

Simulation and Investigation of Influence of Inlet Gas Velocity on Plasma Structure Formed in Plasma Torch¹

Shahrooz Saviz*², Morteza Gharaeinia³, Amir Hossein Sari⁴

Received: 2020.02.24

Accepted: 2020.07.27

Abstract

plasma Torch is widely used in industry and it is very important for determination of the properties of plasma formed in it. Accurate determination of the plasma properties, such as its velocity and temperature profiles, can greatly help to improve plasma torch structure for use for future purposes. Since, experimental testing of plasma properties is very costly and time consuming, simulation of the plasma is utilized. In this paper, the three-dimensional, time-dependent, and non-equilibrium model of plasma torch is simulated and properties of the plasma are investigated. Comparison with the results of similar works shows that the model works well. The effect of change in inlet gas velocity on plasma has also been studied. The results show that with increasing gas velocity at the inlet, the plasma velocity increases, while its temperature decreases. Changing the velocity of the inlet gas also causes the deviation from the thermodynamic equilibrium near the walls.

Keywords: *Plasma Torch, Non-equilibrium, Simulation.*

¹ DOI: 10.22051/jap.2020.30437.1155

² Associate Professor, Plasma Physics Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University. (Corresponding Author). Email: shahrooz.saviz@srbiau.ac.ir.

³ PhD in Physics, Plasma Physics Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University. Email: morteza_gharayenia@yahoo.com

⁴ Assistant Professor, Plasma Physics Research Center, Science and Research Branch, Islamic Azad University. Email: amirsari@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال نهم، پیاپی ۱۹، زمستان ۱۳۹۸

مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن^۱

شهرزاد ساويز*^۲، مرتضی قرایی نیا^۳، امیر حسین ساری^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

چکیده

مشعل پلاسمایی به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. به همین دلیل، تعیین خصوصیات پلاسمای تشکیل شده در آن اهمیت بسیاری دارد. تعیین دقیق خصوصیات پلاسمای نظیر پروفایل‌های سرعت و دما درون و بیرون مشعل پلاسمایی، می‌تواند کمک شایان توجهی به بهبود ساختار دستگاه، جهت استفاده برای مقاصد بعدی کند. با توجه به آنکه بررسی آزمایشگاهی این خصوصیات بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است، می‌توان از شبیه‌سازی استفاده کرد. در این مقاله، مدل سه‌بعدی وابسته به زمان و غیر تعادلی مشعل پلاسمایی شبیه‌سازی شده و خصوصیات پلاسمای بررسی می‌شود. مقایسه با نتایج کارهای مشابه نشان می‌دهد که مدل به خوبی کار می‌کند. همچنین تأثیر تغییر سرعت گاز ورودی در پلاسمای مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت گاز ورودی، سرعت پلاسمای افزایش می‌یابد، در حالیکه دمای آن کاهش می‌یابد. افزایش سرعت گاز

^۱ DOI: 10.22051/jap.2020.30437.1155

^۲ دانشیار، مرکز تحقیقات فیزیک پلاسمای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی. (نویسنده مسئول).

shahrooz.saviz@srbiau.ac.ir

^۳ دانش آموخته دکترا، مرکز تحقیقات فیزیک پلاسمای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی.

morteza_gharayenia@yahoo.com

^۴ استادیار، مرکز تحقیقات فیزیک پلاسمای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی. amirsari@gmail.com

ورودی همچنین باعث افزایش انحراف از تعادل ترمودینامیکی در نزدیکی دیواره‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: مشعل پلاسمایی، غیر تعادلی، شبیه‌سازی.

۱. مقدمه

مشعل پلاسمایی دستگاهی برای تولید شارۀ مستقیمی از پلاسماست و پلاسمای گرمایی در آن توسط انواع مختلفی از تخلیه الکتریکی نظیر تخلیه‌های جریان مستقیم (دی‌سی)، جریان متناوب (ای‌سی) یا فرکانس رادیویی ایجاد می‌شود. رایج‌ترین نوع مشعل پلاسمایی، مشعل جریان مستقیم است. از این نوع مشعل در فرایندهای گسترده‌ای مانند اسپری پلاسمای، برش پلاسمای، جوشکاری پلاسمای، زباله سوزی، و ... استفاده می‌شود [۱]. این دستگاه از دو الکتروود (آند و کاتد) و فضای بین آنها تشکیل شده است و دو نوع انتقال یافته^۱ و انتقال نیافته^۲ دارد. در نوع انتقال نیافته هر دو الکتروود درون مشعل قرار دارد، در حالیکه در نوع انتقال یافته یکی از الکتروودها بیرون دستگاه قرار گرفته است و اجازه می‌دهد که قوس الکتریکی بیرون دستگاه و در فاصله دورتری تشکیل شود [۲]. از آنجا که مطالعه خصوصیات پلاسمای تشکیل شده به صورت آزمایشگاهی بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر است، معمولاً از شبیه‌سازی استفاده می‌کنیم تا مقرون به صرفه باشد [۳].

در فرایند شبیه‌سازی، پلاسمای به صورت شارهای در نظر گرفته می‌شود که از الکترون‌ها و ذرات سنگین (شامل یون‌ها و اتم‌های خنثای جدا از هم) تشکیل شده است. در مدل تعادلی، دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین یکسان در نظر گرفته می‌شود. این تقریب برای داخل پلاسمای که دمای آن زیاد است برقرار است، اما برای ناحیه‌هایی که پلاسمای در خروجی با گاز سرد برخورد می‌کند و نیز در نزدیکی دیواره‌ها نمی‌توان دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین را یکسان در نظر گرفت. همچنین با توجه به آنکه در نزدیکی دیواره‌ها دمای ذرات سنگین بسیار کاهش می‌یابد و گاهی به زیر 1000K می‌رسد. در مدل تعادلی، دمای الکترون‌ها نیز بسیار کاهش می‌یابد که سبب کاهش رسانندگی آنها و در نتیجه عدم امکان عبور جریان الکتریکی بین الکتروودها می‌شود. بنابراین جهت شبیه‌سازی کامل تر مشعل پلاسمایی بهتر است از مدل غیر تعادلی استفاده کنیم [۴].

عوامل بسیاری در ساختار پلاسمای تأثیر گذارند، از جمله تغییر سرعت گاز ورودی (شار گاز ورودی). مطمئناً تغییر در سرعت گاز ورودی تأثیر بسزایی در خصوصیات پلاسمای مانند سرعت، دما، اثرات غیر تعادلی و ... دارد. در کاربردهایی مانند اسپری پلاسمایی، دانستن چنین خصوصیات

¹ Transferred

² Non-transferred

به طور گسترده‌ای به دسترسی به نتایج بهتر و کاهش هزینه‌های مالی و زمانی، بدون نیاز به انجام آزمون و خطای بیشتر، کمک می‌کند. در این مقاله، سعی کرده‌ایم با استفاده از شبیه‌سازی، نحوه حرکت پلاسما و پروفایل‌های دما و سرعت آن را درون مشعل پلاسمایی به طور دقیق پیش‌بینی کنیم. در اینجا، یک مدل سه‌بعدی به صورت غیر تعادلی شبیه‌سازی شده است. همچنین، تأثیر میزان تغییر در سرعت گاز ورودی را در ساختار پلاسما بررسی کرده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که تغییر سرعت گاز ورودی تأثیر بسزایی در سرعت و دمای پلاسما دارد و با انتخاب مناسب آن می‌توان پلاسمایی با شرایط دلخواه برای استفاده در کاربردهای مد نظر تولید کرد.

۲. مدل شبیه‌سازی

در این بخش مدل شبیه‌سازی شده به همراه فرض‌ها و شرایط مرزی و شرایط اولیه به طور کامل بیان می‌شود.

۲-۱ فرض‌ها

- پلاسما در شرایط غیر تعادلی است و دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین (شامل یون‌ها و ذرات سنگین جدا از هم) متفاوت است.
- از اثرات گرانشی و تابشی صرف نظر شده است.
- پلاسما رفتار ویژه‌ای در برابر میدان مغناطیسی از خود نشان می‌دهد و این رفتار کاملاً برعکس رفتار گازهای معمولی است. با توجه به آنکه، تغییرات زمانی میدان مغناطیسی ناچیز است، می‌توان از جریان به وجود آمده توسط این تغییرات، در برابر جریان رسانایی صرف نظر کرد.

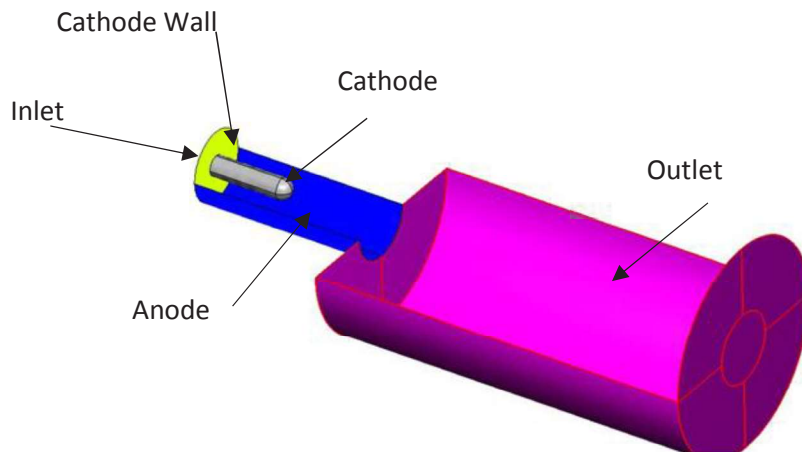
۲-۲ معادلات شبیه‌سازی

شکل ۱ منطقه شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. به منظور درک بهتر خصوصیات پلاسما، قسمتی از ناحیه خروجی گاز نیز در منطقه شبیه‌سازی وارد شده است. گاز از ناحیه ورودی وارد منطقه شبیه‌سازی می‌شود و پس از عبور از این منطقه، بین الکترودها پلاسما تشکیل می‌شود و از ناحیه خروجی خارج می‌شود.

با آنکه تمامی شاره‌ها تراکم‌پذیرند، شاره‌هایی را که عدد ماخ (نسبت سرعت شاره به سرعت صوت) در آنها کمتر از $0/3$ باشد، تراکم‌ناپذیر در نظر می‌گیرند. برای بیشتر مسائل مربوط به دینامیک گازها از قانون گاز کامل به عنوان معادله حالت گاز استفاده می‌شود. پلاسما شاره‌ای

۶۰ / شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل‌شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن

شامل الکترون‌ها و ذرات سنگین در نظر گرفته شده است. ذرات سنگین شامل اتم‌های حالت پایه آرگون (Ar) و اتم‌های برانگیخته الکتریکی (Ar^*) و یون‌های اتمی (Ar^+) و (Ar_2^+) هستند. پلازما با انجام واکنش‌های بیان‌شده در جدول ۱ تشکیل می‌شود. این واکنش‌ها شامل واکنش‌های برانگیختگی، کشسانی، و انگیختگی، پراکندگی و ... است. این واکنش‌ها شامل واکنش‌های برانگیختگی الکترونی که به دمای الکترون‌ها وابسته است و واکنش‌های ذرات سنگین که به دمای گاز وابسته است نیز می‌شود. در اینجا، جهت شبیه‌سازی مشعل پلاسمایی، از نرم‌افزار CFD-ACE+ استفاده شده است و نواخت انجام واکنش‌ها از [۵] و پایگاه داده [۶] گرفته شده‌اند.



شکل ۱ منطقه شبیه‌سازی.

جدول ۱ واکنش‌های انجام‌شده جهت تشکیل پلازما.

واکنش	ترتیب
$M + e \rightarrow M + e (M = Ar, Ar^+)$	۱
$Ar + e \rightarrow Ar^* + e$	۲
$Ar^* + e \rightarrow Ar + e$	۳
$Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	۴
$Ar^* + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	۵
$2Ar^* \rightarrow Ar + Ar^+ + e$	۶
$Ar + Ar^* \rightarrow 2Ar$	۷
$Ar^+ + 2e \rightarrow Ar + e$	۸
$Ar + Ar^+ + e \rightarrow 2Ar$	۹
$Ar_2^+ + e \rightarrow Ar + Ar^+ + e$	۱۰

معادلات پایستگی جرم به صورت زیر بیان می شود،

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (۱)$$

که در آن، \vec{V} بردار سرعت ذرات و ρ چگالی جرمی کل، شامل جرم یونها و الکترونهاست.

معادلات ناویر-استوکس را می توان به صورت زیر نوشت [۷]

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (m \vec{V} u) + (\vec{j}_e \cdot \vec{B})_x \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} v) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (m \vec{V} v) + (\vec{j}_e \cdot \vec{B})_y \\ \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} w) &= - \frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (m \vec{V} w) + (\vec{j}_e \cdot \vec{B})_z \end{aligned} \quad (۲)$$

که در آنها، u و v و w مؤلفه های بردار سرعت ذرات در طول محورهای مختصات است. در این معادلات، گرانیوی m از نظریه جنبشی گازها محاسبه می شود:

$$m_a = 2 / 6693 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{M_w T}}{s_a^2 \Omega_m} \quad (۳)$$

که در آن، Ω_m انتگرال برخورد است و به صورت زیر تعریف می شود،

$$\Omega_m = \frac{1 / 16145}{T^{*0/14874}} + \frac{0 / 52487}{e^{(0/77320T^*)}} + \frac{2 / 16178}{e^{(2/43787T^*)}} \quad (۴)$$

و $T^* = kT / e$ دمای بی بُعد است. گرانیوی مخلوطی از گازها را می توان به صورت زیر محاسبه کرد [۸]،

$$m_{mix} = \sum_{a=1}^N \frac{X_a m_a}{\sum_b X_b f_{ab}} \quad (۵)$$

در این رابطه، f_{ab} برابر است با:

$$f_{ab} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left[\frac{M_a}{M_b} + \frac{M_b}{M_a} \right] + \frac{m_a}{m_b} \left[\frac{M_b}{M_a} + \frac{M_a}{M_b} \right] \frac{1}{2} \frac{u^2}{\hat{u}} \quad (۶)$$

که در آن، N تعداد کل ذرات در مخلوط گازی، X_a و m_a و M_a به ترتیب، کسر مولی و گرانیوی و جرم مولی ذرات a هستند.

معادله پایستگی ذرات سنگین را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\partial (\rho Y_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} Y_a) = \rho \cdot J_a + S_a \quad (۷)$$

۶۲ / شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن

که در آن، Y_a کسر جرمی ذرات و V سرعت میانگین ذرات و S_a نواخت تولید ذرات a هستند و J_a به صورت زیر تعریف می‌شود و همان شار پخش^۱ است،

$$J_a = -rD_a \nabla Y_a + rU_{da} Y_a + J_a^c \quad (۸)$$

در این رابطه، D_a ضریب پخش است و U_{da} برابر است با

$$U_{da} = \frac{q_a m_a}{q_b m_b} \frac{E}{E} \quad (۹)$$

m_{ab} تحرک پذیری یون‌هاست و با استفاده از فرمول لانژوین محاسبه می‌شود

$$m_{ab} = \frac{13 / 853 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{d_a m_r}} \quad (۱۰)$$

d_a قطبش پذیری و m_r جرم کاسته یونها و ذرات سنگین است.

از آنجا که، مدلی که می‌خواهیم شبیه‌سازی کنیم یک مدل غیر تعادلی است، معادلات انرژی برای الکترون‌ها و ذرات سنگین باید جداگانه حل شود. معادله انتقال الکترون‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود،

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = S \quad (۱۱)$$

که در آن، Γ_e شار چگالی الکترونی است و برابر است با

$$\Gamma_e = m_e n_e j - D_e \nabla n_e \quad (۱۲)$$

دمای الکترون‌ها با استفاده از معادله انرژی به دست می‌آید

$$\frac{3}{2} \frac{\partial (n_e T_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (T_e \Gamma_e - c \nabla T_e) = P - n_e \sum_r n_r k_r e_r \quad (۱۳)$$

در این رابطه، $c = \frac{5}{2} n_e D_e$ است و چگالی توان P انرژی کل جذب شده توسط الکترون‌ها

مانند: گرمایش ژول، گرمایش القایی و گرمایش خارجی،

$$P = P_{joule} + P_{ind} + P_{ext} \quad (۱۴)$$

در مدل شارهای پلاسمای، تابع توزیع الکترون‌ها به صورت ماکسولی در نظر گرفته می‌شود و خواص انتقالی الکترون را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم،

$$m_e = \frac{D_e}{T_e} = \frac{e}{m_e \bar{v}_m} \quad (۱۵)$$

¹ Diffusive flux

$$\bar{v}_m = \frac{1}{\bar{n}_e} \int_0^{\infty} v_m(e) e^{\frac{1}{2}} f_0(e) de \quad (16)$$

یک تقریب خوب برای فرکانس برخورد الکترونی به صورت زیر است [۶]:

$$\bar{v}_m = v_1 \frac{P}{T / 293} \quad (17)$$

در این رابطه، مقدار ثابت v_1 برابر با 2×10^7 تعریف می‌شود. معادله انرژی برای ذرات سنگین را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$C_p \frac{dT}{dt} + r u T \frac{dT}{dt} = \sum_i (k_i T) + \sum_i J_i C_{p,i} T + \sum_{r=non\ elec.} e_r \dot{Q}_r + \sum_{l=elastic} e_l \dot{Q}_l \quad (18)$$

چشمه‌های گرمایش گاز در سمت راست معادله (۱۸) شامل موارد زیر است:

- برخوردهای کشسان و غیر کشسان الکترون‌ها
- گرمایش اهمی یونی
- برخورد جنبشی و باز ترکیب سطحی-یونی^۱
- معادلات الکترومغناطیس ماکسول برای پتانسیل برداری مغناطیسی به صورت زیر نوشته می‌شود [۹]:

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (19)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \nabla \times \vec{j} \quad (20)$$

$$\vec{j} = s_e (- \nabla \phi + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (21)$$

$$- \nabla^2 \vec{A} = \vec{j} \quad (22)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (23)$$

در مشعل‌های پلاسمایی، جریان مستقیم گاز در ورودی معمولاً در دمای محیط وارد دستگاه می‌شود. دمای گاز هنگامی که با قوس الکتریکی برهم‌کنش می‌کند با نواختی از مرتبه 10^4 (K/mm) افزایش می‌یابد. این گرمایش شدید سبب انبساط شدید گاز و در نتیجه شتاب گرفتن سریع آن می‌شود [۱۰]. سرعت گاز درون مشعل معمولاً در حدود دو مرتبه بزرگی تغییر می‌کند (از مرتبه 10 (m/s) تا مرتبه 1000 (m/s)). شتاب‌گیری سریع و گرادیان تغییرات دمایی و سرعتی، همراه با نیروهای الکترومغناطیسی وارده، سبب می‌شود تا گاز ناپایدار و آشفته شود. هنگامی که پلازما دستگاه را ترک می‌کند و با گاز سرد برخورد می‌کند نیز آشفته‌گی افزایش می‌یابد [۱۰]. در اینجا، از بین مدل‌های گوناگون موجود، از مدل استاندارد $K - e$ برای وارد

¹ Ion-surface recombination and kinetic impact

۶۴ / شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن

کردن آشفته‌گی استفاده کرده‌ایم. در این مدل اثرات آشفته‌گی در انتقال گرما و نفوذ جرمی با معادلات زیر بیان می‌شود

$$k_{eff} = k + \frac{m_l C_p}{s_t} \quad (24)$$

$$D_{eff} = D + \frac{m_l}{(Sc)_l} \quad (25)$$

در این روابط، مولفه آشفته‌گی گرانی به صورت $m_l = r C_m K^2 / s$ تعریف می‌شود. مدل استاندارد از معادلات انتقال زیر برای K و s استفاده می‌کند [۱۱]:

$$\frac{\partial(rK)}{\partial t} + r(rKV) = r \left(\frac{\partial m_l}{\partial s_k} K + 2m_l E_{ij} E_{ij} - r \right) \quad (26)$$

مقادیر ثابت در مدل K و s ، که با استفاده از جفت‌سازی برای تعداد زیادی از داده‌ها به دست آمده‌اند، برابر هستند با [۱۲]:

$$C_m = 0.09; s_K = 1.00; s_s = 1.30; C_1 = 1.44; C_{2\text{opp}} = 1.92 \quad (27)$$

۲-۳ شرایط مرزی

جدول ۲ جزئیات شرایط مرزی اعمال شده در مدلی را نشان می‌دهد که در این تحقیق استفاده کرده‌ایم. سعی کرده‌ایم که این شرایط مرزی بسیار به آنچه توسط بائوا (Baeva) و همکارانش در [۱۳] ارائه شده است، شبیه باشد تا بتوان مقایسه مطلوبی با نتایج به دست آمده توسط ایشان کرد و از درستی عملکرد مدل اطمینان داشت. در قسمت ورودی، دمای گاز $1000K$ است. دلیل اعمال چنین دمایی به گاز ورودی، ایجاد شرایط مناسب برای برقراری قوس الکتریکی اولیه است که در آزمایشگاه توسط اعمال ولتاژ اولیه شدید به الکترودها ایجاد می‌شود. در خروجی، شرط فشار ثابت (فشار اتمسفری) اعمال شده است. دمای کاتد $1500K$ است. در کاتد و آند، شرط عدم لغزش^۱ در نظر گرفته شده است [۱۴] ($u = v = w = 0$). این شرط تضمین‌کننده گرانیروی شار و تشکیل یک لایه مرزی در سطح الکترودهاست.

در سطح آند، از شرط مرزی همرفتی همراه با ضریب انتقال گرمای $10^5 (W/m^2)$ و دمای آب خنک‌کننده $300K$ استفاده شده است [۱۵]. دمای الکترون‌ها در الکترودها در شرایط تعادل شار گرمایی است، به طوری که دمای الکترون‌ها در یاخته‌های نزدیک به سطح الکترودها به عنوان دمای الکترون‌ها در سطح آن در نظر گرفته می‌شود. مؤلفه‌های مماسی میدان الکتریکی و پتانسیل

¹ No-slip condition

بردارى مغناطیسی، در سطح، هنگامی که ناحیه شبیه سازی در تماس با یک رسانای کامل است، صفر می باشد [۶].

شرط مرزی برون یابی شده برای پتانسیل برداری مغناطیسی ایجاب می کند که مؤلفه های آن، هیچ گرادیانی در راستای عمود بر سطح نداشته باشند [۶]. جریان الکتریکی کل پلاسما $200A$ است. همچنین، قسمت استوانه ای کاتد از نظر گرمایی بی دررو در نظر گرفته شده است و دمای آن شناور بوده و توسط نرم افزار محاسبه می شود [۶].

جدول ۲ خلاصه شرایط مرزی اعمال شده.

	V(m/s)	T(K)	magnetic	Te (eV)	Chemical y
Anode	No slip	300	Perfect conductor	Thermal flux balanced	Zero flux
Cathode	No slip	1500	Perfect conductor	Thermal flux balanced	Zero flux
Inlet	2	1000	EXTRAPOLATION	0.086	Argon
Outlet	Fixed pressure	300	EXTRAPOLATION	$\frac{\partial T_e}{\partial n} = 0$	Argon
Cathode wall	No slip	adiabatic	Zero current density	$\frac{\partial T_e}{\partial n} = 0$	Zero flux

۲-۲ شرایط اولیه

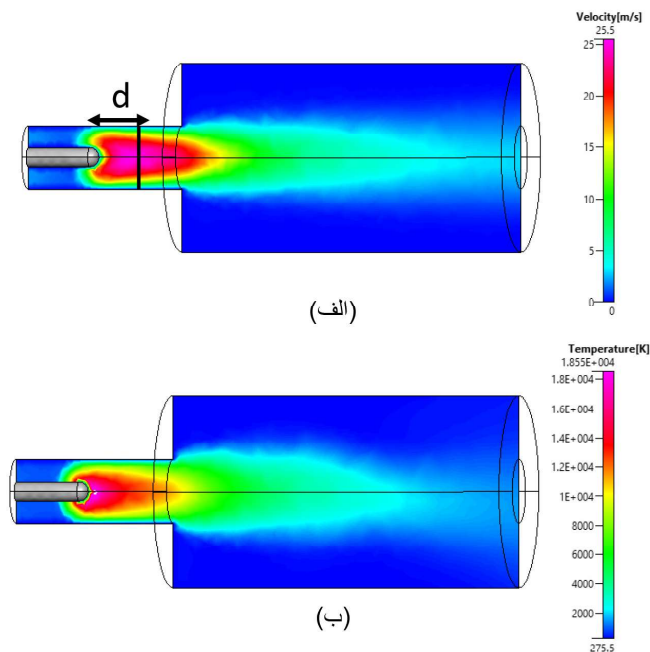
شرایط اولیه را در این مدل به این صورت در نظر گرفته ایم: دمای اولیه الکترون ها $0.2 eV$ است. دمای اولیه محیط $1000K$ ، سرعت گاز $\vec{V} = (1, 0, 0)m/s$ ، ولتاژ الکتریکی اولیه $0 V$ و پتانسیل برداری مغناطیسی اولیه $(0, 0, 0)Vs/m$ در نظر گرفته شده اند. مقادیر اولیه ضرایب مربوط به آشفته گی نیز برابر با $K = 0(m^2/s^2)$ و $D = 0(m^2/s^3)$ می باشند. همچنین، نسبت اولیه یون های آرگون (Ar) به صورت $\frac{0.9999}{0.0001}$ قرار داده شده اند. این نسبت دلخواه است، اما باید طوری در نظر گرفته شود که سبب رسانندگی الکتریکی لازم جهت شارش اولیه جریان و ایجاد قوس الکتریکی اولیه شود.

۳. نتایج

ابتدا در بخش ۱-۳ خصوصیات کلی پلاسما مانند پروفایل سرعت و دما و اثرات غیر تعادلی بیان شده است. بررسی این خصوصیات نشان می دهد که مدل به خوبی عمل می کند. سپس در بخش ۲-۳ تأثیر تغییر سرعت گاز ورودی در سرعت و دمای پلاسما مطالعه شده است.

۱-۳ خصوصیات کلی پلاسما

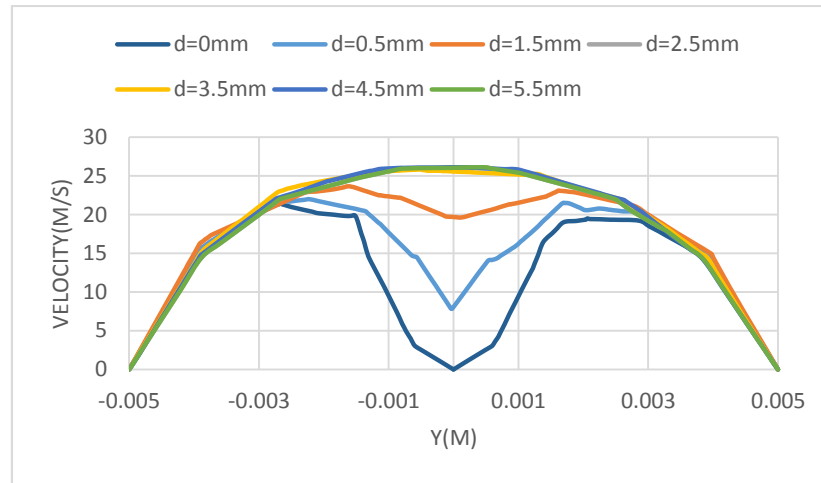
توزیع‌های دما و سرعت در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. گاز ورودی با نزدیک شدن به نوک کاتد یونیزه شده و شتاب می‌گیرد و در نتیجه، سرعت آن به شدت افزایش می‌یابد. بیشترین دمای پلاسما در جلوی کاتد مشاهده می‌شود. توزیع دما بسیار شبیه به آنی است که در [۱۳] گزارش شده است.



شکل ۲ الف) توزیع سرعت و ب) توزیع دمای پلاسما در طول برش عمودی در صفحه $x-y$.

نحوه تغییرات شعاعی سرعت پلاسما بر خطوط کاونده در صفحه $x-y$ و به ازای مقادیر مختلف d در شکل ۳ نشان داده شده است (خط مرجع مشکی در شکل ۲الف). سرعت پلاسما در نوک کاتد و در نزدیکی دیواره آند صفر است. با افزایش فاصله از نوک کاتد (d) سرعت پلاسما به شدت افزایش می‌یابد. این افزایش در طی یک فاصله معین از نوک کاتد صورت می‌گیرد. شتاب گرفتن سریع ذرات گاز در طی این فاصله بر اثر نیروی لورنتس وارد بر ذرات پلاسماست (اثر میکرو^۱) [۱۶].

¹ Maecker effect

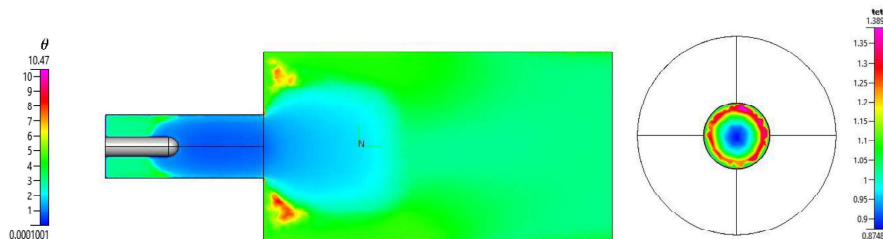


شکل ۳ پروفایل شعاعی سرعت پلازما به ازای مقادیر مختلف فاصله از نوک کاتد (d).

از آنجا که، گرمایش ژول مستقیماً در الکترون‌ها تأثیر می‌گذارد، دمای آنها همیشه بیشتر از دمای یون‌هاست. انحراف از تعادل ترمودینامیکی در هر نقطه درون منطقه شبیه‌سازی را می‌توان توسط نسبت دمای الکترون‌ها به دمای ذرات سنگین نشان داد.

$$q = \frac{T_e}{T_i} \quad (28)$$

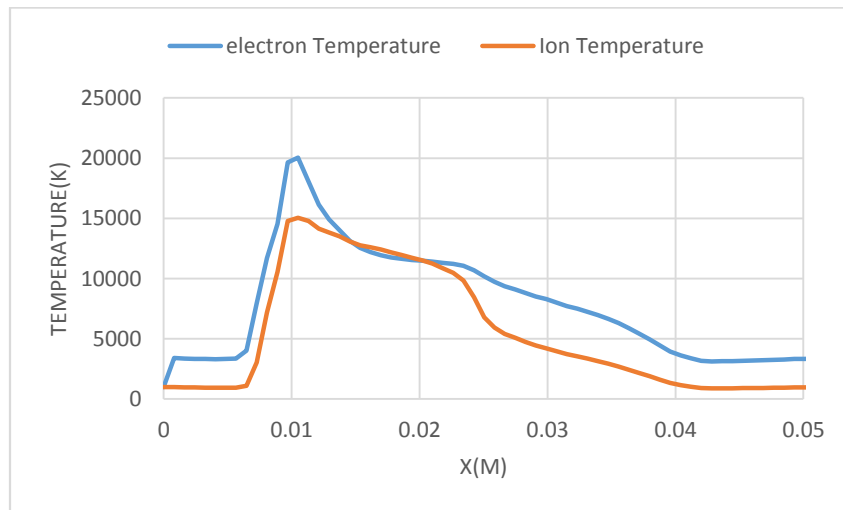
پروفایل تغییرات این کسر در طی یک برش عمودی در صفحه x-y در شکل ۴ نشان داده شده است. در نواحی روبه‌روی کاتد مقدار این نسبت بسیار نزدیک به عدد ۱ است. این بدان معنی است که دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین در این نواحی بسیار به هم نزدیک است. با این همه، در نزدیکی الکترودها و همچنین در جاهایی که پلازما با گاز سرد برهم‌کنش می‌کند دمای آنها با یکدیگر فرق می‌کند. در این نواحی یون‌ها بسیار بیشتر از الکترون‌ها با محیط برهم‌کنش می‌کنند و در نتیجه دمای آنها سریع‌تر کاهش می‌یابد. رفتار مشابهی در [۱۷] و [۱۳] گزارش شده است.



شکل ۴ نمودار تغییرات پارامتر غیر تعادلی θ در طی برش عمودی در صفحه x-y درون مشعل پلاسمایی.

۶۸ / شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل‌شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن

در شکل ۵ پروفایل تغییرات دمای گاز با حرکت درون دستگاه و در طی یک خط فرضی در طول محور Xها نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در بیشتر نواحی، دمای الکترون‌ها بیشتر از دمای ذرات سنگین است. تنها در جلوی کاتد که دمای پلازما بسیار بالاست، دمای الکترون‌ها و ذرات سنگین تقریباً یکسان است. این موضوع ضرورت استفاده از مدل غیر تعادلی را به خوبی نمایان می‌سازد.



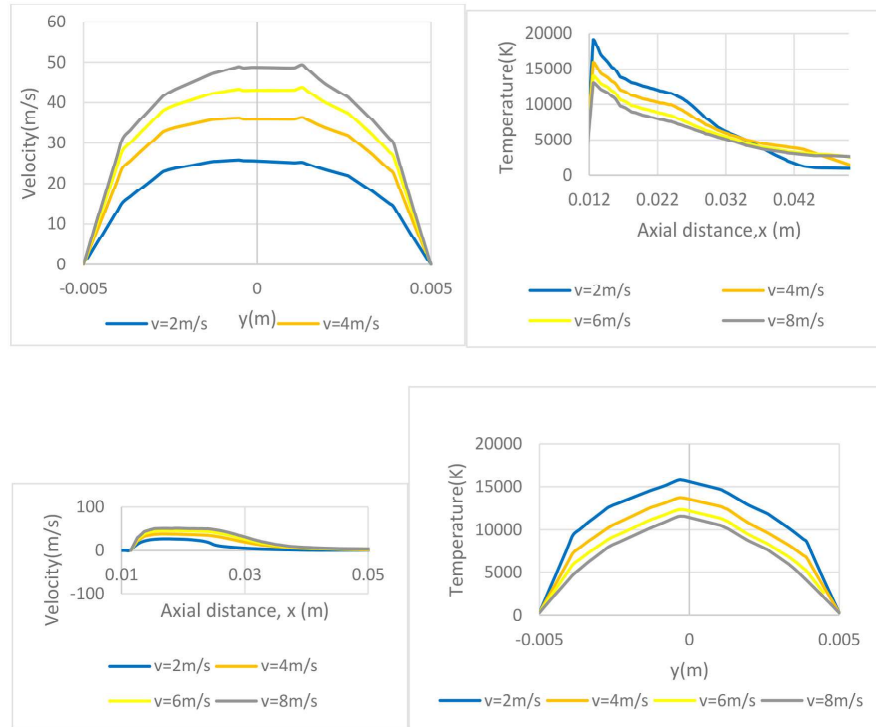
شکل ۵ پروفایل تغییرات دمای گاز با در طول حرکت، در طی یک خط فرضی در طول محور مشعل پلاسمایی.

نتایج این بخش نشان دادند که مدل به خوبی شبیه‌سازی شده است و نتایج حاصل از این مدل به خوبی با نتایج آزمایشگاهی و کارهای شبیه‌سازی قبلی که توسط دیگران انجام شده است هم‌خوانی دارد. در ادامه، تأثیر تغییر سرعت گاز ورودی را در خصوصیات پلازما بررسی می‌کنیم.

۲-۳ تأثیر سرعت گاز ورودی در خصوصیات پلازما

در این بخش، گاز ورودی با سرعت‌های مختلف وارد دستگاه شده و پروفایل‌های سرعت و دمای پلازما به دست آمده است. در شکل ۶، پروفایل‌های شعاعی و محوری سرعت و دمای پلازما درون مشعل پلاسمایی رسم شده است. پروفایل‌های شعاعی در طول یک خط پروب دلخواه در $x=15\text{mm}$ و پروفایل‌های محوری در طول یک خط پروب در $y=0$ در طول محور مشعل، هر دو در صفحه $x-y$ تعیین شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت گاز در ورودی، سرعت پلازما نیز افزایش می‌یابد، در حالی که دمای آن کاهش خواهد یافت. این تغییرات به خوبی در همه

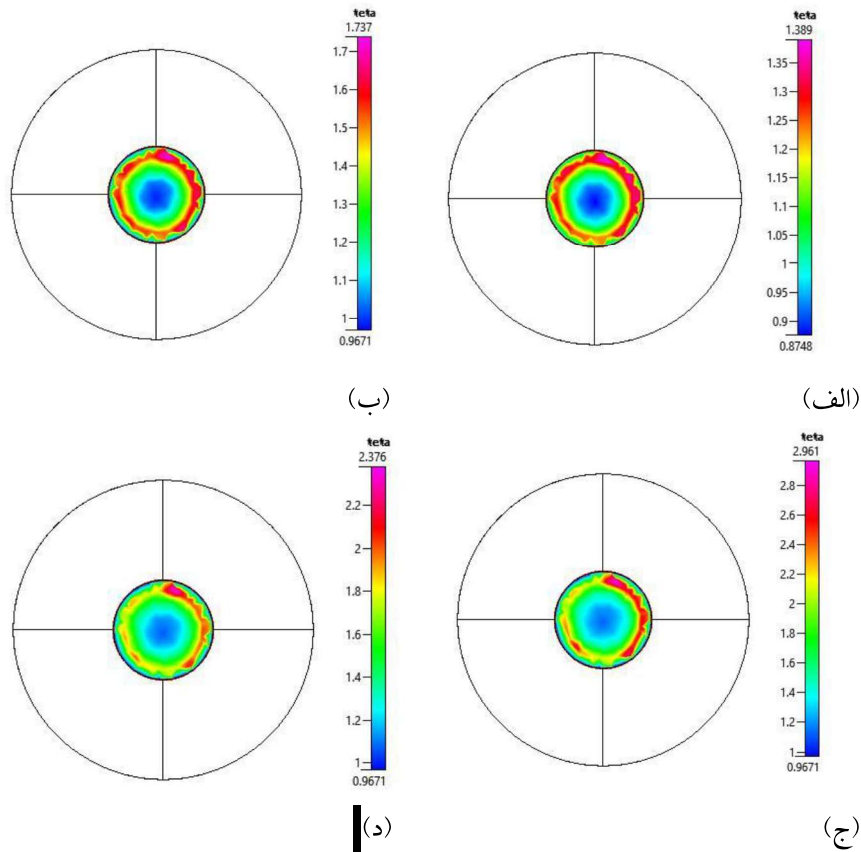
نمودارهای شعاعی و محوری نمایان است. افزایش سرعت گاز در ورودی باعث حرکت سریع تر ذرات گاز در فضای بین الکترودها می شود. این ویژگی سبب کاهش مدت زمان حضور ذرات در این نواحی و در نتیجه کاهش دمای پلاسما می شود.



شکل ۶ پروفایل های شعاعی و محوری دما و سرعت پلاسما به ازای مقادیر مختلف سرعت گاز ورودی.

در شکل ۷ پروفایل تغییرات نسبت دمای الکترون ها به دمای ذرات سنگین (θ) برای مقادیر مختلف سرعت گاز ورودی نشان داده شده است. با افزایش سرعت گاز ورودی انحراف از تعادل ترمودینامیکی در نزدیکی آند به شدت افزایش می یابد. یعنی در نزدیکی دیواره آند نسبت دمای الکترون ها به دمای ذرات سنگین (q) بیشتر می شود. دیدیم که افزایش سرعت گاز ورودی باعث کاهش دمای پلاسما می شود و مطمئناً هر چه دمای پلاسما کمتر باشد انحراف از تعادل ترمودینامیکی آن بیشتر می شود. در نزدیکی دیواره ها نیز همین موضوع صادق است. سرعت بیشتر گاز سبب سریع تر سرد شدن ذرات سنگین با نزدیک شدن به دیواره ها می شود و با توجه به آنکه دمای الکترون ها در طی برخورد هایشان کمتر کاهش می یابد، انحراف از تعادل ترمودینامیکی در این نواحی افزایش خواهد یافت.

۷۰ / شبیه‌سازی ساختار پلاسمای تشکیل شده در مشعل پلاسمایی و بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی در آن



شکل ۷ نسبت دمای الکترون‌ها به دمای ذرات سنگین به ازای مقادیر مختلف سرعت گاز ورودی:

الف) 2(m/s)، ب) 4(m/s)، ج) 6(m/s)، د) 8(m/s).

۴. نتیجه‌گیری

مدل دستگاه مشعل پلاسمایی به صورت سه‌بعدی وابسته به زمان و غیر تعادلی شبیه‌سازی شد. پروفایل دمای پلازما برای سرعت گاز ورودی 2(m/s) به خوبی با آنچه در [۱۳] به دست آمده است همخوانی دارد. همچنین بررسی دیگر خصوصیات پلازما مانند اثرات غیر تعادلی و شتاب‌گیری گاز در جلوی کاتد، صحت عملکرد مدل را به خوبی نشان می‌دهد. پروفایل‌های سرعت و دمای پلازما به ازای مقادیر مختلف سرعت گاز ورودی نیز تعیین شد. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت گاز ورودی، سرعت پلازما افزایش می‌یابد. این در حالی است که دمای پلازما کاهش می‌یابد. افزایش سرعت گاز ورودی باعث حرکت سریع‌تر ذرات گاز در فضای بین الکترودها می‌شود. این اثر سبب کاهش مدت حضور ذرات در این نواحی و در نتیجه کاهش

دمای پلاسما می‌شود. بنابراین، با انتخاب مناسب سرعت اولیه گاز ورودی می‌توان دمای دلخواه را برای فرایندهای مد نظر مانند اسپری پلاسمایی یا برش کاری پلاسمایی، ایجاد کرد. اگرچه تغییر دیگر خصوصیات دستگاه نظیر تغییر هندسه مشعل (تغییر شکل و اندازه الکترودها، نحوه ورود گاز ورودی و ...) نیز عامل مهمی برای تعیین سرعت و دمای پلاسماست. کاهش دمای پلاسما بر اثر افزایش سرعت گاز ورودی، باعث افزایش انحراف ترمودینامیکی شد. در نزدیکی آند کاهش دمای ذرات سنگین بیشتر از کاهش دمای الکترونهاست و افزایش سرعت گاز ورودی این روند را سرعت می‌بخشد. سرعت بیشتر گاز سبب سریع‌تر سرد شدن ذرات سنگین با نزدیک شدن به دیواره‌ها می‌شود و با توجه به آنکه دمای الکترون‌ها در طی برخوردشان کمتر کاهش می‌یابد، انحراف از تعادل ترمودینامیکی در این نواحی افزایش خواهد یافت.

منابع

- [1] Chau S. W., Hsu K. L., Lin D. L., Chen J. S., and Tzeng C. C., Modeling and experimental validation of a 1.2 MW DC transferred well-type plasma torch, *Comput. Phys. Commun.*, **177**, 114-117, 2007.
- [2] Liang P., and Groll R., Numerical Study of Plasma-Electrode Interaction during Arc Discharge in a DC Plasma Torch, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **46**, 363-372, 2018.
- [3] Guo Z., Yin S., Liao H., and Gu S., Three-dimensional simulation of an argon-hydrogen DC non-transferred arc plasma torch, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **80**, 644-652, 2015.
- [4] Chazelas C., Trelles J. P., Choquet I., and Vardelle A., Main Issues for a Fully Predictive Plasma Spray Torch Model and Numerical Considerations, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **37**, 627-651, 2017.
- [5] Baeva M., Kozakov R., Gorchakov S., and Uhrlandt D., Two-temperature chemically non-equilibrium modelling of transferred arcs, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **21**, 1-13, 2012.
- [6] CFD-ACE+ v2014.0: Modules. Manual Part I, <https://www.esi-group.com>, Available in 14 Mar 2017.
- [7] Gharaeinia M., Saviz S., and Sari A. H., Influence of the inlet gas velocity components on the survival of the vertex of gas in the plasma torch, *J. Theor. Appl. Phys.*, **14**, 1-10, 2020.
- [8] Bird R. B., Stewart W.E., and Lightfoot E.N., *Transport phenomena*, Wiley, New York, **2**, 27-40, 2006.
- [9] Chyou Y. P., and Pfender E., Modeling of plasma jets with superimposed vortex flow, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **9**, 291-328, 1989.
- [10] Trelles J. P., Chazelas C., Vardelle A., and Heberlein J. V. R., Arc plasma torch modeling, *J. Therm. Spray Technol.*, **18**, 728-752, 2009.
- [11] Versteeg H. K., and Malaskeker W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Pearson, London, **1**, 100-150, 1995.
- [12] Chigier N. A., and Chervinsky A., Experimental investigation of swirling vortex motion in jets, *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, **34**, 443-451, 1964.
- [13] Baeva M., and Uhrlandt D., Non-equilibrium simulation of the spatial and temporal behavior of a magnetically rotating arc in argon, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20**, 1-10, 2011.
- [14] Felipini C. L., and Pimenta M. M., Some numerical simulation results of swirling flow in d.c. plasma torch, *J. Phys. Conf. Ser.*, **591**, 1-13, 2015.

- [15] Guo Z., Yin S., Qian Z., Liao H., and Gu S., Effect of the deviation of the current density profile center on the three-dimensional non-transferred arc plasma torch, *Comput. Fluids*, **114**, 163–171, 2015.
- [16] Baeva M., Uhrlandt D., Benilov M. S., and Cunha M. D., Comparing two non-equilibrium approaches to modelling of a free-burning arc, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **22**, 1-9, 2013.
- [17] ModirKhazeni S. M., and Trelles J. P., Towards a comprehensive modelling and simulation approach for turbulent non-equilibrium plasma flows, *Proceedings of 22th international symposium on plasma chemistry*, Belgium, 5-10 July, 2015.