

Optoelectronic

Open
Access

ORIGINAL ARTICLE

Finite Element Analysis of Argon Gas Plasma Produced by Inductively Coupled Plasma Method with Variable Input Power, Coil Position and Dielectric Thickness

Elnaz. Poorreza¹, Noushin Dadashzadeh Gargari^{2*}

1 Ph.D., Electrical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2 Assistant Professor, Department of Electrical Engineering Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran.

Correspondence

Noushin Dadashzadeh Gargari

Email: noushindadashzadeh@yahoo.com

How to cite

Poorreza, E., Dadashzadeh Gargari, N. (2023). Finite element analysis of argon gas plasma produced by inductively coupled plasma method with variable input power, coil position and dielectric thickness, Optoelectronic, 6(1), 33-40.

ABSTRACT

Inductively coupled plasma is widely used in applications such as material processing and microelectronic device fabrication. However, their electromagnetic properties have not been fully investigated. Therefore, in this research, 2D finite element simulations, time-dependent, have been performed. Profiles of magnetic field, electron density, and temperature for argon gas by applying variable power of 750 W, 950 W, 1100 W, and 1200 W have been demonstrated. In a comparative study, we investigated the effect of changing input power on plasma parameters and the relevant results were shown. It was shown that with increasing power, the electron density and temperature in the working chamber increase. In the following, with a fixed power of 1200 watts as an optimized power, we investigated the effect of moving the position of the coils and reducing the thickness of the dielectric layer on the magnetic field flux, electron density and temperature and it was shown that by changing the position of the coils, the magnetic flux, electron density and reactor temperature do not change. But with the decrease in the thickness of the dielectric layer, the magnetic field flux, electron density, and temperature decrease to a negligible amount.

KEYWORDS

Chemical Reaction, High Temperature, Inductively Coupled Plasma, Finite Element Method, Electron.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

تجزیه و تحلیل المان محدود پلاسمای گاز آرگون تولید شده به روش پلاسمای جفت شده القایی با توان ورودی، موقعیت سیم پیچ و ضخامت دی الکتریک متغیر

الناز پوررضا¹، نوشین داداش زاده گرگری^{2*}

چکیده

پلاسمای جفت شده القایی¹ به طور گسترده در کاربردهایی مانند پردازش مواد و ساخت ادوات میکروالکترونیک استفاده می شود. با این حال، خواص الکترومغناطیسی آنها به طور کامل بررسی نشده است. بنابراین؛ در این پژوهش، شبیه سازی های المان محدود (2 بعدی)، وابسته به زمان انجام داده شده است. نمودارهای میدان مغناطیسی، چگالی الکترون و دما را برای گاز آرگون با اعمال توان متغیر 750 وات، 950 وات، 1100 وات و 1200 وات ارائه شده است. در یک مطالعه مقایسه ای، اثر تغییر توان ورودی بر پارامترهای پلاسمای را بررسی کردیم و نتایج مربوطه نشان داده شد. نشان داده شد که با افزایش توان، چگالی الکترون و دما در محفظه کار افزایش می یابد. در ادامه، با توان ثابت 1200 وات به عنوان یک توان بهینه شده، تأثیر جابه جایی موقعیت سیم پیچ ها و کاهش ضخامت لایه دی الکتریک بر شار میدان مغناطیسی، چگالی الکترون و دما را بررسی کردیم و نشان دادیم که با تغییر مکان سیم پیچ ها، شار میدان مغناطیسی، چگالی الکترون و دمای راکتور تغییری نمی کند. اما با کاهش ضخامت لایه دی الکتریک شار میدان مغناطیسی، چگالی الکترون و دما به مقدار ناچیزی کاهش می یابد.

واژه های کلیدی

واکنش شیمیایی، دمای بالا، پلاسمای جفت شده القایی، روش اجزای محدود، دمای الکترون.

1 دکتری، دانشکده مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.
2 استادیار، گروه آموزشی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارس، شهر جلفا، ایران.

نویسنده مسئول:
نوشین داداش زاده گرگری
noushindahashzadeh@yahoo.com
رایانامه:

استناد به این مقاله:

الناز پوررضا، نوشین داداش زاده گرگری (1402). تجزیه و تحلیل المان محدود پلاسمای گاز آرگون تولید شده به روش پلاسمای جفت شده القایی با توان ورودی، موقعیت سیم پیچ و ضخامت دی الکتریک. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 33-40.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

یک پلاسمای جفت شده القایی¹ را می‌توان با هدایت انرژی یک منبع فرکانس رادیویی² به یک گاز مناسب مانند هلیوم، آرگون و نیتروژن تشکیل داد [1]. عبور جریان الکتریکی با فرکانس بالا از یک سیم‌پیچ القایی خنک شده، میدان مغناطیسی را در صفحه عمودی سیم‌پیچ ایجاد می‌کند. یونیزاسیون گازی مانند آرگون توسط جریان یا جرقه‌ای از سیم‌پیچ آغاز می‌شود. یون‌های تولید شده و الکترون‌های مربوط به آن‌ها با میدان مغناطیسی برهم‌کنش می‌کنند، که منجر به تولید انرژی کافی برای یونیزه کردن اتم‌های آرگون بیشتر از طریق تحریک برخورد می‌شود. ویژگی منحصر به فرد پلاسمای جفت شده القایی به این واقعیت وابسته است که قادر است تعداد زیادی از نمونه‌ها را در مدت زمان کوتاهی با تشخیص بسیار خوب اکثر عناصر تجزیه و تحلیل کند. پلاسمای جفت شده القایی که در بازار استفاده می‌شود، اغلب به سیستم‌های تشخیص، مانند طیف‌سنجی جرمی پلاσμα جفت شده القایی³ (ICP-MS) و طیف‌سنجی نشر نوری پلاσμα جفت شده القایی⁴ (ICP-OES) متصل می‌شوند [2-7]. طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی یک تکنیک آنالیز با ظرفیت تشخیص بیشتر عناصر در سطوح میلی گرم تا نانوگرم بر لیتر است. از آن در کاربردهای مختلفی مانند صنایع، نظارت بر محیط زیست، متالورژی، تجزیه و تحلیل دارویی و تحقیقات بالینی استفاده می‌شود [8]. این تکنیک، یک منبع یونیزاسیون است که یک نمونه را به طور کامل به عناصر تشکیل دهنده آن تجزیه می‌کند و آن عناصر را به یون تبدیل می‌کند. معمولاً از گاز آرگون تشکیل شده است و انرژی با استفاده از یک سیم‌پیچ القایی برای تشکیل پلاσμα به آن جفت می‌شود [9، 10]. طیف‌سنجی نشر نوری پلاσμα جفت شده القایی ICP-OES یک روش تحلیلی است که برای تعیین مقدار عناصر خاص در یک نمونه استفاده می‌شود. پدیده ICP-OES از این اصل استفاده می‌کند که اتم‌ها و یون‌ها می‌توانند مقدار انرژی کافی را برای انتقال الکترون‌ها از حالت پایه به سطح یک حالت برانگیخته جذب کنند [11-13].

هنگامی که الکترون با حرکت از انرژی بالاتر به انرژی پایین‌تر، معمولاً حالت پایه، سطح خود را تغییر می‌دهد، نوری با طول موج بسیار خاص ساطع می‌کند. نوع اتم (یعنی کدام عنصر است) و سطوح انرژی که در آن الکترون بین آنها حرکت می‌کند، با طول موج نور ساطع شده تعیین می‌شود. انتشارات رخدادی، از

طول موج‌های مختلف نور مطابق با غلظت عناصر موجود در نمونه است [14]. پلاسمای تولید شده یک منبع با دمای بالا از گاز یونیزه شده مانند آرگون است. پلاσμα توسط جفت القایی سیم‌پیچ‌های الکتریکی در محدوده فرکانس‌های مگاهرتز تولید و حفظ می‌شود. دمای منبع در محدوده 6000 تا 10000 کلوین است [15].

یونیزاسیون گاز آرگون در یک میدان شدید آغاز می‌شود و در یک الگوی متقارن چرخشی خاص به سمت میدان مغناطیسی سیم‌پیچ RF جریان می‌یابد. پلاسمای پایدار و دمای بالا در حدود 7000 کلوین است در نتیجه برخوردهای غیر کشسان بین اتم‌های خنثی آرگون و ذرات باردار ایجاد می‌شود [16].

به طور گسترده‌ای در کاربردهایی از جمله تشخیص فلزات در شراب، آرسنیک در غذا استفاده می‌شود. در تکنیک‌هایی برای آزمایش آلودگی فلزات در آب آشامیدنی و فاضلاب استفاده می‌شود [11، 17، 18]. مکانیسم اصلی جذب انرژی در ICP گرمایش ژول⁵ است که در آن الکترون‌هایی که توسط میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند بارها با ذرات دیگر برخورد می‌کنند. بهره‌وری انرژی نقش کلیدی در ICP ایفا می‌کند. یک پنجره دی‌الکتریک ضخیم بازده انرژی را کاهش می‌دهد زیرا اندوکنانس متقابل بین سیم‌پیچ چند مارپیچ و پلاσμα کاهش می‌یابد. در نتیجه جریان از سیم‌پیچ عبور می‌کند و تلفات مسی افزایش می‌یابد [11].

در این پژوهش انجام شده، مقایسه محاسبات پارامترهای پلاσμα در یک پلاسمای جفت شده القایی و تأثیر افزایش توان سیم‌پیچ بر روی پارامترهای پلاσμα بررسی شده است. معادلات اصلی، مدل پیشنهادی و همچنین هندسه پلاσμα آورده شده است. محاسبات در یک مدل متقارن محوری دوبعدی تحت شرایط زیر انجام شد: ابتدا از توان سیم‌پیچ 750 وات استفاده می‌شود، سپس برای گنجاندن توان سیم‌پیچ بیشتر، توان 950 وات، 1100 وات و 1200 وات تنظیم می‌شود. نتایج شبیه‌سازی (به عنوان مثال، چگالی الکترون، توزیع دما، میدان مغناطیسی) ارائه و تجزیه و تحلیل می‌شود. برای محاسبه تابع توزیع انرژی الکترون EEDF و تحرک الکترون کاهش یافته، از حل کننده معادله بولتزمن استفاده شده است. بر اساس نتایج، افزایش توان اعمالی به طور متوسط دما و چگالی بار الکترون را افزایش می‌دهد. طبق کارهای سایر پژوهشگران، اگرچه تلاش‌های زیادی برای مطالعه عملکرد بهینه ICP‌ها انجام شده است، اما در رابطه با شبیه‌سازی کار کمی انجام شده است. برای داشتن بینش

1 Inductively Coupled Plasma

2 Radio Frequency

3 Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry

4 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry

در اینجا e الکترون است، Ar ذره آرگون، Ars نشان دهنده آرگون برانگیخته و Ar^+ یون آرگون است.

نتایج و بحث

تاثیر افزایش توان سیم پیچ بر پارامترهای پلازما

در این کار، تمامی معادلات ارائه شده با استفاده از روش اجزای محدود حل شده است. به طور کلی برای بهبود و بهینه سازی هر سیستم و درک بهتر سیستم باید شبیه سازی آن کار انجام شود. بسیار مهم است که پارامترهای پلازما با دقت بیشتری کنترل گردند، تا این نیازها برآورده شود. علاوه بر این، مدل های عددی برای افزایش درک ما از فرایندها و تأیید مطالعات تجربی مفید هستند.

معادلات با تکنیک فرمول لگاریتم المان محدود با استفاده از مش های مثلثی غیر یکنواخت گسسته می شوند. ماژول های فیزیک در مدل شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفتند که شامل پلازما، میدان مغناطیسی، جریان آرام و انتقال حرارت در سیالات است. توسط ماژول میدان مغناطیسی، معادلات ماکسول برای تعریف میدان های الکترومغناطیسی تولید شده توسط جریان متناوب در سیم پیچ حل می شود. یک هندسه استوانه ای متقارن محوری دو بعدی در مدل استفاده می شود تا در زمان مورد استفاده برای شبیه سازی ریاضی، صرفه جویی شود.

در سیستم ICP، توان به صورت الکترومغناطیسی توسط سیم پیچ های خارجی به سیستم تحویل داده می شود. فرکانس های اعمال شده روی سیم پیچ های چند دور بسته به کاربرد و شرایطی مانند فشار و توان در محدوده صدها کیلوهرتز تا ده ها مگاهرتز است. الکترون های داخل پلازما توسط میدان مغناطیسی با فرکانس بالا شتاب می گیرند. یک عامل مهم برای درک انتقال اساسی پلازما در این پیکربندی ها، اندازه گیری مقادیری مانند چگالی پلازما، میدان مغناطیسی تولید شده، جریان های داخلی و میدان الکتریکی در سراسر محفظه پلازما است. این مقادیر مقدار رسوب توان را تعیین می کند که یکنواختی فرآیند را تعیین می کند.

همان طور که در شکل 1 نشان داده شده است، طول لوله 13 سانتی متر و عرض آن 10 سانتی متر است. کلاف دارای 5 دور است و فاصله بین دو پیچ سیم پیچ مجاور تقریباً به اندازه قطر سیم پیچ های دایروی شکل است. ضخامت مواد دی الکتریک 0/008 متر در نظر گرفته شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، گاز آرگون از پایین محفظه وارد شده و از بالا خارج می شود. برخورد الاستیک و غیر کشسان گونه ها باعث گرم شدن گاز می شود. برخوردهای غیر ارتجاعی باعث گرم شدن بخش عمده ای از گاز می شود. برای گاز آرگون یونیزه شده، هفت

بهتر در مورد ICP به مدل سازی و شبیه سازی های زیر می پردازیم.

معادلات حاکم

چگالی الکترون و انرژی متوسط الکترون با حل معادله رانش - انتشار¹ با معادلات زیر تعیین می شود. (1) و (2) [22, 21]

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e) + \nabla \cdot [-(n_e(\mu_e \cdot E) - D_e \nabla n_e) + E \cdot \quad (2)$$

$$\Gamma_e = R_e$$

در اینجا، n_e تعداد الکترون ها را نشان می دهد μ_e تحرک الکترون است E میدان الکتریکی، R_e منبع الکترون است، D_e انتشار الکترون است، n_e انرژی الکترون است، R_e اتلاف انرژی در اثر برخوردهای غیر کشسان است، D_e انتشار انرژی الکترون، Γ_e جریان چگالی الکترون است. انتشار الکترون ها به تحرک آنها بستگی دارد و با معادله (3) تخمین زده می شود. انتشار الکترون، تحرک انرژی و انتشار انرژی با معادله (3) تخمین زده می شود.

$$\mu_e = 5/3 \mu_e, D_e = \mu_e T_e, D_e = \mu_e T_e \quad (3)$$

در اینجا T_e دمای الکترون را نشان می دهد.

معادله تبادل حرارت برای دمای گاز سنگین با معادله زیر تخمین زده می شود:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \nabla T = \nabla(k \nabla T) + P_j - Q_r \quad (4)$$

در اینجا ρ چگالی گاز در حال کار را نشان می دهد، C_p

جدول 1. مکانیسم برخورد اصلی در فرآیند تخلیه پلاسمای آرگون. [22]

واکنش	فرمول	نوع	$\Delta E(eV)$
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	الاستیک	0
2	$e+Ar \Rightarrow e+Ar_s$	تحرک شدگی	11/5
3	$e+Ar_s \Rightarrow e+Ar$	سوپر الاستیک	-11/5
4	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	یونیزه شدن	15/8
5	$e+Ar_s \Rightarrow 2e+Ar^+$	یونیزه شدن	4/24
6	$Ar_s+Ar_s \Rightarrow e+Ar+Ar^+$	Penning ionization	-
7	$Ar_s+Ar \Rightarrow Ar+Ar$	Metastable quenching	-

گرمای ویژه را در فشار ثابت، T دما، u سرعت، k هدایت حرارتی، P_j و Q_r به ترتیب گرمایش ژول و گرمایش برخورد هستند [23].

در این مدل، محاسبه یک مکانیسم شیمیایی در داخل راکتور که شامل 9 واکنش است که 7 واکنش حجمی است، بسیار مهم است.

جدول 2. دو واکنش سطحی باقی مانده به شرح زیر است [22]

[25و24]

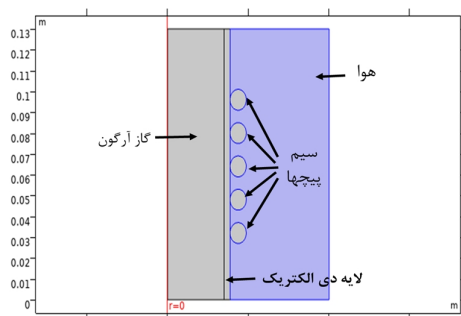
واکنش	فرمول	ثابت چسبندگی ²
1	$Ar_s \Rightarrow Ar$	1
2	$Ar^+ \Rightarrow Ar$	1

1 Drift-Diffusion

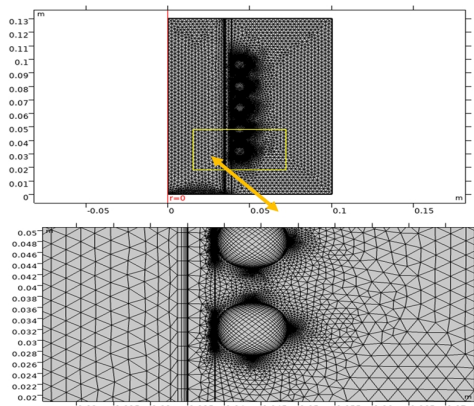
2 Sticking Coefficient

ورودی و خروجی محفظه با رنگ آبی، غلظت پلاسمای تولید شده به دلیل فاصله آن از سیم‌پیچ‌ها در حداقل مقدار است. در نتیجه، قدرت تزریق پلاسمای بالا کارایی بهتر راکتور را تضمین می‌کند.

شکل 6 خطوط توزیع دما در داخل راکتور و وابستگی آنها به تغییر توان را نشان می‌دهد. با افزایش قدرت یا توان ورودی، دما افزایش واضحی دارد. مشاهده می‌شود که چگالی الکترون و دمای گاز شکل توزیع متقارن را نشان می‌دهد. هنگامی که مقدار توان تغییر می‌کند، کمیت‌های فیزیکی مربوط به آن به وضوح تغییر می‌کند. با توجه به شکل بیشینه دما در محدوده 1.34×10^3 تا 1.57×10^3 است.



شکل 1. هندسه راکتور شبیه‌سازی شده.



شکل 2. شبیه‌سازی انجام شده راکتور.

بررسی تاثیر جابه‌جایی موقعیت سیم‌پیچ‌ها بر پارامترهای پلازما

در این بخش از شبیه‌سازی، به بررسی تاثیر جابه‌جایی موقعیت سیم‌پیچ‌ها بر پارامترهای پلازما می‌پردازیم. همان طور که در شکل 7 نشان داده شده است، در ابتدا، سیم‌پیچ‌هایی که تقریباً در وسط کانال قرار دارند، را به سمت ورودی و در مرحله بعد، همین سیم‌پیچ‌ها را به سمت خروجی جابه‌جا می‌کنیم. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در شکل 7، 8 و 9، مشاهده می‌گردد که جابه‌جایی سیم‌پیچ‌ها تاثیری بر پارامترهای پلازما از جمله چگالی الکترون، میدان مغناطیسی و دمای الکترون ندارد.

نوع واکنش الکتروشیمیایی و دو نوع واکنش سطحی روی دیواره راکتور وجود دارد. انواع و ضرایب واکنش‌های الکتروشیمیایی در جدول 1 و واکنش‌های سطحی روی دیواره لوله در جدول 2 نشان داده شده است.

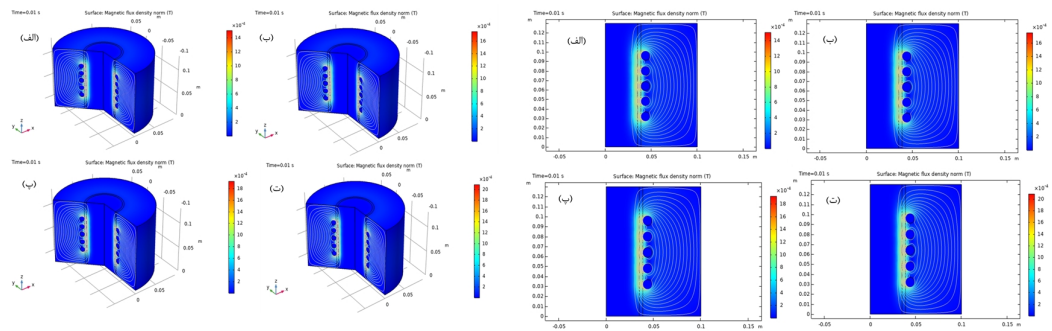
شکل 2 مش‌بندی انجام شده برای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای صرفه‌جویی در زمان محاسبات از مش‌بندی مثلثی استفاده شده است. جزییات موارد مربوط به مش‌بندی در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 3. مش‌بندی انجام شده سیستم	
بیشترین اندازه المان	0/00026
کمترین اندازه المان	9/75
بیشترین نرخ رشد المان	1/2
فاکتور خمش	0/25
رزولوشن مناطق باریک	1

هنگامی که سیستم برای اولین بار فعال می‌شود، پس از حدود 1 میکرو ثانیه، احتراق پلازما شروع می‌شود و با تقسیم اتم‌های گاز خنثی به الکترون‌ها و یون‌ها، الکترون‌های داخل لوله، قدرت بیشتری جذب کرده و گاز خنثی را بیشتر یونیزه می‌کنند. چگالی الکترون محلی در مرکز به حداکثر مقدار می‌رسد و سپس با انتشار الکترون‌ها به حالت پایدار می‌رسد. تکامل توزیع چگالی الکترون در طول زمان با پارامترهایی مانند فشار و توان جذب شده تغییر می‌کند.

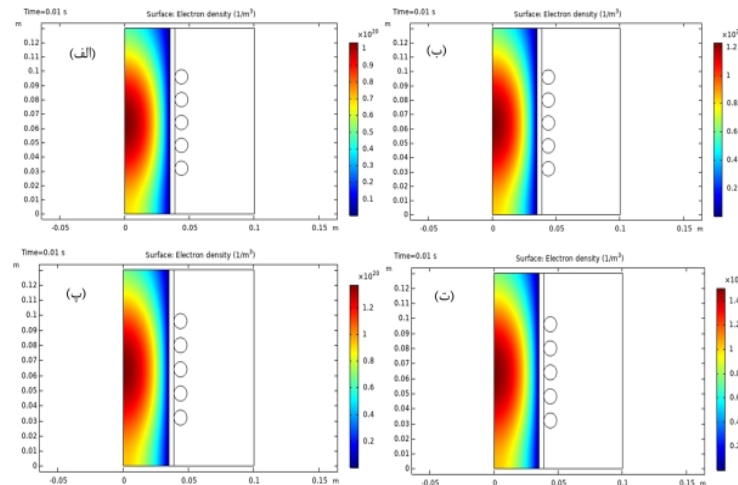
شکل 3 نمودارهای چگالی شار مغناطیسی را نشان می‌دهد که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، 1100 وات (د) 1200 وات تغییر می‌کند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش توان، چگالی شار مغناطیسی در طول زمان افزایش می‌یابد. همان طور که انتظار می‌رود، بیشترین مقدار میدان مغناطیسی نزدیک سیم‌پیچ‌های مسی است. به عبارت دیگر، افزایش قدرت تزریق، حجم تخلیه بیشتری را به همراه دارد و در نتیجه افزایش متناظری در شار مغناطیسی حاصل خواهد شد. بیشترین مقدار در حدود 0/0001 تسلا است. در شکل 4 نتایج به‌دست آمده میدان مغناطیسی، به صورت سه بعدی نشان داده شده است.

شکل 5 نمودارهای چگالی الکترون را زمانی که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، (ج) 1100 وات و (د) 1200 وات تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار توان، الکترون چگالی از $1 \times 10^{20} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ به $1.4 \times 10^{20} \text{ (m}^{-3}\text{)}$ افزایش می‌یابد. با توجه به این شکل، غلظت پلازما عمدتاً در ناحیه مرکزی راکتور است و با نزدیک شدن به دیواره‌ها به دلیل تلفات دیواره‌ها، غلظت آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که چگالی الکترون در مناطقی که در مجاورت نواحی سیم‌پیچ قرار دارند کمی بیشتر است. در نزدیکی

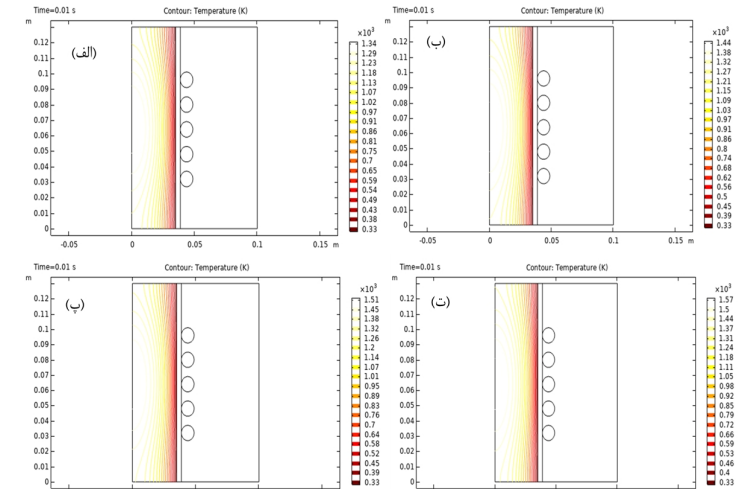


شکل 3. نمودارهای چگالی شار مغناطیسی زمانی که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، 1100 وات (د) 1200 وات تغییر می کند.

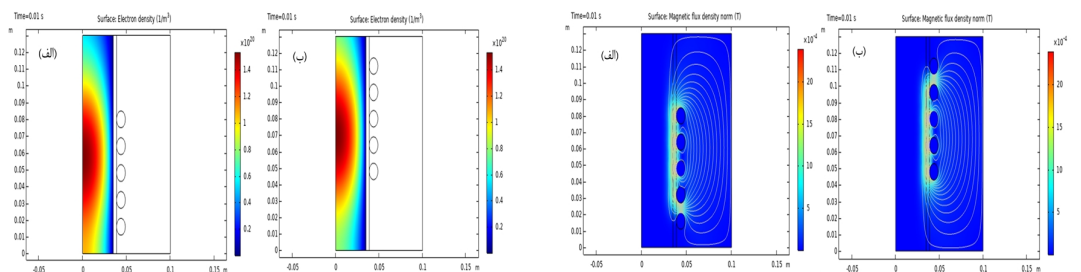
شکل 4. نمودارهای سه بعدی چگالی شار مغناطیسی زمانی که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، 1100 وات (د) 1200 وات تغییر می کند.



شکل 5. نمودارهای چگالی الکترون زمانی که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، 1100 وات (د) 1200 وات تغییر می کند.

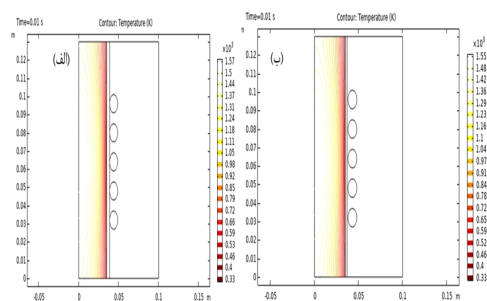


شکل 6. نمودارهای دمای درونی راکتور زمانی که توان ورودی بین (الف) 750 وات، (ب) 950 وات، 1100 وات (د) 1200 وات تغییر می کند.



شکل 7. بررسی تاثیر جابه جایی موقعیت سیم پیچ ها بر میدان مغناطیسی تولیدی در راکتور.

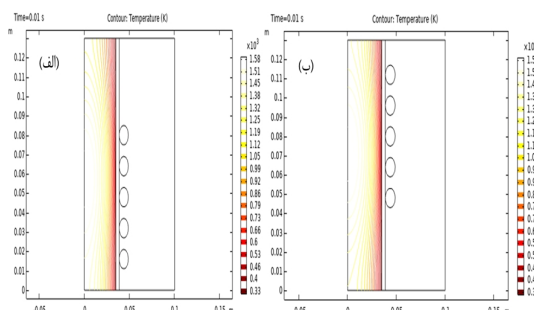
شکل 8. بررسی تاثیر جابه جایی موقعیت سیم پیچ ها بر چگالی الکترون.



شکل 12. بررسی تأثیر کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک بر دمای درونی راکتور.

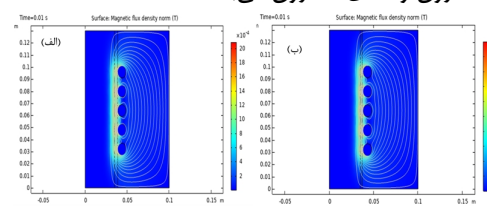
نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی دستگاه ICP یک ابزار مهم است که درک بهتر مکانیسم ICP را امکان‌پذیر می‌سازد. شبیه‌سازی‌های این دستگاه‌ها بارها در کارهای پژوهشگران گزارش شده است. در این تحقیق ابتدا در یک مطالعه مقایسه‌ای، سیستم پلاسمای جفت شده القایی بررسی می‌شود. نقش اصلی توان متغیر اعمال شده بر روی سیم‌پیچ‌ها برجسته شد. پارامترهای پلازما مانند توزیع چگالی الکترون، دمای داخل راکتور با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به دست می‌آیند. نتیجه‌گیری شد که با افزایش توان تزریقی روی سیم‌پیچ‌ها، پارامترهای پلازما مانند چگالی الکترون و دمای داخل به ترتیب افزایش می‌یابد. در بخش بعدی، به عنوان یک کار جدید، هنگامی که توان در 1200 وات ثابت شد، ابتدا تأثیر تغییر موقعیت سیم‌پیچ‌ها بر پارامترهای پلازما را بررسی کردیم و دیدیم که این تغییر تأثیری بر پارامترهای پلازما ندارد. در قسمت بعد و بخش نوآوری پژوهش، تأثیر تغییر ضخامت دی‌الکتریک بر مقدار چگالی الکترون و دمای محفظه بررسی شد و نتایج نشان داده شد. مشاهده شد که با کاهش ضخامت ماده دی‌الکتریک، چگالی الکترون، میدان مغناطیسی و دما به میزان ناچیزی کاهش می‌یابد.

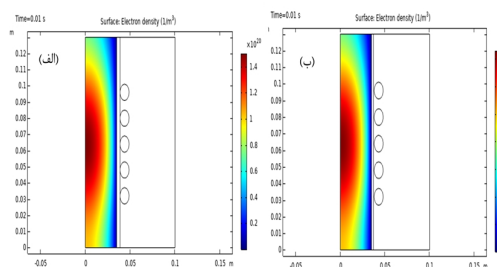


شکل 9. بررسی تأثیر جابه‌جایی موقعیت سیم‌پیچ‌ها بر دمای درونی راکتور.
بررسی تأثیر کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک بر پارامترهای پلازما

در این بخش از شبیه‌سازی، به بررسی تأثیر کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک، هنگامی که توان در 1200 وات ثابت شد، بر پارامترهای پلازما می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل 10، 11 و 12 نشان داده شده است، ضخامت لایه دی‌الکتریک را نصف می‌کنیم. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، مشاهده می‌گردد که کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک تأثیر کمی بر پارامترهای پلازما از جمله چگالی الکترون، میدان مغناطیسی و دمای الکترون دارد. این تأثیر کم در راستای کاهش میدان مغناطیسی، چگالی الکترون و دمای الکترون می‌باشد.



شکل 10. بررسی تأثیر کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک بر میدان مغناطیسی تولیدی در راکتور.



شکل 11. بررسی تأثیر کاهش ضخامت لایه دی‌الکتریک بر چگالی الکترون.

References

- [1] S. C. Wilschefske and M. R. Baxter, Inductively coupled plasma mass spectrometry: introduction to analytical aspects, The Clinical Biochemist Reviews, 40, 115, 2019.
- [2] M. Pan, Y. Zang, X. Zhou, Y. Lu, J. Xiong, H. Li, L. Feng, Inductively coupled plasma mass spectrometry for metrometallomics: The study of quantitative metalloproteins, At. Spectrosc, 42, 262-270, 2021.
- [3] M. Isupov, A. Fedoseev, G. Sukhinin, and I.

- Ulanov, Experimental and theoretical study of a low-frequency inductive discharge of the transformer type, Thermophysics and Aeromechanics, 21, 5, 651-662, 2014.
- [4] H.-S. Park, Study of slag content and properties after plasma melting of incineration ash, Thermophysics and Aeromechanics, 18, 313-321, 2011.
- [5] J. Chen, R. Wang, M. Ma, L. Gao, B. Zhao, and M. Xu, Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS)-based

- strategies applied for the analysis of metal-binding protein in biological samples: an update on recent advances, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 414, 7023-7033, 2022.
- [6] A. O. Brezmes and C. Breitkopf, Fast and reliable simulations of argon inductively coupled plasma using COMSOL, *Vacuum*, 116, 65-72, 2015.
- [7] M. V. e. Isupov and I. y. M. Ulanov, Analysis of the parameters of plasma of an inductively coupled discharge in neon, *High temperature*, 43, 169-176, 2005.
- [8] K. Flores et al., Environmental applications and recent innovations in single particle inductively coupled plasma mass spectrometry (SP-ICP-MS), *Applied Spectroscopy Reviews*, 56, 1-26, 2021.
- [9] B. Michalke, Review about Powerful Combinations of Advanced and Hyphenated Sample Introduction Techniques with Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) for Elucidating Trace Element Species in Pathologic Conditions on a Molecular Level, *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 6109, 2022.
- [10] M. V. e. Isupov, A. V. Fedoseev, G. I. Sukhinin, and I. y. M. Ulanov, An investigation of electrophysical and thermophysical characteristics of low-frequency low-pressure inductive discharge of transformation type, *High temperature*, 53, 179-187, 2015.
- [11] S. R. Khan, B. Sharma, P. A. Chawla, and R. Bhatia, Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES): a powerful analytical technique for elemental analysis, *Food Analytical Methods*, 1-23, 2022.
- [12] Y. Zhang and Y. Shi, Intracellular potassium ion measurements by inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES), in *The Inflammasome: Methods and Protocols*: Springer, 2022, pp. 85-92.
- [13] F. L. da Silva, F.E. Lima, D.M.A. Neto, F.L. de Menezes, L.M. Fachine, A. Akhdhar, L.P. Ribeiro, A.R. Nogueira, P.B. Fachine, G.S. Lopes, Magnetic solid phase extraction as a nonchromatographic method for the quantification of ultratrace inorganic arsenic in rice by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP OES), *Food Chemistry*, 135461, 2023.
- [14] J. M. Meyers, B. Stunkel, I. Ballou, A. Morin, J. Schindler, D. Fletcher, D. Oropeza,, Characterization of LaB6 Emitters in an Inductively Coupled Plasma Facility for Electron Transpiration Cooling Applications, in *AIAA AVIATION 2022 Forum*, 2022, p. 3579.
- [15] J. Han, P. Pribyl, W. Gekelman, A. Paterson, S.J. Lanham, C. Qu, M.J. Kushner, Three-dimensional measurements of plasma parameters in an inductively coupled plasma processing chamber, *Physics of Plasmas*, 26, 10, 103503, 2019.
- [16] N. Yu, R. Jourdain, M. Gourma, F. Xu, A. Bennett, and F. Fang, Power dissipation of an inductively coupled plasma torch under E mode dominated regime, *Micromachines*, 12, 834, 2021.
- [17] H. S. Yang, D. R. LaFrance, and Y. Hao, Elemental testing using inductively coupled plasma mass spectrometry in clinical laboratories: an ACLPS critical review, *American Journal of Clinical Pathology*, 156, 167-175, 2021.
- [18] K. Jinno, Practice and application of microcolumn LC with inductively coupled plasma atomic emission spectrometric detection, in *Microbore Column Chromatography*: CRC Press, 2020, pp. 175-210.
- [19] B. Lu and Q. Feng, Numerical simulation of thermochemically non-equilibrium inductively coupled plasmas under different operating parameters, *Physics of Plasmas*, vol. 25, no. 9, p. 093510, 2018.
- [20] H. H. Marza and T. H. Khalaf, The Effect of Power on Inductively Coupled Plasma Parameters, *Iraqi Journal of Physics*, 20, 98-108, 2022.
- [21] J. Sun, Y.-Q. Liu, Y. Zheng, J. Shi, Y. Li, Y. Zhao, X. Zhang, H. Cai, X. Zhu, X. Sun, Local pressure calibration method of inductively coupled plasma generator based on laser Thomson scattering measurement, *Scientific Reports*, 12, 4655, 2022.
- [22] A. Shahbazian, M. Salem, and M. Ghoranneviss, Simulation by comsol of effects of probe on inductively coupled argon plasma, *Brazilian Journal of Physics*, 51, 351-360, 2021.
- [23] F. Lei, X. Li, D. Liu, Y. Liu, and S. Zhang, Simulation study of an inductively coupled plasma discharge with different copper coil designs and gas compositions, *AIP Advances*, 9, 085228, 2019.
- [24] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Study of the Time Dependence and One Dimensional Simulation of a Dielectric Barrier Discharge Reactor Driven by Sinusoidal High-Frequency Voltage, *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 17, 3, 631-645, 2023/06/01 2023, doi: 10.1134/S1990793123030107.
- [25] E. Poorreza and N. Dadashzadeh Gargari, Modeling and Simulation of a Microwave-Assisted Plasma with Different Input Power for Plasma-Based Applications, *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 17, 719-724, 2023/06/01 2023, doi: 10.1134/S1990793123030235.