

## محاسبه فاکتور تبدیل گرمای هوا به معادل دز فردی در عمق‌های مختلف با استفاده از کد مونت کارلو GATE

محمدحسن مهدیان منش\* و رضا فقیهی

دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

\*فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، کد پستی: ۷۱۹۳۶-۱۶۵۴۸

پست الکترونیکی: mhmahdian@shirazu.ac.ir

### چکیده

مطالعات مختلفی با هدف بهبود کیفیت اقدامات حفاظت در برابر اشعه در رادیولوژی و پزشکی هسته‌ای انجام شده است. از میان موضوعات مختلف قابل بررسی در این زمینه، یک مسئله مهم اندازه‌گیری کمیت‌های عملیاتی حفاظت در برابر اشعه مثل معادل دز فردی،  $HP(d)$ ، در عمق‌های مختلف (۱۰mm، ۳mm،  $d=0/\sqrt{mm}$ ) می‌باشد. این موضوع پس از تصمیم ICRP مبنی بر کاهش حد دز معادل سالانه به  $20\text{mSV}$  در سال از اهمیت بیشتری برخوردار شد. در حال حاضر کالیبراسیون دزیمترهای فردی در میدان‌های فوتونی به وسیله اندازه‌گیری گرمای هوا و تبدیل آن به معادل دز فردی در عمق مورد نظر از طریق ضریب تبدیل مناسب انجام می‌گیرد. به همین منظور در این مطالعه لیستی از ضرایب تبدیل به منظور تبدیل گرمای هوا به معادل دز فردی در عمق‌های (۱۰mm، ۳mm،  $d=0/\sqrt{mm}$ ) برای ۵ بیم اشعه ایکس از محدود  $40\text{Kev}$  تا  $140\text{Kev}$ ، از طریق مدل‌سازی مونت کارلو و با استفاده از کد شبیه‌سازی گیت محاسبه شده و مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده و نتایج منتشر شده توسط سازمان بین‌المللی استانداردسازی (ISO) انجام گرفته است.

کلیدواژگان: ضریب تبدیل، گرمای هوا، معادل دز فردی، کمیت‌های عملیاتی، ICRP

### ۱. مقدمه

برابر اشعه، برای تابش‌های کم نفوذ و پرنفوذ تعریف شده است. برای تابش‌های پرنفوذ، این کمیت عملیاتی معادل دز محیطی و معادل دز فردی نام دارند که به ترتیب با  $H^*(d)$  و  $H_p(d)$

مفهوم کمیت‌های عملیاتی در گزارش‌های ۴۳ و ۳۹ ICRU ارائه شده است. در ICRU ۵۱ نیز مفهوم فعلی ارائه گردیده است. کمیت معادل دز به عنوان کمیت عملیاتی حفاظت در

$$C_m = \frac{\int_0^{E_{max}} CK_{air,E} dE}{\int_0^{E_{max}} K_{air,E} dE} \quad (2)$$

در این رابطه  $K_{air,E}$  توزیع طیف انرژی کرمای هوا و  $E_{max}$  حداکثر انرژی در طیف مورد بررسی است. کرمای هوا پس از عبور از فیلتر اضافی با ضخامت  $X$  و ضریب تضعیف  $\mu$ :

$$K_{air} = \Phi(E) E \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{air} \exp(-\mu(E)x) \quad (3)$$

ضریب انتقال انرژی جرمی و ضریب جذب انرژی جرمی با رابطه زیر به هم مرتبط می‌شوند:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = (1-g) \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (4)$$

که  $g$  کسر انرژی منتقل شده به ذرات باردار ثانویه است که از طریق کاهش سرعت ذرات در محیط صورت می‌گیرد،  $g$  در محدوده انرژی تشخیصی برای مواد با عدد اتمی کم مثل هوا بسیار کوچک است، بنابراین دز جذبی تقریباً بسیار خوبی از کرماست. برای شبیه‌سازی، بعد از تضعیف، کرما با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$K_{air} = \Phi(E) E \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \exp(-\mu(E)x) \quad (5)$$

که در این فرمول  $\Phi(E)$  شار طیف فوتونی و به‌عنوان یک تابع چندجمله‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi(E, v) = a_0[E] + a_1[E]v + a_2[E]v^2 + a_3[E]v^3 \quad (6)$$

در این رابطه  $v$  ولتاژ اعمال شده به تیوب اشعه ایکس می‌باشد،  $\Phi(E, v)$  شار فیلتر نشده با انرژی  $E$  با واحد  $\text{photon/mm}^2$  و ضرایب  $a_0[E], a_1[E], a_2[E], a_3[E]$  ضرایب چندجمله‌ای برای آند تنگستن است.

نمایش داده می‌شود و برای کنترل محیط و مانیتورینگ فردی به کار می‌روند. برای تابش‌های کم نفوذ کمیت عملیاتی، معادل دز جتهی نام دارد. معادل دز فردی عبارت است از: معادل دز دریافت نرم زیر یک موقعیت خاص در بدن (عمق ۱۰ میلی‌متر برای کنترل دز مؤثر، عمق ۰/۷ میلی‌متر برای کنترل دز معادل پوست و عمق ۳ میلی‌متر برای کنترل دز لنز چشم). به‌منظور کالیبراسیون، معادل دز در بافت نرم توسط دوفانتوم معادل بافت نرم با ترکیب مذکور در ICRU بررسی شده است. این فانتوم‌ها دارای ترکیب جرمی ۱۰/۱ درصد هیدروژن، ۱۱/۱ درصد کربن، ۲/۶ درصد نیتروژن و ۷۶/۲ درصد اکسیژن است و دارای چگالی  $1 \text{g/cm}^3$  می‌باشند. در حال حاضر کالیبراسیون دزیمترهای فردی به وسیله اندازه‌گیری کرمای برخوردی در هوا محاسبه می‌شود؛ سپس کمیت‌های عملیاتی مناسب با به کار بردن ضریب تبدیلی که کرمای هوا را به کمیت عملیاتی مناسب تبدیل می‌کند، به دست می‌آید. هدف از انجام این مطالعه محاسبه ضریب تبدیل کرمای هوا به معادل دز فردی برای ۵ باریکه اشعه ایکس سری ( $N_{120} - N_{40}$ ) ارائه شده در استاندارد ISO می‌باشد [۲، ۱].

### ۱.۱. تئوری

برای طیف فوتونی مورد نظر مقادیر عددی ضریب تبدیلی اختصاص داده شده برای عمق‌های مختلف به صورت زیر است:

$$Hp(d) = C \times K_{air} \quad (1)$$

در این رابطه  $K_{air}$  مقدار کرمای هوا در وجه جلویی فانتوم، اما در غیاب فانتوم است، و  $C$  مقدار ضریب تبدیلی است که کرمای هوا را به معادل دز فردی برای باریکه طیف اشعه ایکس تبدیل می‌کند. مقدار میانگین  $C$  با اندازه‌گیری برای فوتون‌های تک‌انرژی موجود در طیف اشعه ایکس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

میانگین انرژی فوتونی امری ضروری است. روش تولید و تعیین مشخصات تابش‌های مرجع در استاندارد ISO ۴۰۳۷-۱ ارائه شده است. پس از محاسبه این داده‌ها، مقایسه‌ای بین این داده‌ها با داده‌های ارائه شده در ISO انجام می‌گیرد [۲].

## ۲.۲. شبیه‌سازی فانتوم‌ها

در این تحقیق به منظور بررسی Hp(۱۰) و Hp(۰.۷) از فانتوم استاندارد ICRU با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۵ و درصد جرمی ۱۰/۱ هیدروژن، ۱۱/۱ کربن، ۲/۶ نیتروژن، ۷۶/۲ اکسیژن و چگالی ۱g/cm<sup>3</sup> استفاده شده است، اما برای محاسبه Hp(۳) انتخاب یک فانتوم تئوری مناسب باید بر اساس شباهت خواص جذب و پراکندگی این فانتوم در مقایسه با سر باشد. همان‌طور که در استاندارد ISO 4037-3 آمده است، فانتوم کالیبراسیون باید تاحد ممکن ویژگی جذب و پراکندگی قسمتی از بدن که دزیمتر در آن استفاده می‌شود را داشته باشد، به عبارت دیگر برای انجام ارزیابی دقیق در لنز چشم دزیمتر باید نزدیک چشم‌ها قرار گیرد این بدان معنی است که فانتوم کالیبراسیون باید تا حد امکان جرم و شکل سر را داشته باشد بنابراین به نظر می‌رسد فانتوم ICRU با ابعاد ۳۰×۳۰×۱۵ سانتی‌متر راه‌حل خوبی برای دستیابی به یک روش بهینه برای دزیمتری لنز چشم نیست. ابعاد چنین فانتومی خیلی از حجم یک سر بزرگ‌تر است، در نتیجه مقدار بافت مرتبط بزرگ‌تری نقش پراکنده‌کننده را در مقابل تابش برخوردی بازی می‌کند. از طرفی ضخامت ۱۵ سانتی‌متر نسبت به ابعاد سر کوچک‌تر است. فانتوم شبیه‌سازی شده استوانه‌ای به قطر ۲۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است و دارای ترکیب و چگالی فانتوم استاندارد ICRU است [۳، ۴].

بعد از بازسازی طیف فیلترشده و شبیه‌سازی فانتوم‌ها، مقدار کرمای هوا را در عمق‌های مورد نظر در غیاب فانتوم حساب کردیم سپس میزان دز در عمق‌های مدنظر را در فانتوم

رابطه‌ی بین پرتودهی حاصل از فوتون‌ها با انرژی E و شار فوتونی بعد از تضعیف به صورت رابطه زیر است:

$$X(E) = \frac{e}{W_{air}} \Phi(E) E \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \exp(-\mu(E)x) \quad (7)$$

در این رابطه e واحد بار و W<sub>air</sub> انرژی یونیزاسیون هوا است (انرژی لازم جهت ایجاد هر جفت یون در هوا ۳۳/۹۷eV است). از ترکیب معادلات ۲ تا ۵ ضریب تبدیل میانگین از رابطه زیر حساب می‌شود [۱]:

$$C_m = \frac{\int_0^{E_{max}} C \Phi(E) E \left( \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_{air} \exp(-\mu(E)x) dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi(E) E \left( \frac{\mu_{en}(E)}{\rho} \right)_{air} \exp(-\mu(E)x) dE} \quad (8)$$

## ۲. روش انجام کار

### ۱.۲. شبیه‌سازی طیف اشعه ایکس

به منظور اندازه‌گیری ضریب تبدیلی که کرمای هوا را به معادل دز فردی برای باریکه طیف اشعه ایکس مربوط می‌کند یک برنامه کامپیوتری با استفاده از کد مونت کارلوی GAET7.2 برای ایجاد طیف اشعه ایکس فیلتر شده و فیلتر نشده حاصل از آند تنگستنی تیوب اشعه ایکس برای ولتاژ اعمالی ۴۰ تا ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت اجرا شده است. برای ایجاد طیف فیلتر شده، طیف فیلتر نشده را در مواد مختلف تضعیف می‌کنند. در عمل قبل از کالیبراسیون دزیمترهای فردی مشخصات طیف انرژی اشعه ایکس با اندازه‌گیری پارامترهای کیفی باریکه، مثل لایه نیمه‌کننده (HVL)، حداکثر ولتاژ (kVp) و میانگین انرژی فوتونی مشخص می‌شود. این پارامترها برای مقایسه کیفی بیم برای بازسازی طیف‌های اشعه ایکس مفید هستند. تمام این کمیت‌ها توصیف کیفی از نفوذپذیری طیف اشعه ایکس ارائه می‌کنند؛ بنابراین به‌طور مشابه برای شبیه‌سازی طیف اشعه ایکس، اندازه‌گیری پارامترهای کیفی بیم مثل لایه نیمه‌کننده، حداکثر ولتاژ و

حساب کرده و ضریب تبدیلی که کرمای هوا را به معادل دز فردی در عمق موردنظر مرتبط می‌کند، محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی بزرگی خطایی که ممکن است در این مدل کامپیوتری رخ داده باشد، ضرایب تبدیل محاسبه شده در این مقاله برای فانتوم استاندارد ICRU با ابعاد  $30 \times 30 \times 15$  برای ۵ باریکه اشعه ایکس سری (N۱۲۰-N۴۰) استاندارد ISO، با ضرایب تبدیل منتشرشده توسط این استاندارد مقایسه می‌شود.

محاسبه ضریب تبدیلی که کرمای هوا را به معادل دز فردی برای دو فانتوم، برای طیف اشعه ایکس حاصل از ولتاژ ۴۰ تا ۱۴۰ الکترون‌ولت تبدیل می‌کند انجام گرفته است. ارزیابی این روش به‌وسیله مقایسه پارامترهای کیفی بیم و ضرایب تبدیل محاسبه‌شده برای ۵ بیم اشعه ایکس از سری N، گزارش شده در استاندارد ISO انجام گرفته است. نتایج این ارزیابی در جداول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱، ارائه‌دهنده مقادیر HVL و میانگین انرژی فوتونی اندازه‌گیری شده در مقایسه با مقادیر گزارش شده در استاندارد ISO است.

### ۳. نتایج و بحث

جدول (۱): مقادیر HVL و میانگین انرژی فوتونی محاسبه شده در مقایسه با مقادیر گزارش شده در ISO.

کد بیم	ولتاژ (KV)	کیفیت تابش	اولین لایه نیمه کننده (HVL)		میانگین انرژی	
			مقدار محاسبه شده	درصد تفاوت	مقدار محاسبه شده	درصد تفاوت
N-۴۰	۴۰	فیلتر ۴/۰۰ (mmAl)	۰/۰۹۳	۳/۷۵	۳۳/۰۰ (keV)	۳۳/۵۶
N-۶۰	۶۰	۴/۰۰	۰/۲۴۶	۲/۹	۴۷/۷۰	۴۸/۱
N-۸۰	۸۰	۴/۰۰	۰/۶۰۹	۳/۳	۶۴/۳۰	۶۵/۲
N-۱۰۰	۱۰۰	۴/۰۰	۱/۱۵	۳/۸	۸۲/۶۰	۸۳/۱۳
N-۱۲۰	۱۲۰	۴/۰۰	۱/۷۳	۲/۳۱	۹۹/۰۰	۱۰۱/۲۲

در جدول ۲ نیز مقادیر ضرایب تبدیل محاسبه‌شده برای تبدیل کرمای هوا به  $H_p(10)$  و  $H_p(0.07)$  برای فانتوم استاندارد ICRU نشان داده شده است و مقایسه‌ای با مقادیر گزارش شده در استاندارد ISO برای ۵ بیم اشعه ایکس از سری

N انجام گرفته است. در جدول ۳ نیز مقادیر ضرایب تبدیل محاسبه‌شده برای تبدیل کرمای هوا به  $H_p(3)$  برای ۵ بیم اشعه ایکس پیشنهادی از سری N برای فانتوم پیشنهادی با ابعاد متفاوت اما جنس مشابه فانتوم ICRU نشان داده شده است.

جدول (۲): ضرایب تبدیل محاسبه شده برای تبدیل کرمای هوا به  $H_p(10)$  و  $H_p(0.07)$  و مقایسه با مقادیر گزارش شده در ISO.

کد بیم	ولتاژ (KV)	کیفیت تابش	ضریب تبدیل میانگین کرمای هوا		ضریب تبدیل میانگین کرمای هوا	
			به $H_p(10)$	به $H_p(0.07)$	به $H_p(10)$	به $H_p(0.07)$
N-۴۰	۴۰	فیلتر ۴/۰۰ (mmAl)	۱/۲۲	۱/۲۹	۱/۲۳	۱/۲۹
N-۶۰	۶۰	۴/۰۰	۱/۶۸	۱/۵۷	۱/۷۲	۱/۵۷

۳/۲	۱/۹۵	۱/۸۹	۳/۹	۱/۷۸	۱/۷۲	۴/۰۰	۸۰	N-۸۰
۲/۷	۱/۹۲	۱/۸۷	۲/۱	۱/۷۴	۱/۷۱	۴/۰۰	۱۰۰	N-۱۰۰
۰/۹	۱/۸۱	۱/۸۰	۳/۱	۱/۷۲	۱/۶۷	۴/۰۰	۱۲۰	N-۱۲۰

جدول (۳): مقادیر ضرایب تبدیل محاسبه شده برای تبدیل کرمای هوا به  $^{۳}\text{HP}$ .

ضریب تبدیل میانگین کرمای هوا به $^{۳}\text{HP}$ بر حسب (SV/Gy)	کیفیت تابش		کد بیم
	فیلتر (mmAl)	ولتاژ (KV)	
۱/۳۵	۴/۰۰	۴۰	N-۴۰
۱/۶۱	۴/۰۰	۶۰	N-۶۰
۱/۵۸	۴/۰۰	۸۰	N-۸۰
۱/۵۲	۴/۰۰	۱۰۰	N-۱۰۰
۱/۴۲	۴/۰۰	۱۲۰	N-۱۲۰

#### ۴. نتیجه گیری

بین مقادیر محاسبه شده معادل دز فردی در عمق های ۰/۷ و ۱۰ میلی متر با مقادیر منتشر شده در استاندارد ISO برای فانتوم استاندارد ICRU انجام گرفت و اختلاف حدود ۱ الی ۴ درصد مشاهده شد. با توجه به دقت مورد نیاز در زمینه حفاظت در برابر اشعه، نتایج به دست آمده نسبتاً قابل قبول می باشد. این روش محاسبه یک روش قابل قبول برای پیش بینی ضریب تبدیل کرمای هوا به معادل دز فردی می باشد و جهت کالیبراسیون دزیمترهای فردی از لحاظ معادل دز فردی ضروری است.

یک روش شبیه سازی کامپیوتری برای تعیین ضریب تبدیل کرمای هوا به معادل دز فردی در عمق های مختلف دو فانتوم برای طیف اشعه ایکس حاصل از آند تنگستنی برای پتانسیل های ۴۰ تا ۱۴۰ الکترون ولت ارائه شده است. این روش امکان اندازه گیری ضریب تبدیل برای باریکه اشعه ایکس با فیلتر آلومینیوم در محدوده تشخیصی را فراهم می کند. در این تحقیق، ضریب تبدیل مناسب برای ۵ باریکه اشعه ایکس سری (N۴۰-N۱۲۰) ارائه شده در استاندارد ISO برای دو فانتوم مختلف حساب شده است. به منظور اعتبار سنجی مقایسه ای

## ۵. مراجع

- [1] H. Kharrati and B. Zarrad. Computation of conversion coefficients relating air Kerma to Hp (0.07,  $\alpha$ ), Hp (10,  $\alpha$ ), and H\*(10) for x-ray narrow spectrum from 40 to 140 kV. *Medical physics*, 31(2) (2004) 277–284.
- [2] A. Hakanen, A. Kosunen, P. Pöyry and M. Tapiovaara. Determination of conversion factors from air kerma to operational dose equivalent quantities for low-energy X-ray spectra. *Radiation protection dosimetry*, 125(1-4) (2006) 198–204.
- [3] G. Gualdrini, J. M. Bordy, J. Daures, E. Fantuzzi, P. Ferrari, F. Mariotti and F. Vanhavere. Air kerma to HP (3) conversion coefficients for photons from 10 keV to 10 MeV, calculated in a cylindrical phantom. *Radiation protection dosimetry*, 154(4) (2012) 517–521.
- [4] P.H.G. Rosado, M.D.S. Nogueira, F. Genezini and E.C. Vilela. Measurement of conversion coefficients between free in air kerma and personal dose equivalent for diagnostic X-ray beams. *Radiation Measurements*, 43(2) (2008) 968–971.