

ارزیابی یک میکرودمتر طراحی شده به منظور اندازه‌گیری معادل دز نوترون‌ها در میدان‌های آمیخته‌ی نوترون-گاما

امیر مصلحی

تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶
پست الکترونیکی: ammoslehi@aeoi.org.ir

چکیده

در پژوهش حاضر یک میکرودمتر طراحی شده به منظور اندازه‌گیری معادل دز نوترون‌ها، پیش از ساخت در میدان‌های آمیخته‌ی نوترون-گاما $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf مورد ارزیابی قرار گرفته است. میکرودمتر به صورت آرایه‌ای از ۲۵۹ حجم حساس یکسان به منظور افزایش حساسیت به نوترون‌ها در نظر گرفته شده است. هر حجم حساس به شکل استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۵ mm پر از گاز معادل بافت با فشار ۱ atm طراحی شده است تا $1\ \mu\text{m}$ از بافت را معادل‌سازی نماید. مقادیر معادل دز نوترون‌ها با استفاده از توزیع میکرودمتری میدان آمیخته که با استفاده از بسته‌ی شبیه‌سازی Geant4 محاسبه شده‌اند و با در نظر گرفتن حد جدایی $3/5\ \text{keV}/\mu\text{m}$ بین سهم نوترون‌ها و پرتوهای گاما در این توزیع‌ها تعیین شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر معادل دز برای دو میدان مذکور به ترتیب ۹٪ و ۱۷٪ با مقادیر $H^*(10)$ اختلاف دارند. با توجه به عدم نیاز میکرودمترها به کالیبراسیون دز به صورت جداگانه در میدان‌های متفاوت و پاسخ قابل اعتماد آن‌ها در میدان‌های ناشناخته، می‌توان نتیجه گرفت که میکرودمتر طراحی شده پس از ساخت می‌تواند در هر میدان آمیخته با بیشینه‌ی انرژی ۱۱ MeV به منظور اندازه‌گیری معادل دز نوترون‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: میکرودمتر، معادل دز، میدان آمیخته‌ی نوترون-گاما

۱. مقدمه

در میان تابش‌های یونساز دزیمتری نوترون‌ها دشوارتر از سایر پرتوهاست، زیرا نوترون‌ها در ماده ذرات باردار ثانویه‌ی متعددی تولید می‌کنند. همچنین معمولاً نوترون‌ها با پرتوهای گاما آمیخته هستند و در بسیاری موارد لازم است تا کسر دز آن‌ها از دز کل در میدان آمیخته جدا شود. در دزیمتری متعارف در بدین منظور از دو دزیمتر استفاده می‌شود، یکی که حساس به نوترون‌ها و پرتوهای گاما و دیگری حساس به یکی از آن‌هاست [۱]. علاوه بر این دزیمترهای متعارف نوترون که بر اساس کندکنندگی نوترون‌ها کار می‌کنند، اگر در یک میدان معلوم کالیبره شوند در میدان‌های نوترونی ناشناخته پاسخ قابل

در مبحث دزیمتری نوترون‌ها پژوهش‌های متعددی مبتنی بر روش‌های میکرو دزیمتری انجام شده است. به‌عنوان مثال Booz در ۱۹۸۴ با توضیح کاربرد روش‌های میکرو دزیمتری در تعیین معادل دز، چگونگی جداسازی کسر دز نوترون‌ها و فوتون‌ها را تنها با یک‌بار اندازه‌گیری توضیح داد [۴]. Schrewe و همکاران در سال ۱۹۸۹ دزیمتری میدان‌های آمیخته‌ی نوترون- فوتون را با استفاده از شمارنده‌های تناسبی معادل بافت (TEPC) انجام دادند [۵]. در پژوهش مشابه دیگری Schrewe و همکاران در ۱۹۹۰ کسر دز نوترون‌ها و فوتون‌ها را در یک میدان آمیخته جداسازی کردند [۶]. پس از معرفی تکثیرکننده‌های الکترونی گازی (GEM)، Farahmand و همکاران در سال ۲۰۰۴ نخستین اندازه‌گیری میکرو دزیمتری را با استفاده از یک TEPC بر مبنای GEM انجام دادند [۷]. در سال ۲۰۰۷، Wang و Seidaliev یک TEPC بر مبنای GEM را به‌صورت شبیه‌سازی و تجربی به‌عنوان یک دزیمتر نوترون مورد بررسی قرار دادند و توانستند معادل دز نوترون‌ها را با دو برابر عدم قطعیت تعیین کنند [۸]. در سال ۲۰۱۰، Orchard و همکاران تکثیرکننده‌های الکترونی گازی ضخیم (THGEM) را به منظور استفاده در میکرو دزیمتری توسعه دادند و قابلیت این تکثیرکننده‌ها در میکرو دزیمتری را به اثبات رساندند [۹]. همچنین مصلحی و همکاران در سال ۱۳۹۴ یک میکرو دزیمتر طراحی شده را به‌منظور تعیین ضریب کیفیت نوترون‌ها با استفاده از روش مونت کارلو مورد بررسی قرار دادند و توانستند ضرایب کیفیت نوترون‌ها را در توافق با ICRU-40 تعیین نمایند [۱۰]. مشخص شده است که میکرو دزیمترها قادر به تعیین معادل دز نوترون‌ها با عدم قطعیت کم‌تری در مقایسه با دزیمترهای متعارف نوترون هستند، زیرا کمیتی که اندازه می‌گیرند مستقیماً به معادل دز ارتباط دارد [۱۱].

اطمینانی ارائه نمی‌کنند. همچنین این دزیمترها با وجود تمهیداتی که در طراحی آن‌ها انجام شده است، در برخی گستره‌های انرژی عدم قطعیت بالایی در پاسخ خود دارند. پژوهش‌ها نشان داده است که روش‌های مبتنی بر میکرو دزیمتری^۱ [۲] می‌توانند مشکلات ذکر شده در دزیمتری نوترون‌ها را تا حدود زیادی مرتفع نمایند. مفاهیم میکرو دزیمتری به‌منظور بررسی دقیق‌تر اثربخشی تابش‌های یونساز و با در نظر گرفتن حجم‌های میکروسکوپی از ماده توسعه پیدا کرده‌اند. آشکارسازهای میکرو دزیمتری (میکرو دزیمترها) برای نخستین بار در دهه‌ی ۱۹۵۰ و توسط Rossi معرفی شده‌اند [۳]. این وسیله که به‌صورت یک شمارنده‌های تناسبی معادل بافت^۲ (جنس گاز و دیواره‌ی آن‌ها معادل بافت) است تاکنون به‌عنوان ابزار استاندارد در میکرو دزیمتری مورد استفاده قرار گرفته است. یک میکرو دزیمتر الگوی رویدادهای یونش [۲] مربوط به ذرات باردار اولیه یا ثانویه را که به‌صورت آماری در حجم حساس رخ داده‌اند، به‌صورت یک توزیع احتمالاتی (توزیع میکرو دزیمتری) به‌دست می‌دهد [۲]. یکی از ویژگی‌های مهم این توزیع این است که الگوی یونش مربوط به ذرات باردار را بر حسب توان یونسازی آن‌ها مرتب می‌کند. به‌عنوان مثال در یک میدان آمیخته‌ی نوترون-گاما به‌طور کلی ذرات باردار ثانویه الکترون‌ها، پروتون‌های پس زده شده و یون‌های سنگین-تر هستند که به‌ترتیب ناشی از اندرکنش پرتوهای گاما و نوترون‌ها هستند. در توزیع میکرو دزیمتری میدان آمیخته ابتدا توزیع یونش الکترون‌ها، سپس توزیع یونش مربوط به پروتون‌ها و نهایتاً توزیع مربوط به یون‌های سنگین قرار می‌گیرند. با صرف نظر از همپوشانی اندکی که بین توزیع‌های مربوط به ذرات باردار مختلف وجود دارد، امکان جداسازی کسر دز مربوط به مؤلفه‌های سازنده میدان فراهم می‌شود [۴].

¹ Microdosimetry

² Tissue Equivalent Proportional Counters

دارند. این درحالی است که کمیت‌های تعریف شده در میکروذیومتری، طبیعت آماری دارند [۲]. کمیتی که در این پژوهش از آن استفاده شده است انرژی خطی^۱ نامیده می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد [۳]:

$$y = \frac{\varepsilon_1}{\bar{l}} \quad (1)$$

که در آن ε_1 انرژی داده شده^۲ به حجم حساس مورد نظر در یک رویداد یونش است. یک رویداد یونش تولید نقاط انتقال انرژی در حجم حساس است که از نظر آماری مانند رد یک ذره باردار به همراه الکترون‌های ثانویه آن به هم وابسته هستند [۲]. همچنین $\bar{l} = 4 \frac{V}{S}$ طول متوسط وتر^۳ یک حجم محدب با حجم V و مساحت S است. در تعریف \bar{l} فرض بر این است که ردهای ذرات باردار به صورت خطوط مستقیم و در راستای وترهای هندسی حجم از آن عبور می‌کنند. یکای انرژی خطی $\text{keV}/\mu\text{m}$ در نظر گرفته شد.

توزیع احتمالاتی انرژی خطی با $f(y)$ که $F(y) = dF(y)/dy$ نمایش داده می‌شود که در آن $F(y)$ احتمال این است که انرژی خطی کوچکتر یا مساوی با y باشد [۲]. همچنین $d(y) = yf(y)/\bar{y}_F$ بنا به تعریف توزیع دز انرژی خطی است که در آن $\bar{y}_F = \int yf(y)dy$ متوسط فرکانسی y است. نمایش استاندارد توزیع میکروذیومتری به صورت تغییرات $yd(y)$ بر حسب لگاریتم y است که در آن سطح زیر منحنی بین دو مقدار انرژی خطی متناسب با دز مربوط به رویدادهای یونش با انرژی‌های خطی بین دو آن دو مقدار است [۲].

به منظور استفاده از میکروذیومتر در مبحث حفاظت در برابر اشعه که تعیین ضریب کیفیت و معادل دز پرتو مورد نظر

در پژوهشی که اخیراً منتشر شده است [۱۲]، مصلحی و رئیس‌علی یک میکروذیومتر بر پایه‌ی تکثیرکننده‌ی الکترونی ضخیم را [۱۳ و ۱۴] طراحی کرده‌اند که با ضخامت مناسب دیواره و در نظر گرفتن مقدار کمی گاز ^3He افزوده شده به گاز درون حجم حساس، می‌تواند معادل دز نوترون‌ها را در یک بازه‌ی انرژی گسترده از انرژی حرارتی تا 14 MeV با اختلاف بیشینه‌ی ۳۰٪ نسبت به $H^*(10)$ [۱۵] (معادل دز محیطی استاندارد نوترون‌ها) تعیین نماید. علت استفاده از گاز ^3He افزایش انرژی جذب شده در حجم حساس و در نتیجه افزایش معادل دز نوترون‌ها در انرژی‌های کم‌تر از 10 keV است که ناشی از یونش پروتون‌های تولید شده در اندرکنش (n و p) این نوترون‌ها با گاز ^3He است. این میکروذیومتر به صورت محاسباتی و تنها در میدان نوترون‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

در پژوهش حاضر هدف این است که قبل از ساخت عملکرد میکروذیومتر طراحی شده در مرجع [۱۲] با هدف تعیین و جداسازی معادل دز نوترون‌ها در میدان‌های آمیخته‌ی نوترون-گاما با استفاده از توزیع میکروذیومتری این میدان‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور محاسبه توزیع‌های میکروذیومتری مورد نظر و نیز معادل دز نوترون‌ها از بسته‌ی شبیه‌سازی Geant4 [۱۶] استفاده شده است.

۲. مفاهیم میکروذیومتری

بر خلاف ذیومتری متعارف که ابعاد حجم‌های حساس ماکروسکوپی هستند، در میکروذیومتری به دلیل انتخاب ابعاد میکروسکوپی از ماده، ساختار رد ذرات باردار و ماهیت تصادفی رویدادهای یونش باید نظر گرفته شوند. از این رو کمیت‌های تعریف شده در ذیومتری دیگر قابل استفاده نخواهند بود زیرا این کمیت‌ها اساساً ماهیتی غیر تصادفی

¹ Lineal energy

² Imparted energy

³ Mean chord length

برای تمامی نوترون‌های سریع مقدار یکسانی دارد و از این رو مستقل از میدان نوترونی است. در نتیجه کالیبراسیون انرژی خطی مستقل از میدان تابشی است که میکرودمتر در آن قرار دارد. در نتیجه میکرودمترها مانند دزیمترهای مرسوم نیازی به کالیبراسیون دز به صورت جداگانه در میدان‌های متفاوت ندارند. از این رو برای پاسخ آن‌ها در میدان‌های تابشی ناشناخته و حتی آمیخته مانند میدان تابش‌های کیهانی اطمینان قابل قبولی وجود دارد [۲].

۳. روش کار

۱.۳. میکرودمتر طراحی شده

در شکل ۱ نمایی از میکرودمتر طراحی شده [۱۲] نشان داده شده است. میکرودمتر شامل آرایه‌ای از حجم‌های حساس است که در ۷ لایه از جنس PMMA قرار گرفته‌اند (قسمت A). در هر لایه تعداد ۳۷ حجم حساس در یک چیدمان شش‌وجهی قرار دارند (قسمت B). هر لایه شامل یک کاتد است که به صورت ورقه‌ی نازکی از مایلار با پوشش آلومینیوم در یک طرف آن است که این پوشش آلومینیوم درست در بالای حجم‌های حساس قرار دارد. هر حجم حساس به شکل یک استوانه با قطر و ارتفاع ۵ mm در نظر گرفته شده است (قسمت C) که از گاز معادل بافت در پایه‌ی پروپان [۳] متشکل از ۵۵٪ پروپان، ۳۹/۵٪ دی‌اکسید کربن و ۵/۵٪ نیتروژن پر شده است. ضمناً مقدار ۰/۰۴٪ گاز ^3He به هر حجم حساس افزوده شده است (درصدها جرمی هستند) [۱۲]. چگالی گاز در هر حجم حساس مساوی با mg/cm^3 ۰/۲۰۰ (معادل با فشار ۰/۱۱ atm) انتخاب شده است تا حجمی کروی از بافت با قطر $1\ \mu\text{m}$ را معادل‌سازی نماید.

ضخامت بین لایه‌ها و فواصل بین حجم‌های حساس در هر لایه معادل با ۲ mm از جنس PMMA در نظر گرفته شد تا از

است، حجم میکروسکوپی مورد مطالعه باید معادل بافت باشد. در شمارنده‌ی Rossi که حجم حساس آن از گاز معادل بافت پر شده است، حجم میکروسکوپی از بافت با فرض مشابه بودن مقدار انرژی داده شده به بافت و گاز و با استفاده از رابطه‌ی ۲ معادل‌سازی می‌شود [۲]:

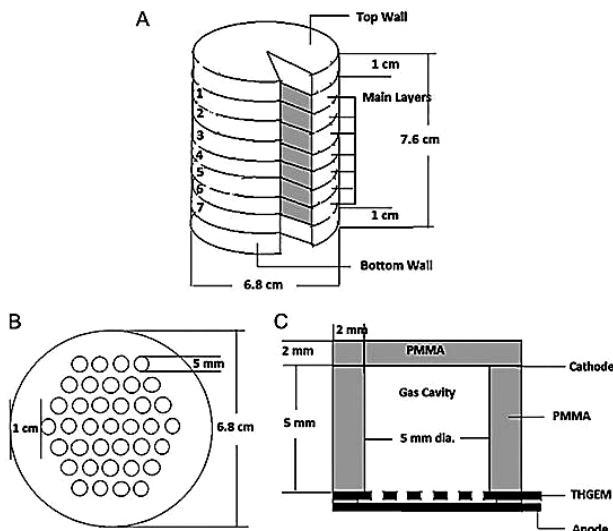
$$\Delta E_t = \left(\frac{dE}{\rho dx} \right)_t \rho_t x_t = \left(\frac{dE}{\rho dx} \right)_g \rho_g x_g = \Delta E_g \quad (2)$$

که ΔE_t انرژی داده به بافت و ΔE_g انرژی داده شده به گاز معادل بافت است. همچنین $\frac{dE}{\rho dx}$ توان توقف جرمی ذره باردار، ρ چگالی و x ابعاد (یا قطر) حجم میکروسکوپی بافت با اندیس t و یا حجم حساس گازی با اندیس g است. با در نظر گرفتن نظریه‌ی فانو [۱۷] و فرض مستقل بودن توان‌های توقف جرمی از چگالی، به دلیل تشابه ترکیب اتمی بافت و گاز معادل بافت، توان‌های توقف جرمی از طرفین رابطه‌ی ۲ حذف می‌شوند و این رابطه به صورت رابطه‌ی تقریبی زیر در می‌آید:

$$\rho_t x_t \cong \rho_g x_g \quad (3)$$

ویژگی مهم انرژی خطی این است که توسط میکرودمتر قابل اندازه‌گیری است. مقادیر دز جذب شده، ضریب کیفیت و معادل دز با استفاده از توزیع میکرودمتری محاسبه شده یا اندازه‌گیری شده قابل محاسبه خواهند بود. نکته‌ی مهم دیگر این است تنها کالیبراسیون برای میکرودمترها کالیبراسیون انرژی خطی است که به یکی از دو روش زیر انجام می‌شود [۲]: استفاده از یک مقدار انرژی خطی معین مانند لبه‌ی پروتون (وقتی میکرودمتر در میدان نوترون‌های سریع است) و یا استفاده از یک چشمه‌ی آلفا مانند ^{244}Cm که درون حجم حساس تعبیه می‌شود (برای میکرودمترهای گازی). لبه‌ی پروتون که انرژی خطی مربوط به پیشینه‌ی انرژی داده شده توسط پروتون‌ها به حجم حساس با یک هندسه‌ی معین است،

از جنس PMMA با همین ضخامت فرض شدند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، میکرودمتر به صورت آرایه‌ای از ۲۵۹ (7×37) حجم حساس است که در ابعاد $7/8 \text{ cm} \times 7/6 \text{ cm}$ جای گرفته‌اند. لازم به ذکر است که یک حجم حساس به تنهایی قادر است پاسخ میکرودمتر را ارائه دهد اما حساسیت آن به نوترون‌ها کم است [۱۸]. به‌همین دلیل آرایه‌ای از حجم‌های یکسان به منظور افزایش حساسیت در نظر گرفته شد [۱۲].



شکل (۱): آشکارساز میکرودمتری طراحی شده [۱۲].

(A) میکرودمتر متشکل از ۷ لایه اصلی. (B) آرایه‌ی شش وجهی چندمان حجم‌های حساس در هر لایه. (C) نمایی از یک حجم حساس به همراه اجزای مرتبط با آن.

۲.۳. شبیه‌سازی و محاسبات

به منظور انجام شبیه‌سازی‌های مونت کارلوی مورد نیاز از بسته‌ی شبیه‌سازی Geant4 [۱۶] استفاده شد. هندسه‌ی میکرودمتر به همراه مواد سازنده‌ی آن در این بسته تعریف شده‌اند. برای ترابرد دقیق نوترون‌ها و پرتوهای گاما و همچنین ذرات ثانویه‌ی آن‌ها مدل فیزیک QGSP_BERT_HP

برقراری تعادل ذرات باردار اطمینان حاصل آید. این ضخامت اندکی بیش از برد پر انرژی‌ترین پروتون‌ها با انرژی ۱۱ MeV که توسط نوترون‌های $^{241}\text{Am-Be}$ پس‌زده شده‌اند، انتخاب شده است. در زیر حجم‌های حساس در هر لایه یک تکثیرکننده‌ی الکترونی ضخیم قرار دارد که از یک ورقه‌ی فیبر FR4 با ضخامت ۰/۵ mm ساخته شده که لایه‌ای از مس با ضخامت $50 \mu\text{m}$ در هر دو طرف آن پوشش‌دهی شده است.

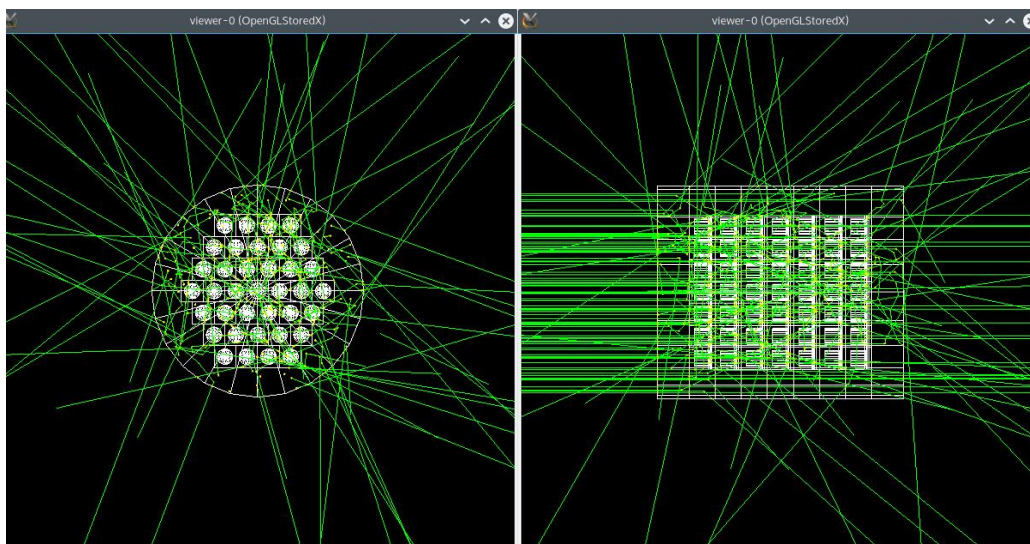
در زیر هر حجم حساس، تکثیرکننده دارای ۲۱ حفره‌ی استوانه‌ای با قطر ۰/۵ mm و ارتفاعی معادل با ضخامت کل تکثیرکننده است. این حفره‌ها نیز مانند حجم‌های حساس از گاز معادل بافت با چگالی $0/200 \text{ mg/cm}^3$ پر شدند. در عمل با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب به تکثیرکننده، یک میدان الکتریکی دو قطبی درون هر یک از این حفره‌ها ایجاد می‌شود و الکترون‌های ناشی از یونش با عبور از درون این حفره‌ها تکثیر می‌شوند. در زیر تکثیرکننده در هر لایه یک ورقه‌ی PMMA با ضخامت ۰/۲۰ mm در نظر گرفته شد که دارای حفره‌های استوانه‌ای شکل با قطر ۶/۰ mm در زیر هر حجم حساس است. این حفره‌ها نیز که با گاز معادل بافت با چگالی ذکر شده پر شدند، در عمل نقش فضای القا^۱ را برای الکترون‌های تکثیر شده بازی می‌کنند. آند نیز به صورت ورقه‌ی نازکی از مس و با فاصله‌ی کمی از تکثیرکننده در نظر گرفته شد. در قسمت C از شکل ۱ شمایی از هر حجم حساس به همراه دیواره‌ها، کاتد، تکثیرکننده‌ی الکترونی و آند نشان داده شده است.

ضخامت اطراف حجم‌های حساس در هر لایه (ضخامت جانبی) مساوی با ۱ cm انتخاب شد تا مشابه با آنچه که برای محاسبه‌ی $H^*(10)$ در عمق ۱ cm از کره‌ی استاندارد ICRU در نظر گرفته می‌شود، میکرودمتر در این عمق از ماده‌ی معادل بافت قرار گیرد. همچنین دیواره‌های بالایی و پایینی نیز

¹ Induction gap

نشان داده شده است. به منظور کاهش زمان محاسبات، نحوه‌ی تابش نوترون‌ها و پرتوهای گاما که با رنگ سبز در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند به گونه‌ای است که به صورت موازی به دیواره‌ی بالایی میکرودمیتر تابیده شوند.

فراخوانی شده است. طیف انرژی نوترون‌های چشمه‌های $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf به عنوان چشمه نوترون انتخاب شده‌اند [۱۹]. علاوه بر این پرتوهای گامای گسیلی از این دو چشمه [۲۰ و ۲۱] با توجه به شدت گسیل آن‌ها به عنوان پرتوهای گامای آمیخته با نوترون‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۲ هندسه‌ی شبیه‌سازی شده در Geant4 از دو نمای مختلف



شکل (۲): هندسه‌ی پرتوهای شبیه‌سازی شده در Geant4 از دو نمای متفاوت. نوترون‌ها به صورت موازی به دیواره‌ی بالایی میکرودمیتر تابیده می‌شوند.

که در آن $D = \frac{E_g}{\rho_g V_g}$ دز جذب شده در گاز معادل بافت، E_g انرژی سپرده شده به گاز معادل بافت، ρ_g چگالی گاز معادل بافت بر حسب g/cm^3 ، V_g حجم گاز در هر حجم حساس بر حسب cm^3 و \bar{Q} ضریب کیفیت میانگین است. همچنین y_i مقدار میانگین انرژی خطی بازه‌ی i ام، $f_i(y_i)$ فرکانس رویدادهای یونش در بازه‌ی i ام و $Q_i(y_i)$ ضریب کیفیت بر حسب انرژی خطی مربوط به بازه‌ی i ام است که به صورت رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$Q_i(y_i) = 0.3 y_i \left[1 + \left(\frac{y_i}{137} \right)^5 \right]^{-0.4} \quad (5)$$

این ضریب کیفیت تنها برای $1 \mu\text{m}$ از بافت، تعیین شده است [۲۲ و ۲۳]. در مرحله‌ی آخر مقادیر معادل دز در واحد

برای محاسبه‌ی انرژی‌های خطی مقدار انرژی داده شده به حجم‌های حساس در هر رویداد یونش محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱ مقادیر \mathcal{Y} به دست آمدند. در مرحله‌ی بعد با در نظر گرفتن تعداد ۳۵۰ بازه‌ی لگاریتمی انرژی خطی از $10^{-3} \text{ keV}/\mu\text{m}$ تا $10^4 \text{ keV}/\mu\text{m}$ (۵۰ بازه در هر دهک لگاریتمی)، هر مقدار انرژی خطی محاسبه شده در بازه‌ی مناسب خود شمارش می‌شود تا در نهایت توزیع انرژی خطی برای هر چشمه به دست آید. پس از محاسبه‌ی این توزیع‌ها، مقادیر معادل دز بر حسب Sv با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شدند [۲ و ۱۲]:

$$H = D\bar{Q} = 1.602 \times 10^{-13} \frac{1}{\rho_g V_g} \sum_{i=1}^{350} y_i f_i(y_i) Q_i(y_i) \quad (4)$$

شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در هر دو منحنی سه قله وجود دارد:

یک قله مربوط به یونش الکترون‌های ثانویه پرتوهای گاما است که "قله‌ی الکترون" نامیده می‌شود و در انرژی‌های خطی کم‌تر از $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ رخ می‌دهد. این قله نماینده سهم پرتوهای گاما در میدان آمیخته است. قله‌ی دوم از حدود $1 \text{ keV}/\mu\text{m}$ تا مقدار $145 \text{ keV}/\mu\text{m}$ مربوط به یونش پروتون‌های پس زده شده است و "قله‌ی پروتون" نامیده می‌شود. قله‌ی سوم نیز در انرژی‌های خطی بزرگ‌تر از $145 \text{ keV}/\mu\text{m}$ رخ می‌دهد که مربوط به یونش یون‌های سنگین است و "قله‌ی یون‌های سنگین" خوانده می‌شود. قله‌های پروتون و یون‌های سنگین نماینده سهم نوترون‌ها هستند.

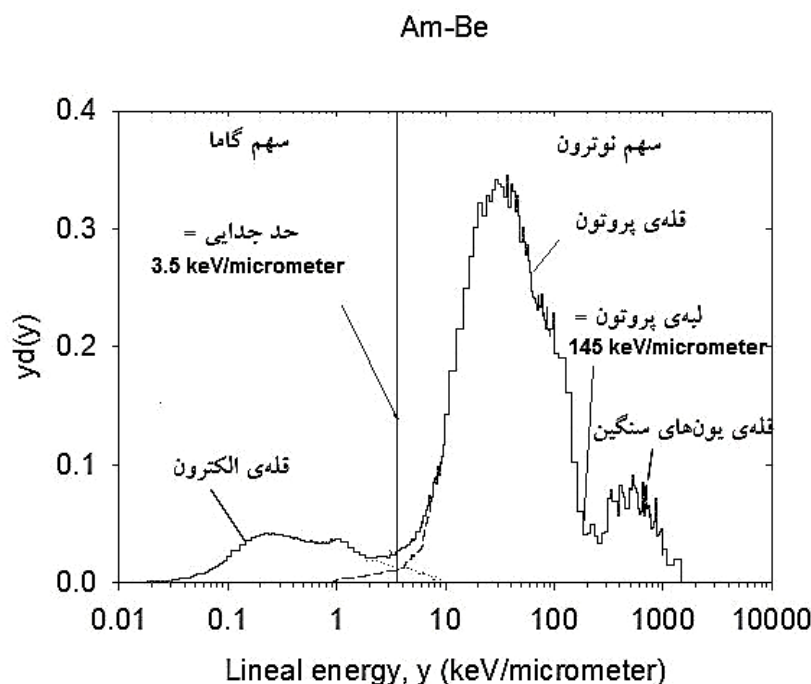
شارش نوترون‌ها و فوتون‌ها به صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه شدند:

$$H_{\phi} = \frac{H}{\phi} \quad (6)$$

که ϕ مجموع شارش نوترون‌ها و فوتون‌های فرودی بر میکرودمتر است. لازم به ذکر است در شبیه‌سازی با Geant4 تعداد ذرات فرودی از چشمه به اندازه‌ای بزرگ انتخاب شده است تا مقدار خطای آماری نسبی حداکثر ۱٪ در مقدار انرژی سپرده شده به گاز معادل بافت به دست آید.

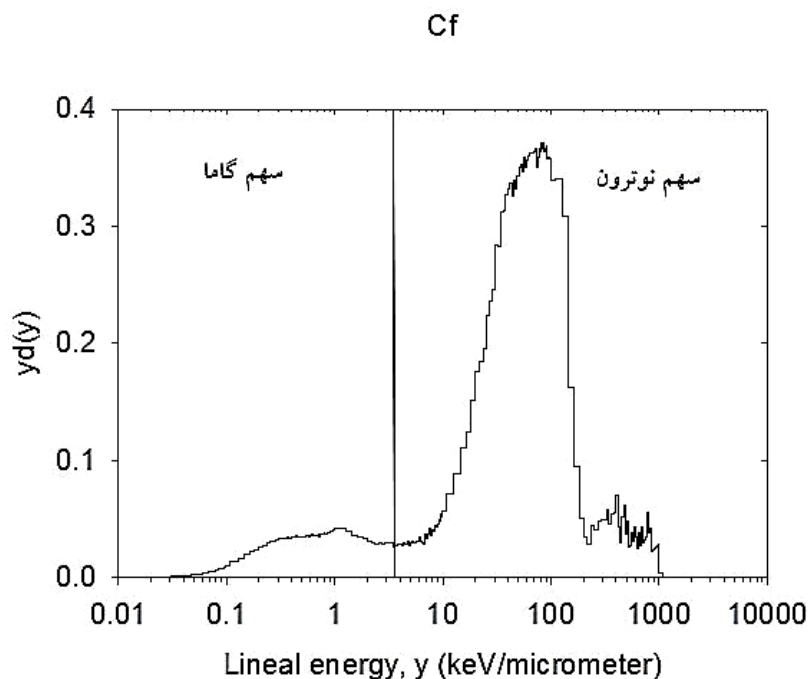
۴. نتایج و بحث

منحنی‌های بهنجار توزیع انرژی خطی برای چشمه‌های آمیخته‌ی نوترون-گامای ^{241}Am -Be و ^{252}Cf به ترتیب در



شکل (۳): منحنی بهنجار توزیع انرژی خطی میدان آمیخته‌ی نوترون-گامای چشمه‌ی ^{241}Am -Be.

با در نظر گرفتن حد جدایی $3/5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ امکان جداسازی کسر دز نوترون‌ها از میدان آمیخته فراهم می‌شود.



شکل (۴): منحنی بهنجار توزیع انرژی خطی میدان آمیخته‌ی نوترون-گامای چشمه‌ی ^{252}Cf . سهم پرتوهای گاما و نوترون‌ها در توزیع انرژی خطی میدان آمیخته مشخص شده است.

میدان آمیخته و رابطه‌ی ۶ استفاده شده است. این مقادیر به همراه یک انحراف معیار در جدول ۱ آورده شده‌اند. داده‌های به‌دست آمده نشان می‌دهند که مقادیر معادل دز برای نوترون-های چشمه‌های $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf به ترتیب ۹٪ و ۱۷٪ با مقادیر $\text{H}^*(10)$ برای این چشمه‌ها اختلاف دارند که این میزان اختلاف در دزیمتری نوترون‌ها قابل قبول است. در نتیجه با یک‌بار اندازه‌گیری توزیع انرژی خطی میدان آمیخته‌ی نوترون-گاما می‌توان کسر دز نوترون‌ها را با عدم قطعیت قابل قبولی به‌دست آورد. بدین ترتیب دیگر نیازی به استفاده از دو دزیمتر نخواهد بود.

جدول (۱): مقادیر معادل دز نوترون‌ها (Sv-cm^2) در میدان‌های آمیخته-

ی نوترون-گامای $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf

میدان آمیخته	معادل دز	$\text{H}^*(10)^*$
$^{241}\text{Am-Be}$	$(3/57 \pm 0/18) \times 10^{-11}$	$3/91 \times 10^{-11}$
^{252}Cf	$(3/21 \pm 0/15) \times 10^{-11}$	$3/85 \times 10^{-11}$

* مقدار $\text{H}^*(10)$ از مرجع [۱۵] آورده شده است.

با توجه به اینکه رویدادهای یونش مربوط به پرتوهای گاما و نوترون‌ها در میدان آمیخته در توزیع میکرودمتری از یکدیگر جدا شده‌اند، امکان جداسازی کسر دز نوترون‌ها یا پرتوهای گاما فراهم می‌گردد. البته مقدار کمی همپوشانی بین قله‌های الکترون و پروتون وجود دارد که مرتبط با نوترون‌های کم انرژی و یا بسیار پر انرژی و همچنین برخی از الکترون‌های پراکنده شده‌ی کامپتون است. فرض شده است که سهم‌های نوترون‌ها و فوتون‌ها در ناحیه‌ی همپوشانی مساوی است و در نتیجه با انتخاب یک حد جدایی^۱ مناسب اثر همپوشانی این سهم‌ها یکدیگر را جبران می‌کنند. غالباً از مقدار $3/5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ برای حد جدایی استفاده می‌شود [۲۴]. همان‌طور که در شکل-های ۳ و ۴ مشخص شده است، در این پژوهش نیز از این مقدار حد جدایی برای هر دو میدان آمیخته‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ و ^{252}Cf استفاده شده است. برای محاسبه‌ی معادل دز نوترون‌ها از مقادیر انرژی خطی بزرگ‌تر از $3/5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ در توزیع

¹ Separation limit

۵. جمع‌بندی

همچنین با توجه به عدم نیاز به کالیبراسیون دز میکرودوزیمترها در میدان‌های شناخته شده، این میکرودوزیمتر پس از ساخت می‌تواند در هر میدان آمیخته‌ی نوترون-گامای ناشناخته با بیشینه‌ی انرژی ۱۱ MeV تنها یا یک‌بار اندازه‌گیری توزیع میکرودوزیمتری معادل دز نوترون‌ها را ارائه دهد.

ارزیابی میکرودوزیمتر طراحی شده به منظور اندازه‌گیری معادل دز نوترون‌ها در میدان‌های آمیخته‌ی نوترون-گامای ^{241}Am و ^{252}Cf نشان می‌دهد که این میکرودوزیمتر می‌تواند معادل دز نوترون‌ها در این دو میدان را با عدم قطعیت بیشینه‌ی ۱۷٪ با استفاده از توزیع میکرودوزیمتری میدان آمیخته تعیین نماید.

۶. مراجع

انرژی خطی و تعیین ضریب کیفیت نوترون‌ها. مجله‌ی علوم و فنون هسته‌ای. ۷۳. (۱۳۹۴) ۸-۱.

- [1] ICRU. Neutron Dosimetry for Biology and Medicine. ICRU Report 26. Bethesda-Maryland, USA, (1977).
- [2] H.H. Rossi, M. Zaider. Microdosimetry and its applications. Springer, (1996).
- [3] H.H. Rossi, W. Rosenzweig. A device for the measurement of dose as a function of specific ionization. Radiology. 64 (1955) 404-411.
- [4] J. Booz. Development of dose equivalent meters based on microdosimetric principles. Radiat. Environ. Biophys. 23 (1984) 155-170.
- [5] U.J. Schrewe, H.J. Brede, G. Dietze. Dosimetry in mixed neutron-photon fields with tissue-equivalent proportional counters. Radiat. Prot. Dosim. 29 (1989) 41-45.
- [6] U.J. Schrewe, H. Schuhmacher, H.J. Brede, G. Dietze. Determination of photon and neutron dose fractions with tissue-equivalent proportional counters. Radiat. Prot. Dosim. 31 (1990) 143-147.
- [7] M. Farahmand, A. Bos, L. De Nardo, C. Van Eijk. First microdosimetric measurement with a TEPC based on a GEM. Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 839-843.
- [8] C. Wang, M. Seidaliev, A. Mandapaka. Design and simulation of a GEM-based TEPC as a neutron REM meter. Radiat. Prot. Dosim. 126 (2007) 559-563.
- [9] G. Orchard, K. Chin, W. Prestwich, A. Waker, S. Byun. Development of a thick gas electron multiplier for microdosimetry. Nucl. Instrum. Meth. A. 638 (2011) 122-126.
- [۱۰] [مصلحی، امیر. رئیس‌علی، غلامرضا. لامعی، محمد. ارزیابی یک میکرودوزیمتر طراحی شده برای اندازه‌گیری توزیع
- [11] H. Schuhmacher. Tissue-equivalent proportional counters in radiation protection dosimetry: expectations and present state. Radiat. Prot. Dosim. 44 (1992) 199-206.
- [12] A. Moslehi, G. Raisali. A multi-element thick gas electron multiplier-based microdosimeter for measurement of neutron dose-equivalent: a Monte Carlo study. Radiat. Prot. Dosim. 176 (2017) 404-410.
- [13] F. Sauli. GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors. Nucl. Instrum. Meth. A. 386 (1997) 531-534.
- [14] R. Chechik, A. Breskin, C. Shalem, D. Mormann. Thick GEM-like hole multipliers: Properties and possible applications. Nucl. Instrum. Meth. A. 44 (2004) 303-308.
- [15] G. Leuthold, V. Mares, H. Schraube. Calculation of neutron ambient dose equivalent on the basis of the ICRP revised quality factors. Radiat. Prot. Dosim. 40 (1992) 77-84.
- [16] S. Agostinelli, J. Allison, K.A. Amako, J. Apostolakis. Geant4-a simulation toolkit. Nucl. Instrum. Meth. A. 506 (2003) 250-303.
- [17] U. Fano. Note on Bragg-Gray cavity principle for measuring energy dissipation. Radiat. Res. 1 (1954) 237-240.
- [18] A. Moslehi, G. Raisali, M. Lemahi. Simulation and experimental study of an indigenously designed and constructed THGEM-based microdosimeter for dose-equivalent measurement. Radiat. Meas. 86 (2016) 56-62.

- [19] International Standard. Reference neutron radiations. ISO 8529-1. Switzerland, (2001).
- [20] H.R. Vega-Carrillo, E. Manzaranes-Acuna, A. M. Becerra-Ferreiro, A. Carrillo-Nunez. Neutron and gamma ray spectra of $^{239}\text{PuBe}$ and $^{241}\text{AmBe}$. *Appl. Radiat. Isot.* 57 (2002) 167–170.
- [21] R. Billnert, F.J. Hambach, A. Oberstedt, S. Oberstedt. New prompt spectral γ -ray data from the reaction $^{252}\text{Cf(sf)}$ and its implication on present evaluated nuclear data files. *Phys. Rev. C.* 87 (2013) 024601.
- [22] A.M. Kellerer, K. Hahn. Considerations on a revision of the quality factor. *Radiat. Res.* 114 (1988) 480–488.
- [23] ICRU. Quality factor in radiation protection. ICRU Report 40. Bethesda-Maryland, USA, (1986).
- [24] V.D. Nguyen. A dose equivalent meter based on the tissue-equivalent proportional counter, and problems encountered in its use. *Radiat. Prot. dosim.* 9 (1984) 223–225.
- [25] J. Booz. Development of dose equivalent meters based on microdosimetric principles. *Radiat. Environ. Biophys.* 23 (1984) 155–170.