



تصحیح منحنی کالیبراسیون دزیمترهای گرمالیان TLD-600 پس از پرتودهی بدون فانتوم با نوترون‌های حرارتی MNSR اصفهان

امیر مصلحی*

پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

*Email: ammoslehi@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۱

چکیده

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که میدان نوترون‌های بیم‌تیوب حرارتی رآکتور چشمه نوترون مینیاتوری اصفهان (MNSR) با داشتن شار و آهنگ معادل دز پایا با زمان، می‌تواند به عنوان میدان کالیبره دز دزیمتری مورد استفاده قرار گیرد. محدودیت اصلی در این زمینه عدم امکان استفاده از فانتوم در پرتودهی دزیمترهای فردی است. این موضوع منجر به پیش‌بینی کم‌تر معادل دز فردی پرتوکاران از مقدار درست خواهد شد. هدف این پژوهش تصحیح پاسخ و در نتیجه منحنی کالیبراسیون دزیمترهای TLD-600 در حالتی است که بدون فانتوم در MNSR پرتودهی شده‌اند. بدین منظور، از شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از ابزار Geant4 استفاده شده است. با توجه به تناسب بین پاسخ دزیمترهای گرمالیان و دز جذب شده در آن‌ها، مقدارهای دزهای جذبی در این دزیمتر در دو حالت پرتودهی با فانتوم و بدون آن محاسبه شده و نسبت آن‌ها به عنوان ضریب تصحیح به پاسخ‌ها در حالت بدون فانتوم اعمال شده و نهایتاً منحنی کالیبراسیون تصحیح شده به دست آمده است. از طرف دیگر، به عنوان یک رویکرد تحلیلی، ضریب تصحیح به صورت نسبت تعداد میانگین انعکاس‌های نوترون‌های حرارتی بین هوا و بافت (حضور فانتوم) و در هوا به تنهایی (بدون فانتوم) در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب تصحیح حاصل از روش‌های شبیه‌سازی و تحلیلی به ترتیب ۱٫۵۷ و ۱٫۴۴ هستند که با اختلاف ۸٪ توافق خوبی دارند. تصحیح پاسخ‌ها منجر به کاهش ضریب کالیبراسیون دزیمترهای TLD-600 از مقدار ۰٫۰۰۱۲ به ۰٫۰۰۰۸ می‌شود.

کلیدواژه‌ها: منحنی کالیبراسیون، دزیمتر TLD-600، فانتوم، نوترون حرارتی، MNSR اصفهان

Correcting the calibration curve of TLD-600 dosimeters after irradiation without phantom by thermal neutrons of Isfahan MNSR

A. Moslehi*

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:11365-3486, Tehran-Iran

Research Article

Received 14.2.2022, Accepted 11.6.2022

Abstract

It is shown recently that the thermal neutron field of Isfahan MNSR with stable flux and dose equivalent rate can be used as a calibration field in dosimetry. The fundamental limit of this field is not the feasibility of using phantom for the irradiation of personal dosimeters. This issue leads to underestimating the personal dose-equivalents from the true values. The subject of this work is to correct the calibration curve of TLD-600 dosimeters irradiated without phantom. To do this, Monte Carlo simulations using Geant4 are carried out and absorbed doses in this dosimeter for irradiation with and without phantom are calculated. Then, the ratio of these doses as a correction factor applies to the responses measured without phantom, and then the corrected calibration curve is determined. As an analytical approach, the correction factor is considered as the ratio of the mean number of thermal neutron reflections between air and water (with phantom) and in the air alone (without phantom). Results obtained show that the correction factors determined by the simulation and analytical methods are 1.57 and 1.44, respectively, which agree well with the 8% difference. Finally, the response correction has led to changing the calibration factor of TLD-600 dosimeters from 0.0012 to 0.0008.

Keywords: Calibration curve, TLD-600 dosimeter, Phantom, Thermal neutron, Isfahan MNSR



۱. مقدمه

نوترون ذره‌ای بدون بار است که با استفاده از اندرکنش با هسته اتم، قابل آشکارسازی است. اندرکنش‌های نوترون برحسب انرژی آن متنوع هستند و منجر به تولید ذرات باردار ثانویه متعدد در ماده تحت تابش نوترون می‌شوند. به طور کلی می‌توان نوترون‌ها را از نظر انرژی به دو دسته اصلی تند و کند تقسیم‌بندی کرد. نوترون‌های تند با کند شدن و پراکندگی‌های کشسان و ناکشسان و نیز نوترون‌های کند عمدتاً با استفاده از جذب اندازه‌گیری و آشکارسازی می‌شوند [۱]. از آشکارسازها و دزیمترهای نوترون می‌توان به آشکارساز ${}^3\text{He}$ [۱]، شمارنده تناسبی معادل بافت [۲]، آشکارساز قطره فوق گرم [۳]، قرص‌های گرمالیان [۴] و آشکارساز ردپای هسته‌ای [۵] اشاره نمود.

در موضوع حفاظت در برابر اشعه، دزیمتری فردی و محیطی نوترون‌ها دشوارتر از سایر پرتوهای یون‌ساز است؛ اول به دلیل داشتن بیناب انرژی، دوم آمیخته بودن با پرتوهای گاما، سوم وابستگی پاسخ دزیمترهای نوترون به انرژی و چهارم فقدان میدان نوترون تک انرژی برای کالیبراسیون [۶]. نوترون‌های تند توسط چشمه‌های رادیوایزوتوپی گسیل می‌شوند و یا می‌توانند در شتابدهنده‌ها از برخورد ذرات باردار مانند پروتون با هدف‌های خاص تولید شوند. برای این نوترون‌ها غالباً چشمه‌های استاندارد ${}^{241}\text{Am-Be}$ و یا ${}^{252}\text{Cf}$ به عنوان چشمه کالیبراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دو چشمه دارای بیناب انرژی هستند که از انرژی‌های کم تا بالاتر از ۱۰ MeV گسترده است [۷]. دزیمترهای نوترون تند تنها در صورتی پاسخ قابل اعتماد خواهند داشت که در میدان‌های نوترون با بیناب انرژی مشابه با میدان کالیبراسیون خود مورد استفاده قرار گیرند. در غیراین صورت پاسخ آن‌ها نیاز به تصحیح دارد [۸].

بر خلاف نوترون‌های تند، نوترون‌های کند و حرارتی از مزیت دارا بودن انرژی‌های تقریباً مشخص برخوردارند. اما این نوترون‌ها چشمه رادیوایزوتوپی ندارند و تنها راه تولید آن‌ها کند نمودن نوترون‌های تند است. یک روش استفاده از یک حفاظ پلی‌اتیلن (یا پارافین) با هندسه و ضخامت مناسب در اطراف یک چشمه نوترون تند است. راه دیگر بیم‌تیوب‌های حرارتی در رآکتورهای تحقیقاتی است که به منظور اهداف خاصی مانند درمان با گیراندازی نوترون با بور^۱ (BNCT)، فعال‌سازی نوترونی^۲ (NAA)، رادیوگرافی نوترون و ... طراحی و ساخته شده‌اند. در هر دو روش به شار بالای نوترون‌های تند نیاز است تا شار قابل قبولی از نوترون‌های حرارتی تولید شود.

در سال ۲۰۱۹ یک بیم‌تیوب حرارتی جدید با قطر ۲۵ cm در رآکتور چشمه نوترون مینیاتوری اصفهان^۳ (MNSR) به منظور انجام آزمایش‌های خارج از هسته رآکتور مانند رادیوگرافی نوترون طراحی و ساخته شده است [۹]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کسر ۹۰٪ از نوترون‌های خروجی از این تیوب دارای انرژی‌های کم‌تر از ۰.۶۲۵ eV با میانگین ۰.۲۵ eV هستند که به صورت موازی و یک‌جهته از تیوب خارج می‌شوند. شار و آهنگ معادل دز (فردی) این نوترون‌ها به ترتیب برابر با $2.37 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ و 9.49 mSv h^{-1} تعیین شده است. در شرایط عادی کاری در MNSR، این مقادیر شار و معادل دز در صفحه خروجی بیم‌تیوب با زمان ثابت و پایا هستند. بر این مبنا در یک پژوهش دیگر در سال ۲۰۲۲، مصلحی و همکاران با اندازه‌گیری منحنی دز-پاسخ دزیمترهای گرمالیان TLD-۶۰۰ و مشاهده خطی بودن این منحنی‌ها در گستره ۰/۱ تا ۳۸ mSv نتیجه گرفته‌اند که میدان نوترون‌های حرارتی MNSR علاوه بر رادیوگرافی می‌تواند به عنوان یک میدان کالیبراسیون در دزیمتری فردی نوترون‌های حرارتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۰]. از طرف دیگر، همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با توجه به فرارگیری استخر و بیم تیوب در کف هال رآکتور کاربر باید از یک نگه‌دارنده برای قرار دادن دزیمترها در مقابل بیم‌تیوب استفاده کند. این بدان معناست که محدودیت اصلی بیم‌تیوب حرارتی MNSR برای انجام کالیبراسیون عدم امکان استفاده از فانتوم در پشت دزیمترها است. در این حالت به ازای یک مقدار معین معادل دز فردی نوترون، پاسخ یک دزیمتر فردی کم‌تر از حالت پرتودهی با فانتوم خواهد بود. بنابراین، در عمل معادل دز پرتوکاران کم‌تر از مقدار درست تعیین خواهد شد. از این رو در مقاله حاضر تصحیح منحنی کالیبراسیون دزیمترهای گرمالیان TLD-۶۰۰ (پس از کسر سهم پرتوهای گامای آمیخته) که در پژوهش پیشین [۱۰] در MNSR اصفهان اندازه‌گیری شده، مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. پرتودهی دزیمترها در مقابل بیم‌تیوب حرارتی MNSR اصفهان بدون امکان استفاده از فانتوم.



۲. روش کار

در هر دو حالت شبیه‌سازی، مقدار دز جذب شده در دزیمترهای TLD-۶۰۰ محاسبه شده و مقدار میانگین آن با استفاده از مقادیر به دست آمده برای چهار دزیمتر تعیین شده است. در نهایت ضریب تصحیح پاسخ‌ها در منحنی کالیبراسیون با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است:

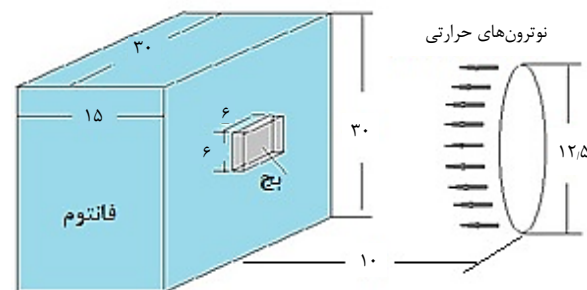
$$c = \frac{\bar{D}_1}{\bar{D}_p} \quad (1)$$

که در آن \bar{D}_1 و \bar{D}_p به ترتیب مقادیر میانگین جذبی دز در حالت‌های پرتودهی با فانتوم و بدون فانتوم است. تعداد نوترون‌ها برابر با 5×10^7 انتخاب شده است تا خطای آماری نسبی در مقادیر دز جذبی در دزیمترها کم‌تر از ۱٪ باشد. لازم به ذکر است که در عمل، پاسخ دزیمترهای گرمالیان پس از فرایند تکثیر در خوانش‌گر به صورت بار الکتریکی بیان می‌شود. اما با توجه به این‌که امکان شبیه‌سازی تکثیرکننده درون خوانش‌گر وجود ندارد، کمیت دز جذبی انتخاب شده است. از آن‌جا که دز جذبی در دزیمتر با بار نهایی خوانده شده متناسب است، نسبت دزهای جذبی با نسبت پاسخ‌ها برابر است.

۳. نتایج و بحث

پس از محاسبه مقادیر دز جذبی \bar{D}_1 و \bar{D}_p مقدار ضریب تصحیح مورد نظر برابر با $c = 1.57 \pm 0.03$ به دست آمده است. به منظور اعمال این ضریب تصحیح به پاسخ‌های تجربی لازم است عدم قطعیت ضریب تصحیح بر اساس پاسخ‌های تجربی اصلاح شود. از آن‌جا که بیشینه خطای نسبی در پاسخ‌های تجربی دزیمترها ۱۸٪ است، خطای نسبی ضریب تصحیح (نسبت پاسخ‌ها) بر اساس روابط انتشار خطا ۲۵٪ خواهد بود. پس ضریب تصحیح به صورت 1.57 ± 0.39 به دست می‌آید. در مرحله بعد، پس از اعمال این ضریب تصحیح به مقادیر پاسخ دزیمتر TLD-۶۰۰ در منحنی کالیبراسیون اندازه‌گیری شده بدون فانتوم [۱۰]، مقادیر پاسخ و عدم قطعیت پاسخ‌های تصحیح شده در حضور فانتوم محاسبه شده‌اند. منحنی کالیبراسیون تصحیح شده در مقایسه با منحنی کالیبراسیون بدون فانتوم در شکل ۳ رسم شده است. مقادیر عدم قطعیت پاسخ‌ها با اطمینان ۶۸٪ (یک ضریب پوششی) به شکل اضافه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از تصحیح تنها ضریب کالیبراسیون (شیب منحنی) دزیمتر TLD-۶۰۰ تغییر می‌کند و از مقدار 0.0012 به 0.0008 کاهش می‌یابد. همچنین، پاسخ دزیمتر به ازای یک مقدار معین معادل دز فردی نوترون‌های حرارتی ۵۷٪ بزرگ‌تر از حالتی است که بدون فانتوم پرتودهی شده است.

همان‌طور که پیش از این اشاره شد، در حال حاضر امکان پرتودهی با فانتوم به صورت تجربی در MNSR وجود ندارد. بنابراین در این مقاله پرتودهی از روش مونت کارلو استفاده شده است. پرتودهی دزیمتر TLD-۶۰۰ (با ابعاد $0.4 \text{ mm} \times 3.1 \text{ mm} \times 3.1 \text{ mm}$ و شامل $0.3\% \text{ } ^6\text{Li}$ و $99.97\% \text{ } ^7\text{Li}$) در دو حالت بدون فانتوم و در حضور فانتوم با استفاده از ویرایش ۱۰/۵ ابزار Geant4 [۱۱] شبیه‌سازی شده است. در هر دو حالت چهار دزیمتر TLD-۶۰۰ درون یک بیج از جنس پلی‌اتیلن با ضخامت 10 mm و ابعاد $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ در نظر گرفته شده‌اند. دزیمترها نیز منطبق با گوشه‌های یک مربع فرضی با ضلع 5 cm درون بیج به گونه‌ای فرض شده‌اند که ضخامت یکسانی از پلی‌اتیلن در پشت و روی آن‌ها قرار گیرد. فانتوم نیز به صورت یک محفظه مکعب مستطیل با دیواره‌هایی از جنس Polymethyl methacrylate (PMMA) با ابعاد $15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ و پر از آب بر اساس استاندارد ISO ۴۰۳۷-۳ [۱۲] در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره در پشت بیج 2.5 mm و سایر دیواره‌ها 5 mm است. در هر دو حالت، نوترون‌های حرارتی با انرژی 0.025 eV و با مقطع دایروی با شعاع 12.5 cm و به صورت موازی و از فاصله 10 cm به بیج تابیده می‌شوند تا شرایط پرتودهی در MNSR معادل‌سازی شود. چشمه نوترون، دزیمترها و فانتوم همگی در یک مکعب هوا با ابعاد 800 cm در نظر گرفته شده‌اند به طوری که بدون فانتوم فاصله طی شده توسط نوترون‌ها حدود 4 m است. برای اندرکنش هادرونیک نوترون‌ها مدل فیزیک QGSP_BERT_HP و برای ترابرد الکترومغناطیسی ذرات باردار ثانویه از مدل فیزیک Lowe_Livermore استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از هندسه پرتودهی شامل بیج و فانتوم نشان داده شده است.



شکل ۲. طرحی از پرتودهی با نوترون‌های حرارتی در MNSR اصفهان که با استفاده از Geant4 شبیه‌سازی شده است (ابعاد برحسب cm هستند).



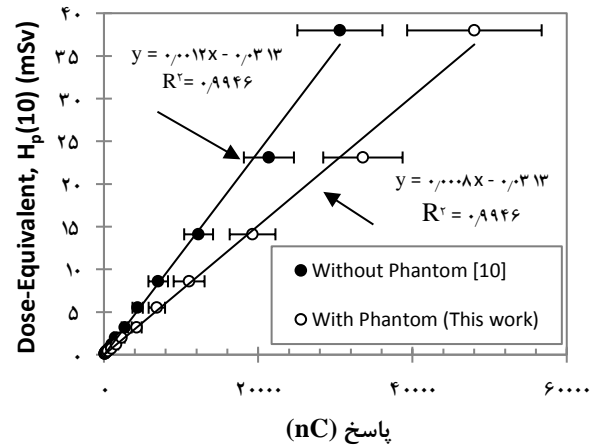
با توجه به این که \bar{n} با شار نوترون‌ها و در نتیجه با معادل دز آن‌ها رابطه دارد، نسبت مقادیر آن در دو حالت مورد نظر می‌تواند به عنوان ضریب تصحیح برای منحنی کالیبراسیون دزیمترهای TLD-۶۰۰ در نظر گرفته شود. در این صورت $\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_r} = 1,44$ خواهد بود که ۸٪ با مقدار ضریب تصحیح به دست آمده از رابطه (۱) (یعنی ۱/۵۷) اختلاف دارد. این نکته بیان‌گر توافق بین ضرایب تصحیح به دست آمده از روش‌های شبیه‌سازی و تحلیلی است. لازم به یادآوری است که اگر به جای ضخامت ۱۵ cm هوا، به عنوان یک حالت حدی فرض کنیم هوا نامحدود باشد آن‌گاه در نهایت تمامی نوترون‌ها منعکس خواهند شد و $\beta = 1$. بنابراین:

$$\bar{n}_r = \frac{1 + (0,39 \times 1)}{1 - (0,39 \times 1)} = 2,29$$

در نتیجه $\frac{\bar{n}_1}{\bar{n}_r} = 0,85$. در این صورت مقادیر دزهای تعیین شده توسط دزیمتر در دو حالت پرتودهی با فانتوم و بدون فانتوم حداکثر ۱۵٪ اختلاف خواهند داشت.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر منحنی کالیبراسیون دزیمترهای گرمالیان TLD-۶۰۰ که پیش از این در میدان نوترون‌های حرارتی MNSR اصفهان و بدون فانتوم پرتودهی شده‌اند، تصحیح شده است. از آن‌جا که امکان استفاده از فانتوم در MNSR وجود ندارد، این تصحیح با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو و ابزار با Geant4 انجام شده است. بدین‌منظور یک ضریب تصحیح به صورت نسبت دزهای جذبی در دزیمتر TLD-۶۰۰ در حالت‌های پرتودهی با فانتوم و بدون فانتوم تعریف شده است. پس از تصحیح پاسخ دزیمتر و منحنی کالیبراسیون آن، پاسخ‌ها به میزان ۵۷٪ بزرگ‌تر و ضریب کالیبراسیون به میزان ۳۰٪ کوچک‌تر از حالتی پرتودهی بدون فانتوم هستند. از طرف دیگر، نسبت تعداد میانگین انعکاس‌های نوترون‌ها در حالت پرتودهی با فانتوم به حالت بدون فانتوم نیز به عنوان ضریب تصحیح در نظر گرفته شده است که مقدار آن با اختلاف ۸٪ با نسبت دزهای جذبی هم‌خوانی دارد.



شکل ۳. منحنی کالیبراسیون تصحیح شده برای دزیمترهای TLD-۶۰۰ در حالت پرتودهی با فانتوم (○) در مقایسه با منحنی کالیبراسیون اندازه‌گیری شده بدون فانتوم (●) [۱۰].

از طرف دیگر، به منظور یک بررسی تحلیلی، موضوع از نقطه نظر انعکاس^۱ نوترون‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. هنگام پرتودهی کسری از نوترون‌های حرارتی پس از نفوذ به بدن (یا فانتوم) جذب نشده و به سمت خارج منعکس می‌شوند. در این حالت انعکاس نوترون‌ها برابر با نسبت شار نوترون‌های خارج شده به شار نوترون‌های برخوردکننده است. نوترون‌ها ممکن است چندین مرتبه بین بدن و هوا منعکس شوند و تعداد میانگین انعکاس‌های متوالی از رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\bar{n} = \frac{1 + \alpha\beta}{1 - \alpha\beta} \quad (2)$$

که در این رابطه $\alpha = 0,39$ و $\beta = 0,82$ به ترتیب مقادیر ضریب انعکاس برای هوا و بافت (آب) در ضخامت ۱۵ cm هستند [۱۳]. اگر فرض کنیم \bar{n}_1 تعداد میانگین انعکاس‌ها بین هوا و بافت (حضور فانتوم) و \bar{n}_r تعداد میانگین انعکاس‌ها در حالت عدم استفاده از فانتوم باشد، مطابق با رابطه (۲)،

$$\bar{n}_1 = \frac{1 + (0,39 \times 0,82)}{1 - (0,39 \times 0,82)} = 1,94 \quad (2)$$

$$\bar{n}_r = \frac{1 + (0,39 \times 0,39)}{1 - (0,39 \times 0,39)} = 1,35$$



1. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement, Fourth Edition* (John Wiley & Sons, USA 2010).
2. H.H. Rossi, M. Zaider, *Microdosimetry and its applications*, (Springer, Germany, 1996).
3. Sh. Badiei, et al, *Development and validation of a Geant4 application to calculate the response matrix of a set of superheated drop detectors under various external pressure*, *Nucl. Sci. Instrum. A*, **939**, 55-60 (2019).
4. F.Y. Hsu, *Dose estimation of the neutrons induced by high energy medical linac accelerator using dual TLD chip*, *Rad. Meas.*, **45**, 739-741 (2010).
5. F. Spurny, K. Turek, *Neutron dosimetry with solid state nuclear track detectors*, *Nucl. Track. Det.*, **1**, 189-197 (1977).
6. ICRU report 26, *Neutron dosimetry for biology and medicine*, (ICRU, 1978).
7. R.V. Griffith, J. Palfalvi, U. Madhvanath, *Compendium of neutron spectra and detector response for radiation protection purposes*, (1990).
8. S. Baradaran, M. Taheri, A. Moslehi, *Comparison and correction of thermoluminescent responses in different neutron fields*, *Iranian. J. Med. Phys.*, **18**, 84-88 (2021).
9. M.H.C. Dastjerdi, et al, *A neutron radiography beamline relying on the Isfahan Miniature Neutron Source Reactor*, *Nucl. Instrument. Meth. A*, **928**, 20-25 (2019).
10. A. Moslehi, et al, *Feasibility study of Isfahan MNSR as a calibration thermal neutron source*, *Nucl. Instrument. Meth. A*, **1024**, 166026 (2022).
11. S. Agostinelli, et al, *Geant4-a simulation toolkit*, *Nucl. Instrument. Meth. A*, **506**, 250-303 (2003).
12. ISO 4037-3, *Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence*, (ISO, 1999).
13. V.F. Kozlov, *A photographic method for personal dosimetry*, (1963).
14. S. Azimkhani, F. Zolfagharpour, F. Ziaie, *Calculation of thermal neutron albedo for mono-material and bi-material reflectors*, *Nucl. Sci. Tech.*, **29**, 130 (2018).

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

امیر مصلحی (۱۴۰۲)، تصحیح منحنی کالیبراسیون دزیمترهای گرمالیان TLD-۶۰۰ پس از پرتودهی بدون فانتوم با نوترون‌های حرارتی MNSR اصفهان، ۱۰۴، ۷۳-۷۷

DOI: 10.24200/nst.2022.1056.1711

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1424.html