مقایسه رفتار میدان‌ها و توان جذبی در پلاسمای هلیکونی و پلاسمای جفت شده‌ی القایی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی

INC29-1192

سیده نرگس رضوی نیا*، جمال‌الدین یزدان‌پناه، سیده زهره آقامیری

پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران- ایران

چکیده:

منابع هلیکونی و منابع جفت شده‌ی القایی به دلیل عدم تماس مستقیم پلاسما با الکترودها و همچنین تولید پلاسمای گرمایی با چگالی بالا، از مهم‌ترین منابع موردتوجه پلاسمایی هستند. جفت‌شدگی توان در منابع پلاسمای هلیکونی از اهمیت خاصی جهت تولید پلاسمای با چگالی بالا برخوردار است. یافتن محدوده‌ی بهینه‌ی پارامترهای مؤثر برجذب توان مانند میدان مغناطیسی و چگالی پلاسما یکی از مسائل کلیدی در طراحی و ساخت منابع پلاسمای هلیکونی است. در این مقاله ابتدا با بهره‌گیری از مدل گلوبال و کد BOLSIG+ دمای پلاسمای استوانه‌ای با ابعاد مدنظر را محاسبه می‌کنیم، سپس از کد HELIC جهت یافتن مقادیر بهینه‌ی میدان مغناطیسی و چگالی جهت دستیابی به حداکثر جذب توان RF استفاده می‌نماییم. همچنین با استفاده از کد HELIC میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در منبع پلاسمای جفت شده‌ی القایی بدون حضور میدان و منبع هلیکونی در حضور میدان مغناطیسی را باهم مقایسه می‌نماییم. علاوه بر این، تغییر اساسی الگوی میدان‌ها از القایی به هلیکونی، افزایش توان جذبی در مد هلیکونی و همچنین گذار مد H-W از موارد مشاهده‌شده است.

کلیدواژه‌ها: پلاسمای هلیکونی، پلاسمای جفت شده‌ی القایی، کد HELIC، کد BOLSIG+، مدل گلوبال

Comparison of fields and absorbed power in Helicon and Inductively Coupled Plasmas using numerical simulations

S. N. Razavinia*, J. Yazdanpanah, S. Z. Aghamiri

The Plasma Physics and Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

Due to absence of direct contact with electrodes and production of high-density thermal plasmas, helicon and inductive sources have attracted many attentions. Especially, enhanced power coupling in helicon sources is of great importance for production of high density plasma. Finding the optimal range of parameters that affects power absorption, such as magnetic field and plasma density is one of the key issues in design and construction of helicon plasma sources. In this paper, we use global model and Bolsig+ code to compute temperature of cylindrical plasma with desired dimensions, then by using HELIC code optimum values of magnetic field and plasma density for maximum RF power absorption has been computed. As well as, comparison between electric and magnetic fields in inductively coupled plasma source without external magnetic field and helicon plasma source in the presence of magnetic fields has been done by using HELIC code. Furthermore, phenomena like field pattern switching from inductive to helicon type, enhanced power absorption in helicon type, and H-W mode transitions are observed.

Keywords: Helicon plasma, Inductively coupled plasma, HELIC code, BOLSIG+ code, Global model.

۱. مقدمه

تخلیه‌های جفت‌شده القایی (ICP)، منابع پلاسمای مناسبی برای تخلیه الکتریکی و پردازش پلاسما هستند. ازآنجاکه این نوع تخلیه‌ها وابسته به ولتاژهای بالا برای ایجاد جریان جابجایی در غلاف‌های RF نمی‌باشند، انرژی‌های یونی در آن‌ها (به‌خصوص در چگالی توان بالا) نسبت به تخلیه جفت‌شده خازنی (RF) به شکل قابل‌توجهی کمتر است. انرژی-های یونی نسبتاً اندک در تخلیه‌های القایی منجر به کاهش برهم‌کنش‌های یون-دیواره می‌شود (به‌عنوان‌مثال اسپاترینگ، کند و پاش و انواع واکنش‌های شیمیایی پرانرژی‌ای که شامل یون‌ها می‌شوند). در بسیاری از موارد، تخلیه-های جفت‌شده‌ی القایی فراهم آورنده‌ی پلاسمای با چگالی بالا و با اتلاف نسبی اندک یون‌ها در غلاف هستند. علاوه بر این، تولید پلاسما و فرآیندهای شتاب‌دهی یون در راکتورهای پردازش پلاسما را می‌توان از طریق بایاس RF زیر لایه، به‌صورت مستقل کنترل کرد که منجر به کنترل مستقل انرژی یون می‌شود[۱]. افزودن میدان مغناطیسی استاتیک به پلاسمای ایجادشده توسط RF ترابرد پلاسما در جهت عمود بر خطوط میدان مغناطیسی را کاهش می‌دهد و می‌توان از آن برای افزایش چگالی پلاسما در توان معین استفاده کرد. علاوه بر این میدان مغناطیسی استاتیک انتشار امواج الکترومغناطیسی در فرکانس‌های پایین، یعنی $\omega \ll \omega_{ce}$ را امکان‌پذیر می‌سازد، این امواج الکترومغناطیسی به نام امواج هلیکونی شناخته می‌شوند. امواج هلیکونی امواجی هستند که در دمای پایین و در حضور میدان مغناطیسی dc در پلاسمای جزئی یونیده منتشر می‌شوند[۲]. تخلیه‌های هلیکونی توسط امواج هلیکونی تولیدشده توسط آنتن‌های RF ایجاد می‌شوند. علی‌رغم آنکه این امواج توسط آنتن القایی ایجادشده‌اند، امواج الکترواستاتیک هستند و نام هلیکون اشاره به ماهیت پیچشی شکل موج آن‌ها دارد. امواج هلیکونی فرکانس‌های پایین بین فرکانس lower hybrid و فرکانس یونی پلاسما دارند. ترکیب گرمایش مؤثر موج و محصورسازی افزایش‌یافته پلاسما در اثر میدان مغناطیسی اعمالی، راکتورهای هلیکونی را برای تولید پلاسما با یونیزاسیون بالا و کاربردهای مربوط به پیشرانه‌های پلاسمایی مناسب می‌سازد. علاوه بر این راکتورهای هلیکونی در کاربردهای مختلف مربوط به پردازش پلاسما مانند لایه نشانی دی‌اکسید سیلیکون یا حکاکی سریع سیلیکون و کربید سیلیکون نیز مورداستفاده قرار می‌گیرند[۳]. جفت‌شدگی توان در منابع پلاسمای هلیکونی از اهمیت خاصی برای تولید پلاسمای با چگالی بالا برخوردار است[۴]. برای دستیابی به حداکثر بازدهی در این نوع منابع پلاسمایی، تحلیل پارامترهای کلیدی مؤثر برجذب توان مانند میدان مغناطیسی، فشار گاز، توان RF و فرکانس RF اعمالی به آنتن، از اهمیت فراوانی برخوردار است. یافتن محدوده‌ی بهینه‌ی این پارامترها یکی از مسائل کلیدی در طراحی و ساخت منابع پلاسمای هلیکونی است. کد HELIC با استفاده از تئوری تحلیلی، اسکن سریعی از فضای پارامتری انجام می‌دهد تا محدوده جذب بهینه توان RF را بیابد. این کد منبع آزاد که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C++ نوشته‌شده است، قادر به محاسبه‌ی پروفایل‌های شعاعی و محوری جریان، میدان-های مغناطیسی و الکتریکی و نیز پروفایل‌های انرژی جذب‌شده در پلاسما است[۵،۶]. علاوه بر این می‌تواند با انتگرال-گیری از پروفایل انرژی جذب‌شده، مقاومت بار پلاسما را نیز محاسبه کند. در اینجا ابتدا با استفاده از مدل گلوبال[۷،۸] و کد منبع آزاد BOLSIG+ [۹] مقدار دمای الکترون‌ها در استوانه‌ای با طول و شعاع معین را محاسبه می‌کنیم. در مرحله بعد با استفاده از این دما به‌عنوان یکی از پارامترهای ورودی کد HELIC، پروفایل‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی را به ازای منبع پلاسمای ICP با میدان مغناطیسی تقریباً صفر و منبع پلاسمای هلیکونی با میدان مغناطیسی ۲۰۰ گاوس (که توسط آنتن القایی Loop-+ ایجاد می‌شود) را با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. درنهایت محدوده بهینه جذب توان در پلاسمای هلیکونی ازنظر چگالی پلاسما و میدان مغناطیسی اعمالی را تعیین می‌کنیم.

۲. روش کار

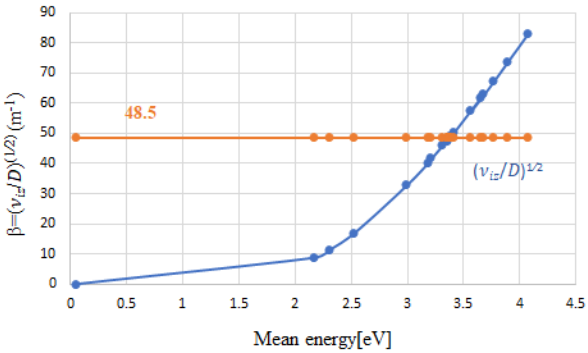
مدل گلوبال که مبتنی بر معادلات توازن توان و توازن ذره است، برای محاسبه مشخصات پلاسمای حاصل از تخلیه بسیار کارآمد است. در این مدل برای محاسبه‌ی چگالی ذرات از معادله‌ی توازن ذره و برای محاسبه‌ی دمای پلاسما از معادله‌ی توازن توان استفاده می‌شود. در اینجا جهت محاسبه دمای اولیه پلاسما از مدل گلوبال استفاده می‌کنیم. در پلاسمای الکتروپازیتیو، چگالی یون مثبت و الکترون برابر است. معادله‌ی پخش ($\partial n/\partial t - D\nabla^2 n = G - L$) که G و L چشمه و چاه هستند و D ضریب پخش (مستقل از مکان) است، در حالت‌پایا و با در نظر گرفتن اثر یونیزاسیون

($G-L=\upsilon_{iz}n$)، به معادله‌ی هلمهولتز ($\nabla^2 n+(\upsilon_{iz}/D)n=0$)، تبدیل می‌شود. معمولاً می‌توان متغیرها را در هندسه‌ی استوانه‌ای با فرض یک حل حاصل‌ضربی (که چگالی روی تمام مرزها صفر است) جداسازی کرد[۷].

$$n(r,z)=n(0)J_0\left(\chi_{01}\frac{r}{a}\right)\cos\left(\frac{\pi z}{l}\right) \quad (۱)$$

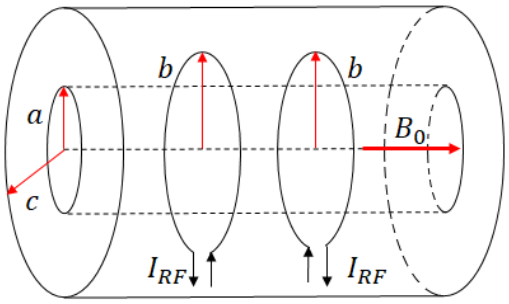
$$\beta^2\equiv\frac{1}{\Lambda_0^2}=\frac{\upsilon_{iz}}{D}=\left(\frac{\chi_{01}}{a}\right)^2+\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \quad (۲)$$

که Λ_0 مقیاس طول پخش مشخصه و $\chi_{01}=2.405$ اولین صفر تابع بسل J_0 است. υ_{iz} ضریب نرخ یونیزاسیون و D ضریب پخش است. کد BOLSIG+ یک نرم‌افزار کاربردی در فیزیک پلاسمای دماپایین است که به حل عددی معادله‌ی بولتزمن الکترون در گازهای یونیزه شده‌ی ضعیف در میدان‌های الکتریکی یکنواخت (شرایطی که معمولاً در پلاسماهای برخوردی دمای پایین برقرار است) می‌پردازد. در اینجا با استفاده از کد BOLSIG+ به ازای درجه یونیزاسیون $۱۰^{-۱}$، چگالی پلاسمای $N=۱۰^{۲۲}\ m^{-3}$، فرکانس زاویه‌ای ۱۳/۵۶ MHZ مربوط به میدان RF و تغییر خطی E/N از ۱۶ تا ۱۰۰ تانسند، υ_{iz} و D را برای گاز آرگون محاسبه کرده و برحسب انرژی متوسط الکترون رسم می‌کنیم. دمای الکترون با قطع دو نمودار تحلیلی و عددی به دست می‌آید. با در نظر گرفتن محفظه استوانه‌ای به شعاع ۰/۰۵ و طول ۰/۵ متر، مقدار β تحلیلی برابر با ۴۸/۵ است که با استفاده از محل تقاطع آن با مقدار عددی β دمای الکترون محاسبه می‌شود. با یافتن محل تقاطع دو نمودار تحلیلی و عددی در شکل ۱ دمای الکترون در گاز آرگون و با در نظر گرفتن برخوردها در محفظه استوانه‌ای به شعاع ۰/۰۵ و طول ۰/۵ متر برابر با ۳/۳۸ الکترون‌ولت خواهد بود.



شکل ۱. مقدار تحلیلی و عددی β (محاسبه‌شده از طریق کد BOLSIG+) برحسب انرژی متوسط الکترون‌ها

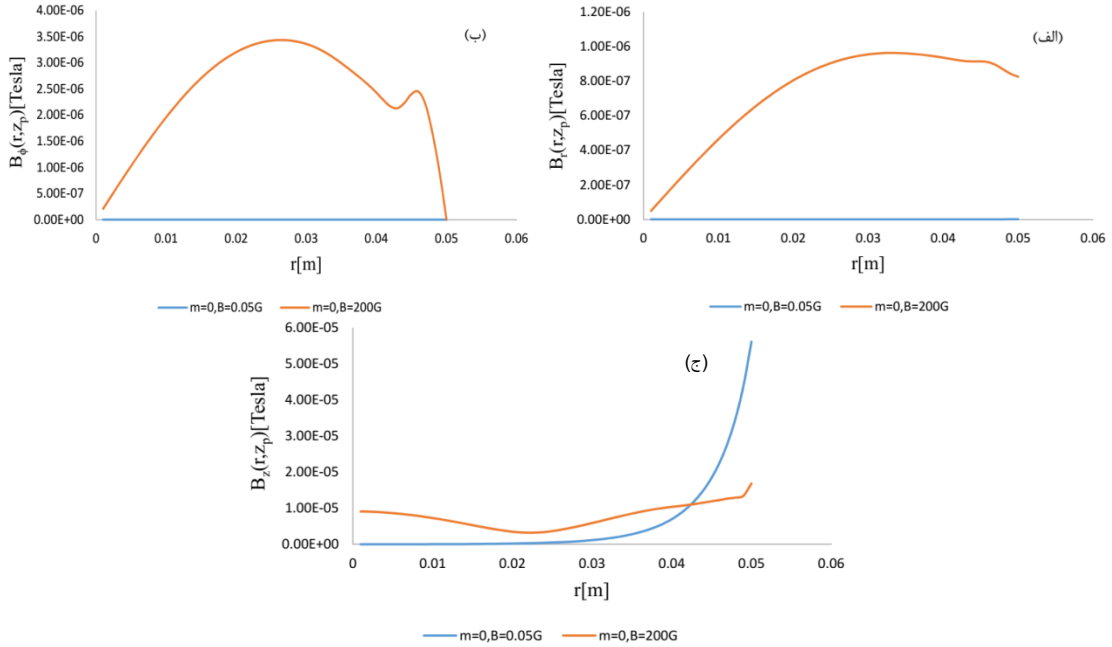
حال با استفاده از دمای محاسبه‌شده به‌عنوان یکی از داده‌های ورودی در کد HELIC، پارامترهای موج که شامل پروفایل‌های میدان مغناطیسی و الکتریکی است را برای پلاسمای هلیکونی و جفت شده‌ی القایی باهم مقایسه می‌کنیم. کد HELIC یک برنامه با زبان برنامه‌نویسی C++ است که از آن برای طراحی منابع پلاسمای هلیکونی و آزمایشات پلاسمای RF و تفسیر داده‌های تجربی استفاده می‌شود. در این کد میدان مغناطیسی dc به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود، علاوه بر این تولید و ترابرد پلاسما نیز در آن لحاظ نمی‌شود. این کد فیزیک تحریک و انتشار موج RF را در حضور میدان مغناطیسی (منابع هلیکونی) و در غیاب میدان مغناطیسی dc (پلاسماهای جفت‌شده القایی) بررسی می‌کند. فرض می‌شود که پلاسما دارای تقارن استوانه‌ای است و میدان مغناطیسی، چگالی پلاسما، دمای الکترون و فشار خنثی توسط کاربر به‌عنوان ورودی برای کد تعریف می‌شود. جذب توان در کد HELIC با در نظر گرفتن پلاسمای برخوردی محاسبه می‌شود. ساده‌ترین نوع آنتن RF که از آن برای ایجاد امواج هلیکونی در پلاسما استفاده می‌شود، حلقه‌ای است که مد مستقل سمتی $m=0$ را برمی‌انگیزد. این مد سمتی در آنتن Loop+- با استفاده از جفت سیم‌پیچ‌های تک حلقه‌ای با جریان‌های برابر اما در خلاف جهت در هر حلقه برانگیخته می‌شود. پلاسمای ICP در کد HELIC با در نظر گرفتن میدان مغناطیسی بسیار کوچک ۰٫۰۵ گاوس بررسی می‌شود. در شکل ۲ طرح‌واره‌ای از مسئله‌ی موردبررسی ارائه گردیده است.



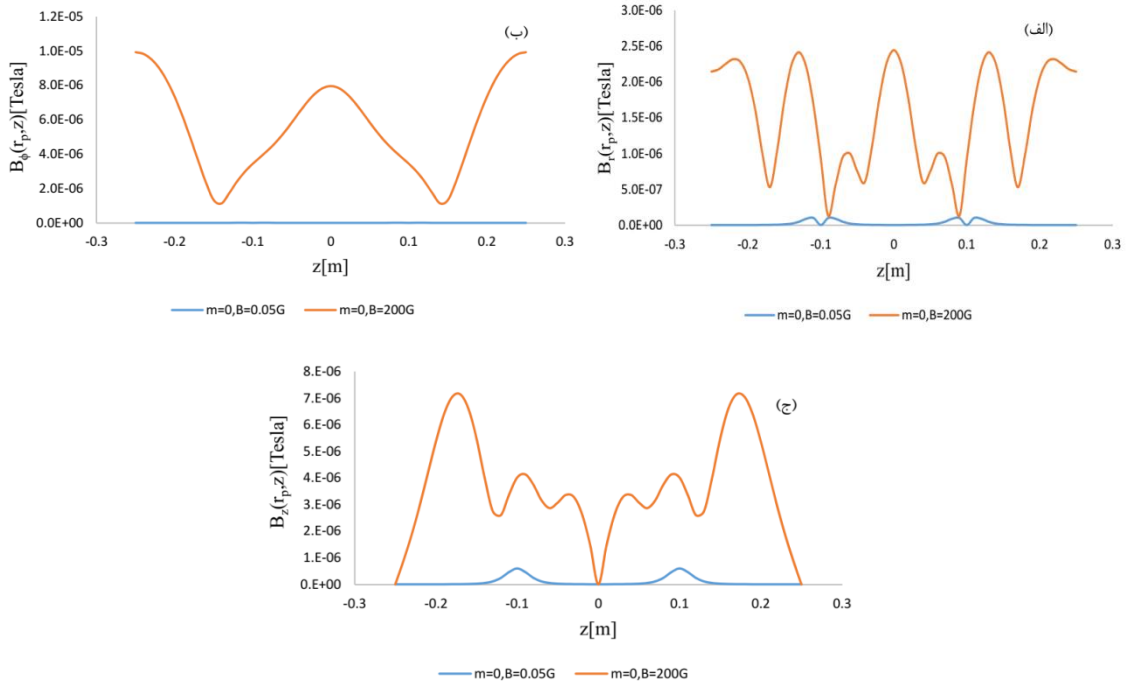
شکل ۲. طرحواره‌ی مسئله‌ی موردبررسی که در آن a شعاع پلاسما، b شعاع آنتن و c شعاع محفظه‌ی تعریف‌کننده‌ی سطوح پتانسیل است. میدان مغناطیسی B_0 در مورد پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی ۰٫۰۵ گاوس و در مورد پلاسمای هلیکونی ۲۰۰ گاوس در نظر گرفته می‌شود.

۳. نتایج عددی

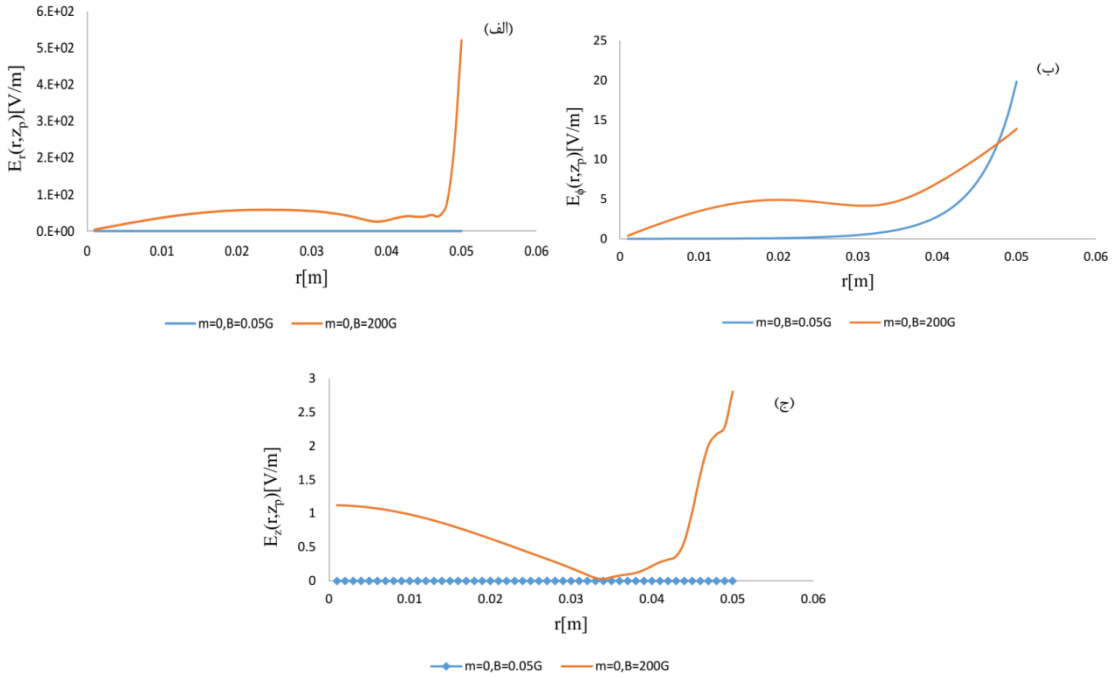
در این بخش پروفایل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی محاسبه‌شده توسط کد HELIC را برای پلاسمای ICP و هلیکونی با یکدیگر مقایسه می‌کنیم. فرض می‌کنیم استوانه‌ای که پلاسما به شعاع $a = 0.05m$ را در برگرفته دارای شعاع $c = 0.1m$ و طول $l_c = 0.5m$ است که با دو صفحه‌ی رسانا در دو انتها محدودشده است. ما در اینجا از آنتن Loop-+در مد سمتی $m = 0$ و فرکانس ۱۳/۵۶ MHz برای ایجاد امواج الکترومغناطیسی درون پلاسما استفاده می‌کنیم. در مورد پلاسمای هلیکونی با قرار دادن میدان مغناطیسی $B_0 = 200Gauss$ (در پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی $B_0 = 0.05Gauss$)، فشار $p = 10mTorr$، چگالی $n_e = 10^{12} cm^{-3}$ و دمای محاسبه‌شده‌ی $T_e = 3.38eV$ در کد HELIC، پروفایل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برحسب شعاع r در فاصله‌ی محوری $z_p = 0.1m$ و برحسب z در فاصله‌ی شعاعی $r_p = 0.025m$ به دست می‌آید.



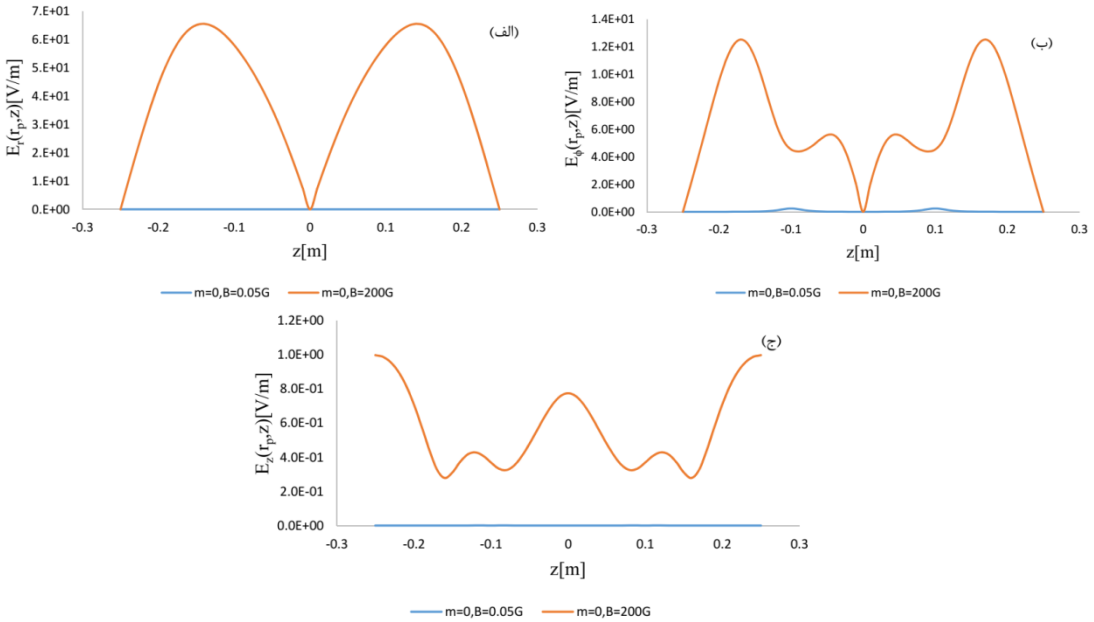
شکل ۳. (الف) مؤلفه شعاعی (ب) مؤلفه سمتی و (ج) مؤلفه محوری میدان مغناطیسی در میدان مغناطیسی ۲۰۰(پلاسمای هلیکونی) و ۰٫۰۵ (پلاسمای جفت شده‌ی القایی) گاوس با استفاده از آنتن Loop-+(m=0) برحسب شعاع و در فاصله محوری $z_p = 0.1m$.



شکل ۴. (الف) مؤلفه شعاعی (ب) مؤلفه سمتی و (ج) مؤلفه محوری میدان مغناطیسی در میدان مغناطیسی ۲۰۰(پلاسمای هلیکونی) و ۰,۰۵ (پلاسمای جفت شده‌ی القایی) گاوس با استفاده از آنتن Loop-+(m=0) برحسب فاصله محوری z و در فاصله شعاعی $r_p = 0.025m$.



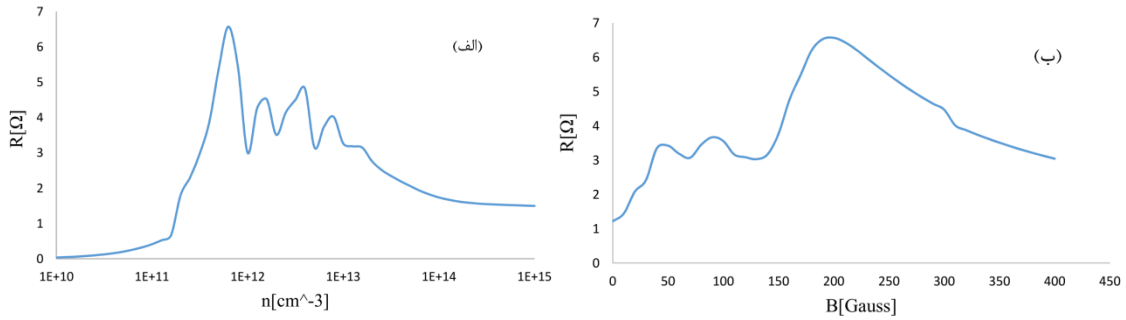
شکل ۵. (الف) مؤلفه شعاعی (ب) مؤلفه سمتی و (ج) مؤلفه محوری میدان الکتریکی در میدان مغناطیسی ۲۰۰(پلاسمای هلیکونی) و ۰,۰۵ (پلاسمای جفت شده‌ی القایی) گاوس با استفاده از آنتن Loop-+(m=0) برحسب شعاع و در فاصله محوری $z_p = 0.1m$.



شکل ۶. (الف) مؤلفه شعاعی (ب) مؤلفه سمتی و (ج) مؤلفه محوری میدان الکتریکی در میدان مغناطیسی ۲۰۰(پلاسمای هلیکونی) و ۰٫۰۵ (پلاسمای جفت شده‌ی القایی) گاوس با استفاده از آنتن Loop-+(m=0) برحسب فاصله محوری z و در فاصله شعاعی $r_p = 0.025m$.

کد HELIC با انتگرال‌گیری از پروفایل انرژی جذب‌شده، مقاومت بار پلاسما را نیز محاسبه می‌کند، طبق خروجی‌های کد مقاومت پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی برابر با ۱/۲۰۲۱۴ اهم است که با اعمال میدان مغناطیسی ۲۰۰ گاوس مقدار مقاومت پلاسما به ۳/۱۸۷۲۳۰ اهم افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت پلاسما با اعمال میدان مغناطیسی را می‌توان این‌گونه توجیه نمود: در پلاسمای ICP (که‌موج ایجادکننده به‌عنوان موج غیر انتشار یابنده طبقه‌بندی می‌شود)، میدان نوسانی خارجی به علت رسانایی الکتریکی بالای پلاسما خنثی می‌شود و فقط می‌توان گرمایش پوسته در لایه‌نازک تا عمقی از مرتبه‌ی c/ω_{pe} از سطح پلاسما را انتظار داشت، اما با اعمال میدان مغناطیسی خارجی به پلاسما، موج هلیکونی در عمق پلاسما منتشر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر به دلیل آنکه موج هلیکونی یک موج رونده است، می‌تواند در پلاسما با جذب موج انتشار یابد و سبب بازدهی جفت‌شدگی توان RF با پلاسما و درنتیجه افزایش توان جذبی شود.

در مرحله‌ی بعد جهت محاسبه شرایط بهینه جذب توان در پلاسمای هلیکونی ایجادشده توسط آنتن Loop-+ که درون میدان مغناطیسی ۲۰۰ گاوس قرارگرفته است، با تغییر لگاریتمی بازه چگالی از $۱۰^{۱۰}cm^{-3}$ تا $۱۰^{۱۵}$ cm^{-3} مقاومت بار پلاسما را برحسب چگالی رسم می‌کنیم.



شکل ۷. مقاومت بار کل (الف) در میدان مغناطیسی ۲۰۰ گاوس و فشار ۱۰ میلی تور برحسب چگالی‌های مختلف پلاسما و (ب) در چگالی $۶/۳۱\times ۱۰^{۱۱}cm^{-3}$ و فشار ۱۰ میلی تور برحسب میدان مغناطیسی، با استفاده از آنتن **Loop-+**.

با توجه به شکل ۷ (الف) مقاومت پلاسما به ازای چگالی $۶/۳۱\times ۱۰^{۱۱}cm^{-3}$ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. حال در این چگالی مقاومت پلاسما را به ازای میدان‌های مغناطیسی مختلف رسم می‌کنیم. با توجه به شکل ۷ (ب) مقدار بهینه میدان مغناطیسی که به ازای آن مقاومت پلاسما به حداکثر مقدار می‌رسد، ۲۰۰ گاوس است.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به‌وسیله کدهای +Bolsig و Helic رفتار میدان‌های الکترومغناطیس و همچنین جذب توان در پلاسماهای هلیکونی و القایی موردبررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۵ دیده می‌شود، در مد القایی، توزیع میدان تقارن سمتی داشته و میدان مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب در راستای محوری و سمتی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، این میدان‌ها، عمدتاً در نزدیکی مرز شعاعی پلاسما جای گزیده هستند. از طرف دیگر، تغییر اساسی الگوهای میدان در مد هلیکونی نسبت به مد القایی، ازجمله الگوی پیچشی آن‌ها در شکل‌های ۳ الی ۶ کاملاً مشهود است. علاوه بر این، شکل‌های ۳ و ۵ نشان می‌دهد که جای گزیدگی میدان‌ها در لبه پلاسما در حالت هلیکونی از بین رفته و میدان‌ها در حجم پلاسما توزیع‌شده‌اند. به همین دلیل در حالت کلی مقاومت پلاسما و توان جذبی در حالت هلیکونی بیشتر است (برای مثال در بالا مقاومت ۱/۲۰۲۱۴ اهم در حالت القایی، با اعمال میدان مغناطیسی ۲۰۰ گاوس به ۳/۱۸۷۲۳۰ اهم افزایش می‌یابد). بررسی مقاومت پلاسما برحسب چگالی الکترونی و میدان اعمالی که در شکل ۷ آمده است، مقادیر بهینه جهت جذب توان (حداکثر مقاومت پلاسما) را نشان می‌دهد. نکته بسیار مهم دیگر، مشاهده گذار از مد القایی H به مد هلیکونی W در شکل ۷ (الف) است که با افزایش شیب ناگهانی منحنی بعد از چگالی $۱۰^{۱۱}cm^{-3}$ قابل‌مشاهده است.

۵. مراجع

1. 1 R B Piejak et al,"A simple analysis of an inductive RF discharge" Plasma Sources Sci. Technol. 1 17(1992).
2. 2 Shunjiro Shinohara, "Helicon high-density plasma sources: physics and applications", Advances in Physics: X, 3:1, 1420424(2018).
3. 3 P. Lan-Lan, et.al, "Numerical Analysis of Helicon Plasma Power Deposition on Helicon Physics Prototype experiment" AIP Conference Proceedings 2254, 060002 (2020).
4. 4 Balkey, Matthew M. "Optimization of a helicon plasma source for maximum density with minimal ion heating" (2000). Graduate Theses, Dissertations and Problem Reports. 1195.
5. 5 D.Arnush and F. Chen "Generalized theory of helicon waves. II. Excitation and absorption" Physics of Plasmas 5, 1239 (1998).
6. 6 D. Arnush, "The role of Trivelpiece–Gould waves in antenna coupling to helicon waves" Physics of Plasmas 7, 3042 (2000).
7. 7 Michael A. Lieberman, Allan J. Lichtenberg, "Principles of Plasma Discharges and Materials Processing", Second Edition.
8. 8 S. K. Nam, J. P. Verboncoeur, "Global model for high power microwave breakdown at high pressure in air" Computer Physics Communications 180, 628-635 (2009).
9. 9 G. J. M. Hagelaar, "Brief documentation of BOLSIG+version 03/2016", Laboratoire Plasma et Conversion d"Energie (LAPLACE), Université Paul Sabatier, 118 route de, Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 9,