



## بهینه سازی مگنت های دایمی چندگانه چشمه یونی هیدروژن منفی

حسین زاده، مریم \*

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

### چکیده:

چشمه یونی مولتی کاسپ در سیکلوترون کرج برای تولید باریکه هیدروژن منفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این چشمه یونی در روزهای اولیه ساخت قادر به تولید ۲,۵ میلی آمپر باریکه هیدروژن منفی بوده است. ما می‌خواهیم جریان باریکه خروجی را با تغییر رشته فیلامان، آهنرباهای مغناطیسی و فشار منبع یون افزایش دهیم. در این مقاله شبیه‌سازی عددی چگالی شار مغناطیسی آهنربای دائمی مورد استفاده در چشمه یونی برای محصورسازی پلاسما و به دام انداختن الکترون‌های سریع توسط میدان مغناطیسی برای بهینه‌سازی تعداد آهنرباهای محدود کننده پلاسما با استفاده از کد CST انجام شده است.

**کلمات کلیدی:** چشمه یونی مولتی کاسپ، ردیابی الکترون در میدان مغناطیسی، چگالی پلاسما و کد CST

### مقدمه:

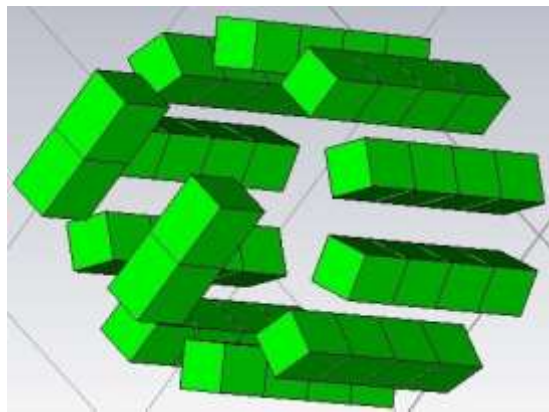
چشمه یون مولتی کاسپ به طور عمده در راکتورهای گداخت و شتاب‌دهنده‌های ذرات برای تولید رادیوایزوتوپ مورد استفاده قرار گرفته می‌گیرند. یکی از گامهای اساسی برای طراحی چشمه یونی مولتی کاسپ طراحی و بهینه‌سازی قدرت و تعداد مگنت‌های محصور کننده پلاسما در اطراف محفظه واکنش چشمه می‌باشد. در این نوع چشمه‌های یونی آهن-رباهای دائمی برای بهبود چگالی و یکنواختی پلاسما استفاده شود [۱]. محصورسازی پلاسما توسط هندسه‌های مختلف آهنرباها مورد بررسی قرار گرفته است. امروزه مشخص است که هندسه کاسپ تمام خط صرف نظر از فشار، بالاترین چگالی پلاسما را می‌دهد. افزایش تراکم در درجه اول به دلیل محصورسازی الکترون‌های اولیه است [۲]. در این مقاله، ما با استفاده از کد شبیه‌سازی CST محاسبه اندازه میدان مغناطیسی حاصل از برابند میدانهای مگنت ها و همچنین با استفاده از کد Femlab محصورسازی پلاسما و به دام انداختن الکترون‌های سریع توسط میدان مغناطیسی را تجزیه و تحلیل می‌کنیم [۳، ۴]. همچنین تأثیر میدان مغناطیسی و تعداد قطب‌های مغناطیسی بر چگالی پلاسما بررسی می‌شود.

در اینجا هدف افزایش چگالی جریان باریکه هیدروژن منفی چشمه یونی مولتی کاسپ کرج می‌باشد. با توجه به هندسه و ابعاد این چشمه یونی هدف بهینه سازی تعداد مگنت‌های محصور کننده پلاسما است که با توجه به هندسه موجود بیشینه محصورسازی انجام شود. شبیه سازی ما نشان می‌دهد که یک نقطه بهینه در انتخاب تعداد آهنرباهای دائمی که باعث محصورسازی پلاسما می‌شوند وجود دارد. نتایج تحقیقات نشان داده است که با افزایش N (تعداد ردیف

آهنرباهای دائمی) اثر محصور سازی الکترونی قوی‌تر می‌شود، از طرف دیگر فرار الکترون‌ها از کاسپ‌ها با افزایش  $N$  بیشتر می‌شود. مقدار بهینه  $N$  در شرایطی است که دو اثر رقابتی متعادل شوند.

### روش کار :

نمایی شماتیک از چیدمان آهنربای دائمی برای محصورسازی پلازما در چشمه یون Cyclone30 در شکل ۱ نشان داده شده است. محفظه واکنش چشمه یونی مولتی کاسپ واقع در شتابدهنده سیکلوترون کرج استوانه‌ای از جنس مس (به قطر ۱۰ cm و طول ۱۵ cm) است که ۱۰ مگنت از نوع دایمی آن را احاطه کرده است. ستونی از مگنت‌های دائمی از جنس نئودیمیم با پلاریته مختلف که الکترون‌های پرنرژی و ذرات پلازما را محصور می‌کند محفظه را احاطه کرده است که تولید میدان مغناطیسی به شکل کاسپ می‌کند [۷-۵]. مگنت‌ها با قطب‌های مختلف با گرادیان میدان ۰ G (در مرکز) تا ۳ G چیده شده‌اند.



شکل (۱): نمای شماتیک از مگنت‌های محصورکننده مغناطیسی چشمه یون Cyclone30

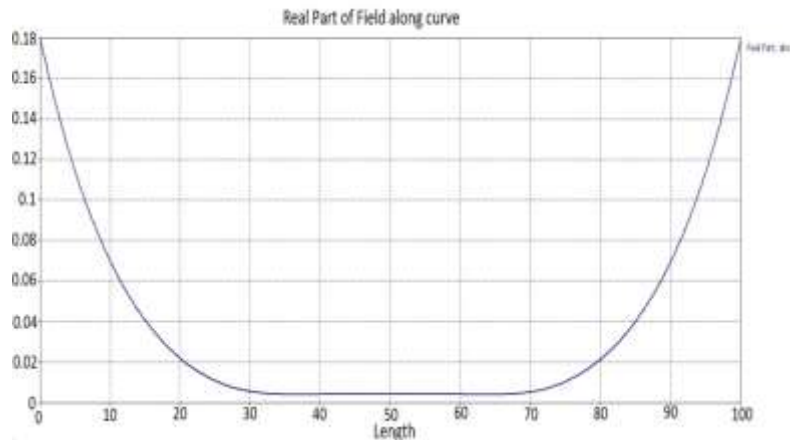
میدان مغناطیسی در منبع یون چند قلو از معادله نمایی 1 به شرح زیر است:

$$B = B_{\max} \exp\left(-y \frac{\pi}{d} y\right) \quad (1)$$

که در اینجا  $B_{\max}$  در لبه آهنربا اندازه‌گیری می‌شود،  $d$  فاصله بین آهنربا و  $y$  یک مختصات است که با جهت شعاعی مطابقت دارد و  $\gamma$  یک عامل هندسی است [۸].



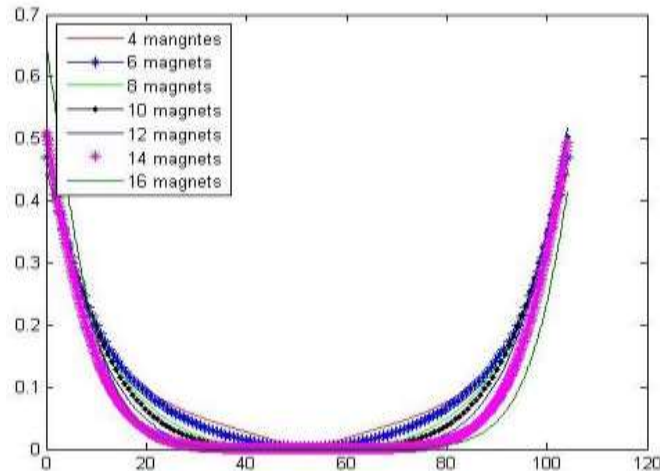
ابتدا میدان مغناطیسی مگنت‌های محصورکننده پلازما را در کد CST حل کرده و ناحیه‌ای در ناحیه وسط چمبر که میدان مغناطیسی در اثر برآیند به سمت صفر میل می‌کند را برای هر یک رسم می‌کنیم. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مگنت‌ها این ناحیه در وسط مگنت که میدان در آن به سمت صفر می‌کند بزرگتر می‌شود.



شکل (۲): پروفایل چگالی شار مغناطیسی در امتداد شعاع از نوک قطب‌های مگنت‌ها برای تعداد ده عدد مگنت چشمه یونی مورد نظر

### نتایج :

در شکل ۳ میدان مغناطیسی حاصل از برآیند میدانهای این آهنرباها بر حسب تعداد مگنت‌های محصورکننده چمبر از ۶ به ۱۶ رسم شده است. هر چه تعداد مگنت‌ها بیشتر شود اندازه این ناحیه بزرگتر می‌شود که نمایانگر این نکته می‌باشد که یونیزاسیون بیشتر و در نتیجه چگالی پلازما بیشتر تولید می‌شود.



شکل (۳): پروفایل چگالی شار مغناطیسی در امتداد شعاع از نوک قطب های مگنت ها برای تعداد 6 تا 16 مگنت.

الکترون‌های ساطع شده از فیلامان را داخل چمبر برای تعداد متفاوتی از مگنت‌ها پرواز می‌دهیم و مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد مگنت‌ها علیرغم افزایش ناحیه میدان تقریباً صفر، تعداد الکترون‌های باقی مانده بعد از پرواز و در نتیجه چگالی پلاسمای تشکیل شده کمتر می‌شود که نتیجه آن است که بایستی نقطه بهینه‌ای از تعداد مگنت‌ها برای افزایش چگالی پلاسمای تشکیل شده وجود داشته باشد. اشکال الکترون پرواز داده شده برای سه حالت 6، 12 و 16 مگنت در اشکال 4، 5 و 6 نشان داده شده است که همانطور که مشاهده می‌شود با تعداد مگنت‌های کم، چگالی الکترون‌ها زیاد است ولی این مشکل وجود دارد که ناحیه میدان صفر نیز که برهم‌کنش و یونیزاسیون عمدتاً در آنجا صورت می‌گیرد نیز کیمنه می‌باشد ولی با افزایش تعداد مگنت‌ها ناحیه کمینه میدان افزایش می‌یابد ولی از طرفی فرار الکترون‌ها نیز بیشتر و در نتیجه چگالی الکترون‌ها و در نتیجه چگالی پلاسمای کاهش می‌یابد.

فرایند شبیه‌سازی بدین صورت است که تعداد مگنت‌های دائمی که برای تولید خطوط میدان مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند پارامتر شبیه‌سازی است. در صورتی که شعاع محفظه واکنش، ارتفاع، مکان و موقعیت فیلامان ثابت‌های شبیه‌سازی هستند. با در نظر گرفتن هندسه و ابعاد محفظه واکنش موجود در سیکلوترون کرج تعداد مگنت‌هایی که محفظه واکنش را محصور می‌کنند از 4 تا 16 عدد متغیر است. میدان مغناطیسی مگنت‌ها توسط نرم افزار Femlab محاسبه شده است. نتیجه این شبیه‌سازی‌ها آن است که هنگامی که تعداد 12 مگنت، محفظه واکنش را احاطه می‌کند، بیشترین چگالی پلاسمای را در ابعاد داده شده چشمه یونی تولید می‌کند. این نتیجه گیری بدین دلیل می‌باشد که مسیر

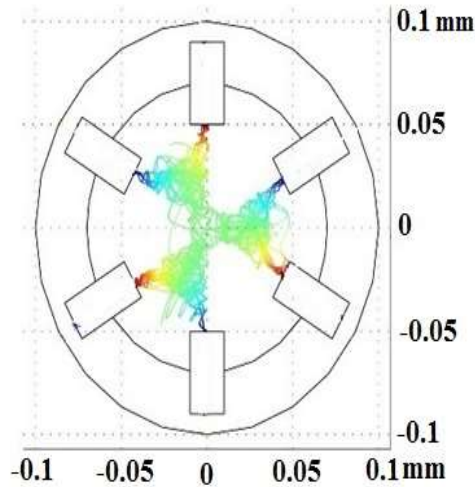


طی شده توسط الکترونها و زمان لازم برای از بین رفتن الکترون ها توسط الکترونها در تعداد مختلف مگنت بر روی و توسط محاسبه شود. نتایج این شبیه سازی نشان داد که هنگامی که تعداد ۱۲ مگنت چمبر را احاطه می کند الکترونها در زمان بیشتر و مسیر بیشتری را طی می کنند. هر چه مدت زمان محصور سازی الکترون ها بیشتر شود واکنش های بیشتری با گاز تزریق شده انجام می دهند و در نتیجه چگالی پلاسما بیشتر تولید می شود. نتایج عددی این شبیه سازی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

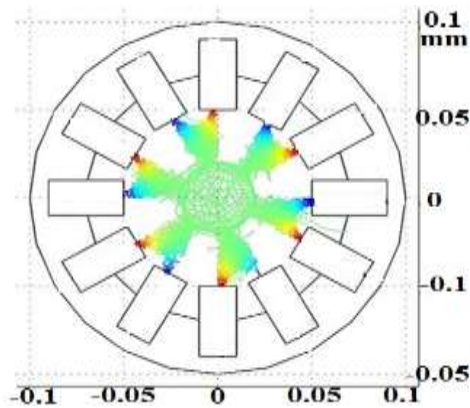
جدول شماره (۱)

تعداد مگنت ها	مجموع مسیر الکترون (متر)	عمر میانگین الکترون ها (ثانیه)
۶	۶۱,۶۴۱	$1.47 \times 10^{-6}$
۱۲	۳۶۸,۰۳۲	$8.79 \times 10^{-6}$
۱۶	۲۹۴,۲۶۰	$7.01 \times 10^{-6}$

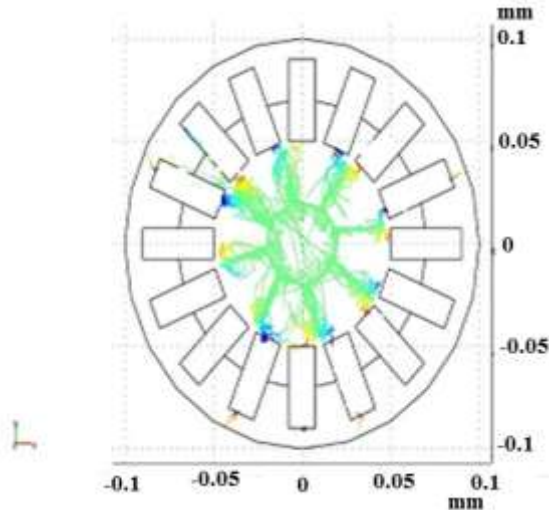
الکترون های ساطع شده از فیلامان را داخل چمبر برای تعداد متفاوتی از مگنت ها پرواز می دهیم و مشاهده می شود که با افزایش تعداد مگنت ها علی رغم افزایش ناحیه میدان تقریباً صفر، تعداد الکترون های باقی مانده بعد از پرواز و در نتیجه چگالی پلاسما تشکیل شده کمتر می شود که نتیجه آن است که بایستی نقطه بهینه ای از تعداد مگنت ها برای افزایش چگالی پلاسما تشکیل شده وجود داشته باشد. همانطور که مشاهده می شود با تعداد مگنت های کم، چگالی الکترون ها زیاد است ولی این مشکل وجود دارد که ناحیه میدان صفر نیز که برهم کنش و یونیزاسیون عمدتاً در آنجا صورت می گیرد نیز کیمنه می باشد ولی با افزایش تعداد مگنت ها ناحیه میدان کیمنه افزایش می یابد ولی از طرفی فرار الکترون ها نیز بیشتر و در نتیجه چگالی الکترون ها و در نتیجه چگالی پلاسما کاهش می یابد.



شکل (۴): الکترون‌ها در چشمه یونی CYCLONE30 با تعداد ۶ مگنت. ناحیه با کمینه میدان کوچک و تعداد اندکی الکترون داخل محفظه واکنش پرواز می‌کنند.



شکل (۵): الکترون‌ها در چشمه یونی CYCLONE30 با تعداد ۱۲ مگنت. ناحیه با کمینه میدان به اندازه کافی بزرگ و تعداد قابل توجهی الکترون داخل محفظه واکنش پرواز می‌کنند.



شکل (۶): الکترون‌ها در چشمه یونی CYCLONE30 با تعداد ۱۶ مگنت. ناحیه با کمینه میدان از موارد قبل بزرگتر و تعداد اندکی الکترون داخل محفظه واکنش پرواز می‌کنند زیرا مقادیر قابل توجهی از آنها فرار می‌کنند.

### بحث و نتیجه گیری :

شبیه‌سازی عددی در بهینه‌سازی منبع یون Cyclone30 با یک میدان مغناطیسی چند قطبی استفاده شده است. تأثیر میدان مغناطیسی و تعداد قطب‌ها بر روی ساختار پلازما بررسی شد. در این حالت مسیر پیموده شده توسط الکترون‌ها و همچنین زمان محصور شده آنها بیشینه می‌شود که منجر به افزایش یونیزاسیون و همچنین چگالی پلاسمای بیشتر می‌شود. با افزایش تعداد قطب‌های مغناطیسی محصورسازی الکترون قوی‌تر می‌شود. برعکس، با افزایش تعداد قطب‌های مغناطیسی فرار الکترون‌ها از کاسپ‌ها بیشتر می‌شود. وقتی تعداد قطب‌ها خیلی زیاد می‌شود اثر دوم بر اولی غلبه می‌کند. بعبارت دیگر، با افزایش تعداد قطب‌ها، الکترون‌های بیشتری هدر می‌رود. مقدار مطلوب تعداد ردیف آهنرباهای دائمی وقتی است که دو اثر رقابتی متعادل می‌شوند که این تعادل در تعداد ۱۲ مگنت بوضوح اتفاق می‌افتد.

### مراجع :

- [۱] R. Limpaecher and K.R. MacKenzie, Rev. Sci. Instr. 44 (1973) 726.
- [۲] K.N. Leung, T.K. Samec and A. Lamm, Phys. Lett. 51A (1975) 490.
- [۳] CST, <http://www.cst.com>.
- [۴] FEMLAB, Finite Element Software package, COMSOL, AB, 2004.
- [۵] K.N. Leung, T.K. Samec, A. Lamm, Phys. Lett. A 51, 490 (1975).
- [۶] Y. Ueda, M. Doi, M. Nishikawa, S. Goto, Rev. Sci. Instrum. 62, 105 (1991).
- [۷] S.R. Walther, K.N. Leung, W.B. Kunkel, J. App. Phys. 64 (1998).



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



[8] Tomozeiu, N and Milne, WI (1999), Magnetic multipole confinement used in amorphous hydrogenated carbon films deposition. Journal of Non-Crystalline Solids, 249. pp. 180-188. ISSN 0022-309