیبات  $NO_x$  خروجی موتورهای دیزلی [۱۰]، تبدیل گاز متان به سوخت مایع متانل [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

1. Self-restoring

بی‌نهایت و متقارن فرض و تحلیل در حالت یک‌بعدی انجام شده است. فاصله دو الکتروود صفحه‌ای با پوشش عایق برابر  $d_g$  و ضخامت پوشش دی‌الکتریک برابر  $2d_c$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ ساختار در مدل‌سازی DBD

با حضور پوشش دی‌الکتریک و با فرض وجود بار سطحی برابر  $\rho_s$  بر روی پوشش‌های دی‌الکتریک در سمت فاصله هوایی، شدت میدان الکترونیکی در فاصله هوایی و داخل پوشش دی‌الکتریک برابر است با:

$$E_{die} = \frac{v + \frac{d_g \rho_s}{\epsilon_0}}{\sqrt{d_c + \epsilon_r d_g}} \quad (1-f)$$

$$E_{air} = \frac{\epsilon_r v - \frac{\sqrt{d_c} \rho_s}{\epsilon_0}}{\sqrt{d_c + \epsilon_r d_g}} \quad (1-b)$$

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

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

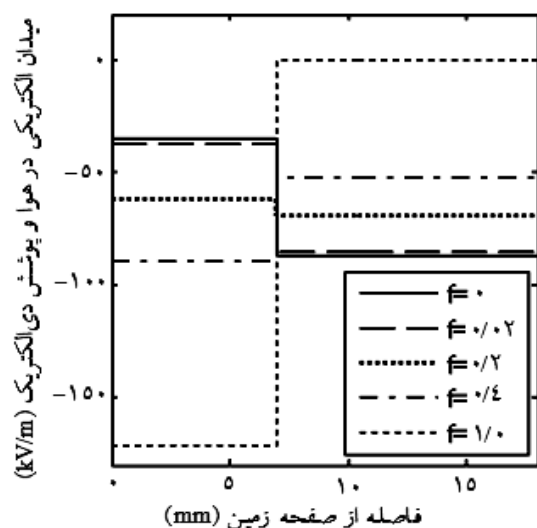
در این مقاله، نخست به مدل‌سازی دینامیک تشکیل بارهای فضایی مذکور [۸] و نحوه نشست آنها بر روی سطوح دی‌الکتریک پرداخته نشده، بلکه بررسی این پدیده به صورت استاتیکی (با فرض نشست بار فضایی با مقادیر مختلف بر روی سطوح دی‌الکتریک) مورد توجه قرار گرفته و نقش تغییر پارامترهای مختلف نظیر ضریب نفوذپذیری ماده دی‌الکتریک، 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 دی‌الکتریک 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 الکتروودهای صفحه‌ای موازی یعنی با فرض میدان الکترونیکی یکنواخت و با دی‌الکتریک دو لایه که به صورت یکنواخت روی الکتروودها 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 ۵،  $\epsilon_r = 2.5$  نشان می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر گفتیم 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 به‌عکس، 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  $\rho_{\max} = \epsilon_r \epsilon_0 v / 2d_c$  مقدار  $\rho_{\max}$  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:

$$E_t(\text{die}) = E_t(\text{air}) \quad (3)$$

$$D_n(\text{die}) - D_n(\text{air}) = \rho_s \Rightarrow$$

$$\epsilon_r \epsilon_0 E_n(\text{die}) - \epsilon_0 E_n(\text{air}) = \rho_s$$

$E_n(\text{die})$  و  $E_n(\text{air})$  با توجه به شکل (۱) و از معادلات (۱) به دست می‌آیند. در رابطه (۲)  $0 \leq f \leq 1$ . در شکل

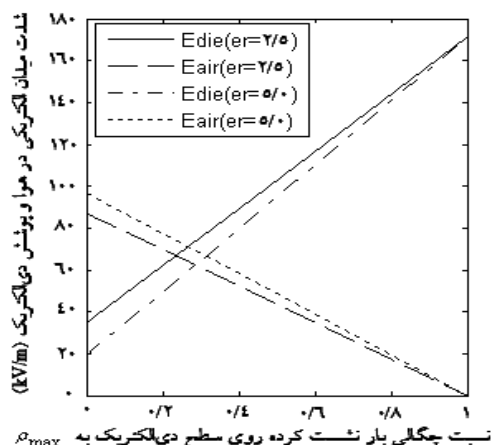
$$(2), \quad d_g + \Delta d_c = 18 \text{ mm}, \quad \Delta d_c = 7 \text{ mm}, \quad v = -1.2 \text{ kV}$$

و  $\epsilon_r = 2.5$  (کل پوشش دی‌الکتریک روی یکی از الکترودها فرض شده) و  $f$  برابر ۰، ۰/۰۲، ۰/۲، ۰/۴، ۱/۰ 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

دی الکتریک با بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دی الکتریک توجیه می شود.

نتیجه دیگری که از شکل (۳) استنباط می شود آن است که با چگالی سطحی یکسان و  $\epsilon_r$  بزرگتر، شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی بیشتر و در پوشش دی الکتریک کمتر است. البته شیب این افزایش یا کاهش نیز در حالت  $\epsilon_r$  بزرگتر، بیشتر است.

با توجه به نتایج تا این مرحله، چنین نتیجه می گیریم که در صورت استفاده از پوشش دی الکتریک می توان ولتاژ شکست مجموعه عایقی را بالاتر برد.



شکل ۳ تغییرات شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی و در داخل پوشش دی الکتریک بر حسب چگالی بار سطحی، برای دو مقدار مختلف  $\epsilon_r$

### ۳- شبیه سازیهای عددی دینامیکی

در شبیه سازیهای دینامیکی، دینامیک باردار شدن دی الکتریک ها در نظر گرفته می شود و برای این منظور، با اعمال ولتاژهای DC، AC و صاعقه  $1.2/50 \mu s$  مسأله حل می شود. فرض می شود که هیچ عامل خارجی یونیزه کننده ای وجود نداشته و بنابراین پوششهای دی الکتریک فاقد 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 دی الکتریک با پتانسیل مخالف نشست خواهند 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 الکتروود و فرض یکنواخت بودن شدت میدان در فاصله هوایی با توجه به قانون پاشن از رابطه زیر به دست می آید [۱۶]:

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

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 می افتد از رابطه (۴) محاسبه می شود. برای به دست آوردن معادله (۴)، معادلات (۱-الف) و (۱-ب) برابر قرار داده می شوند و از این برابری داریم:

$$\rho_s = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \frac{v}{d g + \gamma d c} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E_0 = \rho_{ps} \quad (4)$$

$E_0$  شدت میدان الکتریکی در غیاب پوشش دی الکتریک و  $\rho_{ps}$  چگالی بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دی الکتریک است. به بیانی دیگر نقطه برابری شدت میدان الکتریکی در دو محیط، نقطه ای است که در آن، چگالی بار سطحی نشسته بر روی پوشش دی الکتریک، با چگالی بار سطحی ناشی از پلاریزاسیون پوشش دی الکتریک برابر شود. جالب است که اگر  $\rho_s$  رابطه (۴) در رابطه (۱) جایگزین شود، شدت میدان الکتریکی برابر  $E_0$  نتیجه می شود 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 الکتريکی در دی‌الکتریک با تأثیر بار سطحی نشست کرده و با توجه به روابط (۱-الف) و (۱-ب) به صورت زیر اصلاح شده است:

$$E_{air-modified}(k) = E_{critical} - \frac{\sqrt{d_c} \Delta\rho_{discharge}}{\epsilon_r} \\ E_{die-modified}(k) = E_{die} + \frac{\epsilon_r}{\sqrt{d_c} + \epsilon_r d_g} \Delta\rho_{discharge} \quad (7)$$

• رابطه (۷) بر اساس این واقعیت نوشته شده که در زمانی بین  $t = t_k$  و  $t = t_k - 1$ ، شدت میدان الکتريکی 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  $\rho_s$  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 الکتريکی  $\sigma$  برای پوشش دی‌الکتریک، میزان کاهش بار سطحی برابر است با:

$$\rho_s = \rho_{s0} \exp(-\sigma t / \epsilon_r) \quad (8)$$

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 الکتريکی در فاصله

که  $p$  فشار هوا بر حسب بار و  $d_g$  طول فاصله هوایی بر حسب  $cm$  و  $E_{critical}$  استقامت الکتريکی بحرانی بر حسب  $kV/cm$  است. ضریب  $1/0.1$  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 الکتريکی در فاصله هوایی به  $E_{chocking}$  کاهش خواهد یافت. مقدار بار فضایی تولید شده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\rho_{discharge} = \epsilon_r \left( 1 + \frac{\epsilon_r d_g}{\sqrt{d_c}} \right) (E_{critical} - E_{chocking}) \quad (6)$$

با توجه به [۶]،  $E_{chocking}$  برابر ۹۰ درصد  $E_{critical}$  در نظر گرفته شده است [۶]. برای فشار اتمسفر (۱ بار) و فاصله هوایی  $10 \text{ mm}$  داریم:

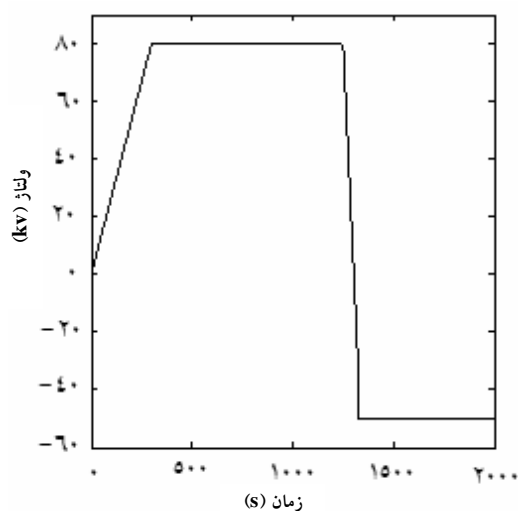
$$E_{critical} = 31.4312 \text{ kV/cm}$$

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

الگوریتم حل به شرح زیر است:

- بار سطحی نشست کرده بر روی پوشش (های) دی‌الکتریک برابر صفر در نظر گرفته شده است.
- شدت میدان الکتريکی 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  $t=1250$  s در این مقدار ثابت مانده و سپس تا زمان  $t=1330$  s با شیب خطی به مقدار  $-50$  کیلوولت کاهش یافته و تا زمان  $t=2000$  s 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  $\Delta t = 0.1$  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 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 مدل‌سازی 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 هوا 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  $\mu$  در شدت میدان الکتریکی  $E$  است.

با در نظر گرفتن  $\mu^+ = 1.36 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  و  $\mu^- = 2.1$  [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  $6.76 \times 10^4 \text{ cm/s}$  و  $4.27 \times 10^4 \text{ cm/s}$  خواهد بود که با توجه به طول فاصله هوایی برابر  $1 \text{ cm}$ ، زمان رسیدن یون‌های منفی و مثبت به سطح پوشش (های) دی الکتریک کمتر از  $10/1502$  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.

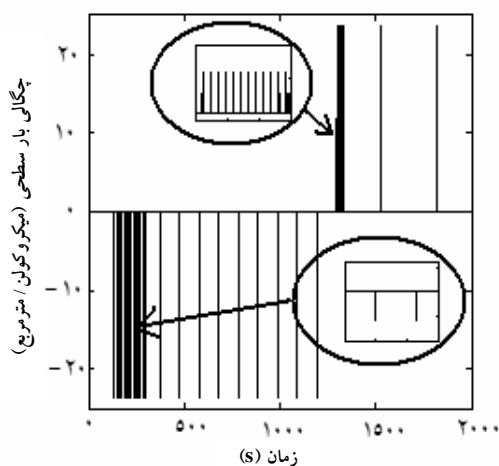
## ۴- شبیه‌سازی

### ۴-۱- اعمال ولتاژ DC

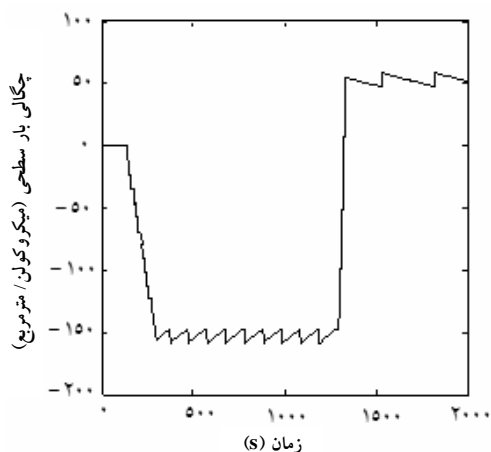
در این قسمت فرض می‌شود که مجموعه الکترودها به ولتاژ DC مطابق شکل (۴) متصل شده باشند (الکترودها بالایی به قطب مثبت متصل است).

در این شکل، ولتاژ با شیب خطی از زمان صفر تا  $t=300$  s 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 دی‌الکتریک بالایی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های (۶) تا (۸) دیده می‌شود که با افزایش بار سطحی بر روی پوشش‌های دی‌الکتریک، شدت میدان الکترونیکی در پوشش دی‌الکتریک افزایش می‌یابد.



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

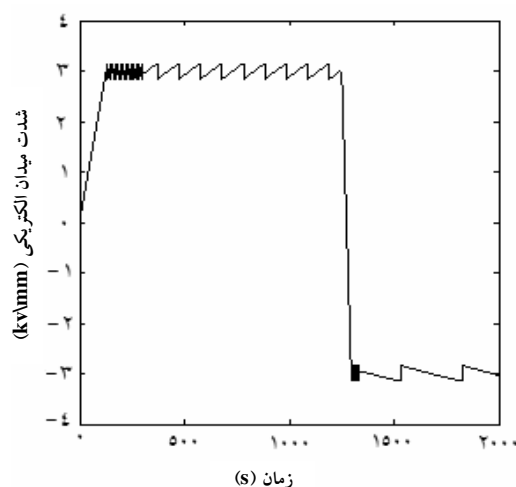


شکل ۸ مقدار بار سطحی جمع شده روی پوشش دی‌الکتریک بالایی با اعمال ولتاژ DC

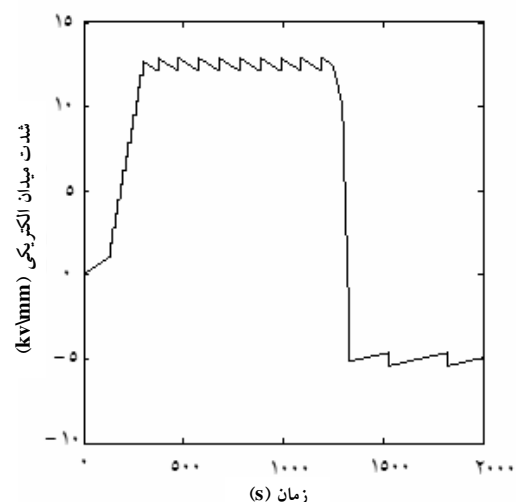
#### ۴-۲- اعمال ولتاژ AC

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

شکل (۶) تغییرات شدت میدان الکترونیکی در دی‌الکتریک را نشان می‌دهد. اگر فرض کنیم که استقامت الکترونیکی ماده عایق پوشش دی‌الکتریک برابر  $20 \text{ kV/mm}$  باشد، با توجه به شکل (۶) بیشینه شدت میدان الکترونیکی به  $15 \text{ kV/mm}$  نمی‌رسد. در صورتی که اگر فاصله بین دو الکتروده (۱۲ mm) فاقد پوشش دی‌الکتریک باشد، با بیشینه ولتاژ برابر  $80 \text{ kV}$  شدت میدان به  $6.67 \text{ kV/mm}$  خواهد رسید که در نتیجه شکست الکترونیکی رخ می‌دهد.

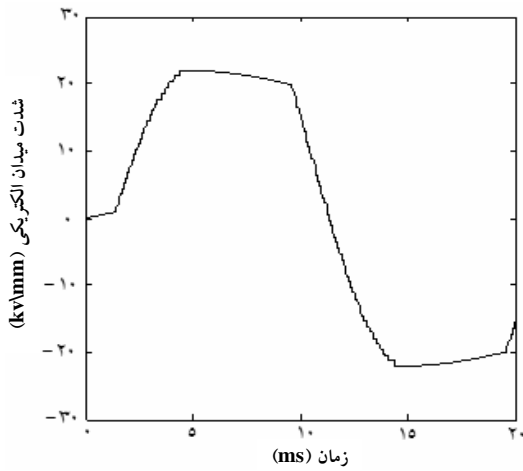


شکل ۵ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ DC

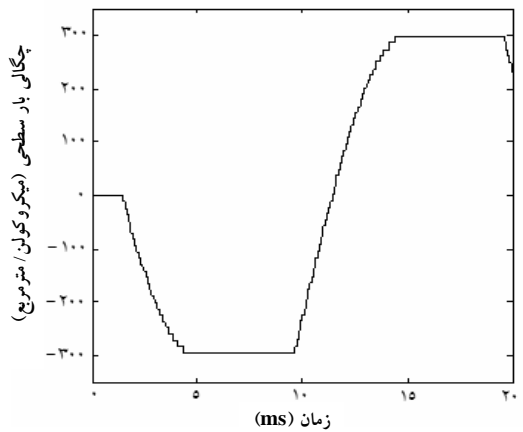


شکل ۶ شدت میدان در پوشش دی‌الکتریک با اعمال ولتاژ DC

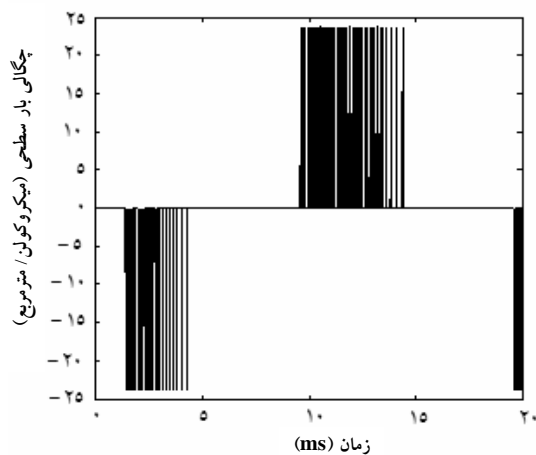




شکل ۱۱ شدت میدان در پوشش دی الکتریک با اعمال ولتاژ AC



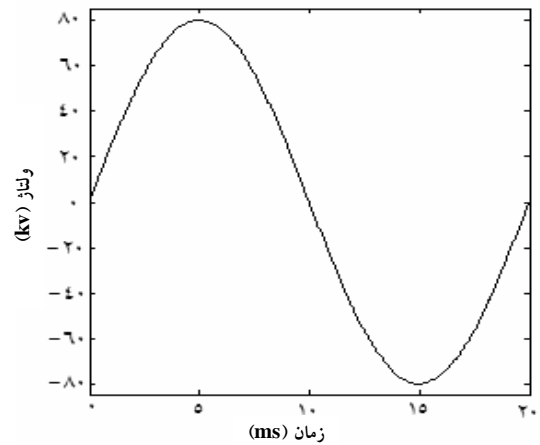
شکل ۱۲ بار سطحی جمع شده بر روی دی الکتریک بالایی با اعمال ولتاژ AC



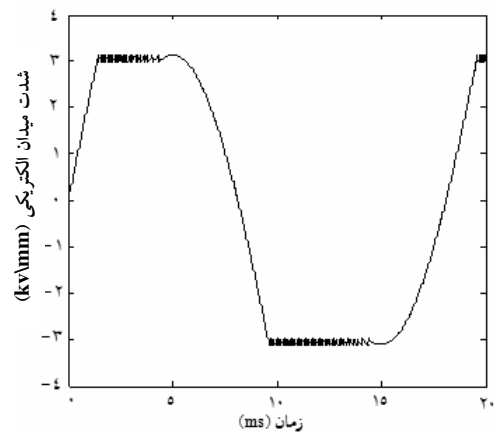
شکل ۱۳ منحنی تولید  $\Delta\rho_{discharge}$  با اعمال ولتاژ AC

است. با همان فرضهای قسمت ۴-۱، شکل های (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 کاترود بالایی و  $\Delta\rho_{discharge}$  را نشان می دهند.

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 می دهد. در بخش ۴-۴ برنامه ای 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 ۱۰ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ AC

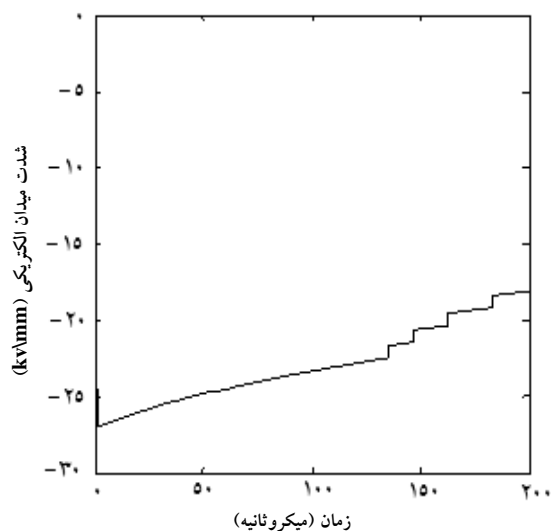
## ۳-۴- اعمال ولتاژ ضربه صاعقه

در این قسمت اثر اعمال ضربه صاعقه  $1.2/50 \mu s$  منفی با حداکثر مقدار  $90$  کیلوولت (شکل ۱۴) به الکترودها بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی صاعقه، از معادله زیر استفاده شده است [۱۷].

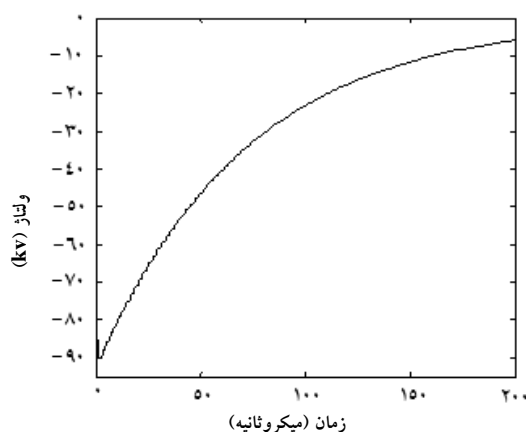
$$u(t) = 1.034U \left( \exp\left(\frac{-t}{72}\right) - \exp\left(\frac{-t}{0.382}\right) \right)$$

در این رابطه  $t$  بر حسب  $\mu s$  بود و  $U = -90 kV$ .

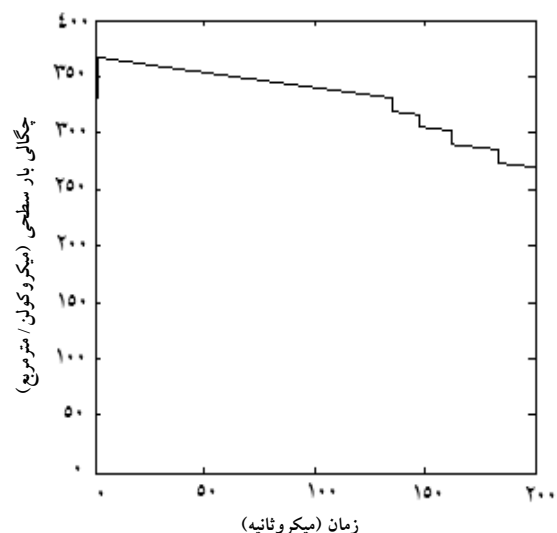
با همان فرضهای قسمت ۴-۱، شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) به ترتیب شدت میدان الکتریکی در فاصله هوایی، شدت میدان الکتریکی در پوشش دی‌الکتریک، بار سطحی جمع شده بر روی پوشش دی‌الکتریک قرار گرفته بر روی سطح الکتروود بالایی و  $\Delta\rho_{discharge}$  را نشان می‌دهند.



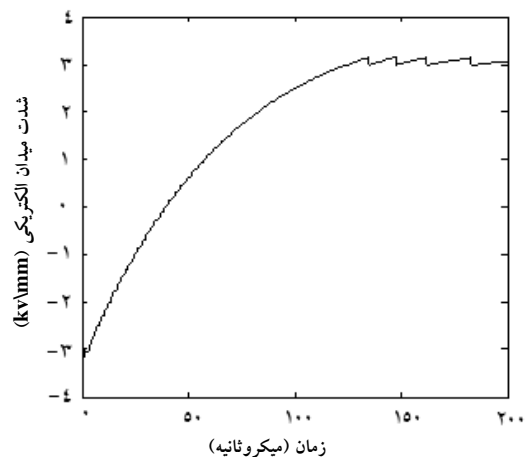
شکل ۱۶ شدت میدان در پوشش دی‌الکتریک با اعمال ولتاژ ضربه



شکل ۱۴ ولتاژ ضربه اعمال شده



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

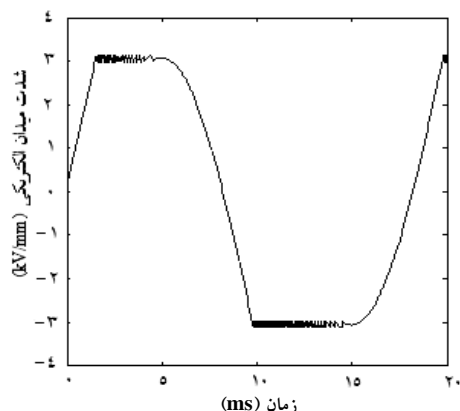


شکل ۱۵ شدت میدان در فاصله هوایی با اعمال ولتاژ ضربه

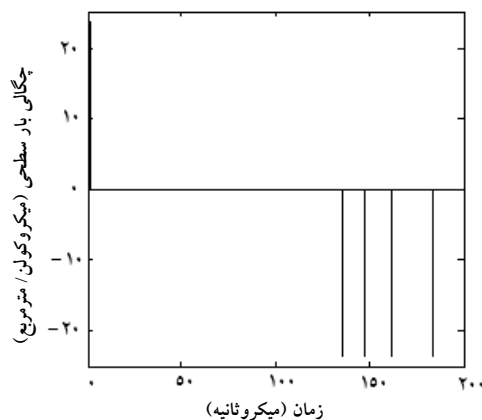
#### ۴-۴- تعیین ولتاژ شکست

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 دی الکتریک  $20 \text{ kV/mm}$  باشد) را تعیین نمود. در مورد ولتاژ اعمالی در قسمت ۴-۲ با همان مشخصات ساختار مجموعه، ولتاژ شکست برابر  $74 \text{ kV}$  است. برای این مقدار، شدت میدان الکتریکی در پوشش دی الکتریک و فاصله هوایی به ترتیب در شکل های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.

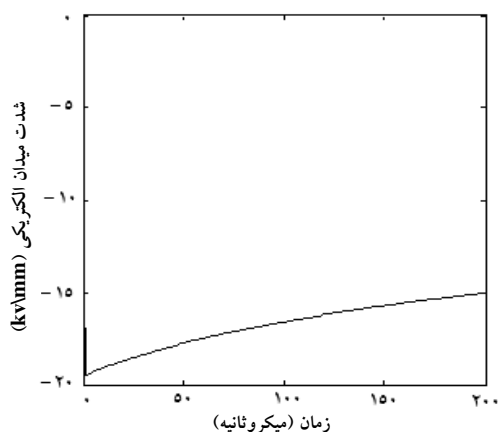
الکتریکی را در پوشش دی الکتریک و فاصله هوایی نشان می دهند.



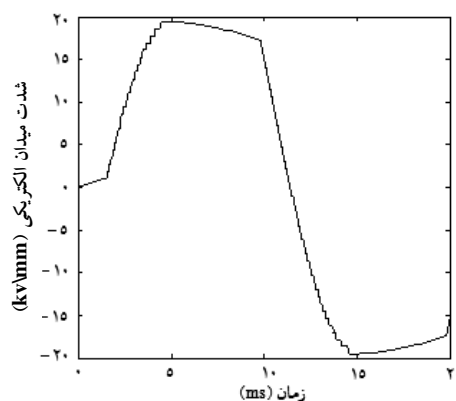
شکل ۲۰ شدت میدان در فاصله هوایی (برای ولتاژ شکست)



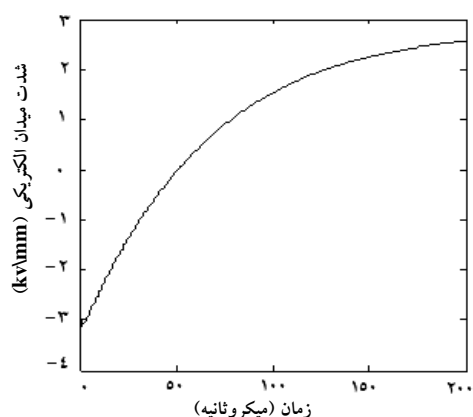
شکل ۱۸ منحنی تولید  $\Delta\rho_{discharge}$  با اعمال ولتاژ ضربه



شکل ۲۱ شدت میدان در پوشش دی الکتریک (برای ولتاژ شکست)



شکل ۱۹ شدت میدان در پوشش دی الکتریک (برای ولتاژ شکست)



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

برای ولتاژ ضربه قسمت ۴-۳، شکست در  $U = -74 \text{ kV}$  رخ می دهد. شکل های (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. Elect. 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. Elect. 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 در نظر گرفتن مقادیر مختلف بار سطحی نشسته بر روی پوشش دی‌الکتریک مدل‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد در صورتی که فاصله بین دو الکتروود با پوشش دی‌الکتریک پر شود، ولتاژ شکست مجموعه عایق نزدیک به دو برابر و یا بیشتر خواهد شد، بسته به اینکه چه 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. همچنین 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 DC، AC 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<sub>x</sub> 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.