

ارزیابی پارامترهای موثر هندسه‌ی نازل بر عملکرد مشعل پلاسمایی حرارتی KW100 از

نوع غیرانتقالی با استفاده از نرم‌افزار کامسول

INC29-1344

زهرة رهبر عالم^۱، نیکودارستانی فراهانی^{۲*}، فریدون عباسی دوانی^۱

۱. کاربردپرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران-ایران

۲. پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۳۳۹۱۴۱۵۵، تهران-ایران

چکیده:

روش‌های مختلفی در آمایش و تثبیت پسماند نیروگاه‌های هسته‌ای بکار گرفته می‌شود. بهترین روش آمایش ذوب کردن است. یکی از تجهیزات مورد نیاز برای آمایش ذوب کردن که به عنوان منابع گرمایشی به کار می‌رود مشعل پلاسمایی است. فناوری ذوب پلاسمای حرارتی با توجه به داشتن ویژگی‌هایی نظیر دمای بالا و چگالی انرژی بالا قابلیت‌های گسترده‌ای در تحقیقات آمایش پسماند هسته‌ای دارد. در این مطالعه با تعریف پارامترهای هندسه‌ای تاثیرگذار نازل بر روی دمای خروجی مشعل مانند طول نازل، قطر آن و نزدیک ترین فاصله بین الکترودها، تاثیر تغییرات آن‌ها بر روی دمای خروجی مشعل طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عملکرد پارامترها از نرم افزار کامسول استفاده شده است. نتایج بدست آمده با تحلیل فیزیکی رفتار مشعل و مشاهدات تجربی مراجع مختلف تطابق دارد. با افزایش طول نازل با وجود کشیده‌تر شدن شعله، دمای خروجی مشعل کاهش می‌یابد. تغییر قطر خروجی نازل تاثیر به سزایی در آنتالپی و توزیع دمای مشعل در خروجی نازل و سرعت پلاسمای و موقعیت محوری پلاسمای تشکیل شده در مشعل می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: مشعل پلاسمایی، آمایش پسماند پرتوزا، نرم افزار کامسول.

Evaluation of effective parameters of nozzle geometry on burner outlet temperature performance on non-transfer DC plasma torch using by COMSOL simulator code**Zohre Rahbar Alam^{1*}, Nikoo Darestani Farahani², Fereydoun Abbasi Davani¹**

1. Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, P.O.Box:1983969411, Tehran, Iran

2. Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box 14155-1339, Tehran, Iran

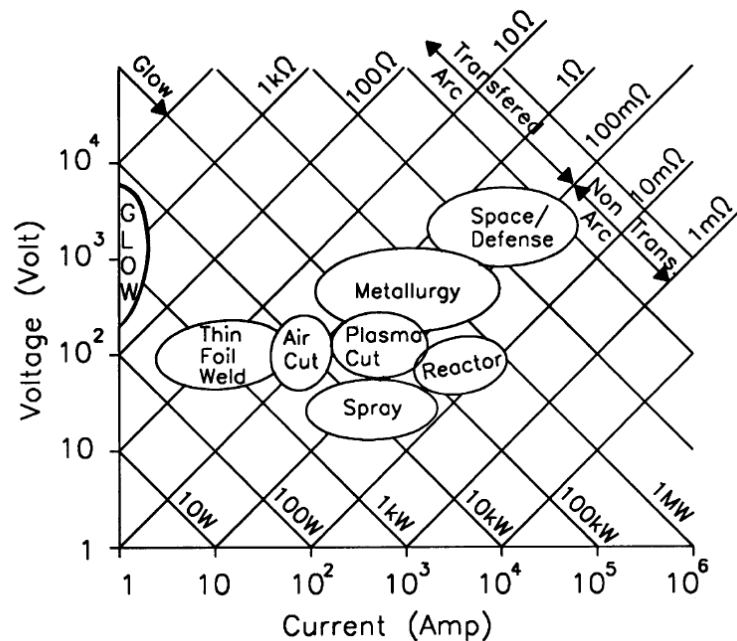
Abstract:

Various methods are used in the incarnation and vitrification of nuclear power plant waste. The best method of disposal is melting. One of the equipment required for the purpose of melting is a plasma torch used as a heating source. Thermal plasma melting technology is considered in nuclear waste disposal research due to its features such as high temperature, high energy density, and wide capabilities. In this study, the effective geometrical parameters of the nozzle on the outlet temperature of the torch, such as the length of the nozzle, its diameter and the closest distance between the electrodes are described and the effect of their changes on the outlet temperature of the designed torch has been investigated. To check the performance of the parameters, the COMSOL software is used. The obtained results are consistent with the physical analysis of the behavior of the torch and the experimental observations of different sources. The torch outlet's temperature decreases by increasing the length of the nozzle despite the longer flame. Changing the diameter of the nozzle outlet has a significant effect on the enthalpy and temperature distribution of the torch at the nozzle outlet and the plasma speed and axial position of the plasma formed in the torch.

Keywords: plasma torch; radioactive nuclear waste treatment; Comsol Multiphysics software.

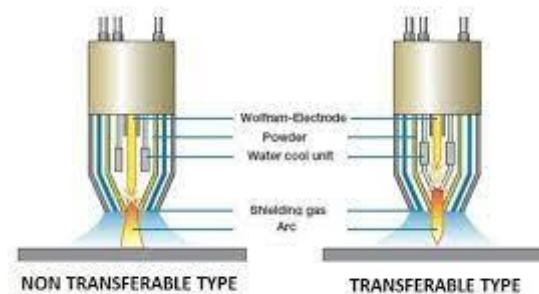
1. مقدمه

تکنولوژی پلاسما با ایجاد تکنیک‌های جدید مکانیکی، شیمیایی و فرآیندهای متالورژی، جهت و انگیزه‌ای نو برای بسیاری از کاربردهای صنعتی ایجاد کرده است. به عنوان مثال کاربردهای مختلف مشعل‌های پلاسمایی بر حسب مقدار ولتاژ و آمپر مشعل در شکل ۱ ارائه شده است. در این نمودار امیدانس مشعل و سطوح توان نیز مشخص شده‌اند. مشعل‌های آرک انتقالی برای برش پلاسمایی، جوشکاری، ذوب کردن، تبخیر و پردازش سطح و بهبود آن استفاده می‌شوند. مشعل‌های آرک غیرانتقالی برای اسپری، گرمایش گاز، سنتز پلاسمایی، تجزیه، رسوب، تولید پودرهای ریز^۳، CVD بر پایه پلاسما^۴ و پردازش زباله پلاسمایی^۵ استفاده می‌شوند [۱].



شکل ۱- نمودار جریان- ولتاژ به همراه نرخ توان و امیدانس مشعل‌های پلاسمایی DC با توجه به نوع کاربری [۱]

اجزاء اصلی مشعل‌های پلاسمایی شامل الکترودها، منبع تغذیه، برد اندازه‌گیری و کنترل جریان الکتریکی و همچنین تجهیزات مرتبط با تأمین و کنترل گاز کاری می‌باشند [۲].
با توجه به کاربرد و جنس قطعه کار یا ماده مورد پردازش از نظر رسانایی الکتریکی، دو ساختار اصلی مشعل پلاسمایی DC با عناوین مشعل‌های انتقالی^۶ و مشعل‌های غیر انتقالی^۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲).



- ¹ dissociation
- ² sintering
- ³ Fine powder preparation
- ⁴ Plasma assisted CVD
- ⁵ Plasma waste-treatment
- ⁶ Transferred torches
- ⁷ Non-transferred torches

شکل ۲. مشعل آرک پلاسمایی در مد کارکرد الف) انتقالی و ب) غیر انتقالی [۳].

یک مشعل پلاسمایی متداول، از یک کاتد میله‌ای تنگ‌ستنی و یک آند مسی که با آب خنک می‌شود و به شکل یک نازل^۱ ساخته شده است، تشکیل شده است. دو الکتروود توسط یک عایق^۲ که همچنین یک ورودی برای گاز پلازما دارد از هم جدا شده‌اند. هنگامی که گازی در شکاف الکتروود وارد می‌شود و آرک DC بین الکتروودها اتفاق می‌افتد، آرک در امتداد نازل هل داده می‌شود که منجر به دمای بالا و شعله‌ای با سرعت بالا^۳ می‌شود. نیروهای الکترومغناطیسی و تثبیت گاز^۴، ستون آرک را منقبض می‌کنند و پلازما را تا دماهایی در حدود ۲۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌کنند [۳].

آند یا نازل در دستگاه قوس الکتریکی پلازما نقش یک رساننده الکتریکی را دارد و جریان قوس الکتریکی را از خود عبور می‌دهد. برای ساخت نازل‌ها از فلزات با رسانندگی حرارتی بالا استفاده می‌شود. البته سعی می‌شود جهت جلوگیری از ذوب شدن نازل و خوردگی آن، با سیستم‌های آب گرد نازل‌ها را نیز خنک کرد. توزیع شار گرمایی انتقال یافته و حرکت نقطه الصاق قوس الکتریکی بر روی آند به میزان صافی سطح آند، وضعیت اکسیداسیون و گاز پلازما بستگی دارد. در مشعل‌های پلاسمایی، حرارت تولید شده در آند بسیار زیاد است. شارش حرارت در نازل می‌تواند به اندازه ۱۶۰ وات بر میلی‌متر مربع باشد. مناسب‌ترین انتخاب برای جنس آند، مس با خلوص بالا است که دارای هدایت حرارتی بسیار خوبی است. سایر مواد از قبیل گرافیت و فلزات سخت نیز استفاده می‌شوند. هر ماده مقاوم حرارتی^۵ دیگری با رسانایی حرارتی پایین‌تر که یا به‌طور جداگانه استفاده شود یا به عنوان ابزار کمکی قرار داده شود، طول عمر نازل را کاهش می‌دهد. روزنه‌ی نازل^۶ بر اساس پایدارسازی ستون پلاسمایی طراحی می‌گردد و قطر آن چگالی توان را تعیین می‌کند. تکنیک افزایش بازده مشعل پلاسمایی بر اساس افزایش انقباض است. این کار به‌طور مؤثری چگالی جریان و همچنین میدان الکتریکی را افزایش می‌دهد [۱].

رفتار قوس الکتریکی از نظر نقطه الصاق قوس به نازل (آند) با هدف طراحی نوع نازل مورد توجه است. از نظر نقطه الصاق قوس الکتریکی به آند، نازل به دو دسته ی ۱- سطح آند عمود بر محور قوس الکتریکی، ۲- سطح آند موازی بر محور قوس الکتریکی تقسیم می‌شود. ساختار ۲ که سطح نازل موازی با محور قوس الکتریکی است، معمولاً برای مشعل‌های پلاسمایی حرارتی غیرانتقالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این ساختار کاتد به صورت مخروطی و آند هم یک نازل و اگر است. معمولاً هر دو الکتروود توسط آب گرد خنک می‌شود [۴].

طراحی نازل و همچنین نحوه تزریق گاز پلازما دو عاملی هستند که در پایداری قوس، توزیع دما و سرعت انتقال جت تأثیر به‌سزایی دارند.

برای قوس متحرک معمولاً دو پیکربندی برای نازل پیشنهاد می‌شود:

۱- پیکربندی چندپله^۷.

۲- پیکربندی استوانه‌ای که خود به واگرا- همگرا یا استوانه‌ای لوله‌ای تقسیم می‌شود.^۸

پیکربندی و تغییرات طول نازل و قطر خروجی آن تأثیر مستقیمی بر روی بازده و دمای خروجی شعله از مشعل دارد. همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود در نوع پیکربندی نازل واگرا، انتقال دمای شعله در مسافت بیشتری در طول محوری رخ می‌دهد [۴].

¹ nozzle

² insulator

³ High velocity flame

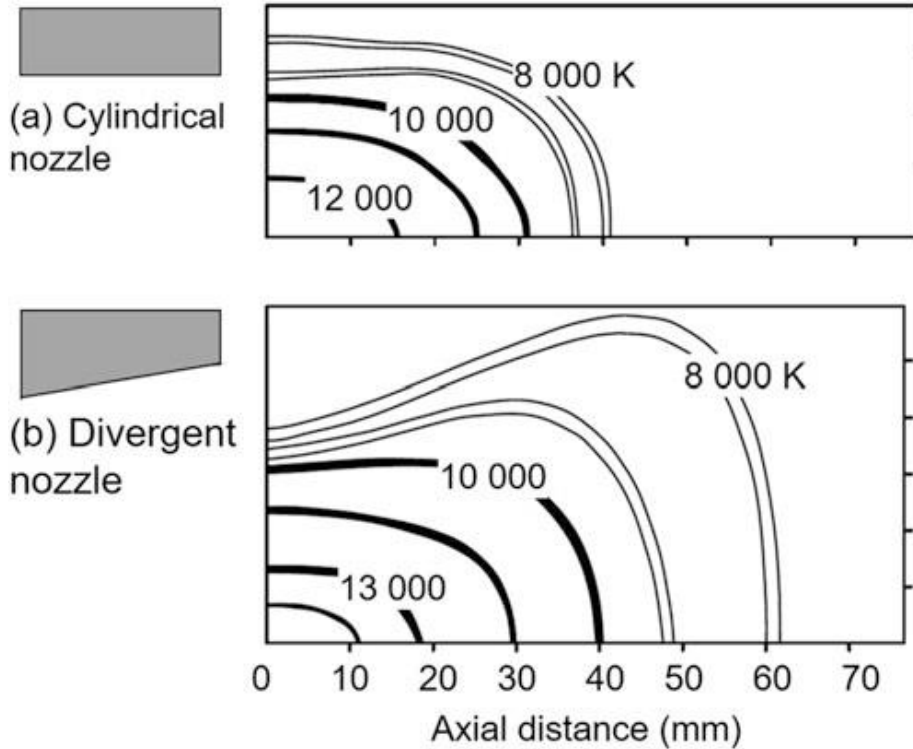
⁴ Gas stabilization

⁵ Heat-resistant

⁶ Nuzzle orifice

⁷ Stepped nozzle

⁸ Cylindrical nozzle -Divergent nozzle



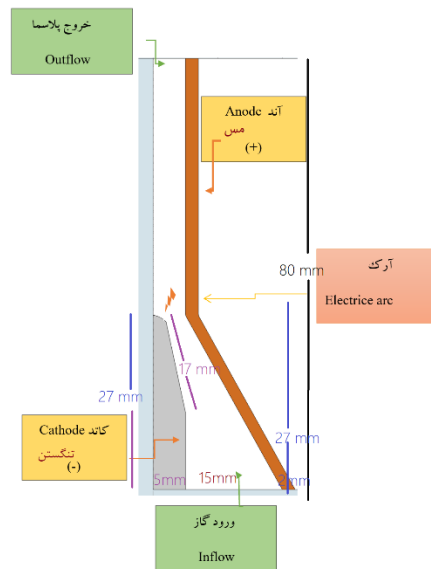
شکل ۳. تغییرات دمایی یک پلاسمای جت با دو پیکربندی نازل متفاوت (a) پیکربندی استوانه‌ای لوله‌ای (b) پیکربندی استوانه‌ای واگرا [۴]

۲. روش کار

یک مشعل آرک پلاسمایی با توان حدود 100 kW و از نوع غیرانتقالی با طراحی نازل استوانه‌ای واگرا طراحی شده است. از سیستم خنک‌سازی آبی نیز برای خنک کردن پوشش الکتروود، الکتروودها و بدنه مشعل به طور جداگانه استفاده می‌شود. به منظور امکان‌سنجی مشعل طراحی شده، این مشعل توسط نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 6.0 شبیه‌سازی می‌شود. ابعاد این مشعل در شکل ۴ آمده است.

شبیه‌سازی این مشعل در فضای 2D Axisymmetric با استفاده از ماژول‌های Magnetic Field, Plasma, Electric current, Laminar Flow و Heat Transfer به همراه فضای چند فیزیکی و حالت مطالعه‌ی Stationary انجام می‌شود.

برای تعریف مشعل پلاسمایی با گاز کاری آرگون در نرم‌افزار، جنس الکتروود کاتد تنگستن و شکل آن استوانه‌ای همراه با پخ شدگی سر آن در نظر گرفته می‌شود. جنس نازل نیز از مس و شکل آن استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴) [۶].



شکل ۴. الف) ابعاد مشعل در شبیه سازی کامسول به همراه معرفی اجزای مشعل پلاسمایی در شبیه سازی کامسول

به طور کلی با توجه به نسبت طول نازل (L) به قطر خروجی (D) نازل، دو مدل نازل وجود دارد: نسبت L/D تقریباً برابر با ۱ ($L/D \sim 1$) و نسبت L/D بزرگتر از یک ($L/D > 1$). نوع اول، قطر بزرگتری دارد و برای مشعل‌های پلاسمایی نوع انتقالی مناسب است. نوع دوم نازل، شدت خروجی بالاتری دارد و شعله کشیده و متمرکز دارد و برای دستگاه‌های غیر انتقالی مناسب‌تر است [۴، ۵]. مشعل طراحی شده در این تحقیق از نوع دوم $L/D > 1$ می‌باشد. در مطالعه‌ای که در سال ۱۹۹۷ توسط آقای Change و همکارانش انجام شده است، تاثیر پارامترهای هندسه‌ای نازل در حالت غیر تعادلی (دمای الکترون‌های پلاسما با دمای یون‌های سنگین برابر نیستند) مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر قطر نازل در دو اندازه بررسی شده است. نتایج اعلامی نشان می‌دهد که این پارامترهای هندسی به طور مستقیم بر دمای خروجی شعله، کاهش دمای سریع پلاسما در مسافت طول محوری و سرعت انتقالی پلاسما تاثیرگذار است [۶]. در سال ۲۰۰۴ نیز در مطالعه‌ای که توسط آقای Choi و همکارانش منتشر شد، اثرات پارامترهای هندسه‌ای نازل، پیکربندی نازل و نحوه‌ی ورود هوا به درون جت پلاسمایی در حالت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. در این پژوهش با بررسی دو پیکربندی برای نازل و بررسی دو قطر مختلف برای نازل استوانه‌ای و اگرچه به این نتیجه رسیده‌اند که نازل استوانه‌ای و اگر با قطر کوچکتر با توجه به توزیع آنتالپی و توزیع دمای بدست آمده، دارای راندمان بالاتری نسبت به نازل استوانه‌ای و اگر با قطر بزرگتر است [۷].

در این شبیه سازی مسئله در حالت دو بعدی متقارن در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌گردد جریان پلاسما متقارن است. تشکیل نقطه الکتریکی^۱ در سطح آند و فرآیند اتصال مجدد روی همان آند در نظر گرفته نمی‌شود؛ ضمناً شرایط تعادل ترمودینامیک محلی فرض می‌گردد، در نتیجه دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین مساوی است؛ نیروهای گرانش نیز در نظر گرفته نمی‌شوند. جریان پلاسما با استفاده از معادلات مگنتوهیدرودینامیک در دستگاه مختصات استوانه‌ای r, z مدل می‌گردد [۸-۱۵]. پلاسما آرگون تعریف شده از نظر نوری، نازک فرض می‌گردد و یک ضریب تابش خالص برای انتقال گرمای ناشی از مکانیزم‌های تابشی در نظر گرفته می‌شود. جریان گاز آرگون بدون حالت گردابی و به شکل محوری و بدون هیچ گونه آشفتگی در ورودی فرض می‌گردد. ضمناً پلاسما به عنوان یک گاز با قابلیت تراکم‌پذیری ضعیف در نظر گرفته می‌شود.

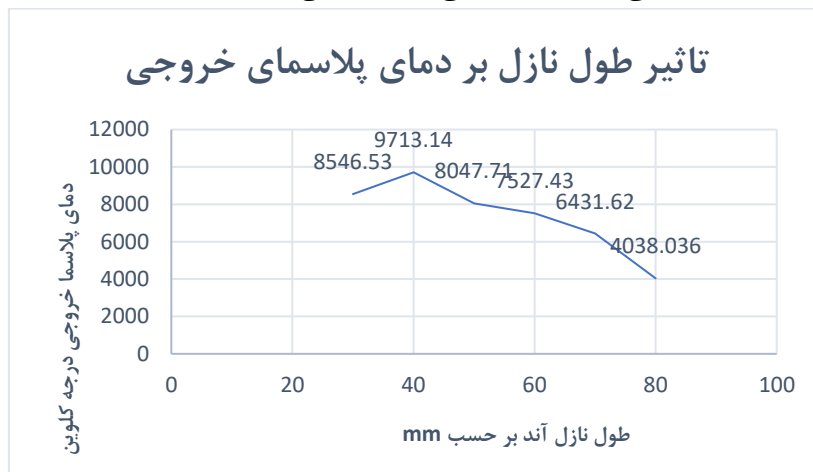
نوع مشعل مناسب برای شیشه‌ای کردن پسماند سطح پایین، آرک جریان مستقیم از نوع غیر انتقالی (آند و کاتد داخل مشعل) می‌باشد. از منبع تغذیه DC با ولتاژ ۱۰۰ kW برای ایجاد تخلیه استفاده می‌شود. شبیه سازی اولیه ابعاد

¹ Electric spot

انتخابی با نرم افزار کامسول 6 با کوپل کردن حالت چند فیزیکی صورت گرفته است. به منظور شبیه سازی نیاز به تعاریف محیط‌های هندسه‌ای و تعاریف مواد است. در انتخاب مواد باید رسانندگی الکتریکی را برای هر ماده، یعنی توانایی آن ماده برای هدایت جریان را تعریف کرد. رسانندگی الکتریکی مس و رسانایی ویژه تنگستن بر مبنای فایل‌های کتابخانه نرم افزار کامسول به ترتیب $6 \times 10^6 S/m$ و $20 \times 10^6 S/m$ در نظر گرفته شد. اما برای انتخاب رسانندگی الکتریکی آرگون با بررسی مقالات شبیه سازی صورت گرفته مانند مرجع [۱۲]، برای شبیه سازی مشعل و اطمینان از برقراری جریان الکتریکی و تشکیل پلازما در مشعل پلاسمایی نیاز است رسانایی الکتریکی آن $9000 S/m$ در نظر گرفته شود. این امر به این دلیل فرض می‌گردد که رسانندگی ویژه آرگون بسیار وابسته به دمای آن است و می‌تواند در دماهای بالاتر از ۲۰۰۰۰ درجه کلوین، مقدار رسانندگی ویژه آن بیش از $13000 S/m$ تعریف شود [۱۸]. پس از تعاریف هندسه‌ها و مواد نیاز به متصل کردن حالات چند فیزیکی نرم افزار کامسول به یکدیگر و انجام محاسبات است.

نتیجه‌گیری:

به‌منظور بررسی تاثیرات طول آند بر روی دمای خروجی پلازما و پیدا کردن طول بهینه نازل آند در این مشعل پلاسمایی جریان ورودی ۸۰۰ آمپر، چگالی جریان در نوک پخ شده کاتد $6.366 \times 10^7 A/m^2$ و سرعت جریان گازی ثابت در راستای محور و معادل ۲ m/s در نظر گرفته شده است؛ سپس برای بررسی تاثیر طول نازل بر روی دمای خروجی پلازما و پیدا کردن طول بهینه نازل آند در این مشعل پلاسمایی، طول نازل را از ۳۰ میلی‌متر تا ۸۰ میلی‌متر تغییر داده‌ایم. نتایج شبیه سازی‌های انجام شده در نمودار ۱ ارائه گردیده است. قابل ذکر است نزدیکترین فاصله بین الکترودها در این حالت ۳/۴ میلی‌متر و قطر خروجی نازل ۱۰ میلی‌متر فرض گردیده است.

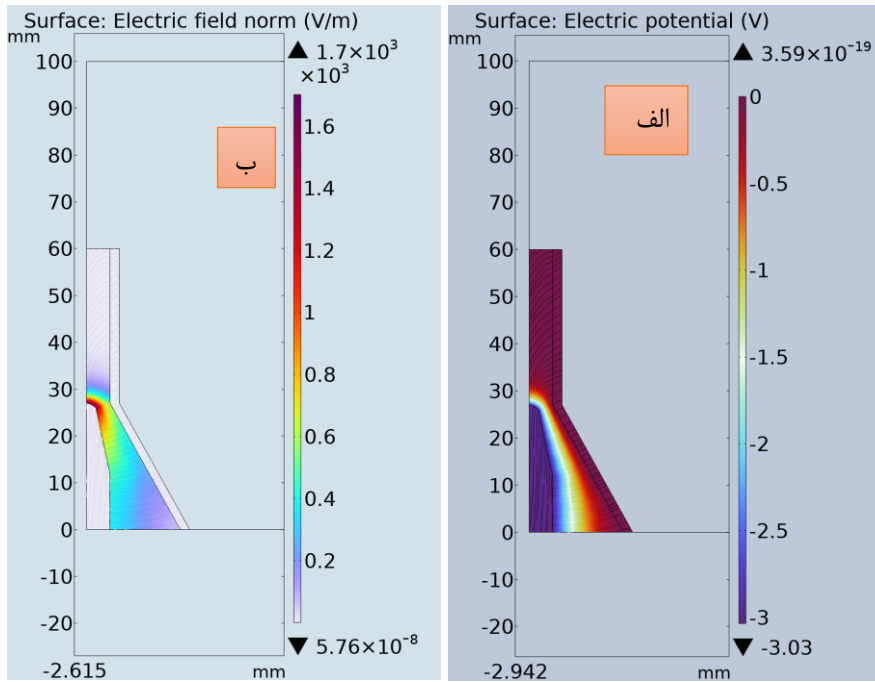


نمودار ۱. دمای خروجی پلازما بر اساس تغییرات طول نازل آند

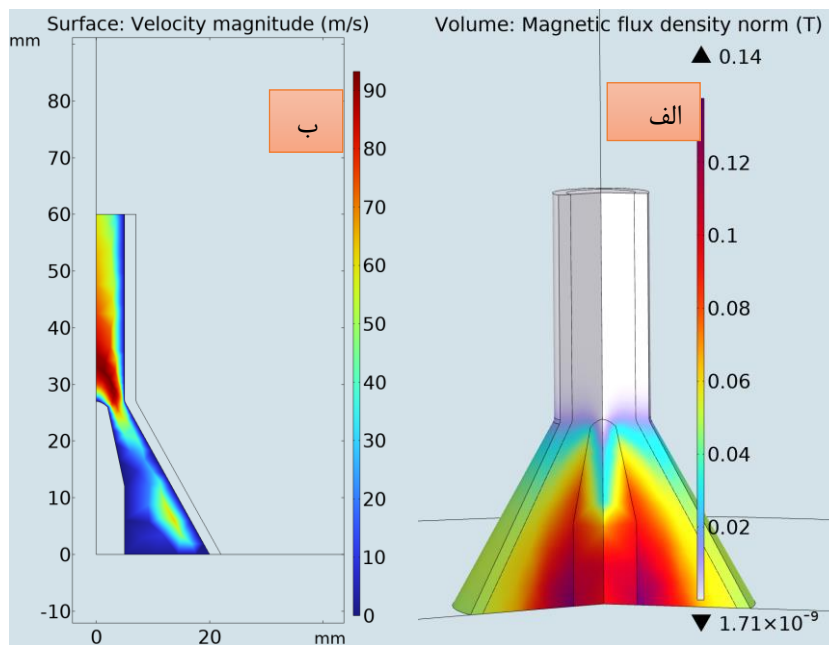
همانطور که دیده می‌شود با تغییر طول نازل تا ۴۰ میلی‌متر دمای بالاتری از خروجی مشعل داریم. بالاترین دمای پلازما در مشعل‌های پلاسمایی با فاصله‌ی کمی از کاتد قرار دارد؛ با افزایش طول نازل مسافت محوری که ستون قوس تا رسیدن به خروجی نازل طی می‌کند افزایش می‌یابد و در نتیجه از دمای پلازما در خروجی نازل کاسته خواهد شد. با کوتاه‌تر شدن طول نازل ستون قوس الکتریکی سریعتر می‌تواند خود را به سر خروجی نازل برساند و همین امر باعث می‌شود دمای خروجی نازل در مشعل پلاسمایی بالاتر رود [۴، ۵]. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده بیشترین دمای خروجی مشعل در طول نازل ۴۰ میلی‌متر بدست آمده است. البته با استفاده از تنظیم طول نازل می‌توان دمای مناسب و شکل شعله مناسب از لحاظ کشیدگی را متناسب با کاربرد مورد نظر در خروجی مشعل داشت.

نتایج به دست آمده در طول ۶۰ میلی‌متری نازل مانند توزیع پتانسیل الکتریکی (شکل ۵-الف)، توزیع میدان الکتریکی^۱ (شکل ۵-ب)، چگالی شار مغناطیسی (شکل ۶-الف)، توزیع سرعت پلازما (شکل ۶-ب) و توزیع دمایی پلازما در شکل ۷ نشان داده شده است.

¹ Electric field norm

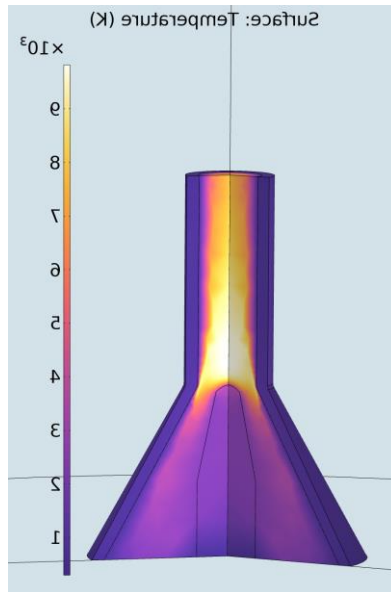


شکل ۵. الف) توزیع پتانسیل الکتریکی در طول ۶۰ میلی‌متری نازل ب) توزیع میدان الکتریکی در طول ۶۰ میلی‌متری نازل



شکل ۶. الف) توزیع میدان مغناطیسی در طول ۶۰ میلی‌متری نازل ب) توزیع سرعت پلاسما در مشعل در طول ۶۰ میلی‌متری

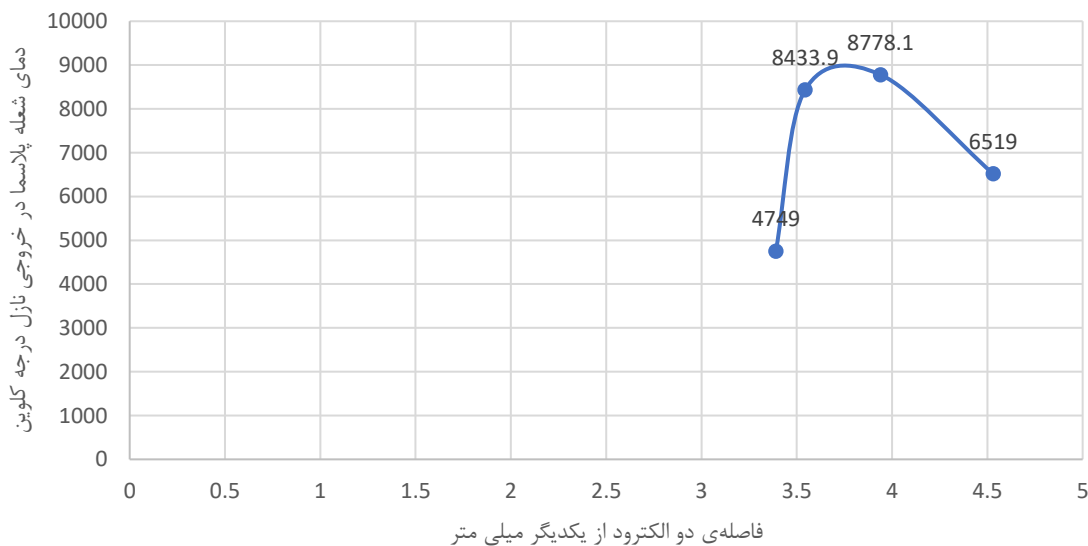
نازل



شکل ۷. توزیع دمایی در مشعل در طول ۶۰ میلی متری نازل

به منظور بررسی تاثیر فاصله‌ی دو الکتروود از یکدیگر در شبیه‌سازی، جریان ورودی ۸۰۰ آمپر، چگالی جریان در نوک پخ شده کاتد $-6.366 \times 10^7 A/m^2$ ، طول نازل ۶۰ میلی متر و سرعت جریان گازی ثابت در راستای محور Z و معادل ۲ m/s در نظر گرفته شده است؛ سپس برای بررسی تاثیر فاصله‌ی دو الکتروود از یکدیگر کاتد را در شبیه‌سازی در راستای محور Z حرکت می‌دهیم و دمای خروجی نازل را در هر مرحله محاسبه می‌کنیم.

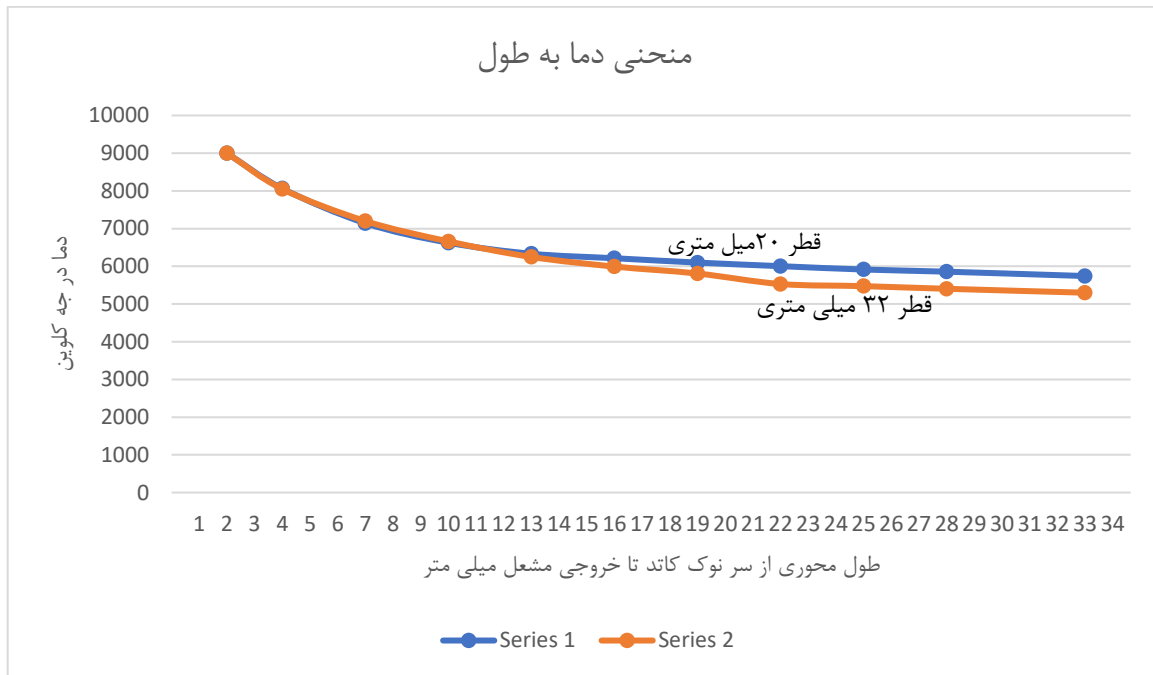
تاثیر تغییرات پارامتر فاصله‌ی دو الکتروود از یکدیگر در دمای خروجی مشعل



نمودار ۲. دمای خروجی پلازما بر اساس تغییرات فاصله‌ی دو الکتروود از یکدیگر

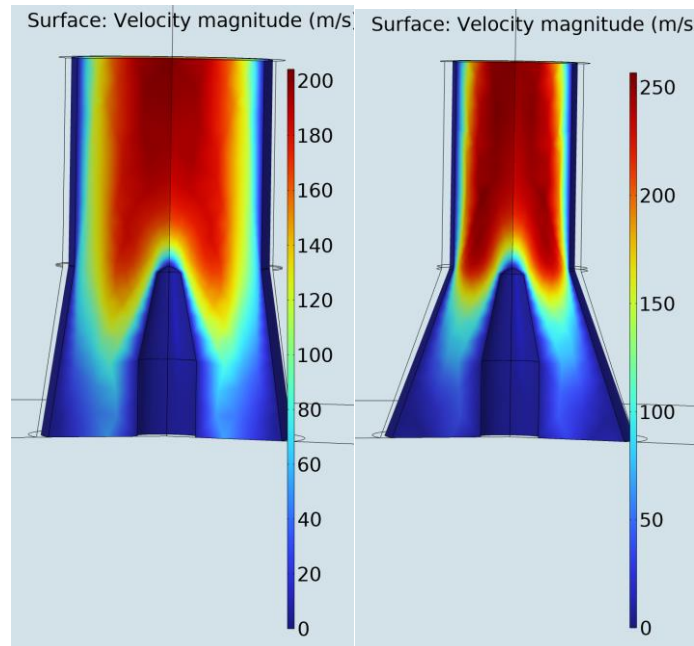
همانطور که در نمودار ۲- دیده می‌شود با افزایش فاصله‌ی دو الکتروود از یکدیگر تخلیه‌ی الکتریکی ضعیف‌تر صورت می‌پذیرد به همین علت قوس الکتریکی ضعیف‌تر شکل خواهد گرفت. همین امر سبب دمای کمتر در خروجی مشعل پلاسمایی خواهد شد. البته این کاهش فاصله‌ی بین دو الکتروود برای ایجاد تخلیه‌ی قوی‌تر را تا حدی می‌توان انجام داد که عبور گاز کاری امکان پذیر باشد. در این شبیه‌سازی در فاصله‌ی کمتر از ۳/۴ میلی متر امکان ورود گاز کاری به درون مشعل و تشکیل پلازما درون مشعل وجود ندارد و شبیه‌سازی پاسخ مناسبی نمی‌دهد. با توجه به نتیجه بدست آمده از نمودار ۲، نزدیکترین فاصله مناسب بین دو الکتروود حدود ۴ میلی متر است.

پارامتر بعدی که نیاز به بررسی دارد قطر خروجی نازل است. به این منظور در شبیه سازی جریان ورودی ۸۰۰ آمپر، چگالی جریان در نوک پخ شده کاتد $6.366 \times 10^7 A/m^2$ ، طول نازل ۶۰ میلی متر و فشار گاز ورودی آرگون ۵ torr در نظر گرفته شد. سپس دو اندازه قطر خروجی نازل ۲۰ میلی متر و ۳۲ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج دمای خروجی در نمودار ۲ نمایش داده شده است.



نمودار ۳. تغییرات دمای در ناحیه هسته پلاسما در داخل مشعل به طول طی شده در نازل برای دو قطر ۲۰ میلی متر و ۳۲ میلی متر

در نمودار ۳ دما در ناحیه هسته پلاسما داخل مشعل بررسی شده است. نازل استوانه‌ای با قطر ۲۰ میلی متر در خروجی دمایی بالاتری نسبت به قطر ۳۲ میلی متر دارد. با بزرگتر شدن قطر خروجی نازل دما با کاهش بیشتری در طول مسافت محوری مواجه است و شعله سریعتر سرد می‌شود. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج مراجع [۷] و [۶] تطابق دارد. نکته‌ی حائز اهمیت این است که با افزایش قطر خروجی نازل، موقعیت محوری پلاسما تغییر می‌کند و سرعت پلاسما در مشعل نیز کاهش پیدا می‌کند. در واقع با کاهش سرعت پلاسما، پلاسما دیرتر به سطح خروجی نازل می‌رسد و دما فرصت بیشتری برای کاهش در طول محوری دارد. شکل ۸- گواه این موضوع می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از مشعل با قطر بزرگتر در فضای آزاد احتمال بیشتری برای ورود مولکول‌های هوا به درون مشعل پلاسما و تغییر ترکیبات شیمیایی پلاسما و در نتیجه سرد شدن سریعتر پلاسما مطابق توضیحات مرجع [۷] وجود دارد.



شکل ۸- الف) سرعت پلازما در مشعل با قطر خروجی ۲۰ میلی متر. ب) سرعت پلازما در مشعل با قطر خروجی نازل ۳۲ میلی متر

مراجع :

- [1] Heberlein J, Murphy AB. Thermal plasma waste treatment. Journal of Physics D: Applied Physics. 2008 Feb 14;41(5):053001.States patents No. US20190162406A1. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20190162406A1/en?q=US20190162406A1>
- [2] Agon, N., Hrabovsky, M., Chumak, O., Hlina, M., Kopecky, V., Maslania, A., Bosmansc, A., Helsen, L., Skobljad, S., Van Oostb, G., Vierendeelse, J., 2016. Plasma gasification of refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents. Waste Manage. 47, 246–255.
- [3] Fauchais, P., Bourdin, E., Coudert, J. F. and McPherson, R., Top., Curr. Chem., , 107, 59, 1983.
- [4] Fauchais PL, Heberlein JV, Boulos MI. Thermal spray fundamentals: from powder to part. Springer Science & Business Media; 2014 Jan 24..
- [5] Boulos MI, Fauchais PL, Heberlein JV. Thermal spray fundamentals: from powder to part. Springer International Publishing; 2021 Oct 19.
- [4] Li, J., et al. Application of thermal plasma technology for the treatment of solid wastes in China: An overview. Waste Management (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.011>.
- [5] pyrolysis and traditional pyrolysis. Chem. Eng. 33, 44–47. Tang, L., Huang, H., Zhao, Z.L., Wu, C.Z., Chen, Y., 2003. Pyrolysis of polypropylene in a nitrogen plasma reactor. Ind. Eng. Chem. Res. 42, 1145–1150.
- [6] Chinè B. A Plasma Torch Model. Rotterdam: COMSOL Conference..

- [7] He-Ping Li, E. Pfender and Xi Chen, Application of Steenbeck's minimum principle for three dimensional modelling of DC arc plasma torches, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **36**, 1084-1096, (2003).
- [8] Deng Jing, Li Yahojian, Xu Yongxiang and Sheng Hongzhi, Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a DC non-transferred arc plasma torch operating under laminar and turbulent conditions, *Plasma Science and Technology*, **13**, vol. 2, 201-207, (2011).
- [9] N.Y. Mendoza Gonzalez, L. Rao, P. Carabin, A. Kaldas and J.L. Meunier, A three-dimensional model of a DC thermal plasma torch for waste treatment applications, *International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-19*, July 27-31, 2009, Bochum, Germany
- [10] B. Chiné, M. Mata and I. Vargas, Modeling a DC plasma with Comsol Multiphysics, *Comsol Conference 2015*, October 14-16 2015, Grenoble, France.
- [11] B. Chiné, A 2D Model of a DC Plasma Torch, *Comsol Conference 2016*, October 12-14 2016, Munich, Germany.
- [12] He-Ping Li and Xi Chen, Three-dimensional modelling of a dc non-transferred arc plasma torch, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **34**, L99-L102, (2001)
- [13] Comsol AB, *Comsol Multiphysics-CFD Module, User's Guide, Version 5.1*, (2015)
- [14] Comsol AB, *Comsol Multiphysics-Heat Transfer Module, User's Guide, Version 5.1*, (2015).
- [15] Comsol AB, *Comsol Multiphysics-AC/DC Module, User's Guide, Version 5.1*, (2015).
- [16] Grobler NJ, Bissett H, Puts GJ, Crouse PL. Finite-element analysis of the effect of sheath-gas composition in an inductively-coupled plasma. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2018 Sep 1 (Vol. 430, No. 1, p. 012024)*. IOP Publishing.