

بررسی تئوری و تجربی تاثیر میدان مغناطیسی قوی بر تانسور رسانندگی پلاسما در روش محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی به منظور افزایش نرخ واکنش‌های گداخت هسته‌ای

علیرضا اصل زعیم^۱

^۱ پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران

*آدرس رایانامه نویسنده مسئول: aaslezaem@aeoi.org.ir

کلید واژه: محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی، میدان مغناطیسی قوی، تانسور رسانندگی پلاسما

چکیده

در این مقاله ضمن بررسی تئوری اثر میدان مغناطیسی پالسی حدود دو تسلا بر رفتار پلاسما در دستگاه الکترواستاتیکی اینرسی، به بررسی تجربی این اثر پرداخته شده است. برای این منظور یک دستگاه الکترواستاتیک اینرسی مینیاتوری طراحی و ساخته شد. سپس با استفاده از یک پیچه میدان مغناطیسی پالسی میدان‌های مغناطیسی در حدود دو تسلا به صورت محوری بر این دستگاه اعمال گردید. سیگنال‌های جریان تخلیه در حین اعمال این میدان‌ها تغییرات شدیدی را نشان دادند که این افزایش جریان در عمل حدود چند میلی ثانیه بیشتر از زمان اعمال میدان ادامه میابد. از آنجایی که نرخ واکنش‌های هسته‌ای در محصورسازی الکترواستاتیکی اینرسی به صورت خطی متناسب با جریان یونی است لذا این آزمایشات می‌تواند دلیل محکمی بر افزایش بهره واکنش‌های گداخت هسته‌ای در این نوع دستگاه‌ها با اعمال میدان مغناطیس قوی باشد.

Effect of strong magnetic field on the conductivity tensor of inertial electrostatic confinement fusion to improve the fusion reaction rate

Alireza Asle Zaem¹

¹ Plasma and fusion research school, nuclear science and technology research institute, Tehran Iran

*corresponding e-mail: aaslezaem@aeoi.org.ir

Abstract

In this article effect of strong magnetic field on the conductivity tensor of plasma in inertial electrostatic confinement (IEC) device has been investigated both theoretically and experimentally. In this way a miniature sized IEC device has been designed and constructed. By using a newly designed pulsed magnet, two Tesla magnetic fields have been used as the axial magnetic field. The discharge current signals represent strong amplifications during the impulse magnetic fields. Since the neutron production rate has been previously proven to be linearly dependent on the discharge current, then this study might open new investigations for probable increment of fusion reaction rates in IEC devices with additional strong magnetic field

Keywords: Inertial electrostatic confinement fusion, Strong magnetic field, Conductivity tensor

مقدمه

است [۲۱] وقتی دستگاه الکترواستاتیکی اینرسی در حال کارکرد عادی است از منظر تئوری جریان کاتد را می‌توان ناشی از حرکت یون‌ها به سمت کاتد و الکترون‌ها از کاتد به سمت آند در میدان الکترواستاتیک شعاعی دستگاه تصور کرد. بعد از اعمال میدان مغناطیسی قوی محوری، مسیر حرکت الکترون‌ها و یون‌ها به طور کلی تغییر می‌کند و می‌توان این تغییر را در تغییر مولفه‌های تانسور

ایده محصورسازی یون‌ها در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی - اینرسی جهت انجام واکنش گداخت هسته‌ای اولین بار توسط روبرد هیرچ در سال ۱۹۶۷ میلادی مطرح گردید. از آن سال‌ها به بعد تلاش‌های فراوانی برای برطرف نمودن موانع مختلف جهت رسیدن به انرژی خالص گداخت هسته‌ای با این نوع روش انجام گرفته



کاتدی را شکل می‌دهند بنابراین جریان کاتدی با چگالی جریان شعاعی ($J_r = \sigma_{\perp} E_r$) متناسب است.

برای این قسمت از آزمایشات از پیچه مغناطیسی پالسی باتوان ایجاد میدان‌های حدود دو تسلا استفاده گردید. این پیچه مغناطیسی قابلیت تولید میدان‌هایی تا دو تسلا را برای مدت زمان حدود بیست میلی ثانیه دارد. برای تغذیه این پیچه از یک بانک خازنی سی و سه میلی فاراد با ولتاژ شارژ هشتصد ولت استفاده گردید [۴]. قطر حفره داخل پیچه مغناطیسی یازده سانتی متر است و محفظه خلا کوارتز دستگاه از مرکز این حفره عبور می‌کند. توسط یک پروب ولتاژ که به دوسر یک مقاومت صد اهمی - که بین خروجی آند دستگاه و زمین قرار دارد - و اتصال خروجی این پروب به اسیلوسکوپ، سیگنال‌های جریان ناشی از افزودن پالس‌های میدان مغناطیسی بر دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی مذکور مورد مشاهده و بررسی قرار گرفت. جریان‌های مذکور در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌اند. چنانکه در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود؛ جریان دستگاه در شروع اعمال میدان مغناطیسی یک قله باریک با پهنای سه میلی ثانیه دارد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر افزایش سریع قله جریان در جریان‌های بالاتر می‌باشد. از طرف دیگر با افزایش ولتاژ کاری، قله باریک جریان جریان کاهش یافته ولی شکل کلی جریان در این حالت از پایداربیشتری برخوردار است و هفتاد و پنج تا صد و ده میلی ثانیه به طول می‌انجامد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری سیگنال‌های جریان نشان می‌دهند در فشارهای کاری نسبتاً بالا هر چه ولتاژ تخلیه افزایش یابد مقادیر ضریب تقویت جریان کمتر خواهد بود و با تغییر ولتاژ از شش تا دوازده کیلو ولت از مقادیر بیست و دو تا سیزده و نیم کاهش نسبتاً اندکی نشان می‌دهد. از طرفی دیگر، در رژیم کاری فشارهای پایین که یونیزاسیون آن با کمک چشمه پلاسمایی انجام می‌گیرد مقادیر ضریب تقویت جریان با افزایش ولتاژ تخلیه افزایش چشمگیری نشان می‌دهد و از ده تا صد و ده با تغییر ولتاژ از ده تا سی کیلو ولت تغییر می‌کند. همچنین افزایش میدان مغناطیسی از حدود نیم تسلا تا نزدیک دو تسلا یک افزایش غیر خطی جریان حدود سی درصدی در هر دو رژیم کاری نشان می‌دهد. در اندازه‌گیری‌های تجربی فقط تغییرات شعاعی چگالی جریان تخلیه

رسانندگی پلاسما جستجو کرد. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت، مسیر حرکت الکترون‌ها با اعمال میدان مغناطیسی بزرگ به مسیرهای بسیار کوتاهی اطراف کاتد محدود خواهد شد این در حالیتیست که مسیر یون‌ها به علت داشتن جرم بیشتر، کمتر تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. مسیر یون‌های دوتریوم با اعمال میدان مغناطیسی در محدوده یک تا دو تسلا به مسیرهای بسته تبدیل می‌شوند [۳] با نوشتن رابطه زیر برای چگالی جریان و میدان الکتریکی، برای تانسور رسانندگی پلاسما خواهیم داشت:

$$\vec{J} = \vec{\sigma} \cdot \vec{E}$$

$$\vec{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{\perp} & \sigma_H & 0 \\ -\sigma_H & \sigma_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\square} \end{pmatrix} \quad (1)$$

E بردار میدان الکتریکی شعاعی بین الکترودها است. مولفه‌های تانسور رسانندگی به صورت زیر نوشته می‌شوند [۵]

$$\sigma_{\perp} = \epsilon_0 \left(\frac{\omega_{pe}^2 \nu_e}{\nu_e^2 + \omega_{ce}^2} + \frac{\omega_{pi}^2 \nu_i}{\nu_i^2 + \omega_{ci}^2} \right)$$

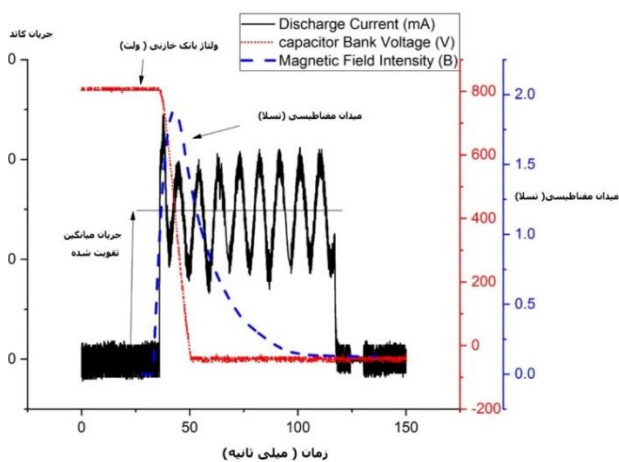
$$\sigma_H = \epsilon_0 \left(\frac{\omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{\nu_e^2 + \omega_{ce}^2} + \frac{\omega_{pi}^2 \omega_{ci}}{\nu_i^2 + \omega_{ci}^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{\square} = \epsilon_0 \left(\frac{\omega_{pe}^2}{\nu_e} + \frac{\omega_{pi}^2}{\nu_i} \right)$$

ϵ_0 ضریب دی الکتریک خلا ω_{pe} و ω_{pi} به ترتیب فرکانس نوسان الکترون‌ها و یون‌ها در پلاسما می‌باشند. ν_e و ν_i به ترتیب فرکانس برخورد یون با اتم‌های گاز خنثی و فرکانس برخورد الکترون با اتم‌های گاز خنثی می‌باشند. ω_{ci} و ω_{ce} فرکانس سیکلوترونی الکترون‌ها و یون‌ها حول میدان مغناطیسی می‌باشد. از آنجایی که حرکت یون‌ها و الکترون‌ها در جهت عمود بر سطوح هم پتانسیل (در هندسه مورد نظر اینجا همان جهت شعاعی) جریان

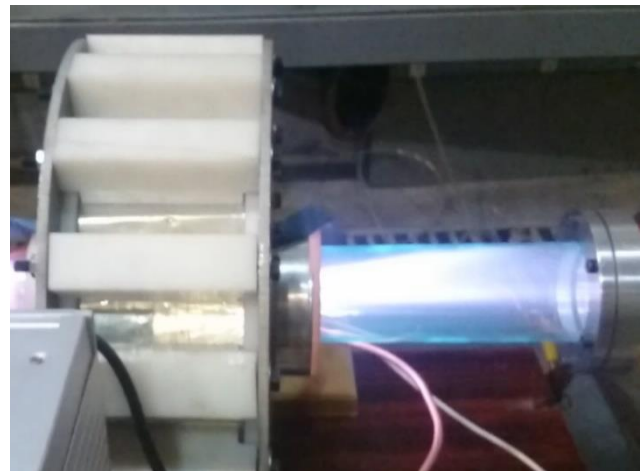
ولتاژ کاری شش کیلو ولت با جریان ده میلی آمپر همینطور در ولتاژ کاری دوازده کیلو ولت با جریان‌های ده میلی آمپر و بیست میلی آمپر می‌باشد. ضریب تقویت جریان در این سه مورد به ترتیب ۲۱، ۱۳.۵ و ۱۸.۵ محاسبه گردید. همچنین با افزایش ولتاژ از شش به دوازده کیلو ولت پهنای زمانی از صد و ده به نود میلی ثانیه کاهش یافت.

شکل‌های (۲) و (۳) نتایج تجربی اعمال میدان مغناطیسی ۱.۸ تسلا بر خصوصیات جریان تخلیه در رژیم کاری فشار پایین با کمک چشمه پلاسمایی کوپل القایی در فشار $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ را نشان می‌دهند. نتایج برای ولتاژ کاری بیست کیلو ولت با جریان سه میلی آمپر و ولتاژ سی کیلو ولت و جریان یک میلی آمپر می‌باشند. ضریب تقویت جریان با افزایش ولتاژ از بیست به سی کیلو ولت به ترتیب از نود و پنج به صد و ده افزایش نشان داد. همچنین پهنای زمانی از نود میلی ثانیه به هشتاد میلی ثانیه کاهش یافت.



شکل (۲). تقویت جریان برای ولتاژ کاری بیست کیلو ولت با جریان کاتد سه میلی آمپر با اعمال میدان مغناطیسی ۱/۸ تسلا در فشار $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ ضریب تقویت جریان نود و پنج

قابل اندازه گیری است و مولفه قطبی جریان تخلیه که ناشی از میدان مغناطیسی است $(J_{\theta} = -\sigma_H E_r)$ به راحتی قابل اندازه‌گیری و مشاهده نیست. از آنجایی که سهم مهمی از تولید نوترون در این نوع دستگاه‌ها ناشی از برخوردهای باریکه با گاز زمینه است لذا با اعمال میدان مغناطیسی افزایش سهم جریان در جهت زاویه قطبی (J_{θ}) سهم مهم‌تری را در تولید نوترون خواهد داشت.



شکل (۱). افزایش جریان تخلیه دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی قوی ۱.۸ تسلا در فشار $5.4 \times 10^{-1} \text{ mbar}$

ضریب تقویت جریان را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$\eta = \frac{I_{dc} + I_{rms}}{(I_{rms})_{steady\ state}}$$

که در این رابطه I_{dc} و I_{rms} به ترتیب جریان مستقیم و میانگین مجذوری جریان (RMS) است، قسمت نوسانی جریان درحین اعمال میدان مغناطیسی و $(I_{rms})_{steady\ state}$ جریان موثر و یا همان میانگین مجذور جریان در حالت قبل از اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد که توسط صفحه نمایش منبع تغذیه خوانده می‌شود.

اشکال (۲) و (۳) به ترتیب نتایج تجربی اعمال میدان مغناطیسی محوری به شدت ۱/۸ تسلا بر خصوصیات جریان تخلیه در فشارهای کاری معمولی دستگاه در حدود $5.4 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ و در

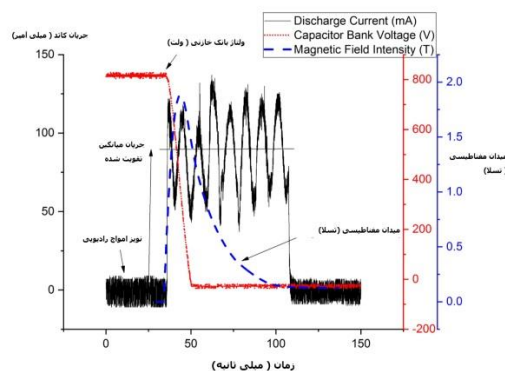
شکل (۴) پیش بینی و مقایسه رشد نرخ تولید نوترون در جریان های بالا نسبت به نرخ تولید نوترون اندازه گیری شده در شرایط عدم وجود میدان مغناطیسی در ولتاژهای سی و چهل کیلو ولت

نتیجه گیری

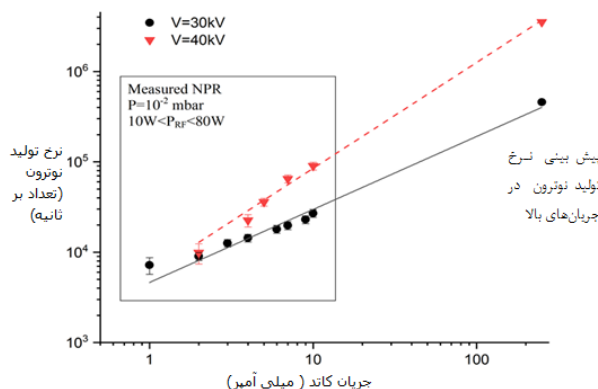
در این آزمایشات افزایش بهره برهمکنش های گداخت هسته ای $D(d, n)^3He$ در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی با اعمال میدان مغناطیسی دو تسلا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این آزمایش ها نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی قوی با شدت یک تا دو تسلا قادر است تا جریان کاتد را تا صدو ده برابر نسبت به جریان پایدار افزایش دهد. با افزایش ولتاژ کاری در رژیم کاری کم فشار و با کمک چشمه پلاسمایی کوپل القایی ضریب تقویت جریان از مقادیر سیزده و نیم و هجده و نیم که در فشارهای عادی اندازه گیری شد تا مقدار صد و ده افزایش نشان داد. این درحالی است که در رژیم فشاری عادی ضریب تقویت جریان با افزایش ولتاژ کمی کاهش نشان می دهد. اگر چه این افزایش جریان اندازه گیری شده مربوط به سهم چگالی جریان در راستای شعاعی J_r است ولی در واقع مولفه قطبی چگالی جریان تخلیه با اعمال میدان مغناطیسی محوری رشد بسیار بیشتری خواهد داشت. از طرفی، با در نظر گرفتن اینکه نرخ تولید نوترون با جریان نسبت تقریباً خطی دارد و این موضوع به طور تجربی در آزمایش ها به اثبات رسید لذا می توان استدلال کرد با اعمال میدان مغناطیسی قوی می توان نرخ تولید نوترون در دستگاه محصورسازی الکترواستاتیکی در هندسه استوانه ای را بیش از یک مرتبه بزرگی یعنی چند ده برابر افزایش داد.

مرجع ها

[۱] Wang, J. J., Choi, K. S., Feng, L. H., Jukes, T. N., & Whalley, R. D. (2013). Recent developments in DBD plasma flow control. *Progress in Aerospace Sciences*, 62, 52-78.



شکل (۳). تقویت جریان برای ولتاژ کاری سی کیلو ولت با جریان کاتد یک میلی آمپر با اعمال میدان مغناطیسی ۱/۸ تسلا در فشار $1 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ ضریب تقویت جریان صد و ده مقایسه نرخ تولید نوترون اندازه گیری شده بدون اعمال میدان مغناطیسی و پیش بینی افزایش آن در حالت اعمال میدان مغناطیسی با افزایش جریان کاتد در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که در قبلاً نیز اشاره گردید نرخ تولید نوترون با جریان کاتد رابطه عملاً خطی دارد. چنانکه در نمودار (۴) ملاحظه می شود؛ با افزایش ولتاژ کاتد، شیب افزایش جریان و به تبع آن شیب افزایش نرخ تولید نوترون افزایش می یابد. همانطور که در نمودار شکل (۴) مشخص است با اعمال میدان مغناطیسی قوی و افزایش جریان کاتد تا دویست و پنجاه میلی آمپر (ضریب تقویت جریان متوسط در حدود چهل) نرخ تولید نوترون افزایشی بیشتر از یک مرتبه بزرگی یعنی رشدی بیشتر از ده برابر را نشان می دهد.



[۲] Chen, F. F. (1984). *Introduction to plasma physics and controlled fusion* (Vol. 1, pp. 19-51). New York: Plenum press.

[۳] A. Asle Zaeem et al “Discharge current enhancement in inertial electrostatic confinement fusion by impulse high magnetic field” *Vacuum* 166 (2019).

[۴] A. Asle Zaeem et al “Development of an efficient pulsed magnet for improvement of inertial electrostatic confinement fusion” *journal of instrumentation* (2019).

[۵] Umran.S Inan and Marek Golkowski “principles of plasma physics for engineers and scientist” chapter seven, Cambridge university press (2011).