

Research Paper

## Measurement of Carbon Ion Temperature in Tokamak IR-T1 Plasma Using Passive Spectroscopy<sup>1</sup>

Majid Fallah<sup>2</sup>, Mohammad Mahdavi<sup>\*3</sup>,  
Mahmoud Ghoranneviss<sup>4</sup>, Sakineh Meshkani<sup>5</sup>

Received: 2019.11.22  
Accepted: 2020.01.25

### Abstract

The study of ionic impurities present in tokamak plasma is an essential tool for studying plasma behavior and determining its various parameters such as temperature, electron density and plasma flow rate. For this purpose, high resolution optical spectroscopy system was installed on the Tokamak IR-T1 to measure the carbon-ion impurity temperature in the plasma. By processing the emission spectral lines recorded by the spectrometer, the location of the spectral line corresponding to the carbon impurity is estimated, and the effective width of the carbon spectral line is determined by matching a Gaussian function to the experimental data. Given the effective width of the carbon spectrum line, its doppler broadening and consequently the carbon ionic impurity temperature are calculated. Carbon CIII ion temperature is obtained about  $18.1 \pm 0.6\text{eV}$ . The experimental impurity temperature is comparable to the results of ISTTOK and COMPASS tokamaks.

**Keywords:** *Passive Spectrometry, Broadening, Ion Temperature, Tokamak, Impurity.*

**PACS number:** 52.55. Fa, 52.55.-s, 52.25. Vy, 52.25. Xz, 52.25Os.

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/jap.2020.29378.1142

<sup>2</sup> PhD Student, Department of Nuclear Physics, Faculty of Basic sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran, Email: maj\_121@yahoo.com

<sup>3</sup> Professor, Department of Nuclear Physics, Faculty of Basic sciences, University of Mazandaran, Mazandaran, Iran.(Corresponding Author). Email: m.mahdavi@umz.ac.ir

<sup>4</sup> Professor, Plasma Physics Research Center, Science & research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: ghoranneviss@gmail.com

<sup>5</sup> Assiatant Professor, Plasma Physics Research Center, Science & research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: s.meshkani@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال نهم، پیاپی ۱۸، پاییز ۱۳۹۸

## مقاله پژوهشی

# اندازه‌گیری دمای یونی کربن درون پلاسمای توکامک IR-T1 با استفاده از بیناب‌سنجی غیرفعال<sup>۱</sup>

مجید فلاح<sup>۲</sup>، محمد مهدوی\*<sup>۳</sup>، محمود قرآن‌نویس<sup>۴</sup>، سکینه مشکانی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵

### چکیده

مطالعه ناخالصی‌های یونی موجود در پلاسمای توکامک، ابزاری اساسی جهت بررسی رفتار پلازما و تعیین پارامترهای مختلف آن از قبیل دما، چگالی الکترونی و سرعت شارش پلازماست. بدین منظور، یک سیستم بیناب‌سنجی نور مرئی با توان تفکیک عالی برای اندازه‌گیری دمای ناخالصی یونی کربن درون پلازما روی توکامک IR-T1 نصب شده است. با پردازش خطوط بینابی گسیلی ثبت شده توسط بیناب‌سنج، مکان خط بینابی مربوط به ناخالصی کربن برآورد شده است. با اعمال برازش و بهنجارش بر خط بینابی و انطباق تابع توزیع گاوسی

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/jap.2020.29378.1142

<sup>۲</sup> دانشجوی دکترا، گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران.

maj\_121@yahoo.com

<sup>۳</sup> استاد، گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران.

m.mahdavi@umz.ac.ir

<sup>۴</sup> استاد، مرکز تحقیقات فیزیک پلازما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

ghoranneviss@gmail.com

<sup>۵</sup> استادیار، مرکز تحقیقات فیزیک پلازما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

s.meshkani@gmail.com

۷۲ / اندازه‌گیری دمای یونی کربن درون پلاسمای توکامک IR-T1 با استفاده از بیناب‌سنجی غیرفعال

بر داده‌های تجربی، پهنای مؤثر خط بینابی کربن تعیین شده و سپس میزان پهن شدگی دوپلری آن و در نتیجه دمای ناخالصی یونی کربن محاسبه شده است. دمای یون کربن CHH حدود  $0.6 \pm 1.8$  الکترون‌ولت به دست آمده است. دمای ناخالصی اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از توکامک‌های ISTTOK و COMPASS مقایسه و تأیید شد.

**واژگان کلیدی:** بیناب‌سنجی غیرفعال، پهن‌شدگی، دمای یونی، توکامک، ناخالصی.

## ۱. مقدمه

لازمه امکان‌پذیری همجوشی گرما هسته‌ای غلبه بر سد پتانسیل کولنی، ذرات شرکت‌کننده در واکنش‌های هسته‌ای با انرژی جنبشی کافی (دمای بالا) و چگالی زیاد (افزایش احتمال برخورد) و زمان محصورسازی طولانی است، که معیار لاسون نامیده می‌شود. برای رسیدن به این شرایط، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین وظیفه هر سیستم همجوشی، پایدار نگه داشتن پلاسماست. محصورسازی مغناطیسی چنبره‌ای - توکامک - باعث پایداری آن می‌شود. در محصورسازی مغناطیسی (MCF) سعی می‌شود به کمک میدان‌های مغناطیسی پلاسمای را در چگالی‌های کم و دمای بسیار بالا برای زمان نسبتاً طولانی محصور کنند.

غالباً توکامک‌ها را در دو گروه توکامک‌های بزرگ و کوچک طبقه‌بندی می‌کنند. هدف از به‌کارگیری توکامک‌های بزرگ همچون: توکامک‌های JET [۱]، JT-60U [۲]، و TFTR [۳]، مطالعه رفتار پلاسمای در مقیاس بزرگ و پارامترهای مختلف آن جهت دستیابی به شرایط مورد نیاز برای همجوشی است. شرایط انجام این گونه آزمایش‌ها بسیار دشوار و پرهزینه است. به همین منظور، از توکامک‌های کوچکی همچون: COMPASS [۴] و ISTTOK [۵] و CASTOR [۶] استفاده می‌شود. توکامک‌های کوچک این امکان را می‌دهند تا بتوان ایده‌های جدید را آزمایش کرد و به نتایجی دست یافت که امکان انجام آن‌ها توسط توکامک‌های بزرگ بسیار دشوار و پرهزینه است. توکامک IR-T1 یکی از این توکامک‌های کوچک است که در زمینه انجام این گونه آزمایش‌ها فعال است. این توکامک تحقیقاتی با پلاسمای هیدروژنی (غیرتریتیومی) با سطح مقطع مخزن دایره‌ای است که در سال ۱۳۷۲ ه.ش. در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران نصب و راه‌اندازی شد [۷].

در طول مدت تخلیه‌های الکتریکی، بر اثر برهمکنش میان لبه پلاسمای و دیواره و لیمیترها، برخی ناخالصی‌ها تولید شده است و به درون آن نفوذ می‌کند. ناخالصی‌ها اساساً ذرات یونی

غیرسوختی درون پلازما هستند. ناخالصی‌های ناخواسته سبب رقیق شدن پلازما، اتلاف انرژی به شکل تابش گسیلی، اختلال در عملکرد آن‌ها و حتی باعث گسیختگی پلازما می‌شوند. در مدهای مختلف عملیاتی توکامک، توازن انرژی پلازما غالباً توسط تابش‌های گسیلی از ناخالصی‌های یونی اداره و تنظیم می‌شود. همچنین احتمال وقوع هر واکنش هسته‌ای میان دو ذره نسبت به سطح مقطع برخورد آن تعریف می‌شود، که به چگالی و انرژی (دما) ذرات محیط واکنش وابسته است. در فرایندهای همجوشی گرما هسته‌ای، سطح مقطع برخوردها، تابع پارامترهایی همچون دما و فشار ناحیه‌ای پلازما و چگالی آن است. بنابراین، دانستن مقدار دقیق‌تر این پارامترها در تعیین احتمال وقوع فرایند اهمیت بسزائی دارد. با وجود این، اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل تابش گسیلی از ناخالصی‌های موجود در پلازما (بیناب‌سنجی ناخالصی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۰۸]. مطالعه ناخالصی‌های یونی می‌تواند به بررسی دقیق‌تر رفتار پلازما و تعیین پارامترهای مختلف آن بیانجامد.

کربن یکی از ناخالصی‌های موجود درون پلازما توکامک IR-T1 است که از طریق نفوذ گاز CO2 هوا، ترکیبات کربن‌دار مورد استفاده در پمپ‌های تخلیه، از طریق برهمکنش الکترون‌های فرار با دیواره مخزن و لیمیت‌های فولادی یا پروب‌های تشخیصی به درون پلازما وارد می‌شود. محاسبات انجام شده برای تعیین دمای یونی بر اساس اندازه‌گیری‌های خطوط بینابی کربن امکان‌پذیر است. زیرا فرم سه‌گانه خطوط آن مستقیماً در دمای یونی تأثیرگذار است [۵]. بهره‌وری کوانتومی توری پراش بیناب‌سنج برای این طول موج حدود ۴۰ تا ۷۰ درصد است [۱۱]. بیناب‌سنجی غیرفعال پلازما، به عنوان یک ابزار تشخیصی غیرتهاجمی است که به طور گسترده‌ای در همجوشی گرما هسته‌ای استفاده می‌شود. بررسی بیناب‌سنجی مواد تشکیل‌دهنده پلازما مانند چگالی و دما و توزیع مکانی ناخالصی‌های یونی می‌تواند به طور جدی در شرایط تخلیه الکتریکی توکامک تأثیر بگذارد. حتی مقدار ناچیزی از ناخالصی می‌تواند در اتلاف انرژی به شکل تابش گسیلی انرژی مؤثر باشد.

شیوه بیناب‌سنجی غیرفعال با نور مرئی، نوعی بیناب‌سنجی با توان تفکیک عالی جهت بررسی خطوط بینابی و شناسایی ناخالصی‌های یونی درون پلازما استفاده می‌شود. این ابزار اخیراً جهت مطالعات ناخالصی‌های یونی در توکامک IR-T1 نصب شده است. با اعمال برازش و بهنجارش بر هر خط بینابی می‌توان اثر هر داده را تعیین و پهنای مؤثر  $FWHM$  [۱۲] آن را محاسبه کرد. سپس با محاسبه پهن شدگی دوپلری خطوط بینابی گسیلی کربن، امکان برآورد دمای یونی درون پلازما

<sup>1</sup> Full Width at Half of Maximum

را فراهم ساخت. طول مدت پرتوگیری از ۱۰ میکرو ثانیه تا ۱۰ دقیقه تغییر پذیر است. پهنای مؤثر یا پهنای در نصف بیشینه مقدار، کمیتی است که بیانگر میزان پهن شدن یک تابع بوده و در سیستم‌های مختلف از جمله پارامترهای دستگاه‌های آنالیزی که نتایج آن‌ها به شکل بیناب باشد، کاربرد دارد. این کمیت همچنین نشان‌دهنده اختلاف میان دو مقدار متغیر مستقل مانند طول موج است وقتی که متغیر وابسته‌ای مانند شدت نسبی تابش گسیلی نصف مقدار بیشینه خود را داشته باشد.

در این مقاله، ابتدا بخش نظری پژوهش ارائه می‌شود. سپس دستگاه‌های به کار گرفته را معرفی می‌کنیم. در بخش سوم، شیوه انجام پژوهش و نحوه کالیبره کردن سیستم بیناب‌سنجی و تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده بیان می‌شود. در بخش نهایی جمع‌بندی ارائه می‌شود.

## ۲. مبانی نظری تحقیق

ترکیب پلازما تأثیر مستقیم در سازوکارهای عملکردی آن و شرایط تخلیه الکتریکی دارد. به همین دلیل تشخیص کامل ذرات تشکیل دهنده پلازما همراه با ناخالصی‌های یونی آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. از این رو، پارامترهایی مانند دمای یون و چگالی هیدروژن را می‌توان با تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از پهن شدن عناصر به دست آورد.

دو پروفایل اساسی پیکره یک خط بینایی توسط تابع‌های توزیع گاوسی و لورنتزی معرفی می‌شود، بنابراین شکل هر خط بینایی ناشی از تأثیر این دو سازوکار مختلف گاوسی (مانند پهن شدن‌های تجهیزات و دوپلری) یا لورنتزی (مانند پهن شدن‌های طبیعی، فشار، استارک) در پهن شدن‌های هر خط بینایی است. در سیستم‌های تشخیصی پلازما، تکنیک پهن شدن‌های دوپلری اغلب مفیدترین است. درخور ذکر است که در این مطالعه، فنون پهن شدن‌های طبیعی، وان دروالس، تشدید، استارک و زیمان، به دلیل تأثیرات بسیار کم آن‌ها در پهن شدن‌های خط بینایی نادیده گرفته شده است ( $10^{-5} \sim$ ) [۱۳-۱۵]. حرکت کاتوره‌ای و نامنظم ذرات در پلازما وابسته به دما به پهن شدن‌های دوپلری می‌انجامد [۱۶] که از رابطه زیر قابل محاسبه است،

$$\Delta\lambda_{1/2}^D(nm) = \frac{2\lambda_0(nm)}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 kT_i(eV)}{m_i(a.mu)}} \quad (1)$$

در این جا،  $T_i$  بیانگر دمای ناخالصی یونی و  $m_i$  واحد جرم اتمی ذره ناخالصی است. در بیناب‌سنجی، پهن شدن‌های تجهیزات به عوامل مختلفی از جمله عرض شکاف ورودی، درجه تفکیک و پهن شدن‌های طبیعی خط بیناب به کاررفته بستگی دارد. پروفایل پهن شدن‌های تجهیزات تابع توزیع آماری گاوسی است. برای محاسبه مقدار پهن شدن‌های تجهیزات می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۷، ۱۸]،

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهراء، سال نهم، پیاپی ۱۸، پاییز ۱۳۹۸ / ۷۵

$$\Delta \lambda_{1/2}^{inst} = W \times \frac{d}{f \times m} \quad (2)$$

برای توری‌های پراش با ۱۸۰۰ (شیار در میلیمتر)،  $f$ ، فاصله کانونی ۷۵ میلی‌متر،  $W$ ، عرض شکاف ۵ میکرون و زاویه پراش کمتر از ۲۰ درجه، میزان پهن‌شدگی تجهیزات برابر ۰/۰۳۷ نانومتر است. در آشکارساز CCD که در نقطه کانونی پرتوهای خروجی قرار دارد، آرایه‌ای از آشکارسازهای نیم‌رسانا قرار دارد. هر پیکسل که جداگانه به عنوان یک آشکارساز کوچک عمل می‌کند، یک تیزک استخراجی را نشان می‌دهد.

رابطه اساسی ساختار خط بینابی مشاهده‌شده با توابع گاوسی (پهن‌شدگی‌های دوپلری و تجهیزات) به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]،

(۳)

$$(D /_{1/2}^{meas})^2 = (D /_{1/2}^D)^2 + (D /_{1/2}^{inst})^2$$

که در آن،  $D /_{1/2}^{meas}$  پهنای مؤثر خط بینابی و  $D /_{1/2}^D$  پهنای مؤثر پهن‌شدگی دوپلری و  $D /_{1/2}^{inst}$  پهنای مؤثر پهن‌شدگی تجهیزات است.

### ۳. چیدمان تجربی

#### الف. توکامک IR-T1

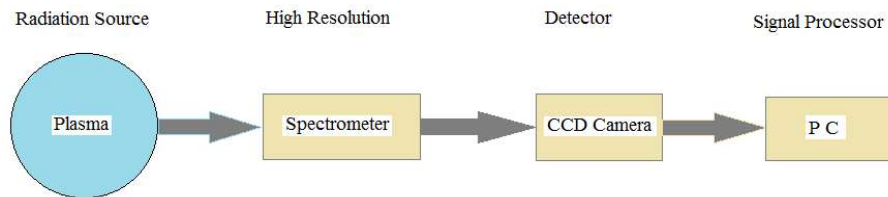
هدف اصلی از مطالعه رفتار پلاسما و پارامترهای وابسته به آن، شناسایی شرایط مناسب جهت تولید انرژی با استفاده از واکنش‌های هسته‌ای است. توکامک IR-T1، یک توکامک تحقیقاتی کوچک هیدروژنی است که دیواره داخلی مخزن توکامک و لیمیترها از جنس فولاد زنگ‌نزن است. در طول مدت تخلیه‌های الکتریکی، بر اثر برهمکنش میان لبه پلاسما و دیواره و لیمیترها، برخی ناخالصی‌ها تولید می‌شود و به درون پلاسما نفوذ می‌کند. مشخصات اصلی این توکامک در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات اصلی این توکامک IR-T1 [7, 20].

Major radius	45 cm
Minor radius	12.5 cm
Plasma current	<30 Ka
Toroidal magnetic field	<1.0 T
Pulse length	<35 ms
Pressure	$2-3 \times 10^{-5}$ Torr
Edge electron temperature	$\leq 20$ eV
Core electron temperature	$\leq 200$ eV

### ب. دستگاه بیناب‌سنج

بیناب‌سنج به کاررفته در این آزمایش‌ها، یک بیناب‌سنج دو کاناله با نور مرئی مدل AvaSpec با بازه ۲۰۰-۱۱۰۰ نانومتر و آرایه اپتیکی Czerny-Turner و توری پراش VD-1800Lines/nm است. آشکار ساز CCD مدل (TOSHIBA TCD 1304, 8' 200mm) با ۳۶۴۸ عدد پیکسل دارای آرایه‌ای خطی از دیودهای نوری از جنس سیلیکون است، که برای دریافت اطلاعات توسط یک فیبر نوری به طول ۲ متر و قطر ۱۰۰۰ میکرون به دریچه افقی دستگاه توکامک مرتبط می‌شود. یک دیافراگم شمارشی (F=7.1)، زمان جمع شدن پرتوهای نور توسط آشکارساز را تنظیم می‌کند. در آشکارسازهای CCD از برخورد فوتون‌های گسیلی به سطح جدائی دیودها، جریان الکتریکی ایجاد می‌شود، به عبارت دیگر فوتون‌های نوری به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند. سپس این سیگنال‌ها با انتقال به حافظه میانی و سپس به رایانه، پردازش و ثبت می‌شوند. طرح‌واره‌ای از سیستم بیناب‌سنجی در شکل ۱ و برخی اطلاعات فنی آن در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۱ طرحی از سیستم تشخیصی بیناب‌سنجی در توکامک IR-T1.

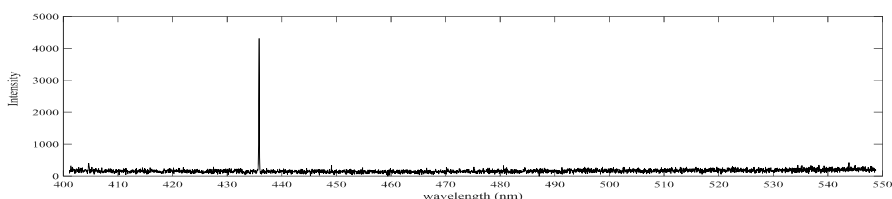
### جدول ۲ پارامترهای اصلی بیناب‌سنج با توان تفکیک عالی بیناب سنج AvaSpec- ULS [۱۱].

Entrance slit width*	5 $\mu$ m(Slit-5-RS)
Grating	VD-1800 Lines/nm
Integration time	10 $\mu$ s - 10minutes
Detector	CCD Line array,3648Pixels
Sensitivity	16000 counts/ $\mu$ W per ms integration time
Quantum efficiency	40% - 70%
Instrumental broadening	0,037nm

در فرآیند اندازه‌گیری‌ها، برای تعیین طول موج خطوط بینابی مختلف و نیز جلوگیری از وقوع پدیده جابه‌جایی دوپلری، امتداد خط دید بر هر دو میدان مغناطیسی چنبره‌ای و قطبی عمود است. از این رو، مخروط امتداد خط دید درون پلاسمای توکامک بسیار باریک بوده و زاویه رأس مخروط کمتر از یک درجه است [۲۱].

#### ۴. نتایج و بحث

به منظور کالیبره کردن سیستم بیناب سنج و تعیین دقت آن ضمن اندازه گیری طول موج خطوط مختلف بینایی، از لیزر زنون استفاده شده است. نتیجه کالیبراسیون نشان می دهد که طول موج اندازه گیری شده برابر ۴۳۹,۳۱۸ نانومتر بوده و اختلافی برابر (۰/۰۰۲- نانومتر) با مقدار استاندارد آن دارد، که بیانگر همپوشانی مناسب مقدار اندازه گیری شده با مقدار معیار آن است (شکل ۲).



شکل ۲ بیناب ثبت شده از دریچه افقی دستگاه توکامک توسط بیناب سنج Ava Spec-spectrometer با استفاده از لیزر زنون.

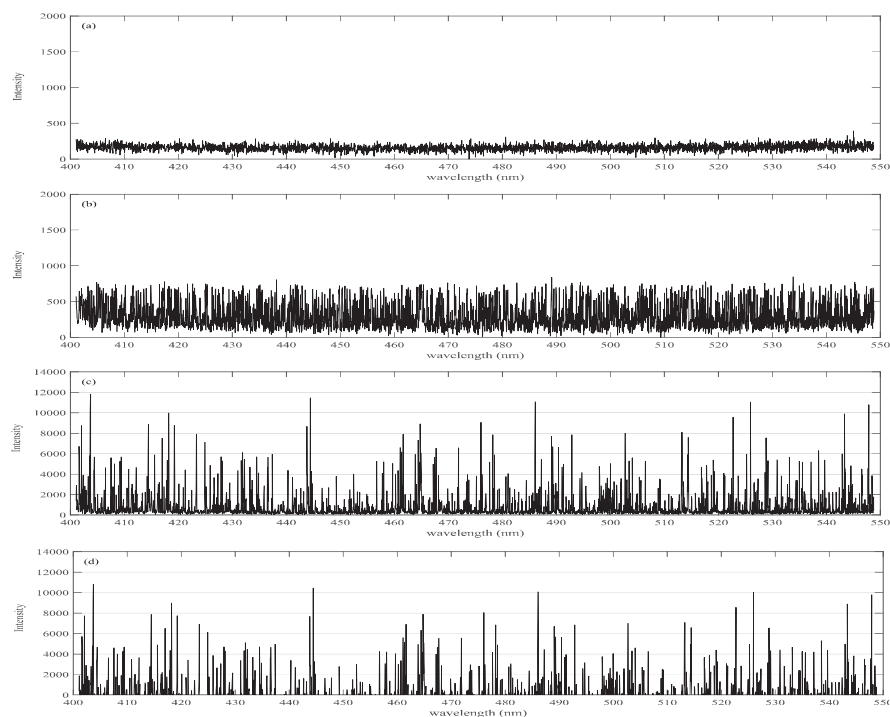
برای کالیبراسیون شدت نسبی خطوط بینایی، ابتدا میزان نوفه محیطی و نوفه بخش اپتیکی بیناب سنج اندازه گیری می شود. سپس با حذف نوفه ها از اندازه گیری های بینایی به دست آمده، بیناب حاصل جهت بحث و بررسی آماده می شود. این تأثیرات به وضوح در شکل های (۳: a-d) نشان داده شده است. اندازه گیری ها نشان می دهد نوفه ایجاد شده هنگام تخلیه الکتریکی به طور متوسط پنج برابر نوفه داخلی سیستم است. برای جلوگیری از اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس گسیلی از پلاسما مانند اشعه ایکس در هنگام تخلیه الکتریکی و نیز میدان مغناطیسی قوی ناشی از عبور جریان از سیم پیچ های مختلف بر قطعات اپتیکی و الکترونیکی بیناب سنج، دستگاه درون یک حفاظ سربی قرار داده می شود. این کار سبب حذف نوفه و در نتیجه شناسایی دقیق تر ناخالصی های موجود در پلاسما می شود.

مطالعات آزمایشگاهی پلاسمای هیدروژنی توکامک IR-T1 در شرایط مختلف و تحت فشار بسیار کم ( $2.8 \times 10^{-5}$  Torr) انجام می گیرد. بررسی ها نشان می دهد که با مطالعه نتایج، شرایط مناسب جهت تولید یک پلاسمای پایدار را می توان شناسایی کرد. برای نیل به این منظور، حضور ناخالصی ها در پلاسما ممکن است بسیار سودمند باشد. خطوط بینایی ناشی از ناخالصی های مختلف دارای گسیل قوی تر و گذار الکترونی آنها شناسایی می شوند. سپس با اعمال برآزش و بهنجارش روی هر خط بینایی، پهنای مؤثر آن تعیین و با انجام محاسبات لازم، دمای ناخالصی درون پلاسمای توکامک تعیین می شود. بدین منظور از کربن های CI و CII و CHII استفاده کرده ایم. اندازه گیری های خطوط بینایی گسیلی و میزان پهن شدگی ها نیازمند دستگاه بیناب سنجی



۷۸ / اندازه‌گیری دمای یونی کربن درون پلاسمای توکامک IR-T1 با استفاده از بیناب‌سنجی غیرفعال

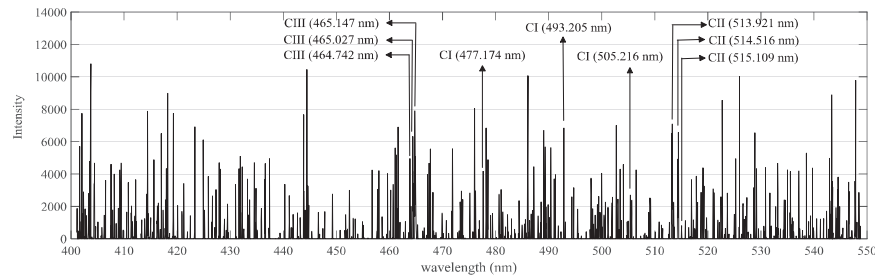
با توان تفکیک بالا حدود ۰/۰۰۱ نانومتر است. اطلاعات حاصل از بیناب‌سنجی در شکل ۴ و ناخالصی‌های یونی کربن شناسایی شده همراه با گذار الکترونی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. با استفاده از روابط ارائه شده در بخش‌های قبلی و پهن‌شدگی دوپلری دمای کربن محاسبه شده است. فرم سه‌گانه خطوط آن مستقیماً در دمای یونی تأثیرگذار است. بهره کوانتومی توری پراش بیناب‌سنجی برای این طول موج حدود ۴۰-۷۰ درصد است. فرایند بیناب‌سنجی در طول مدت زمان تخلیه الکتریکی پلاسما، به طور کامل انجام شده است.



شکل ۳ بیناب به دست آمده از درجه افقی توکامک IR-T1 توسط بیناب‌سنجی Ava Spec تحت شرایط (a) با درجه ورودی نور بسته، (b) بدون پلاسما، (c) با پلاسما و بدون حفاظ سربی، (d) با پلاسما به همراه حفاظ سربی در توکامک IR-T1.

جدول ۳. ناخالصی‌های یونی کربن شناسایی شده در بیناب به دست آمده از پلاسمای توکامک IR-T1.

ناخالصی یونی کربن	گذار الکترونی	طول موج (nm)
C I	$2s^2 2p 3s^1 P^0 \rightarrow 2s^2 2p 4p^3 S$	۴۳۷,۲۱۶ ، ۵۳۸,۵۰۵ ۴۹۳,۰۲۵ ، ۴۷۷,۱۷۴
C II	$2s^2 2p(^3 p^0) 3s \rightarrow 2s^2 2p(^3 p^0) 3p$	۵۱۶,۵۱۴ ، ۵۱۳,۹۲۱ ، ۵۱۵,۱۰۹
C III	$1s^2 2p 3p P^0 \rightarrow 1s^2 2s 3p^3 S$	۴۶۵,۱۴۷ ، ۴۶۵,۰۲۵ ، ۴۶۴,۷۴۲



شکل ۴ بیناب ثبت شده به وسیله بیناب سنج Ava Spec-spectrometer در طول مدت تخلیه الکتریکی و بعد از حفاظ گذاری سربی در توکامک IR-T1.

در توکامک IR-T1 تحت شرایط جریان پلوئیدال پلاسما ۱۸ kA، میدان مغناطیسی ۰,۷-۰,۹ تسلا و چگالی الکترونی  $10^{19} \times 1,5-0,6$  در مترمکعب، میزان پهن شدگی خط بینابی کربن CI برابر  $0,06 \pm 0,042$  نانومتر، کربن CII برابر  $0,13 \pm 0,051$  نانومتر و کربن CIII برابر  $0,09 \pm 0,058$  نانومتر تعیین شده است. بر اساس محاسبات انجام یافته، دمای کربن CI حدود  $0,1 \pm 0,33$  الکترون ولت، CII حدود  $0,1 \pm 0,93$  الکترون ولت و CIII حدود  $0,6 \pm 0,18$  الکترون ولت به دست آمده است. در آزمایش های دیگران، دمای کربن CIII در توکامک CAMPASS با جریان پلوئیدال پلاسما ۴۰ kA و میدان مغناطیسی ۰,۷-۰,۹ تسلا و چگالی الکترونی  $10^{19} \times 1,5-0,6$  در مترمکعب، حدود  $30-35$  الکترون ولت [۴] و در توکامک ISTTOK با جریان پلوئیدال پلاسما ۷ kA، میدان مغناطیسی ۲,۸ تسلا و چگالی الکترونی  $10^{19} \times 5$  در مترمکعب، حدود  $3,3 \pm 0,32$  الکترون ولت به دست آمده است [۵]. این توکامک ها از نوع توکامک های کوچک با سطح مقطع دایره ای با پلاسما گرم هستند. چگالی الکترونی آن ها مشابه یکدیگر، اما میدان مغناطیسی در دو توکامک دیگر بزرگ تر از میدان مغناطیسی در توکامک IR-T1 است. به نظر می رسد میدان های مغناطیسی علاوه بر محصور سازی، در مقدار جریان پلاسما و در نتیجه در تحرک کاتوره ای الکترون ها و یون های هیدروژن و ناخالصی ها مؤثر باشد. به همین علت، میزان پهن شدگی خط های بینابی و در نتیجه دمای ذرات ناخالصی در گزارش ارائه شده نسبت به توکامک IR-T1 مطالعه شده، بیش تر است. همچنین، حضور ناخالصی کربن با دماها و درجه های یونش کمتر (CI و CII) در توکامک IR-T1، نشان دهنده دمای کمتر پلاسما در لبه آن است و ذرات کربن CIII باید در نزدیکی هسته پلاسما یافت شوند.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق اندازه‌گیری‌های دمای ناخالصی یونی با استفاده از اطلاعات حاصل از طریق دریچه افقی توکامک IR-T1 توسط یک بیناب‌سنج نور مرئی با توان تفکیک عالی با موفقیت انجام گرفت. این بیناب‌سنج به تازگی بر روی توکامک نصب شده است و بیناب گسیلی از پلاسمای توسط بیناب‌سنج در محدوده ۴۰۰-۵۵۰ نانومتر قابل تشخیص است. هدف از این تحقیق، مطالعه ناخالصی‌های یونی موجود در پلاسمای توکامک جهت بررسی دقیق‌تر رفتار پلاسمای و تعیین پارامترهای آن و نیز ارتقاء عملکرد توکامک است. دانستن مقدار دقیق پارامترهایی همچون دمای ناحیه پلاسمای و فشار در آن ناحیه و نیز چگالی پلاسمای در تعیین احتمال وقوع واکنش همجوشی گرما هسته‌ای (سطح مقطع برخورد) اهمیت اساسی دارد. بدین منظور از یون‌های کربن CI و CII و CIII استفاده کردیم، تا بتوانیم نتایجمان را با نتایج به دست آمده از توکامک‌های کوچک مشابه همچون ISTTOK و COMPASS مقایسه کنیم. نتایج نشان دادند که دمای ناخالصی کربن CIII حدود ۱۸ الکترون‌ولت است. در نهایت، از مقایسه نتایج با نتایج گزارش شده از توکامک‌های مشابه، صحت و دقت آن‌ها تأیید شد.

## قدردانی

این تحقیق را گروه فیزیک دانشگاه مازندران و مرکز تحقیقات فیزیک پلاسمای دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران حمایت کرده‌اند.

## منابع

- [1] Zastrow, K. D., J. M. Adams, Yu Baranov, P. Belo, L. Bertalot, Jerzy H. Brzozowski, C. D. Challis et al. "Tritium transport experiments on the JET tokamak." *Plasma physics and controlled fusion* 46, no. 12B (2004).
- [2] Koubiti, M., T. Nakano, L. Godbert-Mouret, Yannick Marandet, J. Rosato, and R. Stamm. "Diagnostics of JT-60U divertor plasmas by Stark-Doppler broadening of carbon spectral lines." *Journal of Nuclear Materials* 415, no. 1 (2011).
- [3] Zweben, S. J., and S. S. Medley. "Visible imaging of edge fluctuations in the TFTR tokamak." *Physics of Fluids B: Plasma Physics* 1, no. 10 (1989).
- [4] Naydenkova, D. I., J. Stöckel, V. Weinzettl, D. Šesták, and J. Havlicek. "Spectroscopic measurements on the COMPASS tokamak." *WDS'12 Proceedings of Contributed Papers Part II—Physics of Plasmas and Ionized Media* (2012).
- [5] Gomes, R. B., C. A. F. Varandas, J. A. C. Cabral, E. Sokolova, and S. Reyes Cortes. "High dispersion spectrometer for time resolved Doppler measurements of impurity lines emitted during ISTTOK tokamak discharges." *Review of Scientific Instruments* 74, no. 3 (2003): 2071-2074.
- [6] Weinzettl, V., I. Ďuran, J. Zajac, and V. Piff. "Edge plasma biasing experiments on the CASTOR tokamak: spectroscopic investigation and microwave measurements." *Czechoslovak journal of physics* 53, no. 10 (2003).

- [7] Paknezhad, A., M. Ghoranneviss, R. Arvin, and S. Mohammadi. "Approaches on Measurements of the Shafranov Parameter and Plasma Displacement in Tokamaks." *Journal of Nuclear and Particle Physics* 3, no. 4 (2013).
- [8] Naydenkova, D. I., F. Janky, V. Weinzettl, J. Stockel, D. Sestak, T. Odstrcil, J. Ghosh, R. Gomes, and T. Pereira. "Measurements of ion temperature in the edge plasma of the COMPASS tokamak." In *WDS*, vol. 11, pp. 233-236 (2011).
- [9] Ghorashi, S, and Mahdavi, M. "Broadening effects on opacity calculation of CH plasmas." *Physics of Plasmas* 24, no. 2 (2017).
- [10] Gomes, R. B., C. A. F. Varandas, J. A. C. Cabral, E. Sokolova, and S. Reyes Cortes. "High dispersion spectrometer for time resolved Doppler measurements of impurity lines emitted during ISTTOK tokamak discharges." *Review of Scientific Instruments* 74, no. 3 (2003).
- [11] Avantes Enlightening Spectroscopy. The Netherlands, Europe, [http:// www.avantes.com](http://www.avantes.com) (2015).
- [12] Fantz, U. "Basics of plasma spectroscopy." *Plasma sources science and technology* 15, no. 4 (2006).
- [13] Kunze HJ, "Introduction to plasma spectroscopy." *Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics*; ISBN 978-3-642-02233-3; Springer Heidelberg Dordrecht London New York, p.128-133 (2009 Sep 18).
- [14] Hutchinson, IH. "Principles of Plasma Diagnostics, second edition." New York: Cambridge University Press, p.109 (2002).
- [15] Vidal CR, Cooper J, Smith EW. "Hydrogen Stark-broadening tables." *The Astrophysical Journal Supplement Series*; 25:37 (1973 Jan).
- [16] Kamio S, Cao Q, Abe K, Sakumura M, Suzuki N, Watanabe TG, Ishiguchi K, Imazawa R, Yamada T, Inomoto M, Takase Y. "Multipoint spectroscopy measurement of spherical tokamak heating by magnetic reconnection in UTST." *Plasma and Fusion Research*;6:2402033 (2011 Jul 12).
- [17] Scherrer P. "Estimation of the size and internal structure of colloidal particles by means of röntgen." *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*; 2:96-100(1918).
- [18] Lerner, J. M., and A. Thevenon. "The optics of spectroscopy." *Jobin-Yvon Optical Systems/Instrumentss SA* (1988).
- [19] Daltrini, A. M., M. Machida, and M. J. R. Monteiro. "Vacuum ultraviolet and visible spectroscopy diagnostics on the NOVA-UNICAMP tokamak." *Brazilian journal of physics* 31, no. 3: 496-501 (2001).
- [20] Khorshid, P., Ghoranneviss, M., Razavi, M., Saboohi, S., Mollai, M., Hojabri, A., Mohammadi, S. "Overview of Experimental Studies on IR-T1 Tokamak." No. INIS-XA-08N0893, (2008).
- [21] Menmuir, S., "Visible spectroscopic diagnostics: Application and development in fusion plasmas", PHD Thesis, Albanova University Center, KTH. Roslagstullsbacken 21: S-106 91 Stockholm: Sweden, p;18(2007).