

## محاسبه‌ی دز نمونه برای آزمایش مقاومت خمشی در بازتاباننده‌ی رآکتور تحقیقاتی تهران

محمد امین امیرخانی دهکردی، مصطفی حسن‌زاده\*، محسن اسدی اسدآباد، سیدمحمد میروکیلی  
 پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

## مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۲۳

**چکیده:** ایمنی در هر نوع آزمایش یکی از موارد بسیار مهم است. آزمایش خمش از جمله آزمون‌های مهم برای دستیابی به مشخصه‌های مواد است. در این مقاله، نرخ دز نمونه‌ی استاندارد برای آزمایش خمش گرافیت در رآکتور تحقیقاتی تهران به دست آمد. با استفاده از استانداردهای مختلف مقدارهای دز در فاصله‌های مختلف و دو بازه‌ی زمانی ۱۵ و ۴۰ روز تابش‌دهی محاسبه شد. محاسبه‌ها با استفاده از دو کد اوربجین و ام. سی. پی. ایکس انجام شد. مقدارهای ناخالصی ماده با استفاده از دو تکنیک فلوروسانس پرتو ایکس (XRF) و طیف‌سنجی نشر اتمی پلاسمای جفت شده‌ی (ICP-AES) اندازه‌گیری شد. نتیجه‌های محاسبه‌ها نشان داد که استاندارد کلیبورن و تروبی از استانداردهای دیگر سختگیرانه‌تر بوده و نمونه پس از گذشت ۲۰ روز از تابش‌دهی با رعایت فاصله‌هایی در حدود ۱۰۰ cm دارای دز کمتر از  $2 \mu\text{Sv h}^{-1}$  برای انجام آزمایش‌ها است. هم‌چنین محاسبه‌های مربوط به محفظه‌ی انتقال نشان داد که محدودیتی در انتقال نمونه‌ها وجود ندارد. در نهایت می‌توان گفت روش به کار گرفته شده در این پژوهش می‌تواند برای دیگر مواد موجود در قلب رآکتور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** محاسبه‌ی دز، مقاومت خمشی، رآکتور تحقیقاتی تهران، اوربجین، ام سی پی ایکس

## Sample dose calculation for flexural strength test in Tehran research reactor reflector

M. Amirkhani, M. Hassanzadeh\*, M. Asadi Asadabad, S.M. Mirvakili

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

**Abstract:** Safety is one of the most critical issues in any test. The flexural test is a significant one to obtain material specifications. In this paper, a standard sample dose rate was calculated for the graphite flexural test in Tehran research reactor. Using different standards, the dose was computed at different distances and two periods of radiation, 15-40 days. Our calculations were performed with the ORIGEN and MCNPX codes. The impurity amounts of the material were measured by two methods of X-ray Fluorescence (XRF) and Inductively Coupled Plasma, Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES). The obtained results show that the Claiborne & Trubey standard is more stringent than other standards, and it has less than  $2 \mu\text{Sv/h}$  dose with the observance of 100cm distance and 20 days after irradiation. Moreover, calculations of the transfer chamber indicate that there is no limitation for the transport of the samples. Finally, it can be concluded that the considered method of this research can be used also for other materials at the reactor core.

**Keywords:** Dose calculation, Flexural strength, Tehran reactor, ORIGEN, MCNPX

\*Email: mhasanzadeh@aeoi.org.ir



## ۱. مقدمه

آزمایش، اندازه‌ی نمونه، آماده‌سازی نمونه و ابزارهای آزمایش با فرایند آزمون در ارتباط است. مقاومت خمشی گرافیت به مقاومت ذاتی خمش، اندازه و شدت نقص‌ها وابستگی دارد. پراکندگی طبیعی در داده‌های آزمایش در یک نمونه به دلیل تغییر در پارامترهای اشاره شده است. این آزمایش با هر ماشین آزمایش مناسب که آهنگ یکنواختی از نیرو را اعمال کند قابل انجام است. در ابعاد نمونه‌ی آزمایش، ذکر شده است که نسبت طول به ضخامت کم‌تر از ۶ و نسبت عرض به ضخامت بیش‌تر از ۲ نباشد (شکل ۱) [۸]. در این محاسبه‌ها ابعاد نمونه‌ی مورد آزمایش برابر با  $10\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  در نظر گرفته شده است.

با توجه به تابش نوترون و فعال شدن نمونه‌ی آزمایش به منظور انجام آزمایش‌ها، ضروری است که موارد ایمنی و بهداشتی برای افراد در محیط آزمایشگاه رعایت شود. مهم‌ترین مؤلفه در این بررسی آهنگ دز دریافتی در فاصله‌های مختلف از نمونه‌ی مورد آزمایش و دستیابی به فاصله‌ی ایمن از نمونه است. برای این منظور از دو کد ام سی ان پی ایکس و اورجین استفاده شد. کد ام سی ان پی ایکس به دلیل آن که فرایند را به شکل لحظه‌ای محاسبه می‌کند به تنهایی قادر به انجام محاسبه‌های دز در بازه‌ی زمانی نیست و از کد اورجین برای یافتن مقدار فعالیت در هر یک از زمان‌ها و هم‌چنین طیف گامای گسیل شده از جسم استفاده شد [۹، ۱۰]. کد اورجین به منظور حل معادله‌های بیتمن<sup>۵</sup> و دستیابی به فعالیت نمونه‌ی مورد آزمایش استفاده می‌شود. این کد برای حل معادلات واکنش‌پذیری و واپاشی تعداد زیادی از ایزوتوپ‌ها استفاده می‌شود. کد از روش ماتریس‌نمایی برای حل یک سیستم بزرگ از معادله‌های دیفرانسیل مرتبه‌ی اول، خطی و جفت شده با ضریب‌های ثابت استفاده می‌کند. کتاب‌خانه‌ی بزرگی از داده‌های هسته‌ای شامل نیم- عمرها و برنامه‌ی واپاشی، سطح مقطع‌های جذب نوترون، بهره‌های شکافت، انرژی واپاشی و داده‌های انتشار گامای چند گروهی در این کد وجود دارد [۱۰]. در نهایت محاسبه‌های دز با استفاده از استانداردهای مختلف موجود در کد ام سی ان پی ایکس به انجام رسید [۹]. در این مطالعه، سخت‌ترین شرایط ممکن به منظور انجام آزمایش خمش در نظر گرفته شد.

گرافیت در صنعت هسته‌ای از اولین رآکتور (شیکاگو پیل-۱) تا رآکتورهای کاملاً تجاری استفاده شده است. این ماده یکی از قطعه‌های مورد استفاده در رآکتور قدرت (مانند <sup>۱</sup>HTGR و <sup>۲</sup>VHTR)، رآکتورهای آزمون مواد (مانند <sup>۳</sup>MTR)، رآکتورهای تولیدکننده پلوتونیم و رآکتورهای هم‌جوشی (مانند <sup>۴</sup>ITER) در سراسر جهان است. گرافیت به عنوان بازتاباننده، کندساز و منحرف‌کننده در این رآکتورها استفاده می‌شود [۱-۳]. گرافیت برای این کاربردها از کک چندبلوری ساخته می‌شود و ذرات با تخلخلی برابر با ۲۰٪ به یک‌دیگر می‌چسبند. مشخصه‌های گرافیت هم‌چون پایداری گرمایی و مکانیکی دما- بالا، خواص کندسازی عالی، ماشین‌کاری ساده، قیمت مناسب و سطح مقطع‌های بالای پراکندگی و پایین گیراندازی نوترون سبب شده است گرافیت به عنوان ماده‌ی ساختاری و کندساز در رآکتورها استفاده شود [۴-۶]. مشخصه‌های مکانیکی گرافیت در اثر تابش نوترون به دلیل تغییرات ساختار میکروسکوپی تغییر می‌کند [۱]. اگر چه گرافیت در صنعت هسته‌ای در اولین مدل رآکتور مورد استفاده قرار گرفته است اما متأسفانه به دلیل مشکلات آزمایش‌های تابش نوترون و ساختارهای میکروسکوپی بسیار پیچیده، درک کاملی از مشخصه‌های این ماده تحت تابش وجود ندارد [۷].

مهم‌ترین روش برای دستیابی به تغییرات مشخصه‌های مواد تحت تابش نوتون، قرار دادن نمونه‌ی آزمایشی مطابق با استانداردهای موجود در رآکتور و تابش‌دهی نمونه‌ها در بازه‌های زمانی طولانی مدت و انجام آزمون‌های مورد نظر متعاقب است. یکی از آزمون‌های مهم برای گرافیت آزمایش مقاومت خمشی است. این آزمایش چهارچوبی برای توسعه‌ی مواد، کنترل کیفیت و داده‌های طراحی فراهم می‌کند. در این آزمون بیش‌ترین نیرو بر روی نمونه‌ی گرافیت با نیروی اعمال شده در سه نقطه تعیین و مقدار متوسط مقاومت خمشی در شرایط محیط محاسبه می‌شود. فشار خمشی براساس نظریه‌ی ساده با فرض این‌که ماده، همگن، مدول کششی و فشاری یکسان و ماده کشسان خطی است محاسبه می‌شود. مقاومت خمشی در یک گروه از نمونه‌های آزمایش به‌وسیله‌ی چندین پارامتر از جمله آهنگ نیرو، محیط

4. International Thermonuclear Experimental Reactor  
5. Bateman

1. High-temperature gas-cooled reactor  
2. Very-high-temperature reactor  
3. Materials testing reactor

عیب‌های این روش می‌توان به زمان زیاد برای آماده‌سازی نمونه اشاره کرد [۱۵].

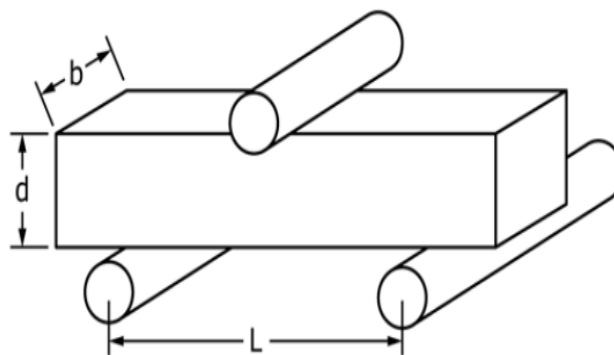
بنابراین هدف از پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود. با توجه به این که منبع اصلی پرتوایی در تجهیزهای فعال‌سازی نوترون است و مقدار آن به ترکیب عنصری مواد مورد استفاده باز می‌گردد [۱۷] بنابراین، این مقاله، ابتدا به تعیین ناخالصی گرافیت مورد آزمایش می‌پردازد. مقدار دقیق ناخالصی‌های گرافیت رآکتور تهران در محاسبه‌های قبل موجود نبوده است و در شبیه‌سازی‌ها از کربن خالص به همراه مقداری بور استفاده شده است. هم‌چنین محاسبه‌ی دز نمونه‌ی گرافیت در بازه‌ی زمانی طولانی با استفاده از کد ام سی ان پی ایکس انجام نشده است. شاری که نمونه‌ی آزمایشی در آن قرار دارد با دقت مناسب اندازه‌گیری و با کمک کد اوريجين، فعالیت نمونه در فاصله‌های زمانی مناسب محاسبه شد و در نهایت با استفاده از کد ام سی ان پی ایکس مقدارهای دز در فاصله‌های مختلف به دست آمد. لازم به ذکر است روش استفاده شده در این پژوهش می‌تواند برای دیگر مواد موجود در قلب رآکتور مانند غلاف سوخت، مواد ساختاری قلب، تجهیزها و ابزارهای مورد استفاده در آن مفید واقع شود.

## ۲. روش کار

### ۱۰.۲ اندازه‌گیری مقدار ناخالصی نمونه

#### ۱۰.۲.۱ تکنیک XRF

ابتدا عناصر موجود در نمونه‌های گرافیت، با استفاده از طیف‌سنجی فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) که شیوه‌ای برای یافتن تمامی ترکیب‌های شیمیایی در همه‌ی مواد است، مشخص شد. در این شیوه ماده می‌تواند به شکل مایع، جامد یا پودر باشد. این شیوه گاهی می‌تواند برای اندازه‌گیری ضخامت و ترکیبات لایه‌ها و پوشش‌ها مورد استفاده قرار گیرد. هم‌چنین این شیوه، روشی غیرمخرب است که تنها به مقدار ناچیزی از ماده برای اندازه‌گیری لازم است. محدوده‌ی اندازه‌گیری این روش در حدود چند میلی‌گرم بر لیتر/ کیلوگرم است. در این شیوه، پرتو ایکس تولید شده توسط یک منبع به نمونه برخورد کرده و عناصر موجود در نمونه پرتو ایکس مشخصه گسیل می‌کنند. با اندازه‌گیری انرژی تابش گسیل شده توسط نمونه، تعیین عنصر



شکل ۱. نمونه‌ی آزمایش مقاومت خمشی و نحوه‌ی قرارگیری آن در دستگاه.

محاسبه‌ها با استفاده از کد ام سی ان پی ایکس و هم‌چنین جیانت<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری ضریب انباشتگی جرمی  $\mu/p$  و عدد اتمی مؤثر  $Z_{eff}$  که در اندازه‌گیری دز مهم هستند در مواد مورد استفاده در رآکتور انجام شده است [۱۱]. هم‌چنین از کد ام سی ان پی برای شبیه‌سازی ابزارهایی هم‌چون سیگما<sup>۲</sup> که برای اهداف دزیمتری نوترون گرمایی با استفاده از کندساز گرافیت طراحی شده استفاده شده است [۱۲، ۱۳]. با استفاده از این کد دز دریافتی در رآکتور تحقیقات پزشکی بروک‌هاون (BMRR) که از گرافیت به عنوان کندساز استفاده می‌کند محاسبه شده است [۱۴].

یکی از موارد مهم در محاسبه‌های نرخ دز، به دست آوردن ناخالصی‌های نمونه‌ی مورد نظر است [۱۱]؛ برای این منظور از تکنیک‌های فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) و طیف‌سنجی نشر اتمی - پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (ICP-AES) استفاده می‌شود. از تکنیک فلورسانسی پرتو ایکس برای تعیین نوع ناخالصی و از تکنیک طیف‌سنجی نشر اتمی - پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی ICP برای تعیین دقیق مقدار ناخالصی در پژوهشی حاضر، بهره گرفته شده است. از مزیت‌های تکنیک XRF می‌توان به سادگی آماده‌سازی نمونه و از عیب‌های آن می‌توان به نیاز به استانداردهای مورد نظر و در نظر نگرفتن عناصر با عدد اتمی زیر ۱۲ اشاره کرد [۱۵]. تکنیک ICP-AES به شکل وسیع به عنوان تکنیک مناسب برای تعیین عناصر شناخته شده است [۱۶]. این تکنیک می‌تواند برای تجزیه‌ی گرافیت با درجه‌ی خلوص بسیار بالا با دقت مناسب بدون نیاز به استاندارد گرافیت مورد استفاده قرار گیرد. از

که در آن  $W$  درصد وزنی ناخالصی،  $I$  مقدار ناخالصی به دست آمده از تجزیه‌ی عنصری توسط ICP بر حسب  $V, mg$  حجم محلول بر حسب لیتر و  $M$  مقدار ماده‌ی حل شده بر حسب  $mg$  است.

با توجه به مطالعات انجام شده، مدت زمان ۷۲ ساعت برای انحلال تمامی عناصر موجود در نمونه در نیتریک اسید ۲٪ حجمی کافی است [۱۵، ۱۷، ۲۱]. پس از انحلال نمونه‌های پودر شده‌ی گرافیت در اسید، هر یک از محلول‌ها از کاغذ صافی واتمن تهیه شده از شرکت سیگما-آلد ریچ عبور داده شده و محلول‌های حاصل مورد تجزیه‌ی عنصری توسط ICP قرار گرفت. این مهم با استفاده از دستگاه واریان، مدل لیبرتی ۱۵۰ آ. ایکس توربو ساخت کشور استورالیا انجام گرفت. همه‌ی مواد شیمیایی مورد استفاده دارای خلوص آزمایشگاهی بودند. در جدول ۱ مقدارهای کسر وزنی و درصد وزنی هر یک از ناخالصی‌ها فهرست شده است. اختلاف بین مقدارها را می‌توان به عللی هم‌چون نایکنواخت بودن نمونه‌ی گرافیت، خطای محاسبه‌های ناشی از مواردی هم‌چون عامل‌های مؤثر در مرحله‌ی تهیه‌ی محلول و رقیق‌سازی و هم‌چنین جداسازی دانست. هم‌چنین در جدول ۲ مقدار میانگین هر یک از ناخالصی‌ها درج شده است.

جدول ۱. مقدارهای ناخالصی در نمونه‌های ۱ و ۲ تعیین شده با تکنیک فلوروسانی پرتو ایکس

عنصر	کسر وزنی (mg/mg)		درصد وزنی	
	نمونه‌ی ۱	نمونه‌ی ۲	نمونه‌ی ۱	نمونه‌ی ۲
Fe	$5,3 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$	۰,۰۰۵۳	۰,۰۰۳۴
Al	۰,۰۰۵۸۶۵	۰,۰۰۰۳۵۴	۰,۵۸۶۵	۰,۰۳۵۴
Ca	۰,۰۰۵۱	۰,۰۰۱۵۱۶	۰,۵۱	۰,۱۵۱۶
Si	۰,۰۰۶۰۱۱	۰,۰۰۰۱۱۲	۰,۶۰۱۱	۰,۰۱۱۲
S	۰,۰۰۰۳۱	۰,۰۰۰۲۱۷	۰,۰۳۱	۰,۰۲۱۷
Na	۰,۰۰۱۰۵۶	۰,۰۰۰۶۱۵	۰,۱۰۵۶	۰,۰۶۱۵
B	۰,۰۰۰۰۶۴	۰,۰۰۰۰۳۴	۰,۰۰۶۴	۰,۰۰۳۴

جدول ۲. ناخالصی نمونه‌ی گرافیت تعیین شده با استفاده از تکنیک ICP-AES

عنصر	کسر وزنی (mg/mg)	درصد وزنی
Fe	۰,۰۰۰۰۴۳	۰,۰۰۴۳
Al	۰,۰۰۰۳۱۱	۰,۳۱۱
Ca	۰,۰۰۰۳۳۰۸	۰,۳۳۰۸
Si	۰,۰۰۰۳۰۶۱	۰,۳۰۶۱
S	۰,۰۰۰۲۶۴	۰,۲۶۴
Na	۰,۰۰۰۸۳۶	۰,۸۳۶
B	۰,۰۰۰۰۴۹	۰,۰۰۴۹

(تحلیل کیفی) و از اندازه‌گیری شدت تابش گسیل شده، مقدار عنصر (تحلیل کمی) ممکن می‌شود [۱۸]. نتیجه‌های آزمون نشان‌دهنده‌ی وجود ناخالصی‌های Fe، Ca، S، Si، Al و در گرافیت است. این تشخیص با استفاده از دستگاه آکسفورد، ای دی ۲۰۰۰ ساخت کشور انگلستان انجام شد [۱۹].

تکنیک XRF شیوه‌ای کیفی و نیمه کمی است که دقت پایینی برای تعیین میزان خلوص مواد دارد. هم‌چنین این شیوه قادر به اندازه‌گیری عنصر با عدد اتمی کم‌تر از عدد اتمی سدیم نیست. از این رو تنها برای تعیین نوع عناصر مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین این پژوهش، برای تعیین دقیق ناخالصی‌ها از تکنیک طیف‌سنجی نشر اتمی-پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی برای عنصرهای به دست آمده در شیوه‌ی XRF و عنصرهای با عدد اتمی کم‌تر از سدیم استفاده شد.

#### ۲.۱.۲ تکنیک ICP-AES

تکنیک ICP شیوه‌ای متداول برای ردیابی فلزها در نمونه‌ها است و با استفاده از طول موج نور گسیل شده از نمونه، نوع عنصر را مشخص می‌کند. این تکنیک برای اولین بار در دهه‌ی ۱۹۶۰ به منظور بهبود رشد بلوری استفاده شده است [۲۰]. در تکنیک ICP نیاز است که محلول آبی مورد استفاده قرار گیرد و برای تهیه‌ی نمونه‌ی مورد تجزیه، نمونه‌ی جامد گرافیت باید در محلول آبی حل شده و سپس تحت تجزیه قرار گیرد. برای این منظور از نیتریک اسید ( $HNO_3$ ) استفاده شد.

در ابتدا مقداری از گرافیت مورد نظر به شکل پودر آماده شد. برای انحلال گرافیت در محلول آبی، از نیتریک اسید ۶۵٪ تهیه شده از شرکت مرک استفاده شد. با استفاده از رقیق‌سازی در آب مقطر، نیتریک اسید ۲٪ حجمی تهیه شد. به منظور افزایش دقت، دو جرم از گرافیت با مقدار ۰,۵۴۹ و ۰,۸۰۵ گرم مورد استفاده قرار گرفت. جرم اول در ۱۰۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۲٪ حجمی و جرم دوم در ۵۰ میلی‌لیتر از همان اسید حل شد. در تکنیک ICP مقدار ماده تأثیری در اندازه‌گیری‌ها ندارد و مقدار ناخالصی‌های هر نمونه به شکل جداگانه و با توجه به وزن آن نمونه اندازه‌گیری می‌شود.

$$W = \frac{I \times V}{M} \times 100 \quad (1)$$

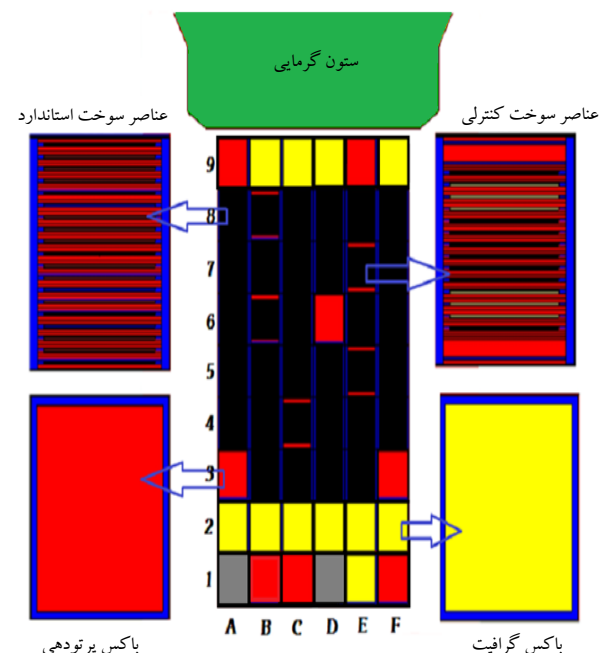
## ۳.۲ محاسبه‌ی فعالیت نمونه

برای محاسبه‌ی فعالیت از کد اورجین استفاده شد. ابتدا مکان پرتودهی نمونه با توجه به برنامه‌ی کاری رآکتور در موقعیت A<sup>۳</sup> در نظر گرفته شد. از محفظه‌ای از جنس آلومینیم به ابعاد ۱۰cm×۶,۸cm×۶,۶cm به منظور ایجاد کانال خشک و افزایش شار نوترون تند و ضخامت ۴mm برای پرتودهی نمونه‌ها استفاده شد. دو مدت زمانی ۱۵ و ۴۰ روز برای پرتودهی نمونه در نظر گرفته شد. شار نوترون بر روی نمونه‌ی گرافیت با کمک کد ام سی ان پی ایکس برابر با مقدار  $۴,۲ \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2}$  محاسبه شد. برای این محاسبه‌ها ۵۰۰ چرخه در نظر گرفته شد. میزان خطای آماری برای این حالت کم‌تر از ۱٪ بود. با توجه به این که مواد موجود در نمونه، مواد شکافت‌پذیر نبوده و هم‌چنین با توجه به خروجی کد اورجین توزیع نوترون در این مسأله وجود ندارد، بنابراین، توزیع فوتون‌های «تولید شده» به عنوان خروجی کد در نظر گرفته شد و برای محاسبه‌ی نرخ دز نمونه به کد ام سی ان پی ایکس انتقال داده شد. شکل ۳ فعالیت پرتوژایی نمونه‌ی گرافیت در فاصله‌ی زمانی ۱۰۰ روز پس از تابش‌دهی که بازه زمانی منطقی برای خنک‌سازی نمونه است، نمایش داده شده است. در نتیجه‌های به‌دست آمده مشاهده می‌شود که در بازه‌های زمانی اولیه تغییرات فعالیت نمونه بسیار شدید بوده و سپس نرخ تغییرات روند کاهشی و آرامتری را دنبال می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که مقدار شار بر روی نمونه‌ها در مقدار فعالیت اولیه‌ی نمونه‌ها مؤثر است. لازم به ذکر است که برای محاسبه‌ی پارامترهای مورد نظر در کد اورجین از کتاب‌خانه فوتون دیک‌۳ استفاده و میزان مصرف سوخت، برای سوخت  $\text{UO}_2$  برابر با  $33000 \text{ MWd/metric ton}$  در نظر گرفته شد.

براساس استاندارد آ.اس. تی. ام. دی ۷۳۰۱ [۲۲] گرافیت درجه‌ی هسته‌ای گرافیتی است که مقدار معادل بور ناخالصی‌های آن که با استفاده از استاندارد آ.اس. تی. ام. سی ۱۲۳۳ [۲۳] قابل اندازه‌گیری است در بازه‌ی ۲-۱۰ ppm باشد.

## ۲.۲ شبیه‌سازی قلب رآکتور تهران

رآکتور تهران یک رآکتور  $5 \text{ MW}$  از نوع استخری با کندساز آب سبک و با سوخت از نوع  $\text{U}_2\text{O}_8\text{Al}$  با اورانیوم غنی شده تا ۲۰٪ است که به منظور تحقیقات، آموزش، آزمایش‌های پرتودهی و تولید رادیوایزوتوپ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. رآکتور دارای دو نوع مجتمع سوخت شامل عناصر سوخت استاندارد ( $\text{SFE}^1$ ) و عناصر سوخت کنترلی ( $\text{CFE}^2$ ) است. گرافیت با خلوص هسته‌ای به عنوان بازتابنده در این رآکتور مورد استفاده قرار گرفته است. پرتودهی مواد در باکس‌های تابش‌دهی ( $\text{IR-Box}$ ) انجام می‌شود. یک ستون گرمایی انباشته شده از گرافیت برای آزمایش‌های تابش با نوترون گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴]. شکل ۲ یک مقطع عمودی از پیکربندی قلب رآکتور تهران را نشان می‌دهد که با کد ام سی ان پی ایکس شبیه‌سازی شده است.



شکل ۲. مقطع محوری قلب رآکتور تهران برای شبیه‌سازی توسط کد ام سی ان پی ایکس.

3. Photon decay

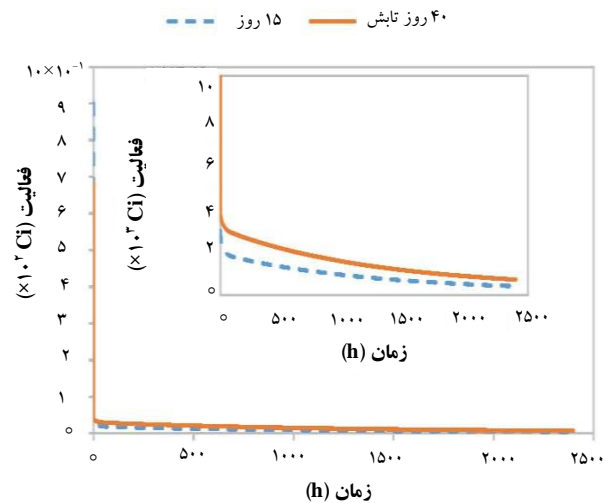
1. Standard fuel element  
2. Control fuel element

### ۳. یافته‌ها و بحث

#### ۱.۳ آهنگ دز نمونه

در شکل ۴ آهنگ دز نمونه ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی به مدت پانزده روز در فاصله‌های مختلف از نمونه نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که استاندارد کلیبورن و تروبی دارای بیش‌ترین مقدار آهنگ دز بود که در نتیجه در شکل ۵ آهنگ دز نمونه در فاصله‌های مختلف با استفاده از این استاندارد نمایش داده شده است. با توجه به نمودارهای نمایش داده شده می‌توان به این نتیجه رسید که برای انجام آزمایش، لازم است که نمونه به کمک ابزاری جابه‌جا شود و امکان در دست گرفتن نمونه وجود ندارد. با توجه به دز مجاز که در فاصله‌ی ۱ متری برای انتقال نمونه کم‌تر از  $100 \mu\text{Sv h}^{-1}$  است [۲۵]، مشاهده می‌شود که فاصله‌ی حدود ۱۰۰ سانتی‌متر از نمونه فاصله‌ی مناسبی برای انجام آزمایش‌ها است.

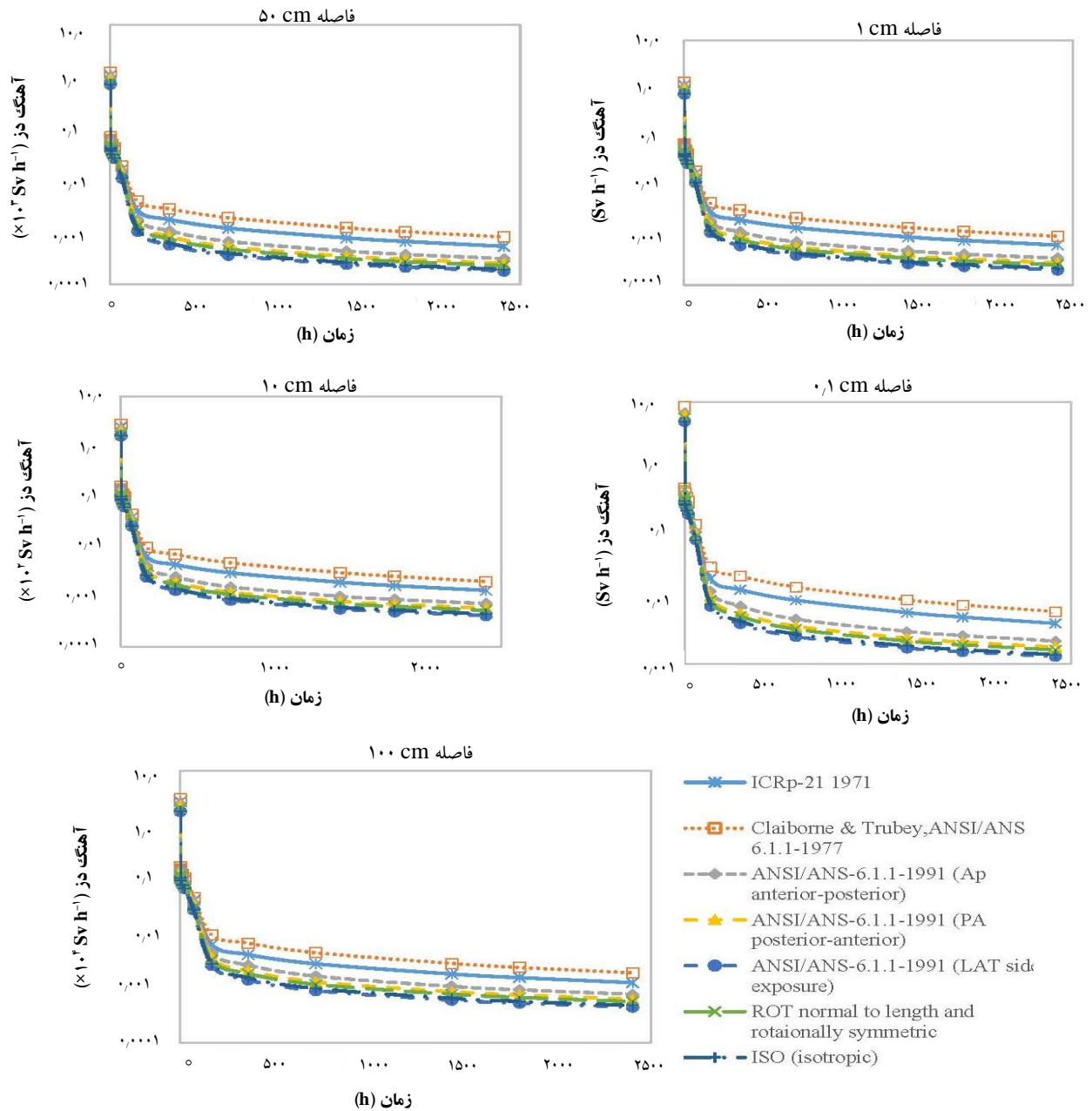
در شکل ۶ آهنگ دز نمونه ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی به مدت چهار روز با استفاده از استانداردهای مختلف در فاصله‌های مختلف از نمونه نمایش داده شده است. مانند بازه‌ی زمانی ۱۵ روز مشاهده می‌شود که استاندارد کلیبورن و تروبی دارای بیش‌ترین مقدار آهنگ دز بوده؛ بنابراین، در شکل ۷ آهنگ دز نمونه در فاصله‌های مختلف از نمونه با استفاده از این استاندارد نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که ۲۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی تغییرات آهنگ دز نمونه بسیار کم است و این زمان برای خنک‌سازی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که استانداردها یا حاصل نتیجه‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه‌های مختلف‌اند و یا با استفاده از مدل‌های ریاضی متفاوت به دست می‌آیند و اختلاف بین آن‌ها قابل توجه نیست.



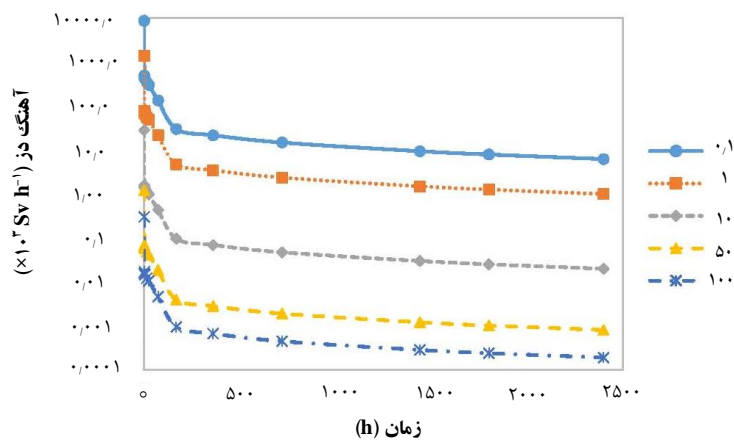
شکل ۳. فعالیت نمونه تابش دیده ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی.

#### ۴.۲ محاسبه‌ی آهنگ دز نمونه

برای محاسبه‌ی آهنگ دز نمونه‌ی پرتو دیده، طیف گاما و فعالیت خروجی از کد اوربجین به عنوان چشمه‌ی گاما در کد ام سی ان پی ایکس در نظر گرفته شد. به منظور کاهش خطای آماری کد ام سی ان پی ایکس از  $10^8$  ذره برای محاسبه‌ها استفاده شد. در این بخش با استفاده از استانداردهای ذکر شده که قابل استفاده در کد ام سی ان پی ایکس هستند به دزیمتری نمونه در فاصله‌های ۰٫۱، ۱، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ cm از نمونه پرداخته شد. فاصله‌های ۰٫۱ و ۱ cm به منظور محاسبه‌ی آهنگ دز جهت لمس نمونه و دیگر فاصله‌ها به منظور محاسبه‌ی نرخ دز در محیط آزمایشگاه در نظر گرفته شد. برای محاسبه‌ی آهنگ دز از تالی F5 و تابع‌های استاندارد موجود در کد ام سی ان پی ایکس استفاده شد. لازم به ذکر است که تعداد ۱۰۰ میلیون تاریخچه برای محاسبه‌ی آهنگ دز در ورودی برنامه در نظر گرفته شد. میانگین خطای محاسبه‌ی حاصل از کد تقریباً ۱٪ است. این کد از فایل کتاب‌خانه‌ی ای ان دی اف/بی-IV برای محاسبه‌ی پارامترهای مختلف از جمله محاسبه‌ی آهنگ دز استفاده می‌کند.

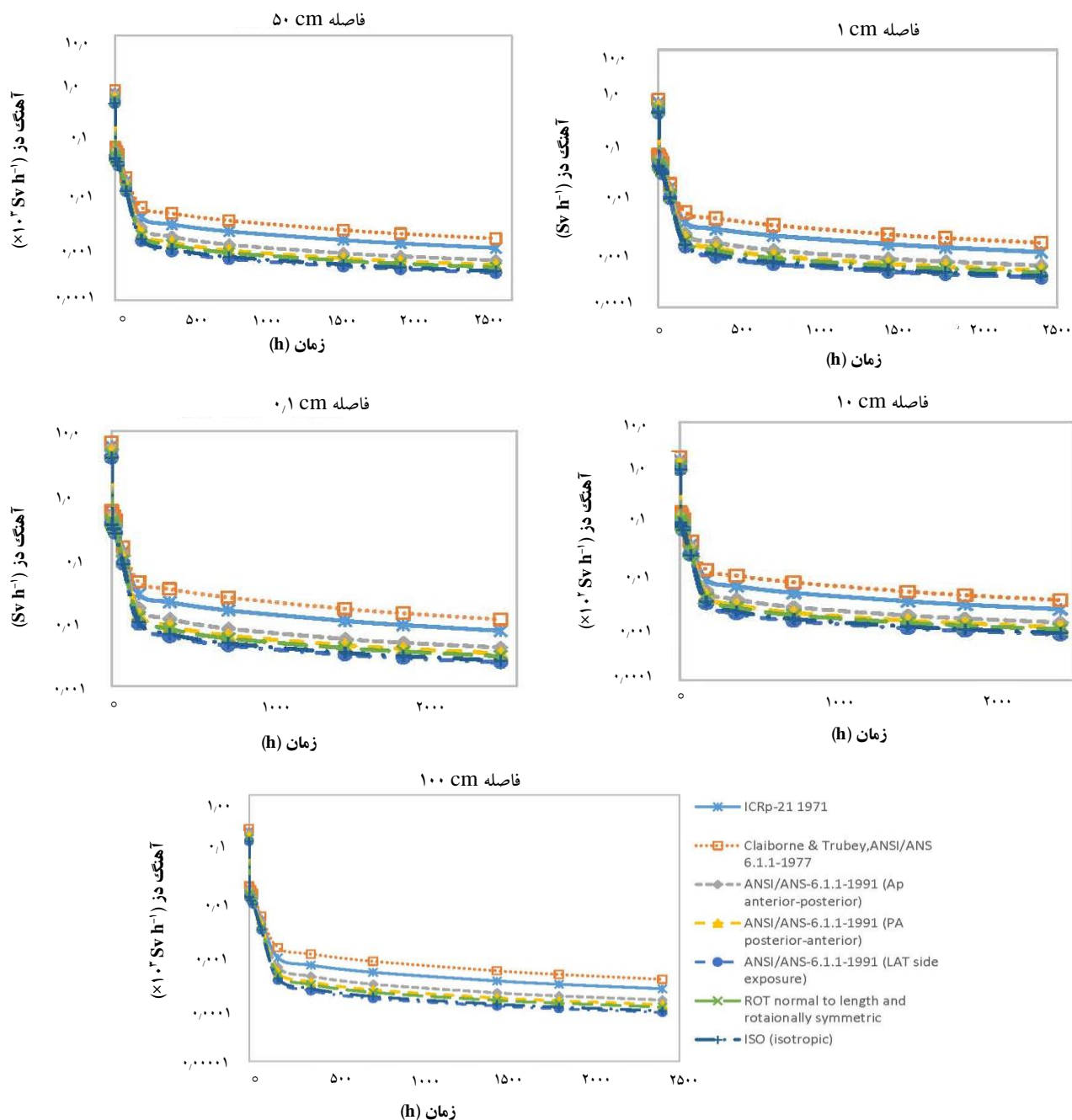


شکل ۴. آهنگ دز نمونه ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی به مدت ۱۵ روز، در فاصله‌های مختلف از نمونه.

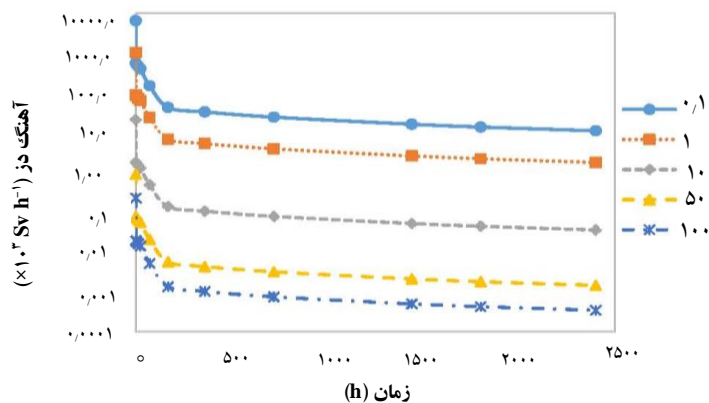


شکل ۵. آهنگ دز نمونه‌ی پرتو دیده به مدت ۱۵ روز، ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی، با استفاده از استاندارد کلیبورن و تروپی در فاصله‌های مختلف از نمونه.





شکل ۶. آهنگ دز نمونه ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتوهی به مدت ۴۰ روز با استفاده از استانداردهای مختلف در فاصله‌های متفاوت از نمونه.



شکل ۷. آهنگ دز نمونه‌ی پرتو دیده ۱۰۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتوهی به مدت ۴۰ روز با استفاده از استاندارد کلیبورن و تروبی در فاصله‌های مختلف از نمونه.

## ۲.۲ محاسبه‌های محافظه‌ی انتقال

با توجه به بالا بودن آهنگ دز نمونه‌ها ۴۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی، محاسبه‌ها برای محافظه‌ی نگه‌دارنده و انتقال نمونه‌های پرتو دیده انجام و محافظه‌ای از جنس سرب با ضخامت‌های ۰/۵ تا ۲/۵ cm در نظر گرفته شد. ضخامت محافظه با توجه به این موضوع، انتخاب شده است که وزن محافظه و نمونه‌ها به مقداری باشد که یک شخص بتواند به راحتی آن را جابه‌جا کند. وزن محافظه به ضخامت ۲/۵ cm در حدود ۱۳ kg است. آهنگ دز در فاصله‌های ۰/۱، ۱، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ cm از سطح محافظه به دست آمده است. انجام محاسبه‌های دزیمتری محافظه‌ی نگه‌دارنده برای ۲۰ روز پس از خاتمه‌ی پرتودهی و با استفاده از استاندارد کلیبورن و تروبی با توجه به نتیجه‌های بخش قبل انجام شده است. حجم کلی نمونه‌ها در یک محافظه‌ی پرتودهی حدود  $100 \text{ cm}^3$  در نظر گرفته شد.

در جدول ۳ مقادیر آهنگ دز محافظه‌ی سربی با ضخامت‌های متفاوت در فاصله‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به دزهای مجاز برای ترخیص نمونه که برای دز چسبیده به محافظه برابر با  $2 \text{ mSv h}^{-1}$  و در فاصله‌ی ۱ m از محافظه برابر با  $100 \mu\text{Sv h}^{-1}$  است، هیچ‌گونه مشکلی برای انتقال نمونه وجود ندارد.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، محاسبه‌ی آهنگ دز نمونه‌ی پرتو دیده به منظور آزمایش مقاومت خمشی گرافیت رآکتور تهران با استفاده از مقدار دقیق ناخالصی‌های موجود در گرافیت انجام شده است. مقادیر ناخالصی نمونه‌ی مورد آزمایش با استفاده از تکنیک‌های تجربی فلورسانسی پرتو ایکس (XRF) و طیف‌سنجی نشر اتمی - پلاسمای جفت‌شده‌ی القایی (ICP-AES) به دست آمده است. از کد اورجین برای محاسبه‌ی فعالیت نمونه‌ها و دست‌یابی به طیف گاما و از کد ام سی این پی ایکس برای دست‌یابی به آهنگ دز در فاصله‌های ۰/۱ و ۱ cm از نمونه به منظور محاسبه‌ی آهنگ دز تماسی نمونه و در فاصله‌های ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ cm از نمونه برای محاسبه‌ی آهنگ دز در محیط آزمایشگاه استفاده شده است. در محاسبه‌ی آهنگ دز از استانداردهای مختلف استفاده و مشاهده شد که استاندارد کلیبورن و تروبی بسیار سخت‌گیرانه‌تر است. در نهایت محاسبه‌های مربوط به محافظه‌ی نگه‌دارنده و انتقال برای نمونه‌ها به انجام رسیده است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده با استفاده از محافظه‌ای به ضخامت ۲ cm از سرب می‌توان نمونه‌ها را با رعایت موارد ایمنی مناسب انتقال داد. همچنین نمونه‌ها پس از گذشت ۲۰ روز از پرتودهی با رعایت فاصله‌هایی در حدود ۱۰۰ cm دارای دز مناسب برای انجام آزمایش هستند. محاسبه‌ها بیان‌گر این است که بهترین روش برای انجام آزمایش‌های آسیب تابشی بر روی مواد استفاده از سلول داغ است ولی با توجه به نبود امکانات و سلول داغ مناسب در اندازه‌ی مناسب و تجهیزهای کافی روش حفظ فاصله با نمونه‌ی پرتو دیده می‌تواند روشی مناسب برای انجام آزمایش‌ها باشد.

جدول ۳. آهنگ دز محافظه‌ی سربی در فاصله‌ها و ضخامت‌های مختلف

ضخامت (cm)	آهنگ دز ( $\times 10^2 \text{ Sv h}^{-1}$ )				
	فاصله ۰/۱ cm	فاصله ۱ cm	فاصله ۱۰ cm	فاصله ۵۰ cm	فاصله ۱۰۰ cm
۰	۹,۳۷	۴,۰۰	۰,۲	۰,۱۰۴	۰,۰۲۵۳
۰,۵	۰,۷۴۷	۰,۴۰۶	۰,۳۱۸	۰,۱۰۷۹	۰,۰۰۴۶۸
۱	۰,۲۹۳	۰,۱۷۲	۰,۱۶۳	۰,۰۰۹۷۴	۰,۰۰۰۲۵۷
۱,۵	۰,۱۳۲	۰,۰۷۸۲	۰,۰۸۶۸	۰,۰۰۰۵۵	۰,۰۰۰۱۴۶
۲	۰,۰۶۱۲	۰,۰۳۷۳	۰,۰۴۷۴	۰,۰۰۰۳۱۷	۰,۰۰۰۰۸۵۱
۲,۵	۰,۰۲۶۸	۰,۰۱۸۳	۰,۰۲۶۳	۰,۰۰۰۱۸۵	۰,۰۰۰۰۵۰۲

## مراجع

1. B.T. Kelly, Graphite—the most fascinating nuclear material. *Carbon*, **20**, 1, 3-11 (1982).
2. H. Atsumi, T. Tanabe, T. Shikama, *Journal of Nuclear Materials*, **39**, 581-584 (2009).
3. C. Hubert, K.O. Voss, M. Bender, K. Kupka, A. Romanenko, D. Severin, C. Trautmann, M. Tomut, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **365**, 509-514 (2015).
4. T.R. Allen, K. Sridharan, L. Tan, W.E. Windes, J.I. Cole, D.C. Crawford, G.S. Was, *Nuclear Technology*, **162**, 3, 342-357 (2008).
5. R. Nightingale, Graphite in Nuclear Industry. *New York and London Academic Press* (1962).
6. P. Thrower, W. Reynolds, *Journal of Nuclear Materials*, **8**, 2, 221-226 (1963).
7. C. Karthik, J. Kane, D.P. Butt, W.E. Windes, R. Ubic, *Carbon*, **86**, 124-131 (2015).
8. ASTM, Standard Test Method for Flexural Strength of Manufactured Carbon and Graphite Articles Using Three-Point Loading at Room Temperature (2015).
9. Pelowitz, DB: MCNPX 2.6.0 manual, LANL, LA-CP-07-1473. *Los Alamos National Laboratory* (2008).
10. M. Bell, ORIGEN: the ORNL isotope generation and depletion code. *Oak Ridge National Lab, Tenn. (USA)* (1973).
11. V.P. Singh, M. Medhat, S. Shirmardi, *Radiation Physics and Chemistry*. **106**, 255-260 (2015).
12. V. Lacoste, V. Gressier, H. Muller, L. Lebreton, *Radiation protection dosimetry*, **110**, 135-139 (2004).
13. N.E. Holden, R.N. Reciniello, J.P. Hu, *Health physics*, **86**, S110-S112 (2004).
14. J.P. Hu, N. Holden, R. Reciniello, in *EPJ Web of Conference, EDP Sciences* (2016).
15. H. Mayer, in *The American Carbon Society's 24th Biennial Conference on Carbon-CARBON* (1999).
16. G.M. Farias, R.G. Wuilloud, S. Moyani, J.A. Gasquez, R.A. Olsina, L.D. Martinez, *Journal of analytical toxicology*, **26**, 6, 360-364 (2002).
17. A. Puzas, V. Remeikis, Z. Ezerinskis, P. Serapinas, A. Plukis, G. Duskesas, *Lithuanian Journal of Physics*, **50**, 4 (2010).
18. P. Brouwer, Theory of XRF. *Almelo, Netherlands: PANalytical BV* (2006).
19. I.O.F. Standardization, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories: ISO/IEC (2005).
20. M. Batsala, B. Chandu, B. Sakala, S. Nama, S. Domatoti, *Int J Res Pharm Chem*, **2**, 3, 671-680 (2012).
21. R. Plukienė, A. Plukis, A. Puzas, V. Remeikis, G. Duskesas, D. Germanas, *Progress in Nuclear Science and Technology*, **2**, 421-426 (2011).
22. ASTM, D7301-11; Standard Specification for Nuclear Graphite Suitable for Components Subjected to Low Neutron Irradiation Dose. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA (2011).
23. A. Standard, C 1233-09 Standard Practice for Determining Equivalent Boron Contents of Nuclear Materials. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.
24. Institute N.S.T.R., TRR-FSAR-New Edition (2009).
25. H. Cember, Introduction to health physics. *Introduction to health physics* (1969).