



## اثر خودحفاظی نمونه روی عدم قطعیت شار نمونه برای یک راکتور تحقیقاتی نوعی

احسان بوستانی، مصطفی حسن‌زاده\*

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

### چکیده

راندمان تولید رادیویزوتوپ‌ها در یک راکتور تحقیقاتی تحت تأثیر متغیرهای مختلفی از جمله دانش شار نوترونی و عدم قطعیت آن‌ها است. همچنین، تولید آن‌ها به طیف و شکل شار نوترون‌ها، خصوصیات نمونه و شرایط پرتودهی در قلب راکتور وابسته است. مشخص کردن مقدار عدم قطعیت پرتودهی یک نمونه، نیازمند مشاهده دقیق همه منابع ممکن عدم قطعیت‌ها است. اثر خودحفاظی نمونه یکی از عوامل موثر در بروز عدم قطعیت در پرتودهی است که به تعداد و هندسه نمونه‌ها یا چگالی‌های آن‌ها وابسته است. در این مقاله، اثر افزایش تعداد و چگالی نمونه‌ها در قلب یک راکتور تحقیقاتی نوعی توان متوسط بررسی و نشان داده شده که می‌تواند سبب عدم قطعیتی به ترتیب به میزان ۷٪ و ۱۲٪ گردد. لیکن با توجه به نتایج به دست آمده در این مقاله، توجه به چگالی و تعداد نمونه‌ها در شرایطی که مقدار آن‌ها از حد مشخصی فراتر رود، از شرط‌های اصلی در لحاظ نمودن عدم قطعیت خواهد بود.

**کلیدواژه‌ها:** راکتور تحقیقاتی، پرتودهی نمونه، فعالیت، عدم قطعیت، اثر خودحفاظی.

## The self-shielding effect of sample on sample flux for one typical research reactor

Ehsan Boustani, Mostafa Hassanzadeh\*

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,  
14395-836, Tehran, Iran.

### Abstract

The efficiency of the production of radioisotopes in a research reactor is influenced by different parameters such as the knowledge of the neutron flux and their uncertainty. Also, this production is dependent to both the spectra and the shape of the neutron flux, sample characteristics and irradiation conditions in the reactor core. Determination of irradiation uncertainty requires careful consideration of all possible sources of uncertainty. The effect of sample self-shielding is one of the effective factors in the occurrence of radiation uncertainty, which depends on the number and geometry of samples or their densities. In this paper, the effect of increasing the number and density of samples in a core of one typical medium power research reactor is investigated and shown that it can cause uncertainty of 7% and 12%, respectively. However, according to the obtained results in this paper, paying attention to the density and number of samples in situations where their value exceeds a certain limit, will be one of the main conditions for including uncertainty.

**Keywords:** Research reactor, Sample irradiation, Activity, Uncertainty, Self-shielding effect.

Email: mhasanzadeh@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

عدم قطعیت نتیجه یک اندازه‌گیری به‌عنوان انحراف از مقدار استاندارد بیان می‌گردد. عدم قطعیت یک اندازه‌گیری نشان دهنده فقدان دانش دقیق از مقدار اندازه‌گیری است. نتیجه اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با بیان عدم قطعیت موجود در اندازه‌گیری باشد [۱]. عدم قطعیت‌ها می‌تواند ناشی از عوامل متعدد باشد. از آنجاکه اندازه‌گیری‌های واقعی هیچگاه در شرایط کامل انجام نمی‌شود، لذا خطاها و عدم قطعیت‌های زیر ایجاد می‌گردد: ابزار اندازه‌گیری، کمیت مورد اندازه‌گیری و فرایند آن، عدم قطعیت‌های وارد شده، مهارت پرسنل، مسایل نمونه برداری و شرایط محیطی. برای داشتن نتایج خوب در هر کاری نیاز به پرسنل قابل<sup>۱</sup> (واجد شرایط)، تجهیزات مناسب<sup>۲</sup> و روش‌های تحلیلی با قابلیت اعتماد بالا<sup>۳</sup> است [۲].

یکی از کاربردهای مهم راکتور تحقیقاتی، پرتودهی نمونه جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های مورد استفاده در پزشکی، صنعتی و کشاورزی است. منابع عدم‌قطعیت در پرتوژایی نمونه‌های تابش دیده بایستی به‌طور دقیق بررسی و شناسایی شود و پس از آن، میزان کمی هرکدام از آنها را به‌دست آورده شود. پرتودهی نمونه به منظور دستیابی به نمونه‌ای با میزان دلخواه پرتوژایی انجام می‌شود. پرتوژایی را می‌توان با استفاده از یک اتافک یونش اندازه‌گیری کرد. مساله انتخاب شکل و اندازه‌های هندسه برای کم کردن اثر خودحفاظی، جلوگیری از فشردگی محلی شار نوترون و تعیین شرایط پرتودهی از جمله مولفه‌های لازم برای دستیابی به میزان فعالیت مورد نظر است. برخی موارد کلی در پرتودهی نمونه‌ها باید رعایت شود که از جمله آنها می‌توان به گزینه‌هایی مثل خلوص بالای نمونه و پرتودهی در شرایط پایدار اشاره کرد [۳].

به دلایل گوناگون، میزان پرتوژایی نمونه خروجی از راکتور با آنچه که مد نظر بوده، متفاوت است. یکی از عوامل، موقعیت استقرار نمونه در قلب راکتور و اثر سایه‌افکنی نمونه‌ها بر روی یکدیگر است. هنگامی که یک نمونه در معرض تابش نوترون قرار می‌گیرد، میزان فعالیت آن در هر ثانیه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۴]:

$$\frac{dN}{dt} = nv \sigma_{act} N_T \quad \phi = nv \quad (1)$$

که  $N_T$  تعداد کل اتم‌های موجود در هدف،  $\phi$  یا  $nv$  شار نوترون،  $\sigma_{act}$  سطح مقطع واکنش و  $N$  تعداد کل اتم‌های فعال شده است. اگر نوترون‌ها دارای توزیع سرعت باشند، در این صورت بایستی مقدار متوسط شار در نظر گرفته شود. از آنجاکه رادیوایزوتوپ تولید شده با نیمه عمر خود شروع به تجزیه می‌کند، در این صورت رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) تغییر می‌کند که نشان‌دهنده نرخ رشد خالص اتم‌های فعال می‌باشد:

$$\frac{dN}{dt} = \phi \sigma_{act} N_T - \lambda N \quad (2)$$

$\lambda N$  نشان‌دهنده نرخ فروپاشی هسته محصول است. رابطه (۳) را می‌توان برای به دست آوردن فعالیت اشباع در زمان‌های بسیار بزرگتر از نیمه عمر به‌صورت زیر حل کرد:

$$S = \frac{0.6 \sigma \phi}{A} (1 - e^{-\lambda t}), \quad \text{for } t \gg t_{1/2} \rightarrow S = \frac{0.6 \sigma \phi}{A} \quad (3)$$

که  $S$  فعالیت<sup>۴</sup> در زمان مورد نظر برحسب تعداد واپاشی بر ثانیه،  $\sigma$  سطح مقطع فعال‌سازی نوترون،  $t$  زمان پرتودهی،  $\lambda$  ثابت واپاشی و  $A$  وزن اتمی عنصر هدف است [۴]. رابطه (۳) به‌روشنی نشان می‌دهد که رشد فعالیت در یک هدف تحت تابش به‌صورت نمایی است و زمان رسیدن به مقدار اشباع به شار نوترون وابسته است.

<sup>1</sup> Qualified personnel

<sup>2</sup> Suitable instrumentations

<sup>3</sup> Highly reliable instrumentation method

<sup>4</sup> Activity

## ۲. روش کار

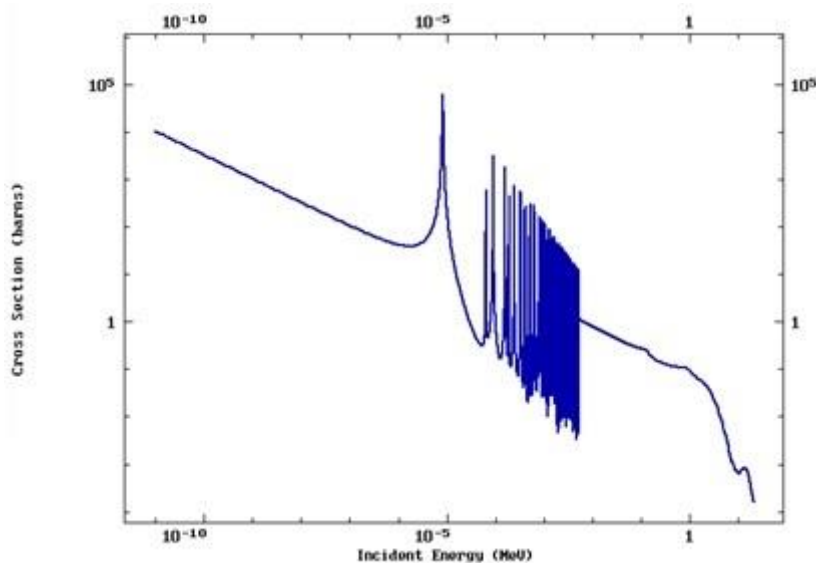
در صورت افزایش تعداد نمونه‌های بارگذاری شده در قلب یا ضخیم، حجیم و چگال بودن نمونه‌های بارگذاری شده برای پرتودهی، اثر خودحفاظتی سبب جذب نوترون در لایه‌های بیرونی جسم شده و در نتیجه از رسیدن همه نوترون‌ها به هسته‌های داخلی‌تر ماده جلوگیری می‌کند. با مطالعه مشخصه‌های نمونه‌ها، امکان بررسی عدم قطعیت ناشی از خودحفاظتی در پرتودهی نمونه وجود دارد که در این صورت معیاری برای چگالی یا ضخامت جسم و ارتباط آن با مدت زمان پرتودهی در هر شار نوترون ارائه خواهد شد.

### ۲.۱. اثر خودحفاظتی

طیف اثر خودحفاظتی نمونه‌ها، برای هدف‌های با سطح مقطع فعال‌سازی نوترونی بالا، غالب است که در آن شار نوترون درون حجم ماده هدف کاهش یافته و در نتیجه از فعالیت نهایی موردنظر کاسته می‌شود. برای مثال، در مطالعه‌ای که روی نمونه‌های تیغه‌ای و کروی انجام شده است، ضریب تصحیح ( $f$ ) وابسته به هندسه هدف بوده و می‌تواند با استفاده از معادله زیر برآورد شود [۳].

$$f = \frac{1}{2\tau} (1 - e^{-2\tau}), \quad \tau = 2\Sigma a' \frac{\text{Volume}}{\text{Surface area}} \quad (4)$$

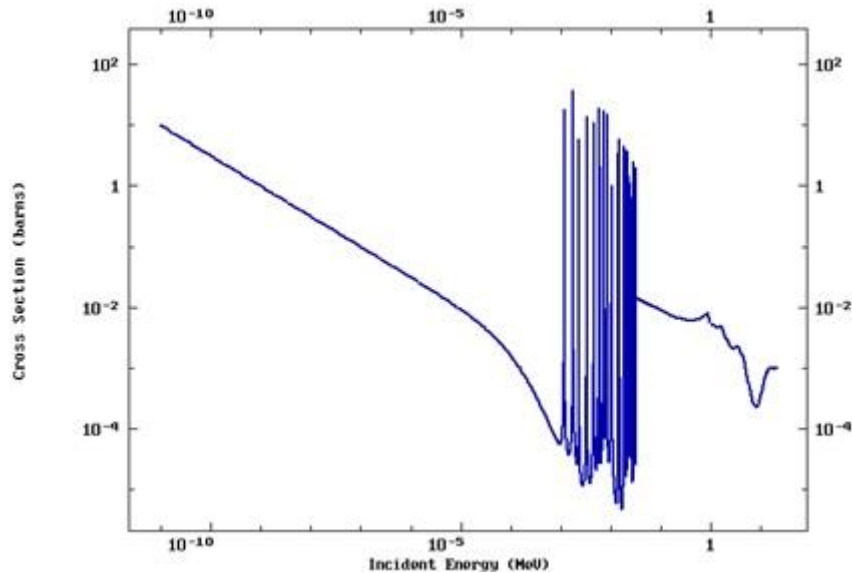
$\Sigma a'$  در رابطه بالا سطح مقطع جذب میکروسکوپی است. خودجذبی سبب از دست رفتن تعدادی از نوترون‌های تولیدی در قلب راکتور می‌شود. این پدیده می‌تواند ناشی از عوامل متعددی از جمله سطح مقطع جذب نوترون بالا، شکل خاص، تعداد نمونه بارگذاری شده در قلب یا چگالی زیاد نمونه پرتودهی شده باشد که مانع از رسیدن همه نوترون‌های تولیدی به ماده مورد نظر می‌شود. نمونه‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق با توجه سابقه پرتودهی در راکتور تهران انتخاب شده که شامل نمونه‌های با سطح مقطع جذب بالا ( $\text{Sm-152}$ ) و پایین ( $\text{Te-130}$ ) می‌باشند. ساماریوم  $^{152}\text{Sm}$  به عنوان محصول تولیدی راکتور با نیمه عمر  $47/28$  ساعت، رادیوایزوتوپی است که در پرتودرمانی برای مداوای درد متاستاز استخوان استفاده می‌شود. این رادیوایزوتوپ از بمباران ایزوتوپ پایدار ساماریوم  $^{152}\text{Sm}$  به صورت اکسید ساماریوم ( $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ) در راکتور تولید می‌شود. سطح مقطع گیراندازی گامای ساماریوم  $^{152}\text{Sm}$  در شکل ۱ نشان داده شده است [۵].



شکل ۱- سطح مقطع گیراندازی تابشی برای ساماریوم  $^{152}\text{Sm}$

محصول دیگر تولیدی راکتور ید ۱۳۱ است. این ایزوتوپ به‌عنوان محصول تولیدی ناشی از پرتودهی نوترونی ایزوتوپ پایدار تلوریم  $^{130}\text{Te}$  در راکتور تهران، رادیوایزوتوپ پرتو‌زایی با تابش بتازای منفی و نیمه عمر ۸ روز است که در درمان

تیروید پرکار، سرطان تیروید و مطالعات تصویربرداری مثل اسکن تیروید استفاده می‌شود. سطح مقطع گیراندازی تابشی تلوریم ۱۳۰ برحسب انرژی نوترون فرودی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- سطح مقطع گیراندازی تابشی برای تلور ۱۳۰

### ۳. محاسبات و نتایج

#### ۳.۱. اثر خودحفاظی ناشی از چگالی

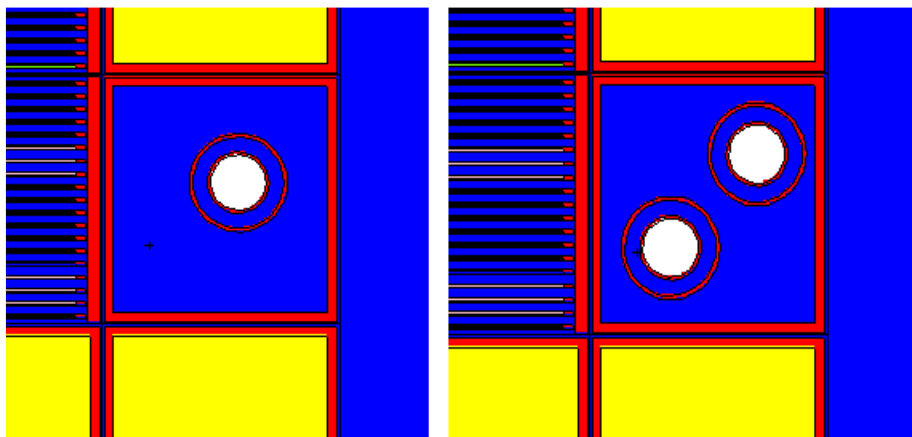
به منظور بررسی اثر خود جذب چگالی نمونه‌ها، سه نمونه ساماریوم با چگالی‌های ۰/۰۸۳۵، ۰/۰۸۳۵ و ۰/۸۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب و تلوریم با چگالی‌های ۰/۵۶۷، ۵/۶۷ و ۱۱/۳۴ گرم بر سانتی متر مکعب در محل پرتودهی در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات قلب که برای پرتودهی نمونه استفاده شده در جدول ۱ آمده است [۶].

جدول ۱. برخی مشخصه‌های راکتور تحقیقاتی تهران

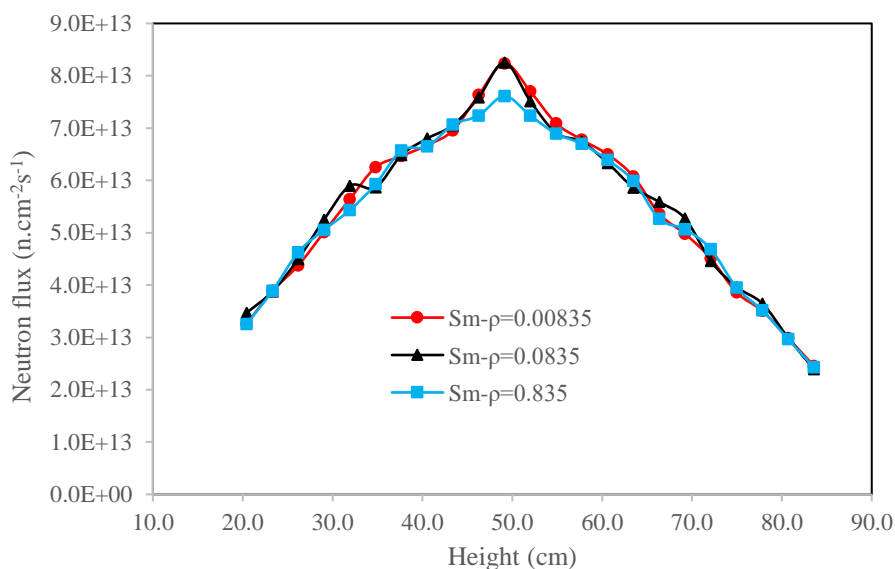
مقدار	کمیت
۶/۷×۶۵/۵×۰/۱۵	اندازه سوخت (سانتیمتر مکعب)
۶/۰×۶۱/۵×۰/۰۷	اندازه گوشت
۱۹	تعداد صفحه سوخت مجموعه سوخت استاندارد
۱۴	تعداد صفحه سوخت مجموعه سوخت کنترلی
۷۶	وزن اورانیوم در هر صفحه سوخت (گرم)
$5 \times 10^{13}$	شار حرارتی متوسط
$1 \times 10^{14}$	شار حرارتی بیشینه
۲۴	تعداد مجموعه سوخت قلب تعادلی

نتایج محاسبات شار نوترون حاصل از کد MCNPX [۷] برحسب ارتفاع کانال پرتودهی برای پرتودهی سه نمونه ساماریوم در شکل ۴ نشان داده شده است. خطای نتایج از کد در تمام محاسبات کمتر از ۳٪ است. تعداد تاریخچه ذرات برای مدت زمان اجرای برنامه در ورودی این کد  $2 \times 10^7$  ذره در نظر گرفته شده است. همچنین از کتابخانه‌های ENDF/B-V و VII برای محاسبه این پارامتر استفاده شده است. قابل ذکر است که تمام نمونه‌ها در مکان پرتودهی درون قلب راکتور مطابق شکل زیر قرار داده شده است. چگونگی قرار گرفتن نمونه‌ها در قلب در

شکل ۳ نشان داده شده است.

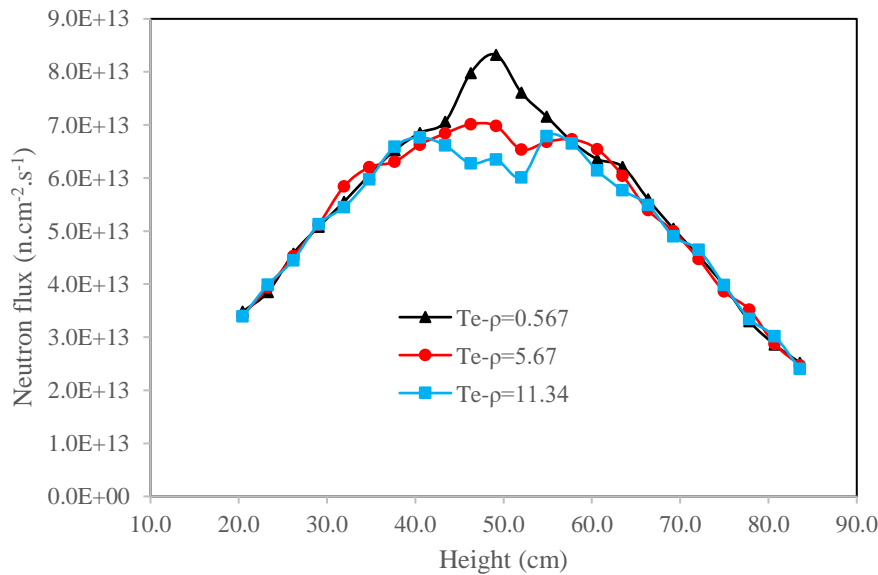


شکل ۳- قرار گیری ۱ یا ۲ نمونه در محل پرتودهی، رنگ‌های آبی، قرمز و سفید به ترتیب برای آب، هوا و غلاف آلومینیوم است.



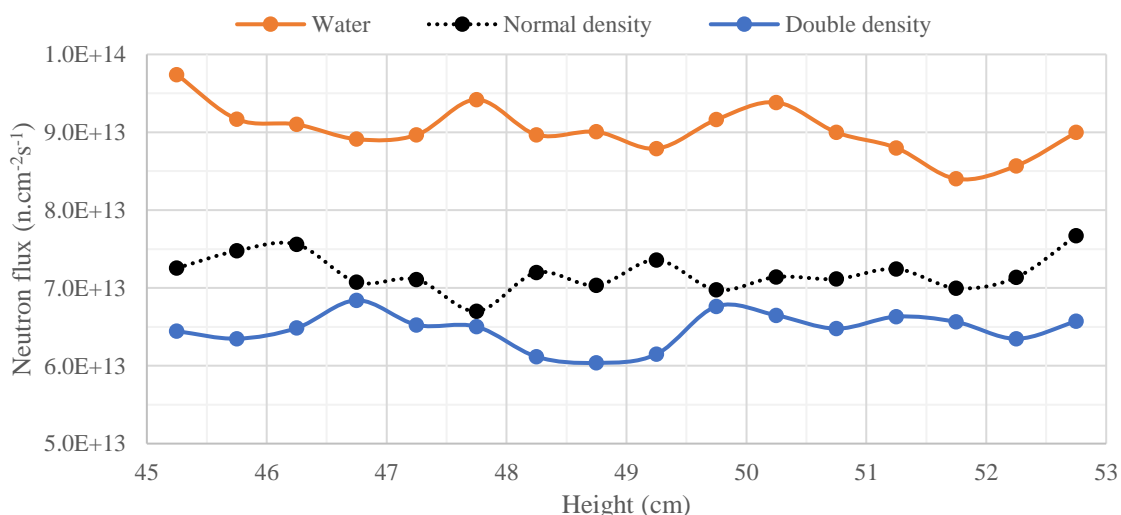
شکل ۴: شار نوترون برای چگالی‌های مختلف نمونه‌های ساماریوم در محل پرتودهی

همانطور که از شکل ۴ دیده می‌شود، بیشترین تغییرات شار نوترون در مرکز نمونه‌های ساماریوم اتفاق می‌افتد. دلیل این رویداد، بیشینه بودن شار نوترون ورودی به نمونه در میانه ارتفاع قلب است که سبب بهتر دیده شدن کاهش شار نوترون در اثر افزایش چگالی نمونه‌ها می‌شود. نمونه ساماریوم با کمترین چگالی (۰/۰۰۸۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب) به عنوان حالت پایه در نظر گرفته شده و تغییرات شار نسب به آن محاسبه شده است. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، بیشینه افت شار نوترون در اثر وارد شدن نمونه‌های ساماریوم در مکان پرتودهی مورد نظر با چگالی‌های ۰/۰۸۳۵ و ۰/۸۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب به ترتیب ۶٪ و ۸٪ می‌باشد که این رویداد به دلیل جذب بیشتر نوترون‌ها با افزایش چگالی ساماریوم است. با توجه به افزایش ۱۰ و ۱۰۰ برابری چگالی برای دو حالت بررسی شده و اینکه در واقع هیچ‌گاه چگالی یک ماده جهت پرتودهی ۱۰ برابر نمی‌شود، اثر سایه افکنی نمونه‌ها برای حالت‌های واقعی، که افزایش چگالی کمتری دارند، قابل توجه نخواهد بود. برای مثالی دیگر، شار نوترون بر حسب ارتفاع محل پرتودهی قبلی برای تلوریم با سه چگالی مختلف شامل ۰/۵۶۷، ۵/۶۷ و ۱۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه شده و در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵: شار نوترون برای نمونه های تلوریم با چگالی های مختلف در محل پرتودهی با افزایش چگالی نمونه پرتودهی به میزان ۱۰ و ۲۰ برابر، بیشینه افت شار نوترون به میزان ۱۶٪ و ۲۴٪ خواهد بود. افت شار نوترون فقط در ارتفاع ۴۵ تا ۵۵ سانتی متر قابل توجه است و در بقیه نقاط در محدوده خطای محاسبات بوده و مقدار قابل توجهی نیست.

باتوجه به اینکه در واقع افزایش چگالی بسیار کمتر از ۱۰ یا ۲۰ برابر است، افزایش چگالی های معمول در بخش عمده ای از محل پرتودهی سبب تغییرات قابل توجهی در شار نوترون نخواهد شد. برای بررسی دقیق تر، تغییرات شار با افزایش چگالی ماده بررسی شده است. این بررسی در ارتفاع ۴۵ تا ۵۵ سانتیمتری که بیشترین مقدار شار نوترون در آنجا است، محاسبه شده و در شکل ۶ آمده است. نمودار آب برای حالتی با ابزار پرتودهی خالی است و دو حالت دیگر برای زمان هایی با چگالی های تلور ۵/۶۷ و ۱۱/۳۴ درون ابزار پرتودهی است.

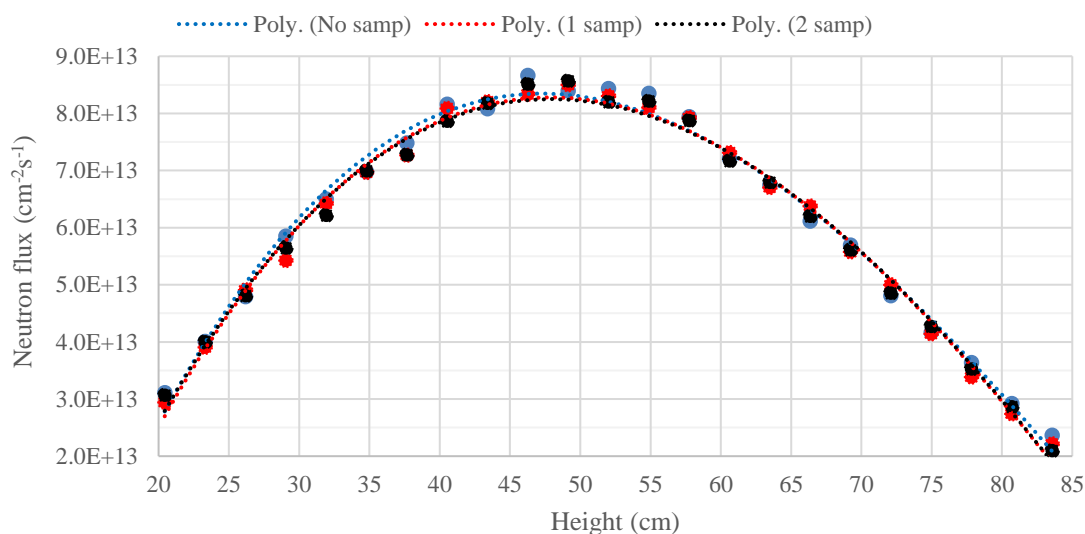


شکل ۶- تغییرات شار نوترون با افزایش چگالی

همان گونه که از شکل ۶ دیده می شود، با افزایش ۲ برابری چگالی ماده، تغییرات شار نوترون قابل توجه بوده و نیاز به در نظر گرفتن ضریب تصحیح مناسب برای لحاظ کردن این افزایش چگالی است.

### ۲.۳. اثر خودحفاظی ناشی از سایه افکنی

هرگاه تعداد ظرف‌های پرتودهی افزایش یابد، امکان دارد روی دریافت شار در دیگر نمونه‌ها یا بخش‌های داخلی‌تر همان نمونه اثر منفی داشته باشد. به‌منظور محاسبه افت شار نوترون در اثر وارد شدن ظرف نمونه‌ها به قلب، شار نوترون بدون در نظر گرفتن ظرف نمونه‌ها (Poly. No sample)، حضور یک (Poly. 1 sample) و دو ظرف نمونه (Poly. 2 sample) در محل پرتودهی شبیه‌سازی شده است. مقادیر شار مربوط به یک محل ثابت برای این ۳ حالت محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تغییرات شار نوترون برای حالت‌های بدون نمونه، یک و دو ظرف نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل دیده می‌شود، بیشترین افت شار نوترون در مرکز ارتفاع نمونه، که دارای بیشینه شار قلب است، اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- تغییرات شار نوترون در اثر وارد شدن نمونه‌ها

مقادیر افت شار نوترون در اثر وارد شدن ظرف خالی نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌دهد، میزان بیشینه افت شار نوترون در اثر وارد شدن یک و دو ظرف نمونه در مکان پرتودهی در محدوده ۴۶ تا ۵۰ سانتیمتر رخ داده و حدود ۴٪ می‌باشد. مقدار متوسط افت شار نوترون برای کل ارتفاع نمونه که در اثر وارد شدن یک یا دو نمونه اتفاق می‌افتد، در محدوده کمتر از ۲٪ است.

### ۵. نتیجه‌گیری

به دلیل متنوع بودن تعداد نمونه‌های ارسالی برای پرتودهی در یک راکتور تحقیقاتی، گزینه‌های متعددی برای چگالی و محل پرتودهی آنها وجود دارد که هرکدام از آنها می‌بایست جداگانه بررسی شود. برای نمونه‌های ساماریوم و تلوریم به عنوان نمونه‌هایی با تعداد پرتودهی قابل توجه، میزان شار برای سه چگالی مختلف نمونه نشان دهنده اثر قابل توجه افزایش چگالی در کاهش شار به ویژه برای نقاط با شار بیشینه است.

باتوجه به محدوده خطای ۳٪ برای نتایج محاسبات کد، از آنجاکه میزان کاهش شار ناشی از ورود یک نمونه به قلب در محدوده این خطا قرار دارد، وارد شدن یک نمونه به قلب بسته به برخی مشخصه‌های نمونه مثل چگالی می‌تواند سبب ایجاد عدم قطعیت قابل اندازه‌گیری شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که وارد شدن یک و دو ظرف نمونه سبب افت شار در نقاط با بیشینه شار به میزانی کمتر از ۴٪ می‌شود. همچنین، مقدار متوسط افت شار نوترون برای این دو حالت ورود ظرف‌های نمونه کمتر از ۲٪ است.





## مراجع

- 
- [1] Bell, Stephanie. "Measurement good practice guide no. 11 (issue 2)." A beginner's guide to uncertainty of measurement. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, United Kingdom (2001).
- [2] Zilli, Mario. "A Practical Guide to the Calculation of Uncertainty of Measurement." Open Toxicology Journal 6, no. 1 (2013): 20-26.
- [3] IAEA, Manual for reactor produced radioisotopes. IAEA-TECDOC-1340, 2003.
- [4] IAEA, Manual for reactor produced radioisotopes. IAEA-TECDOC-1340, 2003.
- [5] <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sSearch2>
- [6] Logbook of Tehran Research Reactor, No. 24, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran, 2020.
- [7] Denise, P. B., "MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory", LA-CP-07-1473, 2008.