

شبیه سازی عددی جریان سیال در راکتور تخلیه سد دی الکتریک سطحی گاز هلیوم

شاهد عابدی*

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

حسن رحیم زاده

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

پویان طالبی زاده

دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

هدف این پژوهش، شبیه سازی عددی پدیده ی پلاسما ناشی از اعمال میدان الکتریکی بر جریان سیال تراکم ناپذیر در راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک است. برای شبیه سازی این راکتور از روش سیال پلاسما استفاده شده است. گاز هلیوم به عنوان گاز پیش زمینه و از پنج جزء و نه واکنش برای شبیه سازی این گاز استفاده شده است. در این شبیه سازی، معادلات بقا برای جزءها و معادله ی پواسون میدان الکتریکی حل شده و نهایتاً با محاسبه ی چگالی ذرات باردار و همچنین پتانسیل میدان الکتریکی، نیروی الکتروهایدرودینامیک مورد محاسبه قرار گرفته و به معادلات جریان سیال به عنوان نیروی حجمی اعمال شده تا تأثیر پدیده ی پلاسما بر روی سیال مورد بررسی قرار گیرد. حل معادلات منجر به تعیین چگالی جزءهای مختلف گاز هلیوم، میزان مصرف و تولید هر جزء، سرعت انجام واکنش ها و سطح انرژی الکترون ها در فاصله ی بین دو الکتروود شد. نتایج نشان داد که افزایش ولتاژ منجر به افزایش سطح انرژی الکترون ها در سمت الکتروود مثبت شده و در نتیجه نرخ سرعت واکنش ها در سمت این الکتروود بیشتر از الکتروود منفی می شود. **واژه های کلیدی:** تخلیه سد دی الکتریک، روش سیال پلاسما، گاز هلیوم، شبیه سازی عددی.

Numerical Simulation of Fluid Flow in Planer Dielectric Barrier Discharge Reactor for Helium

Sh. Abedi

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

H. Rahimzadeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

P. Talebizadeh

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the effect of plasma induced by electric field over the incompressible fluid in dielectric barrier discharge reactors has been simulated numerically. To simulate dielectric barrier discharge, plasma fluid method is used. Helium is used as the background gas. Five species and nine Reactions for this gas are applied to the model. For these simulations, conservation equations for each species and the Poisson equation for the electric field should be applied. Then, the calculated electro-hydrodynamic force is applied as the body force to the fluid flow equations. This simulation determined the various density species of Helium gas. The results showed that the chemical reactions taken in to account, give lower generation rate for positive charge species. Hence, charge density drops especially in the positive electrode relative to the negative one. Therefore, plasma produced near the negative electrode affects the fluid flow more than the positive one. However, considering charge density generated and arrangement of electrodes, the overall influence on the fluid flow will be little.

Keywords: Dielectric barrier discharge, Plasma fluid method, Helium gas, Numerical simulation.

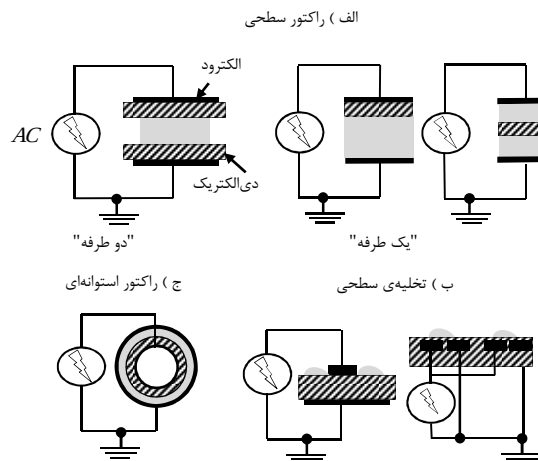
۱- مقدمه

متوسط الکترون در پلاسمای غیر گرمایی در حدود ۱۰۰۰۰ الی ۱۰۰۰۰۰ کلون (۱۰ الی ۱۰۰ الکترون ولت) است. الکترون های پر انرژی نقش مهمی در راه اندازی واکنش های شیمیایی پلاسما ایفا می کنند [۲]. تخلیه سد دی الکتریک از نتایج فناوری تخلیه غیر گرمایی پلاسما است و در این فناوری، با اعمال میدان الکتریکی و با تجزیه ی گاز موجود، فاز پلاسما به صورت مصنوعی ایجاد می شود. در راکتور تخلیه سد دی الکتریک، یک یا هر دو الکتروود با لایه های دی الکتریک پوشیده می شوند و به این ترتیب دی الکتریک از تماس مستقیم گاز و الکتروود جلوگیری می کند. تولید پلاسما با به کارگیری ولتاژ مستقیم روی یکی از الکتروودها امکان پذیر نیست و همواره به یک جریان متناوب نیاز دارد [۱]. آرایش های مختلف الکتروودها در شکل ۱ نشان داده شده است.

راکتور تخلیه سد دی الکتریک می تواند به شکل های مختلفی ایجاد شود. از سال ۱۹۹۱ به بعد ماسین و همکارانش [۳،۲] کمک بزرگی را به درک حالت تابش در تخلیه سد دی الکتریک با فشار اتمسفری نمودند و

پلاسما یا تخلیه گاز اغلب به گاز یونیزه اطلاق می شود که یکی از چهار حالت ماده در کنار جامد، مایع و گاز است. با اعمال میدان الکتریکی با اندازه مناسب به گاز، پلاسما تولید می شود. این میدان الکتریکی منجر به تجزیه ی گاز می شود و در نتیجه برخی اتم ها و مولکول ها به یون های مثبت تبدیل شده و الکترون های آزاد تولید می شوند [۱]. فناوری پلاسما را می توان مطابق با فشار کاری و دمای گاز به سه دسته ی پلاسمای گرمایی، پلاسمای غیر حرارتی و پلاسمای سرد تقسیم کرد. به پلاسمای گرمایی، پلاسمای تعادلی نیز گفته می شود که در آن تمام ذرات در حالت تعادل گرمایی قرار دارند. پلاسمای غیر گرمایی در فشار اتمسفری کار می کند در حالی که پلاسمای سرد در فشار کمتر از ۰/۰۱ اتمسفر کار می کند. ویژگی پلاسمای غیر گرمایی، حالت غیر تعادلی بین الکترون ها و ذرات دیگر است که در این نوع پلاسما الکترون ها به خاطر جرم بسیار کم، نسبت به ذرات دیگر انرژی بسیار بالایی را به دست می آورند. دمای

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sh.abedi_sm@yahoo.com



شکل ۱- آرایش های الکتروود و دی الکتریک راکتور تخلیه سد دی الکتریک

۲- مدل سازی و معادلات حاکم

۲-۱- روش سیال پلاسما

برای شبیه سازی پلاسما در این پژوهش از روش سیال پلاسما استفاده شده است. اولین بار این روش توسط هاگیلار [۱۹] برای شبیه سازی تخلیه درون سلول ها برای فناوری صفحه ای نمایش توسعه یافت. در این روش، کمیت های جزء های تخلیه، در عبارات به صورت میانگین توصیف می شوند. مقادیر هیدرودینامیکی از قبیل چگالی، مومنتوم و انرژی از این کمیت ها هستند. با استفاده از معادله ی بولتزمن، معادلات بقا برای این کمیت ها به دست می آید. امروزه در پژوهش های صورت گرفته در روش سیال پلاسما، توافقی کلی وجود دارد که این روش باید شامل معادلات پیوستگی و انتقال مومنتوم برای الکترون ها و یون ها، معادله ی انتقال انرژی متوسط الکترون و معادله ی پواسون برای تعیین میدان الکتریکی باشد.

در روش سیال پلاسما مقادیر چگالی، مومنتوم و انرژی برای هر جزء محاسبه می شوند و ذرات یا مولکول ها به صورت منفرد ردگیری نمی شوند. این باعث می شود که با روش سیال پلاسما در زمان کمی (حدود چند ساعت) به نتایج قابل اطمینان رسید.

۲-۲- معادلات حاکم در روش سیال پلاسما

معادله ی پیوستگی برای هر جزء i موجود در پلاسما، از معادله بولتزمن به دست می آید که مطابق رابطه ی (۱) است [۱]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_i = S_i \quad (1)$$

در این معادله n_i چگالی جزء i ، Γ_i شار i و S_i عبارت چشمه است که نرخ تغییر چگالی i ناشی از واکنش های شیمیایی را نشان می دهد و به صورت رابطه ی (۲) محاسبه می شود.

$$S_i = \sum_r C_{i,r} R_{i,r} = \sum_r \left[C_{i,r} K_r \prod_j n_j \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲)، r زیرنویس واکنش تولید یا اتلاف i ، $C_{i,r}$ ضریب استوکیومتری i در واکنش r ، $R_{i,r}$ نرخ واکنش، K_r ضریب نرخ واکنش و r زیرنویس i مربوط به جزء های شرکت کننده در واکنش است.

تخلیه گازهای هلیوم و نیتروژن را به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی عددی ارائه کردند. با این کار گام بزرگی برای فهم بنیادی فرآیندهای موجود در حالت تابش برداشته شد. در دو دهه ی اخیر ایجاد پلاسما در فشار اتمسفر به علت عدم نیاز به تجهیزات تولید خلأ و کاربردهای روزافزون در علوم و فناوری مدرن مورد توجه پژوهش های زیادی قرار گرفته است. از این کاربردها می توان به تمیزکننده ی سطوح [۴]، اصلاح سطوح [۵]، رسوب فیلم نازک [۶]، تولید اوزن [۷] و کنترل آلودگی [۸] اشاره کرد. تحقیقات اخیر در زمینه ی توسعه ی جزئیات مدل سازی عددی برای درک بهتر و کنترل بیشتر برای پدیده ی تخلیه گذرای ناپایدار صورت گرفته است. از میان تحقیقات انجام شده می توان به مطالعه برای مدل سازی دوبعدی تخلیه سد دی الکتریک با سه گاز گزنون، نیتروژن و اکسیژن توسط الیاسون و همکارانش [۹] اشاره کرد. بیشتر مطالعات مدل سازی، بر روی گازهای نجیب انجام می گیرد تا تخلیه ی پایدار رخ دهد. در پژوهش های مشابه مطالعات زیادی با عنوان تخلیه سد دی الکتریک هلیوم در شرایط فشار اتمسفری وجود دارد. در این مطالعات اغلب شبیه سازی یک بعدی مورد توجه قرار گرفته تا فیزیک پلاسما شناخته شود و با تغییر پارامتر هایی نظیر فاصله بین دو الکتروود، نوع و فرکانس ولتاژ اعمالی، ترکیب ناخالصی ها و ضریب گسیل ثانویه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۰-۱۲]. از دیگر جنبه های مهم مدل سازی در نظر گرفتن واکنش های شیمیایی پلاسما است. عملکرد شیمیایی پلاسما با در نظر گرفتن مکانیسم واکنش های پیچیده شامل مولکول و یا اتم های نیمه پایدار و ذرات چندگانه یون تغییر می کند و روی یونی زاسیون تأثیر می گذارد. ساده ترین مدل برای رفتار شیمیایی پلاسما در نظر گرفتن دو ذره (الکترون و یون مثبت) است. مدل سازی های زیادی بر این مبنا انجام شده است. از جمله می توان به پژوهش شین و راجا [۱۳] روی گاز هلیوم و همچنین نیشیدا [۱۴] روی گاز نیتروژن اشاره کرد. برای انجام مدل سازی با دقت بیشتر واکنش های شیمیایی پیچیده و ذرات بیشتری از جمله ذرات نیمه پایدار، خنثی، ذرات برانگیخته و یون های مثبت و منفی و .. در نظر گرفته می شود. از جمله ی این کارها می توان به پژوهش های لین و همکارانش [۱۵] و هانگ و همکارانش [۱۶] و همچنین به پژوهش یانگ و همکارانش [۱۷] که به بررسی پلاسمای حاصل از اکسیداسون ترکیباتی از قبیل $C_2H_4/O_2/Ar$ و پژوهش اخیر ناگارجا و همکارانش [۱۸] در مورد احتراق دو مرحله ای هپتان اشاره کرد.

در پژوهش حاضر با شبیه سازی پلاسما در راکتور تخلیه سد دی الکتریک در حالت غیر تعادلی، چگالی گونه های در نظر گرفته شده برای گاز هلیوم و محل تجمع آنها در فاصله ی بین دو الکتروود و همچنین تأثیر پلاسمای ایجاد شده بر اثر میدان الکتریکی بر جریان سیال بررسی شده است. بدین منظور، راکتور دو بعدی در نظر گرفته شده. و گاز هلیوم به عنوان گاز پیش زمینه مورد استفاده قرار گرفته و از پنج جزء و نه واکنش برای شبیه سازی این گاز استفاده شده است. برای شبیه سازی پلاسما، روش سیال پلاسما مورد استفاده قرار گرفته است که در این روش برای بهبود تقریب شار در هر جزء، تأثیر سرعت گاز نیز افزوده شده و به این صورت جملات مربوط به روابط پیوستگی و انرژی برای هر یک از جزء ها با معادلات ناویر استوکس کوپل می شوند.

¹ Thin film deposition

۲-۳- معادلات حاکم بر جریان سیال

برای جریان سیال معادله پیوستگی مطابق رابطه (۱۴) و معادلات اندازه حرکت مطابق رابطه (۱۵) در دو جهت X و Y حل می گردد و با توجه به اینکه در پلاسمای غیر گرمایی، دمای گاز در دمای محیط می ماند بنابراین نیازی به حل معادله انرژی برای سیال نیست. در این روابط ρ و V به ترتیب چگالی و بردار سرعت سیال هستند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (14)$$

معادله اندازه حرکت برای حالت تراکم ناپذیر که به معادله ناویر-استوکس مشهور است، به صورت رابطه (۱۶) بیان می شود.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + F_{EHD} \quad (15)$$

در این رابطه p فشار و μ لزجت دینامیکی سیال هستند و F_{EHD} نیروی حجمی ناشی از پدیده پلازما (بر واحد حجم) است.

۲-۴- شرایط مرزی

برای حل معادلات پیوستگی (۱)، انرژی (۸) و پتانسیل الکتریکی (۱۱) باید شرایط مرزی مناسب اعمال شود. در هندسه بکار گرفته شده برای راکتور تخلیه سد دی الکتریک، شرایط مرزی از قبیل دهانه ورودی و خروجی، سطح الکترود و دی الکتریک وجود دارد. برای دهانه ها، شرایط مرزی همگن نیومن مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین برای مرزهای آزاد $\nabla n_i \cdot e_n = 0$ برای انرژی الکترود $\nabla n_i \cdot e_n = 0$ و برای پتانسیل الکتریکی $\nabla \phi \cdot e_n = 0$ که بردار یکه عمود بر سطح مرز است.

استفاده از شرایط مرزی مناسب برای سطح دی الکتریک، بخش ضروری برای توصیف پدیده پلازما است. در بیشتر پژوهش های انجام شده در این زمینه، از شرایط مرزی استفاده شده که از نظر فیزیکی پدیده پلازما را توصیف نمی کنند [۲۱]. شرایط مرزی رایج شامل $n_i = 0$ یا $\nabla n_i \cdot e_n = 0$ است. این شرایط مرزی برای برخی موارد خاص کاربرد دارد [۲۲] ولی نمی توانند برای حالت عمومی مورد استفاده قرار گیرند. پدیده فیزیکی که روی سطح دی الکتریک رخ می دهد شامل انعکاس، گسیل ثانویه و سرعت حرارتی است. این عبارات درون رابطه شار، برای مرز دی الکتریک تعریف می شوند. در این پژوهش برای اعمال شرایط مرزی از روابط استفاده شده توسط ناگاراچا و همکارانش [۲۰] استفاده شده است که این روابط روی سطح دی الکتریک برای جزءهای الکترود، یون منفی، یون مثبت، جزءهای خنثی و انرژی الکترود به ترتیب مطابق روابط (۱۶) تا (۲۰) هستند.

$$\vec{\Gamma}_e \cdot e_n = \frac{1}{4} n_e \left(\frac{8k_b T_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} - a \sum_k \gamma \vec{\Gamma}_{i+} \cdot e_n + (a-1) \mu_e n_e \vec{E} \quad (16)$$

$$\vec{\Gamma}_{i-} \cdot e_n = \frac{1}{4} n_{i-} \left(\frac{8k_b T_{e-}}{\pi m_{i-}} \right)^{\frac{1}{2}} + (a-1) \mu_{i-} n_{i-} \vec{E} \cdot e_n \quad (17)$$

$$\vec{\Gamma}_{i+} \cdot e_n = \frac{1}{4} n_{i+} \left(\frac{8k_b T_{e+}}{\pi m_{i+}} \right)^{\frac{1}{2}} + a \mu_{i+} n_{i+} \vec{E} \cdot e_n \quad (18)$$

$$\vec{\Gamma}_{uc} \cdot e_n = 0 \quad (19)$$

$$\vec{\Gamma}_e \cdot e_n = -a \left(\frac{5}{2} k_b T_{se} \right) \sum_k \gamma \vec{\Gamma}_{i+} \cdot e_n + \left(\frac{5}{2} k_b T_e \right) \left[\frac{1}{4} n_e \left(\frac{8k_b T_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} + (a-1) \mu_e n_e \vec{E} \cdot e_n \right] \quad (20)$$

در رابطه (۱) برای محاسبه شار از تقریب رانش-انتشار استفاده می شود. با در نظر گرفتن اثرات سرعت سیال محیط، رابطه شار برای الکترودها، جزءهای یون و جزءهای خنثی به ترتیب به صورت روابط (۳)، (۴) و (۵) بدست می آید [۲۰].

$$\vec{\Gamma}_e = -\mu_e n_e \vec{E} - D_e \nabla n_e + n_e \vec{V} \quad (3)$$

$$\vec{\Gamma}_i = \mu_i n_i \vec{E} - D_i \nabla n_i + n_i \vec{V} \quad (4)$$

$$\vec{\Gamma}_{uc} = -D_{uc} \nabla n_{uc} + n_{uc} \vec{V} \quad (5)$$

در روابط بالا $\vec{E}$ میدان الکتریکی، μ_i تحرک پذیری الکتریکی و D_i ضریب انتشار برای جزء i است. ضرایب تحرک پذیری و انتشار، بوسیله برخورد های بین جزءها و گاز پیش زمینه به ترتیب با روابط (۶) و (۷) تعیین می گردند [۱].

$$\mu_i = q_i / m_i v_i \quad (6)$$

$$D_i = k_B T_i / m_i v_i \quad (7)$$

در روابط بالا q_i بار الکتریکی جزء i ، m_i جرم جزء i ، v_i فرکانس برخورد انتقال مومنوم برای جزء i با گاز پیش زمینه، k_B ثابت بولتزمن و T_i دمای جزء i است. فرض می شود که ذرات سنگین در تعادل دمایی با گاز پیش زمینه قرار دارند بنابراین نیازی به حل معادله انرژی برای این ذرات نیست و رابطه انرژی فقط برای الکترودها حل می شود. این معادله برای الکترودها به صورت رابطه (۸) است [۱].

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = S_e \quad (8)$$

در این رابطه n_e چگالی انرژی الکترودها است که به صورت $n_e = n_e \vec{E}$ تعریف می شود و $\vec{E}$ متوسط انرژی الکترودها است که با دمای الکترودها از طریق رابطه $2\vec{E}/3 = k_B T_e$ ارتباط دارد و همچنین Γ_e نشان دهنده شار انرژی الکترودهاست که با رابطه (۹) محاسبه می شود [۲۰].

$$\vec{\Gamma}_e = -\frac{5}{3} \mu_e n_e \vec{E} - \frac{5}{3} D_e \nabla n_e + n_e \vec{V} \quad (9)$$

عبارت چشمه در معادله انرژی از طریق رابطه (۱۰) بدست می آید. قسمت اضافی این عبارت به علت گرمایش اهمی الکترود بوسیله میدان الکتریکی است [۱].

$$S_e = -e \Gamma_e \cdot \vec{E} - n_e \sum_r \vec{E}_r k_r n_r \quad (10)$$

دو عبارت سمت راست به ترتیب بیانگر گرمای ناشی از میدان الکتریکی و اتلاف انرژی الکترود ناشی از برخورد هستند. r بیانگر واکنش هایی است که با برخورد الکترود همراه است، n_r چگالی جزء هدف و $\vec{E}_r$ انرژی آستانه واکنش است.

با استفاده از قانون گاوس، میدان الکتریکی از طریق رابطه (۱۱) به چگالی بار به مرتبط می شود [۱].

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = -\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = \rho_c \quad (11)$$

که در رابطه (۱۱) ϵ ثابت دی الکتریک و ρ_c چگالی بار است. چگالی بار مطابق با رابطه (۱۲) محاسبه می شود [۱].

$$\rho_c = \sum_i q_i n_i \quad (12)$$

نهایتاً نیروی الکترواستاتیکی که به علت میدان الکتریکی و ذرات باردار موجود در سیال به سیال وارد می شود از طریق رابطه (۱۳) محاسبه می شود [۱].

$$\vec{F}_{EHD} = \rho_c \vec{E} = -\nabla \phi \sum_i q_i n_i \quad (13)$$

در روابط بالا در صورتی که $\vec{E} \cdot \vec{e}_n < 0$ باشد $a = 1$ و در غیر این صورت $a = 0$ است. زیرنویس uc ، i_+ و i_- به ترتیب برای جزءهای خشی یون مثبت و منفی، γ ضریب گسیل ثانویه الکترون در برخورد یون ها با سطح دی الکتریک و T_{se} دمای ثانویه الکترون های برگشتی از سطح است که برابر 1ev در نظر گرفته شده است [۲۰].

برای شرایط مرزی سطح الکترودها در معادله پتانسیل الکتریکی (۱۱)، پتانسیل الکترودها دارای توان الکتریکی برابر ولتاژ اعمالی (الکترودها پایینی شکل ۲) اعمال می گردد و این الکترودها مثبت نامیده می شود و برای پتانسیل الکترودها اتصال به زمین (الکترودها بالایی شکل ۲) برابر صفر اعمال می شود و الکترودها منفی نامیده می شود. برای شرایط مرزی سرعت در معادلات ناویر استوکس (۱۵)، در دهانه ورودی و خروجی راکتور شرط نیومن و روی دیوارهها شرط عدم لغزش اعمال شده است.

۳- فرضیات شبیه سازی پلازما

۳-۱- فرضیات

برای شبیه سازی تأثیر پلازما بر جریان سیال، گاز هلیوم به عنوان سیال در نظر گرفته شده است و فرض شده این گاز بین دو الکترودها حضور دارد و ولتاژ در یک نیم سیکل اعمال می گردد. سیال در ابتدا ساکن فرض شده تا با اعمال ولتاژ و شکل گیری پلازما، تغییر ناشی پلازما بر جریان سیال مشخص شود. با اعمال ولتاژ واکنش های شیمیایی انجام می گیرد و منجر به تولید یا مصرف هر یک از جزءها می شود. برای شبیه سازی مناسب گاز هلیوم از پنج جزء He_m^+ ، He_2^+ ، He^+ و He^{2+} استفاده شده است. این پنج جزء واکنش های متفاوتی می توانند باهم داشته باشند که برای ساده سازی از میان آن ها، نه واکنش محتمل انتخاب شده است. همچنین در راکتور تخلیه سرد دی الکتریک پلازما به صورت غیر گرمایی ایجاد می شود و دمای سیال در دمای محیط باقی می ماند و ضمن ثابت ماندن خواص ترموفیزیکی سیال، نیازی به حل کردن معادله انرژی برای سیال نیست.

۳-۲- واکنش های شیمیایی

در بیشتر پژوهش هایی که در این زمینه صورت گرفته از گازهای خالص بدلیل تولید جزءهای کمتر و ساده تر شدن واکنش ها استفاده می شود. همان طور که در بخش قبل ذکر گردید برای شبیه سازی گاز هلیوم از پنج جزء و نه واکنش مرتبط با این اجزا استفاده شده است. افزودن جزءهای دیگر موجب بیشتر شدن واکنش ها و طولانی تر شدن زمان حل عددی می شود و از طرفی موجب دقت بیشتر جواب می گردد. واکنش های مربوط به این پنج جزء به همراه انرژی آستانه و سرعت واکنش در جدول ۱ آورده شده است. مطابق روابط (۳-۵)، برای محاسبه شار برای هر جزء باید ضریب تحرک پذیری و ضریب انتشار هر جزء مشخص باشد. این دو ضریب برای هر یک از جزءهای موجود در گاز هلیوم به صورت جدول ۲ محاسبه می شوند [۱۱].

۳-۳- محاسبه ی جمله ی چشمه

از واکنش های جدول ۱ برای محاسبه ی جمله ی چشمه در معادلات پیوستگی و انرژی الکترون ها استفاده می شود. واکنش های (۱-۵)، با برخورد به الکترون همراه است بنابراین در رابطه ی عبارت چشمه برای معادله ی انرژی الکترون مورد استفاده قرار می گیرند. جمله چشمه ی

جزء های e ، He_m^+ ، He^+ ، He^{2+} و He_2^+ با استفاده از رابطه ی (۲) به ترتیب مطابق روابط (۲۱) تا (۲۵) محاسبه می شوند.

$$S_e = k_2 n_e n_{\text{He}} + k_3 n_e n_{\text{He}_m^+} + k_7 (n_{\text{He}_m^+})^2 - k_6 n_e n_{\text{He}^+} \quad (21)$$

$$S_{\text{He}_m^+} = k_1 n_e n_{\text{He}} - k_3 n_e n_{\text{He}_m^+} - k_4 n_e n_{\text{He}_2^+} + k_6 (n_e)^2 n_{\text{He}^+} - k_7 (n_{\text{He}_m^+})^2 - k_9 n_{\text{He}_m^+} (n_{\text{He}})^2 \quad (22)$$

$$S_{\text{He}^+} = k_2 n_e n_{\text{He}} + k_3 n_e n_{\text{He}_m^+} - k_6 (n_e)^2 n_{\text{He}^+} + k_7 (n_{\text{He}_m^+})^2 - k_8 (n_{\text{He}})^2 n_{\text{He}^+} \quad (23)$$

$$S_{\text{He}_2^+} = k_8 (n_{\text{He}})^2 n_{\text{He}^+} + k_9 n_{\text{He}_m^+} (n_{\text{He}})^2 \quad (24)$$

$$S_{\text{He}_2} = -k_5 n_e n_{\text{He}_2} \quad (25)$$

در روابط فوق برای محاسبه n_{He} از رابطه زیر استفاده می شود.

$$PV = n_{\text{He}} K_b T \quad (26)$$

جدول ۱- واکنش های شیمیایی پلاسمای گاز هلیوم [۲۳]

کانال واکنش	K ثابت نرخ واکنش $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	انرژی (ev)
$e + \text{He} \rightarrow e + \text{He}_m^+$	$\gamma T_e^{-1/2} \exp\left(\frac{-2/29 \times 10^{-5}}{T_e}\right) \times 10^{-16}$	۱۹/۸۲
$e + \text{He} \rightarrow 2e + \text{He}^+$	$\gamma T_e^{-1/2} \exp\left(\frac{-2/85 \times 10^{-5}}{T_e}\right) \times 10^{-18}$	۲۴/۵۸
$e + \text{He}_m^+ \rightarrow 2e + \text{He}^+$	$\gamma T_e^{-1/2} \exp\left(\frac{-2/46 \times 10^{-5}}{T_e}\right) \times 10^{-16}$	۴/۷۸
$e + \text{He}_m^+ \rightarrow e + \text{He}$	$1/0.99 T_e^{-1/2} \times 10^{-17}$	۱۹/۸
$e + \text{He}_2^+ \rightarrow e + 2\text{He}$	$1/2 T_e^{-1/2} \exp\left(\frac{-2/45 \times 10^{-5}}{T_e}\right) \times 10^{-18}$	۱۷/۹
$2e + \text{He}^+ \rightarrow e + \text{He}_m^+$	6×10^{-22}	۴/۷۸
$\text{He}_m^+ + \text{He}_m^+ \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + e$	$2/7 \times 10^{-16}$	۱۵/۸
$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}_2^+$	$1/0 \times 10^{-25}$	۰
$\text{He}_m^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He} + \text{He}_2^+$	$1/3 \times 10^{-25}$	۰

* در این واکنش ها سرعت واکنش برحسب (m6/s) است.

T_e دمای الکترون برحسب کلون است.

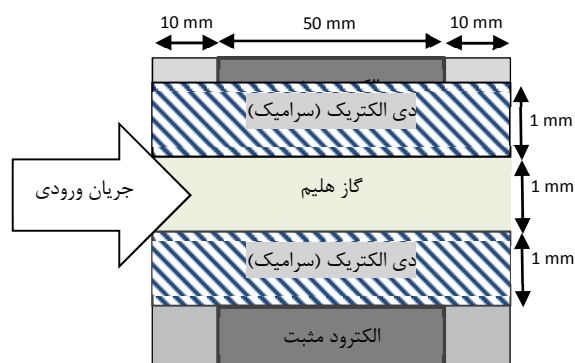
جدول ۲- ضریب تحرک پذیری و ضریب انتشار در گاز زمینه ی

هلیوم [۱۱]

جزء	ضریب تحرک پذیری μ ($\text{m}^2/\text{V.s}$)	ضریب انتشار D (m^2/s)
e	$-0.1132 \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$	$0.1737 \times \left(\frac{T_e}{174.6}\right) \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$
He^+	$1/482 \times 10^{-2} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$	$5/0.26 \times 10^{-5} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$
He_2^+	$2/40.3 \times 10^{-2} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$	$8/148 \times 10^{-5} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$
He_m^+	—	$4/116 \times 10^{-2} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$
He_2	—	$2/0.29 \times 10^{-2} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$
He	—	$1/0.75 \times 10^{-2} \left(\frac{\gamma_e}{P}\right)$

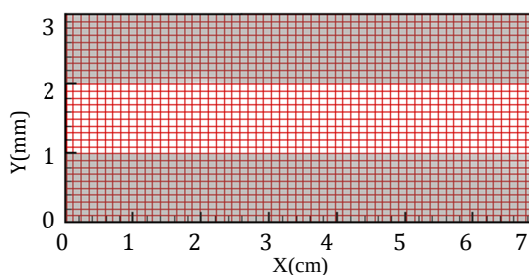
P فشار تخلیه بر حسب تور (Torr) و T_e دمای الکترون بر حسب کلون

است



شکل ۲- ابعاد راکتور تخلیه سد دی الکتریک شبیه سازی شده

برای گسسته سازی معادله پواسون میدانی الکتریکی از روش تفاضل محدود و برای تقریب شار مرزی از روش تفاضل مرکزی استفاده شده است. معادله پواسون روی سطح دی الکتریکها و همچنین در مسیر عبور گاز حل می گردد و شرایط مرزی روی سطح الکترودها کاملاً مشخص است. برای مشخص شدن ناحیه های حل، در شکل ۳ طرحواره از شبکه مورد استفاده برای حل معادله پواسون نشان داده شده است. در شکل ۳ سه ناحیه مشخص است دو ناحیه بالا و پایین مربوط به سطح دی الکتریک است و ناحیه مرکزی مربوط به محل عبور سیال است که در این ناحیه، معادلات ناویر استوکس و همچنین معادلات روش سیال پلاسما حل می گردند. برای انجام حل دستگاه معادلات غیر خطی از روش نیمه ضمنی مورد استفاده توسط مارتین [۱] بهره گرفته شده است که در آن برای حل هر یک از معادلات ذکر شده از الگوریتم ماتریس سه قطری (TDMA) استفاده شده است. به منظور ارضاء روابط ارائه شده برای اجتناب از ناپایداری کوپل معادلات پیوستگی جزءها و پواسون میدانی الکتریکی [۱۵، ۲۰] گام زمانی برابر $1.5e-6$ ثانیه انتخاب گردید.



شکل ۳- ناحیه های محاسباتی و نوع شبکه مورد استفاده

۳-۴- بررسی استقلال حل از شبکه

برای اطمینان از مستقل بودن نتایج از تعداد گره های شبکه، حل برای یک گام زمانی با ولتاژ ۵۰۰ ولت برای تعداد گره های مختلف تکرار شد. حداکثر مقدار مؤلفه های عمودی و افقی سرعت و چگالی جزءهای He^+ و He_2^+ در شکل ۴ رسم شده است. برای سایر متغیرها نیز نتایج مطابق روند شکل ۴ است. تکرار حل برای گام های زمانی دیگر هم نتایج مشابهی را می دهد که از ارائه آنها صرف نظر شده است. نتایج بررسی نشان می دهد که افزایش تعداد گره های شبکه به بیش از ۸۸۲۰۰ (۴۲۰×۲۱۰) تأثیر چندانی در نتایج ندارد و جواب مستقل از شبکه می شود. بنابراین از این تعداد گره برای حل معادلات استفاده شده است.

۴- حل عددی

۴-۱- هندسه راکتور و ناحیه های محاسباتی

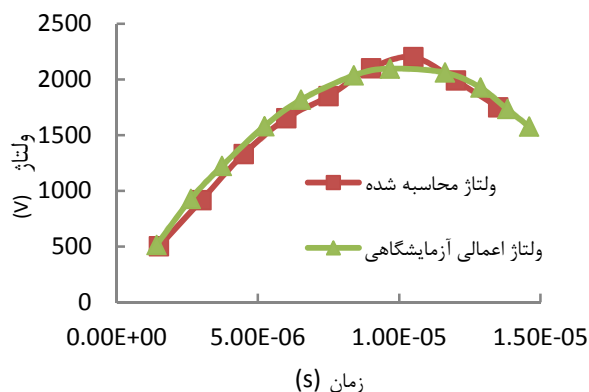
با توجه به نیاز به درستی سنجی نتایج عددی، نتایج باید با یک سیستم آزمایشگاهی موجود، مقایسه شوند. در این پژوهش برای شبیه سازی از هندسه راکتور سطحی مورد استفاده توسط هانگ و همکارانش [۱۶] استفاده شده است. این راکتور تخلیه سد دی الکتریک مطابق شکل ۲ شامل دو الکترود مسی موازی با ابعاد $50 \times 50 \times 8$ میلی متر است. هر کدام از الکترودها توسط یک صفحه سرامیکی به عنوان دی الکتریک پوشیده شده اند. ثابت دی الکتریک نسبی این صفحه ها برابر $11/63$ و دارای ابعاد $70 \times 70 \times 1$ میلی متر هستند. فاصله ی بین دو دی الکتریک ۱ میلی متر است که گاز هلیوم به عنوان گاز مورد استفاده برای تخلیه، از این فاصله عبور می کند.

معادله پواسون میدانی الکتریکی برای سطح دی الکتریکها و محل عبور گاز حل می شود اما معادلات پیوستگی چگالی جزءها و انرژی الکترون و همچنین ناویر استوکس برای حل جریان، فقط در مسیر عبور گاز حل می گردند.

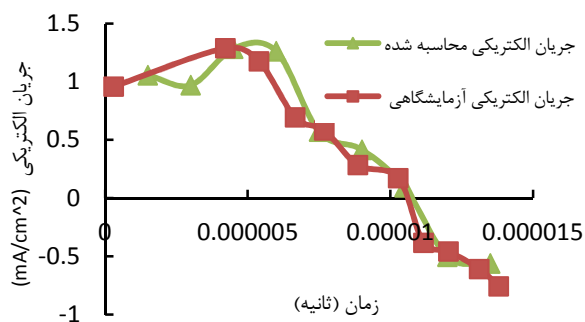
۴-۲- روش حل معادلات

در این شبیه سازی روند انجام حل عددی به این صورت است که در شروع برای چگالی هر یک از جزءها و همچنین دمای الکترون ها مقدار اولیه اعمال می گردد سپس در هر گام زمانی ابتدا از طریق روابط جدول های (۱) و (۲) ثابت نرخ واکنشها و ضرایب انتقال محاسبه می شوند و سپس معادله پواسون میدانی الکتریکی (رابطه ی ۱۱) حل می گردد و در ادامه برای هر یک از جزءها معادله پیوستگی (رابطه ی ۱) و معادله انرژی برای الکترون ها (رابطه ۸) حل شده و نهایتاً نیروی الکترویهیدرودینامیک از طریق رابطه ی (۱۳) محاسبه می شود و با اعمال در معادلات ناویر استوکس سرعت جریان محاسبه می شود و این روند تا رسیدن به همگرایی تکرار می شود.

با توجه به فیزیک مسئله، شکل هندسی راکتور، دو بعدی در نظر گرفته شده و معادلات در مختصات دکارتی تجزیه شده اند و برای ناحیه های حل از شبکه مستطیلی و یکنواخت استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات ناویر استوکس، از روش حجم محدود استفاده شده است که در آن از روش قانون توانی برای تقریب شار روی مرز سلول، و نیز روش SIMPLE برای حل همزمان معادلات پیوستگی و مومنتم مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه شرط مرزی فشار برای دهانه ورودی و خروجی و روی سطح دی الکتریک وجود ندارد از شبکه جابه جا شده برای حل معادلات ناویر استوکس در مسیر عبور گاز استفاده شده است. همچنین معادلات روش سیال پلاسما (معادلات بقا جرم و انرژی برای هر یک از جزءها) با استفاده از روش تفاضل محدود گسسته شده اند که در آن برای تقریب شار از روش نمایی اسپارفرتر-گومل [۲۴] بهره گرفته شده است. با توجه به اینکه چگالی هر یک از جزءها روی سطح دی الکتریک موجود نیست و عبارت شار مرزی برای هر جزء روی سطح دی الکتریک مشخص است از شبکه نیمه جابه جا شده در جهت عمودی برای حل معادلات بقا جرم جزءها و معادله انرژی الکترون ها استفاده شده است.



شکل ۵ - مقایسه‌ی ولتاژ اعمال شده آزمایشگاهی [۱۶] با ولتاژ محاسبه شده



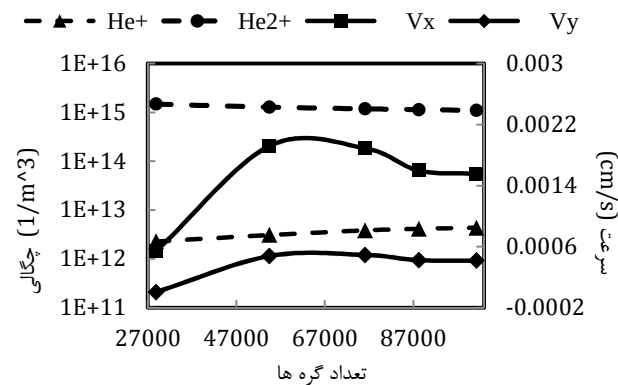
شکل ۶ - مقایسه‌ی جریان اندازه گیری شده‌ی آزمایشگاهی [۱۶] با جریان محاسبه شده

۵- نتایج حل عددی و تحلیل داده ها

هدف اصلی این پژوهش محاسبه‌ی نیروی الکترومغناطیسی است که مطابق رابطه‌ی (۱۳) به چگالی ذرات باردار وابسته است. چگالی ذرات طبق رابطه (۱) به عواملی از قبیل ضریب واکنش شیمیایی، سطح انرژی الکترون، ولتاژ اعمالی، فشار و ... وابسته است. برای بررسی تأثیر این عوامل، ولتاژ دو سر الکتروود مطابق شکل ۵ اعمال شده و در واقع در یک بازه زمانی که ولتاژ از حداقل به حداکثر مقدار خود می‌رسد تغییرات پارامترهای مختلف در مرکز راکتور و در حد فاصله بین دو الکتروود مورد بررسی قرار می‌گیرد و نهایتاً سرعت القا شده به جریان سیال که ناشی از شکل گیری پلاسما است، محاسبه می‌شود. در بخش‌های بعدی تأثیر پارامترهای مختلف به صورت مفصل مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱- تغییرات چگالی و دمای الکترون با گذر زمان

در این قسمت تغییرات چگالی جزءهای موجود برای گاز هلیوم و همچنین دمای الکترون بررسی می‌شود. برای اختصار این نتایج فقط در مقطع مرکزی راکتور و در فاصله‌ی بین دو الکتروود گزارش می‌شود. مطابق شکل ۷ دمای الکترون‌ها در سمت الکتروود مثبت با افزایش ولتاژ مثبت افزایش می‌یابد و در سمت الکتروود منفی دمای الکترون‌ها کاهش پیدا می‌کند. افزایش دمای الکترون‌ها در سمت الکتروود مثبت می‌تواند منجر به افزایش ضریب نرخ واکنش‌ها و در نتیجه افزایش نرخ تولید جزء‌ها در نزدیکی الکتروود مثبت گردد که در بخش بعد مورد بررسی قرار گرفته است.



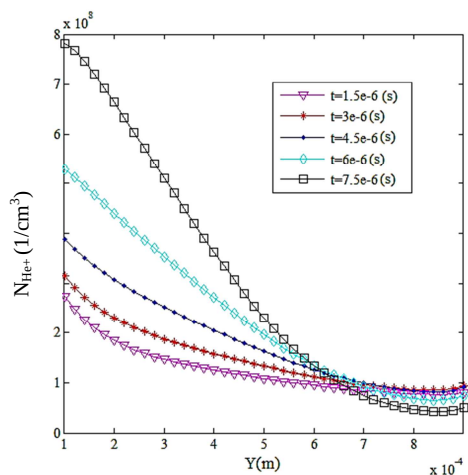
شکل ۴ - بررسی استقلال حل از شبکه

۴-۴- اعتبار سنجی حل عددی

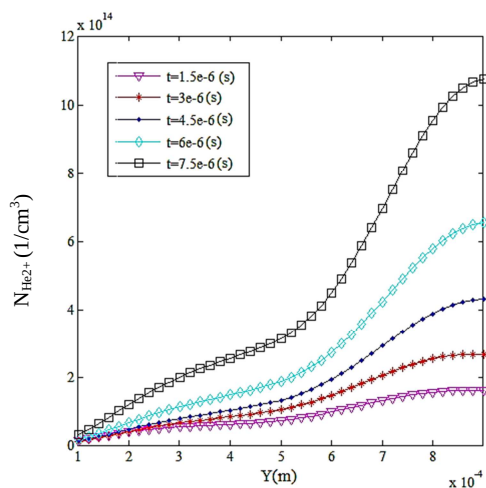
با توجه به اینکه روش‌های بر پایه پلاسما پیچیدگی‌های زیادی دارند و نتایج حاصل از روش به عوامل زیادی وابسته است، لذا مقایسه‌ی نتایج با پژوهش‌های دیگر بسیار مشکل است زیرا عوامل مختلفی در نتایج دخیل‌اند و در پژوهش‌های مختلف متغیرهای متفاوتی در نظر گرفته شده است. از عوامل مؤثر در نتایج آزمایشگاهی می‌توان به ابعاد هندسی راکتور تخلیه‌ی سد دی الکتریک، جنس دی الکتریک، نوع ولتاژ اعمالی، حداکثر ولتاژ، فرکانس و از همه مهم‌تر به گاز مورد استفاده در راکتور اشاره کرد. از عوامل دیگری که در نتایج عددی حل معادلات بسیار مؤثر است تقریب استفاده شده برای گاز است. برای شبیه سازی گاز مورد استفاده، امکان در نظر گرفتن تمام جزءهای موجود وجود ندارد زیرا تعداد واکنش‌های احتمالی بین ذرات بسیار افزایش می‌یابد. همچنین در نظر گرفتن تمام واکنش‌ها حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. به همین دلیل بسیاری از محققین در این زمینه نتایج خود را با نتایج سایر پژوهش‌ها مقایسه نکرده‌اند و صرفاً با ارائه‌ی فرضیات، نتایج خود را منتشر کرده‌اند.

حل معادلات بقا برای جزء‌ها منجر به محاسبه‌ی چگالی هر جزء می‌شود. اندازه گیری این جزء‌ها در ابعاد به کار گرفته شده از نظر آزمایشگاهی امکان پذیر نیست برای اعتبارسنجی ولتاژ اعمالی و جریان الکتریکی اندازه گیری شده از راکتور تخلیه‌ی سد دی الکتریک با ولتاژ و جریان الکتریکی محاسبه شده از طریق حل میدان پتانسیل مقایسه می‌شود.

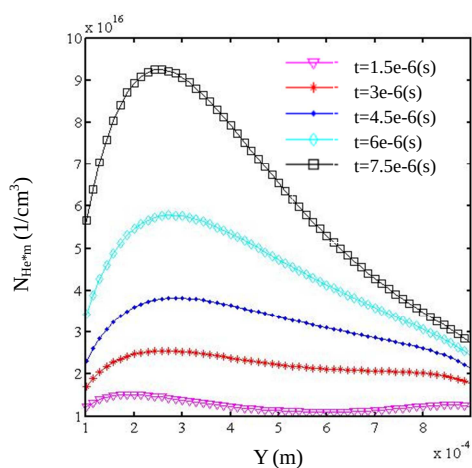
در شکل ۵ ولتاژ به دست آمده از میدان پتانسیل الکتریکی محاسبه شده با ولتاژ تجربی اعمالی [۱۶] مقایسه شده است که نتایج نشان‌دهنده‌ی تطبیق مناسب میدان پتانسیل الکتریکی با نتایج تجربی است. مقداری اختلاف بخصوص در اوج ولتاژ مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از فرضیاتی باشد که برای مدل سازی اتخاذ شده است. در مرجع [۱۶] مقدار تجربی ولتاژ برحسب زمان در یک سیکل کامل اندازه گیری شده که در اینجا با توجه به زمان طولانی حل عددی فقط به یک نیم سیکل اکتفا شده است. همچنین جریان الکتریکی اعمال شده‌ی آزمایشگاهی مرجع [۱۶] در همان بازه، با جریان حاصل از شار ذرات باردار و جریان جابه‌جایی در شکل ۶ مقایسه شده است. مطابق شکل ۶ جریان محاسبه شده به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارد.



شکل ۹- تغییرات چگالی He^+ با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

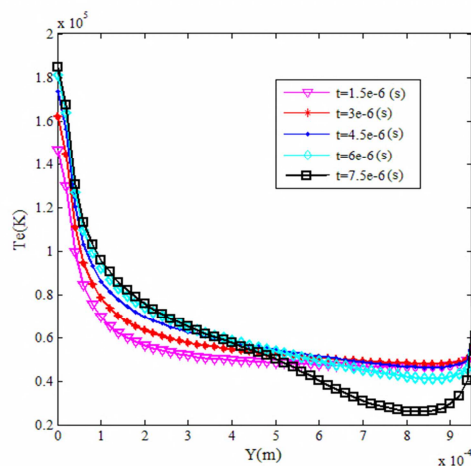


شکل ۱۰- تغییرات چگالی He^{2+} با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

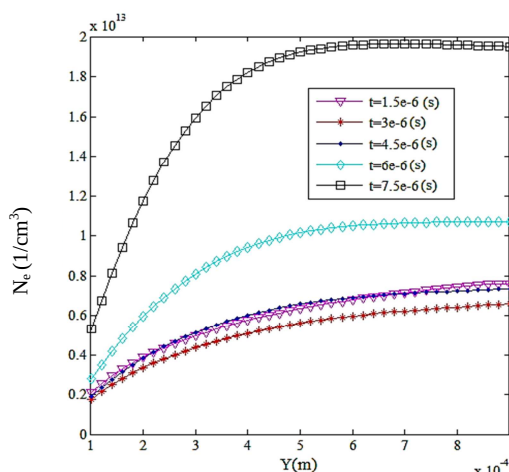


شکل ۱۱- تغییرات چگالی He_m^* با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

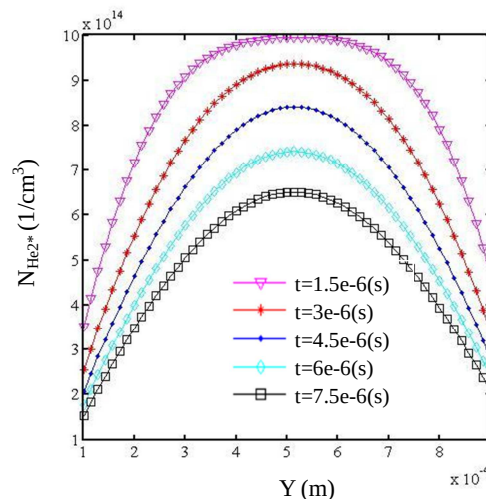
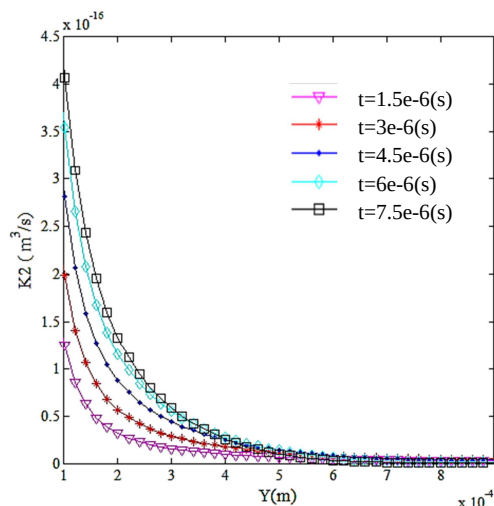
نتایج چگالی جزءها حاکی از آن است که افزایش ولتاژ موجب افزایش نرخ تولید تمام جزءها به استثنای He_2^+ شده و در نتیجه چگالی این جزءها در ولتاژ حداکثر به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. چگالی جزءهای مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۲ رسم شده است. با توجه به مقدار نرخ واکنش‌های مؤثر در الکترون، نرخ تولید الکترون بسیار بیشتر از نرخ مصرف آن است. بنابراین افزایش ولتاژ و به طبع آن افزایش ثابت نرخ واکنش‌ها مطابق شکل ۸ منجر به افزایش چگالی الکترون می‌شود. به طور مشابه با توجه واکنش‌های مؤثر در هر یک از جزءها، وابستگی دمای الکترون به نرخ تولید جزءهای دیگر به صورت $\text{He}_m^* < \text{He}^+ < \text{He}_2^+$ است. افزایش ولتاژ و به طبع آن تغییر در دمای الکترون‌ها منجر به تغییر چگالی جزءها می‌شود که این تغییر با توجه به مقدار وابستگی جزء مورد نظر به واکنش‌هایی است که به دمای الکترون‌ها وابسته‌اند. بنابراین مطابق شکل‌های ۹ تا ۱۱ تأثیر ولتاژ به روی چگالی جزءهای مختلف نیز به صورت $\text{He}_m^* < \text{He}^+ < \text{He}_2^+$ است. طبق رابطه‌ی (۲۵) نرخ تولید He_2^+ به قرینه‌ی ثابت واکنش ۵ وابسته است و به عبارتی افزایش ولتاژ منجر به کاهش نرخ تولید He_2^+ می‌شود که این موضوع در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲- تغییرات دمای الکترون‌ها با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور



شکل ۱۳- تغییرات چگالی الکترون‌ها با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

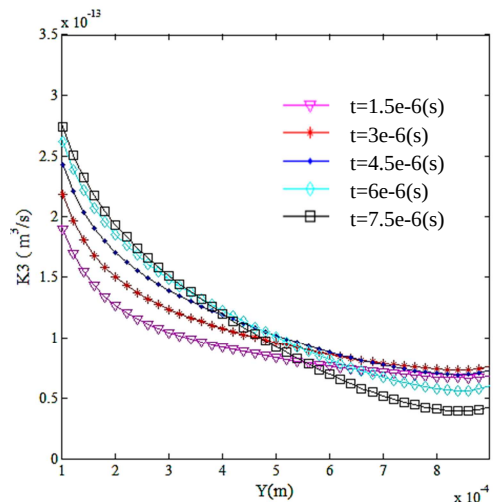


شکل ۱۲- تغییرات ثابت نرخ واکنش دوم با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

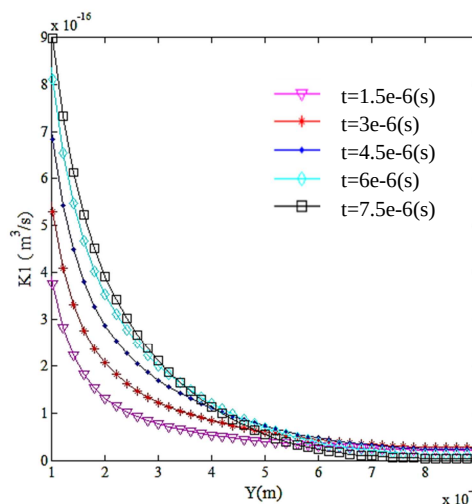
شکل ۱۳- تغییرات چگالی He_2^* با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

۵-۲- تغییرات ثابت نرخ واکنش‌ها با گذر زمان

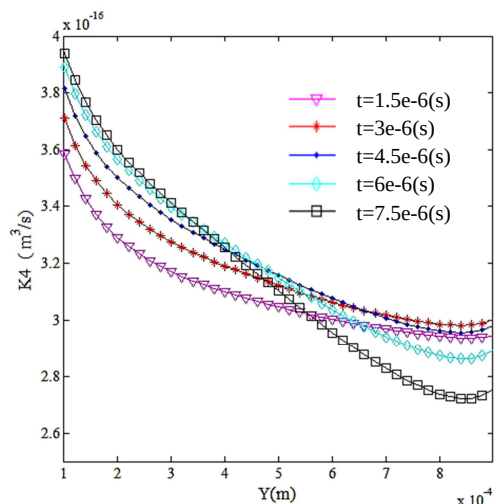
در این بخش تغییرات ثابت نرخ واکنش‌ها نسبت به زمان بررسی می‌شود. طبق جدول ۲ ثابت نرخ واکنش‌های ۱ تا ۵ به دمای الکترون وابسته‌اند و طبق شکل ۵ با تغییر زمان مقدار ولتاژ اعمالی به دو سر الکترود تغییر می‌کند و در نتیجه دمای الکترون‌ها متأثر می‌شود. با گذر زمان مقدار ولتاژ به مقدار حداکثر خود می‌رسد و بنابراین انتظار می‌رود که با پیشروی زمان مقدار ثابت نرخ واکنش‌ها در نزدیکی الکترود مثبت بیشتر شود که نتایج مطابق شکل‌های ۱۳-۱۷ تایید کننده‌ی این موضوع است.



شکل ۱۴- تغییرات ثابت نرخ واکنش سوم با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور



شکل ۱۵- تغییرات ثابت نرخ واکنش اول با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور



شکل ۱۶- تغییرات ثابت نرخ واکنش چهارم با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور

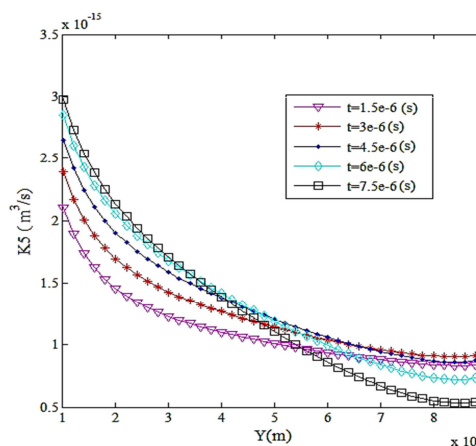
الکتریکی نیستند. در واقع حل معادلات بقا برای این جزءها در به دست آوردن نرخ واکنش و سایر متغیرهای دیگر لازم است اما در محاسبه ی مقدار نیروی الکتروهایدرودینامیک تأثیری ندارند. بنابراین چگالی جزءهای He^+ ، He^{2+} و الکترون ها نقش اساسی در مقدار نیروی الکتروهایدرودینامیک دارند.

با توجه به واکنش های در نظر گرفته شده برای He^+ مشاهده می شود که بخش قابل توجهی از He^+ تولید شده در واکنش های دیگر شرکت می کند و از بین می رود اما He^{2+} در هیچ واکنشی به عنوان واکنش دهنده حضور ندارد و انتظار می رود دارای چگالی بیشتری نسبت به He^+ و الکترون ها باشد. با توجه به جزءها و واکنش های در نظر گرفته شده میزان تولید ذرات باردار به مراتب پایین تر از تولید ذرات خنثی و نیمه پایدار است. در شکل ۱۹ در حالت حداکثر ولتاژ اعمال شده، چگالی جزءهای مختلف مقایسه شده اند که به وضوح مشخص است که ذرات باردار به مراتب چگالی کمتری دارند. بنابراین مقدار نیروی الکتروهایدرودینامیک تولید شده بسیار ناچیز خواهد بود و به طبع آن تأثیر جزئی به جریان سیال خواهد گذاشت.

در شکل ۲۰ تأثیر پلاسمای ایجاد شده بر روی سیال با استفاده از پروفیل سرعت در راستای افقی و عمودی در مرکز راکتور برای حالت حداکثر چگالی به وجود آمده، نشان داده شده است. با توجه به اینکه در سمت الکتروود مثبت ضریب سرعت واکنش ها که متأثر از دمای الکترون ها هستند بیشتر از سمت الکتروود منفی است چگالی بار کلی در سمت الکتروود منفی بیشتر و به طبع آن نیروی الکتروهایدرودینامیک بیشتر شده و در سمت این الکتروود سیال تأثیر بیشتری گرفته است اما از مقدار عددی سرعت القا شده مشخص است که پلاسمای تأثیر قابل توجهی روی سرعت جریان نداشته است.

۶- نتیجه گیری

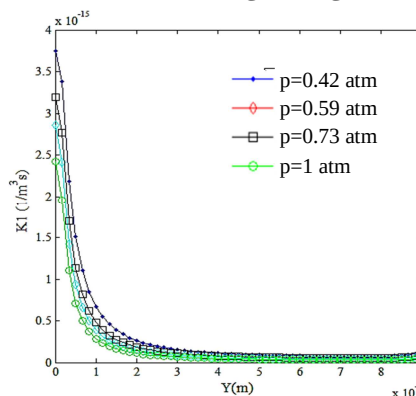
هدف اصلی این پژوهش شبیه سازی عددی تأثیر پدیده ی پلاسمای ناشی از اعمال میدان الکتریکی به جریان سیال تراکم ناپذیر در راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک بود. برای این منظور، از انواع هندسه های موجود برای شبیه سازی، تخلیه سد دی الکتریک سطحی انتخاب گردید. برای شبیه سازی راکتور تخلیه سد دی الکتریک سطحی از روش سیال پلاسمای که روشی کلی برای انواع هندسه های مختلف است استفاده گردید تا ضمن شبیه سازی راکتور حاضر بتوان کد نوشته شده را برای هندسه های دیگر تعمیم داد. برای شبیه سازی سیال این راکتور، از گاز هلیوم و با در نظر گرفتن پنج جزء و نه واکنش استفاده گردید. نهایتاً با حل معادلات پیوستگی برای هر جزء و معادله ی انرژی برای الکترون و معادله پواسون میدان الکتریکی نیروی الکتروهایدرودینامیک محاسبه گردید و به معادلات حاکم بر سیال اعمال شد. تأثیر فشار کاری و همچنین ولتاژ اعمالی متغیر با زمان بر روی پارامترهای مختلف از قبیل ثابت نرخ واکنش، چگالی اجزا و نرخ تولید جزءها مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی واکنش های در نظر گرفته شده و تعداد ذرات موجود مشاهده شد که نسبت ذرات باردار به ذرات خنثی بسیار ناچیز است و بیشتر ذرات باردار تولید شده، توسط واکنش هایی که مصرف می شوند از بین می روند. بنابراین مقدار نیروی الکتروهایدرودینامیک در این راکتور بسیار ناچیز می شود و تأثیر چندانی روی جریان سیال نمی گذارد.



شکل ۱۷- تغییرات ثابت نرخ واکنش پنجم با گذر زمان و افزایش ولتاژ اعمالی در فاصله ی بین دو الکتروود در مرکز راکتور

۵-۳- تأثیر فشار بر ثابت نرخ واکنش ها

تغییرات فشار کاری موجب تغییر در ضرایب تحرک پذیری و انتشار شار جزءها می شود. در فشارهای کمتر از فشار اتمسفر کاهش فشار موجب افزایش ضرایب تحرک پذیری و ضریب انتشار یون های مثبت می شود [۱۱]. تأثیر فشار بر روی واکنش های مختلف متفاوت است. در محدود فشار یک اتمسفر برای واکنش های برخورد الکترون، فشار بر روی نرخ واکنش تأثیر ناچیزی دارد [۱]. در شکل ۱۸ برای واکنش برخورد الکترون تأثیر فشار بررسی شده که نشان دهنده تغییرات جزئی ثابت نرخ واکنش است و با کاهش فشار (در فشارهای کمتر از فشار اتمسفر) مقدار ثابت نرخ واکنش ها کمی بیشتر می شود.

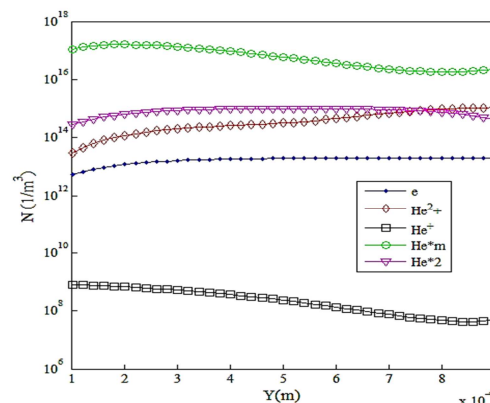


شکل ۱۸- تأثیر فشار روی ثابت نرخ واکنش اول در فاصله ی بین دو الکتروود در مرکز راکتور

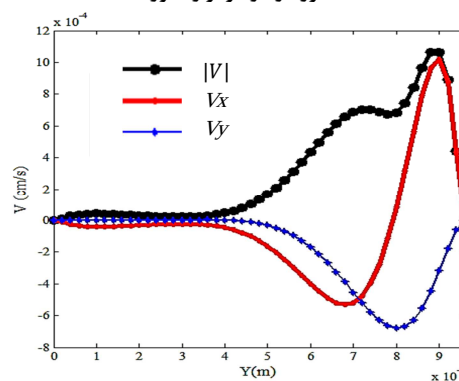
۵-۴- تأثیر پلاسمای بر جریان سیال

در این قسمت تأثیر پلاسمای ایجاد شده درون راکتور به روی جریان سیال بررسی می شود. همان طور که در بخش های قبلی ذکر شد، تأثیر پلاسمای بر جریان سیال از طریق نیروی الکتروهایدرودینامیک ایجاد شده توسط پلاسماست که به صورت نیروی حجمی به معادلات حاکم بر جریان سیال اعمال می شود. نیروی الکتروهایدرودینامیک ناشی از حرکت ذرات باردار در میدان الکتریکی است. بنابراین ذرات خنثی در مقدار این نیرو تأثیری ندارند. جزءهای He_m^+ و He_2^+ ، حالت های نیمه پایدار هلیوم هستند و هنوز الکترون خود را از دست نداده اند و دارای بار

- [8] Okubo M., Yoshida K., and Yamamoto T., Numerical and experimental analysis of nanosecond pulse dielectric barrier discharge-induced nonthermal plasma for pollution control, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. 44, pp. 1410-1417, 2008.
- [9] Eliasson B. and Kogelschatz U., Modeling and applications of silent discharge plasmas, *Plasma Science, IEEE Transactions on*, Vol. 19, pp. 309-323, 1991.
- [10] Yang, Suo, et al. Numerical and Experimental Study of Pulsed Nanosecond Plasma Discharges for C₂H₄/O₂/Ar Gas Mixtures in a Low Temperature Reactor, 2015.
- [11] Nagaraja, Sharath, et al. Ignition of hydrogen-air mixtures using pulsed nanosecond dielectric barrier plasma discharges in plane-to-plane geometry." *Combustion and Flame* 161.4 1026-1037, 2014.
- [12] Cheng, Kai-Wen, et al. Fluid modeling of a nitrogen atmospheric-pressure planar dielectric barrier discharge driven by a realistic distorted sinusoidal alternating current power source, *Japanese Journal of Applied Physics* 51.11R, 116001, 2012.
- [13] J. Shin and L. L. Raja, Dynamics of pulse phenomena in helium dielectric-barrier atmospheric-pressure glow discharges, *Journal of applied physics*, vol. 94, pp. 7408-7415, 2003.
- [14] H. Nishida, Numerical Analysis for Plasma Dynamics in SDBD Plasma Actuator, *41st Plasmadynamics and lasers conference, Chicago*, 2010.
- [15] K.-M. Lin, C.-T. Hung, F.-N. Hwang, M. R. Smith, Y.-W. Yang, and J.-S. Wu, Development of a parallel semi-implicit two-dimensional plasma fluid modeling code using finite-volume method, *Computer Physics Communications*, vol. 183, pp. 1225-1236, 2012.
- [16] C.-T. Hung, Y.-M. Chiu, F.-N. Hwang, M.-H. Chiang, J.-S. Wu, and Y.-C. Wang, Investigation of the Atmospheric Helium Dielectric Barrier Discharge Driven by a Realistic Distorted-Sinusoidal Voltage Power Source, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 31, pp. 1-21, 2011.
- [17] Yang, Suo, et al. "Numerical and Experimental Investigation of Nanosecond-Pulsed Plasma Activated C₂H₄/O₂/Ar Mixtures in a Low Temperature Flow Reactor." *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015.
- [18] Nagaraja, Sharath, Wenting Sun, and Vigor Yang. "Effect of non-equilibrium plasma on two-stage ignition of n-heptane." *Proceedings of the Combustion Institute* 35.3, 2015
- [19] G. J. M. Hagelaar, *Modeling of microdischarges for display technology*, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2000.
- [20] S. Nagaraja, V. Yang, and I. Adamovich, Multi-scale modelling of pulsed nanosecond dielectric barrier plasma discharges in plane-to-plane geometry, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, pp. 155205, 2013.
- [21] G. Hagelaar, F. De Hoog, and G. Kroesen, Boundary conditions in fluid models of gas discharges, *Physical Review E*, vol. 62, pp. 1452, 2000.
- [22] B. Jayaraman and W. Shyy, Modeling of dielectric barrier discharge-induced fluid dynamics and heat transfer, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 44, pp. 139-191, 2008.
- [23] R. Deloche, P. Monchicourt, M. Cheret, and F. Lambert, High-pressure helium afterglow at room temperature, *Physical Review A*, vol. 13, pp. 1140, 1976.
- [24] D. Scharfetter and H. K. Gummel, Large-signal analysis of a silicon read diode oscillator, *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 16, pp. 64-77, 1969.



شکل ۱۹- چگالی هر یک از جزءهای گاز هلیوم در فاصله‌ی بین دو الکترود و در مرکز راکتور



شکل ۲۰- حداکثر سرعت ایجادشده در مرکز راکتور

۷- مراجع

- [1] Martens T., *Numerical simulations of dielectric barrier discharges*, PhD Thesis, University of Antwerpen, Antwerpen, 2010.
- [2] Massines F., Rabehe A., Decoms P., Gadri R. B., Ségur P., and Mayoux C., Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier, *Journal of Applied Physics*, vol. 83, pp. 2950-2957, 1998.
- [3] Massines F., Segur P., Gherardi N., Khamphan C., and Ricard A., Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: *diagnostics and modelling*, *Surface and Coatings Technology*, vol. 174, pp. 8-14, 2003.
- [4] Iwasaki M., Matsudaira Y., Hori M., Takeda K., Ito M., Miyamoto E., et al., Roles of oxidizing species in a nonequilibrium atmospheric-pressure pulsed remote O₂ plasma glass cleaning process, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, 2008.
- [5] Borcia G., Chiper A., and Rusu I., Using a He⁺ N₂ dielectric barrier discharge for the modification of polymer surface properties, *Plasma sources science and technology*, Vol. 15, pp. 849, 2006.
- [6] Morent R., De Geyter N., Jacobs T., Van Vlierberghe S., Dubruel P., Leys C., et al., Plasma - Polymerization of HMDSO Using an Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge, *Plasma Processes and Polymers*, Vol. 6, pp. S537-S542, 2009.
- [7] Takaki K., Hatanaka Y., Arima K., Mukaigawa S., and Fujiwara T., Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier discharge reactor, *Vacuum*, vol. 83, pp. 128-132, 2008.