مجله علوم و فنون هسته‌ای، دوره ۴۴، شماره ۱، جلد ۱۰۳، بهار ۱۴۰۲

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 44 (2), Serial Number 103, 2023

مطالعه ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند با استفاده از سامانه طیف‌سنج نور مریی

زهرا غلامی سرراک[۱]، محمدرضا عبدی[۱]، بنفشه پورشهاب*[۲]، چاپار رسولی[۲]

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان - ایران

۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵ ،تهران- ایران

*Email: bpourshahab@aeoi.org.ir

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۹

چکیده

ناخالصی‌های پلاسما یکی از عوامل اتلاف انرژی محصور شده در توکامک‌ها به شمار می‌روند که از این منظر مطالعه و بررسی آن‌ها در راستای حفظ پایداری پلاسمای توکامک و بهبود کیفیت محصورسازی امری ضروری خواهد بود. در این کار تحقیقاتی به منظور مطالعه ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند، تکفام‌ساز نوری موجود در آزمایشگاه توکامک دماوند به همراه یک آرایه خطی CCD در ساختار یک طیف‌سنج نور مرئی به کار گرفته شد. سامانه طیف‌سنج جدید توسط طول موج‌های مشخصه یک لامپ جیوه کالیبره شده و در رژیم پلاسمای نرمال توکامک دماوند جهت ثبت و تحلیل تابش‌های گسیلی در بازه طول موجی ۷۰۰۰ – ۳۰۰۰ آنگستروم مورد استفاده قرار گرفت. کم‌ترین قدرت تفکیک ابزاری طیف‌سنج حاصل در پهنای شکاف ورودی ۵۰ µm در حدود ۰٫۹ A° به دست آمد که برای تابش‌های پرشدت پلاسمای هیدروژن نظیر H_α و H_β به کار گرفته شد. برای مطالعه تابش‌های حاصل از ناخالصی‌ها با توجه به شدت پایین آن‌ها از پهنای شکاف ورودی ۱۰۰ µm و در نتیجه قدرت تفکیک ۱٫۸ A° استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که ناخالصی‌های غالب در پلاسمای توکامک دماوند عبارتند از اکسیژن، نیتروژن و کربن که منشأ آن‌ها عموماً از مولکول‌های هوای به دام افتاده در دیواره محفظه خلأ و ادوات مجاور با پلاسما هستند و ناخالصی آهن نیز در نتیجه برهم‌کنش پلاسمای داغ با لیمیتر و ادوات داخل محفظه خلأ تولید می‌شود.

کلیدواژه‌ها: توکامک دماوند، پلاسما، ناخالصی، طیف‌سنج نور مریی، قدرت تفکیک طیفی

Modification of visible spectrometer of Damavand tokamak and study of plasma impurities

Z. Gholami Sarrak[1], M.R. Abdi[1], B. Pourshahab*[2], Ch. Rasouli[2]

1. Faculty of Physics, University of Isfahan, P.O. Box: 81746-73441, Isfahan - Iran

2. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Technical Paper

Received 24.10.2021, Accepted 9.1.2022

Abstract

Plasma impurities are one of the loss factors of confined energy in tokamaks, so from this regard their study in order to maintain the stability of tokamak plasma and improve the confinement quality is essential. In this research, in order to study the impurities of Damavand tokamak plasma, a monochromator along with a Line Scan CCD array in the assembly of a visible light spectrometer was used. The modified spectrometer system was calibrated by the characteristic wavelengths of a mercury-vapor lamp and was used in the normal plasma regime of Damavand tokamak to record and analyze the radiation in the wavelength range of 3000-7000A°. The finest instrumental resolution of the spectrometer was about 0.9A° at entrance slit width of 50µm, which was used for intensive hydrogen plasma radiation lines such as Hα and Hβ. To study the radiation from the impurities, due to their low intensity, the entrance slit width of 100 µm and the resolution of 1.8A° were selected. The results showed that the predominant impurities in Damavand tokamak plasma are oxygen, nitrogen and carbon, which are generally originated from air molecules trapped in the wall of the vacuum chamber and the plasma facing components, also iron impurities are produced as a result of hot plasma interaction with the limiter and other components inside the vacuum chamber.

Keywords: Damavand tokamak, Plasma, Impurity, Visible spectrometer, Spectral resolving power

۱. مقدمه

از آغاز ابتدایی‌ترین تحقیقات بر روی ماشین‌های توکامک نظیر T-۱ یکی از مهم‌ترین مسایلی که نقش اصلی را در اتلاف انرژی پلاسمای داغ ایفا می‌کند، تابش‌های ناشی از ناخالصی‌های پلاسما بوده است [۱]. اهمیت این موضوع به قدری بالا بود که در ادامه تحقیقات، محفظه خلأ توکامک T-۲ به صورت دو جداره ساخته شد، تا به منظور رهش[1] مولکول‌های گاز به دام افتاده در سطوح، جداره داخلی آن را بتوان تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم کرد [۲]. هم‌چنین برای کاهش برخورد پلاسما با دیواره محفظه خلأ یک دیافراگم در داخل محفظه نصب شد که قطر پلاسما را کوچک‌تر از قطر محفظه نگه می‌داشت و این دیافراگم بعدها به یکی از اجزای اصلی ماشین‌های توکامک یعنی محدودکننده تبدیل شد [۳].

پلاسمای توکامک‌ها همیشه حاوی مقادیری از یون‌های ناخالصی می‌باشد. این یون‌ها یا ناشی از مواد دیواره محفظه خلأ هستند که در اثر پدیده‌هایی نظیر کندوپاش رها می‌شوند، و یا ناخالصی‌هایی هستند که به صورت عمدی برای خنک‌سازی پلاسمای لبه[2] یا ناحیه دایورتور[3] به منظور کنترل برهم‌کنش پلاسما با دیواره، وارد پلاسما می‌گردند [۴]. اگرچه این شرایط بیش‌تر در توکامک‌هایی برقرار است که از سامانه‌های پیشرفته مهیاسازی دیواره برخوردار هستند، ولی در توکامک‌های اندازه کوچک نیز علاوه بر مسیرهای فوق، کیفیت نه چندان مطلوب خلأ پایه محفظه می‌تواند باعث وجود ناخالصی‌های بیش‌تری در پلاسمای توکامک گردد. وجود این یون‌های ناخالصی منجر به افزایش تابش‌های پلاسما شده که این امر می‌تواند ناپایداری‌های ناشی از تابش را با خود به همراه داشته باشد.

در پلاسمای توکامک پدیده‌های متنوعی منجر به اتلاف‌های تابشی می‌گردند. توان اتلافی مربوط به تابش ترمزی ناشی از برخورد الکترون - یون (آزاد-آزاد) یا بازترکیب (آزاد- مقید) بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_{br} \propto Z^{2} n_e n_Z T_e^{1/2} \qquad (۱)$$

که در آن Z بار یون، n_e و n_Z چگالی‌های الکترون‌ها و یون‌ها در مرتبه یونش Z و T_e دمای الکترون می‌باشد. برای شرایط عملکرد نرمال توکامک این اتلاف توان می‌تواند به راحتی توسط سیستم گرمایش پلاسما تأمین شود. یک اتلاف توان مهم دیگر ناشی از تابش سیکلوترونی الکترون می‌باشد که از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$P_c = e^{4} / (3\pi\varepsilon_0 m_e^{3} c^{3}) B^{2} n_e T_e \qquad (۲)$$

که در آن e بار الکترون، ε_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، m_e جرم الکترون و c سرعت نور می‌باشد. توان تابش شده توسط گسیل الکترون- سیکلوترون اگرچه می‌تواند مقادیر بزرگی باشد ولی این مسأله مشکلی برای اتلاف ایجاد نمی‌کند زیرا پلاسما خود جاذب این طول موج بوده و این امواج پس از تولید در یک ناحیه، در نواحی دیگر پلاسما جذب می‌شوند. اتلاف کسر کوچکی از توان تابشی ممکن است در فرکانس هماهنگی‌هایی[4] که پلاسما نسبت به آن‌ها شفاف است اتفاق افتد که این مقدار نیز به راحتی توسط سامانه‌های گرمایشی قابل جبران است.

مهم‌ترین چشمه اتلاف توان تابشی، یون‌های ناخالصی هستند. آن‌ها علاوه بر گسیل تابش‌های خطی با توان تابشی زیر، باعث افزایش اتلاف‌های ناشی از تابش ترمزی می‌شوند.

$$P_R = L(T_e) n_e n_I \qquad (۳)$$

که در رابطه فوق $L(T_e)$ آهنگ خنک‌سازی [۵] برای یک ناخالصی مشخص و n_I چگالی ناخالصی می‌باشد. لازم است اشاره شود که با کاهش دمای پلاسما، آهنگ خنک‌سازی افزایش می‌یابد.

سامانه‌های تشخیصی بخشی جدا ناشدنی از تأسیسات پلاسما و گداخت هسته‌ای می‌باشند که برای مطالعه پارامترهای گوناگون پلاسما و کیفیت پلاسمای تولید شده در داخل توکامک‌ها به کار می‌روند. یکی از این سامانه‌ها که برای مطالعه ناخالصی‌های موجود در پلاسمای داغ مورد استفاده قرار می‌گیرد طیف‌سنج نور مریی است که از طریق تفکیک طول موجی تابش‌های رسیده از پلاسمای یک توکامک می‌تواند انواع ناخالصی‌های تابش‌کننده را شناسایی و ثبت کند. هم‌چنین از این سامانه می‌توان برای تعیین دمای ناخالصی‌ها، دمای یون‌های پلاسما و سرعت چرخش آن‌ها استفاده نمود. به عنوان مثال توکامک EAST از دو سامانه طیف‌سنج نور مریی برای مطالعه تابش‌های پلاسما استفاده می‌کند. طیف‌سنج اول شامل یک تکفام‌ساز با آرایش چرنی- ترنر و توری پراش میلی‌متر / شیار ۳۰۰ با فاصله کانونی ۳۰۰ mm است که قدرت تفکیک طول

1. Outgassing
2. Edge Plasma
3. Divertor Area
4. Harmonic

موجی حدود A° ۴ در A° ۴۳۴۰ را در اختیار می‌گذارد. طیف‌سنج دوم با قدرت تفکیک طول موجی A° ۰/۱ در A° ۶۵۶۰ است که شامل یک تکفام‌ساز با فاصله کانونی mm ۷۵۰ و توری پراش میلی‌متر / شیار ۱۸۰۰ است [۶]. یا تابش‌های محدوده مریی توکامک T-۱۰ در محدوده A° ۳۹۰۰-۷۱۰۰ توسط یک تکفام‌ساز MDR-۲۰۶ با توری پراش میلی‌متر / شیار ۱۲۰۰ و فاصله کانونی mm ۱۶۰ و قدرت تفکیک طیفی A° ۵ مورد مطالعه قرار می‌گیرند [۷]. یا در توکامک کوچکی نظیر NOVA از چندین تکفام‌ساز با ۱) توری پراش میلی‌متر / شیار ۶۰۰ و فاصله کانونی mm ۲۵۰ و ۲) توری پراش میلی‌متر / شیار ۱۲۰۰ و فاصله کانونی mm ۱۰۰۰ برای مطالعه تابش‌های پلاسما استفاده می‌شود [۸].

توکامک دماوند یکی از ماشین‌های تحقیقاتی پلاسمای داغ است که در رده توکامک‌های اندازه کوچک قرار دارد. شعاع اصلی این توکامک cm ۳۶ و شعاع فرعی آن cm ۷ سانتی‌متر است. در این دستگاه دمای متوسط یون‌ها به حدود eV ۱۵۰ و دمای متوسط الکترون‌ها به حدود eV ۳۰۰ می‌رسند. پهنای زمانی پلاسما در این توکامک تا حدود ms ۲۲ قابل افزایش بوده و بیش‌ترین جریان تولید شده در آن به kA ۴۰ می‌رسد. با توجه به این‌که این ماشین برای تولید و نگه‌داری پلاسما با سطح مقطع کشیده طراحی شده است، یک سامانه کنترل مکان عمودی غیرفعال در داخل آن تعبیه شده که مکان عمودی پلاسما را در طول زمان تخلیه در مرکز محفظه خلأ نگه‌داری کند. هم‌چنین یک سامانه کنترل مکان افقی و عمودی فعال نیز برای این توکامک ساخته شده است.

با توجه به این‌که توکامک دماوند ۱) در پیکربندی محدودکننده[1] کار می‌کند؛ ۲) فشار پایه در این ماشین تا حدود 8×10^{-7} torr قابل کاهش است (با استفاده از تمامی پمپ‌های توربومولکولار و پمپ‌های سرمایشی)؛ ۳) سامانه پخت محفظه خلأ ندارد؛ ۴) اجزای مجاور با پلاسما از جنس استیل هستند و ۵) درگاه‌های تعبیه شده بر روی محفظه خلأ آن بسیار زیاد است (حدود ۱۰۰ درگاه)، بنابراین اهمیت تولید و حضور ناخالصی‌ها در این توکامک بسیار برجسته و بارز است. لذا تحقیقات بر روی مطالعه انواع ناخالصی‌ها و هم‌چنین روش‌های کاهش آن‌ها در این توکامک یکی از اولویت‌ها اصلی به شمار می‌رود.

در پژوهش جاری به منظور بهبود عملکرد سامانه آشکارسازی طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند چندین طرح مورد بررسی قرار گرفت. یکی از روش کارآمد جهت افزایش دقت داده‌های به دست آمده و دسترسی به تفکیک طول موجی بالاتر و هم‌چنین مطالعه هم‌زمان چندین طول موج از تابش‌های گسیل شده، استفاده از آرایه خطی آشکارساز CCD در این سامانه می‌باشد. در طرح جاری پس از نصب این آرایه بر روی تکفام‌ساز[2] سامانه طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند ابتدا به انجام فرایندهای کالیبراسیون مربوطه پرداخته شد و سپس قدرت تفکیک[3] سامانه به صورت تجربی تعیین گردید. در مرحله بعد به انجام آزمایش‌های اصلی در توکامک دماوند و مطالعه ناخالصی‌های پلاسما توسط سامانه طیف‌سنج نور مریی جدید پرداخته شد.

در بخش دوم به معرفی سامانه طیف‌سنج مریی توکامک دماوند و معرفی دقیق پارامترهای آن پرداخته شده و در ادامه فرایندهای کالیبراسیون به کار رفته مورد بررسی قرار گرفت. در بخش چهارم مطالعات و آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تابش‌های ناشی از ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند مورد تحلیل قرار گرفته و در بخش نتیجه‌گیری نیز نتایج داده‌گیری‌ها و بررسی‌های انجام شده آورده شده است.

۲. ارتقاء سامانه طیف‌سنج تابش مریی توکامک دماوند

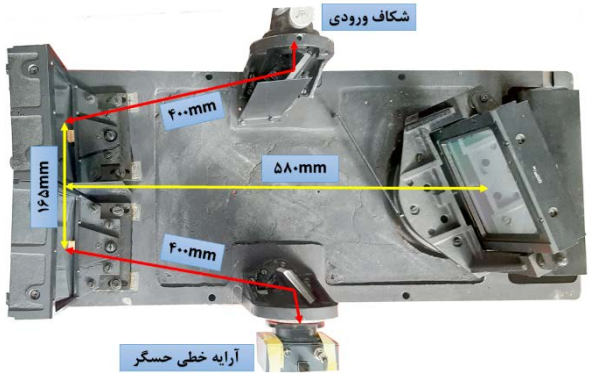
همان‌طور که در مقدمه مطرح شد یکی از سامانه‌های اصلی برای مطالعه ناخالصی‌های پلاسما سامانه طیف‌سنج نوری است. سامانه طیف‌سنج مریی توکامک دماوند از دو بخش اصلی شامل تکفام‌ساز و آشکارساز تشکیل شده است. تکفام‌ساز مورد استفاده از نوع چرنی- ترنر[4] است که از دو آینه موازی‌ساز و همگراساز، دو آینه منعکس‌کننده، توری پراش، دو شکاف خطی متغیر ورودی و خروجی و یک محور مدرج تشکیل شده است. نمایی از تکفام‌ساز توکامک دماوند در شکل ۱ نشان داده شده است. هم‌چنین فواصل هندسی آرایه خطی نسبت به توری پراش و آیینه‌های موازی‌ساز نسبت به شکاف ورودی را در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود.

این توری پراش به کار رفته از نوع انعکاسی بوده و تعداد شیارهای آن در هر میلی‌متر ۱۲۰۰ عدد می‌باشد. فاصله کانونی آینه‌های همگراکننده و موازی‌ساز ۴۰ سانتی‌متر است.

1. Limiter Configuration

2. Monochromator
3. Resolution
4. Czerny-Turner

شکل ۱. نمایی از تکفام‌ساز توکامک دماوند (بدون سرپوش اصلی).



شکل ۲. تصویر آرایه خطی و فاصله هندسی موضع آن نسبت به توری پراش (بدون سرپوش اصلی).

هم‌چنین شکاف‌های ورودی و خروجی آن حداکثر به مقدار ۵ میلی‌متر باز می‌شود. چرخش توری پراش با حرکت شاخص بر روی صفحه مدرج همراه است و با استفاده از چرخش آن توسط محور مدرج می‌توان تکفام‌ساز را برای طول موج‌های مختلف تنظیم نمود. نور از طریق شکاف ورودی وارد طیف‌سنج شده و از طریق آینه منعکس‌کننده بر روی آینه موازی‌ساز می‌تابد. نور توسط این آینه موازی‌ساز به صورت یک دسته پرتو موازی روی توری پراش تابیده می‌شود. توری پراش نور را به مؤلفه‌های طیفی آن تجزیه کرده و نور را بر روی آینه همگراکننده می‌تاباند. نور تابیده شده بر روی آینه همگراکننده به صورت همگرا به یک آینه انعکاسی تابیده شده و از طریق آن به روزنه خروجی می‌رسد.

بخش آشکارساز اولیه در سامانه طیف‌سنج مریی توکامک دماوند یک فتومولتی پلایر[1] روسی بوده است که توانایی ثبت تغییرات زمانی یک طول موج مشخص را در طول زمان تخلیه دارد. فتومولتی پلایرها برای کاربردهای تحلیل طول موجی (مشاهده چند طول موج به‌طور هم‌زمان) و پهن‌شدگی طیف قابل استفاده نیستند و امکان مطالعه تابش‌های پلاسما در یک بازه طیفی توسط آن‌ها وجود ندارد. بنابراین برای این‌که بتوان طیف را در گستره طول موجی بررسی کرد لازم است از آرایه‌ای از پیکسل‌ها یا حس‌گرهای نوری استفاده نمود.

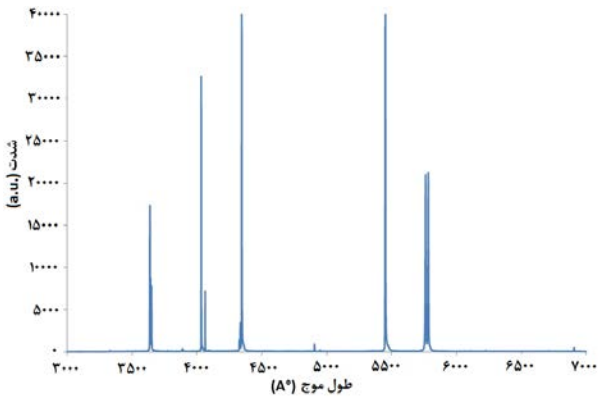
برای این کار یک حس‌گر اسکن خطی CCD با ۲۰۴۸ پیکسل و شماره مشخصه TCD۱۲۰۹D ساخت کمپانی توشیبا انتخاب شد. این حس‌گر خطی برای استفاده در دستگاه‌های فکس، اسکنرهای رومیزی، متن‌خوان‌های نوری طراحی شده است ولی به دلیل سرعت بالا و جریان تاریک پایین برای استفاده در سامانه آشکارساز طیف‌سنج نوری توکامک دماوند نیز به کار گرفته شد. این حس‌گر شامل یک سطر ۲۰۴۸ عنصری از فتودیودها است که ابعاد هر یک از فتودیودها ۱۴μm×۱۴μm بوده و حساسیت آن حدود ۳۰ V/lx.s می‌باشد. مدار راه‌انداز، رابط کامپیوتری و نرم‌افزار استفاده از این CCD نیز به صورت سفارشی توسط شرکت سازنده در اختیار قرار گرفت.

۳. کالیبراسیون سامانه طیف‌سنج نور مریی

برای تحلیل طیف تابشی از یک چشمه، سامانه طیف‌سنجی باید ابتدا نسبت به طول موج کالیبره شود. برای کالیبره کردن طیف‌سنج نور مریی باید از لامپ‌های استاندارد که طول موج‌های تابشی آن‌ها به طور دقیق مشخص هستند استفاده گردد. این لامپ‌های استاندارد به علت فشار گاز پایین داخل آن‌ها طول موج‌هایی با پهن‌شدگی خیلی کوچک تابش می‌کنند و پهن‌شدگی در آن‌ها قابل صرف‌نظر می‌باشد.

در این پژوهش به منظور کالیبراسیون تکفام‌ساز در مرحله اول از دو لامپ طیف‌سنجی استاندارد با کدهای ۶۰۳۳ گاز زنون (۵mA) و ۶۰۳۵ بخار جیوه (۲۰mA) کمپانی نیوپورت که دارای خطوط طیفی کاملاً مشخص بودند استفاده شد. با توجه به حساسیت کم‌تر حس‌گر CCD نسبت به فتومولتی‌پلایر، در این بخش از عملیات سیگنال‌های ثبت شده توسط CCD از ارتفاع و شدت کافی برخوردار نبود. این ضعف هنگامی بیش‌تر نمایان شد که عرض شکاف ورودی تکفام‌ساز کم‌تر از ۸۰۰μm و زمان تابش‌دهی آشکارساز زیر ۱s تنظیم می‌گردید. برای افزایش قدرت تفکیک تکفام‌ساز (قطر شکاف ورودی حدود ۱۰۰μm و پایین‌تر) و کاهش زمان پرتودهی به بازه زمانی تغییرات پلاسما در توکامک دماوند (حدود ۱ms) در مرحله بعد از یک لامپ بخار جیوه با توان ۲۵۰W (۱۰۰۰mA) استفاده شد که خطوط طیفی مشخصی مطابق با شکل ۳ دارد.

1. Photomultiplier



شکل ۳. خطوط طیفی لامپ جیوه در بازه ۷۰۰۰-۳۰۰۰ آنگستروم.

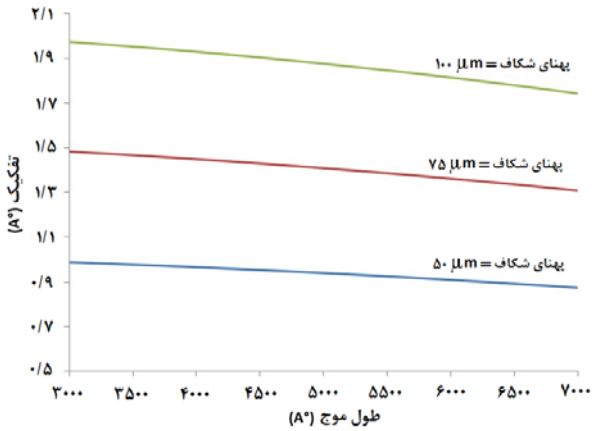
با توجه به این‌که هدف از این پژوهش مشاهده چند طول موج به طور هم‌زمان بوده است لذا شکاف خروجی تکفام‌ساز حذف شده و حس‌گر CCD در این محل نصب شد. فرایند کالیبراسیون بر اساس تنظیم زاویه توری پراش جهت رسیدن یک طول موج مشخص به پیکسل مشخصی از حس‌گر CCD انجام شد و سپس با در دست‌داشتن طول موج‌های معلوم و درجه‌های معادل با آن‌ها بر روی صفحه مدرج تکفام‌ساز، نمودار کالیبراسیون محاسبه گردید. رابطه کالیبراسیون به دست آمده برای پیکسل ۱۰۱۳ به عنوان پیکسل مرجع به صورت زیر می‌باشد که در آن λ طول موج تنظیم شده سامانه و D درجه تکفام‌ساز می‌باشند.

$$\lambda(A^\circ) = ۵/۴۸۵۸D + ۲۵۴۹/۱ \quad (\pm ۵/۵A^\circ) \qquad (۴)$$

قدرت تفکیک تکفام‌ساز با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۹، ۱۰]. در این رابطه di پهنای شکاف ورودی، α زاویه بین طول موج فرودی و طول موج بازتاب شده از توری‌پراش (۱۶/۲°)، F فاصله کانونی تکفام‌ساز، m مرتبه توری پراش، g تعداد شیارهای توری پراش بر میلی‌متر و λ طول موج نور فرودی می‌باشند.

$$\Delta\lambda = \frac{d_i}{Fmg}\cos\left[a\sin\left[\frac{\lambda_g}{۲\cos(\frac{a}{۲})}\right]+\frac{a}{۲}\right] \qquad (۵)$$

با جای‌گذاری مشخصات تکفام‌ساز در رابطه فوق، قدرت تفکیک تکفام‌ساز سامانه طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند برای پهنای شکاف ورودی ۵۰μm، ۷۵ μm و ۱۰۰ μm و برای بازه طول موجی ۷۰۰۰-۳۰۰۰A° مطابق با شکل ۴ تغییر خواهد کرد. در مطالعه جاری با توجه به پایین بودن شدت نور رسیده به تکفام‌ساز از پلاسمای توکامک، در کلیه آزمایش‌ها اندازه پهنای شکاف ورودی تکفام ساز برابر با ۱۰۰μm تنظیم گردید.



شکل ۴. تغییرات قدرت تفکیک تکفام‌ساز بر اساس پهنای شکاف ورودی.

۴. مطالعه ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند

همان‌طور که بیان شد در این پژوهش برای مطالعه ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند از سامانه طیف‌سنج نور مریی استفاده شد. این آزمایش‌ها در رژیم تخلیه‌های گریزان[1] توکامک دماوند انجام شد زیرا یکی از مهم‌ترین عوامل در تولید الکترون‌های گریزان نقش بارز ناخالصی‌ها در پلاسما است. برای به دست آوردن نتایج دقیق، شرایط عملیاتی توکامک دماوند نظیر فشار گاز ورودی، میزان شارژ بانک‌های خازنی و فواصل زمانی تخلیه بانک‌های خازنی در طول آزمایش‌ها همواره ثابت نگه داشته می‌شود. هم‌چنین برای کمینه کردن میزان تفاوت شات‌ها با یک‌دیگر و کاهش خطای آماری، نتایج طیف‌سنجی ۵ شات متوالی میانگین‌گیری شده و به عنوان یک داده آزمایشگاهی ثبت و مورد تحلیل قرار می‌گیرند. هم‌چنین طیف‌هایی که در فرایند گسیختگی تولید می‌شوند به طور جداگانه مورد بررسی و تحلیل قرار داده می‌شوند.

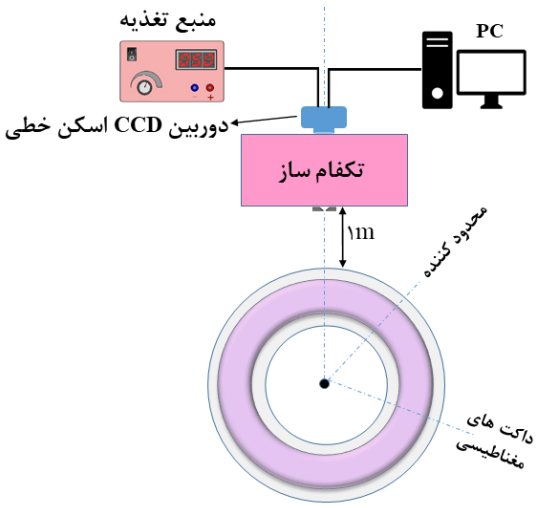
توکامک دماوند را می‌توان در دو مد تخلیه‌های نرمال و تخلیه‌های گریزان مورد استفاده قرار داد. در مد تخلیه‌های گریزان کل جریان تخلیه توسط الکترون‌های گریزان حمل شده، یون‌های زمینه سرد بوده و جمعیت قابل توجهی از ذرات پلاسما در حال خنثی وجود دارند بنابراین در این حالت تابش‌های گسیلی از توکامک بسیار پرشدت و قابل توجه هستند زیرا عملاً بخش عمده‌ای از انرژی داده شده به پلاسما توسط تابش‌های خطی تلف می‌گردند. در تخلیه‌های نرمال با توجه به وجود محصورسازی انرژی، ذخیره شدن انرژی توسط ذرات پلاسما، افزایش دمای یون‌ها و کاهش چشمگیر جمعیت ذرات خنثی، از میزان تابش‌های خطی کاسته شده و نور رسیده به تکفام‌ساز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. بنابراین در روند آزمایش‌ها

1. Runaway Discharge

ناگزیر باید کل تابش خارج شده از پنجره اپتیکی توکامک را توسط یک آرایش اپتیکی (یک یا دو لنز) بر روی شکاف ورودی تکفام‌ساز متمرکز نمود تا نتایج حاصل دارای نسبت سیگنال به نویز قابل قبولی باشد. استفاده از فیبر نوری باعث کاهش بیش‌تر نور رسیده به سمت تکفام‌ساز و بنابراین کاهش نسبت سیگنال به نویز می‌گردد لذا در این مجموعه از آزمایش‌ها از تابش‌های مستقیم پلاسما به منظور داده‌گیری استفاده شده است.

با توجه به این‌که طی آزمایش‌های اولیه مشخص شد که تابش‌های رسیده به تکفام‌ساز از شدت کافی برخوردار نیستند لذا کلیه ادوات سامانه طیف‌سنج به فاصله ۱ متری از توکامک دماوند در مقابل پورت مخصوص طیف‌سنجی (زاویه چنبره‌ای °۰) منتقل شد. در ادامه آرایه حسگر خطی CCD در محل خروجی تکفام‌ساز نصب شده و عملیات کالیبراسیون مطابق آنچه شرح داده شد صورت گرفت. با توجه به تعداد ۲۰۴۸ فتودیود در این آرایه خطی و حذف شکاف خروجی، چیدمان سامانه جدید به گونه‌ای است که بازه طول موجی مشاهده شده توسط حس‌گرها حدود ۵۵۰A° می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از چیدمان آزمایشگاهی سامانه طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند نشان داده شده است.

برای جاروب بازه طول موجی ۳۰۰۰ - ۷۰۰۰ A° داده‌گیری‌ها در ۱۴ پنجره طول موجی ۵۵۰ آنگسترومی انجام گرفت. لازم به توضیح است که به منظور حفظ پیوستگی طیف نهایی و افزایش دقت، هر پنجره طول موجی با پنجره‌های قبل و بعد حدود ۳۰۰A° هم‌پوشانی داشته است. هم‌چنین جهت کاهش اثر نور محیط در اندازه‌گیری‌ها، میزان تابش‌های زمینه به طور جداگانه اندازه‌گیری شده و از طیف به دست آمده کسر گردید.

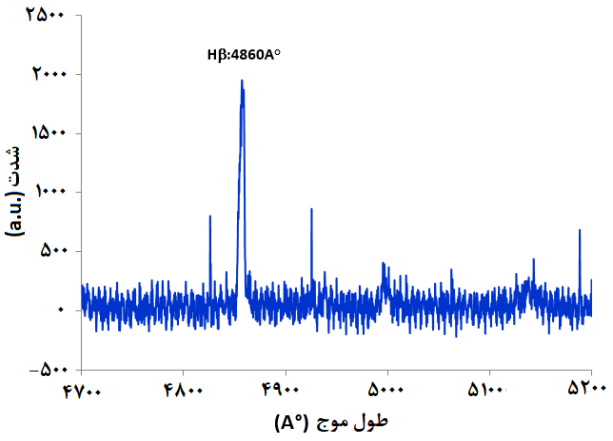


شکل ۵. چیدمان آزمایشگاهی سامانه طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند.

زمان اندازه‌گیری طیف تابش‌ها با توجه به زمان حضور پلاسما در توکامک دماوند، حدود ۲۵ms در نظر گرفته شد. علی‌رغم نزدیک کردن سامانه طیف‌سنج به توکامک، داده‌های ثبت شده دارای خطای آماری بودند لذا برای افزایش نسبت سیگنال به نویز و افزایش نور رسیده به هر یک از حس‌گرهای آرایه خطی، پهنای شکاف ورودی از ۵۰μm به ۱۰۰μm افزایش داده شد که این امر منجر به کاهش قدرت‌تفکیک طیفی تکفام‌ساز به ۲A° گردید.

داده‌های ثبت شده توسط نرم‌افزار مربوط به آرایه حس‌گر خطی در فایل‌های متنی ذخیره می‌گردند. این داده‌ها حاوی نویز فراوان بوده و با توجه به شدت نور کم رسیده به آرایه CCD نسبت سیگنال به نویز بالایی دارند، لذا نمی‌توان آن‌ها را برای تحلیل داده‌های آزمایشگاهی و استخراج نتایج فیزیکی مورد استفاده قرار داد. در شکل ۶ نمونه‌ای از سیگنال خام ثبت شده توسط آرایه حس‌گر خطی نشان داده شده است.

به منظور پردازش داده‌ها، حذف نویز، حذف تابش‌های زمینه و استخراج طیف تابش‌های حاصل از هر شات و هم‌چنین انجام عملیات میانگین‌گیری و تحلیل طیف نهایی یک کد توسط نرم‌افزار متلب[1] نوشته شد. در این کد ابتدا سیگنال زمینه از سیگنال ثبت شده در حضور پلاسما کسر می‌گردد. در ادامه برای پردازش داده‌ها و حذف نوساناتِ با فرکانس بالا، از فیلتر ساویتزکی - گولای[2] استفاده می‌شود. این فیلتر یک الگوریتم نرم‌سازی داده بر اساس برازش زیرمجموعه‌ای از نقاط داده مجاور یک‌دیگر با یک چند جمله‌ای با درجه پایین به روش حداقل مربعات می‌باشد.



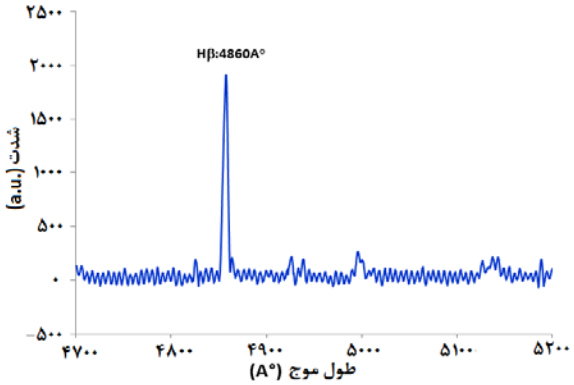
شکل ۶. سیگنال ثبت شده توسط آرایه حس‌گر خطی پیش از حذف نویز.

1. MATLAB
2. Savitzky-Golay

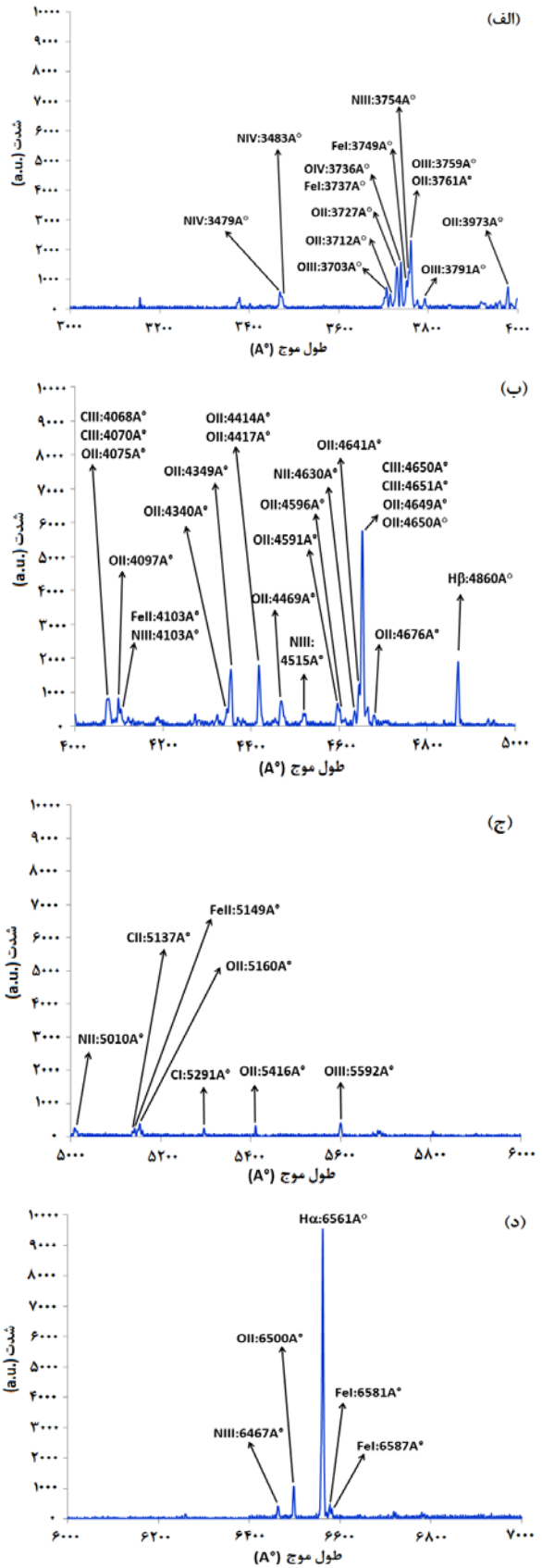
این یکی از فیلترهای پرکاربرد برای استخراج داده در برنامه‌هایی است که به منظور پردازش طیف، تضعیف نویز و استخراج پیک نوشته می‌شوند. عملکرد اصلی این فیلتر این است که پیک را حفظ می‌کند و اعوجاج سیگنال را به حداقل می‌رساند. در شکل ۷ طیف به دست آمده برای پنجره طول موجی حاوی تابش Hβ پس از حذف نویز ارایه داده شده است.

با میانگین‌گیری از داده‌های ثبت شده در ۵ شات متوالی می‌توان نتایج دقیقی برای طیف پنجره‌های طول موجی تعیین شده به دست آورد. با کنار هم‌گذاری نتایج هر بازه، طیف تابش‌های پلاسمای توکامک دماوند که شامل تابش‌های ذرات پلاسما (هیدروژن) و تابش‌های حاصل از ناخالصی‌ها می‌باشند به دست آمد. در شکل ۸ طیف نهایی ثبت شده توسط سامانه طیف‌سنج نور مریی توکامک دماوند در ۴ بازه طول موجی ۱۰۰ آنگسترومی در کل زمان تخلیه توکامک آورده شده است که در بازه طول موجی ۳۰۰۰-۷۰۰۰ A° به تفکیک به صورت نمودارهای (الف)، (ب)، (ج) و (د) نشان داده شده‌اند.

با توجه به مسیرهای ورود ناخالصی به توکامک‌ها که پیش‌تر توضیح داده شد، یکی از مسایل مهم پیرامون طیف‌سنجی تابش‌های توکامک‌ها این است که یک ارزیابی اولیه از منشأ ناخالصی‌های ممکن بر اساس جنس دیواره محفظه خلأ، نوع گاز مورد استفاده جهت پاک‌سازی و آماده‌سازی محفظه، جنس لایه نشانده شده بر روی اجزای مجاور با پلاسما و دمای پلاسمای تولید شده صورت گیرد. در پژوهش جاری به منظور آماده‌سازی محفظه خلأ توکامک دماوند فرایند تخلیه نورانی با استفاده از گاز هیدروژن انجام شد. هم‌چنین در این توکامک فرایند لایه نشانی بر روی اجزای مجاور با پلاسما صورت نمی‌گیرد و با توجه به بهره‌برداری از یک پمپ توربومولکولار، پایین‌ترین فشار ممکن برای محفظه خلأ نیز در حدود ۲×۱۰^{-۶} torr می‌باشد. بر اساس شرایط مذکور انتظار مشاهده برخی از عناصر در طیف تابش‌های این توکامک وجود داشته و برخی دیگر نیز که در سایر توکامک‌ها به عنوان ناخالصی رایج شناخته می‌شوند (مانند تنگستن، مولیبدن، بور، آرگون و سیلیسیم) وجود ندارد.



شکل ۷. سیگنال حاوی تابش Hβ که در حضور پلاسما ثبت شده و عملیات حذف سیگنال‌های اضافه روی آن صورت گرفته است.



شکل ۸. طیف به دست آمده از سامانه فتواسپکترومتر توکامک دماوند در بازه طول موجی $۳۰۰۰-۷۰۰۰\ A^0$ در کل زمان تخلیه توکامک؛ (الف) طیف مربوط به بازه $۳۰۰۰-۴۰۰۰\ A^0$، (ب) طیف مربوط به بازه $۴۰۰۰-۵۰۰۰\ A^0$، (ج) طیف مربوط به بازه $۵۰۰۰-۶۰۰۰A^0$ و (د) طیف مربوط به بازه $۶۰۰۰-۷۰۰۰A^0$.

در شکل ۶ همان‌طور مشاهده می‌گردد پیک‌های متعددی در طیف تابش‌های مریی توکامک دماوند نمایان شده است که بر اساس طول موج هر یک از پیک‌ها و مراجعه به جداول استاندارد می‌توان بر این اساس عناصر ناخالصی موجود در پلاسما را شناسایی نمود. ناخالصی‌های غالب در طیف به دست آمده از تابش‌های مریی توکامک دماوند عبارتند از اکسیژن، نیتروژن، کربن و آهن. منشأ عناصر اکسیژن، نیتروژن و کربن در حقیقت مولکول‌ها و اتم‌های موجود در هوا هستند که به داخل محفظه خلأ راه پیدا کرده‌اند و منشأ آهن نیز مربوط به اندرکنش الکترون‌های گریزان با دیواره محفظه خلأ و کندوپاش حاصل از آن می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند با استفاده از تابش‌های آن‌ها در محدوده طول موج نور مریی (۳۰۰۰-۷۰۰۰A°) مورد مطالعه قرار گرفت. برای مشاهده تابش‌های حاصل از چند نوع ناخالصی و هم‌چنین خطوط متفاوت یک نوع ناخالصی در یک شات، از تکفام‌ساز توکامک دماوند به همراه یک آرایه آشکارساز CCD با ۲۰۴۸ حس‌گر (ابعاد هر حس‌گر ۱۴μm×۱۴μm) استفاده گردید به گونه‌ای که سامانه طیف‌سنجی حاصل توانایی مشاهده یک پنجره‌طیفی به پهنای ۵۵۰A° را داشته باشد. در این راستا برای کالیبراسیون سامانه از طیف استاندارد یک لامپ بخارجیوه استفاده شد. بر اساس طیف‌های به دست آمده و با توجه به جداول استاندارد موجود، ناخالصی‌های غالب در پلاسمای توکامک دماوند عبارتند از اکسیژن، کربن و نیتروژن (ناخالصی‌های سبک) و آهن (ناخالصی سنگین) که منشأ تولید آن‌ها هوای وارد شده به داخل محفظه (در نتیجه شکست خلأ و یا نشتی) و اندرکنش پلاسما با ادوات داخل محفظه خلأ توکامک می‌باشد.

مراجع

1. G.G. Dolgov-Saveljev, et al, *Toroidal discharge in a strong magnetic field*, Soviet Phys.—JETP, **11**, 287 (1960).
2. V.S. Strelkov, *History of T-10 tokamak: creation and development*, Plasma Phys. Rep., **27**, 819 (2001).
3. V.P. Smirnov, *Tokamak foundation in USSR/Russia 1950–1990*, Nucl. Fusion, **50**, 014003 (2010).
4. H.R. Koslowski, *Operational Limits and Limiting Instabilities in Tokamak Machines*, Fusion Science and Technology, **49**(**2T**), 147 (2006).
5. D.E. Post, et al., *Steady-state radiative cooling rates for low-density high-temperature plasmas*, At. Data Nucl. Data Tables, **20**, 397 (1977).
6. FU. Jia, et al., *Spectroscopic Measurements of Impurity Spectra on the EAST tokamak*, Plasma Science and Technology, **14**, 1048 (2012).
7. A. Gorbunov, L.A. Klyuchnikov, K.V. Korobov, *Visible range spectrum of the T-10 tokamak plasma*, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, **38**, 62, (2015).
8. A.M. Dalt Rini, M. Machida, M.J.R. Moterio, *Vacuum Ultraviolet and Visible Spectroscopy Diagnostics on the NOVA-UNICAMP tokamak*, Brazilian Journal of Physics, **31**, 496 (2001).
9. H. Mohammadi, E. Eslami, *Investigation of Spectral Resolution in a Czerny Turner Spectrograph*, Instruments and Experimental Techniques, **53**, 549, (2010).
10. Liu, Chuan; Berg, Rolf W., *Determining the Spectral Resolution of a Charge-Coupled Device (CCD) Raman Instrument*, Applied Spectroscopy, **66**, 1034 (2012).

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
زهرا غلامی سرراک، محمدرضا عبدی، بنفشه پورشهاب، چاپار رسولی (۱۴۰۲)، مطالعه ناخالصی‌های پلاسمای توکامک دماوند با استفاده از سامانه طیف‌سنج نور مریی، ۱۰۳، ۱۵۸-۱۶۵

DOI: 10.24200/nst.2022.1332 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1332.html