



طراحی و ساخت پروب لانگمویر سه تایی برای اندازه گیری پارامترهای پلاسمای توکامک تابان

رستمی فرد، داریوش - میرزایی، حمیدرضا - امراللهی، رضا - محسنی، ملیکا - کاظمی، مسلم* ایرجی، داود - اسد نژاد، رضا - قاسمی، مریم

دانشگاه امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

در مرحله راه اندازی توکامک تابان، اندازه گیری لحظه ای پارامترهای پلاسمای اهمیت ویژه ای دارد. برای اندازه گیری پارامترهای پلاسمای توکامک از قبیل دما و چگالی الکترون، پروب لانگمویر سه تایی طراحی و ساخته شد. نتایج اولیه بدست آمده با این پروب امکان بهینه سازی شرایط راه اندازی توکامک را فراهم می نماید. پلاسمای از طریق تزریق موج مایکروویو به داخل محفظه و اعمال میدان چنبره ای در حدود ۰.۱ تسلا ایجاد می شود. نتایج بدست آمده برای فشارهای مختلف بیانگر این موضوع می باشد که با افزایش فشار داخل محفظه دمای الکترون افزایش و چگالی پلاسمای کاهش پیدا می کند و همچنین میزان نوسانات این پارامترها بر حسب فشار گاز بررسی گردید. کلمات کلیدی: پروب لانگمویر سه تایی، توکامک، پلاسمای

Design and construction of Triple Langmuir Prob diagnostic system for measuring the plasma parameters in Taban tokamak

Rostamifard, dariush; Mirzaei, Hamidreza; Amrollahi, Reza; Mohseni, Melika; Kazemi, Moslem*; Iraj, davoud, Asadnezhad, Reza; Ghasemi, Maryam

Amirkabir University of technology, energy engineering and physics

Abstract:

The simultaneous measurements of plasma parameters have a special significance in Taban tokamak startup phase. For measuring the plasma parameters of tokamak such as temperature and electron density, the design and construction of triple Langmuir probe diagnostic system are carried out. The optimized tokamak startup conditions are provided by investigation of initial obtained results via constructed probe. Plasma has been generated by injection of microwave into a chamber with the existence of the magnetic field around 0.1T. The experimental results for different pressures have been reported and evaluated that show the increase of the pressure inside the chamber leads to decrease of the temperature and increase of the plasma density. As well as the fluctuations of these parameters have been investigated in this condition.

Keywords: Triple Langmuir probe, tokamak, Plasma



مقدمه:

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما و مطالعه رفتار آن مورد استفاده قرار می‌گیرد که به منظور اندازه‌گیری دما و چگالی الکترون‌ها دو روش بسیار متداول و دقیق روش تداخل‌سنجی میکروویو و پراکندگی تامسون هستند. ابزارهای تشخیصی به مانند پروب‌های لانگمویر ضمن کاهش هزینه‌ها از طراحی و ساخت ساده‌تری برخوردار می‌باشند. که از معایب استفاده از آنها تماس مستقیم آنها با پلاسما می‌باشد.

از این پروب در اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما در سیستم‌های آزمایشی خطی و سیستم‌های چنبره‌ای، ماشین‌های گداخت از جمله توکامک‌ها استفاده می‌شود. همچنین رفتارهای دینامیکی پلاسما از جمله اغتشاش، نیز در توکامک‌ها توسط این پروب مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱-۳].

پروب لانگمویر در سه آرایش تکی، دوتایی و سه‌تایی ساخته می‌شود که آرایش تکی و دوتایی آن در اندازه‌گیری پارامترهای لبه پلاسما توکامک از جمله دما و چگالی پلاسما بسیار موثر و پرکاربرد می‌باشد. به بیان ساده عملکرد این پروب شامل قرارگیری یک الکتروود فلزی در پلاسما و جمع جریان الکترون‌های رسیده به آن متناسب با ولتاژ بایاس پروب می‌باشد که با رسم و تحلیل نمودار مشخصه جریان ولتاژ نهایتاً منجر به حصول پارامترهای پلاسما خواهد شد. وابستگی این روش اندازه‌گیری به تغییر ولتاژ بایاس پروب در دستیابی به مقدار لحظه‌ای پارامترها و تغییرات زمانی آنها محدودیت ایجاد می‌کند. پروب لانگمویر سه‌تایی با قرارگیری سه پروب در پلاسما و دستیابی همزمان به سه نقطه از نمودار مشخصه جریان ولتاژ، ضمن مرتفع نمودن محدودیت اشاره شده، نویزهای حاصل از امواج رادیوفرکانسی و خطای ناشی از میدان‌های مغناطیسی کوچک را تا حد امکان تقلیل می‌دهد.

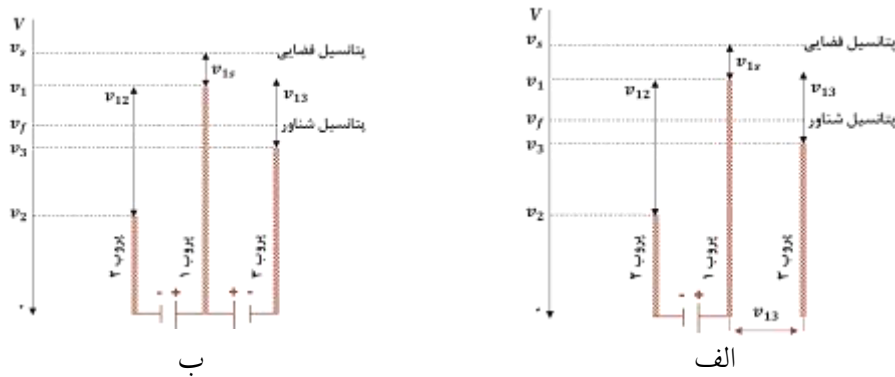
در این مقاله با استفاده از پروب لانگمویر سه‌تایی پارامترهای پلاسما توکامک تابان در مرحله راه‌اندازی اندازه‌گیری و مطالعه و تحلیلی بر این اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است. لذا در بخش بعدی چگونگی طراحی و ساخت این پروب برای کارکرد مناسب بررسی گردیده است. در ادامه در بخش سوم ضمن معرفی مختصری از توکامک تابان [۴] نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده ارائه گردیده و مورد تحلیل قرار گرفته است. و در آخر نتایج حاصل از انجام مطالعه پیش‌رو ارائه شده است.

طراحی و ساخت پروب :

پروب لانگمویر سه‌تایی شامل سه الکتروود فلزی هم‌شکل و هم‌اندازه بوده که لازم است حداقل فاصله الکتروودها به قدری باشد تا غلاف تشکیل شده اطراف آنها، با یکدیگر هم‌پوشانی نداشته باشد و همچنین این فاصله به اندازه‌ای زیاد نباشد که الکتروودها شرایط متفاوتی از پلاسما را احساس کنند. اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما توسط این پروب در دو مد جریان و



ولتاژ صورت گرفته که نمودار شماتیک مدار اتصالات هریک در شکل شکل ۱ نشان داده شده است. مد ولتاژ با در نظر گرفتن تقریب $kT_e \ll ev_{13}$ و ساده سازی روابط محاسبه پارامترهای پلاسما ($I_3(t) = 0$) امکان دسترسی مستقیم به دما و چگالی پلاسما را فراهم آورده و مورد توجه بیشتری قرار دارد. در این مطالعه از مد ولتاژ در اندازه گیری‌ها به کمک روابط معادله 1 و معادله 2 استفاده شده است.



شکل ۱. طرح شماتیک مدار پروب لانگمویر سه تایی (الف) مد ولتاژ (ب) مد جریان.

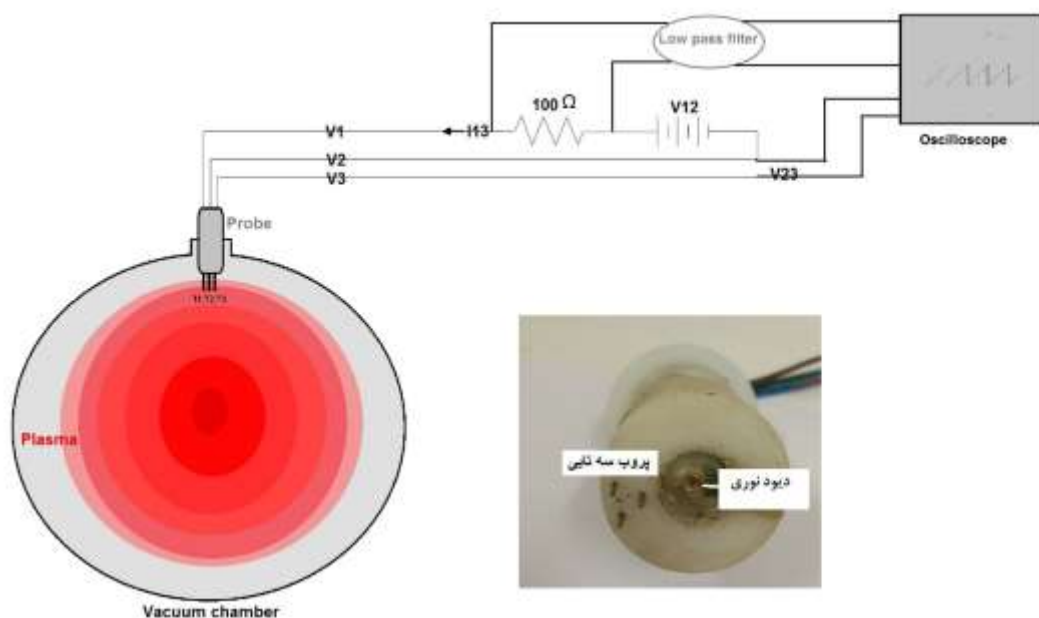
$$kT_e = \frac{v_{12}}{\ln 2} \cong \frac{v_+ - v_f}{0.7} \quad \text{معادله 1}$$

$$n_e = \frac{I_1}{\exp\left(-\frac{1}{2}\right) A_1 e \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}} \quad \text{معادله 2}$$

متداولترین اندازه برای قطر الکترودهای در معرض پلاسما، محدوده ۰٫۱ تا ۱ میلی متر است که در حضور امواج الکترومغناطیسی، جهت کاهش نویزهای حاصل از انعکاس امواج از نوک الکترودها، این مقدار تا حد امکان کوچک انتخاب می گردد. مطابق تئوری پروب لانگمویر در پلاسماهای فشار پایین، $3\lambda_D \leq d_p \leq 16\lambda_D$ و $l \gg r_p \gg \lambda_D$ و تخمین طول دبای چشمه پلاسمای سیکلوترونی الکترون (ECR)، الکترودها با قطر ۰٫۵ و طول ۸ میلیمتر، مورد استفاده قرار گرفته است.

در این مطالعه پروب طراحی شده دارای ۳ عدد الکترودها بوده که از آنها در آرایش سه تایی مورد استفاده قرار گرفته شده است. جهت حفظ تساوی فاصله الکترودها از یکدیگر در آرایش مثلثی مطابق شکل 2 و با فاصله ۶ میلی متری نسبت به

یکدیگر قرار گرفته‌اند. پروبها با استفاده از سیم‌های کواکسیال نقره‌ای به قطر ۰,۳ میلی‌متر از طریق فیدترو خلا به مدار اتصالات خارجی متصل گردیده‌اند. رویه سیم‌های کواکسیال با وارنیش و توری‌های آلومینیومی پوشانده شده تا از انعکاس امواج و ایجاد ناخالصی‌های حاصل از سوختن، جلوگیری گردد. پروب لانگمویر سه تایی از طریق پورت DN25 در موقعیت بالای محفظه نصب شده است به طوری که فقط سر پروب در لبه داخلی چنبره و در تماس با لایه بیرونی پلاسما قرار دارد و بدنه تفلونی پروب در دهانه پورت پوشیده شده است.



شکل 2. طرح شماتیک پروب لانگمویر و تصویر نمونه ساخته شده پروب لانگمویر سه تایی

توکامک تابان

توکامک تابان شامل محفظه‌ای چنبره‌ای شکل از جنس استیل ضد زنگ با ضخامت ۳ میلیمتر در ۴ بخش ۹۰ درجه ای می‌باشد که به شکل مناسبی با استفاده از ارینگ (Viton O-rings) به هم متصل شده‌اند. این اتصال به نحوی صورت گرفته است که فراهم نمودن شرایط خلأ به بهترین شکل حاصل گردد. سطح مقطع این چنبره دایره‌ای شکل با شعاع اصلی ۴۵ و شعاع فرعی ۱۵ سانتیمتر می‌باشد. با توجه به ساختار ذکر شده حجم چنبره ۲۰۰ لیتر می‌باشد. بر روی این محفظه به منظور اتصال سیستم‌های اندازه‌گیری، تزریق گاز، خلأ و یا سایر تجهیزات جانبی، ۴ پورت در بالا و ۲ پورت در پایین تعبیه شده است.

جدول ۱. مشخصات کلی توکامک تابان.

میدان مغناطیسی در مرکز چنبره (تسلا)	
۰,۷	
۰,۴۵	شعاع اصلی (متر)
۰,۱۵	شعاع فرعی (متر)
۳	ضریب منظر
۳	فاکتور ایمنی در لبه پلاسما
۳۰	بیشینه جریان (کیلوآمپر)

این محفظه با استفاده از سیستم خلأ که شامل ترکیب سری پمپ روتاری مدل DS602 و پمپ توربو مولوکولار مدل TURBOVAC 361 می‌باشد تا فشار پایه 10^{-6} تور می‌رسد. دستیابی به چنین شرایط خلأ مناسب، علاوه بر سیستم خلأ ذکر شده در نتیجه تأثیرگذاری فرایندهای کمکی دیگر از قبیل الکتروپولیش سطح محفظه، عایق بندی مناسب، شستشوی مناسب و پاکسازی محفظه از طریق تخلیه می‌باشد. توکامک تابان به همراه سیستم پیش یونش مگنترون در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات کلی توکامک تابان در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳. توکامک تابان به همراه سیستم پیش یونش مگنترون

پلاسمای ECR که در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، از طریق برخورد امواج میکروویو تولید شده توسط مگنترون ۲,۴۵ GHz با توان ۸۰۰ وات و میدان مغناطیسی ۸۷۵ گوس در مرکز چنبره تولید شده است. ذرات باردار پلاسما تحت تأثیر نیروی لورنتس حاصل از میدان مغناطیسی B ، حرکت‌های چرخشی رو به جلو با فرکانس سیکلوترونی ω_{ce} خواهند داشت. ورود امواج الکترومغناطیسی با فرکانس f_{rf} به فضای پلاسما و برخورد با ذرات باردار منجر به تشدید آنها در نواحی $(f_{rf} = f_{ce})$ می‌شود. در این ناحیه که جذب ECR نامیده می‌شود، الکترون‌ها با جذب انرژی امواج



الکترومغناطیس شتابدار شده و برخوردهای بیشتری با ذرات خنثی داخل محفظه پلازما انجام می‌دهند. در صورت کافی بودن سطح مقطع برخورد و مقدار انرژی الکترون برخوردکننده، انتقال انرژی الکترون‌های آزاد به ذرات خنثی، منجر به جداسدن الکترون و الانس اتم خنثی و یونیزاسیون آن می‌گردد. همچنین افزایش چگالی الکترون‌ها و در نتیجه افزایش فرکانس پلازما سبب تشکیل لایه جذب دیگری به نام هیبرید بالا در نواحی $f_{ce} < f_{ff}$ خواهد شد.

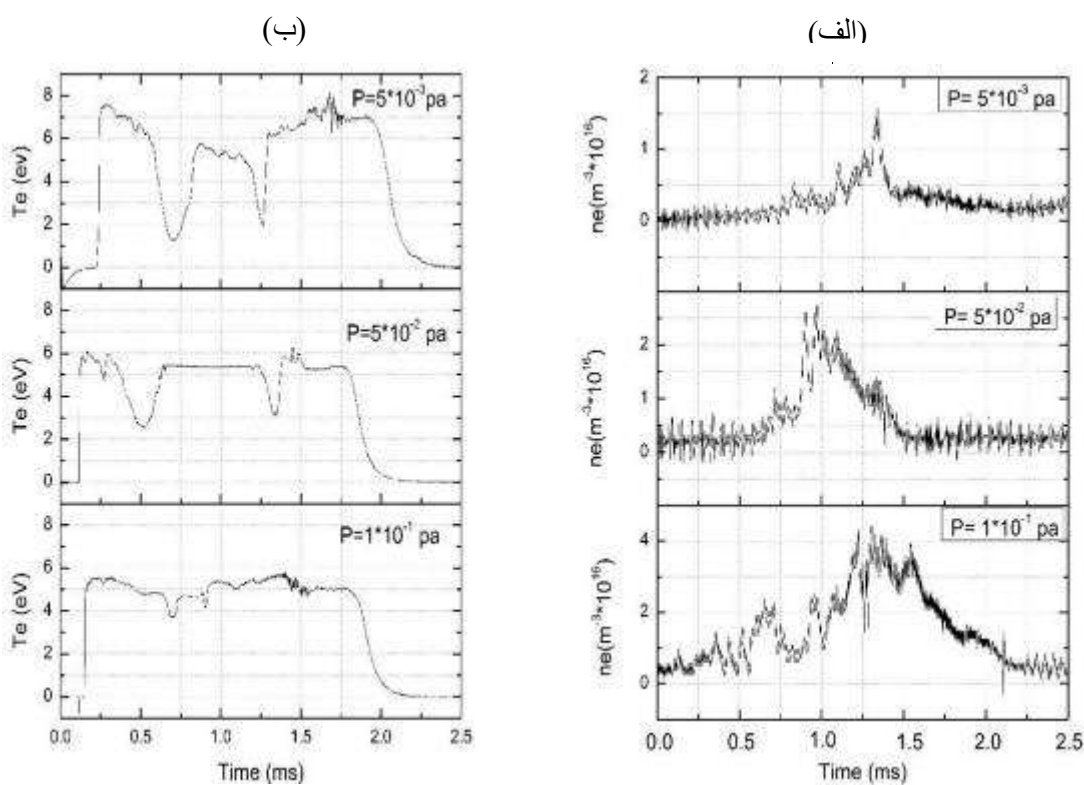
نتایج:

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد در تخلیه‌های سریع و در مواردی که تغییرات زمانی پارامترهای پلازما مورد بحث می‌باشد، پروب لانگمویر سه تایی جایگزین پروب تکی و دوتایی خواهد شد. که با در نظر گرفتن مدولتاژ در محاسبه پارامترها، می‌توان گفت پارامترهای اصلی مشخصه پلازما از جمله دما و چگالی مستقیماً وابسته به جریان عبوری از پروب‌ها و اختلاف پتانسیل فی مابین آنها می‌باشد.

در این مقاله نتایج اندازه‌گیری این پارامترها در برای فشارهای مختلف گاز آرگون گردآوری شده است و آزمایشات در سیستم محصور سازی مغناطیسی تابان و مد چنبره ساده مغناطیسی انجام شده است. برای اندازه‌گیری پارامترهای پلازما توکامک تابان به دلیل تغییرات سریع پارامترها استفاده از پروب لانگمویر تکی و دوتایی امکان پذیر نبود بنابراین پروب لانگمویر سه تایی برای این منظور ساخته شد. دمای الکترونی یک پارامتر مهم پلازما می‌باشد که از طریق برخورد عامل تولید گونه‌های فعال می‌باشد همچنین نرخ فرآیندهای واکنش گازها توسط دمای الکترون تعیین می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری لحظه‌ای دمای الکترون برای بررسی فرآیندهای یونیزاسیون ناشی از برخورد الکترون نیاز اساسی می‌باشد. اثر فشار گاز کاری بر روی دمای الکترون در شکل ۴ نشان داده شده است.

ناحیه جذب لایه ECR از طرف HFS (ناحیه با میدان مغناطیسی بالا) چنبره شروع به حرکت کرده و به سمت LFS (ناحیه با میدان مغناطیسی کم) جابجا می‌شود، از طرفی پروب سه تایی به دلیل اینکه دما و چگالی لایه بیرونی پلازما را اندازه‌گیری می‌کند و در لحظات اولیه تشکیل پلازما در قسمت HFS که میزان چگالی که پروب اندازه‌گیری می‌کند (به دلیل موقعیت مکانی پروب) ناچیز می‌باشد ولی الکترون‌های که در قسمت LFS حرکت می‌کنند بدلیل این چگالی کم سرعت حرکت بیشتر دارند و در این مدت زمان دمای الکترون‌ها توسط پروب قابل اندازه‌گیری هستند. در طول زمان میدان مغناطیسی به همراه لایه ECR از ناحیه HFS به LFS حرکت می‌کند که در زمان‌هایی تقریباً ۱ میلی ثانیه این ناحیه به لایه بیرونی چنبره می‌رسد.

به وضوح مشخص می‌باشد که دمای الکترون در فشارهای بالا مقدار کمتری دارد. این کاهش انرژی جنبشی در فشارهای بالا می‌تواند ناشی از انتقال انرژی برخوردی الکترون‌ها به سایر گونه‌ها باشد. همچنین پروفایل زمانی دمای الکترون در فشارهای پایین دارای نوسانات بیشتری نسبت به فشارهای بالا دارد. این پدیده نیز می‌تواند به پاسخ آنی الکترون‌ها در فرآیند برخورد وابسته باشد به طوری که این فرآیند سبب رشد الکترون‌های با انرژی بالا می‌شود و سبب ایجاد جریان الکترون‌های فراری می‌شود.



شکل ۴. پروفایل چگالی (الف) و دمای (ب) اندازه‌گیری شده توسط پروب لانگمیر سه تایی در فشارهای مختلف.

همچنین این نتایج حاکی از آنست که با افزایش فشار کاری داخل محفظه، چگالی پلاسما افزایش می‌یابد زیرا با افزایش فشار کاری داخل محفظه، به دلیل افزایش تعداد ذرات خنثی موجود در آن، تعداد برخوردها بیشتر شده، در نتیجه یونیزاسیون بیشتری انجام شده و چگالی الکترون‌های داخل محفظه افزایش می‌یابد.



مراجع:

- [۱] C. Riccardi, G. Longoni, G. Chiodini, and M. Fontanesi, "Comparison between fast-sweep Langmuir probe and triple probe for fluctuations measurements," *Review of scientific instruments*, vol. 72, no. 1, pp. 461-464, 2001.
- [۲] S. L. Chen and T. Sekiguchi, "Instantaneous direct-display system of plasma parameters by means of triple probe," *Journal of Applied Physics*, vol. 36, no. 8, pp. 2363-2375, 1965.
- [۳] T. K. Popov, P. Ivanova, M. Dimitrova, J. Kovačič, T. Gyergyek, and M. Čerček, "Langmuir probe measurements of the electron energy distribution function in magnetized gas discharge plasmas," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 21, no. 2, p. 025004, 2012.
- [۴] H. Mirzaei and R. Amrollahi, "Design, simulation and construction of the Taban tokamak," *Plasma Science and Technology*, vol. 20, no. 4, p. 045103, 2018.