بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی و شبیه سازی سیستم استخراج و کانونی کننده باریکه برای چشمه یون H^+

عاطفه فتحی، سید امیر حسین فقهی ، سید مصطفی ساداتی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده – در این مقاله به طراحی و شبیه سازی سیستم استخراج باریکه یون H^+ از چشمه‌های یونی مبتنی بر تشکیل پلاسما، با استفاده از برنامه شبیه سازی CST particle studio پرداخته شده است. در واقع هدف طراحی سیستمی برای استخراج و کانونی ساختن باریکه است. چندین تغییر در هندسه سیستم استخراج به منظور کانونی ساختن باریکه اعمال شده است؛ از جمله ایجاد هلال مقعر در پلاسما، طراحی الکترود شبه پیرس در اطراف باریکه و استفاده از عدسی استخراج کننده کروی با طول کانال ۱۴٫۵ mm . طول کانال عدسی استخراج برابر با فاصله کانونی باریکه یون H^+ درنظر گرفته شده است. فاصله کانونی که توسط روابط ریاضی محاسبه شده است با نتایج شبیه سازی مطابقت دارد.

کلید واژه- برنامه شبیه سازیCST particle studio، چشمه یونی، سیستم استخراج.

Design and simulation of ion beam extractor and focusing system for H^+ ion source

Atefeh Fathi, Seyed Amir Hosein Feghhi, Seyed Mostafa Sadati

Nuclear engineering Department of University of Shahid Beheshti

Abstract- This paper discusses the design and simulation of the ion beam extractor from an ion source using CST particle studio. It has been used to design the extraction system in order to produce a highly focused beam. Sevral changes was done at the geometry of the extraction system to focusing the ion beam, including creates a concave plasma meniscus, using of a quasi-pierce electrode at the beam periphery and using the spherical extraction electrodes with ١٤,٥mm channel. We assume that, the extraction electrode channel length is equal to focal length of H+ ion beam. The focal length that was calculated with mathematical relations is consistent with the result of CST simulation.

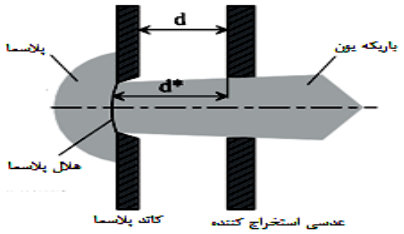
Keywords: CST particle studio, ion source, extraction system.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

دومین مرحله برای چشمه‌های یونی پلاسما، پس از تولید یک پلاسما با چگالی بالا، استخراج یون‌های پلاسما در شکل یک باریکه یون می‌باشد. این کار می‌تواند با استفاده از یک الکترود که دارای پتانسیل منفی نسبت به کاتد پلاسما است، انجام گیرد. [۲-۱] استخراج یون و فرایند تشکیل باریکه یکی از مراحل بسیار سخت در کاشت یون، جداسازی مغناطیسی و تشخیص پلاسما است.[۳] سیستم استخراج طراحی شده شامل دو الکترود؛ کاتد پلاسما و عدسی استخراج کننده می‌باشد. شماتیکی از سیستم استخراج دو الکترودی در شکل ۱ نشان داده شده است. پلاسما در یک سمت کاتد پلاسما قرار گرفته و باریکه یونی شکل گرفته به سمت عدسی استخراج کننده انتقال داده می‌شود.



شکل ۱ : سیستم استخراج دو الکترودی

سطح ساطع کننده یون در چشمه‌های یونی هلال پلاسما نامیده می‌شود که شکل آن ثابت نبوده و وابسته به چگالی پلاسما و همچنین اختلاف پتانسیل بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج است. [۴] شکل هلال پلاسما باعث همگرایی و واگرایی باریکه استخراج شده خواهد شد به گونه‌ای که هلال مقعر باریکه همگرا، هلال محدب باریکه واگرا و هلال مسطح باریکه موازی ایجاد خواهد نمود.[۵] در واقع هلال پلاسما سطح هم پتانسیل بین ناحیه خلا و پلاسما می‌باشد. به همین دلیل با شبیه سازی سطوح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما، به وسیله برنامه CST particle studio با تقریب خوبی شکل هلال پلاسما را تخمین زده و تمام ملاحظات و طراحی‌ها را بر پایه تشکیل هلال مقعر در دهانه کاتد پلاسما قرار داده تا باریکه استخراج شده از چشمه به صورت همگرا باشد تا بتوان به راحتی آن را کانونی نمود. برنامه شبیه سازی CST PS [۶] برای آنالیز دقیق و سریع دینامیک ذرات در میدان‌های الکترومغناطیسی سه بعدی به کار می‌رود.

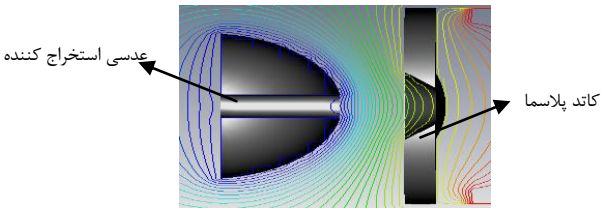
۲- روش انجام کار

با توجه به سیستم استخراج مورد بررسی، می‌توان با ایجاد تغییراتی در هندسه کاتد پلاسما و عدسی استخراج کننده ، همگرایی زیادی در باریکه استخراج شده به وجود آورد. در تمام مراحل طراحی دو نکته اساسی رعایت شده است؛ الف) شکل سطوح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما مقعر باشد. ب) سطوح هم پتانسیل بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج دارای انحنای زیادی باشد تا به همگرایی هر چه بیشتر باریکه، کمک کند.

در این طراحی قطر دهانه کاتد پلاسما ۵,۳۵mm و با نسبت ۰,۶۶ قطر دهانه کاتد پلاسما ۳,۷۵mm در نظر گرفته شده است. این نسبت ۰,۶۶ را مونا الخشاب در مقاله خود، با بررسی ابیراهی کروی و کروماتیک، بهترین نسبت بین قطر دهانه کاتد پلاسما و عدسی استخراج کننده به دست آورده است.[۷] علاوه بر ثابت نگه داشتن قطر دهانه کاتد پلاسما و قطر دهانه عدسی استخراج در شبیه سازی‌ها، اختلاف پتانسیل بین دو الکترود ۵kV- و فاصله بین این دو الکترود نیز ثابت در نظر گرفته شده و صرفا به بررسی شکل هندسه مناسب پرداخته شده است. کوپلند بهترین نسبت شعاع دهانه کاتد پلاسما به فاصله بین اولین و دومین الکترود استخراج را، برای دست‌یابی به بیشترین چگالی جریان، کمتر از ۰,۵به دست آورد. [۸] به همین دلیل در اینجا نیز با توجه به شعاع کاتد پلاسما و با رعایت این نسبت، فاصله بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج ۵mm در نظر گرفته شده است. پس از تعیین شکل مناسب عدسی استخراج و کاتد پلاسما به محاسبه فاصله کانونی باریکه H^+ پرداخته شده است. طراحی بدین صورت انجام شده است که نقطه کانونی باریکه تقریبا پس از خروج از عدسی استخراج کننده باشد.

۳- شبیه سازی

شبیه سازی‌های بسیاری توسط برنامه CST انجام شده است، اما هندسه‌ای که بتواند هر دو شرط ذکر شده در قسمت قبل را برآورده کند به صورت شکل ۲ می‌باشد.



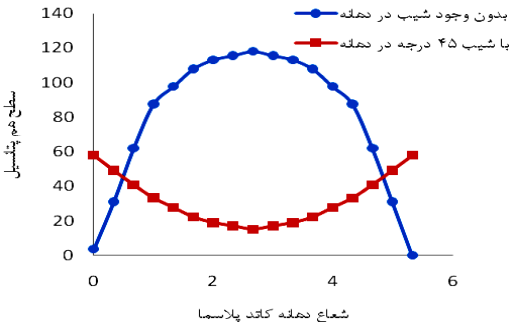
شکل ۲: سیستم استخراج طراحی شده

$$E = \frac{dV}{dR} = \left[\frac{I}{14.67\times10^{-6}(1-\cos\theta)}\right]^{2/3}\frac{d(\alpha)^{4/3}}{dR}$$

۱.pierce

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

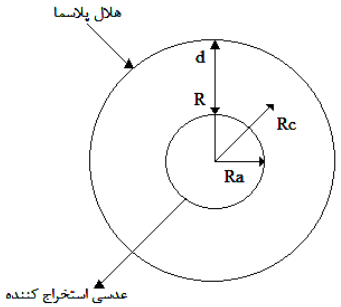
کاتد پلاسما طراحی شده دارای ضخامت ۳,۵mm و شیب دهانه ۴۵ درجه می‌باشد. سطح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما با وجود شیب ۴۵ درجه و بدون شیب در شکل ۳ نشان داده شده است. شیب دهانه کاتد پلاسما باعث شده شکل سطح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما، از محدب به مقعر تغییر کند. این شیب علاوه بر این باعث شده توزیع سطوح هم پتانسیل بین دو الکترود تغییر کند به نحوی که باریکه همگراتر شود.



شکل ۳: سطح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما با وجود شیب ۴۵ درجه و بدون شیب

در تفنگ‌های الکترونی و همچنین در برخی از چشمه-های یونی از زاویه ۶۷,۵ یعنی زاویه پیرس[۱] برای شیب کاتد پلاسما استفاده شده است.[۹,۱۰] با حل معادله لاپلاس برای کاتد تفنگ‌های الکترونی، زاویه‌ای که در آن پتانسیل برابر با صفر خواهد شد به دست خواهد آمد، که این زاویه برابر با ۶۷,۵ درجه می‌باشد، این زاویه را به نام زاویه پیرس می‌شناسند. اما تمامی محاسبات زاویه پیرس برای استخراج باریکه موازی انجام شده است اما در اینجا باریکه استخراج شده به صورت همگرا می‌باشد. بنابراین زاویه پیرس باید نسبت به لبه باریکه در نظر گرفته شود پس زاویه شیب دهانه کاتد پلاسما از ۶۷,۵ درجه کمتر خواهد شد. چون انحنای هلال پلاسما به طور دقیق مشخص نمی‌باشد به طور تقریبی زاویه ۴۵ درجه را برای شیب کاتد پلاسما انتخاب کرده که شرط مقعر بودن سطح هم‌پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما را نیز برآورده می‌کند.

برای انحنای بیشتر سطوح هم‌پتانسیل بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج کننده شکل عدسی استخراج کننده به صورت نیمی از یک نیم کره به شعاع ۱۱mmطراحی شده است. به طور کلی هلال پلاسما و عدسی استخراج کننده به صورت بخشی دو کره هم مرکز در نظر گرفته شده‌اند به صورتی که هرچه شعاع هلال پلاسما افزایش یابد، به بین دلیل هم مرکز بودن دو کره، فاصله بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج نیز افزایش خواهد یافت. در اینجا شعاع عدسی استخراج کننده ۱۱mm در نظر گرفته شده است، اگر شعاع هلال پلاسما بین بازه ۱۶mm تا ۲۳mm تغییر کند می‌توان هلال پلاسما و عدسی استخراج کننده را به صورت دو کره هم مرکز، مشابه شکل ۴، در نظر گرفت. زیرا شکل سطح هم پتانسیل در دهانه داخلی کاتد پلاسما ، که تقریبی از هلال پلاسماست، در این فواصل به صورت بخشی از یک کره‌ی بزرگ است که در بردارنده کره عدسی استخراج کننده می‌باشد. ولی با زیاد شدن شعاع هلال پلاسما از ۲۳mm، دیگر سطح هم پتانسیل در دهانه کاتد پلاسما محدب خواهد شد.



شکل ۴ : هلال پلاسما و عدسی استخراج در سیستم استخراج کروی

همانگونه که قبلا ذکر شد طول کانال عدسی استخراج کننده برابر با فاصله کانونی باریکه در نظر گرفته شده است. برای محاسبه فاصله کانونی از رابطه دیوسون کالبیک به صورت تقریبی استفاده شده است. رابطه دیوسون کالبیک فاصله کانونی را به صورت برای لنز نازک بیان می‌کند.[۱۱]

$$f = 4\frac{V_a}{E_2 - E_1} \qquad (۱)$$

E_1 میدان در ابتدای باریکه و E_2 میدان در انتهای باریکه می‌باشد، V_a نیز پتانسیل عدسی استخراج کننده است. از آنجایی که در داخل عدسی استخراج کننده میدان صفر است پس $E_2=0$ می‌باشد. مقدار E_1 را می‌توان به صورت $E_1 = -dV/dR$ نوشت و با استفاده از معادله۲ که پروه-انس برای سیستم‌های کروی همگرا می‌باشد، مقدار V را محاسبه کرد و سپس E_1 را به دست آورد.[۱۲]

$$P = \frac{0.34}{\alpha^2}(1-\cos\theta) = \frac{V^{3/2}}{I} \qquad (۲)$$

α تابعی از γ می‌باشد که خود γ وابسته به R_a شعاع عدسی استخراج کننده و R_c شعاع هلال پلاسما می‌باشد.

۱.pierce

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

$$\alpha = \gamma - 0.3\gamma^2 + 0.075\gamma^3 - 0.01432\gamma^4 + 0.0021609\gamma^5 - 0.000267\gamma^6 + ... \quad (۳)$$

$$\gamma = Ln(\frac{Ra}{Rc}) \quad (۴)$$

با استفاده از فرمول ۲ و کمی محاسبات جبری ساده E_1 به صورت

$$E_1 = -\frac{dV}{dR} = -\frac{4V_a}{3(\alpha)}\frac{1}{R_a}\frac{df(\gamma)}{d\gamma} \quad (۵)$$

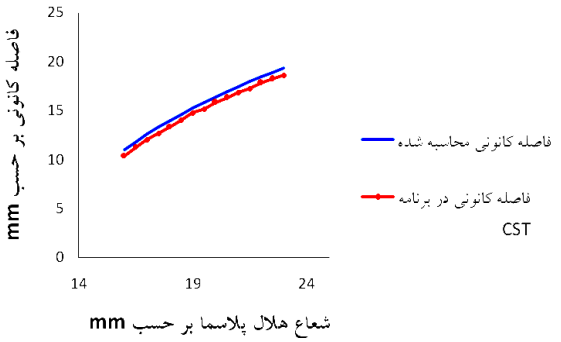
که در آن

$$\frac{df(\gamma)}{d\gamma} = 1 - 0.6\gamma + 0.225\gamma^2 - 0.0573\gamma^3 + 0.0108\gamma^4 - 0.0021\gamma^5 \quad (۶)$$

به این ترتیب E_1 ، به راحتی در سطح عدسی استخراج کننده محاسبه شده و با جایگذاری E_1 ، فاصله کانونی از رابطه ۱به دست می‌آید.

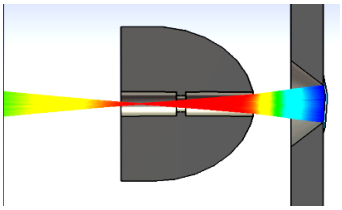
$$f = \frac{3\alpha R_a}{(df(\gamma)/\gamma)} \quad (۷)$$

با توجه به رابطه ۷، شعاع عدسی استخراج را ۱۱mm ثابت در نظر گرفته و شعاع هلال پلاسما را از ۱۶mm تا ۲۳mm تغییر داده و فاصله کانونی را برای هر حالت محاسبه کرده و با فاصله کانونی به دست آمده از شبیه سازی حاصل از CST مقایسه کرده که نتایج در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵: مقایسه فاصله کانونی محاسبه شده و فاصله کانونی به دست آمده در برنامه CST

شکل۵ مسیر حرکت باریکه در حالتی که شعاع هلال پلاسما ۱۹,۵mm و عدسی استخراج کننده ۱۱mm باشد را نشان می‌دهد. با استفاده از فرمول شماره ۷، فاصله کانونی برای این حالت ۱۴,۶۰mm محاسبه شده و نقطه‌ای که باریکه در آن کانونی می‌گردد در CST برابر با ۱۴mm است. با اضافه کردن استوانه‌ای به شعاع خارجی ۱۱mm وشعاع داخلی۱,۷۵mm به عدسی استخراج کننده، باریکه پس از خارج شدن از عدسی کانونی می‌گردد.



شکل ۶: مسیر باریکه برای شعاع هلال پلاسما ۱۸,۵mm و شعاع عدسی استخراج کننده۱۱ mm و طول عدسی استخراج کننده ۱۴,۵mm

نتیجه گیری

سیستم استخراج تاثیر بسزایی بر شکل و سایز باریکه خارج شده از چشمه یونی خواهد داشت. برای داشتن باریکه کانونی با انرژی دلخواه، می‌توان از روند این مقاله برای طراحی سیستم استخراج استفاده نمود. به گونه‌ای که ابتدا با توجه به انرژی باریکه مورد نیاز پتانسیل بین کاتد پلاسما و عدسی استخراج را تعیین نمود و سپس با ثابت گرفتن شعاع دهانه و فاصله هر این دو الکترود، سیستم استخراجی مشابه سیستم استخراج طراحی شده در اینجا، طراحی کرد.

منابع

[۱] A.G.Drentje; Rev. Sci. Instrum., ۷۵, ۱۳۹۹ (۲۰۰٤).
[۲] M.Leitner, D.Wutte, J.Brandstotter, F.Aumayr and HP.Winter;Rev. Sci. Instrum., ٦٥, ۱۰۹۱ (۱۹۹٤).
[۳] M. Turek et al; Vacuum ۷۸; ٦٤۹-٦٥٤ (۲۰۰٥).
[٤] S. R. Lawrie, D. C. Faircloth, A. P. Letchford, Plasma meniscus and extraction electrode studies of the ISIS H- ion source, of scientific instruments ۸۱ , ۰۲A۷۰۷ (۲۰۱۰).
[٥] Stanley Humphries Jr, *Modeling ion extraction from a free-plasma surface with a flexible conformal mesh*, Journal of Computational Physics ۲۰٤ ٥۸۷_ ٥۹۷(۲۰۰٥).
[٦] CST PS manual, (۲۰۱۳).
[۷] Muna A. Al-Khashab, Abdullah E. Al-Abdullah, *The Effect of Bore Diameters inTwo Electrodes Electrostatic Immersion Lens Design*, Raf. J. Sci., Vol. ۲٤, No.۲ pp. ۸۲-۹۱, ۲۰۱۳.
[۸] Coupland. J. R and Thompson. E, Rev. Sci. Instrum. ٤۲, ۱۰٤۳, (۱۹۷۱).
[۹] Humphries. Stanley, *Modeling ion extraction from a free-plasma surface with a flexible conformal mesh*, Computational Physics ۲۰٤ ,(۲۰۰٥).
[۱۰] Lawrie. S.R, *Plasma meniscus and extraction electrode studies of the ISIS H ion source*, review of scientific instruments ۸۱, ۰۲A۷۰۷ ,(۲۰۱۰).
[۱۱] V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, S. A. Korepanov, and I. A. Kotelnikov, Precise formation of geometrically focused ion beams, review of scientific instruments۷۷, ۰۳B۹۰۲ (۲۰۰٦).
[۱۲] Abdelrahman. M. M and Zakhary. S. G, *simulation studies for ion beam extraction systems*, Brazilian Journal of physics, vol. ۳۹, no. ۲, June, (۲۰۰۹).

۱.pierce

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]