

شبیه سازی جت پلاسمای فشار اتمسفری هلیوم با استفاده از معادلات سیالی

فاطمه جعفرزاده یزد و سمیه مهرابیان* دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۸ – دریافت نسخه نهایی: ۸/۴ (۱۴۰۰)

چکیده – در این پژوهش، به بررسی جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری هلیوم پرداخته می شود. جت از نوع تخلیه سد دی الکتریک بوده و متشکل از یک تیوپ دی الکتریک با دو الکترود حلقوی فلزی است. برای شبیه سازی از معادلات پیوستگی، تکانه و پایستگی انرژی به همراه معادله پواسون جهت محاسبه پتانسیل و میدان الکتریکی و معادلات حاکم بر گاز کامل استفاده می شود. نتایج نشان می دهد که چگالی الکترونی و یونی، پتانسیل و میدان بارفضا، انرژی درونی، دما و سرعت الکترون ها با زمان روندی افزایشی دارند. نیز افزایش طول پلاسما و حرکت رو به جلوی آن در امتداد محور جت، با زمان قابل مشاهده است. بنابراین انتظار می رود تا با افزایش زمان، مقادیر کمیت های مذکور افزایش یونه و طول شعله جت پلاسما بیشتر شود.

واژههای کلیدی: جت پلاسمای فشار اتمسفری، تخلیه سد دیالکتریک، پلاسما، معادلات سیالی.

Simulation of a Helium Atmospheric Plasma Jet Using Fluid Equations

F. Jafarzadeh yazd and S. Mehrabian*

Department of Physics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract: In this study, a cold atmospheric He plasma jet is investigated. The jet is of dielectric barrier discharge type, consisting of a dielectric tube with two metal ring electrodes. The continuity, momentum and energy conservation equations as well as the Poisson equation for obtaining the potential and the electric field, accompanied with the ideal gas laws, are used for the simulation. The results show that the electron and ion densities, potential and space charge field, internal energy, temperature and velocity of the electrons increase with time. Moreover, the increment of the plasma length and its forward propagation along the jet axis with time is also observed. Therefore, it is expected that the values of the mentioned quantities increase with time, which results in the increment of the plasma jet length.

Keywords: Atmospheric plasma jet, Dielectric barrier discharge, Plasma, Fluid equations.

s_mehrabian@shahroodut.ac.ir * : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي:

فهرست علائم

ميدان الكتريكي	E	جريان مستقيم	DC
انرژی درونی الکترون	3	جريان متناوب	AC
دماي الكترون	T _e	چگالی الکترون	n _e
ثابت بولتزمن	k _b	سرعت الكترون	v _e
چگالی یون،های مثبت	n _i	ضريب يونيزاسيون	α
پتانسيل الكتريكي	φ	بارالكتريكى	q
چگالی بار	ρ	فشار الكترون	pe
عادد پی	π	جرم الكترون	m _e
پاسكال	pa	ولت	V
كلوين	К	تخلیه سد دیالکتریک	DBD
ژول	J	نانو ثانيه	ns
سرعت ماكزيمم	v	شار الكترون	Γ_{e}

۱ – مقدمه

امروزه علم پلاسما دارای کاربردهای فراوانی در صنعت و تکنولوژی اعم از پزشکی و غیرپزشکی است. پلاسما را می توان به دو دسته کلی پلاسمای فشار پایین و پلاسمای فشار اتمسفری تقسیم کرد [۱]. در سالهای اخیر، تحقیقات بسیاری در زمینه پلاسمای فشار اتمسفری بهدلیل سادگی آن نسبت به پلاسمای فشار پایین انجام شده است. برخی از انواع پلاسما-های فشار اتمسفری، غیرتعادلی هستند. در این نوع پلاسماها، دمای الکترونها، یونها و اتمهای خنثی با هم برابر نبوده و از اینرو، پلاسمای فشار اتمسفریای که دارای تعادل ترمودینامیکی نباشد را پلاسمای سرد مینامند. یکی از انواع پلاسماهای سرد فشار اتمسفری، جت پلاسما است [۲]. جتهای پلاسمای سرد اتمسفری را می توان براساس پیکربندی در چهار دسته تخلیه سد دیالکتریک، شبه تخلیه سد دىالكتريك، الكترود بدون دىالكتريك و الكترود منفرد قرار داد [۳]. از کاربردهای جت پلاسما می توان به کاربرد آن در صنعت خودروسازي، محيط زيست، هوافضا، نساجي، توليد انرژی، نفت و پتروشیمی، الکترونیک و امور نظامی اشاره کرد.

یکی از کاربردهای مهم دیگر جت پلاسما که امروزه مورد توجه فراوان قرار گرفته است، کاربرد آن در زمینه پزشکی همانند درمان زخمهای دیابتی، انعقاد خون، دندانپزشکی، درمان بیماریهای پوستی و سرطان است [۴].

در جت پلاسما میدان الکتریکی ایجاد شده در راستای شارش گاز است و پلاسما در اثر تخلیه الکتریکی بین دو الکترود یا توسط یک تک الکترود ایجاد می شود. یک منبع DC و یا AC می تواند ولتاژ مورد نیاز برای تخلیه را فراهم کند. از گازهای مختلفی همچون آرگون، نیتروژن، اکسیژن، هلیوم و ترکیب آنها در تولید جت پلاسما استفاده می شود. نوع گاز، سرعت شارش گاز، ولتاژ اعمالی و شکل الکترودها در ایجاد پلاسما و در طول جت بسیار موثر هستند [۵].

از طرفی با توجه به کاربردهای فراوان جت پلاسما، شبیه سازی پلاسمای ایجاد شده توسط جت، از اهمیت زیادی برخوردار است. از تحقیقات انجام شده در این زمینه، می توان به شبیه سازی هایی در ارتباط با پلاسمای ایجاد شده توسط جت تخلیه سد دی الکتریک (متشکل از یک تیوپ دی الکتریک با یک الکترود سوزنی) با استفاده از معادلات



۲– مدل ریاضی ۲–۱– ساختار جت

ساختار جت شبیهسازی شده در شکل (۱) به نمایش درآمده است. همانگونه که مشخص است تیوپ دیالکتریک دارای شعاع خارجی ۲ mm ۲ است و هر یک از الکترودها نیز به شکل حلقوی بوده و دارای طول cm ۵/۰ و قطر ۴ mm ۴ هستند. از سمت چپ، الکترود اول، الکترود زمین و الکترود دوم، الکترود توان است. فاصله دو الکترود با هم ۲ n است و انتهای الکترود توان با انتهای تیوپ دیالکتریک، cm ۱ فاصله دارد. شبیهسازی از انتهای الکترود توان آغاز شده و تا ۱۵ سانتی متری خارج تیوپ ادامه مییابد. ولتاژ اعمالی به الکترود توان نیز VM ۱۰ است.

۲-۲- معادلات حاکم

برای انجام شبیهسازی از معادلات حاکم بر برهمکنش شامل معادلات سیالی: پیوستگی، تکانه و انرژی بههمراه معادله پواسون که برای محاسبه میدان الکتریکی است استفاده می شود.

ارت معادله پیوستگی الکترون $\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n_e v_e) = \alpha n_e$ (۱)
از این معادله برای محاسبه تغییرات چگالی الکترون در پلاسما سیالی اشاره کرد که در سالهای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ به انجام رسید [۶–۷]. سپس چن و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی جت پلاسمای ماکروویو پالسی آرگون پرداختند [۸]. همچنین در سال ۲۰۱۵ تحقیقات قابل توجهی روی گونههای واکنش پذیر اکسیژن و نیتروژن و عملکرد آنها روی سلول انجام شد [۹]. ون و همکاران نیز درسال ۲۰۱۵، جت پلاسمای هلیوم با یک الکترود سوزنی در فشار یک اتمسفر را شبیهسازی کرد و در این راستا از معادلات سیالی حاکم استفاده کرده و چگالی قونههای واکنش پذیر داخل و خارج جت را مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

با توجه به اهمیت جت پلاسما و کاربردهای آن و نیز تأثیر ساختار جت بر ویژگیهای آن، در این پژوهش به بررسی پلاسمای ایجاد شده توسط جت پلاسمای هلیومی پرداخته میشود که از نوع تخلیه سد دیالکتریک بوده و متشکل از یک تیوپ دیالکتریک با دو الکترود حلقوی فلزی است. شبیهسازی با استفاده از حل عددی معادلات سیالی به همراه معادله پواسون انجام شده و توزیع فضایی- زمانی چگالی، سرعت، انرژی، فشار و دمای الکترونها و نیز چگالی و سرعت یونها را به دست میدهد. لازم بهذکر است که نتایج این شبیهسازی جهت بهینه کردن پارامترهای مربوط به جتهای پلاسمای فشار اتمسفری کاربردی است.

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱

177

استفاده می شود. در این رابطه $n_e e e_p v_e$ به ترتیب چگالی و سرعت الکترون ها بوده و α ضریب یونیز اسیون است که تابعی از نسبت میدان الکتریکی بر چگالی گاز خنثی $(\frac{E}{N})$ است، که در آن، E میدان الکتریکی و N چگالی گاز خنثی است [۶–۱۰]. بستگی ضریب یونیز اسیون به $(\frac{E}{N})$ با استفاده از نرم افزار +BOLSIG محاسبه می شود. +BOLSIG نرم افزاری برای حل معادله بولتزمن برای الکترون ها در گاز های ضعیف یونیزه است و اصلی ترین کاربرد آن به دست آوردن ضرایب انتقال، برخورد و یونیز اسیون است [۱۱].

۲–۲–۲– معادله تکانه الکترون

 $\frac{\partial(n_e v_e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n_e v_e^{\gamma}) + \frac{1}{m_e}\frac{\partial}{\partial x}(p_e) = -\frac{qEn_e}{m_e}$ (Y) livit avalete is availed active and the equation of the equation

۲–۲–۳ معادله انرژی الکترون

$$\begin{split} \frac{\partial(n_e\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n_e\epsilon v_e) + \frac{\partial}{\partial x}(p_e v_e) = q \vec{E}.\vec{\Gamma}_e \qquad (\mbox{\boldmathackarrow}) \\ \mbox{$lust$ list$ is noticed to reduce the integer} $ \mbox{$lust$ list$ determined to the the integer} $ \\ \mbox{$lust$ list$ list$ list$ list$ determined to the integer} $ \\ \mbox{$lust$ list$ li$$

۲-۲-۲ معادله پیوستگی یونهای مثبت

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(n_i v_i) = \alpha n_e$$
(۴)

از این معادله بهمنظور محاسبه تغییرات چگالی یونها در پلاسما استفاده میشود و در آن n_i و v_i بهترتیب برابر با چگالی و سرعت یونهای مثبت است [۱۲–۱۳].

$$\frac{\partial(\mathbf{n}_{i}\mathbf{v}_{i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{n}_{i}\mathbf{v}_{i}^{\mathsf{Y}}) + \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{m}_{i}}\frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{p}_{i}) = \frac{q\mathbf{E}\mathbf{n}_{i}}{\mathbf{m}_{i}} \tag{(b)}$$

این معادله به منظور محاسبه سرعت یونها در پلاسما استفاده شده و در آن p_i و m_i به ترتیب فشار یون و جرم آن هستند [17–17]. لازم به ذکر است که در یک جت پلاسمای سرد فشار اتمسفری، یونها و اتمهای خنثی باهم در تعادل ترمودینامیکی بوده و از این رو دمای آنها با هم برابر و تقریبا برابر با دمای اتاق است [14]. از این رو دمای یونها در این پژوهش ثابت و برابر با k° ه می قرار داده شده و فشار آنها با استفاده از رابطه برابر با دمای یونها در این و می آ

۲-۲-۶- معادله يواسون

۲-۳- شبیه سازی

با توجه به این مسئله که برای حل معادلات ذکر شده احتیاج به دانستن میدان الکتریکی هست، برای محاسبه میدان الکتریکی از معادله پواسون استفاده می شود [۱۰-۶ و ۱۳–۱۲].

- $\nabla^{\mathsf{Y}} \boldsymbol{\phi} = -\boldsymbol{\rho} \,/\, \boldsymbol{\epsilon}_{\circ} \tag{\textbf{\textbf{F}}}$
- $\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi \tag{V}$

در این معادله، φ، *q*و قق بهترتیب پتانسیل الکتریکی، چگالی بار و ضریب گذردهی خلاء هستند. لازم بهذکر است که معادله پواسون برای محاسبه پتانسیل ایجاد شده در محیط پلاسما (ناشی از اثرات بارفضا) مورد استفاده قرار می گیرد. برای در نظر گرفتن اثر الکترود توان نیز، پتانسیل ناشی از یک استوانه فلزی با طول و شعاع مشخص را با روش انتگرالگیری، روی محور آن محاسبه کرده و سپس به محاسبه میدان ناشی از آن پرداخته می شود. نهایتا مقدار میدان در هر نقطه از محیط با استفاده از برهم نهی میدان بارفضا و میدان الکترود توان بهدست می آید [10–19].

معادلات سیالی برای پلاسما از دسته معادلات اویلر و غیر ویسکوز هستند و برای حل عددی این معادلات، بهویژه زمانی که مشخصههای یک سیال مانند فشار، دما و چگالی دارای

0, 1, 5	
شرايط	مقدار
طول الكترود	•/۵cm
شعاع الكترود	۲mm
چگالی اولیه الکترون	$\cdot \cdot m^{-r}$
سرعت اوليه الكترون	0
چگالی اولیه هلیوم	۲/۴×۱ • ۲۵ m ^{-۳}
سرعت اوليه هليوم	$10 \frac{m}{s}$
ولتاژ الكترود زمين	o
ولتاژ الكترود توان	۱۰ kV
Δx	۴×۱۰ ^{-۶} m
Δt	∕∘ [−] ′ [⊬] S
с	۰/۹٩
زمان شبيەسازى	۲۰ ns

جدول ۱– شرایط مورد استفاده در شبیهسازی

$$u_{j+\frac{1}{\gamma}}^{n+\frac{1}{\gamma}} = \frac{1}{\gamma} \left\{ u_{j+1}^{n} + u_{j}^{n} \right\} - \frac{\Delta t}{\gamma \Delta x} \left\{ f\left(u_{j+1}^{n}\right) - f\left(u_{j}^{n}\right) \right\}$$
(4)

$$\mathbf{u}_{j-\frac{1}{\gamma}}^{n+\frac{1}{\gamma}} = \frac{1}{\gamma} \left\{ \mathbf{u}_{j}^{n} + \mathbf{u}_{j-1}^{n} \right\} - \frac{\Delta t}{\gamma \Delta x} \left\{ f\left(\mathbf{u}_{j}^{n}\right) - f\left(\mathbf{u}_{j-1}^{n}\right) \right\}$$
(1°)

که در این روابط u نشانگر چگالی، ممنتوم یا چگالی انرژی j است و f(u) شار مربوط به هر یک از این کمیتها است. شمارنده سلول و $\frac{1}{2} \pm j$ مرزهای سلول را نشان میدهد. n نیز شمارنده زمان است. شرایط مورد استفاده در شبیه سازی نیز در جدول (۱) آورده شده است.

٣- نتايج و بحث

با توجه به ساختار جت پلاسما که در شکل (۱) به نمایش درآمده است، شبیهسازی در راستای محور z و از انتهای الکترود توان آغاز شده و در محیط بیرون تیوپ دیالکتریک نیز ناپیوستگی باشند باید از روش هایی چون آپ ویند^۱، لکس فردریچ^۲، لکس وندروف^۳، مک کورمک^۴ و بیم وارمینگ^۵ استفاده کرد [۱۷]. در این روش ها، اگر به صورت پایسته نوشته شوند، حل معادلات بر مبنای محاسبه شار در مرزهای ورودی و خروجی به هرسلول است [۱۸]. ویژگی روش های پایسته این است که محل ناپیوستگی را به صورت صحیح به دست می دهند. لازم به ذکر است که شرط پایداری این روش ها $\frac{c\Delta x}{v} > 1\Delta$ است که در آن $1 \ge 5 \ge 0$ و v بیشینه سرعت سیال است [۱۸]. در این تحقیق، از روش لکس فردریچ مرتبه دوم برای حل معادلات سیالی استفاده شد که در آن مقدار کمیت مورد نظر در زمان بعد (n+1) در سلول *ز*ام از رابطه زیر به دست می آید [۱۸]:

$$u_{j}^{n+\nu} = \frac{\nu}{\tau} \left\{ u_{j+\frac{\nu}{\tau}}^{n+\frac{\nu}{\tau}} + u_{j-\frac{\nu}{\tau}}^{n+\frac{\nu}{\tau}} \right\} - \frac{\Delta t}{\tau \Delta x} \left\{ f \left(u_{j+\frac{\nu}{\tau}}^{n+\frac{\nu}{\tau}} \right) - f \left(u_{j-\frac{\nu}{\tau}}^{n+\frac{\nu}{\tau}} \right) \right\}$$
(A)



شکل۳ - توزیع مکانی میدان الکتریکی الکترود توان

ادامه مییابد. طول کل محیط شبیهسازی n ۲۶ (m ۱ داخل تیوپ و n ۵۵ خارج تیوپ) است. گاز هلیوم با فشار ۱۰^۵ pa ۱۰^۵ میرعت m ۵۱ و با دمای اولیه K^{° ۳} ۰۰ وارد تیوب می شود. مقدار چگالی اولیه الکترونها و یونها قبل از یونیزاسیون نیز ^m ۳^۰ است. انتظار می رود که با اعمال ولتاژ و ایجاد میدان الکتریکی، گاز هلیوم به تدریج یونیزه شده و پلاسمای تشکیل شده رو به جلو حرکت کند.

پتانسیل و میدان الکتریکی الکترود توان بهترتیب در

شکلهای (۲) و (۳) به نمایش در آمده است، همانگونه که بیان شد، پتانسیل این الکترود با توجه به مشخصات هندسی آن (طول و شعاع الکترود) بهصورت تحلیلی و با استفاده از انتگرالگیری روی محورش (محور z) محاسبه شد. سپس میدان الکترود با مشتق گیری از پتانسیل بهدست آمد. لازم بهذکر است که در این دو شکل عدد صفر روی محور z، ابتدای الکترود زمین را نشان میدهد و فاصله ۲ سانتیمتری از مبدا در امتداد محور z ها، انتهای الکترود توان را مشخص میکند. همانگونه که مشخص است پتانسیل در محل الکترود توان (۱/۵ cm </



شکل۴- توزیع مکانی چگالی الکترونی در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)

بیشینه ۱۰ kV میرسد و نیز میدان الکتریکی در انتهای الکترود توان دارای مقدار بیشنیه ۷ ^۵۰×۱۵ است.

شکل (۴) تغییرات چگالی الکترونی بر حسب مکان را در زمانهای اولیه، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ۲۰ نشان میدهد. همانگونه که مشخص است چگالی الکترونی از مقدار ثابت ^m-۳ در زمان اولیه شروع به افزایش میکند بهگونهای که مقدار بیشینه آن به تر تیب به ۱۰^{۱۴} × ۱۰^{۱۲} ، ۳/۱۵×۱/۱۵ و m^{-۳} ۱۰۱×۱/۲۶ در زمانهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ns میرسد. این نتیجه مورد انتظار است، زيرا با اعمال ميدان الكتريكي، ضريب يونيزاسيون بهعنوان تابعی از (<u>E</u>) سبب یونیزاسیون و ایجاد آبشاری برخوردی از الکترونها می شود. با توجه به تولید آبشاری الکترونها در اثر برخورد، انتظار میرود که چگالی الکترونی با زمان روندی افزایشی داشته باشد. با دقت در مقادیر بیشینه چگالی، میتوان دریافت که آهنگ افزایش مقدار چگالی شروع به کند شدن کرده است. این مسئله به این علت است که ضریب یونیزاسیون به عنوان تابعی غیرخطی از (<u>E</u>) با گذشت زمان، روند صعودی خود را از دست داده و از اینرو منجر به کند شدن روند افزایشی چگالی میشود.

علاوهبر این با گذشت زمان، پلاسمای ایجاد شده رو به جلو حرکت کرده و بتدریج از تیوپ دیالکتریک خارج

می شود. همان گونه که انتظار می رود پیشروی پلاسما در محیط با زمان بیشتر می شود، به گونه ای که پلاسمای تشکیل شده به فاصله ۲۰۵۵، ۸/۵۸ و ۶/۵۶ از لبه خارجی الکترود توان در زمان های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ می رسد. لازم به ذکر است که برای نمایش بهتر مقادیر چگالی، مقیاس محور عمودی به صورت لگاریتمی در آمده و طول انتشار سیال الکترونی تا جایی در نظر گرفته شده که چگالی الکترونی به مقدار اولیه ۳^{-m} ۱۰۹ می رسد.

تغییرات چگالی یونی بر حسب مکان در زمانهای ۱۰، ۵ و rons در شکل (۵) به نمایش درآمده است. همان گونه که در شکل دیده می شود چگالی یونی نیز همانند چگالیِ الکترونی روندی افزایشی بر حسب زمان داشته و در زمانهای ۱۰، ۵۰ و ۲۰۳ ۲۰۱۰×۱۰۱۲ می رسد. علاوهبر این، همان طور که در شکل دیده می شود، یونهای تولید شده پس از یونیزاسیون، در محیط به سمت جلو حرکت کرده و از تیوپ دی الکتریک خارج می شوند. یونها در زمانهای ۱۰، ۵۱ و ron ۲۰ به ترتیب به ماصله ۲۰/۱۶ و ron ۲/۷۲ از لبه خارجی الکترود توان می رسند. در واقع، میزان پیشروی یونها در محیط بسیار کمتر از الکترونها است، که این حرکت با سرعت بسیار کم، ناشی از

+/1/0/Jcme.41.1.9101

177



شکل۵- توزیع مکانی چگالی یونی در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)



شکل۶- توزیع مکانی پتانسیل الکتریکی پلاسما در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)

نسبت جرمی ^۶۰۰×۷ برابری یون هلیم در قیاس با الکترونها است.

شکل (۶) توزیع مکانی پتانسیل الکتریکیِ محیط پلاسما را در زمانهای اولیه، ۱۰، ۱۵ و ns ۲۰ نمایش میدهد. همان طور که مشاهده می شود پتانسیل الکتریکی (صرف نظر از علامت منفی) روندی افزایشی با زمان دارد به گونهای که مقدار بیشینه آن بهترتیب به ۱/۳۶–۰ ۵۲۷–و ۷ ۰۷۷۷- در زمانهای ۱۰، ۱۵ و ns می می رسد. این مسئله به این علت اتفاق می افتد که مقدار

چگالی بار، با توجه به معادلهی پواسون در مقدار پتانسیل نقش دارد و از آنجایی که میزان یونیزاسیون و چگالی بار با زمان افزایش مییابد، بنابراین افزایش پتانسیل با زمان قابل پیشبینی است.

توزیع مکانی میدان الکتریکی ناشی از بارفضا در زمانهای اولیه، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ns در شکل (۷) به نمایش درآمده است. همانگونه که مشاهده می شود میدان الکتریکی از مقدار صفر در زمان اولیه شروع به افزایش کرده و مقدار بیشینه آن در

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱

DOI: 10.47176/jcme.41.1.9101



شکل۷- توزیع مکانی میدان بارفضا در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)



شکل۸ - توزیع مکانی سرعت الکترون در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)

زمانهای ۱۰، ۱۵ و ns ۲۰ بهترتیب برابر با ۲۰۲×۳۸٬۳٬ ۸۰۱×۲/۴ و ۷/۳ ۲۰۵×۱/۳۵ است. این روند افزایشی با توجه به افزایش پتانسیل پلاسما با زمان قابل پیشبینی است، زیرا میدان الکتریکی با مشتق گیری از پتانسیل الکتریکی بهدست میآید. لازم بهذکر است که نمودار مربوط به زمان ns ۱۰ در دو شکل اخیر (پتانسیل و میدان الکتریکی بارفضا) با توجه به تفاوت مرتبه آن با دو زمان ۱۵ و ns ۲۰ در شکل ها قابل مشاهده نیست.

شکل (۸) توزیع مکانی سرعت الکترونی را در زمانهای اولیه، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ۳ نشان میدهد. با توجه به افزایش میدان الکتریکی با زمان، انتظار میرود که سرعت حرکت الکترونها نیز با زمان افزایش یابد، زیرا طبق معادله تکانه الکترون، میدان الکتریکی با وارد کردن نیرو به الکترونها، سرعت آنها را افزایش میدهد که این امر در شکل بهوضوح قابل مشاهده است. در واقع مقدار بیشینه سرعت الکترونها در زمانهای ۱۰ است. ۵/۹×۱۹/۱، ۵۰



شکل۹ – توزیع مکانی چگالی انرژی الکترون در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ۲۰ ns (نقطه چین)

و m ^۶ ۱/۱۸×۱۰^۶ است. لازم بهذکر است که این شکل نیز، انتشار رو به جلوی پلاسما با زمان را نشان میدهد؛ همانگونه که در شکل (۴) نیز مشاهده شد.

توزيع مكاني چگالي انرژي الكترونها در زمانهاي اوليه، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ns در شکل (۹) به نمایش در آمده است. در واقع، حركت الكترونها در ميدان الكتريكي سبب توليد گرما و افزایش انرژی الکترونها (عبارت گرمایش ژول در معادله انرژی الکترون) می شود. با توجه به اینکه میدان، سرعت و چگالی الکترونی در گرمایش ژول موثرند و هر سه نیز با زمان افزایش مییابند، انتظار میرود که چگالی انرژی نیز، روندی افزایشی داشته باشد. همانگونه که در شکل دیده می شود، این افزایش تا زمان ns اتفاق می افتد، اما به دلیل کند شدن آهنگ افزایش چگالی الکترونی پس از این زمان، که قبلا به آن پرداخته شد؛ بیشنیه چگالی انرژی الکترونی در زمان ۲۰ ns افزایش نیافته و تقریبا ثابت میماند. در واقع، بیشینه چگالی انرژی به مقادیر $^{-\circ}$ ا $\times 10^{-7}$ ، 10×10^{-7} ، 10×10^{-7} انرژی به مقادیر $^{-\circ}$ در زمانهای ۱۰، ۱۵ و ns میرسد. لازم بهذکر است که این شکل نیز حرکت رو به جلوی پلاسما و خروج آن از تیوپ دىالكتريك را نشان مىدهد.

انرژی درونی الکترونها که از تقسیم چگالی انرژی بر

چگالی الکترونی بهدست میآید، در شکل(۱۰) به نمایش درآمده است. از آنجایی که چگالی الکترونی تأثیری در مقدار انرژی درونی الکترونها ندارد، روند افزایشی انرژی درونی با زمان حفظ شده و نیز حرکت رو به جلوی پلاسما در شکل قابل مشاهده است. همانطور که دیده میشود، مقدار بیشینه انرژی درونی بهترتیب به مقادیر ^{۲۰}-۱۰×۶/۹۷، ^{۱۹} - ۱×۷/۷۱ و

محاسبه انرژی درونی از آنجایی دارای اهمیت است که با توجه به رابطه گاز کامل در محاسبه دمای الکترونی مورد استفاده قرار می گیرد. توزیع مکانی دمای الکترونی در زمانهای اولیه، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ۲۰ در شکل (۱۱) به نمایش در آمده است. از آنجایی که دما با استفاده از انرژی درونی محاسبه می شود، رفتاری مشابه با انرژی درونی خواهد داشت. بنابراین دمای الکترونی با زمان افزایش یافته و مقدار بیشینه آن به تر تیب برابر با ۱۳۷۰، ۸۴۸۰ و ۲ ° ۲۰۰۰ در زمانهای ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ۲۰ است.

با دانستن دمای الکترونی، میتوان فشار ناشی از سیال الکترونی را با رابطه مربوط به فشار گاز کامل محاسبه کرد. شکل (۱۲) توزیع مکانی فشار سیال الکترونی را در زمانهای مختلف به نمایش میگذارد. در این نمودار نیز رفتار افزایشی



شکل ۱۰ – توزیع مکانی انرژی درونی الکترون در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ns ۲۰ (نقطه چین)



شکل ۱۱ – توزیع مکانی دمای الکترون در زمان اولیه (خط)، ۱۰(خط نقطه)، ۱۵(خط چین) و ۲۰ ns (نقطه چین)

۴- نتیجهگیری

در این پژوهش، به بررسی جت پلاسمای فشار اتمسفری هلیوم پرداخته شد. این جت از نوع تخلیه سد دی الکتریک بوده و متشکل از یک تیوپ دی الکتریک با دو الکترود حلقوی فلزی است. در این شبیه سازی از معادلات سیالی شامل معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی به همراه معادله پواسون جهت محاسبه پتانسیل و میدان الکتریکی استفاده شد. نیز نرمافزار +BOLSIG برای محاسبه ضریب یونیز اسیون به کار رفت و شبیه سازی تا فشار با زمان تا زمان ns قابل مشاهده است. با توجه به تأثیر چگالی الکترونی و دما بر مقدار فشار، انتظار می رود تا نمودار فشار مشابه با نمودار چگالی انرژی (شکل ۹) باشد. بنابراین فشار تا زمان ns افزایش می یابد، اما پس از آن بهدلیل اثر کند شدن روند افزایشی چگالی الکترونی، تقریبا ثابت می ماند. همان گونه که در شکل دیده می شود، بیشینه فشار الکترونی به مقدار ۶-۱۰×۲/۱۲، ۴-۱۰×۷/۳۴ و ۶ ۹-۱۰×۶/۹۸ در زمان های

روش های عددی در مهندسی، سال ۴۱، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱

DOI: 10.47176/jcme.41.1.9101





انتظار می رود تا با افزایش زمان شبیه سازی، مقادیر کمیت های مذکور افزایش یافته و طول شعله جت پلاسما بیشتر شود. لذا این شبیه سازی و نتایج حاصل از آن برای بهینه کردن خروجی جت های پلاسمای فشار اتمسفری، کاربردی است. زمان ns ۲۰ انجام شد. نتایج نشان می دهد که چگالی الکترونی و یونی، پتانسیل و میدان بارفضا، سرعت، انرژی درونی و دمای الکترونها با زمان روندی افزایشی دارند. نیز انتشار رو به جلوی پلاسما در امتداد محور جت، با زمان قابل مشاهده است.

واژەنامە

5. Beam-warning

مراجع

and Plasma Bullets", *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 034005, 2012.

- 6. Naidis, G. V., "Modelling of Streamer Propagation in Atmospheric-Pressure Helium Plasma Jets", *Journal* of Physics D: Applied Physics, Vol. 43, No. 40, pp. 402001, 2010.
- Naidis, G. V., "Modelling of Plasma Bullet Propagation Along A Helium Jet in Ambient Air", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 21, pp. 215203, 2011.
- Chen, Z., Yin, Z., Chen, M., Hong, L., Xia, G., Hu, Y., Huang, Y., Liu, M., and Kudryavtsev, A.A., "Self-Consistent Fluid Modeling and Simulation on a Pulsed Microwave Atmospheric-Pressure Argon Plasma Jet", *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 15, pp. 153303, 2014.
- Norberg, S. A., Johnsen, E., and Kushner, M., "Formation of Reactive Oxygen and Nitrogen Species by Repetitive Negatively Pulsed Helium Atmospheric Pressure Plasma Jets Propagating into

upwind
 Lax–Friedrichs

- Lax–Weandrof
 Mac-Cormac
- Lieberman, M. A., and Lichtenberg, A. J., *Principles* of *Plasma Discharges and Materials Processing*, Vol. 2, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- Kolb, J. F., Mohamed, A. A. H., Price, R. O., Swanson, R. J., Bowman, A., Chiavarini, R. L., Stacey, M., and Schoenbach, K. H., "Cold Atmospheric Pressure Air Plasma Jet for Medical Applications", *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 24, pp. 241-501, 2008.
- 3. Passaras, D. N., "Simulation of Atmospheric Pressure Plasma Jets with A Global Model", *Master Thesis*, National and Kapodistrian University of Athens, Athens, 2016.
- Reiazi, R., Akbari, M. E., Norozi, A., and Etedadialiabadi, M., "Application of Cold Atmospheric Plasma (CAP) in Cancer Therapy: A Review", *International Journal of Cancer Management*, Vol. 10, No. 3: e8728, 2017.
- 5. Lu, X., Laroussi, M., and Puech, V., "On Atmospheric- Pressure Non-Equilibrium Plasma Jets

DOR: 20.1001.1.22287698.1401.41.1.6.8

DOI: 10.47176/jcme.41.1.9101

Humid Air", *Plasma Sources Science Technology*, Vol. 24, No. 3, p. 035026, 2015.

- Wen, Y., Fu-Cheng, L., Chao-Feng, S., and De-Zhen, W., "Two-Dimensional Numerical Study of an Atmospheric Pressure Helium Plasma Jet with Dual-Power Electrode", *Chinese Physics B*, Vol. 24, No. 6, p. 065203, 2015.
- Hagelaar, G. J. M., and Pitchford, L. C., "Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models", *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 14, No. 4 pp. 722, 2005.
- 12. Mancinelli, B., Prevosto, L., Chamorro, J. C., Minotti, F. O., and Kelly, H., "Modelling of the Plasma–Sheath Boundary Region in Wall-Stabilized Arc Plasmas: Unipolar Discharge Properties", *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 38, No. 1, pp. 147-176, 2018.
- Kanzari, Z., Yousfi, M., and Hamani, A., "Modeling and Basic Data for Streamer Dynamics in N2 And O2 Discharges", *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 8, pp. 4161-4169, 1998.

- Tabares, F. L., and Junkar, I., "Cold Plasma Systems and their Application in Surface Treatments for Medicine", *Molecules*, Vol. 26, No. 7, p. 1903, 2021.
- 15. Yousfi, M., Eichwald, O., Merbahi, N., and Jomaa, N., "Analysis of Ionization Wave Dynamics in Low-Temperature Plasma Jets From Fluid Modeling Supported by Experimental Investigations", *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 045003, 2012.
- 16. Vafeas, P., Papadopoulos, P. K., Vafakos, G. P., Svarnas, P., and Doschoris, M., "Modelling the Electric Field in Reactors Yielding Cold Atmospheric–Pressure Plasma Jets", *Scientific Reports*, Vol. 10, p. 5694, 2020.
- 17. Taflove, A., and Hagness, S. C., *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, Boston, 2005.
- LeVeque, R. J., Mihalas, D., Dorfi, E. A., and Müller, E., *Computational Methods for Astrophysical Fluid Flow*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.