



## طراحی و ساخت سامانه پروب لانگمویر برای تعیین پارامترهای تخلیه درخشان جهت آماده‌سازی محفظه خلأ در توکامک دماوند

فریدالدین صدیقی<sup>۱</sup>، اردوان کوهی<sup>۱\*</sup>، چا پار رسولی<sup>۱</sup>، داود ایرجی<sup>۲</sup>، حسین رسولی<sup>۱</sup>

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

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

\*Email: akouhi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۷

### چکیده

در این مقاله پارامترهای پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن با استفاده از سامانه پروب لانگمویر اندازه‌گیری گردید. بدین منظور برای اندازه‌گیری این پارامترها در توکامک دماوند، قسمت‌های مختلف پروب لانگمویر طراحی و ساخته شد. الکتروود مورد استفاده در این سامانه یک مفتول از جنس تنگستن با قطر و طول به ترتیب ۰/۱ و ۶ میلی‌متر است. مدار الکتریکی طراحی شده برای این سامانه قادر است تا ولتاژ و جریان به ترتیب ۴۰۰ ولت و ۱ آمپر را تأمین نماید و می‌تواند پالس‌های مثلثی در بازه فرکانسی ۱۰ هرتز الی ۱۰ کیلوهرتز را تولید نماید. پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن به منظور پاک‌سازی محفظه خلأ، به وسیله دو الکتروود که در قسمت تحتانی توکامک دماوند وجود دارد، در ولتاژ ۴۵۰ ولت، جریان ۱/۵ آمپر و فشار  $10^{-3}$  تور تولید می‌گردد. با اعمال ولتاژ به الکتروود پروب در بازه ۲۰۰ الی ۳۵۰ ولت، جریان عبوری از پروب اندازه‌گیری و با تحلیل مشخصه جریان-ولتاژ، پارامترهای پلاسما مشخص می‌شود. دمای الکترونی، چگالی پلاسما، پتانسیل پلاسما و طول دمای پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن که با استفاده از این سامانه اندازه‌گیری شده است به ترتیب برابر با ۵/۸ الکترون‌ولت،  $1.17 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$  بر متر مکعب، ۲۳۶ ولت و ۵۲۳ میکرومتر می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** تخلیه درخشان، توکامک، پروب لانگمویر، دمای الکترونی، چگالی پلاسما

## Design and fabrication of Langmuir probe system for determination of glow discharge parameters for vacuum vessel conditioning of Damavand tokamak

F. Sedighi<sup>1</sup>, A. Koohi<sup>1\*</sup>, Ch. Rasouli<sup>1</sup>, D. Iraji<sup>2</sup>, H. Rasouli<sup>1</sup>

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, 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 15.11.2020, Accepted 27.11.2020

### Abstract

In this paper, the plasma parameters of hydrogen glow discharge were measured using Langmuir probe system. To measure these parameters in Damavand tokamak, different parts of the Langmuir probe were designed and fabricated. The electrode used in this system is a tungsten wire with diameter and length of 0.1 and 6 mm, respectively. The electrical circuit constructed for this system is capable of supplying voltage and current in the order of 400 V and 1 A, and can produce triangular pulses in the frequency range of 10 Hz to 10 kHz, respectively. Glow discharge hydrogen plasma, which is used for vacuum vessel cleaning and conditioning, is produced by two electrodes located in the lower part of the Damavand tokamak with the voltage of 450 V, current of 1.5 A and pressure of  $10^{-3}$  Torr. By applying voltage to the electrode of probe, in the range of 200 to 350 V, the current drawn from the probe was measured. By interpreting the current-voltage characteristic, the plasma parameters were determined. The electron temperature, plasma density, plasma potential, and Debye length of the hydrogen glow discharge measured using this system are 5.8e V,  $1.17 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ , 236 V and 523  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Keywords:** Glow Discharge, Tokamak, Langmuir Probe, Electron Temperature, Plasma Density



## ۱. مقدمه

پارامترهای پلاسما وجود داشته باشد. لذا وجود یک ابزار تشخیصی معتبر که در حین فرایند تخلیه درخشان بتواند پارامترهای پلاسما را اندازه‌گیری نماید، ضروری است. یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین ابزارهای تشخیصی برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما در رژیم تخلیه درخشان پروب‌های لانگمویر می‌باشد [۶-۸]. از طرف دیگر، پروب‌های لانگمویر در دسته اساسی‌ترین ابزار برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما لبه در دستگاه‌های محصورسازی مغناطیسی می‌باشند. لذا، علاوه بر اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما تخلیه درخشان می‌توان در گام‌های بعدی از این ابزار اندازه‌گیری برای تعیین پارامترهای پلاسما لبه در زمان محصورسازی مغناطیسی در توکامک دماوند نیز استفاده نمود. علاوه بر این، در طراحی اولیه توکامک دماوند یک پایه نگهدارنده برای اتصال سامانه پروب لانگمویر به داخل توکامک نیز تعبیه گردیده است. لذا این دلایل سبب گردید تا یک سامانه پروب لانگمویر برای توکامک دماوند طراحی و ساخته شود تا بتواند در مرحله اول پارامترهای پلاسما تخلیه درخشان را اندازه‌گیری کند و در گام‌های بعدی قادر به اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما لبه در زمان محصورسازی مغناطیسی باشد. لازم به توضیح است تاکنون در داخل کشور فعالیت‌های ارزشمندی در جهت بررسی مشخصات پلاسما با استفاده از این روش انجام گردیده است که در این بین می‌توان به فعالیت‌های ذیل اشاره نمود. در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، به‌وسیله ردیاب لانگمویر، دمای الکترونی و چگالی پلاسما تولید شده در میدان لیزر در مقیاس نانوثانه تا فاصله‌های از مرتبه سانتی‌متر مورد مطالعه قرار گرفت [۹]. هم‌چنین پروب‌های لانگمویر تکی و دوگانه برای اندازه‌گیری مشخصات پلاسما در توکامک البرز واقع در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، طراحی و ساخته شده‌اند [۱۰-۱۵].

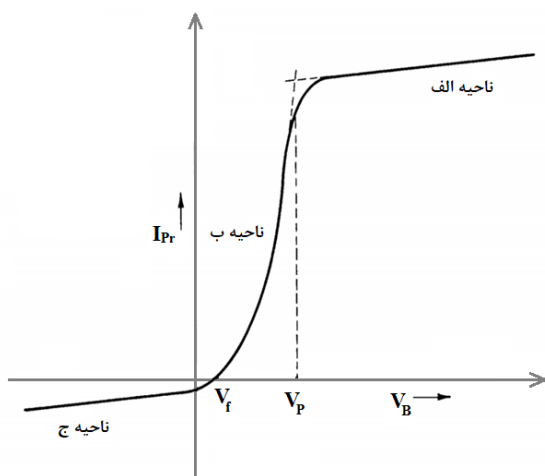
در این مقاله در ابتدا به شرح اصول اساسی اندازه‌گیری پارامترهای پلاسما با استفاده از پروب لانگمویر پرداخته می‌شود و در ادامه طراحی و ساخت قسمت‌های اصلی پروب لانگمویر به‌منظور استفاده در توکامک دماوند شرح داده می‌شود و در انتها، پارامترهای تعیین‌شده پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن توسط این پروب ارائه می‌گردد.

دستیابی به پلاسما با کیفیت از مهم‌ترین مسایل در توکامک‌ها می‌باشد. مسایل مختلفی سبب می‌شوند تا کیفیت پلاسما در طول زمان کاهش پیدا کند که در این بین برهم‌کنش پلاسما با دیواره نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کند. برخورد یون‌های پر انرژی با دیواره محفظه سبب می‌شود تا اتم‌های دیواره کنده شده و به داخل محفظه وارد شوند. از آن جا که جنس مواد به‌کار رفته در دیواره توکامک‌ها بیش‌تر از عناصر سنگین هم‌چون تنگستن، مولیبدن و استیل تشکیل می‌شود، برهم‌کنش این مواد با یون‌های پر انرژی پلاسما و سپس ورود آن‌ها به داخل پلاسما به‌شدت موجب سرد شدن و در نهایت از دست رفتن پلاسما می‌شود. علاوه بر این، برهم‌کنش پلاسما با دیواره سبب گیراندازی یون‌های پلاسما درون دیواره می‌گردد. این اتم‌ها در طول زمان دوباره از دیواره جدا می‌شوند و وارد محیط پلاسما می‌شوند که این موضوع خود نیز سبب کاهش کیفیت پلاسما و اختلال در کنترل میزان چگالی پلاسما می‌گردد. از طرفی دیگر، زمانی که توکامک در فاز استراحت می‌باشد و محفظه خلأ در تماس مستقیم با هوای محیط قرار می‌گیرد، تعدادی از اتم‌های موجود در هوای اطراف جذب سطح داخلی توکامک می‌گردد که این موضوع سبب می‌شود تا ناخالصی‌هایی از قبیل کربن و اکسیژن در زمان تشکیل پلاسما به محیط پلاسما وارد شده و سبب کاهش کیفیت، تغییر چگالی و سرد شدن پلاسما شوند. بدین منظور، آماده‌سازی دیواره نقشی کلیدی و پراهمیت در کاهش میزان ناخالصی‌ها و بهبود کیفیت پلاسما در توکامک‌ها دارد. در طول زمان، روش‌های مختلفی برای آماده‌سازی دیواره در توکامک‌ها پیشنهاد شده که رایج‌ترین و مؤثرترین آن‌ها پاک‌سازی با تخلیه درخشان می‌باشد [۱-۵].

تخلیه درخشان، نوعی از پلاسما است که با عبور جریان الکتریکی از یک گاز تشکیل می‌گردد. این رژیم پلاسما، معمولاً با اعمال ولتاژ بین دو الکترود در یک محفظه خلأ ایجاد می‌شود. استفاده از رژیم تخلیه درخشان در توکامک‌ها بسیار متداول می‌باشد و از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به آماده‌سازی دیواره با استفاده از روش پاک‌سازی تخلیه درخشان اشاره نمود. اجرای مؤثر و بهینه فرایند پاک‌سازی با تخلیه درخشان زمانی حاصل می‌گردد که شناخت خوب و درستی از

## ۲. پروب لانگمویر

گردیده است. لازم به توضیح است که دلیل تفاوت میزان دو کمیت  $V_f$  و  $V_p$  در یک پلاسمای معمولی (که ذرات باردار مثبت آن را یون‌ها و ذرات باردار منفی را الکترون‌ها تشکیل می‌دهند)، جرم کم‌تر الکترون‌ها نسبت به یون‌ها می‌باشد؛ در چنین پلاسمایی، الکترون‌ها (به دلیل جرم کم‌ترشان) دارای سرعت گرمایی بیش‌تری نسبت به یون‌ها هستند. اگر چه یک پلازما از لحاظ الکتریکی خنثی است و چگالی یون‌ها و الکترون‌ها نزدیک به هم می‌باشد، ولی الکترون‌ها به دلیل این‌که سبک‌تر هستند، زودتر از یون‌ها به پروب می‌رسند. از آن‌جا که در پتانسیل شناوری  $V_f$  هیچ جریان خالصی از پروب عبور نمی‌کند، پتانسیل شناوری  $V_f$  باید نسبت به پتانسیل پلازما  $V_p$  کم‌تر (منفی‌تر) باشد تا سبب دفع الکترون‌ها و جذب یون‌ها گردد. جالب توجه است که در پلاسماهایی که جرم ذرات باردار مثبت و منفی با یکدیگر برابر است (مانند پلاسماهای تشکیل‌شده از الکترون و پوزیترون) مقدار دو کمیت  $V_f$  و  $V_p$  نیز دقیقاً با یکدیگر برابر هستند. نحوه یافتن دو کمیت  $V_f$  و  $V_p$  در یک پلاسمای معمولی با استفاده از پروب لانگمویر امکان پذیر است؛ کمیت  $V_f$  در نقطه‌ای که مشخصه جریان-ولتاژ، محور افقی را قطع می‌کند (در پتانسیلی که جریان صفر آمپر از آن عبور می‌کند) به راحتی مشخص می‌گردد. هم‌چنین متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری پتانسیل پلازما  $V_p$  نیز بدین صورت است که باید خطوط راست مماس بر دو ناحیه الف و ب را برون‌یابی نمود. نقطه‌ای که این دو خط راست یکدیگر قطع می‌کنند در راستای محور افقی مشخصه جریان ولتاژ (شکل ۱) دارای یک پتانسیل متناظر است که برابر با پتانسیل پلازما می‌باشد [۱۹].



شکل ۱. مشخصه جریان-ولتاژ پروب لانگمویر.

نظریه پروب لانگمویر در دهه ۲۰ میلادی توسط ایروینگ لانگمویر و همکارانش بیان گردید [۱۶]. اصول عملکرد یک پروب لانگمویر بدین صورت است که با اعمال یک بازه ولتاژ به الکتروود پروب و اندازه‌گیری مقدار جریان الکتریکی عبوری از پروب، یک مشخصه جریان-ولتاژ به دست می‌آید که با تحلیل این مشخصه می‌توان به دما و چگالی پلازما دست یافت [۱۷، ۱۸]. در ادامه به شرح مشخصه جریان-ولتاژ و نحوه اندازه‌گیری پارامترهای پلازما پرداخته می‌شود.

شکل ۱ مشخصه جریان-ولتاژ پروب لانگمویر را نشان می‌دهد. محور افقی برحسب ولتاژ بایاسی است که به پروب اعمال گردیده است و با  $V_B$  نشان داده شده است و محور عمودی برحسب جریان عبوری پروب است که با  $I_{Pr}$  نشان داده شده است. بدیهی است که جریان عبوری پروب همواره نشان‌دهنده مجموع جریان‌های ذرات باردار یونی و الکترونی است. این مشخصه دارای چند نقطه و ناحیه مشخص است که با استفاده از آن‌ها می‌توان از پارامترهای پلازما آگاه شد. زمانی که ولتاژ بایاس نسبت به پتانسیل پلازما به میزان قابل توجهی کم‌تر باشد، به دلیل اینکه یون‌ها اطراف پروب را به طور کامل احاطه می‌کنند، جریان الکتریکی تقریباً به اشباع می‌رود و یک مقدار منفی و تقریباً ثابت را نشان می‌دهد. به این ناحیه، که در شکل ۱ «ناحیه ج» نامیده شده است، ناحیه اشباع یونی گفته می‌شود. با افزایش ولتاژ بایاس، یون‌ها از اطراف پروب دفع می‌گردند. به این ناحیه، که در شکل ۱ «ناحیه ب» نامیده شده است، ناحیه گذار گفته می‌شود. با افزایش ولتاژ بایاس نسبت به پتانسیل پلازما، الکترون‌ها به سمت پروب جذب شده و با افزایش بیش‌تر ولتاژ، به دلیل اینکه الکترون‌ها اطراف پروب را به طور کامل احاطه می‌کنند، جریان الکتریکی مجدد به اشباع می‌رود و یک مقدار مثبت و تقریباً ثابت را نشان می‌دهد. به این ناحیه که در شکل ۱، «ناحیه الف» نامیده شده است، ناحیه اشباع الکترونی گفته می‌شود. هم‌چنین به پتانسیلی که میزان جریان عبوری از پروب در آن پتانسیل، صفر باشد (یعنی میزان جریان الکترونی برابر با میزان جریان یونی باشد) پتانسیل شناوری گفته می‌شود که در شکل ۱ با  $V_f$  نشان داده شده است. یکی دیگر از پارامترهای مهم، «پتانسیل پلازما» است و برابر با میزان پتانسیلی است که پلازما نسبت به دیواره‌های محفظه دارا می‌باشد. این کمیت، در این مقاله با  $V_p$  مشخص

## ۳. طراحی، ساخت و آزمایش

## ۱.۳ طراحی الکترو پروب لانگمویر

ولتاژ بایاس از طریق الکترو پروب به پلاسما اعمال می‌گردد و همچنین جریان ذرات باردار در پلاسما از طریق این الکترو پروب وارد مدار الکتریکی پروب لانگمویر می‌گردد. الکترو پروب لانگمویر باید به گونه‌ای طراحی شود تا بتواند در مقابل محیط بسیار داغ پلاسما از خود مقاومت کافی را نشان دهد. در این بین، مفتول تنگستن، به دلیل دارا بودن بالاترین نقطه ذوب در میان تمام فلزات (۳۶۹۵ درجه کلوین)، پایین بودن نرخ کندوپاش و همچنین ویژگی‌های گرمایی و مکانیکی مناسب، بهترین گزینه برای استفاده به عنوان الکترو پروب لانگمویر است [۲۲-۲۵]. نکته قابل توجه دیگر در طراحی الکترو پروب، محاسبه میزان سطح مقطعی از الکترو پروب می‌باشد که در تماس مستقیم با پلاسما قرار دارد. هر چه میزان سطح مقطع پروب بیشتر باشد، میزان جریان عبوری آن نیز بیشتر است. لذا سطح مقطع پروب باید تا اندازه‌ای بزرگ باشد که منبع تغذیه پروب لانگمویر قادر به تأمین جریان الکتریکی باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، بیشترین حد جریان در زمان اشباع الکترونی رخ می‌دهد، لذا محاسبات باید برای این حالت در نظر گرفته شود تا ابعاد پروب با یک حاشیه امنیتی مناسب، تعیین شود. همچنین به دلیل عبور جریان بالا در ناحیه اشباع الکترونی، الکترو پروب آسیب نبیند و در خطر ذوب‌شدگی نباشد. چگالی و دمای پلاسماهای تخلیه درخشان به ترتیب در بازه  $5 \times 10^{14}$  الی  $5 \times 10^{15}$  بر مترمکعب و ۱ الی ۱۰ الکترون‌ولت می‌باشد [۲۶-۲۹]، که این میزان دما و چگالی به مراتب از دما و چگالی پلاسماهای محصورشده توسط میدان‌های مغناطیسی پایین‌تر می‌باشد و به عبارتی دیگر برای حالتی که پلاسما در رژیم تخلیه درخشان قرار دارد، محدودیت چندانی برای انتخاب سطح مقطع پروب نخواهیم داشت. لذا اگر محاسبات برای پلاسماهای محصورسازی مغناطیسی انجام شود، می‌توان با اطمینان از آن الکترو پروب برای رژیم تخلیه درخشان نیز استفاده کرد. در این حالت، مقدار تقریبی دمای پلاسما لبه توکامک دماوند برابر با ۳۰ الکترون‌ولت و چگالی این ناحیه در حدود  $10^{19}$  بر مترمکعب می‌باشد [۳۰]. با در نظر گرفتن بیشینه جریان ۲ آمپر، باید به محاسبه ابعاد بهینه الکترو پروب پرداخت. برای پروب‌های استوانه‌ای میزان سطح مقطعی که در تماس با پلاسما است ( $A_{probe}$ ) برابر است با:

$$A_{probe} = \pi r^2 + 2\pi r l \quad (5)$$

لذا رابطه شعاع پروب و طول پروب به این صورت به دست می‌آید:

در مشخصه جریان-ولتاژ پروب لانگمویر ناحیه گذار از اهمیت بالاتری برخوردار است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود رابطه جریان و ولتاژ در ناحیه گذار (ناحیه ب) به صورت یک تابع نمایی می‌باشد. این رابطه توسط معادله ۱ بیان می‌گردد [۱، ۱۷، ۱۸، ۲۰، ۲۱]:

$$I_{Pr} = I_{is} (\exp[e(V_B - V_f)/T_e] - 1) \quad (1)$$

که در این رابطه  $I_{is}$  همان میزان جریان اشباع یونی می‌باشد و برابر است با:

$$I_{is} = 0.6 en_i \sqrt{\frac{T_e}{m_i}} A \quad (2)$$

که در این رابطه  $A$ ،  $n_i$  و  $e$  به ترتیب معادل با سطح پروب، میزان چگالی یون، بار الکتریکی و جرم یون می‌باشد. رابطه جریان اشباع الکترونی نیز به این صورت می‌باشد:

$$I_{es} = \frac{1}{4} en_e \sqrt{\frac{\lambda k T_e}{\pi m_e}} A_{probe} \quad (3)$$

آگاهی از کمیت‌های دما و چگالی پلاسما سبب می‌شود تا شناخت بسیار بهتری از پلاسما به دست آید. یکی از کمیت‌های مهم پلاسما که کاملاً وابسته به دما و چگالی می‌باشد طول دمای می‌باشد. طول دمای که بر طبق رابطه (۴) تعریف می‌گردد، به طولی از یک گاز یونیزه گفته می‌شود که اگر طول (یا حجم) گاز یونیزه از آن کم‌تر باشد، آن گاز هیچ‌گاه خصوصیات یک پلاسما را از خود نشان نخواهد داد. آگاهی از اندازه طول دمای در شناخت پدیده‌های میکروسکوپی پلاسما و همچنین بررسی و شناخت برهم‌کنش پلاسما با مواد مواجه با پلاسما از قبیل محدودکننده‌ها، دیواره و همچنین الکترو پروب‌های الکترواستاتیکی بسیار ضروری می‌باشد.

$$\lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K_B T_e}{e n_e}} \quad (4)$$

لازم به توضیح است که در این مقاله، فرض شده که ذرات پلاسما دارای توزیع سرعت ماکسولی می‌باشند و تمامی روابط برای این حالت بیان شده‌اند. با استفاده از معادله‌های ۱ و ۲ می‌توان به دمای الکترونی و چگالی یونی پی برد؛ در ابتدا با توجه به معادله ۱، و رسم منحنی نیمه لگاریتمی جریان پروب بر حسب ولتاژ بایاس پروب، با محاسبه عکس شیب این نمودار می‌توان به دمای الکترونی رسید. در ادامه با توجه به معادله ۲ و اطلاع از میزان دمای الکترونی (که از معادله ۱ به دست می‌آید) می‌توان میزان چگالی یونی را مشخص نمود [۱، ۱۷، ۲۰].



شکل ۵، مدار معادل الکتریکی سامانه پروب لانگمویر را نشان می‌دهد. با استفاده از منبع تغذیه، ولتاژ بایاس به مدار اعمال می‌گردد و با استفاده از ثبت ولتاژ دو سر مقاومت اندازه‌گیری، می‌توان به جریان پلاسما دست یافت. شایان ذکر است که مقاومت الکتریکی بدنه پروب با استفاده از یک میکرو اهم‌متر اندازه‌گیری گردیده است. هم‌چنین باید توجه نمود که با استفاده از این روش، زمانی اندازه‌گیری جریان از صحت و اطمینان برخوردار است که میزان مقاومت الکتریکی پلاسما بسیار بیش‌تر از مجموع مقاومت الکتریکی سایر قسمت‌ها باشد به‌طوری که مقاومت الکتریکی سایر قسمت‌ها بر جریان عبوری مدار الکتریکی تأثیری نگذارد.

### ۳.۳ شرح آزمایش

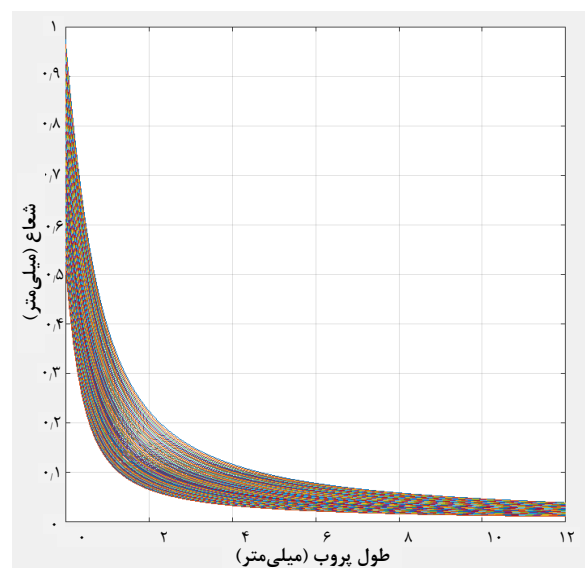
برای اندازه‌گیری مشخصات تخلیه درخشان توکامک دماوند توسط پروب لانگمویر، پس از متصل نمودن پروب به محفظه، با استفاده از پمپ‌های روتاری، فشار محفظه تا حدود  $10^{-3}$  تور کاهش می‌یابد، پس از آن پمپ‌های توربومولکولار وارد مدار می‌گردند و فشار را تا حدود  $10^{-6}$  تور کاهش می‌دهند. پس از آن با تزریق گاز هیدروژن فشار محفظه به  $10^{-3}$  تور می‌رسد. سپس با اعمال ولتاژ شکست به دو الکترودی که در پایین محفظه تعبیه شده‌اند، فرایند یونش ایجاد شده که موجب تشکیل پلاسمای تخلیه درخشان هیدروژن می‌گردد. تخلیه درخشان، در ولتاژ ۴۵۰ ولت و جریان ۱/۵ آمپر صورت می‌گیرد و بسته به هدف، بین ۲/۵ الی ۴ ساعت به طول می‌انجامد. در شکل ۶ فرایند تشکیل پلاسمای تخلیه درخشان در توکامک دماوند مشاهده می‌گردد. مدت حضور پلاسمای تخلیه درخشان، باید براساس روش‌های تحلیل میکروسکوپی و هم‌چنین روش‌های تحلیل سطح ارزیابی گردد تا پاکسازی با تخلیه درخشان به بهترین شکل انجام پذیرد. قابل توجه است که فعالیت پمپ‌های توربومولکولار پس از اتمام مرحله پاکسازی با تخلیه درخشان سبب می‌گردد تا ناخالصی‌های جدا شده از دیواره، به میزان قابل توجهی از محفظه خلأ خارج شوند و محفظه از کیفیت بهتری برخوردار گردد. شکل ۷ نیز نمایی از پروب لانگمویر را نشان داده شده است که در حال اندازه‌گیری مشخصات پلاسمای تخلیه درخشان هیدروژن در توکامک دماوند می‌باشد. پس از تشکیل پلاسمای تخلیه درخشان، با اعمال ولتاژ به الکترود پروب لانگمویر و اندازه‌گیری جریان پلاسما مشخصه جریان- ولتاژ به دست می‌آید که با تحلیل آن می‌توان به مشخصات پلاسمای توکامک دماوند دست یافت.

$$r = -l + \sqrt{l^2 + \frac{A_{probe}}{\pi}} \quad (6)$$

با کدنویسی در نرم‌افزار متلب و لحاظ نمودن محدوده پارامترهای ذکر شده، حدود مجاز ابعاد الکترود پروب تعیین گردید و این حدود در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، برای مثال یک مفتول تنگستن خالص با طول ۶ میلی‌متر و قطر ۰/۱ میلی‌متر می‌تواند گزینه مناسبی جهت استفاده به‌عنوان الکترود پروب لانگمویر باشد.

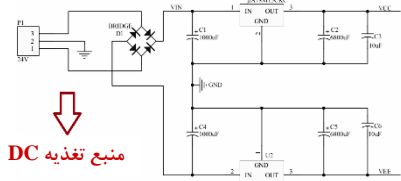
### ۲.۲ طراحی مدار الکتریکی پروب لانگمویر

شکل‌های ۳ و ۴، مدار الکتریکی طراحی شده و ساخته شده برای منبع تغذیه پروب لانگمویر را نشان می‌دهند. اصول کارکرد این مدار به این طریق است که در طبقه اول با استفاده از یک نوسان‌ساز، یک پالس مثلثی تولید می‌شود و سپس در طبقه تقویت‌کننده قدرت با استفاده از یک تقویت‌کننده عملیاتی میزان ولتاژ و جریان تا حد مطلوب تقویت می‌گردد. این مدار، قابلیت تأمین ولتاژ و جریان تا میزان ۴۰۰ ولت و ۱ آمپر را دارا می‌باشد و قادر به تولید پالس مثلثی در بازه ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد. لازم به توضیح است که اگرچه برای اندازه‌گیری مشخصات پلاسما در رژیم تخلیه درخشان ساخت یک مدار الکتریکی با فرکانس پایین‌تر نیز می‌تواند کارگشا باشد، ولی طراحی این مدار الکتریکی به گونه‌ای صورت گرفته است تا علاوه بر اندازه‌گیری مشخصات پلاسمای تخلیه درخشان بتواند در گام‌های بعدی، مشخصات پلاسمای لبه در رژیم محصورسازی مغناطیسی را با دقت زمانی بالایی اندازه‌گیری نماید.



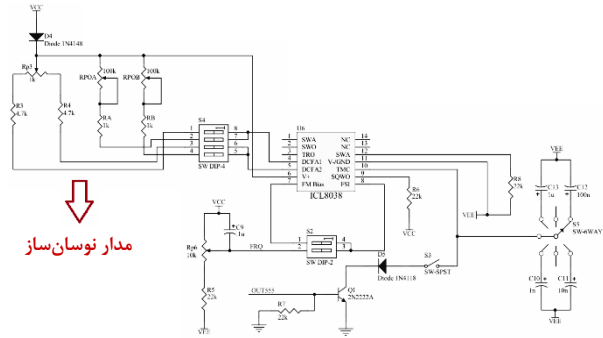
شکل ۲. حدود مجاز طول و شعاع الکترود پروب لانگمویر توکامک دماوند.





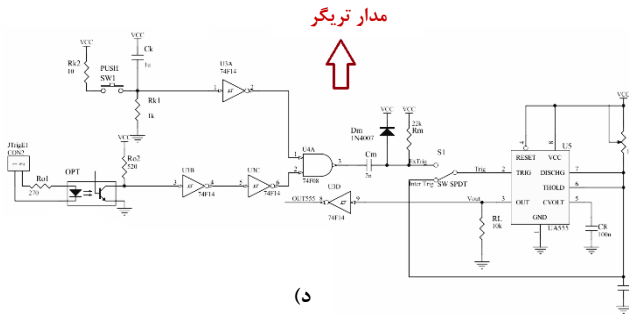
منبع تغذیه DC

(ب)



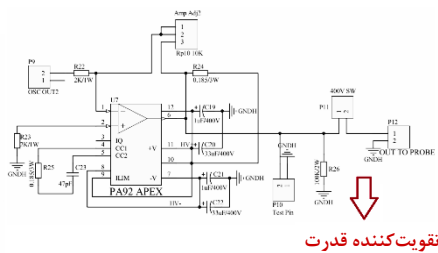
مدار نوسان ساز

(الف)



مدار تریگر

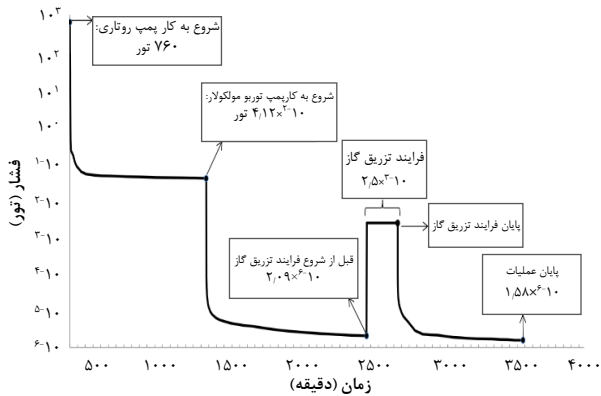
(د)



تقویت کننده قدرت

(ج)

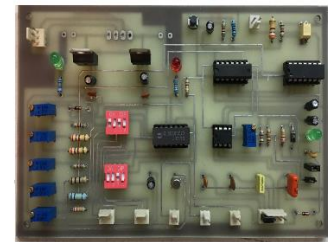
شکل ۳. مدار الکتریکی طراحی شده برای منبع تغذیه پروب لانگمویر. (الف) مدار نوسان ساز (ب) منبع تغذیه DC (ج) مدار تقویت کننده قدرت (د) مدار تریگر.



شکل ۶. فرایند تشکیل پلاسمای تخلیه درخشان در توکامک دماوند

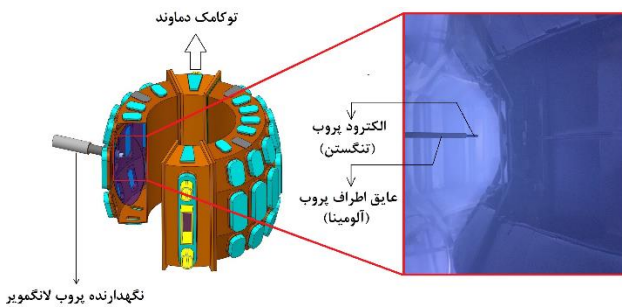


(ب)



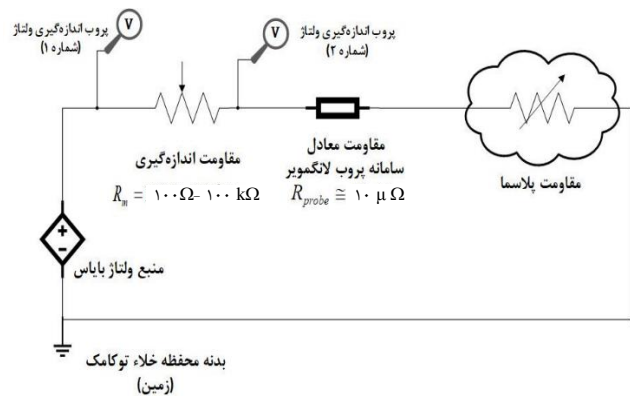
(الف)

شکل ۴. منبع تغذیه ساخته شده برای پروب لانگمویر (الف) نوسان ساز ولتاژ (ب) تقویت کننده ولتاژ و جریان.



نگهدارنده پروب لانگمویر

شکل ۷. نمایی از پروب لانگمویر و پلاسمای تخلیه درخشان هیدروژن در توکامک دماوند

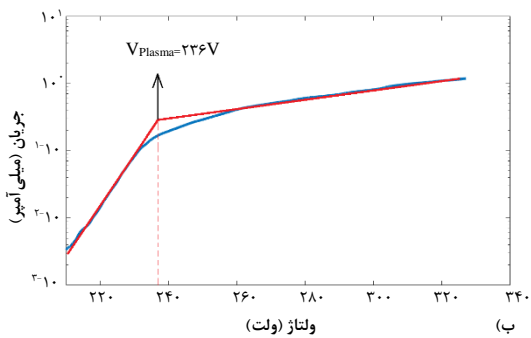
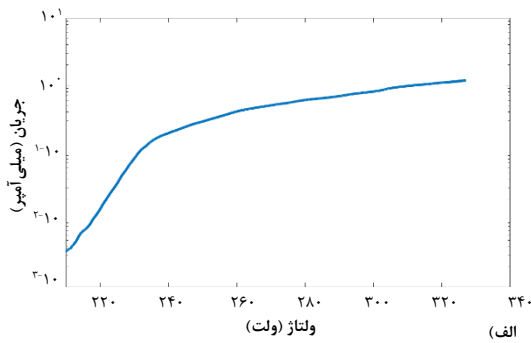


شکل ۵. مدار معادل الکتریکی سامانه پروب لانگمویر.

## ۴.۳ نتایج آزمایش

همان‌طور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود، به دلیل وجود نویز و کثرت فراوانی داده‌ها، مشخصه جریان-ولتاژ به دست‌آمده بسیار پهن می‌باشد، به طوری که از روی آن نمی‌توان به تحلیل درست داده‌ها توسط اسیلوسکوپ می‌توان با اعمال یک فیلتر ضابط داده‌ها تا حدود زیادی حذف نمود. با استفاده پایین گذر میزان نویز را تا حدود زیادی حذف نمود. نمودار از نرم‌افزار متلب می‌توان این نویزها را فیلتر نمود. مشخصه جریان-ولتاژ پس از اعمال فیلتر به صورت شکل ۸-ب می‌باشد. در ادامه، همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با رسم منحنی نیمه لگاریتمی جریان-ولتاژ، می‌توان پارامترهای پلاسما را اندازه‌گیری نمود.

با به دست آوردن شیب این منحنی نیمه لگاریتمی، بر طبق معادله ۱ دمای پلاسما تعیین می‌گردد. هم‌چنین با توجه به معادله ۲ و آگاهی از میزان دمای الکترونی می‌توان به چگالی پلاسما دست یافت. با توجه به این موارد، مشخصات پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن در توکامک دماوند مطابق جدول ۱ می‌باشد. قابل ذکر است که به دلیل اختلاف بسیار زیاد (بیشتر از ۲۰۰ ولت) پتانسیل پلاسما نسبت به پتانسیل بدنه توکامک، جریان اشباع یونی به راحتی و بدون اعمال ولتاژ بایاس، قابل اندازه‌گیری بود. مقدار جریان اشباع یونی ۵۰ میکروآمپر اندازه‌گیری گردید.



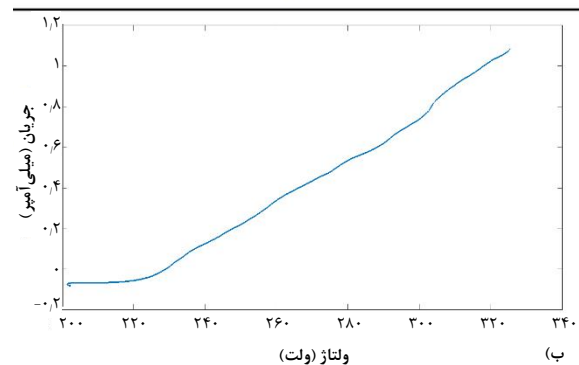
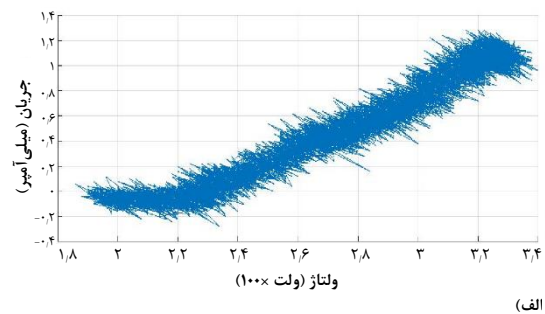
شکل ۹. مشخصه نیمه لگاریتمی جریان الکترون بر حسب ولتاژ بایاس

جدول ۱. مشخصات پلاسما تخلیه درخشان هیدروژن در توکامک دماوند

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| دمای الکترون   | ۵٫۸ الکترون‌ولت                   |
| چگالی یون      | $1.17 \times 10^{15}$ بر متر مکعب |
| پتانسیل پلاسما | ۲۳۶ ولت                           |
| طول دمای       | ۵۲۳ میکرومتر                      |

## ۴. نتیجه‌گیری

پاکسازی با استفاده از تخلیه درخشان هیدروژن یکی از متداول‌ترین روش‌ها در فرایند آماده‌سازی دیواره توکامک‌ها، به ویژه توکامک‌های دارای دیواره از جنس استیل، می‌باشد. لذا برای دستیابی به پلاسما با کیفیت در توکامک دماوند، استفاده از تخلیه درخشان هیدروژن ضروری می‌باشد. برای کسب آگاهی از پارامترهای اصلی پلاسما تخلیه درخشان، نیاز به یک ابزار تشخیصی مناسب و معتبر خواهد بود که در این بین، پروب لانگمویر بهترین ابزار برای اندازه‌گیری پارامترهای پلاسماهای سرد از قبیل رژیم تخلیه درخشان می‌باشد. از طرف دیگر، استفاده از سامانه پروب لانگمویر از آن جهت قابل اهمیت است که در صورت لزوم می‌توان با استفاده از آن آزمایش‌ها را تکرارپذیر نمود و به همان پارامترهای مطلوب دست یافت. پروب لانگمویر از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که باید با در نظر گرفتن شرایط موجود به طراحی و ساخت این قسمت‌ها پرداخته شود. الکترودی که



شکل ۸. مقایسه مشخصه جریان-ولتاژ (الف) بدون اعمال فیلتر و (ب) با استفاده از فیلتر

10. A. Mazandarani, Design and Construction of Double Langmuir Probe, [Amirkabir University of Technology \(Tehran Polytechnic\)](#), 2015, (In Persian).
11. S. Fazelpour, Design and Construction of Single Langmuir Probe for Alborz Tokamak, [Amirkabir University of Technology \(Tehran Polytechnic\)](#), 2015, (In Persian).
12. S. Shahshenas, A. Mazandarani, R. Amrollahi, D. Iraj, Alborz tokamak plasma parameters measurement at pre-ionization stage by double langmuir probes, [International Conference on Plasma Science and Application](#), IEEE, Isfahan, 2015.
13. A. Mazandarani, and S. Shahshenas, Electron temperature and density measurement in a glow discharge plasmaby double langmuir probe, [International Conference on Plasma Science and Application](#), IEEE, Isfahan 2015.
14. A. Mazandarani, R. Amrollahi, and S. Shahshenas, Plasma density measurement by Longmuir probe during hot cathode pre-ionization in Alborz Tokamak, [International Conference on Plasma Science and Application](#), Isfahan, 2015.
15. S.A. Ghasemi, A. Mazandarani, S. Shahshenas, Double Langmuir probe measurement of plasma parameters in a dc glow discharge, [IJPR](#) **18(3)** (2018) 494-494.
16. H.M. Mott-Smith, I. Langmuir, The Theory of Collectors in Gaseous Discharges, [Physical Review](#) **28(4)** (1926) 727-763.
17. R.L. Merlino, Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics, [American Journal of Physics](#) **75(12)** (2007) 1078-1085.
18. I.H. Hutchinson, Principles of Plasma Diagnostics: Second Edition, [Plasma Physics and Controlled Fusion](#) **44(12)** (2002) 2603-2603.
19. F.F. Chen, J.D. Evans, W. Zawalski, Electric probes, [Citeseer](#).
20. R. Fitzpatrick, Plasma physics: an introduction, [Crc Press](#) 2014.
21. B.E. Cherrington, The use of electrostatic probes for plasma diagnostics—A review, [Plasma chemistry and plasma processing](#) **2(2)** (1982) 113-140.
22. M. Tuszewski, J.A. Tobin, The accuracy of Langmuir probe ion density measurements in low-frequency RF discharges, [Plasma Sources Science and Technology](#) **5(4)** (1996) 640-647.
23. I.D. Sudit, R.C. Woods, A workstation based Langmuir probe system for low-pressure dc plasmas, [Review of Scientific Instruments](#) **64(9)** (1993) 2440-2448.
24. G. Wright, D. Brunner, M. Baldwin, R. Doerner, B. Labombard, B. Lipschultz, J. Terry, D. Whyte, Tungsten nano-tendrill growth in the Alcator C-Mod divertor, [Nuclear Fusion](#) **52(4)** (2012) 042003.
25. J.C. Xu, L. Wang, G.S. Xu, W. Feng, H. Liu, J.B. Liu, W. Zhang, T.F. Ming, C. Yip, G.Z. Deng, S.Y. Dai, D.M. Yao, G.N. Luo, H.Y. Guo, Upgrade Design of Lower Divertor Langmuir Probe Diagnostic System in the EAST Tokamak,

برای این پروب انتخاب گردید، یک مفتول از جنس تنگستن با قطر و طول به ترتیب ۰/۱ و ۶ میلی متر است. هم‌چنین مدار الکتريکی طراحی شده برای این سامانه قادر است تا ولتاژ و جریان به ترتیب ۴۰۰ ولت و ۱ آمپر را تأمین نماید و می‌تواند پالس‌های مثلثی در بازه فرکانسی ۱۰ هرتز الی ۱۰ کیلوهرتز را تولید نماید.

پس از طراحی، ساخت و آزمایش قسمت‌های مختلف سامانه پروب لانگمویر برای توکامک دماوند، پارامترهای پلاسمای تخلیه درخشان هیدروژن با استفاده از این سامانه اندازه‌گیری گردید. در نتیجه در اختیار داشتن این سامانه تشخیصی، می‌تواند سرآغازی باشد تا تحقیقات جدی بر روی رژیم تخلیه درخشان در توکامک دماوند مورد مطالعه و بررسی عمیق قرار گیرد.

### مراجع

1. J. Wesson, D.J. Campbell, [Tokamaks](#), [OUP Oxford](#) 2011.
2. M. Shimada, S. Putvinski, R.A. Pitts, [Glow discharge cleaning on ITER](#).
3. Y. Yamauchi, K. Takeda, Y. Nobuta, T. Hino, Hydrogen and helium removal retained in stainless steel by neon glow discharge, [Journal of Nuclear Materials](#) **390** (2009) 1048-1050.
4. Z. Khan, S. George, P. Semwal, K.R. Dhanani, F.S. Pathan, Y. Paravastu, D.C. Raval, G.R. Babu, M.S. Khan, S. Pradhan, Conditioning of SST-1 Tokamak Vacuum Vessel by Baking and Glow Discharge Cleaning, [Fusion Engineering and Design](#) **103** (2016) 69-73.
5. M. Shimada, R.A. Pitts, Wall conditioning on ITER, [Journal of Nuclear Materials](#) **415(1, Supplement)** (2011) S1013-S1016.
6. H.F. Dylla, S.A. Cohen, S.M. Rossnagel, G.M. McCracken, P. Staib, Glow discharge conditioning of the PDX vacuum vessel, [Journal of Vacuum Science and Technology](#) **17(1)** (1980) 286-290.
7. G. Saibene, A. Rossi, R.D. Monk, J. Orchard, P. Andrew, R. Barnsley, D. Cushing, P.J. Coad, S. Davies, K. Erents, H.Y. Guo, K. Lawson, J. Lingertat, G. Matthews, G. Sips, M. Stamp, A. Tanga, Review of vacuum vessel conditioning procedures at JET and their impact on plasma operation, [Journal of Nuclear Materials](#) **220-222** (1995) 617-622.
8. F. Waelbroeck, J. Winter, P. Wienhold, Cleaning and conditioning of the walls of plasma devices by glow discharges in hydrogen, [Journal of Vacuum Science & Technology A](#) **2(4)** (1984) 1521-1536.
9. N. Morshedian, F. Shahverdi, A. Farahbod, Investiycrtion of electron temperature and density of laser-induced-plasma by Langmuir probe up to the centimeters scale distance from the target, [Journal of Nuclear Science and Tehnology](#) **35** (2014), (In Persian).





- IEEE Transactions on Plasma Science **46(5)** (2018) 1331-1337.
26. J.R. Roth, Industrial Plasma Engineering: Volume 1: Principles, CRC Press 1995.
  27. K. Honglertkongsakul, D. Ngamrunroj, Relationship of Pressure and Plasma Temperature in Plasma DC Glow Discharge, *Trans Tech Publ*, 2014, pp. 293-296.
  28. J. Wang, M. He, P. Zheng, Y. Chen, X. Mao, Comparison of the Plasma Temperature and Electron Number Density of the Pulsed Electrolyte Cathode Atmospheric Pressure Discharge and the Direct Current Solution Cathode Glow Discharge, *Analytical Letters* **52(4)** (2019) 697-712.
  29. S.A. Wissel, A. Zwicker, J. Ross, S. Gershman, The use of dc glow discharges as undergraduate educational tools, *American Journal of Physics* **81(9)** (2013) 663-669.
  30. S. Goudarzi, A. Raeisdana, Measurement and analysis of the radiation losses in DAMAVAND Tokamak, *Journal of Physics: Conference Series* **516** (2014) 012032.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## استناد به این مقاله

فریدالدین صدیقی، اردوان کوهی، چاپار رسولی، داود ایرجی، حسین رسولی (۱۴۰۰)، طراحی و ساخت سامانه پروب لانگمویر برای تعیین پارامترهای تخلیه درخشان جهت آماده‌سازی محفظه خلأ در توکامک دماوند، ۹۵، ۲۹-۲۱

DOI: [10.24200/nst.2020.1115](https://doi.org/10.24200/nst.2020.1115)

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1115.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1115.html)

