

Study of different parameters of Tokamak IR-T1 Plasma using Passive Spectroscopy technique

Mohammad Mahdavi^{*1}, Majid Fallah¹, Mahmoud Ghoranneviss², Sakineh Meshkani²

¹Department of Nuclear Physics, Faculty of Basic sciences, University of Mazandaran, P. O. Box 47415-416, Babolsar, Iran

²Plasma Physics Research Center, Science & research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 09.02.2020 Final revised: 22.09.2020 Accepted: 02.11.2020

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.16183](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.16183)

Abstract

In this study, using the passive spectroscopic method, a two-channel visible light channel Ava-Spec-ULS3648TEC-2-RS-USB2, high-emission spectral line set, to detect the presence of carbon, nitrogen, Oxygen, iron, chromium and tungsten have been identified in the IR-T1 tokamak plasma. Spectroscopic operations were performed during the period of electrical discharge inside the tokamak plasma. After performing the fitting and normalization, the effective width (FWHM) is calculated for each spectral line. Using Doppler broadening profiles and instrument, the hydrogen temperature is obtained at 4.4 eV, which is comparable to the results of COMPASS and ISTTOK tokamak. By calculating the Doppler broadening profiles and instrument, and using the information from the spectral lines, the ionic impurity temperature at the edge of the IR-T1 tokamak plasma is estimated at about 2.3 eV and at the core at about 40eV. Then, the effect of variation of biasing voltage on the FWHM of hydrogen (H β) - Stark broadening - and the effect of variation of magnetic field on the FWHM of iron ion (Fe I) - Zeeman broadband- are investigated. The results show the dependence of the radiation intensity and the temperature of the hydrogen on the biasing voltage.

Keywords: Tokamak, Impurity, Spectroscopic Broadening, Ionic temperature, Passive spectroscopy, Bias limiter

* Corresponding Author: m.mahdavi@umz.ac.ir



مطالعه پارامترهای مختلف پلاسمای توکامک IR-T1 با استفاده از روش بیناب‌نمائی غیرفعال

محمد مهدوی^{1*}، مجید فلاح¹، محمود قرآن نویس²، سکینه مشکانی²

¹گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران کدپستی: 47415-416 بابلسر، مازندران، ایران

²مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

دریافت: 1398/11/20 ویرایش نهائی: 1399/07/01 پذیرش: 1399/08/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2020.16183](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2020.16183)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش بیناب‌نمائی غیرفعال، یک بیناب‌نمای دو کاناله نور مرئی -Ava-Spec-ULS3648TEC-2-RS-USB2، مجموعه خطوط بینابی با شدت تابش گسیلی بالا به منظور تشخیص وجود ناخالصی‌های کربن، نیتروژن، اکسیژن، آهن، کروم و تنگستن در پلاسمای توکامک IR-T1 شناسائی شده است. عملیات بیناب‌نمائی در طول مدت زمان تخلیه الکتریکی درون پلاسمای توکامک انجام شده است. پس از انجام برازش و بهنجارش، پهنای مؤثر برای هر خط بینابی محاسبه شده است. با استفاده از نمایه‌های پهن‌شدگی‌های دوپلر و تجهیزات، دمای هیدروژن برابر $4/4\text{eV}$ به دست آمده است که قابل مقایسه با نتایج حاصل از توکامک‌های COMPASS و ISTTOK می‌باشد. با محاسبه پهن‌شدگی‌های دوپلری و تجهیزات و به کمک اطلاعات به دست آمده از خطوط بینابی، دمای چند ناخالصی یونی در لبه پلاسمای توکامک IR-T1 حدود $2/3\text{eV}$ و در هسته آن حدود 40eV برآورد شده است. سپس اثر تغییرات ولتاژ بایاس لیمیتر بر پهنای مؤثر هیدروژن ($\text{H}\beta$) - پهن‌شدگی استارک - و اثر تغییرات میدان مغناطیسی بر پهنای مؤثر یون آهن (Fe I) - پهن‌شدگی زیمان-مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج از وابستگی شدت تابش و دمای خط بینابی هیدروژن را به ولتاژ بایاس لیمیتر نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: توکامک، ناخالصی، پهن‌شدگی بینابی، دمای یونی، بیناب‌نمائی غیرفعال، بایاس لیمیتر

مقدمه

ناخالصی یونی به درون پلاسما و نیز برخورد الکترون‌های گریزان با دیواره مخزن می‌شود [1-3]. پلاسماهای رقیق نسبت به تابش گسیلی شفاف بوده، به طوری که وجود ناخالصی منجر به تابش از هسته پلاسما و افزایش شارش گرما به سمت دیواره توکامک می‌شود. ذرات ناخالصی با عدد اتمی بالا به علت دارا بودن انرژی یونش بالا، نیازمند دماهای بالا برای توقف تابش گسیلی هستند. با این حال، مطالعه بیناب خطی

حفظ ثبات و تعادل پلاسما در طول مدت محصورسازی به خصوص دماهای بالا توسط راکتورهای همجوشی گرما-هسته‌ای مانند توکامک‌ها، از جمله فرایندهای بسیار مهم به حساب می‌آیند. به همین منظور از پیچیده‌های مختلف چنبره‌ای، قطبی و عمودی جهت محصورسازی و حفظ تعادل پلاسما استفاده می‌شود. با این حال، برهم‌کنش مداوم پلاسما با دیواره مخزن توکامک منجر به تولید و نفوذ ذرات

* نویسنده مسئول: m.mahdavi@umz.ac.ir

ذرات ناخالصی می‌تواند کمک بسزایی در شناخت رفتار پلازما و پارامترهای آن داشته باشد [4,5].

عوامل بسیاری در نحوه شکل‌گیری هر خط بینایی دخالت دارند. تشریح صحیح و مناسب آثار ناشی از این عوامل اجازه می‌دهد تا با انجام محاسبات لازم با نمایه خط بینایی مشاهده شده، بتوان اطلاعات دقیق‌تری از رفتار پلازما و پارامترهای پلازما از آن جمله نمونه‌های مختلف یونی درون پلازما (مکان هر خط بینایی)، دمای الکترونی و یونی (پهن‌شدگی دوپلری)، تأثیر میدان الکتریکی بر پلازما (پهن‌شدگی استارک)، تأثیر میدان مغناطیسی بر پلازما (پهن‌شدگی زیمان) و سرعت چرخش ذرات یونی (جاب‌جائی دوپلری) را به‌دست آورد.

مطالعه خطوط بینایی گسیلی این امکان را می‌دهد تا بتوان پارامترهای اساسی پلازما از جمله دما و چگالی ناخالصی‌ها را محاسبه نمود. بیناب‌سنجی غیرفعال با نور مرئی، روش مناسبی جهت بررسی رفتار پلازما و برهم‌کنش آن با دیواره مخزن و ذرات ناخالصی است. این روش، اثر تخریبی بر جنبش ذرات درون پلازما در طول مدت تخلیه الکتریکی ندارد. همچنین، در محدوده نور مرئی، اثری از بیناب‌های پیوسته ناشی از اثر تابش ترمزی و الکترون‌های گریزان، یافت نمی‌شود و تنها بیناب گسسته عناصر یونی و ناخالصی‌های موجود در پلازما قابل شناسایی و مطالعه هستند.

در این پژوهش، ابتدا مبانی نظری تحقیق ارائه خواهد شد. دستگاه‌های توکامک IR-T1، بیناب‌نما دو کاناله نور مرئی Ava-Spec و سیستم بایاس لیمیتور و جزئیات آنها در بخش 3 تشریح خواهد شد. سپس نتایج حاصل از بیناب‌نمایی در بخش 4 مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. با استفاده از روش بیناب‌سنجی غیرفعال خطوط بینایی چند ناخالصی یونی دارای تابش گسیلی قوی درون پلازما شناسایی شده و با انجام برازش و بهنجارش، پهنای مؤثر هر خط بینایی تعیین خواهد شد. با محاسبه پهن‌شدگی‌های دوپلری و تجهیزات و

به‌کمک اطلاعات به‌دست آمده از خطوط بینایی، دمای چند ناخالصی یونی و هیدروژن درون پلاسمای توکامک IR-T1 محاسبه خواهد شد. در نهایت تأثیر تغییرات ولتاژ بایاس لیمیتور بر پهنای مؤثر هیدروژن ($H\beta$)، پهن‌شدگی استارک، تأثیر تغییرات میدان‌های مغناطیسی بر پهنای مؤثر یون آهن (Fe I) و پهن‌شدگی زیمان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مبانی نظری تحقیق

کلیه اثر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر روی ذرات باردار، برخورد ذرات با یکدیگر و حرکت کاتوره‌ای و نسبی ذرات در پلازما، عوامل اصلی در پهن‌شدگی خطوط بیناب هستند. در یک اتم خاص، گذار الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر آن، موجب گسیل فوتونی با یک بسامد خاص می‌شود. با استفاده از خط بینایی گسیلی، پهنای مؤثر ($\Delta\lambda_{1/2}$) را می‌توان محاسبه نمود. در بسیاری از حالت‌های پهن‌شدگی، مهمترین عامل پهن‌شدگی خطوط طیفی، برهم‌کنش اتم جاذب با ذرات مجاور خود در درون پلازما است. از آنجائی که این ذرات غالباً بار دارند، پتانسیل الکتریکی آنها با آن بخش از هسته اتمی که دو قطبی الکترون‌ها را مقید می‌سازد، برهم‌کنش دارد. این برهم‌کنش در ترازهای انرژی اتم‌ها در یک بازه زمانی اختلال ایجاد می‌کند. عملکرد جمعی این اختلالات روی اجتماع اتم‌های جاذب باعث پهن‌شدگی خط طیفی می‌شود. افزایش فشار و در نتیجه افزایش چگالی ذرات پلازما سبب افزایش برخوردها و کاهش زمان حیات مؤثر یک حالت می‌شود. این امر منجر به پهن‌تر شدن خط طیفی می‌شود. بنابراین پهن‌شدگی استارک تابعی از چگالی ذرات پلازما می‌باشد. این پهن‌شدگی، نتیجه تأثیر میدان‌های الکتریکی کوچک اطراف هر اتم

توزیع آماری سرعت ذرات در امتداد خط دید (نمایه گوسین) منجر به این پهن‌شدگی می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود [7].

$$\Delta\lambda_{1/2}^D (nm) = \frac{2\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 kT (eV)}{m(a.m.u)}} \quad 4$$

T بیانگر دمای ناخالص یونی، λ_0 طول موج و m معرف جرم اتمی ذره ناخالصی می‌باشد.

در بیناب نمائی، پهن‌شدگی تجهیزات به عوامل مختلفی از جمله عرض شکاف، درجه تفکیک و پهن‌شدگی طبیعی خط بیناب مورد نظر بستگی دارد. پهن‌شدگی تجهیزات را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود [8,9]:

$$\Delta\lambda_{1/2}^{inst} = W \times \frac{d}{f \times m} \quad 5$$

d بیانگر فاصله بین دو شکاف متوالی در توری پراش برحسب mm می‌باشد. برای توری پراش با 1800 (شیار در میلیمتر) و f فاصله کانونی 75mm، عرض شکاف 5 μ m و زاویه پراش کمتر از 20 درجه، پهن‌شدگی تجهیزات برابر 0/037nm حاصل خواهد شد. در آشکارساز CCD که در نقطه کانونی پرتوهای خروجی قرار دارد، آرایه‌ای از آشکارسازهای نیمه هادی قرار دارد [10,11].

دو نمایه اصلی ساختار یک خط بینابی توسط توابع گاوسین و لورنتزین با پهنای مؤثر معرفی می‌شوند. ترکیبی از دو نمایه گاوسین، یک نمایه گاوسین جدید با پهنای مؤثری به صورت زیر است:

$$(\Delta\lambda_{1/2}^G)^2 = (\Delta\lambda_{1/2}^{G_1})^2 + (\Delta\lambda_{1/2}^{G_2})^2 \quad 7$$

و ترکیب دو نمایه لورنتزین، یک نمایه لورنتزین جدید با پهنای مؤثر زیر می‌باشد:

$$(\Delta\lambda_{1/2}^L) = (\Delta\lambda_{1/2}^{L_1}) + (\Delta\lambda_{1/2}^{L_2}) \quad 8$$

نمایه‌های پهن‌شدگی طبیعی، استارک و زیمن، نمایه‌های لورنتزین و پهن‌شدگی دوپلری و تجهیزات، نمایه‌های گاوسین هستند. ترکیبی از دو نمایه لورنتزین

بر روی آن است. وجود یک میدان الکتریکی، حالت‌های تبهگن را به حالت‌های ناتبهگن تبدیل می‌کند. پهنای مؤثر خطوط بینابی گسیلی هیدروژن و یون‌های هیدروژن‌گونه با عدد اتمی (Z) در حالت شبه تعادلی به صورت زیر محاسبه می‌شود [6]:

$$\Delta\lambda_{1/2}^s (nm) \cong 8.4 \times 10^{-22} \lambda_0^2 \times (n_i^2 - n_j^2) \left(\frac{Z}{Z_c}\right) n_c^{\frac{2}{3}} (m^{-3}) \quad 1$$

که در آن Z بیانگر بار الکتریکی هسته یون گسیلنده و z بیانگر بار الکتریکی ذرات هیدروژن است. λ_0 طول موج و n_z بیانگر چگالی ذرات هیدروژن می‌باشد. n_i و n_j به ترتیب بیانگر عداد کوآنتومی ترازهای بالا و پایین خط بینابی است. اثرات میدان مغناطیسی خارجی و القایی داخلی منجر به پهن‌شدگی خطوط بینابی (پهن‌شدگی زیمن) می‌شود. مؤلفه - π ($\Delta M = 0$) در امتداد خطوط میدان مغناطیسی تابش گسیلی ندارد. ولی مؤلفه موازی با میدان، دارای قطبش خطی است. مؤلفه - σ ($\Delta M = \pm 1$) در جهت میدان دارای قطبش دایره‌ای و در جهت عمود بر آن با سطح قطبیدگی عمود بر آن، دارای قطبش خطی است. میزان پهن‌شدگی زیمن به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد [7]:

$$\Delta\lambda_{1/2}^Z = 4.669 \times 10^{-8} m_l \cdot g_L \cdot \lambda_0^2 B \quad 2$$

که در آن، B بیانگر بزرگی میدان مغناطیسی برحسب تسلا، λ_0 طول موج خط بینابی برحسب نانومتر، m_l بیانگر عدد کوآنتومی مغناطیسی و g_L فاکتور لانداندا است. عامل لانداندا بستگی به نوع جفت شدگی دارد، که در آن جفت‌شدگی اسپین-مدار LS توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g_L(J, L, S) = 1 + [J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)] / [2J(J+1)] \quad 3$$

حرکت تصادفی و کاتوره‌ای ذرات در پلاسما که وابسته به دما هستند، منجر به پهن‌شدگی دوپلری می‌شود.

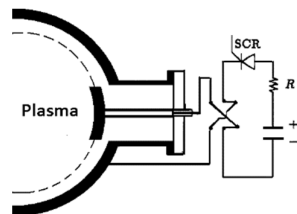
آشکار ساز دارای آرایه‌ای خطی از دیودهای نوری از جنس سیلیکون

(TOSHIBA TCD 1304, $8 \times 200 \mu\text{m}$) است.

در فرایند اندازه‌گیری‌های طول‌موج خطوط بینایی مختلف جهت جلوگیری از وقوع پدیده جابه‌جایی دوپلری، امتداد خط دید بر هر دو میدان‌های مغناطیسی چنبره‌ای و قطبی عمود می‌باشد. از این رو، مخروط امتداد خط دید درون پلاسمای توکامک بسیار باریک بوده و زاویه رأس مخروط کمتر از یک درجه است [16].

سیستم بایاس لیمیتر

سیستم بایاسینگ در توکامک IR-T1، شامل سه سیستم بایاسینگ شعاعی جداگانه. الکتروود بایاس، بایاس لیمیتر و بایاس لیمیتر به‌همراه تخلیه‌الکتریکی است. بسته به شرایط مورد نیاز، هر یک از این سیستم‌ها می‌تواند به‌طور جداگانه مورد استفاده قرار گیرد. بایاس لیمیتر شامل یک بخش قطبی با پهنای 2cm، ضخامت 2mm و طول قوس 10cm است (شکل 1). بایاس لیمیتر حدود 1cm در داخل پلاسمای توکامک (تا شعاع 1cm جلوتر از لیمیتر ثابت اصلی) قرار می‌گیرد. ولتاژ بایاسینگ بین لیمیتر و دیواره مخزن که به زمین متصل است، اعمال می‌شود [17].



شکل 1. نمودار طرح واره ای از بایاس لیمیتر نصب شده بر روی توکامک IR-T1 [17].

یک بانک خازنی که با برق شهری پر می‌شود و با تخلیه الکتریکی، ولتاژی بین لیمیتر و دیوارمخزن ایجاد

و گاوسین به یک نمایه خطی وویت¹ منجر می‌شود. یک رابطه ساده بین پهنای مؤثر تابع وویت و پهنای مؤثر نمایه‌های گارسین و لورنتزین به‌صورت زیر نشان داده می‌شود [12]:

$$\Delta\lambda_{1/2}^p \approx \left[\left(\frac{1}{2} \Delta\lambda_{1/2}^L \right)^2 + \left(\Delta\lambda_{1/2}^G \right)^2 \right]^{1/2} + \left(\frac{1}{2} \Delta\lambda_{1/2}^L \right) \quad 9$$

دقت نمایه وویت در رابطه⁹ حدود 0,01nm می‌باشد.

معرفی سیستم‌های مورد استفاده توکامک-IR-T1

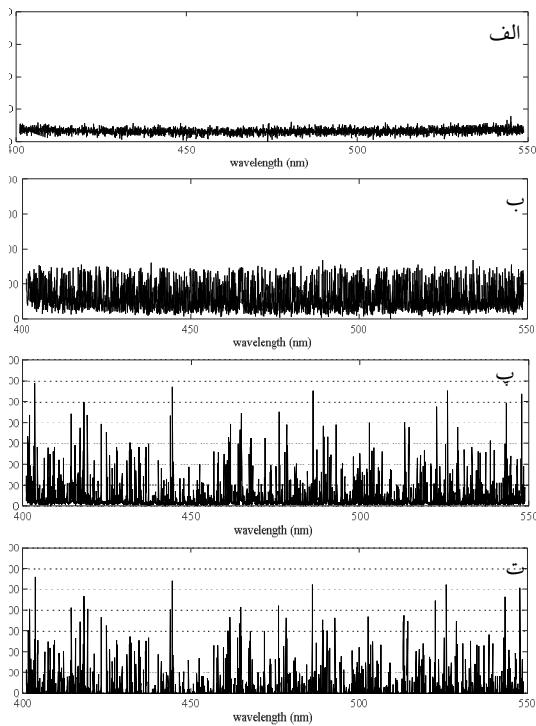
توکامک یک دستگاه مناسب جهت همجوشی به‌روش محصورسازی مغناطیسی (MCF) برای تولید توان همجوشی گرما-هسته‌ای کنترل شده، است. هدف از مطالعه رفتار پلازما و پارامترهای وابسته به آن، شناسایی شرایط مناسب برای تولید انرژی به‌کمک واکنش‌های هسته‌ای است. به‌همین خاطر، انواع مختلفی از توکامک‌ها در اندازه‌های بزرگ و کوچک ساخته شده است. توکامک IR-T1 با R شعاع اصلی 45cm، شعاع فرعی 12,5cm، I_p جریان قطبی پلازما 40kA و میدان مغناطیسی کمتر از 1T است که در سال 1372 ه.ش. در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران راه اندازی شد [13-14]. دیواره داخلی مخزن توکامک و لیمیترها از جنس فولاد زنگ نزن است که در طی تخلیه الکتریکی، بر اثر برهم‌کنش لبه پلازما با دیواره و لیمیترها، برخی ناخالصی‌های تولیدی به درون پلازما نفوذ می‌کنند.

دستگاه بیناب‌نما

بیناب‌نمای مورد استفاده، یک بیناب‌نمای دو کاناله نور مرئی با آرایه اپتیکی Czerny-Turner و توری پراش VD-1800Lines/nm است، که یک دریچه ورودی با پهنای 5میکرون و یک دریچه عددی $F=7.1$ ، زمان جمع شدن نور توسط آشکارساز را کنترل می‌کند.

¹Voigt

پلاسمای توکامک IR-TI به‌روشنی در شکل 3 دیده می‌شود.



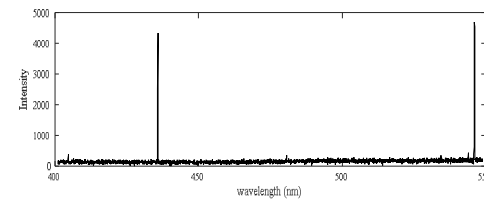
شکل 3. بیناب ثبت شده از طریق دریچه افقی دستگاه توکامک توسط بیناب نما *Spec-Ava* تحت شرایط، (الف) با دریچه ورودی نور بسته، (ب) بدون پلاسما، (پ) با پلاسما و بدون حفاظ سربی، و (ت) پلاسما به‌همراه حفاظ سربی در توکامک *IR-TI*.

استفاده از بیناب‌نمایی برای بازبینی ناخالصی‌های پلاسما را می‌توان به دو نوع فعال و غیرفعال طبقه‌بندی کرد. بیناب‌نمایی غیر فعال شامل مطالعه تابش گسیل طبیعی از یون‌های ناخالصی یا اتم‌های موجود در پلاسما گرم می‌باشد، در حالی‌که بیناب‌نمایی فعال، با ایجاد آشفستگی در یون‌ها یا اتم‌های موجود در پلاسما، باعث افزایش یا تغییر تابش گسیلی آنها می‌شود. برای بررسی انتقال ناخالصی پلاسما می‌توان از روش‌هایی مانند تزریق گاز یا قرص به‌درون پلاسما و ساییدگی بر اثر تابش لیزر استفاده کرد. هر دو روش تشخیصی برای مطالعه پارامترهای پلاسما همچون، تراکم، دما و چگالی ناخالصی‌های درون آن است.

می‌کند. یک کلید با توانائی اتصال سریع، جهت اعمال ولتاژ در فواصل زمانی کوتاه استفاده می‌شود. ولتاژ بایاسینگ در بازه -400V تا $+400\text{V}$ و جریان عبوری از طریق بایاس لیمیتر بین -40A و $+40\text{A}$ است. بایاسینگ ولتاژ برای هر دو حالت ولتاژهای مثبت و منفی انجام می‌شود.

کالیبراسیون

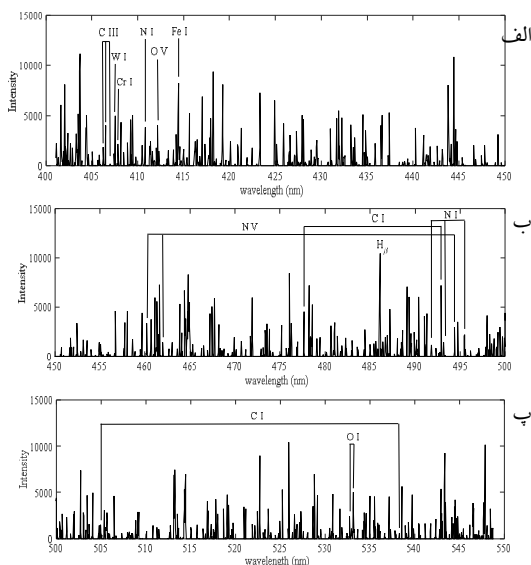
کالیبره کردن طول‌موج با هدف تعیین میزان دقت سیستم جهت اندازه‌گیری طول‌موج خطوط مختلف بیناب انجام می‌گیرد. برای این کار علاوه بر گواهی‌نامه ارائه شده توسط شرکت سازنده [15]، از لیزر زنون نیز استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که در طول موج‌های $439/318$ و $546/036$ نانومتر به‌ترتیب اختلافی برابر $(-0/002)$ و $(+0/003)$ نانومتر با مقادیر استاندارد آنها دارد (شکل 2).



شکل 2. بیناب ثبت شده از طریق دریچه افقی دستگاه توکامک توسط بیناب‌نمای *Ava-Spec* با استفاده از لیزر زنون.

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد نوفه ایجاد شده هنگام تخلیه الکتریکی به‌طور میانگین پنج برابر بیش از نوفه داخلی سیستم است. امواج الکترومغناطیسی گسیلی از پلاسما (مانند پرتو ایکس) هنگام تخلیه الکتریکی و میدان مغناطیسی قوی ناشی از عبور جریان از پیچ‌های مختلف توکامک، اثرات مخربی بر قطعات نوری و الکترونیکی دستگاه بیناب‌نما دارند. برای حذف این اثرات، دستگاه درون یک حفاظ سربی قرار داده می‌شود. این کار به حذف نوفه و در نتیجه شناسایی دقیق‌تر ناخالصی‌های یونی موجود در پلاسما کمک می‌کند. اثر حفاظ سربی بر بیناب گسیلی آشکارسازی شده

توزیع گاوسین منطبق بر طول موج خطهای مختلف بینایی می باشد. ضریب همبستگی هر خط طیفی گسیلی بیش از 0,994 است. بهره کوآنتومی، بیانگر میزان اثر بخشی مقدار اندازه گیری توسط قسمت آشکارساز بیناب نما برای تولید بار الکتریکی حاصل از برخورد فوتونها به سطح حساس به نور می باشد، که در این دستگاه این ضریب در بازه 70%-40% است. اندازه گیری های مربوط به خطوط بینایی گسیلی و میزان پهن شدگی ها نیازمند دستگاه بیناب سنجی با وضوح و توان تفکیک بالا حدود 0,01nm است. حال، با استفاده از معادله های ارائه شده در بخش قبل می توان به کمک پهن شدگی دوپلری دمای یون هر ناخالصی را محاسبه نمود. نتایج حاصل برای ناخالصی یونی انتخاب شده در جدول 3 ارائه شده است.



شکل 4. بیناب ثبت شده به وسیله بیناب نما Ava-Spec در طول مدت تخلیه الکتریکی و بعد از حفاظ گذاری سری در محدوده های الف: 400-450 nm، ب: 450-500 nm، و پ: 500-550 nm در توکامک IR-T1.

در آشکارسازهای CCD¹ از برخورد فوتون های گسیلی به سطح جدائی دیودها، جریان الکتریکی ایجاد می شود، به عبارت دیگر فوتون های نوری به سیگنال های الکتریکی تبدیل می شوند. سپس این سیگنال ها با انتقال به حافظه میانی و سپس به رایانه، پردازش و ثبت می شوند. با مطالعه اطلاعات پردازش شده می توان پارامترهای مختلف پلاسمای مورد بحث و بررسی قرار داد، که در بخش های زیر ارائه می شود.

شناسایی ناخالصی ها: خطوط بینایی حاصل از ناخالصی های مختلف با میزان تابش گسیلی و گذار الکترونی آنها شناسایی می شوند. با برازش و بهنجارش پهنای مؤثر هر خط بینایی ناخالصی هائی همچون یون های هیدروژن (486,135nm)، کربن (493,205nm)، نیتروژن (491,494nm) و اکسیژن (532,910nm) که در لبه پلاسمای و کربن (406,891nm)، نیتروژن (460,373nm)، اکسیژن (412,399nm)، آهن (420,203nm) کروم (407,764nm) و تنگستن (407,436nm) که در نزدیکی هسته شناسائی شده اند. بیناب ثبت شده در شکل 4، در سه بازه طول موجی 400-450nm، 450-500nm و 500-550nm و ناخالصی های یونی شناسایی شده همراه با گذار الکترونی آنها در جدول 1 ارائه شده است.

همان طور که قبلاً ذکر شد، شکل کلی هر خط بینایی گسیلی تابع پروفایل ویت است. اثر هر یک از این داده ها را می توان پس از انجام برازش و بهنجارش هر خط بینایی با پهنای مؤثر آن محاسبه کرد. برای این کار ابتدا باید کمیت هائی همچون ضریب همبستگی²، بهره کوآنتومی³ دستگاه بیناب نما را تعیین نمود. ضریب همبستگی یک دستگاه بیناب نما بیانگر احتمال وابستگی نتایج تقریبی شدت نسبی تابش گسیلی بر اساس تابع

³ Quantum efficiency

¹ Couple Charged Devise

² The coefficient of determination

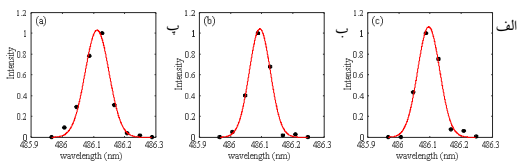
جدول 1. ناخالصی‌های یونی انتخابی مشاهده شده در بیناب به‌دست آمده از درون پلاسمای توکامک IR-T1 مطابق با شکل 4.

Ion (Multiple number)	Transition	Wavelength (nm) with peak intensities
H_{β}	2S - 5S	486.135(21700)
C I (6)	$2s^2 2p 3s^1 P^0 - 2s^2 2s^2 2p 4p^3 S$	538.0337, 505.2167(1696), 493.205 (1324), 477.1742
N I (10)	$2s^2 2p^2 (^3p) 3s^2 P - 2s^2 2p^2 (^3p) 4p^2 S^0$	495.023, 493.5117(873), 491.494(602), 410.9949(629)
O I (12)	$2s^2 2p^3 (^4s^0) 5d^5 P - 2s^2 2p^3 (^4s^0) 5d^5 D^0$	533.074(983), 532.968, 532.910(951)
C III (16)	$1s^2 2s 4f^3 F^0 - 1s^2 2s 5g^3 G$	407.026(695), 406.891(572), 406.794
N V (1)	$1s^2 3s^2 S - 1s^2 3p^2 P^0$	494.456(501), 461.998(511), 460.373(679)
O V (4)	$1s^2 2p (^2P_{3/2}^0) 3s^3 P^0 - 1s^2 2p (^2P_{3/2}^0) 3p^3 D$	412.399(2480)
Fe I (43)	$3d^7 (4F) 4S - 3d^7 (4F) 4P$	401.453, 404.581, 406.359, 407.173, 413.468, 414.387(8480), 418.779, 420.203(2662), 422.940
Cr I (198)	$3d^5 (^4G) 4s - 3d^5 (^4G) 4p$	402.809, 402.846, 402.849(2043), 403.909, 407.764(498)
W I (6)	$5d^5 (^6S) 6s - 5d^5 (^6S) 6p$	407.436(987), 429.461, 430.211(759), 426.938

جدول 2. دمای یونی و چگالی هیدروژن محاسبه شده برای ناخالصی‌های انتخاب شده در جدول 1.

Ionic Impurity	λ_0 (nm)	Measured $\Delta\lambda_{1/2}$ (nm)	M (a.m.u)	T_i (eV)
$H\beta$ (1)	486.135	0.091 ± 0.017	1	4.4 ± 0.2
C I (6)	493.205	0.042 ± 0.017	12.011	2.2 ± 0.2
N I (10)	491.494	0.041 ± 0.017	14.007	2.3 ± 0.2
O I (12)	532.910	0.041 ± 0.017	16.00	2.5 ± 0.2
C III (16)	406.891	0.068 ± 0.042	12.011	35.5 ± 0.5
N V (1)	460.373	0.063 ± 0.042	14.007	39.5 ± 0.5
O V (4)	412.399	0.069 ± 0.042	16.00	38.0 ± 0.5

(3kV) به مدت 19ms و در مرحله دوم (1/45kV) به مدت 16ms پس از مرحله اول بوده است. با اعمال برازش و بهنجارش بر روی هر خط، پهنای مؤثر هیدروژن ($H\beta$) به دست آمد. تخلیه الکتریکی درون پلازما در سه حالت، با به کارگیری بایاس لیمیتر (اعمال پتانسیل مثبت و سپس منفی) و بدون آن انجام گرفت. دیتای جمع آوری شده توسط بیناب‌نما در کل طول مدت تخلیه الکتریکی بوده است. خطهای بینابی به دست آمده در شرایط مذکور و پس از اعمال برازش و بهنجارش در شکل 6 نشان داده شده است، که براساس مقیاس شدت نسبی نسبت به طول موج است. بررسی این خطهای بینابی نشان می‌دهد که با اعمال ولتاژ بایاسینگ مثبت و منفی، میزان پهن شدگی خط طیفی به ترتیب حدود 9% و 13% کاهش می‌یابد. و نیز شدت تابش خط طیفی $H\beta$ با اعمال ولتاژ بایاسینگ منفی ($V_{bias}=-250V$) حدود 14% افزایش و با اعمال ولتاژ بایاسینگ مثبت ($V_{bias}=+250V$) حدود 10% کاهش می‌یابد.



شکل 6. خطهای بینابی برازش و بهنجارش شده هیدروژن $H\beta$ بدون اعمال بایاس لیمیتر ($V_{bias}=0V$), ب: با اعمال بایاس لیمیتر ولتاژ منفی ($V_{bias}=-250V$) و پ: با اعمال بایاس لیمیتر ولتاژ مثبت ($V_{bias}=+250V$).

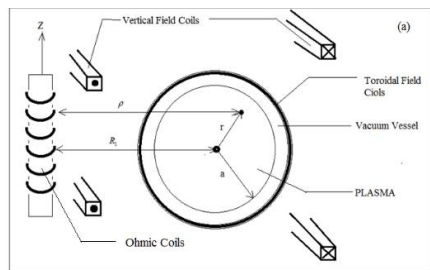
خط طیفی هیدروژن ($H\beta$) برای تعیین تغییرات دمای هیدروژن در ناحیه محیطی پلازما، به وسیله تغییر ولتاژ بایاس لیمیتر انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که بدون اعمال ولتاژ بایاسینگ، دمای هیدروژن در لبه

نتایج نشان می‌دهد که در محدوده طول‌موج‌های 550-400 نانومتر، کمینه دما ($\approx 2/3eV$) مربوط به ناخالصی‌های با عدد اتمی کم با درجه یونش پایین، مانند $O I, N I, C I$ و ($4/4eV$) برای هیدروژن ($H\beta$) است. بیشینه دما ($38eV$) مربوط به ناخالصی‌های یونی با عدد اتمی کم و درجه یونش بالا مانند $NV, C III$ و $O V$ است. مقایسه داده‌ها انطباق خوبی با آشکارساز اشعه ایکس سخت [18] برای تمام بیناب‌ها را نشان می‌دهد. همچنین محاسبات براساس گسترش بینابی در توکامک COMPASS نشان می‌دهد که دمای $H\beta$ هیدروژن در حدود $T(H\beta) \approx 1/1eV$ است و دمای الکترون در حدود $T_e \approx 8eV$ است [19]. در توکامک‌های COMPASS و ISTTOK [20] که از ناخالصی کربن $C III$ استفاده شده، دمای یونی در نزدیکی لبه پلازما را به ترتیب $30-35eV$ و $25eV$ گزارش شده است و حد بالای دمای یون کربن $C I$ برابر $2/3eV$ محاسبه شد.

اثر تغییرات ولتاژ بایاس لیمیتر بر پهن شدگی بیناب هیدروژن

روش بیناب نمائی غیر فعال با نور مرئی برای مطالعه خطوط بیناب نمائی در پلاسمای توکامک و بایاسینگ در لبه پلازما با اعمال ولتاژ (با بازه $-250V$ و $+250V$) بین لیمیتر و دیواره مخزن توکامک انجام می‌شود. ولتاژهای بایاسینگ، در طی مدت 10ms آخر هر تخلیه الکتریکی ($\sim 35ms$) توسط بایاس لیمیتر و در عمق 5 میلیمتری لبه پلازما به درون آن اعمال شد. طی مدت هر تخلیه الکتریکی، فشار ($2/9 \times 10^{-5} Torr$)، جریان پلازما (18kA)، ولتاژ اعمال شده به کوئل‌های میدان مغناطیسی تروئیدال (2/9kV) و ولتاژ اعمال شده به کوئل‌های میدان مغناطیسی ورتیکال در مرحله اول

پلازما استفاده می‌شود. این میدان، یک میدان مغناطیسی خارجی است که می‌تواند محصور سازی پلازما را ارتقا بخشد. میدان مغناطیسی عمودی توسط چهار پیچه در خارج از مخزن توکامک تولید می‌شود. میدان مغناطیسی عمودی توسط چهار پیچه واقع در بالا و پایین مخزن تولید می‌شود. موقعیت پیچه‌ها در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 7. طرح واره‌ای از مکان پیچه‌های میدان‌های مغناطیسی مختلف در توکامک IR-T1.

محصورسازی انرژی درون پلاسمای توکامک را می‌توان با تغییر پارامترهای لبه پلازما و هندسه مغناطیسی آن تنظیم کرد. پیچه‌های حامل جریان اطراف پیکربندی استوانه‌ای، یک میدان مغناطیسی شبه‌همگن را در امتداد محور سیلندر تولید می‌کنند. اندازه‌گیری میزان جریان‌های الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی حاصل از هر یک، تعیین شده و سپس میدان مغناطیسی برآیند محاسبه شد. نمودار تغییرات این جریان‌ها در طول مدت زمان تخلیه الکتریکی در شکل 8 ارائه شده است.

مطالعه نمودارها و محاسبات مربوطه نشان می‌دهد که افزایش جریان در پیچه‌ها، بویژه در پیچه‌های میدان عمودی، سبب افزایش میزان پهن‌شدگی زیمان، زمان محصورسازی مغناطیسی و جریان پلاسمای پلازما و کاهش دمای پلازما می‌شود. به عبارت دیگر، افزایش میدان در کنترل و حفظ پلازما توکامک اهمیت زیادی دارد و تأثیر آن بر خطوط بینایی هم قابل توجه و هم قابل اندازه‌گیری است.

پلازما باید به میزان $4/9\text{eV}$ باشد. دمای هیدروژن به‌طور متوسط با اعمال ولتاژ بایاسینگ مثبت و منفی به ترتیب 20٪ و 28٪ کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از محاسبات در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3. مقادیر محاسبه شده برای هیدروژن

$V_{bias} (V)$	$\Delta\lambda_{1/2}^V (nm)$	$\Delta\lambda_{1/2}^D (nm)$	$T_{H\beta} (eV)$
0	0.091	0.083 ± 0.017	4.9 ± 0.2
+250	0.083	0.074 ± 0.017	3.9 ± 0.2
-250	0.079	0.070 ± 0.017	3.5 ± 0.2

اثر تغییرات میدان‌های مغناطیسی بر پهن‌شدگی بیناب آهن (Fe I)

پلازما درون مخزن توکامک، یک توده شبه-گازی یونیزه است که تمایل به گسترش در طول شعاع دارد. هدف از ایجاد یک میدان مغناطیسی خارجی و القاء درونی در پلاسمای توکامک جداسازی پلازما از دیواره مخزن و پیامد آن حفظ پایداری و تعادل نیروها است. مهم‌ترین میدان مغناطیسی توکامک میدان مغناطیسی چنبره‌ای است [15,21]. جریان پلاسمای قطبی (I_p) باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی قطبی می‌شود. بزرگی این میدان تقریباً یک دهم برابر بزرگی میدان مغناطیسی چنبره‌ای است [22,23]. برهم‌نهی این دو میدان، یک میدان مغناطیسی مارپیچی ایجاد می‌کند که به حفظ تعادل پایدار پلازما کمک می‌کند. میدان چنبره‌ای، میدانی پایدار است که عملکردی ضعیفی در حفظ تعادل پلازما دارد. به همین دلیل، از میدان مغناطیسی عمودی برای حفظ تعادل و کنترل بیشتر

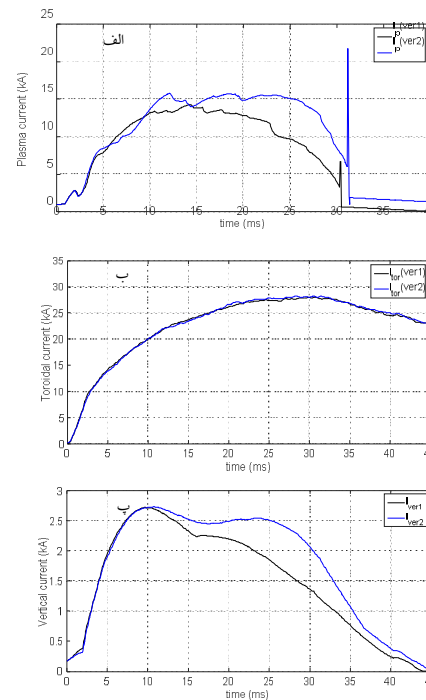
0/083 نانومتر است. داده‌های به دست آمده از بیناب نمائی در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4. اطلاعات بیناب آهن در پلاسمای توکامک IR-T1

$\lambda_0(\text{nm})$	Rel.Int. measured (1)	Rel.Int. measured (2)	$\lambda_{1/2}^{\text{observed}}$ (1)	$\lambda_{1/2}^{\text{observed}}$ (2)
407.1738	7080	-	-	-
413.2058	1475	5984	0.0812	0.0423
414.3868	-	-	-	-
414.7669	450	-	0.0782	-

نتیجه گیری

با نصب بیناب سنج نور مرئی بر روی توکامک IR-T1 بیناب گسیلی دریافتی از پلاسمای توسط بیناب سنج در محدوده 400-550 نانومتر اندازه گیری شده است. با شناسایی برخی از ناخالصی‌های یونی و گذارهای الکتریکی آنها و با استفاده از خطوط بینابی گسیلی و انواع پهن‌شدگی خطی همچون پهن‌شدگی‌های دوپلری و تجهیزات، دمای ناخالص یونی درون پلاسمای توکامک محاسبه شده است. بر طبق نتایج حاصله، دمای متوسط یونی در لبه پلاسمای حدود $2eV$ و در هسته آن حدود $40eV$ به دست آمد، که قابل مقایسه با دمای یونی حاصل با نتایج حاصل از توکامک‌های ISTTOK و COMPASS می‌باشد. آزمایشات بایاس لیمیتر بر روی لبه پلاسمای در توکامک IR-T1 نشان دهنده توانایی دستگاه‌های بیناب‌نمائی غیرفعال برای تحقیق تأثیر تغییرات ولتاژ بایاس لیمیتر بر روی پارامترهای پلاسمای است. اثرات ولتاژ بایاس لیمیتر بر دمای لبه پلاسمای در چندین تخلیه الکتریکی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. وابستگی شدت تابش و دمای خط بینابی هیدروژن به ولتاژ بایاس لیمیتر مشاهده شد. دما در لبه پلاسمای با اعمال ولتاژ بایاس مثبت یا منفی کاهش می‌یابد. شدت تابش با اعمال ولتاژ مثبت کاهش و با اعمال ولتاژ منفی، افزایش می‌یابد.



شکل 8. تغییرات زمانی الف: جریان پلاسمای، ب: چنبره ای و پ: عمودی (خط تیره رنگ مربوط به 1 و خط آبی رنگ مربوط به 2 است). برای مطالعه پهن‌شدگی زیمان خط بینابی گسیلی، لازم است که ناخالصی‌های مورد مطالعه دارای شدت تابش گسیلی قوی باشند تا بتوان آنها را تحت شرایط مختلف مشاهده نمود. به همین علت، یون آهن Fe $I(413/206nm)$ ، مورد استفاده قرار گرفت که دارای قله با شدت نسبی بالا تحت شرایط مختلف میدان مغناطیسی است. در این مطالعه، با تغییر جریان در پیچ‌های مختلف، میزان میدان مغناطیسی درون پلاسمای توکامک IR-T1 تغییر یافت (دو حالت 1 و 2). به کمک روش بیناب‌سنجی غیرفعال، یک بیناب گسسته از پلاسمای درون توکامک تهیه شد. با انجام برازش و بهنجارش، پهنای مؤثر خط طیفی در دو حالت آهن Fe $I [3d^7(4F)^4S \rightarrow 3d^7(4F)^4P]$ پهنای مؤثر در حالت 1 (میدان مغناطیسی $0,346 \pm 0,015$ تسلا) برابر $0,082 \pm 0,016$ نانومتر و در حالت 2 (میدان مغناطیسی $0,353 \pm 0,017$ تسلا) برابر برابر $\pm 0,017$

during ISTTOK tokamak discharges. *Review of Scientific Instruments* **74** 3 (2003) 2071-2074.

<https://doi.org/10.1063/1.1537039>

[6] H.J. Kunze. Introduction to plasma spectroscopy, *Springer Science & Business Media* **56** (2009).

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-02233-3>

[7] C.R. Vidal, J. Cooper, E.W. Smith. Hydrogen Stark-broadening tables, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **25** (1973) 37.

<https://doi.org/10.1086/190264>

[8] U. Fantz, Basics of plasma spectroscopy. *Plasma sources science and technology* **15** 4 (2006) S137.

<http://iopscience.iop.org/0963-252/15/4/S01>

[9] J.M. Lerner, A. Thevenon. The optics of spectroscopy. *Jobin-Yvon Optical Systems/Instrumentss SA* (1988).

<https://web.mit.edu/8.13/8.13d/manuals/Hydrogenic/j-y-theory-optics-spectroscopy.pdf>

[10] P.J.N.G.W.G. Scherrer, Estimation of the size and internal structure of colloidal particles by means of röntgen, *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* **2** (1918) 96-100.

[11] T. Sugie, A. Costley, A. Malaquias, C. Walker, Spectroscopic diagnostics for ITER, *Journal of Plasma and Fusion Research* **79** 10 (2003) 1051-1061.

<https://doi.org/10.1585/jspf.79.1051>

[12] I.H. Hutchinson, Principles of plasma diagnostics. *Plasma Physics and Controlled Fusion* **44** 12 (2002) 2603.

<https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/12/701>

[13] R. Alipour, M. Ghoranneviss, A. Salar Elahi. First investigation on plasma impurities of the IR-T1 tokamak. *AIP Advances* **7** 11 (2017) 115303.

<https://doi.org/10.1063/1.4990869>

محاسبات مربوط به اطلاعات به دست آمده از درون پلاسمای توکامک IR-T1 نشان می‌دهد که با افزایش بزرگی میدان مغناطیسی، میزان پهن‌شدگی خطهای بینایی کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر، افزایش این میدان، نقش مهمی در محصور سازی، کنترل پلاسمای درون توکامک و پیشگیری از اتلاف انرژی داراست. میزان پهنای مؤثر یون آهن نشان می‌دهد که تأثیر میدان مغناطیسی بر میزان پهن‌شدگی خط بینایی آن، قابل ملاحظه و قابل اندازه‌گیری است. افزایش جریان الکتریکی در پیچها، به‌ویژه در پیچهای میدان عمودی، منجر به افزایش میزان پهنای مؤثر، زمان محصورسازی مغناطیسی و جریان پلاسما و کاهش شدت نسبی خطوط بینایی می‌شود.

مرجع‌ها

[1] M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran, Fusion Physics. *International Atomic Energy Agency Vienna* (2012).

[ISBN 978-92-0-130410-0](https://doi.org/10.1017/s0263034605000789)

[2] S. Atzeni, J. Meyer. The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, *Hot Dense Matter*, OUP Oxford **125** (2004).

<https://doi.org/10.1017/s0263034605000789>

[3] B. Bigot, Inertial fusion science in Europe, *Journal de Physique IV (Proceedings)* **133** EDP sciences (2006) 3-8.

<https://doi.org/10.1051/jp4:2006133002>

[4] S.A. Ghorashi, M. Mahdavi. Broadening effects on opacity calculation of CH plasmas, *Physics of Plasmas* **24** 2 (2017): 023301.

<https://doi.org/10.1063/1.4976547>

[5] R.B. Gomes, C.A. Varandas, J.A. Cabral, E. Sokolova, S.R. Cortes. High dispersion spectrometer for time resolved Doppler measurements of impurity lines emitted

- [19] N. Hasanvand, M.R. Riazifar, R. Alipour, S. Meshkani, and M. Ghoranneviss. Improving plasma confinement by controlling hard X-ray, *Chinese Physics Letters* **33** 11 (2016) 115202. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/33/11/115202>
- [20] O. Van Hoey, Visible light measurements on the COMPASS tokamak. *Faculty of Engineering Department of Applied Physics*, PhD diss (2010).
- [21] H. Tsutsui, K. Nakayama, T. Ito, H. Ajikawa, S. Nomura, S. Tsuji-Iio, R. Shimada. A tokamak with nearly uniform coil stress based on the virial theorem. *Nuclear fusion* **44**, no. **9** (2004) 954. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/44/9/003>
- [22] I.S. Landman, G. Janeschitz. Calculation of poloidal magnetic field in tokamak code TOKES. In *35th EPS Conf. Crete, Greek*. (2008). <https://www.epj-conferences.org/doi/pdf/10.1051/epjconf/20083500507>
- [23] A.I. Morozov, L.S. Solov'ev. The structure of magnetic fields. *Reviews of Plasma Physics*. **2** (1966) 1. *Reviews of Plasma Physics, Volume 2*. Authorized translation from the Russian by Herbert Lashinsky, University of Maryland, USA. Edited by M. A. Leontovich. Published by Consultants Bureau, New York, 1966, p.1
- [14] A.Paknezhad, M. Ghoranneviss, R. Arvin, S. Mohammadi. Approaches on Measurements of the Shafranov Parameter and Plasma Displacement in Tokamaks, *Journal of Nuclear and Particle Physics* **3** 4 (2013) 55-62. <https://doi: 10.5923/j.jnpp.20130304.02>
- [15] P. Khorshid, M. Ghoranneviss, M. Razavi, S. Saboohi, M. Mollai, A. Hojabri, D. Dorrani, M.K. Salem, R. Tarkeshian, R. Arvin, S. Mohammadi, *Overview of Experimental Studies on IR-T1 Tokamak*, **INIS-XA--08N0893** (2008). http://www.academia.edu/download/54127615/Overview_of_Experimental_Studies_on_IR-T20170812-6963-11cvjtj.pdf
- [16] Avantes Enlightening Spectroscopy. *The Netherlands, Europe*, <http://www.avantes.com> (2015).
- [17] S. Menmuir, Visible spectroscopic diagnostics: Application and development in fusion plasmas. PhD diss., KTH, *AlbaNova University Centre, Sweden* (2007).
- [18] S. Meshkani, M. Ghoranneviss, M. Lafouti. Effect of Biasing on Electron Temperature in IR-T1 Tokamak. In *proceedings of the 5th International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE'14)* Florence, Italy (November 2014) 22-24. ISBN:978-960-474-400-8 <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Florence/DEEE/D-EEE-45.pdf>