

طراحی و شبیه‌سازی سیستم پلاسمای هلیکون با بسامد ۱۳/۵۶ مگاهرتز و توان بسامد رادیویی ۱/۵ کیلو وات

سمانه فاضل‌پور^۱، امیر چخماچی دوم^{۱*}، داود ایرجی^۲، محمد امیر حمزه تفرشی^۱، حسین صادقی^۲

۱. پژوهشکده‌ی پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران-ایران

۲. دانشکده‌ی فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران-ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۲/۲

چکیده: در این مقاله، به بررسی و شبیه‌سازی یک سیستم چشمه‌ی پلاسمای هلیکون با استفاده از آنتن ناگویا، به صورت سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول مالتی فیزیکس پرداخته شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، تمام برهم‌کنش‌ها و پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید پلاسما در نظر گرفته شده است، علاوه بر این، سطح مقطع واکنش‌هایی که در پلاسما رخ می‌دهد از انرژی ۰/۰۰۱ eV تا ۱ MeV در نرم‌افزار وارد شده است. در این شبیه‌سازی، میدان مغناطیسی پیچه‌ها ۶۰۰ G، جریان آنتن ۶ A، فشار گاز ۱۰ mTorr و شار ورودی گاز (SCCM) ۵۰ در نظر گرفته شده است. در نهایت با استفاده از آنتن ناگویا پلاسمایی با چگالی $2.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ و دمای ۲/۶ eV به دست آمد. این مقاله علاوه بر طراحی و شبیه‌سازی چشمه‌ی پلاسمای هلیکونی، تأثیر تغییرات جریان اعمال شده به آنتن ناگویا بر چگالی و توان جذب شده‌ی پلاسمای هلیکونی را مورد بررسی قرار می‌دهد. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده به مقایسه‌ی داده‌های تجربی و شبیه‌سازی برای ۷ دستگاه هلیکون ساخته شده تاکنون پرداخته شد. مقایسه‌ی انجام شده نشان داد که نتیجه‌هایی که از شبیه‌سازی این سیستم‌ها به دست می‌آیند به صورت قابل قبولی با داده‌های تجربی و آزمایشگاهی گزارش شده مطابقت دارند. هدف اصلی طراحی این چشمه‌ی پلاسما، بررسی پارامترهای مؤثر بر افزایش چگالی به منظور استفاده در سیستم باریکه-خنثی (گرمایش کمکی) برای توکامک‌های اندازه-کوچک هم‌چون توکامک دماوند است.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای هلیکون، پلاسماهای با بسامد رادیویی، شبیه‌سازی

Design and simulation of the helicon plasma system with 1.5 kW RF power and 13.56 MHz frequency

S. Fazelpour¹, A. Chakhmachi^{1*}, D. Iraj², M. Tafreshi¹, H. Sadeghi²

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran, Iran

2. Department of the Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, P.O. Box: 15875-4413, Tehran, Iran

Abstract: In this paper, a Helicon plasma system with Nagoya Type III antenna was designed and simulated by using COMSOL Multiphysics 5.2. In our simulation, all effective interactions and parameters in the plasma production process are considered. Besides, the cross-sections of the reactions which are occurred in the plasma with the energy range from 0.001 eV to 1MeV are applied in the software. Meanwhile, the Argon-Helicon plasma is produced by using Nagoya Type III antenna considering the following conditions: the magnetic field of 600 G, the antenna current 6 Ampere, with the operating gas pressure 10 mTorr and inlet gas flux of 50 (SCCM). Finally, the plasma density of the order $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ and a temperature of 2.6 eV were obtained by using the Nagoya antenna. The effect of the variations of the current, which was applied to the Nagoya antenna, on the density and absorbed power of the Helicon plasma was also investigated. This simulation was made for seven operational helicon devices, and the results have seemed reasonable.

Keywords: Helicon plasma, RF plasmas, Simulation

*Email: achakhmachi@aut.ac.ir

۱. مقدمه

شده در این سیستم مؤثر هستند [۶]. در این راستا، با استفاده از کدهای متفاوت هلیک^۱، آنتن^۲، اسپارس^۳، ماکسب^۴ و آدامانت^۵ به بررسی پلاسما در سیستم هلیکون و مدل سازی این منبعها پرداخته شده است. از این رو، نتیجه های به دست آمده تا به حال به صورت مدل سازی یک سیستم پلاسما دو بعدی با کد نویسی بوده است. در این کار، سعی شده است یک مدل سه بعدی از این منبع پلاسمایی با استفاده از نرم افزار کامسول ارائه شود. نرم افزار کامسول یکی از قدرتمندترین نرم افزارها است که توانایی شبیه سازی سه بعدی پلاسما را با در نظر گرفتن پارامترهای گوناگون دارد. علاوه بر آن، تمام برهم کنشها و پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید پلاسما نیز در نظر گرفته شده است. در این شبیه سازی، سطح مقطع واکنشهایی که در پلاسما رخ می دهد در گستره انرژی از 0.01 eV تا 1 MeV وارد نرم افزار شده است. در نتیجه، این مدل سازی سه بعدی می تواند زمینه لازم برای بهینه سازی این سیستم و تولید پلاسمایی با چگالی بالاتر را براساس هدف مشخص مهیا سازد. در حقیقت این مدل سازی سه بعدی، با هدف رسیدن به پارامترهای بهینه در منبع پلاسما، برای استفاده در طراحی سیستم گرمایش کمکی (باریکه ی خنثی) برای توکامک های اندازه- کوچک هم چون توکامک دماوند انجام شده است. بدین منظور، ابتدا تولید پلاسما هلیکونی با استفاده از آنتن ناگویا در مدلی سه بعدی شبیه سازی و سپس تحلیل پارامتری بر روی اثر تغییرات توان بسامد رادیویی اعمال شده به آنتن در چگالی پلاسمای هلیکونی و توان جذب در سیستم پرداخته شد.

برای رسیدن به این هدف این مقاله، ابتدا و در قسمت اول نظریه ی حاکم بر منبع های پلاسمای هلیکون را بررسی و در قسمت بعد یک سیستم پلاسمای هلیکونی را به صورت سه بعدی طراحی و با نرم افزار کامسول شبیه سازی می کند. سپس به بررسی داده های به دست آمده از پلاسمای هلیکون و تحلیل پارامتری پارامترهای مؤثر بر این سیستم می پردازد.

امروزه منبع های پلاسمایی دما- پایین و چگالی- بالا در زمینه های متفاوت هم چون لایه نشانی مواد، دستگاه های هم جوشی با محصور سازی الکترواستاتیکی جرمی (IECF)، منبع های پیشرانش در جت های پلاسمایی و ... کاربرد به سزایی دارند. هم چنین در زمینه ی هم جوشی، این نوع منبع های پلاسمایی برای مطالعه در انواع ناپایداری های پارامتری، پیش یونش، پیشرانش، گرمایش پلاسمای توکامک، ابزارهای تشخیصی برای توکامکها و نیز در انتخاب دیواره ی اول در توکامکها اهمیت زیادی دارند [۱-۳].

یکی از روش های ایجاد پلاسما استفاده از امواج بسامد رادیویی است. منبع های پلاسمای هلیکون نیز از همین سازوکار برای تولید پلاسما بهره می گیرند. امواج هلیکونی، امواج الکترومغناطیسی با قطبش دایروی راست گرد هستند که در پلاسمای مغناطیسی منتشر می یابند [۳]. هلیکون ها را می توان امواج ویستلر نامید با این تفاوت که در یک محفظه ی محدود انتشار می یابند [۴، ۵]. منبع های پلاسمای هلیکون به علت تولید پلاسمایی با چگالی بالا در فشار پایین، نسبت به دیگر منبع های پلاسما بیش تر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و اخیراً در بسیاری از پروژه های بزرگ مورد استفاده قرار گرفته اند [۵-۱۱].

چن [۶] به مطالعه و بررسی فیزیک تخلیه در فشار پایین و چگالی بالا برای منبع پلاسمای هلیکون پرداخت. از سوی دیگر، چن و همکاران [۷]، به تحلیل فیزیک تخلیه ی هلیکون با دو نوع آنتن ناگویا و ماریچی پرداخته و دما و چگالی پلاسمای تولید شده را مورد مطالعه قرار دادند. براگینس و همکاران [۸] سیستم پلاسمای هلیکون را در میدان های مغناطیسی نایکنواخت مطالعه و سازوکارهای جذب را در این سیستم بررسی کردند. لیگت و همکاران [۹] به بررسی نقش امواج هلیکون و بررسی سازوکار جذب برخوردی در منبع های هلیکون پرداختند.

در طراحی و ساخت منبع پلاسمای هلیکون، پارامترهای بسیاری هم چون میدان مغناطیسی ثابت که توسط پیچچه های مغناطیسی ایجاد می شود، نوع آنتن، طول آنتن، بسامد اعمال شده به آنتن، توان موج بسامد رادیویی و فشار گاز تزریق شده به محفظه در انتشار موج و هم چنین چگالی پلاسمای تشکیل

1. HELIC
2. ANTENA2
3. SPIRES
4. MAXEB
5. ADAMANT

۲. نظریه

در این جا v سرعت ذره، m جرم الکترون، E میدان الکتریکی و B_0 میدان مغناطیسی تولید شده توسط پیچ‌های مغناطیسی در راستای محور سیستم (Z) هستند. با استفاده از معادله‌های ۱ تا ۴، می‌توان مؤلفه‌های میدان مغناطیسی موج هلیکونی را در مختصات استوانه‌ای شکل و از حل معادله‌ی بسط به دست آورد [۴].

$$B_r = A [(\alpha + k) J_{m-1} + (\alpha - k) J_{m+1}] \quad (۵)$$

$$B_\theta = A [(\alpha + k) J_{m-1} - (\alpha - k) J_{m+1}] \quad (۶)$$

$$B_z = -r i T A J_m \quad (۷)$$

در رابطه‌های بالا، A دامنه‌ی موج، T عدد موج عمود بر میدان مغناطیسی B_0 ، J_m تابع بسط با مرتبه m که تابعی از متغیر $T r$ است، K بردار انتشار موج، و α ضریب ثابت است. با استفاده از مؤلفه‌های میدان مغناطیسی B به دست آمده و جای‌گذاری در معادله‌ی ۱ می‌توان مؤلفه‌های میدان الکتریکی E موج را به دست آورد.

$$E_r = i(\omega/k) A [(\alpha + k) J_{m-1} - (\alpha - k) J_{m+1}] \quad (۸)$$

$$E_\theta = -(\omega/k) A [(\alpha + k) J_{m-1} + (\alpha - k) J_{m+1}] \quad (۹)$$

$$E_z = 0 \quad (۱۰)$$

بر اساس شرایط مرزی، بدون در نظر گرفتن سازوکارهای برخوردی و لاندائو، می‌توان رابطه‌ی پاشندگی را به دست آورد [۶].

$$\frac{\omega}{k} = \frac{T B_0}{\mu_0 e n_0} \quad (۱۱)$$

که در آن، n_0 چگالی پلاسما، B_0 میدان مغناطیسی پیچ‌های

مغناطیسی، T عدد موج عمود بر میدان مغناطیسی B_0 و $\frac{\omega}{k}$

سرعت فاز موج است. از رابطه‌ی ۱۱، برای طراحی منبع‌های پلاسمای هلیکون (شعاع محفظه، چگالی پلاسما، میدان مغناطیسی ثابت، بسامد اعمال شده به آنتن، طول آنتن) استفاده می‌شود.

امواج هلیکونی در گستره‌ی بسامدی $\omega_{ci} \ll \omega_{pi} \ll \omega \ll \omega_{ce} \ll \omega_{pe}$ انتشار می‌یابند که در آن ω_{ci} ، ω_{ce} بسامد سیکلوترون یون و الکترون، ω_{pe} ، ω_{pi} بسامد پلاسمای یون و الکترون هستند [۶]. هلیکون‌ها امواج الکترومغناطیسی با قطبش راست‌گرد هستند که در پلاسمای مغناطیسه‌ی محدود شده انتشار می‌یابند.

فیزیک حاکم بر منبع‌های پلاسمای هلیکون نسبت به دیگر منبع‌های پلاسما پیچیدگی بیش‌تری دارد، زیرا در آن‌ها چگونگی تولید پلاسما به برهم‌کنش خودسازگار موج-ذره، محصورسازی ذرات در میدان مغناطیسی و سازوکارهای پیچیده‌ی جذب وابسته است. در این منبع‌های پلاسما، یونش توسط دو سازوکار جذب-سازوکار جذب برخوردی و سازوکار جذب غیربرخوردی (میرایی لاندائو)-انجام می‌شود. سازوکار جذب برخوردی براساس برخورد یون-الکترون، الکترون-ذرات خنثی و سازوکار جذب غیربرخوردی براساس میرایی لاندائو و تبادل انرژی بین امواج و ذرات، توصیف می‌شود [۵]. در فشارهای پایین که آهنگ برخوردها کم است، ذراتی که سرعت‌شان با سرعت فاز موج الکترومغناطیسی تقریباً برابر و کم‌تر است از موج انرژی می‌گیرند و موج، میرا می‌شود؛ در نتیجه در بازه‌ی فشار پایین، سازوکار غیربرخوردی غالب است [۱۰-۱۴]. علاوه بر این دو نوع سازوکار جذب ذکر شده، سازوکار دیگری که باعث افزایش چگالی در سیستم پلاسمای هلیکون می‌شود، وجود و انتشار امواج شبه الکترواستاتیکی است؛ این امواج در عرض میدان مغناطیسی در لایه‌ی نازکی در لبه‌ی پلاسما انتشار می‌یابند و بسیار سریع جذب می‌شوند. این امواج را مد TG می‌نامند [۱۵-۱۷].

رابطه‌ی پاشندگی و چگونگی انتشار امواج هلیکونی در ساده‌ترین شکل خود از سه معادله‌ی ماکسول خطی شده،

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (۱)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j \quad (۲)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (۳)$$

و معادله‌ی حرکت ذره استخراج می‌شوند،

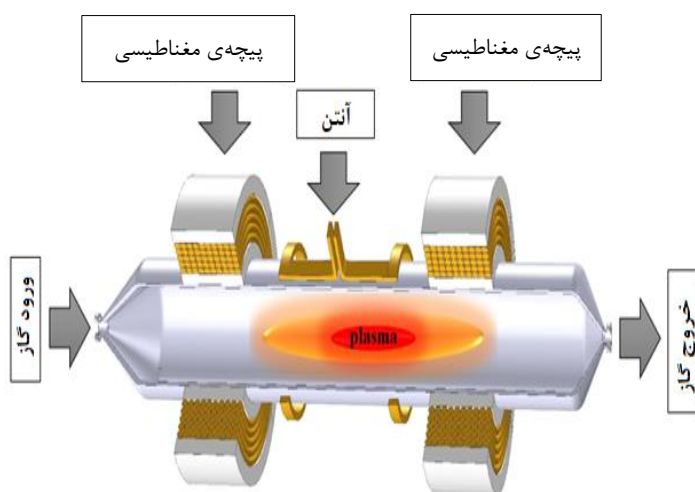
$$m \frac{\partial V}{\partial t} = -e(E + V \times B_0) \quad (۴)$$

۳. طراحی و شبیه‌سازی

نرم‌افزار کامسول یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهایی است که توانایی شبیه‌سازی سه بعدی پلاسما را دارد. هدف اصلی این بخش طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم هلیکون به صورت سه بعدی است تا در زمینه‌ی بهینه‌سازی این سیستم در راستای ارتقای منبع پلاسما و هم‌چنین افزایش چگالی پلاسما برای به کارگیری در هدف‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد.

همان‌طور که اشاره شد، منبع هلیکون از قسمت‌های اصلی، محفظه‌ی خلاء، آنتن، یک منبع موج بسامد رادیویی برای تولید موج و هم‌چنین از یک سیستم تولید میدان مغناطیسی تشکیل شده است. سیستم تولید میدان مغناطیسی استاتیک از دو پیچ‌های مقابل هم تشکیل شده است که جریانی در جهت یکسان از آن‌ها شارش می‌یابد تا علاوه بر جلوگیری از خروج ذرات از محفظه (محصورسازی) یک میدان مغناطیسی زمینه در جهت محور z ایجاد شود [۱۸].

چهار نوع آنتن تک حلقه، دابل سددل، ناگویا و ماریچ در منبع‌های پلاسما هلیکون استفاده می‌شوند [۱۹-۲۱]. آنتن‌ها در اطراف محفظه‌ی شیشه‌ای قرار گرفته و با استفاده از یک سیستم مولد موج بسامد رادیویی و یک سیستم تطبیق امپدانس، جریانی با بسامد مشخص به آن اعمال می‌شود. آنتن در داخل محفظه، موج هلیکونی تولید کرده و این موج براساس سازوکارهای بیان شده در نظریه‌ی پلاسما هلیکون، جذب و منجر به یونش می‌شود. در شکل ۱ نمایی کلی از یک منبع پلاسما هلیکون ارائه شده است.



شکل ۱. نمایی کلی از اجزای سیستم منبع هلیکون.

با استفاده از تحلیل فیزیکی ارایه شده در بالا رابطه‌ی پاشندگی امواج هلیکونی با در نظر گرفتن سازوکار برخوردی و میرایی لاندائو به صورت زیر به دست می‌آید:

$$n^r = \frac{c^r k_l^r}{\omega^r} = \frac{\omega_{pe}^r}{\omega(-\omega - i\nu_{eff} + \omega_{ce} \cos \theta)} \quad (12)$$

که در آن، ν_{eff} بسامد برخوردی مؤثر برای میرایی برخوردی و میرایی لاندائو، ω_{ce} بسامد سیکلوترون الکترون، و ω_{pe} بسامد پلاسما الکترون است. بسامد برخوردی مؤثر به صورت حاصل جمع بسامد برخوردی ν_c و بسامد میرایی لاندائو ν_{LD} معرفی می‌شود.

$$\nu_{eff} = \nu_c + \nu_{LD} \quad (13)$$

از سوی دیگر با استفاده از طول میرایی برخوردی و غیربرخوردی می‌توان تخمینی از حداقل طول لازم برای طراحی محفظه‌ی پلاسما به دست آورد.

$$L_C \approx \frac{\omega_C}{\nu_C T} \approx \frac{\omega}{k} \frac{\mu_0}{\eta T^r} \quad (14)$$

$$L_{LD} \approx \frac{\omega_C}{\nu_{LD} T} \approx \omega_C / \nu \sqrt{\pi} \omega T \zeta^r e^{-\zeta^r} \quad (15)$$

در معادله‌های بالا، ν_{LD} بسامد لاندائو، T عدد موج عمود بر میدان مغناطیسی B_0 ، ω_c بسامد سیکلوترون و

$$\zeta \approx \frac{\omega + i\nu}{k v_{th}} \approx \zeta_0 \left(1 + \frac{i\nu}{\omega} \right).$$

در نهایت، با استفاده از طول میرایی برخوردی و لاندائو، طول تخمینی محفظه‌ی پلاسما مشخص می‌شود.

$$L_d = \left(\frac{1}{L_{LD}} + \frac{1}{L_C} \right)^{-1}. \quad (16)$$

موج منتشر شونده، به دست خواهد داد. در نتیجه برای انتشار این موج به آنتن نیم موجی، با طولی برابر با ۱۵ cm نیاز است (زیرا آنتنی که در این سیستم پلاسمای استفاده می‌شود، طولی برابر با نصف طول موج دارد).

از سوی دیگر، توجه داریم که طول آنتن‌های رایج در سیستم هلیکون تقریباً ۱۲، ۱۵ و ۱۸ cm است. براساس نتیجه‌های نظری و تجربی، چگالی پلاسمای هنگام استفاده از آنتن‌هایی با طول کم‌تر یعنی تقریباً ۶ و ۸ cm کاهش می‌یابد و نیز در آنتن‌های با طول بیش‌تر از ۱۸ cm نیز کاهش چگالی مشاهده می‌شود. علت اصلی این روند این است که اگر یک آنتن طول زیادی داشته باشد، سرعت فاز موج منتشر شونده افزایش می‌یابد. و همچنین اگر طول آنتن خیلی کوتاه باشد از آن‌جایی که ضریب تقویت در تبدیل میدان‌های الکتریکی القایی به میدان‌های بار فضایی متناسباً کاهش می‌یابد، تأثیر جفت شدگی در سیستم بسیار پایین می‌آید. لازم به ذکر است که ضریب تقویت یا ضریب جفت شدگی برابر با نسبت $k_{\perp}^2/k_{\parallel}^2$ است، $k_{\perp} = \pi/L_{\alpha}$ (α شعاع محفظه‌ی پلاسمای)، $k_{\parallel} = \pi/L_{\alpha}$ (طول آنتن).

در نهایت با مشخص کردن میدان مغناطیسی، چگالی مورد انتظار پلاسمای، بسامد امواج و نوع گاز تزریقی، همان‌طور که اشاره شد، طول آنتن و شعاع محفظه را می‌توان محاسبه کرد. طول محفظه باید از طول میرایی برخوردی و میرایی لاندائو، بیش‌تر باشد تا سازوکارهای جذب صورت گیرد.

در شبیه‌سازی انجام شده، طول آنتن برابر با ۱۲ cm، طول محفظه‌ی پلاسمای برابر با ۴۰ cm، شعاع محفظه‌ی پلاسمای ۲۷ cm و شعاع آنتن ۳ cm در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که طول محفظه با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه می‌شود، در واقع باید طول محفظه از طول میرایی برخوردی و لاندائو بیش‌تر باشد. از سوی دیگر شعاع محفظه و آنتن با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ و ریشه‌ی اول معادله‌ی بسل به دست می‌آید.

مقدار میدان مغناطیسی ثابت (که توسط پیچ‌های مغناطیسی اعمال می‌شود) پارامتر بسیار مهمی در سیستم پلاسمای هلیکونی است. دلیل اصلی‌ای که اهمیت میدان مغناطیسی را پررنگ‌تر کرده، عمل محصورسازی ذرات در داخل محفظه و هم‌چنین انتشار امواج در پلاسمای مغناطیده

طراحی محفظه و آنتن جز مهم‌ترین قسمت‌های طراحی یک سیستم منبع پلاسمای هلیکون هستند. در معادله‌ی ۱۱، T براساس شرایط مرزی $(j_r = 0, B_r(\alpha) = 0)$ ، $J_m(T, \alpha) = 0$ که در این جا j_r چگالی جریان شعاعی و α شعاع محفظه‌ی پلاسمای است [۴]. برای مدهای ۱، $m = 0$ به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$T = 3.83 / \alpha \quad (17)$$

که در آن T عدد موج عمود بر میدان مغناطیسی B_0 ، 3.83 کوچک‌ترین ریشه‌ی تابع بسل است. با جای‌گذاری معادله‌ی ۱۷ در رابطه‌ی پاشندگی (رابطه‌ی ۱۱)، داریم:

$$n_{1r} = \frac{1.9}{\alpha_{cm} \lambda_{cm} f_{\epsilon}} \quad (18)$$

$$\frac{\omega n_0}{k B_0} = \frac{1.9 \times 10^{15}}{\alpha}$$

که در آن، n_{1r} چگالی $(\times 10^{13} \text{cm}^{-3})$ ، B_G میدان مغناطیسی برحسب گاوس، f_{ϵ} بسامد برحسب مگا هرتز و α_{cm} و λ_{cm} شعاع محفظه و طول موج برحسب سانتی‌متر است.

اگر سرعت فاز موج (ω/k) نزدیک سرعت گرمایی انتخاب شود، موج شدیداً توسط میرایی لاندائو میرا می‌شود. از سوی دیگر، انرژی تشدید الکترون‌ها (E_f) براساس گاز مورد استفاده، مشخص می‌شود. در این‌جا، انرژی تشدید برای الکترون‌های گاز آرگون، بیشینه‌ای برابر با ۵۰ eV در نظر گرفته شده، و در نتیجه:

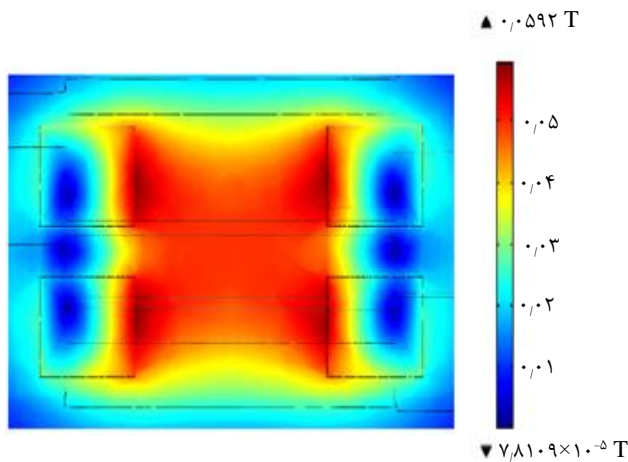
$$\frac{\omega}{k} = \left(\frac{2e E_f}{m} \right)^{1/2} \text{ms}^{-1} \quad (19)$$

از طرف دیگر سرعت فاز برابر است با:

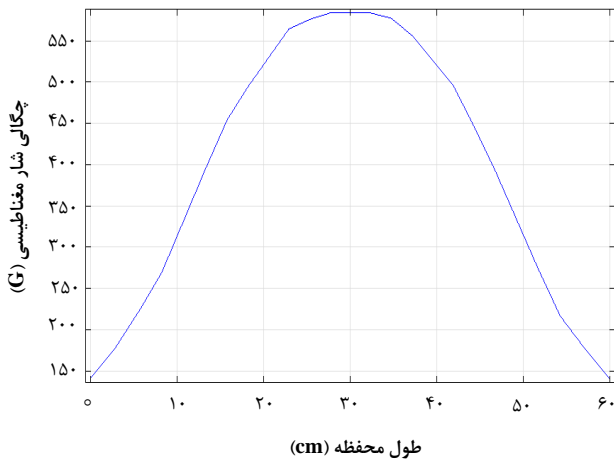
$$\frac{\omega}{k} = f \lambda = 4.79 \times 10^8 \text{ms}^{-1} \quad (20)$$

بنابراین برای یک سیستم پلاسمای هلیکون با گاز آرگون در بسامد ۱۳/۵۶ MHz، در بیشینه‌ی برهم‌کنش و تبادل انرژی موج-الکترون طول موجی تقریباً برابر با ۳۰ cm برای

ثابت و همچنین شیب میدان مغناطیسی در جهت شعاعی ناچیز است.



شکل ۲. میدان مغناطیسی یکنواخت شبیه‌سازی شده در بین پیچ‌های مغناطیسی بر روی خط مرکز پیچ‌ها.



شکل ۳. چگالی شار مغناطیسی در طول محفظه.

پس از طراحی شبیه‌سازی سیستم مغناطیسی، به بررسی و شبیه‌سازی آنتن سیستم پلاسمای هلیکون از نوع ناگویا و نیز چگونگی تولید پلازما با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول مالتی فیزیکس پرداخته شد. در شبیه‌سازی انجام شده، تمام واکنش‌های مؤثر بر فرایند تولید پلازما در نظر گرفته شده، و علاوه بر این سطح مقطع واکنش‌هایی که در پلازما رخ می‌دهند از انرژی 0.01 MeV تا 1 MeV در نرم‌افزار وارد شد. در شکل ۴، نمایی سه بعدی از آنتن ناگویای طراحی شده در محیط شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. آنتن ناگویا با شعاع 3 cm و طول 12 cm از $z = 5$ تا $z = 17 \text{ cm}$ محفظه قرار گرفته است. ضخامت آنتن 0.1 mm است.

است. میدان مغناطیسی به طور معمول به صورت یکنواخت و یا نایکنواخت (بسته به نوع کاربرد) در این سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مقاله، سیستم میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت (در جهت محور) در نظر گرفته شده است. سیستم پلازما در میدان‌های مغناطیسی 100 G تا 600 G شبیه‌سازی و میدان مغناطیسی 600 G به عنوان میدان مغناطیسی مرجع برای رسیدن به چگالی مورد نظر (رابطه‌ی ۱۱) انتخاب شده است.

برای ایجاد میدان مغناطیسی 600 G ، از سیستم هلمهولتز متشکل از دو پیچ‌های مغناطیسی با شعاع داخلی 18 cm و شعاع خارجی 24 cm که فاصله‌ی بین مرکزهای آن‌ها برابر با شعاع خارجی هر یک پیچ‌ها است، استفاده شد. در خارج هر یک از پیچ‌ها از سیم‌های مسی به شعاع 4 mm با تعداد دور 225 و جریان عملی 53 A استفاده شد. این پیچ‌ها به صورت یک سیستم هلمهولتز برای ایجاد میدان مغناطیسی یکنواخت در حد فاصل دو پیچ طراحی و شبیه‌سازی شدند. ابعاد سیم‌ها، تعداد دورها و جریان اعمال شده به آن‌ها همه در راستای ایجاد یک میدان مغناطیسی 600 G در نقطه‌ی وسط خط فاصل مراکز این دو پیچ هستند. میدان مغناطیسی محاسبه شده در نقطه‌ی وسط محور دو پیچ‌های مغناطیسی از طریق رابطه‌ی زیر برابر با 0.5957 T است.

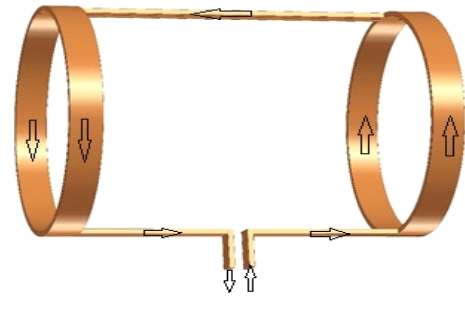
$$B = 0.716 \frac{\mu_0 N I}{R} = 0.5957 \text{ T} \approx 595.7 \text{ G} \quad (21)$$

که در آن μ_0 ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خلاء، N تعداد دور سیم‌ها در هر پیچ‌های مغناطیسی، I جریان اعمال شده به هر پیچ‌های مغناطیسی، R شعاع داخلی هر پیچ‌های مغناطیسی است. شکل ۲ میدان مغناطیسی شبیه‌سازی شده برای این سیستم پلاسمای هلیکون را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود شدت میدان مغناطیسی در حد فاصل پیچ‌ها به حدود 600 G می‌رسد.

در شکل ۳، چگالی شار مغناطیسی در طول محفظه نشان داده شده است. محل قرارگیری پیچ‌ها به ترتیب در $21/25$ و $38/75 \text{ cm}$ است. از شکل ۳ بر می‌آید که در بین دو پیچ، میدان مغناطیسی دارای یکنواختی مناسبی است. بدین معنا که، شار مغناطیسی در این ناحیه (محل قرارگیری آنتن) تقریباً

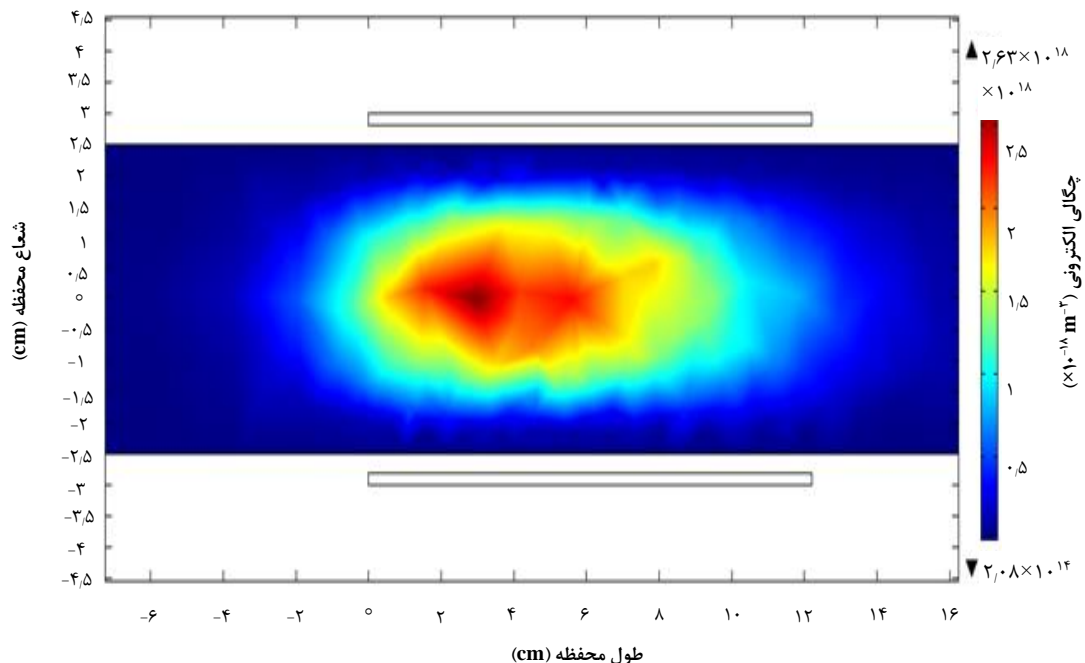
می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود با استفاده از این سیستم به پلاسمایی با چگالی $2.63 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ رسیده‌ایم. نمودار تغییرات دمای الکترون و چگالی پلازما برای پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده، در محور Z (به طوری که آنتن ناگویا از $z = 5$ تا $z = 17 \text{ cm}$ قرار گرفته است) در شکل ۶، نشان داده شده است. با توجه به این شکل نیز، مقدار بیشینه‌ی چگالی پلازما در این سیستم پلاسمای هلیکون برابر با $2.63 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ و مقدار بیشینه‌ی دمای الکترون برابر با 2.64 eV است.

سیستم پلاسمای هلیکونی به ازای میدان‌های مغناطیسی متفاوت از ۱۰۰ تا ۶۰۰ G شبیه‌سازی و نتیجه‌های به دست آمده برای چگالی پلازما در شکل ۷ نشان داده شده است. یکی از پارامترهایی که در افزایش چگالی و میزان یونش در منبع پلاسمای هلیکون اهمیت به سزایی دارد، توان جذب شده است. تغییرات توان جذب شده به تغییرات چگالی پلازما وابسته است و علاوه بر آن، تغییرات میدان مغناطیسی ثابت در طول محور استوانه نیز می‌تواند تأثیر بسزایی بر مقدار توان جذب داشته باشد.

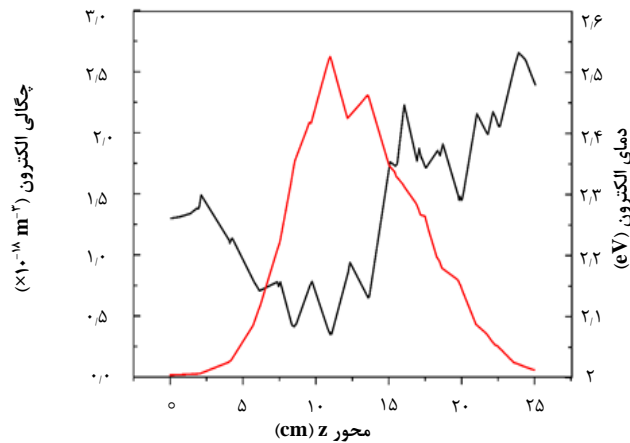


شکل ۴. نمایی از آنتن ناگویای شبیه‌سازی شده و جریان شارش یابنده از آن.

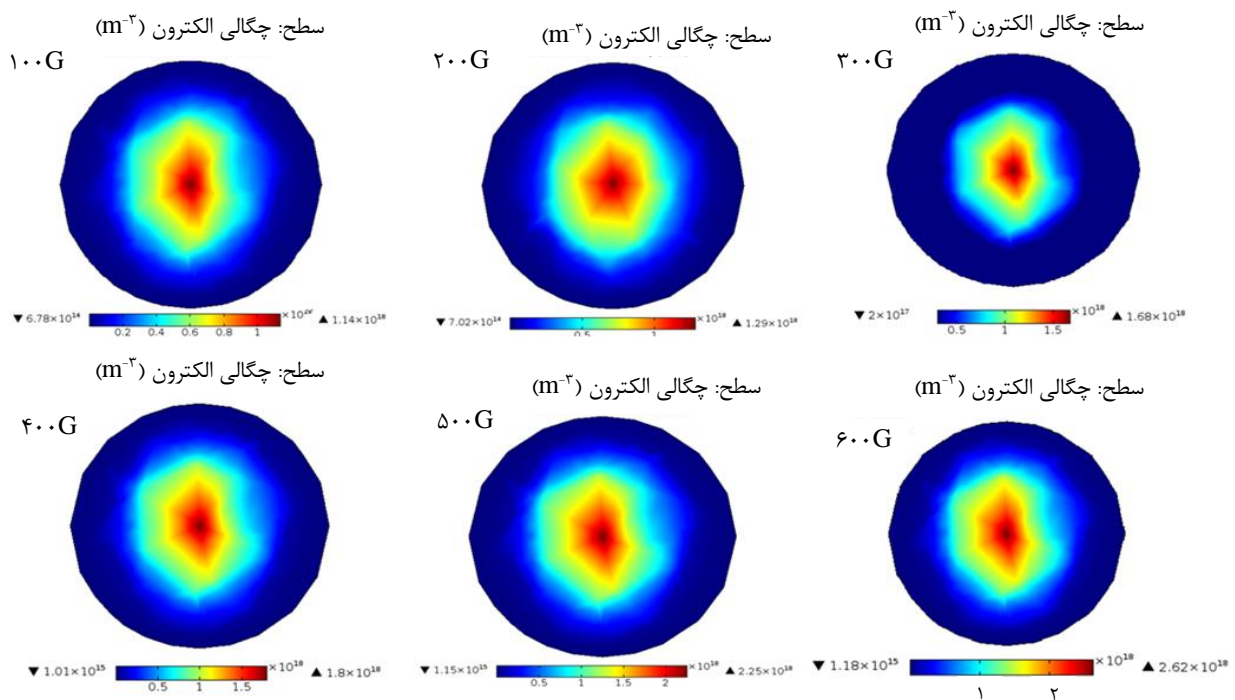
در شبیه‌سازی انجام شده، گاز آرگون با فشار 10 mTorr وارد محفظه‌ی پلازما که مطابق محاسبه‌ها با شعاع 2.9 cm و طول 40 cm طراحی شده است، تزریق می‌شود. موج بسامد رادیویی با توان 1.5 kW و بسامد 13.56 MHz به آنتن ناگویا اعمال شده است. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان داد که به پلاسمای هلیکونی با چگالی $2.63 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ و دمای 2.64 keV دست می‌یابیم. در شکل ۵، سیستم پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده با آنتن ناگویا، بسامد 13.56 MHz ، توان 1.5 kW و میدان مغناطیسی ثابت 600 G مشاهده



شکل ۵. سیستم پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده با آنتن ناگویا با چگالی $2.63 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ، میدان مغناطیسی ثابت 600 G ، بسامد 13.56 MHz و توان 1.5 kW .



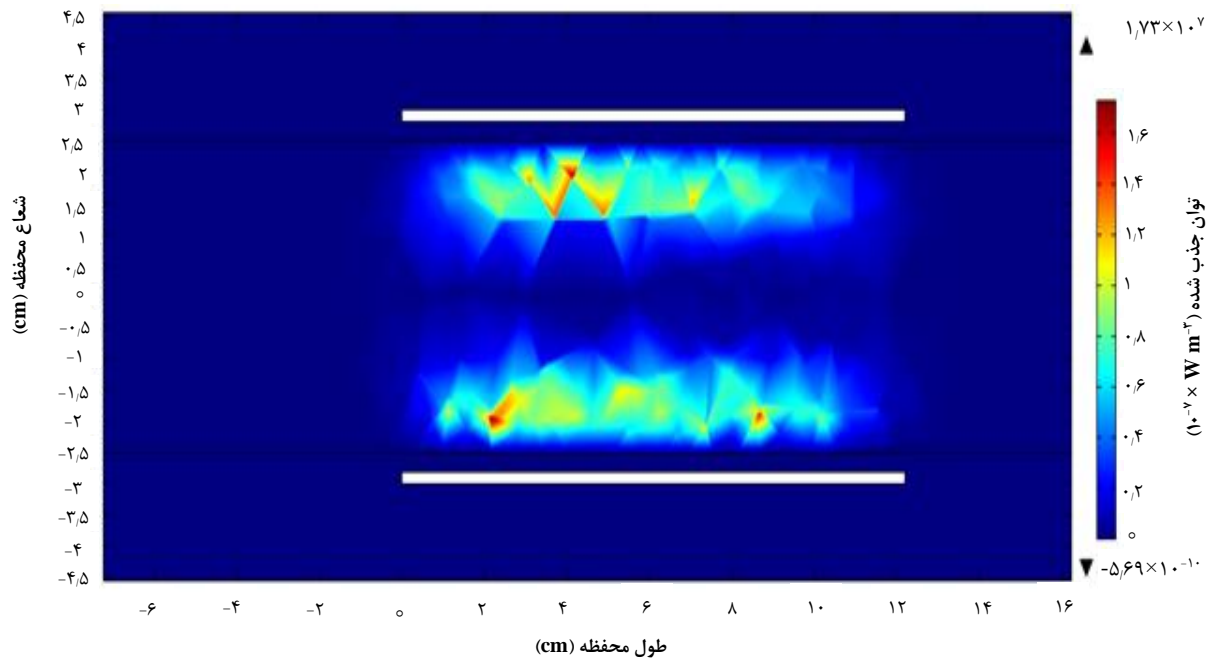
شکل ۶. نمودار تغییرات چگالی (قرمز) و دمای (سیاه) پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده، در محور Z محفظه.



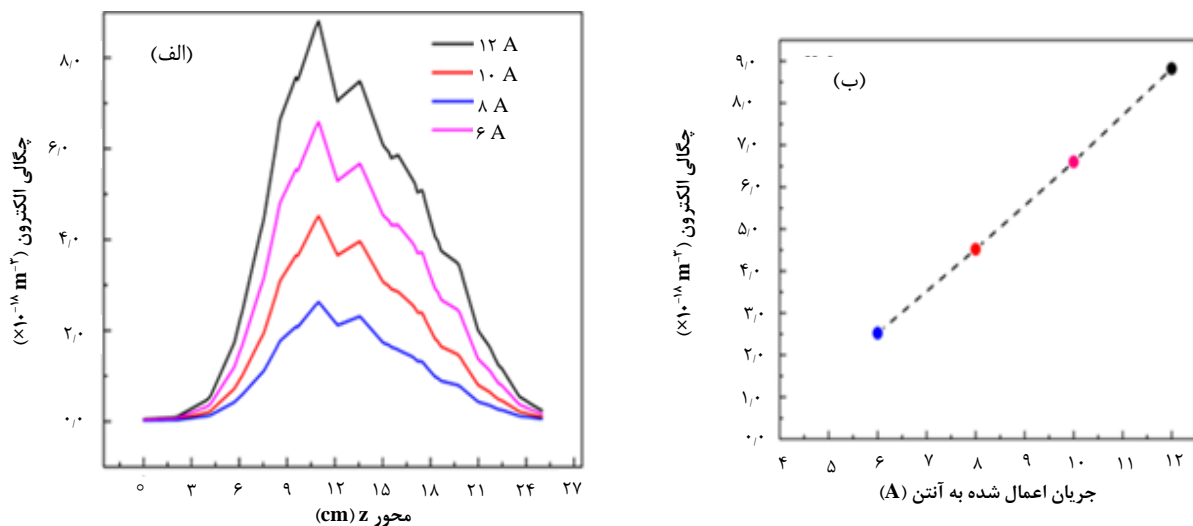
شکل ۷. مقطع پلاسمای هلیکون در میدان‌های مغناطیسی متفاوت.

از جمله‌ی عامل‌های دیگری که می‌تواند در مقدار توان جذب شده و تغییرات چگالی نقش بازی کند، تغییرات جریان اعمال شده به آنتن است. بدین منظور تغییرات چگالی پلازما با افزایش مقدار جریان اعمال شده به آنتن مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ الف توزیع محوری چگالی پلازما برای جریان‌های مختلف از ۶ تا ۱۲ A اعمال شده به آنتن ناگویا نشان داده شده است. هم‌چنین شکل ۹ ب رابطه‌ی بین چگالی بیشینه‌ی پلازما و جریان اعمال شده به آنتن را نمایش می‌دهد.

تغییرات توان جذب شده توسط الکترون‌ها در میدان مغناطیسی ۶۰۰ G، بسامد ۱۳/۵۶ MHz، جریان آنتن ۶ A، فشار گاز ۱۰ mTorr، به صورت دو بعدی (در راستای محوری و شعاعی محفظه) برای سیستم پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده، در شکل ۸ ارایه شده است. نتیجه‌های شبیه‌سازی در شکل‌های ۶، ۷، و ۸ نشان می‌دهند که بیشینه‌ی توان جذب شده توسط الکترون‌ها با آنتن ناگویا در میدان مغناطیسی ۶۰۰ G، در فشار ۱۰ mTorr برابر با 17.3 Wcm^{-3} و بیشینه‌ی چگالی پلازما برابر با $2.63 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ است.



شکل ۸. توان جذب شده توسط الکترون‌ها با آنتن ناگویا با جریان ۶A، در میدان مغناطیسی ۶۰۰ G، بسامد ۱۳/۵۶ MHz، فشار ۱۰ mTorr.



شکل ۹. (الف): توزیع محوری چگالی پلاسمای برای جریان‌های مختلف ۶A (آبی)، ۸A (قرمز)، ۱۰A (صورتی)، و ۱۲A (سیاه) و (ب): رابطه‌ی بین بیشینه‌ی چگالی پلاسمای و جریان اعمال شده به آنتن ناگویا (ب).

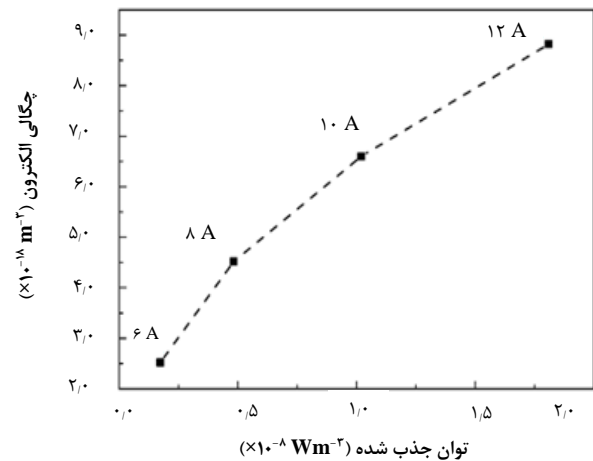
این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که چگالی که افزایش جریان بسامد رادیویی اعمال شده به آنتن، با نسبت ۱/۰۴۹ افزایش می‌یابد. از سوی دیگر تغییرات توان جذب شده با جریان بسامد رادیویی اعمال شده به آنتن به دست آورده شد. در شکل ۱۰، تغییرات چگالی و توان جذب شده با جریان اعمال شده به آنتن مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۹ الف مشاهده می‌شود، توزیع محوری چگالی با افزایش جریان و توان ورودی، شکل کلی خود را حفظ کرده و مختل نمی‌شود، افزایش توان ورودی تنها سبب افزایش بیشینه‌ی چگالی شده و گستره‌ی توزیع طولی چگالی را تغییر نمی‌دهد. مقدار بیشینه‌ی چگالی پلاسمای برای جریان‌های ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ A به ترتیب برابر با $۲/۶۳ \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ، $۴/۵۲ \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ، $۶/۶۰ \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ و $۸/۸۲ \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ است. از

دارند و همچنین علاوه بر تغییر میدان مغناطیسی پیچها، جریان یا توان اعمال شده به آنتن می‌تواند تأثیر بسزایی بر این دو پارامتر داشته باشند.

در ارتباط با درستی پارامترهای به دست آمده و برای راستی‌آزمایی این شبیه‌سازی، ۷ دستگاه پلاسما هلیکونی را که پیش از این ساخته شده و نتیجه‌های تجربی آن‌ها در زمینه‌های پژوهشی گزارش شده بود، شبیه‌سازی کرده و توانستیم به چگالی پلاسمایی تقریباً برابر با مقدار گزارش شده دست یابیم. در جدول ۱ مشخصه‌های ۷ دستگاه هلیکون ذکر شده و در ستون آخر مقدار چگالی پلاسمای به دست آمده از شبیه‌سازی درج شده است.

در این کار، تلاش بر این بود که مدل سه بعدی از سیستم پلاسمای هلیکون ارایه شود تا زمینه‌ی لازم برای بهینه‌سازی این منبع پلاسمای وجود داشته باشد. تمام پژوهش‌گران زمینه‌ی هلیکون تلاششان بر این اساس بوده که به راهی برای ارتقای سیستم هلیکون در راستای افزایش چگالی دست یابند. همان‌طور که اشاره شد با کدهای متفاوت به مدل‌سازی دو بعدی این سیستم و به بررسی پارامترهای حایز اهمیت در آن پرداخته‌اند. در این مقاله، هدف از شبیه‌سازی سه بعدی بررسی پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر توان جذب شده و چگالی پلاسمای در یک منبع پلاسمای هلیکونی بود تا از آن طریق بتوان به طراحی یک منبع پلاسمای بهینه برای استفاده در سیستم گرمایش کمکی (باریکه خنثای) توکامک‌های با اندازه‌ی کوچک پرداخت.



شکل ۱۰. تغییرات چگالی پلاسمای و توان جذب شده با جریان اعمال شده به آنتن.

بر اساس نتیجه‌های شبیه‌سازی به دست آمده در شکل‌های ۹ و ۱۰، بیشینه‌ی توان جذب شده در جریان‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ A به ترتیب، $۱٫۷۳ \times ۱۰^۷$ ، $۴٫۸۳ \times ۱۰^۷$ ، $۱٫۰۲ \times ۱۰^۸$ و $۱٫۸۱ \times ۱۰^۸$ $Wm^{-۲}$ است. بنابراین نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان می‌دهد که، افزایش جریان اعمال شده به آنتن سبب افزایش توان جذب شده و در نتیجه افزایش چگالی پلاسمای می‌شود. هم‌چنان که از نتیجه‌های شبیه‌سازی بر می‌آید با دو برابر شدن جریان اعمال شده به آنتن توان جذب شده بیش از ۱۰ برابر می‌شود. این در حالی است که چگالی پلاسمای کمی بیش از سه برابر مقدار اولیه‌ی خود می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که توان جذب شده و چگالی پلاسمای دو پارامتر اصلی در سیستم پلاسمای هلیکون هستند که وابستگی تنگاتنگی با یکدیگر

جدول ۱. مشخصه‌های چگالی به دست آمده از ۷ دستگاه هلیکون با آرگون و با آنتن ناگویای ساخته شده و چگالی شبیه‌سازی شده

مرجع	ابعاد شیشه پریکس	فشار (mTorr)	طول آنتن (cm)	بسامد (MHz)	میدان مغناطیسی (Tesla)	توان بسامد رادیویی (kW)	چگالی الکترون ($m^{-۳}$) گزارش شده در منابع	چگالی الکترون ($m^{-۳}$) محاسبه شده
[۱۸]	R:۲٫۵ cm L:۱۶۰ cm	۱۵	۱۵	۲۷٫۱۲	۰٫۰۸	۲	۵×۱۰^{-۱۸}	$۵٫۷۵ \times ۱۰^{-۱۸}$
[۲۰]	R:۳ cm L:۴۲٫۵ m	۳	۱۵	۱۳٫۵۶	۰٫۰۵۷	۱	$۱٫۱ \times ۱۰^{-۱۹}$	$۱٫۰۱ \times ۱۰^{-۱۹}$
[۲۱]	R:۲ cm L:۱٫۳ m	۱٫۵	۱۲	۲۷٫۱۲	۰٫۱۳	۲	۳×۱۰^{-۱۸}	$۲٫۵ \times ۱۰^{-۱۸}$
[۲۲]	LINL	۱-۳	۱۸	۱۳٫۵۶	۰٫۰۰۶-۰٫۰۴۵	۳	۱×۱۰^{-۱۸}	$۱٫۴۸ \times ۱۰^{-۱۸}$
[۲۳]	R:۱۰ cm L:۱۲۲ cm	۱	۱۵	۱۳٫۵۶	۰٫۱۵	۱٫۴	۲×۱۰^{-۱۹}	$۱٫۶ \times ۱۰^{-۱۹}$
[۹]	R:۳ cm	۸	۱۳٫۳	۲۷٫۱۲	۰٫۰۸	۱٫۹	۶×۱۰^{-۱۸}	$۴٫۹ \times ۱۰^{-۱۸}$
[۲۴]	R:۲٫۲۵ cm L:۴۰ cm	۱-۳	۱۶	۱۳٫۵۶	۰٫۰۳۲-۰٫۰۵۶	۱	$۱٫۸ \times ۱۰^{-۱۸}$	$۱٫۳ \times ۱۰^{-۱۸}$

۴. نتیجه‌گیری

تأثیرات تغییر جریان و توان ورودی به آنتن ناگویا بر افزایش چگالی بررسی شد. در چهار جریان ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ A، مقدار چگالی پلازما به ترتیب، برابر با $۲/۶۳ \times ۱۰^{۱۸}$ ، $۴/۵۲ \times ۱۰^{۱۸}$ ، $۶/۶۰ \times ۱۰^{۱۸}$ و $۸/۸۲ \times ۱۰^{۱۸} \text{ m}^{-۳}$ به دست آمد. نتیجه‌ها نشان داد که چگالی با توجه به افزایش توان بسامد رادیویی اعمال شده به آنتن با نسبت ۱/۰۴۹ تغییر می‌کند. داده‌های شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش توان ورودی، توان جذب شده و در نتیجه چگالی پلاسمای تولید شده افزایش می‌یابد، به طوری که با دو برابر شدن جریان اعمال شده به آنتن چگالی پلاسمای تولید شده بیش از سه برابر می‌شود.

در ارتباط با درستی پارامترهای به دست آمده از شبیه‌سازی پلاسمای هلیکون، ۷ دستگاه پلاسمای هلیکون را که پیش از این ساخته شده و نتیجه‌های تجربی آن‌ها در زمینه‌های پژوهشی منبع‌های هلیکونی گزارش شده بود توسط نرم‌افزار کامسول و به روش مشابه شبیه‌سازی کرده و توانستیم به چگالی پلاسمای سازوگار با نتیجه‌های گزارش شده دست یابیم.

در این کار، تلاش بر این بود که بتوان مدل سه بعدی سیستم پلاسمای هلیکون را شبیه‌سازی نمود تا زمینه برای بهینه‌سازی این سیستم فراهم آید. هدف از شبیه‌سازی سه بعدی این سیستم علاوه بر بهینه‌سازی آن، برداشتن گام برای طراحی یک منبع پلاسمای مناسب در سیستم گرمایشی کمکی (باریکه خنثای) توکامک‌های اندازه-کوچک بود.

در این مقاله، به بررسی و شبیه‌سازی یک سیستم پلاسمای هلیکون با آنتن ناگویا، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی کامسول مالتی فیزیکس پرداخته شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، تمام برهم‌کنش‌ها و پارامترهای مؤثر بر فرایند تولید پلازما در نظر گرفته شده است، علاوه بر این سطح مقطع واکنش‌هایی که در پلازما رخ می‌دهند در گستره‌ی انرژی $۰/۰۰۱ \text{ eV}$ تا ۱ MeV در نرم‌افزار وارد شده است. پارامترهای کلیدی مانند توان جذب شده، چگالی و دمای پلازما اندازه‌گیری شده است که داده‌های زیر حاصل شده است:

- با مقادیر پارامترهای: میدان مغناطیسی، ۶۰۰ G ؛ فشار گاز آرگون تزریق شده، ۱۰ mTorr ؛ توان بسامد رادیویی اعمال شده به آنتن، $۱/۵ \text{ kW}$ و بسامد، $۱۳/۵۶ \text{ MHz}$ ، پلاسمای ایجاد شده دارای بیشینه‌ی چگالی $۲/۶۳ \times ۱۰^{۱۸} \text{ m}^{-۳}$ و بیشینه‌ی دمای الکترون $۲/۶۴ \text{ eV}$ بود، به طوری که دما و چگالی به دست آمده با آنچه که در مقاله‌های مختلف گزارش شده است هم‌خوانی خوبی دارد [۱، ۲۲، ۲۳].

- سیستم پلاسمای هلیکونی به ازای میدان‌های مغناطیسی ۱۰۰ تا ۶۰۰ G شبیه‌سازی و نتیجه‌های چگالی پلاسمای به دست آمده گزارش شد.

- توان جذب شده (با پارامترهای ذکر شده در بند ۱) در پلازما با آنتن ناگویا برابر با $۱/۷۳ \times ۱۰^۷ \text{ Wm}^{-۳}$ است. توان جذب شده یکی از پارامترهای مهم در تولید پلاسمای هلیکونی است که با مطالعه و بررسی آن در فشارها و میدان‌های مغناطیسی متفاوت می‌توان به بررسی سازوکارهای جذب پرداخت.

- تأثیر تغییرات جریان اعمال شده به آنتن بر توان جذب شده مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که در جریان‌های ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ A توان جذب شده به ترتیب، برابر با $۱/۷۳ \times ۱۰^۷$ ، $۴/۸۳ \times ۱۰^۷$ ، $۶/۸۳ \times ۱۰^۸$ و $۱/۰۲ \times ۱۰^۸ \text{ Wm}^{-۳}$ است. در نتیجه مشاهده شد که با افزایش جریان ورودی، توان جذب شده افزایش می‌یابد. هم‌چنان که از نتیجه‌های شبیه‌سازی بر می‌آید با دو برابر شدن جریان اعمال شده به آنتن توان جذب شده بیش از ۱۰ برابر می‌شود.

مراجع

1. F.F. Chen, In *Advanced Plasma Technology*, ed. by R. d'Agostino, P. Favia, H. Ikegami, Y. Kawai, N. Sato and F. Arefi-Khonsari (Wiley-VCH, Berlin, 2006), Chap. 6.
2. Y.S. Hwang, I.S. Hong, G.S. Eom, *Review of scientific instruments*, **69**, 3, 1344-1348 (1998).
3. F.F. Chen, *IEEE Transactions on plasma science*, **36**, 5, 2095-2110 (2008).
4. F.F. Chen, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **33**, 4, 339 (1991).
5. F.F. Chen, *Physica Scripta 1990.T*, **30**, 14 (1990).
6. F.F. Chen, Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles, CA 90095-1594, USA.
7. F.F. Chen, *Plasma Sources Science and Technology*, **21**, 5, 055013 (2012).
8. O.V. Braginskii, A.N. Vasil'eva, A.S. Kovalev, *Plasma Physics Reports*, **27**, 8, 699-707 (2001).
9. M. Light, F.F. Chen, *Physics of Plasmas*, **2**, 4, 1084-1093 (1995).
10. A.R. Ellingboe, R.W. Boswell, *Physics of Plasmas*, **3**, 7, 2797-2804 (1996).
11. F.F. Chen, R.W. Boswell, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **25**, 6, 1245-1257 (1997).
12. Y. Mouzouris, J.E. Scharer, *Physics of Plasmas*, **5**, 12, 4253-4261 (1998).
13. F.F. Chen, *University of Los Angeles Report LTP-806 June*, (1998).
14. R.L. Stenzel, J.M. Urrutia, *Physics of Plasmas*, **23**, 9, 092103 (2016).
15. A. Ganguli, R.D. Tarey, Indian Institute of Technology Delhi, New Delhi 110 016, India, *CURRENT SCIENCE*, **3**, 10, 83 (2002).
16. D. Melazzi, V. Lancellotti, *Plasma Sources Science and Technology*, **24**, 2, 025024 (2015).
17. I.V. Kamenski, G.G. Borg, *Physics of Plasmas*, **3**, 12, 4396-4409 (1996).
18. F.F. Chen, *Physics of Plasmas*, **3**, 5, 1783-1793 (1996).
19. T. Windisch, K. Rahbarnia, O. Grulke, T. Klinger, *Plasma Sources Science and Technology*, **19**, 5, 055002 (2010).
20. C.A. Lee, G. Chen, A.V. Arefiev, R.D. Bengtson, B.N. Breizman, *Physics of Plasmas*, **18**, 013501 (2011).
21. G. Chen, A.V. Arefiev, R.D. Bengtson, B.N. Breizman, C.A. Lee, L.L. Raja, *Physics of plasmas*, **13**, 123507 (2006).
22. A.W. Molvik, T.D. Rognlien, J.A. Byers, R.H. Cohen, A.R. Ellingboe, E.B. Hooper, H.S. McLean, B.W. Stallard, P.A. Vitello, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **14**, 984 (1996).
23. X.M. Guo, J. Scharer, Y. Mouzouris, L. Louis, *Physics of Plasmas*, **6**, 3400 (1999).
24. F.A.N.G. Tong-Zhen, W. Long, J. Di-Ming, Z. Hou-Xian, *Chinese Physics Letters*, **18**, 1098 (2001).