

اندازه‌گیری طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند با استفاده از یک طیف‌سنج تابش ترمزی

مهسا معظمی قمصری^۱، احمد رضائی مقدم آرانی^{۱*}، اردوان کوهی^۲، بنفشه پورشهاب^۲، چاپار رسولی^۲ و فاطمه شاکری^۱

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

^۲پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

*اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: ramezamo@kashanu.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این پژوهش، طراحی و امکان‌سنجی ساخت یک طیف‌سنج تابش ترمزی برای اندازه‌گیری طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند می‌باشد. در این طرح مجموعه‌ای از فیلترهای سربی با افزایش انرژی قطع و دزیمترهای ترمولومینسانس GR-200 مورد استفاده قرار گرفتند. در روش ارائه شده، با استفاده از اصل برهم‌نهی، معادله ماتریسی بین طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند و دز جذبی در دزیمترهای ترمولومینسانس استخراج شد و مقادیر ماتریس ضرایب این معادله، با شبیه‌سازی مسئله توسط کد محاسباتی MCNPX، به دست آمد. پرتودهی توسط دستگاه توکامک دماوند انجام گرفت و طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند با اعمال روش‌های بازیابی و مجموعه نظری اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ابزار تشخیصی ساخته شده می‌تواند به‌عنوان یک طیف‌سنج فوتون مناسب برای بازیابی طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند در بازه انرژی ۱۰۰ keV تا ۲ MeV مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: توکامک دماوند، پرتوهای ایکس سخت، الکترون‌های گریزان، ابزار تشخیصی پرتو ایکس، کد محاسباتی مونت کارلو، طیف‌نگاری انرژی.

۱. مقدمه

با توجه به اهمیت تابش ترمزی در دستگاه‌های توکامک از جمله توکامک دماوند، در این کار تابش ترمزی حاصل از الکترون‌های گریزان مورد بررسی قرار گرفت. الکترون‌های گریزان^۱ الکترون‌هایی هستند که سرعت حرکت آن‌ها در داخل پلاسما بسیار بیشتر از سرعت حرکت الکترون‌های حرارتی پلاسما می‌باشد، به طوری که تحت هیچ

^۱ Runaway electrons

نیروی اصطکاکی برای کاهش انرژی قرار نمی‌گیرند. این مسئله باعث می‌شود این الکترون‌ها تا حد انرژی‌های نسبی، شتاب بگیرند. دو نوع ساز و کار تولید الکترون‌های گریزان در پلاسما با اعمال میدان الکتریکی وجود دارد. اولی فرآیند دریسر^۱ است [۱] که توسط پخش برخوردی الکترون‌ها با یون‌ها در فضای سرعت با سرعت‌هایی بالاتر از یک حد بحرانی، که نیروی الکتریکی بر نیروی اصطکاک ناشی از برخوردها غلبه می‌کند، ایجاد می‌شود. در برخورد الکترون‌ها بخشی از انرژی الکترون تلف می‌شود. بنابراین در این برخوردها، نیرویی غیرپایستار روی الکترون کار انجام می‌دهد و ما اثرات این نیروی غیرپایستار را در شباهت با آثار نیروهای غیرپایستار در مکانیک، نیروی اصطکاک می‌نامیم. ساز و کار دوم تولید الکترون‌های گریزان در اثر برخوردهای نزدیک الکترون‌های پرانرژی موجود با الکترون‌های حرارتی پلاسما است که اولین بار توسط سوکولوف^۲ مطرح شد [۲]. این فرآیند، بهمنی با ثابت زمانی $\tau_{ave} \propto E^{-1}$ فراهم می‌کند [۳].

ماشین توکامک در معرض گونه‌های مختلفی از ناپایداری‌های ماکروسکوپی قرار دارد. در برخی موارد پلاسما ناپایداری‌ها را تعدیل می‌کند به طوری که اختلال اساسی در نتایج عملیات به وجود نمی‌آید، اما در مورد خاصی از ناپایداری‌ها به نام گسیختگی، ناپایداری به تخریب پلاسما منتهی می‌شود به شکلی که بازایی مجدد آن امکان‌پذیر نیست.

در طول یک گسیختگی، انرژی ذخیره‌شده در پلاسما به دلیل فقدان محصورسازی به سرعت در دیواره محفظه و ادوات موجود در داخل محفظه تخلیه می‌شود. اخیراً مشخص شده است که فرآیند بهمنی نقش مهمی را در طول گسیختگی‌ها، وقتی که یک میدان الکتریکی چنبره‌ای بزرگ به صورت القائی تولید می‌شود، ایفا می‌کند که این امر منجر به تبدیل جریان

پلاسما به جریان گریزان می‌شود [۴-۵]. هر یک از الکترون‌های گریزان می‌توانند تا چندین مگا الکترون‌ولت انرژی حمل کنند. به دلیل کوچک بودن مناطق برخوردی که در محدوده چند ده سانتی‌متر مربع است، این الکترون‌ها می‌توانند به‌طور قابل ملاحظه‌ای از عمر اجزای مجاور با پلاسما بکاهند و یا حتی موجب تخریب موادی شوند که برای محافظت دیواره به کار برده شده‌اند [۶]. همچنین در تخلیه‌های گریزان که تمام جریان تخلیه توسط الکترون‌های گریزان حمل می‌شود، در لحظات وقوع ناپایداری‌های parail-poguts [۷] ستون پلاسما در زمان کوتاه با دیواره محفظه برخورد می‌کند. در طول این فاز به دلیل تابش ترمزی الکترون‌های گریزان در نزدیکی اتم‌های سنگین دیواره و محدودکننده^۳، گسیل پرتوهای ایکس سخت اتفاق می‌افتد. بنابراین تابش ایکس سخت یکی از آثار ثانویه الکترون‌های گریزان می‌باشد که به وسیله آن می‌توان اطلاعات مهمی در مورد این الکترون‌ها در طول جریان پلاسما به دست آورد [۸]. توکامک دماوند یک توکامک تحقیقاتی کوچک با سطح مقطع غیر دایروی است، که شامل دستگاه‌های تشخیصی متنوع و سیستم کنترل‌کننده مکان پلاسما فعال می‌باشد که برای پژوهش در زمینه گداخت هسته‌ای طراحی و ساخته شده است [۹].

در این مقاله هدف آن است که طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری طیف انرژی به دو روش فعال و غیرفعال صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه نقاط مختلف توکامک دارای شدت‌ها و طیف‌های مختلفی می‌باشد مطالعه طیف انرژی با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری فعال با محدودیت‌های مهمی مواجه می‌شود. زیرا برای اندازه‌گیری هم‌زمان شدت پرتوهای ایکس سخت در زوایای فضایی مختلف تعداد زیادی آشکارساز مورد نیاز است و این آشکارسازها در فواصل نزدیک به دستگاه که

¹ Dreicer² Sokolov³ Limiter

۲. تئوری آزمایش

طیف تابش ترمزی به‌طور معمول با روش‌های فوتوهسته‌ای^۱ و فیلترکردن تفاضلی^۲ اندازه‌گیری می‌شود. روش فوتوهسته‌ای [۱۱-۱۲] به فوتون‌هایی با انرژی بالاتر از ۵ MeV محدود می‌شود. زیرا سطح مقطع برهمکنش فوتوهسته‌ای در انرژی‌های کم‌تر از ۵ MeV به سرعت کاهش می‌یابد. روش فیلترکردن تفاضلی [۱۳] با استفاده از تعداد زیادی فیلتر با ضخامت‌های مختلف و اندازه‌گیری شار فوتون‌های خروجی از فیلتر کار می‌کند. شار فوتون با روش‌های غیرمستقیم مانند دزیترهای ترمولومینسانس، صفحه عکس و دیودهای پین^۳ اندازه‌گیری می‌شود. مطالعات انجام شده بر روی توکامک دماوند نشان می‌دهد که انرژی بخش قابل توجهی از فوتون‌های ایکس سخت در بازه انرژی keV ۵۰۰ تا ۱ MeV بوده و حتی از ۱ MeV هم فراتر می‌رود [۱۴]. در این تحقیق برای اندازه‌گیری طیف انرژی تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان توکامک دماوند از روش فیلترکردن تفاضلی استفاده شده است.

بنابر اصل برهم‌نهی یا جمع آثار، مقادیر دز جذبی در دزیترهای ترمولومینسانس پشت هر فیلتر برابر با مجموع شدت فوتون‌های تولید شده توسط هر یک از n بازه انرژی طیف پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند به‌صورت جداگانه می‌باشد. بنابراین با گسسته‌سازی و تقسیم‌بندی طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند به n گروه انرژی و ثبت دز جذبی مربوط به هر گروه توسط دزیترهای ترمولومینسانس، طیف پرتوهای ایکس سخت قابل بازیابی است. این توضیحات می‌تواند به شکل ماتریسی رابطه ۱ نشان داده شود:

اغلب مطالعات در آن نواحی صورت می‌گیرد به اشباع می‌رسند. همچنین نصب تعداد زیادی آشکارساز در اطراف توکامک هزینه‌بر نیز می‌باشد، لذا برای بررسی طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت گسیلی توکامک دماوند از ابزارهای تشخیصی غیرفعال استفاده شد.

این تحقیق به طراحی و ساخت یک سامانه آشکارسازی غیرفعال برای اندازه‌گیری طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت اختصاص دارد. با توجه به کوتاه بودن مدت زمان گسیل این پرتوها به یک سامانه تشخیصی نیاز است که بتواند در این پهنای زمانی بیش‌ترین داده را ثبت کند. بنابراین در میان ابزارهای غیرفعال حساس به پرتو ایکس، دزیتر ترمولومینسانس (LiF:Mg,Cu,P (GR-200 با ترکیب معین انتخاب و به‌کارگرفته شد. سامانه تشخیصی ساخته شده با استفاده از فیلترهای سربی با ضخامت‌های مختلف و دزیترهای ترمولومینسانس انتخابی می‌تواند به‌عنوان یک طیف سنج فوتون مناسب برای بازیابی طیف تابش ترمزی توکامک دماوند به‌کارگرفته شود.

در این مقاله ابتدا فاز نظری روش به‌کارگرفته شده برای بازیابی طیف انرژی بیان می‌شود. ماتریس تبدیل با شبیه‌سازی کد MCNPX [۱۰] محاسبه و اعتبارسنجی آن برای بازیابی طیف انرژی فرضی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرح ابزار، طراحی و ساخت سیستم تشخیصی مورد استفاده در آزمایش معرفی می‌گردد. در ادامه به شرح شرایط و روش آزمایش و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی پرداخته می‌شود و در بخش آخر دو روش ریاضی برای بازیابی طیف انرژی معرفی می‌شود و پس از بررسی نتایج محاسبات طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند گزارش می‌گردد.

¹ Photonuclear techniques

² Differential filtering

³ PIN Diode

$$A = R \times Y \quad (۳)$$

که در آن R ماتریس ضرایب برای تبدیل طیف تابش ترمزی الکترون‌های گریزان به مقادیر دز جذبی می‌باشد. رابطه ۳ نشان می‌دهد که دز جذبی در دزیمترهای ترمولومینسانس برابر با مجموع دز تولید شده به وسیله طیف پرتوهای ایکس سخت توکامک در n گروه انرژی است. با توجه به رابطه ۳ دز جذبی پشت آمین فیلتر می‌تواند توسط رابطه زیر نمایش داده شود:

$$A_i = R_{i1}Y_1 + R_{i2}Y_2 + \dots + R_{ij}Y_j + \dots + R_{im}Y_m \quad (۴)$$

۳. محاسبه ماتریس تبدیل R

به منظور محاسبه ماتریس تبدیل R طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت توکامک دماوند به ۱۰ گروه انرژی تقسیم‌بندی شد. دز مربوط به هر گروه انرژی پس از عبور از ۱۶ ضخامت مختلف سیستم تشخیصی طراحی شده، در TLD ها ذخیره می‌شود. با استفاده از کد $MCNPX$ چشمه فوتون‌های تک انرژی، برهمکنش فوتون با هدف جامد، هندسه ابزار تشخیصی و TLD ها با به‌کارگیری ابعاد دقیق، چگالی مواد و سطح مقطع‌ها به طور کامل شبیه‌سازی شدند و ضرایب ثابت ماتریس تبدیل $R_{16 \times 10}$ محاسبه گردید. در این راستا کد برای تعیین ۱۶۰ مؤلفه ماتریس R اجرا شد. در کلیه محاسبات انجام شده توسط کد $MCNPX$ خطا کم‌تر از ۱ درصد می‌باشد.

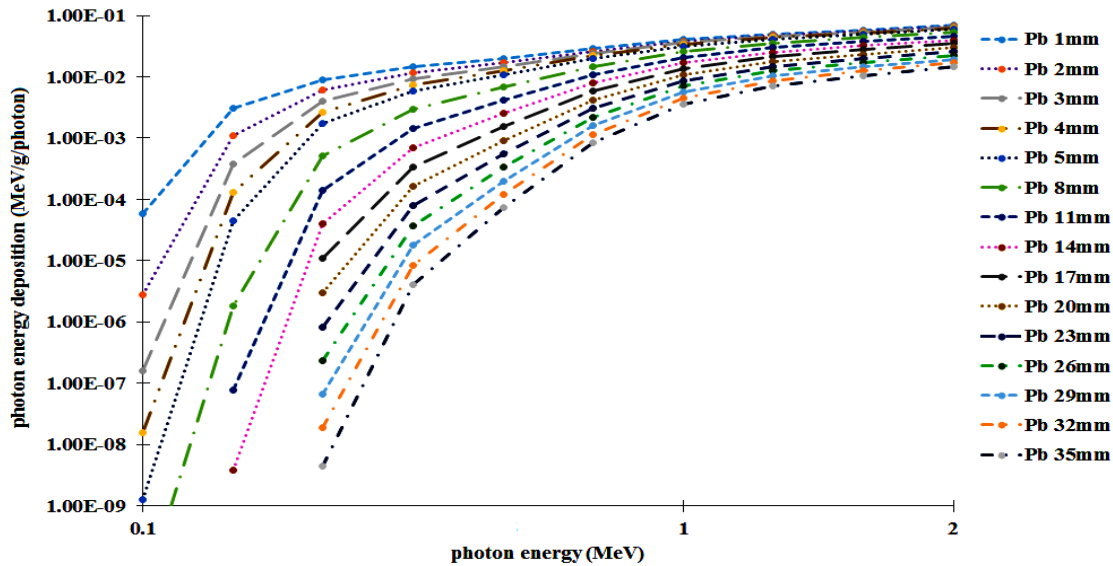
شکل ۱ منحنی پاسخ انرژی ذخیره شده در دزیمترها پس از عبور از ضخامت‌های مختلف فیلتر سربی می‌باشد که در آن هر خط نمایانگر ضخامت مختلف فیلتر سربی است که در طراحی نهایی ابزار تشخیصی، به‌کارگرفته شده‌اند. منحنی پاسخ نشان می‌دهد که ابزار تشخیصی طراحی شده قادر به جداسازی انرژی فوتون‌ها در بازه انرژی مورد نظر است.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1n} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & B_{ij} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ B_{m1} & B_{m2} & \dots & B_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_j \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad or \quad X = B \times Y \quad (۱)$$

که در آن X ماتریس شدت طیف پرتوها پشت هر فیلتر، Y ماتریس شدت طیف تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان توکامک و B ماتریس ضرایب برای تبدیل طیف تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان به طیف تابش پرتوها پشت هر فیلتر می‌باشد. ضرایب B_{ij} اثر نسبی پرتوهای ایکس سخت آمین گروه انرژی روی پرتوهای تولید شده پس از عبور از آمین فیلتر می‌باشند. دز جذبی در دزیمترهای ترمولومینسانس پشت هر فیلتر برابر با مجموع دز تولید شده به وسیله تمام گروه‌های انرژی می‌باشد که توسط رابطه ۲ توضیح داده شده است:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \dots & D_{1m} \\ D_{21} & D_{22} & \dots & D_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & D_{ij} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_{m1} & D_{m2} & \dots & D_{mm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} \quad or \quad A = D \times X \quad (۲)$$

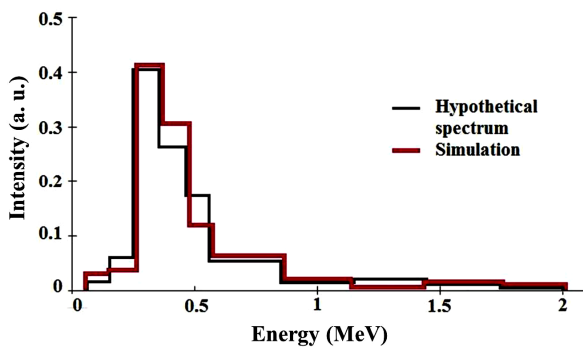
که در آن A ماتریس دز جذبی پشت فیلترها است که توسط دزیمترهای ترمولومینسانس اندازه‌گیری می‌شود. D ماتریس ضرایب برای تبدیل طیف پرتوها پشت هر فیلتر به مقادیر دز جذبی می‌باشد. D_{ij} اثر نسبی تابش آمین گروه انرژی روی دز جذبی توسط دزیمتر ترمولومینسانس پشت آمین فیلتر است. تفاوت بین المان‌های ماتریس D وابسته به ضریب جذب مواد فیلتر و پاسخ دز آشکارسازهای ترمولومینسانس به انرژی فوتون‌ها می‌باشد. برای ایجاد رابطه‌ی بین طیف تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان توکامک و مقادیر دز جذبی از رابطه ۱ و ۲ استفاده شد. ماتریس A به شکل زیر می‌باشد:



شکل (۱): منحنی پاسخ انرژی به‌جامانده در TLDها به‌عنوان تابعی از انرژی فوتون و ضخامت فیلترها که در کد MCNPX شبیه‌سازی شده.

۴. اعتبار سنجی محاسبات با کد MCNPX

پس از محاسبه ماتریس تبدیل، یک اعتبار سنجی با استفاده از کد MCNPX و یک سری روش محاسباتی انجام گرفت. به این منظور از یک طیف فوتون فرضی استفاده شد. چشمه فوتون با طیف فرضی، فیلترها و TLDها به‌طور کامل در کد شبیه‌سازی شدند و ماتریس A برای یک هندسه ثابت محاسبه گردید.



شکل (۲): مقایسه طیف چشمه فرضی و طیف شبیه‌سازی شده.

۵. ابزار و روش‌ها

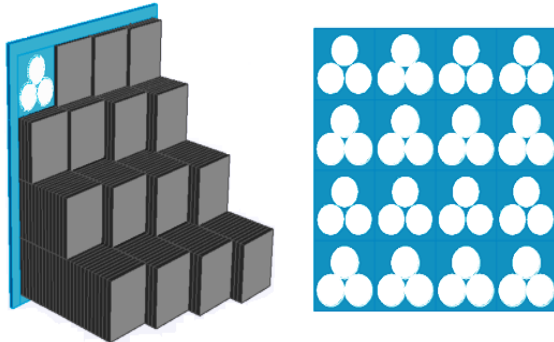
۱.۵. دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD)^۱

در این مقاله، برای اندازه‌گیری طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت گسیل‌شده از توکامک دماوند از روش اندازه‌گیری محلی دز استفاده شده است. استفاده از این روش مطالعه تابش را با دقت و تمرکز بالا ممکن می‌سازد. در این کار تحقیقاتی برای اندازه‌گیری دز تابش ایکس سخت از ۵۰ عدد دزیمتر ترمولومینسانس LiF:Mg,Cu,P ، تحت نام تجاری GR-200

ردیابی ذرات در کد MCNPX شامل تمام برهمکنش‌هایی است که ممکن است برای ذرات اتفاق بیفتد، (برهمکنش کولنی، پس پراکنی و غیره)، بنابراین تمام فرآیندهای ممکن در محاسبه ماتریس A برای بازیابی طیف انرژی چشمه در نظر گرفته شده است. با قرارگیری ماتریس تبدیل R و A در رابطه ۳ طیف انرژی چشمه فرضی محاسبه شد. شکل ۲ نشان می‌دهد که طیف چشمه تطابق بسیار خوبی با طیف شبیه‌سازی دارد. تفاوت بین دو طیف کم‌تر از ۷٪ است که به‌طور صریح اعتبار روش به‌کارگرفته شده برای بازیابی طیف آزمایشگاهی را تأیید می‌نماید.

^۱ Thermoluminescence Dosimetry

با یکدیگر برهم‌نهی نداشته باشند. در شکل ۳ مکعب‌ها با ارتفاع مختلف نماینده فیلترهای سریبی و دایره‌های سفید نماینده دزیمرهای نصب شده است.



شکل (۳): نمایی از سامانه تشخیصی ساخته شده.

۶. شرح آزمایش

توکامک دماوند از دسته توکامک‌های کوچک با سطح مقطع D شکل است که تحت نظارت پژوهشکده فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای وابسته به پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران قرار دارد. در شکل ۴ نمایی از توکامک دماوند نشان داده شده است. این توکامک دارای شعاع اصلی ۳۶ cm، شعاع فرعی ۷ cm و کشیدگی سطح مقطع پلاسما ۱-۱/۴ می‌باشد. پهنای زمان جریان پلاسما حدود ۲۲ ms بوده، بیشینه جریان پلاسما حدود ۴۰-۳۵ kA و بیشینه میدان مغناطیسی چنبره‌ای ۱/۲ تسلا می‌باشد. در توکامک دماوند با توجه به گرمایش اهمی و میدان الکتریکی چنبره‌ای القایی، الکترون‌های گریزان می‌توانند در طول هر شات تولید شوند. میدان الکتریکی بحرانی برای تولید الکترون‌های گریزان حدود $0.9c \approx V$ و سرعت بحرانی 0.2 Vm^{-1} است [۱۶]. الکترون‌های گریزان در آغاز تحت ساز و کار دریسر تولید و سپس با ساز و کار بهمنی تکثیر می‌یابند. یکی از مهم‌ترین نواحی در توکامک دماوند، ناحیه محدودکننده است، زیرا الکترون‌های گریزان بیش‌ترین شانس را برای

استفاده شده است. این دزیمر بهترین کارایی را در بازه انرژی مورد نظر داشته و به دلیل اندازه کوچک آن قابلیت اندازه‌گیری محلی دز را دارا می‌باشد [۱۵]. قبل از شروع آزمایشات به منظور آماده‌سازی TLDها، فرآیند بازپخت^۱ به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره انجام گرفت. سپس TLDها تحت تابش یکنواخت چشمه ^{137}Cs قرار گرفتند و با قرائت دزیمرها ضریب حساسیت (ECC^2) مربوط به هر TLD محاسبه شد. برای تعیین فاکتور کالیبراسیون ۱۸ عدد TLD تحت تابش یکنواخت چشمه ^{137}Cs با دزهای مختلف قرار گرفتند و به این ترتیب فاکتور کالیبراسیون با استفاده از روابط مربوطه محاسبه گردید.

۲.۵. ساخت سامانه تشخیصی

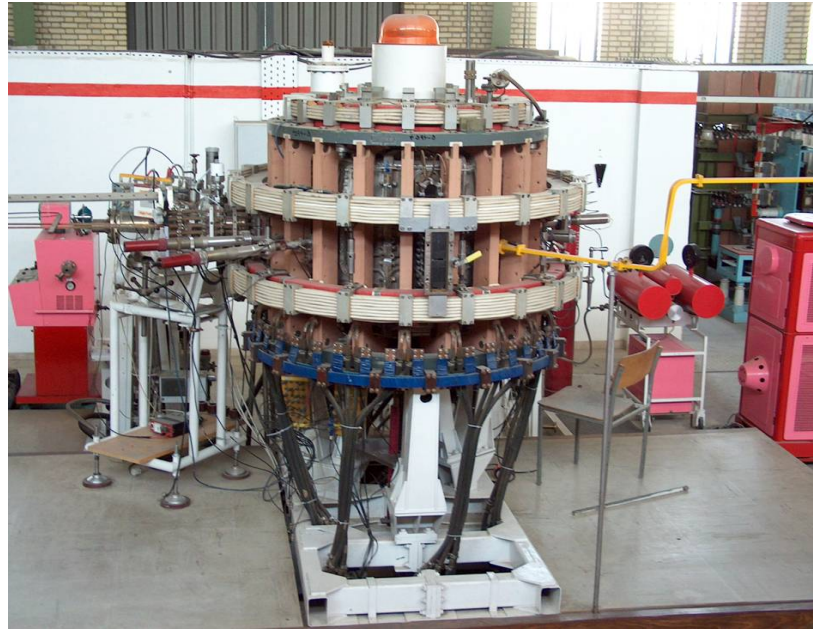
طرحی از طیف‌سنج تابش ترمزی ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است. طرح پیشنهادی بر مبنای جذب انرژی پرتوهای ایکس سخت در دزیمرهای ترمولومینسانس پس از عبور از فیلترهای مختلف سرب می‌باشد. مفهوم فیلتراسیون مستلزم آن است که شار تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان از نظر فضایی روی ابزار تشخیصی ساخته شده یکنواخت باشد. بنابراین انتخاب دقیق ابعاد فیلترها بسیار مهم و ضروری است.

طیف‌سنج شامل ۱۵ ضخامت مختلف از فیلتر سربی می‌باشد. ابعاد هر قطعه سرب $1 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ در نظر گرفته شد و برای ساخت ۱۵ فیلتر مورد نظر، ۲۵۷ قطعه سرب با مشخصات ذکر شده به کار گرفته شد. با توجه به ابعاد فیلترها و با هدف محاسبه دز نقطه‌ای و ثبت بیش‌ترین داده، پشت هر فیلتر سه عدد TLD تعبیه شده است. چیدمان TLDها به گونه‌ای است که در کم‌ترین فاصله از یکدیگر قرار گرفته و

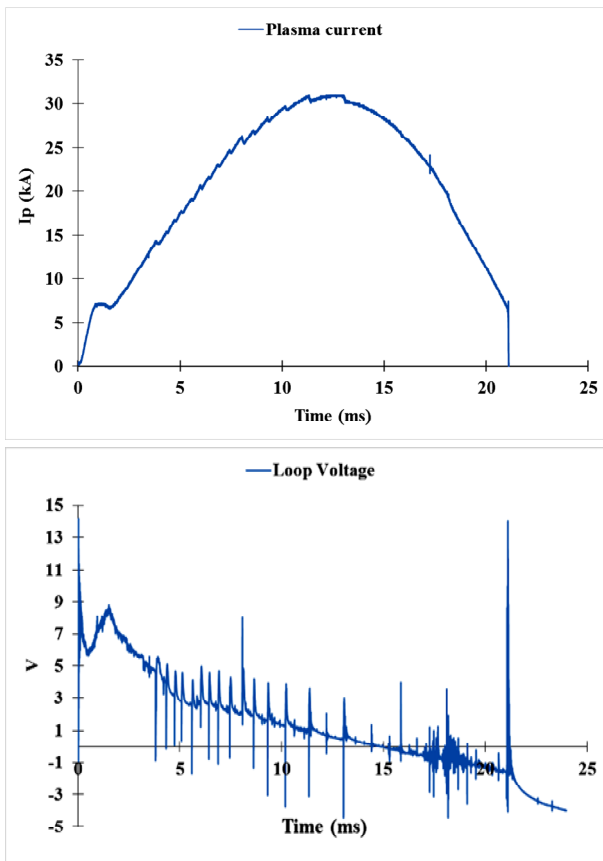
¹ Annealing

² Element Correction Coefficient

برخورد مستقیم با آن دارند. دز اندازه‌گیری شده در ناحیه محدودکننده، پروب‌های مغناطیسی و محدوده‌های اتصال بخش‌های محفظه خلاء تا 30 mSv/shot گزارش شده است [۱۷].

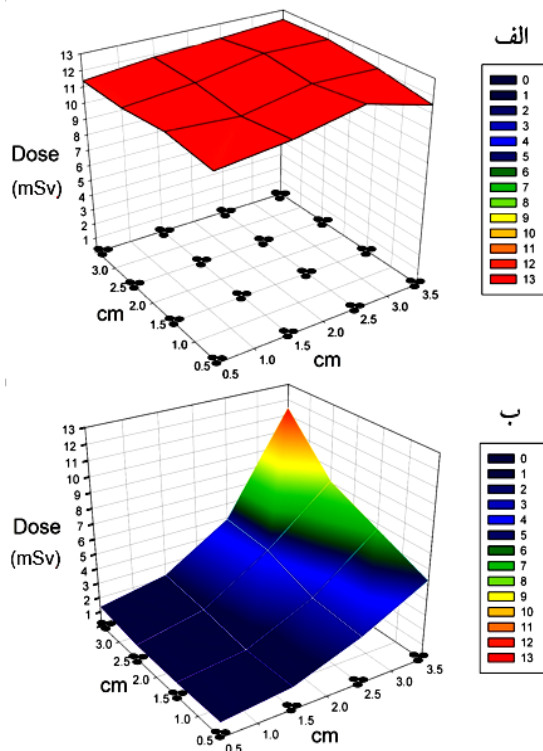


شکل (۴): نمایی از توکامک دماوند.



شکل (۵): تحول زمانی جریان پلاسما و ولتاژ حلقه.

در توکامک دماوند دو محدودکننده ثابت و متحرک وجود دارد که تحت زاویه چنبره‌ای 189° از یکدیگر جدا شده‌اند. محدودکننده ثابت و متحرک به ترتیب در زاویه‌ی چنبره‌ای 297° و 108° قرار گرفته‌اند. برای مطالعه طیف پرتوهای ایکس سخت، طیف‌سنج ساخته شده در فاصله 1 m از محدودکننده ثابت و در صفحه استوای توکامک قرار گرفت. پرتودهی به ازای 30 شات در 3 نوبت انجام گرفت که جریان بیشینه پلاسما در آن $28-32 \text{ kA}$ می‌باشد. شکل ۵ تحول زمانی جریان پلاسما و ولتاژ حلقه را برای یک شات نوعی نشان می‌دهد. در فاز اول آزمایشات به منظور اطمینان از اینکه توزیع فضایی و طیفی پرتوهای ایکس سخت در مکان انتخابی برای سیستم تشخیصی یکنواخت است، تعداد 48 دزیتر در موقعیت قراردادی در مقابل محدودکننده قرار گرفتند. نتایج پرتودهی به ازای 30 شات از توکامک دماوند ثبت شد.



شکل (۶): توزیع فضایی دز تابش‌های ایکس سخت بر روی صفحه TLDهای واقع در فاصله ۱ m توکامک دماوند.

۷. بحث و نتایج

در این مرحله به منظور بازیابی طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند از دو روش استفاده شد. روش اول روش غیرمستقیم یا تکرار گاوس سایدل^۷ می‌باشد که برای حل دستگاه معادلات خطی به فرم $Ax = b$ است که در آن A و b ماتریس ضرایب معادلات خطی و x بردار حاوی جواب معادلات خطی است. در این روش فرآیند تکرار تا برآورده شدن شرط همگرایی لازم ادامه یافت [۱۸]. با قرار دادن مقادیر دز جذبی به دست آمده از فاز دوم و سوم آزمایش در رابطه ۳ طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت به روش غیرمستقیم گاوس سایدل محاسبه شد. شکل ۷ مقایسه بین طیف تابش ایکس سخت ناشی از الکترون‌های گریزان در توکامک دماوند [۱۳] و طیف بازیابی شده با روش تکرار

جدول ۱ میزان شارژ بانک‌های خازنی توکامک دماوند در هر شات را نشان می‌دهد. فشار محفظه خلاء در تمامی شات‌ها 10^{-5} Ton می‌باشد.

جدول (۱): میزان شارژ بانک‌های خازنی توکامک دماوند در این پژوهش.

ولتاژ (kV)	SFB1 ^۱	EFB2 ^۲	EFB1 ^۳	SIB ^۴	FIB ^۵	TFB ^۶
۱/۹	۱/۳	۱/۷	۲/۶	۴/۱	۱/۸	

قبل از شروع آزمایشات برای لحاظ کردن اثر دز زمینه در محاسبات، تعداد ۲ دزیتر در یک مکان تحت شرایط نرمال به مدت ۳ روز در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. دز دریافتی توسط تعداد ۵۰ دزیتر با تمهیدات لازم توسط دستگاه قرائت-گر Harshow مدل ۴۵۰۰ خوانده شد. توزیع فضایی دز تابش‌های ایکس سخت بر روی صفحه TLDهای واقع در فاصله ۱ m توکامک دماوند، در شکل ۶-الف نشان داده شده است.

در فاز دوم آزمایش طیف‌سنج ساخته شده تحت شرایط آزمایشی ثابت در موقعیت ذکر شده مقابل محدودکننده قرار گرفت. انرژی فوتون‌های ایکس سخت در طول ۳۰ شات پس از عبور از فیلترها در تعداد ۴۸ دزیتر ذخیره شده و مقادیر دز مربوطه خوانده و ثبت گردید. در شکل ۶-ب کاهش دز جذبی ناشی از فوتون‌های ایکس سخت پس از عبور از ضخامت‌های مختلف فیلتر سربی سیستم تشخیصی نشان داده شده است. در فاز سوم آزمایشات برای حصول اطمینان از صحت داده‌های آزمایشی، فاز دوم مجدداً تکرار گردید و داده‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

^۱ Shaping Field Bank1

^۲ Equilibrium Field Bank2(Slow)

^۳ Equilibrium Field Bank1(Fast)

^۴ Slow Inductor Bank

^۵ Fast Inductor Bank

^۶ Toroidal Field Bank

^۷ Gauss-Seidel method

در این روش طیف بازیابی شده در انرژی‌های پایین با طیف آزمایشگاهی مطابقت دارد ولی در انرژی‌های بالا به ازای چندین بازه شکست انرژی، شدت پرتوهای ایکس سخت صفر گزارش شده است.

۸. نتیجه‌گیری

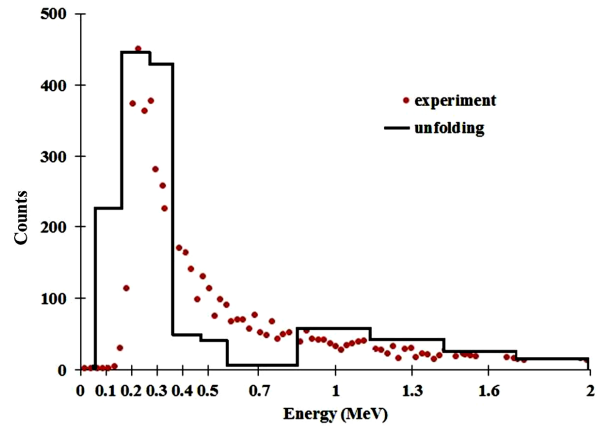
در این کار تحقیقاتی امکان‌سنجی ساخت یک طیف‌سنج با استفاده از فیلترهای مختلف سرب و دزیترهای ترمولومینسانس GR-200 برای اندازه‌گیری غیرمستقیم طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند بررسی گردید.

با استفاده از روش به‌کارگرفته شده بر پایه اصل برهم‌نهی، سهم پرتوهای ایکس سخت در تولید دز جذبی در دزیترهای ترمولومینسانس GR-200 توسط کد شبیه‌سازی MCNPX محاسبه شد و ضرایب ماتریس تبدیل به‌دست آمد. صحت این روش با تعریف یک طیف چشمه فرضی توسط کد مذکور و بازیابی آن بررسی گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ابزار تشخیصی ساخته شده با استفاده از مجموعه نظری، یک راه حل مناسب برای طیف‌سنجی تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های گریزان توکامک دماوند ایجاد کرده است. به‌منظور بازیابی طیف انرژی پرتوهای ایکس سخت خروجی از توکامک دماوند از دو روش حل دستگاه معادلات خطی استفاده شد. نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که طیف بازیابی شده به روش گاوس‌سایدل تطابق خوبی با طیف آزمایشگاهی دارد.

۹. تشکر و قدردانی

بدین وسیله از جناب آقای دکتر موافقی برای در اختیار گذاشتن برخی از وسایل و دستگاه‌های آزمایشی تشکر و قدردانی می‌شود.

گاوس‌سایدل را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که طیف بازیابی شده به روش غیرمستقیم در تمام بازه‌های شکست انرژی با طیف آزمایشی مطابقت دارد.

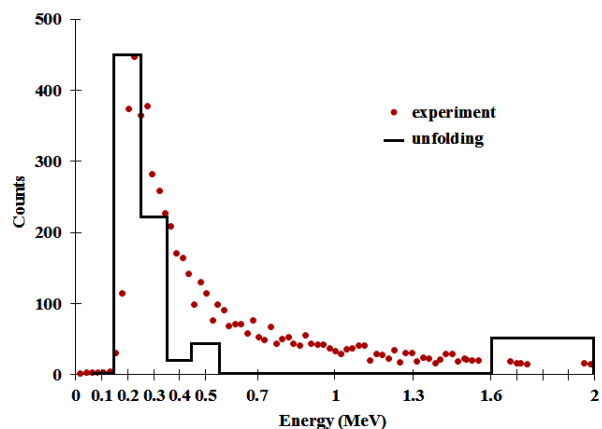


شکل (۷): مقایسه طیف آزمایشی و طیف بازیابی شده به روش گاوس-سایدل

روش دوم حل دستگاه معادلات به روش حداقل مربعات غیر منفی^۱ به صورت رابطه ۵ می‌باشد:

$$\min \|Ax - b\|^2, x \geq 0 \quad (5)$$

از روش فوق برای بازیابی طیف پرتوهای ایکس سخت برای دو سری داده آزمایشگاهی استفاده شد. شکل ۸ مقایسه بین طیف تابش ایکس سخت ناشی از الکترون‌های گریزان در توکامک دماوند و طیف بازیابی شده به روش NNLS را نشان می‌دهد.



شکل (۸): مقایسه طیف آزمایشی و طیف بازیابی شده به روش NNLS.

^۱ Non Negative Least Square

۱۰. مراجع

- [1] H. Dreicer. Electron and ion runaway in a fully ionized gas. I. Phys. Rev, 117(2) (1960) 329–342.
- [2] Y.A. Sokolov. Multiplication of accelerated electrons in a tokamak. JEPT Lett, 29(4) (1979) 218–221.
- [3] Yu.K. Kuznetsov, R.M.O. Galvao, V. Bellintanijr, A.A. Ferrira, A.M.M. Fonseca, I.C. Nascimento, L.F. Ruchko, E.A.O. Sætton, V.S. Tsy-pin and O.C. Usuriage. Runaway discharges in TCABR. Nucl. Fusion, 44 (2004) 631–644.
- [4] P. Helander, L.G. Eriksson and F. Andersson. Runaway acceleration during magnetic reconnection in tokamaks. Plasma Physics and Controlled Fusion, 44 (12B) (2002) 247-262.
- [5] R.D. Gill. Nucl Fusion, 33 (1993) 1613–1625.
- [6] R. Nygren, T. Lutz, D. Walsh, G. Martin, M. Chatelier, T. Loarer and D. Gulihem. J. Nucl. Mater. (1997) 241–243:522–527.
- [7] V.V. Parail and O.P. Pogutse. The kinetic theory of runaway electron beam instability in a tokama. Nuclear Fusion, 18 (1978) 303–314.
- [8] C. Rasouli, D. Iraj, A.H. Farahbod, K. Akhtari, H. Rasouli, H. Modarresi and M. Lamehi. Rev. Sci. Instrum. 80 (2009) 013503.
- [9] Kurchatov Institute of Atomic Energy. TOKAMAK DAMAVAND AEOI, Moscow, (1994).
- [10] Los Alamos Scientific Laboratory. Group X-6. MCNP : a General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport. Los Alamos, N.M. : [Springfield, Va.] :Dept. of Energy, Los Alamos Scientific Laboratory, (1979).
- [11] M.A. Stoyer, T.C. Sangster, E.A. Henry, M.D. Cable, T.E. Cowan, S.P. Hatchett, M. Key, M.J. Moran, D.M. Pennington, M.D. Perry, T.W. Phillips, M.S. Singh, R.A. Snavely, M. Tabsk and S.C. Wilks. Nuclear diagnostics for petawatt experiments. 72 (2001) 767.
- [12] P. Hatchett, C.G. Brown, T.E. Cowan, E.A. Henry, J.S. Johnson, M.H. Key, J.A. Koch, A.B. Langdon, B.F. Lasinski, R.W. Lee, A.J. Mackinnon, D.M. Pennington, M.D. Perry, T.W. Phillips, M. Roth, T.C. Sangster, M.S. Singh, R.A. Snavely, M.A. Stoyer, S.C. Wilks and K. Yasuike. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of petawatt laser pulses with solid targets. Physics of Plasmas, 7 (2000) 2076–2082.
- [13] C. Courtois, A.C.L. Fontaine, O. Landoas, G. Lidove, V. Meot, P. Morel, R. Nuter, E. Lefebvre, A. Boscheron, J. Grenier, M.M. Aleonard, M. Gerbaux, F. Geobet, F. Hannschi, G. Malka, J.N. Scheurer and M. Tarisies. Effect of plasma density scale length on the properties of bremsstrahlung x-ray sources created by picosecond laser pulses. Phys. Plasma, 16 (2009) 013105.
- [14] D. Iraj, C. Rasouli and A.H. Farahbod. Iranian Annual Nuclear Physics Conference, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran, (2006) 28–31.
- [15] A.F. McKeever. Thermoluminescence Dosimetry, Adam Hilger Ltd, Bristol, UK, (1981).
- [16] M. Moslehi-Fard, N. Alinejad. Relation between Hard X-Ray Emission and Runaway Electrons in Damavand Tokamak. J. of Nuclear Sci. and Tech, 48 (2009) 17–23.
- [17] C. Rasouli, B. Pourshahab, S.M. Hosseini-Pooya, T. Orouji and H. Rasouli. Study of runaway electrons using dosimetry of hard x-ray radiation in Damavand tokamak. Rev. Sci. Instrum, 85 (2014) 053509.
- [۱۸] قاسمی، فرشته. شایسته فرد، مریم. روش‌های محاسبات عددی به همراه برنامه‌سازی به زبان C. اصفهان، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، (۱۳۸۹).