



## مطالعه بکارگیری مشعل پلاسمایی جهت آمایش پسماندهای با سطح پرتوزایی پایین

دارستانی فراهانی، نیکو\* (۱) - اسدی آقبلاغی، مرضیه (۲) - چخماچی دوم، امیر (۱) - زمانیان، حامد (۱)

\*<sup>۱</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای؛<sup>۲</sup> دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها؛

**چکیده:** بیشتر پسماند پرتوزایی که در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید می‌شود، پسماند سطح پایین است. روش‌های مختلفی در آمایش و تثبیت پسماند نیروگاه‌های هسته‌ای وجود دارد که بهترین روش آمایش ذوب کردن است. منابع گرمایش پلاسمایی (مشعل‌های پلاسمایی) تجهیزاتی جایگزین نازل‌های سوخت مایع یا مشعل‌های گازی هستند. به دلیل گستره دمایی بالاتر فرآیند آمایش پلاسمایی پسماند، در مقایسه با روش‌های مرسوم سوزاندن، محدوده موادی که با پلاسما می‌توان آمایش نمود، گسترده‌تر است. هدف از این تحقیق مطالعه و بررسی مشعل مناسب برای شیشه‌ای کردن پسماند است. از ماژول پلاسمایی نرم‌افزار کامسول برای شبیه‌سازی پلاسمای مشعل مورد نظر می‌توان استفاده نمود و ابعاد بهینه مشعل برای رسیدن به دمای مورد نیاز را بدست آورد.

**کلمات کلیدی:** مشعل پلاسمایی، آمایش پسماند پرتوزا، نرم‌افزار کامسول.

### مقدمه :

بیشتر پسماند پرتوزایی که در نیروگاه‌های هسته‌ای تولید می‌شود، پسماند سطح پایین است. دسته پسماند جامد سطح پایین شامل پسماند مایع جامدسازی شده و پسماند فعال خشک مانند فلز و مواد عایق حرارتی است که در طی عملکرد نیروگاه‌های قدرت و یا در طی فرآیند بازرسی دوره‌ای تولید می‌شوند. پسماند خشکی که در نواحی کنترل شده تابشی تولید می‌شود جهت پسمانداری به دو دسته پسماند فعال قابل سوختن نظیر پارچه، کاغذ، وینیل، لاستیک، پلاستیک یا چوب و پسماند فعال غیر قابل سوختن مانند آهن، شیشه، فیلتر، خاک، سیمان یا سیم‌ها تقسیم می‌شود. انواع مختلف و پیچیده‌ای از پسماند خشک وجود دارد که برخی از آن‌ها نقطه ذوب بسیار بالایی دارند. مواردی مانند فیلترهای گاز یا قوطی‌ها نیز حاوی فلز و یا مواد غیر قابل سوختن می‌باشند. روش‌های مختلفی در آمایش و تثبیت پسماند نیروگاه‌های هسته‌ای نظیر روش جامدسازی با سیمان، جامدسازی با آسفالت، روش‌های فشرده سازی، روش‌های سوزاندن و غیره بکار گرفته می‌شود. از آنجا که انواع پسماندهای با سطح پرتوزایی پایین و متوسط بسیار زیاد است و مواد پرتوزا سزیم و کبالت داخل آن‌ها وجود دارد، بهترین روش آمایش ذوب کردن است [۱].



بطور کلی فناوری های حرارتی توجه چشمگیری را به خود جلب کرده اند زیرا مزایایی در مورد تثبیت فرم پسماند و کاهش حجم زیاد آن را دارند. یکی دیگر از مزایای استفاده از فرآیندهای حرارتی، بهبود همگن و کیفیت فرم پسماند پس از آمایش است. با توجه به هزینه های بالای دفع پسماند و افزایش نیاز به بهبود کیفیت فرم نهایی پسماند، مزایای ارائه شده توسط فرآوری حرارتی بسیار مهم می شود. روش های حرارتی همچنین دارای معایبی هستند که می توانند کاربردهای آن ها را در استراتژی های فرآوری پسماند پرتوزا محدود کنند. مسئله اصلی، برآورده کردن الزامات ایمنی محیط زیست، مانند محدودیتهای پسماند گازی است که ممکن است منجر به پیچیدگی و هزینه بالاتر این فناوریها شود.

برای فرآیند ذوب کردن، مقدار زیادی انرژی برای خشک کردن، تجزیه در اثر حرارت و سوختن مواد آلی و ذوب کردن مواد غیرآلی مورد نیاز است. منابع گرمایش پلاسمایی (مشعل های پلاسمایی) تجهیزاتی جایگزین نازل های سوخت مایع یا مشعل های گازی هستند. در واقع، منابع پلاسمایی تبدیل حرارتی بسیار خوبی از مواد آلی فراهم می کنند و به کمک آن ها می توان محصول نهایی فرآیند را به طور کامل در حالت ذوب شده بدست آورد. مشعل های پلاسمایی از انرژی تخلیه الکتریکی برای گرمایش گازهای کاری که از آن ها عبور می کنند استفاده می کنند. هر دو نوع گاز، خنثی از نظر شیمیایی (نیتروژن، آرگون، هلیوم) و عمل کننده (اکسیدکننده=اکسیژن، هوا؛ کاهنده= هیدروژن) به عنوان محیط کاری می توانند مورد استفاده قرار بگیرند. دمای بخار گاز خروجی مشعل پلاسمایی تا چند هزار درجه سانتیگراد قابل دستیابی است. در مقایسه با روش سوزاندن پسماند پرتوزا و دیگر فناوری ها که بر مبنای یک سوخت ارگانیک هستند، مشعل های پلاسمایی امکان تبدیل حرارتی در حجم نسبتا کوچک با بازده بالا را فراهم می کنند. این امر به خاطر آن است که مشعل های پلاسمایی قادر هستند درجه بالایی از تمرکز انرژی حرارتی را در جت پلاسمایی ایجاد کنند. در روش آمایش پسماند با پلاسمای، انرژی مورد نیاز بصورت مستقیم به ماده پسماند منتقل می گردد. در نتیجه، دمای شعله نسبتا بالای سوزاننده پلاسمایی، ذوب شدن پیوسته و تجزیه مواد پسماند را تضمین می کند. پسماند پرتوزای مایع را نیز می توان با قرار دادن در برابر جت پلاسمایی آمایش نمود. به دلیل گستره دمایی بالاتر فرآیند آمایش پلاسمایی پسماند، در مقایسه با روش های مرسوم سوزاندن، محدوده موادی که با پلاسمای می توان آمایش نمود، گسترده تر است.

در طی روش سوزاندن پسماند جامد آلی با مشعل پلاسمایی انواع مختلفی از ترکیبات گازی تولید می گردد. تأمین ایمنی پرتویی تاسیسات به دلیل گازهای تولید شونده بسیار ضروری است [۱].

روش آمایش حرارتی پسماند با پلاسمای در سال های اخیر به خاطر بازده تخریب بسیار بالای آن و سازگاری خوب با محیط زیست، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۲]. این روش برای انواع پسماندها، شامل مایع های آلی، مایع های غیرآلی، جامد های آلی، جامد های غیرآلی، جامد های ترکیب آلی و غیرآلی، مایع های ترکیب آلی و غیرآلی و رزین های مصرف شده قابل بکارگیری است [۱۲].

در صورت دستیابی به فناوری پلاسمای در آمایش پسماند هسته ای، دستاوردهای ذیل حاصل می شود:

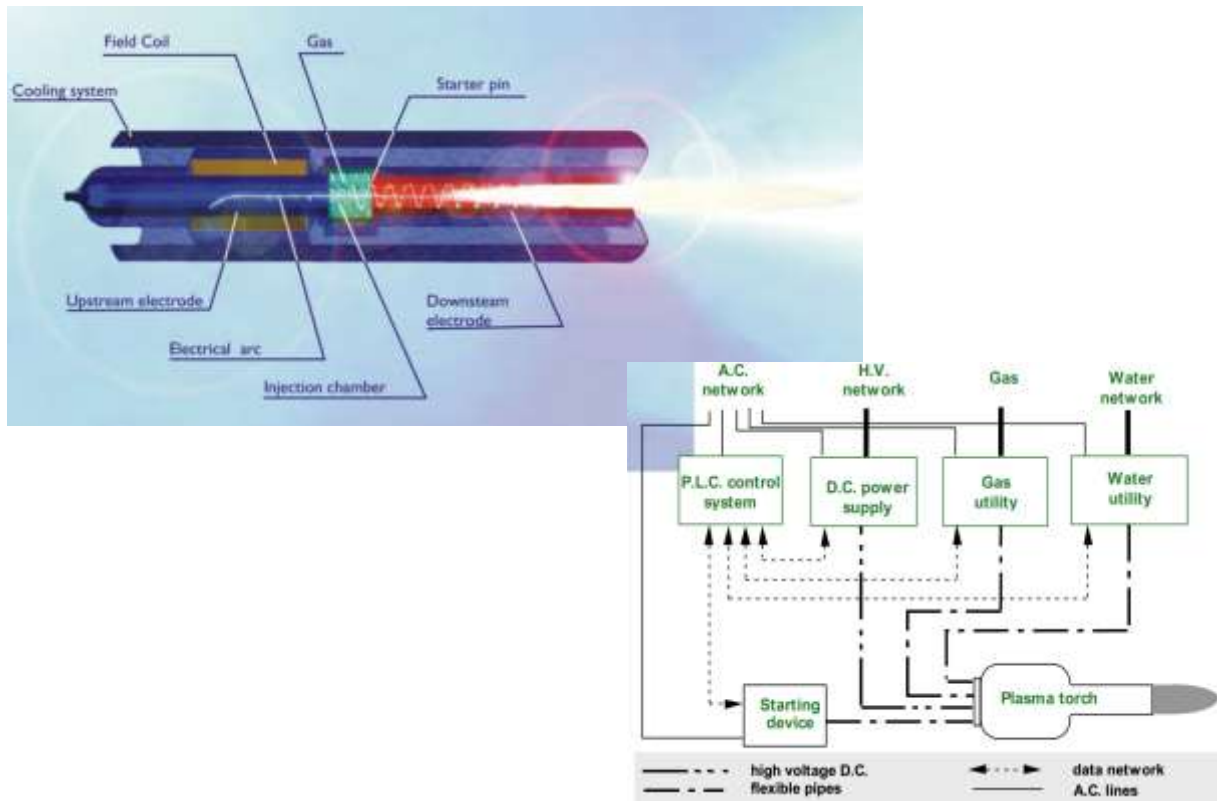


- یک فرآیند واحد می‌تواند پسماند را در زمان تولید آمایش کند (به عنوان مثال هیچ آمایش قبلی لازم نیست). این قابلیت هزینه‌های زیرساخت را کاهش داده و با حذف مرحله‌های اضافی کار با پسماند، باعث می‌شود تا میزان پرتوگیری پرسنل کاهش یابد.
  - فرم نهایی پسماند، مقاوم، عاری از مواد آلی و مناسب برای نگهداری و دفع طولانی مدت است.
  - فاکتورهای کاهش حجم با این روش می‌توانند در گستره ۱:۶ (نتایج مربوط به سامانه ZWILAG) برای پسماندهایی با درصد بالای فلزات (از جمله ظروف پسماند)، ۱:۱۰ برای پسماندهای مخلوط (نتایج مربوط به سامانه RADON) و تا بیش از ۱:۱۰۰ برای آمایش پسماندهای آلی اولیه تغییر کند.
  - از آنجا که منبع گرما به جای سوخت‌های فسیلی، پلاسما است، میزان تولید گازهای دودکش و گازهای گلخانه‌ای CO کمتر است. این ممکن است منجر به پذیرش بهتر مردم شود. (با این حال، این بدان معنی نیست که گازهای خارج شده از فرآیند حذف می‌شوند، و گازهای خروجی جزو محدودیت‌های این روش به حساب می‌آیند و باید قبل از رها سازی پیش آمایش صورت گیرد).
- با توسعه صنعت هسته‌ای در ایران، نیاز به مطالعه و گسترش فناوری‌های پیشرفته در زمینه آمایش و دفع زباله‌های هسته‌ای بسیار ضروری است و همانطور که ذکر شد فناوری ذوب پلاسمای حرارتی، با توجه به داشتن ویژگی‌هایی نظیر دمای بالا، چگالی انرژی بالا و قابلیت‌های گسترده، به عنوان یکی از موضوعات کلیدی در زمینه تحقیقات آمایش پسماند هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود. در یک سامانه آمایش پسماند حرارتی پلاسمایی، تجهیزاتی نصب می‌گردند که لازم است استانداردهای مورد نیاز و ویژگی‌های لازم برای تضمین ایمنی و عملکرد فرآیند را تضمین کنند. این تجهیزات عبارتند از مشعل پلاسمایی، محفظه دو منظوره، سیستم خنک کننده، واحد کنترل آلودگی هوا، چیلر، سیستم‌های ابزار دقیق و کنترل، سیستم‌های کانال کشی و لوله کشی، سیستم منبع تغذیه مود تبدیل AC به DC، کمپرسور هوا، فن مکنده، خشک‌کننده، مخزن هوا، پمپ‌های سانتریفیوژ و ترموکوپل‌ها. مشعل پلاسمایی به کار رفته در آن یکی از اجزای اصلی است که دربردارنده چندین تیوب می‌باشد که بصورت منظم متمرکز شده‌اند و با آب خنک می‌شوند. بیرونی‌ترین تیوب هم با مواد نسوز پوشیده شده است تا مشعل بتواند در برابر دمای زیاد درون محفظه پردازش ایستادگی کند.

مشعل‌های پلاسمایی شامل اجزاء اصلی زیر می‌باشند [۱۳]:

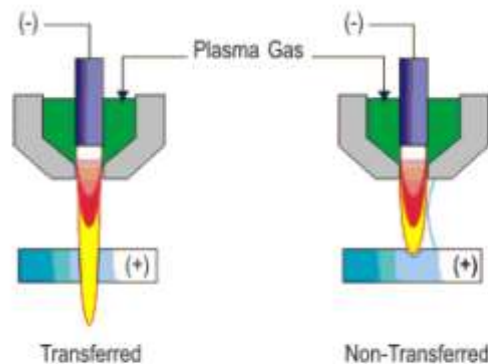
- الکترودهای مشعل
- یونیت منبع تغذیه

- سیستم کنترل و ابزار دقیق
  - منبع گاز فرآیند (نیتروژن، هوا یا اکسیژن)
- در شکل ۱ تصویری از یک نمونه مشعل پلاسمایی به همراه دیاگرام اجزای مرتبط با آن نشان داده شده است.



شکل ۱: یک نمونه مشعل پلاسمایی به همراه دیاگرام اجزای مرتبط با آن

دو مدل اصلی مشعل وجود دارد (شکل ۲)؛ مشعل‌های عبوری (Transferred torches) و مشعل‌های غیر عبوری (Non-transferred torches).



شکل ۲: مشعل پلاسمایی عبوری و غیر عبوری

در مشعل های عبوری، مشعل پلاسمای انرژی الکتریکی را از آند به سرباره مذاب منتقل می کند که به عنوان کاتد عمل می کند. با این روش، انرژی به طور مستقیم و کارآمدتری به مواد پسماند برای گرم شدن منتقل می شود. مشعل غیر عبوری شامل دو الکترود تیوبی فلزی (جهت جریان پلازما از بالا به پایین) است که توسط یک محفظه تزریق گاز جدا شده است. قوس الکتریکی بین الکترودهای منفی و مثبت برقرار می شود و جریان گاز تزریق شده به داخل محفظه یونیزه می شود. در نتیجه، یک جریان گاز با دمای بالا از الکترود پایینی در جت پلاسمای بدست می آید. مشعل های غیر عبوری در آمایش پسماند مرسوم تر هستند زیرا محدودیت رسانای الکتریکی بودن مواد واکنش دهنده را ندارند [۱۴].

مشعل های عبوری معمولاً درجه حرارت بالاتری را به مواد پسماند القا می کنند. رنج توان به طور معمول از ۱۰۰ کیلو وات تا چند مگاوات است. از طریق انتخاب گاز پلازما، شرایط فرآیند می تواند از بی اثر بودن (به عنوان مثال Ar یا N<sub>2</sub>) تا اکسیداسیون (به عنوان مثال هوا یا O<sub>2</sub> خالص) متغیر باشد. حساس ترین اجزای روی مشعل پلازما، الکترودهای مس هستند. الکترودهای اولیه طول عمر چند ساعت داشتند که به طور قابل توجهی بهبود یافته است (حداکثر ۵۰۰ ساعت). درجه حرارت معمولی "شعله" پلازما از مشعل غیر عبوری در حدود ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد است که پایین تر از مشعل های عبوری است اما هنوز هم به اندازه کافی برای آمایش انواع پسماندهای ناهمگن با نقاط مختلف ذوب، بالا است [۱۳].

محصول نهایی سیستم آمایش پلازما، یک ماده شیشه ای جامد است که در ظروف فلزی یا سرامیکی بسته بندی شده و برای دفع مستقیم و بدون هیچ گونه پردازش بعدی مناسب است. در پسماند نهایی، مواد پرتوزا بی حرکت می شوند و خواص محصول نهایی از لحاظ ویژگی های مکانیکی و پایداری شیمیایی بیش از خواص معادل ماتریس های شیشه ای است. در این تحقیق مطالعات اولیه صورت گرفته در زمینه شیشه ای کردن پسماند سطح پایین با روش پلاسمای حرارتی گزارش شده است و با مطالعه منابع، مشخصات مشعل پلاسمایی استخراج شده و شبیه سازی اولیه با نرم افزار کامسول صورت گرفته است.

## روش کار :

مطابق بررسی صورت گرفته در نمونه های تحقیقاتی و صنعتی در جهان برای شروع تحقیقات یک مشعل آرک پلاسمایی با توان حدود 30 kW و از نوع جریان مستقیم طراحی کرده و ملزومات آن تهیه می گردد. این مشعل به صورت عمودی بر روی یک



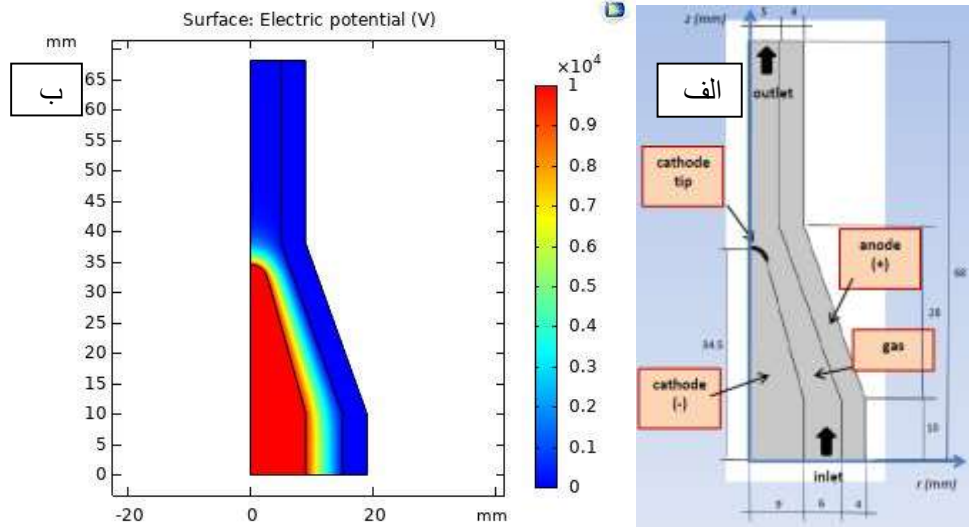
محفظه سوختن می تواند نصب گردد. از سیستم خنک سازی آبی نیز برای خنک کردن پوشش الکتروود، الکتروودها و بدنه مشعل به طور جداگانه استفاده می شود. ضمناً، در صورت کار با مواد پرتوزا، یک کمپر سور هوا برای تأمین هوای محفظه واکنش و خنک سازی محصولات سمی ثانویه به همراه سیستم‌های کنترلی مورد نیاز است.

شبیه‌سازی دو بعدی مشعل پلاسمایی جریان مستقیم با گاز کاری آرگون، توسط نرم‌افزار کامسول ۵،۴ انجام می‌شود. جنس الکتروودهای استوانه آند و کاتد مس در نظر گرفته شده است و برای بهینه کردن محل ریشه تخلیه، نوک کاتد پخ شده است (مطابق شکل ۳-الف).

در یک مشعل پلاسمایی آرک غیر عبوری، تخلیه الکتریکی با اعمال جریان DC بین کاتد و آند که هر دو داخل مشعل قرار گرفته‌اند، آغاز می‌گردد. پلاسمای حرارتی با گرم شدن، یونیزه شدن و گسترش گاز کاری که داخل مشعل در طول کاتد جریان دارد بدست می‌آید. بدلیل خنک‌سازی آند، گاز نزدیک به سطح آند سرد است؛ از نظر الکتریکی غیر رسانا است و محدود کننده پلازما است. دمای گاز بیشتر از  $10^4$  K است و سرعت گاز بیشتر از  $10^2$  m/s خواهد بود. مدلسازی این مشعل پلاسمایی بسیار پیچیده است. پلازما در بردارنده گونه‌های مختلفی (مولکول‌ها، اتم‌ها، یون‌ها و الکترون‌ها) است. چندین پدیده فیزیکی به خاطر اندرکنش بین میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و جریان سیالی باید با یکدیگر ترویج گردد. جریان پلاسمای بسیار غیر خطی، باعث بوجود آمدن گرادیان‌های قوی، اثرات غیر تعادلی ترمودینامیکی و شیمیایی می‌شود. در شبیه سازی اولیه، مسئله دو بعدی در نظر گرفته می‌شود و فرض می‌گردد جریان پلازما متقارن است و در حالت پایدار قرار دارد. بدلیل اینکه مدلسازی دوبعدی در نظر گرفته می‌شود، تشکیل نقطه الکتریکی در سطح آند و فرآیند اتصال مجدد روی همان آند در نظر گرفته نمی‌شود؛ در واقع نقطه الکتریکی در مدلسازی دو بعدی حلقوی است، در حالیکه پدیده اتصال مجدد، شدت یک پدیده گذرا است. ضمناً شرایط تعادل ترمودینامیک محلی اقرض می‌گردد، در نتیجه دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین مساوی است. پلازما با استفاده از معادلات مگنتوهیدرودینامیک مدل می‌گردد.

<sup>۱</sup>Electric spot

<sup>۲</sup>local thermodynamic equilibrium

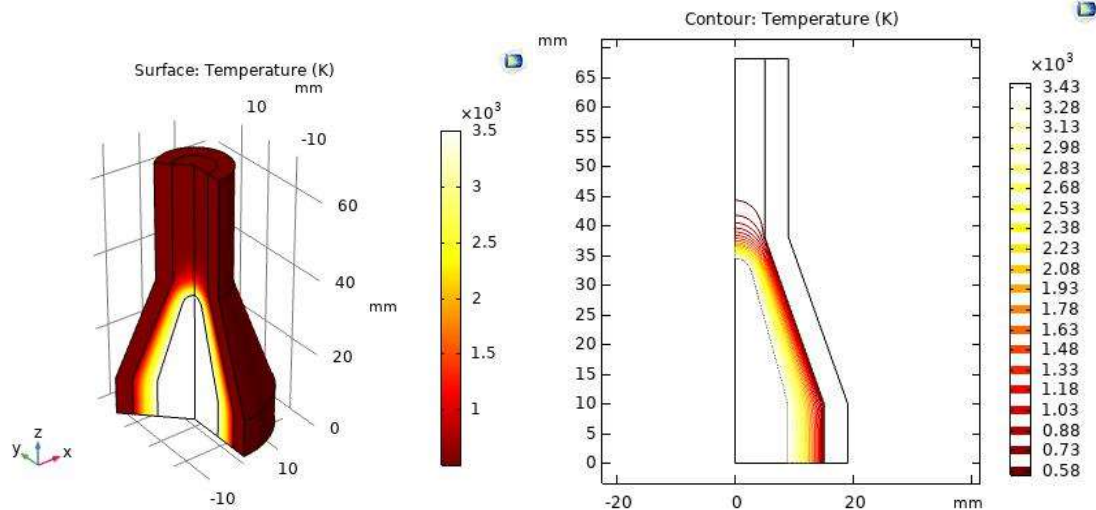


شکل ۳: الف) ابعاد مشعل پلاسمایی آرک جریان مستقیم طراحی شده. ب) توزیع میدان الکتریکی در مشعل طراحی شده

پلازما از نظر نوری، نازک فرض می‌گردد و یک ضریب تابش خالص برای انتقال گرمای ناشی از مکانیزیم های تابشی در نظر گرفته می‌شود. پلازما به عنوان یک گاز با قابلیت تراکم‌پذیری ضعیف در نظر گرفته می‌شود ( عدد ماخ کمتر از ۰/۳). جریان بدون حالت گردابی در ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای شبیه‌سازی مشعل ماژول های پلازما، AC/DC، انتقال حرارت و CFD ( جریان مسطح) تزویج می‌گردد.

### بحث و نتیجه گیری :

نوع مشعل مناسب برای شیشه‌ای کردن پسماند سطح پایین، آرک جریان مستقیم از نوع عبوری (آند و کاتد داخل مشعل) می‌باشد. از منبع تغذیه DC با ولتاژ ۳۰kV برای ایجاد تخلیه استفاده می‌شود. شبیه سازی اولیه ابعاد انتخاب شده با نرم افزار کامسول 5.4 صورت گرفته است. توزیع میدان الکتریکی در مشعل در شکل ۳-ب نشان داده شده است. توزیع دما در حالت پایدار نیز در شکل ۴ نشان داده شده است که از مرتبه ۱۰۰۰ درجه کلوین است و برای بررسی های اولیه مناسب می‌باشد.



شکل ۴: توزیع دمای حالت پایدار در مشعل پلاسمایی آرک جریان مستقیم طراحی شده با توان ۳۰۰ kW.

مراجع :

- [۱] Jong Kill Park, Byung Soo YO, Seong Ki No, Eun Ji Shin, Hwan No Lee, Jae Suk Huh, Byung Woo LEE. (2019). Sealed plasma melting furnace for treating low- and intermediate-level radioactive waste. United States patents No. US20190162406A1. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20190162406A1/en?q=US20190162406A1>
- [۲] Agon, N., Hrabovsky, M., Chumak, O., Hlina, M., Kopecky, V., Mašláňa, A., Bosmans, A., Helsenc, 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.
- [۳] Materazzi, M., Lettieri, P., Mazzei, L., Taylor, R., Chapman, C., 2013. Thermodynamic modelling and evaluation of a two-stage thermal process for waste gasification. *Fuel* 108, 356–369.
- [۴] Materazzi, M., Lettieri, P., Taylor, R., Chapman, C., 2015. Performance analysis of RDF gasification in a two stage fluidized bed-plasma process. *Waste Manage.* 47, 256–266.
- [۵] Morrin, S., Lettieri, P., Chapman, C., Mazzei, L., 2012. Two stage fluid bed-plasma gasification process for solid waste valorisation: technical review and preliminary thermodynamic modelling of sulphur emissions. *Waste Manage.* 32, 676–684.
- [۶] Morrin, S., Lettieri, P., Chapman, C., Taylor, R., 2014. Fluid bed gasification-plasma converter process generating energy from solid waste: experimental assessment of sulphur species. *Waste Manage.* 34, 28–35.
- [۷] Tang, B.S., Lin, J., Qian, S., Wang, J.D., Zhang, S., 2014. Preparation of glass-ceramic foams from the municipal solid waste slag produced by plasma gasification process. *Mater. Lett.* 128, 68–70.
- [۸] Tang, L., Huang, H.T., 2004. An investigation of sulfur distribution during thermal plasma pyrolysis of used tires. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 72, 35–40.
- [۹] Tang, L., Huang, H.T., Zhao, D.Q., 2006. A study of pyrolysis of waste tire in a capacitively coupled RF plasma reactor. *J. Fuel Chem. Technol.* 34, 373–376.
- [۱۰] Tang, L., Huang, H.T., Wu, C., 2005. Comparative study of PP thermal plasma





- [۹] *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.*
- [۱۰] *Tang, L., Huang, H.T., Hao, H.Q., Wang, H., Wang, Y.H., Zhu, C.H., 2010. A preliminary investigation of sulfur distribution during thermal plasma pyrolysis of used tires. Environ. Pollut. Control 32, 5–8.*
- [11] *Wang, Q., Yan, J.H., Chi, Y., Li, X.D., Lu, S.Y., 2010. Application of thermal plasma to vitrify fly ash from municipal solid waste incinerators. Chemosphere 78, 626–630.*
- [۱۲] *International Atomic Energy Agency. Application of thermal technologies for processing of radioactive waste. IAEA-TECDOC-1527. Vienna, 2006.*
- [۱۳] *International Atomic Energy Agency. Application of thermal technologies for processing of radioactive waste. IAEA-TECDOC-1527. Vienna, 2006.*
- [۱۴] *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>*