

علمی - پژوهشی

بررسی رفتار مواد فروالکتریک جدید عایقی و کاربرد آن‌ها در طراحی خازن‌های فشار قوی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی با تأکید بر باریم تیتانات

مجتبی اسدی^۱، اسعد شمشادی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی اراک، ایران اراک

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

هدف از این مقاله طراحی خازن فشار قوی جدیدی می‌باشد که بین صفحات آن به‌جای استفاده از عایق‌های معمول از ماده فروالکتریک باریم تیتانات که ضریب گذردهی نسبی بالایی دارد استفاده شده است. اهداف این پژوهش در واقع رسیدن به مدل کامل الکتریکی از مواد فروالکتریک، با تأکید بر ماده باریم تیتانات می‌باشد که وابستگی ضریب تلفات عایقی و عدد دی‌الکتریک نسبی در ارتباط با تغییرات دما و شدت میدان الکتریکی در این مدل شناخته شده باشد. چالش پیش رو این است که ضریب گذردهی نسبی ماده دی‌الکتریک ثابت نبوده و متغیر می‌باشد، همچنین حلقه هیستریزیسی وجود دارد که مشخصات عایقی نظیر ضریب گذردهی نسبی و ضریب تلفات عایقی در آن بر اساس دما تغییر می‌کند که در این مقاله با استفاده از روش اجزای محدود و بازسازی حلقه هیستریزیسی واقعی ماده تلاش شده است این موضوع مهم، مورد نظر قرار گرفته و قابل حل باشد. انجام این پژوهش به امکان‌سنجی استفاده از این عایق‌ها در ساخت خازن‌های فشار قوی و چالش‌های پیش رو در این زمینه منجر می‌گردد. همچنین نتایج آن در امکان‌سنجی طراحی و ساخت خازن‌های فشار قوی و عایق‌های با ضرایب دی‌الکتریک بالا و شناخت چالش‌های پیش رو و پیشنهاد مناطق مناسب از لحاظ آب و هوایی (حداقل و حداکثر دما) جهت نصب خازن‌های مذکور، کارآمد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: اجزای محدود، باریم تیتانات، خازن فشار قوی، ضریب تلفات عایقی، فروالکتریک، ضریب گذردهی نسبی

۱. مقدمه

مانند نمک راشل^۲ به قرن ۱۶ میلادی بر می‌گردد، لازم به ذکر است که کاربردهای اولیه این مواد مانند نمک راشل در ابتدا اهداف غیر الکتریکی به‌ویژه کاربردهای پزشکی را شامل می‌شد. فروالکتریک به مفهوم وجود دو قطبی‌های خود به خودی در یک بلور می‌باشد که جهت آن توسط میدان الکتریکی خارجی قابل تغییر است و خاصیت آن برای اولین بار در نمک راشل در سال ۱۹۲۱ توسط والاسک کشف گردید.

در سال ۱۹۴۵ خاصیت فروالکتریک در ماده سرامیکی باریم تیتانات به‌صورت تصادفی توسط گینزبرگ کشف شد. باریم تیتانات اولین فروالکتریک بدون پیوند هیدروژنی بود که در حال حاضر در موارد بسیاری اعم از نظامی، صنعتی، پزشکی، ارتباطات، اکتشافات بین سیاره‌ای و صنعت خودرو کاربرد دارد. سرامیک باریم تیتانات از ثابت دی‌الکتریک فوق‌العاده بالایی برخوردار است (ثابت دی‌الکتریک این ماده در محدوده ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ است) و به همین دلیل از نظر کاربردهای عایقی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مواد فروالکتریک مثل باریم تیتانات یا نمک راشل از

مواد فروالکتریک، موادی هستند که دارای خواص عایقی جالب و مورد توجه، نظیر ثابت دی‌الکتریک بالا می‌باشند. امکان‌سنجی استفاده از این مواد به‌عنوان ماده عایقی در طراحی خازن‌های الکتریکی با کاربرد فشار قوی (۲۰ kV) باعث افزایش قابل توجه ظرفیت بانک‌های خازنی مذکور و کاهش اندازه بلوک‌های خازن‌های فشار قوی، که به‌ویژه در پست‌های فشار قوی شهری و GIS^۱ نیاز به محل کوچک‌تری جهت نصب دارند، می‌گردد. در کنار خاصیت ضریب دی‌الکتریک بالا اثرات عوامل محیطی مزاحم به‌ویژه درجه حرارت و ضریب تلفات عایقی در فرکانس قدرت و میدان الکتریکی ایجاد شده در حال تغییر باید مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار گیرد. ۱- چالش‌های پیش رو در به‌کارگیری مواد جدید فروالکتریک در طراحی بخش عایقی تجهیزات فشار قوی، سبب تحقیقاتی بر پایه مواد جدید، نظیر مواد فروالکتریک شد و این امر منجر به تولید ترکیبات جدیدی از جمله، باریم تیتانات^۱ گردید. تاریخ کشف برخی از مواد فروالکتریک

^۱ Barium Titanate (BaTiO₃)^۲ Rochellsalt (KNaC₄H₄O₆ - 4H₂O)

* نویسنده پاسخگو: shemshadi@arakut.ac.ir

سلول واحد مکعبی ساده با کاتیون بزرگ A در گوشه‌های سلول، کاتیون کوچک B در مرکز سلول و آنیون‌های اکسیژن O در مرکز وجوه سلول مشخص می‌شود) تمایل دارند. تجربه نشان می‌دهد که ساختار و خصوصیات لایه‌های فروالکتریک اساساً به ضخامت لایه تشکیل‌دهنده ماده دی‌الکتریک بستگی دارد. در این مقاله برای توصیف خواص مواد فروالکتریک در ارتباط با ضخامت لایه‌های باریم زیرکونات و باریم تیتانات به دلیل مقادیر ثابت دی‌الکتریک بالا و کاربرد آن‌ها در دستگاه‌های حافظه فروالکتریک غیرفرار، کار شده است [۳].

یک بررسی کلی برای به‌دست آوردن انرژی الکترونیکی با استفاده از مواد فروالکتریک انجام شده است. تأمین انرژی الکترونیکی از طریق مواد پیزوالکتریک و پیزوالکتریک نیز در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. بسیاری از مزایای مواد فروالکتریک در طول ۳۰ سال گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. چندین روش برای تولید انرژی الکترونیکی از طریق مواد فروالکتریک با ساختارهای پیچیده موجود است که برای به‌دست آوردن انرژی الکترونیکی از نوسانات حرارتی و ارتعاشات مکانیکی مناسب، استفاده می‌شود [۴].

بررسی سرامیک‌های فروالکتریک که جز اصلی بسیاری از مبدل‌های التراسونیک صوتی هستند با روش اجزای محدود انجام می‌گیرد. مشکلات درخواستی از این مواد مثل (تلفات دی‌الکتریک) ممکن است اثر قوی بر تشدید امیدانس داشته باشد. با توجه به اینکه رزوناتورهای اشکال هندسی ساده‌ای داشته و یک حالت تحلیلی برای امیدانس دارند، اگر رزوناتور دارای شکل پیچیده‌ای باشد، توصیف رزونانس با استفاده از روش تحلیلی اجزای محدود^۵ انجام می‌شود. در این مقاله رزوناتورها با مقادیر شناخته‌شده ضرایب الاستیک، دی‌الکتریک و پیزوالکتریک، با استفاده از روش تحلیلی اجزای محدود مدل‌سازی شده است. می‌توان از روش اجزای محدود برای محاسبه دقیق فشار یا ارتعاش ساختار استفاده کرد [۵].

ساختار پروسکایت ماده فروالکتریک باریم تیتانات، مورد استفاده در پروژه‌های صنعتی مختلف مانند، کاربردهای الکترونیکی و الکترومکانیکی، مورد بررسی قرار گرفت. باریم تیتانات، با ساختار پروسکایت، یک ماده فروالکتریک با ثابت دی‌الکتریک بالا است که به‌طور گسترده برای ساخت قطعات الکترونیکی مانند خازن‌های چند لایه، ترمیستورهای PTC^۶ و انواع دستگاه‌های الکترونیکی استفاده می‌شود. ثابت دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده با استفاده از مواد زمینه‌ای پرکننده و افزایش تلفات دی‌الکتریک به طوری مستقیم افزایش می‌یابد. مقادیر ثابت

کریستال‌هایی تشکیل شده‌اند که واحدهای ساختاری آن‌ها دو قطبی‌های کوچک الکترونیکی هستند، یعنی در هر واحد، مراکز بار مثبت و منفی کمی از هم جدا شده‌اند. بیشترین دمایی که سرامیک‌های فروالکتریک، خواص خود را در آن دما حفظ می‌کنند، دمای کوری نامیده می‌شود و بعد از دمای مذکور ساختار دی‌الکتریک‌ها به عایق عادی تغییر شکل می‌دهد.

باریم تیتانات اولین ماده مورد استفاده برای تولید خازن‌های سرامیکی با ثابت دی‌الکتریک بالا مخصوصاً خازن‌های چند لایه^۱ است. از این خازن‌ها برای ساخت حافظه‌هایی با دسترسی تصادفی^۲ در کامپیوترها و همچنین در دستگاه‌های فراصوت پزشکی (اولتراسونیک)، دوربین‌های مادون قرمز با کیفیت بالا، حس‌گرهای آتش، ردیاب صوتی (سونار)، حس‌گرهای ارتعاشی، انژکتورهای سوخت در موتورهای دیزلی، سیستم ترمز ضد قفل^۳ استفاده می‌شود.

مواد فروالکتریک ثابت دی‌الکتریک بسیار بالا در فرکانس‌های نسبتاً پایین دارند، خازن‌های ساخته‌شده از این مواد می‌توانند به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر از خازن‌های ساخته‌شده از دیگر مواد دی‌الکتریک باشد، مقدار بار الکترونیکی قابل ذخیره‌سازی در خازن‌های فروالکتریک به علت ثابت دی‌الکتریک بالای آن‌ها، بسیار بیشتر از ساختار مشابه مانند کاغذ یا هوا می‌باشد [۱].

قابلیت استفاده از مواد فروالکتریک برای تولید ولتاژ بالا تحت فشرده‌سازی شوک مکانیکی - صوتی مورد بررسی قرار گرفته است. به علت قطب دهی ناشی از شوک مکانیکی، پتانسیل الکترونیکی فشار قوی در دو سر ماده فروالکتریک ایجاد می‌گردد. این ولتاژ می‌تواند در محدوده ۴ تا ۱۵۰ کیلوولت و بسته به ضخامت عناصر فروالکتریک از ۴/۷ تا ۵۱ میلی‌متر تغییر یابد. پدیده شکست الکترونیکی در مواد فروالکتریک از دهه ۱۹۷۰ به‌طور گسترده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که قانون شکستی به شرح رابطه $E_B(d) = \gamma \cdot d^{-1/2}$ را نشان می‌دهد که در این رابطه، E_B میدان شکست، γ ثابت وابسته به مواد، d ضخامت دی‌الکتریک و γ ضریب شکست الکترونیکی می‌باشد که توسط ساز و کار شکست الکترونیکی توجیه می‌شود [۲].

دی‌الکتریک و پلاریزاسیون باریم زیرکونات^۴ و باریم تیتانات با ابعاد بلور ۱۳/۳۲ نانومتر بررسی شده است. گذردهی الکترونیکی عایق‌ها در این مقاله به عدد 10^4 که بالاترین مقدار را در بین مراجع بررسی شده دارد، رسیده است. در عمل، مواد فروالکتریک، بیشتر به تشکیل ساختارهای پروسکایت (ساختار پروسکایت با فرمول ABO_3 ساده‌ترین آرایش اتمی است که به‌صورت یک

¹ Monolithic Multilayer Capacitors

² Random Access Memory

³ Anti Lock Braking System

⁴ Barium Zirconate (BaZrO₃)

⁵ Finite Element Method

⁶ Positive Temperature Coefficient

خصوصیات عایقی آن شامل ثابت دی‌الکتریک و حلقه هیستریزس باشد و در واقع عایق مورد استفاده در بین صفحات این خازن ماده فروالکتریک باریم تیتانات است که ثابت دی‌الکتریک بالایی دارد. سپس حلقه هیستریزس ماده فروالکتریک را به کمک مقاله مرجع [۹] و به کمک نرم‌افزار متلب برازش منحنی کرده و سپس کُرو آن را در نرم‌افزار متلب به صورت دو ضابطه، یکی ضابطه بالای حلقه هیستریزس و دیگری ضابطه پایین حلقه هیستریزس به دست آورده و سپس آن‌ها را وارد نرم‌افزار کرده و بر اساس حلقه هیستریزس ثابت دی‌الکتریک را نیز به دست آورده و بر این اساس محاسبات انجام می‌شود.

در این بخش، در حقیقت روشی مهم است که به وسیله آن بتوان خصوصیات جالب عایقی را مدل‌سازی کرد که این خصوصیات در روش‌های جدید وجود ندارد و هدف این پژوهش انجام آن‌ها می‌باشد. چالش پیش رو در این روش این است که ثابت دی‌الکتریک ثابت نبوده و متغیر می‌باشد، همچنین همان‌طور که در بالا نیز گفته شد، حلقه هیستریزسی وجود دارد که مشخصات عایقی نظیر ثابت دی‌الکتریک و ضریب تلفات عایقی در آن بر اساس دما تغییر می‌کند و در حقیقت می‌توان گفت که در این روش هیچ پارامتر ثابتی وجود ندارد. روش حل معادلات فوق برای شبیه‌سازی بر مبنای معادله لاپلاس می‌باشد که به صورت رابطه زیر است:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \quad [7]$$

در عبارت بالا φ تابع حقیقی دو بار مشتق‌پذیر است و x, y, z متغیرهای مورد نظر در مختصات دکارتی هستند.

۲-۱. ترسیم هندسی ناحیه حل معادلات

در این مرحله ابتدا باید خازن مورد نظر را طراحی کرد. همان‌طوری که گفته شد با توجه به اینکه این خازن یک خازن عادی و مسطح (مکعبی) می‌باشد ابعاد آن را با توجه به گران قیمت بودن ماده باریم تیتانات و در نظر گرفتن پدیده تخلیه الکتریکی در لبه‌های خازن‌های فشار قوی تحت ولتاژ ۳۰ کیلو ولت، برای این طرح، خازنی با ابعاد مناسب و کوچک به طول ۵ cm و عرض ۵ cm و ارتفاع ۰/۹ cm در نظر گرفته شده است (شکل ۱). به منظور موارد پیش‌بینی شده برای خازن هنگام آزمایش و بهره‌برداری و صحیح انجام شدن شبیه‌سازی باید اطراف خازن مورد نظر را نیز مکعبی شبیه خازن مربوطه با ابعادی به طول و عرض و ارتفاع ۱۰ cm، ولی از جنس روغن در نظر گرفت و مانند

دی‌الکتریک و ضریب تلفات عایقی در این آزمایش به ترتیب ۲۵۰۰ و ۰/۰۳ به دست آمدند. باریم تیتانات به عنوان یک سرامیک فروالکتریک، یک ماده سازگار با محیط زیست است، بنابراین یک گزینه خوب برای برنامه‌های کاربردی مختلف می‌باشد [۶].

معیار جدیدی از تغییر ابعاد برای پلی کریستال‌های فروالکتریک ارائه شد. بر اساس این معیار، مدل‌سازی اجزای محدود سه بعدی صورت گرفته است. در این مدل فرض می‌شود که هر کریستال که توسط یک عنصر مکعبی نمایش داده می‌شود، یک حوزه یا دامنه واحد است. این مدل می‌تواند به خوبی حلقه‌های هیستریزس الکتریکی را توصیف و اندازه‌گیری کند. شبیه‌سازی‌ها در این مقاله تحت یک میدان الکتریکی ثابت انجام شده است. معادلات و فرمول‌های مورد استفاده در روش اجزای محدود بر اساس قوانین اساسی پیروالکتریک و معادلات ماکسول به دست می‌آید [۷].

با استفاده از پودر باریم تیتانات با افزودنی‌های دیگر، یک سرامیک با اندازه‌های کمتر از ۰/۲ میکرومتر و عدد گذردهی الکتریکی ۲۸۰۰، مورد بررسی قرار گرفت. ضریب دمایی ظرفیت خازنی^۱ و ضریب تلفات عایقی^۲ به صورت تابعی از ضخامت لایه سرامیک فروالکتریک مورد بررسی قرار گرفته و با ترکیبات فروالکتریک معمولی مقایسه می‌شوند در ادامه این مقاله امکان استفاده از دی‌الکتریک تهیه شده از باریم تیتانات برای خازن‌های چند لایه الکترونیکی را مورد بررسی قرار داده است و نتایج با استفاده از ترکیبات دی‌الکتریک معمول مقایسه شده‌اند. پایداری ضریب دمایی ظرفیت خازنی و مقدار پایین ضریب تلفات عایقی نشان می‌دهد که دی‌الکتریک ریزدانه، یک گزینه بسیار عالی برای استفاده در طرح‌های خازن‌های چند لایه با تعداد بالا است [۸].

۲. مدل‌سازی خازن و فضای اطراف آن

همان‌گونه که قبلاً نیز گفته شد هدف از این پژوهش، مدل‌سازی اثر تغییرات شدت میدان الکتریکی ناشی از تغییرات ولتاژ و دما بر تغییرات مشخصات عایقی مواد فروالکتریک با تأکید بر ماده باریم تیتانات جهت استفاده در خازن‌های فشار قوی با استفاده از روش اجزای محدود (در نرم‌افزار) می‌باشد. پیاده‌سازی طرح مورد نظر به این صورت است که در ابتدا خازنی طراحی می‌شود که این خازن یک خازن معمولی و مسطح (مکعبی) می‌باشد و فاصله‌ای بین صفحات آن وجود دارد و بین صفحات این خازن به جای استفاده از عایق‌های عادی از ماده‌ای استفاده می‌شود که

¹ Temperature Coefficient of Capacitance

² Dissipation Factor

$$\frac{dV}{dt} = 2000000\pi\cos(\omega t) \quad (۳)$$

همچنین فرکانس در اینجا ثابت یا همان فرکانس شبکه می باشد و ۵۰ Hz در نظر گرفته می شود و شدت میدان هم در واقع از فرمول $E=F/q$ محاسبه می شود که در اینجا F برآیند نیروهای وارد شده به جسم مورد نظر و q بار الکتریکی بر روی سطح جسم مورد نظر می باشد و با توجه به اینکه این طرح بر مبنای حلقه هیستریزس و ثابت دی الکتریک ماده کاربردی خود را نشان داده و مورد آزمایش قرار خواهد گرفت، از طرف دیگر چون حلقه هیستریزس در محور مختصات، نسبت محور Y ها که همان D (جابجایی الکتریکی و واحد آن C/m^2) است بر محور X ها که همان E (شدت میدان الکتریکی و واحد آن V/m) است، قرار دارد و مقاله ای که بر مبنای آن حلقه هیستریزس تخمین و برازش منحنی گردید، واحد شدت میدان در آن kV/mm است، بر همین اساس باید تبدیل واحد انجام گیرد و به V/m تبدیل شود و سپس برازش منحنی بر مبنای واحد اصلی آن که V/m است صورت گیرد. بر این اساس تبدیل واحد انجام شده در محدوده حلقه هیستریزس از $E = -۲,۵ \times 10^6$ V/m تا $E = ۲,۵ \times 10^6$ V/m است و از آنجایی که ولتاژ تعریف شده $V_1 = ۲۰۰۰ \times \sin(\omega_0 t)$ می باشد، به دلیل اینکه آزمایش ها و ثابت دی الکتریک در محدوده حلقه هیستریزس قرار گیرد باید X ها بر عدد ۲۰۰۰۰ که ولتاژ مورد نظر شبیه سازی است، تقسیم گردد تا رنج آزمایش ها در بازه تعریف شده حلقه هیستریزس قرار گیرد و به صورت زیر می باشد.

$$E = \frac{2500000}{20000} = 125 \times V_1$$

۳-۲. جنس مواد به کاررفته در خازن فشار قوی

در این بخش به بررسی جنس مواد به کاررفته در خازن فشار قوی و شبیه سازی آن و جنس مکعب در نظر گرفته شده در اطراف آن پرداخته شده است، به طور کلی مواد به کار گرفته شده در شبیه سازی شامل سه ماده کلی می باشد که شامل صفحه رسانا از جنس مس برای شبیه سازی خازن فشار قوی که به عنوان صفحه بالا و پایین خازن در نظر گرفته می شود، ماده عایقی فروالکتریک باریتم تیتانات که به عنوان ماده عایقی در بین صفحات خازن در گرفته می شود و در نهایت ماده سوم روغن می باشد که برای مکعب اطراف خازن فشار قوی به منظور آزمایش های عایقی در نظر گرفته شده است.

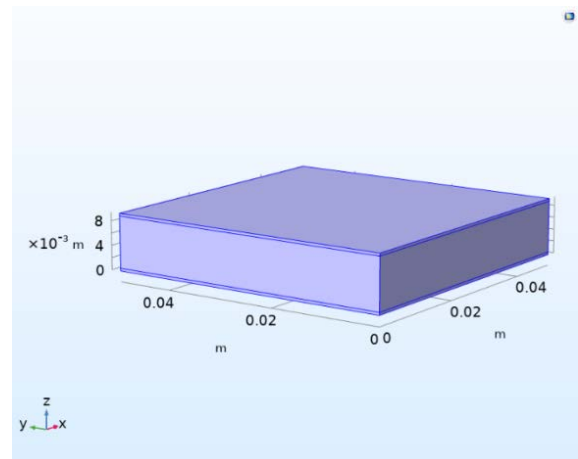
۴-۲. شبیه سازی خصوصیات عایقی ماده فروالکتریک

در این قسمت لازم است این نکته بیان شود که مشکلاتی که در ماده فروالکتریک وجود دارد این است که ثابت دی الکتریک ثابت نبوده و همچنین در این مواد حلقه هیستریزیسی وجود دارد که این موارد در عایق های عادی وجود ندارند. قسمت اصلی کار این پژوهش، شامل حلقه هیستریزیسی می باشد که بتواند خصوصیات

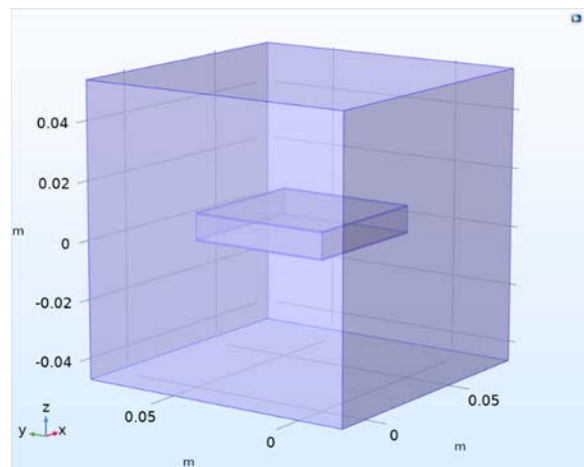
مرحله قبل که صفحه پایین خازن زمین شد در اینجا نیز باید مکعب اطراف خازن را زمین کرد تا شبیه سازی اثر خود را به خوبی نشان دهد (شکل ۲).

۲-۲. مقادیر اولیه ولتاژ، فرکانس، شدت میدان

به دلیل اینکه خازن مورد نظر قرار است در سطح ولتاژ ۲۰ کیلو ولت مورد آزمایش قرار گیرد، در این شبیه سازی نیز تحت ولتاژ ۲۰ کیلو ولت شبیه سازی انجام شده است. نکته مهمی که در اینجا باید به آن توجه شود این است که در این پژوهش ولتاژ به صورت یک پارامتر متغیر سینوسی است و ثابت نیست و با متغیر در نظر گرفتن ولتاژ کاربرد آن در فرکانس AC و مد AC نرم افزار بررسی می شود که در طرح های قبلی این امر بررسی نشده بود و همین امر نوآوری این طرح نسبت به طرح های قبلی را نشان می دهد. ولتاژ مورد استفاده و مشتق آن را در روابط (۲) و (۳) آمده است.



شکل (۱): طراحی خازن



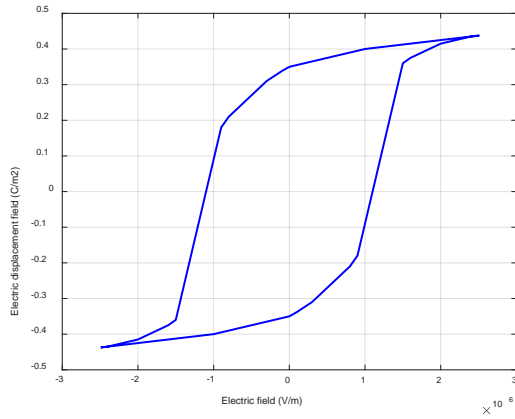
شکل (۲): طراحی مکعب از جنس روغن اطراف خازن

$$V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (۲)$$

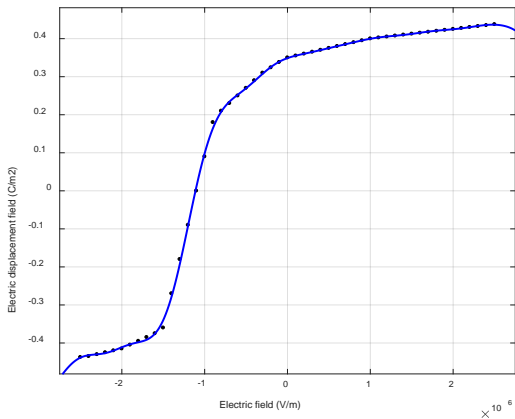
$$V(t) = 20000 \times \sin(\omega t)$$

(۵) که مجموع این دو ضابطه با هم حلقه هیستریزس را تشکیل می‌دهند.

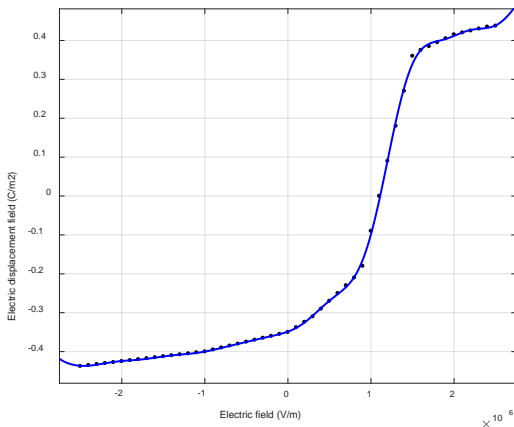
$$f_2(x) = \sum_{i=1}^8 a'_i \sin(b'_i x + c'_i) \quad (۵)$$



شکل (۳): حلقه هیستریزس با نقطه‌یابی



شکل (۴): ضابطه بالای حلقه هیستریزس و به‌دست آوردن آن با یک معادله از مجموع توابع سینوسی و کسینوسی



شکل (۵): ضابطه پایین حلقه هیستریزس و به‌دست آوردن آن با یک معادله از مجموع توابع سینوسی و کسینوسی

در این مرحله باید تابع مربوط به ضابطه بالا و پایین حلقه هیستریزس را به‌دست آورد و سپس کِرو آن را با معادله

عایقی ماده فروالکتریک را در نظر گرفته و توصیف کند. در ابتدا باید یک حلقه هیستریزس واقعی ماده فروالکتریک را در نظر گرفت و با استفاده از نقطه‌یابی، برازش منحنی کرد (شکل ۳) و سپس آن را به دو ضابطه تقسیم کرد تا بتوان تابع آن دو ضابطه را به‌دست آورد [۱۰-۱۳] و سپس آن توابع را وارد نرم‌افزار کرد و شبیه‌سازی را بر مبنای آن‌ها انجام داد. یکی ضابطه بالای حلقه هیستریزس یا جائیکه مشتق ولتاژ یا شدت میدان منفی می‌شود و به‌صورت رابطه (۴) است (شکل ۴). در جدول (۱) ضرایب ضابطه بالای حلقه هیستریزس و در جدول (۲) ضرایب ضابطه پایس، حلقه هیستریزس آورده شده است.

$$f(x) = \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (۷)$$

جدول (۱): ضرایب ضابطه بالای حلقه هیستریزس (رابطه ۴)

ضرایب	اعداد	ضرایب	اعداد
a_1	۰٫۰۹۴۶	a_5	۰٫۰۲۵۲۷
b_1	$۱٫۴۷۶ \times 10^{-10}$	b_5	$۴٫۹۱۱ \times 10^{-10}$
c_1	۲٫۰۹۴	c_5	۰٫۰۰۲۱۵۶
a_2	۰٫۵۰۲۸	a_6	۰٫۰۱۳۳۲
b_2	$۶٫۲۵۸ \times 10^{-10}$	b_6	$۶٫۴۹ \times 10^{-10}$
c_2	۰٫۵۵۸۱	c_6	۱٫۳۵۴
a_3	۰٫۰۶۰۴۸	a_7	۰٫۰۰۸۸۱۳
b_3	$۲٫۵۰۹ \times 10^{-10}$	b_7	$۷٫۷۸۳ \times 10^{-10}$
c_3	۲٫۶۱۶	c_7	۲٫۷۶۵
a_4	۰٫۰۴۵۸۶	a_8	۰٫۰۰۴۱۳۴
b_4	$۳٫۷۵۳ \times 10^{-10}$	b_8	$۸٫۶۱۸ \times 10^{-10}$
c_4	-۱٫۹۹۴	c_8	-۱٫۴۷۲

جدول (۲): ضرایب ضابطه پایین حلقه هیستریزس (رابطه ۵)

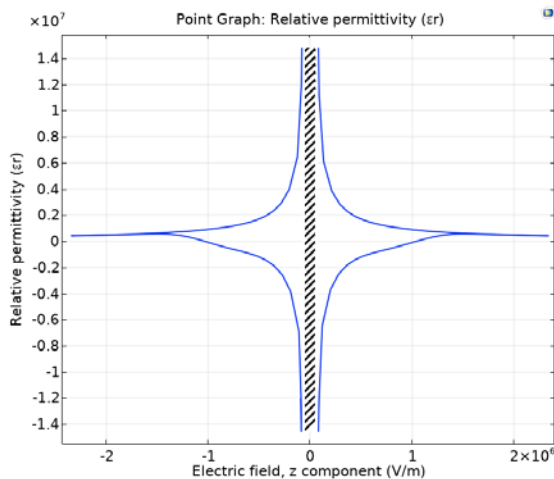
ضرایب	اعداد	ضرایب	اعداد
a'_1	۰٫۰۹۴۶	a'_5	۰٫۰۲۵۲۷
b'_1	$۱٫۴۷۶ \times 10^{-10}$	b'_5	$۴٫۹۱۱ \times 10^{-10}$
c'_1	-۲٫۰۹۴	c'_5	-۰٫۰۰۲۱۵۶
a'_2	۰٫۵۰۲۸	a'_6	۰٫۰۱۳۳۲
b'_2	$۶٫۲۵۸ \times 10^{-10}$	b'_6	$۶٫۴۹ \times 10^{-10}$
c'_2	-۰٫۵۵۸۱	c'_6	-۱٫۳۵۴
a'_3	۰٫۰۶۰۴۸	a'_7	۰٫۰۰۸۸۱۳
b'_3	$۲٫۵۰۹ \times 10^{-10}$	b'_7	$۷٫۷۸۳ \times 10^{-10}$
c'_3	-۲٫۶۱۶	c'_7	-۲٫۷۶۵
a'_4	۰٫۰۴۵۸۶	a'_8	۰٫۰۰۴۱۳۴
b'_4	$۳٫۷۵۳ \times 10^{-10}$	b'_8	$۸٫۶۱۸ \times 10^{-10}$
c'_4	۱٫۹۹۴	c'_8	۱٫۴۷۲

دیگری ضابطه پایین حلقه هیستریزس یا جائیکه مشتق ولتاژ یا شدت میدان مثبت می‌شود و به‌صورت رابطه (۵) می‌باشد (شکل

ضریب گذردهی خلأ، $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ می‌باشد، بر همین اساس می‌توان ثابت دی‌الکتریک را نیز به دست آورد که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد.

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \rightarrow \epsilon_r = \frac{D}{\epsilon_0 E} \quad (۸)$$

به همین ترتیب نمودار ثابت دی‌الکتریک بر حسب شدت میدان به دست می‌آید (شکل ۷).



شکل (۷): نمودار ثابت دی‌الکتریک بر حسب شدت میدان

۲-۵. مش‌بندی خازن فشار قوی و مکعب اطراف آن

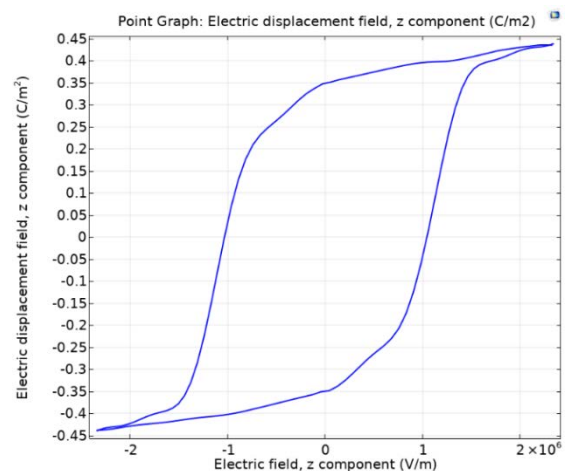
قبل از مرحله RUN شبیه‌سازی باید به مش‌بندی خازن و مکعب اطراف آن که از جنس روغن می‌باشد، پرداخت و با توجه به اینکه در روش اجزاء محدود کل مدل هندسی به اجزاء ریزتری با نام المان یا مش تقسیم‌بندی می‌شود و تحلیل بر اساس المان‌های قرار گرفته بر روی مدل انجام می‌شود، بنابراین روش اجزای محدود بر اساس مش‌بندی انجام می‌شود که در اینجا ناحیه حل چند نوع مش‌بندی دارد. بر این اساس باید در نواحی‌ای که نقاط نوک تیز وجود دارد به عنوان مثال گوشه‌های خازن از مش‌بندی ریز استفاده کرد تا هم محاسبات دقیق تر انجام شود و هم جواب به دست آمده به حل نهایی نزدیک‌تر باشد، و در نواحی‌ای که نقاط نوک تیز وجود ندارد، می‌توان از مش‌بندی درشت‌تر استفاده کرد که مش‌بندی خازن مورد نظر با توجه به ابعاد و اهمیت آن ریز (شکل ۸) و مش‌بندی مکعب از جنس روغن (شکل ۹) در اطراف خازن مورد نظر با توجه به ابعاد و درجه اهمیت درشت‌تر از مش‌بندی خازن می‌باشد و به این صورت مش‌بندی آن‌ها در نظر گرفته شده است.

Sum of Sine درجه ۸ انجام داد، سپس تابع آن را تحت متغیر D وارد نرم‌افزار کرد و مراحل شبیه‌سازی را بر این اساس انجام داد که معادله آن به صورت رابطه (۶) می‌باشد (شکل ۶).

$$E = 125 \times V_1$$

$$D = \sum_{i=1}^8 a_i \sin(b_i x + (-1)^n c_i) \quad (۶)$$

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} > 0 & n = 2 \\ \frac{dV}{dt} < 0 & n = 1 \end{cases}$$



شکل (۶): نمودار حلقه هیستریزس با نرم‌افزار

نکته ای که در اینجا باید به آن توجه شود این است که برای اینکه در این قسمت بتوان دو تابع را هم‌زمان کنار هم داشت، باید به صورت زیر عمل کرد.

تابع ضابطه بالا و پایین حلقه هیستریزس از نظر ضرایبشان دقیقاً با هم برابر هستند ولی ضرایب دقیقاً قرینه و عکس یکدیگرند. به همین منظور باید یک متغیر به نام n به صورت زیر تعریف کرد، که n دو حالت دارد (و عبارت $(-1)^n$ را در معادله D ، قبل از ضرایب قرار داد).

حالت اول: اگر مشتق ولتاژ مثبت بود، $n=2$ می‌شود که ضابطه بالای حلقه هیستریزس را می‌سازد.

حالت دوم: اگر مشتق ولتاژ منفی بود، $n=1$ می‌شود که ضابطه پایین حلقه هیستریزس را می‌سازد و رابطه شرطی آن به صورت زیر است.

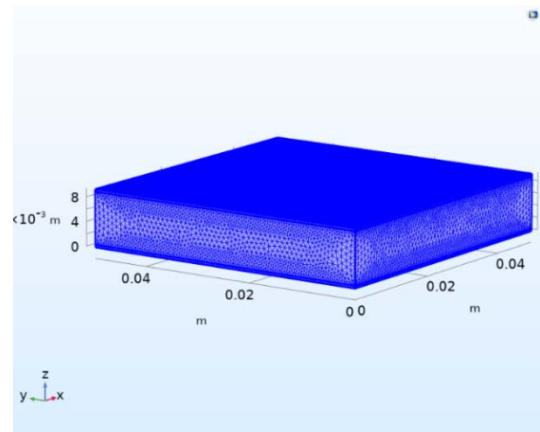
$$n = \text{if} \left(\frac{dV_1}{dt} \geq 0, (2), (1) \right) \quad (1)$$

در ادامه باید تمامی متغیرها را وارد نرم‌افزار کرد، در واقع هم متغیر D و هم متغیر E در اینجا وجود دارد و با توجه به اینکه

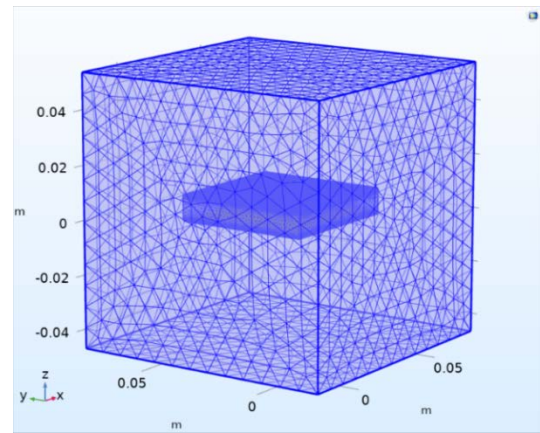
$$g_1(x) = \sum_{i=1}^7 a_i e^{-(\frac{x-b_i}{c_i})^2} \quad (9)$$

جدول (۳): ضرایب تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما (رابطه ۹)

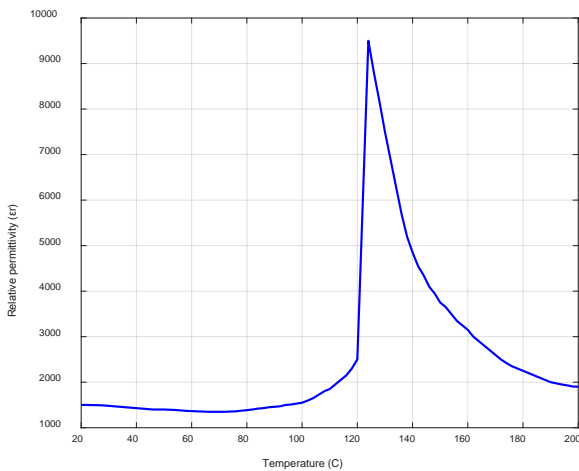
ضرایب	اعداد	ضرایب	اعداد
a_1	۴۳۷۴	c_4	۲۲٫۷
b_1	۱۲۳٫۷	a_5	$۵٫۷۲۹ \times 10^{-9}$
c_1	۲٫۱۱۳	b_5	-۱۱۹۹
a_2	۳۴۰٫۳	c_5	۳۰۱٫۲
b_2	۱۲۶٫۹	a_6	$۵٫۲۱ \times 10^{-4}$
c_2	۳٫۶۶۱	b_6	۲۰۲۸
a_3	۲۷۲۸	c_6	۱۰۱۹
b_3	۱۳۲٫۲	a_7	۰
c_3	۶٫۸۰۹	b_7	$-۷٫۵۱۳ \times 10^{-4}$
a_4	۲۳۶۷	c_7	۹۱۱۰
b_4	۱۴۲٫۶	—	—



شکل (۸): نحوه مش‌بندی خازن



شکل (۹): نحوه مش‌بندی مکعب از جنس روغن اطراف خازن



شکل (۱۰): نمودار ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما

در این مرحله باید تابع به‌دست آمده ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را در قسمت شبیه‌سازی در نرم‌افزار اعمال کرد، به این منظور باید در تابع هیستریزس که قبلاً در نرم‌افزار تعریف شده بود یعنی رابطه D تابع دمای به‌دست آمده یعنی $(an1(T))$ را ضرب کرد که در این حالت اثرات معادله ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در قالب افزایش اعداد محور D یا همان جابجایی میدان الکتریکی نسبت به محور E یا شدت میدان الکتریکی، بر روی حلقه هیستریزس و همچنین افزایش اعداد محور ثابت دی‌الکتریک نسبت به شدت میدان الکتریکی مشاهده می‌شود که خروجی آن به ترتیب به‌صورت اشکال زیر می‌شود (شکل ۱۱ و ۱۲).

۳. شبیه‌سازی

در این بخش باید اثر دما را بر روی ضریب گذردهی نسبی و همچنین بر روی ضریب تلفات عایقی بررسی کرد.

۳-۱. شبیه‌سازی عدد گذردهی نسبی بر حسب دما، به‌صورت عبارت $(an1(T))$ در نرم‌افزار

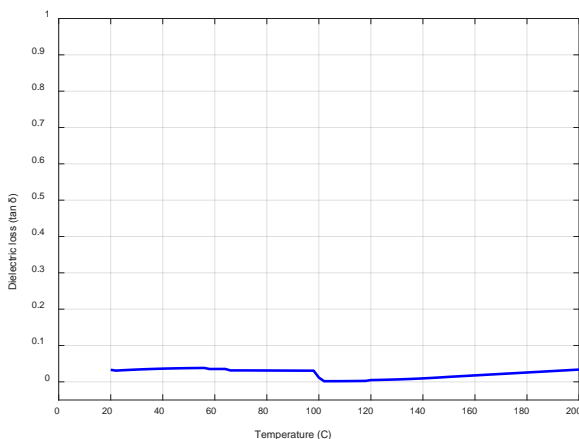
در این قسمت باید ابتدا نمودار ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را از مرجع [۱۴] که در مورد مواد فروالکتریک می‌باشد استخراج کرده و آن را در نرم‌افزار متلب با استفاده از نقطه‌یابی برازش منحنی کرد تا بتوان تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را با دستور `cftool` در متلب به‌دست آورد و سپس تابع مربوطه را وارد نرم‌افزار کرد و شبیه‌سازی را بر مبنای آن‌ها انجام داد. به این منظور باید در نرم‌افزار متلب با دستور `plot(T,ep)` نمودار ایجاد شده ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را مشاهده کرد و زمانی که از صحت کار اطمینان حاصل شد با دستور `cftool` تابع مربوط به منحنی ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را توسط معادله Gaussian درجه ۷، `کرو` نمود که رابطه آن به‌صورت عبارت زیر می‌باشد (شکل ۱۰) [۱۷-۱۵]. در جدول (۳) ضرایب تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما آورده شده است.

کار اطمینان حاصل شد با دستور cftool تابع مربوط به منحنی ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را توسط معادله Gaussian درجه ۸، کُرو نمود که رابطه آن به صورت عبارت زیر می‌باشد (شکل ۱۲).

$$g_2(x) = \sum_{i=1}^8 a'_i e^{-\left(\frac{x-b'_i}{c'_i}\right)^2}$$

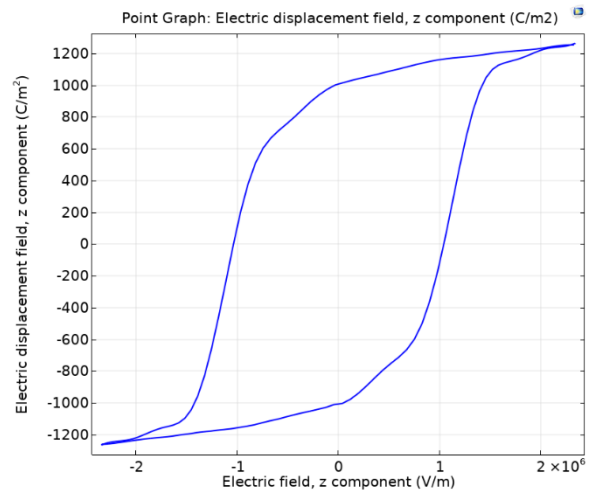
جدول (۴): ضرایب تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما (رابطه ۱۰)

ضرایب	اعداد	ضرایب	اعداد
a'_1	۰٫۰۲۵۵۷	a'_5	۰٫۰۲۲۴۶
b'_1	۶۳٫۴	b'_5	۸۴٫۰۳
c'_1	۱۸٫۳	c'_5	۱۰٫۸
a'_2	۰٫۰۲۹۰۲	a'_6	۰٫۰۱۷۰۶
b'_2	۳۷٫۲۹	b'_6	۹۳٫۳۲
c'_2	۲۳٫۱	c'_6	۴٫۹۴۹
a'_3	۰٫۰۱۰۸۹	a'_7	۰٫۰۱۸۳۲
b'_3	۲۱۷	b'_7	۹۷٫۶۲
c'_3	۲۲٫۲۲	c'_7	۲
a'_4	۵۴٫۹۹	a'_8	۰٫۰۲۷۶۸
b'_4	-۱۷۷٫۲	b'_8	۱۹۷٫۱
c'_4	۶۸٫۹۱	c'_8	۵۵٫۲۱

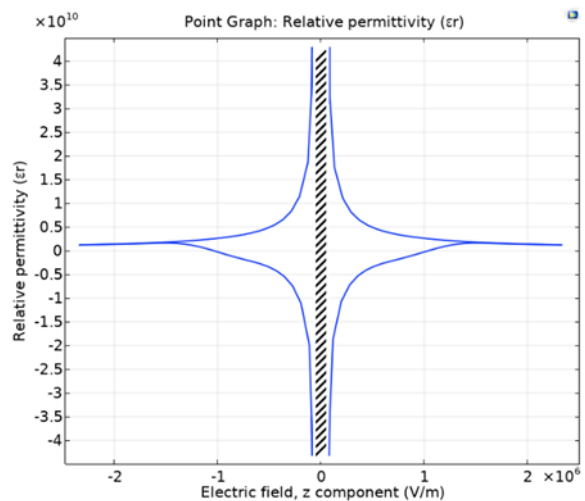


شکل (۱۲): نمودار ضریب تلفات عایقی بر حسب دما

در این مرحله باید تابع به دست آمده ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را در شبیه‌سازی در نرم‌افزار اعمال کرد، نکته مهمی که در اینجا باید به آن توجه شود این است که با توجه به اینکه ماده عایقی مورد نظر، ماده باریم تیتانات می‌باشد و هدایت الکتریکی آن در حال تغییر می‌باشد و با توجه به اینکه ضریب تلفات عایقی با فرکانس نسبت دارد و فرکانس نیز در این طرح ثابت در نظر گرفته شده است، پس ضریب تلفات عایقی با هدایت الکتریکی مدل می‌شود و ضریب تلفات عایقی کاری به ثابت دی‌الکتریک و معادلات و متغیرهای مربوط به آن ندارد و در واقع



شکل (۱۱): نمودار حلقه هیستریزس در نرم‌افزار پس از اعمال تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در معادله اصلی شبیه‌سازی (رابطه D)

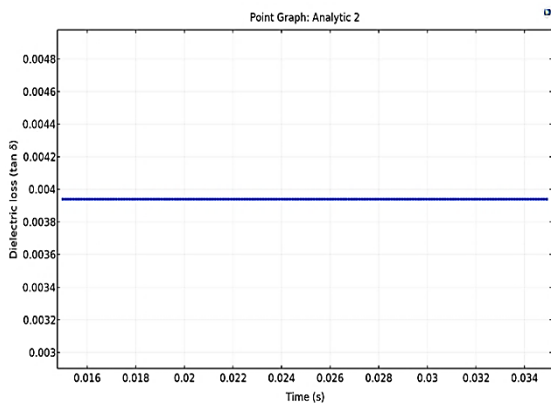


شکل (۱۲): نمودار ثابت دی‌الکتریک بر حسب شدت میدان الکتریکی در نرم‌افزار پس از اعمال تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در معادله اصلی شبیه‌سازی (رابطه D)

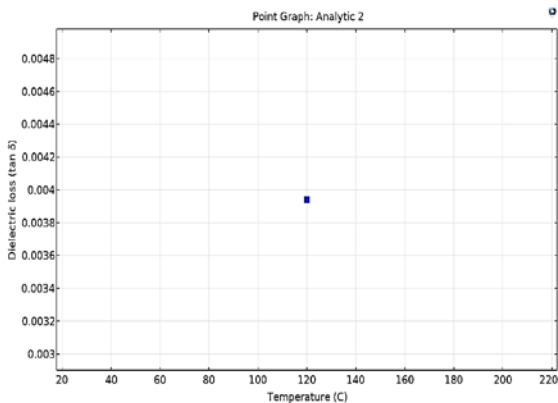
۳-۲. شبیه‌سازی ضریب تلفات عایقی بر حسب دما، به صورت عبارت (T, \tan^2) در نرم‌افزار

در این قسمت باید ابتدا نمودار ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را از مرجع [۱۴] که در مورد مواد فروالکتریک می‌باشد استخراج کرده و آن را با استفاده از نقطه‌یابی برازش منحنی کرده تا بتوان تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را با دستور cftool در نرم‌افزار متلب به دست آورد و سپس تابع مربوطه را وارد نرم‌افزار کرد و شبیه‌سازی را بر مبنای آن‌ها انجام داد. به این منظور باید در نرم‌افزار متلب با دستور $\text{plot}(T, \tan)$ نمودار ایجاد شده ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را مشاهده کرد و زمانی که از صحت

حسب دما، در اینجا نیز پس از اعمال تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما در نرم افزار در قسمت رسانش ماده یا همان Electrical conductivity، از آنجایی که ضریب تلفات عایقی عکس رسانش الکتریکی ماده است آن را به صورت معکوس $(1/\text{an}2(T))$ در قسمت رسانش الکتریکی ماده باریم تیتانات در نرم‌افزار وارد کرده و می‌توان نتایج ضریب تلفات عایقی بر حسب دما را در زمان شبیه‌سازی یا t (بر حسب زمان $(\text{an}2(T) / t)$) و همچنین بر حسب هر دمای دلخواه که در محدوده دمای شبیه‌سازی یعنی دماهای بین ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد مشاهده کرد، در اینجا نتایج تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما، در دمای دلخواه $T=120$ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود $(\text{an}2(T) / T)$ که به صورت یک عدد (نقطه) نشان داده شده است و به صورت اشکال زیر می‌باشد (شکل ۱۵ و ۱۶). لازم به ذکر است که این مقادیر برای دماهای متفاوت نیز در جدول (۶) آورده شده است.



شکل (۱۵): نتیجه شبیه‌سازی تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما در نرم‌افزار، در زمان های متفاوت شبیه‌سازی (زمان t)

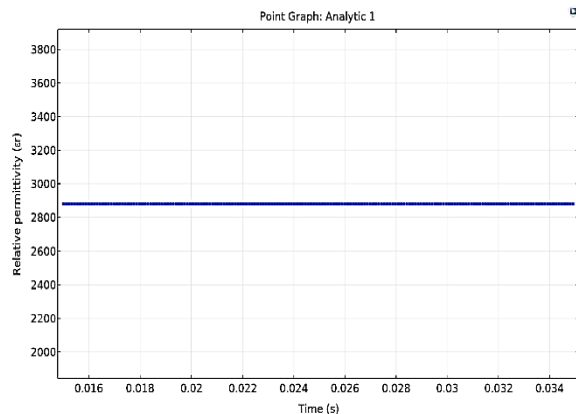


شکل (۱۶): نتیجه شبیه‌سازی تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما در نرم‌افزار، بر حسب دمای دلخواه ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد

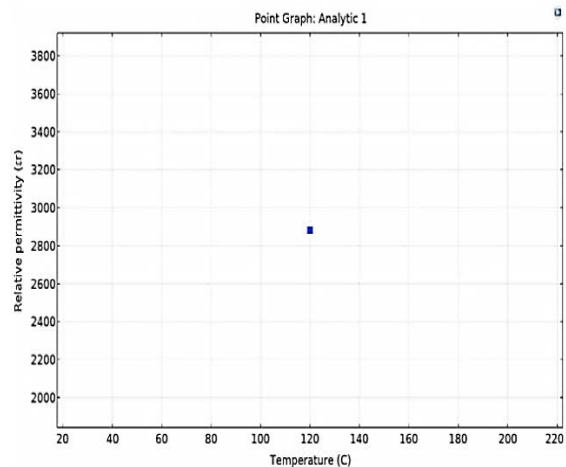
در اینجا مقادیر ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما و ضریب تلفات عایقی بر حسب دما برای دماهای متفاوت در جداول (۵) و (۶) آورده شده‌اند.

تابع ضریب تلفات عایقی بر حسب دما به صورت معکوس در نرم‌افزار در قسمت رسانش ماده یا همان Electrical conductivity قرار خواهد گرفت و رابطه آن به صورت $(1/\text{an}2(T))$ می‌باشد.

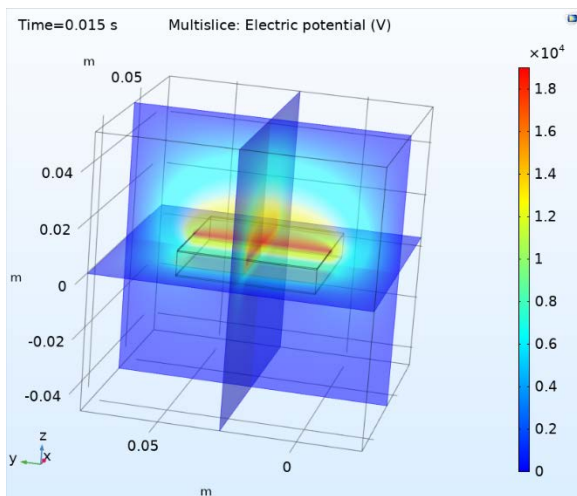
همچنین پس از اعمال تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در معادله اصلی شبیه‌سازی (معادله D)، می‌توان نتایج ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما را در زمان شبیه‌سازی یا t (بر حسب زمان $(\text{an}1(T) / t)$) و همچنین بر حسب هر دمای دلخواه که در محدوده دمای شبیه‌سازی یعنی دماهای بین ۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار دارد مشاهده کرد، در اینجا نتایج تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما، در دمای دلخواه $T=120$ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود $(\text{an}1(T) / T)$ که به صورت یک عدد (نقطه) نشان داده شده است و به صورت اشکال زیر می‌باشد (شکل ۱۳ و ۱۴). لازم به ذکر است که این مقادیر برای دماهای متفاوت نیز در جدول (۵) آورده شده است.



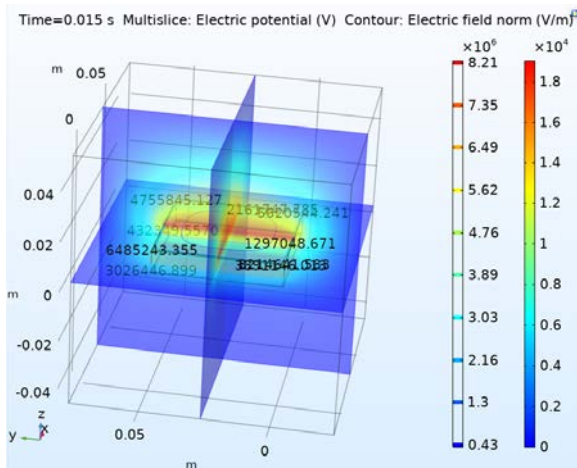
شکل (۱۳): نتیجه شبیه‌سازی تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در نرم‌افزار، در زمان های متفاوت شبیه‌سازی (زمان t)



شکل (۱۴): نتیجه شبیه‌سازی تابع ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در نرم‌افزار، بر حسب دمای دلخواه ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد همانند توضیحات گفته‌شده برای تابع ثابت دی‌الکتریک بر



شکل (۱۷): نمایش اختلاف پتانسیل الکتریکی در راستای محور Z برای خازن شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار



شکل (۱۸): تغییرات ولتاژ و میدان خازن شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار

۴. نتیجه‌گیری

انجام این پژوهش به منظور امکان‌سنجی استفاده صنعتی از خازن‌های فشار قوی با عایق‌های جامد، نوع سرامیکی فروالکتریک باریم تیتانات صورت گرفته است. مطالعه و مدل‌سازی کامل مشخصات الکتریکی و رفتار به شدت غیرخطی آن‌ها به عنوان ماده عایقی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق می‌باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته رفتار پیچیده مبتنی بر مشخصات مولکول‌های عایق باریم تیتانات مانند استخراج و مدل‌سازی نمودار عایقی که به شدت وابسته به دما و شدت میدان الکتریکی می‌باشد با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود به صورت موفقیت‌آمیز و بر اساس نمودارهای واقعی ماده فروالکتریک صورت گرفته است. ثابت دی‌الکتریک ماده باریم تیتانات ساختار هیستریزس ماندی را در ولتاژ AC ایجاد می‌کند که استفاده از خازن مذکور در ولتاژهای AC را با چالش مواجه خواهد ساخت،

جدول (۵): مقادیر ثابت دی‌الکتریک بر حسب دما در نرم‌افزار

ثابت دی‌الکتریک	دما (درجه سانتی‌گراد)	ثابت دی‌الکتریک	دما (درجه سانتی‌گراد)
۲۳۵۹	۲۰	۱۵۱۳	۱۱۸
۲۸۸۰	۲۸	۱۴۶۲	۱۲۰
۵۷۸۶	۳۶	۱۴۲۷	۱۲۲
۹۵۶۴	۴۴	۱۴۰۸	۱۲۴
۸۷۳۹	۵۲	۱۳۹۷	۱۲۶
۸۲۴۰	۶۰	۱۳۹۸	۱۲۸
۵۲۷۸	۶۸	۱۴۰۷	۱۳۸
۳۸۸۷	۷۶	۱۴۲۳	۱۵۰
۳۱۳۲	۸۴	۱۴۴۷	۱۶۰
۲۴۳۲	۹۲	۱۴۸۶	۱۷۰
۲۱۰۴	۱۰۰	۱۵۷۰	۱۸۰
۲۰۴۶	۱۰۸	۱۷۶۶	۱۹۰
۲۰۹۲	۱۱۶	۲۱۸۰	۲۰۰

جدول (۶): مقادیر ضریب تلفات عایقی بر حسب دما در نرم‌افزار

ضریب تلفات عایقی	دما (درجه سانتی‌گراد)	ضریب تلفات عایقی	دما (درجه سانتی‌گراد)
۰٫۰۰۳۵	۲۰	۰٫۰۳۱۹	۱۱۸
۰٫۰۰۳۹	۲۸	۰٫۰۳۳۱	۱۲۰
۰٫۰۰۴۳۵	۳۶	۰٫۰۳۵۴	۱۲۲
۰٫۰۰۴۸	۴۴	۰٫۰۳۶۹	۱۲۴
۰٫۰۰۵۲	۵۲	۰٫۰۳۷۵	۱۲۶
۰٫۰۰۵۷۷	۶۰	۰٫۰۳۶۳	۱۲۸
۰٫۰۰۸۸	۶۸	۰٫۰۳۱۷	۱۳۸
۰٫۰۱۳۳	۷۶	۰٫۰۳۰۸	۱۵۰
۰٫۰۱۷۶	۸۴	۰٫۰۳۱۰	۱۶۰
۰٫۰۲۱۸	۹۲	۰٫۰۳۲	۱۷۰
۰٫۰۲۵۸	۱۰۰	۰٫۰۱۱۴	۱۸۰
۰٫۰۲۹۷	۱۰۸	۰٫۰۰۲۲	۱۹۰
۰٫۰۳۳۶	۱۱۶	۰٫۰۰۳۲	۲۰۰

در این مرحله نتیجه نهایی شبیه‌سازی نشان داده شده است. در واقع نمایش شدت میدان و اختلاف پتانسیل الکتریکی که روی صفحات خازن است، در راستای محور Z در زمان $t = 0.015$ s نشان داده شده است. شکل (۱۷) نمایش اختلاف پتانسیل در راستای محور Z را نشان می‌دهد که به صورت هاله‌ای از نور آبی‌رنگ می‌باشد و شکل (۱۸) تغییرات ولتاژ و میدان خازن را به صورت هم‌زمان نشان می‌دهد.

- [9] A. López, A. De Andrés, and P. Ramos, "Finite Element Model of a Ferroelectric," COMSOL Conference, pp. 1-5, 2010.
- [10] Kyunam Lim, Kyuhyon Kim, Songcheol Hong, and Kywro Lee, "A semi-empirical cad model of ferroelectric capacitor for circuit simulation," Integrated ferroelectrics, vol. 17, pp. 97-104, 1997.
- [11] Baraskar, Bharat & Kakade, Sandip & James, A. & Kambale, Rahul & Kolekar, Y.. (2016). Improved ferroelectric, piezoelectric and electrostrictive properties of dense BaTiO₃ ceramic. 1731. 140066. 10.1063/1.4948232.
- [12] Tan, Yongqiang & Zhang, J. & Wu, Yanqing & Wang, Chunlei & Koval, Vladimir & Shi, Baogui & Ye, Haitao & Mckinnon, Ruth & Viola, Giuseppe & Yan, HAIXUE. (2015). Unfolding Grain Size Effects in Barium Titanate Ferroelectric Ceramics. Scientific Reports. 5. 9953. 10.1038/srep09953.
- [13] J.F. Scott, F.M. Ross, C.A. Paz de Araujo, M.C. Scott and M. Huffman; "Structure and device characteristics of SrBi₂Ta₂O₉ based nonvolatile random-access memories"; Mrs Bulletin; 33-39 (julio 1996).
- [14] F. Maxim, D. Berger, F. Teodorescu, C. Hornoiu, C. Lete, S. Tanasescu, Low-temperature synthesis and thermodynamic and electrical properties of barium titanate nanorods, J. Nanomater. 2015 (2015). <https://doi.org/10.1155/2015/827641>.
- [15] Marjanovic, Milos & Dimitrijevic, Dragana & Paunovic, Vesna & Prijic, Zoran. (2014). Microstructural and dielectrical characterization of Ho doped BaTiO₃ ceramics. Serbian Journal of Electrical Engineering. 11. 35-46. 10.2298/SJEE131129004M.
- [16] Deluca, Marco & Al-Jlaihawi, Zaid & Reichmann, Klaus & Bell, Anthony & Feteira, Antonio. (2018). Remarkable impact of low BiYbO₃ doping levels on the local structure and phase transitions of BaTiO₃. Journal of Materials Chemistry A. 6. 10.1039/C7TA11096K.
- [17] Zemouli, Sabah & Chaabi, Abdelhafid & Talbi, Houcine. (2015). Design of a Compact and High Sensitivity Temperature Sensor Using Metamaterial. International Journal of Antennas and Propagation. 2015. 1-7. 10.1155/2015/301358.

ولی در صورت وجود دمای ثابت می‌توان از خازن مذکور جهت ولتاژهای DC و ذخیره‌سازی انرژی و همچنین به‌عنوان خازن‌های مورد استفاده در مبدل‌های الکترونیک صنعتی با ظرفیت بالا استفاده کرد.

۵. مراجع

- [1] Ashim Kumar Bain and Prem_Chand, "Ferroelectrics: Principles and Applications," pp. 1-328, 2017.
- [2] Sergey I. Shkuratov, Jason Baird, Vladimir G. Antipov, Evgueni F. Talantsev, Allen H. Stults, Larry L. Alt, "High voltage generation with transversely shock compressed ferroelectrics: Thickness dependent law for breakdown Field," IEEE Pulsed Power Conference (PPC), pp.1-6, 15 October 2015.
- [3] Alexander Sidorkin, Lolita Nesterenko, Yaovi Gagou, Pierre Saint-Gregoire, Eugeny Vorotnikov, and Nadezhda Popravko, "Dielectric Properties and Switching Processes of Barium Titanate-Barium Zirconate Ferroelectric Superlattices," journal, pp.1-11, 14 August 2018.
- [4] Prateek, Vijay Kumar Thakur, and Raju Kumar Gupta, "Recent Progress on Ferroelectric Polymer-Based Nanocomposites for High Energy Density Capacitors: Synthesis, Dielectric Properties, and Future Aspects," pp. 1-58, 4 April 2016.
- [5] Thibaut Meurisse and Dragan Damjanovic, "Modeling losses of a piezoelectric resonator: Analytical vs finite elements analysis," IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF), pp.1-4, 03 August 2017.
- [6] Burcu Ertuğ, "The Overview of The Electrical Properties of Barium Titanate," American Journal of Engineering Research (AJER), pp.1-7, 2013.
- [7] FaxinLi and DainingFang, "Simulations of domain switching in ferroelectrics by a three-dimensional finite element model," Elsevier Ltd. All rights reserved, pp. 959-973, October 2004.
- [8] SeaFue Wang and Gordon O. Dayton, "Dielectric Properties of Fine-Grained Barium Titanate Based X7R Materials," pp. 2677-2682, October 1999.