



Semnan University



Research Article

Simulation and Analysis of the Electrodes Shape Effect on the Arc Energy and Electric Field in Multi-Chamber Arresters

Kimiya Silakhori ^a, Mohammad Mirzaie ^{a,*}, Iraj Ahmadi ^b

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

^b Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-03-07

Revised: 2024-07-27

Accepted: 2024-09-22

Keywords:

Multi-chamber arrester;

Electrode shape;

Electric arc plasma;

Arc electric field;

Arc energy flux.

ABSTRACT

In electrical networks, in order to protect against lightning overvoltages, the presence of surge arresters is essential. In recent years, Streamer Company has introduced a new generation of arresters known as smart arresters or multi-chamber arresters (MCA) equipped with an arc extinguishing system. These arresters are usually used in the 3-35 kV voltage range and to protect medium voltage networks. Since in these arresters, the discharge of electric arc occurs in the air, there is no need to an independent ground system. In this paper, in order to study the electric field and electric arc energy, two-dimensional modeling of a 20 kV MCA has been performed using the finite element method. In the simulation process, in order to more accurately evaluate the behavior of the electric arc plasma in the discharge chamber, the theory of magneto-hydrodynamic (MHD) is considered. Also, two important operational parameters, including electric field and electric arc energy flux, have been investigated by considering of decisive role in the process of electric arc discharge and the performance of this arrester. Therefore, according to different shapes of electrodes (spherical, cylindrical and conical), necessary studies have been done on these parameters. According to the simulations results, in arresters with conical electrodes, the maximum arc electric field inside the discharge chamber and the arc energy flux in the opening of the discharge chamber are more than other models, and therefore the arrester will have a better and faster performance from a technical point of view.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33467.2634>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding Author.

E-mail address: mirzaie@nit.ac.ir

How to cite this article:

K. silakhori , M. mirzaie and I. Ahmadi, "Simulation and Analysis of the Electrodes Shape Effect on the Arc Energy and Electric Field in Multi-Chamber Arresters," Journal of Modeling in Engineering, 23 Special Issue 81 (2025): 19-32, doi: 10.22075/jme.2024.33467.2634

شبیه سازی و تحلیل تاثیر شکل الکترودها بر انرژی و میدان الکتریکی قوس در برقیهای چند محفظه ای

کیمیا سیلاخوری^۱، محمد میرزایی^{۱*}، ایرج احمدی^۲ 

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷	در شبکه‌های الکتریکی به منظور حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه، حضور برقیهای امری ضروری است. در سالهای اخیر، شرکت استریمر، نسل جدیدی از برقیهای را تحت عنوان برقیهای هوشمند یا برقیهای چند محفظه‌ای ^۲ (MCA) مجهز به سیستم خاموش کننده قوس، معرفی نموده است. این برقیها معمولاً در رده ولتاژ ۳-۳۵ کیلوولت و به منظور حفاظت از شبکه های فشار متوسط کاربرد دارند. از آنجاییکه در این برقیها، تخلیه قوس الکتریکی در هوا صورت می‌گیرد لذا نیازی به سیستم زمین مستقل وجود ندارد. در این مقاله با استفاده از روش اجزا محدود، مدلسازی دو بعدی از یک محفظه‌ی برقی چند محفظه‌ای ۲۰ کیلوولت، به منظور مطالعات میدان الکتریکی و انرژی قوس الکتریکی، انجام شده است. در فرآیند شبیه‌سازی، به منظور ارزیابی دقیق‌تر از رفتار پلاسمای قوس الکتریکی در محفظه تخلیه، تئوری هیدرودینامیک مغناطیسی ^۳ (MHD) در نظر گرفته شده است. همچنین دو پارامتر مهم کاری، از جمله میدان الکتریکی و شار انرژی قوس الکتریکی، با توجه به نقش مهم و تعیین کننده آنها در فرآیند تخلیه قوس الکتریکی و عملکرد این نوع برقی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. از اینرو حسب شکل‌های مختلفی از الکترودها (کروی، استوانه‌ای و مخروطی) مطالعات لازم بر روی این پارامترها انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، در برقیهای با الکترودها مخروطی، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و شار انرژی قوس در دهانه محفظه تخلیه نسبت به سایر مدل‌ها، بیشتر بوده و لذا برقی از لحاظ فنی عملکرد بهتر و سریع‌تری خواهد داشت.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	
واژگان کلیدی: برقی چند محفظه ای، شکل الکترودها، پلاسمای قوس الکتریکی، میدان الکتریکی قوس، شار انرژی قوس.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.33467.2634>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه
 یکی از عوامل مهم بروز تخلیه‌های الکتریکی و خطاهای ناشی از آنها در سیستم های قدرت و خطوط توزیع هوایی، برخورد مستقیم و یا غیرمستقیم صاعقه می‌باشد. این خطاها می‌توانند منجر به قطعی‌های موقت و یا دائمی در شبکه

قدرت گردند. استفاده از برقیهای مناسب در خطوط توزیع هوایی به عنوان یکی از راهکارهای مناسب جهت بهبود عملکرد شبکه در برابر برخورد صاعقه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه مورد نظر است. از گذشته تاکنون، استفاده از برقیهای معمولی مانند برقیهای اکسید

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mirzaie@nit.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

² Multi chamber arrester

³ Magneto-hydrodynamic

استناد به این مقاله:

کیمیا سیلاخوری، محمد میرزایی و ایرج احمدی، "شبیه سازی و تحلیل تاثیر شکل الکترودها بر انرژی و میدان الکتریکی قوس در برقیهای چند محفظه ای"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ شماره ویژه ۸۱ (۱۴۰۴): ۱۹-۳۲، doi: ۱۰.۲۲۰۷۵/jme.۲۰۲۴.۳۳۴۶۷.۲۶۳۴

بررسی و مطالعه همه جانبه پارامترهای تاثیرگذار بر روی عملکرد برقگیر چند محفظه ای در شبکه، بستری مناسب به منظور دستیابی به نتایج مطلوب تری فراهم می‌گردد. در سایر مطالعات، عملکرد این برقگیرها به منظور ارزیابی رفتار قوس الکتریکی در محفظه‌های تخلیه انجام گردیده است. در [۱۱] مطالعاتی بر روی پارامترهای دینامیکی قوس از جمله فشار قوس، دمای قوس، سرعت قوس و ... انجام شده است. همچنین فرآیند حرکت دینامیکی قوس الکتریکی و روند تخلیه، مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مطالعات بر روی تخلیه قوس الکتریکی، نیازمند آگاهی از فشار و دمای قوس و بستگی آن به ویژگی های فیزیکی-حرارتی از پلاسمای قوس می‌باشد. این پارامترها شامل هدایت حرارتی، ضریب ویسکوزیته، دمای ویژه و هدایت الکتریکی قوس می‌باشند [۱۲-۱۴]. از طرفی انرژی قوس تشکیل شده در حالت ضربه صاعقه می‌تواند یک شارش هوای پرفشار با سرعت بالایی ایجاد کند که خود نیز موجب تخلیه و خاموش شدن قوس می‌گردد. در واقع انرژی قوس حاصل از ضربه، تبدیل به انرژی موج فشرده شده و به خاموش شدن قوس کمک می‌کند [۱۵]. در [۱۶] نیز مطالعات دما و فشار بر روی برقگیرهای چند محفظه ای انجام شده است. همچنین مسیر حرکت قوس و مشخصه های آن در درون و بیرون محفظه تخلیه، تحت تاثیر پارامترهای ساختاری، بررسی گردیده است.

در دیگر مطالعات، برقگیرهای چند محفظه‌ای از نگاه ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عبارتی اثر تغییر برخی مشخصه‌های ساختاری برقگیر مانند ابعاد و شکل محفظه تخلیه و فاصله بین الکترودها بر روی پارامترهای دینامیکی قوس الکتریکی بررسی شده است [۱۳ و ۱۷]. همچنین در [۱۸-۲۱]، مدل‌های دیگری از انواع برقگیرهای چند محفظه ای با ساختارهای متفاوت از لحاظ شکل (حلقه ای شکل، دیسکی شکل و طرح فشرده مارپیچی سری) و طرح الکترودها (میله ای و لوله ای با حفره) مورد مطالعه قرار گرفته است. هر یک از این نوع برقگیرها به منظور کاربردهای خاصی و برای خطوط انتقال هوایی در سطوح ولتاژ مختلف کاربرد دارند.

در [۱۵] طرحی دیگر از برقگیر چند محفظه ای تحت عنوان برقگیر چند محفظه ای خاموش کننده قوس^۵ (MCAA)، برای خطوط ۱۰ کیلوولت شبیه سازی و مورد مطالعه

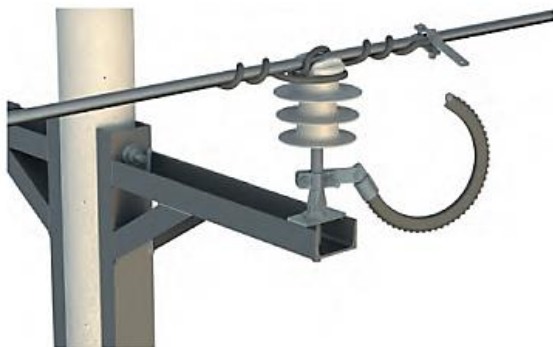
فلزی، کاربرد وسیعی در شبکه‌های توزیع داشته است. در این برقگیرها، انرژی موج اضافه ولتاژ از طریق برقگیر به زمین منتقل شده و افت ولتاژ ناشی از عبور جریان تخلیه برقگیر به یک مقدار معین (در حد سطح حفاظتی برقگیر و ولتاژ باقیمانده)، محدود می‌شود. علیرغم مزایایی که این نوع برقگیرها دارند قیمت بالای آنها به سبب وجود قرص‌ها یا ورستورهای فلزی، وجود جریان نشستی در فرکانس قدرت، تغییر مقاومت قرص‌ها در اثر افزایش دما، متاثر بودن آنها از مقاومت سیستم زمین مستقل، از جمله معایب آنها به شمار می‌رود [۲ و ۱]. لذا در سالهای اخیر، استفاده از تکنولوژی برقگیرهای هوشمند مجهز به سیستم چند محفظه‌ای، به سبب مزایایی که نسبت به برقگیرهای معمولی دارند به منظور کاهش خاموشی های ناشی از بروز صاعقه در خطوط توزیع، پیشنهاد شده است. از جمله مزایای این نوع برقگیرها می‌توان به عدم خاموشی شبکه، عملکرد سریع و اطفا قوس در کمتر از ۱۰ میلی ثانیه، سادگی ساختار و راحتی نصب و اجرا، عدم نیاز به سیستم زمین مستقل و طول عمر بالای آنها، اشاره نمود [۳-۶]. در [۷ و ۸] به منظور مقایسه عملکرد برقگیرهای چند محفظه ای با سایر مدل‌های برقگیر در خطوط هوایی، مطالعات شبیه‌سازی و آزمایشگاهی بر روی برقگیر چند محفظه‌ای و برقگیر قوس طولانی^۴ (LFA) انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است.

از طرفی هدف اصلی برقگیرهای چند محفظه‌ای، افزایش قابلیت اطمینان و بهینه سازی هزینه و زمان عملکرد به منظور رفع خطا و حفاظت در شبکه نیز می‌باشد. به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد برقگیرهای چند محفظه ای، مطالعات آزمایشگاهی مختلفی بر روی آنها انجام شده است. از مهمترین تست‌های اعمال شده بر روی این برقگیرها می‌توان به تست ولتاژ استقامت در برابر ضربه صاعقه و تست ولتاژ استقامت فرکانس قدرت تحت شرایط خشک اشاره نمود. همچنین به جهت ارزیابی آنها، تست های دیگری همچون تست ظرفیت تخلیه صاعقه، ارتعاش و ... نیز بر روی آنها انجام و عملکرد آنها در شرایط گوناگون بررسی شده است [۹ و ۴]. همچنین در سایر مطالعات، تست اثرات محیطی مانند آلودگی و مه نمکی بر روی برقگیرهای چند محفظه ای انجام شده است و نتایج حاصل از این تست ها بر روی این برقگیر با برقگیرهای اکسید فلزی تحت شرایط مشابه، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است [۱۰]. لذا با

⁵ Multi Chamber Arc-quenching Arrester

⁴ Long Flashover Arrester

شده در خط توزیع هوایی ۲۰ کیلوولت (به صورت موازی با مقره)، در شکل (۱) نشان داده شده است [۴].



شکل ۱- نمایی از برقگیر چند محفظه ای بر روی خط توزیع هوایی ۲۰ کیلوولت [۴].

ساختار این برقگیرها به گونه ای است که در طول بدنه ای آنها و بر روی فواصل هوایی بین الکترودها، روزنه یا شیارهای بسیار باریکی برای تخلیه گازها تعبیه شده است که به عنوان محفظه های تخلیه گاز عمل می کنند. مکانیزم عملکرد برقگیرهای چند محفظه ای تا حدودی مشابه با برقگیرهای شاخکی می باشد با این تفاوت که قوس در برقگیرهای شاخکی طولانی است [۲۴]. اما در برقگیرهای چند محفظه ای به علت وجود سیستم چند محفظه ای آنها، یک قوس بزرگ به چندین قوس کوچک تبدیل شده و تخلیه قوس در هوا صورت می پذیرد. در حقیقت در برقگیرهای چند محفظه ای، بخش اعظمی از انرژی قوس در هوا تخلیه شده و لذا نیازی به سیستم زمین موثر وجود ندارد [۴].

پس از برخورد ضربه صاعقه به این برقگیرها و با شکست عایقی هوا در درون محفظه های تخلیه، قوس الکتریکی ایجاد می شود. در هنگام تخلیه ای اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه از طریق محفظه های تخلیه برقگیر، هدایت الکتریکی در فواصل هوایی (ناشی از یونیزاسیون هوا) به شدت افزایش می یابد. لذا جریان صاعقه و در نتیجه انرژی موج، از طریق برقگیر تخلیه می گردد. با کاهش جریان و تخلیه انرژی موج گذرا و با اولین عبور جریان فرکانس قدرت از صفر، عملکرد خاموش کنندگی قوس توسط محفظه های برقگیر چند محفظه ای منجر به خاموش شدن قوس می شود. به عبارتی شرایط به حالت عادی خود باز می گردد [۴].

۳- شبیه سازی برقگیر چند محفظه ای

به منظور مطالعه و بررسی عملکرد برقگیرهای چند

آزمایشگاهی قرار گرفته است. در [۲۲] نیز برقگیر چند محفظه ای تحت عنوان برقگیر چند محفظه ای نوع دیسکی^۶ (MCDA) برای حفاظت خط ۱۳/۸ کیلوولت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج تست ها بر روی این نوع از برقگیرها، راندمان بالای آن را در شبکه به ازای جریان های اتصال کوتاه بالای ۲۶ کیلو آمپر و همچنین استقامت مکانیکی و حرارتی مناسب آن در برابر جریان های ضربه مستقیم صاعقه نشان داده است. در [۲۳] مطالعات شبیه سازی و آزمایشگاهی برای یک سیستم اطفا قوس جدید شامل ساختار لوله ای شکل با فشرده سازی چند مرحله ای نیمه بسته^۷ (SMTS) انجام شده است.

در این مقاله با هدف بررسی میدان الکتریکی و شار انرژی قوس الکتریکی در برقگیرهای چند محفظه ای، چندین سناریو بر مبنای تغییر شکل هندسی الکترودها در نظر گرفته شده است. از آنجاییکه شکل هندسی الکترودها در برقگیرهای موجود، کروی هستند، لذا به منظور بررسی تاثیر شکل هندسی الکترودها بر میدان الکتریکی و شار انرژی قوس الکتریکی، دو پروفیل هندسی دیگر یعنی استوانه ای و مخروطی نیز در نظر گرفته شده است و ضمن شبیه سازی، نتایج آنها با یکدیگر مقایسه و تحلیل می شوند. به عبارتی تاثیر شکل هندسی الکترودها بر ماکزیمم میدان الکتریکی قوس و شار انرژی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن و در زمان های مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطالعات و ساختار کلی مورد نظر در این مقاله به شرح ذیل می باشند؛

در قسمت ۲ معرفی برقگیرهای چند محفظه ای و نحوه عملکرد آنها ارائه شده است. در قسمت ۳، با تعریف شرایط اولیه و سناریوهای مورد مطالعه، شبیه سازی برقگیر چند محفظه ای انجام شده است. در قسمت ۴، نتایج شبیه سازی و تحلیل آنها ارائه و همچنین در انتها نتیجه گیری حاصله آمده است.

۲- برقگیرهای چند محفظه ای

برقگیرهای چند محفظه ای دارای یک بدنه لاستیک سیلیکونی بوده و شامل چندین الکتروود متوالی با فواصل هوایی کوچک بین آنها و همچنین یک فاصله هوایی بین کلمپ متصل شده به هادی و الکتروود ترمینال برقگیر می باشد. شکل ظاهری یک برقگیر چند محفظه ای نصب

⁷ Semi-enclosed multi compression tube structures

⁶ Multi Chamber Disc-type Arrester

در شبیه سازی مدل های مورد مطالعه در این مقاله، کل زمان شبیه سازی ۴۰۰ میکروثانیه و گام های شبیه سازی نیز ۱ میکروثانیه در نظر گرفته شده است.

پس از شکست الکتریکی در فاصله هوایی بین آند و کاتد و به سبب ضربه جریانی صاعقه، قوس الکتریکی به وجود آمده، بر اساس معادلات الکترومغناطیسی، حرکت و انرژی ارزیابی می شود. تنها منبع انرژی پلاسمای قوس در درون محفظه های تخلیه، گرمای ژولی است. گرمای ژولی موجب ایجاد یک قوس الکتریکی با دما و انرژی بالا شده و همچنین باعث افزایش فشار در درون محفظه تخلیه می گردد. لازم به ذکر است به منظور مطالعه رفتار دینامیکی پلاسمای قوس در درون محفظه تخلیه، تئوری هیدرودینامیک مغناطیسی (MHD) به کار گرفته شده است [۲۷]. در واقع این تئوری بر اساس معادلات دینامیک سیالات رسانا شامل معادلات حرارتی و ناویر-استوکس و همچنین معادلات ماکسول و با در نظر گرفتن میدان های الکترومغناطیسی می باشد.

۳-۲- سناریوهای مورد مطالعه

هدف پژوهش در این مقاله، بررسی و ارزیابی اثر شکل الکترودهای برقگیر چند محفظه ای بر عملکرد و رفتار قوس الکتریکی می باشد. لذا با تعریف سناریوهای مختلفی مبتنی بر شکل هندسی الکترودها، مطالعات شبیه سازی انجام و مقایسه های لازم جهت بررسی میدان و انرژی قوس الکتریکی تحت سناریوهای مختلف صورت می گیرد. اشکال هندسی مختلف برای الکترودهای برقگیر مورد مطالعه در این مقاله، طی سناریوهای تعریف شده به شرح ذیل مطرح می گردند:

- الکترودهای کروی (سناریوی اول)
- الکترودهای استوانه ای (سناریوی دوم)
- الکترودهای مخروطی (سناریوی سوم)

این الکترودها، در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل، الکترودهای کروی با شعاع ۳ میلی متر، الکترودهای استوانه ای با شعاع قاعده ۳ میلی متر و ارتفاع ۳ میلی متر و همچنین الکترودهای مخروطی با شعاع قاعده ۳ میلی متر، ارتفاع ۳ میلی متر و زاویه راس ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.

محفظه ای و رفتار قوس الکتریکی در آنها، مدل دوبعدی از یک محفظه تخلیه در نرم افزار کامسول پیاده سازی شده است. الکترودها به عنوان آند و کاتد در دو طرف محفظه تخلیه در نظر گرفته می شوند.

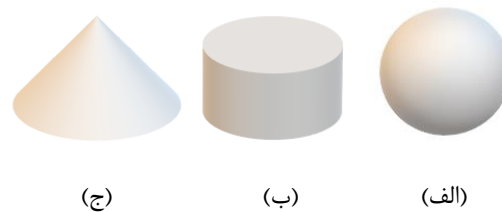
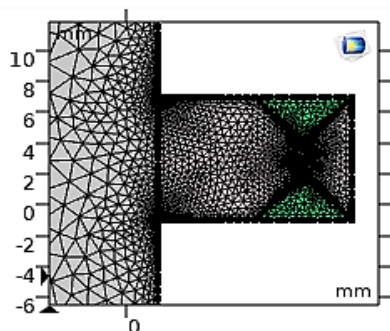
مشخصه های الکتروحرارتی و شرایط اولیه ای نیز برای این مطالعات و شبیه سازی ها لحاظ شده است. بر این اساس، الکترودهای برقگیر از جنس مسی با چگالی ۸۹۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، هدایت الکتریکی $5/998 \times 10^7$ زیمنس بر متر، گرمای ویژه ۳۸۵ ژول بر کیلوگرم بر کلونین و رسانایی حرارتی ۴۰۰ وات بر متر بر کلونین در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت و فشار اولیه تعریف شده برای هوای درون محفظه های تخلیه، به ترتیب برابر با صفر متر بر ثانیه و یک اتمسفر می باشند. از طرفی دمای اولیه برای الکترودها، هوای درون محفظه تخلیه و هوای اطراف برقگیر (فضای بیرونی) برابر با ۳۰۰ درجه کلونین و در شرایط بدون آلودگی و رطوبت در نظر گرفته شده است [۱۷ و ۲۵]. لازم به ذکر است در تمامی فرآیند شبیه سازی پارامترهایی مانند چگالی، گرمای ویژه، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و هدایت قوس به عنوان تابعی از فشار و دما لحاظ شده است.

فیزیک های در نظر گرفته شده در فرآیند شبیه سازی شامل Electric current، به منظور مطالعات الکتریکی بر روی برقگیر و Laminar flow و Heat transfer in fluid به منظور بررسی و مطالعات حرارتی پارامترهای دینامیکی قوس می باشند. پس از مدلسازی هندسی برقگیر و تنظیم فیزیک های لازم و شرایط مرزی و به منظور بررسی عملکرد برقگیر، یک موج جریان ضربه صاعقه، به مدل مورد نظر اعمال می گردد. موج ضربه ای اعمالی دارای دامنه ۱۰ کیلوآمپر و با زمان پیشانی و نیم زمان پشت موج ۸ و ۲۰ میکروثانیه و بر اساس تابع استاندارد هیدلر^۸ می باشد [۲۶].

۳-۱- تئوری ها و روش های محاسبات در روند شبیه سازی

مدل مورد مطالعه در این مقاله، در نرم افزار کامسول و در حوزه فرکانس گذرا شبیه سازی شده است. این نرم افزار یک نرم افزار قدرتمند برای مطالعات چند فیزیکی بوده که روش محاسبات آن بر مبنای روش های اجزا محدود می باشد.

⁸ Heidler



شکل ۲- انواع شکل هندسی الکترودهای برقگیر مورد مطالعه، (الف) الکترودهای کره‌ای، (ب) الکترودهای استوانه‌ای، (ج) الکترودهای مخروطی.

شکل ۳- نمای دو بعدی و مش بندی تک محفظه تخلیه با الکترودهای مختلف در برقگیر چند محفظه ای، (الف) الکترودهای کره‌ای، (ب) الکترودهای استوانه‌ای، (ج) الکترودهای مخروطی.

در این قسمت، با مدلسازی یک محفظه تخلیه از برقگیر چند محفظه‌ای، در نرم افزار کامسول و بر اساس سناریوهای تعریف شده در قسمت ۳-۲، نتایج حاصل از تاثیر شکل الکترودها بر پارامترهای میدان الکتریکی قوس و شار انرژی قوس ارائه شده است. شایان ذکر است، جهت استخراج نتایج میدان و انرژی در نرم افزار کامسول، پروپ های اندازه گیری در درون محفظه تخلیه و در دهانه ی محفظه تخلیه در نظر گرفته می‌شوند.

همانطور که قبلا اشاره شد، در این مقاله تنها بررسی تاثیر شکل الکترودها بر رفتار قوس مد نظر می‌باشد. لذا سایر مشخصه‌های ساختاری برقگیر ثابت فرض شده است. به عبارتی برای همه ی حالات، عمق محفظه تخلیه‌ی برقگیر برابر ۱۲ میلی متر، قطر دهانه محفظه تخلیه برابر ۸ میلی متر و فاصله بین الکترودها برابر ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۷]. نتایج حاصل از شبیه سازی با در نظر گرفتن سناریوهای تعریف شده، در قسمت‌های بعدی مقاله آمده و نتایج تحلیل می‌شوند.

۴- نتایج شبیه سازی و بحث

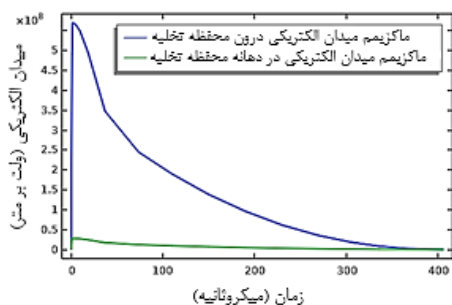
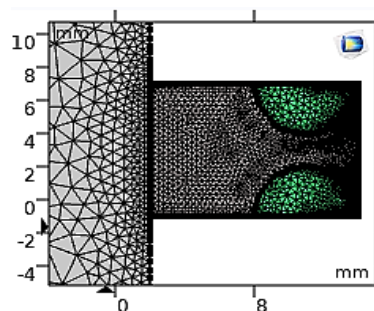
۴-۱- ارزیابی میدان الکتریکی قوس با الکترودهای مختلف

با انجام شبیه‌سازی ها، نتایج ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در اشکال هندسی مختلف الکترودها در ذیل ارائه شده است.

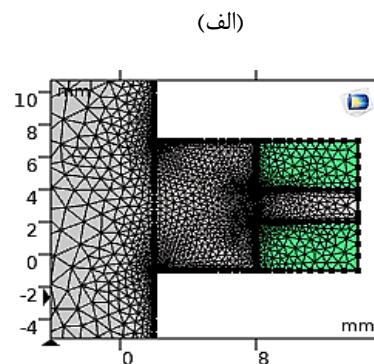
در شکل (۳)، شبیه سازی دو بعدی از یک محفظه تخلیه برقگیر، با الکترودهای مفروض نشان داده شده است. در این شکل‌ها، مش بندی های لازم جهت انجام مطالعات شبیه سازی مشاهده می‌گردد.

۴-۱-۱- الکترودهای کره‌ای (سناریوی اول)

ماکزیمم میدان الکتریکی قوس و طیف رنگی توزیع میدان الکتریکی در برقگیر چند محفظه ای با الکترودهای کره‌ای به شعاع ۳ میلی متر و همچنین با فاصله الکترودها، معادل ۲ میلی متر، به ترتیب در شکل های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- توزیع ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن بر حسب زمان با وجود الکترودهای کره‌ای.



(الف)

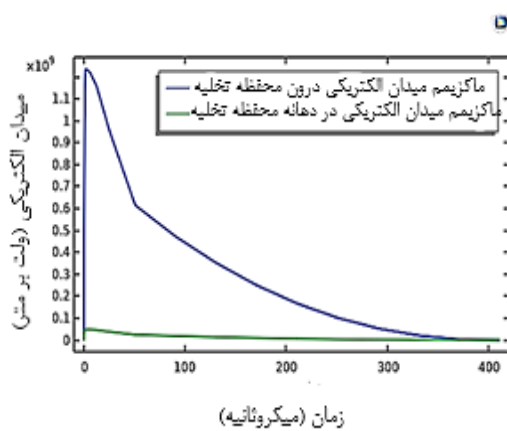
(ب)

ولت بر متر می‌گردد.

لازم به ذکر است در همه ی حالات، ماکزیمم مقدار میدان الکتریکی قوس در کمترین فاصله بین الکترودها رخ می‌دهد.

۴-۱-۲- الکترودهای استوانه ای (سناریوی دوم)

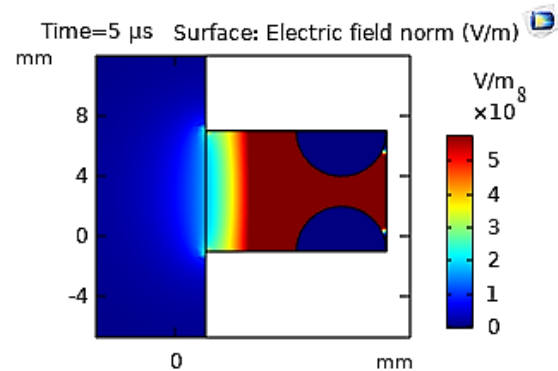
در این قسمت، الکترودها بصورت استوانه و با شعاع قاعده ۳ میلی متر و ارتفاع ۳ میلی متر در نظر گرفته شده است. فاصله الکترودها نیز ۲ میلی متر می‌باشد. نتایج میدان الکتریکی قوس در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده است.



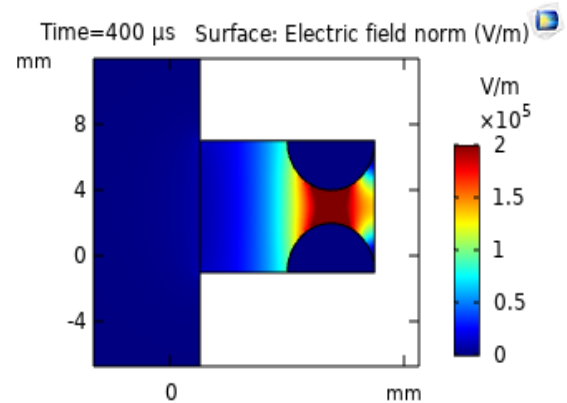
شکل ۶- توزیع ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن بر حسب زمان با وجود الکترودهای استوانه ای.

با توجه به شکل (۶)، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در زمانهای ابتدایی پس از وقوع قوس، بیش از $1/2 \times 10^9$ ولت بر متر می‌باشد که بسیار بیشتر از ماکزیمم میدان قوس الکتریکی در دهانه‌ی محفظه تخلیه است. در شکل (۷) نیز، طیف توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه با این الکترودهای استوانه ای تحت زمانهای ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است. در شکل (۷-الف)، میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه در زمان ۵ میکروثانیه قابل مشاهده است که مقدار ماکزیمم آن دقیقاً مطابق با مقدار پیک منحنی آبی رنگ در شکل (۶) می‌باشد. لازم به ذکر است که در زمان ۴۰۰ میکروثانیه (شکل ۷-ب)، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه، کاهش یافته و تقریباً برابر با 1×10^6 ولت بر متر می‌گردد.

با توجه به منحنی توزیع میدان الکتریکی در شکل (۴)، مشاهده می‌شود که ماکزیمم میدان الکتریکی قوس درون محفظه تخلیه، در زمانهای کمتر از ۴۰۰ میکروثانیه، بسیار بیشتر از ماکزیمم میدان قوس الکتریکی در دهانه‌ی محفظه تخلیه می‌باشد. اما لازم به ذکر است که در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی درون محفظه تخلیه و دهانه محفظه تخلیه، تقریباً برابر می‌شوند.



(الف)



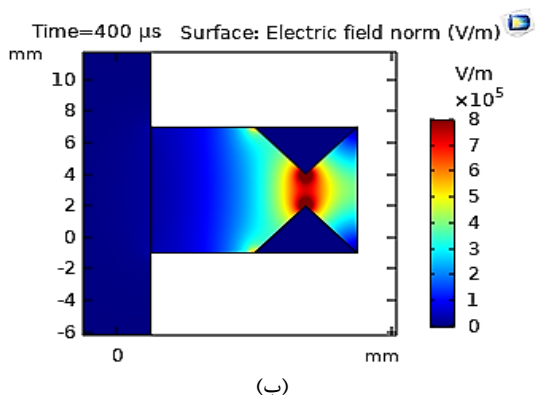
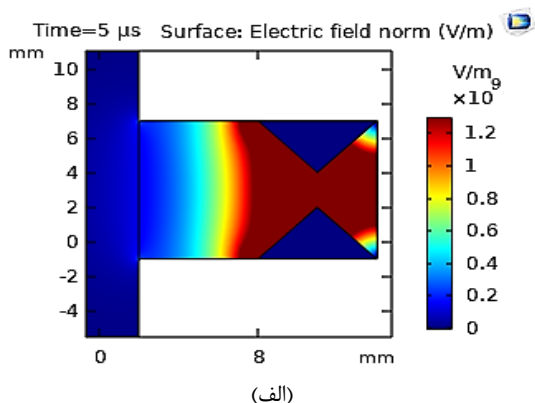
(ب)

شکل ۷- طیف رنگی توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه با وجود الکترودهای کروی، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.

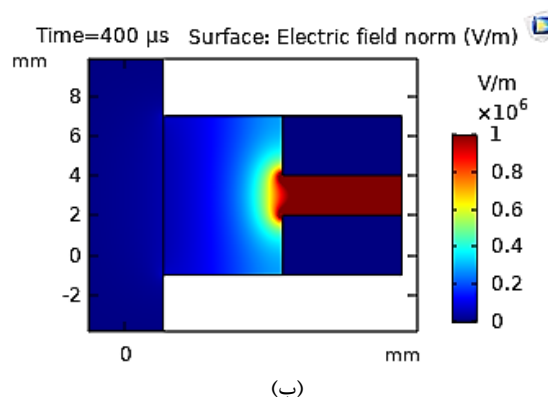
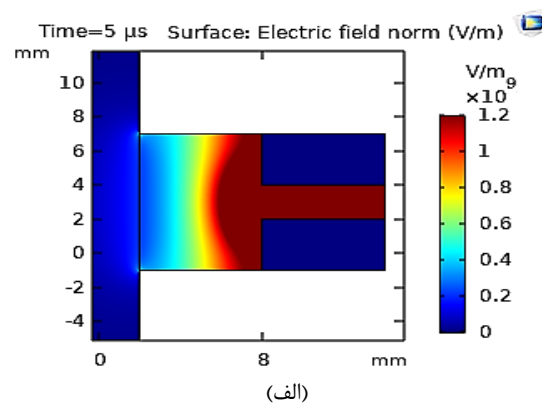
همچنین در شکل (۵) طیف توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه با این الکترودهای کروی و در زمانهای ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است. مطابق شکل (۵-الف) در زمانهای ابتدایی پس از وقوع قوس در درون محفظه تخلیه، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس به بیش از 5×10^8 ولت بر متر رسیده است. اما با توجه به شکل (۵-ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه کاهش یافته و تقریباً برابر با 2×10^5

مشاهده می شود که با در نظر گرفتن الکترودهای مخروطی، مشابه سایر الکترودها، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه در زمانهای کمتر از ۴۰۰ میکروثانیه بسیار بیشتر از ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در دهانهی محفظه تخلیه است.

از طرفی در شکل (۹)، طیف توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه با الکترودهای مخروطی مذکور تحت زمانهای ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است. مطابق شکل (۹-الف) و در زمان ۵ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس برابر با 1.3×10^9 ولت بر متر می باشد. این مقدار دقیقاً در منحنی آبی رنگ شکل (۸) نیز برای زمان ۵ میکروثانیه (پیک منحنی) قابل مشاهده است. اما با توجه به شکل (۹-ب) و در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس درون محفظه تخلیه، کاهش یافته و تقریباً برابر با 8×10^5 ولت بر متر می شود. به عبارتی با توجه به شکل (۸) و در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی در درون و در دهانه محفظه تخلیه، تقریباً برابر می شوند.



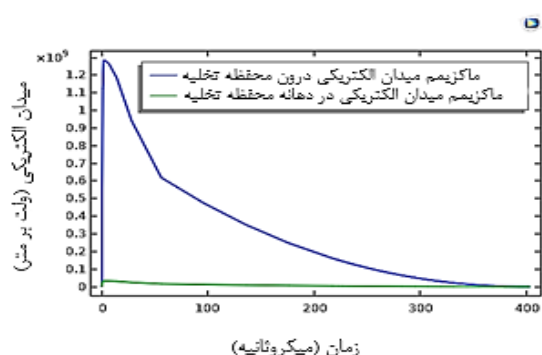
شکل ۹- طیف رنگی توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه با وجود الکترودهای مخروطی، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.



شکل ۷- طیف رنگی توزیع میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه با وجود الکترودهای استوانه ای، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.

۴-۱-۳- الکترودهای مخروطی (سناریوی سوم)

در این قسمت، الکترودها بصورت مخروطی و با شعاع قاعده ۳ میلی متر، ارتفاع ۳ میلی متر و با زاویه راس ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. در این شرایط، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس و طیف رنگی توزیع میدان الکتریکی در شکل های (۸) و (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸- توزیع ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن بر حسب زمان با وجود الکترودهای مخروطی.

با توجه به شکل (۸) و منحنی توزیع میدان الکتریکی،

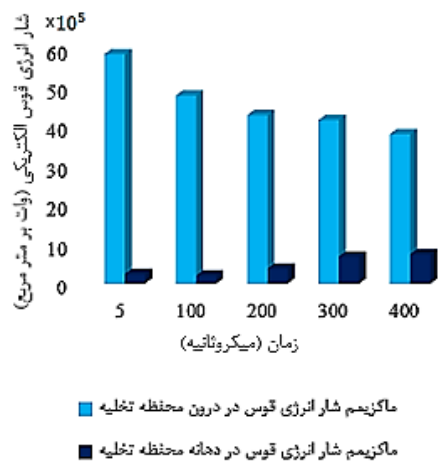
استوانه‌ای حاصل شده است. از طرفی دیگر، میدان الکتریکی قوس در دهانه‌ی محفظه تخلیه و در زمان‌های مختلف، گویای وضعیت قوس در لحظه خروج از محفظه تخلیه می‌باشد. ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در دهانه محفظه تخلیه در زمان‌های ابتدایی پس از وقوع قوس الکتریکی، برای برقگیر با الکترودهای کروی کمتر از سایر الکترودها می‌باشد. اما در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، میدان الکتریکی قوس برای برقگیر با الکترودهای مخروطی، دارای کمترین مقدار نسبت به سایر الکترودها است.

۴-۲-۲- ارزیابی شار انرژی قوس با الکترودهای مختلف

به منظور بررسی اثر شکل الکترودها بر انرژی قوس الکتریکی تشکیل شده در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن و بر اساس سناریوهای مندرج در بخش ۳-۲، نتایج در حالات مختلف به شرح ذیل بیان می‌گردند.

۴-۲-۱- الکترودهای کروی (سناریوی اول)

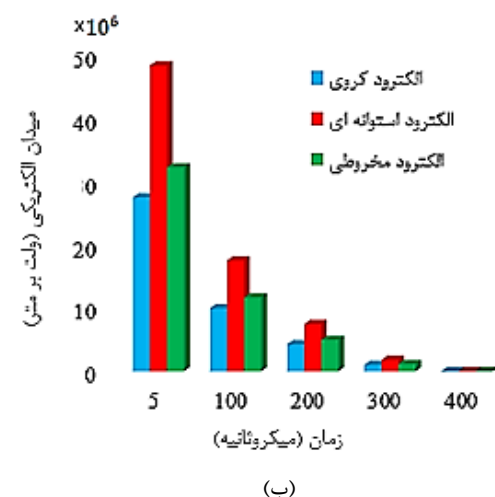
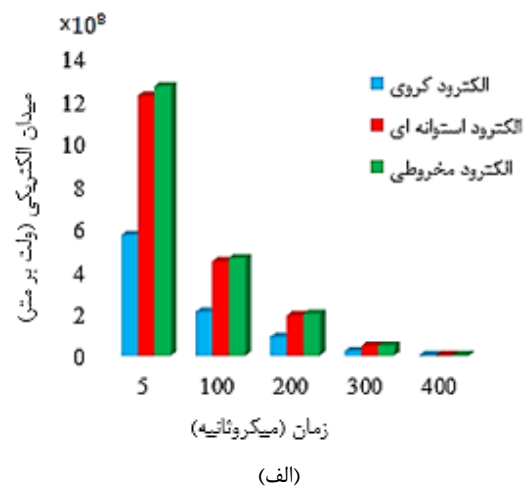
با توجه به شبیه سازی های انجام شده، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی و طیف رنگی توزیع شار انرژی در درون و دهانه محفظه تخلیه برای برقگیر با الکترودهای کروی (با شعاع ۳ میلی متر و فاصله الکترودهای ۲ میلی متر) به ترتیب در شکل های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون و دهانه محفظه تخلیه در زمانهای مختلف با الکترودهای کروی.

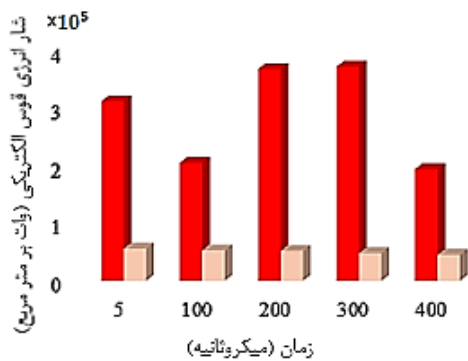
با توجه به شکل (۱۱)، مشاهده می‌شود که با وجود الکترودهای کروی در برقگیر چند محفظه ای، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه در همه‌ی زمان ها بسیار بیشتر از مقدار آن در دهانه محفظه تخلیه است. همچنین شکل (۱۲) طیف رنگی توزیع شار انرژی

با توجه به انجام شبیه‌سازی برقگیر مورد مطالعه با الکترودهای مختلف (کروی، استوانه‌ای و مخروطی)، در شکل (۱۰) ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه‌ی آن، در زمان‌های گوناگون، در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۰- ماکزیمم میدان الکتریکی برای اشکال هندسی مختلف الکترودها، (الف) در درون محفظه تخلیه، (ب) در دهانه محفظه تخلیه.

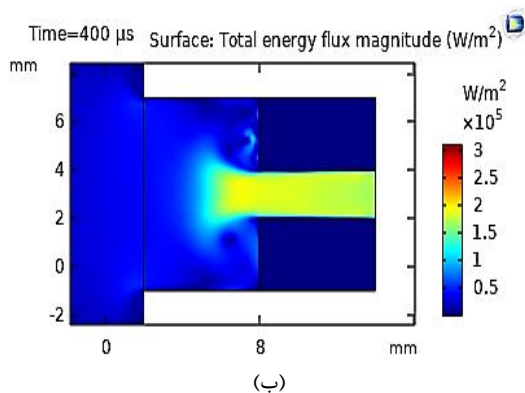
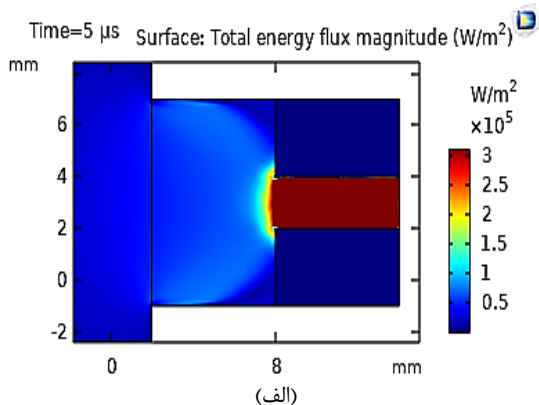
با توجه به نتایج شبیه سازی در زمان‌های کمتر از ۴۰۰ میکروثانیه، برای حالتی که الکترودها به صورت کروی هستند، میدان الکتریکی ماکزیمم در درون محفظه تخلیه، در قیاس با سایر حالات، کمتر بوده و با وجود الکترودهای مخروطی شکل، میدان الکتریکی ماکزیمم، بیشترین مقدار را دارد. در زمان ۴۰۰ میکروثانیه نیز، ماکزیمم میدان الکتریکی برای برقگیر با الکترودهای کروی کمتر از اشکال دیگر الکترودها می‌باشد. در واقع در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، بیشترین میدان الکتریکی برای برقگیرهای با الکترودها



■ ماکزیمم شار انرژی قوس در درون محفظه تخلیه
 ■ ماکزیمم شار انرژی قوس در دهانه محفظه تخلیه

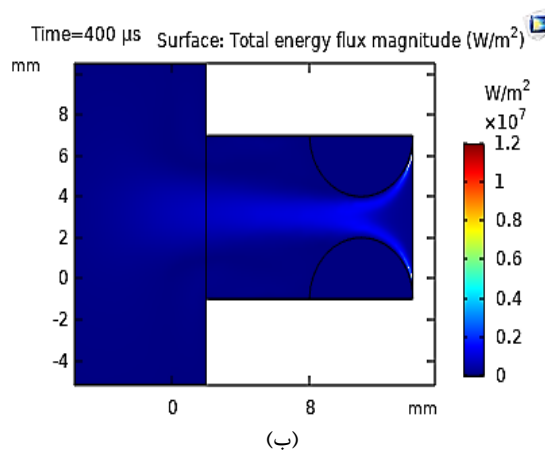
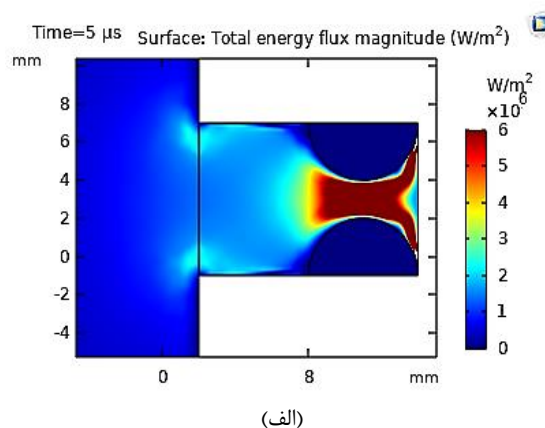
شکل ۱۳- ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون و دهانه محفظه تخلیه در زمانهای مختلف با وجود الکترودهای استوانه ای.

با توجه به شکل (۱۳)، با وجود الکترودهای استوانه ای در برقیهای چند محفظه ای، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه در همه ی زمان ها بیش از 3×10^5 وات بر متر مربع می باشد در حالیکه در دهانه محفظه تخلیه، مقدار آن کمتر از 1×10^5 وات بر متر مربع است.



شکل ۱۴- طیف رنگی توزیع انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه با الکترودهای استوانه ای، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.

قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه را در زمان های ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان می دهد. با توجه به شکل (۱۲- الف)، مشاهده می شود که در زمانهای اولیه پس از وقوع قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی تقریباً برابر با 6×10^6 وات بر متر مربع می باشد. در حالیکه با توجه به شکل (۱۲- ب)، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه (در زمان ۴۰۰ میکروثانیه)، به 0.4×10^7 وات بر متر مربع می رسد. لازم به ذکر است در همه ی حالات، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در کمترین فاصله بین الکترودها رخ می دهد.

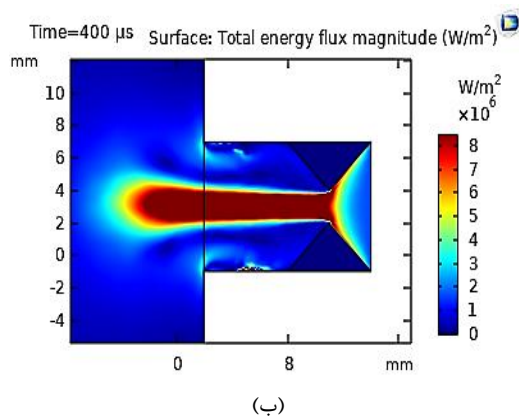
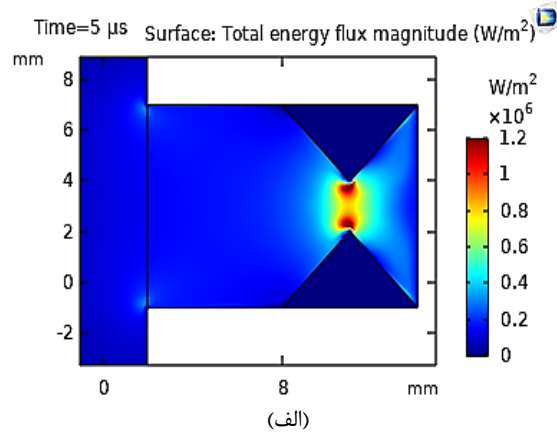


شکل ۱۲- طیف رنگی توزیع انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه با الکترودهای کروی، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.

۴-۲-۲- الکترودهای استوانه ای (سناریوی دوم)

در شکل های (۱۳) و (۱۴) و به جهت مقایسه، ماکزیمم شار انرژی قوس در درون و دهانه محفظه تخلیه برقیهای و طیف رنگی توزیع شار انرژی قوس در درون محفظه با الکترودهای استوانه ای نشان داده شده است.

انرژی قوس الکتریکی برابر با $1/2 \times 10^6$ وات بر متر مربع می‌باشد (در حد فاصل راس های الکترودهای مخروطی) و این در حالیهست که با توجه به شکل (۱۶-ب) و در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه، افزایش یافته و برابر با $8/5 \times 10^6$ وات بر متر مربع می‌گردد بطوریکه قوس با انرژی بالایی از دهانه محفظه تخلیه، خارج می‌شود.



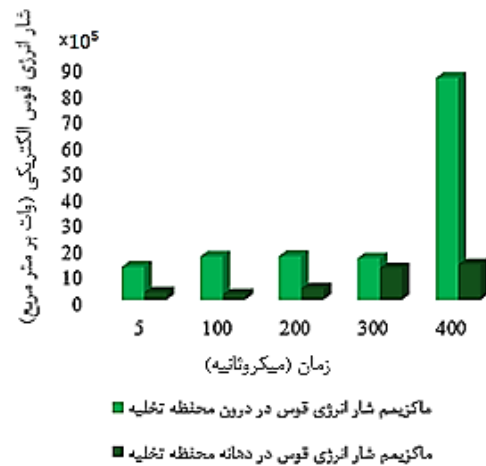
شکل ۱۶- طیف رنگی توزیع انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه با الکترودهای مخروطی، (الف) در زمان ۵ میکروثانیه، (ب) در زمان ۴۰۰ میکروثانیه.

در شکل (۱۷)، مقایسه ای میان نتایج ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن با توجه به شکل های مختلف الکترودها نشان داده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی های مندرج در شکل (۱۷-الف)، مشاهده می‌شود که در بیشتر زمانها، میزان شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه برقیگیر با الکترودهای کروی، بیشترین مقدار را نسبت به سایر الکترودها داشته است. اما در زمانهای نزدیک به ۴۰۰ میکروثانیه، میزان شار انرژی قوس برای برقیگیرهای با الکترودهای مخروطی، دارای بیشترین مقدار است. همچنین

از طرفی در شکل (۱۴)، طیف توزیع شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه با الکترودهای استوانه ای در زمانهای ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است. در شکل (۱۴-الف)، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه و در زمان ۵ میکروثانیه، برابر با 3×10^5 وات بر متر مربع است. همچنین با توجه به شکل (۱۴-ب)، مشاهده می‌شود که در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی، بین الکترودها در درون محفظه تخلیه، تقریباً برابر با 2×10^5 وات بر متر مربع شده و نسبت به زمان های اولیه نیز کاهش یافته است.

۴-۲-۳- الکترودهای مخروطی (سناریوی سوم)

در این قسمت، ماکزیمم شار انرژی قوس و همچنین طیف رنگی توزیع آن برای برقیگیر با الکترودهای مخروطی ارزیابی می‌گردد. نتایج در شکل های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۱۵- ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون و دهانه محفظه تخلیه در زمانهای مختلف با وجود الکترودهای مخروطی.

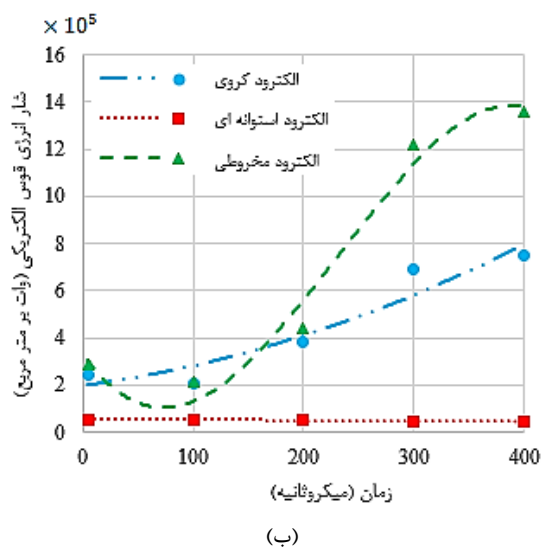
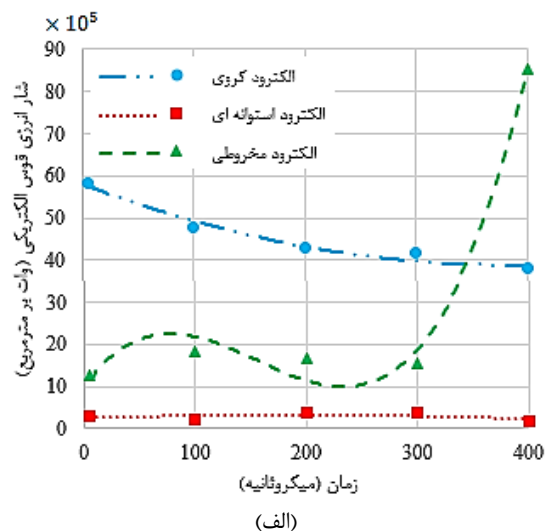
با توجه به شکل (۱۵)، مشاهده می‌شود که با وجود الکترودهای مخروطی در برقیگیر چند محفظه ای، ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه در همه ی زمان ها بیشتر از ماکزیمم شار انرژی قوس الکتریکی در دهانه محفظه تخلیه است (به خصوص در زمان ۴۰۰ میکروثانیه). همچنین در شکل (۱۶)، طیف رنگی توزیع شار انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه در زمان های ۵ و ۴۰۰ میکروثانیه نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۶-الف)، مشاهده می‌شود که در زمانهای اولیه پس از وقوع قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه، ماکزیمم شار

قیاس با الکترودهای موجود در طرح اصلی برقیها (الکترودهای کروی)، بر مقادیر میدان الکتریکی و انرژی قوس الکتریکی، با استفاده از شبیه سازی به روش اجزاء محدود، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

در این مقاله با انجام شبیه سازی ها در نرم افزار کامسول که مبتنی بر روش اجزا محدود است، تاثیر شکل هندسی الکترودهای برقی بر پارامترهای انرژی قوس و میدان الکتریکی قوس ارزیابی شده است. مقدار ماکزیمم این دو پارامتر در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن در زمانهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. به عبارتی با توجه به شبیه سازی های انجام شده، تغییرات در روند توزیع و مقدار ماکزیمم میدان الکتریکی و شار انرژی قوس، از درون محفظه تا دهانه محفظه تخلیه، به وضوح قابل مشاهده است. با توجه به نتایج شبیه سازی در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و در دهانه آن برای هر یک از الکترودهای مفروض، تقریباً مشابه است. اما در زمانهای اولیه، مقدار ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در درون محفظه تخلیه و برای الکترودهای مخروطی، نسبت به سایر الکترودها بیشتر می باشد. این در حالی است که، ماکزیمم میدان الکتریکی قوس در دهانه محفظه تخلیه در زمان ۴۰۰ میکروثانیه برای الکترودهای مخروطی کمتر از سایر الکترودها می باشد.

کمتر از سایر الکترودها در همین زمان است. از طرفی با توجه به نتایج شار انرژی قوس الکتریکی مشاهده شده است که ماکزیمم انرژی قوس الکتریکی در درون محفظه تخلیه در زمانهای بیش از ۳۲۰ میکروثانیه و در دهانه محفظه تخلیه در همه ی زمانها برای الکترودهای مخروطی، نسبت به سایر الکترودها، بیشتر می باشد. اما در زمان ۴۰۰ میکروثانیه، در برقی با الکترودهای مخروطی بر خلاف سایر شکل الکترودها، قوس با انرژی زیادی از دهانه محفظه تخلیه، خارج می گردد. این امر نشان دهنده این است که با این نوع الکترودها در برقی، به علت شکل خاص آن، فرآیند تخلیه قوس از درون محفظه به سمت دهانه و خارج از آن در زمان کوتاه تری (قبل از ۴۰۰ میکروثانیه) صورت گرفته است و از لحاظ فنی می توان گفت که برقی عملکرد بهتر و سریع تری داشته است.

با توجه به شکل (۱۷-ب)، میزان شار انرژی قوس در دهانه محفظه تخلیه در بیشتر زمانها، برای برقیهای با الکترودها مخروطی نسبت به سایر الکترودها، دارای بیشترین مقدار می باشد. لازم به ذکر است، کمترین میزان شار انرژی قوس در درون محفظه تخلیه و دهانه آن، در همه ی زمانها مرتبط با برقی با الکترودهای استوانه ای است.



شکل ۱۷- توزیع شار انرژی قوس الکتریکی برای شکل های هندسی مختلف الکترودها، (الف) در درون محفظه تخلیه، (ب) در دهانه محفظه تخلیه.

۵- نتیجه گیری

عوامل مختلفی بر عملکرد برقیهای چند محفظه ای و فرآیند تخلیه قوس در درون آن موثر می باشند. یکی از پارامترهای مهم و موثر بر رفتار قوس الکتریکی در این برقیها، شکل هندسی الکترودها می باشد. در این مقاله تاثیر الکترودها با اشکال هندسی استوانه ای و مخروطی در

مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

کیمیا سیلاخوری: تحقیق و گردآوری داده‌ها، نرم‌افزار
و شبیه سازی، آنالیز و تحلیل نتایج، نگارش و تهیه
پیش‌نویس اصلی.

محمد میرزایی: تحلیل، بازبینی و ویرایش.

ایرج احمدی: تحلیل، بازبینی و ویرایش.

منابع مالی

در این تحقیق، کمک مالی خاصی از هیچ سازمانی دریافت
نشده است.

با توجه به نتایج حاصله، از آنجاییکه از نقطه نظر عملی و
کاربردی، عملکرد مناسب این برقگیرها منوط به رفتار قوس
الکتریکی از زمان تشکیل قوس تا تخلیه آن می باشد، لذا
بکارگیری الکترودهای مخروطی نسبت به سایر الکترودهای
مورد مطالعه، رفتار مناسب تری را نشان داده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که در مورد انتشار این مقاله
تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می شوند که مطالب این مقاله را در هیچ

مراجع

- [1] H. Mohseni. "Fundamentals of High Voltage Engineering." Tehran University Press, 6th Edition, 2015. (in Persian)
- [2] "Technical and general executive specifications of substations, overhead distribution lines and transmission of arresters in high voltage substations." Ministry of Energy -Tavanir Company, publication number 501-2. 2010. (in Persian).
- [3] S. Luo, L. Luan, Y. Cui, Sh. Xu, Q. Guo, and T. Liu. "Simulation research on lightning protection effect of distribution line lightning protection measures." *Journal of Physics: Conf. Series* 1802, no. 4 (2021).
- [4] Streamer International AG. "Line Lightning Protection Devices for Medium-Voltage Networks", LP_CATA_2212_EN_WEB, 2022.
- [5] E. Perdana, S. Hidayat, and R. Zoro. "Lightning protection system on overhead distribution line using multi chamber arrester." in *Proc. 2nd IEEE Conf. on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE'14, Bali, Indonesia*. pp. 70-74. IEEE, 2014.
- [6] G.V. Podporkin, V.E. Pilshikov, E.S. Kalakutsky, and A.D. Sivaev. "Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters." *IEEE Transaction on Power Delivery* 26, no. 1 (2010): 214-221.
- [7] M. Borecki and Y. Kharchenko. "Comparative Simulation Analysis of Selected Medium and High Voltage Surge Protection Devices." *Energies* 15, no. 12 (2022): 4326.
- [8] M. Borecki and M. Ciuba. "Testing of Selected Surge Protection Devices in the Context of the Possibility of Ensuring the Reliability of Power Grids." *Energies* 16, no. 3 (2023):1445.
- [9] Multi-Chamber Lightning Arrester. "Test report From High Voltage Lab of NRI." Report Number: TH 90026E, 2011.
- [10] N.W. Priambodo, B.B.S.D.A. Harsono, A.S. Habibie, and J. Hartono. "Performance evaluation of modified multi gap arrester." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1098, no. 4, p. 042054. IOP Publishing, 2021.
- [11] V.Y. Frolov, D.Y. Ivanov, G.V. Podporkin, and A.D. Sivaev. "Development of a mathematical model of processes in multi-chamber arrester for identification of criteria of arc extinction." *International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*. Natal, Brazil. pp. 240-243. IEEE, 2017.
- [12] V.Y. Frolov, D.Y. Ivanov, Y.V. Murashov, and A.D. Sivaev. "Calculation of The Composition of Plasma of an Arc Pulsed Discharge in a multi chamber arrester." *Technical Physics Letter* 41, no. 4 (2015): 310-313.
- [13] W. Sima, W. Jia, T. Yuan, M. Yang, H. Cheng, and S. Zua. "Dynamic Evolution of Arc Plasma in a Semi-Enclosed Arc-Extinguishing Chamber and its Influencing Factor." *Physics of Plasmas* 28, no. 6 (2021): 1-14.
- [14] Y. Wu, M. Rong, X. Li, A.B. Murphy, X. Wang, F. Yang, and Z. Sun. "Numerical Analysis of the Effect of the Chamber Width and Outlet Area on the Motion of an Air Arc Plasma." *IEEE Transaction on Plasma Science* 36, no. 5 (2008): 2831-2837.

- [15] D. Wu, Z. Ji, and J. Wang. "Simulation and Experimental Analysis of Multi-Chamber Arc-Quenching Arresters (MCAA) for 10 kV Transmission Lines." *Energies* 14, no. 19 (2021): 6185.
- [16] Y. Liu, G. Wu, K. Liu, Y. Guo, X. Zhang, and Ch. Shi. "Study on the Arc Motion Characteristics of Multi-Chamber Arrester Based on 3D Model." *In IEEE Access*, vol. 8, (2020): 90035-90041.
- [17] K. Silakhori, M. Mirzaie, and I. Ahmadi. "Electro-thermal analysis and dynamic arc parameters evaluation in multi chamber arrester under structural and dimensional changes effect using the finite element method." *Electric Power System Research* 229, 110185, (2024).
- [18] G.V. Podporokin, E.Y. Enkin, Y.V. Kretov, V.N. Pankratiev, and V.E. Pilschikov. "Prototype of multi-chamber loop-type arrester for 110 kV OHL lightning protection." 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Rzeszow, Poland. pp. 1-5. IEEE, 2018.
- [19] G.V. Podporokin, E.Y. Enkin, B.O. Dmitriy, and V.E. Pilschikov. "Multi-Chamber Disc-Type Lightning Arrester for 13.8 kV Overhead Lines Protection." *11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China*. PP. 1-5. IEEE, 2019.
- [20] L. Murashov, V.Y. Frolov, D. Uhrlandt, S. Gorchakov, D. Ivanov, and A.D. Sivaev. "Analysis of Arc Processes in Multi-chamber Arrester for Lightning Protection at High-Voltage Overhead Power Lines." *Plasma Physics and Technology* 4, no. 2 (2017): 124-128.
- [21] Sh. Pu, W. Jia, H. Li, Q. Peng, R. Yang, and T. Yuan. "Research on Compact Design of Multi-chamber Arc-extinguishing Structure for Lightning Protection." *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China*. pp. 1-4. IEEE, 2020.
- [22] G.V. Podporokin, E.Y. Enkin, B.O. Dmitriy, and V.E. Pilschikov. "Multi-Chamber Disc-Type Lightning Arrester for 13.8 kV Overhead Lines Protection." *11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China*. pp. 1-5. IEEE, 2019.
- [23] Y. Song, J. Wang, P. Huang, Y. Lu, Q. He, Zh. Jia, H. Li, and Y. Wang. "Arc-Extinguishing Research on Semi-Closed Multi-Compression Tube Structures." *Energies* 16, no. 3 (2023).
- [24] G.V. Podporokin, E.Y. Enkin, E.S. Kalakutsky, V.E. Pilshikov, and A.D. Sivaev. "Lightning protection of overhead lines rated at 3–35 kV and above with the help of multi-chamber arresters and insulator-arresters." *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Beijing, China*. pp. 1247-1250. IEEE, 2010.
- [25] Engineering Toolbox [online]. 2001. <https://www.engineeringtoolbox.com>.
- [26] F. Heidler, J. Cvetic, and B.V. Stanic. "Calculation of Lightning Current Parameters." *IEEE Transaction on Power Delivery* 14, no. 2 (1999): 399-404.
- [27] D. Wu, and J. Wang. "Lightning Protection of 10-kV Distribution Lines by Multiple Breakpoints Arc-Extinguishing Lightning Protection Gap." *IEEE Transaction on Plasma Science* 48, no. 2 (2020): 531-536.