



شبیه‌سازی پلاسمای فوق چگال چشمه یونی کوچک مقیاس تشدید سیکلوترونی الکترون

حمیدرضا میرزایی^{۱*}، معصومه یارمحمدی‌سطری^۱، حمید رحیم‌پور^۱، سینا فصیح^۲

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

۲. دانشکده فیزیک و انرژی، دانشگاه امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران- ایران

*Email: hamidreza.mirzaei@aut.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۱

چکیده

در این مقاله پلاسمای چشمه یونی کوچک مقیاس تشدید سیکلوترونی الکترون آهنربا دائم با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز شبیه‌سازی و بررسی شده است. این چشمه با محفظه پلاسمای به شعاع ۵۰ میلی‌متر، طول ۵۰ میلی‌متر و بیشینه توان ورودی ۱ کیلووات، مولد جریان باریکه پروتونی ۱۰ میلی‌آمپر با انرژی ۵۰ کیلوولت است. به دلیل ابعاد کوچک مقیاس محفظه و طول موج بلند میکروموج ($\lambda_0 = 122.4$ mm) تزریق شده در این چشمه، انتشار و انتقال میکروموج به داخل محفظه در شرایط عادی امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای انتقال توان میکروموج به داخل محفظه و تشکیل پلاسمای دی‌الکتریک با جنس آلومینا با ضریب‌گذردهی نسبی ۹ در ورودی محفظه استفاده شده است. این مقاله، به طراحی و شبیه‌سازی خط انتقال و جفت شدگی میکروموج به محفظه چشمه یونی کوچک مقیاس پرداخته است. در این راستا، شدت میدان مغناطیسی پیچه‌ها، میدان الکتریکی میکروموج و تحولات زمانی و مکانی کمیت‌های مهم هم‌چون، چگالی توان جذبی، لایه تشدید هیبرید بالا، چگالی و دمای الکترونی در زمان‌های اولیه تزریق میکروموج به داخل چشمه یونی پلاسمای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: چشمه یونی کوچک مقیاس، تشدید سیکلوترونی الکترون، پلاسمای، نرم‌افزار کامسول

Simulation study of the over dense plasma in an electron cyclotron resonance miniature ion source

H.R. Mirzaei^{*1}, M. Yarmohammadi Satri¹, H. Rahimpour¹, S. Fasih²

1. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box:11365-8486, Tehran - Iran

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

Research Article

Received 13.3.2022, Accepted 11.6.2022

Abstract

In this paper, the plasma of a 2.45 GHz permanent magnet miniature ECR ion source has been simulated and discussed. The source with a cylindrical plasma chamber of 50 mm in radius, 50 mm in length, and a maximum input power of 1kW generates a 10 mA, 50 kV proton beam. Considering the long wavelength of the microwave generator ($\lambda_0 = 122.4$ mm) and the miniature size of the plasma chamber, an alumina window with a relative permittivity of 9 is hired at the entrance of the plasma chamber. Microwave power is injected into the chamber through the window. Microwave power transfer and coupling to the miniaturized plasma chamber of the ion source is the focus of this study. In this way, the strength of the magnetic field, microwave electric field, and spatial and temporal variations of the essential parameters like the density of the microwave power absorption, the Upper Hybrid Resonance (UHR) layer, density, and temperature of the plasma at the starting time of the microwave injection to the ion source chamber are investigated.

Keywords: Miniature ion source, Electron cyclotron resonance, Plasma, COMSOL software



۱. مقدمه

(PIC^۲) توسعه داده شده است [۲۳-۱۵]. روش اجزاء محدود نیز برای شبیه‌سازی پلاسمای ECR به کار گرفته شده است [۲۴]. نرم‌افزار کامسول نیز با روش اجزاء محدود و با استفاده از مدل سیالی قابلیت شبیه‌سازی پلاسمای ECR را دارد که در این مقاله نیز استفاده شده است [۲۵].

در این مطالعه به نحوه انتقال میکروموج به محفظه‌ی ECR کوچک مقیاس با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز پرداخته شده و شبیه‌سازی‌های مرتبط با استفاده از نرم‌افزار کامسول^۳ [۲۵] انجام شده است. برای درک فرایندهای پلاسمایی در چشمه یونی ECR و بررسی تغییرات مکانی و زمانی کمیت‌های پلازما در سه بعد، با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی انجام گردید و نتایج بررسی شد. نتایج گویای این مطلب است که سازوکار اصلی، جذب تشدید سیکلوترونی الکترون می‌باشد و تحولات زمانی و مکانی نشان می‌دهد که ناحیه جذب با گذشت زمان تغییر می‌کند و پلاسمای چگال^۴ تشکیل می‌گردد. با بررسی‌های انجام شده در تحولات مکانی و زمانی مشخص گردید، در چشمه یونی کوچک مقیاس، جذب تشدید هیبرید بالا نیز اتفاق می‌افتد که عامل ایجاد پلاسمای فوق چگال است.

۲. چشمه یونی ECR

هدف این مقاله، شبیه‌سازی پلاسمای چشمه یونی کوچک مقیاس تشدید سیکلوترونی الکترون (ECR) با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز و توان ۱ کیلووات است. چشمه یونی بر پایه پلاسمای ECR و با استفاده از آهنرباهای دائم طراحی شده است. محفظه پلاسمای این چشمه با قطر ۵۰ میلی‌متر، طول ۵۰ میلی‌متر و از جنس آلومینیم می‌باشد. برای انتشار میکروموج، طول محفظه از $\lambda/4$ موج ورودی بزرگ‌تر انتخاب شده است. برای ایجاد میدان مغناطیسی ۸۷۵ گوس، بخش تولیدکننده میدان مغناطیسی از سه عدد آهنربای دائم نئودیمیوم^۵ تشکیل شده است که آهنرباها با قطر داخلی ۶۰ میلی‌متر، قطر خارجی ۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۸۰ میلی‌متر می‌باشند. بخش استخراج‌گر نیز از سه الکتروود تشکیل شده است که قطر روزنه الکتروود پلازما، سرکوب‌گر^۶ و الکتروود زمین به ترتیب ۶، ۸ و ۸ میلی‌متر می‌باشند. بخش میکروموج شامل یک مگنترون با توان ۱ کیلووات دائم‌کار و خروجی پیوسته توان (CW) می‌باشد که برای حفاظت از امواج برگشتی به یک ایزولاتور که شامل یک

چشمه‌های یونی میکروموج با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، به دلیل شدت بالا، آمیتنس پایین، ساختار ساده، هزینه پایین، عمر بالا و ... کاربردهای وسیعی در شتابگرهای مدرن جریان بالا دارند [۳-۱]. در سال‌های اخیر، محققان تحقیقات بسیاری در زمینه‌های پیکربندی میدان مغناطیسی، فیزیک پلازما، پایداری باریکه و جفت شدگی توان میکروموج انجام داده‌اند [۴-۶]. چشمه‌های یونی کوچک مقیاس کاربرد وسیعی در مولدهای نوترون و کاشت یون دارند [۷]. چشمه‌های یونی میکروموج دارای ساختارها و هندسه‌های متفاوتی می‌باشد. هم‌چنین چشمه‌های یونی تشدید سیکلوترونی الکترون در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز اغلب دارای ابعاد بزرگی می‌باشند. به دلیل طول بلند میکروموج به کار گرفته شده ($\lambda_0 = 122.4 \text{ mm}$)، اغلب این نوع چشمه‌ها دارای محفظه پلاسمایی با قطری در حدود ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشند. از منظر تئوری خطوط انتقال میکروموج و با توجه به فرکانس قطع برای موج‌بر دایروی مد TE_{11} ، ابعاد محفظه باید بزرگ‌تر از ۷۲ میلی‌متر باشند. البته روش‌هایی برای ارسال امواج وجود دارد که از موج‌برهای فشرده و یا دی‌الکتریک‌ها برای ارسال امواج استفاده می‌شود [۸-۱۱]. با توجه به این‌که چشمه‌های کوچک مقیاس ابعاد کوچکی دارند می‌توانند جریان باریکه بالایی تولید کنند و این عامل باعث شده است تا این نوع چشمه‌ها مورد توجه قرار گیرند. جریان باریکه ارتباط مستقیمی با چگالی پلازما دارد که در مقالات تجربی و شبیه‌سازی [۳، ۱۲، ۱۳] نیز میزان چگالی این نوع چشمه‌ها به‌دست آمده است. مقادیر چگالی بیش‌تر از میزان چگالی بحرانی می‌باشد. برای توصیف این موضوع در مقاله ارائه شده به شبیه‌سازی پلازما پرداخته شده است و نشان داده شده است که چگالی بالاتر از میزان چگالی بحرانی ($7.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$) است. برای توصیف این پدیده به برانگیختگی امواج الکترواستاتیک در داخل پلازما پرداخته شده و با توجه به این که میدان مغناطیسی ثابت نبوده است امکان برانگیختگی و جذب موج الکترواستاتیک هیبرید بالا وجود داشته که در این مقاله به آن پرداخته شد.

در دانشگاه پکینگ^۱ کشور چین یک چشمه کوچک مقیاس طراحی، ساخته و آزمایش شده است که نتایج به‌دست آمده با طراحی ارائه شده در این مقاله هم‌خوانی دارد [۱۴].

برای شبیه‌سازی پلاسمای ECR مدل‌های تک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی با روش‌های مونت‌کارلو یا ذره در جعبه

2. Particle In Cell (PIC)
3. COMSOL Multi Physics
4. Over-Dense
5. NdFeB
6. Suppressing Electrode



انتخاب شده است. پنجره میکروموج برای جفت شدگی میکروموج از موج بر به محفظه پلازما و حفظ خلأ^۲ به کار می رود. این پنجره از سه قطعه سرامیک آلومینا استوانه‌ای شکل به قطر ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر با ثابت دی الکتریک ۹ تشکیل می‌شود و ارتفاع مجموع آلومینا ۳۰ میلی‌متر، معادل با $3\lambda/4$ است. در شکل ۲ اندازه میدان الکتریکی در راستای محور و نتایج بررسی نحوه انتقال میکروموج به داخل محفظه چشمه یونی ECR رسم شده است. اندازه میدان الکتریکی در موج بر WR۲۸۴، به دلیل ابعاد کوچک آن افزایش می‌یابد و در داخل محفظه اندازه میدان الکتریکی در حدود 2×10^4 V/m، معادل با تقریباً ۵۰ درصد اندازه آن در داخل موج بر می‌باشد و بیانگر نفوذ میدان الکتریکی در داخل محفظه است.

نمونه مشابه چشمه کوچک مقیاس در مرجع [۳، ۱۴، ۲۸] ارائه شده است که با نتایج به دست آمده در این مطالعه همخوانی خوبی دارند.

پلاسمای ECR همانند یک ماده با ثابت دی الکتریک $(\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r)$ عمل می‌کند که گذردهی نسبی آن در راستای میدان مغناطیسی به این صورت نوشته می‌شود [۲۹]:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{(\omega_{pe} / \omega)^2}{1 - \omega_{ce} / \omega} \quad (1)$$

و ω_{pe} فرکانس پلازما، ω فرکانس میکروموج و ω_{ce} فرکانس سیکلوترونی الکترون است.

فرکانس پلازما $\omega_{pe} = n_e e^2 / \epsilon_r m_e$ ، فرکانس میکروموج $\omega = eB / m_e$ برابر با ۲/۴۵ گیگاهرتز برای میدان مغناطیسی ۸۷۵ گوس و فرکانس الکترون ω_{ce} می‌باشند و فرمول بالا به صورت زیر، ساده‌سازی می‌شود:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n_e m_e}{\epsilon_0 B_0 (B - B_0)} \quad (2)$$

که n_e چگالی الکترون، m_e جرم الکترون و B میدان مغناطیسی محوری در چشمه یونی می‌باشد. این فرمول برای پلاسمای مغناطیده با چگالی بالای الکترون و میدان مغناطیسی $B > B_0$ به کار می‌رود، گذردهی نسبی چشمه ECR بزرگتر از فضای آزاد $(\epsilon_r = 1)$ می‌شود. ارتباط بین طول موج λ_p در داخل ماده و گذردهی نسبی ϵ_r به صورت زیر نوشته می‌شود:

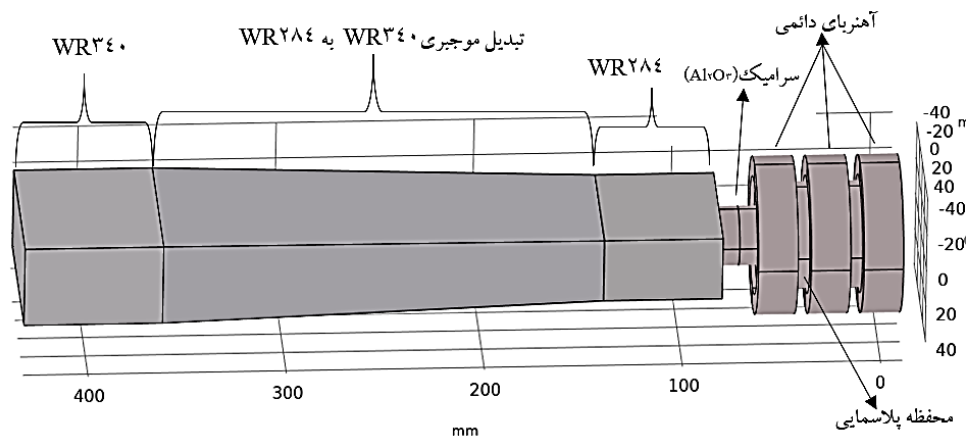
$$\lambda_p = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

سیرکولاتور^۱ به همراه بار اتلاف‌کننده^۲ است متصل می‌باشد و با استفاده از یک موج بر WR۳۴۰، مد TE_{۱۰} ایجاد می‌کند. میزان توان رفت و برگشت از طریق کوپلر جهتی^۳ و دیود اندازه‌گیری می‌شود و یک استاب تیونر^۴ برای کمینه کردن توان برگشتی در مسیر قرار می‌گیرد. برای کوچک کردن ابعاد موج بر از یک تبدیل WR۳۴۰ به WR۲۸۴ استفاده شده است. طرح‌واره چشمه یونی ECR طراحی شده، شامل هندسه، محفظه، آهنرباهای دائمی و بخش انتقال موج در شکل ۱ ارائه شده است. اساس طراحی فیزیکی چشمه یونی کوچک مقیاس، کاهش ابعاد چشمه با حفظ عملکرد می‌باشد. جفت شدگی میکروموج و پلازما نقش مهمی در میزان جریان باریکه خروجی دارد. در چشمه‌ای با ابعاد کوچک، جفت شدگی میکروموج از خط انتقال به محفظه پلاسمایی یکی از با اهمیت‌ترین مباحث است. اولین محدودیت در یک موج بر، فرکانس قطع پایین می‌باشد که با توجه به ابعاد تعیین می‌گردد. فرکانس قطع یک موج بر مستطیلی برابر با $c/2a$ و فرکانس قطع موج بر دایره‌ای برابر با $c / (\sqrt{\epsilon} \times 3.412R)$ می‌باشد، که در آن c سرعت نور در خلأ، ϵ ضریب گذردهی دی الکتریک، a عرض موج بر مستطیلی و R شعاع موج بر دایره‌ای است. جفت شدگی میکروموج به یک محفظه پلاسمایی با قطر ۵۰ میلی‌متر با تبدیل موج بر مستطیلی TE_{۱۰} به موج بر دایره‌ای TE_{۱۱} انجام می‌گیرد [۲۶]. برای این منظور از یک موج بر WR۲۸۴ با فرکانس قطع ۲/۰۷۹ گیگاهرتز و یک پنجره با قطر ۳۰ میلی‌متر استفاده شده است. هم‌چنین در ورودی محفظه‌ی چشمه، سه قطعه سرامیک آلومینا با قطر ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر قرار داده شده است.

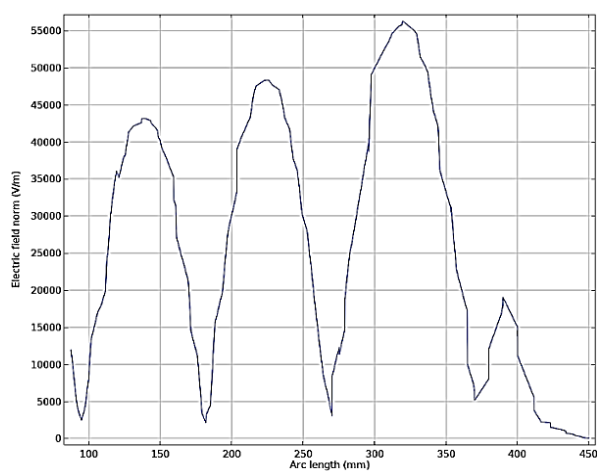
از منظر تئوری، برای انتقال میکروموج به داخل محفظه، شعاع محفظه نباید کمتر از (λ_c / π) باشد، به طوری که $\lambda_c = \pi R$ طول موج قطع برای مد TE_{۱۱} در یک محفظه استوانه‌ای با شعاع R می‌باشد. در نتیجه، حداقل قطر محفظه در فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز (در فضای آزاد $\lambda = 122.4$ mm) در حدود ۷۸ میلی‌متر باشد. بنابراین، در طراحی‌های معمول، امکان انتقال میکروموج به محفظه پلازما با قطر ۵۰ میلی‌متر و تولید پلاسمای ECR وجود ندارد. هم‌چنین برخی مطالعات نشان می‌دهد که پلاسمای مغناطیده معادل یک دی الکتریک با ثابت دی الکتریک بالا می‌باشد که سبب تغییر فرکانس قطع در محفظه و انتشار میکروموج می‌گردد [۲۷]. برای رفع این مشکل، پنجره میکروموج از جنس آلومینا^۵ به ضخامت ۳۰ میلی‌متر

1. Circulator
2. Dummy Load
3. Directional Coupler
4. Stub Tuner
5. Al2O3

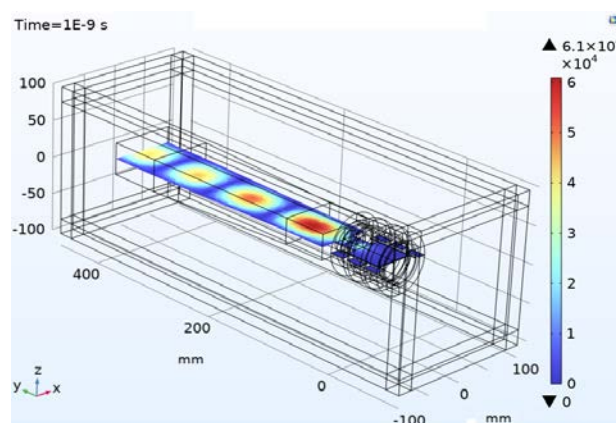




شکل ۱. طرح‌واره چشمه یونی ECR طراحی شده.



(ب)



(الف)

شکل ۲. توزیع میدان الکتریکی (الف) و اندازه میدان الکتریکی در راستای محور شبیه‌سازی شده (ب) در داخل موج‌بر WR340، تبدیل موج‌بر WR340 به WR284، موج‌بر WR284 و محفظه پلاسمایی با حضور سرامیک آلومینا با توان ورودی ۸۰۰ وات.

که Q فاکتور کیفیت، ε گذردهی ماده‌ی محفظه (با حضور پلازما)، R شعاع و z طول محفظه می‌باشد. همان‌گونه که در رابطه‌ی بالا دیده می‌شود، میدان الکتریکی با شعاع محفظه رابطه عکس دارد و کاهش قطر محفظه، چگالی پلاسمای ECR را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد.

با کاهش قطر محفظه، چگالی پلازما افزایش و به همان میزان طول موج λ_p و طول موج قطع λ_c محفظه نیز به صورت هم‌زمان کاهش می‌یابد. در شرایط بهینه با قطر $2R$ ، طول موج λ_p در داخل پلاسمای ECR برابر با λ_c می‌شود و با کاهش قطر چگالی پلازما به طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند.

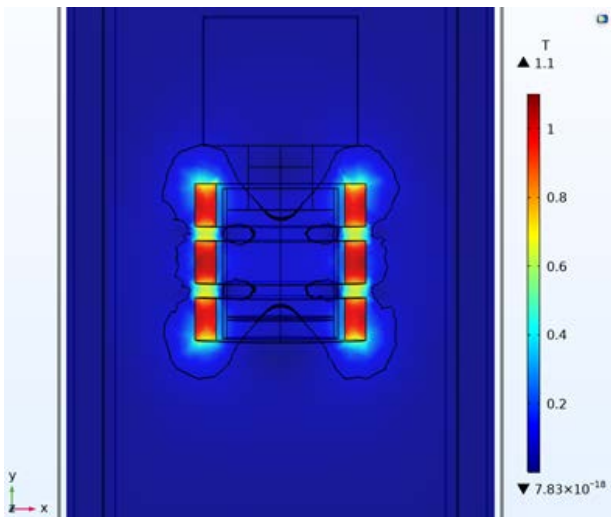
قطر $2R$ حداقل ابعاد برای محفظه پلاسمایی برای رسیدن به چگالی بیشینه می‌باشد. با تشکیل پلازما و افزایش چگالی آن، ضریب دی‌الکتریک نسبی پلازما افزایش یافته است و میزان توان برگشتی کمتر شده است و همچنین در فشار 0.5×10^{-7} پاسکال بیشینه چگالی الکترونی پلازما در مرکز محفظه برابر با 5×10^{17} بر مترمکعب شده است.

زمانی که پلازما با چگالی بالا در داخل محفظه ایجاد می‌شود، طول موج داخل پلاسمای ECR کمتر از λ_c می‌شود. با افزایش چگالی پلازما، طول موج λ_p کوچک‌تر می‌شود. با کاهش λ_p به همان اندازه طول موج قطع λ_c و کمتر از آن می‌رسد و میکروموج به راحتی می‌تواند داخل محفظه منتقل شود. به همین دلیل میکروموج به راحتی در محفظه منتشر و جذب می‌شود.

در چشمه یونی ECR، میدان الکتریکی تنها روی الکترون‌ها عمل می‌کند و مؤلفه میدان مغناطیسی میکروموج $\vec{B}$ نسبت به میدان خارجی B_0 قابل چشم‌پوشی می‌باشد. ارتباط بین دامنه میدان الکتریکی E_0 و توان میکروموج ورودی P برای یک محفظه استوانه‌ای (با مد TE_{11}) به این صورت می‌باشد [۳۰]:

$$E_0 = \sqrt{\frac{2QP}{0.238\pi R^2 z \omega}} \quad (4)$$





شکل ۳. شدت میدان مغناطیسی و ناحیه جذب تشدید سیکلوترونی الکترون برای فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز معادل میدان مغناطیسی 875 ± 5 گوس (خطوط مشکی رنگ) در داخل محفظه پلاسمایی.

۲.۳ شبیه سازی برهم کنش پلازما و میکروموج

در شبیه سازی، انتشار میکروموج و تحولات کمیت های پلازما در مقیاس زمانی نانو ثانیه به صورت تزویج شده باهم در نظر گرفته می شود. نوسانات میدان الکتریکی میکروموج ($\vec{E}$) در یک بازه زمانی میانگین گیری می شود و در این بازه تحولات پلازما نادیده گرفته می شوند. میدان الکتریکی میانگین گیری شده دوره های به عنوان ورودی مدل پلازما می شود. انتگرال گیری زمانی معادله تکانه الکترون همراه با معادلات ماکسول در طول دوره های میکروموج ادامه پیدا می کند و در نتیجه یک توان متوسطی در هر دوره به الکترون ها انتقال داده می شود. جزییات بیشتر در مورد جذب توان از میدان $\vec{E}$ در مرجع [۲۴] ارائه شده است. میانگین توان جذبی به صورت ورودی مدل پلازما در نظر گرفته می شود و پروفایل زمانی به صورت دوره ای محاسبه و به روز رسانی می شود. این فرایند تا زمانی که شرایط

پایا به دست بیاید (حداقل 10^3 دوره میکروموج $\sim 10^3 \frac{\omega}{v_m}$) ادامه پیدا می کند. توصیف این شرایط در مدل سیالی دشوار می باشد. برای حل این مشکل و به دست آوردن هم گرایی در شبیه سازی، فرکانس برخورد مؤثر (v_{eff}) تعریف می شود [۲۵]. برای هم سازی با گرمایش بی برخورد، لازم است که v_{eff} از مرتبه معکوس زمان گذار از ناحیه تشدید باشد و v_{eff} به سرعت حرارتی و گرادیان میدان B وابسته می باشد.

در این مدل، گرمایش از طریق میدان همانند مرجع [۲۴] در نظر گرفته شده است. معادلات میکروموج در حوزه فرکانس و سایر کمیت ها در حوزه زمان در نظر گرفته می شود. تمامی میدان های متغیر با زمان دارای فرکانس $\frac{\omega}{2\pi}$ می باشند.

۳. شبیه سازی

در شبیه سازی پلاسمای ECR میدان الکتریکی ناشی از میکروموج ورودی و میدان مغناطیسی ناشی از آهنرباها نقش اساسی دارند. برای بررسی رفتار پلازما و میزان جفت شدگی توان، رفتار میدان الکتریکی در ناحیه جذب اهمیت بسیاری دارد. در این مقاله با روش اجزا محدود و با استفاده از نرم افزار کامسول ویراش ۶ پلاسمای چشمه یونی کوچک مقیاس ECR برای توان ورودی ۸۰۰ وات و فشار ۰/۵ پاسکال شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی به ترتیب به میدان مغناطیسی و سپس شبیه سازی میکروموج- پلازما پرداخته شده است. در ابتدا میدان مغناطیسی محاسبه می شود و از این میدان در مدل پلازما، تانسور پلازما به دست می آید. در شبیه سازی از مش بندی براساس تکنیک انطباقی^۱ برای ایجاد مش های بسیار ریز در ناحیه تشدید استفاده شده است. بیشیه و کمینه اندازه هر مش به ترتیب برابر با ۲/۴ میلی متر و ۰/۲ میلی متر می باشد.

۱.۳ شبیه سازی میدان مغناطیسی

آهنرباهای دائمی از جنس نئودیمیوم برای تولید میدان مغناطیسی در چشمه یونی کوچک مقیاس ECR در نظر گرفته شده اند. در شبیه سازی با استفاده از نرم افزار کامسول برای میدان مغناطیسی روابط زیر در نظر گرفته می شود [۲۵].

$$\nabla \times H = 0 \quad (5)$$

هم چنین پتانسیل مغناطیسی اسکالر V_m از رابطه زیر تعریف می شود.

$$H = -\nabla V_m \quad (6)$$

که مشابه ایده پتانسیل الکتریکی برای میدان الکتریکی ایستا می باشد. با استفاده از ارتباط مابین چگالی شار مغناطیسی و میدان مغناطیسی

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (7)$$

با معادله

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (8)$$

در نهایت معادله زیر برای V_m به دست می آید:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M_0) = 0 \quad (9)$$

و عایق مغناطیسی بدین صورت تعریف می شود:

$$(\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 M_0) = n \cdot B = 0. \quad (10)$$

شبیه سازی میدان مغناطیسی با استفاده از ماژول میدان مغناطیسی ایستایی نرم افزار کامسول اجرا شده و نتایج این شبیه سازی در شکل ۳ ارائه شده است. خطوط با رنگ مشکی ناحیه تشدید ECR را مشخص می نماید.



برخورد غیرکشسان، شار انرژی الکترون، تحرکپذیری انرژی الکترون و پخش انرژی الکترون می‌باشد. پخش الکترون، تحرکپذیری و پخش انرژی برحسب روابط زیر تخمین زده می‌شوند:

$$D_e = \mu_e T_e, \mu_e = \left(\frac{5}{3}\right) \mu_e, D_e = \mu_e T_e. \quad (13)$$

ویژگی‌های ترابرد به صورت کمیت‌های تانسوری کامل می‌باشند. عبارت تانسور کامل تحرکپذیری الکترون تابعی از تحرکپذیری DC (بدون میدان مغناطیسی) و تحرکپذیری میدان مغناطیسی می‌باشند.

تحرکپذیری DC الکترون $(1 \times 10^{25}/N_n)$ و میدان مغناطیسی، کمیت‌های شناخته شده‌ای می‌باشند N_n چگالی گاز خنثی می‌باشد. عبارت چشمه از شیمی پلاسمای به دست می‌آید و با عبارت نرخ ضرایب $R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_n$ تعیین می‌شود. به طوری که M ، x_j و k_j به ترتیب تعداد واکنش‌ها، نسبت مولی گونه‌ها برای واکنش j و نرخ ضریب برای واکنش j می‌باشند. عبارت اتلاف انرژی برای همه واکنش‌ها به صورت $R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_n \Delta \varepsilon_j$ می‌باشد که $\Delta \varepsilon_j$ اتلاف انرژی از واکنش j می‌باشد. عبارت چشمه و اتلاف انرژی برای همه واکنش‌ها توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه می‌شود. به طوری که نرخ ضرایب از اطلاعات سطح مقطع با استفاده از رابطه $\gamma \int_0^\infty \varepsilon \sigma_k(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon$ که γ برابر با $(2q/m_e)^{1/2}$ به دست می‌آید. m_e ، ε و σ_k به ترتیب جرم، انرژی الکترون، سطح مقطع الکترون و تابع توزیع انرژی الکترون می‌باشند.

دیواره محفظه پلاسمای زمین می‌باشد. بازتاب، گسیل ثانویه و گسیل حرارتی الکترون‌ها در مرز دیواره صفر در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه، شار الکترون و شار انرژی الکترون در مرز دیواره به صورت $n_e \Gamma_e = \left(\frac{1}{4}\right) v_{e,th} n_e$ و $n_e \Gamma_e = \left(\frac{1}{4}\right) v_{e,th} n_e$ می‌باشند. همچنین تلفات ذرات سنگین پلاسمای در دیواره‌ها و حرکت آن‌ها فقط به دلیل واکنش‌های سطحی و میدان الکتریکی دو قطبی می‌باشد. توان جذبی پلاسمای $(P_{absorbed})$ با تنظیم ضریب نرمالیزاسیون (α) در هر لحظه از تحولات پلاسمای (نانوثانیه تا میکروثانیه) در هر واکنش $P_{absorbed} = \alpha \iiint n_e P_{set} dV$ ، $P_{set} \equiv -e \langle \tilde{v}_e \cdot \tilde{E} \rangle_t$ تعیین می‌شود. این نرمالیزه کردن برای هم‌گرایی پاسخ و جلوگیری از جذب نادرست توان توسط پلاسمای می‌باشد.

میکروموج از طریق رابط سرامیکی از موج‌بر به داخل محفظه ارسال می‌گردد. میدان ناشی از میکروموج در داخل محفظه

میدان‌های الکتریکی میکروموج در طول تحولات زمانی پلاسمای با استفاده از معادلات زیر به دست می‌آید [۲۵].

$$\nabla \times \mu^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 (\varepsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega \varepsilon_0}) E = 0 \quad (11)$$

k_0 ، ε_r و σ به ترتیب عدد موج در خلأ، گذردهی نسبی، میدان الکتریکی کل و تانسور رسانش پلاسمای می‌باشد. σ تابعی از چگالی پلاسمای، فرکانس برخورد و میدان B می‌باشد. در این مدل، ویژگی‌های ترابرد الکترون از تابع توزیع بولتزمن پیروی می‌کند. برای حل با روش اجزاء محدود، پلاسمای به صورت سیال یا تقریب پخش سوقی^۱ که از معادله بولتزمن و با ضرب برخی توابع وزن^۲ و سپس انتگرال‌گیری در فضای سرعت استخراج شده است، در نظر گرفته می‌شود. این تقریب به صورت کامل در سه بعد معادلات وابسته به زمان را نتیجه می‌دهد.

در طول مدل‌سازی، حرکت یون در مقایسه با حرکت الکترون در مقیاس زمانی میکروموج (نانوثانیه) قابل چشم‌پوشی است. چگالی الکترون در ناحیه تشدید ثابت در نظر گرفته می‌شود و همچنین طول دمای خیلی کوچک‌تر از طول برهم‌کنش میکروموج می‌باشد. سرعت متوسط الکترون در مقیاس زمانی میکروموج با فرض تابع توزیع ماکسولی و با مشتق اول معادله بولتزمن (مشابه مراجع [۲۵، ۳۱، ۳۲]) به دست می‌آید. معادلات سوقی به کار رفته برای محاسبه چگالی الکترون (یا چگالی پلاسمای) و انرژی الکترون به این صورت می‌باشد:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_e (\mu_e E) - D_e \nabla n_e] = R_e \quad (12)$$

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

که $E \cdot \Gamma_e = e n_e v_e \cdot E_{ambipolar} - \Pi$ است [۲۵]. عبارت گرمایش $E \cdot \Gamma_e$ در معادله بالا دارای دو مؤلفه است: (۱) الکترون‌ها از طریق میدان دو قطبی^۳ انرژی می‌دهد و (۲) Π ، توان جذبی الکترون‌ها $(n_e \langle v_e \cdot \tilde{E} \rangle)$ به خاطر میکروموج می‌باشد. به طوری که n_e ، Γ_e ، D_e ، E ، μ_e ، R_e ، v_e ، n_e ، Γ_e به ترتیب چگالی الکترون، سرعت متوسط الکترون، عبارت چشمه الکترون، شار الکترون، تحرکپذیری الکترون، تحرکپذیری انرژی الکترون، میدان الکتریکی کل، پخش الکترون، چگالی انرژی الکترون، کسب/اتلاف انرژی به دلیل

1. Drift Diffusion
2. Weighting Function
3. Ambipolar



سپس، این مقدار به شدت افت می‌کند. به بیان دیگر، گرمایش و انرژی دهی به الکترون‌ها از طریق فرایند ECR تا این زمان ادامه پیدا می‌کند. افت شدید در دمای الکترون‌های داغ و افزایش چگالی پلاسما به بیش‌تر از میزان بحرانی، نشانگر وجود فرایند گرمایش دیگری می‌باشد.

شکل ۶ و شکل ۷، تحولات چگالی و دمای الکترونی در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست آمده با نتایج مراجع [۳، ۱۲] که آزمایشات تجربی انجام داده‌اند هم‌خوانی دارد. در زمان‌های اولیه، چگالی پلاسما کم‌تر از چگالی بحرانی و سپس پلاسما فوق چگال تشکیل می‌شود (شکل ۷). کاهش میزان دمای الکترونی در پلاسما نشان از کاهش گرمایش ECR و افزایش احتمال مکانیسم UHR در یک بازه زمانی مشخص می‌باشد. پس از گذشت ۱۰ میکروثانیه، شرایط پایدار ایجاد می‌شود، به طوری که چگالی الکترونی $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ بیش از مقدار بحرانی می‌باشد. هم‌چنین دمای الکترونی پلاسما و گرادیان آن در حجم پلاسما کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

با طراحی انجام شده در این مقاله، امکان انتقال میکروموج به داخل محفظه چشمه یونی ECR کوچک مقیاس ایجاد گردید. هم‌چنین، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که در صورت به کارگیری سرامیک آلومینا به عنوان پنجره‌ی ورودی میکروموج، اندازه میدان الکتریکی در مرکز محفظه پلاسمایی در حدود ۵۰ درصد مقدار آن در داخل موج‌بر می‌باشد. در صورت عدم استفاده از آلومینا، امکان انتقال توان میکروموج به داخل محفظه به دلیل ابعاد بزرگ‌تر موج‌بر نسبت به محفظه‌ی چشمه، وجود ندارد. با تولید پلاسما و افزایش چگالی، طول موج در داخل محفظه و پلاسما کاهش می‌یابد و به همان اندازه، طول موج قطع، λ_c ، برای محفظه کاسته شده و میکروموج به راحتی به داخل محفظه منتقل می‌شود. هم‌چنین، جذب توان میکروموج با فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز، به صورت زمانی و مکانی در زمان‌های اولیه تشکیل پلاسما در چشمه یونی کوچک مقیاس ECR شبیه‌سازی گردید. تحولات چگالی توان جذبی، لایه UHR، چگالی و دمای الکترونی در زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر ناحیه جذب توان و انطباق آن با مکان لایه UHR و هم‌چنین برای فرکانس ۲/۴۵ گیگاهرتز چگالی بحرانی برابر با $7.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ می‌باشد. با بررسی شکل ۵ متوجه می‌شویم که پس از ۲۰۰ نانوثانیه، چگالی بالاتر از چگالی بحرانی می‌شود و دستیابی به شرایط فوق چگال، بیانگر جذب میزان کم‌تری از انرژی میکروموج در سطوح ECR است.

نفوذ می‌کند و بردار انتشار آن موازی با میدان مغناطیسی اعمالی می‌باشد [۳۳]. پس از ارسال، میکروموج شروع به برهم‌کنش با گاز پس‌زمینه در بازه‌های زمانی (نانوثانیه) می‌کند. برای درک بهتر فرایند جذب و تصویرسازی بهتر، میدان الکتریکی و کمیت‌های پلاسمای محفظه در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. شرایط مرزی پلاسما برای محاسبه σ به صورت: چگالی پلاسما 1×10^{12} بر مترمکعب و دمای پلاسما ۴ الکترون‌ولت فرض شده است. در ابتدا میدان مغناطیسی محاسبه و سپس کمیت‌های پلاسما و میکروموج محاسبه می‌شود. در حین محاسبات، از فرکانس برخورد مؤثر (U_{eff})، استفاده می‌شود. در مقیاس زمانی حرکت سیکلوترونی تشدید، میدان الکتریکی بر روی الکترون‌ها در زمانی که در ناحیه تشدید قرار دارند، اثر می‌کند. U_{eff} به این صورت تخمین زده می‌شود:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{v_e \omega}{\delta_B}}$$

به طوری که، v_e سرعت حرارتی الکترون و δ_B گرادیان میدان مغناطیسی می‌باشد. مقدار U_{eff} چندین مرتبه بیش‌تر از فرکانس برخورد واقعی می‌باشد. U_{eff} تأثیر زیادی در پروفایل جذب توان و غلبه بر ناپایداری‌های عددی دارد. برای رسیدن به حل پایدار، لازم است که تعداد دوره‌های میکروموج از مرتبه $\frac{\omega}{U_{eff}}$ باشد.

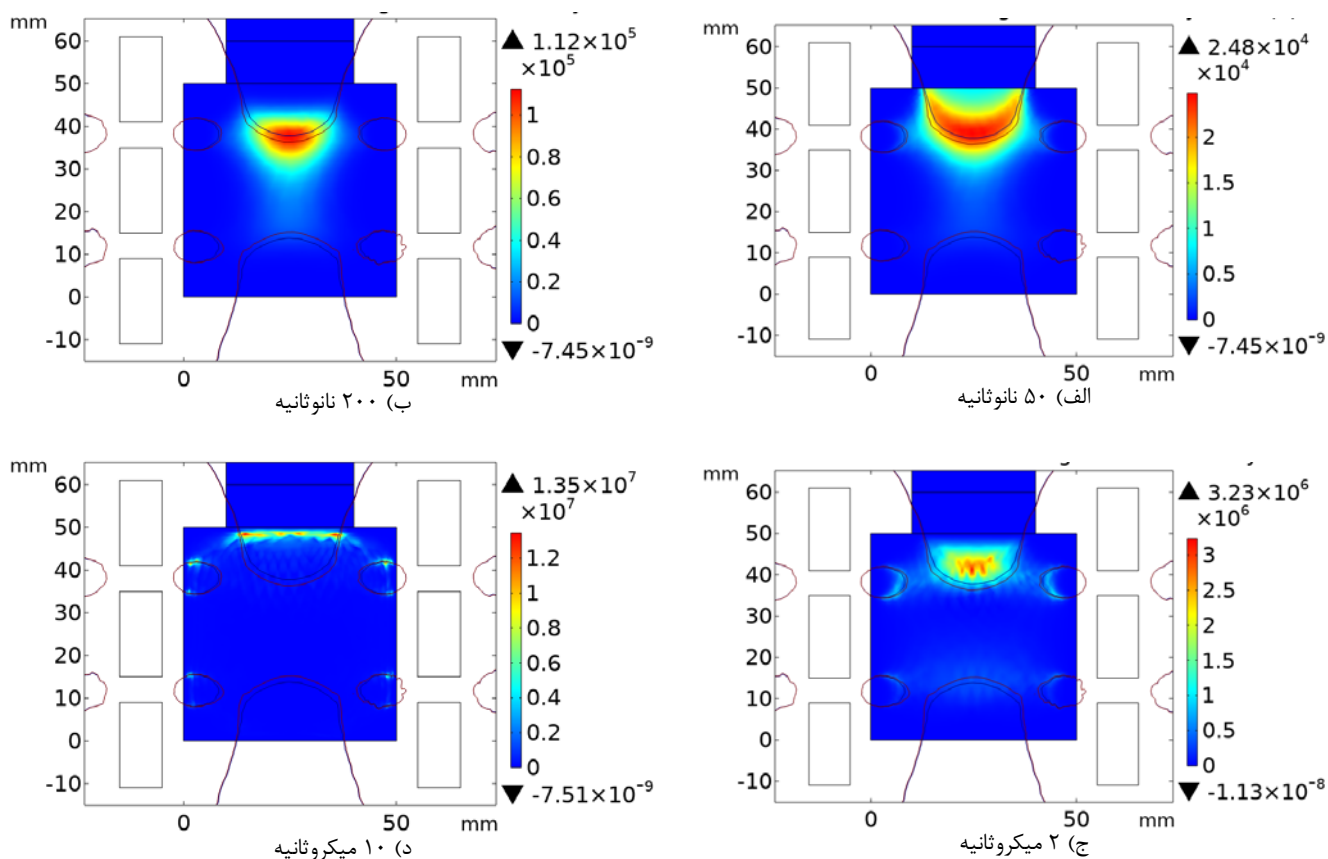
۴. بحث و بررسی

در این بخش به بررسی نتایج شبیه‌سازی از جمله چگالی شار مغناطیسی و رفتار زمانی و مکانی چگالی توان جذب شده، لایه هیبرید بالا، چگالی و دمای الکترونی پلاسما پرداخته شده است.

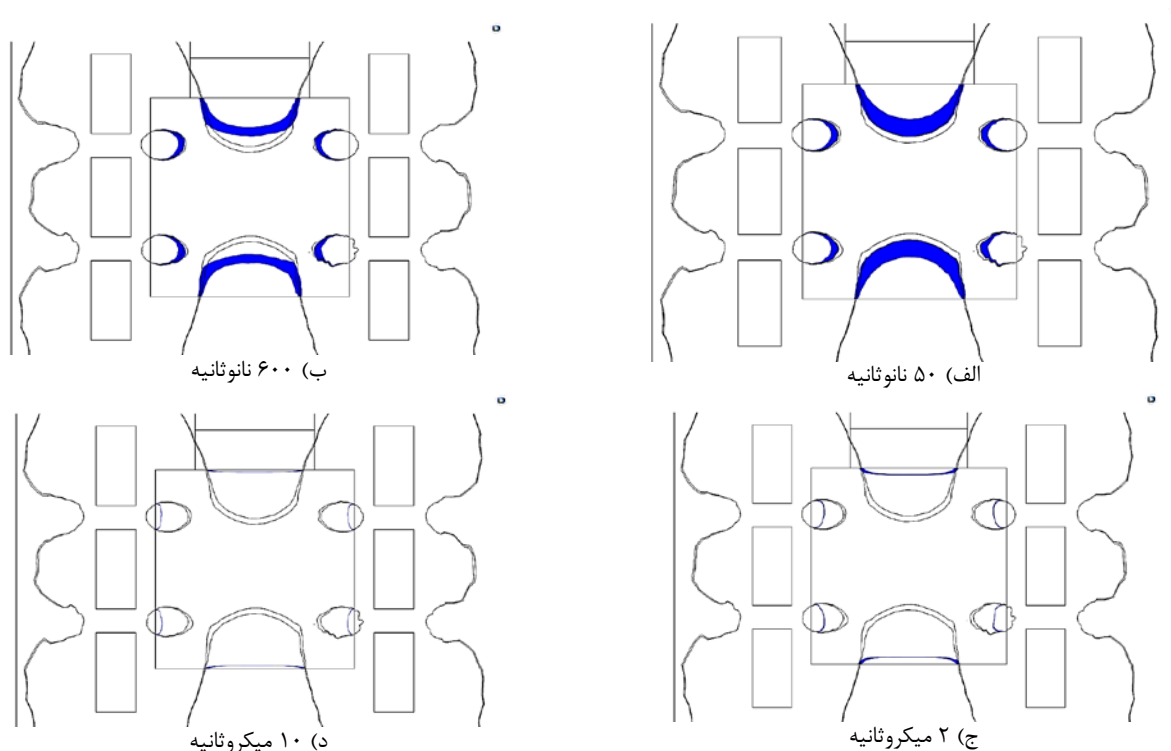
۱.۴ جذب توان

در زمان‌های ابتدایی که چگالی پلاسما پایین می‌باشد، توان میکروموج در سطوح جذب ECR (۸۷۵ گوس)، جذب می‌شود. طبق نتایج شکل ۴ بیش‌ترین چگالی جذب توان ($1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$) در سطوح ECR در زمان ۶۰۰ نانوثانیه اتفاق می‌افتد. با گذر زمان، چگالی پلاسما افزایش می‌یابد و ناحیه‌ی جذب توان به نواحی غیر از سطوح جذب ECR منتقل می‌شود. در شکل ۵، نواحی تشدید هیبرید بالا UHR^1 ، $\omega_{uh} = (\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2)^{\frac{1}{2}}$ در محدوده فرکانس کاری ۲/۴۵ گیگاهرتز برای زمان‌های مختلف رسم شده است. با مقایسه‌ی شکل ۴ و شکل ۵ مشخص می‌گردد که تغییر مکان چگالی جذب توان متناظر با تغییر مکان لایه هیبرید بالا می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که تا زمان ۶۰۰ نانوثانیه، دمای الکترون‌ها نزدیک مقدار بیشینه (حدوداً ۲۰ الکترون‌ولت) است و



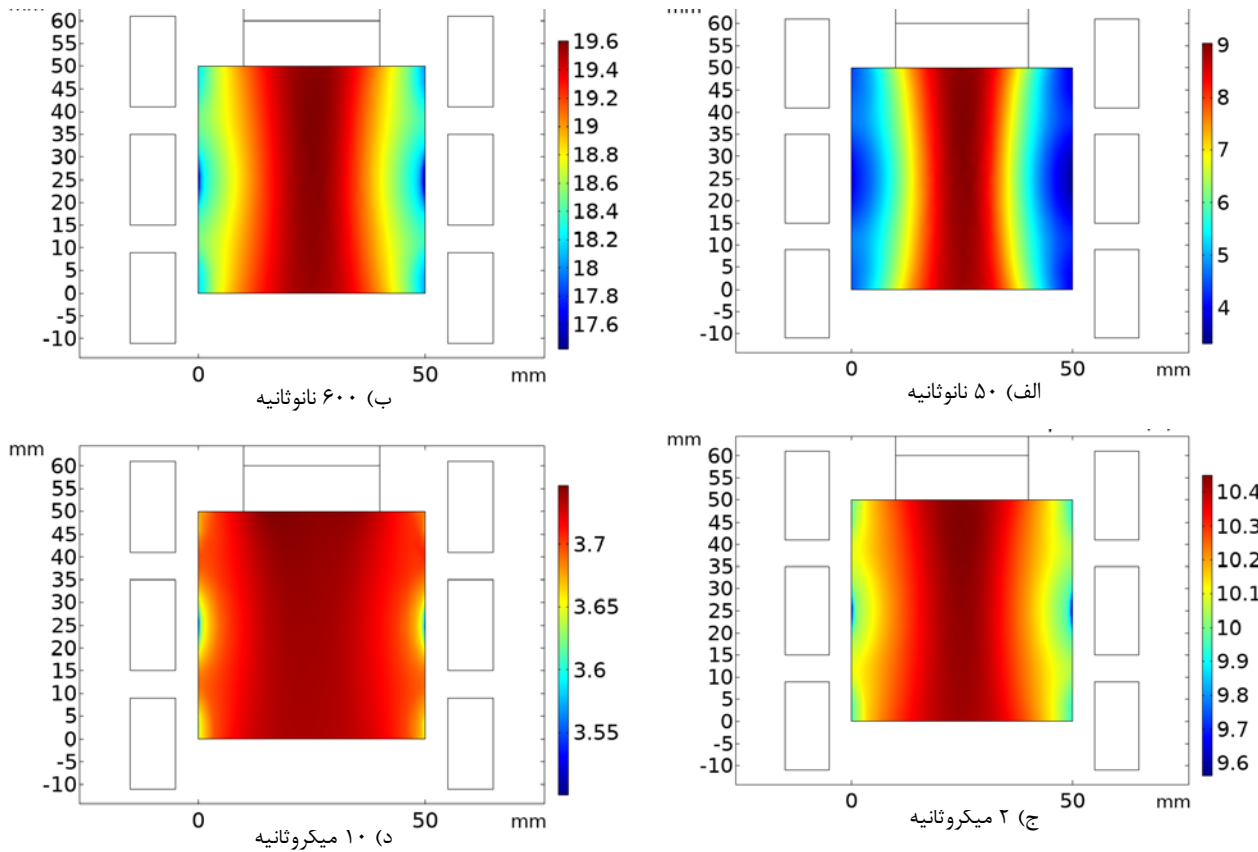


شکل ۴. چگالی توان جذبی در زمان‌های مختلف: الف) زمان ۵۰ نانوثانیه، بیشینه توان جذبی $2 \times 10^4 W/m^3$ ، ب) زمان ۲۰۰ نانوثانیه، بیشینه توان جذبی $1 \times 10^5 W/m^3$ ، ج) زمان ۲ میکروثانیه، بیشینه توان جذبی $6 \times 10^6 W/m^3$ ، د) زمان ۱۰ میکروثانیه، بیشینه توان جذبی $1 \times 10^7 W/m^3$.

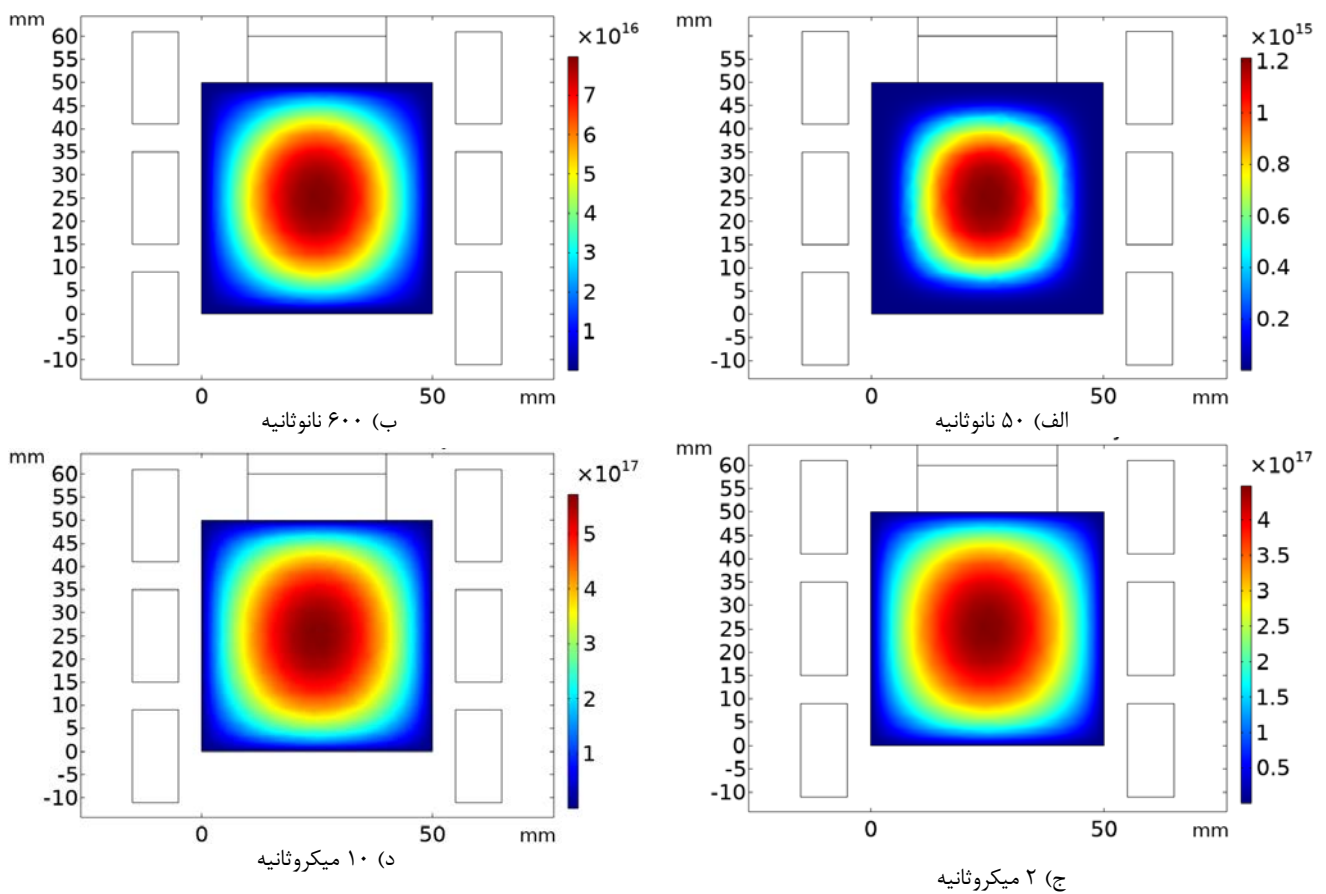


شکل ۵. تغییرات مکانی لایه UHR در زمان‌های مختلف: الف) ۵۰ نانوثانیه، ب) ۲۰۰ نانوثانیه، ج) ۲ میکروثانیه، د) ۱۰ میکروثانیه.





شکل ۶. تحولات زمانی ناحیه دمای الکترونی در زمان‌های مختلف: (الف) ۵۰ نانوثانیه، (ب) ۶۰۰ نانوثانیه، (ج) ۲ میکروثانیه، (د) ۱۰ میکروثانیه.



شکل ۷. تحولات زمانی ناحیه چگالی الکترونی پلاسمای در زمان‌های مختلف: (الف) ۵۰ نانوثانیه، (ب) ۶۰۰ نانوثانیه، (ج) ۲ میکروثانیه، (د) ۱۰ میکروثانیه.



11. H. Ren, et al., *Plasma studies of the permanent magnet electron cyclotron resonance ion source at Peking University*, [Review of Scientific Instruments](#), **85(2)**, 02A927 (2014).
12. S. Peng, et al., *Plasma simulation and optimization for a miniaturized antenna ECR ion source*, [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment](#), **1011**, 165586 (2021).
13. V. Mironov, et al., *Three-dimensional modelling of processes in electron cyclotron resonance ion source*, [Journal of Instrumentation](#), **15(10)**, P10030 (2020).
14. J.-M. Wen, et al., *A miniaturized 2.45 GHz ECR ion source at Peking University*, [Chinese Physics B](#), **27(5)**, 055204 (2018).
15. M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*, [John Wiley & Sons](#), (2005).
16. D. Hemmers, et al., *Self-consistent modelling of overdense plasmas in ECR discharges*, [Journal of Physics D: Applied Physics](#), **31(17)**, 2155 (1998).
17. R. Porteous, H.-M. Wu, D. Graves, *A two-dimensional, axisymmetric model of a magnetized glow discharge plasma*, [Plasma Sources Science and Technology](#), **3(1)**, 25 (1994).
18. M.A. Hussein, G. Emmert, *Modeling of plasma flow downstream of an electron cyclotron resonance plasma source*, [Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films](#), **8(3)**, 2913-2918 (1990).
19. V.P. Gopinath, T.A. Grotjohn, *Three-dimensional electromagnetic PIC model of a compact ECR plasma source*, [IEEE Transactions on Plasma Science](#), **23(4)**, 602-608 (1995).
20. W.H. Koh, et al., *Electromagnetic particle simulation of electron cyclotron resonance microwave discharge*, [Journal of Applied Physics](#), **73(9)**, 4205-4211 (1993).
21. Y. Weng, M.J. Kushner, *Electron energy distributions in electron cyclotron resonance discharges for materials processing*, [Journal of Applied Physics](#), **72(1)**, 33-42 (1992).
22. D. Mascali, et al., *3D-full wave and kinetics numerical modelling of electron cyclotron resonance ion sources plasma: steps towards self-consistency*, [The European Physical Journal D](#), **69(1)**, 1-9 (2015).
23. D. Mascali, et al., *Modelling RF-plasma interaction in ECR ion sources*, in [EPJ Web of Conferences](#), [EDP Sciences](#), **157**, 03054 (2017).
24. G. Hagelaar, et al., *Modelling of a dipolar microwave plasma sustained by electron cyclotron resonance*, [Journal of Physics D: Applied Physics](#), **42(19)**, 194019 (2009).
25. www.comsol.com.
26. H. Ren, et al., *Intense beams from gases generated by a permanent magnet ECR ion source at PKU*, [Review of Scientific Instruments](#), **83(2)**, 02B905 (2012).

بررسی تغییرات دمای الکترونی در پلاسما و کاهش دما و افزایش چگالی الکترونی، مشخص گردید که گرمایش از طریق ECR کاهش و جذب توان از طریق UHR اتفاق می‌افتد. مکانیسم اصلی جذب تشدید سیکلوترونی الکترون می‌باشد و با گذشت زمان، گرمایش UHR در نواحی غیرتشدید اتفاق می‌افتد و بعد از گذشت ۱۰ میکروثانیه، شرایط پایدار ایجاد می‌شود. به طوری که چگالی الکترونی ($5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$) بیش از مقدار بحرانی می‌باشد و همچنین دمای الکترونی پلاسما و گرادیان آن در حجم پلاسما کاهش می‌یابد.

مراجع

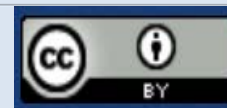
1. R. Gobin, et al., *A 140 mA cw deuteron electron cyclotron resonance source for the IFMIF-EVEDA project*, [Review of Scientific Instruments](#), **79(2)**, 02B303 (2008).
2. S. Peng, et al., *Improvements of PKU PMECRIS for continuous hundred hours CW proton beam operation*, [Review of Scientific Instruments](#), **87(2)**, 02A706 (2016).
3. M. Shimada, I. Watanabe, Y. Torii, *Compact electron cyclotron resonance ion source with high density plasma*, [Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films](#), **9(3)**, 707-710 (1991).
4. N. Yamamoto, et al., *Effects of magnetic field configuration on thrust performance in a miniature microwave discharge ion thruster*, [Journal of Applied Physics](#), **102(12)**, 123304 (2007).
5. B. Zhang, X. Zhang, *Modeling of plasma density, argon ion energy and ion velocity functions in a dipolar electron cyclotron resonance plasma source*, [Vacuum](#), **174**, 109215 (2020).
6. S. Peng, et al., *Possibility of generating H^+ , or H_2^+ , or H_3^+ dominated ion beams with a 2.45 GHz permanent magnet ECR ion source*, [Review of Scientific Instruments](#), **90(12)**, 123305 (2019).
7. O. Waldmann, B. Ludewigt, *A Permanent-Magnet Microwave Ion Source For A Compact High-Yield Neutron Generator*, in [AIP Conference Proceedings](#), [American Institute of Physics](#), **1336(1)**, 479-482 (2011).
8. R. Swaroop, et al., *Design and development of a compact ion implanter and plasma diagnosis facility based on a 2.45 GHz microwave ion source*, [Review of Scientific Instruments](#), **92(5)**, 053306 (2021).
9. A. Misra, V. Pandit, *Studies on the coupling transformer to improve the performance of microwave ion source*, [Review of Scientific Instruments](#), **85(6)**, 063301 (2014).
10. N. Kumar, et al., *A compact 2.45 GHz microwave ion source based high fluence irradiation facility at IUAC, DELHI*, (2014).



27. O. Popov, *Characteristics of electron cyclotron resonance plasma sources*, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **7(3)**, 894-898 (1989).
28. Z. Song, et al., *Minipermanent magnet high-current microwave ion source*, *Review of Scientific Instruments*, **77(3)**, 03A305 (2006).
29. H. Sang, et al, *Comparison study of different plasma chamber of microwave ion source for intense neutron tube*, *J. Northeast Normal University*, **33(2)**, 27-32 (2001).
30. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*, *Routledge*, (2018).
31. C. Mallick, M. Bandyopadhyay, R. Kumar, *Plasma characterization of a microwave discharge ion source with mirror magnetic field configuration*, *Review of Scientific Instruments*, **89(12)**, 125112 (2018).
32. R.L. Kinder, M.J. Kushner, *Consequences of mode structure on plasma properties in electron cyclotron resonance sources*, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **17(5)**, 2421-2430 (1999).
33. D. Mascali, et al., *Electrostatic wave heating and possible formation of self-generated high electric fields in a magnetized plasma*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **653(1)**, 11-16 (2011).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

حمیدرضا میرزایی، معصومه یارمحمدی سطری، حمید رحیم پور، سینا فصیح (۱۴۰۲)، شبیه سازی پلاسمای فوق چگال چشمه یونی کوچک مقیاس تشدید سیکلوترونی الکترون، ۱۱۹-۱۰۹، ۱۰۵

DOI: 10.24200/nst.2022.1065.1720

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1425.html