



محاسبات دزیمتری و بهینه سازی حفاظ بیولوژیکی دستگاه IECF

و ثوقی، سارا^(۱) - قپانوری، مریم*^(۲) - بابایی، مرتضی^(۲)

(۱) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

(۲) سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای

چکیده:

در این مقاله، محاسبات دزیمتری و بهینه سازی حفاظ بیولوژیکی دستگاه IECF با فرض گداخت $D-T$ و تولید پیوسته نوترون

$14/1 \text{ MeV}$ با شدت تابش 10^{11} (n/s) با استفاده از کد $MCNPX-2.6$ انجام شده است. تغییرات دز موثر بر حسب ضخامت حفاظ

برای گروه های مختلفی از مواد محاسبه شده، و با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی، ساعت کاری مجاز در مد پیوسته برای

دستگاه بر حسب ضخامت بهینه ارائه شده است.

کلمات کلیدی: دستگاه IECF، حفاظ نوترونی، دز موثر، کد $MCNPX-2.6$

مقدمه:

دستگاه IECF به روش محصور سازی الکترو ستاتیکی لختی، شامل دو الکتروود کروی مشبک هم مرکز بوده که الکتروود مرکزی کاتد به ولتاژ بالای منفی و الکتروود بیرونی آند به زمین متصل شده و دو الکتروود در داخل یک محفظه خلاء قرار می گیرند. در این دستگاه پس از تزریق گاز کاری به داخل محفظه، بر اثر تخلیه الکتریکی در فشار پایین، یونیزاسیون رخ داده و یون های تولید شده بین دو الکتروود کروی مشبک شتاب داده می شوند. یون ها به سمت مرکز الکتروود کروی شتاب گرفته و در اثر برخورد های پی در پی در مرکز کره، انجام واکنش هم جوشی هسته ای را سبب می شوند. میدان الکتریکی کروی بین دو الکتروود باعث شکل گیری پلاسمای نسبتاً چگال و داغ در مرکز الکتروود مرکزی شده و حالت مناسبی برای واکنش های گداخت هسته ای پیوسته فراهم می شود [۱]. اولین دستگاه ایرانی IR-IECF، در سال ۲۰۱۱ در SPNF-INST طراحی و ساخته شد. در حال حاضر به منظور بالا بردن نرخ واکنش هم جوشی هسته ای و افزایش شار

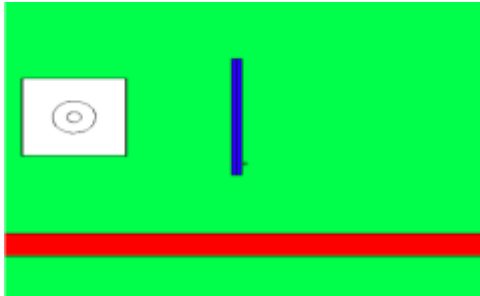


نوترون تا 10^{11} (n/s)، طراحی و ساخت یک نمونه ارتقاء یافته از دستگاه IECF در این مرکز در حال انجام است. بطور یقین با توجه به نرخ بالای تولید نوترون در دستگاه IECF، محاسبات دزیمتری نوترون و بهینه سازی حفاظ بیولوژیکی برای دستگاه، جهت کاهش پرتوگیری پرسنل ضروری است.

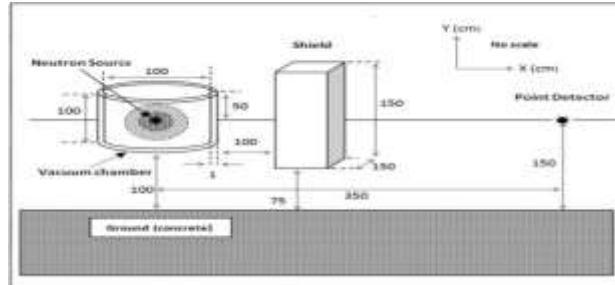
با توجه به محدودیت فضا در مراکز تحقیقاتی و آموزشی، طراحی و بهینه سازی یک حفاظ موثر از جهت تضعیف تابش پرتویی، ابعاد و هزینه از اهمیت بالایی برخوردار است. موثرترین مواد حفاظ سازی برای دستگاه‌های هسته‌ای از مواد هیدروژن دار، عناصر فلزی سنگین و جاذب‌های نوترون بدست می‌آید. پراکندگی‌های غیرکشسان با عناصر سنگین و پراکندگی‌های کشسان با هیدروژن در کاهش انرژی نوترون‌های سریع موثر هستند هم‌چنین جاذب‌ها می‌توانند پرتوهای گامای ثانویه و نوترون‌های گرمایی را جذب کنند. پلی اتیلن و بتن به‌طور گسترده به عنوان ماده حفاظ سازی نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. در این پژوهش، به‌منظور کاهش اندازه پرتوگیری کاربر دستگاه زیر حد استاندارد نظام ایمنی و حفاظت پرتویی کشور (20 mSv/year)، محاسبات دزیمتری و طراحی حفاظ بیولوژیکی نوترون برای دستگاه IECF با فرض گداخت D-T و تولید پیوسته نوترون $14/1 \text{ MeV}$ با شار 10^{11} (n/s) با استفاده از کد شبیه سازی MCNP-X انجام شده است.

روش کار :

با توجه به محدودیت فضای آزمایشگاه و تجهیزات جانبی دستگاه و هزینه بالا، حفاظ گذاری تمام اطراف دستگاه مشکل است. هم‌چنین دستگاه بایستی برای انجام آزمایشات، تعمیر و نگهداری قابل دسترس باشد. بدین منظور، هندسه حفاظ به صورت یک صفحه مربعی با ابعاد $1/5 \text{ m} \times 1/5 \text{ m}$ در نظر گرفته شده است که با به‌کارگیری یک یا چند صفحه در کنار هم در اطراف دستگاه، میزان دز در ناحیه‌های مد نظر و تحت کنترل که دارای ضریب اشغال تمام وقت هستند (مانند محل قرار کاربر)، می‌تواند کاهش یابد. در این شبیه‌سازی، با توجه به تشکیل پلاسمای داغ و چگال در مرکز کاتد و تقارن سیستم محفظه دستگاه، ناحیه تابش نوترون به صورت یک چشمه نوترونی همسانگرد در مرکز کاتد در نظر گرفته شده است. محفظه خلاء به صورت استوانه‌ای با قطر و ارتفاع 100 cm و ضخامت 1 cm از جنس استیل ضد زنگ در نظر گرفته شده است. با توجه به فضای در نظر گرفته شده برای دستگاه و سیستم کنترل (محل کاربر) در آزمایشگاه، فاصله چشمه نقطه‌ای نوترون تا آشکار ساز ثابت و برابر با 350 cm در نظر گرفته شده است. هم‌چنین به‌منظور افزایش سایه حفاظ در ناحیه تحت کنترل، حفاظ مربعی نزدیک به دستگاه و در فاصله امتری از محفظه قرار داده شده است. چشمه نقطه‌ای، مرکز حفاظ مربعی و آشکار ساز نقطه‌ای در یک راستا قرار داده شده است. مدل شبیه‌سازی شده در کد MCNPX در شکل ۱ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱: (الف) شماتیک دستگاه، (ب) هندسه شبیه‌سازی شده در کد MCNP.

در این مطالعه، در تمام محاسبات شبیه‌سازی ترابرد نوترون، فرایندهای جذب، پراکندگی کشسان و غیرکشسان و هم‌چنین گیراندازی غیرتابشی برای نوترون در نظر گرفته شده و از کتابخانه سطح مقطع ENDF-B-IV استفاده شده است. کمیت حفاظت زیست پرتوی محاسبه شده در این مقاله، دز موثر است. کمیت دز موثر برای تعیین احتمال خطرات پزشکی ناشی از یک پرتوگیری مشخص، معرفی شده است. دز موثر در واقع مجموع دز معادل وزنی بافت در همه اندام‌های بدن است که با رابطه ۱ تعریف می‌شود [۳].

$$E = \sum_T W_T H_T \quad (1)$$

در رابطه ۱، W_T و H_T به ترتیب فاکتور وزنی بافت و دز معادل بافت است. به منظور محاسبه دز موثر القاء شده توسط شار ذرات، بایستی ضرایب تبدیل شار به دز موثر برای تمام انرژی‌ها و تمامی ذرات موجود در میدان تابشی، شناخته شده باشد. در این مطالعه به منظور تخمین دز موثر کل، شار ذرات عبوری از حفاظ در موقعیت مورد نظر با استفاده از آشکارساز نقطه‌ای (تالی F5 در کد MCNP)، در بازه‌های انرژی مناسب، محاسبه شده است. ضرایب تبدیل شار به دز موثر برای نوترون و فوتون، از مقادیر ارائه شده توسط کمیسیون بین‌المللی حفاظت زیست پرتوی (ICRP-74) گرفته شده است [۴]. با دانستن شار $(\Phi_{E,P})$ ، و ضرایب تبدیل شار به دز موثر $(E/\Phi)_{E,P}$ برای هر بازه انرژی و برای هر نوع ذره، کمیت دز موثر طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۳].

$$E = \sum_P \left(\sum_E (E/\Phi)_{E,P} \cdot \Phi_{E,P} \right) \quad (2)$$

محاسبات فوق در کد MCNPX با وارد کردن ضرایب تبدیل شار به دز موثر برای نوترون و فوتون از طریق ورودی DE و DF انجام شده است [۵]. در این مقاله قابلیت حفاظ سازی مواد بتن معمولی، بتن سنگین، پلی‌اتیلن خالص، پلی‌اتیلن بور دار، و حفاظ چند لایه ای ML^2 در برابر تابش نوترون‌های پر انرژی $14/1 \text{ MeV}$ مورد بررسی قرار گرفته است. کسر



وزنی و چگالی جرمی ترکیبات تشکیل دهنده بتن معمولی، بتن سنگین، پلی اتیلن خالص، پلی اتیلن بور دار در جدول ۱ و نسبت ضخامت لایه‌ها و چگالی معادل حفاظ چند لایه‌ای ML در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- چگالی و درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده مواد حفاظ‌سازی.

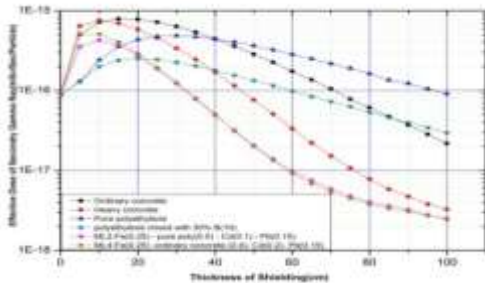
مواد	بتن معمولی	بتن سنگین	پلی اتیلن خالص	پلی اتیلن ترکیب شده با ۳۰٪ بور-۱۰
چگالی (g/cm ³)	۲/۳۰	۴/۸	۰/۹۳	۱/۱۳
عناصر تشکیل دهنده و درصد وزنی				
H	۰/۰۲۲۱	۰/۰۰۵	۰/۱۴۴	۰/۱۰۰۸
C	۰/۰۰۲۵	-	۰/۸۵۶	۰/۵۹۹۲
O	۰/۵۷۵۰	۰/۱۰۴	-	-
Na	۰/۱۵۲	-	-	-
Mg	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۲	-	-
Al	۰/۰۱۲۰	۰/۰۰۴	-	-
Si	۰/۳۰۴۷	۰/۰۳۴	-	-
K	۰/۰۱۰۱	-	-	-
Ca	۰/۰۴۳۰	۰/۰۴۲	-	-
Fe	۰/۰۰۶۴	۰/۶۱۲	-	-
P	-	۰/۱۹۷	-	-
B	-	-	-	۰/۳

جدول ۲- ترتیب و نسبت ضخامت لایه‌ها در حفاظ چند لایه‌ای.

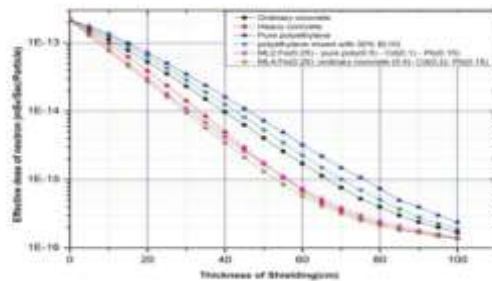
حفاظ چند لایه ای	لایه ۱: آهن	لایه ۲: پلی اتیلن خالص	لایه ۳: بتون خالص	لایه ۴: کادمیوم	لایه ۵: سرب	چگالی معادل (g/cm ³)
ML2	۰/۲۵	۰/۵	-	۰/۱	۰/۱۵	۴/۹۹
ML4	۰/۲۵	-	۰/۴	۰/۲	۰/۱۵	۶/۳۲

نتایج:

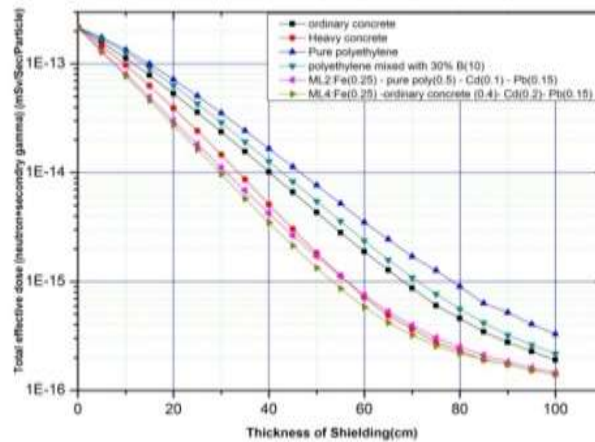
دز موثر نوترون، فوتون‌های ثانویه و دز موثر کل بر حسب ضخامت حفاظ برای مواد مختلف در شکل ۲ (الف، ب، ج) و ساعت کاری مجاز سالانه بر حسب ضخامت حفاظ در شکل ۳ نشان داده شده است.



ب



الف



ج

شکل ۲: نمودار تغییرات دز موثر (الف) نوترون (ب) فوتون های ثانویه (ج) کل بر حسب ضخامت مواد حفاظ: بتن معمولی، بتن

سنگین، پلی اتیلن خالص، پلی اتیلن بور دار، و حفاظ چند لایه ای ML.

ساعت کاری مجاز سالانه متناسب با ضخامت های مختلف حفاظ، در جدول ۳ نشان داده شده است. محاسبات به گونه ای انجام گرفته است که به ازای یک ضخامت مشخص از انواع حفاظ، دز موثر کل دریافتی کاربر در مدت یک سال کمتر از ۲۰ mSV باشد. در این جدول با توجه به چگالی، ابعاد و ضخامت حفاظ، وزن مواد حفاظ نیز آورده شده است.



جدول ۳- ضخامت بهینه حفاظ‌های مختلف به‌ازای میزان ساعت کاری متفاوت، برای دستگاه با آهنگ تابش نوترون 10^{11} n/s و انرژی $14/1 \text{ MeV}$.

ML2 Fe/pure poly/Cd/Pb	ML4 Fe/Concr/Cd/Pb	پلی اتیلن ترکیب شده با ۳۰٪ بور-۱۰	پلی اتیلن خالص	بتون معمولی	بتون سنگین	مواد
ضخامت (سانتی متر)						ساعت
وزن (کیلوگرم)						
۱۴	۱۳	۲۲	۲۴	۱۹	۱۶(cm)	۱
۶۸۶	۸۲۲	۲۹۳	۲۲۳	۴۳۷	۷۶(Kg)	
۳۰	۲۸	۴۲	۴۵	۳۹	۳۳	۵
۱۴۷۰	۱۷۷۰	۵۵۹	۴۱۹	۸۹۷	۱۵۸۴	
۳۷	۳۵	۵۰	۵۴	۴۶	۳۹	۱۰
۱۸۱۳	۲۲۱۲	۶۶۵	۵۰۲	۱۰۵۸	۱۸۷۲	
۴۹	۴۶	۶۳	۶۹	۶۰	۵۰	۳۰
۲۴۰۱	۲۹۰۷	۸۳۸	۶۴۲	۱۳۸۰	۲۴۰۰	
۵۵	۵۳	۷۰	۷۷	۶۶	۵۵	۵۰
۲۶۹۵	۳۳۵۰	۹۱۳	۷۱۶	۱۵۱۸	۲۶۴۰	
۶۴	۶۱	۸۰	۸۸	۷۶	۶۳	۱۰۰
۳۱۳۶	۳۸۵۵	۱۰۶۴	۸۱۸	۱۷۴۸	۳۰۲۴	
۹۰	۸۵	>۱۰۰	>۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۳۰۰
۴۴۱۰	۵۳۷۲	-	-	۲۳۰۰	۴۰۸۰	



بحث و نتیجه گیری :

هدف از ارائه این مقاله انجام محاسبات دزیمتری و بهینه سازی یک حفاظ نوترونی برای دستگاه IECF با شار نوترونی بالا (10^{11} n/s)، به منظور فراهم کردن شرایط کاری ایمن از لحاظ حفاظت پرتوئی برای کاربر دستگاه است. محاسبات دز موثر کل در پشت حفاظ با استفاده از کد شبیه سازی MCNP-X انجام شده است. همان‌طور که از شکل (۲) دیده می‌شود، بیشترین و کمترین دز موثر کل به ترتیب مربوط به پلی اتیلن خالص و ML4 است. علاوه بر این از این نمودار دیده می‌شود که نسبت دز موثر فوتون و نوترون پلی اتیلن خالص به حفاظ‌های پلی اتیلن ۳۰٪ بردار، بتن معمولی، بتن سنگین و ML4، در عمق ۶۰ سانتیمتری به ترتیب با ضرایب ۱/۶، ۱/۸، ۵/۳ و ۵/۹ کاهش می‌یابد. علی‌رغم این که پلی اتیلن دانسیته هیدروژنی بالایی دارد، اما سطح مقطع برهم‌کنش آن برای نوترون‌های پرنرژری پایین است، بنابراین در کاهش دز موثر نسبت به سایر مواد، تاثیر کمتری دارد. حفاظ چند لایه‌ای ML4 از آهن و بتن معمولی بعنوان کندکننده نوترون پرنرژری، کادمیوم جاذب نوترون حرارتی و سرب جاذب گاما تشکیل شده است. به همین جهت حفاظ چند لایه‌ای در کاهش دز موثر، تاثیر بیشتری دارد.

نتایج نشان می‌دهد که در حالت بدون حفاظ بیولوژیکی، به منظور نگهداشتن دز موثر کل در حد مجاز سالانه (کمتر از ۲۰ mSV)، تنها ۳ دقیقه کار در سال با دستگاه مجاز می‌باشد. این موضوع ضرورت استفاده از یک حفاظ موثر برای افزایش ساعت کاری مجاز سالانه دستگاه IECF را نشان می‌دهد. ساعت کاری مجاز سالانه متناسب با ضخامت حفاظ برای مواد مختلف محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است. با استفاده از جداول ۳ می‌توان براساس میزان ساعت کار مجاز، نوع و ضخامت حفاظ را از لحاظ بهینه سازی شرایط مختلف مانند قابل حمل بودن، کم حجم و ارزان بودن تعیین نمود.

مراجع :

- [۱] V.Damideh, "Experimental Study of the Iranian Electrostatic Confinement Fusion as a Continuous Generator," Journal of Fusion Energy, 2011.
- [۲] Huasi Hu, "Study on Composite Material for Shielding Mixed Neutron and gamma-Rays", Journals & Magazines, Volume: 55 , Issue: 4 Page(s): 2376 – 2384,
- [۳] P. Seltborg, "Radiation shielding of high-energy neutrons in SAD", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 550, Issues
- [۴] International Commission on Radiation Protection , "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation ", ICRP publication 74,(1997). 1–2, Pages 313–328,(2005).
- [۵] Los Alamos National Laboratory "MCNPX EXTENSIONS Version 2.6.0" April 2005.