

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک پلاسما

عنوان پایان نامه

شبیه سازی توزیع فضایی پارامترهای پلاسما در سیستم تخلیه الکتریکی تابان

نگارنده :

وحید نیک جو

استاد راهنما :

دکتر مهدی مومنی

دکتر آزاده کبریایی

بهمن ۱۳۹۹

به نام خدا

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده فیزیک و مهندسی هسته ای

پایان نامه کارشناسی ارشد

عنوان: شبیه سازی توزیع فضایی پارامترهای پلاسما در سیستم تخلیه الکتریکی تابان

نگارش: وحید نیک جو

کمیته ممتحنین:

امضاء:

استاد راهنما اول: دکتر مهدی مومنی

امضاء:

استاد راهنما دوم: دکتر آزاده کبریایی

امضاء:

ممتحن داخلی: دکتر مجتبی هاشم زاده

امضاء:

ممتحن داخلی: دکتر سمیه مهراییان

تاریخ:

تشکر و قدردانی

پس از حمد و سپاس از خداوند بزرگ

تقدیر و تشکر از استاد گرانقدرم دکتر مهدی مومنی فردی علمی در حوزه اتمی و مولکولی و همچنین استاد بزرگوار دکتر آزاده کبریایی که فردی علمی در حوزه هوا و فضا دانشگاه صنعتی شریف هستند. این دو استاد مرا در این مسیر راهنمایی و حمایت ها موثرترین نقش را در به سرانجام رساندن این پایان نامه داشته اند، ابزار می کنم.

در پایان از پدر و مادر عزیزم که مرا یاری کرده اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم
برای محاسبات از سرورهای دانشکده هوا و فضا دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است.

نرخ یوسف شکند گر تو به بازار آیی

کار گل زار شود گر تو به گل زار آیی

(شهریار)

ایمیل: vahid.nikjou012@gmail.com

تعهد نامه

اینجانب وحید نیکجو دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته فیزیک دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه شبیه سازی توزیع فضایی پارامترهای پلاسما در سیستم تخلیه الکتریکی تابان تحت راهنمایی دکتر مهدی مومنی و دکتر آزاده کبریایی متعهد می شوم

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

امضای دانشجو: وحید نیک جو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

مدل سازی محاسباتی تخلیه الکتریکی ایجاد شده در اثر برخورد ذرات (یون ها، الکترون ها و ...) ناشی از هوا و آرگون را بررسی می کند. این مدل خود سازگار برای تجزیه و تحلیل رفتارهای فیزیکی تخلیه الکتریکی با شدت بالا در فشار اتمسفر ایجاد شده است. مدل سازی را می توان به سه منطقه تقسیم کرد:

(۱) منطقه لایه مرزی کاتد (۲) منطقه یونیزاسیون (۳) منطقه لایه مرزی آند. لایه مرزی کاتد دارای دو زیر مجموعه است، (۱) غلاف (۲) پیش غلاف، لایه مرزی نازکی که به دلیل جدا شدن الکترون ها از سطح کاتد و همچنین یون های (مثبت) به سمت کاتد می روند تشکیل می شود. ابتدای خال کاتد حاصل از این لایه مرزی کاتد و همچنین لایه پیش غلاف که پلاسما است به دلیل درجه یونیزاسیون و دمای مختلف در شرایط غیر تعادل ترمودینامیکی است. لایه مرزی آند به صورت اثرات اتلافی یا جنبشی در معرض غیر تعادل ترمودینامیکی قرار دارد و خال آند به دلیل تراکم جریان و دمای بالا در مرکز لایه مرزی آند قرار دارد. فضای بین لایه مرزی آند و کاتد، فضای با درجه بالایی از یونیزاسیون با نام ستون پلاسما است و به سمت شرایط تعادل شیمیایی درجه یونیزاسیون که برابر با معادله ساها می رود. شعله پلاسما بخش باز ترکیب است و ستون پلاسما در شرایط تعادل ترمودینامیکی قرار دارد. تعداد برخورد ذرات با خود مقادیر مختلف انرژی ایجاد می کند. با توجه به این فرضیه که پلاسما را یک سیال گرفتیم. برخورد ذرات تأثیر مستقیمی بر ضرایب ترابردی دارد و پلاسما می تواند در فشارهای مختلف خصوصیات فیزیکی متفاوتی داشته باشد. اثر فشار را حتی در کسرهای مولی الکترون می توان مشاهده کرد. با فشارهای مختلف، الکترون ها در فشارهای زیاد کمتر از سطح لایه های اتم جدا می شوند. شبیه سازی تخلیه الکتریکی با تجزیه و تحلیل حجم محدود در ANSYS Fluent انجام می شود. برای محاسبه پلاسما در معادلات مگنتوهیدرودینامیک از ضرایب ترابردی گاز هوا و آرگون با استفاده از کد UDF است. نیروی لورنتس که تحت تأثیر امواج هیدرو مغناطیسی مانند موج مغناطوسوتی و موج آلفن است، نیز توسط UDF نوشته شده است. علاوه بر این، معادله تابش، مقاومت گرمایی و تابع کار نیز در این کار با استفاده از UDF در شبیه سازی ما در نظر گرفته شده است. در مدل سازی انجام شده در این کار، نقطه سکون و لایه سکون مشاهده شده است و ضرایب ترابردی را در فشارهای مختلف بدست آورده ایم، اما برای مدل سازی در کار حاضر توسط Fluent فقط ضرایب ترابردی را برای فشار یک اتمسفر از ۳۰۰ کلوین تا حداکثر دمای ۳۰۰۰۰ کلوین تعریف کردیم.

کلمات کلیدی: تعادل ترمودینامیکی، Fluent، تعادل شیمیایی، خال آند، خال کاتد، نقطه سکون، لایه سکون

۱ فصل اول معرفی پژوهش	۱
۱-۱- نوآوری و انگیزه از این پایان نامه	۲
۲-۱- مقدمه	۳
۳-۱- مفهوم پلاسما	۴
۱-۳-۱- معیار های پلاسما	۵
۲-۳-۱- طول دبابی	۶
۳-۳-۱- لکه کاتد	۷
۴-۳-۱- لکه آند	۷
۵-۳-۱- شعله	۱۰
۶-۳-۱- ستون پلاسما	۱۱
۷-۳-۱- تخلیه تاریک	۱۲
۸-۳-۱- تخلیه تابان	۱۳
۹-۳-۱- تخلیه قوس	۱۴
۴-۱- پیشینه پژوهش	۱۵
۵-۱- پلاسمای تعادلی و غیر تعادلی	۲۱
۱-۵-۱- انتقالی، غیر انتقالی	۲۲
۶-۱- لایه سکون پلاسما	۲۴
۲ فصل دوم معادلات و مفاهیم پایه	۲۷
۱-۲- سیال پلاسما	۲۸
۲-۲- عدد رینولدز مغناطیسی	۲۹
۳-۲- عدد پرنتل مغناطیسی	۳۰
۴-۲- عدد پکلت	۳۰
۵-۲- عدد پرنتل	۳۰
۶-۲- مگنتوهیدرودینامیک	۳۱

۳۲	۷-۲- مدل سازی انرژی انتقال درون پلاسما
۳۳	۷-۲-۱- نیروی لورنتس
۳۴	۸-۲- امواج هیدرومغناطیسی
۳۴	۸-۲-۱- موج مغناطوسوتی
۳۴	۸-۲-۲- موج آلفن
۳۵	۹-۲- مدل سازی پدیده های الکترومغناطیسی درون پلاسما
۳۷	۱۰-۲- درجه یونیزاسیون
۳۸	۱۱-۲- تابش پلاسما
۳۹	۱۲-۲- محاسبه ضرایب ترابردی پلاسما
۴۰	۱۲-۲-۱- ویسکوزیته
۴۱	۱۲-۲-۲- هدایت حرارتی
۴۲	۱۲-۲-۳- رسانندگی الکتریکی
۴۳	۳ فصل سوم مدل سازی
۴۴	۳-۱- محاسبات عددی و شبیه سازی مسئله
۴۴	۳-۲- روش محاسبات عددی
۴۵	۳-۳- مراحل روش حل عددی
۴۶	۳-۴- تولید هندسه
۴۶	۳-۴-۱- استقلال از شبکه
۴۷	۳-۵- شبکه بندی با نرم افزار انسیس
۴۸	۳-۵-۱- شبیه سازی در نرم افزار فلوئنت
۴۹	۳-۶- الگوریتم کوپل سرعت و فشار
۵۰	۳-۷- الگوریتم SIMPLE
۵۱	۳-۸- الگوریتم PISO
۵۲	۳-۹- الگوریتم SIMPLEC
۵۲	۳-۱۰- کد نویسی فلوئنت
۵۲	۳-۱۱- کامسول
۵۳	۴ فصل چهارم نتایج
۵۴	۴-۱- مقدمه
۵۵	۴-۱-۱- شار گرمایش روی صفحه آند و پلاسما

۵۵.....	۴-۱-۲- تابع کار کاتد
۵۸.....	۴-۲- پلاسما آرگون
۶۳.....	۴-۳- تابش پلاسما
۶۵.....	۴-۴- پلاسما هوا
۶۸.....	۴-۵- اعتبار سنجی روش مگنتوهیدرودینامیک
۷۲.....	۴-۵-۱ پارامتر غربال گری
۷۳.....	۴-۶- ضرایب ترابردی
۷۳.....	۴-۶-۱- گرمایی ویژه
۷۶.....	۴-۶-۲- هدایت الکتریکی
۷۸.....	۴-۶-۳- هدایت گرمایی
۸۰.....	۴-۶-۴- ویسکوزیته
۸۳.....	۴-۶-۵- آنتروپی
۸۵.....	۴-۶-۶- آنتالپی
۸۸.....	۴-۷- کسرهای مولی الکترون
۹۱.....	۴-۸- مقایسه ضرایب ترابردی با کار دیگران
۹۳.....	۵ فصل پنجم جمع بندی
۹۴.....	۵-۱- جمع بندی
۹۵.....	۵-۲- پیشنهادات
۹۷.....	منابع و مراجع

صفحه

فهرست شکل ها

شکل ۱-۱- شماتیک دما تخلیه الکتریکی پلاسما	۳
شکل ۲-۱- تصویری فیزیکی از مفهوم طول دبابی	۶
شکل ۳-۱- شماتیک لایه مرزی کاتد [۲۶].....	۷
شکل ۴-۱- مقایسه ماکروسکوپیکی اثرات اتلافی و میکروسکوپیکی اثر سینماتیکی [۲۵]	۸
شکل ۵-۱- منحنی پاشن برای گازهای هوا و آرگون [۲۹]	۱۴
شکل ۶-۱- (الف) ستاپ تجربی دانشگاه توکیو ژاپن.....	۱۹
شکل ۶-۱- (ب) نمونه پایه قبل از آزمایش تست قوس دانشگاه توکیو ژاپن.....	۱۹
شکل ۶-۱- (پ) امواج قوس از B تا A جریان و مدت زمان.....	۱۹
شکل ۷-۱- (الف) مدل سازی تخلیه پلاسما حرارتی	۲۰
شکل ۷-۱- (ب) اثرات برخورد تخلیه الکتریکی به کامپوزیت	۲۰
شکل ۸-۱- مکانیسم رفتار هرج و مرج صاعقه، توسط Chemartín و همکاران [۲۰]	۲۰
شکل ۹-۱- انتقالی، غیر انتقالی.....	۲۳
شکل ۱۰-۱- نمودار جریان های سکون	۲۴
شکل ۱۱-۱- نمودار سرعت برای پلاسما آرگون	۲۵
شکل ۱۲-۱- دما پلاسما گاز آرگون	۲۵
شکل ۱۳-۱- فشار پلاسما بر روی صفحه آند	۲۵
شکل ۱-۲- نیروی لورنتس	۳۳
شکل ۲-۲- امواج مغناصوتی	۳۴
شکل ۳-۲- امواج آلفن	۳۵
شکل ۴-۲- ویسکوزیته	۴۰
شکل ۵-۲- هدایت حرارتی نیتروژن	۴۱
شکل ۶-۲- رسانندگی الکتریکی	۴۲
شکل ۱-۳- شبکه بندی هندسه	۴۶
شکل ۱-۴- شبکه بندی تقارن محوری	۵۷
شکل ۲-۴- هندسه فیزیکی	۵۷

- شکل ۴-۳- مقایسه سرعت گاز آرگون کار حاضر با دیگران..... ۶۰
- شکل ۴-۴- توزیع سرعت پلاسما گاز آرگون کار حاضر ۶۱
- شکل ۴-۵- توزیع دما برای پلاسما گاز آرگون کار حاضر ۶۱
- شکل ۴-۶- پلاسما آرگون تجربی ۶۱
- شکل ۴-۷- چگالی گاز پلاسما آرگون کار حاضر ۶۲
- شکل ۴-۸- نمودار چگالی پلاسما گاز آرگون برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
- تا دمای ۳۰۰۰ کلوین ۶۲
- شکل ۴-۹- نمودار ضریب انتشار تابش گاز پلاسما آرگون کار حاضر ۶۳
- شکل ۴-۱۰- تابش پلاسما آرگون کار حاضر ۶۳
- شکل ۴-۱۱- نمودار مقایسه ضریب انتشار پلاسما گاز هوا کار حاضر..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲- تابش پلاسما هوا کار حاضر..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳- مقایسه سرعت گاز پلاسما هوا ۶۵
- شکل ۴-۱۴- توزیع دما برای گاز پلاسما هوا کار حاضر ۶۵
- شکل ۴-۱۵- چگالی پلاسما هوا کار حاضر ۶۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار چگالی پلاسما گاز هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
- تا دمای ۳۰۰۰ کلوین ۶۶
- شکل ۴-۱۷- فرآیند انتقال انرژی غالب بر پلاسما که شکل (الف) مربوط به انرژی یون ها هست و شکل (ب) مربوط به انرژی الکترون ها هست [۴۴]..... ۶۷
- شکل ۴-۱۸- سرعت پلاسما گاز هوا کار حاضر ۶۷
- شکل ۴-۱۹- مقایسه ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما برای گاز هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف
- به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰ کلوین ۷۳
- شکل ۴-۲۰- ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما هوا کار حاضر با تابع سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب
- جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰ کلوین ۷۵
- شکل ۴-۲۱- ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما هوا کار حاضر با تابع گاوس برای فشارهای مختلف
- به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰ کلوین ۷۵
- شکل ۴-۲۲- نمودار مقایسه ظرفیت گرمایی ویژه گاز پلاسما آرگون، هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
- تا دمای ۳۰۰۰ کلوین ۷۶

- شکل ۴-۲۳- مقایسه هدایت الکتریکی پلاسما هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۷۶
- شکل ۴-۲۴- هدایت الکتریکی هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۷۷
- شکل ۴-۲۵- هدایت الکتریکی هوا با روش گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۷۷
- شکل ۴-۲۶- نمودارمقایسه هدایت الکتریکی پلاسما آرگون، هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۷۸
- شکل ۴-۲۷- مقایسه هدایت گرمایی پلاسما هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۷۸
- شکل ۴-۲۸- هدایت گرمایی پلاسما هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۷۹
- شکل ۴-۲۹- هدایت گرمایی پلاسما هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۰
- شکل ۴-۳۰- نمودارمقایسه هدایت گرمایی گاز پلاسما آرگون، هوا برای فشار اتمسفر کار حاضر تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۸۱
- شکل ۴-۳۱- مقایسه ویسکوزیته پلاسما گاز هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۲
- شکل ۴-۳۲- ویسکوزیته پلاسما گاز هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۲
- شکل ۴-۳۳- ویسکوزیته پلاسما گاز هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۳
- شکل ۴-۳۴- نمودار مقایسه ویسکوزیته پلاسما گاز آرگون، هوا برای فشار اتمسفر کار حاضر تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۸۳
- شکل ۴-۳۵- مقایسه آنتروپی پلاسما گاز هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۴
- شکل ۴-۳۶- آنتروپی پلاسما گاز هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۴
- شکل ۴-۳۷- آنتروپی پلاسما گاز هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۵

- شکل ۴-۳۸- مقایسه آنتالپی پلاسما گاز هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۵
- شکل ۴-۳۹- آنتالپی پلاسما گاز هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۶
- شکل ۴-۴۰- آنتالپی پلاسما هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۸۶
- شکل ۴-۴۱- نمودار مقایسه آنتالپی پلاسما گاز آرگون، هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۸۶
- شکل ۴-۴۲- توزیع آنتالپی پلاسما گاز آرگون برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۸۷
- شکل ۴-۴۳- توزیع آنتالپی پلاسما گاز هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر
تا دمای ۳۰۰۰۰ کلوین ۹۰
- شکل ۴-۴۴- مقایسه کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۹۰
- شکل ۴-۴۵- کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۹۱
- شکل ۴-۴۶- کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا با تابع سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب
جدول [۳-۴] تا دمای ۱۰۰۰۰۰ کلوین ۹۱
- شکل ۴-۴۷- مقایسه ویسکوزیته هوا با کار دیگر نویسندگان فشار برای یک اتمسفر ۹۲
- شکل ۴-۴۸- مقایسه هدایت گرمایی هوا با کار دیگر نویسندگان برای فشار یک اتمسفر ۹۲
- شکل ۴-۴۹- مقایسه هدایت الکتریکی کار حاضر با دیگر نویسندگان برای فشار یک اتمسفر ۹۲

صفحه	فهرست جدول ها
۶۵.....	جدول ۴-۱- لیست متغیرها تابع کار و شار گرمایش آند.....
۶۶.....	جدول ۴-۲- شرایط مرزی شبیه سازی
۸۴.....	جدول ۴-۳- مقادیر نوزده فشار مختلف محاسبه شده
۹۹.....	جدول ۴-۴- محاسبه ضریب کسر مولی الکترون $\chi_e(p, T)$ با استفاده از معادله (۴-۱) [۶۵].....

۱

فصل اول

معرفی پژوهش

۱-۱- نوآوری و انگیزه از این پایان نامه

با استفاده بیشتر از مواد کامپوزیت ماتریس پلیمر تقویت شده با فیبر^۱، در عملکرد سازه های سبک مانند هواپیمای مدرن، پره های توربین بادی، قایق ها و... برخورد صاعقه با این اشیاء به یک نگرانی واقعی تبدیل شده است. اثرات برخورد صاعقه بر هواپیما را می توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد. [۱] [۲]

(۱) مستقیم (۲) غیر مستقیم. اثرات مستقیم با آسیب های جسمی که در محل اتصال و تجهیزات دارد همراه است. اثرات غیر مستقیم مربوط به تداخلات ناشی از برخورد الکترومغناطیسی با سیم ها و کابل کشی و تجهیزات حساس به اثرات مغناطیسی است. [۳]

صدمه به سازه ها می تواند خسارت های مالی زیادی برای تجهیزات ایجاد کند. و هم چنین هواپیماها همان طور که در طول زمان ثابت کرده خطرناک و می تواند کشنده باشد. به عنوان مثال برای هواپیمای مسافربری (Fairchild Metro 3) در سال ۱۹۸۸ پس از برخورد صاعقه که عمده سیستم الکتریکی هواپیما را خراب و سقوط کرد و منجر به مرگ نوزده نفر از مسافر و دو نفر از اعضا خدمه شد. [4]

طراحی مدرن هواپیما، برای جلوگیری از چنین فاجعه که می تواند ناشی از صاعقه باشد بسیار موثر است. با این حال نمی توان از صدمات صاعقه به هواپیما های مدرن جلوگیری کرد، اما معمولاً باعث می شود تا تاخیر شدید و شغل های پر هزینه تعمیر و نگهداری برای جایگزینی قسمت آسیب دیده ایجاد شود. مطالعه صاعقه در آزمایشگاه با استفاده از خازن های پر قدرت برای تحول بار الکتریکی شبیه صاعقه امکان پذیر است. که از طریق آزمایش های تجربی، فقط مشاهده نهایی ماکروسکوپی، خسارات ناشی از جریان برخورد صاعقه امکان پذیر است که تخلیه دارای پارامترها و تاثیرات مختلفی دارد.

این تاثیرات به مکانسیم پلاسما مربوط است به همین دلیل است که، برای درک مکانسیم اصلی که می تواند باعث ایجاد صدمات ناشی از صاعقه شود، شبیه سازی عددی این مطالعه ضروری است. از این مکانسیم ها به عنوان " شرایط بارگیری " برخورد تخلیه استفاده می شود.

شبیه سازی با تقریب های ریاضی ساده، برای توصیف و تاثیر تخلیه الکتریکی بر مواد، مانند مواد کامپوزیتی^۲ را انجام دهند. کار حاضر نمایانگر روشنی از شرایط بارگیری تخلیه بین یک آند مس و یک کاتد تنگستن است. که فقط به شبیه سازی پلاسما با کمک پارامترهای مگنتوهیدرودینامیک می پردازیم. پلاسما سیالی و تعادلی در نظر گرفته شده است و پارامترهای تشکیل دهنده پلاسما مانند شار گرمایش آند، تابع کار کاتد، ضرایب ترابردی پلاسما برای هوا و آرگون، معادلات مگنتوهیدرودینامیک را در شبیه سازی در نظر می گیریم. که از تاثیر پلاسما بر مواد کامپوزیتی صرف نظر کردیم. همچنین بالعکس تاثیر مواد کامپوزیتی بر پلاسما هم در نظر گرفته نشده است.

^۱ fiber reinforced polymer matrix (FRP)

^۲ carbon fiber reinforced polymer matrix

۱-۲- مقدمه

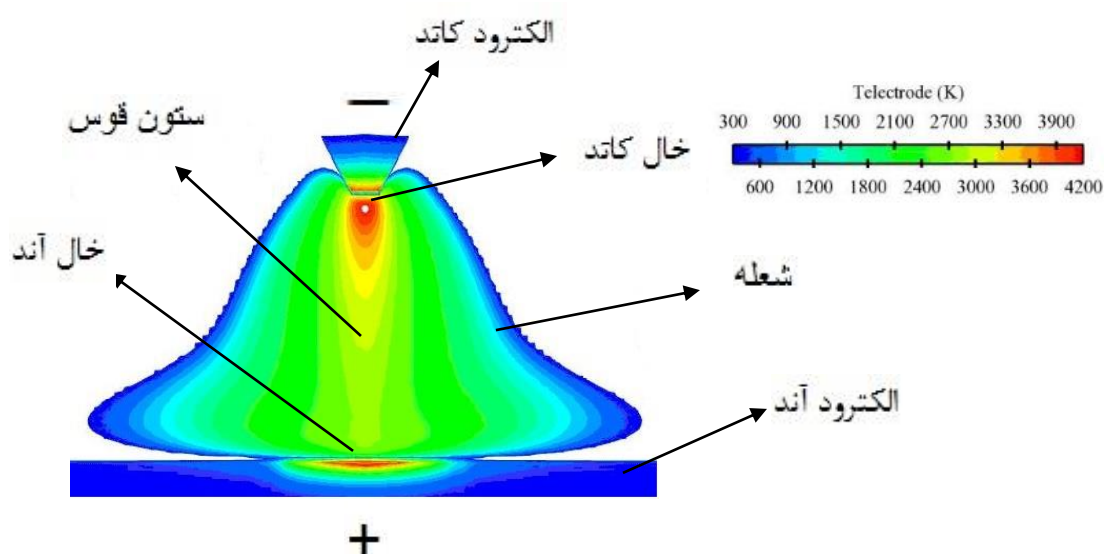
قوس الکتریکی یکی از انواع تخلیه های الکتریکی است. از ایجاد یک مسیر رسانایی بین دو نقطه از پتانسیل الکتریکی متفاوت در محیطی که در آن نقاط به کار برده شده است، حاصل می شود هر دو نوع جریان مستقیم^۱ و جریان متناوب^۲ قابلیت تولید قوس الکتریکی را دارد که در پروژه ما جریان مستقیم است. پدیده قوس الکتریکی، اولین بار در سال ۱۸۰۳ میلادی توسط پرفسور پتروف^۳ در آکادمی علوم سن پترزبورگ کشف شد. او کاربرد اصلی قوس الکتریکی را در ایجاد روشنایی و ذوب فلزات می دید. تخلیه به سه دسته تقسیم می شود.

۱- تخلیه تاریک (تخلیه تاونسند)

۲- تخلیه تابان

۳- تخلیه قوس

طرح شماتیک اولیه یک قوس الکتریکی در شکل ذیل ارائه شده است همان طور که ملاحظه می شود، یک قوس از لکه کاتد (خال کاتد)^۴، لکه آند (خال آند)^۵، ستون قوس پلاسما و شعله (تاج قوس)^۶ تشکیل شده است.



شکل ۱-۱- شماتیک دما یک تخلیه الکتریکی [66]

^۱ DC: Direct Current

^۲ AC: Alternative Current

^۳ V.V. Petrov

^۴ Cathode Spot

^۵ Anode Spot

^۶ Crown arc

نام "پلاسما" اولین بار در سال ۱۹۲۹ میلادی توسط تانکس و لانگمویر^۱ برای توصیف مجموعه ذرات باردار استفاده شد. همچنین عبارت "حالت چهارم ماده" برای توصیف محیط یونیزه شده که در اثر تخلیه الکتریکی یک گاز تولید شده است، نخستین بار در سال ۱۸۷۹ به کار گرفته شد. علت این نامگذاری برای این است که با اعمال حرارت به جسم جامد، آن را به مایع و سپس به گاز تبدیل می کنند.^[۵]

با ادامه این روند اعمال انرژی حرارتی کافی به گازها، پلاسما ایجاد خواهد شد. که با اعمال انرژی کافی به گاز، الکترون های آزاد موجود در گاز جدا شده و با اتم ها و ملکول های خنثی برخورد می کنند. الکترون ها و یون های جدید را تولید می کنند. این الکترون های ثانویه نیز با برخورد به الکترون های اولیه از آن ها حرارت و انرژی می گیرند و به فرآیند یونیزاسیون شتاب می بخشند. در نتیجه پلاسما که در حقیقت مجموعه ای از الکترون های آزاد با بار منفی و یون های با بار مثبت و گونه های خنثی است، شکل می گیرد از دیدگاه ماکروسکوپی این مجموعه خنثی است زیرا چگالی الکترون ها و یون ها تقریباً برابر است. با توجه به فرآیند تشکیل پلاسما، گاهی آن را "گاز یونیزه شده"^۲ نیز می نامند. هنگامی که پلاسما تشکیل می شود، نوع عملکرد آن متفاوت از گاز خواهد شد. خواص الکتریکی ذرات باردار، میدان الکتریکی ایجاد می کنند و به دنبال آن میدان مغناطیسی شکل می گیرد. از جمله مزیت های پلاسما نسبت به حالت های دیگر ماده این است که می تواند جریان الکتریکی و مغناطیسی را داشته باشد. همچنین این نوع ماده می تواند درجه حرارت بسیار بالایی برخوردار باشند، زیرا شکسته شدن پیوند بین الکترون ها و هسته ی اتم و پیوند های مولکولی به دمای خیلی زیادی نیاز دارد. با از دست دادن انرژی گرمایی، یون ها به اتم های خنثی و در نهایت حالت گاز تبدیل می شوند. در برخی موارد اتفاق می افتد الکترون جدا شده از یک اتم و یا مولکول خنثی، به اتم یا مولکول دیگری می چسبد و از این طریق یون منفی ایجاد می کند در این شرایط هم شامل یون های مثبت و هم یون های منفی است.

^۱ Tanks and Langmuir

^۲ Ionized gas

درصد یون های مثبت خیلی بیشتر از یون های منفی است. تفاوت اصلی حالت پلاسما با سه حالت دیگر ماده در اهمیت تاثیر نیروی الکتریکی و مغناطیسی روی آن است در حالی که نیروهای دیگری هم چون نیروی گرانش روی هر چهار حالت ماده اثر می گذارد. از آنجا که این نیروهای الکترومغناطیسی می توانند تا فواصل زیادی اثر بگذارند، پلاسما این قابلیت را دارد تا همانند یک سیال عمل کند حتی اگر ذرات آن به ندرت با یک دیگر برخورد کنند. موضوع جالب این است که پلاسما رایج ترین ماده در جهان می باشد کره زمین توسط یک لایه پلاسمای نازک به نام " باد خورشیدی "^۱ و همچنین یک لایه ضخیم پلاسما به نام " یونسفر "^۲ پوشانده شده است خورشید و ستاره ها و اجرام در فضای بین سیاره ای و بین ستاره ای از پلاسما تشکیل شده اند همچنین پلاسما در لوله های فلورسنت و نئون نیز وجود دارد به عنوان مثال در لامپ نئون با اعمال ولتاژ بالا به دو الکتروود درون آن گاز درون آن که نئون می باشد یونیزه شده و نور تولید می کند. از جمله کاربرد های دیگر پلاسما، می توان به استفاده از آن در صفحه نمایش تلویزیون، هم چنین آیرودینامیک جهت جلوگیری از از جدایش جریان و کاهش درگ روی سطح ایرفویل ها و نیز یکی از راه های بهبود فرآیند احتراق، پایداری شعله و کنترل جرقه، تصفویه آب، جوش و برش قطعات؛ رشد جوانه زنی گیاه، رشد ساقه گیاه، پاک کردن سطوح الکترونیکی و غیر الکترونیکی، اشاره کرد. در ادامه معادلات و مفاهیم پلاسما بیشتر آشنا می شویم.

۲-۱- معیارهای پلاسما

این سه شرط بیان گر این است که گازی که یونیزه شده پلاسما می باشد. گازی که خیلی کم یونیزه شده است، مثلاً گاز خروجی یک جت، شرایط یک پلاسما را حایز نیست، زیرا که حرکتشان بیشتر توسط نیروهای هیدرودینامیکی کنترل می شود تا توسط نیروهای الکترومغناطیسی، اگر ω فرکانس نوسانات پلاسما، τ زمان متوسط بین برخوردهای انجام شده با اتم های خنثی باشد. برای داشتن چلاسما شرط زیر باید برقرار باشد.

$$\omega\tau > 1 \quad (1-2)$$

شرط شبه خنثی ایجاب می کند که چگالی الکترون ها و چگالی یون ها تقریباً با هم برابر باشد.

$$\lambda_D \ll L \quad (2-2)$$

تعداد ذرات (N_D) در یک (پوشش دبای) مطابق رفتار دسته جمعی ایجاب می کند که

$$N_D \gg 1 \quad (3-2)$$

^۱ Solar wind

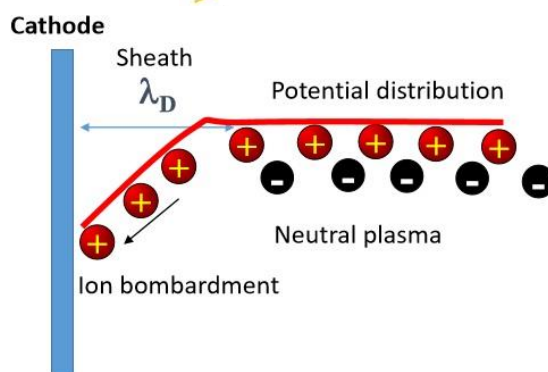
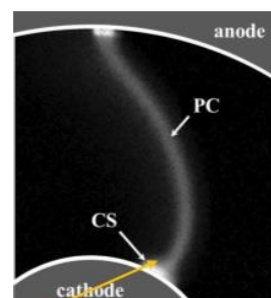
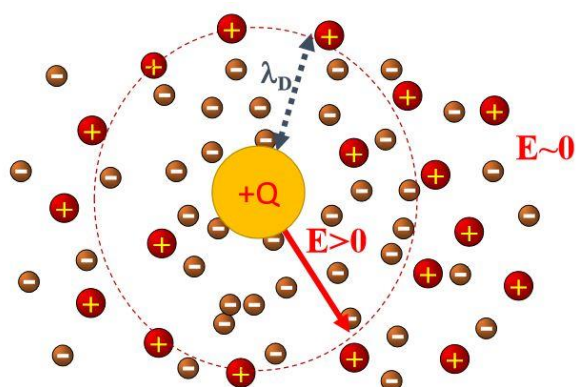
^۲ Ionosphere

۲-۱-۱- طول دبای^۱

از دیدگاه میکروسکوپی، پلاسما مجموعه خنثی است، زیرا چگالی یون ها و الکترون ها تقریباً برابر است. اما اگر ذره ای باردار در این مجموعه قرار گیرد، دیگر به صورت خنثی عمل نخواهد کرد، تا فاصله خاصی از آن ذره تحت تاثیر میدان الکتریکی ناشی از آن ذره قرار می گیرد. توسط لایه ای از ابر باردار (پوشش دبای^۲) پوشانده می شود به طوری که از میدان الکتریکی که توسط پلاسما پوشیده شده است، طول دبای (λ_D) گفته می شود و به صورت زیر نوشته می شود.

$$\lambda_D = \left(K_B T_e T_i / \pi e e_i (n_e T_e + n_i T_i) \right)^{1/2} \quad (2-4)$$

که در آن ثابت K_B ثابت بولتزمن، T_e دمای الکترون، n_e چگالی الکترون، دمای یون را با نماد T_i چگالی یون n_i بار الکترون e ، یون بار e_i ،



شکل ۱-۲- تصویری فیزیکی از مفهوم طول دبای [۶۹]

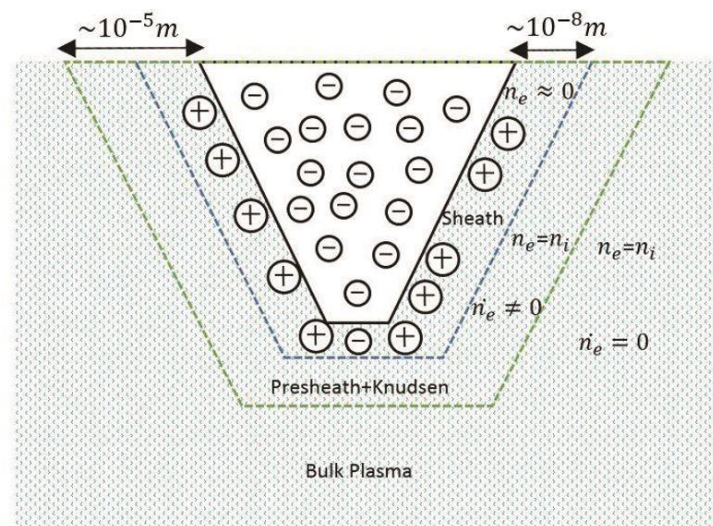
¹ Debye length

² Debye shielding

۱-۲-۱- لکه کاتد

بر اساس نظریه نشر یون ها، کاتد قطبی است که همواره الکترون خارج می شود. قسمت عمده الکترون ها از ناحیه خاصی از الکتروود کاتد صورت می گیرد که به لکه کاتدی مشهور است، که دما و چگالی جریان در لکه کاتد بیشتر از ناحیه های دیگر الکتروود کاتد می باشد. با توجه به این که در محدوده لکه کاتدی انرژی زیاد آزاد می شود و به همین علت است که این محدود به سمتی حرکت می کند، که کمترین انرژی دارا است. با توجه به شکل ۱-۲- غلاف^۱ و پیش غلاف^۲، لایه نازکی تقریباً برابر 10^{-5} ، 10^{-8} متر می باشد.

لایه مرزی کاتد دارای دو زیر مجموعه غلاف و پیش غلاف است. ناحیه غلاف لایه نازکی که به علت جدایش الکترون از سطح کاتد و یون های تشکیل شده است. به سمت کاتد می رود. دارای شرط شبه خنثی نبود و شروع لکه کاتد که از این لایه ناشی شده است و همچنین لایه پیش غلاف دارای شرط شبه خنثی می باشد.



شکل ۱-۳- شماتیک لایه مرزی کاتد [۲۶]

با این حال، چون کل سیستم باید شبیه سازی شود، هزینه های قابل توجه محاسبه باید تا حد قابل قبولی کاهش یابد در اینجا لایه کاتد، نادسن^۳ نادیده گرفته می شود.

۱-۲-۲- لکه آند

در محدوده لکه آند، سطح جامد یا مذاب فلز، توسط الکترون ها بمباران می شود. در این حالت انرژی ناشی از برخورد الکترون ها با سطح آند موجب افزایش دمای آن تا دمای بالاتر از دمای ذوب می گردد.

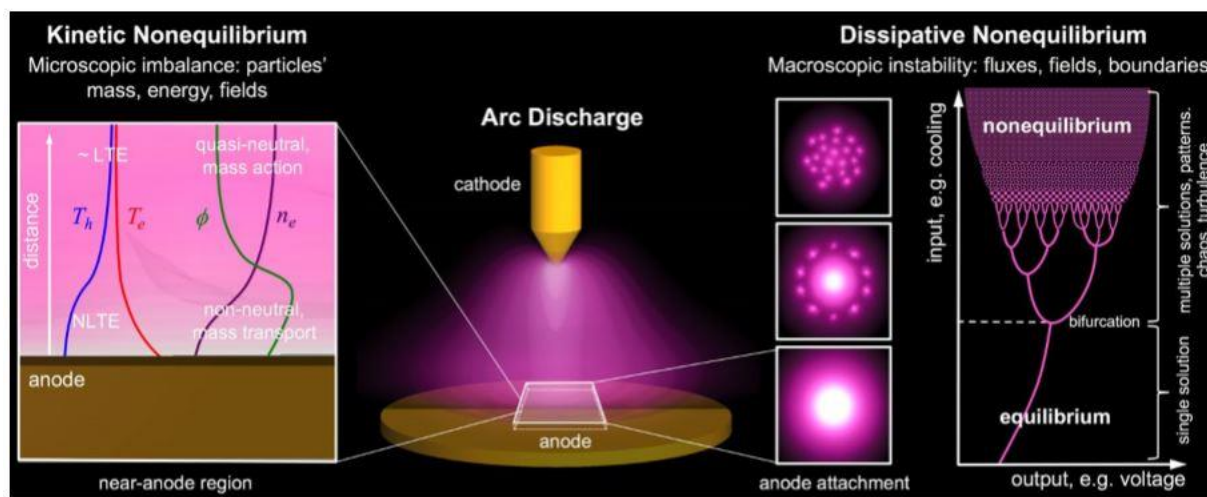
^۱ Sheath

^۲ Pre-Sheath

^۳ Knudsen

که بیشترین دما در سطح آند در لکه آند رخ می دهد. با افزایش جریان قوس، اندازه لکه آند نیز افزایش می یابد. [۲۴]

لایه مرزی آند نیز نادیده گرفته می شوند. زیرا افت یا افزایش بالقوه در مقایسه با لایه کاتد کم است. محاسبه پیچیده ضرایب ترابردی در حالت غیر تعادلی پلاسما با روش چاپمن اینسکوگ است. [۶۱]
برای تحلیل بررسی لایه مرزی آند، اثرات اتلافی یا اثر سینماتیکی در نظر گرفته می شود. [۲۵]



شکل ۱-۴- مقایسه میکروسکوپی اثرات اتلافی و میکروسکوپی اثر سینماتیکی [۲۵]

پدیده های غیر تعادل در جریان های پلاسمای حرارتی را می توان به طور مشابه جنبشی یا اتلاف کننده توصیف کرد. وقوع غیر تعادل جنبشی و اتلافی در یک سیستم پلاسمای حرارتی یعنی تخلیه الکتریکی انتقالی در شکل ۱-۳- نمایش داده شده است. در شرایط تعادل ترمودینامیکی، که دمای یکسانی را برای گونه های سنگین (اتم ها خنثی، مولکول ها، یون ها) و برای الکترون ها نشان می دهد. به طور کلی در هسته قوس معتبر است اما در منطقه نزدیک به آند تا حد زیادی معتبر نیست. به همین ترتیب، شبه خنثی و قوانین مربوط به جرم (به عنوان مثال معادله ساها) نیز در نزدیکی آند، در جایی که انحراف زیادی در تراکم چگالی الکترون و پتانسیل الکتریکی از آنچه انتظار می رود تحت تعادل رخ دهد بی اعتبار است. در نتیجه، این انحرافات فرض تعادل ترمودینامیکی که یک مفهوم کلاسیک و بسیار مفید برای تجزیه و تحلیل پلاسمای حرارتی است. بی اعتبار می کند، که منجر به حالت غیر تعادل ترمودینامیکی می شود. [۴۵] غیر تعادل جنبشی نتیجه ذرات میکروسکوپی یا عدم توازن های میدان است همان طور که توسط چارچوب های نظریه جنبشی شرح داده شده است. [۴۶]

عدم تعادل جنبشی را می توان از طریق تجزیه و تحلیل معادله انتقال بولتزمن^۱ به دست آورد که تحول تابع چگالی احتمال F_s از گونه ها را توصیف می کند.

طبق معادلات نظریه جنبشی که F_s باید در آن صدق کند، معادله بولتزمن است

$$F_s = f(r, v, t) \quad (۱-۱)$$

$$D_t F_s = C_s \quad (۲-۱)$$

$$D_t = \partial_t + v \cdot \nabla_x + a \cdot \nabla_v = \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial}{\partial v} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_s \quad (۳-۱)$$

در اینجا، $\mathbf{F}$ نیروی وارد بر ذرات، $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_s$ میزان تغییر زمان f در اثر برخورد است. علامت ∇ ، گردایان در فضای $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ است. [۶۲]

x موقعیت، v سرعت، a شتاب و $C_s = C_s^a - C_s^b$ نرخ خالص تغییر ناشی از برخورد ها، که در آن خلاصه های a, b به ترتیب سهم های بعد و قبل برخورد را نشان می دهد. با توجه به شکل ۱-۴ - به طور کلی، درجه غیر تعادل جنبشی را می توان براساس مقدار نسبی میزان تغییر در فاز - فضا و میزان تغییر در اثر برخورد ها دانست یعنی [۴۷]

$ D_t F_s \ll C_s^{ab} $	بسیار تحت تسلط - برخورد ← تعادلی - مدل ترمودینامیکی
$ D_t F_s \lesssim C_s^{ab} $	تحت تسلط - برخورد ← شبه تعادلی - مدل سیالی
$ D_t F_s \approx C_s^{ab} $	عدم تحت تسلط - برخورد ← غیر تعادلی - جنبشی / مدل دینامیکی ذره

^۱ Boltzmann Transport Equation (BTE)

حرف a,b یکی از اصطلاحات برخورد را نشان می دهد و $|0|$ مقدار را نشان می دهد. برای برخوردهای بسیار زیاد، شیب های مکانی و زمانی تاثیر ناچیزی در تحول F_s دارند و تقریب تعادل جنبشی معتبر است. زیرا اغلب در مدل های جهانی و تجزیه، تحلیل ترمودینامیک استفاده می شود. [۲۵] با توجه به شکل ۱-۳- از طرف دیگر، وقتی اثرات تصادفی غالب نباشند، سیستم در حالت عدم تعادل جنبشی است و دینامیک ذرات باید توسط معادله انتقال بولتزمن کامل توصیف شود. همان طور که توسط دینامیک جنبشی ذرات حاصل می شود. شرایط متوسط شبه تعادل^۱ جنبشی که در آن دینامیک ذرات هنوز تحت سلطه برخورد هستند اما شیب های فضایی و زمانی را نمی توان نادیده گرفت، مشخصه بیشتری از جریان های پلاسمای حرارتی است. شبه تعادل (عدم تعادل ملایم)^۲ در فرمول های سیالی مورد استفاده قرار می گیرد. [۴۸][۴۹]

برای درک عدم تعادل اتلاف یا تعادل اتلاف، می توان بیان کرد که الکتروود آند قطب مثبت است الکترون های که تابش می شوند به سمت آند می روند سطح آند را می پوشانند هرچه الکترون های بیشتری روی سطح آند قرار بگیرند میزان تاثیر آند کمتر می شود فشار در لایه مرزی آند را افزایش می دهد. این خود یک اتلاف است. اتلاف یک شرط تحمیل شده به سیستم پلازما، که به وجود آمده است این اتلاف به پارامتر های انرژی، تکانه، بار و جرم وابسته هست. اگر فشار به حدی باشد می توان لایه مرزی آند را در شرایط غیر تعادل ترمودینامیکی یا تعادل ترمودینامیکی قرار دهد. [۵۱] [۵۲]

۱-۲-۳- شعله

شعله در فرآیند قوس، فضای بین دو الکتروود با شعله درخشانی پوشیده می شود که این منطقه از فعل و انفعالات شیمیایی بالایی برخوردار است این پارامتر بسیار مهم است در این حالت امکان ترکیب مجدد و یا نفوذ در ستون قوس وجود دارد. برای مثال احتمال یونیزه شدن ذرات گاز به موازات ترکیب مجدد کاتیون ها با آنیون ها وجود دارد. در شرایط پایدار دمایی، نوعی تعادل در بین یونیزه شدن ذرات و ترکیب مجدد آن ها برقرار می گردد، به گونه ای که منحنی جریان الکتریکی، همواره به صورت پیوسته به دست می آید.

^۱ quasi-equilibrium

^۲ mild nonequilibrium

در نقاط تغییر علامت هم مقدار را صفر نشان می دهد. در مواقعی که شرایط ناپایدار برتخلیه حاکم شود افزایش نرخ ترکیب مجدد ذرات منجر به اختلال تخلیه و قطع مقطعی جریان الکتریکی می شود. در مباحث احتراق با تخلیه الکتریکی (پلاسما) قسمت شعله با سیال سوخت واکنش داده باعث جدایش اتم از مولکول و ترکیب جدید را ایجاد می کند در احتراق مایلد^۱ از پلاسما سرد استفاده می کنند برای این که این نوع پلاسما های با دمای و جریان الکتریکی و توان پایین برای شکستن پیوند های مولکولی مناسب می باشد. در احتراق میزان تولید آلاینده های ناکس^۲، ساکس^۳، و طول شعله دارای اهمیت است و برای تولید پلاسما نیازی نیست سیال پلاسما اکسیژن باشد و در احتراق های معمولی برای ایجاد احتراق باید از گاز اکسیژن استفاده شود و در این صورت میزان آلاینده های تولیدی و طول شعله افزایش می یابد، برای همین یکی از راه های مناسب احتراق مایلد استفاده از پلاسما می باشد.

در شعله پلاسما با تولید یون ها، الکترون های پر انرژی و همچنین مولکول های برانگیخته از نظر ارتعاشی و هم از نظر الکترونی، باعث ایجاد رادیکال های فعال (مانند O, OH, H) و هم گونه های میانی شده از این طریق سبب شتاب بخشی به واکنش های شروع کننده و ادامه دهنده زنجیره واکنش ها می شود. برخورد الکترون ها به مولکول ها (مانند مولکول های سوخت ...) به آن ها انرژی می دهد. این انرژی کوانتیده به مولکول های یونیزه شده انرژی داده و این مولکول های یونیزه شده و ساختار شیمیایی آن ها را تغییر می دهد. باعث تجزیه آن ها به مولکول های کوچکتر شده و در نتیجه از این طریق واکنش پذیری با دیگر سیال و خواص انتقالی آن بهبود می یابد.

در این اثر مولکول های کوچکتر، سیال سوخت (نظیر C_2H_4 , CH_2O , CH_4 , H_2) که از مولکول های بزرگ تر که با کمک تخلیه، پلاسما تولید شده اند با سرعت بیشتری به نواحی واکنشی نفوذ کرده و کاهش زمان تاخیر جرقه و کاهش شعله احتراق هم می شوند.

۱-۲-۴- ستون پلاسما

نتایج شبیه سازی نشان داده است که قوس می تواند به عنوان حالت تعادل شیمیایی^۴ برسد. اما در حالی که حالت تعادل حرارتی برای شرایط تجربی به طور معمول حاصل نمی شود. کلمه قوس با آنچه در معماری استفاده می شود متفاوت است. در صورتی که قوس ایجاد تعادلی نباشد. ستون پلاسما با شعله پلاسما تقریباً یکی می شود و می توان گفت که کارکرد این دو ناحیه یکی می شود. برای همین، یکی دیگر از دلایلی است که پلاسما سرد نسبت به پلاسما گرم و پلاسما داغ برای احتراق بهتر است.

^۱ Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD)

^۲ NO_x

^۳ SO_x

^۴ LCE: Local Chemical equilibrium

اگر چه قوس و تخلیه تابان دو رژیم معمول برای محققان هستند اما آنها نمی توانند به طور کامل کل روند این پدیده فیزیکی بسیار پیچیده را توصیف کنند. از اولین مرحله تا تخلیه قوس پایدار به طور معمول سه مرحله اصلی و زیر مرحله های مهم وجود دارد.

۱-۲-۵- تخلیه تاریک^۱

پس از شروع یونیزاسیون توسط پرتوهای کیهانی یا سایر منابع تابش یونیزاسیون که جریان فقط فمتوآمپر^۲ را تولید می کند، این مرحله، بهمن تاریک نیز نامیده می شود، یک حالت شروع برای تولید گسترده الکترون است معمولاً توسط یک منبع ولتاژ بالا شروع می شود تا یک میدان الکتریکی قوی ایجاد کند. میدان الکتریکی و پویش آزاد میانگین الکترون باید به الکترونها ی آزاد اجازه دهد سطح انرژی را بدست آورند که می تواند باعث یونیزاسیون ضربه شود. در این مرحله، این الکترونها از سطح کاتد به دلیل برخورد یونهای مثبت هستند که ظاهر الکترون های کافی برای شروع تخلیه را حفظ می کنند.

اگر انرژی الکترون حاصل از میدان الکتریکی به اندازه کافی بالا نباشد، یونیزاسیون اتفاق نمی افتد اگر در گاز رقیق باشد، جایی که مسیر آزاد برای الکترون طولانی است، ممکن است بیشتر الکترونها قبل از برخورد با هر اتم یا مولکول به آند برسند. برعکس، اگر پویش آزاد میانگین الکترون ها خیلی کوتاه باشد، به دلیل برخورد بیش از حد مکرر با اتم ها، الکترون ها شانس کمی برای به دست آوردن انرژی کافی برای یونیزاسیون خواهند داشت. از این رو، دستیابی به شرایط بهمن تاریک به خصوص برای فشار تخلیه کم و زیاد آسان نیست. وقتی که میدان الکتریکی افزایش یابد الکترون های که کاتد را ترک می کنند شتاب می گیرند و یک الکترون با سرعت کافی در اثر برخورد اتمی را یونیزه کرده و الکترون دیگری را آزاد می کند. این دو الکترون به این شرط که از میدان الکتریکی انرژی کافی بدست آورند باعث ایجاد الکترونها ی بعدی می شوند بنابراین گام به گام، یک واکنش زنجیره ای وارد عمل می شود جریان را از مقدار اشباعی فراتر می برد که این فرآیند را اصطلاحاً پدیده بهمنی می گویند.

وقتی که جرقه به بدنه ایرفویل هواپیما، توربین ها و... برخورد می کند دارای دو اثر مستقیم و غیر مستقیم می باشد علاوه بر اثرات مستقیم که خسارت رساندن به بدنه است به علت این که پلاسما را سیالی گرفتیم و نسبت به دیگر سیال ها دارای میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی ذاتی است برای همین جرقه زده شده در اثرات غیر مستقیم به علت شدت مغناطیس به تجهیزات حساس الکترونیکی خسارت وارد می کند.

^۱ femtoamperes

^۲ Townsend

۱-۲-۶- تخلیه تابان^۱

وقتی ولتاژ اعمال شده بین دو الکتروود از ولتاژ ضربه یا ولتاژ شکست بیشتر شود، گاز موجود در لوله یونیزه می شود و به یک پلاسما تبدیل می شود. جریان الکتریکی از آن عبور می کند و آن را با توجه به گاز مصرفی با رنگ خاصی قابل مشاهده و درخشان می کند که به چنین رژیمی تخلیه تابان گفته می شود.

فردریش پاشن در سال ۱۸۸۹ کشف کرد که ولتاژ شکست بین دو الکتروود در یک گاز به فشار گاز و طول شکاف مربوط است. [۲۷] [۲۸]

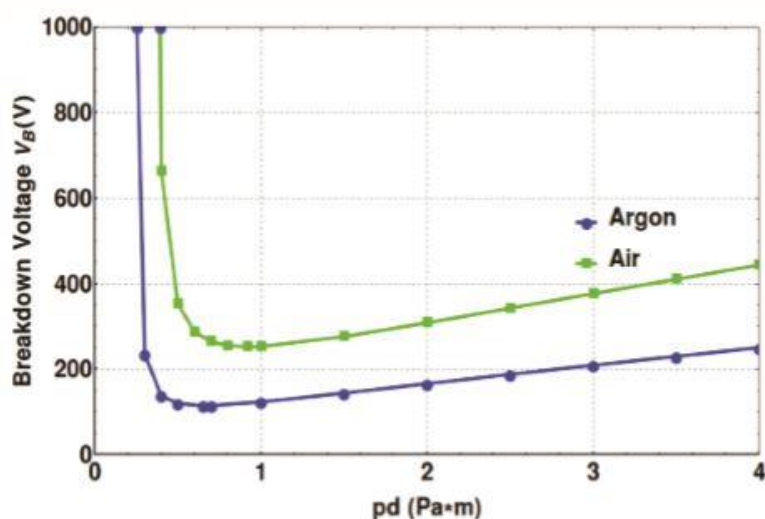
$$V_B = \frac{B(pd)}{\ln(A(pd)) - \ln\left[1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right]} \quad (۴-۱)$$

p فشار گاز برحسب پاسکال، d فاصله شکاف بر حسب متر است، γ_{se} ضریب ثانویه انتشار الکترون است. A و B به صورت تجربی تعیین می شود. که بیش از محدود خاص $\frac{E}{p}$ ثابت مشخص شده است. با تنظیم $\frac{\partial V_B}{\partial (pd)} = 0$ منجر به حداقل ولتاژ شکست V_{Bmin} برای این که مقدار pd مشخص شود.

$$(pd)_{min} = \frac{2.718}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right) \quad (۵-۱)$$

$$V_{Bmin} = 2.718 \frac{B}{A} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma_{se}}\right) \quad (۶-۱)$$

^۱ glow discharge



شکل ۱-۵- منحنی پاشن برای گاز هوا و آرگون [۲۹]

این نتیجه از بهمن تاریک است که در بالا بحث شد، که دارای یک پیش شرط دقیق برای قدرت میدان الکتریکی و الکترون دارای مسیر آزاد، هنگامی که ولتاژ بیش از حد درخشش طبیعی افزایش یابد، درخشش غیر عادی آغاز می شود. شکل ۱-۴- منحنی پاشن نقطه بهینه برای یونیزاسیون گاز هوا و آرگون را نشان می دهد با فشار و فاصله مستقیم دارد این نقطه مینیموم بهینه مربوط به برخورد ذرات است.

۱-۲-۷- تخلیه قوس^۱

اگر ولتاژ اعمال شده همچنان افزایش یابد که درخشش کاتد، کل کاتد را پوشش دهد. سپس تخلیه قوس شروع می شود تخلیه قوس که در محدوده جریان آمپر رخ می دهد. این ناحیه در محدوده مطالعه تحقیقاتی است، زیرا بیشتر برنامه های تخلیه مربوط به این رژیم است. از نظر صنعتی، از قوسهای الکتریکی برای جوشکاری، برش پلاسما، ماشین کاری تخلیه الکتریکی استفاده می شود. در زمینه های فضاوردی تخلیه قوس داخل یک رانشگر جت قوسی، پیشراننده گاز را گرم می کند تا نیروی محرکه بزرگی را به عنوان راهی جایگزین برای رانش سنتی توسط سوخت شیمیایی تولید کند. مشخصه آن افت ولتاژ شدید ناشی از تخلیه درخشش با افزایش شدت جریان است. اگر افت ولتاژ کاتد در تخلیه تابان تقریباً ۱۰۰ ولت یا بیشتر، در قوس ۱۵~۱۰ تخلیه ولت است.

^۱ Arc discharge

افت ولتاژ در نتیجه افزایش رسانایی الکتریکی گاز در فرآیند انتقال به حالت پلاسما است بنابراین مقاومت کمتری برای جریان وجود دارد. اگر شدت تخلیه های جریان همچنان افزایش یابد، افزایش تعداد الکترون باعث افزایش درجه حرارت گاز در مجاورت کاتد می شود و یونیزاسیون حرارتی نقش اصلی را در یونیزاسیون گاز بازی می کند در نتیجه، به منظور حفظ شبه خنثی در بدنه اصلی پلاسما، لازم است که از افت بالقوه الکتریکی در مجاورت کاتد اطمینان حاصل کنید. خروج الکترون از سطح کاتد اکنون بیشتر به دلیل انتشار یونی حرارتی و انتشار میدانی به جای انتشار ثانویه صورت می گیرد، که در مراحل اولیه فعال است. در طول برخورد صاعقه، جریان پالس می تواند تا $200 \sim 300$ kA با مدت زمان چند میکرو ثانیه افزایش یابد. که جریان الکتریکی مداوم با یک دوره، با مدت زمان $1 \sim 0.25$ ثانیه به $800 \sim 200$ آمپر برسد. با توجه به شکل ۱-۱ این جریان زیاد گاز را تا دمای 3000 کلوین گرم کند. [۱] هنگام تماس با اشیاء درجه حرارت بالا و جریان الکتریکی سریع گرم و مواد نارسانا مانند رزین و پلاستیک را تبخیر می کند با توجه به این نکات، رعد و برق می تواند تهدیدی جدی برای بسیاری از سازه های غیر فلزی مانند هواپیما مدرن، برج های مخابراتی پره های توربین بادی، قایق ها و سایر سازه های کامپوزیت تقویت شده با الیاف سبک در معرض خطر جدی باشد به عنوان مثال بخش قابل توجهی از هواپیمای مدرن از کامپوزیت های ماتریس پلیمری تقویت شده با فیبر، کامپوزیت های ماتریس پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای (GFRP) کامپوزیت های ماتریس تقویت شده با فیبر کربن (CFRP) ساخته شده است. [۶] [۲] [۵]

این مواد معمولاً نسبت به همتایان آلیاژ فلزی مورد استفاده در صنعت هوا و فضا بیشتر در معرض صدمه دیدگی صاعقه هستند. برای این کار، این مواد کامپوزیتی باید برای مقاومت در برابر جریان الکتریکی بالا و اثرات شدت گرما طراحی شود.

۱-۳- پیشینه پژوهش

با بهبود مواد و تغییرات در خصوصیات مواد کامپوزیتی مانند مقاومت، هدایت گرمایی می توان پیشرفت های در برابر ضربه صاعقه ایجاد کرد. برای مثال با توجه به شکل ۱-۶ می تواند به طور قابل توجهی به پراکندگی تراکم جریان الکتریکی شدید روی مواد کامپوزیتی، کم شدن مقاومت گرمایی و همچنین نیروهای مغناطیسی که ممکن است باعث لایه لایه شدن کامپوزیت شود کمک کند. معمولاً که یک شبکه مسی برای افزایش هدایت الکتریکی آن به سطح لایه بالای مواد (CFRP) اضافه می شود.

پیش بینی های ما با نتایج تجربی و سایر پیش بینی های عددی گزارش شده توسط پژوهشگران قبلی مقایسه شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که شبیه سازی ما به خوبی می تواند نتایج تجربی را پیش بینی کند.

معمولا سایر روش های محافظت در برابر صدمات ناشی از صاعقه اضافه می شود، یک نمونه از گیرنده های صاعقه، که فقط صفحات فلزی هستند که روی سطوح دم هواپیما و تیغه های توربین بادی قرار دارند. این گیرنده ها با جذب تخلیه به دور از مواد کامپوزیتی کار می کنند و به صورت امن جریان تخلیه را از طریق رساناهای داخلی انجام می دهند.

این روش در کاهش برخورد به سطح کامپوزیت موثر است. با این وجود، با داشتن یک قوس قابل توجه، میدان الکتریکی می تواند به اندازه ای بالا برود تا مقاومت دی الکتریک مواد ایجاد کننده قوس را بشکند. در بعضی موارد با عبور از گیرنده مستقیما روی ماده نارسا ضربه بزند، این مورد فقط طرح مواد (مثال کامپوزیت های فیبرکربن با رزین رسانا) صدمه را کاهش می دهد. خسارت قوس به (CFRF) و کامپوزیتهای (CFRF) معمولا قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱-۶ این اثر سوختن قسمت مرکزی در کامپوزیت ها ایجاد می شود. هر چند در بعضی موارد صدمه تخلیه الکتریکی به مواد کامپوزیت، باعث لایه لایه شدن لایه های داخلی که قابل مشاهده نیست و ممکن است مانند لایه برداری رنگ روی سطوح باشد. پیچیدگی از این دسته شبیه سازی در تعداد معادلاتی که باید برای ستون قوس حل شود. به عنوان مثال بیشترین استفاده از این چارچوب شبیه سازی، مدل سازی با مگنتو هیدرودینامیک (MHD)^۱ است. [۸] در معادلات مگنتو هیدرودینامیک نیاز به حل ترکیبی از معادلات انتقال حرارت، معادلات ناویراستوکس و به همراه حل معادلات ماکسول برای الکترومغناطیس است. مگنتو هیدرودینامیک مدل ریاضی برای تعامل با فرکانس پایین بین هدایت الکتریکی سیالات و میدان الکترومغناطیسی است. مگنتو هیدرودینامیک با پیچیدگی خود، هنوز روشی کارآمد برای مدل سازی فعل و انفعالات قوس الکتریکی است. بدون این رویکرد ما باید تمام ذرات یونیزه شده و برخورد آنها با یکدیگر را نیز الگوبرداری کنیم. برای محاسبه انرژی هر ذره ناشی از برخورد و دمای آن این امر به مقدار بی سابقه ای از منابع محاسباتی نیاز دارد. مدل سازی تخلیه الکتریکی با استفاده از روش مگنتو هیدرودینامیک است. این فرض به طور قابل توجهی از مستلزم استفاده از فرض پلاسما، که در شرایط تعادل ترمودینامیکی^۲ محاسبه ضرایب ترابردی یعنی تراکم چگالی، ویسکوزیته، ظرفیت گرما، هدایت حرارتی و هدایت الکتریکی و... را تسهیل می کند.

تعادل ترمودینامیکی ضرایب ترابردی پلاسما می تواند به عنوان تابعی از دما محاسبه شود. محاسبه با فرض استفاده از معادلات بولتزمن تقریب شده با چاپمن-انسکوگ انجام می شود. تابع توزیع ذرات حاصل با استفاده از چند جمله های سونین^۳ گسترش می یابد. [۹]

^۱ Magnetohydrodynamic (MHD)

^۲ Local thermodynamic equilibrium (LTE)

^۳ Sonine

این فرض چاپمن-انسکوگ دقت قابل قبولی برای خواص پلاسما تا دمای حداکثر ۳۰۰۰۰ کلوین را نشان می دهد. هرچند برخی از نویسندگان دما را تا ۱۰۰۰۰۰ کلوین، اندازه گیری کردند. ستون پلاسما در شرایط تعادل ترمودینامیکی است. با توجه به شکل ۱-۶- اما لایه مرزی آند و لایه مرزی کاتد در حالت غیرتعادل ترمودینامیکی هستند. لایه مرزی کاتد دارای لایه غلاف و پیش غلاف است. با توجه شکل ۱-۲- در بسیاری از مدل ها برای در نظر گرفتن شرایط لایه مرزی نزدیک آند و کاتد تهیه شده اند. با این حال برخی از آن ها کاتد و پلاسما را جداگانه شبیه سازی کردند در حالی که برخی دیگر به طور همزمان کاتد و پلاسما را مدل کردند.

به عنوان مثال Benlive و همکاران، مدلی که انجام دادند ابتدا ناحیه کاتد را به طور جداگانه مدل سازی کردند متوجه شدند که افت پتانسیل الکتریکی روی لایه نزدیک کاتد در تمام نقاط روی کاتد است. که دما، پتانسیل الکتریکی و توزیع چگالی جریان را در سطح کاتد به ما می دهد. به این ترتیب می توان مدل ناحیه پلاسما و لایه مرزی آند را به طور جداگانه مدل سازی کرد. [۱۰] [۱۱] Hsu و همکاران، برای مدل سازی یکپارچه، استفاده از دمای ثابت در مرز برای کاتد و آند پیشنهاد کردند. که یک مرز دمای ۳۰۰۰ کلوین در سطح یک کاتد تنگستن تئوری اعمال شود و مقدار ثابت دیگر از اندازه گیری تجربی در سطح آند گرفته شد. [۱۲] Chemartin و همکاران، مقدار درجه حرارت ۱۰۰۰ کلوین در سطح آند و ۳۵۰۰ کلوین در سطح کاتد وارد شده است که چیدمان مطابق کار Hsu و همکاران قرار دادند. [۱۳]

مدل های دقیق تر "دو درجه حرارت" یکی برای الکترون ها و دیگری برای ذرات سنگین استفاده شده اند. در بخش عمده پلاسما، این شرط است که درجه حرارت ذرات سنگین برابر با درجه حرارت الکترون است. درحالی که، در مناطق مجاور کاتد، دمای ذرات سنگین از دمای الکترون ها پایین تر است. مدل های دو درجه حرارت معمولاً برای اجرای در یک مدل شبیه سازی صاعقه پیچیده هستند زیرا نیاز به معادلات اضافی انتقال ذرات دارد. تاناکا یک مدل دقیق و آسان برای استفاده، که متشکل از یک مدل یک بعدی برای محاسبه شار حرارتی بین ستون پلاسما، کاتد و آند ارائه شده است. از این شارهای حرارتی می توان برای تنظیم دما استفاده کرد تا شرایط غیر تعادل ترمودینامیکی تقریب یابد. [۱۴]

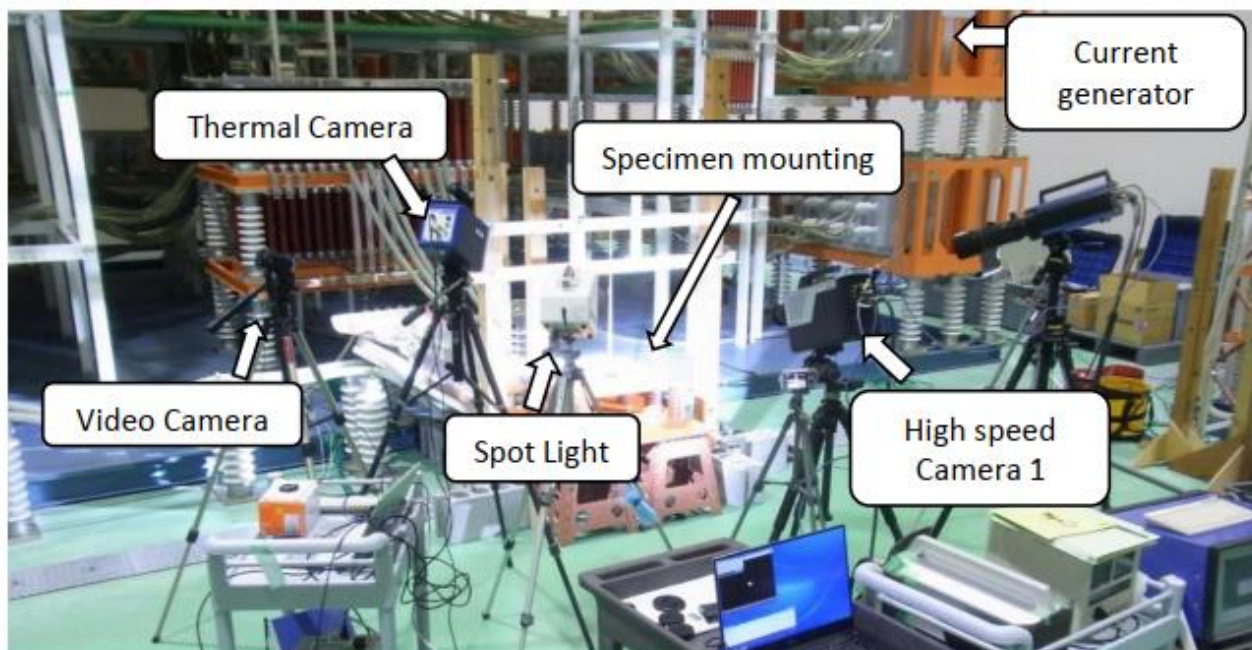
درمدل تاناکا همچنین استفاده از عناصر مش نسبتاً "درشت" در نزدیکی مناطق الکتروود را برای صاف کردن افت دما و هدایت الکتریکی در آن مناطق پیشنهاد می کند. [۱۵]، مدل مورد استفاده در اینجا، یک رویکرد ساده و عملی برای در نظر گرفتن ناپیوستگی های NLTE برای هر دو لایه ی الکتروود آند و کاتد می باشد. این مدل توسط بسیاری از نویسندگان پیشنهاد شده است. [7-16] علاوه براین، شار حرارتی پیشنهاد شده توسط تاناکا این رویکرد شامل استفاده از یک منطقه کوچک از دامنه پلاسما که متصل به آند و کاتد سطوح، (تقریباً مشابه ضخامت لایه NLTE) است. که بیشترین حرارت و پتانسیل روی الکتروودها در این قسمت وسط الکتروود ها ظاهر می شود. با برداشتن دمای شرایط مرزی دمای ثابت در کاتد، هدایت الکتریکی هوا در دمای اتاق 10^{-14} S/m می شود همان طور که توسط Kamsail، اندازه گیری شده است. [۱۷]

در نتیجه، شبیه سازی می تواند برای شروع از شرایط اولیه دمای اتاق چالش برانگیز باشد. عبدالله و همکاران استفاده از یک مدل یک بعدی برای در نظر گرفتن انتشار سرد از الکترون ها از کاتد به آند پیشنهاد شده و باعث افزایش هدایت الکتریکی هوا می شود. [۱۸] برای شبیه سازی صاعقه براساس قوس سوزان آزاد است. با توجه به، شکل ۵-۱- برای شبیه سازی شکل موج C، در این کار، شرایط اولیه دما شبیه به دما ناشی از شبیه سازی شکل موج B اضافه شد.

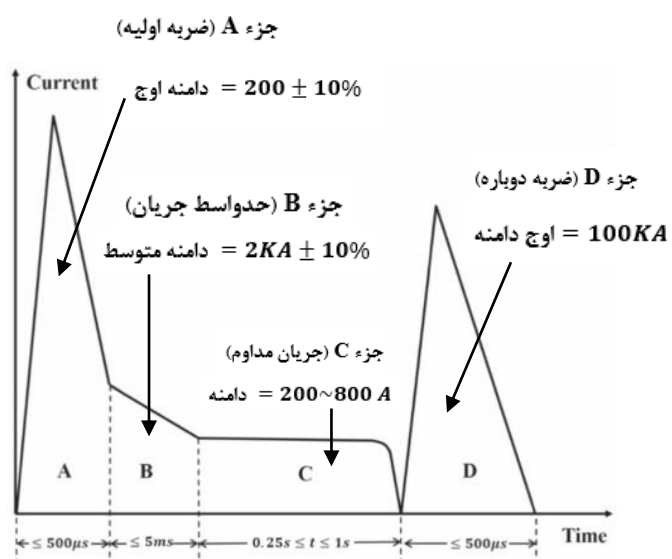
با توجه به، شکل ۱-۳- این مدل شامل یک کاتد تنگستن و صفحه آند می باشد. نتایج آنها نشان می دهد که مگنتوهیدرودینامیک برای دامنه پلاسما با ضرایب تراپردی هوا و آرگون، یک مدل قوس طولانی سه بعدی مناسب باشد که می تواند این روش رفتار آشوبناک کانال قوس را به طور دقیق شبیه سازی کند. نیروی میدان روی سیال می تواند قوس را از نقاط مختلف فشار دهد. این نیرو به ستون قوس فشار می آورد تا جایی که حلقه ایجاد کند. چگالی جریان مستقیماً از دو لبه دایره عبور می کند، و فرآیند سپس تکرار می شود. [۱۹] جفت شدگی مگنتوهیدرودینامیک، معادلات ماکسول با هیدرودینامیک برای توصیف رفتار ماکروسکوپی سیال های بسیار رسانا مانند پلاسما است. ثابت کرد که رویکرد عددی مگنتوهیدرودینامیک می تواند پدیده برخورد صاعقه را با استفاده از طرح های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و یک دامنه سیال همسانگرد^۲ مطالعه کند. تاثیرات اضافی مانند تبخیر مواد نیز به دما قابل محاسبه است. از الکتروود و خصوصیات مواد دامنه پلاسما (آرگون یا هوا) با توجه به مقدار بخار فلزی که به پلاسمای معرفی شده قابل محاسبه است. [۲۰]

^۱ Computational Fluid Dynamics (CFD)

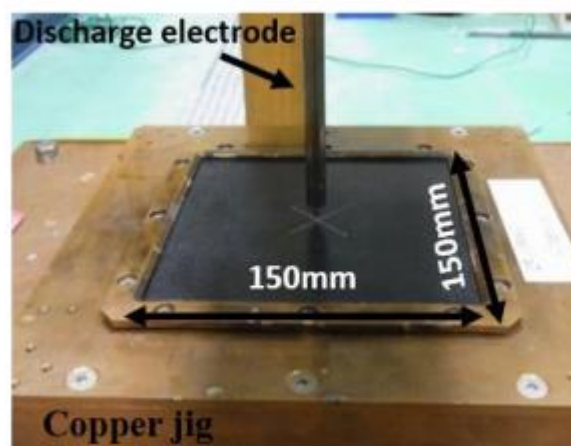
^۲ isotropic



(الف)



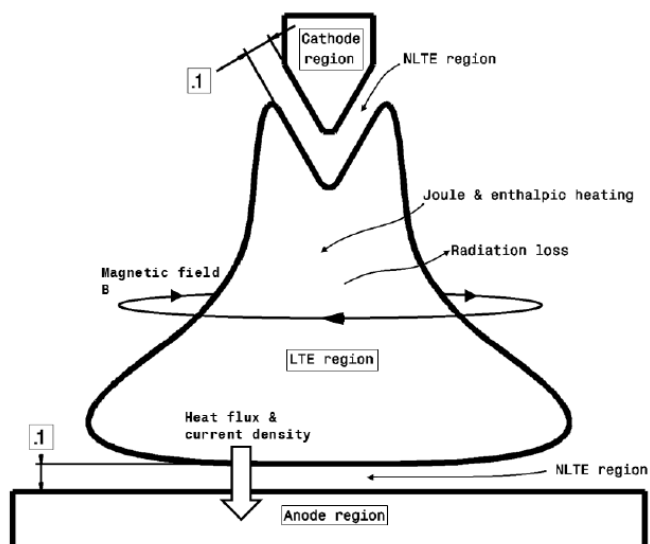
(ب)



(پ)

شکل ۱-۶- (الف) چیدمان تجربی دانشگاه توکیو (ب) شکل امواج قوس از A تا B، با اوج جریان و مدت زمان،

(پ) نمونه پایه قبل از آزمایش تست قوس دانشگاه توکیو [۶]

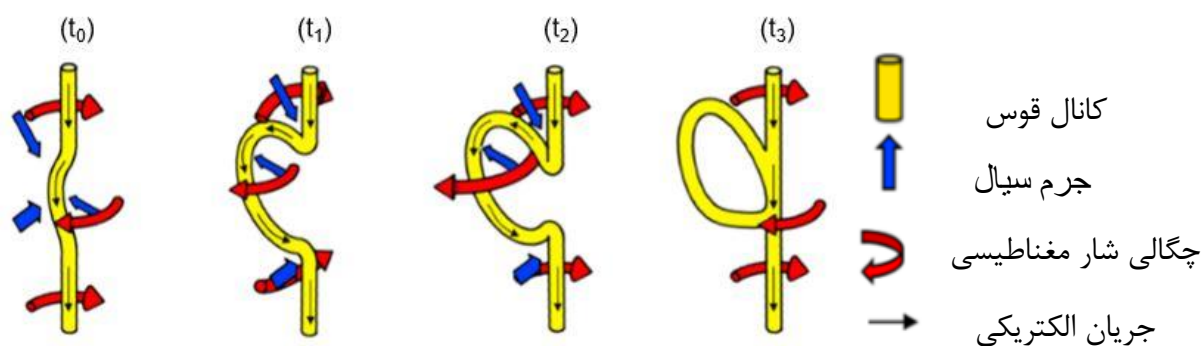


(الف)



(ب)

شکل ۷-۱- (الف) مدل سازی تخلیه پلاسما حرارتی (ب) اثرات قوس الکتریکی به کامپوزیت [۶۷] [۶۸]



شکل ۸-۱- مکانیسم رفتار آشوبناک صاعقه، توسط Chemartín و همکاران [۲۰]

فلش های قرمز (تراکم شار مغناطیسی) معمولاً در جهت منفی پتانسیل از مختصات استوانه ای متصل ، به حجم محدود قوس الکتریکی است. چگالی جریان الکتریکی در فلش سیاه در جهت منفی Z همان مختصات قرار دارد.

۱-۵- پلاسمای تعادلی، غیر تعادلی

همان طور که می دانیم که پلاسما مجموعه ای از الکترون ها، یون ها و ذرات خنثی است. مقدار انرژی که بین این ذرات ناشی از برخورد الاستیک منتقل می شود، به جرم آنها بستگی دارد. از آنجا که الکترون ها جرم کمتری نسبت به یون ها و گونه های خنثی دارند، در برخورد با سایر گونه ها انرژی خیلی کمی به آن ها انتقال می دهند. اگر انرژی گرمایی بین ذرات پلاسما به صورت نامساوی تقسیم شود، پلاسمای تولید شده، غیر تعادلی (غیرحرارتی) نامیده می شود. با این حال، با افزایش فشار، فرکانس برخورد الکترون ها و ذرات خنثی بیشتر شده و در نتیجه انتقال انرژی نیز افزایش می یابد و پلاسمای تعادلی (گرم یا حرارتی) به وجود می آید. در پلاسمای تعادلی، ذرات خنثی گاز و ذرات باردار با یکدیگر در تعادل حرارتی بوده و دمای الکترون ها و دمای ارتعاشی و چرخشی ذرات با هم در تعادل می باشند. همچنین این نوع پلاسما ها جریان زیادی را از خود عبور می دهند، جریان الکتریکی (حدود ۱ الی ۱۰۰۰۰۰ آمپر) و دمای آن ها بین ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ کلوین متغیر بوده و معمولاً در فشارهای بالا به وجود می آیند. فشار بالا باعث می شود تا برخورد کافی بین گونه های پلاسما جهت برقراری تعادل حرارتی ایجاد شود. از طرف دیگر، در فشار های پایین تر میدان الکتریکی به الکترون ها انرژی بیشتری نسبت به سایر ذرات منتقل می کند و چون الکترون ها جرم و حجم کمتری نسبت به یون ها و گونه های خنثی دارند، به دمای خیلی بالایی در حدود ۲۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ کلوین می رسند. از آنجا که جرم الکترون در مقایسه با سایر اتم ها و یون ها کمتر است. طی برخورد با آنها انرژی کمی منتقل می کند و به این ترتیب یون ها و اتم های خنثی دمای کمتری نسبت به الکترون ها خواهند داشت. این نوع پلاسما را پلاسمای غیر تعادلی می نامند. و در آن الکترون ها نه تنها با سایر ذرات بلکه با یکدیگر نیز در تعادل حرارتی نیستند به دلیل تخلیه الکتریکی با سد دی الکتریک^۱ یک نوع پلاسما است که در فشار و دمای اتمسفر رخ می دهد. جریان عبوری از سد دی الکتریک محدود می شود.

سد دی الکتریک محدود می شود. و به دنبال آن یونیزاسیون کم شده و در نتیجه برخورد بین الکترون ها و سایر ذرات نیز کاهش یافته و تعادل حرارتی بین آنها شکل نخواهد گرفت و به همین دلیل این نوع پلاسما از نوع غیر حرارتی است. [۲۱]

در پلاسمای حرارتی، رادیکال ها تحت تاثیر انرژی گرمایی و با افزایش دمای جریان گاز و به دنبال آن تجزیه مولکول های خنثی در اثر برخورد با یکدیگر به وجود می آیند به عنوان نمونه می توان به تخلیه الکتریکی قوس الکتریکی اشاره کرد. در حالی که، مکانیزم اصلی تولید رادیکال برخورد الکترون ها با اتم های خنثی و تجزیه آنها به یون و الکترون می باشد. [۲۲] در پلاسمای حرارتی با گرمایش گاز و انتشار انرژی همراه است.

^۱ dielectric barrier discharge (DBD)

که منجر به افزایش میزان واکنش های شیمیایی می شود. هم چنین گرمایش گاز به صورت غیر یکنواخت، باعث ایجاد اغتشاشات جریان و اختلاط بهتر آن می شود و در مقابل پلاسمای غیر حرارتی بیشتر مبنی بر انتقال و ممنوم از میدان الکتریکی به گاز و همچنین تجزیه و یونیزاسیون مولکول های خنثی تحت تاثیر برخورد الکترون با آن ها و در نتیجه تغییر مکانیسم شیمیایی است. [۲۳]

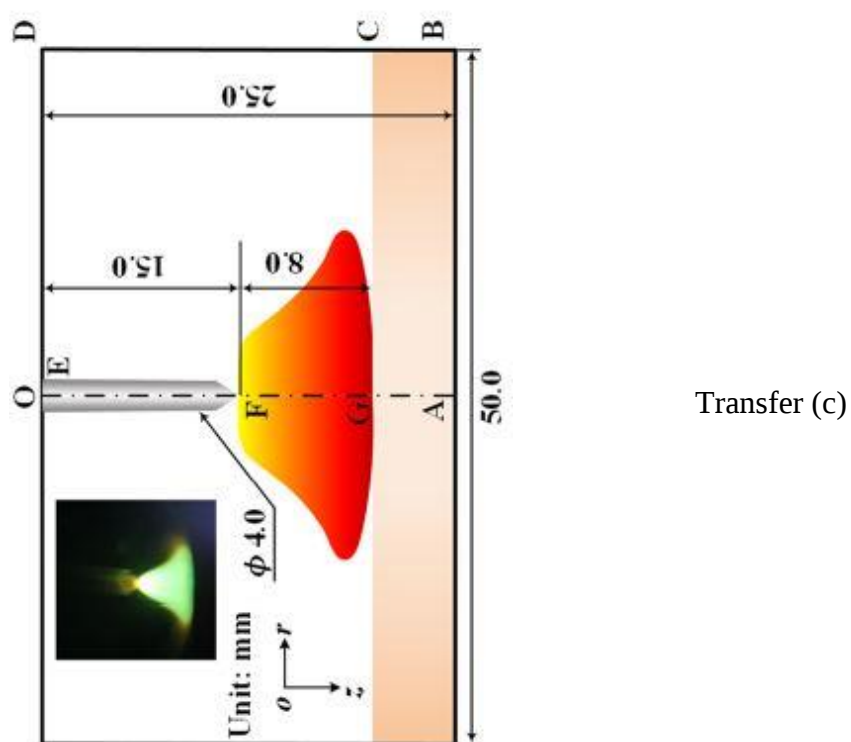
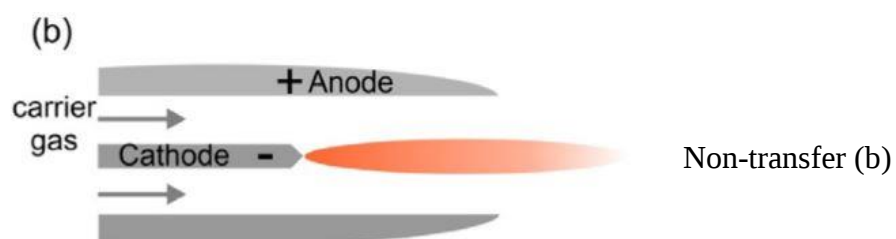
تفاوت اصلی دیگر بین این دو نوع پلاسما، درجه یونیزاسیون آنها است به نحوی که پلاسماهای حرارتی با درجه بالا یونیزه شده اند در حالی که پلاسماهای غیر حرارتی درجه یونیزاسیون پایینی دارند. در تخلیه الکتریکی همراه با جرقه، این نوع تخلیه الکتریکی بین دو الکترود و زمانی که قدرت میدان الکتریکی بین دو الکترود بیشتر از یک مقدار مشخص (ولتاژ شکست دی الکتریک) شود شکل می گیرد. تحت آن شرایط، در کسر خیلی کوتاهی از ثانیه تعداد بسیار زیادی یون تشکیل شده، و گاز بین دو الکترود همانند رسانای الکتریکی عمل خواهد کرد.

۱-۵-۱- انتقالی^۱، غیر انتقالی^۲

قوس های تشکیل شده در حالت غیرانتقالی، بیشتر در کاربرد های صنعتی و پوشش دهی مورد استفاده قرار می گیرد. علت اصلی استفاده بیشتر از غیر انتقالی نسبت به انتقالی در این است که پلاسما می تواند در این حالت بهتر قابل کنترل باشد. علاوه بر این برای افزایش دما از جریان الکتریکی استفاده می کنیم و همچنین در حالت غیر انتقالی جریان الکتریکی و پتانسیل کمتری نسبت به انتقالی در صنعت می توان از آن ها استفاده کرد و با توجه به شکل ۱-۸- سیال از بین الکترود آند و کاتد عبور می کند بر اثر اختلاف پتانسیل بین دو الکترود آند و کاتد سیال یونیزه می شود و قوس ایجاد می کند، در قوس انتقالی سیال بین دو الکترود قرار دارد یا سیال از داخل نازلی که الکترود کاتد قرار دارد عبور می کند با الکترود آند در مقابل الکترود کاتد قرار دارد برخورد می کند طول پلاسما را می توان کنترل کرد و سیال بین این دو الکترود یونیزه می شود. با توجه به شکل ۱-۸- c در کار حاضر، سیال بین دو آند و کاتد قرار دارد بنابراین مدل پلاسما تشکیل به صورت انتقالی می باشد.

¹ Transfer

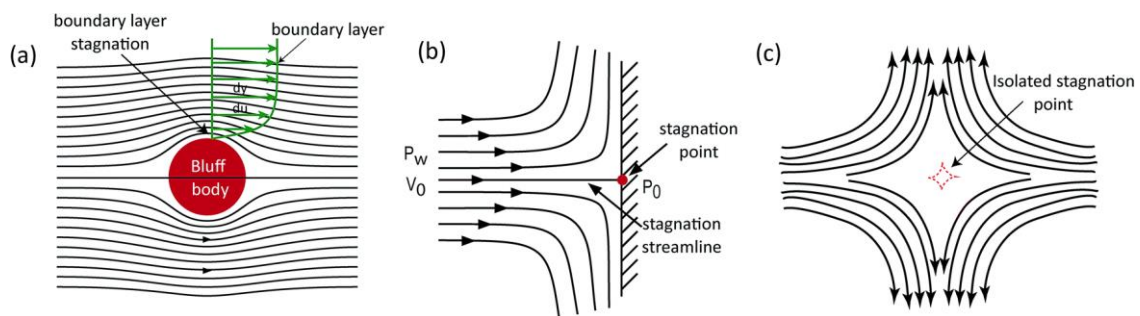
² Non-transfer



شکل ۱-۹- انتقالی، غیر انتقالی [۴۴]

۱-۶- لایه سکون پلاسما^۱

در دینامیک سیالات، سیال با توجه به شرایط می تواند دارای نقطه سکون، لایه سکون و ناحیه سکون باشد که هر کدام شرایطی دارد. با توجه به شکل ۱-۹- با فرض این که پلاسما را سیالی گرفتیم. چون پلاسما سیال فرض کردیم از قواعد و قوانین مکانیک سیالات خارج نمی باشد رکود سیال پدیده ای است که به موجب آن بدنه سیال در یک منطقه بی حرکت یعنی سرعت محلی صفر است در نوع خاصی از جریان ها، این منطقه به یک نقطه بدون بعد محدود می شود. نقطه سکون در یک میدان جریان می باشد که در آن نقطه ای سرعت محلی^۲ سیال صفر می باشد دی آلمبرت^۳ برای اولین بار در سال ۱۷۵۲ مفهوم نقطه سکون سیال را مطرح کرد. دو قرن بعد (سال ۱۹۰۴) پرنتل^۴ نظریه لایه مرزی را که تئوری نیروهای اصطکاک به علت چسبیدن به یک لایه سیال بسیار نازک (نقطه ایستایی) به یک مرز سفت و سخت ارائه داد. از آن زمان، مفهوم سکون سیال از مفاهیم نظری در آیرودینامیک تکامل یافته است. [۳۷]



شکل ۱-۱۰- نمودارهای جریان سکون، a جریان نقطه ایستایی، b سکون لایه مرزی،

c نقطه سکون که جدا شده جریان [۳۷]

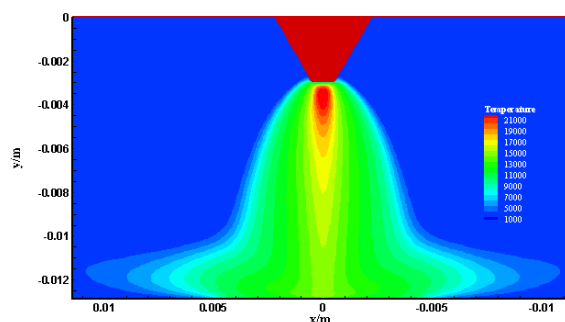
¹ Stagnation layer plasma

² local velocity

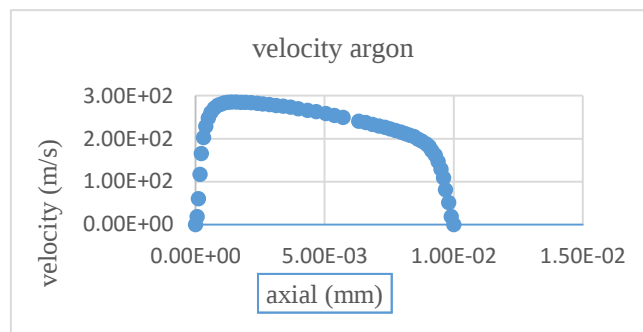
³ D' Alembert

⁴ Prantle

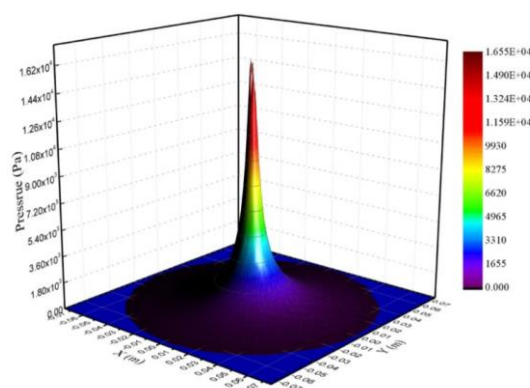
توسط معادله برنولی نشان می دهد که هنگامی که سرعت صفر است. فشار استاتیکی بالاترین است بنابراین فشار استاتیکی در نقطه رکود در حداکثر مقدار خود است به این فشار استاتیک فشار سکون گفته می شود. در مرکز پلاسما فشار بالاترین مقدار است و همچنین سرعت در این نقطه صفر می باشد. در شکل ۱-۸ و با توجه شرایط مرزی قوس آزاد در جدول ۴-۱- در فصل چهارم و عدم لغزش در دیوار جریان لایه سکون داریم.



شکل ۱-۱۲- دما پلاسما آرگون محاسبه کار حاضر



شکل ۱-۱۱- سرعت پلاسما آرگون محاسبه کار حاضر



شکل ۱-۱۳- فشار پلاسما هوا بر روی آند [۴۳]

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} \text{ ضریب فشار برای نقطه سکون}$$

فصل دوم

معادلات و مفاهیم پایه

۲-۱- سیال پلاسما

در دستگاه های تخلیه پلاسما مانند جت قوس پیشران یا مشعل پلاسما، ذرات باردار دچار تعداد زیادی برخورد با یکدیگر می شوند خوشبختانه، در اکثر موارد برای پی بردن به دینامیک پلاسما لازم نیست ذرات منفرد ردیابی شود. در آمار، توزیع ماکسول-بولتزمن^۱ توزیع احتمالی خاصی است که به نام جیمز کلرک ماکسول^۲ و لودویگ بولتزمن^۳ نامگذاری شده است.

در فیزیک (به ویژه در مکانیک آماری) برای توصیف سرعت ذرات در گازهای ایده آل استفاده می شود. که در آن ذرات بدون تعامل با یکدیگر آزادانه درون یک ظرف ثابت حرکت می کنند، به استثنای برخورد بسیار کوتاه که در آن آنها انرژی و حرکت را با یکدیگر یا با محیط گرمایشان رد و بدل می کنند. بنابراین، می توان با اطمینان فرض کرد که در پلاسمای دمای بالا با غلبه بر برخورد، سرعت هر گونه از توزیع ماکسولی پیروی می کند (به جز مناطق نزدیک به الکتروند)، بنابراین حرکت های تصادفی را می توان با ایجاد یکپارچه سازی توابع توزیع محاسبه کرد فرم چگالی احتمال سرعت ماکسول در سه بعد:

$$f(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) = \left(\frac{m}{\sqrt{\pi} K_B T}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m}{\sqrt{\pi} K_B T}(\vec{u} \cdot \vec{v} \cdot \vec{w})\right] \quad (2-5)$$

$\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}$ نمایانگر اجزای سرعت در سه محور مختصات است. K_B ثابت بولتزمن است.

میانگین انرژی جنبشی یک ذره در توزیع ماکسول در سه بعد

$$\bar{E} = \frac{\iiint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m (\vec{u}^2 + \vec{v}^2 + \vec{w}^2) f(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) d\vec{u} d\vec{v} d\vec{w}}{\iiint_{-\infty}^{\infty} f(\vec{u}, \vec{v}, \vec{w}) d\vec{u} d\vec{v} d\vec{w}} \quad (2-6)$$

^۱ Maxwell-Boltzmann

^۲ James Clerk Maxwell

^۳ Ludwig Boltzmann

$$\bar{E} = \frac{3}{2} K_B T \quad (۷-۲)$$

بنابراین، برای گاز تک اتمی به عنوان مثال آرگون که دارای سه درجه آزادی است آنتالپی متوسط که از تحریک داخلی و انرژی واکنشی صرف نظر می شود.

$$\bar{H} = E + \frac{P}{\rho} = \frac{5}{2} E = \frac{5}{2} K_B T \quad (۸-۲)$$

سرعت متوسط مطلق ذره در توزیع ماکسول :

$$|\bar{u}| = \int_0^\infty |u| \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m}{2\pi K_B T} |u|^2 \right) 4\pi |u|^2 du = \sqrt{\frac{8K_B T}{\pi m}} \quad (۹-۲)$$

۲-۲- عدد رینولدز مغناطیسی^۱

عدد رینولدز^۲ یک عدد بی بعد برای تعیین جریان آرام، اغتشاشی سیال که متناسب به آن معادلات را حل می کنیم. عدد رینولدز مغناطیسی کاربرد آن در معادلات ماکسول است. همچنین پلاسما را سیالی و براساس معادلات مگنتوهیدرودینامیک مدل کردیم بنابراین در معادلات مگنتوهیدرودینامیکی دارای معادلات ماکسول است. در پلاسما عدد رینولدز برای تعیین نوع جریان و عدد رینولدز مغناطیسی برای معادله ماکسول و صرف نظر کردن پارامترهای مربوط به قانون اهم (۹-۲) استفاده می شود. که در اعتبار سنجی مگنتوهیدرودینامیک فصل چهارم بهتر توضیح داده شده است. در ادامه نشان می دهیم که در مسئله ما، عدد رینولدز مغناطیسی کمتر از یک است در این صورت میدان مغناطیس پخش می شود و ناهمگنی در این زمینه صاف می شود.

$$Re_{mag} = \frac{vL}{\eta} = vL\mu\sigma \quad (۱۰-۲)$$

$$Re = \frac{\rho vL}{\mu} \quad (۱۱-۲)$$

^۱ Magnetic Reynolds number

۲-۳- عدد پرنتل مغناطیسی^۱

عدد پرنتل مغناطیسی (Pr_m) یک مقدار بدون بعد است که در مگنتوهیدرودینامیک وجود دارد که نسبت نفوذ حرکت (ویسکوزیته) به نفوذ مغناطیسی است.

$$Pr_m = \frac{Re_{mag}}{Re} = \frac{v}{\eta} = \frac{\text{viscosity diffusion rate}}{\text{magnetic diffusion rate}} \quad (2-12)$$

۲-۴- عدد پکلت^۲

یک عدد بدون بعد است که نشان دهنده نسبت حرکت هدفمند (جهت دار) یک کمیت فیزیکی به حرکت کاتوره ای (واپخشی) آن در شاره است و با نماد Pe نمایش داده می شود. عدد پکلت را می توان با کمک عدد پرنتل هم تعریف کرد.

$$Pe = RePr = \frac{l.v.C_p}{K} \quad (2-13)$$

۲-۵- عدد پرنتل^۳

عدد پرنتل (Pr) یک مقدار بی بعد است نسبت نفوذ اندازه حرکت (ویسکوزیته) به نفوذ گرمایی است.

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{\text{viscosity diffusion rate}}{\text{thermal diffusion rate}} = \frac{C_p \mu}{K} \quad (2-14)$$

Re عدد رینولدز، v ویسکوزیته دینامیکی η مغناطیسی نفوذ C_p ظرفیت گرمایی ویژه μ ، ویسکوزیته دینامیکی، K ضریب هدایت گرمایی

^۱ Magnetic Prantle number

^۲ Peclet number (Pe)

^۳ Reynolds number

۲-۶- مگنتوهیدرودینامیک^۱

وقتی بارها به صورت نقطه ای هستند مانند حالتی که در یک محیط یونیزه وجود دارد نیروی موثر در این محیط نیروی کولمبی با عکس مجذور فاصله بارها ($F \propto \frac{1}{r^2}$) رابطه خواهد بود. در حالتی که توده های باری داریم نظیر آنچه که در یک محیط به شدت یونیزه مانند پلاسما برقرار است، نیروی غالب در این محیط، نیروی تجمعی خواهد بود که با فاصله ی توده های بار متناسب ($F \propto r$) است. در نتیجه در یک محیط پلاسمایی حرکت های ارتعاشی توده های بار که ناشی از همین نیروی تجمعی است وجود خواهد داشت که یک محیط یونیزه وجود ندارد.

مگنتوهیدرودینامیک معادلات ماکسول هیدرودینامیک ترکیب می کند تا رفتار ماکروسکوپی سیال بسیار رسانا مانند پلاسما را توصیف کند. بنابراین باید از دینامیک سیالات، و در مورد الکترومغناطیس و هم چنین از فیزیک پلاسما دانسته شود.

مگنتو هیدرودینامیک یک تقریب معقول و منطقی برای توصیف پلاسما در مقیاس زمانی بزرگ و مقیاس طولی طولانی است. پس تقریب طول موج بلند و فرکانس پایین است. مشخصات مقیاس زمانی این است که باید بزرگتر از معکوس فرکانس های یون، الکترون و فرکانس های سیکلوترون الکترون، و یون باشد.

$$\tau \gg \omega_{pe}^{-1} \cdot \omega_{pi}^{-1} \cdot \Omega_{ce}^{-1} \cdot \Omega_{ci}^{-1} \quad (2-15)$$

در مقیاس های بزرگ تر نسبت به طول دبای، شعاع اتمی، شعاع سیکلوترون الکترون و یون

$$L \gg \lambda_D \cdot r_{Le} \cdot r_{Li} \cdot a. \quad (2-16)$$

دمای الکترون و دمای یون با هم برابر هستند.

$$T_i = T_e \quad (2-17)$$

^۱ MHD: magnetohydrodynamic

در این بخش پلاسما ایجاد شده تحت شرایط تعادل ترمودینامیکی (LTE) در نظر گرفته می شود. و سیال نیوتنی و تک سیال با گازهای مختلفی می باشد.

معادله پیوستگی

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (18-2)$$

u سرعت جریان، ρ چگالی که وابسته به دما است

پایستگی ممنتوم

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho U + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot [\mu (\nabla u) + (\nabla u)^T] - \frac{1}{\epsilon} \mu (\nabla \cdot (u) I) = - \nabla p + \underbrace{j \times B}_{\text{Lorenz force}} \quad (19-2)$$

j ، چگالی جریان الکتریکی، B میدان مغناطیسی، تانسور تنش مطابق قانون ویسکوزیته نیوتن μ ویسکوزیته دینامیک سیالات که وابسته به دما است P فشار استاتیکی و هم چنین I واحد تانسور است.

۷-۲- مدل سازی انتقال انرژی درون پلاسما

انتقال انرژی درون پلاسما با معادله پایداری آنتالپی زیر انجام می شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h + \nabla \cdot (\rho u h) - h \nabla \cdot \rho u + \nabla \cdot q = - \nabla \cdot (u \cdot p) - p \nabla \cdot u + \omega \cdot (j \cdot E) - \epsilon \pi \epsilon_N + \nabla \cdot \left(\frac{K_b j}{\epsilon c_p} \right) \quad (20-2)$$

h آنتالپی، E میدان الکتریکی، ϵ_N ، ضریب انتشار خالص K_b ، ثابت بولتزمن است.

^۱ net emission coefficient

انتقال گرما توسط قانون فوریه $q = -\alpha \nabla h$ ،
 α ، است حرارتی نفوذ، K هدایت حرارتی وابسته به دما است.

$$\alpha = \frac{K(T)}{\rho C_p(T)} \quad (2-21)$$

با استفاده از تعریف ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، دما از آنتالپی خاص تعیین می شود.
 C_p ظرفیت گرمایی ویژه تابعی وابسته به دما است.

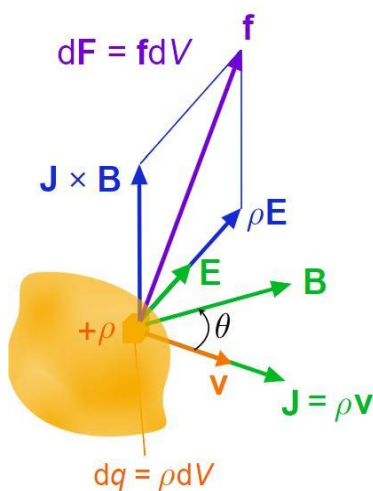
$$C_p(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (2-22)$$

۲-۷-۱- نیروی لورنتس

نیروی وارد بر بار نقطه ای در میدان الکترومغناطیسی است.

$$j \times B + \rho E = \underbrace{\frac{1}{\mu_0} (B \cdot \nabla) B}_{\text{موج مغناطیسی}} - \underbrace{\nabla \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right)}_{\text{موج آلفن}} = \rho E + \rho v \times B \quad (2-23)$$

موج مغناطیسی موج آلفن



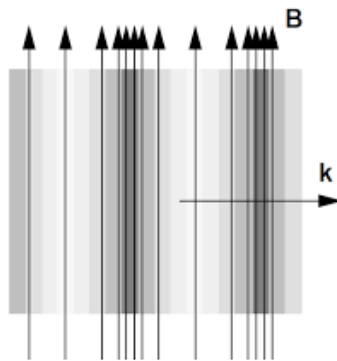
در اعتبار سنجی توضیح داده شده که چرا ρE حذف شده است.

شکل ۲-۱- نیروی لورنتس

۲-۸- امواج هیدرو مغناطیسی

۲-۸-۱- موج مغناطو صوتی^۱

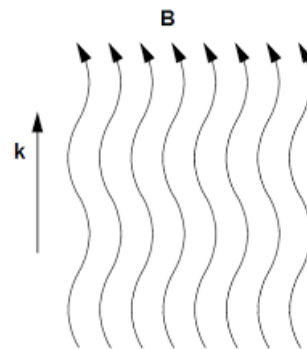
مغناطو صوتی، فشار مغناطیسی است اگر B میدان مغناطیسی خطوط راست باشد. که ضریب انتشار K عمود بر میدان مغناطیسی، در طول میدان مغناطیسی باشد. بنابراین موج مغناطو صوتی داریم اما موج آلفن نداریم.



شکل ۲-۲- موج مغناطو صوتی

۲-۸-۲- موج آلفن^۲

موج آلفن که تنش مغناطیسی است اگر B میدان مغناطیسی خطوط انحنای داشته باشد که ضریب انتشار K در عرض میدان مغناطیسی باشد بنابراین موج آلفن داریم اما موج مغناطو صوتی نداریم.



شکل ۲-۳- موج آلفن

^۱ Alfen wave

^۲ magnetosonic wave

گرمایش ژول

$$\omega \cdot (j \cdot E) = \omega \cdot (\sigma_m (\nabla \varphi) \cdot (\nabla \varphi)) \quad (24 - 2)$$

ω تابع وزنی است برای کنترل جمله ژول حرارتی استفاده می شود به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{f_{max}}} \quad (25 - 2)$$

در اینجا f_{max} حداکثر مقدار عملکرد بردار $\sigma (\nabla \varphi)^2 / (\rho h)$ را در یک مرحله زمانی مشخص نشان می دهد بعد از چند مرحله زمان، این تابع وزن به عدد یک نزدیک می شود و این مقدار را برای بقیه محاسبات حفظ می کند. ρ چگالی و h ارتفاع است.

۹-۲- مدل سازی پدیده های الکترومغناطیسی درون پلاسما

پس از ایجاد قوس، وجود یک میدان الکتریکی تحمیل شده بین کاتد و آنود باعث عبور جریان الکتریکی از منطقه پلاسمای یونیزه شده می شود. جریان الکتریکی باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی القایی می شود. این پدیده الکترومغناطیسی با کمک معادلات ماکسول مدل سازی می شود.

قانون فارادی

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \quad (26-2)$$

قانون آمپر

$$\epsilon \mu \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times B - \mu j \quad (27 - 2)$$

قانون گوس (الکتریکی)

$$\nabla \cdot E = \frac{q_{tot}}{\epsilon} \quad (28 - 2)$$

قانون گوس (مغناطیسی)

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (29 - 2)$$

μ نشان دهنده اینجا نفوذ پذیری، q_{tot} کل بار الکتریکی، ε گذردهی محیط

این چهار معادله ماکسول با معادلات زیر تکمیل می شود:

پایستگی بار الکتریکی

$$\frac{\partial q_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot j = 0 \quad (2-30)$$

قانون اهم

$$j = \sigma_m \left\{ \underbrace{E}_{\text{electric current}} + \underbrace{u \times B}_{\text{inducted current}} - \overbrace{\frac{1}{n_e} j \times B}^{\text{Hall current}} + \dots \right\} \quad (2-31)$$

n_e چگالی الکترون

نفوذ پذیری با دو پارامتر توصیف شده است. [31]

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \approx \mu_0 \quad (2-32)$$

χ_m قابلیت مغناطیسی μ نفوذ پذیری فضای آزاد است. $(4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2})$

قابلیت مغناطیسی یک ثابت غیر بعدی است که توسط خصوصیات فیزیکی ماده مغناطیسی تعیین می شود قابلیت مغناطیسی از درجه 10^{-9} است نفوذ پذیری مغناطیسی برابر است با نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء که به صورت زیر بیان می شود.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \approx \varepsilon_0 \quad (2-33)$$

χ_e قابلیت الکتریکی است برای یکی گاز آرگون و هوا این قابلیت نادیده گرفته می شود. [31]

ε نفوذ پذیری در فضا آزاد است. $(8.85 \cdot 10^{-12} A^2 s^4 kg^{-1} m^{-3})$

با توجه به ماهیت مسئله در نظر گرفته شده می توان معادلات ماکسول را بر اساس مفروضات زیر ساده کرد.

الکترو-خنثی^۱

در قوس پلاسما مسیر آزاد میانگین^۲ یک الکترون ($\lambda_e = 10^{-6}\text{m}$) بسیار بزرگتر از، نسبت به طول موج دمای است. ($\lambda_D = 10^{-8}\text{m}$ [۳۲]) طول موج دمای در مقایسه با مقیاس ماکروسکوپیکی، برای مدل سازی پلاسما استفاده می شود. بسیار کوچک است بنابراین می توان در نظر گرفت که هر عنصر حجمی (هرسلول مش) از نظر الکتریکی در مقیاس ماکروسکوپیکی خنثی است. (کل بار الکتریکی صفر است) [۳۳]

تحت فرض الکتریکی-خنثی قانون گاوس برای میدان الکتریکی

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (۳۴-۲)$$

و

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (۳۵-۲)$$

۲-۱۰- درجه یونیزاسیون^۳

درجه یونیزاسیون بیانگر نسبت تعداد ذرات یونیزه شده به کل تعداد یون ها و اتم های خنثی است و نشان دهنده ی میزان قدرت یک میدان الکتریکی می باشد. اگر درجه یونیزاسیون در حدود ۱ درصد باشد به ترکیب حاصل، گاز نسبتا یونیزه شده^۴ و اگر این درصد خیلی زیاد و در حدود ۱۰۰ باشد، کاملا یونیزه شده^۵ گفته می شود.

$$\alpha = \frac{N_i}{N_i + N_a} \quad (۳۶-۲)$$

^۱ Electro-neutrallity

^۲ free path

^۳ Degree of ionization

^۴ Partially ionized gas

^۵ Fully ionized

۲-۱۱- تابش پلاسما

به دلیل دمای بالای پلاسما حرارتی، تابش یک پدیده مهم است که باید محاسبه شود از نظر کیفی، تابش دارای سه اثر می باشد.

- ۱- در گرمترین مناطق، تابش اصطلاح اصلی از دست دادن انرژی است.
- ۲- در مناطق بیرونی، تابش بخش قابل توجهی از انتقال انرژی درون پلاسما است.
- ۳- معادله انتقال تابش در فرم ساده زیر آورده شده است در یک جهت در یک پلاسمای غیر پراکنده با ضریب شکست برابر یک است. [۳۷]

$$\frac{dI_v}{dr} = \underbrace{\epsilon_v}_{\text{Emission}} - \underbrace{I_v K'_v}_{\text{absorbtion}} \quad (2 - 37)$$

I_v (W m⁻² sr⁻¹) شدت توان تابشی در واحد زاویه جامد و در واحد سطح ظاهری K'_v ضریب جذب در واحد طول فرکانس v ، $\epsilon_v = K'_v B_v (W m^{-3} Sr^{-1})$ ، نماینگر ضریب تابش است. این توان در فرکانس v است، که توسط واحد حجم پلاسما در واحد زاویه جامد تابش می شود. در تعادل ترمودینامیکی قانون کیر شهبوف برای یک طول مشخص و یک درجه حرارت معین معتبر است.

$$\frac{\epsilon_v}{K'_v} = B_v(T, v) = \frac{2 h v^3}{c^2 (e^{\frac{hv}{kT}} - 1)} \quad (2 - 38)$$

B_v نشان دهند تابش جسم سیاه است، c سرعت نور است، h ثابت پلانک است. محاسبه کا تابش یک کار پیچیده است بنابراین یک محاسبات زیادی برای حرارت تابش در مدل سازی پلاسما لازم است. تعداد زیادی روش برای محاسبه وجود دارد [۴۱]

در این کار از مدل (NEC) ضریب انتشار خالص استفاده شده است که منجر به محاسبه تابش خالص در مرکز کره همدما^۱ می شود.

$$\epsilon_N = \int_0^\infty B_v K'_v \exp(-K'_v R_p) dv \quad (2 - 39)$$

R_p شعاع کره می باشد. [۳۸][۴۰]

دمای ثابت بسیار محدود کننده می باشد، اما نشان داده شده است که برای منطقه مرکزی پلاسمای حرارتی معتبر است. [۴۲]

خصوصیات ضرایب ترابردی از روش چپمن-اینسکوگ^۱ با استفاده از روش چند جمله ای سونین^۲ و معادله بولتزمن استفاده شده است نظریه چپمن-اینسکوگ چارچوبی را ارائه می دهد که در آن می توان معادلات هیدرودینامیک یک گاز را از معادله بولتزمن به دست آورد این روش روابط سازنده پدیدار شناختی دیگری را نشان می دهد که در توصیفات هیدرودینامیکی مانند معادلات ناویر-استوکس ظاهر می شود. با انجام این کار، عبارات مربوط به ضرایب مختلف ترابردی مانند هدایت حرارتی و ویسکوزیته و... به دست می آید. بنابراین نظریه چپمن-اینسکوگ گام مهمی در عبور از توصیف میکروسکوپی، مبتنی بر ذرات به توصیف هیدرودینامیکی پیوسته را تشکیل می دهد.

تابع درون یابی:

گاوسی^۳

$$\gamma(T; c, \Delta) = e^{-q^2} \cdot q = \frac{T - c}{\Delta} \quad (۲ - ۴۰)$$

$$\gamma_i(T) = \gamma(T; C_i, \Delta_i) \quad (۲ - ۴۱)$$

سیگموئید^۴

$$\sigma(T; c, \Delta) = \frac{e^q}{e^q + e^{-q}} \cdot q = \frac{T - c}{\Delta} \quad (۲ - ۴۲)$$

$$\sigma_i(T) = \sigma(T; C_i, \Delta_i) \quad (۲ - ۴۳)$$

^۱ Chapman- Enskog

^۲ Sonine polynomial

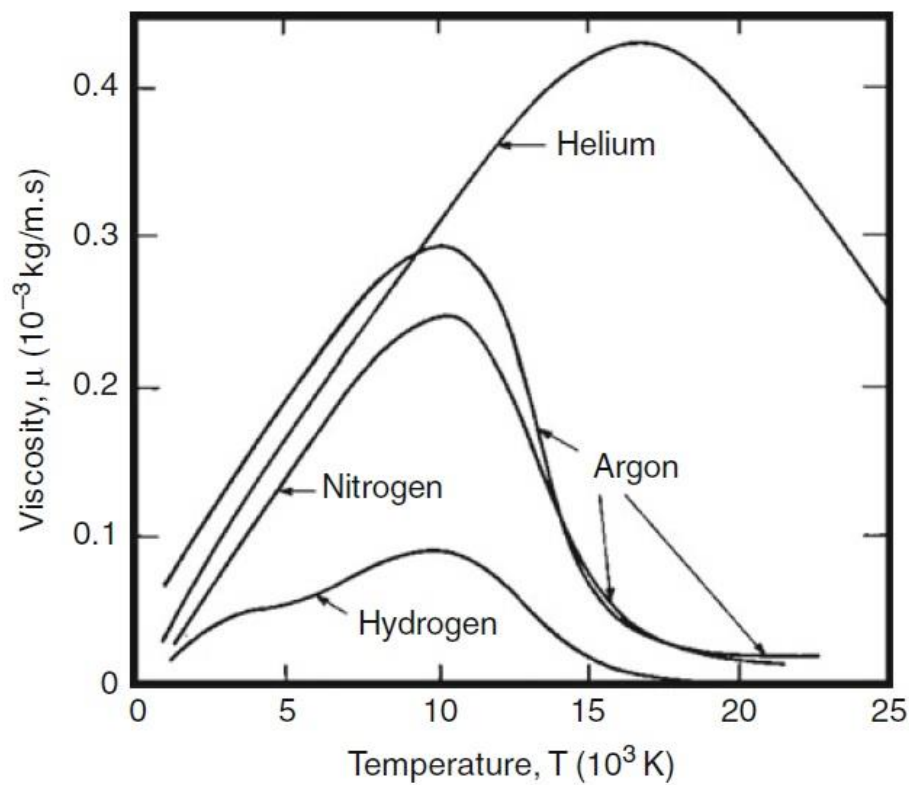
^۳ Gaussian

^۴ sigmoid

۲-۱۲-۱- ویسکوزیته

سهم الکترون ها در محاسبه ضریب ویسکوزیته قابل اغماض است در نتیجه می تواند تقریب یابد. به عبارت دیگر مقاومت یک ویسکوزیته یا گرانروی مقاومت سیال در برابر اعمال تنش برشی است سیال یا گاز در برابر شارش یا لغزیدن لایه ها، هنگامی که تحت تنش برشی قرار گیرد. [۵۲]

$$\eta \cong \eta_h + \eta_e \cong \eta_h \quad (۲-۴۴)$$



شکل ۲-۴- ویسکوزیته برای گاز های مختلف [۶۰]

۲-۱۲-۲- هدایت حرارتی

رسانندگی گرمایی یا هدایت حرارتی یک ماده اندازه گیری توانایی آند در انتقال گرما است. [۶۰]

$$\lambda = \lambda_{tr} + \lambda_{int} + \lambda_r \quad (۲-۴۵)$$

$$\lambda_{tr} = \lambda_e + \lambda_h \quad (۲-۴۶)$$

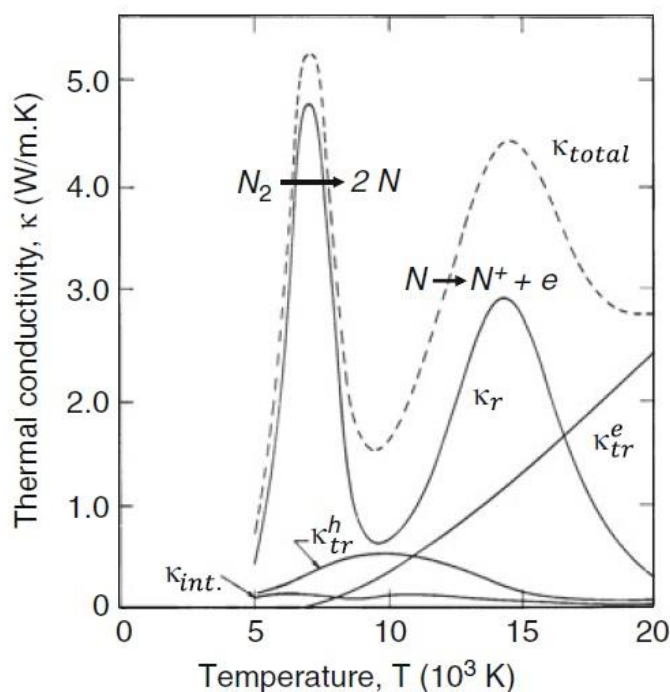
$$\lambda_r = \frac{1}{RT} \sum_{j=1}^v \Lambda_j \Delta H_j \quad (۲-۴۷)$$

$$\lambda_{int} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^v \frac{X_j \frac{C_{p,int,j}}{R}}{\sum_{j=1}^v \frac{X_j}{p D_{ij}}} \quad (۲-۴۸)$$

λ_{tr} هدایت حرارتی انتقالی است.

λ_{int} هدایت گرمایی داخلی است

λ_r سهم واکنش پذیر در هدایت گرمایی کل است

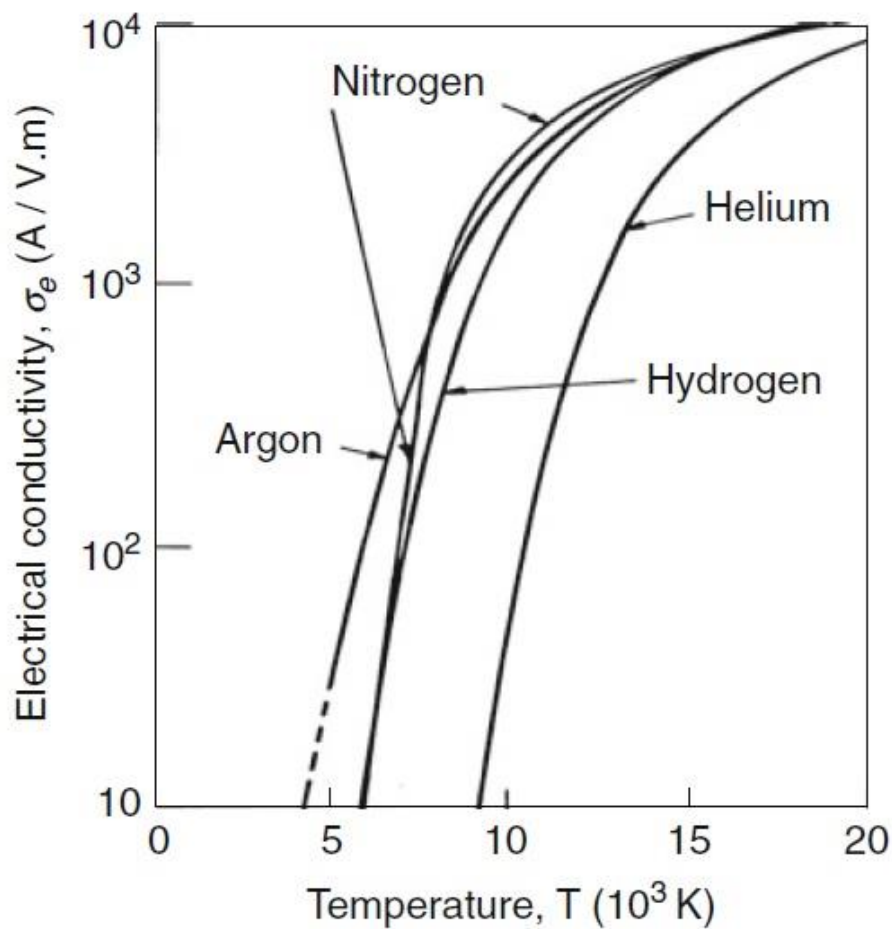


شکل ۲-۵- هدایت حرارتی نیتروژن [۶۰]

۲-۱۲-۳- رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی یا رسانش ویژه متقابل مقاومت الکتریکی استاین نشان دهنده توانایی یک ماده در هدایت جریان الکتریکی است. شکل ۲-۷- رسانندگی الکتریکی را در گاز نیتروژن، آرگون، هیدروژن و هلیوم نشان می دهد.

$$\sigma = \frac{e^2 n_e (\pi / k m_e T)^{-1/2}}{|q|} \left| \frac{q^{11} q^{12}}{q^{21} q^{22}} \right| \quad (2-49)$$



شکل ۲-۶- رسانندگی الکتریکی [۶۰]

فصل سوم

مدل سازی

۳-۱- محاسبات عددی و شبیه سازی مسئله

معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسئله مورد نظر که در فصل دوم اشاره شده است که با توجه به شرایط مرزی باید حل شود حل این معادلات با استفاده از نرم افزار فلونتت به روش حجم محدود است در این فصل ابتدا مطالبی در مورد روش های محاسبات عددی، تولید هندسه و شبکه در نرم افزار فلونتت ارائه شده است سپس چگونگی انتخاب شبکه مناسب برای مسئله مورد نظر بیان شده است

۳-۲- روش محاسبات عددی

عموماً معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره ای غیرخطی و وابسته را ایجاد می کنند که باید در یک قلمرو ناهموار با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند. در بیشتر موارد، حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار پیچیده است. مکانیک سیالات تجربی می تواند اطلاعات مورد نیاز یک میدان جریان خاص را فراهم کند. در هر حال به علت محدودیت های تجهیزاتی، مانند اندازه نمونه های آزمایش و همچنین مشکلات ناشی از عدم تشابه کامل با میدان جریان واقعی، کسب اطلاعات آزمایشگاهی در بیشتر میدان های جریان غیرعملی است. به هر حال از نتایج آزمایشگاهی برای اثبات درستی روش های محاسبات عددی استفاده می شود.

در روش های محاسبات عددی برخلاف روش های تجربی، شرایط جریان و ابعاد و اندازه های آن به راحتی قابل تغییر هستند و از این نظر انعطاف زیادی وجود دارد. البته جوابی که از محاسبات عددی حاصل می شود را پس از مقایسه با نتایج تجربی می توان مورد تایید قرارداد.

برای بررسی مسائل به روش محاسبات عددی روش های متفاوتی برای تبدیل معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری قابل حل وجود دارد که می توان به روش های زیر اشاره کرد:

۱- روش تفاضل محدود^۱

۲- روش المان محدود^۲

۳- روش حجم محدود^۳

^۱ Finite difference

^۲ Finite element

^۳ Finite Volume

در این روش از نرم افزار فلوئنت برای محاسبات عددی استفاده شده است و روش مورد استفاده در این نرم افزار حجم محدود است.

در روش حجم محدود، ابتدا شبکه‌های از نقاط بر میدان حل منطبق می‌شود و با انفصال معادلات دیفرانسیل روی این شبکه، این معادلات به معادلات جبری در هر نقطه از شبکه تبدیل می‌شود. سپس دستگاه معادلات جبری به دست آمده حل شده و توزیع کمیات مختلف در نقاط شبکه به دست می‌آید.

۳-۳- مراحل روش حل عددی

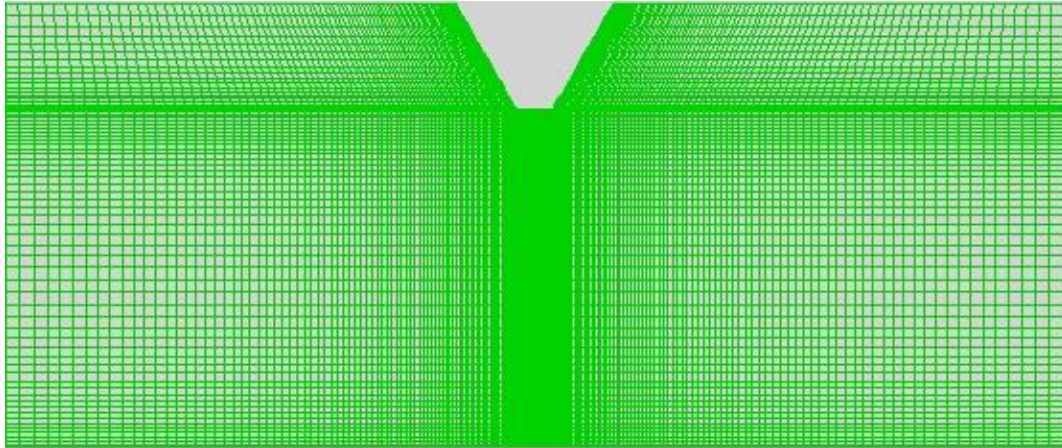
به طور کلی برای حل معادلات حاکم مراحل زیر باید دنبال شوند:

- ۱- ابتدا شبکه‌ای از نقاط باید بر میدان حل منطبق شود.
 - ۲- شرایط مرزی مسئله موردنظر باید اعمال شود.
 - ۳- نوع سیال به همراه خواص ترموفیزیکی آن تعیین شود.
 - ۴- پارامترهای حل عددی باید انتخاب شود.
 - ۵- مقادیر قابل تغییر جریان برای هر سلول باید مشخص شود که همان شرط‌های اولیه هستند.
 - ۶- با شرط‌های اولیه معادلات پیوستگی و ناویراستوکس به صورت تکراری برای مرکز هر سلول حل می‌شوند. اگر تمام معادله ناویراستوکس را به یک طرف بیاوریم و آن را باقیمانده^۱ بنامیم و این حاصل برای هر سلول صفر شود، آنگاه حل دقیق است. اگرچه این حاصل هیچ‌گاه صفر نمی‌شود، ولی به سمت صفر کاهش می‌یابد. (باقیمانده معیاری است که انحراف از حل دقیق را نشان می‌دهد)
- زمانی که حل همگرا شد، توزیع کمیات مختلف در نقاط شبکه به دست می‌آید.

^۱ Residual

۳-۴- تولید هندسه

هندسه در حالت دو بعدی تقارن محوری^۱ است لایه ستون پلاسما و لایه مرزی کاتد و لایه مرزی آند و قسمت اشباع جریان در مش زنی مهم است که بیان می شود چون مسئله ما به تشکیل خود پلاسما مربوط است نه الکترودها، بنابراین در هندسه دو بعدی ما آند و کاتد که دارای ضخامت هست را رسم نکرده و تا حل برنامه سریع تر شود.



شکل ۳-۱- شبکه بندی هندسه

۳-۴-۱- استقلال از شبکه

به منظور بررسی استقلال از شبکه، از ۳ شبکه محاسباتی با ابعاد زیر استفاده شده است.

$$۱۶ \times ۴۳۱ \text{ و } ۴۸ \times ۴۳۱ \text{ و } ۱۴۴ \times ۴۳۱$$

که با استفاده از نرم افزار Ansys meshing تولید شده است. به این معناست که مرحله، تعداد نقاط شبکه ی حل در هر جهت، تقریباً ۳ برابر شده است. اما در نتایج خروجی تفاوت محسوسی نداشت. برای کاهش زمان محاسباتی همین از مقدار شبکه ۱۶×۴۳۱ استفاده شده است.

۳-۵- شبکه بندی با نرم افزار انسیس^۲

نرم افزار انسیس یک نرم افزار جامع در زمینه حل عددی است که بسیاری از شاخه های علوم مهندسی را شامل می شود. یکی از این بخش ها، قسمت شبکه بندی است. این قسمت خود شامل چند زیر نرم افزار است که وظیفه شبکه بندی هندسه را بر عهده دارند. با توجه به برتری هر کدام از این نرم افزارهای شبکه بندی در نوع شبکه بندی سازمان یافته^۳ و بی سازمان^۴، در کار حاضر از شبکه بندی سازمان یافته استفاده شده است. به دلیل جفت بودن قسمت های مختلف شبکه بندی و حل عددی و همچنین هوشمند بودن این نرم افزارها در بهینه سازی شبکه بندی اعمال شده، برای شبکه بندی هندسه از این نرم افزارها بهره برده شده است.

به طور کلی برای استفاده از این نرم افزار باید مراحل را طی نمود. مرحله اول وارد کردن هندسه مورد نظر، مرحله دوم ایجاد شبکه بر روی هندسه و در نهایت مرحله سوم تعیین شرایط مرزی است. مهم ترین مرحله از حل عددی، تولید شبکه است. این شبکه باید سلول هایی که تغییرات جریان (نظیر فشار و سرعت) در آن ها در محدوده محاسباتی وجود دارد را تعریف کند. شبکه بندی نامناسب باعث واگرایی مسئله و افزایش خطا می شود.

^۱ axisymmetric

^۲ ANSYS

^۳ Structured

^۴ Unstructured

به‌طور کلی در اصطلاح دو نوع شبکه وجود دارد که شامل شبکه سازمان‌یافته و بی‌سازمان می‌شود. یک شبکه سازمان‌یافته شامل چهار سلول لبه مسطح (دوبعدی) و یا سلول‌های حجمی با شش وجه (سه‌بعدی) هستند. سلول‌ها می‌توانند به اشکالی غیر از مستطیل است. یک شبکه بی‌سازمان شامل سلول‌هایی در شکل‌های مختلف است اما معمولاً به‌صورت مثلثی یا چهارضلعی (دوبعدی) و چهاروجهی یا شش‌ضلعی (سه‌بعدی) است.

از مهم‌ترین مزیت شبکه‌های سازمان‌یافته می‌توان به تسلط بهتر کاربر بر روی شبکه که معمولاً منجر به حجم پایین‌تر تعداد شبکه در مقایسه با شبکه بی‌سازمان می‌شود. در شبکه‌های با سازمان اندازه لایه‌های شبکه اعمال‌شده را در نزدیکی دیواره‌ها متناسب با فیزیک جریان تغییر داد. به همین دلیل برخلاف شبکه‌بندی بی‌سازمان، نیازی به اعمال جداگانه لایه‌مرزی نیست.

برتری شبکه‌های بی‌سازمان در راحتی اعمال آن به اجسام و هندسه‌های مختلف است. در عمل نمی‌توان برای بسیاری از هندسه‌ها یا نمی‌توان شبکه‌بندی سازمان‌یافته اعمال کرد و یا اعمال شبکه سازمان‌یافته کاری به‌شدت طاقت‌فرسا خواهد بود. نکته‌ای که باید در شبکه‌بندی بی‌سازمان بدان توجه کرد این است که برای اعمال مدل‌های آشفستگی، علاوه بر شبکه‌بندی جسم، لایه‌های نزدیک دیواره را با شبکه‌های لایه‌مرزی بهبود بخشید.

در این هندسه اصلی مبدل با توجه به پیچیدگی‌های ذکرشده، از شبکه‌بندی بی‌سازمان استفاده‌شده است. نواحی نزدیک دیواره نیز متناسب با مدل توربولانسی مدنظر، از شبکه لایه‌مرزی استفاده‌شده است. برای قسمت نوآوری مسئله نیز از شبکه سازمان‌یافته بهره برده شده است. لذا شبکه در نواحی نزدیک دیواره، ستون پلاسما، لایه مرزی آندو کاتد و جریان اشباع ریز شده است.

۳-۵-۱- شبیه سازی در نرم افزار فلوئنت^۱

نرم‌افزار فلوئنت نرم‌افزاری است که با زبان C نوشته شده است و قابلیت تحلیل و شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده را دارد. این نرم افزار جریان را برای شبکه های سازمان یافته و بی سازمان تحلیل می نماید.

^۱fluent

پس از شبکه‌بندی، شبکه ایجادشده در نرم‌افزار فلونت خوانده می‌شود. در این حالت نرم‌افزار نباید هیچ‌گونه پیغام خطایی درباره شبکه‌بندی بدهد. به‌طور کلی مراحل زیر برای حل عددی باید طی شوند:

- ۱- بررسی هندسه و شبکه‌بندی
- ۲- انتخاب مدل حل
- ۳- انتخاب مدل آرام
- ۴- فعال کردن معادلات انرژی
- ۵- تعیین مواد به همراه خواص ترموفیزیکی آن‌ها
- ۶- تعیین شرایط مرزی
- ۷- انتخاب نوع الگوریتم کوپل سرعت و فشار
- ۸- انتخاب روش گسسته سازی معادلات
- ۹- مقداردهی اولیه به کمیت‌ها
- ۱۰- تعیین محدوده‌های خطا
- ۱۱- تعیین تعداد تکرار
- ۱۲- ادامه تکرار تا رسیدن به همگرایی
- ۱۳- کد نویسی

۳-۶- الگوریتم کوپل سرعت و فشار

در نرم‌افزار فلونت دو نوع حل گر شامل فشار- مبنا و چگالی مبنا مورد استفاده قرار می‌گیرد. انتخاب نوع حل گر با توجه به فیزیک جریان و مسئله صورت می‌پذیرد. در این پژوهش با توجه به تغییرات بسیار ناچیز چگالی، از روش فشار - مبنا بهره برده شده است. به‌طور کلی به‌جز در برخی حالات ویژه، نمی‌توان میدان سرعت را در کل هندسه حل مشخص ساخت و در عوض باید مؤلفه‌های سرعت موضعی و میدان فشار را با استفاده از معادلات حاکم مناسب به دست آورد. مؤلفه‌های سرعت تحت تأثیر معادلات مقدار حرکت هستند که خود حالت خاص معادله دیفرانسیل عمومی هستند.

مشکل واقعی برای محاسبه میدان سرعت در نا معلوم بودن میدان فشار است. برای رفع این مشکل راه‌حل‌هایی برای کوپل سرعت و فشار ارائه شده است. در حل گر فشار- مبنا معادله بقای جرم از طریق حل معادله‌ی فشار که از ترکیب معادلات جرم و تکانه به‌دست آمده است توجیه می‌کند. در ذیل حل گر

فشار- مبنا، معادلات حاکم می‌توانند به دو صورت کوپل^۱ و یا جداگانه^۲ حل شوند. در صورت انتخاب روش جداگانه، معادلات حاکم برای متغیرهای میدان جریان (شامل سرعت، فشار، دما، آشفتگی و...) به صورت جداگانه و به ترتیب حل می‌شوند. درحالی که در صورت استفاده از روش کوپل در ذیل حل گر فشار- مبنا، معادلات مومنتوم و پیوستگی فشار پایه، به صورت یکجا و کوپل با یکدیگر حل شده و سپس باقی معادلات جداگانه حل می‌شوند. مزیت روش حل جداگانه معادلات، حافظه رم کمتر موردنیاز در مقایسه با روش کوپل است. به طوری که حالت کوپل به ۱,۵ تا ۲ برابر حافظه رم بیشتری نیازمند است. اما در مقابل به دلیل حل هم زمان معادلات در روش کوپل، سرعت همگرایی آن به مراتب بالاتر از روش دیگر است

روش جداگانه خود به الگوریتم‌های ISPO^۵, SIMPLEC^۴, SIMPLE^۳ تقسیم می‌شود هر کدام از این الگوریتم‌ها در یکسری از فیزیک‌ها جواب دقیق تری می‌دهند به عنوان مثال الگوریتم SIMPLE و SIMPLEC در مسائل جریان پایا، مقدار ضریب - خلاصی^۶ نزدیک یک توصیه می‌شود. الگوریتم نیز PISO، برای مسائل ناپایا با مقدار ضریب - خلاصی یک و همچنین مسائل پایا با سلول‌های محاسباتی نسبت دارای میزان نا همگونی زوایای داخلی یک سلول^۷ زیاد توصیه شده است. روش کوپل در مسائل ناپایا در گام زمانی بزرگ و شبکه محاسباتی با کیفیت کم، بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها دارد. در ادامه به تشریح این الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۷- الگوریتم SIMPLE

این الگوریتم جهت به دست آوردن میدان فشار در شبکه بندی جابجا شده^۸ از روش حدس و اصلاح بهره می‌برد. در این الگوریتم میدان فشار حدسی نقشی اصلی را ایفا می‌کند. این الگوریتم دارای مراحل زیر است

-
- ^۱ Coupled
 - ^۲ Segregated
 - ^۳ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
 - ^۴ SIMPLE-Consistent
 - ^۵ Pressure Implicit with Splitting of Operators
 - ^۶ Under-Relaxation
 - ^۷ Skewness
 - ^۸ Staggered-grid

- ۱- حدس میدان فشار
- ۲- حل معادلات تکانه برای پیدا کردن مؤلفه‌های سرعت (در اینجا نیاز به داشتن شبکه جابجا شده همراه با یک روش تکرار است)
- ۳- حل معادلات تصحیح فشار و افزودن این معادله به میدان فشار حدسی طبق رابطه برای معادله فشار اصلی
- ۴- تصحیح و محاسبه سرعت با استفاده از مقادیر تصحیح سرعت بر اساس میدان فشار به دست آمده است.
- ۵- در نظر گرفتن فشار تصحیح شده به عنوان فشار حدسی و برگشت به مرحله دوم و تکرار کار تا رسیدن به یک جواب همگرا

۳-۸- الگوریتم PISO

هدف از توسعه این الگوریتم، حل بدون- تکرار جریان‌های تراکم پذیر ناپایا بوده است. لذا این الگوریتم را می‌توان مدل توسعه داده شده‌ی الگوریتم SIMPLE دانست. مراحل حل این الگوریتم بدین شرح است.

- ۱- حدس میدان فشار
- ۲- حل معادلات تکانه برای پیدا کردن مؤلفه‌های سرعت (در اینجا نیاز به داشتن شبکه جابجا شده همراه با یک روش تکرار است)
- ۳- حل معادلات تصحیح فشار و افزودن این معادله به میدان فشار حدسی طبق رابطه برای معادله فشار اصلی
- ۴- حل معادلات ثانویه تصحیح فشار
- ۵- تصحیح و محاسبه سرعت با استفاده از مقادیر تصحیح سرعت بر اساس میدان فشار به دست آمده در نظر گرفتن فشار تصحیح شده به عنوان فشار حدسی و برگشت به مرحله دوم و تکرار کار تا رسیدن به یک جواب همگرا

۳-۹- الگوریتم SIMPLEC

این الگوریتم که در سال ۱۹۸۴ توسط دورمال^۱ و ریث^۲ ۱۲ سال پس از الگوریتم SIMPLE ارائه شده است. در این الگوریتم با دستکاری در معادلات تکانه و حذف یکسری از ترم‌های که چندان قابل اهمیت نیستند، مدل پایدارتری ارائه شده است. مراحل حل توسط این الگوریتم دقیقاً مشابه الگوریتم SIMPLE است. یک الگوریتم پرکاربرد در حل معادلات ناویر استوکس می باشد.

۳-۱۰- کد نویسی فلوئنت^۳

پلازما حالت چهارم ماده محسوب می شود اما در نرم افزار فلوئنت پلازما تعریف نشده است سه حالت دیگر گاز، مایع، جامد با خصوصیات شان تعریف شده است برای همین برای داشتن پلازما باید خواص فیزیکی مانند هدایت گرمایی، هدایت الکتریکی، گرمایی ویژه، ویسکوزیته و حتی چگالی برای پلازما را نوشت چون تعداد این مقادیر خواص زیاد هست در هر نقطه با دما تغییر می کند برای همین از کد نویسی برای تعریف پلازما و ماکرو ها و دستورهایی که نرم افزار فلوئنت تشخیص می دهد استفاده کردیم.

در فلوئنت روش های مختلفی برای محاسبه تابش در نرم افزار در نظر گرفته شده است و هیچکدام از این روش ها برای محاسبه تابش پلازما مناسب نیست اول این که پلازما بر اساس ضخامت تشکیل شده و درجه یونیزاسیون مقدار تابش متفاوت است برای همین تابش را هم کد جداگانه نوشته به معادله انرژی اضافه می کنیم. ما هر آنچه را به جز معادله ناویر-استوکس مانند میدان الکتریکی، چگالی جریان، میدان مغناطیسی، بردار پتانسیل مغناطیسی، نیروی لورنتس، گرمایش، تابش، تابع کار آند، کاتد و ضرایب ترابردی چگالی، آنتالپی، ویسکوزیته، هدایت گرمایی، هدایت الکتریکی و ظرفیت گرمایی ویژه را در فلوئنت کد نوشته و به معادله انرژی و تکانه و اسکالر اضافه کردیم.

۳-۱۱- کامسول

نرم افزار کامسول یک مجموعه کامل شبیه سازی است که می تواند معادلات دیفرانسیل سیستم های غیر خطی را توسط مشتق های جزئی به روش اجزاء محدود (FEM) در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. این نرم افزار می تواند در حضور چالش هایی نظیر میدان های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به خوبی راهگشا باشد COMSOL. همچنین فرصتی برای حل مشکل به عنوان یک فرمول ریاضی (در فرم معادلات) و فیزیکی (انتخاب مدل فیزیکی، به عنوان مثال مدل فرایند انتشار) را به کاربر می دهد

^۱ Doormal

^۲ Raith

^۳ UDF (user define function)

فصل چهارم

نتایج

در این فصل نتایج به دست آمده از ضرایب تراپردی هوا و آرگون، را با استفاده از زبان برنامه نویسی C برای نرم افزار فلوئنت تعریف کردیم. این ضرایب تراپردی گاز هوا و آرگون از دمای ۳۰۰-۳۰۰۰۰ کلین برای شبیه سازی تخلیه الکتریکی در فلوئنت لحاظ شده است. ضرایب تراپردی و کسرهای مولی الکترون در شرایط تعادل ترمودینامیکی در فشار ثابت یک اتمسفر محاسبه شده است. ضرایب تراپردی با کمک دو تابع، سیگموئید و گاوس در فشارهای مختلف به دست آوردیم. ضرایب تراپردی به دست آمده را با کار دیگران مقایسه کردیم. با محاسبه عدد رینولدز نوع جریان پلاسما در ناحیه آرام است بنابراین از معادلات ناویر استوکس استفاده می کنیم. حال معادلات پیوستگی، انرژی و ممنتوم را برپایه معادلات مگنتوهیدرودینامیک و ناویر استوکس بسط می دهیم. همچنین به تحلیل داده ها خروجی از فلوئنت برای هر دو گاز هوا و آرگون می پردازیم. پتانسیل الکتریکی، پتانسیل برداری مغناطیسی^۱ را به صورت اسکالر تعریف شده توسط کاربر^۲ در فلوئنت تعریف شده است. در کار حاضر، ما بر روی مطالعه ویژگی های قوس پلاسما تمرکز می کنیم، که در آن از اثرات مذاب و بین قوس پلاسما و الکتروود آند و کاتد و با توجه به شکل ۱-۶- همچنین تاثیر بین قوس پلاسما و کامپوزیت بر روی سطح آند قرار دارد را هم نادیده گرفتیم. در صنعت از هوا و آرگون بیشتر استفاده می شود. با توجه به شکل ۴-۱- دامنه محاسبه و شبکه بندی محدود یک قوس آزاد سوزان را نشان می دهد که مدل نوک کاتد برخلاف کار، Hsu نوک کاتد صاف شده^۳ است. زاویه مخروط الکتروود ۶۰ درجه است. [۵۵] طول شکاف^۴ تخلیه از نوک کاتد تا سطح آند ۱۰ میلی متر است شبکه ها در نزدیکی آند اصلاح شده است. این اندازه شکاف براساس کار Hsu و همکاران در نظر گرفته شده است و کل شبکه بندی ۶۸۹۶ محاسبه شده است. طبق نظریه (Dinulescu and Pfender) شار گرمایش سطح آند ناشی از جریان الکتریکی می تواند به فرمول (۴-۱) تقریب زده شود. [۵۶] در جدول ۴-۲- شار گرمایش آند و تابع کار کاتد قرار داده شده است. مدل سازی تخلیه الکتریکی پلاسما را به صورت دو بعدی و به علت دروانی که وجود دارد براساس تقارن محوری مدل سازی کرده ایم و همچنین با توجه به این که پلاسما را سیال گرفته و براساس معادلات مگنتوهیدرودینامیک مدل سازی را انجام می دهیم بنابراین می توانیم از جریان هال^۴ صرف نظر کنیم.

^۱ Magnetic vector potential

^۲ cathode tip

^۳ gap

^۴ Hall current

۴-۱-۱- شار گرمایش روی صفحه آند و پلاسما

$$Q_a = J \left((2.5 + e D_T / K_B \sigma) \left(\frac{K_B T_e}{e} \right) + \phi_a \right) \quad (۴-۱)$$

یا

$$Q_a = |J \cdot n| \phi_a - \varepsilon_a \sigma_B T^\circ \quad (۴-۲)$$

۴-۱-۲- تابع کار کاتد

$$Q_c = J_i V_i - J_e \phi_c - \varepsilon_c \sigma_B T^\circ \quad (۴-۳)$$

$$J_r = A_r T^\circ \exp\left(\frac{-e \phi_e}{K_B T}\right) \quad (۴-۴)$$

$$J_e = \{J_r \text{ if } (|J \cdot n| - J_r) > 0 \quad (۴-۵)$$

$$J_e = \{0 \text{ if } (|J \cdot n| - J_r) \leq 0 \quad (۴-۶)$$

$$J_i = |J \cdot n| - J_e \quad (۴-۷)$$

اگر هدایت الکتریکی زیاد باشد به جای معادله ای ۴-۱ از معادله ۴-۲ برای شار گرمایش روی صفحه آند استفاده می شود

جدول ۴-۱- لیست متغیرها تابع کار و شار گرمایش آند

نماد	کمیت	مقدار	واحد در SI
σ_B	بولتزمن	۵.۶۷۰۴×۱۰^{-۸}	$\text{kg/s}^3/\text{K}^4$
ε_a	نشر آند	(مس) ۰,۴	۱
ε_c	نشر کاتد	(تنگستن) ۰,۵	۱
ϕ_a	تابع کار آند	(مس) ۴,۶۵	V
ϕ_c	تابع کار کاتد	(تنگستن) ۴,۵	V
T	دما		K
K_B	ثابت بولتزمن	$۱.۳۸۰۶۴۸۵ \times ۱۰^{-۲۳}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg/s}^2/\text{K}$
σ	هدایت الکتریکی		S/m
e		۱.۶۰۲۲×۱۰^{-۱۹}	C
J	چگالی جریان		A/m^2
J_e	چگالی جریان الکترون		A/m^2
J_i	چگالی جریان یون		A/m^2
A_r	ثابت ریچاردسون	۱.۲×۱۰^{-۶}	$\text{A/m}^2/\text{K}^2$
J_r	چگالی جریان ریچاردسون		A/m^2

شرایط مرزی پلاسما تخلیه الکتریکی قوس به دلیل عدم وجود شرایط واقع گرایانه، بیشتر با مراجعه به موارد پیشنهادی Hsu و همکاران تنظیم می شود. [۱۲] به طور خاص، شرایط مرزی برای چگالی جریان با استفاده از آزمایش تعیین می شود و نقش تعیین کننده در نتایج عددی دارد. شرایط مرزی مربوط در جدول ۲،۴ آورده شده است. برای راحتی کنترل جریان $200A$ ، که تراکم جریان اعمال شده بر روی نوک الکتروود را می توان با معادله زیر بیان کرد.

$$J_z(r) = J_{max} \exp(-br) \quad (۸ - ۴)$$

$$J_{max} = ۱.۲ \times ۱۰^8 A m^{-2}$$

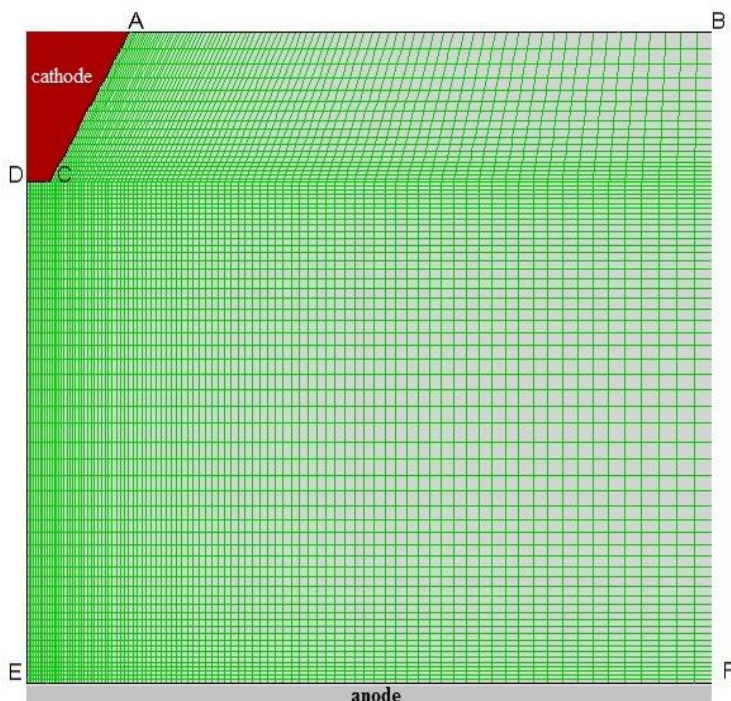
و مقدار b را می توان از طریق فرمول ۴-۸ به دست آورد

$$I = 2\pi \int_0^{R_c} j(r)r dr \quad (۹ - ۴)$$

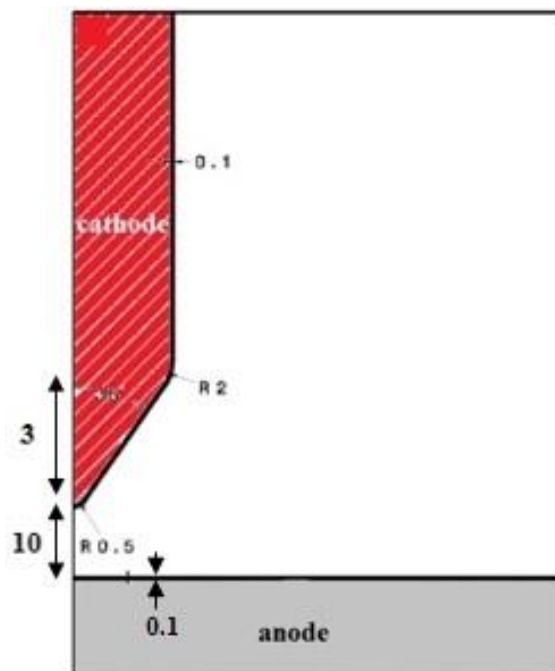
$R_c = 3 mm$ و شعاع جریان اشباع است.

۴-۲- جدول شرایط مرزی شبیه سازی

	AB	AC	CD	DE	EF	BF
P	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$-\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n} = J_z(x)$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	0	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$
A_x	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial A_x}{\partial x} = 0$
A_z	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A_z}{\partial z} = 0$
u	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	$u = 0$	$u = 0$	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	$u = 0$	$u = 0$
w	$w = 0$	$w = 0$	$w = 0$	$w = 0$	$w = 0$	$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$
T	1000K	3500K	3500K	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	1000K	1000K



شکل ۴-۱- شبکه بندی تقارن محوری



شکل ۴-۲- هندسه فیزیکی

تمامی اندازه گیری ها برحسب میلی متر است همچنین توجه به این نکته مهم است که این مقیاس برحسب میلی متر مطابق کار Hsu همکاران است و همچنین باید ذکر کرد که دیگر نویسندگان برای مقایسه های سه بعدی، طبق استاندارد های (انجمن مهندسان خودرو)^۱ ابعاد و اندازه های در نظر گرفته می شود. [۵۷] [۵۸]

ضخامت لایه مرزی آند و کاتد که دارای شرایط غیر تعادل ترمودینامیکی (NLTE) است را ۰,۱ میلی متر در نظر گرفته شده است. [۵۹]

^۱ Society of Automotive Engineers (SAE)

۴-۲- پلاسمای گاز آرگون

در ضرایب تراپردی پلاسما تاثیر فشار هم دیده شده است ضرایب تراپردی (ویسکوزیته، آنتالپی، آنتروپی، هدایت گرمایی، رسانندگی الکتریکی، چگالی) تحت فشارهای مختلف مقادیر متفاوتی دارد این ضرایب به انرژی حاصل از میزان برخورد هم وابستگی دارد درجه یونیزاسیون که برخورد یون ها و الکترون و اتم های خنثی یکی از پارامترهای اصلی در تشکیل ضرایب تراپردی و نوع پلاسما می باشد. علت اصلی در تعریف که چرا فشار باید دخالت کند می توان به طور کلی شرح داد همه چیز به این برخورد ذرات به هم برمی گردد. تاثیر برخورد^۱ هست. با افزایش برخورد ذرات به هم می تواند چگالی جریان در ناحیه را افزایش دهد و در ناحیه ای که بیشترین برخورد ذرات را داشته باشیم، به دنبال آن بیشترین دما و فشار را در آن ناحیه داریم. طبق فرمول ساده فشار، $(P = F/A)$ ، نیروی است در رفتار تجمعی که پلاسما دارد رابطه مستقیمی با شعاع r دارد. در توضیحات مگنتوهیدرودینامیک فصل دوم به رفتار جمعی پلاسما اشاره کردیم به دلیل رفتار جمعی و هم چنین، فاصله ذرات در محیط یونیزه شده، پلاسما کم هست. هر چقدر برخورد ذرات زیاد باشد. مقدار نیروی که ذرات به هم دیگر وارد می کنند بیشتر می شود. ناحیه ای که دما پلاسما بیشتر باشد. ناشی از این است. که برخورد ذرات زیاد است.

با توجه به فرمول (۴-۱۰) و (۴-۱۱) در اثر افزایش دما و برخورد های، گاز پلاسما به سمت یونیزه کامل سوق پیدا می کند. با افزایش برخورد های صورت گرفته، یون و الکترون های زیادی در ناحیه پلاسما تولید می شوند این خود به معنی این است که نیروی ذرات و به طبع آن فشار را در آن ناحیه افزایش می دهد و با توجه به شکل ها ۴-۲۳ و ۴-۴۴ تاثیر زیادی در هدایت الکتریکی و کسرهای مولی الکترون ایجاد می کند.

$$PV = nRT \quad (۴-۱۰)$$

در عمل به علت برد بلند نیروهای کولمبی، برخوردهای با زاویه کوچک به مراتب بیشتر است. در مجموع اثر تعداد زیادی از انحرافات با زاویای کوچک، از اثر برخوردهای با زاویه بزرگ مهمتر می شود. [۵۳]

$$\eta \approx \frac{\pi e^2 m^{1/2}}{(4 \pi \epsilon_0)^2 (kT_e)^{3/2}} \ln \Lambda \quad (۴-۱۱)$$

$$\Lambda = \lambda_D / r_i \quad (۴-۱۲)$$

η مقاومت ویژه است. r_0 پارامتر برخورد و λ_D طول دبی است.

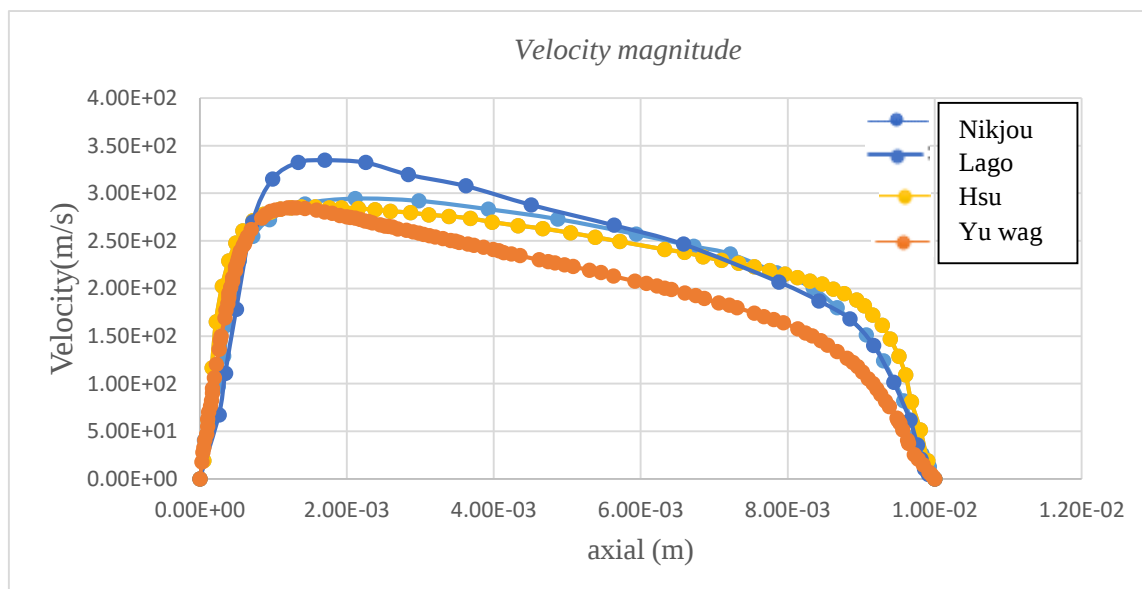
^۱ collision ($\ln \Lambda$)

در کار حاضر، تخلیه الکتریکی قوس برای تولید پلاسما حرارتی از جریان الکتریکی بالا استفاده شده است. با توجه به، شکل های ۴-۵ و ۴-۱۴ و فرمول (۴-۷) به تحلیل علت افزایش دمای پلاسما می پردازیم. η نشان می دهد که متناسب با $(KT_e)^{3/2}$ است وقتی که پلاسما گرم، سطح مقطع موثر کولمبی کاهش می یابد، و مقاومت ویژه با افزایش دما، به طور نسبتاً سریع کاهش می یابد. یک طریق آسان برای گرم کردن پلاسما، عبور دادن جریان الکتریکی می باشد که در کار حاضر جریان الکتریکی بالا هست. در این صورت ترم اتلاف، $J^2 \eta$ یا $I^2 R$ منجر به افزایش دمای الکترون می شود این روش گرمایش اهمی است.

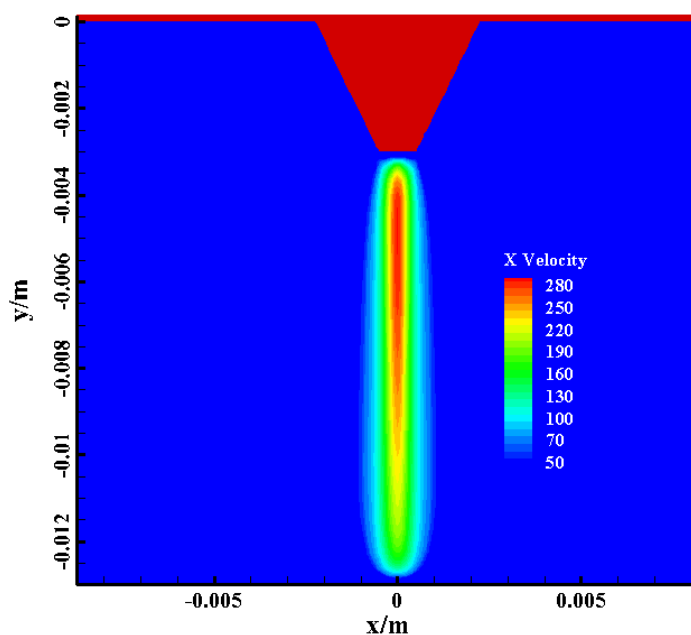
$$v_{ei} = \frac{ne^2}{m} \eta = \frac{ne^2}{16 \pi \epsilon_0 m v^3} \quad (4 - 13)$$

v_{ei} فرکانس برخورد است.

η مقاومت ویژه مستقل از چگالی است به جز وابستگی ضعیفی که برخورد ها دارد برخورد باعث کاهش سرعت می شود دما الکترون نسبت به یون زیاد و جرم کمتر دارد و برای راحت تر جابه جا می شوند. برای هر انرژی می توان دما در نظر گرفت با برخورد انرژی جنبشی را اتلاف می کنند. دمای خود الکترون کاهش می یابد اما اثر انرژی خود را می توان در دمای و انرژی که به محیط داده دید. در کار حاضر v_{ei} صورت به v^{-3} تغییر می کند. الکترون ها با سرعت زیاد و جرم کمتر، با چندین برخورد که انجام می دهند، بنابراین جریان اساساً توسط این الکترون ها حمل می شود تا مجموعه های از الکترون ها، حمل قسمت اصلی توزیع وابستگی شدید به v داشته باشد میدان الکتریکی به طور ناگهانی به پلاسما اعمال می شود ما می بینیم در کار حاضر هم میدان الکتریکی به طور ناگهانی و لحظه ای اعمال می شود حتی در شرایط مرزی می بینید چگالی جریان به طور پروفیلی داده می شود. این میدان الکتریکی ناگهانی باعث ایجاد پدیده ای گریز الکترون نامیده می شود. که اتفاق بیفتد چند الکترونی که در اثر میدان، در جهت $-E$ سرعت می گیرند قبل از مواجه شدن با یک یون آن قدر انرژی دریافت می کنند که فقط برخورد سطحی با آن انجام دهند این امر الکترون ها به الکترون ها امکان می دهد که در میدان الکتریکی، انرژی بیشتری اخذ و مقطع موثر برخورد را باز کمتری کند. اگر میدان الکتریکی به حد کافی بزرگ باشد، مقطع موثر آن قدر سریع کاهش می یابد که این الکترون های گریزنده هیچ برخوردی انجام ندهند در این صورت، الکترون ها باریکه شتابداری تشکیل می دهند که از قسمت اصلی توزیع جدا شده اند.



۳-۴- مقایسه سرعت گاز آرگون با دیگران

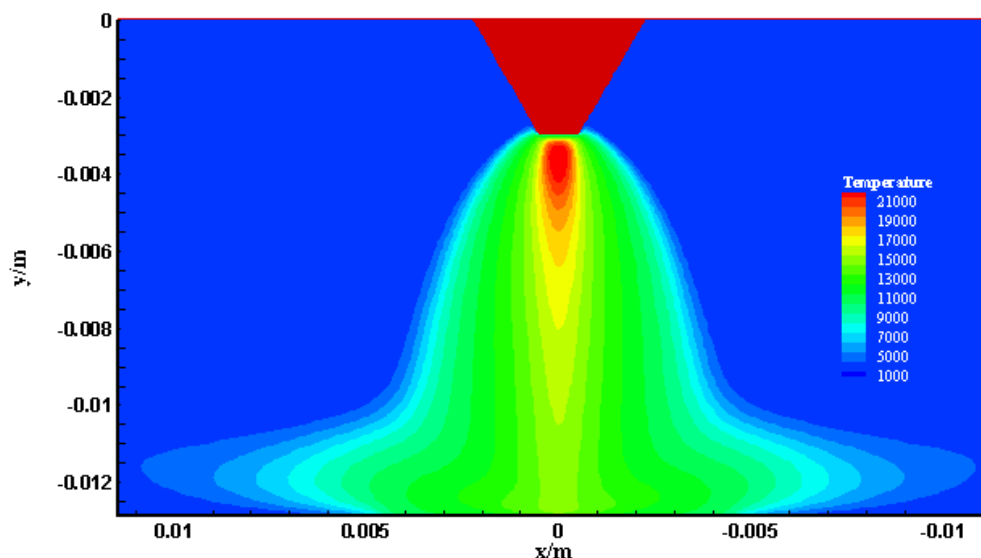


۴-۴- توزیع سرعت پلاسما آرگون

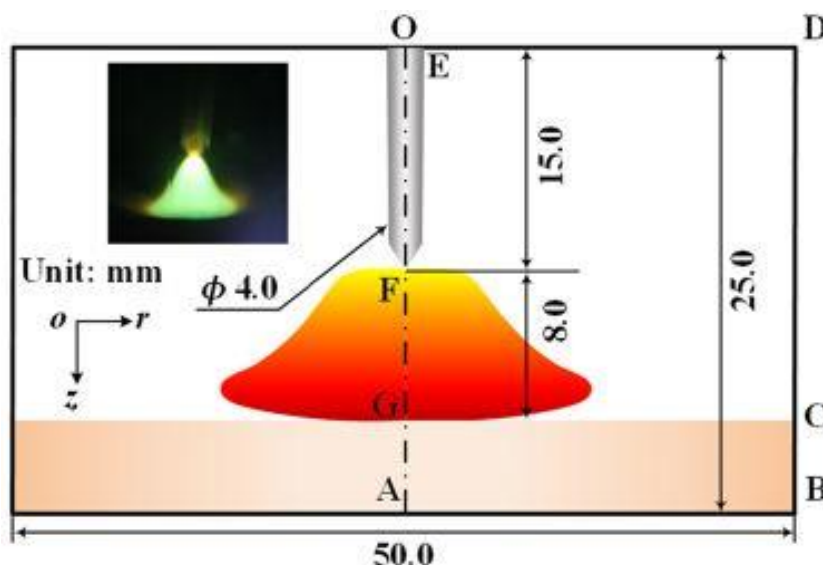
روی سطح آند و روی سطح کاتد که خال کاتد و خال آند دارای سرعت صفر و بیشترین دما در مرکز سطح آند و سطح کاتد وجود دارد. در قسمت لایه های مرزی آند و کاتد تشکیل می شود. با توجه این که از سطح کاتد الکترون (بار منفی) خارج می شود و دمای الکترون ها نسبت به یون بیشتر است و همچنین یون ها اغلب دارای بار مثبت هستند به سمت کاتد قطب منفی است کشیده می شوند و الکترون به سمت آند قطب مثبت می رود. که چگالی جریان و فشار در این نقاط زیاد هست با توجه به شکل ۳-۴- روی سطح کاتد و آند نقطه سکون داریم و همچنین وقتی که لایه های مرزی پلاسما نزدیک می شود پلاسما در حال کم رنگ شدن

است با توجه به شکل های ۴-۱۰ و ۴-۱۲ شدت تابش رو به کاهش است چون شدت تابش با ضریب انتشار رابطه مستقیمی دارد و این ضریب انتشار با دما مربوط است دما هم رو به کاهش می رود سرعت هم کاهش می یابد و همچنین فشار ناشی از پلاسما هم رو کاهش است و که به سمت فشار سکون می رویم برای همین ما لایه سکون^۱ داریم. با توجه به، شکل های ۴-۷ و ۴-۱۵ چگالی پلاسما از ستون پلاسما دور، که به سمت لایه سکون می رویم بیشتر می شود. و به چگالی محیط هوا نزدیک می شود و همچنین این چگالی ناشی از خاصیت شبه خنثی پلاسما ناشی می شود که چگالی الکترون و چگالی یون تقریباً برابر است.

$$n_i \cong n_e \quad (4-10)$$

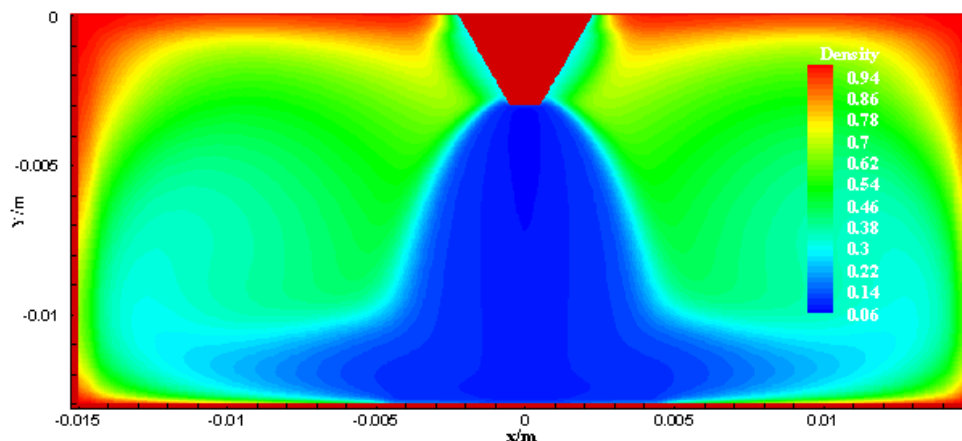


شکل ۴-۵- توزیع دما برای پلاسما گاز آرگون



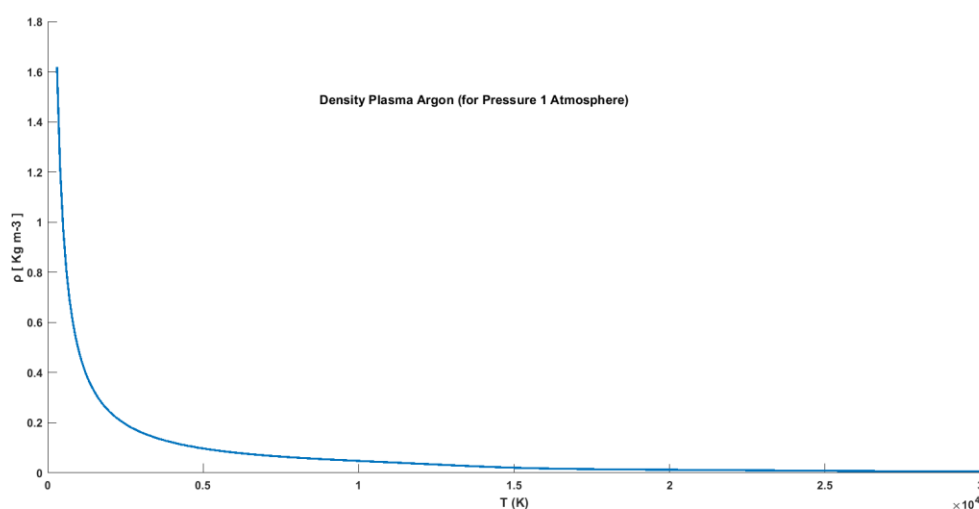
شکل ۴-۶ پلاسما آرگون تجربی [۴۴]

^۱ stagnation layer



شکل ۴-۷- چگالی گاز پلاسما آرگون

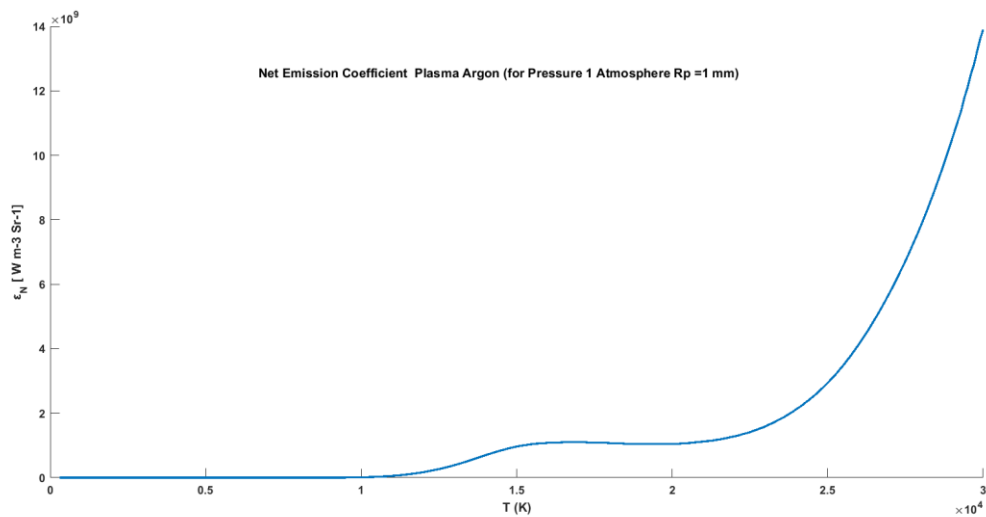
این را باید یادآور باشیم که پلاسما دارای میدان مغناطیسی هست درون پلاسما پیچیده های زیادی است. در کار حاضر پلاسما را، سیالی مدل سازی می کنیم تا بتوانیم در دیدگاه ماکروسکوپیک توزیع درست برسیم. میدان مغناطیسی خود دارای فشار مغناطیسی است پلاسما در حین حال می تواند دارای چندین دما باشد اغلب اتفاق می افتد که یون ها و الکترون ها، توزیع های ماکسولی با دما های مختلف T_i, T_e داشته باشند. در حضور میدان مغناطیسی B حتی ذرات همجنس، مثلاً یونها، می توانند دو نوع دما داشته باشند علت این امر این هست که نیروهای وارد بر یک یون در امتداد B متفاوت از وارد بر آن یون در امتداد عمود بر B (در اثر نیروی لورنتزی در فصل سوم قسمت مدل سازی انرژی درون پلاسما (۲-۲۳) توضیح داده است) هستند مولفه های سرعت عمود بر میدان مغناطیسی و موازی میدان به توزیع های ماکسولی متفاوتی با $T_{\perp}, T_{\parallel}$ مربوط است.



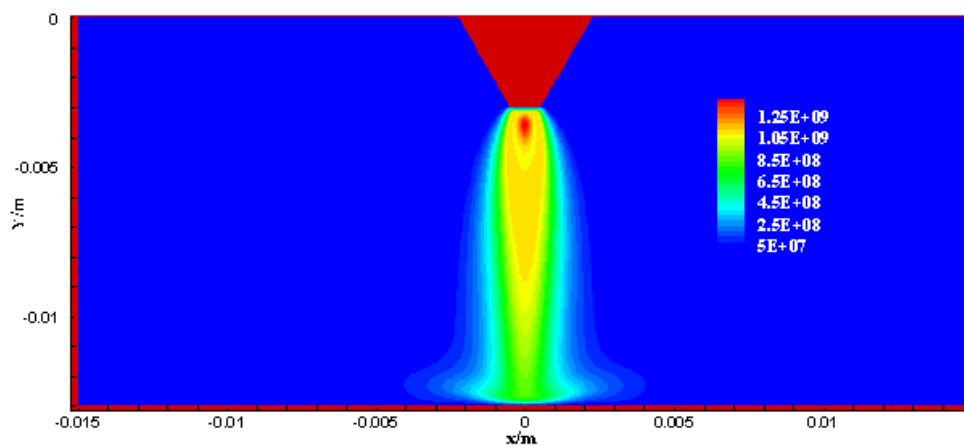
شکل ۴-۸- نمودار چگالی پلاسما گاز آرگون برای فشار یک اتمسفر

۴-۳- تابش پلاسما

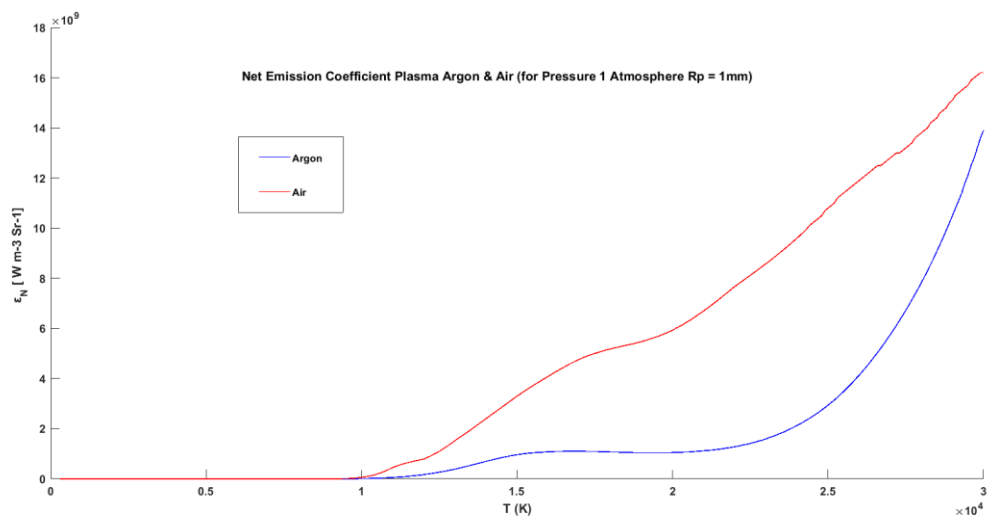
تابش پلاسما براساس معادله (۲-۳۷) فصل دوم که تئوری محاسبه تابش پلاسما ارائه شده است انجام گردیده است ضریب انتشار مطابق فصل دوم از معادله (۲-۳۹) به دست آمده است. اما خود مقدار تابش پلاسما برای شرایط تعادل ترمودینامیکی مناسب مطابق فرمول $Sr = 4\pi\epsilon_N$ به دست آمده است. [۶۳] با توجه به نمودار ۴-۹- مقدار ضریب تابش هوا بیشتر از آرگون است این انرژی ناشی از این است که میزان انرژی در برخوردها بین ذرات هوا بیشتر از آرگون که گازی خنثی هست. با توجه به شکل ۴-۱۱- تابش هوا بیشتر از آرگون هست.



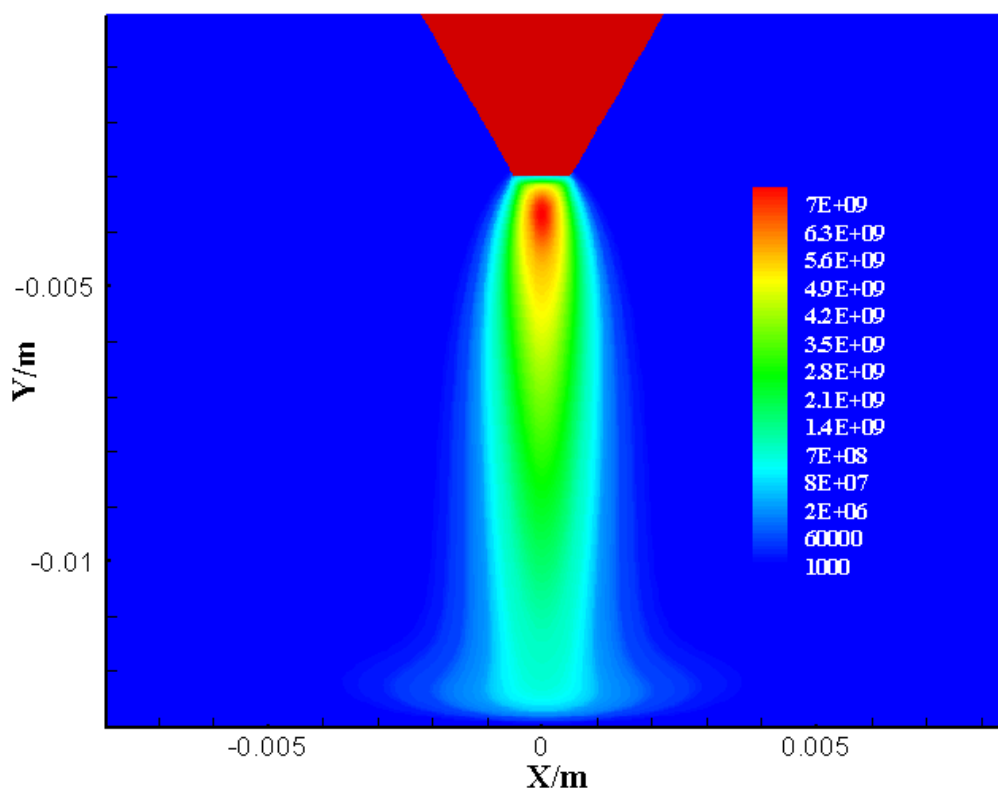
شکل ۴-۹- ضریب انتشار تابش گاز پلاسما آرگون



شکل ۴-۱۰- تابش پلاسما گاز آرگون

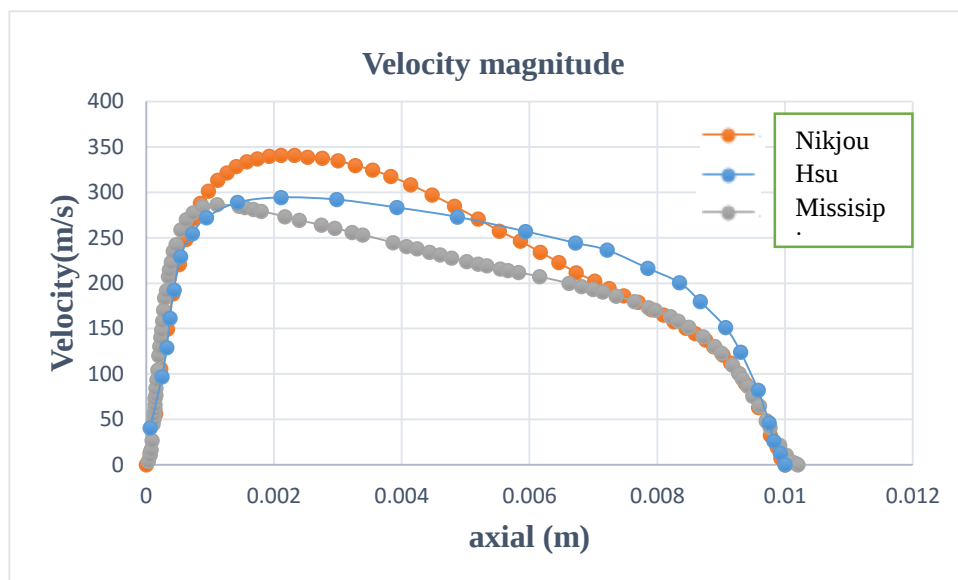


شکل ۴-۱۱- نمودار مقایسه ضریب انتشار پلاسما گاز هوا، آرگون کار حاضر



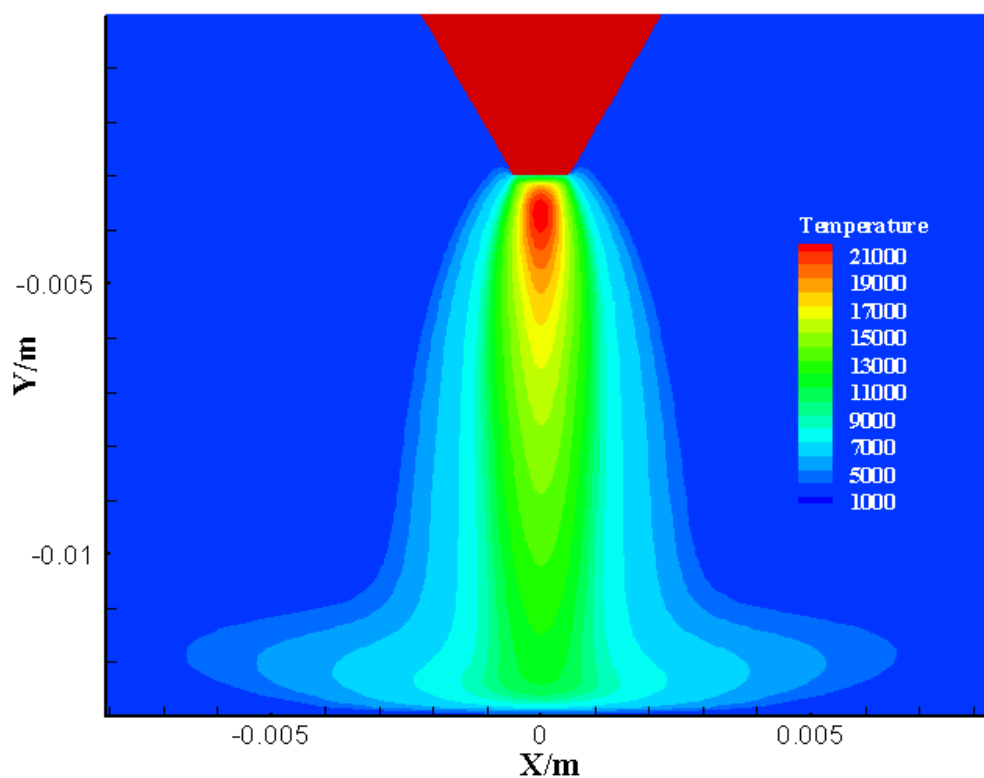
شکل ۴-۱۲- تابش پلاسما هوا

با توجه به شکل ۴-۱۷- در ناحیه ای که بیشترین مقاومت گرمایی داریم بیشتر مقدار تابش را در شکل های ۴-۱۰- و ۴-۱۲- دیده می شود.

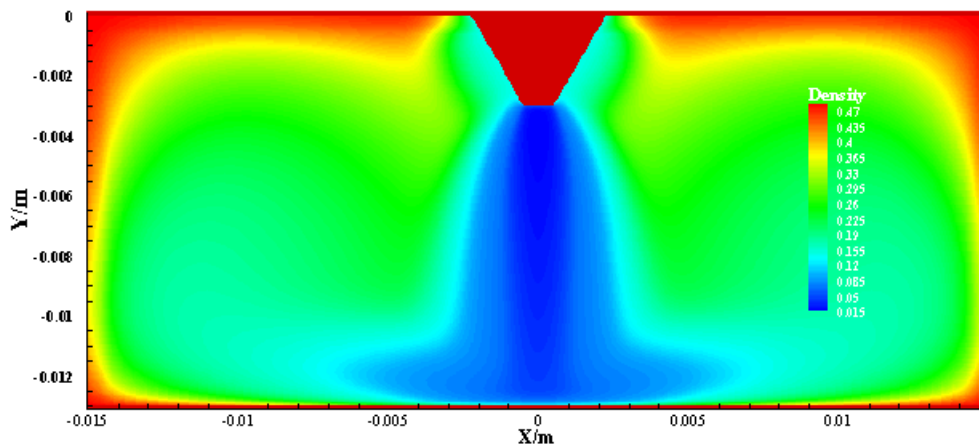


شکل ۴-۱۳- مقایسه سرعت گاز پلازما هوا

کار Hsu با گاز آرگون انجام شده است

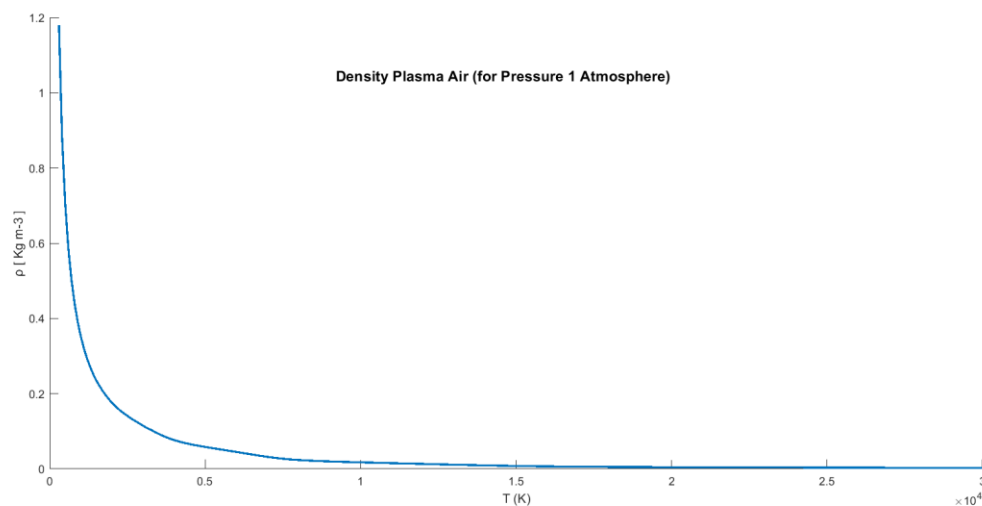


شکل ۴-۱۴- توزیع دما برای گاز پلازما هوا

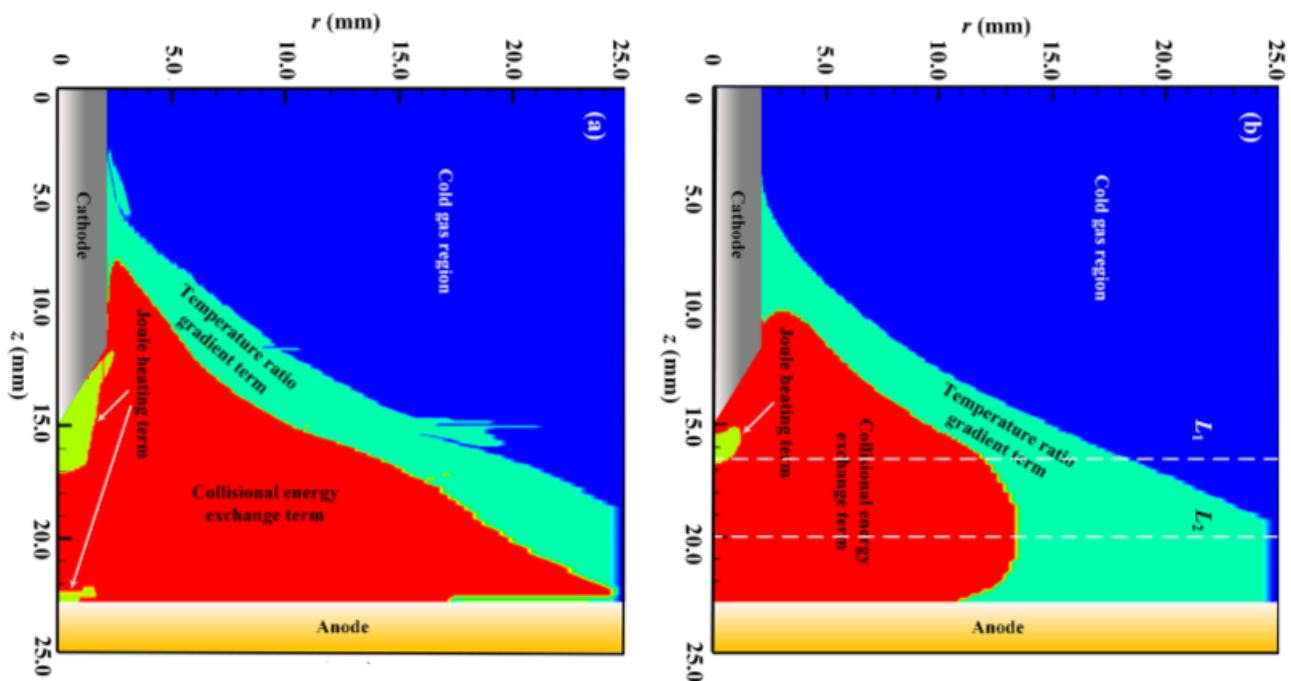


شکل ۴-۱۵- چگالی پلاسما هوا

همان طور طبق تئوری های پلاسما انتظار داریم اتفاق می افتد با توجه شکل ۴-۱۶ در این نمودار با روند افزایش دما مقدار چگالی پلاسما رفته رفته کم می شود به دلیل افزایش درجه یونیزاسیون و سیستم به سمت یونیزاسیون کامل تعادل شیمیایی می رود که حتی اتم های خنثی به یون و الکترون تبدیل می شوند و فرصت دوباره اتم خنثی شود، را در این ناحیه ستون پلاسما ندارند در دما های پایین تر چگالی نزدیک به چگالی هوا نزدیک است با توجه به شکل ۴-۱۵ و هر چه از ستون پلاسما دور می شوم چگالی افزایش می یابد چون دما روند کاهشی پیدا می کند پلاسما بین دو آند و کاتد در محدود معینی اتفاق می افتد اما با توجه به شکل ۴-۱۵ اطراف خارج از پلاسما مقدار چگالی تحت تاثیر انرژی پلاسما است این انرژی را از و اثرات انرژی تابش و گرمایی ژول و تابع کار کاتد و شار گرمای آند را به دست می آورد که می توان در محیط اطراف تخلیه دیده می شود. حتی می توان اثرات تابع کار کاتد و شار گرمایی آند که روی لبه و لایه های مرزی کاتد و لایه های مرزی آند دید که میزان چگالی را تحت تاثیر قرار داده اند. از اثرات میدان مغناطیسی خارجی صرف نظر کردیم. که این پارامتر در نیروی لورنتس در معادله تکانه اثر گذار می باشد.



شکل ۴-۱۶- نمودار چگالی پلاسما گاز هوا برای فشار یک اتمسفر کار حاضر



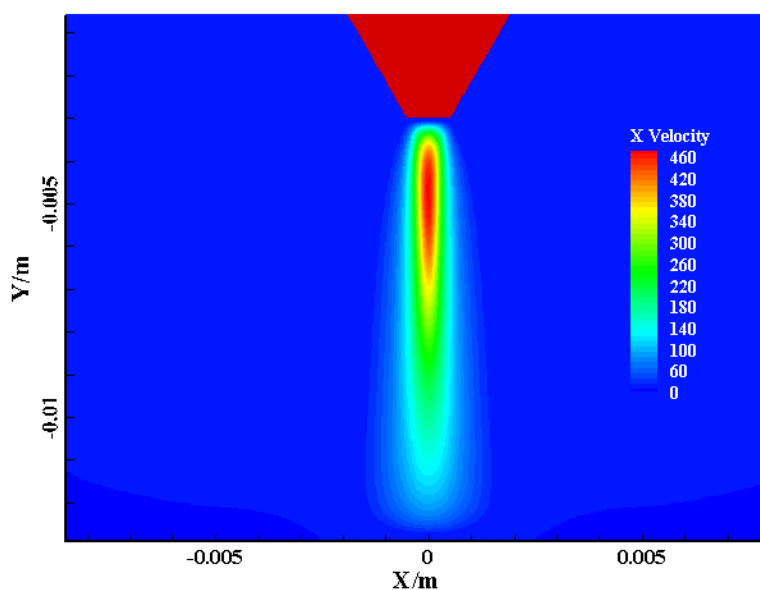
(ب)

(الف)

شکل ۴-۱۷- فرآیند انتقال انرژی غالب بر پلاسما که شکل (الف) مربوط به انرژی یون ها هستند

شکل مربوط به (ب) انرژی الکترون ها هست. [۴۴]

شکل ۴-۱۷- انتقال انرژی پلاسما در شرایط غیر تعادل ترمودینامیکی و غیر تعادل شیمیایی رخ داده است. [۴۴]



شکل ۴-۱۸- سرعت پلاسما گاز هوا کار حاضر

با توجه به شکل های ۴-۱۴ و ۴-۵ و ۴-۱۷ بیش ترین ناحیه دما در قسمت های است که ما مقاومت گرمایی داریم و این انتظار می رفت و همچنین با توجه به شکل های سرعت هوا و آرگون ۴-۴ و ۴-۱۸ بیشترین سرعت پلاسما و کمترین چگالی هم در این ناحیه مقاومت گرمایی اتفاق می افتد باز هم همین اتفاق را می توان برای تابش تفسیر کرد و با توجه شکل های ۴-۹ و ۴-۱۰ و ۴-۱۱ و ۴-۱۲ بیشترین مقدار دما در همین ناحیه مقاومت گرمایی رخ می دهد که بیشترین تولید انرژی را نسبت به دیگر پارامترهای محاسباتی معادلات انرژی را در بردارد.

۴-۵- اعتبار سنجی روش مگنتو هیدرودینامیک

با استفاده از ضریب عملگر قانون فارادی، معادله زیر به دست می آید

$$\nabla \times \nabla \times E = -\nabla \times \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4-14)$$

سمت راست را می توان با استفاده از قانون آمپر با $\mu = \mu_0$ و $\epsilon = \epsilon_0$ بازنویسی کرد.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\frac{\partial}{\partial t} (\mu_0 j + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t}) \quad (4-15)$$

با استفاده از خصوصیات عملگر $\nabla \times (\nabla \times)$ و معادله (۱۰-۲) معادله زیر به دست می آید.

$$\Delta E = \mu_0 \frac{\partial j}{\partial t} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (4-16)$$

با تناسب ایجادى سمت چپ و راست معادله بالا که آیا پلاسما در حالت گرم تعادل ترمودینامیکی مسئله می تواند رسانا یا نارسا یا نیم رسانا باشد ؟ و هم چنین نتایج آن رینولدز مغناطیسی بیان می گردد.

$$\frac{\left| \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right|}{|\Delta E|} \approx \frac{\epsilon_0 \mu_0 \frac{E_c}{t_c}}{\frac{E_c}{L_c}} = \frac{\epsilon_0 \mu_0 L_c}{t_c} \quad (4-17)$$

در اینجا طول مشخصه و زمان می باشد. t_c, L_c

$$\left| \varepsilon \cdot \mu \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right| \ll |\Delta E| \quad (4-18)$$

در نتیجه مشتق زمانی دوم حذف می شود و معادله به صورت زیر در می آید.

$$\Delta E = \mu \cdot \frac{\partial j}{\partial t} \quad (4-19)$$

با ترکیب معادله ۴-۱۹ و ۴-۳۴ خواهیم داشت.

$$\nabla \times \frac{\partial B}{\partial t} = \mu \cdot \frac{\partial j}{\partial t} \quad (4-20)$$

جریان همرفت را در مقایسه با جریان جریان هدایت در قانون آمپر نادیده گرفت. به این ساده سازی فضیه شبه پایداری^۱ می گویند قانون آمپر سپس به صورت زیر تقلیل می یابد.

$$\nabla \times B = \mu \cdot j \quad (4-21)$$

این معادله بیان می کند که مسئله ما پلاسما گرم در حالت تعادل ترمودینامیک که در حال بررسی آن هستیم یک پلاسمای رسانا است.

برای اولین بار پارامتر هال^۲ را ارزیابی می کنیم پارامتر هال برای تعیین این است که آیا جریان هال می توان نادیده گرفته شود؟

فرکانس لارمور مربوطه، نشان دهنده فرکانس فراتر از الکترون در یک میدان مغناطیسی B_c و به صورت بیان می شود. و $B_c = 10^{-4}$ است. برای جریان تخلیه 200 A و ستون تخلیه با شعاع تخلیه 3 m می باشد که شعاع اشباع است.

$$\omega_e = \frac{eB_c}{m_e} \approx 2 \times 10^8 \text{ Hz} \quad (4-22)$$

m_e جرم الکترون هست.

میانگین فرکانس برخورد الکترون با ذرات دیگر از مشتق زیر حاصل می شود.

$$\nu_{e,\beta} = \frac{n_e e^2}{m_e \sigma_c} = 2.8 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (4-23)$$

که مشخصه رسانایی هدایت الکتریکی $[\text{A} \cdot \text{V}^{-1} \text{m}^{-1}]$ $\sigma_c \approx 10^4$ ، مشخصه چگالی الکترون $n_e \approx 10^{23} [\text{m}^{-3}]$ است.

پارامتر هال به صورت زیر تعریف می شود.

$$\beta_c = \frac{\omega_e}{\nu_{e,\beta}} \approx 10^{-3} \quad (4-24)$$

در شرایط فوق β_c کمتر از یک می باشد. این به این معنی است که حرکت ذرات باردار تحت عمل از میدان الکترومغناطیسی است که به دلیل برخورد با ذرات باردار دیگر متوقف می شود با توجه به این واقعیت می توان جریان هال را در معادله (۲-۳۱) نادیده گرفت.

سپس قانون اهم ۲-۹ را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\mathbf{j} = \sigma_m (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (4-25)$$

در مرحله دوم عدد رینولدز مغناطیسی را بررسی می کنیم آیا جریان القایی را می توان نادیده گرفته شود یا نه ؟

$$\frac{1}{\mu \cdot \sigma} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (4-26)$$

با استفاده از عملگر کرل از دو طرف رابطه کرل می گیریم.

^۱ quasisteady

^۲ Hall

^۳ larmor

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu \cdot \sigma} \nabla \times B \right) = \nabla \times E + \nabla \times (u \times B) \quad (۴ - ۲۷)$$

با استفاده از قانون ۴-۲ فارادی معادله مشابه معادله انتقال برای میدان مغناطیسی به دست می آید.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) - \nabla \times \left(\frac{1}{\mu \cdot \sigma_m} \nabla \times B \right) \quad (۴ - ۲۸)$$

$\frac{\partial B}{\partial t}$ این جریان القا شده توسط تغییرات زمانی میدان مغناطیسی را نشان می دهد. $\nabla \times (u \times B)$ جریان ناشی از حرکت سیال، $\nabla \times \left(\frac{1}{\mu \cdot \sigma_m} \nabla \times B \right)$ هدایت جریان، یک مطالعه یک بعدی از این معادله، همان طور که توسط بودری پیشنهاد شده است. [۳۴]

R_{ω} می توان با استفاده از پارامتر غربالگری بدون بعد و عدد رینولدز مغناطیسی R_{mag}

مقایسه جریان القا شده توسط حرکت جریان و بازده جریان هدایت با رابطه زیر انجام می شود.

$$\frac{|\mu \cdot \sigma_c \nabla \times (U \times B)|}{|\nabla \times (\nabla \times B)|} \approx \frac{\mu \cdot \sigma_c \frac{1}{L_c} V_c B_c}{\frac{1}{L_c} \frac{1}{L_c} B_c} = \mu \cdot \sigma_c L_c V_c B_c = R_{mag} \quad (۴ - ۲۹)$$

پارامتر غربالگری به عنوان نسبت تغییر زمان میدان مغناطیسی به جریان هدایت تعریف می شود ^۱

عدد رینولدز مغناطیسی برآوردی از اثرات جذب مغناطیسی به انتشار مغناطیسی ارائه می دهد ^۲

عدد رینولدز مغناطیسی تقریباً برابر با ۰,۰۱ است در نتیجه جریان القایی در مقایسه با جریان هدایت ناچیز است بنابراین معادله انتقال برای میدان مغناطیسی ۱۹-۲ و قانون اهم ساده شده ۱۶-۲ به ترتیب زیر حاصل می شود.

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times \left(\frac{1}{\mu \cdot \sigma_c} \nabla \times B \right) \quad (۴ - ۳۰)$$

۹

$$j = \sigma_m E \quad (۴ - ۳۱)$$

۴-۶-۱- پارامتر غربال گری

اکنون با مقایسه زمان تغییر میدان مغناطیسی به جریان هدایت، رابطه زیر به دست می آید.

$$\frac{|\mu \cdot \sigma_c \frac{\partial B}{\partial t}|}{|\nabla \times (\nabla \times B)|} \approx \frac{\mu \cdot \sigma_c \frac{B_c}{t_c}}{\frac{1}{L_c} \frac{1}{L_c} B_c} = \frac{\mu \cdot \sigma_c L_c^2}{t_c} = R_\omega \quad (۴ - ۳۱)$$

R_ω مشخصه پارامتر غربالگری ۰,۰۳ است این پارامتر کمتر از یک می باشد حاکی از آن است که جریان ناشی از تغییر زمان مغناطیسی نسبت به چگالی جریان ناچیز است معیارهای رژیم پایدار حاکم است قانون فارادی را می توان به حداقل می رساند.

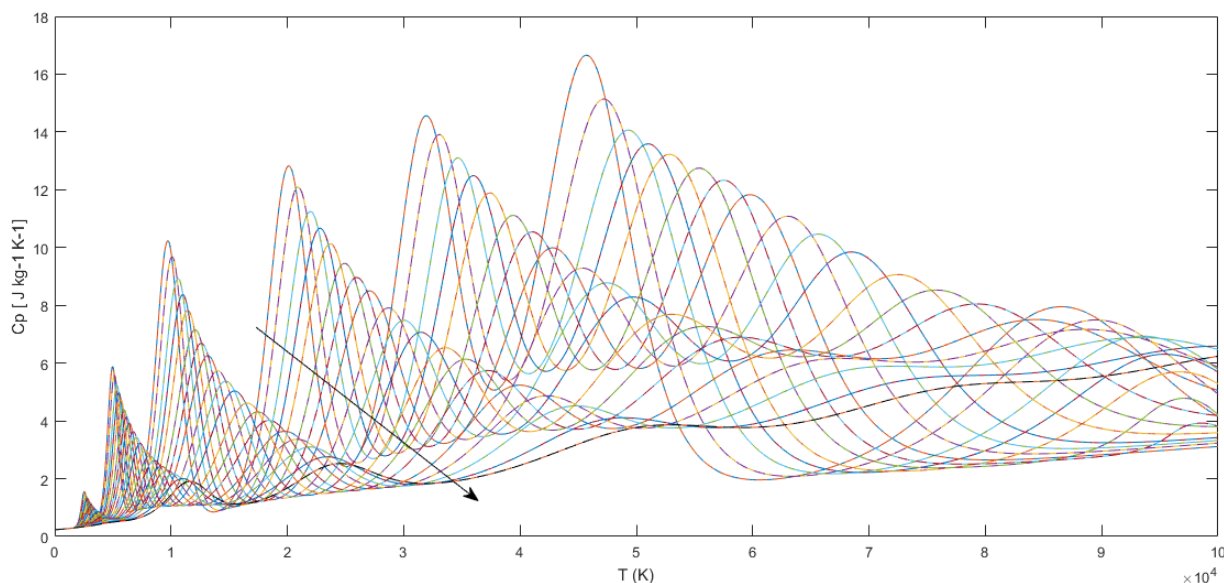
$$\nabla \times E = \cdot \quad (۴ - ۳۲)$$

۴-۶- ضرایب ترابردی

ظرفیت گرمایی ویژه، آنتالپی، آنتروپی، هدایت گرمایی، ویسکوزیته به عنوان ضرایب ترابردی محاسبه شده است. [۷۰] توابع درون یابی سیگماوئید و گاوسین در کارحاضر برای محاسبه ضرایب ترابردی استفاده شده است. چون توابع چند جمله ای سونین، مدل ریاضی برای حالت اغتشاش با کمک چاپمن- انسکوگ مناسب است و برای جریان آرام کار حاضر مناسب نیست برای همین از توابع گاوسین و سیگموئید استفاده شده است. عملکرد سیگما با تغییر عملکرد کسر مولی با دما تحت تاثیر یک واکنش منفرد، با دقت خوبی تولید می کند. هنگامی که واکنش های متعدد در یک محدوده دما موثر باشند، ترکیبی از سیگما مناسب است. در برخی مناطق خطا بین داده محاسبه شده با روش سیگما وجود دارد برای همین با یک تابع گوس تقریب می یابد. این رویکرد دو مزیت نسبت به چند جمله سونین دارد. یک عبارت پیوسته و مشتق برای کل دامنه دما استفاده می شود. علاوه براین، رفتار مجانبی عملکرد درون یابی دارای مقادیر سازگار است، در حالی که مناسبات چند جمله ای نتایج غیر فیزیکی را نیز برای برون یابی جزئی از دامنه اعتبار وارد می کند.

۴-۶-۱- ظرفیت گرمایی ویژه هوا

شکل ۴-۱۹- تابع سیگموئید و گاوس در محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه هوا تا دما 10^4 کلوین با هم مقایسه شده اند.



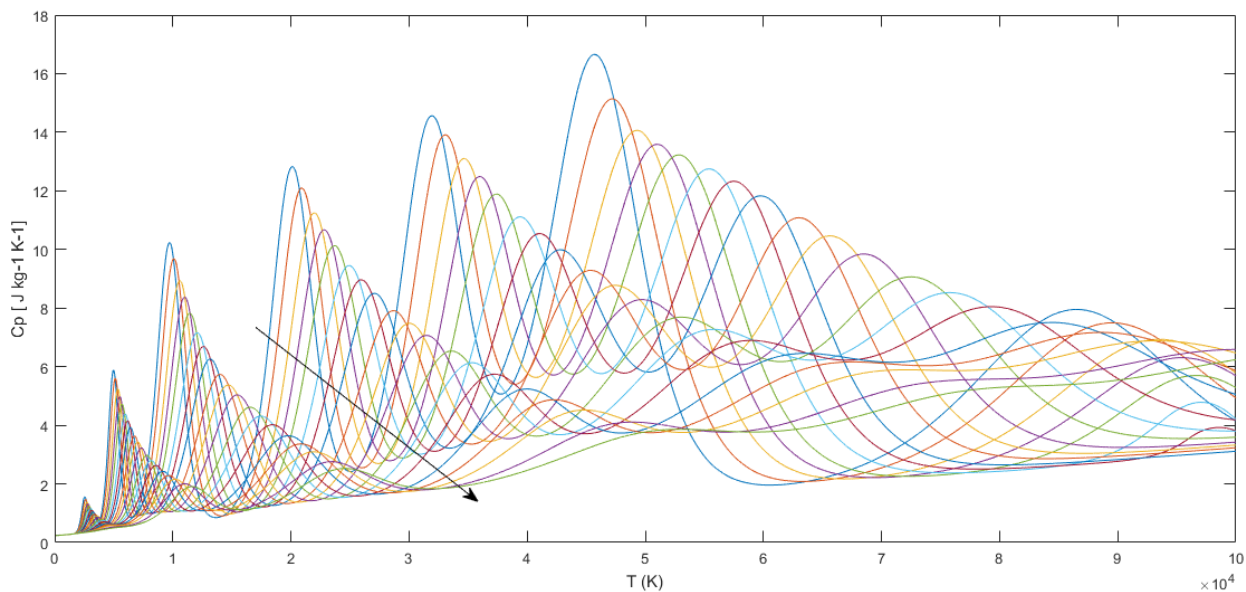
شکل ۴-۱۹- مقایسه ظرفیت گرمایی ویژه برای گاز هوا برای فشار مختلف به ترتیب جدول ۳،۴

جدول ۴-۳- ترتیب مقادیر فشارهای مختلف محاسبه شده

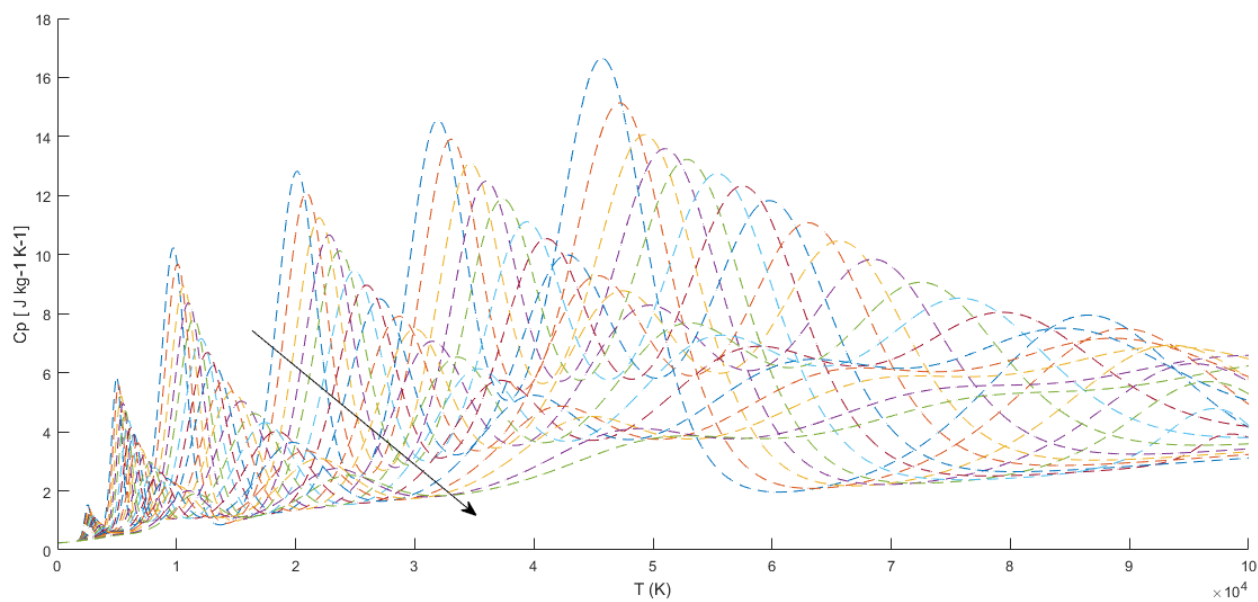
Row	Pressure (bar)	row	Pressure (bar)	Row	Pressure (bar)
۱	۱e-۳	۸	۲e-۱	۱۵	۵e۱
۲	۲e-۳	۹	۵e-۱	۱۶	۱e۲
۳	۵e-۳	۱۰	۱e۰	۱۷	۲e۲
۴	۱e-۲	۱۱	۲e۰	۱۸	۵e۲
۵	۲e-۲	۱۲	۵e۰	۱۹	۱e۳
۶	۵e-۲	۱۳	۱e۱		
۷	۱e-۱	۱۴	۲e۱		

ظرفیت گرمایی ویژه، مقدار گرمایی که ماده می گیرد تا دمای آن یک واحد افزایش کند طبق نمودار ۴-۴۳ که کسرهای مولی الکترون در فشار متفاوت نشان می دهد هر چه فشار افزایش می یابد کسر مولی الکترون کمتر به وجود می آید. هم چنین میزان انتگرال برخورد کمتر می شود انرژی کمتری تولید می شود مقدار گرمایی تولید کاهش می یابد و برای همین انرژی دریافتی باید زیاد شود تا الکترون های از تراز الکترونی جدا شوند با افزایش فشار باید بیشتر انرژی داده شود و بنابراین ظرفیت گرمایی ویژه با افزایش فشار هم کاهش می یابد.

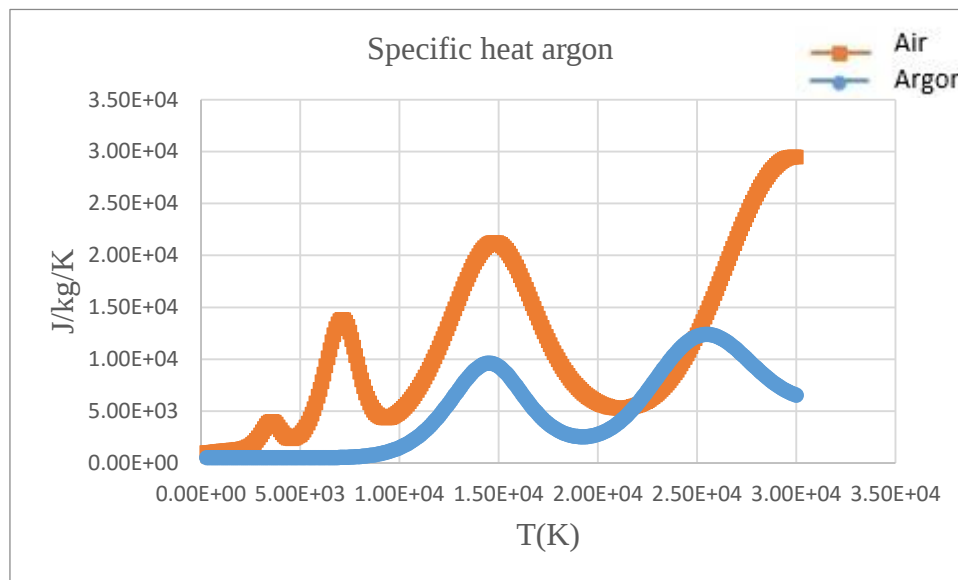
ظرفیت گرمایی ویژه آرگون و هوا با هم متفاوت است و ظرفیت گرمایی ویژه هوا بیشتر از آرگون است چون انتگرال برخورد در هوا نسبت به گاز آرگون بیشتر است بنابراین این انتظار می رود که ظرفیت گرمایی که ویژه پلاسما هوا از آرگون بیشتر شود. همان طور که Murphy، خواص فیزیکی محاسبه کرده است. اشاره نمود. [۶۴] با توجه به، شکل ۴-۲۲- ظرفیت گرمایی ویژه هوا بیشتر از آرگون هست این انتظار را می توان برای آنتالپی داشت یعنی این که آنتالپی هوا بیشتر از آرگون است. هر انرژی برای خود دمای دارد. انرژی انتقالی، انرژی دروانی، انرژی ارتعاشی و انرژی واکنش، هر کدام از این انرژی ها برای خود یک دمای دارند. اختلاف دما به وجود می آید و پس هر کدام ظرفیت گرمایی ویژه متفاوتی دارند. هر کدام از برخورد ها با هم انرژی های مختلف آزاد می کنند که این انرژی هم به نوع خورد (الکترون با اتم خنثی، یون با الکترون، اتم خنثی با یون، الکترون با الکترون) و گونه بستگی دارد. برای آزاد شدن الکترون از هر اتم خنثی، باید این اتم انرژی های متفاوتی دریافت کند. باید این را توجه داشت که این ضرایب ترابردی در لایه های غلاف و پیش غلاف متفاوت است بنابراین ما نمی توانیم این خواص را برای این لایه ها تعریف کنیم.



شکل ۴-۲۰- ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما هوا تابع سیگموئید برای فشار مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



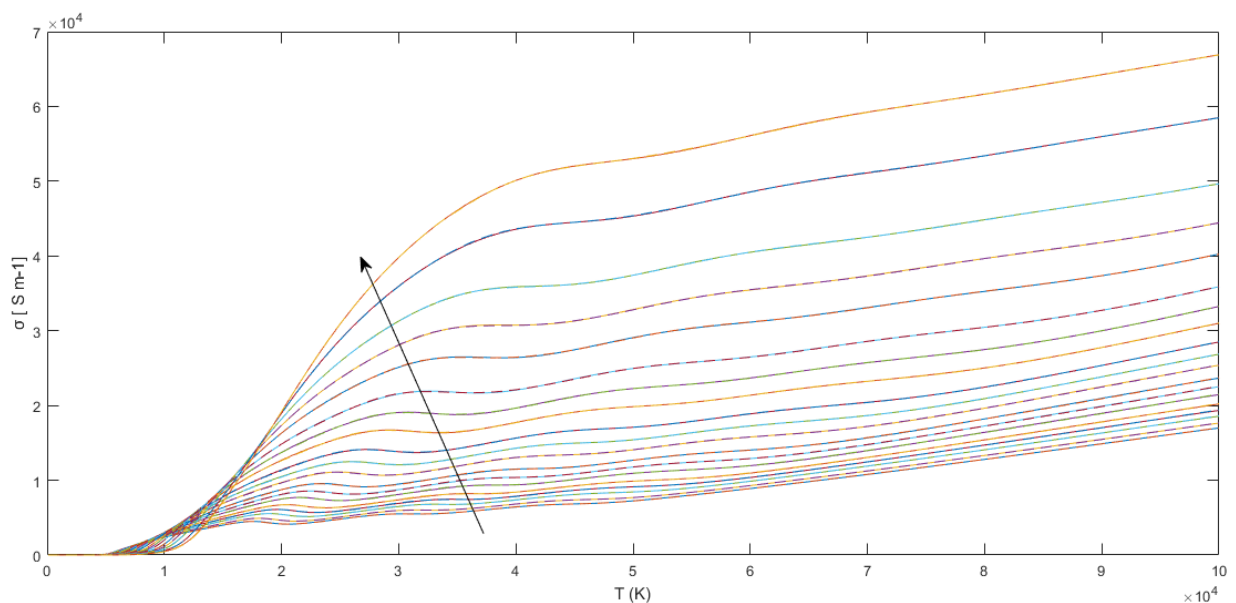
شکل ۴-۲۱- ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما هوا تابع گاوس برای فشار مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



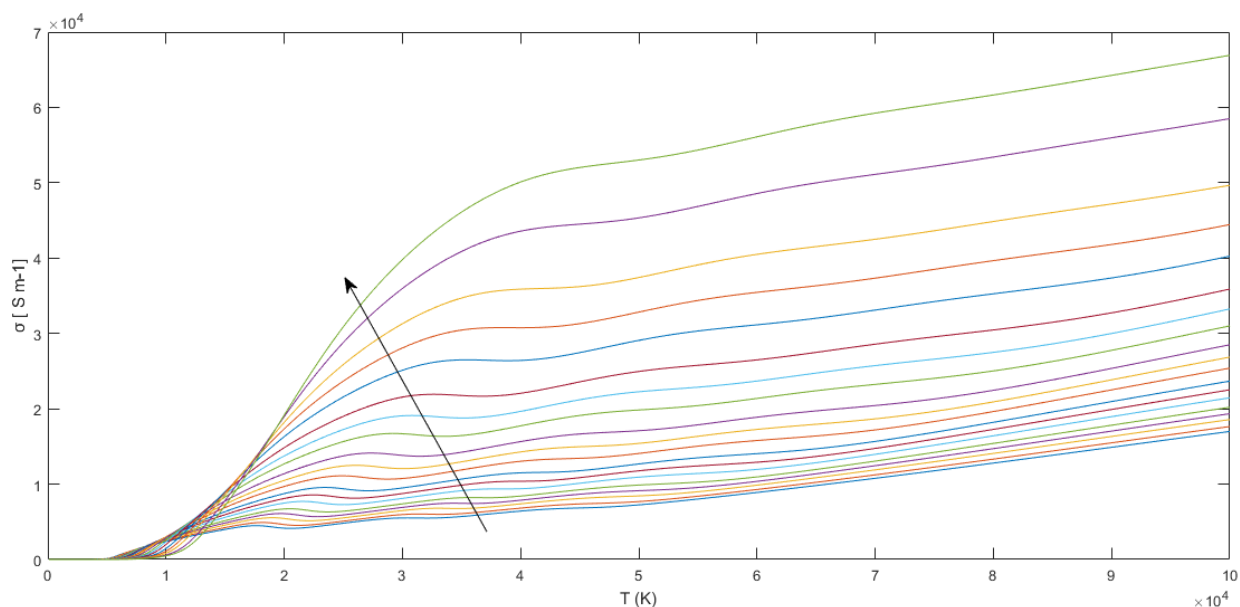
شکل ۴-۲۲- نمودار مقایسه ظرفیت گرمایی ویژه پلاسما آرگون، هوا فشار یک اتمسفر

۴-۶-۲- هدایت الکتریکی ($[S/m]$)

شکل ۴-۱۹- تابع سگموئید و گاوس برای محاسبه هدایت الکتریکی تا دما 10^4 کلوین با هم مقایسه شده اند.

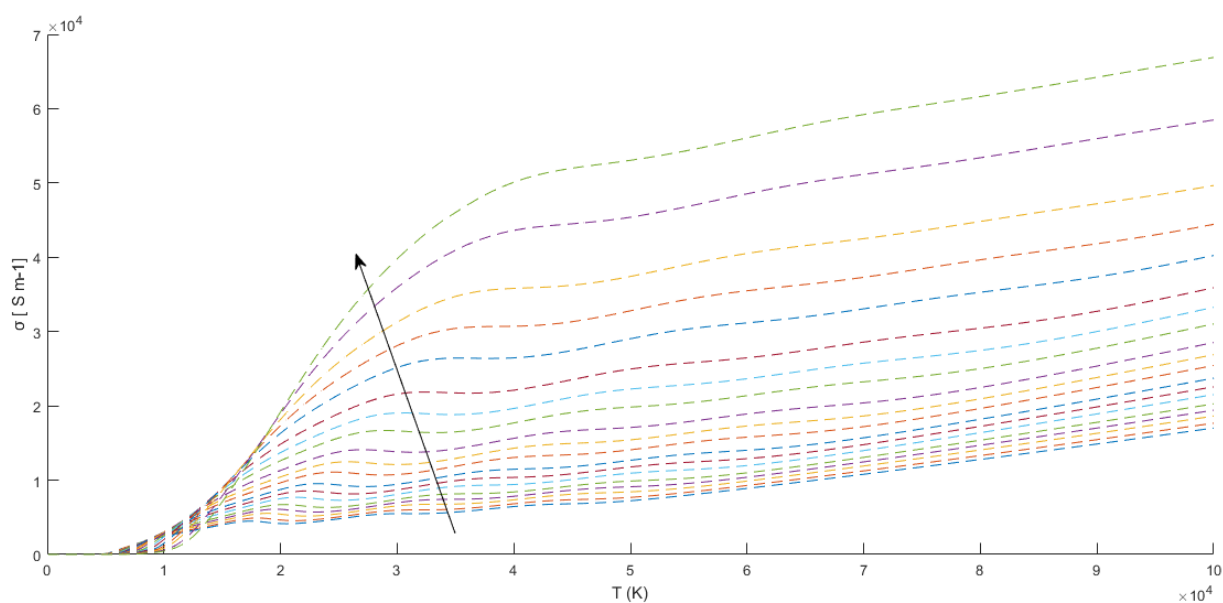


شکل ۴-۲۳- مقایسه هدایت الکتریکی پلاسما هوا برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

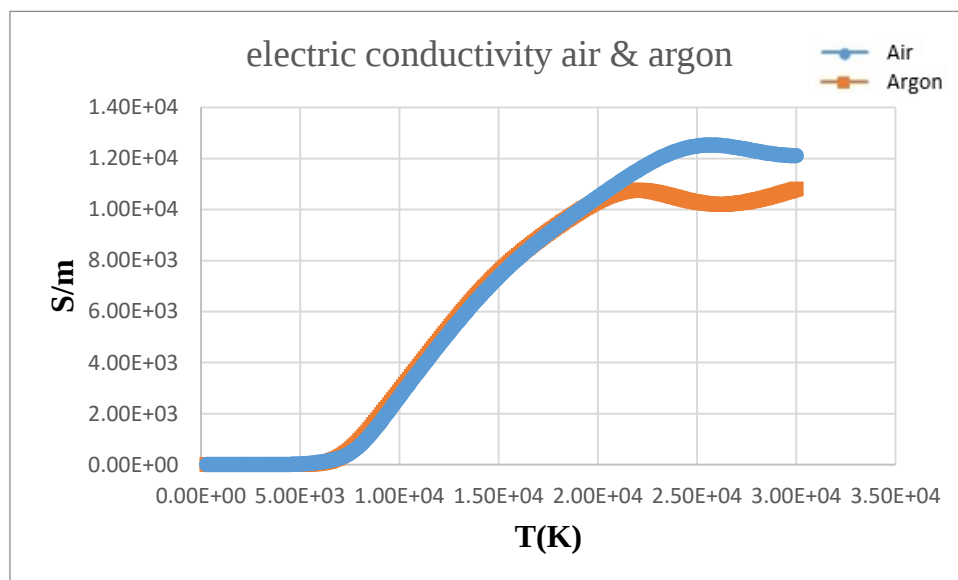


شکل ۴-۲۴- هدایت الکتریکی هوا با روش سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

هر چه فشار افزایش می یابد با توجه به شکل ۴-۴۴- کسر مولی الکترون کمتر به وجود می آید. اما مول الکترون ها افزایش می یابد یعنی تعداد الکترون زیادی می یابد بنابراین هدایت الکتریکی با افزایش فشار افزایش می یابد.



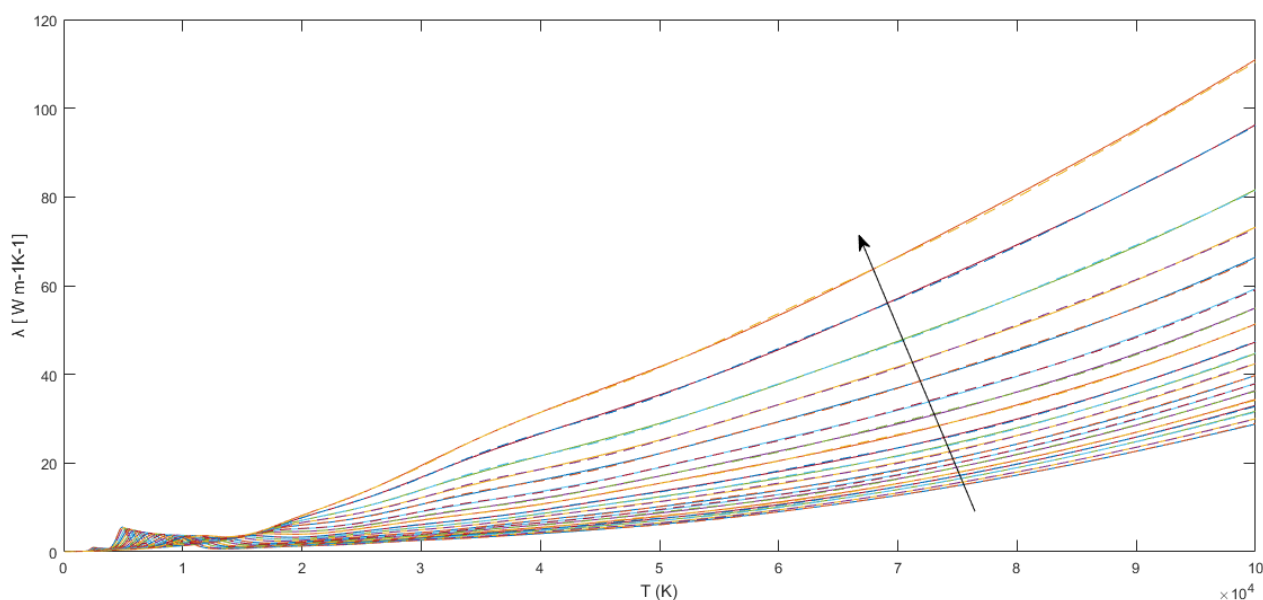
شکل ۴-۲۵- هدایت الکتریکی هوا با روش گاوس کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



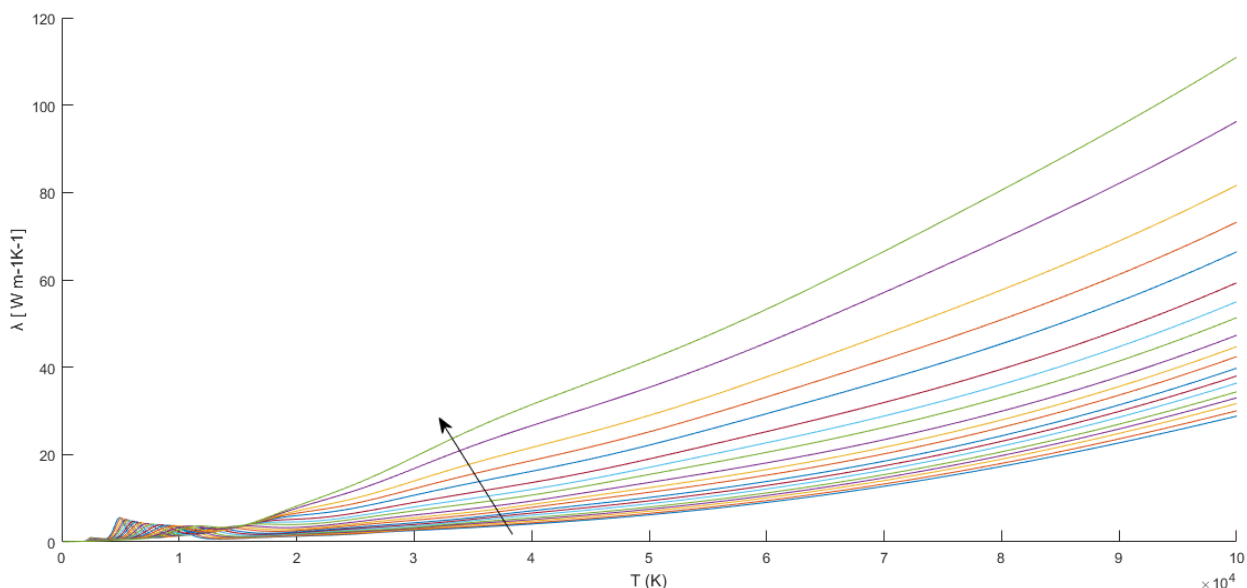
شکل ۴-۲۶- نمودار هدایت الکتریکی پلاسما آرگون، هوا فشار یک اتمسفر

۴-۶-۳- هدایت گرمایی [W/K/m]

شکل ۴-۲۳- تابع سیگموئید و گوس برای محاسبه هدایت گرمایی تا دما 10^4 کلین با هم مقایسه شده اند.

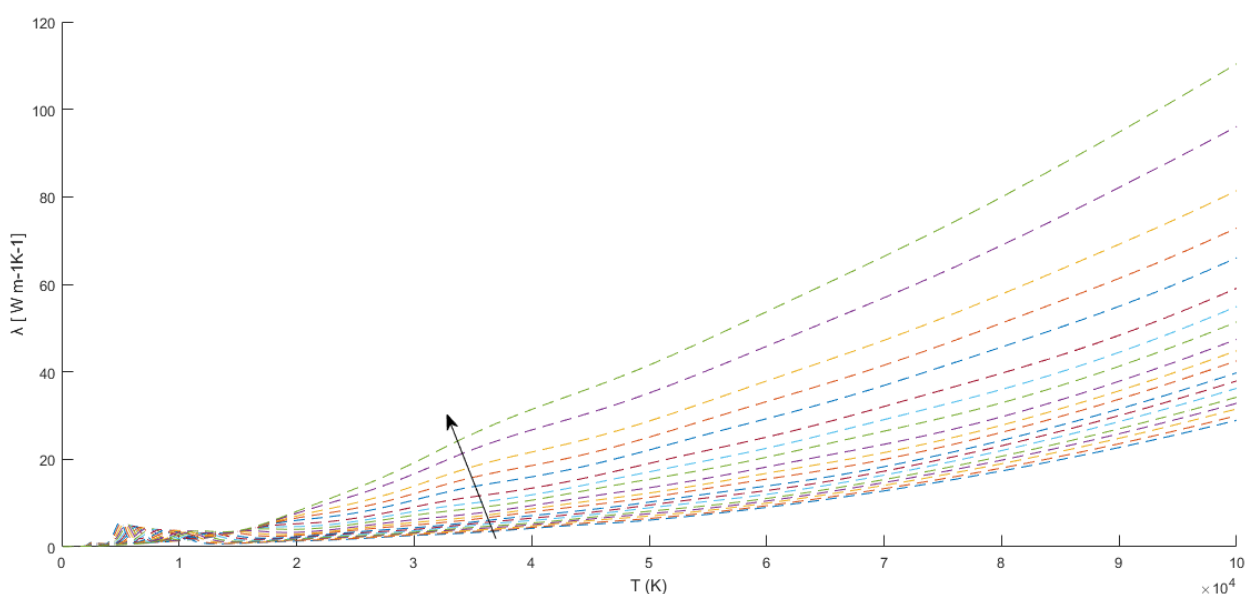


شکل ۴-۲۷- مقایسه هدایت گرمایی پلاسما هوا برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

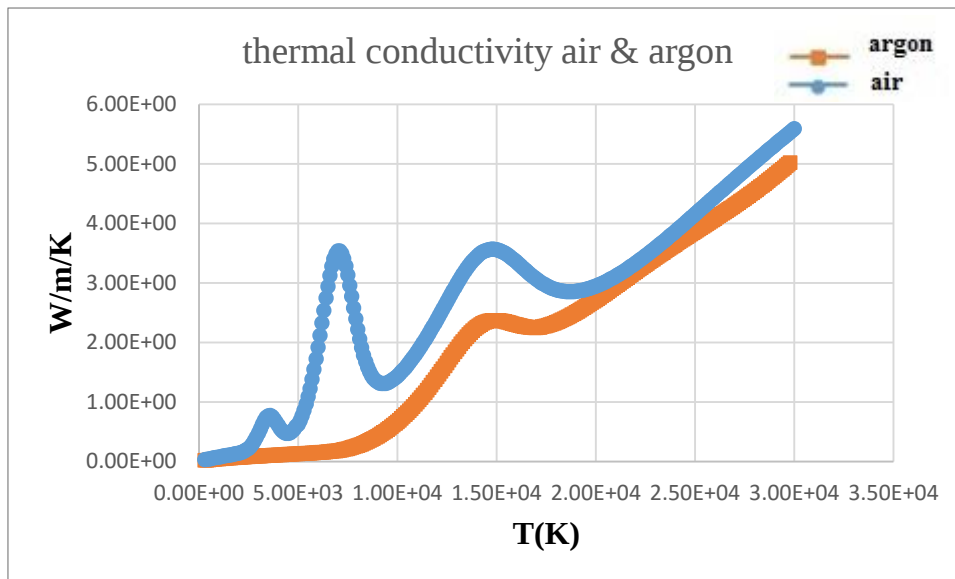


شکل ۴-۲۸- هدایت گرمایی هوا با تابع سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

هدایت گرمایی یک ماده بیانگر توانایی آن در انتقال گرما است. با توجه به شکل ۴-۲۸ با افزایش دما هدایت گرمایی پلاسما افزایش می یابد و همچنین با افزایش فشار باز هدایت گرمایی افزایش می یابد. گونه های مختلف الکترون از دست بدهند و برخورد الکترون ها با توجه به، شکل ۴-۲۳ و شکل ۴-۴۴ هدایت الکتریکی افزایش می یابد. که افزایش الکترون را در پی دارد و الکترون ها با ذرات زیاد برخورد می کنند. که در ابتدای فصل چهارم درباره برخورد الکترون ها توضیح داده شده است. با توجه به شکل ۴-۵ توزیع دمای آرگون اختلاف دمای زیادی در پلاسما ایجاد شده وجود دارد و گرمایی زیادی تولید می کند در نتیجه هدایت گرمایی افزایش می یابد.



شکل ۴-۲۹- هدایت گرمایی هوا با تابع گاوس برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



شکل ۴-۳- نمودار مقایسه هدایت گرمایی گاز پلاسما آرگون، هوا برای فشار اتمسفر

۴-۶-۴- ویسکوزیته [Kg/m/s]

سهام الکترون ها در محاسبه ضریب ویسکوزیته قابل اغماض است در نتیجه می تواند به روش ذیل

تقریب یابد. [۵۲]

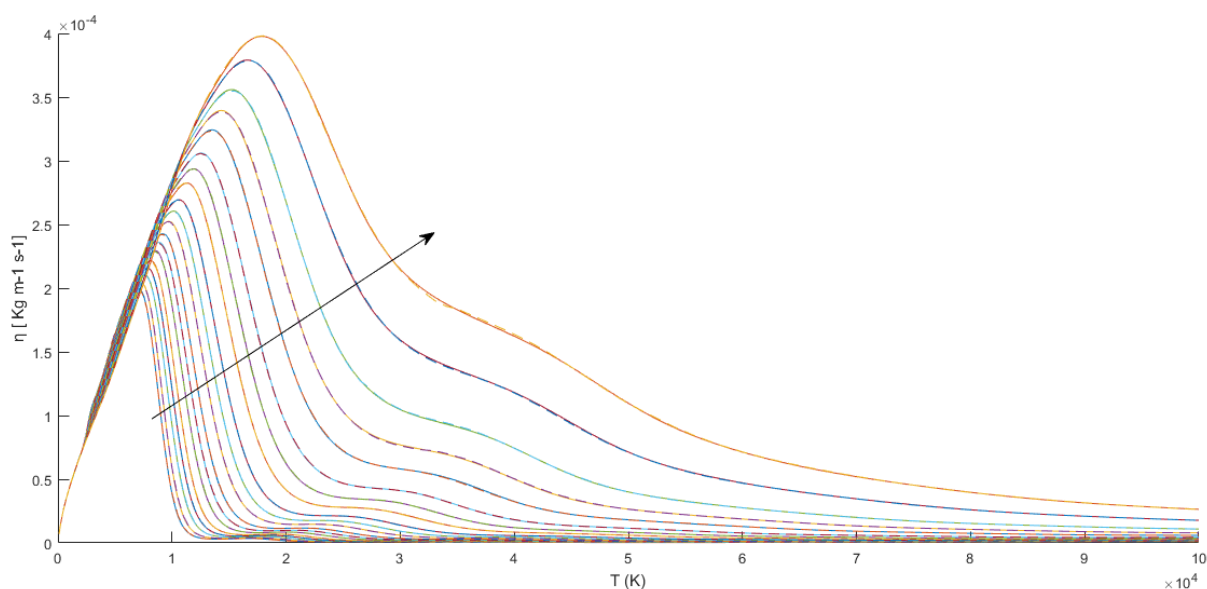
$$\eta \cong \eta_h + \eta_e \cong \eta_h \quad (۴-۳۳)$$

تناقض آشکار وجود دارد که ویسکوزیته نه فقط با دما مقادیرش تغییر می کند بلکه در فشار های مختلف مقادیر متفاوتی دارد نمی توان یک مقدار ثابتی بدون در نظر گرفتن فشار ضرایب تراپردی پلاسما حرارتی را به دست آورد. اما بر خلاف شبیه سازی های که برای پلاسما با نرم افزار سیالات، انسیس انجام می شود ضرایب تراپردی برای پلاسما با (UDF) تعریف کنیم. در فشار مختلف ضرایب متفاوتی داریم که در نظر نمی گیرند. همه ضرایب تراپردی پلاسما در فشار های مختلف دارای مقادیر متفاوتی است. ویسکوزیته روند صعودی دارد و به پیک نمودار ویسکوزیته می رسیم باز کاهش می یابد این پیک نشان دهنده این هست که آستانه تعادل شیمیایی رسیدم و در آستانه تعادل شیمیایی چون جرم الکترون کم هست و مول های الکترون افزایش یافته است و همچنین در حالت تماس مستقیم نیستند بنابراین نزول ویسکوزیته را بعد پیک داریم. این درجه یونیزاسیون مربوط به برخوردها درونی است. اگر تعداد ذرات در همان حجم دو برابر شود، دو برابر ذرات برای انتقال حرکت از صفحه به صفحه ای دیگر وجود دارد اما میانگین مسیر آزاد از هر مولکول نصف می شود به طوری که می تواند این حرکت را فقط به نصف به طور موثر انتقال دهد هنگامی که دمای از دمای اتاق افزایش می یابد.

مقدار ویسکوزیته اولین عملکرد فعل و انفعالات روی مولکول های خنثی است (برای مولکول های آدیاباتیک) سپس با شروع تفکیک توسط اتم های خنثی کنترل می شود و در دمای بالاتر توسط ذرات باردار کنترل می شوند با افزایش تراکم ذرات باردار تحرک ذرات باردار کاهش می یابد.

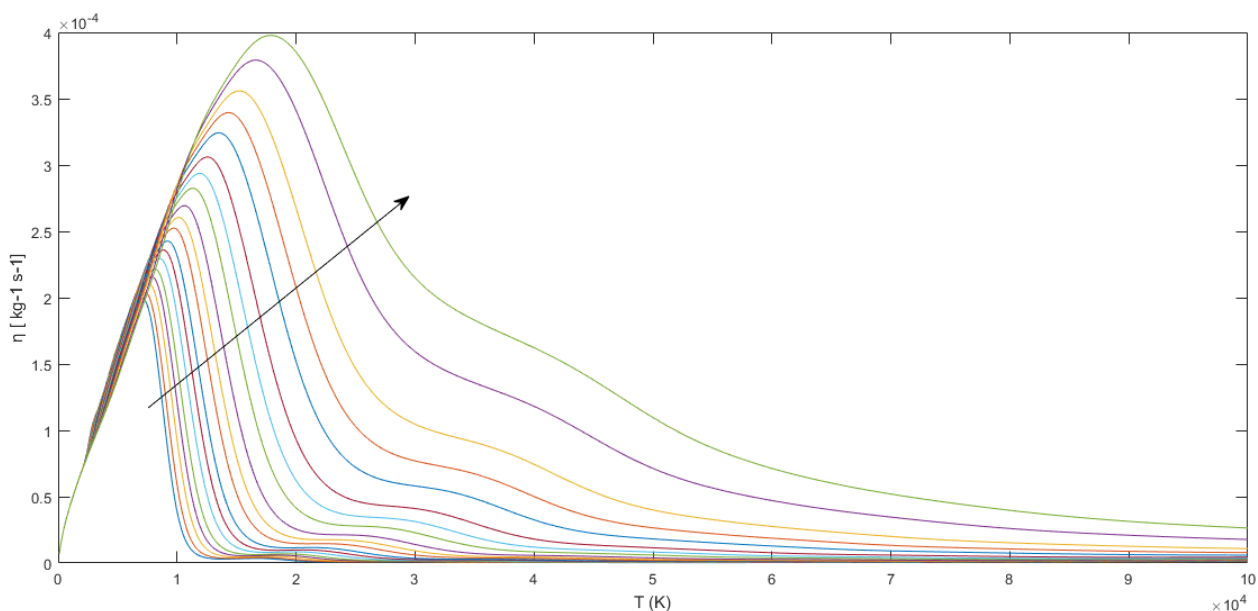
در دمای بالاتر از یونیزاسیون ویسکوزیته با افزایش دما کاهش می یابد. با توجه به شکل ۲-۵- می بینید برای فشار ۰,۰۰۵ بار که با افزایش دما تا حدود ۷۰۰ کلوین ویسکوزیته افزایش می یابد اما این ۷۰۰ کلوین ماکزیمم ویسکوزیته را داریم اما بعد از ۷۰۰ کلوین کاهش روند صعودی ویسکوزیته تا دمای می یابد هرچه فشار افزایش می یابد مقادیر ویسکوزیته رو به کاهش است. با افزایش روند دما و فشار مقدار ویسکوزیته زیاد می شود، با افزایش دما درجه یونیزاسیون بالا می رود و به تعادل شیمیایی نزدیک شویم مقدار گرانیوی افزایش می یابد این دمای زیاد باعث می شود دارای اتم های خنثی به یون و الکترون تبدیل شوند و فرصت باز ترکیب نداشته باشند.

انرژی برخورد در پلاسما گاز هوا بیشتر از آرگون است بنابراین ویسکوزیته هوا کمتر از آرگون می باشد. با توجه به نمودار ویسکوزیته در فشار های مختلف با افزایش دما مقدار ویسکوزیته نزدیک به هم می شود این یعنی که، گاز در به سمت یونیزاسیون کامل می رود که کاملاً تعادل شیمیایی^۱ برقرار است. در شکل ۴-۲۷- تابع سیگموئید و گاوسی برای محاسبه ویسکوزیته تا دما 10^4 کلوین با هم مقایسه شده اند.



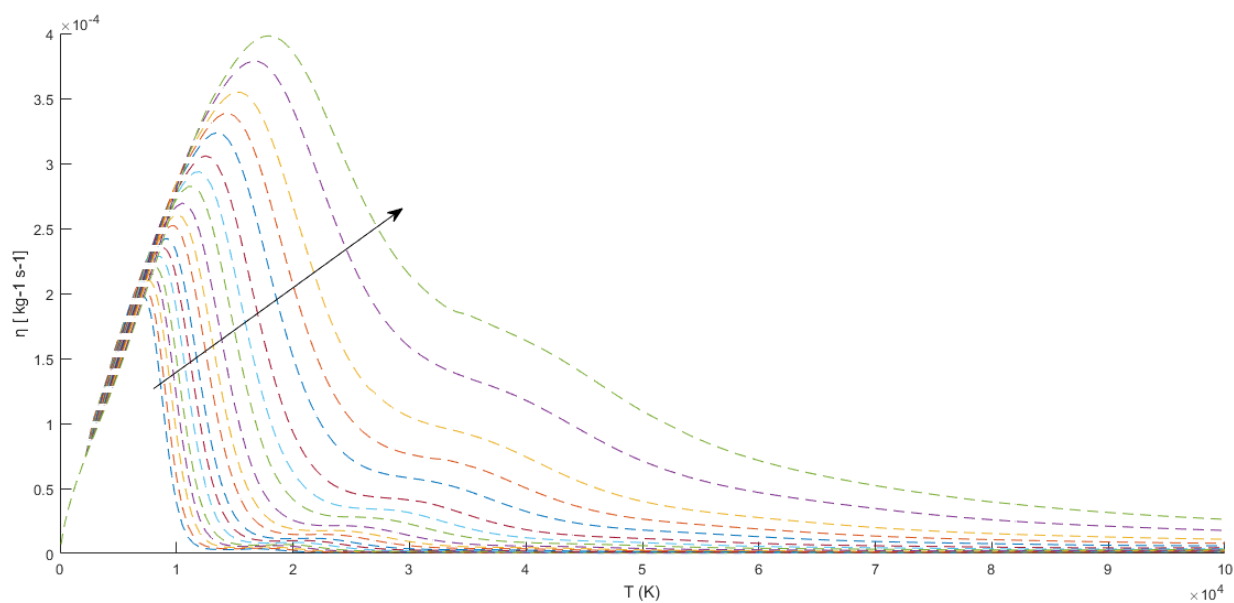
شکل ۴-۳۱- مقایسه ویسکوزیته پلاسما هوا برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

^۱Complete Local Chemical Equilibrium (CLCE)

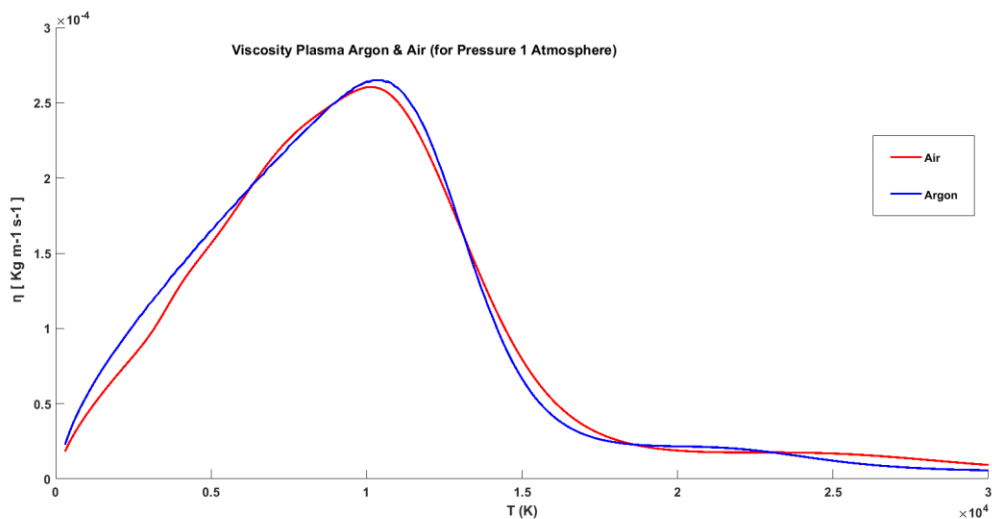


شکل ۴-۳۲- ویسکوزیته پلاسما هوا با روش سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

با توجه به شکل ۴-۱- ولتاژ شکست آرگون از هوا کمتر است اما با توجه به شکل ۴-۳۴- مقدار ویسکوزیته آرگون در بیشتر منحنی بالاتر از منحنی ویسکوزیته هوا هست این بیان گر این که، انرژی که در هوا در اثر برخورد ذرات تولید می شود بیشتر است.



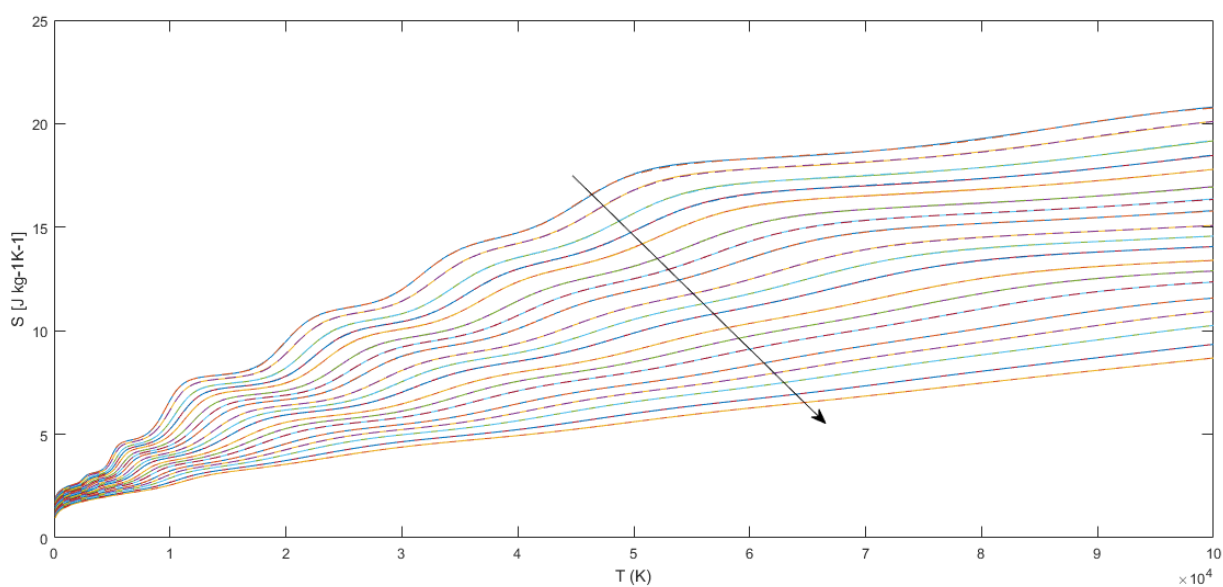
شکل ۴-۳۳- ویسکوزیته پلاسما هوا با تابع گاوس برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



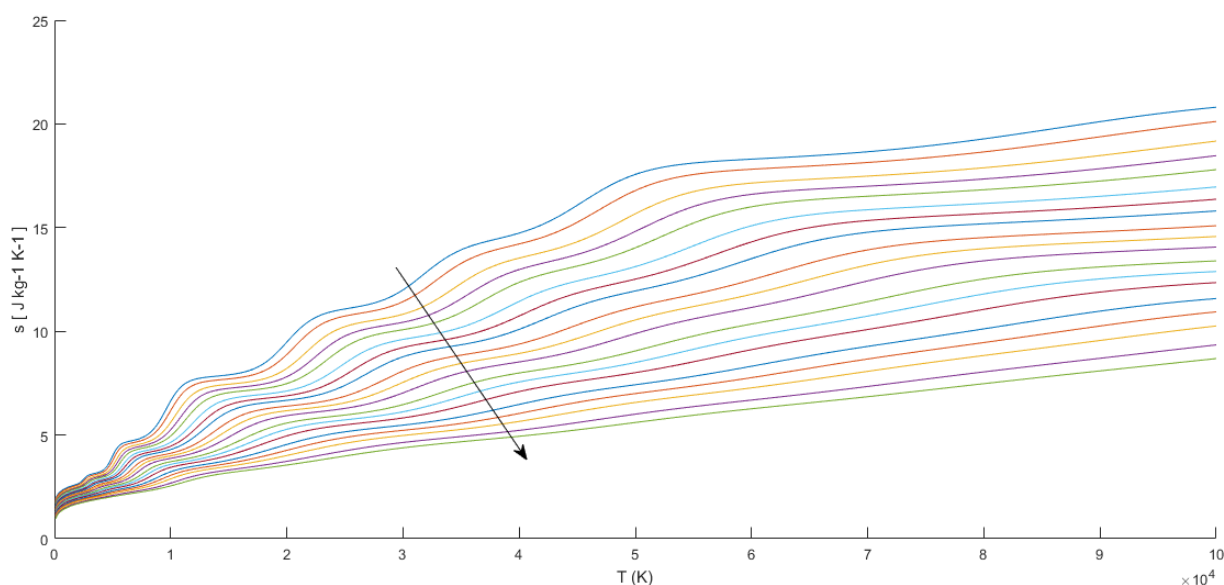
شکل ۴-۳۴- نمودار ویسکوزیته پلاسما گاز آرگون، هوا برای فشار اتمسفر

۴-۶-۵- آنتروپی

در شکل ۴-۳۱- تابع سیگموئید و گاوس برای محاسبه آنتروپی تا دمای 10^4 کلوین با هم مقایسه شده اند.

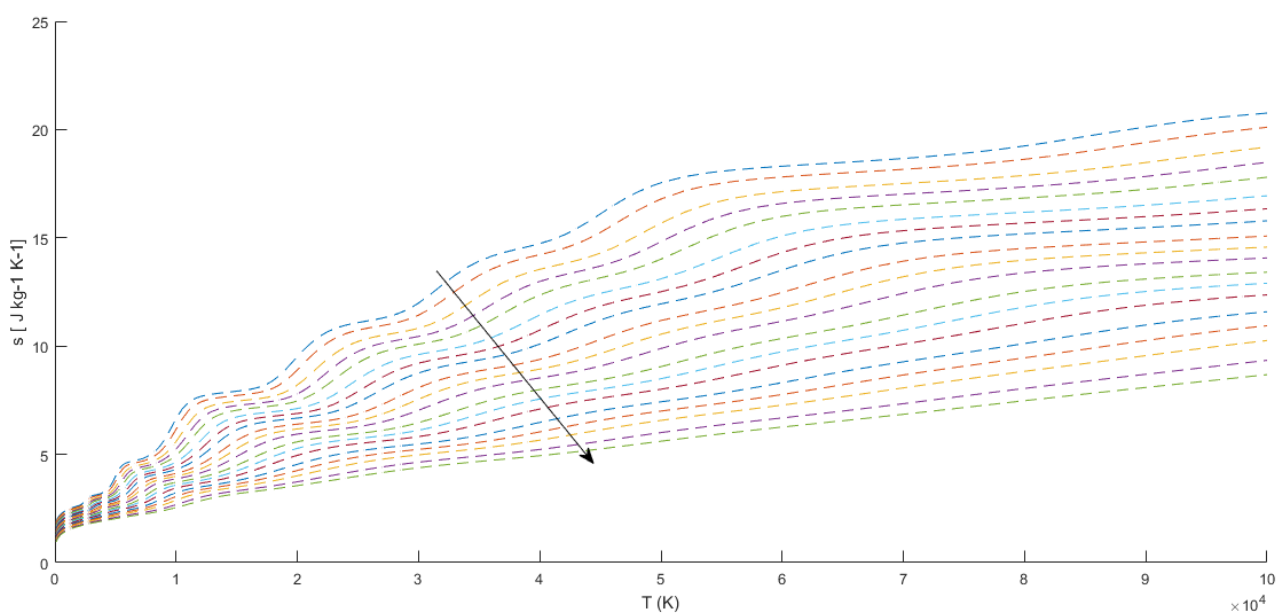


شکل ۴-۳۵- مقایسه آنتروپی پلاسما هوا برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳



شکل ۳۶-۴- آنتروپی هوا با تابع سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۳-۴

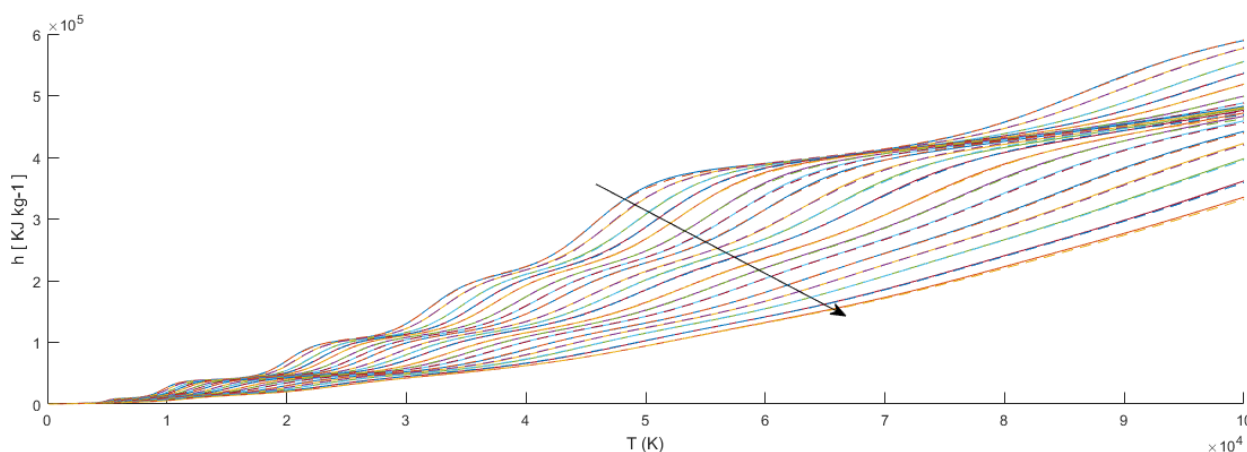
با توجه به شکل ۴-۴۳- کسرمولی الکترون با افزایش فشار کاهش می یابد و الکترون ها دمای بیشتر و جرم کمتر و با سرعت بالاتری نسبت به دیگر ذرات می باشد و برخورد ذرات کاهش می یابد می توان این اثر کاهش کسرهای مولی الکترون را در شکل ۴-۳۵- دید که میزان آنتروپی را کاهش می دهد. وقتی آنتروپی کاهش پیدا می کند مقدار انتگرال برخورد نیاز کاهش می یابد یکی از نتایجی را که می توان از کاهش مقدار انتگرال برخورد به دست آید کاهش آنتالپی هست چون میزان انرژی سیستم کاهش می یابد.



شکل ۳۷-۴- آنتروپی هوا با تابع گاوس برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۳-۴

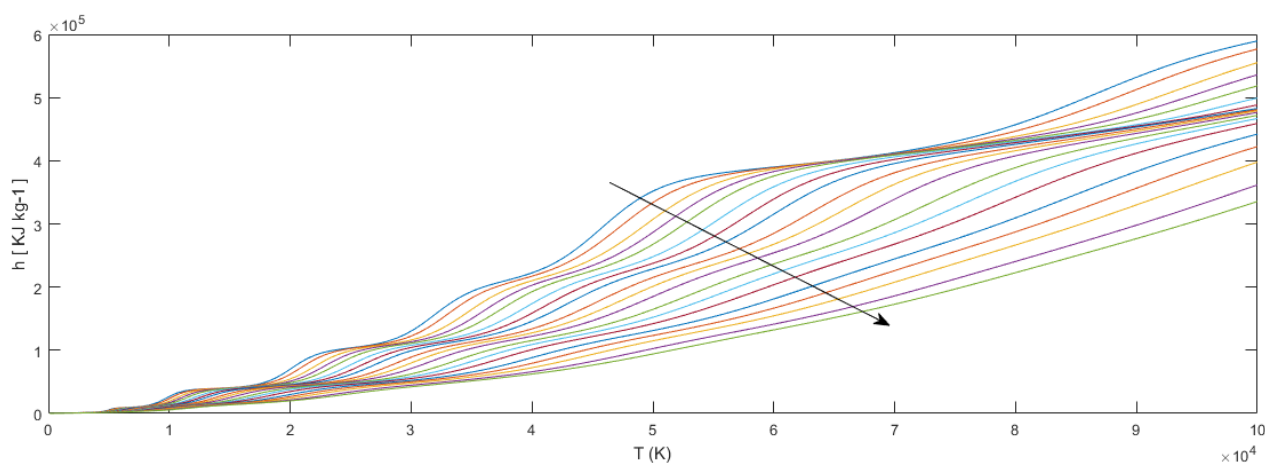
۴-۶-۶- آنتالپی

در شکل ۴-۳۴- تابع سیگموئید و گاوس برای محاسبه آنتالپی تا دمای 10^4 کلوین با هم مقایسه شده اند.

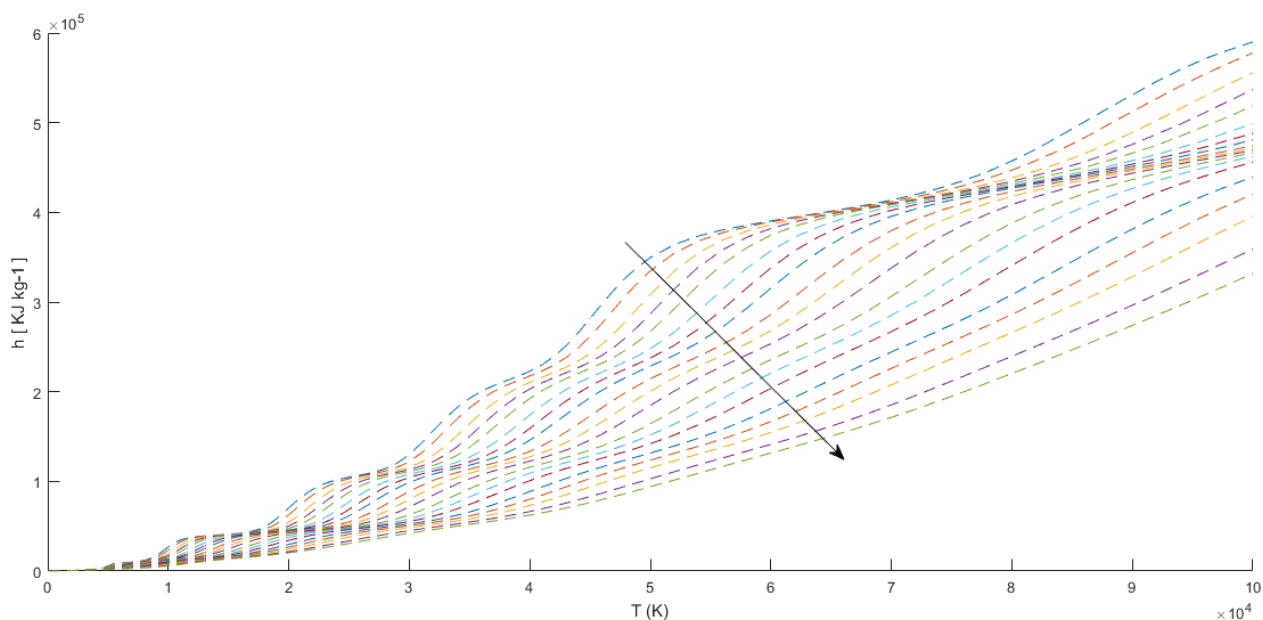


شکل ۴-۳۸- مقایسه آنتالپی پلاسما هوا برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

با توجه به شکل ۴-۴۳- کاهش الکترون پیامد کاهش برخورد ذرات را در پی دارد در نتیجه میزان انرژی تولیدی کاهش می یابد انرژی که از برخورد ذرات به دست می آمد کاهش می یابد و بنابراین آنتالپی سیستم کاهش می یابد. باتوجه به شکل ۴-۴۱- آنتالپی هوا بیشتر از آرگون است این به دلیل ظرفیت گرمایی بیشتر هوا از آرگون هست که در شکل ۴-۲۲- نمایان هست.

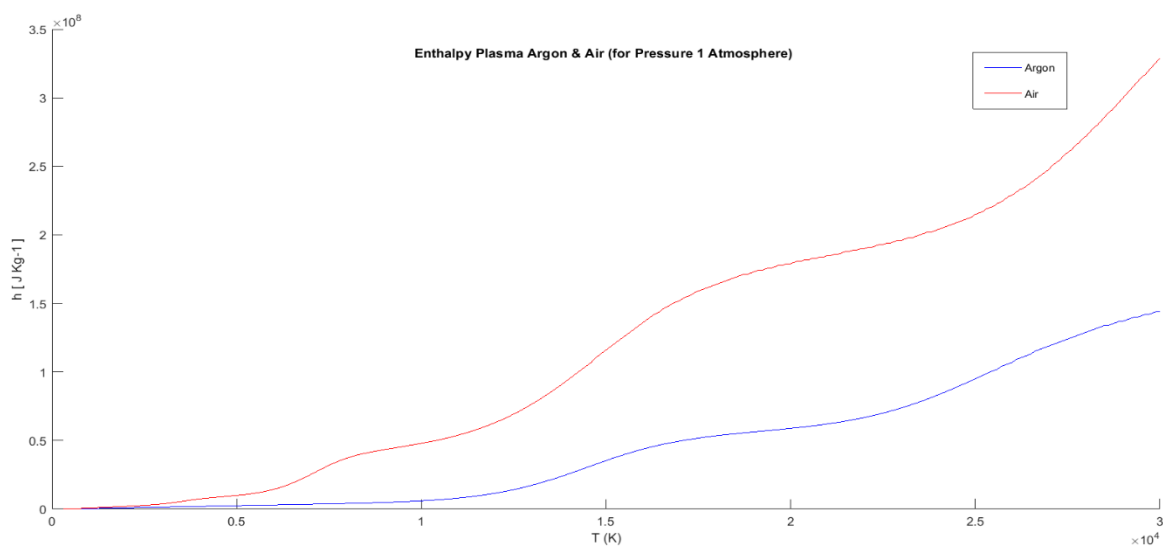


شکل ۴-۳۹- آنتالپی پلاسما هوا با تابع سیگموئید برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

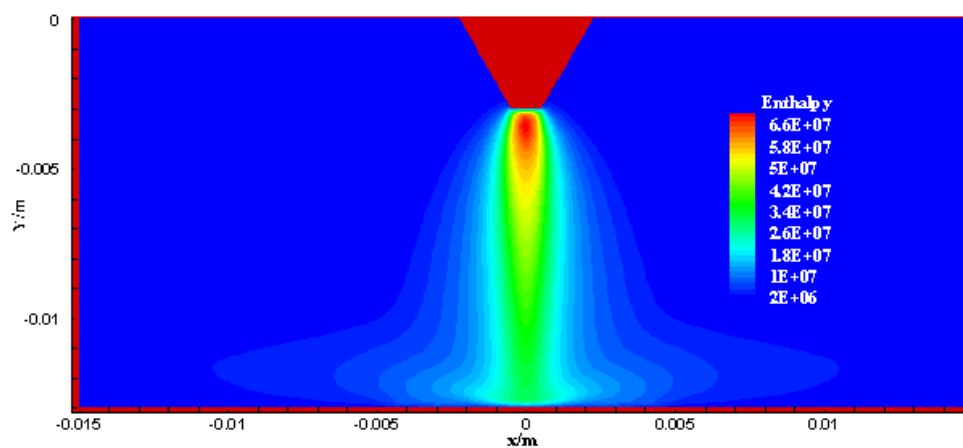


شکل ۴-۴۰- آنتالپی پلاسما هوا با تابع گاوس برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۳-۴

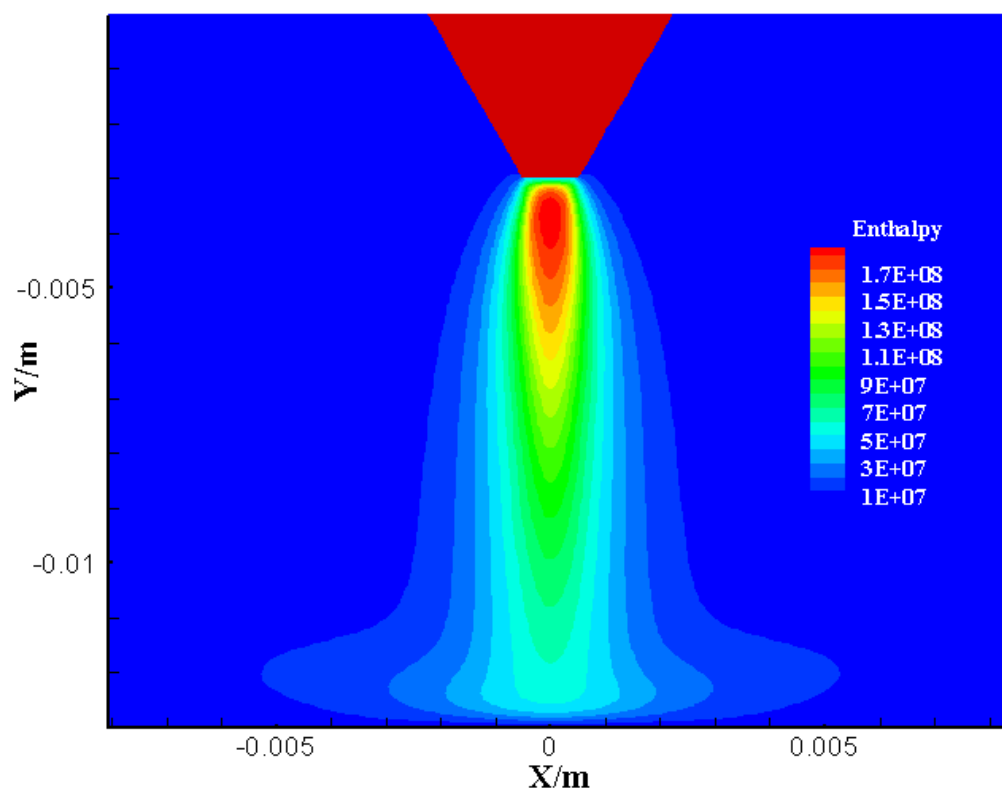
با توجه به شکل ۴-۴۱- انرژی حاصل از برخورد در گاز پلاسما هوا بیشتر از گاز پلاسما آرگون است در نتیجه آنتالپی گاز پلاسما هوا بیشتر از گاز پلاسما آرگون می شود.



شکل ۴-۴۱- نمودار مقایسه آنتالپی پلاسما گاز آرگون، هوا برای فشار اتمسفر



شکل ۴-۴۲- توزیع آنتالپی پلاسما گاز آرگون برای فشار یک اتمسفر



شکل ۴-۴۳- توزیع آنتالپی پلاسما گاز هوا برای فشار یک اتمسفر

۴-۷- کسرهای مولی الکترون^۱

ضرایب تراپردی و عملکردهای ترمودینامیکی مخلوط هوا در یک دما و فشار وسیع یک مشکل پیچیده است، چون توزیع سرعت های انواع ذرات در همه جا ماکسولی فرض می شود و بنابراین می تواند منحصرأ توسط یک دمای T مشخص شود. در پلاسما های داغ برخورد کمتری اتفاق می افتد، می توان برای مدت نسبتاً طولانی، جلوی انحراف از تعادل ترمودینامیکی را گرفت.

با توجه به شکل ۴-۴۴- مقدار کسرهای مولی الکترون ها در دما ها و فشارهای مختلف، متفاوت است هرچه فشار افزایش می یابد میزان کسرهای مولی الکترون کاهش می یابد برای درک بهتر به طور مثال، در تبخیر هرچه فشار بر روی سطح زیاد باشد دمای تبخیر مایع افزایش می یابد برای همین در کمترین فشار هست که خیلی راحت تر می توان گاز را تخلیه کرد که ما با کسرهای مولی الکترون و تاثیر فشار بر ضرایب تراپردی هوا این را نشان دادیم.

کسر مولی هوا برای فشار مختلف مطابق جدول ۴-۲- به صورت زیر به دست آمده است. [۶۵]

$$\chi_e(p, T) = (1 - \sigma_1(T)) \exp \left[\sum_{i=1}^6 \delta_i(p) T^i \right] + a_1 \sigma_1(T) \times \sigma_1(T) \sigma_m(T) + \sigma_1(T) [a_2 \sigma_2(T)] + a_3 \sigma_3(T) - a_4 \gamma_4(T) \quad (4-34)$$

$$\delta_i(p) = \sum_{k=0}^6 \beta_{k,i} [\log(p)]^k \quad (4-35)$$

$$C = \sum_{j=0}^n \alpha_j x^j \quad (4-36) \quad x = \ln(p)$$

تابع گوس

$$\gamma(T; c, \Delta) = e^{-q} \cdot q = \frac{T - c}{\Delta} \quad (4-37)$$

$$\gamma_i(T) = \gamma(T; C_i, \Delta_i) \quad (4-38)$$

تابع سیگموئید

$$\sigma(T; c, \Delta) = \frac{e^q}{e^q + e^{-q}} \cdot q = \frac{T - c}{\Delta} \quad (4-39)$$

$$\sigma_i(T) = \sigma(T; C_i, \Delta_i) \quad (4-40)$$

¹ Molar fraction electron

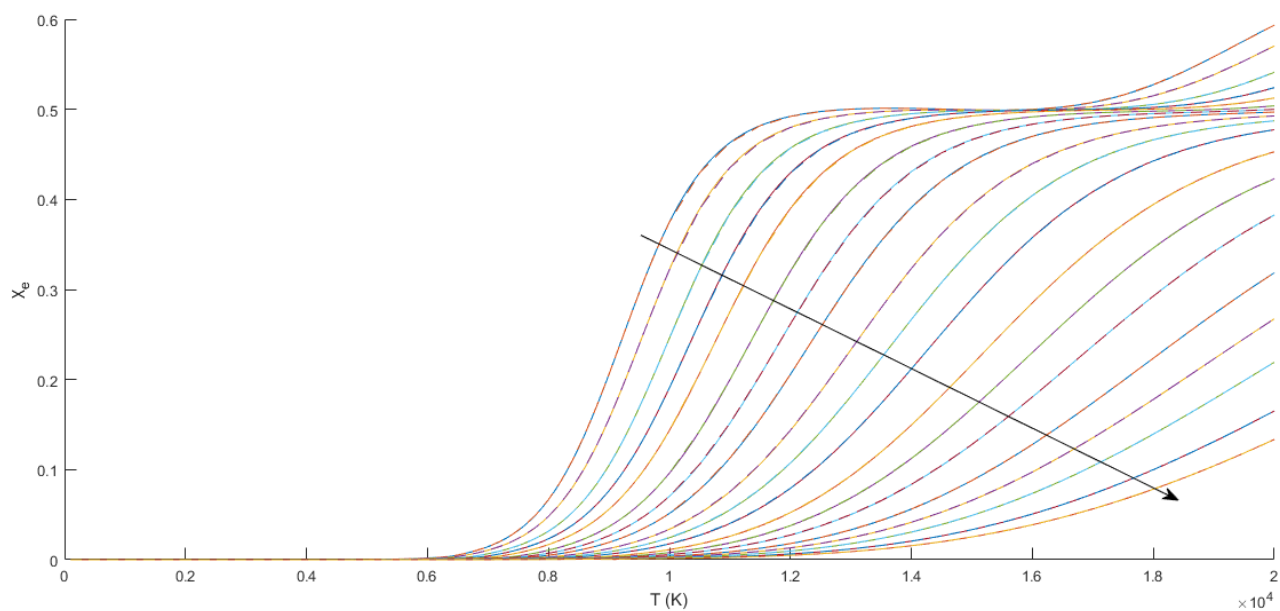
جدول ۴-۴- محاسبه ضریب کسر مولی الکترون $\chi_e(p, T)$ با استفاده از معادله (۴-۳۴) [۶۵]

	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
δ_0	-1.453520×10^{-2}	-2.449447×10^{-3}	-1.115521×10^{-1}	4.115904×10^{-2}	4.116233×10^{-3}
δ_1	1.369547×10^{-1}	2.858663×10^{-3}	3.205470×10^{-5}	-8.338958×10^{-5}	-5.701341×10^{-6}
δ_2	-6.345758×10^{-5}	-1.679107×10^{-6}	4.450866×10^{-8}	4.948604×10^{-8}	2.313164×10^{-9}
δ_3	1.617445×10^{-8}	4.919459×10^{-10}	$-2.922150 \times 10^{-11}$	$-1.375302 \times 10^{-11}$	$-4.284662 \times 10^{-13}$
δ_4	$-2.299085 \times 10^{-12}$	$-7.370074 \times 10^{-14}$	6.536403×10^{-15}	1.931609×10^{-15}	3.938597×10^{-17}
δ_5	1.702203×10^{-16}	5.392941×10^{-18}	$-6.228118 \times 10^{-19}$	$-1.322524 \times 10^{-19}$	$-1.891956 \times 10^{-21}$
δ_6	$-5.100309 \times 10^{-21}$	$-1.529637 \times 10^{-22}$	2.147344×10^{-23}	3.497704×10^{-24}	4.747413×10^{-26}

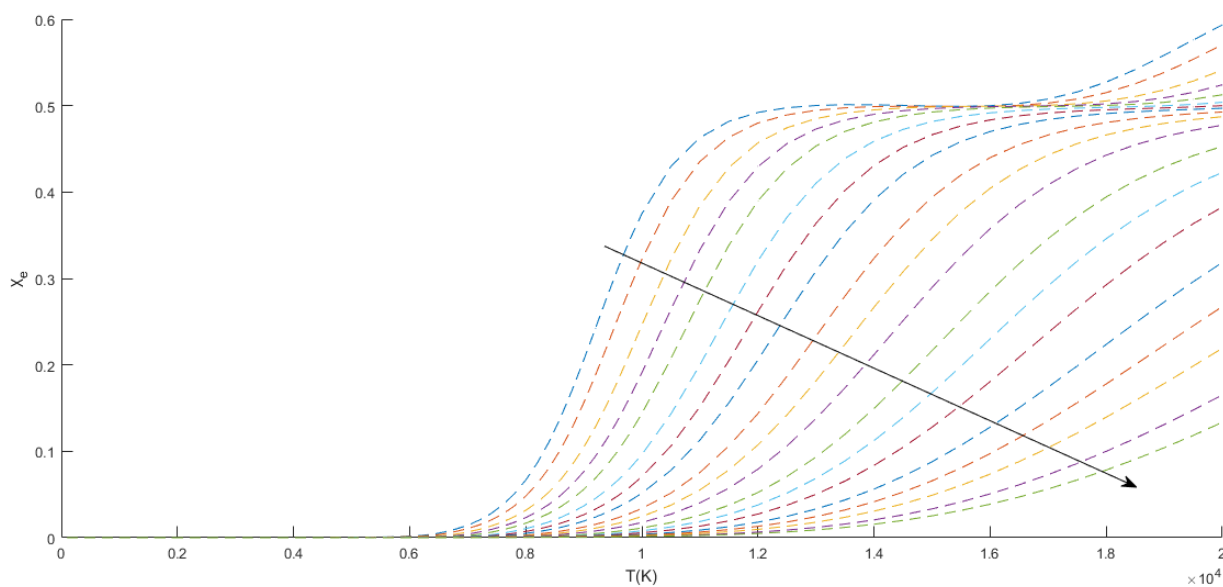
	β_5	β_6
δ_0	-4.844801×10^{-4}	-6.055194×10^{-5}
δ_1	8.585860×10^{-7}	8.583472×10^{-8}
δ_2	$-5.251591 \times 10^{-10}$	$-4.461556 \times 10^{-11}$
δ_3	1.504247×10^{-13}	1.156213×10^{-14}
δ_4	$-2.191122 \times 10^{-17}$	$-1.631548 \times 10^{-18}$
δ_5	1.569686×10^{-21}	1.216511×10^{-22}
δ_6	$-4.388925 \times 10^{-26}$	$-3.786008 \times 10^{-27}$

		α_0	α_1	α_2	α_3
σ_0	C_0 Δ_0	8.047945×10^{-3} 5.000000×10^{-1}	2.117097×10^{-2} 6.863114×10^{-2}	-6.978618×10^{-3}	
σ_1	$\log a_1$	-3.897330×10^{-1}	4.088303×10^{-3}	2.004021×10^{-3}	6.989005×10^{-4}
	$\log C_1$	9.510842×10^{-3}	6.332838×10^{-2}	5.805702×10^{-4}	-6.640588×10^{-5}
	$\log \Delta_1$	7.970326×10^{-3}	1.336309×10^{-1}	3.159430×10^{-3}	3.346003×10^{-4}
σ_m	C_m Δ_m	6.343867×10^{-3} 1.029159×10^{-1}	1.473378×10^{-3} 3.502366×10^{-2}	-2.628976×10^{-1} -1.043994×10^{-2}	2.653667×10^{-2} -7.498040×10^{-4}
σ_2	$\log a_2$	-1.599518×10^{-3}	-3.681243×10^{-2}	-1.499672×10^{-2}	-4.875898×10^{-3}
	$\log C_2$	1.025313×10^{-1}	6.613035×10^{-2}	2.106960×10^{-3}	1.249059×10^{-4}
	$\log \Delta_2$	8.461864×10^{-3}	1.033435×10^{-1}	-6.800325×10^{-3}	-2.171111×10^{-3}
σ_3	$a_3 = a_{3b} - a_2 - a_1$	-3.465436×10^{-1}	-2.831472×10^{-3}	-1.021467×10^{-3}	-7.753035×10^{-5}
	$\log a_{3b}$	1.009244×10^{-1}	5.691765×10^{-2}	2.642057×10^{-3}	3.297719×10^{-5}
	$\log C_3$ $\log \Delta_3$	9.041428×10^{-3}	9.809302×10^{-2}	1.899235×10^{-3}	-1.329754×10^{-4}
γ_4	$\log a_4$	-5.123507×10^{-3}	3.850431×10^{-1}	6.380724×10^{-3}	-1.088865×10^{-2}
	$\log C_4$	9.247533×10^{-3}	1.007851×10^{-1}	-1.058914×10^{-2}	9.089247×10^{-4}
	$\log \Delta_4$	8.132477×10^{-3}	9.307459×10^{-2}	-5.524780×10^{-3}	2.540886×10^{-4}

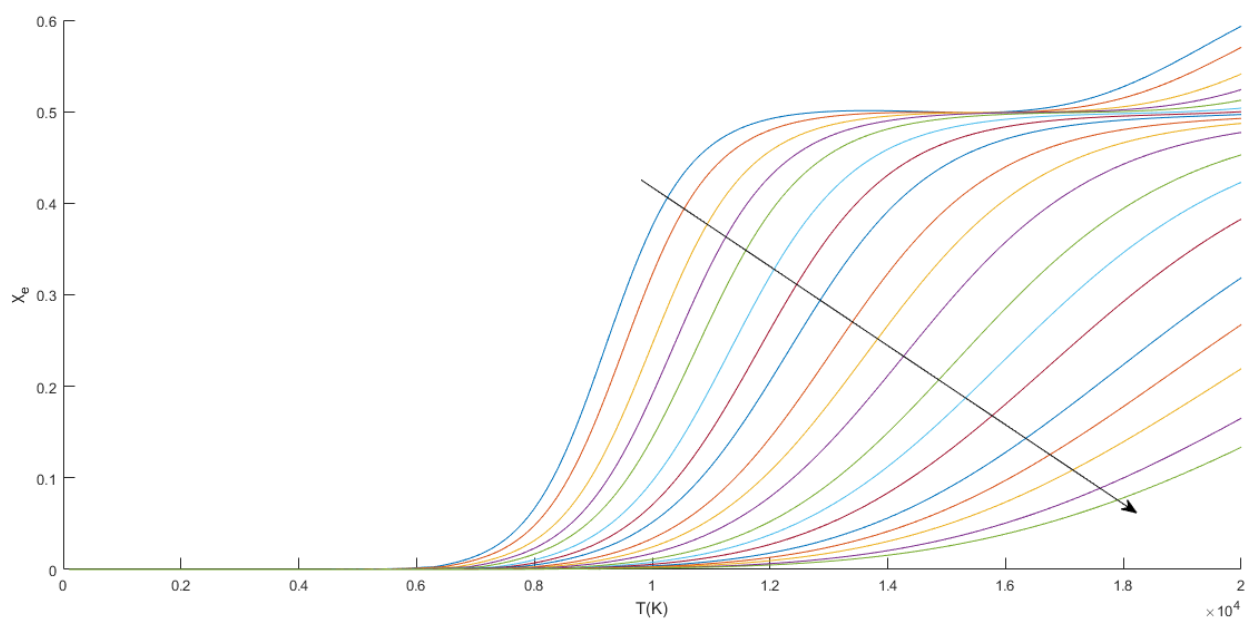
در شکل ۴-۴۴- تابع سیگموئید و گاوس برای محاسبه کسر مولی با هم مقایسه شده اند.



شکل ۴-۴۴- مقایسه کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا کار حاضر برای فشارهای به ترتیب جدول ۴-۳

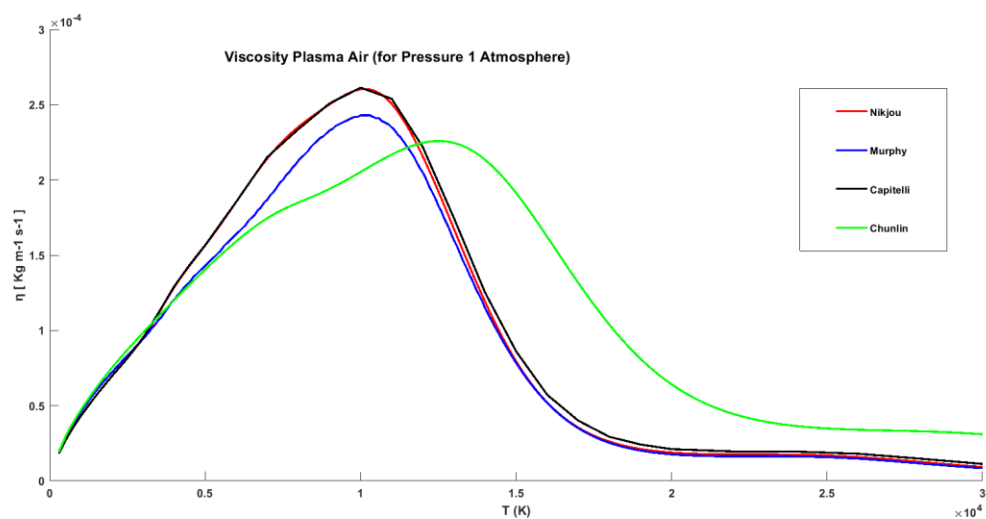


شکل ۴-۴۵- کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا با تابع گاوس کار حاضر برای فشارهای به ترتیب جدول ۴-۳

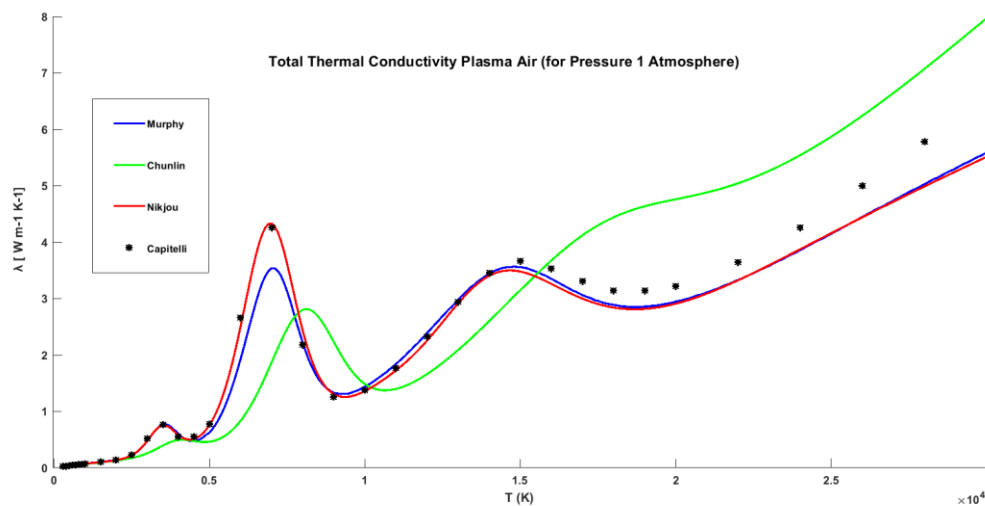


شکل ۴-۴۶- کسرهای مولی الکترون پلاسما هوا با تابع سیگموئید کار حاضر برای فشارهای مختلف به ترتیب جدول ۴-۳

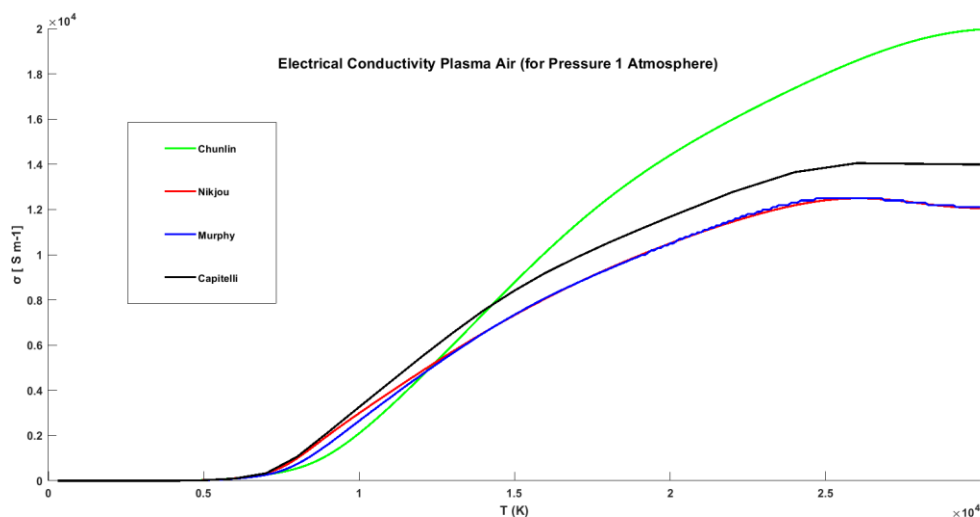
۴-۹ مقایسه ضرایب ترابردی با کار دیگران



شکل ۴-۴۷- مقایسه ویسکوزیته هوا با کار دیگر نویسندگان برای فشار یک اتمسفر



شکل ۴-۴۸- مقایسه هدایت گرمایی کار حاضر با دیگر نویسندگان برای فشار یک اتمسفر



شکل ۴-۴۹- مقایسه هدایت الکتریکی کار حاضر با دیگر نویسندگان برای فشار یک اتمسفر

Chulin و همکاران خصوصیات ترمودینامیکی و ضرایب ترابردی هوای خشک و مرطوب را برای ۳۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ کلوین و در ۰,۱-۱۰۰ اتمسفر محاسبه کرده است که بیش از ۷۰ گونه برای محاسبه دقیق پلاسما هوا در نظر گرفته است. برای تعیین پلاسمای هوا در یک محدوده دمایی متفاوت، از دو روش مختلف، حداقل انرژی آزاد گیبس و روش قانون جرم استفاده می شود. نتایج با یک رویکرد خود سازگار برای خصوصیات ترمودینامیکی تقریب مرتبه بالاتر از روش چاپمن اینسکوگ برای ضرایب ترابردی محاسبه شده است.

فصل پنجم

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پروژه ما به بررسی پلاسما تشکیل شده به صورت سیالی در شرایط تعادل ترمودینامیکی پرداختیم که افرادی مانند پروفیسور پفندر ودکتر اعتمادی و Hsu دانشگاه مینستوتا به صورت تجربی و عددی کارهای خوبی انجام دادن اما با نرم افزارسیالاتی فلوئنت این کار را انجام دادیم و همچنین تمامی خواص فیزیکی (ضرایب تراپردی)، تابش، تابع کار آند، تابع کار کاتد، توان، را به صورت کد اختصاصی (UDF) که با زبان C نوشته و در نرم افزار انسیس فلوئنت فراخوانی شده است

در فصل چهارم نمودارهای دما و سرعت گاز هوا و آرگون با وارد کردن مقادیر دقیق تر ضرایب تراپردی برای فشار اتمسفر و تعادل ترمودینامیکی و اضافه کردن پارامترهای دیگری همچون انرژی و تکانه به معادلات ناویراستوکس نسبت به دیگر نویسندگان دیگر بهتر شده با خطای کمتری به دیگران با کار تجربی Hsu شده است. در واقع به توجه به نمودارهای تابش هوا و آرگون به طور معمول تابش هوا بیشتر نسبت به آرگون دارد. و برای بررسی UV در کار تجربی باید از دستگاه طیف سنجی استفاده شود.

نیروی لورنتس بر ذرات باردار اثر می گذارد تنها به بار بستگی دارد. بنابراین شتاب در هوا نسبت به آرگون بیشتر است و یسکوزیته کمتری در هوا نسبت به آرگون وجود دارد بنابراین سرعت بالاتری شاهد هستیم این شتاب نیروی لورنتس هست به صفحه آند چسبیده شود.

گاز آرگون با داشتن رسانندگی پایین تر و ولتاژ شکست پایین تری نسبت به هوا دارد از آنجا که باید قسمت پلاسما به دلایلی همچون هدایت گرمایی و همرفتی از بین برود اما به دلیل مقاومت گرمایی که حداکثر دما را در پلاسما محدود می کند و به طور معمول گرمترین نقطه زیر نقطه کاتد است.

با توجه به شکل توزیع دمای آند برای هوا و آرگون، پلاسما به آند برخورد می کند و به سمت خارج منحرف می شود و یک لایه دمای متوسط به جز خال آند که در ستون پلاسما قرار دارد در امتداد سطح آند می دهد و گرم تر از خارج پلاسما می باشد. چگالی هوا نسبت به آرگون کمتر است و توزیع دمای هوا کمتر از آرگون می باشد و شکل پلاسما هوا نسبت به پلاسما آرگون جمع تر است

با توجه به کانتور شکل های ۴-۴ و ۴-۱۸ سرعت گاز آرگون و هوا با هم متفاوت است و انتقال حرارت همرفت در نتیجه مشخصات دما باید کاملاً متفاوت باشند. به طور مشابه، تفاوت در رهدایت گرمایی باید در نمودارهای دما قابل مشاهده باشد ولی این طور نیست!! با توجه به، فرمول (۲-۱۳) پارامتر حاکم بر شکل دما عدد پکلت است که نسبت انتقال گرما به رسانایی است. اندازه طول مشخصه عرض پلاسما است. برای گازهای آرگون و هوا یکسان است سرعت مشخصه حداکثر سرعت است نسب عدد پکلت هوا به آرگون این عدد پکلت در حدود ۰,۲ است.

۵-۲- پیشنهادات

- اثرات مستقیم پلاسما بر روی صفحه آند باعث سوختگی یا مذاب و انرژی های که آزاد می شود را در نظر گرفت
- جنس آند و کاتد متفاوتی قرار داد و فاصله های آند و کاتد را تغییر داد.
- برای گاز هوا می توان گاز های تشکیل دهنده هوا را با مولار فرکشن برای شرایط تعادل ترمودینامیکی یا غیر تعادل ترمودینامیکی را در نظر گرفت
- پلاسما را با ضرایب تراپردی در چند فشار که مقادیر یکسانی ندارند می توان محاسبه کرد
- پلاسما را در شرایط غیرتعادل ترمودینامیکی در نظر گرفت
- محاسبه عددی پلاسما به صورت ذره ای بررسی کرد
- می توان پلاسما را در سه بعدی شبیه سازی کرد و میزان زاویه دروانی برای میدان مغناطیس و میدان الکتریکی را در نظر گرفت
- می توان برای جریان های الکتریکی و پروفیل چگالی جریان های مانند ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ را محاسبه کرد.
- برای تشکیل پلاسما از دیگر گازها استفاده کرد یا به صورت ترکیبی از دو یا چند نوع گاز استفاده کرد
- اثراتی که تخلیه الکتریکی بر روی انواع کامپوزیت ها ایجاد می کند را بررسی کرد.
- تخلیه الکتریکی را در شرایط توربالانسی بررسی کرد
- ضرایب تراپردی را در شرایط توربالانسی به دست آورد
- ضرایب تراپردی با فشار و دمای مختلف باهم برای مدل سازی در فلوئنت تعریف کرد.

- [١] G. V. Cooray, *The lightning flash* (no. 34). Iet, 2003
- [٢] Y. Wang and O. Zhupanska, "Lightning strike thermal damage model for glass fiber reinforced polymer matrix composites and its application to wind turbine blades," *Composite Structures*, vol. 132, pp. 1182-1191, 2015.
- [٣] L. Chemartin and B. Peyrou and A. Chazottes and P. Elias "Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints "AerospaceLab, 2012, p. 1-15.
- [٤] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press, 2003
- [٥] L. Tonks and I. Langmuir, "Oscillations in ionized gases," *Physical Review*, vol. 33, p. 195, 1929.
- [٦] Kumar, V., Yokozeki, T., Okada, T., Hirano, Y., Goto, T., Takahashi, T., Ogasawara, T., Effect of through-thickness electrical conductivity of CFRPs on lightning strike Damages, *Composites: Part A* (2018),
- [٧] C. Karch and C. Metzner, "Lightning protection of carbon fibre reinforced plastics an Overview," in *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2016: IEEE, pp. 1-8
- [٨] Juntong Xiang , Fiona F. Chen , Hunkwan Park , Keigo Tanaka , Masaya Shigeta , Manabu Tanaka , Anthony B. Murphy , Numerical study of the Metal vapour transport in tungsten inert gas welding in argon for stainless steel, *Applied Mathematical Modelling* (2019),
- [٩] M. I. Boulos, P. Fauchais, and E. Pfender, *Thermal plasmas: fundamentals and Applications*. Springer Science & Business Media, 2013
- [١٠] M. Benilov, M. Cunha, and G. Naidis, "Modelling interaction of multispecies Plasmas with thermionic cathodes," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 14, no. 3, p. 517, 2005
- [١١] M. Benilov and M. Cunha, "Heating of refractory cathodes by high-pressure arc Plasmas: I," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 35, no. 14, p. 1736, 2002.
- [١٢] K. Hsu, K. Etemadi, and E. Pfender, "Study of the free-burning high-intensity argon Arc," *Journal of applied physics*, vol. 54, no. 3, pp. 1293-1301, 1983.

- [١٣] L. Chemartin, P. Lalande, C. Delalondre, B. Cheron, and F. Lago, "Modelling and Simulation of unsteady dc electric arcs and their interactions with electrodes," *Journal Of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 19, p. 194003, 2011.
- [١٤] M. Tanaka, H. Terasaki, M. Ushio, and J. J. Lowke, "A unified numerical modeling of Stationary tungsten-inert-gas welding process," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 33, no. 7, pp. 2043-2052, 2002
- [١٥] J. Lowke and M. Tanaka, "‘LTE-diffusion approximation’ for arc calculations," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, no. 16, p. 3634, 2006.
- [١٦] M. Khalil, N. Abulfoutouh, G. Abdelal, and A. Murphy, "Numerical Simulation of Lightning Strike Direct Effects on Aircraft Skin Composite Laminate," *World Acad. Sci. Eng. Technol.: Int. J. Architect. Environ. Eng.*, vol. 12, pp. 160-173, 2018.
- [١٧] N. Kamsali, B. Prasad, and J. Datta, "The electrical conductivity as an index of air Pollution in the atmosphere," in *Advanced Air Pollution: IntechOpen*, 2011.
- [١٨] G. F. Abdelal and A. Murphy, "A multi-physics simulation approach for efficient Modeling of lightning strike tests on aircraft structures," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, no. 4, pp. 725-735, 2017
- [١٩] L. Chemartin, P. Lalande, C. Delalondre, B. Cheron, and F. Lago, "Modelling and Simulation of unsteady dc electric arcs and their interactions with electrodes," *Journal Of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 19, p. 194003, 2011.
- [٢٠] L. Chemartin, P. Lalande, E. Montreuil, C. Delalondre, B. Cheron, and F. Lago, "Three Dimensional simulation of a DC free burning arc. Application to lightning physics," *Atmospheric Research*, vol. 91, no. 2-4, pp. 371-380, 2009.
- [٢١] M. Mamunuru, "Simulation of DBD plasma actuators, and nanoparticle-plasma Interactions in argon-hydrogen CCP RF discharges," University of Minnesota, 2014
- [٢٢] J. A. Heinrichs, "Plasma Assisted Combustion and Flameholding in High Speed Cavity Flows," The Ohio State University, 2012.
- [٢٣] A. Starikovskiy and N. Aleksandrov, "Plasma-assisted ignition and combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, pp. 61-110, 2013.
- [٢٤] J. Chen, A. Khrabry, I. D. Kaganovich, A. Khodak, V. Vekselman, H.-P. Li
"Validated two-dimensional modeling of short carbon arcs: anode and cathode spots"
- [٢٥] Juan Pablo Trelles, *Nonequilibrium Phenomena in (Quasi-) thermal Plasma Flows*
- [٢٦] Peng Liang, 2D self-consistent modeling of arc–electrode interaction in GTAW using A finite volume method

- [۲۷] A. J. Shirvan, Modelling of cathode-plasma interaction in short high-intensity electric Arc. Thesis (Ph.D.)—Chalmers University of Technology, 2016.
- [۲۸] Paschen's Law. Merriam-Webster Online Dictionary. Merriam-Webster, Inc.2013. Retrieved April 10, 20113.
- [۲۹] K. T. A. L. Burm, Calculation of the Townsend Discharge Coefficients and the Paschen Curve Coefficients. Contributions to Plasma Physics.2007; 47:177-1
- [۳۰] M. F. Zhukov, I.M. Zasypkin, Thermal Plasma Torches: Design, Characteristics, Application. Cambridge Int. Science Publishing, 2007.
- [۳۱] Weast R. C.: CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, Cleveland, OH, 1975
- [۳۲] Choquet I. and Lucquin-Desreux B.: Hydrodynamic Limit for an arc discharge at Atmospheric pressure, Journal of Statical Physics, Vol. 119, 112, pp. 197-**239**, **2005**
- [۳۳] Delalondre C., Zahrai S. and Simonin O.: Turbulence Modellingin Electric Arc Rapport EDF HE-44/94/020A, 1994
- [۳۴] Baudry C.: Contribution a` la mode´ lisation instationnaire et tridimensionnelle du Comportement dynamique de l' arc dans une torche de projection plasma, Ph. D. Thesis, Universite´ de Limoges, 2003
- [۳۵] M. Capitelli, G. Colonna, C. Gorse, and A. D'Angola Transport properties of high Temperature air in local thermodynamic equilibrium
- [۳۶] V. Colombo, E. Ghedini, P. Sanibondi Thermodynamic and transport properties in Non-equilibrium argon, oxygen and nitrogen thermal plasmas
- [۳۷] Ayoola T. Brimmo, Mohammad A. Qasaimeh, Stagnation point flows in analytical Chemistry and life sciences
- [۳۸] Gleizes A., Gonzalez J.J. and Freton P.: Thermal plasma modeling, J. Phys. D: Appl Phys, 38, pp. 153-183, 2005
- [۳۹] Rat V., Pascal A., Aubreton J., Elchinger M. F., Fauchais, P. and Lefort A.: Transport Properties in a two-temperature plasma: Theory and application, Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics), Vol 64, 2, August 2001
- [۴۰] Rat V., Pascal A., Aubreton J., Elchinger M.F., Fauchais P. and Vacher D.: Transport Coefficients including diffusion in a twotemperature argon plasma Journal of Physics D, 35 pp. 981-991, 2002
- [۴۱] Y Naghizadeh-Kashani, Y Cressault and A Gleizes, Net emission coefficient of air Thermal plasmas 2002

- [٤٢] Gleizes A., Gonzalez J. J., Razafinimanana M. and Robert T.: Influence of radiation On temperature field calculation in SF6 arcs, Plasma Sources Sci. Technol., Vol 1, p. 135, 1992
- [٤٣] Fusheng WANG, Xiangteng MA, Han CHEN and Yao ZHANG Evolution simulation Of lightning discharge based on a magnetohydrodynamics method, 2018
- [٤٤] Heng Guo, Xiao-Ning Zhang, Jian Chen, He-Ping Li & Kostya (Ken) Ostrikov Non-Equilibrium Synergistic effects in atmospheric pressure plasmas
- [٤٥] Boulos MI, Fauchais P, Pfender E (1994) Thermal plasmas: fundamentals and Applications. Plenum, New York
- [٤٦] Mitchner M, Kruger CH (1973) partially ionized gases. Wiley, New York
- [٤٧] Juan Pablo Trelles Nonequilibrium Phenomena in (Quasi-) thermal Plasma Flows
- [٤٨] Li H-P, Zhang X-N, Xia W-D (2013) A numerical model of non-equilibrium thermal Plasmas. II. Governing equations. Phys Plasmas 20:033509
- [٤٩] Rat V, André P, Aubreton J, Elchinger MF, Fauchais P, Lefort A (2001) Transport Properties in a two-temperature plasma: theory and application. Phys Rev E 64:026409
- [٥٠] Trelles JP (2018) Advances and challenges computational fluid dynamics modeling of Atmospheric pressure plasmas. Plasma Sources Sci Technol 27:093001
- [٥١] Nicolis G, Prigogine I (1971) Fluctuations in nonequilibrium systems. Proc Natl Acad Sci USA 68:2102
- [٥٢] Prigogine I (1978) Time, structure, and fluctuations. Science 201(4358):777–785
- [٥٣] R.S. Devoto, Phys. Fluids **10**, 2105 (1967).
- [٥٤] Lyman Spitzer, JR Physics of Fully Ionized Gases 1956
- [٥٥] K. C. Hsu, K. Etemadi, and E. Pfender, Study of the freeburning highintensity argon Arc
- [٥٦] H. A. Dinulescu and E. Pfender, “Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs,” J. Appl. Phys., vol. 51, no. 6, pp. 3149–3157, 1980.
- [٥٧] ARP5416 SAE 2005 Aircraft Lightning Test Methods (Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers)
- [٥٨] ARP5412A SAE 2005 Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms (Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers)
- [٥٩] Youssef Aider, Yeqing Wang, Gasser F. Abdelal, Olesya I. Zhupanska, Modeling of The Electric Arc Plasma Discharge Produced by a Lightning Strike Continuing Current

- [٦٠] Maher I. Boulos, Pierre L. Fauchais, and Emil Pfender Transport Properties of Gases Under Plasma Conditions
- [٦١] S. Chapman and T. G. Cowling, the Mathematical Theory of Non-Uniform Gases Cambridge University Press, Cambridge, 1970
- [٦٢] Ffancis Chen, introduction to plasma physics and controlled fusion
- [٦٣] Fusheng WANG, Xiangteng MA, Han CHEN and Yao ZHANG Evolution simulation Of lightning discharge based on a magnetohydrodynamics method
- [٦٤] A.B. Murphy Transport Coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas
- [٦٥] A. D'Angola, G. Colonna, C. Gorse, and M. Capitelli Thermodynamic properties of High temperature air in local thermodynamic equilibrium: II accurate analytical Expression for electron molar fractions
- [٦٦] <https://www.code-saturne.org/cms/features/modules/electric>
- [٦٧] Shintaro Kamiyama, Yoshiyasu Hirano, Takao Okada, Toshio Ogasawara, Lightning strike damage behavior of carbonfiber reinforced epoxy, bismaleimide, and polyetheretherketone composites
- [٦٨] Y, Wang, A, Youssef A unified plasma-materials finite element model of lightning strike interaction with carbon fiber composite materials, Mississippi State University (2019)
- [٦٩] Yiguang Ju, Plasma Assisted Combustion, Princeton University, 2017. 6. 13
- [70] (Capitelli, Mario, Colonna, Gianpiero, D'Angola, Antonio, 2012)
- [70] M. Capitelli, G. Colonna, Antonio D'Angola, Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics, Springer New York Dordrecht Heidelberg London

Abstract

Current project investigate computational modeling of electric discharge created by collisions of particles (ions, electrons, etc.) induced by air and argon. This self-consistent model has been developed to analyze the physical behaviors of high intensity Free- burning arc at atmospheric pressure. The model can be divided into three regions: (1) the cathode boundary layer region (2) the ionization region (3) the anode boundary layer region. The cathode boundary layer has two subsets, 1) the sheath region and 2) pre-sheath. Thin layer, which is, formed due to the separation of electrons from the surface of the cathode and the ions (positive) formed goes to the cathode. The beginning of the cathode spot resulting from this layer, as well as the pre-sheath layer which is plasma, is in Non-Local Thermodynamic Equilibrium (N-LTE) condition due to the degree of ionization and different temperatures. The boundary layer of the anode is subject to Non-Local Thermodynamic Equilibrium (N-LTE) in the form of dissipative or cinematic effects, and the anode spot is located in the center of the boundary layer of the anode due to the current density and high temperature. The space between the anode and cathode boundary layer is the space with a high degree of ionization. That is the plasma column, which is under the Local Chemical Equilibrium (LCE) conditions of the degree of ionization and is equal to the Saha equation. Because Plasma flame is part recombination. And the plasma column is in a state of thermodynamic equilibrium, the number of collisions of particles with themselves creates different amounts of energy. Due to the fact that plasma is a Newtonian fluid, the collisions of particles have a direct effect on transport coefficients, and the plasma can have different physical properties at different pressures. The effect of pressure can be seen even in molar fractions of electrons that with increasing of different pressures, electrons are separated less from the surface of the layers of atoms at high pressures. Electric discharge simulations are performed by finite volume analysis in ANSYS Fluent. Using User Defined Function (UDF) Air and argon gas transport coefficients have been used to calculate plasma in magneto-hydrodynamic equations (MHD). The Lorentz force which is affected by hydromagnetic waves such as the magnetic wave and the alpha wave is also written by

UDF and considered in the present work. Furthermore, the radiation equation, joule heating and work function is also considered in this work using UDF in our simulation. In modeling done in this work, the stagnation point and the stagnation layer have been seen and we obtained the transport coefficients at different pressures, but for modeling in the present work by Fluent we only defined the transport coefficients for pressure of one atmosphere, up to a temperature of 30,000 Kelvin. Our predictions have been compared with experimental results and other numerical predictions reported by previous authors. The analysis of the results showed that our simulation was able to predict the experimental results very well.

Key words: *thermodynamic equilibrium, non-thermodynamic, kinematic effect*



Shahrood University of Technology
(Physics and Nuclear Engineering Faculty)

M.Sc Thesis

Thesis Title:

**Simulation of spatial distribution of plasma parameters in glow
electric discharge system**

By:

Vahid Nikjou

Adviser:

Dr. Mahdi Momeni

Dr. Azadeh Kebriaee

۲۰۲۱ February