

طراحی منبع باریکه یونی جهت استفاده در سامانه گرمایش تزریق باریکه خنثی یک توکامک نمونه

سمانه فاضل پور^۱، امیر چخماچی دوم^{۱*}، حسین صادقی^۲

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

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

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۱۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۹

چکیده

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار کامسول به طراحی و شبیه‌سازی یک منبع تولید یون براساس مولد پلاسمای چگال هلیکونی و سیستم استخراج‌کننده متناسب با آن جهت استفاده در طراحی سامانه گرمایش تزریق باریکه خنثی برای یک توکامک نمونه مانند توکامک دماوند پرداخته شده است. براساس محاسبات جهت افزایش دمای الکترونی پلاسمای این توکامک به ۳۰۰ الکترون ولت و دمای یونی به ۱۵۰ الکترون ولت، این توکامک نیازمند یک سامانه تزریق باریکه خنثی با انرژی ۴٫۵ کیلوالکترون ولت، جریان ۶٫۷ آمپر و توان ۳۰٫۱۵ کیلووات می باشد. در این راستا در مدل‌سازی حاضر یک سیستم مولد پلاسمای هلیکونی با چگالی 5.51×10^{18} یک بر مترمکعب، دمای الکترونی پلاسما ۲٫۸ الکترون ولت و سیستم استخراج‌کننده‌ای با ۲۸۰ حفره (قطر ۳٫۵ میلی‌متر) و جریان باریکه یونی ۷ آمپر، جهت استفاده در طراحی این سامانه گرمایشی، طراحی و شبیه‌سازی و ارایه شده است. هم‌چنین در این طراحی تمامی مسایل نوری باریکه یونی از قبیل واگرایی، بار فضایی، و قطر باریکه که می‌تواند بر کیفیت باریکه تأثیر بگذارد، مورد بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: سیستم تزریق باریکه خنثی، منبع یون، استخراج باریکه، توکامک، بار فضایی

Design of ion beam source for a sample tokamak neutral beam injection heating system

S. Fazelpour¹, A. Chakhmachi^{1*}, 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

Research Article

Received 9.6.2019, Accepted 30.11.2019

Abstract

In this paper, the design and simulation of ion source based on a helicon plasma generator and its corresponding extraction system for design of the neutral beam injection heating system of a sample tokamak like Damavand tokamak using COMSOL software have been investigated. Based on our previous calculations, to increase the electron temperature of this tokamak to 300 eV and the ion temperature to 150 eV, it requires a neutral beam injection system with energy 4.5 KeV, 6.7 A current, and 30.15 kW power. In this regard, in the present model, a dense helicon plasma source with an electron density of $5.51 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, an electron temperature of 2.8 eV and an extraction system with 280 holes (3.5 mm in diameter) and 7 A ion beam for this heating system were designed, simulated and presented. Also, in this design, all the optical issues of the ion beam such as divergence, space charge, and beam size which can affect the beam quality are investigated.

Keywords: NBI system, Ion source, Beam extraction, Tokamak, Space charge

*Email: achakhmachi@gmail.com

۱. مقدمه

نتایج شبیه‌سازی و محاسبات کار قبلی انجام شده توسط نویسندگان این مقاله نشان داد که در توکامک دماوند جهت افزایش دمای الکترونی پلاسما به ۳۰۰ الکترون ولت و دمای یونی به ۱۵۰ الکترون ولت، این ماشین نیازمند سیستم تزریق باریکه خنثی با انرژی ۴/۵ کیلوالکترون ولت و توان ۳۰/۱۵ کیلووات می‌باشد [۶]. این نتایج نشان داد که در این راستا می‌توان از منبع پلاسمای هلیکون با توان ۳/۲ کیلووات به‌عنوان منبع یونی و سیستم استخراج‌کننده سه شبکه‌ای با ولتاژ ۴/۵ کیلوولت (۲/۸ میلی‌متر) استفاده نمود [۶]. براساس این محاسبات انجام شده می‌بایست در سیستم تزریق باریکه خنثی از چهار منبع تولید یون یا به عبارتی چهار تزریق‌گر استفاده می‌شد. بنابراین، جهت کاهش تجهیزات در طراحی سیستم تزریق باریکه خنثی مناسب برای توکامک نمونه همانند توکامک دماوند، در این مقاله به طراحی یک منبع تولید یون با هندسه جدید نسبت به حالت قبل پرداخته شده است. سیستم استخراج‌کننده ارایه شده در این مقاله نسبت به کار قبلی انجام شده توسط این گروه، مشخصات نوری باریکه را تا حد ممکن بهبود بخشیده و در نهایت در این کار تنها از دو منبع تولید یون جهت تولید باریکه خنثی با مشخصات توان، جریان و انرژی مناسب، استفاده می‌شود.

لازم به‌ذکر است که، یکی از قسمت‌های مهم منبع تولید یون، سامانه تولید پلاسما می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند از بین منابع جفت شده القایی، جفت شده خازنی، مولتی کاسپ‌ها و منابع پلاسمای هلیکون انتخاب شوند [۱۴-۱۷]. منبع پلاسمای هلیکون جزء منابعی است که برای تولید پلاسماهای چگال با چگالی‌های بالاتر از 10^{18} یک بر مترمکعب شناخته شده‌اند و در کاربردهای بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، منابع پلاسمای هلیکون به‌عنوان گزینه مناسبی جهت تولید باریکه یون برای سیستم تزریق باریکه خنثی توکامک‌ها شناخته شده‌اند [۱۸-۲۴].

در طراحی سیستم استخراج‌کننده باریکه باید مسایل نوری باریکه^۱ را در نظر گرفت. مسایل نوری باریکه به عوامل زیادی (روشنایی، شدت، توان، قدرت، هندسه الکترودها، بار فضایی، واگرایی، دمای الکترونی و یونی پلاسما) وابسته است.

در توکامک‌ها گرمایش اولیه از طریق گرمایش مقاومتی یا سیم‌پیچ مرکزی صورت می‌گیرد [۱]. روش‌های گرمایش ثانویه پلاسما به‌منظور بالا بردن دما جهت انجام واکنش‌های گداخت به دو دسته گرمایش از طریق تزریق باریکه خنثی و گرمایش از طریق امواج رادیوفراکانسی تقسیم شده‌اند [۱-۴]. در برخی از توکامک‌های حال حاضر جهان از سیستم تزریق باریکه ی خنثی به‌منظور گرمایش پلاسما و هم‌چنین به‌عنوان ابزار تشخیصی استفاده می‌کنند [۳-۵]. در سیستم‌های تزریق باریکه خنثی، باریکه خنثی با انرژی بالا وارد پلاسمای توکامک شده و انرژی خود را به ذرات انتقال داده و در نتیجه منجر به افزایش سرعت حرکت ذرات پلاسما خواهد شد. این سامانه‌ها از قسمت‌هایی چون منبع تولید یون، استخراج‌کننده و شتاب‌دهنده، خنثی‌ساز باریکه یون و منحرف‌کننده ذرات باردار تشکیل می‌شوند [۶].

به‌عنوان نمونه توکامک TCV دارای سیستم تزریق باریکه خنثی با انرژی ۲۵ کیلوالکترون ولت و توان ۱ مگاوات می‌باشد. منبع یون این سیستم از یک پلاسمای جفت شده القایی با فرکانس ۴ مگاهرتز و توان ۴۰ کیلووات و هم‌چنین سیستم استخراج‌کننده آن با محیط ۲۲۴ سانتی‌متر مربع، ۴۷ میلی‌متر طول و قطر ۲۵۰ میلی‌متر یون‌ها را از منبع پلاسما استخراج می‌کند [۷-۹]. از سوی دیگر، توکامک KSTAR، دارای سیستم تزریق باریکه خنثی دوتریوم با توان ۸ مگاوات و انرژی ۱۲۰ کیلوالکترون ولت بوده که با دو خط باریکه با سه منبع تولید یون (ولتاژ ۱۲۰ کیلوولت و جریان ۶۵ آمپر) تجهیز شده است [۱۰]. سیستم تزریق باریکه خنثی برای توکامک HL-۲M دارای توان ۵ مگاوات، انرژی ۶۰ تا ۸۰ کیلوالکترون ولت (سه سیستم تزریق‌گر) و چهار منبع تولید یون مثبت از نوع پلاسمای قوس الکتریکی، ولتاژ ۸۰ کیلوولت و جریان ۴۵ آمپر می‌باشد [۱۱، ۱۲]. سامانه تزریق باریکه خنثی توکامک JET با توان ۳۴ مگاوات و بازه زمانی ۷ تا ۲۰ ثانیه که توسط ۱۸ تزریق‌گر تأمین می‌شود، نمونه‌ای دیگر از سامانه گرمایش تزریق باریکه خنثی است [۱۳]. لازم به‌ذکر است که در این سیستم از پلاسمای مولتی‌کاسپ و سیستم استخراج‌کننده سه‌گریدی (قطر هر حفره برابر با ۱۱/۵ میلی‌متر و فاصله بین دو گرید اول برابر با ۱۵ میلی‌متر) استفاده شده است.

1. Optical Beam

۱.۲ منبع پلاسمای هلیکون

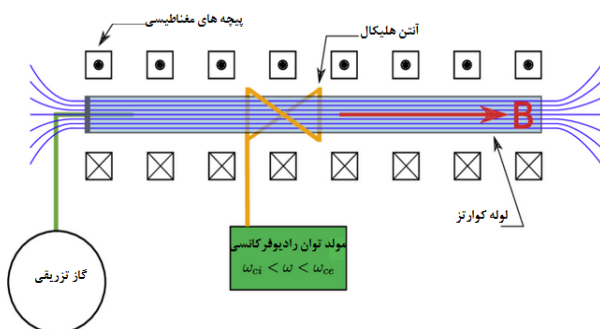
منابع تولید پلاسمای متفاوتی برای تولید یون مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از: منبع تشدید سیکلوترونی الکترون، منبع دوپلاسماترون، منبع جفت شده القایی، منبع جفت شده خازنی، بمباران الکترون و منابع مبتنی بر لیزرها [۲۵-۴۳].

سیستم پلاسمای هلیکون، جزء کارآمدترین منابع تولید پلاسمای با چگالی بسیار بالا در فشار پایین می‌باشد که برای بسیاری از کاربردهای صنعتی، پیشرانش، مولد نوترون و منابع تولید یونی مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند [۱۶-۲۰]. با استفاده از ساده‌ترین رابطه پاشندگی بدون در نظر گرفتن مسایل اپتیکی، ترکیب و ساختارهای جذب، با استفاده از رابطه (۱) می‌توان به طراحی اولیه یک مولد سیستم پلاسمای هلیکون پرداخت:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{TB_0}{\mu_0 n_0} \quad (1)$$

که در آن، n_0 چگالی پلاسمای، B_0 میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط پیچ‌ها، T عدد موج عمود بر میدان مغناطیسی B_0 و ω/k سرعت فاز موج می‌باشند. منبع پلاسمای هلیکون دارای اجزای محفظه خلاء، منبع تولید امواج، مدار تطبیق امپدانس، آنتن، سیستم میدان مغناطیسی و گاز تزریقی می‌باشد که در شکل ۲، نمایی کلی از اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم تولید پلاسمای هلیکونی نشان داده شده است.

عواملی هم‌چون چگالی پلاسمای، دمای الکترون، دمای یون و پتانسیل پلاسمای می‌توانند تأثیر زیادی بر طراحی منابع تولید یون، بگذارند.



شکل ۲. نمایی از اجزای تشکیل‌دهنده سیستم تولید پلاسمای هلیکونی.

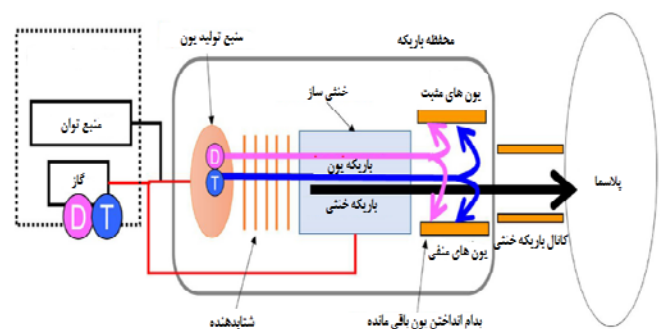
در این گزارش ما ابتدا یک استخراج‌کننده تک‌حفره‌ای را با در نظر گرفتن حالت بهینه بررسی کرده‌ایم [۲۲-۲۴]. با تخمین میزان جریان باریکه عبوری از یک الکتروود (با استفاده از محاسبات نوری باریکه) می‌توان تعداد حفره‌های موردنیاز الکتروود را برای رسیدن به جریان ۷ آمپری به‌دست آورد. بنابراین، محاسبات اپتیک باریکه تک‌حفره‌ای، می‌تواند در طراحی گریدهای چندحفره‌ای به‌کار رود.

در این مقاله، ابتدا به ارایه مبانی نظری جهت طراحی سیستم تزریق باریکه خنثی پرداخته شده، در ادامه به طراحی و شبیه‌سازی سیستم تولید یون برای گرمایش تزریق باریکه خنثی در یک توکامک نمونه همانند توکامک دماوند پرداخته شده است و در انتها، خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده در شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

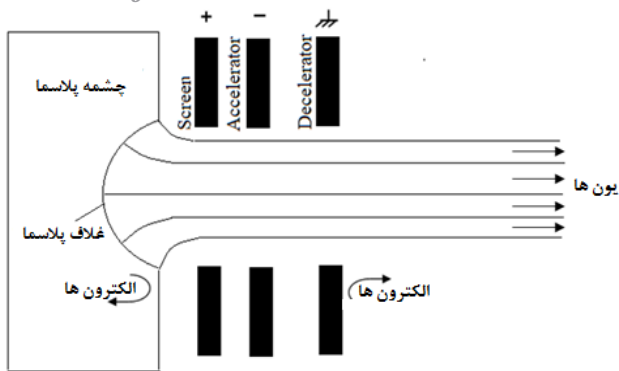
۲. مبانی نظری

سیستم گرمایش تزریق باریکه خنثی از سیستم تولید پلاسمای استخراج‌کننده، شتاب‌دهنده، خنثی‌ساز و منحرف‌کننده‌های ذرات باردار تشکیل شده‌اند. در شکل ۱، نمایی کلی از اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم تزریق باریکه خنثی نشان داده شده است.

در این مقاله، هدف اصلی طراحی یک منبع تولید یون جهت طراحی یک سیستم تزریق باریکه خنثی برای یک توکامک نمونه همانند توکامک دماوند می‌باشد. در ادامه، به بررسی فیزیک قسمت‌های متفاوت منابع تولید یون جهت استفاده در سیستم تزریق باریکه خنثی، پرداخته خواهد شد.



شکل ۱. اجزای تشکیل‌دهنده یک سیستم تزریق باریکه خنثی.



شکل ۳. نمایی از سیستم استخراج کننده باریکه یونی.

۳. طراحی و شبیه سازی

نرم افزار کامسول یک نرم افزار قدرتمند سه بعدی و قابل دسترس در شبیه سازی پلاسما می باشد. این نرم افزار با روش حل عددی المان محدود اقدام به مدل سازی و شبیه سازی مسایل فیزیک محور کرده و هم چنین قادر به تحلیل پدیده هایی با چند فیزیک متفاوت خواهد بود. در این مقاله، به طراحی و شبیه سازی یک سیستم تولید یون (شامل منبع پلاسما هلیکون و استخراج کننده ها) با استفاده از نرم افزار کامسول برای طراحی تزریق گر باریکه خنثی پرداخته شده است. در جدول ۱، مشخصات توکامک دماوند ذکر شده است.

بر اساس مشخصات این توکامک و به کمک روابط مربوطه می توان تخمین زد، توکامک دماوند جهت افزایش دما الکترونی به ۳۰۰ الکترون ولت و دمای یونی به ۱۵۰ الکترون ولت، به یک سیستم تزریق باریکه خنثی با انرژی ۴/۵ کیلو الکترون ولت، جریان ۶/۷ آمپر و توان ۳۰/۱۵ کیلووات نیازمند است [۶]. بنابراین برای داشتن چنین سیستم تزریق باریکه خنثی، نیاز به منبع تولید یون با جریان حداقل ۷ آمپر و انرژی ۴/۵ کیلو الکترون می باشد. در این راستا، یک منبع پلاسما هلیکون به عنوان منبع تولید یون به صورت سه بعدی طراحی و شبیه سازی شده است. بر اساس رابطه ۲، برای داشتن باریکه ای با جریان ۷ آمپر و انرژی ۴/۵ کیلو الکترون ولت، پلاسمایی با چگالی $10^{18} \times 5/51$ ذره در مترمکعب و دمای الکترونی ۲/۸ الکترون ولت مورد نیاز خواهد بود.

۲.۲ سیستم استخراج کننده باریکه یون

بعد از سیستم مولد پلاسما، الکترودهای استخراج کننده قرار می گیرند تا یون ها را از پلاسما استخراج کرده و آن ها را تا انرژی مورد نیاز را برای ارسال به خنثی ساز شتاب دهند [۱۹-۲۱]. در شکل ۳، نمایی از سیستم استخراج کننده باریکه یونی نشان داده شده است.

رابطه (۲)، جریان ایده آل یون استخراج شده از یک الکتروده با سطح مقطع A را نشان می دهد:

$$I_{ion} [A] = 0.6 \sqrt{n_e q} \sqrt{\frac{T_e}{M_i}} A \quad (2)$$

که در این رابطه، T_e دمای الکترون، n_e چگالی الکترونی پلاسما، M_i جرم یون، q بار الکتریکی یون، می باشند. بر اساس رابطه (۲)، می توان به صورت ایده آل تعیین کرد که از یک منبع پلاسما با چگالی و دمای الکترونی مشخص، توانایی استخراج چه میزان جریان وجود دارد. یکی از مسایل مهم در طراحی سیستم استخراج کننده باریکه، محاسبات مربوط به مشخصات نوری باریکه می باشد [۱۹-۲۴]. مشخصات نوری به عوامل زیادی مانند روشنایی، تابش، گسیلندگی، هندسه الکترودها، بار فضایی، واگرایی، دمای الکترون و یون پلاسما وابسته است. این عوامل می توانند بر کمیت و کیفیت جریان استخراج شونده از هر حفره تأثیرگذار باشند [۱۹-۲۴]. بر اساس معادله چایلد لانگمیر می توان میزان جریان استخراج شده از هر حفره را تخمین زد، که عبارت است از:

$$I [mA] = 1.72 \sqrt{\frac{q^*}{u}} \frac{\Phi [kV]^{3/2}}{d [mm]^2} \pi r [mm]^2 = 5.4 \sqrt{\frac{q^*}{u}} \frac{\Phi [kV]^{3/2}}{d [mm]^2} r [mm]^2 \quad (3)$$

که در این رابطه، Φ پتانسیل اعمالی به الکترودها، r شعاع حفره الکترودها، d فاصله بین دو الکترودها اول و $10^{18} \times 8/854 = \epsilon_0$ ضریب نفوذ پذیری الکتریکی خلاء می باشند. بنابراین، در طراحی سیستم استخراج کننده باریکه علاوه بر بررسی رابطه (۲)، در جهت تخمین مشخصات منبع پلاسما، باید به بررسی رابطه (۳) نیز جهت تعیین میزان جریان استخراج شده از هر حفره بر اساس فاصله الکترودها و پتانسیل اعمالی به آن ها پرداخت.

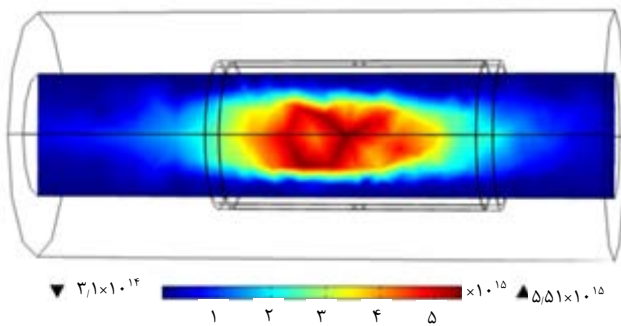
جدول ۲. مشخصات پلاسمای هلیکون مورد استفاده در سیستم تزریق

پارامترها	کمیت
توان رادیوفرکانسی (کیلووات)	۱.۵
فرکانس RF (مگاهرتز)	۱۳.۵۶
گاز تزریقی	هیدروژن
میدان مغناطیسی (تسلا)	۰.۰۶
طول محفظه (سانتی متر)	۳۰
طول آنتن (سانتی متر)	۱۲
فشار (میلی تور)	۱۰

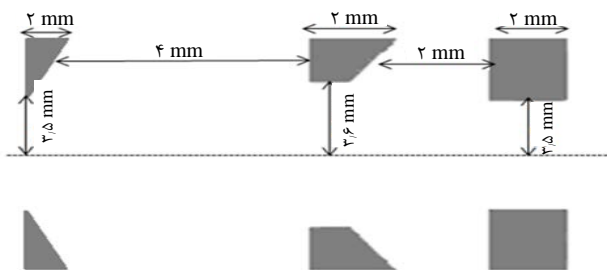
جدول ۱. مشخصات توکامک دماوند

پارامترها	کمیت
شعاع اصلی (متر)	۰.۳۶
شعاع فرعی (متر)	۰.۰۷
میدان چنبره‌ای (تسلا)	۱.۲
دمای الکترون (الکترون ولت)	۳۰۰
دمای یون (الکترون ولت)	۱۵۰
چگالی پلاسما (یک بر مترمکعب)	3×10^{19}
جریان پلاسما (کیلو آمپر)	۴۰
زمان (ثانیه)	۰.۲۱

چگالی پلاسما (مترمکعب/ل)

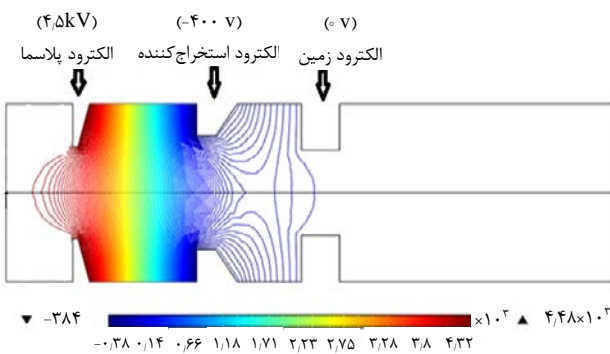


شکل ۴. توزیع چگالی الکترونی پلاسمای سیستم هلیکونی شبیه‌سازی شده.



شکل ۵. هندسه الکترودهای استخراج‌کننده.

پتانسیل الکتریکی (ولت)



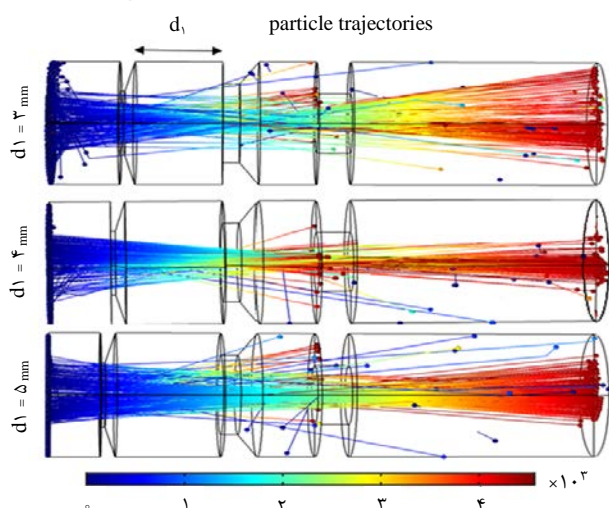
شکل ۶. خطوط پتانسیل اعمالی به الکترودهای استخراج‌کننده.

در شبیه‌سازی انجام شده، تمام برهم‌کنش‌ها و پارامترهای مؤثر اعم از برهم‌کنش‌های کشسان، غیرکشسان، پارامترهای یونش و برانگیختگی در محدوده انرژی بین ۰.۱ الکترون ولت تا ۱ امگا الکترون ولت برای گاز هیدروژن در تولید پلاسما در نظر گرفته شده است. در جدول ۲، مشخصات پلاسمای هلیکون شبیه‌سازی شده جهت استفاده در سیستم تزریق باریکه خنثی نشان داده شده است.

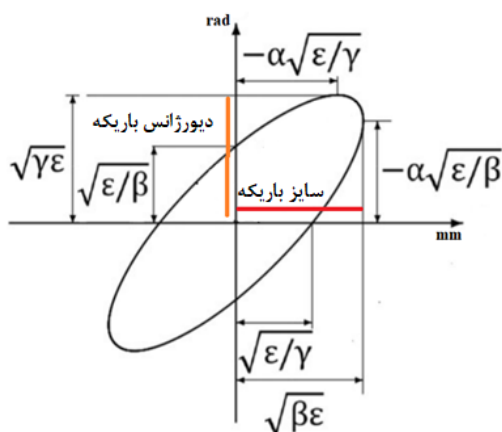
براساس مشخصات ذکر شده در جدول ۲، مولد پلاسمای هلیکون به صورت مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی شده است. در شکل ۴، توزیع چگالی الکترونی پلاسمای هلیکونی شبیه‌سازی شده نشان داده شده است.

براساس شکل ۴، چگالی پلاسمای شبیه‌سازی شده برابر با 5.51×10^{18} ذره در مترمکعب و دمای ۲/۸ الکترون ولت پیش‌بینی می‌شود. در منابع تولید یون، بعد از مولد پلاسما، استخراج‌کننده قرار می‌گیرد تا یون‌ها را از پلاسما استخراج کرده، و آن‌ها را تا انرژی مورد نیاز را برای ارسال به خنثی‌ساز شتاب دهد. در ادامه، به طراحی و شبیه‌سازی یک سیستم استخراج‌کننده سه الکترودی برای استخراج باریکه یون پرداخته شده است. در شکل ۵، هندسه پیشنهادی برای الکترودهای استخراج‌کننده نشان داده شده است.

پتانسیل اعمالی به الکترودهای استخراج‌کننده، براساس انرژی مورد نیاز برای باریکه، تعیین خواهد شد. بنابراین، پتانسیل اعمالی به الکترودهای اول ۴/۵ کیلوولت، الکترودهای دوم منفی ۴۰۰ ولت و الکترودهای سوم زمین قرار داده شد. در شکل ۶، خطوط پتانسیل بین الکترودهای استخراج‌کننده نشان داده شده است.



شکل ۷. تغییرات واگرایی باریکه را برحسب تغییرات فاصله بین دو الکتروود اول با در نظر گرفتن بار فضایی.



شکل ۸. نمایی از یک فضای فاز حرکات ذرات در خارج از استخراج کننده.

با استفاده از شکل ۸، (بیضی گون شکل گرفته) می توان ابعاد باریکه و واگرایی باریکه را به دست آورد. این پارامترها در دل مساحت این بیضی گون قابل تعریف می باشد. مساحت این بیضی گون به پارامتر گسیلندگی باریکه معروف می باشد. بنابراین، یکی از پارامترهای مهم در مسایل نوری باریکه، گسیلندگی باریکه است. گسیلندگی باریکه توسط شعاع حفره الکتروود اول یا الکتروود پلاسما کنترل می شود. گسیلندگی باریکه می تواند رابطه مستقیمی با اندازه باریکه (کمر باریکه) استخراج شده از سیستم استخراج کننده داشته باشد. برای به دست آوردن مشخصات باریکه استخراج شده در خارج از سیستم استخراج کننده (بعد از الکتروود سوم (زمین))، بیضی گسیلندگی باریکه شبیه سازی و ترسیم شد. در شکل ۹، شکل بیضی تابش سیستم استخراج کننده طراحی شده را نشان می دهد.

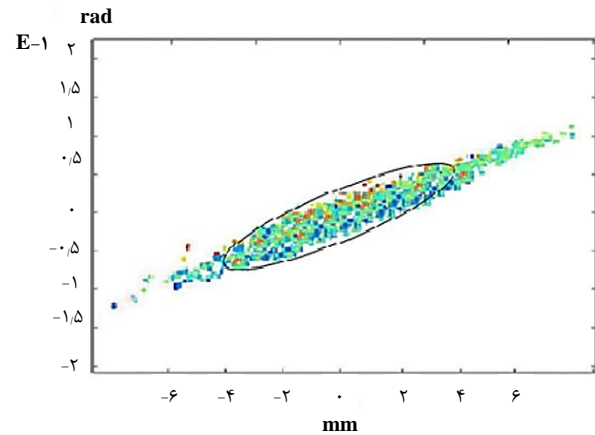
علاوه بر پتانسیل الکتروودها، در راستای طراحی سیستم استخراج کننده عواملی چون شعاع الکتروودها، هندسه الکتروودها و همچنین فاصله بین الکتروودها می توانند بر مشخصات نوری باریکه تأثیر بگذارند. از سویی دیگر، اندازه حفره بر کیفیت باریکه استخراج شده بسیار مؤثر است. به طوری که حفره بزرگ نه تنها واگرایی باریکه را افزایش می دهد، بلکه از ایجاد گرادیان خلأ بین چنبره ی مولد پلاسما و استخراج کننده جلوگیری می کند. همچنین، فاصله بین دو الکتروود اول در طراحی سیستم استخراج کننده دارای اهمیت به سزایی است که نباید از حدی کم تر باشد که منجر به شکست پتانسیل خلأ شود. بنابراین نوع طراحی سیستم استخراج کننده است که جریان یون و کیفیت باریکه را تعیین می کند. در شکل ۷، تغییرات واگرایی باریکه برحسب تغییرات فاصله بین دو الکتروود اول با در نظر گرفتن بار فضایی نشان داده شده است.

بر اساس نتایج این شبیه سازی (شکل ۷)، بهینه ترین حالت فاصله بین دو الکتروود اول استخراج کننده ۴ میلی متر می باشد. یکی از مهم ترین مشخصات نوری باریکه، ایجاد بار فضایی در سیستم استخراج کننده می باشد. بار فضایی ایجاد شده می تواند به علت برخورد یون های باریکه با گاز موجود در سیستم استخراج کننده و یا برخورد یون ها با الکتروودها ایجاد شود. بنابراین، مشخصات نوری باریکه می تواند بر کمیت و کیفیت باریکه استخراج شده تأثیر بگذارد. علاوه بر مقایسه کیفی که از طریق شکل باریکه انجام شده است لازم است مقایسه های کمی نیز در این مورد صورت پذیرد. یکی از این مقایسه های کمی، بررسی نحوه حرکت ذرات موجود در باریکه در یک صفحه فرضی مشخص می باشد. به همین منظور پارامترهای α ، β ، γ و ϵ تعریف می شود که نشان دهنده میزان انحراف، اندازه کمر باریکه (سایز باریکه) و واگرایی باریکه می باشند. در شکل ۸، نمایی از فضای فاز (محور عمودی زاویه انحراف ذرات و محور افقی پهن شدگی محوری ذرات است) حرکات ذرات در خارج از استخراج کننده نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، حرکت ذرات در فضای فاز به شکل یک بیضی خود را نشان می دهد.

پلازما هلیکونی شبیه‌سازی شده برابر 5.51×10^{18} ذره در مترمکعب و دمای الکترونی آن $2/8$ الکترون ولت تخمین زده شد. مسایل نوری باریکه برای سیستم استخراج‌کننده (شتاب دهنده/ کاهش‌دهنده) سه شبکه‌ای برای یک حفره توسط نرم‌افزار کامسول محاسبه شده و در طراحی مد نظر قرار گرفته است. پتانسیل اعمالی به الکترودهای استخراج‌کننده، براساس انرژی مورد نیاز برای باریکه، تعیین خواهد شد. بنابراین، پتانسیل اعمالی به الکتروده اول $4/5$ کیلوولت، الکتروده دوم منفی 400 ولت و الکتروده سوم زمین قرار داده شد. در این سیستم استخراج‌کننده، زاویه واگرایی باریکه برابر با $1/54$ درجه و اندازه باریکه برابر با $2/5$ میلی‌متر می‌باشد. براساس این زاویه واگرایی، جریان یون استخراج‌شده از یک حفره تقریباً برابر با 25 میلی‌آمپر است. بنابراین برای دست‌یافتن به جریان 7 آمپر نیاز به 280 حفره خواهیم داشت.

مراجع

1. J. Wesson, D.J. Campbell, *Tokamaks*, Oxford University Press. **149** (2011).
2. G.G. Kelley, O.B. Morgan, L.D. Stewart, *Neutral-beam-injection heating of toroidal plasmas for fusion research*, Nuclear Fusion, **12** (1972).
3. G. Iovic, *Neutral beam plasma heating*.
4. P. Vincenzi, *Interaction between neutral beam fast particles and plasma in fusion experiments*, (2016).
5. M. Kazemi, R. Amrollahi, *Proton beam simulation of duoplasmatron ion source for diagnostic neutral beam of Alborz tokamak*, Fusion Engineering and Design. **127**, 1 (2018).
6. S. Fazelpour, et al. *Design and simulation of NBI heating system using high dense helicon plasma source for Damavand Tokamak*, Fusion Engineering and Design. **137**, 152 (2018).
7. A.N. Karpushov, et al., *Neutral beam heating on the TCV tokamak*, Fusion Engineering and Design. **123**, 468 (2017).
8. A.N. Karpushov, et al., *A scoping study of the application of neutral beam heating on the TCV tokamak*, Fusion Engineering and Design. **86**(6), 868-871 (2011).
9. A.N. Karpushov, et al., *Upgrade of the TCV tokamak, first phase: Neutral beam heating system.*, Fusion Engineering and Design. **96**, 493-497 (2015).



شکل ۹. شکل بیضی تابش سیستم استخراج‌کننده طراحی شده.

براساس نتایج شبیه‌سازی پارامترهای $\alpha = -2/2217$ ، $\beta = 0/2651$ ، $\epsilon = 23/5741$ ، $\gamma = 30/9237$ و زاویه واگرایی باریکه برابر با 27 میلی‌راد یا $1/54$ درجه و قطر باریکه برابر با $2/5$ میلی‌متر تخمین زده شد. بنابراین، براساس قطر باریکه و رابطه (۳)، جریان یون استخراج‌شده از یک حفره تقریباً برابر با 25 میلی‌آمپر به دست آمد. بنابراین برای دست‌یافتن به جریان 7 آمپری نیاز به 280 حفره خواهیم داشت. بار گرمایی تقریباً برابر با $4-1$ درصد توان باریکه استخراج‌شده را در برمی‌گیرد و اثر باریکه‌های کناری بر روی اپتیک یک‌دیگر خیلی ناچیز بوده و نادیده گرفته شده است.

روش محاسبه تعداد حفره‌های گریدهای استخراج‌کننده همانند محاسبات طراحی گریدهای استخراج‌کننده در توکامک‌های TEXTOR، SST1، JET، DII-D و TFTR [۴۴-۴۸] انجام گرفته است. اگر فاصله بین حفره‌ها برابر با $1/6$ میلی‌متر باشد، برای 280 حفره، به صفحه‌ای با سطح مقطع 100 سانتی‌متر مربع نیاز داریم.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار کامسول، یک سیستم مولد یون هلیکونی و استخراج‌کننده متناظر آن (که توانایی استخراج باریکه یون هیدروژن مثبت با ولتاژ $4/5$ کیلوولت و جریان 7 آمپر از این منبع پلاسمای هلیکونی را دارد) برای طراحی سامانه تزریق باریکه خنثی برای یک توکامک نمونه همانند توکامک دماوند طراحی و شبیه‌سازی شده است. به جهت این منظور، براساس نتایج شبیه‌سازی انجام شده، چگالی پلاسمای منبع

10. T.S. Kim, S.H. Jeong, S.R. In, *New ion source for KSTAR neutral beam injection system*, [Review of Scientific Instruments](#). **83**(2), 02B112 (2012).
11. H.L. Wei, et al. *Recent progress on the IMW-NBI system on HL-2A Tokamak*, [EPS/ICPP Conference](#) (2012).
12. L.He, et al., *Measurement of HL-2A NBI beam profile and beam power*, [Plasma Science and Technology](#). **11**(5), 613 (2009).
13. M.L. Mavoral, et al., *On the challenge of plasma heating with the JET metallic wall*, [Nuclear Fusion](#). **54**(3), 033002 (2014).
14. F.F. Chen, R.W. Boswell, *Helicons-the past decade*, [IEEE Trans Plasma Sci.](#), **25**(6), 1245-57 (1997).
15. R.W. Boswell, F.F. Chen, *Helicons-the early years*, [IEEE Trans Plasma Sci.](#), **25**(6), 1229-44 (1997).
16. F.F. Chen, *Plasma ionization by helicon waves*, [Plasma Physics and Controlled Fusion](#). **33**(4), 339 (1991).
17. F.F. Chen, *Permanent magnet helicon source for ion propulsion*, [IEEE Trans plasma Sci](#), **36**(5), 2095-2110 (2008).
18. F.F. Chen, *Experiments on helicon plasma sources*, [Journal of Vacuum Sci Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films](#). **10**(4), 1389-1401 (1992).
19. I.V. Shikhvotsev, et al., *Correlation of wave propagation modes in helicon plasma with source tube lengths.*, [Physics of Plasmas](#). **24**(1), 013518 (2017).
20. C. Niu, et al., *Correlation of wave propagation modes in helicon plasma with source tube lengths*, [Physics of Plasmas](#). **24**(1), 013518 (2017).
21. X. Zhang, et al., *Pressure dependence of an ion beam accelerating structure in an expanding helicon plasma*, [Physics of Plasmas](#). **25**(2), 023503 (2018).
22. K. Choe, et al., *Development of a radio frequency ion source with multi-helicon plasma injectors for neutral beam injection system of Versatile Experiment Spherical Torus*, [Review of Scientific instruments](#). **85**(2), 02B318 (2014).
23. S. Mordyk, et al., *High-plasma-density helicon source for ion beam application*, [13th International Congress on Plasma Physics](#). **4** (2006).
24. N. Sharma, et al., *Design of a helicon plasma source for ion-ion plasma production*, [Fusion Engineering and Design](#). **117**, 30-8 (2017).
25. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas*. [Routledge](#) (2018).
26. H. Conrads, M. Schmidt, *Plasma generation and plasma sources*, [Plasma Sources Scientific Technology](#). **9**(4), 441 (2000).
27. Z.O. Xie, C.M. Lyneis, *Plasma potentials and performance of the advanced electron cyclotron resonance ion source*, [Review of Scientific instruments](#). **65**(9), 2947-2952 (1994).
28. Z. Xie, et al., *Enhanced ECR ion source performance with an electron gun.*, [Review of scientific instruments](#). **62**(3), 775-778 (1991).
29. Z.O. Xie, et al., *Production of highly charged ion beams from electron cyclotron resonance ion sources.*, [Review of Scientific instruments](#). **69**(2), 625-630 (1998).
30. R. Masic, J.M. Sautter, R.J. Warnecke, *A new way of producing ion beams from metals and gases using the plasma jet from a duoplasmatron*, [Nuclear Instruments and Methods](#). **71**(3), 339-342 (1969).
31. F.M. Bacon, *Gas discharge ion source. I. Duoplasmatron*, [Review of Scientific Instruments](#). **49**(4), 427-434 (1978).
32. A.L. Gray, A.R. Date, *Inductively coupled plasma source mass spectrometry using continuum flow ion extraction*, [Analyst](#). **108**(1290), 1033-1050 (1983).
33. R.S. Houk, et al., *Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements*, [Analytical Chemistry](#). **52**(14), 2283-2289 (1980).
34. <http://sam.zeloof.xyz/icp-stuff/icp-extraction/>
35. B.B. Sahu, J.G. Han, *Comparison of plasma excitation, ionization, and energy influx in single and dual frequency capacitive discharges*, [Physics of Plasmas](#). **23**(12), 123504 (2016).
36. J.L. Kline, et al., *RF absorption and ion heating in helicon sources*, [Physical Review letter](#). **88**(19), 195002 (2002).
37. J.L. Kline, et al., *Ion heating in the HELIX helicon plasma source*, [Physics of Plasmas](#). **6**(12), 4767-4772 (1999).
38. F.F. Chen, *Permanent magnet helicon source for ion propulsion*, [IEEE Transactions on plasma science](#). **36**(5), 2095-2110 (2008).
39. J. Del Valle, et al., *Experimental investigation of momentum transfer to solid surfaces by the impact of energetic ions and atoms*, [In 33rd International Electric Propulsion Conference, Washington, DC, USA](#) (2013).
40. B.M. Hegelich, et al., *Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams*, [Nature](#). **439** (7075), 441(2006).
41. I.G. Brown, *in: The physics and technology of ion sources*, ([John Wiley & Sons](#), 2004).
42. M.M. Shamim, et al., *Measurement of electron emission due to energetic ion bombardment in plasma source ion implantation*, [Journal of applied physics](#). **70**(9), 4756-4759 (1991).
43. N. Sakudo, et al., *Microwave ion source*, [Review of Scientific Instruments](#). **48**(7), 762-766 (1977).
44. S.R. LawriL, *Plasma meniscus and extraction electrode studies of the ISIS H- ion Source*, [Review of Scientific Instruments](#). **81**(2), 02A707 (2011).
45. M.R. Jana, *Design of an ion extractor system for a prototype ion source experiment for SST-I neutral beam injector*, [Fusion Engineering and Design](#). **85**(1), 122-12 (2010).
46. W.B. Kunkel, [Fusion.1, 103 Part B](#) (1981).
47. Sawyer C and Norris N, [Estimation of Space Charge and Hlittance Growth](#), (1984).
48. R. Uhlemann, J. Ongena, *Variation of injected neutral beam power at constant particle energy by changing the beam target aperture of the TEXTOR neutral beam injectors.*, [Fusion technology](#). **35**(1), 42-53 (1999).