مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۲، تابستان ۱۴۰۴

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025



سمانه یارمحمودی[»] 💿، بنفشه پورشهاب 回، چاپار رسولی 💿 پژوهشکده پلاسما و گداخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۱۳۵–۱۴۳۹۹، تهران – ایران

*Email: syarmahmoodi@aeoi.org.ir

مقالة فني

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

چکندہ

توکامکها به عنوان یکی از امیدوارکنندهترین دستگاهها برای دستیابی به همجوشی هستهای، محیطهای پیچیدهای با سطوح بالای تابش هستند. ارتقاى اين دستگاهها به منظور افزايش بازدهى و مدت زمان حضور پلاسما، لزوماً به افزايش سطوح تابش منجر مىشود. از اينرو، تخمین دقیق در تابشی و طراحی سیستههای حفاظتی ایمن، از اهمیت ویژهای برخوردار است. توکامک دماوند با پلاسمای هیدروژن خالص، مولد پرتوهای ایکس نرم و سخت میباشد. با داشتن اطلاعات کافی درباره این پرتوهای یونساز غیرمستقیم، میتوان تا حد ممکن از اثرات مخرب آنها جلوگیری کرد. با توجه به برنامه ارتقا و بهروزرسانی توکامک دماوند، زمان پالسهای پلاسما از ۲۲ ms به حدود ۲۰۰ ms افزایش خواهد یافت؛ این امر باعث افزایش چشمگیر میزان تابشرها تا حدود ده برابر در مناطق کاری پرسنل و ناایمن شدن این مناطق از نقطهنظر پرتوگیری کاربران خواهد شد. در این پژوهش دز تابشی مناطق مختلف آزمایشگاه توکامک دماوند ارتقا یافته با توجه به دادههای تجربی موجود تخمین زده شد و مشخصات حفاظهای پرتویی جدید برای ایمنسازی محیط آزمایشگاه توسط کد MCNPX محاسبه گردید. ابعاد حفاظهای مورد نیاز برای دو ماده سرب و بتن محاسبه شد که براساس برآورد هزینه و بررسی محدودیتهای ممکن، هر یک از آنها میتواند جهت پیادهسازی انتخاب شود.

كليدواژهها: گداخت هستهاى، توكامك دماوند، تابشهاى ايكس سخت، حفاظ يرتوى، كد MCNPX

Estimation of radiation dose in the upgraded Damavand tokamak and the design of safe radiation shielding

S. Yarmahmoodi^{*}, B. Pourshahab, Ch. Rasouli

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Technical Paper

Received: 22.09.2024. Revised: 29.11.2024, Accepted: 22.12.2024

Abstract

Tokamaks are recognized as one of the most promising devices for achieving nuclear fusion, operating within complex environments with high radiation levels. Upgrading these devices to enhance plasma efficiency and duration inevitably leads to increased radiation levels, making precise radiation dose estimation and the design of effective shielding systems essential. The Damavand tokamak, with its pure hydrogen plasma, generates both soft and hard X-rays. With sufficient data on these indirect ionizing radiations, the potential adverse effects can be minimized. Planned upgrades to the Damavand tokamak will extend plasma pulse duration from 22 ms to approximately 200 ms, resulting in a significant increase in radiation levels, estimated to be up to ten times higher in work areas, posing safety risks for personnel. In this study, we estimate the radiation dose in different areas of the upgraded Damavand tokamak laboratory based on experimental data, and we calculate specifications for new radiation shields using the MCNPX code to ensure laboratory safety. The required shielding dimensions were calculated for lead and concrete materials, allowing for a cost and feasibility assessment to guide the selection of the optimal implementation material.

Keywords: Nuclear fusion, Damavand tokamak, Hard x-ray radiations, Radiation shielding, MCNPX code

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology

Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 190-197

مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای دوره ۴۶، شماره ۲، جلد ۱۱۱، تابستان ۱۴۰۴، ص ۱۹۰–۱۹۷



توكامكهاى اندازه كوچك معمولاً مولد يرتوهاي گوناگوني مانند ایکس نرم و سخت هستند و در صورت تزریق گاز دوتریم، علاوه بر این پرتوها، فوتونوترونها نیز تولید خواهند شد. پرتوهای ایکس نرم دارای انرژی کمتر از keV و طول موج بیشتر از nm و پرتوهای ایکس سخت دارای انرژی بیشتر از ۱۰ keV و طول موج کمتر از ۱۰ nm میباشند [۳]. توکامک دماوند با استفاده از گاز هیدروژن خالص تنها مولد پرتوهای ایکس نرم و سخت است. پرتوهای ایکس نرم قادر به خروج از دیواره محفظه خلأ توکامک نیستند، ولی پرتوهای ایکس سخت از محفظه خارج شده و میتوانند به طور غیرمستقیم یونیزه کنند. طیف انرژی این تابشها از نوع پیوسته بوده و ناشی از فرایند تابش ترمزی است. تابش ترمزی نتیجه برخورد الکترونهای گریزان^۴ تولید شده در پلاسما با دیواره و تجهیزات داخل محفظه خلاً مىباشد. الكترون هاى گريزان، جمعيتى از الكترونهاى يلاسما هستند كه به دليل شتاب گيرى ييوسته ناشی از میدان الکتریکی چنبرهای^۵ توکامک به انرژیهای نسبیتی میرسند. به دلیل کارکرد پالسی توکامک، تابشهای ایکس تنها در لحظات تخلیه و حضور پلاسما وجود داشته و در ساير زمانها، گسيل اين تابشها اتفاق نمى افتد. همچنين، گسیل پرتوهای ایکس سخت به خارج از محفظه خلاً منجر به فعالسازی⁶ تجهیزات و ادوات محیط پیرامون توکامک نمی گردد. از اینرو، مدت زمان پرتوزایی دستگاه توکامک دماوند به زمان حضور پلاسما در محفظه محدود می شود که در حال حاضر این مدت زمان حدود ۲۲ میلی ثانیه است، اگرچه تعداد تخلیههای پلاسمای دستگاه میزان پرتوزایی آن را در مجموع افزایش خواهد داد. لازم به ذکر است که آزمایشگاه توکامک دماوند فاقد هرگونه چشمه باز (بدون پوشش)^۷، چشمه بسته (یوششدار)^ و یا پسماند پرتوزا می باشد [۲، ۴–۵]. چشمه بسته در حقیقت چشمه پرتوزایی است که مواد پرتوزای آن بهطور دائمی در یک محفظه بسته بوده و کاملاً به هم متصل و به شکل جامد هستند بهطورىكه در اثر فرسايش يا اشتباهات قابل پیشبینی، مواد پرتوزای آن به بیرون نشت نمی کند؛ چشمه باز نیز به مواد پرتوزایی اطلاق میگردد که تعریف چشمه بسته برای آنها صدق نمیکند [۶–۷]. ازآنجایی که توکامکهای اندازه کوچک در طول تخلیههای

گریزان به یک چشمه پرقدرت ایکس سخت تبدیل میشوند،

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 190-197

۱. مقدمه

محصورسازی مغناطیسی یکی از روشهای متداول برای محصور کردن پلاسمای داغ و تولید انرژی از واکنشهای گداخت هستهای میباشد. ماشینهای مختلفی با ساختار میدانهای مغناطیسی متفاوت در تحقیقات محصورسازی مغناطیسی طراحی و ساخته شدهاند که در این میان توکامکها با بیشترین احتمال برای تبدیل شدن به رآکتورهای گداخت، کاندیدای اصلی به شمار میروند. آزمایشگاه توکامک دماوند در پژوهشکده یلاسما و گداخت هستهای، به منظور توسعه فناوریهای نوین برای تولید انرژی در آینده تأسیس شده است. دستیابی به پلاسماهای پایدار با مدت زمان محصورسازی ۱ بالا، از اولویتهای تحقیقاتی این آزمایشگاه بوده و به دلیل کاربردهای مهم آن، از اهمیت ویژهای برخوردار است. توکامک دماوند یکی از توکامکهای اندازه کوچک در جهان برای پژوهشهای پایه و پیشرفته در زمینه محصورسازی مغناطیسی است. این توکامک به دلیل داشتن پلاسما با سطح مقطع کشیده^۲ و نزدیک به یلاسمای رآکتور ایتر^۳، برای انجام تحقیقات گداخت هستهای بسیار مناسب میباشد. با دستیابی به پلاسمای پایدار با مدت زمان محصورسازی بالا علاوه بر محاسبه پارامترهای پلاسما با دقت بالاتر می توان روشهای مختلف گرمایش را تست کرده و اثرات ناپایداری ها را بررسی کرد، بدین صورت می توان از نتایج بهدست آمده در توکامک دماوند در راستای توکامک ایتر استفاده كرد. همچنين با افزايش زمان حضور پلاسما ميتوان از سامانههای کنترلی پارامترهای پلاسما در زمان بیشتر، دقت بالاتر و تنوع بیشتر استفاده کرد. علاوه بر این می توان اثر ناپايدارىھا روى فازھاى مختلف جريان پلاسما را بەصورت دقیقتر مطالعه کرده و زمان کافی برای اعمال گرمایشهای ثانویه نیز وجود خواهد داشت. مشخصات فنی توکامک دماوند در جدول ۱ خلاصه شده است [۱-۲].

مقدار	پارامتر
۳۶ cm	شعاع اصلي پلاسما
Y cm	شعاع فرعي پلاسما
$\Delta_{/}$)	نسبت ظاهرى
۴_ ۱ – ۱	کشیدگی سطح مقطع
۱٫۲ T	بیشینه شدت میدان مغناطیسی چنبرهای
۴۰ kA	بيشينه جريان پلاسما
۱-۳×۱۰ ^{۱۹} m ^{-۳}	بیشینه چگالی پلاسما
۱۵۰ eV	متوسط دمای یون
۳۰۰ eV	متوسط دماي الكترون

1. Confinement Time

- 2. Elongated Cross Section
- 3. ITER



^{4.} Runaway Electrons

^{5.} Toroidal

^{6.} Activation

^{7.} Unsealed Source

^{8.} Sealed Source

بنابراین دارای مخاطرات پرتویی بسیار بالایی میباشند. با توجه به اجتنابناپذیر بودن وقوع تخلیههای گریزان و در نتیجه تولید تابشهای ایکس سخت پرشدت و پرانرژی در توکامک دماوند، داشتن اطلاعات کافی در مورد این پرتوها میتواند جهت کاهش اثرات مخرب تابشهای ایکس سخت بهکار برده شود. بدین منظور محاسبات دزیمتری تابش و اقدامات لازم به منظور به حداقل رساندن آثار بیولوژیکی ناشی از آنها بسیار مورد اهمیت میباشند.

با توجه به این که تابش های ایکس سخت توکامک دماوند در تمام جهتها گسیل می شوند بنابراین انجام نقشهبرداری دقیق از توزیع دز این تابشها در تمامی قسمتهای آزمایشگاه بهویژه نواحی مهم مانند محل قرارگیری کاربران دستگاه، محل نصب سامانههای تشخیصی آسیبپذیر در برابر تابشهای هستهای و محل نصب تجهيزات الكترونيكي حساس به تابش بسيار ضروري میباشد. از آنجایی که در بازههای زمانی بسیار کوچک (ms) و آهنگ دز بسیار بالا (۱۸۰Sv/h-۶۳kSv/h) پاسخ ابزار اندازه گیری فعال دارای محدودیت بوده و از دقت کافی برخوردار نیست؛ لذا برای تابشهای پرشدت و کوتاهمدت، معمولاً از ابزار اندازه گیری غیرفعال استفاده می شود که توانایی انباشت دز در تعداد زیادی از تابشها را داشته باشد [۲]. در پژوهشهای انجام شده جهت اندازهگیری دز تابشهای ایکس سخت توکامک دماوند، به منظور تعیین نقشه دز محیطی در شرایط عملکردی فعلی، از TLDهای LiF:Mg,Cu,P) (GR-۲۰۰) استفاده شده که چیدمان این دزیمترها در مرجع [۲] آورده شده است. لازم به ذکر است با توجه به عدم قطعیت موجود در پاسخ دزیمترهای ترمولومینسانس (به دلیل متفاوت بودن ضرایب ECC^۲ آنها)، جهت برخورداری از دقت کافی نتایج، معمولاً بیش از یک دزیمتر در هر نقطه اندازه گیری استفاده می گردد. با توجه به این که منشأ تولید تابش های ایکس سخت، برخورد الكترونهاى گريزان با ادوات و تجهيزات داخل محفظه میباشد، بنابراین در نواحی که برخی اجزاء مانند لیمیتر، دریچههای سامانههای تشخیصی و محلهای اتصال بخشهای تشکیلدهنده محفظه خلأ در مجاورت پلاسما حضور داشته باشند، احتمال گسیل تابشها افزایش چشمگیری خواهد داشت و بنابراین تراکم چیدمان TLDها در فواصل نزدیک به توکامک بیشتر خواهد بود [۲، ۸-۱۰]. مطابق دستورالعمل های حفاظت

در برابر اشعه، برای اندازه گیری تابشهای یک دستگاه مولد پرتو به منظور طراحی حفاظهای مناسب، باید شرایط بیشینه عملکرد آن دستگاه در نظر گرفته شود. در توکامک دماوند با پارامترهای عملکردی فعلی، در هر ساعت ۱۵–۲۰ تخلیه پلاسما انجام میشود که در یک روز با در نظر گرفتن ۶ ساعت کاری به عنوان حداکثر زمان کار با دستگاه، قابلیت اجرای ۹۰ تخلیه پلاسما در روز وجود خواهد داشت. بنابراین پژوهشهای پیشین در راستای اندازه گیری بیشینه تابشهای دستگاه با استفاده از نگهداشتن شرایط عملکردی اعم از ولتاژ بانکهای خازنی، فشار محفظه خلأ و نوع گاز کاری، معمولاً طی ۱۰۰ تخلیه پلاسمای متوالی انجام شده است. با توجه به مقادیر قرائت شده از متوالی ایم از پایان پرتودهی، نقشه دز توکامک دماوند برای زمان پلاسمای ۲۲ ms در شکل ۱ نشان داده شده است زمان پلاسمای ۲۲ ms در شکل ۱ نشان داده شده است

ازآنجایی که تابش جزء لاینفک تأسیسات هستهای است، از این و همواره باید برای حفظ کارکنان و تجهیزات حساس در مقابل اثرات سوء تابش تدبیری اندیشیده شود. بهطورکلی با به کار بردن همزمان اصول حفاظتی شامل (الف) به حداقل رساندن زمان پرتوگیری، (ب) به حداکثر رساندن فاصله از چشمه تابش و (ج) حفاظ گذاری پیرامون چشمه تابش، میتوان پرتوگیری در برابر تابش را تحت کنترل درآورد. بهدلیل وقوع شرایط خاص و نیز ضرورت حضور افراد یا دستگاه در محیطها یا در یک جایگاه خاص گاهی اوقات نمی توان موارد یک و دو را بهطور همزمان رعایت کرد. اما مورد سوم را می توان به عنوان یک عامل بازدارنده دائمی در مقابل پرتوها در نظر گرفت. از اینرو طراحی حفاظ به منظور کاهش پرتوگیری کارکنان و ایمنسازی محل كار آنها امرى لازم و ضرورى است. همچنين از طريق حفاظ گذاری می توان علاوه بر کاربران دستگاه، تجهیزات حساس به تابش و ادوات الکترونیکی را نیز در یک میدان تابشی محافظت نمود. لازم به ذکر است در صورتی که علی رغم تمهیدات انجام شده، اثر حفاظ ۱۰۰٪ نباشد، برنامهریزی برای صرف زمان کوتاهتر در محیط پرتو یا به عبارتی انجام تعداد تخلیههای پلاسمای کمتر در بازهٔ زمانی آزمایشات جهت کاهش میزان پرتوگیری کارکنان ضروری میباشد [۲، ۱۲].

Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 190-197

^{1.} Active

^{2.} Element Correction Coefficient



شکل ۱. نقشه دوبعدی توزیع دز تابشهای ایکس سخت توکامک دماوند در کل محیط آزمایشگاه. (A) سالن اصلی توکامک دماوند، (B) اتاق کنترل توکامک دماوند، (C) نواحی حاشیه سالن اصلی توکامک دماوند. (B) اتاق کنترل توکامک دماوند، (C) نواحی حاشیه سالن اصلی توکامک دماوند. نتایج ثبت شده به ازای یک تخلیه پلاسما (۲۲ ms) میباشد [۲].

۲. روش کار

همان گونه که پیش از این بیان شد دستیابی به پلاسمای پایدار با زمان محصورسازی بالا، از اولویتهای تحقیقاتی آزمایشگاه توکامک دماوند میباشد. در سالهای اخیر یک برنامه ارتقا و بهروزرسانی در راستای افزایش دما، چگالی و زمان حضور پلاسما در توکامک دماوند آغاز شده است. یکی از اهداف این برنامه افزایش زمان حضور پلاسما تا حدود T۰۰ میباشد. با توجه به این که گاز مورد استفاده در توکامک تغییری نخواهد از نوع تابشهای ایکس نرم و سخت خواهند بود. با توجه به برنامه افزایش ۱۰ برابری زمان حضور پلاسما بدیهی است که مدت زمان برخورد الکترونهای گریزان با ادوات درون محفظه خلأ و بنابراین زمان گسیل تابشهای ایکس سخت نیز افزایش خواهد یافت.

در حالت ارتقا پیشبینی میشود تابشها در حدود ۱۰ برابر میزان فعلی افزایش یابند که با این حد تابش و در نظر گرفتن حد دز مجاز مناطق کاری [۱۳–۱۴]، تمامی نواحی A، B و C در توکامک تبدیل به مناطق ممنوعه خواهند شد.

نقشه دز تخمینی برای نواحی مذکور در شرایط توکامک ارتقا یافته در شکل ۲ آورده شده است.

لازم به ذکر است که در حالت ارتقا با افزایش زمان پالسها به حدود ms ، تعداد تخلیههای پلاسما در یک ساعت به حدود ۱۰ مورد کاهش مییابد. با توجه به محاسبات انجامشده و مراجعه به جدول ۲، مشاهده می گردد در توکامک ارتقا یافته، به

ازای هر تخلیه پلاسما در تمامی نواحی (A,B,C) میزان دز از حد مجاز عبور کرده و این نواحی به مناطق ممنوعه تبدیل شدهاند. از اینرو حضور تمامی افراد از جمله کاربران دستگاه در این مناطق ممنوع میباشد. بنابراین باید اقدامات حفاظتی مناسب و امکانپذیر با توجه به حدود دز تعیین شده از سوی واحد قانونی، به گونهای صورت پذیرد که حدود دز مجاز در مناطق A، B و C مطابق با دستورالعملهای حفاظت در برابر اشعه و اصل آلارا^۱ رعایت شده و احتمال پرتوگیری از منابع پرتو به پایین ترین مقدار ممکن برسد. اصل آلارا در حقیقت به معنی که در به کارگیری منابع پرتوزا اطمینان حاصل گردد که علاوه بر دستیابی به حداکثر کیفیت در رسیدن به هدف مورد نظر، مقدار پرتوگیری افراد درگیر نیز در حداقل ممکن قرار خواهد داشت و ارزش عملیات انجام شده در برابر هزینه آن قابل توجیه باشد [13].

جدول ۲. حد دز مجاز مناطق کاری [۱۴-۱۳]

حد دز مجاز	مناطق کاری
کمتر از ۲٫۵ μSv/h	منطقه آزاد
$\tau_{\text{A}} \ \mu Sv/h$ – $\nu_{\text{A}} \ \mu Sv/h$	تحت نظارت
v/a $\mu Sv/h$ – t mSv/h	تحت كنترل
بیشتر از ۳Sv/h	ممنوعه

Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 190-197

^{1.} Alara Low (As Low As Reasonably Achievable) Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology



شکل ۲. نقشه دوبعدی تخمین توزیع دز تابشهای ایکس سخت توکامک دماوند ارتقا یافته در کل محیط آزمایشگاه. (A) سالن اصلی توکامک دماوند، (B) اتاق کنترل توکامک دماوند، (C) نواحی حاشیه سالن اصلی توکامک دماوند. نتایج به ازای یک تخلیه پلاسما (۲۰۰ ms) می باشد.

۳. محاسبات حفاظ

بهطور کلی محاسبات حفاظ توسط کدهای مونت کارلو با استفاده از ترابرد ذرات در مواد مشخصی که توان ایستانندگی مناسب برای توقف تابشهای یونساز را داشته باشند انجام می گیرد. در این روش ابتدا با استفاده از جدولهای استاندارد و محاسبات اوليه، ضخامت حفاظ با توجه به جنس آن تخمين زده مي شود و سپس دز کل که از تمامی چشمههای پرتوزای موجود اندازه گیری شده به عنوان تابش ورودی در کد مورد استفاده قرار می گیرد. توسط محاسبات انجام شده در کد، میزان دز تابشهای خروجی از حفاظ تخمین زده شده تعیین می گردد. چنانچه مقادير خروجي بيشتر از حد دز ايمن باشد لازم است جنس و ضخامت حفاظ در داخل کد به گونهای تغییر داده شود تا حد دز خروجی به کمترین میزان ممکن برسد. این فرایند ممکن است به دفعات زیاد جهت رسیدن به ضخامت مطلوب حفاظ تکرار شود تا در نهایت حد دز تابشی پس از خروج از حفاظ طراحی شده به گونهای باشد که آهنگ دز در محل کار کاربران حداکثر در بازه ۷٬۵μSv/h–۲mSv/h قرار گیرد [۱۴-۱۳]. در طرح جارى كليه محاسبات فوق توسط كد MCNPX انجام شده است.

با توجه به این که تابش های ایکس سخت توکامک ها دارای قدرت نفوذ بالایی هستند بنابراین در توکامک دماوند ارتقا یافته جهت بهینهسازی و طراحی حفاظ جدید و تضعیف تابشهای ایکس باید از مواد با چگالی و عدد اتمی بالا استفاده کرد. سرب یا مواد حاوی سرب از متداول ترین گزینه ها جهت ساخت حفاظ در برابر پرتوهای ایکس میباشند. قدرت تضعیف پرتوهای ایکس در سرب ناشی از عدد اتمی (Z=۸۲) و چگالی بالای مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای

آن (۱۱٬۳۴ g/cm^۳) است. استفاده از بتن نیز چنانچه در ضخامتهای زیاد (بیش از ۵۰ cm) به کار برده شود می تواند به عنوان یک گزینه مناسب دیگر جهت ساخت حفاظ در برابر یرتوهای ایکس به شمار رود [۱۲].

به منظور طراحی حفاظ برای ماشین توکامک دماوند ارتقا یافته، لازم است حد دز در محل قرارگیری کاربران همچنان در محدوده ایمن ۷٬۵μSv/h–۲mSv/h قرار داشته باشد. برای این منظور حفاظهایی مطابق با شکل ۳ در نواحی مشخص شده (در چهار طرف توکامک ارتقا یافته) قابل انتظار می باشد. لازم به ذکر است در راستای رعایت قوانین و استاندارهای حفاظت در برابر اشعه، طراحی حفاظهای پرتوی همواره برای شرایط بیشینه عملکرد دستگاه، که بیشترین شدت و دز تابشی را به همراه خواهد داشت، انجام می شود.

براساس پارامترهای عملیاتی پیشبینی شده برای توکامک دماوند ارتقا یافته، به هنگام کار دستگاه در هر ساعت حداکثر ۱۰ تخلیه اتفاق خواهد افتاد که با توجه به افزایش زمان حضور پلاسما (۲۰۰ ms)، میزان دز تابشهای ایکس گسیلی ده برابر میزان فعلی پیشبینی میشود.

جهت رسیدن به حد دز استاندارد در نواحی طبقهبندی شده بعد از استقرار حفاظ، درصد تضعیف مورد نیاز توسط حفاظ در هر طرف توکامک ارتقا یافته محاسبه شده است که مقادیر بهدست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

در شکل ۴، درصد تضعیف دز تابشهای ایکس سخت محاسبه شده برای ضخامتهای مختلف دیوار سربی و بتنی با استفاده از کد MCNPX، آورده شده است.

194



شکل ۳. موقعیتهای شماره ۱، ۲، ۳، ۴ به عنوان محلهای قرارگیری حفاظ در چهار طرف توکامک دماوند ارتقا یافته.

درصد تضعیف مورد نیاز دز توسط حفاظ ۱۰۰*(دز قبل از حفاظ / (دز بعد از حفاظ — دز قبل از حفاظ)) = درصد تضعیف دز	بیشینه دز توکامک ارتقا یافته قبل از حفاظ (µSv/h)	شماره حفاظ
९ ९,९ <i>१</i>	74	١
१९,४१	۳۵۸۰	*7
१९,४٢	118.	٣
૧૧	۲۰۰	۴

جدول ٣. محاسبه درصد تضعيف مورد نياز حفاظ در هر طرف توكامك دماوند ارتقا يافته

*: مقادير ذكر شده در سمت اتاق كنترل با فرض حذف حفاظ سربي كنوني و جايگزيني حفاظ نهايي محاسبه شده است.



درصد تضعیف دز شکل ۴. تأثیر ضخامتهای مختلف حفاظ سربی و بتنی بر تضعیف دز تابشهای ایکس سخت، محاسبه شده توسط کد MCNPX.

۴. نتیجه گیری

با توجه به درصدهای تضعیف بهدست آمده توسط کد MCNPX و همچنین درصد تضعیف مورد نیاز در هر چهار طرف توکامک دماوند، ابعاد حفاظهای سربی و بتنی که باید در

چهار طرف توکامک ارتقا یافته نصب شوند و همچنین فاصله آنها از مرکز توکامک در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به وجود یک دیوار بتنی در محل تعیین شده برای حفاظ شماره ۳، وجود بانکهای خازنی که به دلیل تعداد بسیار زیاد خازنها و ادوات و تجهیزات مرتبط میزان قابل توجهی از Journal of Nuclear Science, Engineering and Technology Vol. 46 (2), Serial Number 112, 2025, P 190-197

تابشهای ایکس گسیلی از توکامک را جذب میکنند و همچنین عدم امکان تردد پرسنل در پشت نواحی حاوی بانکهای خازنی، میتوان از اجرای حفاظ در این ناحیه صرفنظر نمود. علاوه بر اين بهدليل بالا بودن هزينه و محدودیت استفاده از حجم بالای سرب در محل کار پرسنل (حدود ۱۱۰ تن) و همچنین با در نظر گرفتن هزینه پایین تر، دوام نسبتاً زياد و قابل دسترس بودن مواد اوليه بتن، نتايج بهدست آمده نشان میدهد استفاده از دیوارههای بتنی به عنوان حفاظ با ابعاد ذکر شده در جدول ۴ در جهتهای شماره ۱، ۲ و ۴ می تواند انتخاب مناسب تری برای حفاظ گذاری در توکامک دماوند ارتقا یافته باشد.

نقشه دز توکامک دماوند ارتقا یافته در صورت نصب حفاظهای بتنی طراحی شده، در شکل ۵ قابل مشاهده مى باشد.

با توجه به شکل ۵، در ناحیه B و C دز دریافتی به ازای یک تخلیه پلاسما با وجود حفاظهای طراحی شده از مرتبه ۰٬۰۱ µSv میباشد، از آنجایی که در هر ساعت در حالت ارتقا ده تخلیه پلاسما ممکن خواهد بود، دز در این نواحی در مرتبه مناطق $\cdot_{,1} \mu Sv/h$ قرار خواهد گرفت؛ با توجه به حد دز مجاز مناطق مختلف ذکر شده در جدول ۲، مشاهده می گردد که با وجود حفاظهای طراحی شده، محل کار کاربران و محل تردد پرسنل عادی دستگاه ایمن خواهد بود. بنابراین در صورت به کارگیری نتایج حاصل از این پژوهش در فرایند حفاظسازی توکامک دماوند ارتقا یافته، محیط کار پرسنل و فضای خارج از محدوده آزمایشگاه عموماً هیچگونه تأثیری از فعالیتهای پرتویی توکامک نخواهند گرفت.

ابعاد حفاظ بتنی،	ضخامت حفاظ بتنى	ابعاد حفاظ سربي	ضخامت حفاظ سربي	فاصله حفاظ از مرکز	شماره			
ارتفاع×طول (m×m)	(cm)	ارتفاع×طول (m×m)	(cm)	توکامک (m)	حفاظ			
$\Upsilon m \Delta \times \Upsilon$	۶۵	$\Upsilon m \Delta \times \Upsilon$	١٣	۴,٩۶۰	١			
$V_{/}\Delta \times T$	۵۵	$V_{J}\Delta \times Y$	١٢	۵,۴۹۰	٢			
$\Upsilon \Psi_{0}\Delta \times \Upsilon$	۶.	$\Upsilon T_{\Delta} \times \Upsilon$	١٢	۴,۶۷۰	٣			
1 • × T	۴.	۱۰ × ۲	٨	١٢,•٨٠	۴			





شکل ۵. نقشه دوبعدی تخمین توزیع دز تابش.های ایکس سخت توکامک دماوند ارتقا یافته در حضور حفاظهای بتنی طراحی شده در کل محیط آزمایشگاه. (A) سالن اصلی توکامک دماوند، (B) اتاق کنترل توکامک دماوند، (C) نواحی حاشیه سالن اصلی توکامک دماوند. نتایج به ازای یک تخلیه پلاسما (T۰۰ ms) مىباشد.

مراجع

- Rasouli C, Pourshahab B, Hosseini Pooya S.M, Orouji T, Rasouli H. Study of runaway electrons using dosimetry of hard x-ray radiations in Damavand tokamak. Review of scientific instruments. 2014 May;85:053509. doi.org/10.1063/1.4875983.
- Pourshahab B, Rasouli C. Two-dimensional mapping of hard X-rays dose distribution of Damavand Tokamak. The Annual Physics Conference of Iran. Kermanshah University. 2020 [In Persian].
- Maier A, Steidl S, Christlein V, Hornegger J. Medical Imaging Systems: An Introductory Guide. Springer. 2018. ISBN 978-3-319-96519-2.
- Rasouli C, Iraji D, Farahbod A.H, Akhtari K, Rasouli H, Modarresi H, Lamehi M. Runaway electron energy measurement using hard x-ray spectroscopy in "Damavand" tokamak. Review of Scientific Instruments. 2009;80:013503.
- Pourshahab B, Abdi M.R, Sadighzadeh A, Rasouli C. Temporal and spatial evolution of runaway electrons at the instability moments in Damavand tokamak. Physics of Plasmas. 2016; 23:072501. doi:10.1063/1.4955218.
- Basic regulations for protection against ionizing radiation and safety of radiation sources. The center of the country's nuclear safety system, Department of Radiation Protection. INRA-RP-RE-100-00/01-1-Aba.1401;2022 [In Persian].
- 7. Ghiashinejad M, Katouzi M. General lessons on radiation protection. Sayan Company. 2013; ISBN 964-06-2857-3 [In Persian].
- Pourshahab B, Rasouli C, Iraji D. Dose mapping of hard X-ray radiation due to runaway electrons in Alvand tokamak using combination of high-dose and low-dose level dosimeters. Fusion Engineering and Design. 2023;197-114065.

- Zhou M, Hu L, Huang L, Zhong G, Li K, Hong B, Xiao M, Zhang R. Measurement of the radiation dose distribution in EAST hall based on thermoluminescence dosimeter. Fusion Engineering and Design. 2020;160-11977.
- Nouri Dogahi S.M, Abtahi S.M.M, Habibi M. Evaluation of X-ray dose distribution in adult male and female organs due to plasma focus device function. Journal of Nuclear Science and Technology. 2021;97(4):62-69 [In Persian].
- Pourshahab B, Rasouli C, Hosseini Pooya S.M, Rasouli H, Sadighzadeh A, Habibi H. Dose measurement of hard X-ray produced by Damavand tokamak by means of LiF:Mg, Cu, P TLDs. Journal of Fusion Energy. 2013;32:451-456.
- 12. Cember H. Introduction to health physics. Pergamon Press. Oxford. 1983.
- HSE Book. Work with ionising radiation, Ionising Radiations Regulations 2017, Approved Code of Practice and guidance. Second Edition. Published by TSO (The Stationery Office). 2018, ISBN 978 0 7176 6662 1.
- Eation D.J, Gonzalez R, Duck S, Keshtgar M. Radiation protection for an intra-operative X-ray device. The British Journal of Radiology. 2011;84:1034-1039.
- Riyahi Alam N, Graily Gh, Taghizadeh S. Radiation protection health physics, radiobiology and radiology. Royan Pazhouh Publication. 2015;ISBN 978-600-408-3034 [In Persian].

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

یارمحمودی، سمانه، پورشهاب، بنفشه، رسولی، چاپار. (۱۴۰۴)، تخمین دز تابشی توکامک ارتقا یافته دماوند و طراحی حفاظ پرتوی ایمن. مجله علوم، مهندسی و فناوری هستهای، Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1706.html .DOI: https://doi.org/10.24200/nst.2024.1672.2055 .۱۹۷-۱۹۰

