



## ارزیابی میکرودوزیمتر طراحی شده برای اندازه‌گیری توزیع انرژی خطی و تعیین ضریب کیفیت نوترون‌ها

امیر مصلحی<sup>۱</sup>، غلامرضا رئیس‌علی\*<sup>۱</sup>، محمد لامعی<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران  
۲. پژوهشکده‌ی فیزیک و شتاب‌گرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** پاسخ انرژی دوزیمترهای متداول نوترون افت و خیز بالایی دارد. هدف پژوهش حاضر ساخت یک دوزیمتر محیطی نوترون به صورت آرایه‌ای از میکرودوزیمترها بود که پاسخ آن وابستگی کم‌تری به انرژی داشته باشد. برای این منظور، قبل از ساخت، یکی از این میکرودوزیمترها طراحی و عملکرد آن برای داشتن رفتار معادل بافت در میدان‌های نوترونی ارزیابی شد. حجم حساس میکرودوزیمتر به شکل استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۵ میلی‌متر و پر شده از گاز معادل بافت، به گونه‌ای طراحی شد که معادل با حجمی کروی از بافت به قطر ۱ میکرومتر رفتار نماید. دیواره‌های آن نیز از جنس پلاستیک‌های معادل بافت و به ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد. توزیع انرژی خطی برای چند انرژی مختلف نوترون‌ها و هم‌چنین برای طیف انرژی چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  با استفاده از کد Geant4 محاسبه و از روی آن ضریب کیفیت نوترون‌ها محاسبه شد. توزیع‌های انرژی خطی با توزیع‌های تجربی گزارش شده و مقدارهای ضریب کیفیت نیز با مقدارهای گزارش شده در ICRU-۴۰ مقایسه شد که توافق خوبی را با یک‌دیگر نشان دادند. نتیجه‌ها نشان داد که میکرودوزیمتر طراحی شده با تقریب خوبی با بافت معادل بوده و می‌تواند به عنوان بخشی از دوزیمتر محیطی، در میدان‌های نوترونی برای اندازه‌گیری معادل دز به کار برده شود.

**کلیدواژه‌ها:** میکرودوزیمتر، توزیع انرژی خطی، ضریب کیفیت، نوترون، چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$

## Evaluation of a microdosimeter designed for measurement of neutron lineal energy distribution and determination of its quality factor

A. Moslehi<sup>1</sup>, G. Raisali\*<sup>1</sup>, M. Lamehi<sup>2</sup>

1. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran  
2. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran – Iran

**Abstract:** Energy response of common neutron dosimeters has a significant deviation. Our goal is to construct an ambient neutron dosimeter as an array of microdosimeters whose response has less dependency on neutron energy. Before construction, the behavior of the microdosimeter as a tissue equivalent in neutron fields has been investigated. The cylindrical sensitive volume of the microdosimeter with 5 mm of diameter and the height filled with a tissue equivalent (TE) gas has been selected to behave like a tissue spherical volume of 1  $\mu\text{m}$  diameter. The walls have been considered as TE plastics with a thickness of 2 mm. The lineal energy distribution for a few single energies of neutrons and also for the energy spectrum of  $^{241}\text{Am-Be}$  source has been calculated using Geant4 toolkit and the quality factors have been worked out. The calculated lineal energy distributions and the values of quality factor for dose equivalent measurement are found to be in good agreement with the experimental measurements reported in ICRU-40. The results show that the designed microdosimeter which is equivalent to the tissue with a good approximation, can be used as a part of the ambient dosimeter for measurement of dose-equivalent in neutron fields.

**Keywords:** Microdosimeter, Lineal energy distribution, Quality factor, Neutron,  $^{241}\text{Am-Be}$  source

\*email: raisali@aeoi.org.ir

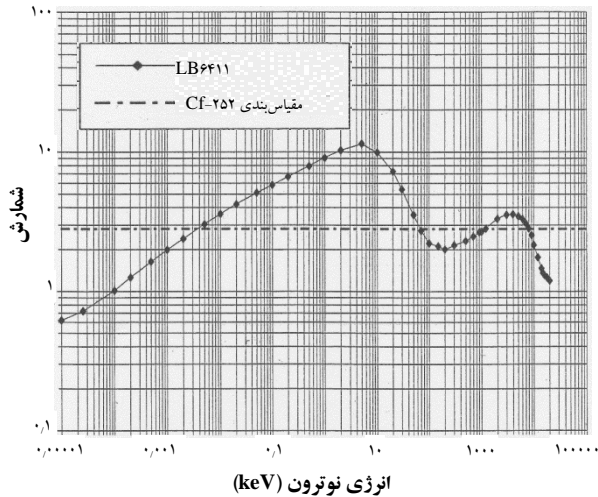
تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱/۱۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱/۲۶



## ۱. مقدمه

در مباحث دزیمتری و حفاظت در برابر تابش کمیت اساسی در ارزیابی تابش، دز جذب شده است؛ کمیت مهم معادل دز از تلفیق آن با ضریب کیفیت پرتو تعیین می شود. دز جذبی، کمیتی غیرآماری<sup>(۱)</sup> است و مقدار متوسط انرژی به جا مانده در یکای جرم ماده است. این مقدار متوسط هیچ گونه اطلاعاتی در مورد توزیع رویدادهای یونش در حجم مورد مطالعه (هدف) ارایه نمی کند. ضرایب کیفیت پرتوها نیز در دزیمتری برحسب انتقال انرژی خطی<sup>(۲)</sup> (LET) محاسبه می شوند [۱]. با توجه به این که انتقال انرژی خطی تنها مقدار متوسط کاهش انرژی ذره ی باردار در یکای طول است و پرتوهای دلتای ناشی از رد ذرات باردار (ساختار ردپا)<sup>(۳)</sup> و طبیعت تصادفی انتقال انرژی به ماده و توزیع رویدادهای یونش را در نظر نمی گیرد [۲، ۳]، نمی تواند ضرایب کیفیت را به دقت پیش بینی نماید.

دزیمتری نوترون ها عمدتاً با استفاده از دزیمترهای مبتنی بر کندشوندگی نوترون ها انجام می شود [۴]. در این دزیمترها نوترون های تند پس از انجام تعداد زیادی پراکندگی کشسان در یک کندکننده با ضخامت کافی، گرمایی شده و پس از اندرکنش در حجمی از  $BF_3$  یا  $^3He$  ثبت می شوند. پاسخ معادل دز این دزیمترها که غالباً براساس شمارش تعداد نوترون های گرمایی تعیین می شود، دارای وابستگی زیادی به انرژی نوترون ها است. به عنوان مثال در شکل ۱ منحنی پاسخ یک نمونه از این دزیمترها (LB ۶۴۱۱) با  $^3He$  در مرکز که در میدان نوترون های  $^{252}Cf$  مقیاس بندی شده، نشان داده شده است [۵]. همان طور که ملاحظه می شود، پاسخ آن دارای افت و خیز زیادی است و در انرژی های حدود ۱۰ keV، تا ۵ برابر مقدار پاسخ در میدان مقیاس بندی هم می رسد. هر چند که با بهینه نمودن طراحی و ضخامت کندکننده تا حدی می توان پاسخ را بهبود بخشید [۶].



شکل ۱. منحنی پاسخ انرژی دزیمتر LB ۶۴۱۱ [۵].

مشخص شده است که استفاده از روش های میکرودمتری با قابلیت تعیین دقیق الگوی میکروسکوپی رویدادهای یونش در بافت [۲، ۳]، امکان برآورد دقیق جذب انرژی را فراهم می کند. شمارنده های تناسبی معادل بافت [۷] به عنوان ابزار متعارف در میکرودمتری از طریق معادل سازی حجم های میکروسکوپی بافت، در دزیمتری پرتوهای گاما و نوترون ها مورد استفاده قرار می گیرند. این شمارنده ها دارای این ویژگی اند که کمیت خوانده شده از آن ها به معادل دز تابش مربوط است [۸]. هم چنین در میدان های مخلوط نوترون-گاما، الگوی میکروسکوپی جذب انرژی به عنوان طیف میکرودمتری، امکان جداسازی کسر دز مربوط به نوترون ها و فوتون ها را بدون نیاز به اندازه گیری مجدد فراهم می نماید [۹]. با قابلیت های ذکر شده، این شمارنده ها علاوه بر ارزیابی دقیق ضریب کیفیت نوترون ها، دارای این توانایی هستند که تا حد زیادی وابستگی پاسخ (نسبت معادل دز میکرودمتری به دز معادل محیطی استاندارد،  $H^*(10)$ ) [۱۰] به انرژی را کاهش دهند. در این راستا پژوهش های متعددی انجام شده است. با معادل سازی ابعاد ۱ یا ۲ میکرومتر از بافت، ضرایب کیفیت و معادل دز نوترون ها محاسبه و یا اندازه گیری شده اند [۱۱، ۱۲، ۱۳].

هدف اصلی پژوهش حاضر ساخت یک دزیمتر محیطی نوترون به صورت آرایه ای از میکرودمترهای یکسان بود. بدین منظور یکی از این میکرودمترها به صورت یک



و احتمال این است که انرژی خطی کوچک‌تر یا مساوی  $y$  باشد. توزیع دز انرژی خطی مربوط به  $f(y)$  نیز  $d(y)$  است که مستقل از دز جذب شده و آهنگ آن است [۳]. ارتباط بین توزیع‌های  $d(y)$  و  $f(y)$  چنین است

$$d(y) = \frac{yf(y)}{\bar{y}_F} \quad (2)$$

که در آن،  $\bar{y}_F = \int_0^{\infty} yf(y)dy$ . ضریب کیفیت تابش "Q" برحسب انرژی خطی چنین تعریف می‌شود [۱۴، ۱۵]

$$\bar{Q} = \int Q(y)d(y)dy \quad (3)$$

که در آن  $Q(y)$  ضریب کیفیت تابش در انرژی خطی  $y$  است که برای حجمی از بافت به قطر ۱ میکرومتر با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۱، ۱۶]

$$Q(y) = 0.3y[1 + (\frac{y}{137})^5]^{-1/4} \quad (4)$$

که در آن،  $y$  برحسب  $\text{keV}/\mu\text{m}$  است.

منحنی تغییرات  $Q(y)$  برحسب  $y$  در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به تعریف چگالی احتمال دز در رابطه‌ی ۲، عامل کیفیت را می‌توان چنین نوشت

$$\bar{Q} = \frac{\int yQ(y)f(y)dy}{\int yf(y)dy} \quad (5)$$

برای محاسبه‌ی توزیع انرژی خطی و عامل کیفیت، میکرودمتر موردنظر به صورت یک حجم حساس (کاوآک) گازی و به گونه‌ای طراحی شد که حجمی به قطر ۱ میکرومتر از بافت را معادل‌سازی کند. بنابراین لازم بود گاز و دیواره‌های آن از مواد معادل بافت باشند تا طبق نظریه‌ی فانو [۲، ۳] مقدار انرژی جذب شده از ذرات باردار ثانویه در حجم کوچک بافت «t» با مقدار انرژی جذب شده در کاواک «g» یکسان باشد، یعنی

$$\Delta E_t = (\frac{dE}{pdx})_t (\rho \Delta x)_t = (\frac{dE}{pdx})_g (\rho \Delta x)_g = \Delta E_g \quad (6)$$

شمارنده‌ی تناسبی معادل بافت قبل از شروع مرحله‌ی ساخت، مورد ارزیابی قرار گرفته است تا پس از تأیید عملکرد پیش‌بینی شده‌ی آن، نسبت به ساخت میکرودمتر و در نهایت دزیمتر محیطی موردنظر اقدام شود.

## ۲. مفاهیم و مبانی محاسباتی

در میکرودمتری، حجم کوچکی از ماده یا بافت به عنوان هدف در نظر گرفته می‌شود و توزیع انرژی به جا مانده<sup>(۴)</sup> در آن با استفاده از ساختار ردپای ذرات باردار با جزییات بیش‌تری تعیین می‌شود. بدین منظور کمیت‌های آماری با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی رویدادهای یونش در هدف تعریف می‌شوند. کمیت اساسی در میکرودمتری انرژی خطی است که هر یک از رویدادهای یونش در هدف را بررسی می‌کند. مکان هر رویداد یونش همان مکان انتقال انرژی<sup>(۵)</sup> است که به صورت آماری به یک‌دیگر وابسته‌اند (مانند ایجاد ردپای یک ذره ی باردار به همراه الکترون‌های ثانویه‌ی آن در هدف) [۲]. در این نقاط، همه یا بخشی از انرژی ذره ی باردار در هدف جذب می‌شود و اثر ناشی از تابش (یونش اتم‌ها، تغییرهای شیمیایی و ...) رخ می‌دهد. انرژی خطی معمولاً برحسب یکای  $\text{keV}/\mu\text{m}$  و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲، ۳]

$$y = \frac{\varepsilon}{l} \quad (1)$$

که در آن،  $\varepsilon$  انرژی داده شده<sup>(۶)</sup> به هدف در یک رویداد یونش و  $l$  طول متوسط وتر<sup>(۷)</sup> هدف (برای حجم‌های هندسی محدب با حجم  $V$  و مساحت سطح  $S$ ،  $l = \frac{4V}{3S}$ ) است. طول متوسط وتر یک مفهوم هندسی است. در میکرودمتری به دلیل کوچکی ابعاد حجم تحت تابش، می‌توان ردپای ذرات باردار عبوری از آن را به صورت خطوط مستقیم و در امتداد وترهای آن در نظر گرفت. در این صورت  $l$  به عنوان طول متوسط وترهای هندسی حجم و نیز طول متوسط ردپاهای ذرات باردار موجود در حجم فرض می‌شود [۲، ۳].

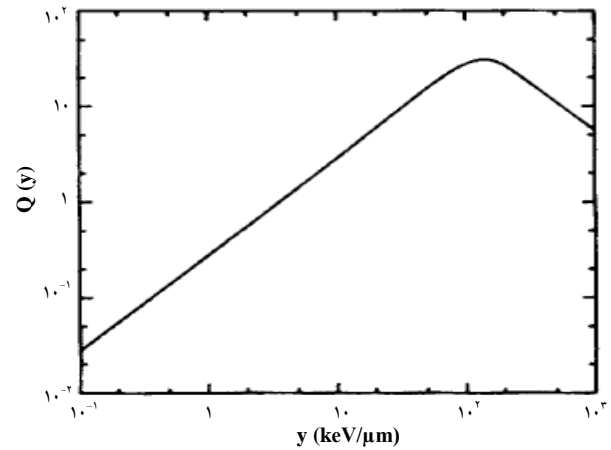
توزیع انرژی خطی (چگالی احتمال)<sup>(۸)</sup>،  $f(y)$ ، به صورت  $f(y) = \frac{dF(y)}{dy}$  تعریف می‌شود که در آن  $F(y)$  تابع توزیع



### ۳. روش کار

در شکل ۳ طرح واره‌ی میکرودمتر طراحی شده نمایش داده شده است. حجم حساس به صورت استوانه‌ای به قطر و ارتفاع ۵ میلی‌متر و گاز معادل بافت درون آن، شامل ۵۵/۰ درصد پروپان، ۳۹/۵ درصد  $CO_2$  و ۵/۵ درصد  $N_2$  انتخاب شده است [۳]. با توجه به رابطه‌های ۷ و ۸، چگالی گاز برابر با  $2.0 \times 10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$  و فشار آن برابر با  $0.115 \text{ atm}$  ( $0.875 \text{ torr}$ ) در دمای  $293.15 \text{ K}$  است. دیواره‌ی جانبی آن از جنس پلاستیک عایق و معادل بافت رکسولیت<sup>(۹)</sup> (پلاستیک C-LEC مدل ۱۴۲۲) به ضخامت ۲ میلی‌متر و دیواره‌های بالایی و پایینی نیز از جنس پلاستیک معادل بافت و پلی‌مر رسانای A-۱۵۰ [۱۷] با همان ضخامت در نظر گرفته شده‌اند [۱۸، ۱۹، ۲۰]. به منظور اطمینان از برقراری تعادل ذرات باردار در دیواره‌های میکرودمتر، ضخامت آن‌ها مساوی با ۲ میلی‌متر انتخاب شد. فضای اطراف میکرودمتر نیز هوا فرض شد.

به منظور محاسبه‌ی توزیع انرژی خطی و ضریب کیفیت نوترون‌ها از کد محاسباتی Geant4.9.4.P02 [۲۱] استفاده شد. در این کد ذرات مطابق با اندرکنش‌های موجود در کلاس PhysicsList ترابرد می‌شوند. در این‌جا از کلاس NeutronHP PhysicsList که در ترابرد دقیق نوترون‌های با انرژی صفر تا ۲۰ MeV به کار می‌رود، استفاده شده است [۲۱]. در این کلاس، در ترابرد نوترون‌ها فرایندهای G4HadronInelasticProcess، G4HadronElasticProcess، G4HadronCapture و G4HadronFission که به ترتیب، مربوط به پراکندگی کشسان، پراکندگی ناکشسان، فروپاشی ذرات ناپایدار (و گیراندازی نوترون‌های گرمایی) و شکافت القایی توسط نوترون هستند، مورد استفاده قرار گرفت. در فرایند یونش ایجاد شده به وسیله‌ی پروتون‌ها و یون‌های سنگین ثانویه در گاز، فرایند G4ionIonization به کار گرفته شد، و برای در نظر گرفتن پرتوهای دلتای تولید شده به وسیله‌ی این یون‌ها نیز فرایند G4ionBraggModel به آن افزوده شد. در تمامی فرایندهای یونش در Geant4، برانگیختگی اتم‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲. منحنی تغییرات ضریب کیفیت برحسب انرژی خطی، محاسبه شده برای ۱ میکرومتر از بافت [۱].

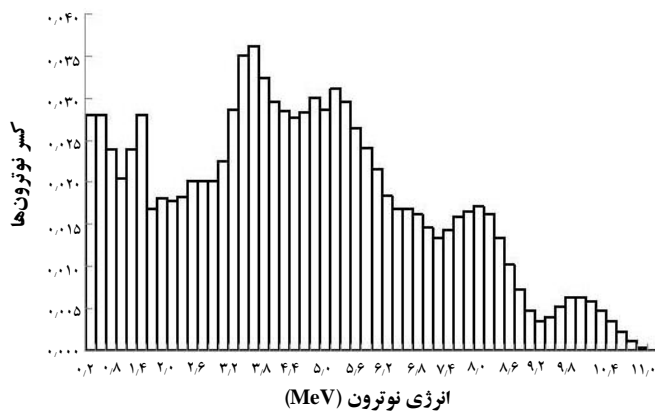
که در آن  $\frac{dE}{pdx}$  توان ایستاندگی جرمی ذرات باردار،  $\rho$  چگالی و  $\Delta x$  قطر حجم موردنظر از بافت و حجم حساس است. از آن‌جا که به دلیل مشابهت ساختار اتمی بافت و گاز معادل بافت، توان‌های ایستاندگی جرمی تقریباً مساویند، رابطه‌ی ۶ به رابطه‌ی زیر تبدیل می‌شود

$$\rho_t \Delta x_t \cong \rho_g \Delta x_g \quad (7)$$

این رابطه چگالی و قطر حجم کوچک بافت را به چگالی و قطر حجم حساس میکرودمتر مربوط می‌کند. با محاسبه‌ی چگالی گاز معادل بافت از رابطه‌ی فوق، فشار آن چنین محاسبه می‌شود

$$P_g = \rho_g \frac{RT_g}{M_g} \quad (8)$$

که در آن  $\rho_g$  چگالی گاز برحسب  $\text{kg/m}^3$ ،  $R (=8.314 \text{ J/mol K})$  ثابت جهانی گازها،  $T_g$  دمای گاز برحسب کلوین،  $M_g$  جرم مولی گاز برحسب  $\text{kg/mol}$  و  $P_g$  فشار آن برحسب پاسکال است. لازم به ذکر است که حجم حساس میکرودمتر می‌تواند به صورت کره یا استوانه‌ی راست (یعنی با قطر و ارتفاع مساوی) باشد که در هر دوی آن‌ها توزیع وتر و طول متوسط یکسان است [۳] و در نتیجه توزیع انرژی خطی در هر دو یکسان خواهد بود. با توجه به سهولت ساخت، در عمل حجم حساس استوانه‌ای شکل ترجیح داده می‌شود، به ویژه این‌که می‌توان میدان الکتریکی متقارن‌تری در درون آن ایجاد نمود.

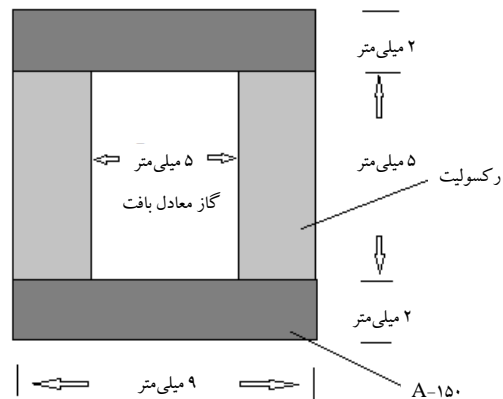


شکل ۴. طیف انرژی نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  [۲۲].

که در آن،  $y_{mi}$  مقدار متوسط هندسی انرژی خطی در بازه‌ی  $\Delta m$  (۳۰۰ تا  $i$ )،  $f_i(y_{mi})$  چگالی احتمال رویدادها در همان بازه و  $Q_i(y_{mi})$  مقدار ضریب کیفیت در انرژی خطی  $y_{mi}$  است که با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود. تعداد نوترون‌های گسیلیده از چشمه به گونه‌ای در نظر گرفته شد که مقدار خطای نسبی انرژی به جا مانده در گاز معادل بافت حداکثر ۱ درصد باشد.

#### ۴. یافته‌ها و بحث

با توجه به فرض‌های در نظر گرفته شده برای میکرودمتر طراحی شده و هندسه‌ی پرتودهی نوترونی توصیف شده در بخش‌های پیشین، توزیع انرژی خطی و ضریب کیفیت برای نوترون‌های با انرژی ۰٫۱، ۰٫۴، ۱٫۰، ۴٫۰ و ۱۰٫۰ MeV و نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  با استفاده از کد محاسباتی Geant4 محاسبه شدند. در شکل ۵ منحنی توزیع انرژی خطی بهنجار شده‌ی به دست آمده برای این نوترون‌ها و نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  نشان داده شده است. توزیع انرژی خطی محاسبه شده با توزیع تجربی مربوط به شمارنده تناسبی معادل بافت استاندارد [۲۳] دارای هم‌خوانی هستند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در همه‌ی توزیع‌ها یک قله‌ی بزرگ دیده می‌شود که برای نوترون‌های با انرژی ۰٫۴ MeV، این قله بیش‌ترین ارتفاع را در بین توزیع‌های رسم شده دارد و مکان آن تقریباً در انرژی خطی  $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$  است. برای نوترون‌های ۰٫۱، ۱٫۰، ۴٫۰ و ۱۰٫۰ MeV مکان قله‌ی پروتون به ترتیب، در انرژی‌های خطی ۸۰، ۳۰ و  $14 \text{ keV}/\mu\text{m}$  و برای نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  نیز در انرژی خطی  $30 \text{ keV}/\mu\text{m}$  قرار دارد.



شکل ۳. مقطع کاواک استوانه‌ای شکل معادل بافت طراحی شده به عنوان میکرودمتر.

چشمه‌ی نوترون به صورت یک چشمه‌ی سطحی دایروی با شعاع ۶ میلی‌متر به گونه‌ای در نظر گرفته شد که نوترون‌ها به صورت موازی و در جهت عمود بر دیواره‌ی بالایی به میکرودمتر تابیده شوند. انرژی‌های ۰٫۱، ۰٫۴، ۱٫۰، ۴٫۰ و ۱۰٫۰ MeV به عنوان انرژی‌های تک و طیف انرژی نوترون‌های گسیلیده از چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  [۲۲] در گستره‌ی انرژی ۲۰۰ keV تا ۱۱٫۲ MeV در نظر گرفته شد. در شکل ۴ طیف انرژی نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  نشان داده شده است که متوسط انرژی آن  $\bar{E}_n = 4.29 \pm 0.10 \text{ MeV}$  است [۲۲].

برای محاسبه‌ی مقدارهای انرژی خطی و توزیع آن‌ها ابتدا مقدار انرژی داده شده به حجم حساس به ازای هر نوترون گسیلیده از چشمه با استفاده از کد Geant4 محاسبه شد. با تقسیم این انرژی به طول متوسط وتر برای حجمی به قطر ۱ میکرومتر از بافت ( $0.67 \text{ میکرومتر}$ )، مقدارهای انرژی خطی محاسبه شد. سپس با انتخاب ۳۰۰ بازه‌ی لگاریتمی برای انرژی خطی از  $10^{-2}$  تا  $10^4 \text{ keV}/\mu\text{m}$  و در نظر گرفتن میانگین هندسی هر بازه،  $y_m$ ، چگالی احتمال رویدادها (تعداد رویدادهای یونش بهنجار شده به تعداد کل رویدادها)،  $f(y_m)$ ، در هر بازه محاسبه شد. در مرحله‌ی بعد با محاسبه‌ی توزیع دز مربوط به آن بازه،  $d(y_m)$ ، منحنی تغییرهای  $y_m d(y_m)$  بر حسب  $y_m$  به عنوان طیف میکرودمتری استاندارد و به صورت بهنجار رسم شد. سرانجام با تبدیل انتگرال به جمع در رابطه‌ی ۵، ضریب کیفیت نوترون‌ها چنین محاسبه شد

$$\bar{Q} \approx \frac{\sum_i^N y_{mi} f_i(y_{mi}) Q_i(y_{mi})}{\sum_i^N y_{mi} f_i(y_{mi})} \quad (9)$$





میکروذیمتر باشد، افزایش انرژی نوترون‌ها تا  $0.4 \text{ MeV}$  باعث می‌شود مطابق با شکل ۵ مکان قله‌ی پروتون‌ها به انرژی‌های خطی بزرگ‌تر منتقل شود. زیرا با افزایش انرژی نوترون، انرژی متوسط پروتون‌ها، و در نتیجه مقدار انرژی به جا مانده در حجم حساس افزایش می‌یابد و منجر به ایجاد مقدارهای انرژی خطی بزرگ‌تر می‌شود. از طرف دیگر با افزایش بیش‌تر انرژی نوترون‌ها برد پروتون‌های پس‌زن بزرگ‌تر از قطر حجم حساس می‌شود و در نتیجه به دلیل کاهش توان ایستاندگی این پروتون‌ها انرژی کم‌تری به حجم حساس انتقال داده می‌شود. در این حالت، مکان قله‌ی پروتون به انرژی‌های خطی کم‌تر انتقال پیدا می‌کند.

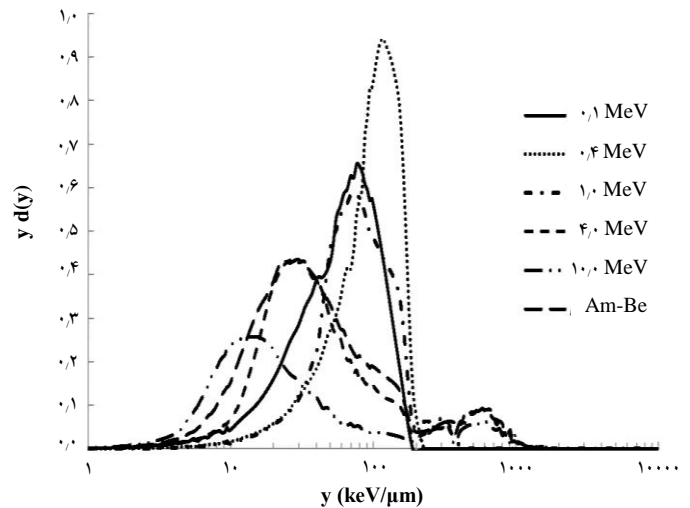
در جدول ۱ مقدارهای ضریب کیفیت محاسبه شده با استفاده از توزیع‌های انرژی خطی همراه با مقدارهای خطای هر کدام و مقدارهای گزارش شده در ICRU-40 [۱] آورده شده است. مقدارهای خطا در هر مورد از حاصل ضرب ضریب کیفیت در مقدار خطای نسبی محاسبه‌ی انرژی به جا مانده در حجم حساس به ازای یک انحراف معیار به دست آمده‌اند. هم‌چنین در شکل ۶ منحنی تغییرات ضریب کیفیت متوسط برحسب انرژی نوترون‌ها به همراه منحنی گزارش شده در ICRU-40 رسم شده است. مقدارهای ضریب کیفیت متوسط نوترون‌ها با مقدارهای گزارش شده در ICRU-40 توافق خوبی را نشان می‌دهد که بیان‌گر رفتار معادل بافت میکروذیمتر طراحی شده است.

جدول ۱. مقدارهای ضریب کیفیت نوترون‌ها

گزارش شده در ICRU-40 [۱]	محاسبه شده از توزیع انرژی خطی <sup>a</sup>	انرژی نوترون (MeV)
۱۷,۴	$16.9 \pm 0.2$	۰,۱
۲۳,۶	$23.2 \pm 0.2$	۰,۴
۲۱,۳	$21.2 \pm 0.2$	۱,۰
۱۲,۰	$12.0 \pm 0.1$	۴,۰
۷,۴	$7.5 \pm 0.1$	۱۰,۰
$11.9^b$	$12.0 \pm 0.1$	<sup>241</sup> Am-Be

a مقدارهای خطای نسبی ذکر شده براساس یک انحراف معیار محاسبه شده‌اند.

b مقدار ذکر شده به صورت مستقیم در ICRU-40 گزارش نشده است، بلکه با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ و میانگین‌گیری ضرایب کیفیت ذکر شده در ICRU-40 برای انرژی‌های گنجانده شده در طیف انرژی به دست آمده است.



شکل ۵. توزیع‌های انرژی خطی استاندارد بهنجار شده برای نوترون‌های با انرژی‌های مختلف. سطح زیر منحنی همه‌ی توزیع‌ها مساوی با ۱ است.

در انرژی‌های موردنظر در این پژوهش، اندرکنش غالب نوترون‌ها با گاز و دیواره‌ی میکروذیمتر، پراکندگی کشسان با هسته‌های مواد معادل بافت (O, N, C, H) است که پراکندگی از هیدروژن بیش‌ترین سهم را دارد [۳]. قله‌ی بزرگ موجود در طیف‌های به دست آمده مربوط به پروتون‌های ثانویه است. مکان انتهایی این قله، لبه‌ی پروتون<sup>(۱۰)</sup> نامیده می‌شود و مربوط به پروتون‌های پس‌زده شده‌ای است که برد آن‌ها تقریباً مساوی با قطر حجم حساس میکروذیمتر است [۲، ۳]. محاسبات نشان می‌دهد که مقدار انرژی انتقال داده شده به حجم حساس، به وسیله‌ی این پروتون‌ها برابر با  $93.4 \text{ keV}$  است که با توجه به مقدار  $0.67 \text{ μm}$  میکرومتر طول متوسط و تر حجم کوچک بافت، مقدار انرژی خطی در لبه‌ی پروتون برای همه‌ی نوترون‌ها مساوی با  $140 \text{ keV/μm}$  خواهد بود. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، قسمت‌هایی از طیف میکروذیمتری نوترون‌های  $4.0 \text{ MeV}$ ،  $10.0 \text{ MeV}$  و نوترون‌های چشمه‌ی <sup>241</sup>Am-Be در انرژی‌های خطی بزرگ‌تر از لبه‌ی پروتون دیده می‌شود که مربوط به هسته‌های پس‌زن سنگین‌تر از پروتون است. زیرا با افزایش انرژی، احتمال پراکندگی کشسان نوترون از هسته‌های سنگین‌تر افزایش می‌یابد [۳] و توان ایستاندگی این هسته‌های پس‌زن بزرگ‌تر از پروتون‌های پس‌زن است.

اگر انرژی نوترون‌ها آن‌قدر پایین باشد که بیشینه‌ی برد پروتون‌های پس‌زن کوچک‌تر از قطر حجم حساس

معادل است. برای نوترون‌های تک انرژی مقادیر ضریب کیفیت محاسبه شده با استفاده از توزیع‌های انرژی خطی توافق خوبی با مقادیرهای گزارش شده در ICRU-۴۰ دارند و حداکثر اختلاف بین این دو مقدار ۶ درصد است. برای نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  با طیف انرژی پیوسته نیز ضریب کیفیت محاسبه شده با استفاده از توزیع انرژی خطی مساوی با ۱۲٫۰ است و با مقدار میانگین گیری شده از طیف انرژی که مساوی با ۱۱٫۹ است توافق خوبی دارد. این توافقات بیان‌گر توانایی پیش‌بینی عملکرد مناسب میکرودمتر برای اندازه‌گیری توزیع انرژی خطی و استفاده از آن در تعیین دقیق‌تر ضریب کیفیت ماکروسکوپی در دزیمتری نوترون‌ها است.

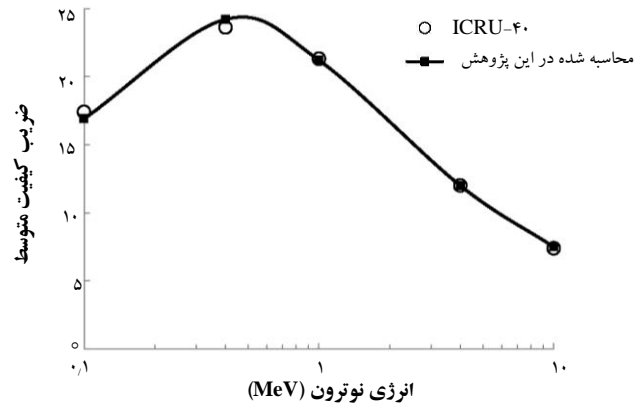
از طرف دیگر توزیع انرژی خطی بدون توجه به تک انرژی یا دارای طیف انرژی پیوسته بودن نوترون‌ها ضریب کیفیت را به درستی تعیین می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با میکرودمتر طراحی و ساخته شده، در یک میدان نوترونی با طیف انرژی مجهول می‌توان به درستی ضریب کیفیت را تعیین نمود که یک ویژگی برجسته برای آن محسوب می‌شود. در مجموع ارزیابی انجام شده در این پژوهش نشان داد که میکرودمتر طراحی شده به عنوان بخشی از یک آرایه می‌تواند در ساخت دزیمتر محیطی مورد استفاده قرار گیرد و می‌توان با اطمینان به منظور اندازه‌گیری معادل دز از آن استفاده نمود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌های ارزشمند آقای دکتر فرید سمسارها در استفاده از کد Geant4 قدردانی می‌نمایند.

### پی‌نوشت‌ها

1. Non-stochastic quantities
2. Linear energy transfer
3. Track structure
4. Deposited energy
5. Energy transfer points
6. Imparted energy
7. Mean chord-length
8. Lineal energy distribution
9. Rexolite
10. Proton-edge
11. KERMA response function



شکل ۶. منحنی تغییرهای ضریب کیفیت محاسبه شده و مقایسه‌ی آن با مقادیرهای گزارش شده در ICRU-۴۰ [۱].

در نهایت به منظور مقایسه، ضریب کیفیت نوترون‌های چشمه‌ی  $^{241}\text{Am-Be}$  با استفاده از روش میانگین‌گیری روی طیف انرژی این نوترون‌ها از طریق تقسیم آن به ۵۹ بازه‌ی انرژی با پهنای ۲۰۰ keV و با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه شد

$$\bar{Q} \approx \frac{\sum_{j=1}^{59} Q_j(E_j) g_j(E_j) R_j(E_j)}{\sum_{j=1}^{59} g_j(E_j) R_j(E_j)} \quad (10)$$

که در آن  $Q_j(E_j)$  ضریب کیفیت گزارش شده در ICRU-۴۰،  $g_j(E_j)$  کسر نوترون‌ها در گروه انرژی  $g_j$  و  $R_j(E_j)$  تابع پاسخ کرما<sup>(۱۱)</sup> مربوط به بازه‌ی  $E_j$  زام با انرژی متوسط  $E_j$  در طیف نوترون‌های  $^{241}\text{Am-Be}$  است. مقادیرهای تابع پاسخ کرما استفاده شده برحسب  $\text{Gy-cm}^2$ ، در کره‌ی ICRU (از جنس بافت) توسط کد کامپیوتری NJOY و با استفاده از داده‌های کتابخانه‌ی ENDF/B-V محاسبه شده‌اند [۲۴]. مقدار ضریب کیفیت با استفاده از این روش با مقدار حاصل از توزیع انرژی خطی هم‌خوانی خوبی دارد. این توافق بیان‌گر این نکته است که همانند نوترون‌های تک انرژی، برای نوترون‌های با طیف انرژی پیوسته نیز از توزیع انرژی خطی به دست آمده به وسیله‌ی میکرودمتر طراحی شده، ضریب کیفیت با دقت خوبی می‌تواند محاسبه شود.

### ۵. نتیجه‌گیری

توزیع‌های انرژی خطی به دست آمده از میکرودمتر طراحی شده، با توزیع‌های تجربی گزارش شده هم‌خوانی دارند و از این رو میکرودمتر با تقریب بسیار خوبی با ۱ میکرومتر از بافت



- [1] ICRU Report 40, The quality factor in radiation protection, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, Maryland (1986).
- [2] H.H. Rossi, M. Zaider, Microdosimetry and its applications, Spriger-Verlag, Berlin (1996).
- [3] ICRU Report 36, Microdosimetry, International Commission on Radiation Units and Measurements, USA (1983).
- [4] ICRU Report 26, Neutron dosimetry for biology and medicine, Bethesda, Maryland (1977).
- [5] Neutron Probe LB 6411, Berthold company (1996).
- [6] G.F. Knoll, Radiation detection and measurement, Fourth Edition, John Wiley & Sons, USA (2010).
- [7] H.H. Rossi, W. Rosenzweig, A device for the measurement of dose as a function of specific ionization, Radiology, 64 (1955) 404-411.
- [8] H. Schuhmacher, Tissue-equivalent proportional counters in radiation protection dosimetry: expectations and present state, Radiat. Prot. Dosim., 44 (1992) 199-206.
- [9] J. Booz, Development of dose equivalent meters based on microdosimetric principles, Radiat. Environ. Biophys., 23 (1984) 155-170.
- [10] G. Leuthold, V. Mares, H. Schraube, Calculation of the neutron ambient dose equivalent on the basis of the ICRP revised quality factors, Radit. Prot. Dosim., 40 (1992) 77-84.
- [11] B. Kawecka, K. Morstin, J. Booz, Optimization of the design of microdosimetric dose equivalent meters, Radiat. Prot. Dosim., 9 (1984) 203-206.
- [12] S. Gerdung, R.E. Grillmaier, T. Lim, P. Pihet, H. Schuhmacher, P. Segur, Performance of TEPCs at low pressure: some attempts to improve their dose equivalent response in the neutron energy range from 10 keV to 1 MeV, Radiat. Prot. Dosim, 52 (1994) 1-4.
- [13] L. Braby, G.D. Badhwar, Proportional counters as neutron detector, Radiat. Meas., 33 (2001) 265-267.
- [14] M. Zaider, D.J. Brenner, On the microdosimetric definition of quality factors, Radiat. Res., 103 (1985) 302-316.
- [15] A.M. Kellerer, K. Hahn, The quality factor for neutrons in radiation protection: physical parameters, Radiat. Prot. Dosim., 23 (1988) 73-78.
- [16] A.M. Kellerer, K. Hahn, Considerations on a revision of the quality factor, Radiat. Res., 114 (1988) 480-488.
- [17] L.J. Goodman, Density and composition uniformity of A-150 tissue equivalent plastic, Phys. Med. Biol., 23(4) (1978) 753-758.
- [18] S.H. Byun, G.M. Spirou, A. Hanu, W.V. Prestwich, A.J. Waker, Simulation and first test of a microdosimetric detector based on a thick gas electron multiplier, IEEE Trans. Nucl. Sci., 56 (3) (2009) 1108-1113.
- [19] A. Hanu, S.H. Byun, W.V. Prestwich, A Monte carlo simulation of the microdosimetric response for thick gas electron multiplier, Nucl. Instrum. Method A, 662 (2010) 270-275.
- [20] G.M. Orchard, K. Chin, W.V. Prestwich, A.J. Waker, S.H. Byun, Development of a thick gas electron multiplier for microdosimetry, Nucl. Instrum. Method A, 638 (2011) 122-126.
- [21] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, Geant4-a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Method A, 506 (2003) 250-303.
- [22] K.W. Geiger, L. Van Der Zwan, The Neutron spectrum of a  $^{241}\text{Am-Be}$  ( $\alpha, n$ ) source as simulated by accelerator produced  $\alpha$ -particles, Int. J. Appl. Radiat. Isot., 21 (1970) 193-198.
- [23] A.J. Waker, Principles of experimental microdosimetry, Radiat. Prot. Dosim., 61(4) (1995) 297-308.
- [24] J.K. Shultis, R.E. Faw, Radiation shielding, American Nuclear Society, USA (2000).