

## شبیه‌سازی کوره قوس AC فرکانس پایین به روش اجزای محدود و استخراج مشخصه‌های فیزیکی قوس جهت بررسی پایداری قوس الکتریکی با رفتار دینامیکی

مصطفی گلرخ جوبنی<sup>۱</sup>، آرش دهستانی کلاگر<sup>۲\*</sup>، محمدرضا علیزاده پهلوانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

(دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۲)

### چکیده

کوره‌های قوس الکتریکی از بزرگ‌ترین بارهای متمرکز، غیرخطی و با رفتار آشوبناک در شبکه‌های توزیع قدرت می‌باشند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی مغناطیسی این بارها کمترین خطا را نسبت به ماهیت و رفتار فیزیکی قوس الکتریکی داشته و در دقت مطالعات، نقش بسزایی دارد. در این مقاله شبیه‌سازی کوره قوس الکتریکی AC فرکانس پایین، به روش اجزای محدود و با کمک نرم‌افزار قدرتمند COMSOL Multiphysics انجام می‌گیرد. روش اجزای محدود جهت تحلیل‌های مغناطیسی، حرارتی و دینامیکی روش مرسوم بوده و توانمندی خود را در حوزه‌های فیزیکی مختلف به اثبات رسانیده است. در شبیه‌سازی به روش اجزای محدود، مدار الکتریکی مورد استفاده، ابعاد الکتروود، شرایط دمایی اولیه و منبع تغذیه ورودی کوره نیز در نظر گرفته می‌شوند. با استفاده از حل هم‌زمان معادلات فیزیکی مختلف در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و بهره‌گیری از روابط و اصول مگنتوهیدرودینامیک، قانون آمپر، قانون اهم و معادلات ماکسول مدل قوس الکتریکی و نحوه ایجاد پلازما مطالعه می‌شوند. سپس با استخراج نتایج و مقایسه با روابط و مطالعات پیشین، پایداری قوس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پایداری قوس سبب کاهش هارمونیک‌های تولیدی و فلیکر ولتاژ تحمیلی به شبکه شده و نیاز به ادوات جبران‌ساز را کاهش می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** کوره قوس الکتریکی، پلازما، پایداری قوس الکتریکی، پلاسمای حرارتی، قوس جریان بالا، قوس دینامیکی

مثبت و منفی جریان، سطح صفر ظاهر نشود و تنها در لحظه تغییر نیم‌سیکل مقدار جریان قوس صفر شود. در واقع پایداری قوس مساله بسیار مهمی در کوره‌های قوس الکتریکی AC است و در بهره‌وری کوره و کیفیت مذاب خروجی اثرگذاری زیادی دارد [۲-۴]. در این پژوهش، بررسی پایداری قوس الکتریکی یک کوره قوس AC و شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود مدنظر می‌باشد؛ به نحوی که ولتاژ و جریان قوس الکتریکی و پارامترهای مهم دیگری از قبیل میدان، شار، چگالی شار و دما محاسبه گردند. با توجه به توانایی کوره‌های قوس در ذوب فلزات و ایجاد آلیاژهای با کیفیت‌تر نسبت به روش‌های مرسوم گذشته و نیاز صنایع نظامی به این کوره‌ها و همچنین نیاز کشور به صنایع اساسی و مادر همچون فولاد، خودروسازی، متالورژی و مواد و وابستگی این صنایع به فناوری با کیفیت ذوب فلزات و ترکیب آنها، بررسی عملکرد این کوره‌ها ضروری می‌باشد. با داشتن مدل درستی از پدیده قوس الکتریکی که لازمه فرآیند ذوب می‌باشد، می‌توان به یک مدل جامع و درست از کوره قوس دست یافت که حالت‌های مانا و گذرا را دربر گرفته و از خروجی این مدل برای طراحی منبع تغذیه بهینه جهت تأمین توان تحت تمامی شرایط استفاده کرد [۲-۴]. در تحقیقات انجام‌شده مدل‌های مختلف قوس از قبیل مدل‌های کاسی، مایر، کاسی- مایر و ... استفاده

### ۱. مقدمه

در صنایع وابسته به ذوب فلزات، از انواع کوره‌ها استفاده می‌شود؛ که با توجه به توانایی هر کدام و صرفه اقتصادی، بنا بر نیاز در هر مرحله از آنها استفاده می‌گردد. سه دسته اصلی کوره‌های مورد استفاده در صنایع عبارت‌اند از: (۱) کوره مقاومتی<sup>۱</sup> (۲) کوره القایی<sup>۲</sup> (۳) کوره قوس الکتریکی (EAF)<sup>۳</sup>

کوره‌های مقاومتی، القایی و پیش‌گرم‌کن‌های القایی معمولاً در صنایع متالورژی و صنایع کوچک کاربرد دارند [۱، ۲]. اما، کوره‌های قوس الکتریکی از پرکاربردترین نوع کوره‌ها در صنعت فولادسازی محسوب می‌شوند. این کوره‌ها توانایی ذوب فلزات تا چند صد تن را دارا می‌باشند. کوره‌های قوس از نظر تغذیه در دو دسته AC و DC مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در هر دو نوع کوره، مساله پایداری قوس بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد. قوس پایدار در کوره با تغذیه AC به قوسی گفته می‌شود که، دارای جریان به‌صورت پیوسته باشد و در گذار از نیم‌سیکل‌های

\* نویسنده پاسخگو: a\_dehestani@mut.ac.ir

<sup>1</sup> Resistance Furnace

<sup>2</sup> Induction Furnace

<sup>3</sup> Electrical Arc Furnace

می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر کوره قوس نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از مدل‌سازی عددی، اثر میدان مغناطیسی بر لایه‌های حرارتی و جریان سیال، در مرجع [۱۳] بررسی شده است. در این راستا، از روش تحلیل اجزاء محدود برای به‌دست‌آوردن نیروهای الکترومغناطیسی، جریان سیال، گرما و جابجایی جرم استفاده شده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها، گویای تأثیر میدان الکترومغناطیسی بر همگن‌سازی دما و راندمان مخلوط در حمام مذاب بوده است. انرژی الکتریکی سه فاز واردشده به کوره قوس از طریق الکترودهای گرافیتی، تبدیل به انرژی حرارتی می‌شوند؛ که در این فرآیند، پایدار بودن طول قوس مطلوب است. در این خصوص، جریان قوس الکتریکی به‌عنوان متغیر تحت کنترل، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴]. در کوره‌های قوس الکتریکی، یک قوس ناپایدار منجر به عملکرد نامطلوب کوره می‌گردد. البته مشکل فوق با استفاده از نصب راکتورهای سری قابل حل است. اما راکتورهای سری بر روی برخی از پارامترهای کوره از قبیل پایداری قوس، ضریب توان ورودی، طول قوس و بهره کوره اثر می‌گذارد. علاوه بر این، توان مؤثر انتقال‌یافته به کوره را نیز کاهش می‌دهد [۱۵]. در مرجع [۱۶] نیز یک معیار برای مطالعه پایداری قوس الکتریکی ارائه شده است. همچنین یک مبدل بهینه جهت تغذیه کوره قوس الکتریکی AC با فلزات غیر آهنی، به‌عنوان مواد شارژ درون کوره، مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار جریان در لحظه عبور از صفر، نشان‌دهنده پایداری قوس بوده و حداکثر مقاومت قوس به‌طور کمی قابل اندازه‌گیری است. در مرجع [۱۷] یک مدل ۳ بعدی از تغییرات جریان قوس موجود در یک کلید قطع جریان، توسط معادلات مداری، حرارتی و مکانیکی جهت تحلیل پلاسمای ایجادشده، ارائه شده است. در [۱۸] نیز به بررسی و تحلیل الکترودهای موجود در کوره قوس و تأثیر میدان‌های مغناطیسی الکترودها بر یکدیگر توسط معادلات ماکسول پرداخته شده است. همچنین، حرکت قوس الکتریکی حاصل از یک کلید قطع‌کننده مدار به همراه معادلات حاکم بر فیزیک قوس الکتریکی در [۱۹] ارائه شده است. در همین راستا، با استفاده از یک سامانه لیزری حرکت قوس و تأثیر این جابجایی بر روی افروزش و پخش‌شدگی قوس مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به افزایش استفاده از قوس DC در کاربردهای مختلف، بررسی و ارزیابی مشخصات یک قوس DC به کمک معادلات MHD و معادلات دینامیکی در [۲۰] انجام شده است. یک مدل جدید از قوس الکتریکی DC مبتنی بر معادلات حاکم بر قوس و نتایج تجربی نیز در [۲۱] ارائه شده است؛ که این مدل نسبت به سایر مدل‌ها دقت بالاتری می‌باشد. همچنین، در [۲۲] جهت محاسبه توان انتقالی به کوره‌های قوس DC از مشخصات فیزیکی و الکتریکی قوس استفاده شده و نتایج تجربی مربوطه نیز ارائه شده است.

شده است؛ به‌طوری که با شناسایی پارامترهای مدل کاسی - مایر، مدل‌سازی کوره قوس به انجام رسیده است [۱۵]. کوره‌های قوس الکتریکی از بزرگ‌ترین بارها در شبکه‌های قدرت هستند که به‌دلیل غیرخطی و متغیر بودن با زمان، باعث مشکلات کیفیت توان نظیر هارمونیک و فلیکر ولتاژ<sup>۱</sup> در شبکه می‌شوند. بنابراین، در دست داشتن مدلی دقیق از کوره قوس، جهت طراحی سیستم تغذیه مناسب و ادوات جبران‌ساز ضروری است [۱۶]. بررسی مدل کاسی - مایر قوس در کوره قوس الکتریکی DC نیز در [۱۷] انجام گرفته است. جهت به‌دست‌آوردن پارامترهای مدل کاسی - مایر و همچنین مطالعات پایداری قوس، از شبیه‌سازی قوس DC در نرم‌افزار اجزای محدود، به کمک معادلات مگنتوهیدرودینامیک (MHD)، استفاده شده است. همچنین، در پژوهش مذکور مدلی جهت بررسی پایداری قوس به‌دست آمده است که می‌تواند به‌عنوان یک مدل پایدار تحت عملکردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرد. کوره‌های قوس الکتریکی کیفیت توان شبکه برق را با ایجاد اختلالاتی نظیر فلیکر ولتاژ، نامتعادلی و تزریق هارمونیک‌ها کاهش می‌دهند. این اختلالات ناشی از رفتارهای غیرخطی الکترومغناطیسی و گرمایی قوس الکتریکی است. در [۱۸]، یک مدل سه‌بعدی از میدان الکترومغناطیسی کوره قوس AC شامل (الکترودها، قوس الکتریکی و حمام مذاب) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق فوق، نتایج مربوط به چگالی جریان، ولتاژ و شدت میدان مغناطیسی در قوس الکتریکی، حمام مذاب و الکترودها ارائه شده است. با توجه به دسترسی محدود به اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای قوس الکتریکی، از شبیه‌سازی مبتنی بر معادلات مگنتوهیدرودینامیک و مدل شناخته‌شده کاسی - مایر برای قوس الکتریکی استفاده شده است. ولتاژ به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی برای جریان‌های مختلف قوس، نیازمندی تحلیل‌های دیگر را جهت بررسی فیزیک‌های مختلف، برطرف می‌سازد [۹]. مدل اجزای محدود دو کوره قوس، یکی با شکل دایره‌ای با توان ۴۸ مگاوات و دیگری با شکل مستطیلی با توان ۶۸ مگاوات، با الکتروود درون مواد مذاب، در [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. جهت ارتقاء دقت تحلیل‌ها، در مدل مربوطه، الکتروود، مواد خام، سرباره و فلز مذاب نیز گنجانده و در نظر گرفته شده‌اند. یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار طراحی اجزای محدود ANSYS Fluent برای حل معادلات ماکسول، در [۱۱] ارائه شده است که بر مبنای بردارهای جریان توزیع‌شده در قوس فرو رفته در درون کوره، محاسبات را انجام داده است. همچنین در پژوهش فوق، اثر فرکانس بر روی جریان، تأثیر محدودسازی آستانه جریان قابل تحمل الکترودها، اثر پوستی و اثر مجاورتی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در [۱۲]، یک کوره قوس الکتریکی با مشخصه‌های غیرخطی شدید، مشابه آنچه که در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد و سبب بروز مسائل حاد کیفیت توان

<sup>1</sup> Voltage Flicker<sup>2</sup> Magneto Hydro Dynamic

یونیزه شدن هوا، جریان بتواند برقرار شود. روش دیگر استفاده از ادوات مکانیکی و شکل‌گیری جریانی قوس می‌باشد. به اینصورت که، در ابتدا الکترودها به آرامی به کمک بازوهای مکانیکی رو به پایین حرکت نموده، تا اینکه به قراضه‌ها برخورد نمایند. در این شرایط، با بسته شدن مسیر جریان، بلافاصله به کمک یک ترانس جریان (CT<sup>۱</sup>)، برقراری جریان تشخیص داده شده و الکترودها توسط بازوهای مکانیکی به بالا کشیده خواهند شد. در این حالت، به علت وجود راکتور تعبیه‌شده در مدار تغذیه شکل (۱)، با توجه به رابطه (۱)، یک ولتاژ بسیار بالا بین الکترودها ایجاد می‌شود [۲۰].

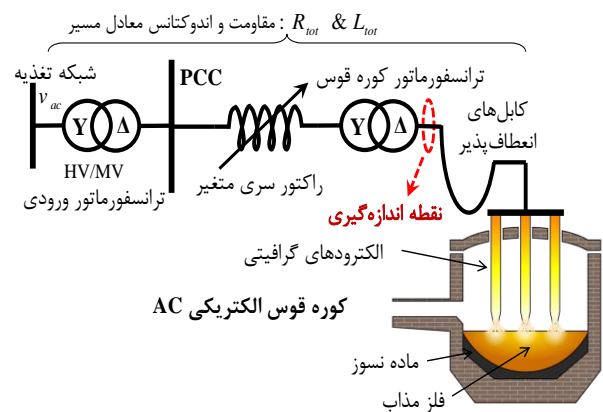
$$v_{gap} = v_{ac} - R_{tot} i - L_{tot} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

ولتاژ ایجادشده که همان ولتاژ فاصله هوایی ( $v_{gap}$ ) می‌باشد، بر اثر قطع ناگهانی جریان راکتور ایجاد می‌گردد؛ که عامل شکست عایقی و یونیزه شدن هوا و ایجاد محیط پلاسمایی می‌باشد. این امر سبب، برقراری جریان را در قالب قوس الکتریکی می‌شود. در واقع، بروز قوس مابین الکترودها و قراضه‌ها را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که، قبل از جدا شدن الکترودها از قراضه‌ها، جریان در مدار برقرار بوده و ولتاژ منبع ورودی ( $v_{ac}$ ) برابر با افت ولتاژ روی مقاومت و اندوکتانس مسیر ( $L_{tot}$  و  $R_{tot}$ ) می‌باشد. در لحظه جدا شدن الکترودها، به دلیل ایجاد شکاف مابین الکترودها و قراضه‌ها، جریان به تندی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش، منجر به افت ولتاژ القایی منفی ( $L_{tot} \frac{di}{dt}$ ) بر روی اندوکتانس  $L_{tot}$  و نیز کاهش افت ولتاژ اهمی  $R_{tot} i$  شده و در نتیجه از آنجایی که ولتاژ منبع دارای مقدار مشخصی می‌باشد، مطابق با قانون مداری کیرشهف، ولتاژی ( $v_{gap}$ ) جهت جبران‌سازی ولتاژ منفی اندوکتانس و نیز کاهش افت ولتاژ مقاومتی، مابین الکترودها و قراضه‌ها ظاهر می‌گردد. اگر ولتاژ  $v_{gap}$  به اندازه کافی بزرگ باشد، قوسی مابین الکترودها افزونش پیدا می‌کند. در این مقاله از روش اول جهت برقراری قوس استفاده شده است. در مورد پایداری قوس نیز، اگر شکل موج جریان کوره برای نیم‌سیکل‌های متوالی پیوسته باشد، یک قوس پایدار را خواهیم داشت. رسیدن به قوس پایدار جهت افزایش بهره‌وری کوره، یک عامل کلیدی می‌باشد. عدم پایداری قوس باعث عملکرد نامطلوب کوره و کاهش توان انتقالی مؤثر به آن می‌شود. جهت رسیدن به قوس پایدار، معمولاً از راکتور (سلف) سری در سیستم تغذیه کوره‌های قوس AC استفاده می‌شود. عامل مهم دیگری که بعد از پایدار کردن قوس به کمک راکتور سری، باید مورد توجه قرار گیرد، توان انتقالی به کوره بعد از نصب راکتور سری می‌باشد. نصب راکتور سری هرچند با کاهش ضریب توان موجب پایداری قوس می‌شود، اما

در این مقاله، در بخش ۲ به بررسی مدار تغذیه کوره قوس الکتریکی پرداخته می‌شود. در این بخش نحوه شکل‌گیری قوس الکتریکی و عملکرد آن به اختصار ارائه می‌گردد. سپس، در بخش ۳، معادلات فیزیکی لازم جهت شبیه‌سازی قوس الکتریکی معرفی می‌شوند. در ادامه، در بخش ۴، نتایج شبیه‌سازی یک کوره قوس الکتریکی به روش اجزاء محدود ارائه شده و در نهایت، بخش ۵ به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص داده شده است.

## ۲. مدار تغذیه کوره قوس الکتریکی

شمای کلی مدار تغذیه کوره‌های قوس الکتریکی در شکل (۱) آورده شده است؛ که در آن پس از شبکه تغذیه، امپدانس کل مسیر شامل (مقاومت سیم و کابل‌ها و اتصالات مکانیکی و الکترودها)، با هم به‌عنوان امپدانس مسیر ( $L_{tot}$  و  $R_{tot}$ ) در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): شمای تک‌خطی مدار تغذیه کوره قوس الکتریکی

در سیستم مذکور، از یک راکتور (سلف بزرگ) متغیر جهت حفظ پیوستگی جریان قوس استفاده می‌گردد و سپس جریان از طریق ترانسفورماتور کوره وارد الکترودها می‌شود. در کوره‌های قوس الکتریکی سه فاز، از سه الکترودهای گرافیتی و سه مسیر متفاوت جهت انتقال جریان استفاده می‌شود. مدار شکل (۱) در واقع دیگرام تک‌خطی سیستم را نشان می‌دهد. پس از ایجاد قوس الکتریکی، جریان از طریق هوا به‌واسطه ایجاد محیط پلاسمایی انتقال یافته و وارد حجم قراضه‌ها یا همان مواد شارژ کوره می‌شود. سپس، از طریق حمام مذاب مسیر جریان بسته می‌شود. کوره‌های قوس DC نیز از روشی مشابه پیروی می‌کنند.

### ۲-۱. نحوه ایجاد قوس الکتریکی

برای برقراری جریان الکتریکی در قالب قوس، می‌توان از یک ولتاژ بسیار بالا استفاده کرد؛ که این ولتاژ باید به حدی بالا باشد تا شکست عایقی در هوا رخ داده و بعد از شکست الکتریکی و

<sup>1</sup> Current Transformer

$$\frac{\partial(\rho v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} v_k) = \frac{-\partial P}{\partial x_k} + \sum_{z=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_z} \left[ \eta \left( \frac{\partial v_k}{\partial x_z} + \frac{\partial v_z}{\partial x_k} \right) \right] + (\vec{j} \times \vec{B})_k \quad (2)$$

معادله تعادل انرژی نیز به شکل زیر قابل نوشتن است [۱۹]:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) - \nabla \cdot (\nabla T) = \frac{\partial P}{\partial t} + V - \sigma \times \varepsilon (T^4 - T_{amb}^4) + \frac{J}{\sigma} \quad (3)$$

به علاوه، معادله تعادل جرم که به چگالی مواد وابستگی دارد، به صورت زیر اعمال می‌گردد [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

همچنین، قانون اهم مطابق با رابطه (۵) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]:

$$\vec{j}(x, y, t) = \sigma(x, y, t) \vec{E}_{arc}(t) \quad (5)$$

معادله میدان الکتریکی برای کل فضا نیز به صورت زیر قابل بیان است [۱۹]:

$$\vec{E}_{arc}(t) = \int_{sa} \frac{i(t)}{\sigma ds} \quad (6)$$

در نهایت، قانون بیوساوار جهت محاسبه چگالی میدان مغناطیسی، به صورت ذیل قابل نوشتن می‌باشد [۱۹]:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}(\vec{r})_{ext} + \frac{\mu_0}{4\pi} \iint_s \vec{J}(\vec{r}') \times \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} ds' \quad (7)$$

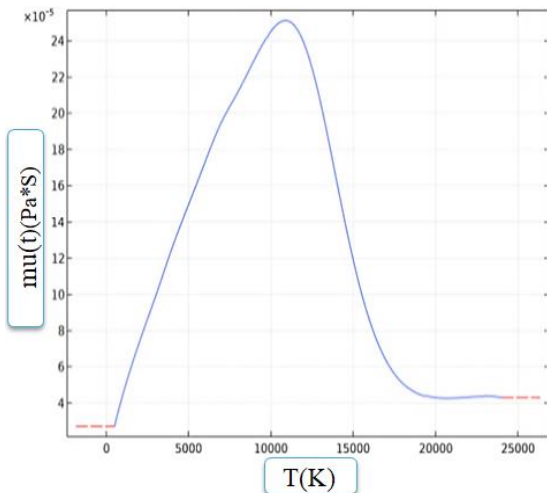
در روابط (۲) الی (۷)،  $t$  زمان،  $X_k$  و  $X_z$  مختصات کارتزین،  $\vec{v}$  سرعت فلو،  $v_k$  سرعت در مختصات  $(k = x, y)$ ، فشار،  $P$ ، چگالی شار مغناطیسی،  $T$  دما،  $H$  آنتالپی،  $\vec{j}$  چگالی جریان،  $V$  تابع تلفات گرانیوی،  $\rho$  چگالی،  $\sigma$  هدایت الکتریکی،  $\lambda$  هدایت حرارتی،  $i$  جریان،  $\eta$  گرانیوی،  $E_{arc}$  ولتاژ قوس و  $\varepsilon$  ضریب گسیل الکترون می‌باشند. خواص مکانیکی، حرارتی و فیزیکی هوا به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته شده‌اند. نمودار تغییرات این خواص بر حسب دما در شکل (۲-۷) نشان داده شده است. در شکل (۲) نحوه تغییرات چگالی هوا بر حسب دما آورده شده است، با توجه به تعریف چگالی، با افزایش دما حجم مواد افزایش یافته و منطقی است که چگالی به صورت پیوسته در حال کاهش باشد. در شکل (۳) چگونگی تغییرات ظرفیت گرمایی هوا، با توجه به تغییرات دمایی و واکنش‌های مختلف ترمودینامیکی متغیر با دما

به دلیل ایجاد افت ولتاژ در مدار تغذیه کوره، خود باعث کاهش توان انتقالی به کوره نیز می‌شود. این نقص با انتخاب تپ مناسب ترانسفورماتور کوره رفع می‌شود. ولی در هنگام تغییر تپ ترانسفورماتور باید دوباره پایداری قوس مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، همواره دو متغیر مقدار راکتور سری و تپ ترانسفورماتور کوره را خواهیم داشت که بر پایداری قوس و میزان توان انتقالی به کوره تأثیر گذارند. استفاده از راکتور سری باعث کاهش ضریب توان و در نتیجه پایدارتر شدن قوس می‌شود. بدین صورت که با ورود راکتور سری، اختلاف فاز بین ولتاژ نقطه کوپلاژ مشترک مدار و جریان قوس بیشتر می‌شود. لذا در هنگام عبور از صفر جریان قوس، ولتاژ به اندازه کافی ازدیاد یافته و قوس بلافاصله مجدداً آفرز می‌یابد و بنابراین جریان پیوسته و قوس پایدار را خواهیم داشت. اما اگر هنگام عبور از صفر جریان، ولتاژ هنوز از یک مقدار آستانه‌ای کمتر باشد، قوس روشن نمی‌شود و تا زمانی که ولتاژ به مقدار آستانه برسد، جریان کوره در مقدار صفر خواهد ماند. در این حالت جریان قوس گسسته می‌شود و قوس ناپایدار را خواهیم داشت. با تضمین پایداری قوس و عدم وجود سطح صفر در جریان کشیده شده از ترانسفورماتور کوره، میزان هارمونیک‌ها و ضربات وارد شده به ترانسفورماتور و شبکه کاهش یافته و نیاز به جبران‌سازها نیز کاسته می‌شود.

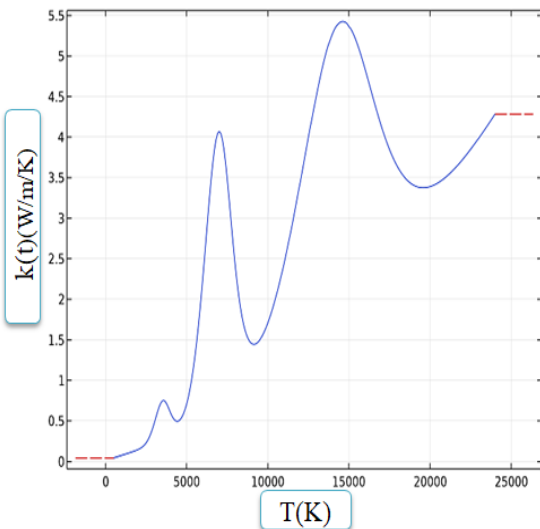
### ۳. معادلات فیزیکی جهت شبیه‌سازی قوس

برای شبیه‌سازی قوس الکتریکی فرضیات متعددی لحاظ شده است که عبارت‌اند از: ۱- پلاسمای مورد مطالعه جهت برآورده کردن شرایط معادله ترمودینامیک، موضعی در نظر گرفته می‌شود. ۲- فلوی گاز خطی بوده و تأثیر اغتشاش ناچیز فرض می‌شود. همچنین، خواص فیزیکی شامل هدایت حرارتی، چگالی، گرمای ویژه، گرانیوی و هدایت الکتریکی، به عنوان توابعی از دمای پلازما در نظر گرفته می‌شوند. ۳- پلازما از لحاظ الکتریکی، خنثی در نظر گرفته می‌شود. ۴- جهت ساده‌سازی محاسبات میدان مغناطیسی، از یک پرمابیلیته ثابت برای محیط گازی با توجه به عدم حضور مواد فرومغناطیس استفاده می‌شود. ۵- پلاسمای قوس به وسیله معادلات ناویر استوکس جهت تفسیر فرآیند تغییرات جرم، اندازه حرکت و انرژی مطالعه شده و نیز معادلات ماکسول به منظور تشریح رفتار الکترومغناطیسی قوس به کار گرفته می‌شوند. همچنین، رفتار فیزیکی ستون قوس، انعکاس گرمای مهمی، خنک‌سازی تشعشعی و تأثیر نیروی لورنتس، ناشی از میدان‌های خودالقا و خارجی، روی پلازما مورد بررسی قرار می‌گیرند. به منظور تحلیل فیزیکی مساله، معادلات حاکم بر پدیده قوس الکتریکی را می‌توان دسته‌بندی نمود. در این راستا، معادله تعادل اندازه حرکت به صورت زیر قابل بیان می‌باشد [۱۷ و ۱۹]:

شده و این امر سبب افزایش ضریب انتشار حرارتی حجمی می‌گردد. شکل (۷) نحوه تغییرات ضریب انتشار حرارتی حجمی را برحسب دما نشان می‌دهد. در نظرگیری وابستگی پارامترها به دما، موجب بازسازی شرایط واقعی در شبیه‌سازی و دستیابی به نتایجی بسیار نزدیک به واقعیت می‌گردد. از این رو، نتایج حاصل از شبیه‌سازی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بوده و قابل اتکا می‌باشند. همچنین، چنانکه در هر شکل مشخص می‌باشد، در صورت افزایش بیش از اندازه حرارت، نمودارها منطبق بر بخش قرمز رنگ، توسط نرم‌افزار برون‌یابی می‌شوند.

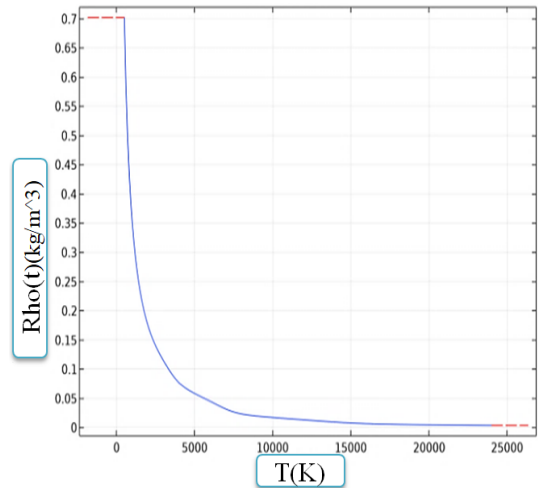


شکل (۴): گرانروی دینامیکی هوا وابسته به دما

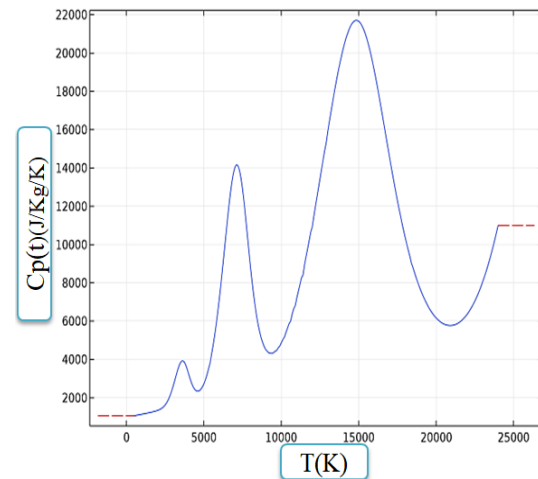


شکل (۵): هدایت حرارتی هوا وابسته به دما

آورده شده است. گرانروی، میزان مقاومت یک سیال در برابر جاری شدن می‌باشد، که در شکل (۴) نشان داده شده است، که برای سیال هوا، با افزایش دما به بیشتر از حد بحرانی، شروع به کاهش می‌کند.



شکل (۶): چگالی هوا وابسته به دما

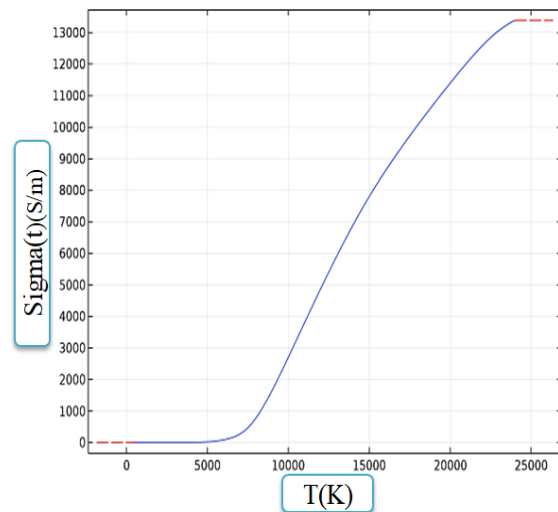


شکل (۷): ظرفیت گرمایی هوا  $C_p$  وابسته به دما

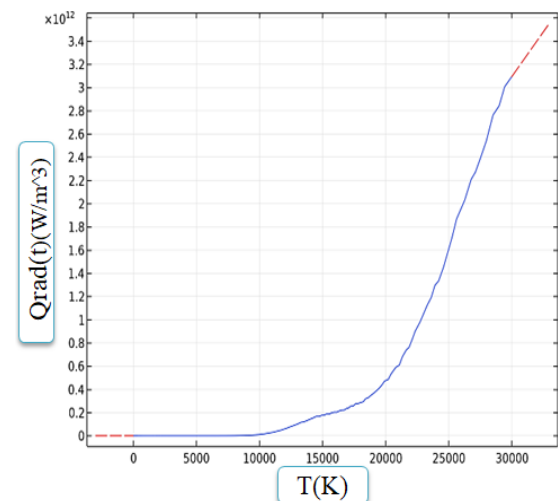
هدایت حرارتی یک ماده نیز وابسته به حرکت اتم‌ها و مولکول‌های آن ماده بوده و با توجه به این نکته، حرکت ذرات موجود در هوا که ترکیبی از چند گاز مختلف می‌باشد، در دماهای مختلف متفاوت خواهد بود. لذا هدایت حرارتی هوا وابسته به دما بوده و نحوه تغییرات آن با دما در شکل (۵) نشان داده شده است. هوا در دمای معمولی یک عایق مناسب می‌باشد، اما همراه با افزایش دما، حرکت بین ذرات آن افزایش یافته و به مرور با ازدیاد دما هنگامی که وارد ناحیه پلاسمایی می‌گردد، خاصیت عایقی خود را از دست داده و رسانایی آن افزایش می‌یابد. این واقعیت فیزیکی در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین، افزایش دما موجب افزایش سرعت حرکت مولکول‌ها

هم‌زمان با هم حل شوند. برای شبیه‌سازی از گونه‌های مختلف گازی موجود در هوا که شامل گاز آرگون، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن می‌باشند، استفاده شده است. در واقع، میزان ترکیب این گونه‌ها و اثر برخورد آنها بر یکدیگر و آزادسازی الکترون‌ها در نرم‌افزار وارد شده است. علاوه بر این، وابستگی ایجادشده بین نوع الکتروود، فلز مذاب و ابعاد کوره، نتایج شبیه‌سازی را به رفتار واقعی موجود در کوره نزدیک می‌کند. ماژول مدار الکتریکی به واسطه رابط داخلی نرم‌افزار، با ماژول جریان الکتریکی و مغناطیسی ارتباط برقرار می‌کند و جریان در الکتروود جاری می‌گردد. سپس، ماژول‌های مغناطیسی، جریان الکتریکی و حرارتی با یکدیگر کوپل می‌گردند. از کوپلاژهای انجام‌شده، معادلات پلاسمایی، حرارتی، مغناطیسی و نیروی لورنتس محاسبه می‌گردند. در انتها با برقراری ارتباط بین ماژول‌های حرارتی، مغناطیسی و جریان الکتریکی با جریان سیال، گزینه شرایط دشارژ الکتریکی فعال و شرایط پلاسمایی و جریانات سیال، حرارتی، مغناطیسی و الکتریکی با توجه به گونه‌های گفته‌شده به صورت هم‌زمان حل می‌گردند. لذا، با توجه به ماژول‌های مورد استفاده و تأثیرپذیری شرایط فیزیکی متغیر تعریف‌شده برای محیط پلاسمایی، بروز تغییراتی در ابعاد، مواد مذاب، جنس الکتروود و سایر مشخصه‌های کوره، به صورت مستقیم بر تمامی تحلیل‌ها تأثیر خواهد گذاشت.

در این مقاله، به منظور کاستن از زمان شبیه‌سازی، از ساختار دوبعدی متقارن استفاده می‌شود. در شکل (۸) این تقارن با خط‌چین قرمز رنگ سمت چپ در  $z=0$  مشخص شده است. برای دستیابی به نتایج دقیق، مش‌بندی بسیار ریزی جهت تحلیل اجزای محدود به کار گرفته شده است. قوس الکتریکی در ناحیه بین الکتروود و فلز مذاب، یعنی در فضایی که با رنگ آبی مشخص شده است و از جنس هوا می‌باشد، پدیدار می‌شود. در شکل (۸) شمای کلی الکتروودهای یک فاز کوره قوس الکتریکی نشان داده شده است. قسمت پایینی، فلز از جنس مس (فلز مذاب) و الکتروود در قسمت بالا سمت چپ نیز از جنس تنگستن می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات منبع ورودی، قطر الکتروود، فشار محیط، دمای اولیه محیط و مقادیر عناصر و اِلمان‌های موجود در شکل (۱)، آورده شده است. در شکل (۹) نمودار ولتاژ (جهت وضوح، ولتاژ در عدد ۱۰ ضرب شده است) و جریان برحسب زمان برای ۵ سیکل کاری ارائه شده است. همانطوری که ملاحظه می‌شود، حداکثر جریان قوس،  $427.05A$  می‌باشد. در نتایج آورده شده در شکل (۹)، آنچه بسیار حائز اهمیت است، هم‌فازی ولتاژ و جریان قوس و همچنین پایداری قوس الکتریکی ایجادشده می‌باشد. با توجه به تعریف ارائه‌شده از قوس پایدار، مبنی بر عدم وجود سطح صفر در شکل جریان قوس، پایداری قوس از



شکل (۶): هدایت الکتریکی هوا وابسته به دما



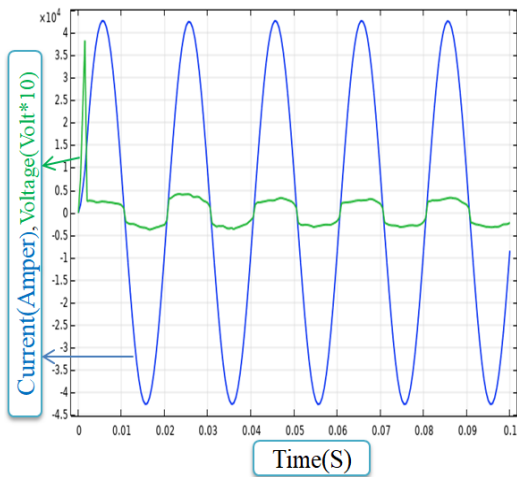
شکل (۷): ضریب انتشار حرارتی حجمی وابسته به دما

#### ۴ نتایج شبیه‌سازی

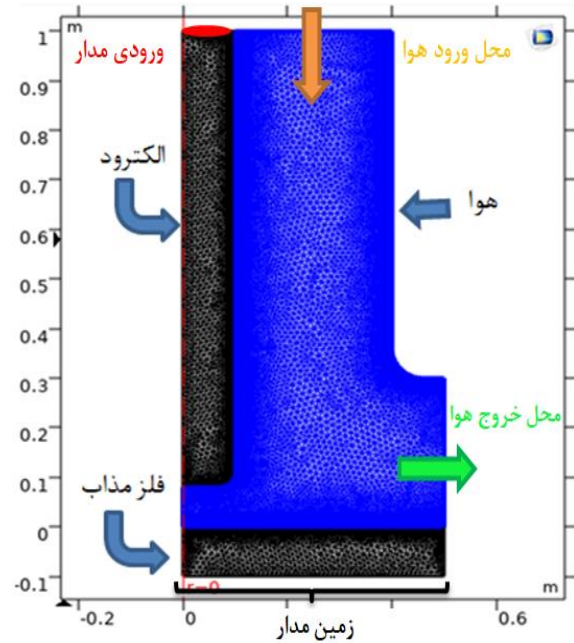
در این مقاله، به منظور شبیه‌سازی مغناطیسی کوره قوس الکتریکی و مطالعه رفتار فیزیکی قوس، از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics ۵.۴، به دلیل توانایی ویژه آن در انجام تحلیل‌های اجزاء محدود و دقت بالای خروجی‌ها استفاده شده است. ماژول‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی عبارتند از: ماژول مدار الکتریکی، ماژول جریان الکتریکی، ماژول مغناطیسی، ماژول حرارتی و ماژول جریان سیال است. علاوه بر این، با توجه به روابط (۱) الی (۷) که معادلات کلی مورد استفاده در این شبیه‌سازی هستند، بایستی کوپلاژ بین ماژول‌های فوق، جهت ایجاد ارتباط بین معادلات پلاسمایی، حرارتی، مغناطیسی، سیالاتی و نیروی لورنتس، نیز انجام گیرد و معادلات ناوبراستوکس، معادله قانون اهم و معادله بیوساوار به صورت

جدول (۱): مقادیر اِلمان‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

مقدار	اِلمان‌های مورد استفاده
$5000 \times \sin(\pi \times 50 \times t)$	منبع ولتاژ ورودی
$f = 50 \text{ Hz}$	فرکانس منبع
$0.05 \Omega$	مقاومت مسیر ( $R_{tot}$ )
$0.08 \text{ mH}$	راکتور مسیر ( $L_{tot}$ )
$1 \text{ m}$	طول الکتروود
$10 \text{ cm}$	قطر الکتروود
$1 \text{ atm}$	فشار هوا
$25^\circ \text{C}$	دمای اولیه محیط

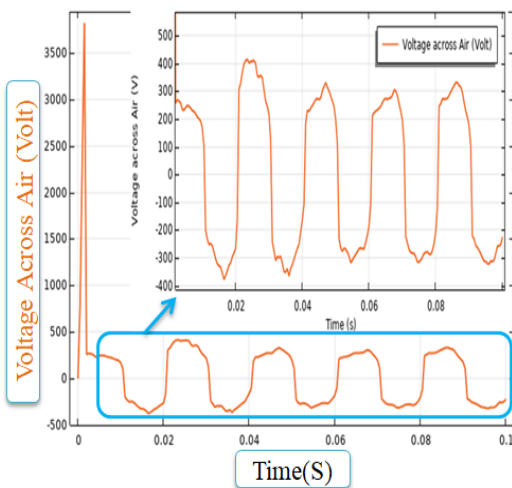


شکل (۹) کاملاً قابل استنتاج است. در شکل (۱۰)، ولتاژ قوس الکتریکی به‌طور مجزا نشان داده شده است.



شکل (۸): مدل متقارن الکتروود و بوته کوره قوس

شکل (۹): ولتاژ و جریان قوس الکتریکی

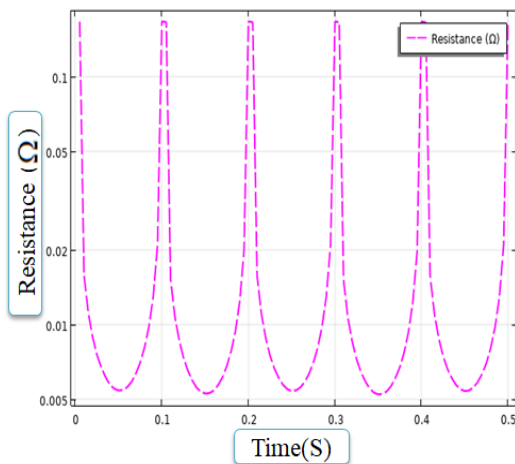


شکل (۱۰): ولتاژ قوس الکتریکی

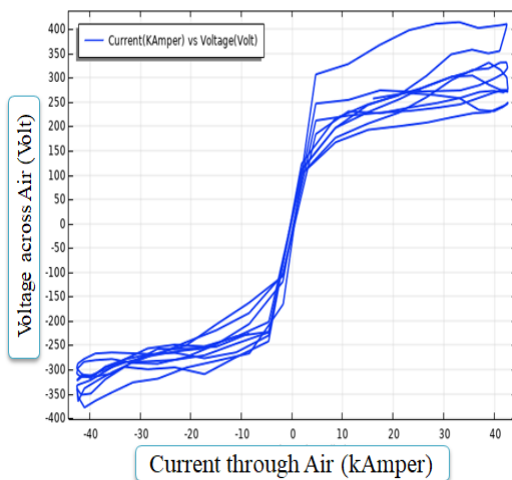
بعد از شکل‌گیری اولیه قوس الکتریکی، فرآیند ایجاد قوس در هر یک از سیکل‌های بعدی، در شکل (۱۱) نیز کاملاً مشخص می‌باشد. پس از رسیدن به نقطه افروزش قوس، مقاومت به‌شدت کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده وجود پلاسما و رسانایی بالای مسیر است. پس از افروزش قوس، جریان قوس به‌شدت افزایش می‌یابد؛ تا اینکه ولتاژ قوس متناوب، به مقداری موسوم به ولتاژ خاموشی قوس برسد. پس از آن، جریان قوس شروع به کاهش می‌نماید. این رویه در هر نیم‌سیکل قوس پایدار تکرار می‌شود.

اگرچه در صنایع فولادسازی قوس الکتریکی به‌واسطه چسباندن الکتروودها به سطح قراضه‌ها و سپس جدا کردن آنها ایجاد شده و شروع به سوختن می‌کند، اما در این شبیه‌سازی، با توجه به اینکه مطالعه قوس الکتریکی بعد از شکل‌گیری اولیه مدنظر می‌باشد، جهت ساده‌سازی قوس الکتریکی به‌صورت ولتاژی ایجاد شده است. بدین معنا که در ابتدا هوا همانند عایق عمل نموده و در ادامه به‌علت فاصله هوایی کم و ولتاژ اولیه‌ی بسیار بالای منبع تغذیه، با ایجاد تخلیه جزئی و افزایش عبور جریان، رفته رفته محیط پلاسمایی ایجاد شده و نهایتاً هوا در ولتاژی معادل  $3820 \text{ V}$  قدرت عایقی خود را از دست داده و شکست عایقی کامل می‌شود. پس از آن، بلافاصله جریان افزایش یافته و ولتاژ رو به کاهش می‌گذارد. در این شرایط، محیط هوا به‌صورت کامل یونیزه شده و جریان را از خود عبور می‌دهد. در ادامه، پس از ایجاد محیط پلاسمایی، در هر سیکل نیاز به ولتاژ اولیه‌ی بالا برای شکست عایقی نمی‌باشد و قوس ایجادشده، در صورت پایداری، به سوختن ادامه می‌دهد. اما نکته حائز اهمیت در این مقاله، متغیر بودن پارامترهای فیزیکی قوس الکتریکی و وابستگی آنها به زمان است. در شکل (۱۰)، این وابستگی به زمان با توجه به یکسان نبودن سیکل‌های متوالی ولتاژ قوس، کاملاً مشهود است. علت این امر، شرایط متغیر استفاده‌شده برای خواص فیزیکی هوا در تحلیل اجزاء محدود می‌باشد که با تقریب بسیار بالایی به واقعیت نزدیک است.

بسیار بالاتر است. البته فلزات دیگر موجود در «جدول (۲)» نیز می‌توانند به‌عنوان قراضه مورد استفاده قرار گیرند. همچنین باید به این مساله نیز توجه شود که دمای بسیار بالا و ایجاد پلاسما در هوا رخ می‌دهد و تشکیل پلاسما، خود از عوامل اصلی ذوب قراضه‌ها می‌باشد. زیرا دما در مرکز ستون پلاسما در محدوده  $10000^{\circ}K$  الی  $16000^{\circ}K$  بوده و موجب انتقال حرارت تشعشعی بالا و ذوب شدن قراضه‌ها می‌شود. دمای الکترودها را می‌توان با روش‌های مختلف کاهش داد و از افزایش دمای الکترودها و آسیب دیدن آن‌ها جلوگیری نمود.



شکل (۱۱): مقاومت قوس الکتریکی



شکل (۱۲): نمودار ولتاژ بر حسب جریان قوس الکتریکی

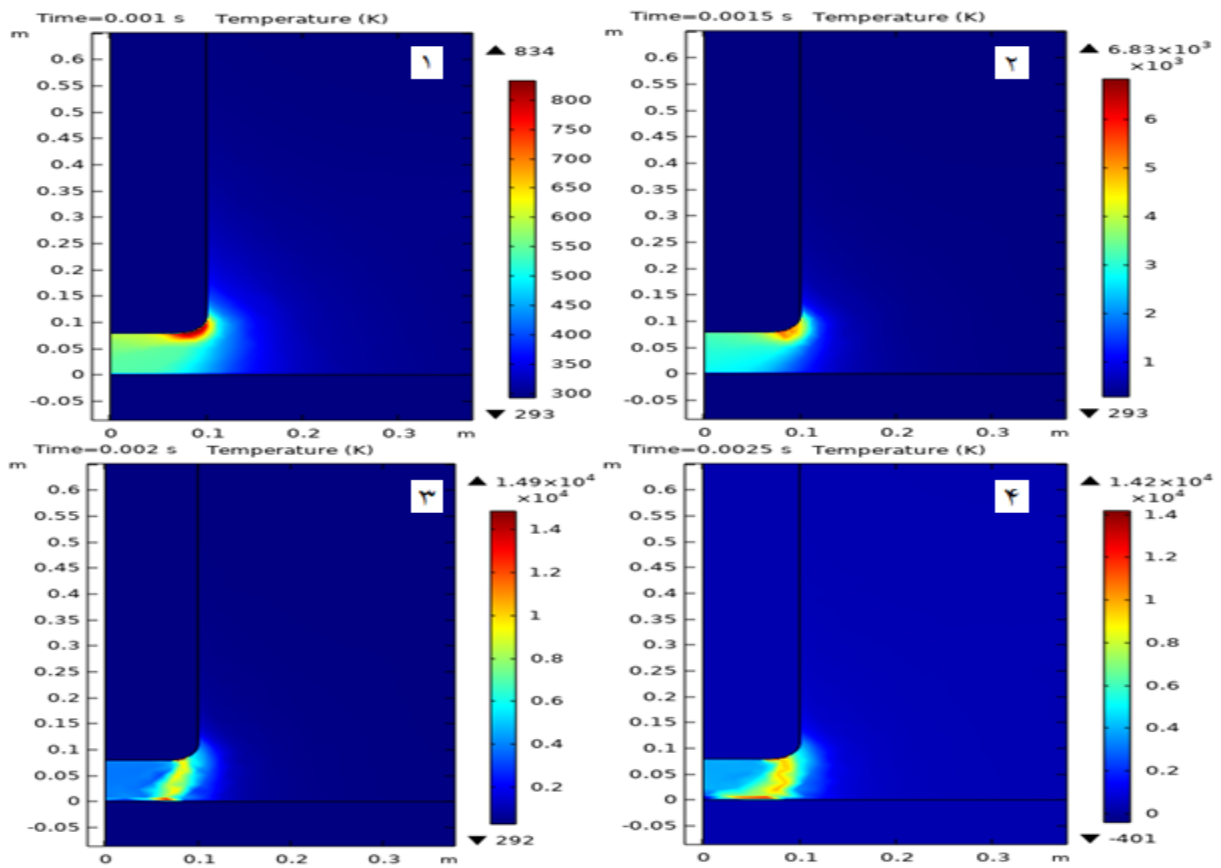
جدول (۲): نقطه ذوب فلزات مختلف

نام فلز	نقطه ذوب به $^{\circ}C$
آهن	۱۵۳۸
آلومینیوم	۶۶۰/۳۲
کروم	۱۹۰۷
مس	۱۰۸۴/۶۸
نیکل	۱۴۵۳
طلا	۱۰۶۴/۱۸
تنگستن	۳۴۲۲

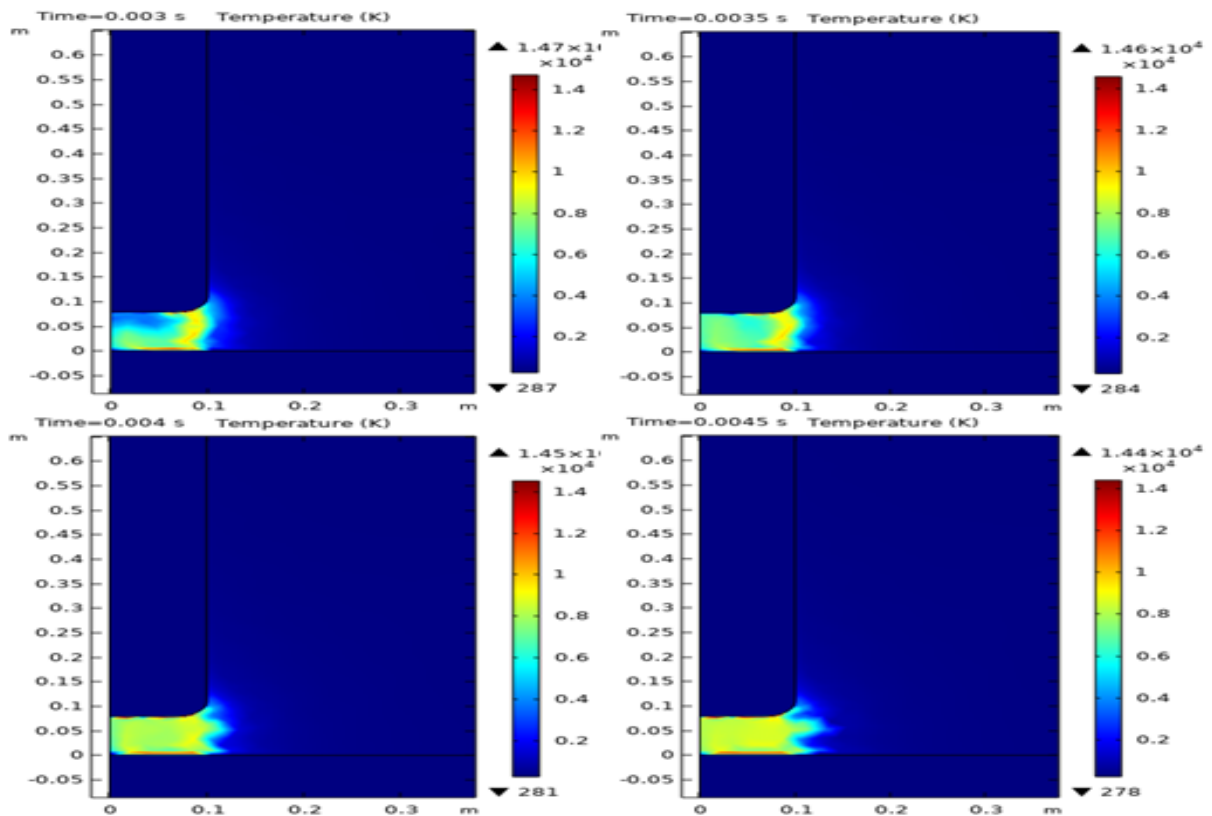
افزایش و کاهش مقاومت قوس به دلیل متناوب بودن منبع تغذیه ورودی است. در شکل (۱۲) نمودار ولتاژ قوس (ولت) برحسب جریان قوس (کیلو آمپر) نشان داده شده است. پس از لحظه‌ی اولین شکست عایقی، جریان به شدت افزایش یافته و قوس الکتریکی مانند یک منبع جریان عمل می‌کند. در سیکل اول ولتاژ افروزش قوس بالاتر است، اما به واسطه ایجاد پلاسما و حرارت، در سیکل‌های بعدی میزان ولتاژ افروزش قوس تا حدی کاهش می‌یابد. با توجه به متناوب بودن ولتاژ، به‌ناچار در لحظه رسیدن به ولتاژ خاموشی قوس، جریان قوس رو به کاهش نهاده تا اینکه به مقدار صفر برسد. پس از آن، همین روال در نیم‌سیکل منفی نیز تکرار می‌شود. همچنین به دلیل متغیر با زمان بودن مقاومت قوس الکتریکی و رفتار آشوب‌ناک قوس، در شکل (۱۲) مسیرهای رفت و برگشت در هر سیکل متفاوت می‌باشد؛ و مقادیر ولتاژ افروزش، ولتاژ خاموشی و جریان قوس در هر سیکل با سیکل بعدی متفاوت است. اما رفتار کلی قوس در سیکل‌های مختلف، مشابه می‌باشد. با توجه به استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر تحلیل اجزاء محدود در حالت وابسته به زمان، در شکل (۱۳) دمای قوس الکتریکی برای زمان‌های مختلف آورده شده است. نحوه نمایش به ترتیب شماره‌های قرار داده شده می‌باشد. در زمان  $0/001$  ثانیه جریان الکتریکی به صورت حرکت از سطح الکترودها، تجمع بیشتر بار در لبه الکترودها، ایجاد میدان قوی تر در لبه در حال یونیزاسیون و تخلیه جزئی در لبه الکترودها می‌باشد و این فرآیند تا زمان  $0/0015$  ثانیه ادامه می‌یابد تا اینکه در لحظه  $0/002$  ثانیه، همانطوری که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، ولتاژ به حدی افزایش می‌یابد که شرایط برای شکست عایقی کاملاً مهیا شده و قوس الکتریکی ایجاد می‌گردد. در این زمان دمای کانال قوس تا  $10000^{\circ}K$  بالا رفته و محیط پلاسمایی شکل می‌گیرد. سپس، در لحظه  $0/0025$  ثانیه، طبق شکل (۱۳)، این فرآیند ادامه یافته و دمای هوا به واسطه افزایش جریان و انتقال حرارت به صورت تابشی و همرفتی، مجدداً بالاتر می‌رود. همانطوری که در شکل (۱۴) قابل ملاحظه است، در ادامه قوس الکتریکی به دلیل شکست عایقی و ایجاد محیط پلاسمایی شروع به پیشروی کرده و به تدریج از لبه بیرونی الکترودها به سمت داخل و مرکز الکترودها حرکت می‌کند.

در زمان  $0/0035$  ثانیه، دمای هوا در قسمت زیرین الکترودها افزایش یافته و در لحظه بعدی، قوس الکتریکی به فضای داخل کشیده می‌شود. دلیل دیگر کشیده شدن قوس الکتریکی به داخل، اعمال شدن نیروی لورنتس است که با توجه به کویل شدن مازول‌های مختلف با یکدیگر، این اثر نیز در نظر گرفته شده و در نتیجه، رفتار ستون قوس به واقعیت بسیار نزدیک می‌باشد. دمای ذوب فلزات مختلف در جدول (۲) آورده شده است. در این مقاله از فلز تنگستن به‌عنوان الکترودها استفاده شده است. زیرا نقطه ذوب آن نسبت به قراضه مورد استفاده که فلز مس می‌باشد،





شکل (۱۳): دمای ستون قوس الکتریکی بر حسب ( $^{\circ}K$ ) در زمان‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۱۵، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۲۵ ثانیه



شکل (۱۴): دمای ستون قوس الکتریکی بر حسب ( $^{\circ}K$ ) در زمان‌های ۰/۰۰۳، ۰/۰۰۳۵، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۴۵ ثانیه

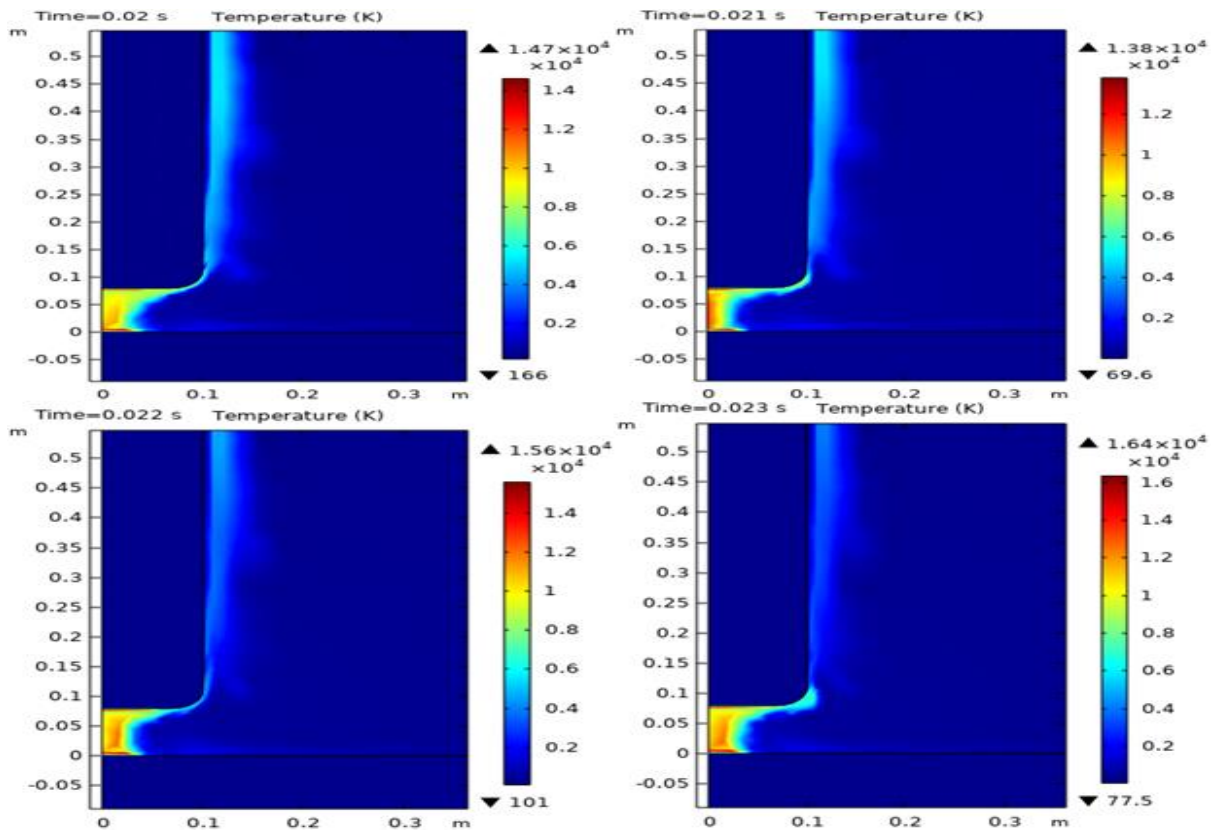
دیگر مؤلفه عمودی این نیرو، حرکت فلوی گاز را در امتداد طول ستون قوس شتاب می‌دهد. جهت برقراری اصل بقای جرم، گاز از اتمسفر اطراف وارد ستون قوس شده و در زیر سطح الکتروود، به دلیل گرادیان ولتاژ زیاد یونیزه می‌شود. فلوی متلاطم پلاسما، سرعت گاز ورودی به مسیر جریان پلاسما را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش انتقال گرما از طریق همرفتی می‌شود. بنابراین انتقال همرفتی گرما توسط فلوی تولیدی خود قوس، در قوس جریان بالایی که آزادانه می‌سوزد، یک نسبت قابل توجهی از توان الکتریکی ورودی به قوس را تشکیل می‌دهد و رفتار قوس نیز تا حد زیادی توسط این فلویی که به‌طور مغناطیسی جاری می‌شود، تعیین می‌گردد.

در شکل (۱۷) فشار ستون قوس الکتریکی برحسب Pa برای زمان‌های مختلف نشان داده شده است. فشار محیط ۱ atm در نظر گرفته شده است. اما با توجه به کوپل بودن ماژول‌های حرارت و سیالات، بر اثر افزایش دما مولکول‌های گاز شروع به منبسط شدن می‌کنند که این پدیده موجب افزایش فشار در ستون قوس می‌گردد. این افزایش فشار در لحظه ۰/۰۲ ثانیه به مقدار اولیه یعنی Pa ۱۰۰۰۰ که همان ۱ atm است نزدیک می‌باشد؛ ولی با ایجاد قوس الکتریکی و تغییر پارامترهای فیزیکی محیط، در زمان ۰/۰۲۲ ثانیه، افزایش فشار تا حد Pa ۱/۸ حاصل می‌شود. فرآیند افزایش فشار با افزایش جریان ادامه می‌یابد و در زمان ۰/۰۲۳ ثانیه به مقدار Pa ۲/۶ می‌رسد.

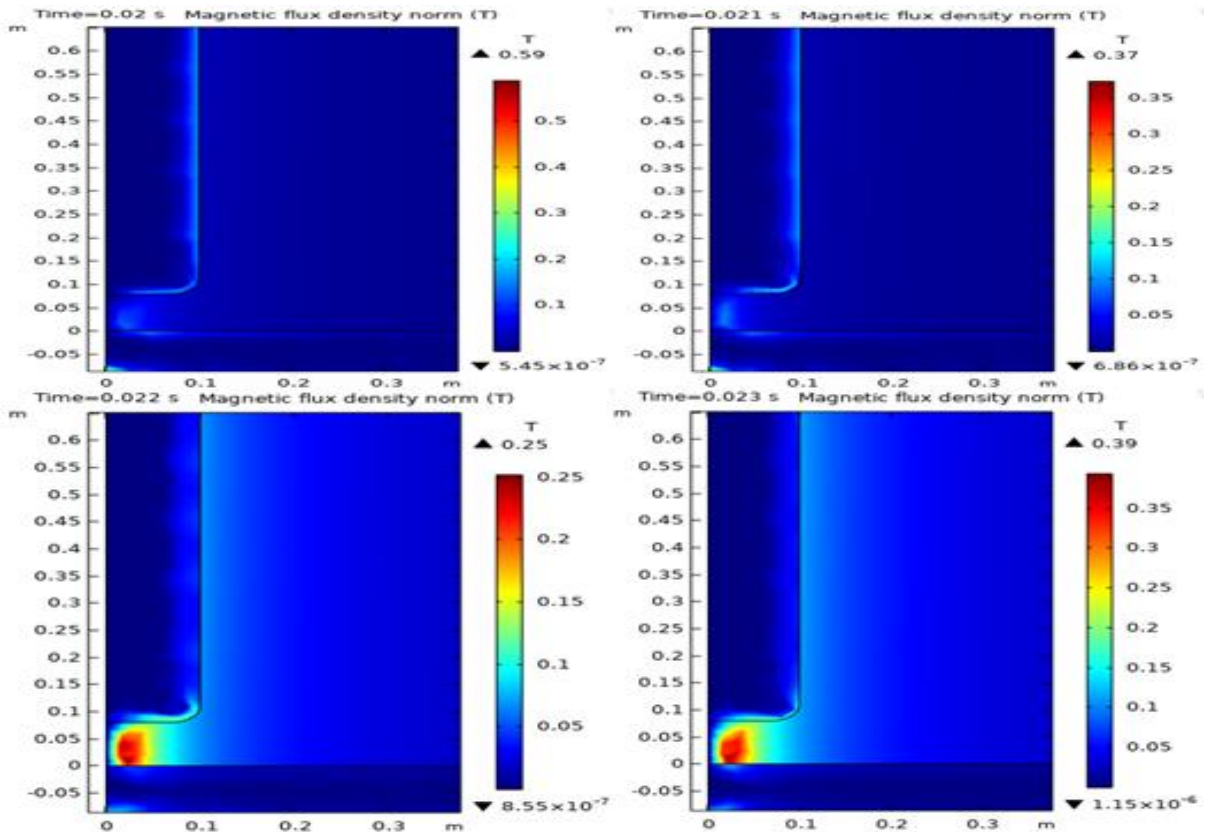
قوس الکتریکی از نظر جریانی به چند طیف مختلف تقسیم می‌شود، که در شکل (۱۸)، نشان داده شده است. در واقع، تخلیه الکتریکی از تخلیه تاریک با جریان  $10^{-1}$  A شروع شده و سپس با جریان  $10^{-5}$  A وارد ناحیه تخلیه تابان گشته و در انتها با افزایش جریان و افروزش قوس، با جریان ۱۸ در ناحیه قوس الکتریکی قرار می‌گیرد. قوس شبیه‌سازی شده از نظر الکتریکی، قوس آزادسوز با جریان بالا می‌باشد. همچنین، از نظر دمایی با توجه شرایط اولیه جدول (۱) و نتایج حرارتی استخراج شده از (شکل ۱۳ و ۱۴) و با توجه به شکل (۱۸)، قوس فوق در ناحیه قوس حرارتی می‌باشد [۲۳]. باید این نکته ذکر شود که، شرایط دمایی ایجاد شده حاصل حل هم‌زمان معادلات مختلف بوده و نتایج به‌دست آمده از نظر جریان الکتریکی و حرارتی نشان‌دهنده صحت شبیه‌سازی می‌باشند. در شکل (۱۹) چگالی جریان برای زمان‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، مسیر عبور جریان در بیرونی‌ترین قسمت الکتروود می‌باشد. سپس از طریق هوا و با توجه با نواحی تشکیل پلاسما و هادی شدن این قسمت، چگالی جریان مسیر خود را از آنجا ادامه می‌دهد و در سطح قراضه‌ها امتداد می‌یابد. این عمل موجب پخش شدن حرارت در سطح قراضه‌ها می‌گردد.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۲-۹) و بررسی پایداری قوس، در دوره تناوب‌های بعدی، فرآیند تشکیل قوس به دلیل وجود پلاسما و افزایش دمای ستون قوس تسریع می‌شود و نیازی به ولتاژ بالای نشان داده شده در ابتدای سیکل شکل (۱۰) نمی‌باشد. دمای قوس در زمان ۰/۰۲ ثانیه نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است. از این شکل قابل استنباط است که پس از ایجاد قوس، دمای اولیه برای دوره تناوب بعدی بالا بوده و محیط یونیزه نیز فراهم می‌باشد. لذا ستون قوس به راحتی می‌تواند در مرکز الکتروود تشکیل گردد و نیازی به ایجاد قوس از لبه‌ی الکتروود نیست. این امر نشان‌دهنده تشکیل پلاسما و تغییر ماهیت فاصله هوایی می‌باشد. در زمان ۰/۰۲۲ ثانیه دمای هسته مرکزی ستون قوس به  $15600^{\circ} K$  می‌رسد و این افزایش دما در لحظات بعدی حتی به  $16400^{\circ} K$  نیز می‌رسد. در واقع، قوس به‌عنوان یک ناحیه پلاسمایی با درجه حرارت بالا در نظر گرفته می‌شود که حامل جریان الکتریکی بین الکتروود تنگستن و حمام فلز مذاب می‌باشد. زبانه‌های قوس نیز گازهای درخشانی هستند که مرتبط با فرآیند قوس می‌باشند اما حامل هیچ جریانی نیستند. همچنین، دما در طول ستون مرکزی قوس نسبتاً ثابت می‌باشد. ولی به‌طور شعاعی از حدود  $15000^{\circ} K$  در مرکز قوس تا حدود  $3000^{\circ} K$  در انتهای درخشندگی زبانه‌های قوس کاهش می‌یابد.

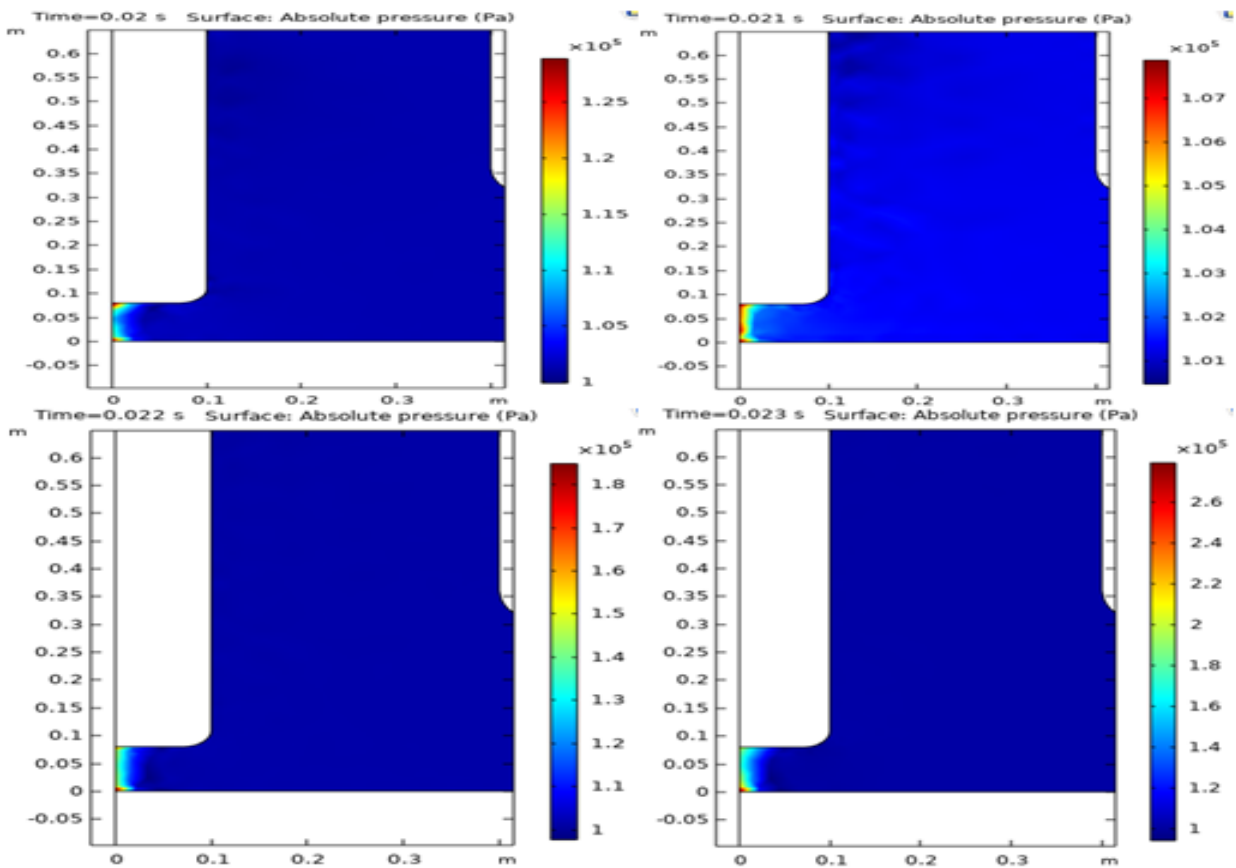
در شکل (۱۶) چگالی میدان مغناطیسی در زمان‌های مختلف آورده شده است. طبق شکل، چگالی میدان در ابتدا بسیار کم می‌باشد که این مسئله به دلیل کم شدن جریان و ولتاژ در زمان ۰/۰۲ ثانیه اتفاق می‌افتد. اما به مرور با افزایش ولتاژ و جریان و ایجاد قوس الکتریکی در محیط پلاسمایی هوا، میدان مغناطیسی افزایش یافته و در زمان ۰/۰۲۲ ثانیه به  $0/25 T$  می‌رسد. با توجه به کوپل بودن ماژول‌های مختلف نرم‌افزار از قبیل انتقال حرارت و مغناطیس و سیالات، تأثیر افزایش حرارت و میدان با افزایش جریان در لحظه ۰/۰۲۳ ثانیه خود را نشان می‌دهد و میدان مغناطیسی ستون قوس به مقدار  $0/39 T$  می‌رسد. به‌عنوان یک نتیجه، می‌توان گفت که یک قوس الکتریکی که در واقع همان فلوی گاز یونیزه شده یا پلاسما می‌باشد، یک میدان مغناطیسی مدور را در اطراف قوس ایجاد می‌کند. برهمکنش میان این میدان مغناطیسی تولیدی توسط خود قوس و قوس جریان بالا، تولید یک نیروی مغناطیسی می‌کند. این نیروی مغناطیسی بر قوس وارد شده و بر شعاع انحنای قوس در حال گسترش عمود می‌باشد. این نیروی مغناطیسی از یک مقدار بزرگ در مجاورت الکتروود که در آنجا چگالی جریان زیاد می‌باشد، به یک مقدار به مراتب کوچک‌تری در نواحی گسترش‌یافته ستون قوس تغییر می‌کند. مؤلفه شعاعی این نیرو تمایل به متراکم کردن و فشردن فلوی گاز یونیزه شده را به طرف مرکز ستون قوس دارد. از طرف



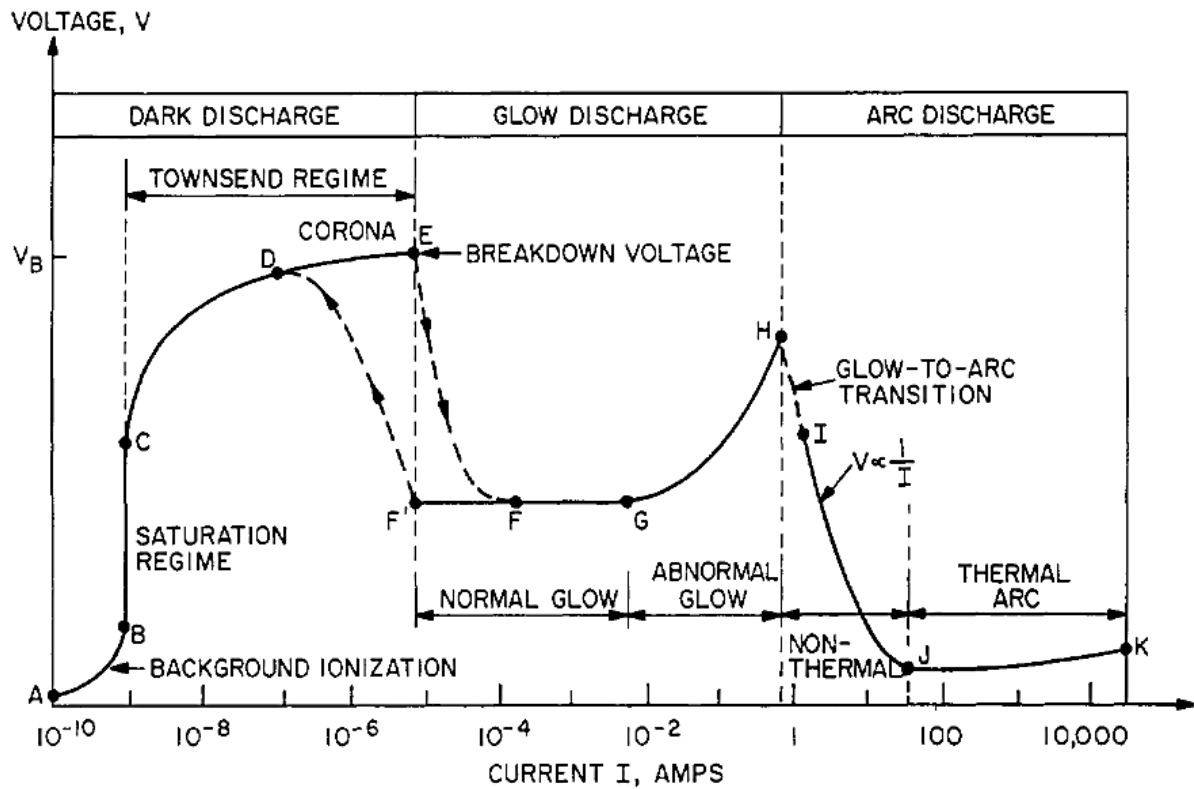
شکل (۱۵): دمای ستون قوس الکتریکی بر حسب (K) در زمان‌های ۰/۰۲، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۳ ثانیه



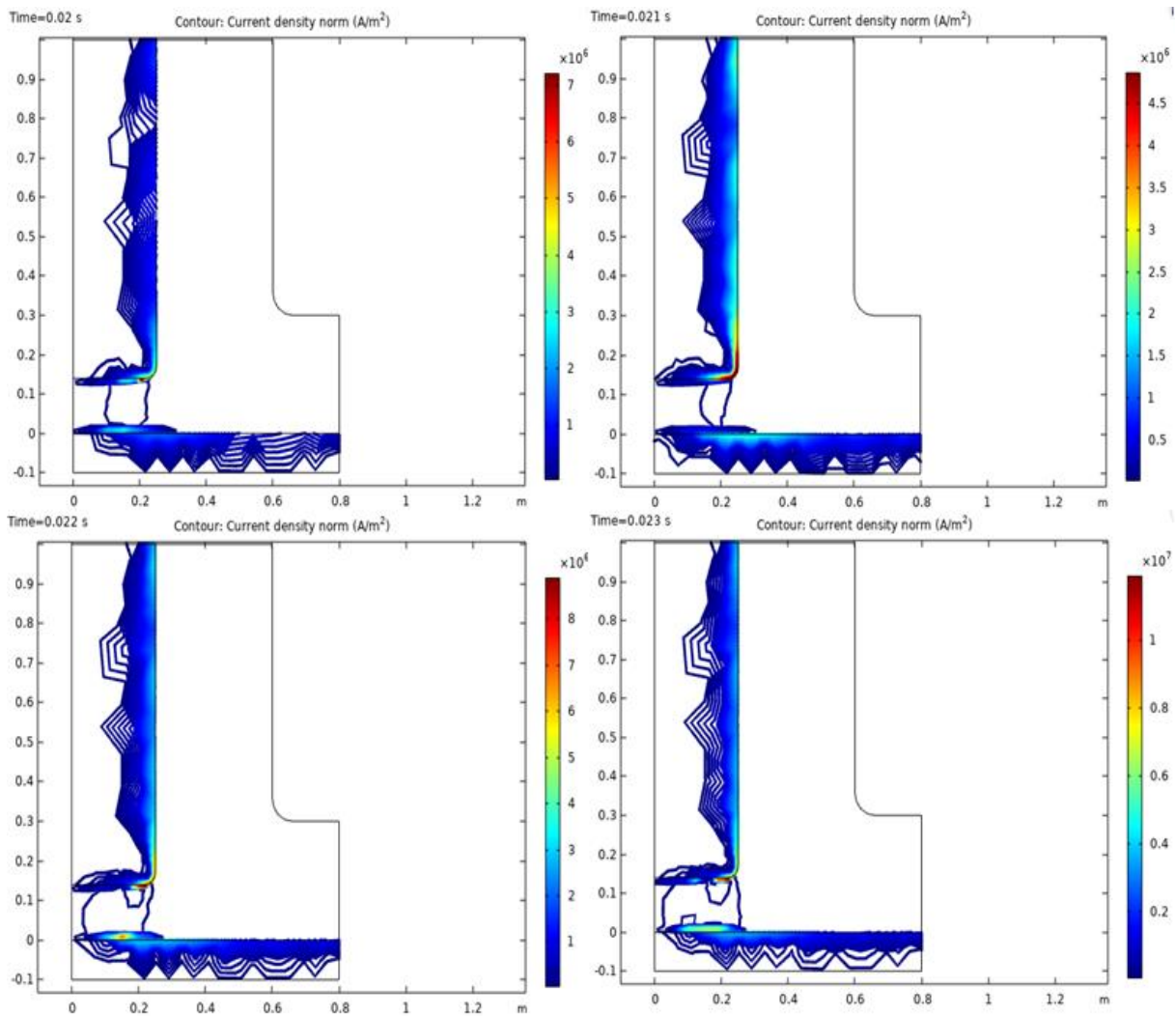
شکل (۱۶): چگالی شار ستون قوس الکتریکی بر حسب (T) در زمان‌های ۰/۰۲، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۳ ثانیه



شکل (۱۷): فشار ستون قوس الکتریکی بر حسب (Pa) در زمان‌های ۰/۰۲، ۰/۰۲۱، ۰/۰۲۲ و ۰/۰۲۳ ثانیه



شکل (۱۸): منحنی دسته‌بندی انواع تخلیه‌های الکتریکی از نظر ولتاژ و جریان به همراه نام‌گذاری نواحی مختلف [۲۳]



شکل (۱۹): چگالی جریان الکتریکی بر حسب  $(A/m^2)$  در زمان‌های  $0.02$ ،  $0.021$ ،  $0.022$  و  $0.023$  ثانیه

است. لذا در این ناحیه قوس ناپایدار رخ نمی‌دهد.

در یک قوس پایدار، ستون قوس مانند یک مکنده هوا یا یک پمپ الکترومغناطیسی عمل می‌کند و هوا را در ناحیه اطراف کناره‌های الکترود به درون ستون قوس می‌کشد و آنگاه هوای مکیده شده را تا درجه حرارت‌های بالایی (حدود  $15000^\circ K$ ) گرم می‌کند. سپس آن را به صورت یک شاره با آنتالپی زیاد به طرف فلز ذوب شونده پس می‌زند. دامنه ضربه این جریان شدید پلاسما از رابطه تئوری زیر قابل حصول می‌باشد [۲۴].

$$P \approx (1.5 \times 10^{-7}) I^2 \quad (9)$$

برای مثال، در جریان  $10\text{ kA}$  مقدار ضربه برابر با  $15\text{ N}$  و در جریان  $100\text{ kA}$  اندازه ضربه برابر  $1500\text{ N}$  می‌باشد. در عمل، به سبب برهم‌کنش میان میدان مغناطیسی ناشی از جریان مدار تغذیه کوره قوس واقع در خارج کوره، و جریان خود قوس، و نیز

همچنین به واسطه وجود مسیر به زمین مدار که در کوره‌های تک‌فاز واقعی از طریق کف کوره و مسیرهای ایجاد شده در جداره مواد نسوز کوره وجود دارد، مسیر جریان به زمین مدار برقرار می‌شود. لذا در کف کوره همان‌طور که در شکل (۱۹) نیز نشان داده شده است، زمین مدار در قسمت زیرین در نظر گرفته شده و جریان از این طریق مسیر خود را می‌بندد.

قابل ذکر است که در این مقاله هدف شبیه‌سازی قوس الکتریکی پایدار بوده است. زیرا، قوسی که پایداری آن توسط شرایط دمایی، مغناطیسی، سیالاتی و منحنی‌های الکتریکی تضمین گردد، از ابعاد الکترود آن می‌توان به‌عنوان نمونه‌های مورد استفاده در صنعت بهره جست. همچنین در صورت تضمین پایداری، میزان هارمونیک‌ها و فلیکر ولتاژ تحمیل‌شده به شبکه کاهش می‌یابد. از طرفی با توجه به «شکل ۱۸» و نتایج «شکل ۹» قوس الکتریکی در ناحیه قوس جریان بالا و پلاسمای حرارتی

مختلف موجود در نرم‌افزار از قبیل مدار الکتریکی، جریان الکتریکی، میدان مغناطیسی، انتقال حرارت، سیالات، پلاسما و کوپل نمودن این مازول‌ها با یکدیگر، رفتار الکتریکی یک قوس AC شامل شکل موج ولتاژ و جریان قوس و نیز رفتارهای فیزیکی قوس اعم از رفتار ترمودینامیکی، مغناطیسی و سیالاتی این پدیده بررسی و ارائه شده است. همچنین تخلیه‌های الکتریکی با شرایط جریانی و گرمایی ارائه و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است. در مجموع در این مقاله، تحلیل و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی، شامل شرایط حرارتی، مغناطیسی، سیالاتی، پلاسمایی، پخش جریان در سطح فلز و منحنی‌های الکتریکی شامل (ولتاژ، جریان و مقاومت قوس)، که همگی نشان‌دهنده ویژگی‌ها و مشخصه‌های فیزیکی یک قوس کاملاً پایدار و منطبق بر شرایط موجود در کوره قوس الکتریکی می‌باشند، ارائه شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۶. مراجع

- [1] M. Golrokh joubeni and A. Dehestani Kolagar, "Design, Simulation, and Implementation of an Electric Induction Heater up to 300 °C," Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 7, No. 2, pp. 75-86, 2020, (in Persian).
- [2] S. Lupi, "Fundamentals of Electroheat," Electrical Technologies for Process Heating. Springer. Switzerland, 2017.
- [3] Y. N. Toulouevski and I. Y. Zinurov, Innovation in electric arc furnaces. Springer, 2010.
- [4] Matlabi, Power Electronics: Power Circuits, Command Circuits, Induction Furnaces (Industrial Electronics), 2000, (in Persian).
- [5] B. Rodríguez-Medina, "Parameters extraction tool for high-pressure gas arc models in high-voltage circuit breaker simulations," University of Puerto Rico, Mayaguez (Puerto Rico), 2004.
- [6] S. Golestani and H. Samet, "Generalised Cassie-Mayr electric arc furnace models", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 13, pp 3364-3373, 2016.
- [7] K. Jung, Y. Suh, T. Kim, T. Park, and Y. Lee, "Arc stability control of a high-power thyristor rectifier system in a DC arc furnace," IEEE Transactions on Power Electronics, vol: 29, no: 12, pp 6342-6351, 2014.
- [8] A. Kiyomarsi, A. Nazari, M. Ataei, H. K. Beheshti, and H. Karimi, "Three dimensional analysis of an AC electric arc furnace," in 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp 3697-3702, 2009.
- [9] Y. Lee, H. Nordborg, Y. Suh, and P. Steimer, "Arc stability criteria in AC arc furnace and optimal converter topologies," in APEC 07-Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp 1280-1286, 2007.
- [10] I. Mc Dougall, "Finite element modelling of electric currents in AC submerged arc furnaces," 2007.
- [11] Y. A. Tesfahunegn, G. Saevarsdottir, T. Magnusson, and M. Tangstad, "The effect of frequency on current distributions inside submerged arc furnace", in 2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), pp 1-4, 2018.

به دلیل نیروهای دافعه‌ی بین قوس‌ها که حامل جریان سه‌فاز به داخل کوره هستند، قوس به‌طور غیرعمودی به سوی حمام مذاب حرکت می‌کند. در سطح مذاب، آنجا که محل برخورد با ستون قوس غیر عمودی است، چگالی توان بسیار بالا می‌باشد (در حدود  $100 \text{ kW/cm}^2$ ) به‌طوری‌که، فلز موجود در کوره توانایی جذب همه این مقدار انرژی را ندارد. بنابراین جریان پلاسمای دارای انحراف، از سطح فلز مذاب منعکس شده و در یک جهت غیر عمودی به طرف دیواره کوره حرکت می‌کند. شاره پلاسما در مسیرش به سوی دیواره کوره، افت دمایی از سطح دمای قوس به سطح دمای کوره داشته و تا حدودی سرد می‌شود، که در واقع این امر به دلیل مکش گازهای مجاور می‌باشد. در این فرآیند، اجزاء یونیزه شده پلاسما مجدداً ترکیب شده و به اتم‌های خنثی و سپس به مولکول‌ها تبدیل می‌شوند. این عمل ترکیب مجدد، به میزان بسیار زیادی انرژی آزاد کرده و نشان‌دهنده انتقال توان همرفتی از قوس به زبانه‌های آتشی ایجاد شده است. این زبانه‌های آتش با دیواره کوره تصادم کرده و موجب افزایش دمای دیواره جانبی کوره می‌شوند که به ناحیه نقاط داغ موسوم است. قوس الکتریکی به سطح مذاب برخورد کرده و همچنین موجب پرتاب شدن و برخورد سرباره‌ها و مواد مذاب با دیواره جانبی کوره می‌شود که این امر باعث وارد آمدن آسیب‌های مکانیکی و خوردگی شیمیایی دیواره کوره می‌شود. می‌توان نتیجه‌گیری نمود که مسبب اصلی پدیده‌ی نقاط داغ، تشعشع از قوس به طرف دیواره‌های کوره به‌علت نیروهای الکترومغناطیسی می‌باشد. بنابراین جهت افزایش عمر دیواره‌های کوره بایستی به‌نوعی از شکل‌گیری نقاط داغ ممانعت به عمل آورد. جهت حصول این امر، طراحی مناسب کوره قوس جهت کمینه نمودن انحراف قوس بایستی به‌کار رود. قابل ذکر است که تاکنون طرح پیشگیرانه مهمی جهت جلوگیری از تشکیل نقاط داغ در کوره‌های قوس AC ارائه نشده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی کوره قوس الکتریکی AC توسط نرم‌افزار قدرتمند تحلیل اجزای محدود COMSOL Multiphysics ۵,۴ انجام شده است. هدف از شبیه‌سازی پدیده قوس الکتریکی، بررسی پایداری قوس و شرایط ایجاد و تداوم محیط پلاسمایی بوده است. در واقع در صورت ناپیوستگی در جریان و ایجاد سطح صفر جریانی، شاهد تشدید فلیکر ولتاژ و افزایش هارمونیک‌های ولتاژ خواهیم بود که این موارد می‌توانند اثر سوء و نامطلوبی بر کیفیت شبکه برق بگذارند. از این‌رو، نیاز به جبران‌سازی و صرف هزینه‌های گزاف می‌باشد. در این مقاله، با استفاده از مازول‌های

- [19] X. Li, D. Chen, R. Dai, and Y. Geng, "Study of the influence of arc ignition position on arc motion in low-voltage circuit breaker," *IEEE transactions on plasma science*, vol: 35, no: 2, pp 491-497, 2007.
- [20] S.-H. Rau, Z. Zhang, and W.-J. Lee, "3-D magnetohydrodynamic modeling of DC arc in power system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol: 52, no: 6, pp . 4549-4555, 2016.
- [21] S.-H. Rau and W.-J. Lee, "DC arc model based on 3-D DC arc simulation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol: 52, no: 6, pp 5255-5261, 2016.
- [22] A. Dehestani Kolagar, M. Alizadeh Pahlavani, and H. Ebrahimi, "Arc Power Calculation in DC Electric Arc Furnaces," *Journal of Applied Electromagnetics*, Vol. 3, No. 4, pp. 19-28, 2016, (in Persian).
- [23] G. Miley, "Industrial Plasma Engineering", Volume:1 Principles and Volume: 2 Application to Nonthermal Plasma Processing, by J. Reece Roth. IOP Publishing, 2001. ISBN 750308257, *Journal of Plasma Physics*, vol: 68, no: 3, pp 237-243, 2002.
- [24] M. Sharifi, "Magnetic field modelling of a direct current electric arc furnace," 1995.
- [12] F. Illahi, I. El-Amin, and M. U. Mukhtiar, "The application of multiobjective optimization technique to the estimation of electric arc furnace parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol: 33, no: 4, pp 1727-1734, 2017.
- [13] N. Arzpeyma, "Modeling of Electric Arc Furnaces (EAF) with electromagnetic stirring," ed, 2011.
- [14] M. Peens, "Modelling and control of an electrode system for a three-phase Electric Arc Furnace," University of Pretoria, 2007.
- [15] H. Samet, T. Ghanbari, and J. Ghaisari, "Maximum performance of electric arc furnace by optimal setting of the series reactor and transformer taps using a nonlinear model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol: 30, no: 2, pp 764-772, 2015.
- [16] Y. Suh, H. Park, Y. Lee, and P. K. Steimer, "A power conversion system for AC furnace with enhanced arc stability," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol: 16, no: 6, pp 2526-2535, 2010.
- [17] V. Abbasi, A. Gholami, and K. Niayesh, "Impact of External Magnetic Field on Plasma Current Layer Deformation During Contact Opening in Medium-Voltage Puffer SF6 Circuit Breaker," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol: 40, no: 6, pp 1759-1767, 2012.
- [18] Y. A. Tesfahunegn, T. Magnusson, M. Tangstad, and G. Saevarsdottir, "The Effect of Pitch Circle Diameter of Electrodes on Current Distributions in Submerged Arc Furnace," in 2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), pp 1-4, 2018.

## **Finite Element-Based Simulation of Low-Frequency AC Arc Furnace and Extraction of Arc Physical Characteristics to Investigate the Stability of Electric Arcs with Dynamic Behavior**

**M. Golrokh joubeni<sup>1</sup>, A. Dehestani Kolagar<sup>\*2</sup>, M. R. Alizadeh Pahlavani<sup>3</sup>**

Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

(Received: 29/02/2020; Accepted: 11/06/2020)

### **Abstract**

*Electric arc furnaces are the largest concentrated, nonlinear and chaotic loads in power distribution networks. Magnetic modeling and simulation of such loads have the least error with respect to the physical nature of the arc and play a significant role in the accuracy of the studies. In this paper, the electromagnetic simulation of a low-frequency AC arc furnace is performed based on finite element method, utilizing the powerful COMSOL Multiphysics software. The finite element method for magnetic, thermal and dynamic analysis is a commonly used method and its capability in various physical fields has been repeatedly proven. In this finite element simulation, the corresponding electrical circuit, the electrode physical dimensions, the initial thermal condition and the furnace power supply system are also considered. By simultaneous solving of different physical equations in COMSOL Multiphysics software and applying the magnetohydrodynamic principles, Ampere's law, Ohm's law, and Maxwell's equations, the arc model and plasma generation are investigated. Then, by extracting the results and comparing them with previous studies, the stability of the arc is evaluated. A stable arc decreases the harmonic components and also diminishes the voltage flicker severity imposed on the grid and thus, reduces the need for compensator equipment.*

**Keywords:** Electric Arc Furnace, Plasma, Arc Stability, Thermal Plasma, High Current Arc, Dynamic Arc

---

\* Corresponding author E-mail: a\_dehestani@mut.ac.ir