



محاسبه پارامترهای بهینه‌ی مولد یون H^+ شتابدهنده الکترواستاتیک ۲۰۰ keV

بدیعی، سیدمحمد^(۱) - جباری، ایرج*^(۱) - ریاضی مبارکی، زعفر^(۲)

^۱ دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

^۲ سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده:

یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید پلاسما، تخلیه الکتریکی در گاز است که با استفاده از روش‌هایی همچون چشمه‌ی پنینگ، میکروویو و رادیوفرکانسی انجام می‌گیرد. در روش رادیوفرکانسی، تعدادی کوئل به دور محفظه پیچیده شده است و جریان رادیوفرکانسی عبوری از داخل این کوئل‌ها، میدان الکتریکی و مغناطیسی لازم برای ایجاد یونش و برانگیزش در گاز را سبب می‌شود. در این مطالعه، چشمه یونی شتابدهنده‌ی الکترواستاتیک ۲۰۰ keV پژوهشکده فیزیک و شتابگرها با استفاده از نرم افزار کامسول و در یک پیکربندی دوبعدی متقارن شبیه سازی شد. اثر پارامترهایی همچون فشار، فرکانس، توان کوئل و فاصله‌ی کوئل‌ها بر جریان خروجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان داد که با افزایش فشار، به دلیل تشکیل پلاسمای چگال، جریان پروتون خروجی کاهش می‌یابد. با افزایش فرکانس، روند تغییرات جریان پروتون بسیار کم و قابل اغماض است. همچنین با افزایش توان و تا رسیدن به توان ۱۰۰W، جریان پروتون افزایش و پس از آن به دلیل افزایش راکتانس کوئل کاهش می‌یابد و در نهایت در یک فاصله‌ی بهینه‌ی بین کوئل‌ها، جریان پروتون خروجی بیشینه می‌شود. در انتها برای اینکه بهترین جریان پروتون خروجی در این هندسه‌ی خاص حاصل شود، نیاز است از توان ۱۰۰W، فرکانس ۱۰۰MHz، فشار ۲Pa و فاصله‌ی کوئل ۶mm استفاده گردد.

کلمات کلیدی: چشمه‌ی یون هیدروژن، پلاسمای کوئل شده‌ی القایی، شبیه سازی، کامسول.

Calculation of the optimal parameters for H^+ ion generator of the 200 keV electrostatic accelerator

Badiee, S. Mohammad¹; Jabbari, Iraj*¹; Riyazi, Za'far²

¹ University of Isfahan, Faculty of Advanced Sciences & Technologies, Department of Nuclear Engineering

² Atomic Energy Organization of Iran, Research Institute of Nuclear Science and Technology, Physics and Accelerators Research School

Abstract:

One of the most commonly used methods for plasma production is electric discharge in gas, which is done using several methods such as PIG, microwave, and radiofrequency. In the radiofrequency method, a number of coils are wrapped around the cylinder, and the transmitted radiofrequency flow through the coils causes the electric and magnetic fields which is necessary to generate ionization and excitation effect in the gas. In this study, the 200 keV electrostatic ion beam of the physics and accelerator Institute of AEOI was simulated using COMSOL software in a symmetric two-dimensional configuration. The effects of several parameters including pressure, frequency, coil power and spacing of coils on the output ion current were investigated. The results of calculations showed that increasing



the pressure reduces the output current due to the dense plasma formation. As the frequency increases, the process of changing the proton current is very small and negligible. Also, with increasing power and up to the power of 100 W, the proton current increases and then decreases with increasing coil reactance, and ultimately, at an optimal distance between the coils, the output current of the proton current will be maximized. Finally, for the best outgoing proton current in this particular geometry, the power of 100 W, frequency of 100 MHz, pressure of 2 Pa and coil distance of 6 mm should be used.

Keywords: *Hydrogen Ion Source, ICP, Simulation, COMSOL*

مقدمه:

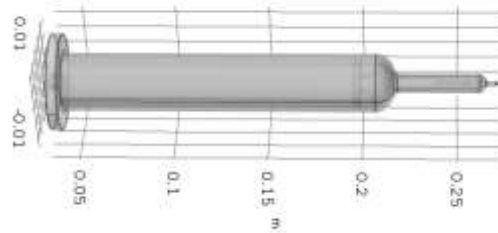
چشمه‌ی تولید یون یکی از اجزای اصلی هر شتابدهنده‌ای است [۱]. چشمه‌ی یونی رادیوفرکانسی در مقایسه با سایر چشمه‌های یونی دارای مزایایی از قبیل قابلیت تولید یون برای هر نوع گاز، تولید یون اتمی بالا در مقایسه با یون مولکولی، تمیز بودن بدلیل عدم استفاده از کاتد داغ و همچنین عمر طولانی می‌باشد [۲]. چشمه یونی رادیوفرکانسی به طور وسیع در شتابدهنده‌های ذرات، اصلاح ساختار مواد با استفاده از باریکه یونی و کاشت یون بویژه در صنعت نیمه‌هادی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه طراحی چشمه‌ی یونی با استفاده از نرم افزار COMSOL بسیار متداول است [۳-۵]. در کاری که آقای گائو و همکارانش انجام داده‌اند، شبیه سازی چشمه یونی از نوع رادیوفرکانسی کوپل شده‌ی القایی، توافق بسیار خوبی را با تجربه نشان داده است. در این پژوهش فرآیند تولید یون هیدروژن مثبت در محفظه پلاسمای رادیوفرکانسی القایی، برای شتابدهنده الکترواستاتیک ۲۰۰keV موجود در پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، توسط نرم افزار COMSOL شبیه سازی شده است. ضمن اعتبارسنجی نتایج با استفاده از مرجع [۱]، پارامترهای بهینه چشمه‌ی شتابدهنده مورد نظر شامل فرکانس، توان، فشار، فاصله‌ی کوئل‌ها به منظور افزایش راندمان و جریان پروتون خروجی محاسبه شده است.

روش کار:

به طور کلی، بر اساس مطالعات یوون او همکارانش، ۲۱ نوع واکنش برخوردی شامل یونیزاسیون، تحریک، واکنش ضمیمه و بازترکیب در تخلیه گاز هیدروژن وجود دارد که تنها ۱۱ مورد از آنها در پلاسمای سرد و فشار پایین هیدروژن دارای اهمیت است [۵]. در گام نخست، سطح مقطع تمامی کانال‌های واکنشی مهم که منجر به تولید ذرات $H_2^+, H_3^+, H_2, H, H^+, H(n=2), H(n=3)$ می‌شوند از داده‌های آقای لی یو و گائو [۶ و ۸] استخراج و فایل ورودی مورد استفاده در کامسول نوشته شد. سپس معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و شار انرژی برای ذرات خنثی، الکترون و یون‌های مثبت و معادله کوپلینگ توان RF به پلاسمای سرد اعمال شد. در این کار دو مدل‌سازی صورت گرفته است. ابتدا برای اعتبارسنجی نتایج، داده‌هایی که در تحقیقات آقای گائو و همکارانش مورد استفاده قرار گرفته است، شبیه

^۱ Yoon et all

سازی و نتایج آن با داده‌های تجربی این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از اعتبارسنجی، ساختار شکل ۱ بر اساس چشمه‌ی یونی شتابدهنده الکترواستاتیک ساخته شده در سازمان انرژی اتمی با مشخصات اسمی قطر ۲۵mm، ارتفاع ۲۲۲mm، پتانسیل آند ۱۵۵kV و پتانسیل کاتد ۱۵۰kV به همراه سیستم استخراج متصل به آن شبیه سازی و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مرجع [۱] مقایسه شد. در این پژوهش از ماژول پلاسما، زیر شاخه‌ی پلاسما ی القایی، انتخاب و همچنین از ماژول جریان خطی، شارهی تک فازی انتخاب شد. همچنین به جهت افزایش دمای گاز از ماژول انتقال گرما در سیالات استفاده شد.

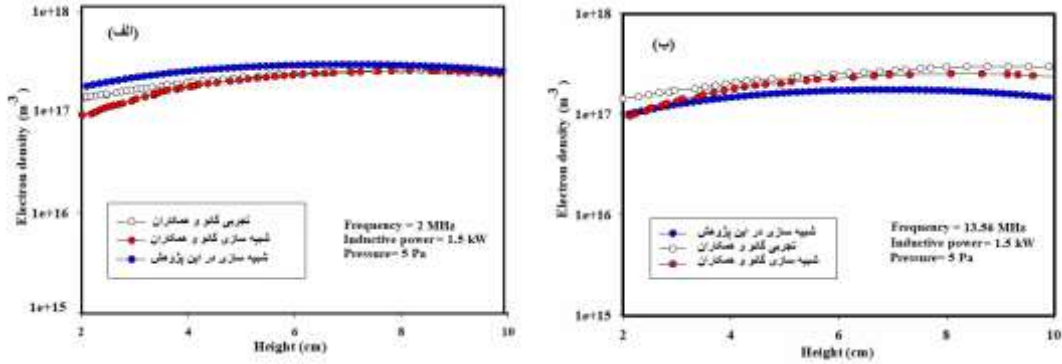


شکل (۱) محفظه‌ی چشمه یون شتابدهنده الکترواستاتیک

در ادامه با هدف گذاری جریان باریکه‌ی بالا، پارامترهای موثر شامل توان، فرکانس، فشار، فاصله‌ی کویل‌ها بررسی و در هر مورد مقادیر بهینه با استفاده از شبیه سازی کامسول محاسبه گردید. بازه‌ی فرکانس از ۶۰MHz-۱۰۰ MHz، فشار از ۲Pa-۱۰ Pa و توان از ۷۰W-۱۲۰ W انتخاب شد.

نتایج:

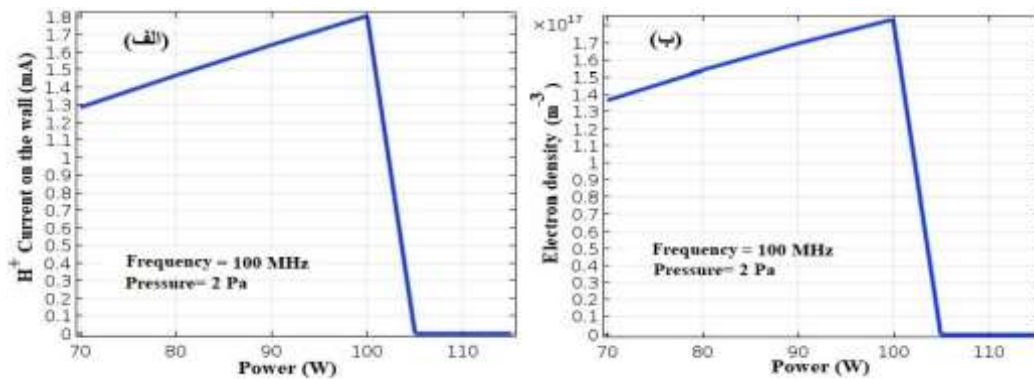
شکل ۲ مقادیر تجربی چگالی الکترونی و نتایج حاصل از شبیه سازی را بر روی محور مرکزی برای فشار ۵Pa و توان القایی ۱/۵kW در دو فرکانس ۲MHz و ۱۳/۵۶MHz را نشان می‌دهد. همان طور که مشهود است، نتایج شبیه سازی با مقادیر تجربی تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد. همچنین این نتایج نشان داد، داده‌های هیدروژن وارد شده در نرم افزار کامسول مورد تأیید است.



شکل ۲) مقایسه‌ی چگالی الکترونی با نتایج تحقیقات گائو و همکاران. الف) فرکانس ۲ MHz، ب) فرکانس ۱۳/۵۶ MHz [۵ و ۸]

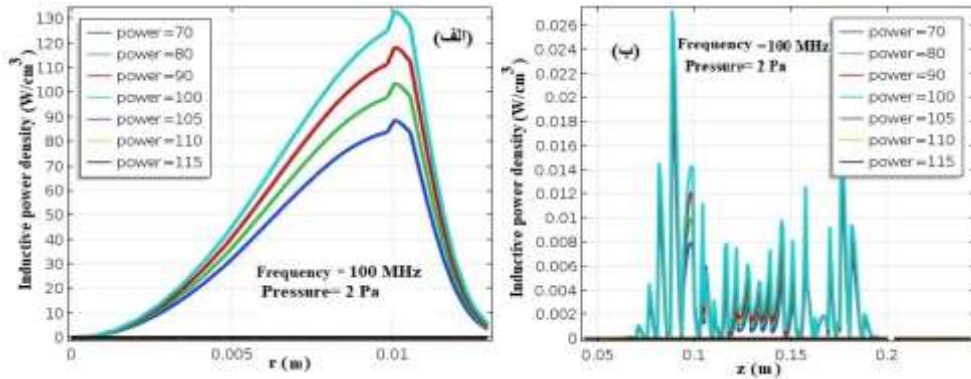
اختلاف اندک مشاهده شده به دلیل نداشتن اطلاعات دقیق در چینش کوپل‌ها رخ داده است. با توجه به اینکه با افزایش فرکانس، توان در نزدیکی دیواره‌ی محفظه القا خواهد شد، لذا ابعاد دقیق کوپل و فاصله‌ی آن‌ها در فرکانس‌های بالاتر نمود بیشتری بر چگالی الکترونی خواهد داشت.

در شکل ۳ تغییرات چگالی الکترونی و جریان پروتون برحسب توان رسم شده است. در این شکل فشار و فرکانس ثابت و به ترتیب برابر ۲ Pa و ۱۰۰ MHz است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش توان کوپل تا ۱۰۰ W، چگالی الکترون‌ها و جریان یون خروجی ابتدا افزایش و برای توان‌های بالاتر کاهش می‌یابد.



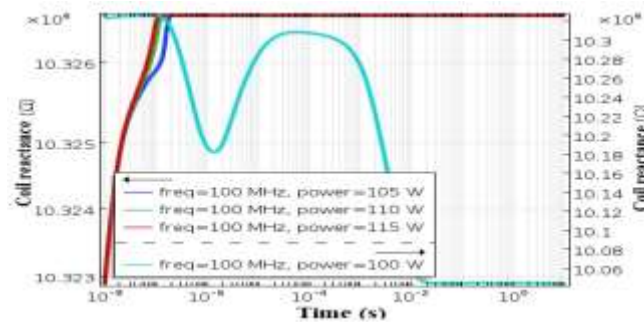
شکل ۳) روند تغییرات جریان پروتون و چگالی الکترون در چشمه‌ی یونی طراحی شده. الف) جریان یون، ب) چگالی الکترون.

شکل ۴ پروفایل توان القایی روی محور مرکزی و محور شعاعی را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در توان‌های بالاتر از ۱۰۰ W هیچ مقدار از توان در محفظه القا نمی‌شود.

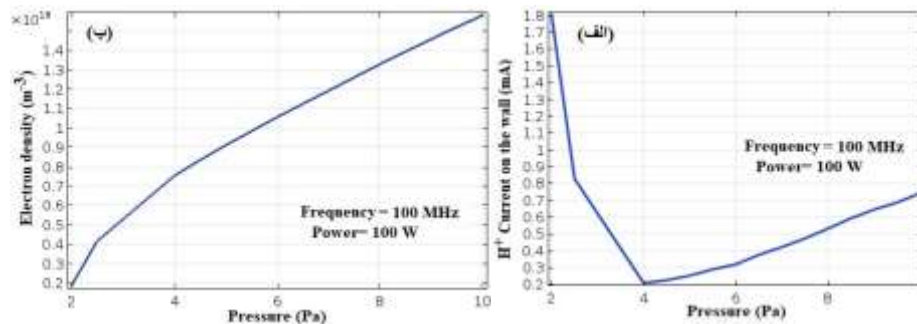


شکل ۴) توزیع توان القایی در راستای r و z برای توان‌های مختلف. الف) راستای شعاعی در $z=10\text{cm}$ ، ب) راستای محوری در $r=0$.

بر طبق شکل ۵ برای توان‌های بالاتر از 100W راکتانس کوپل‌ها افزایش می‌یابد و لذا توان کوپل‌ها کاهش یافته و پلاسما تشکیل نمی‌شود. در شکل ۶ اثر فشار بر چگالی الکترونی و جریان پروتون نشان داده شده است. در این شکل میزان توان و فرکانس ثابت و به ترتیب برابر 100W و 100MHz در نظر گرفته شده است. همان طور که این شکل نشان می‌دهد با افزایش فشار، چگالی الکترونی به طور پیوسته افزایش می‌یابد. اما جریان پروتون در خروجی محفظه، کاهش می‌یابد.



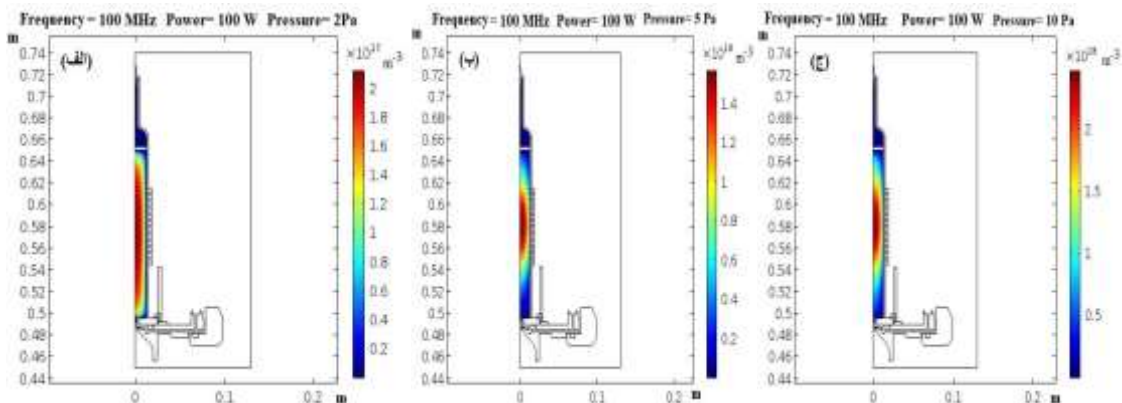
شکل ۵) تغییرات راکتانس کوپل در توان‌های 100W تا 105W



شکل ۶) تغییرات ناحیه‌ی پلاسما با توجه به تغییرات فشار در چشمه‌ی یونی طراحی شده. الف) جریان یون، ب) چگالی الکترونها

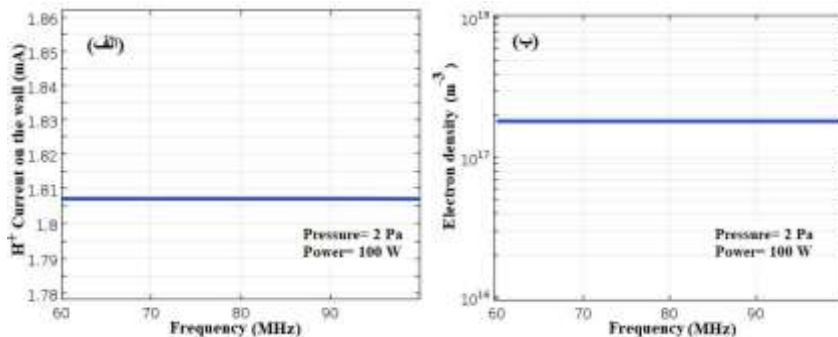


شکل ۷ ناحیه‌ی تشکیل پلازما در فشارهای ۲Pa، ۵Pa و ۱۰Pa را برای توان ثابت ۱۰۰W و ۱۰۰MHz نشان می‌دهد. فشار بالا باعث ایجاد پلاسمای چگال شده و به طبع آن باعث افزایش چگالی الکترونی می‌شود. اما عامل تاثیرگذار بر جریان پروتون، گستردگی توزیع پلازما در خروجی است که این مهم در فشار ۲Pa و در این بازه نمود بیشتری می‌یابد. همان طور که در شکل ۶ و ۷ مشخص است، این روند برای فشارهای بیشتر از ۵Pa به گونه‌ای است که با افزایش فشار، جریان خروجی به تدریج شروع به افزایش می‌کند.



شکل ۷ (تغییرات ناحیه‌ی پلازما با توجه به تغییرات فشار در چشمه‌ی یونی طراحی شده. الف) فشار ۲Pa، ب) فشار ۵Pa و ج) فشار ۱۰Pa.

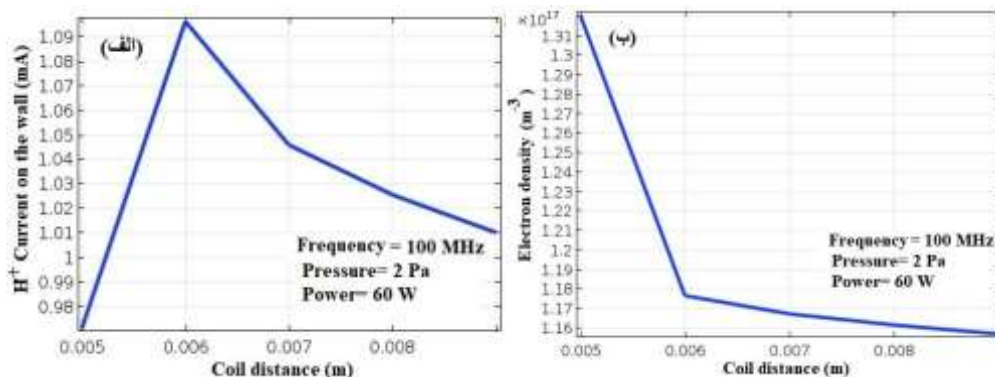
در شکل ۸ اثر تغییر فرکانس بر چگالی الکترون و جریان یون خروجی رسم شده است. فرکانس در حقیقت بر عمق توان القا شده در پلازما اثرگذار است، به گونه‌ای که فرکانس کمتر میدان الکتریکی را در اعماق بیشتری نسبت به فرکانس بیشتر القا می‌کند. با توجه به این موضوع مقدار چگالی الکترونی و به طبع آن جریان یون در فرکانس‌های بین ۶۰MHz تا ۱۰۰MHz، برای فشار و توان ثابت و به ترتیب ۲Pa و ۱۰۰W با تغییرات بسیار کوچکی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که می‌توان از این تغییرات صرف نظر کرد.



شکل ۸ (رفتار الف) جریان یون و ب) چگالی الکترون با تغییرات فرکانس در چشمه‌ی یونی طراحی شده



تأثیر فاصله‌ی کویل‌ها بر چگالی الکترونی و جریان پروتون در شکل ۹ نشان داده شده است. با افزایش فاصله‌ی کویل‌ها، برآیند نیروی القایی در داخل محفظه کاهش یافته و از تشکیل پلاسمای چگال، جلوگیری می‌کند. این مهم برای جریان یون در خروجی، شرایط بهتری را ایجاد می‌کند. در این تحقیق در فرکانس، فشار و توان ثابت و به ترتیب 100MHz ، 2Pa ، 60W و فاصله‌ی 6mm بهترین توزیع پلازما و جریان یون به دست آمد.



شکل ۹) الف) تغییرات جریان پروتون خروجی و ب) تغییرات چگالی الکترون بر حسب فاصله‌ی کویل‌ها برای چشمه‌ی یونی طراحی شده.

بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، که از ماژول پلاسمای القایی نرم افزار کامسول جهت انجام شبیه سازی استفاده شد، ضمن استخراج و اعتبارسنجی داده‌های هیدروژن، چشمه یونی شتابدهنده الکترواستاتیک پژوهشکده فیزیک و شتابگرهای سازمان انرژی اتمی شبیه سازی شد و شرایط بهینه برای افزایش جریان آن به دست آمد. فاکتورهای موثر شامل توان، فشار، فرکانس و فاصله‌ی کویل‌ها بر راندمان و جریان پروتون خروجی بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش فشار، به دلیل تشکیل پلاسمای چگال، جریان پروتون خروجی در بازه‌ی 2Pa – 10Pa کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فرکانس، روند تغییرات جریان پروتون بسیار کم و قابل اغماض است. با افزایش توان و تا رسیدن به فرکانس 100MHz ، جریان پروتون افزایش و پس از آن به دلیل افزایش راکتانس کویل‌ها کاهش می‌یابد. در نهایت در یک فاصله‌ی بهینه‌ی 6mm بین کویل‌ها، جریان پروتون خروجی بیشینه شد. با توجه به جریان هدف گذاری شده‌ی در این تحقیق، توان، فرکانس فشار و فاصله‌ی کویل بهینه و به ترتیب برابر 100W ، 100MHz ، 2Pa و 6mm به دست آمد.



مراجع:

- [1] Z.H. Shun, Ion sources, Springer, 1999.
- [2] R.K. Janev, D. Reiter, U. Samm, Collision processes in low-temperature hydrogen plasmas, Forschungszentrum Jülich, Zentralbibliothek, 2003.
- [3] A. Obrusnik, P. Synek, L. Zajicková, Simulations of atmospheric pressure microwave plasma torch in Ar/H₂ mixture using Matlab and COMSOL Multiphysics API, 20th Annual Conference Proceeding's Technical Computing Bratislava, 2012.
- [4] M. Cavenago, Use of COMSOL multiphysics in the modeling of ion source extraction, Comsol Conference, 2006.
- [5] F. Gao, Y.R. Zhang, H. Li, Y. Liu, Y.-N. Wang, Spatial distributions of plasma parameters in inductively coupled hydrogen discharges with an expansion region, Physics of Plasmas, 24, 073508, 2017.
- [6] J.Y. Liu, Y. Gao, G. Wang, Main reaction process simulation of hydrogen gas discharge, Pramana-Journal of Physics, 79(1),113-124, 2012.
- [7] J.S. Yoon, M.Y. Song et al, Cross Sections for Electron Collisions with Hydrogen Molecules, Journal of Physics, Chen. Ref. Data 37, 2, 2008.
- [8] F. Gao, H. Li, W. Yang, J. Liu, Y.R. Zhang, Y.N. Wang, Experimental and numerical investigations of electron characteristics in 2 MHz and 13.56 MHz inductively coupled hydrogen plasmas with an expansion region, Physics of Plasmas, 25, 013515, 2018.