

محاسبه ضخامت نیمه لایه آلومینیوم و انرژی مؤثر لامپ مولد اشعه ایکس^۱

احسان تقی زاده طوسی^۲

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۸/۰۶

تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۰۷/۱۱

چکیده

در این تحقیق، کیفیت یک دستگاه رادیولوژی ساخت شرکت توشیبا ارزیابی شد. برای این منظور ابتدا ضخامت نیمه لایه آلومینیوم تقریباً خالص، با کمک آشکارساز اتاقک یونی در برابر تابش دستگاه رادیولوژی در طیف انرژی تشخیصی اشعه ایکس، اندازه گیری و با مقدار کمیته آن برای آلومینیوم مقایسه شد. سپس با کمک مقدار نیمه لایه آلومینیوم، انرژی مؤثر پرتوی ایکس اندازه گیری شد. انرژی مؤثر پرتوی تابیده به بدن بیماران تعیین کننده میزان دوز جذبی است، که یکی از پارامترهای بسیار مهم در فیزیک پزشکی می باشد. با توجه به نتایج این تحقیق، دستگاه رادیولوژی مورد مطالعه در طیف انرژی های تشخیصی دارای کیفیت نفوذ مطلوب و انرژی مؤثر مناسب می باشد. این تحقیق می تواند مرجعی برای محاسبه ضخامت نیمه لایه و همچنین انرژی مؤثر پرتوی ایکس دستگاه های رادیولوژی در مراکز تحقیقاتی و پزشکی باشد.

^۱ شناسه دیجیتال (DOI): 10.22051/jap.2018.14794.1070

^۲ دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، خراسان رضوی، ایران؛ e.taghizadeh@torbath.ac.ir

واژه‌های کلیدی: دوز جذبی، لامپ اشعه ایکس، آشکارساز اتافک یونی، ضخامت نیمه‌لایه (HVL)، انرژی مؤثر لامپ اشعه ایکس (E_{eff}).

۱. مقدمه

امروزه دستگاه‌های رادیولوژی به‌طور گسترده‌ای در مراکز تحقیقاتی و پرتو پزشکی استفاده می‌شود. یکی از عناصر اصلی تشکیل‌دهنده یک دستگاه رادیولوژی، لوله مولد اشعه ایکس است، که به عنوان منبع تولید پرتوی ایکس استفاده می‌شود. لوله مولد اشعه ایکس از بخش‌های مختلفی (از جمله محفظه لوله، لامپ اشعه ایکس و غیره) تشکیل شده است. لامپ اشعه ایکس، اصلی‌ترین قسمت دستگاه رادیولوژی است که وظیفه تولید اشعه ایکس را بر عهده دارد. پرتوهای ایکس از بیماران هدفی فلزی با باریکه‌ای از الکترون‌های سریع، تولید می‌شوند. به‌طور کلی لامپ مولد اشعه ایکس از محفظه لامپ، کاتد و آند تشکیل شده است. کاتد برای گسیل الکترون‌ها و آند به عنوان هدف فلزی است، که هر دو درون محفظه لامپ قرار دارند.

با توجه به میزان نفوذ اشعه ایکس و طول موج آن، از لامپ‌های اشعه ایکس متنوعی در کارهای تحقیقاتی و پزشکی و صنعتی استفاده می‌شود. موارد استفاده از لامپ‌های اشعه ایکس در علم و صنعت بسیار وسیع است. یکی از کاربردهای مهم و در حال توسعه لامپ اشعه ایکس، استفاده از آن در علم پزشکی است که می‌توان آن را در دو بخش اصلی تقسیم‌بندی کرد: (۱) پرتونگاری تشخیصی، (۲) پرتو درمانی.

پس از کشف اشعه ایکس و افزایش کاربردهای تابش به‌ویژه در علوم پزشکی، همواره حفاظت در برابر پرتوها مورد توجه قرار داشته است. برهمکنش ماده (همانند بدن انسان) با پرتو به خواص ماده (مانند چگالی، عدد اتمی مؤثر و غیره) و همچنین به انرژی فوتون، بستگی دارد. یکی از کمیت‌های مهم در فیزیک پزشکی، میزان دوز جذبی توسط ماده است.

دوز جذبی در ماده به‌صورت نسبت انرژی جذب‌شده از پرتو، در واحد جرم ماده جذب‌کننده تعریف می‌شود [۱]. یکای دوز جذبی در سیستم بین‌المللی یکاها (SI)، گری^۱ (ژول بر کیلوگرم) است. محاسبه دوز جذبی در بافت بدن انسان یکی از اصلی‌ترین اهداف فیزیک پزشکی و پرتو پزشکی است، که به شدت به انرژی پرتوی ورودی به بافت وابسته است. در نتیجه، ارزیابی دقیق انرژی لامپ اشعه ایکس در فیزیک پزشکی بسیار مهم است [۲].

^۱ Gray (Gy)

۲. روش کار

۲-۱. انرژی مؤثر اشعه ایکس

با توجه به مکانیک امواج، پرتوی دارای طول موج کوچکتر بسامد بزرگتری دارد. انرژی فوتون ارتباط مستقیم به بسامد آن دارد. بنابراین امواج دارای طول موج کوچکتر، انرژی بیشتری دارند. پرتوی ایکسی که فقط دارای یک طول موج خاص باشد پرتوی ایکس تکفام می‌نامند، که دارای یک انرژی مشخص است. اگر باریکه اشعه ایکس دارای طول موج هایی در بازه مشخص باشد، آن را پرتو ایکس سفید (پیوسته) نامیده و دارای طیف انرژی (به جای تک انرژی) است.

لامپ اشعه ایکس در دستگاه رادیولوژی، باریکه پرتوی ایکس پیوسته با طیف انرژی مشخص تولید می‌کند. برای نمایش انرژی اشعه ایکس تولید شده در لامپ اشعه ایکس، از کمیت kVp^1 استفاده می‌شود که حداکثر ولتاژ اعمال شده در سراسر لوله مولد اشعه ایکس است. در واقع، کمیت kVp ، انرژی جنبشی الکترون‌ها در لوله مولد اشعه ایکس را تعیین می‌کند. بنابراین، kVp نشان‌دهنده انرژی اوج طیف پرتوی تولید شده در لامپ اشعه ایکس است. در یک لامپ اشعه ایکس، میزان kVp را انرژی اسمی^۲ لامپ نیز می‌نامند [۱-۲]. کمیت مهم دیگر در لامپ اشعه ایکس، میزان بار الکتریکی یا همان تعداد الکترون‌های بمباران کننده آند است، که با یکای میلی آمپر در ثانیه (mA.s) نشان داده می‌شود. میلی آمپر در ثانیه، در واقع یکای برای بار الکتریکی است که در تصویربرداری تشخیصی و همچنین پرتودرمانی به عنوان یکی از پارامترهای تعیین کننده کیفیت پرتوی ایکس تولید شده، استفاده می‌شود [۳].

برای تشخیص میزان نفوذپذیری باریکه پرتوی ایکس، تعیین مقدار واقعی انرژی آن ضروری است. یکای نشان‌دهنده انرژی باریکه پرتوی تکفام، الکترون ولت (eV) است. با توجه به اینکه تجهیزات رادیولوژی از اشعه ایکس تک انرژی استفاده نمی‌کنند، برای تشخیص کیفیت اشعه تولید شده در لامپ مولد پرتوی ایکس، باید انرژی مؤثر آن را محاسبه کنیم. انرژی مؤثر لامپ اشعه ایکس، برابر با انرژی پرتوی تکفامی است که مقدار میرایی آن با طیف انرژی لامپ اشعه ایکس برابر باشد [۱، ۴].

در این تحقیق، مقادیر انرژی مؤثر یک لامپ اشعه ایکس توشیبا^۳ در دستگاه رادیولوژی ساخت شرکت توشیبا^۱ در انرژی‌های اسمی ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ (kVp)، به عنوان طیف انرژی‌های تشخیصی اشعه ایکس، ارزیابی و اندازه گیری شد.

¹ Peak Kilo-Voltage

² Nominal Energy

³ Rotanode; DRX-HD

۲-۲. ضخامت نیمه‌لایه و روش محاسبه انرژی مؤثر لامپ اشعه ایکس

مقادیر ضخامت نیمه‌لایه^۱ (HVL) و همچنین انرژی مؤثر پرتوی اشعه ایکس، به عنوان پارامترهای کیفی پرتوی تولیدشده توسط لامپ اشعه ایکس، ارزیابی می‌شود [۲]. مقدار HVL برای ماده مشخص به صورت ضخامتی از آن ماده که شدت تابش ورودی را به نصف کاهش می‌دهد، تعریف می‌شود [۶]. برای اندازه‌گیری مقدار HVL، ابتدا مقادیر دوز توسط یک آشکارساز محفظه یونی^۳ در حالت‌های حضور و عدم حضور یک ماده تضعیف‌کننده (معمولاً آلومینیوم [۵]) در مسیر پرتوی اشعه ایکس، اندازه‌گیری می‌شوند. مقدار HVL برای لامپ اشعه ایکس توسط معادله (۱) محاسبه می‌شود [۶]،

$$HVL = \frac{X_1 \ln\left(\frac{2Y_2}{Y_0}\right) - X_2 \ln\left(\frac{2Y_1}{Y_0}\right)}{\ln\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)} \quad (1)$$

که در آن، Y میزان دوز خوانده‌شده در حالت مستقیم و بدون آلومینیوم (X_1 (mGy)، بیشترین ضخامت صفحه آلومینیوم (mm) برای مقدار کمتر از HVL؛ X_2 ، کمترین ضخامت صفحه آلومینیوم (mm) برای مقدار بیشتر از HVL؛ Y_1 مقدار دوز اندازه‌گیری‌شده با صفحه آلومینیومی به ضخامت X_1 (mGy) و Y_2 مقدار دوز اندازه‌گیری‌شده با صفحه آلومینیومی به ضخامت X_2 (mGy) است.

قانون بیر-لامبرت^۴ بیان می‌کند تغییر شدت پرتوی فوتون اولیه، متناسب با منفی حاصل ضرب شدت پرتوی اشعه ایکس در ضخامت ماده جاذب است. ضریب میرایی خطی (μ) بر حسب (cm^{-1}) که به مجموعه‌ای از خصوصیات ماده جاذب بستگی دارد، به عنوان ثابت تناسب در قانون بیر-لامبرت، تعریف می‌شود. ضریب میرایی خطی توسط معادله (۲) محاسبه می‌شود [۱]،

$$dI = -\mu I dx \rightarrow \mu = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2)$$

که در آن x ضخامت ماده، I_0 و I به ترتیب شدت تابش ورودی و خروجی از ماده می‌باشند. ضریب میرایی خطی در واقع درصد کاهش شدت پرتوی ایکس در واحد ضخامت ماده جاذب در انرژی خاص پرتوی ورودی را تعیین می‌کند. براین اساس، ضریب خطی میرایی، میزان کاهش شدت اشعه ایکس را به عنوان تابعی از ضخامت مواد تعیین می‌کند. بنابراین، مقدار ضریب میرایی خطی

¹ Rodrextm KXO

² Half Value Layer

³ Parallel Plate Thin Window Ion Chamber Detector at the Air Kerma

⁴ Beer-Lambert law

ماده جاذب مشخص به راحتی توسط برخی پدیده‌های فیزیکی مانند تبخیر و انبساط و انقباض تغییر می‌کند. پس ضریب میرایی جرمی به صورت نسبت ضریب میرایی خطی (μ) به چگالی ماده جاذب (ρ)، تعریف می‌شود. ضریب میرایی جرمی (μ/ρ)، کمیتی است که میرایی هر ماده را فقط به صورت تابعی از جنس و خصوصیات ذاتی ماده نشان می‌دهد. رابطه ضریب میرایی جرمی با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود [۲]،

$$\text{if } : x = HVL \rightarrow I = \frac{1}{2} I_0 \quad (3)$$

$$\mu = \frac{\ln(2)}{HVL} \rightarrow \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\ln(2)}{HVL} \right)$$

که در آن، ρ چگالی آلومینیوم و مقدار آن (2.7 g/cm^3) است. انرژی مؤثر پرتوی اشعه ایکس را می‌توان با استفاده از ضرایب میرایی جرمی آلومینیوم در محدوده مقدار HVL از رابطه (۴) محاسبه کرد [۱]،

$$\frac{(E_{eff} - E_2)}{\left(\frac{m}{r}\right)_2 - \left(\frac{m}{r}\right)} = \frac{(E_1 - E_2)}{\left(\frac{m}{r}\right)_2 - \left(\frac{m}{r}\right)_1} \text{ p } E_{eff} = \frac{[E_1 - E_2] \left[\left(\frac{m}{r}\right)_2 - \left(\frac{m}{r}\right) \right]}{\left(\frac{m}{r}\right)_2 - \left(\frac{m}{r}\right)_1} + E_2 \quad (4)$$

که در آن، E_1 و E_2 به ترتیب انرژی‌های پرتوی ایکس قبل و بعد از ضخامت HVL برای آلومینیوم است. همچنین، $(\mu/\rho)_1$ و $(\mu/\rho)_2$ و (μ_{eff}/ρ) به ترتیب ضریب میرایی جرمی آلومینیوم قبل و بعد و در ضخامت HVL است. انرژی مؤثر برای هر سه طیف انرژی اسمی اشعه ایکس (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ kVp) محاسبه شد.

۳. روش آزمایش

از آشکارساز محفظه یونی با صفحات نازک موازی برای محاسبه انرژی مؤثر لامپ اشعه ایکس توشیبا استفاده شد. بار الکتریکی را در تمام زمان تحقیق بر عدد $115.2(\text{mA}\cdot\text{s})$ ثابت گرفتیم تا در محاسبه انرژی مؤثر فقط انرژی اسمی (kVp) تأثیر داشته باشد [۱]. سه انرژی اسمی ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ (kVp) در طیف انرژی‌های تشخیصی به عنوان نمونه و برای محاسبه انرژی مؤثر و همچنین کیفیت سنجی دستگاه رادیولوژی انتخاب شد. برای هر انرژی اسمی دستگاه رادیولوژی، آشکارساز اتاقک یونی در فاصله ۱۰۰ سانتی متری از لوله مولد اشعه ایکس ($\text{SSD}^1 = 100 \text{ cm}$) قرار گرفت [۱، ۲، ۷]. سپس آشکارساز اتاقک یونی را تحت تابش قرار دادیم و میزان دوز جذبی برای هر انرژی اسمی بدون حضور ماده جاذب اندازه‌گیری شد. پس از آن برای هر انرژی اسمی

¹ Source To Surface Distance

حداقل ۷ ضخامت متفاوت از صفحات آلومینیوم با خلوص بسیار زیاد، بر روی آشکارساز اتاقک یونی قرار داده و مجدداً دوز جذبی پس از تابش اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت آزمایش، در هر انرژی اسمی و برای هر ضخامت از آلومینیوم حداقل ۳ بار عمل تابش و قرائت دوز انجام و میانگین‌گیری شد.

۴. نتایج آزمایش

صفحات آلومینیومی با خلوص بسیار زیاد به منظور تعیین ضخامت نیمه‌لایه آلومینیوم و همچنین انرژی مؤثر اشعه ایکس در انرژی‌های اسمی ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ (kVp) برای لامپ اشعه ایکس توشیبا استفاده شد. جدول ۱ مقدار دوز اندازه‌گیری‌شده را توسط آشکارساز اتاقک یونی به ازای ضخامت‌های مختلف صفحات آلومینیومی در انرژی اسمی ۶۰ (kVp) برای لامپ اشعه ایکس نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر دوز در حضور صفحات آلومینیومی با ضخامت‌های مختلف برای انرژی اسمی ۶۰ kVp.

ضخامت آلومینیوم (mm)	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
دوز (mGy)	۴/۷۰	۳/۳۹	۲/۵	۱/۹۶	۱/۵۳	۱/۲۶	۱/۰۲	۰/۸۵

همچنین جداول ۲ و ۳ مقادیر دوز اندازه‌گیری‌شده را در انرژی‌های اسمی اشعه ایکس ۸۰ و ۱۰۰ (kVp) به ترتیب نشان می‌دهند. در هر سه جدول ۱ و ۲ و ۳ تمام پارامترهای اندازه‌گیری دوز از جمله فاصله لوله مولد اشعه ایکس تا صفحات آلومینیومی و همچنین پارامترهای دستگاه رادیولوژی (بجز انرژی اسمی) ثابت است.

جدول ۲: مقادیر دوز در حضور صفحات آلومینیومی با ضخامت‌های مختلف برای انرژی اسمی ۸۰ kVp.

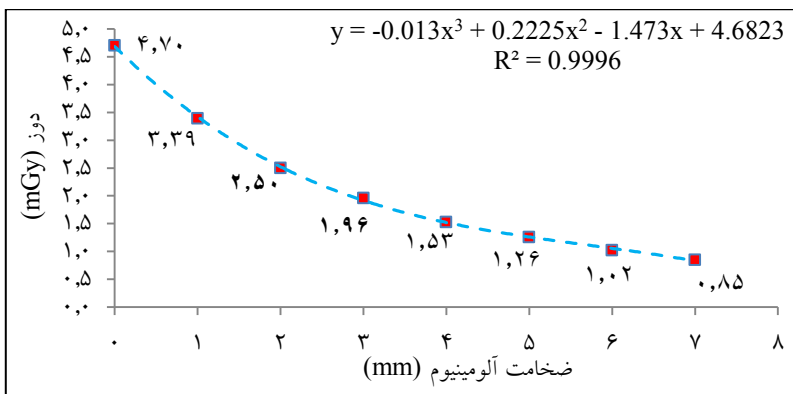
ضخامت آلومینیوم (mm)	۰/۰	۲/۰	۳/۰	۳/۵	۵/۵	۶/۰	۷/۰	۸/۰
دوز (mGy)	۸/۴۷	۵/۱۳	۴/۲۵	۳/۸۵	۲/۷۷	۲/۵۴	۲/۲۳	۱/۹۴

جدول ۳: مقادیر دوز در حضور صفحات آلومینیومی

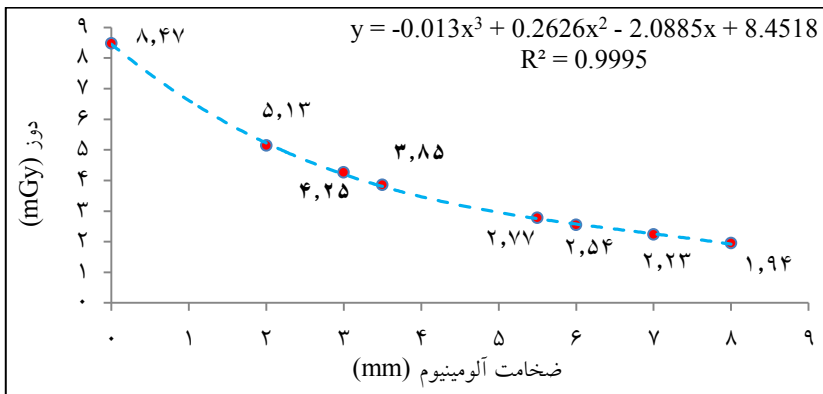
با ضخامت‌های مختلف برای انرژی اسمی ۱۰۰ kVp.

ضخامت آلومینیوم (mm)	۰/۰	۲/۰	۳/۰	۳/۵	۴/۰	۶/۰	۸/۰	۸/۵	۹/۰
دوز (mGy)	۱۳/۰۰	۸/۵۵	۷/۳۰	۶/۷۷	۶/۲۱	۴/۷۸	۳/۸۰	۳/۵۸	۳/۴۰

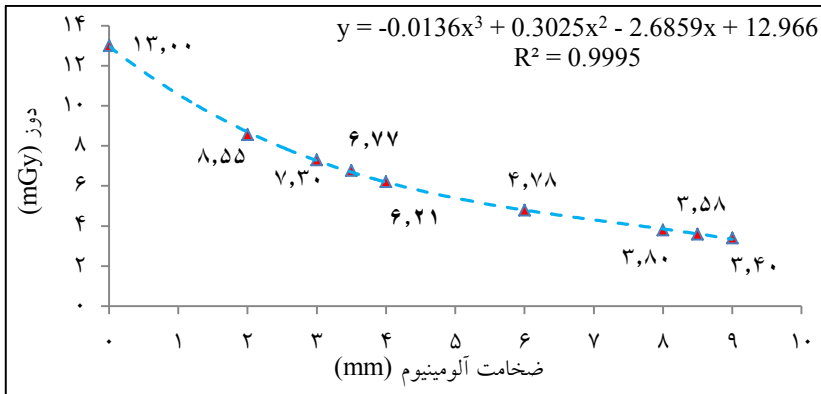
شکل های ۱ و ۲ و ۳ منحنی دوز اندازه گیری شده را بنا به ضخامت آلومینیوم در انرژی اسمی اشعه ایکس ۶۰ و ۸۰ و ۱۰۰ (kVp) به ترتیب نشان می دهند. منحنی چندجمله ای برای نمایش منحنی دوز-ضخامت آلومینیوم استفاده شده است، زیرا ضریب رگرسیون خطی (R^2) برای منحنی چندجمله ای، تقریباً یک است، بنابراین بیشترین سازگاری را با منحنی واقعی دارد. با استفاده از رابطه ۱ و همچنین نمودارهای ۱ و ۲ و ۳، مقادیر HVL برای باریکه اشعه ایکس تولید شده در انرژی های اسمی ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ (kVp) در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۱. منحنی دوز اندازه گیری شده بر حسب ضخامت آلومینیوم در انرژی اسمی ۶۰ kVp اشعه ایکس.



شکل ۲. منحنی دوز اندازه گیری شده نسبت به ضخامت آلومینیوم در انرژی اسمی ۸۰ kVp اشعه ایکس.



شکل ۳. منحنی دوز اندازه‌گیری شده نسبت به ضخامت آلومینیوم در انرژی اسمی ۱۰۰ kVp اشعه ایکس.

جدول ۴: مقادیر محاسبه‌شده HVL در انرژی‌های اسمی مختلف لامپ اشعه ایکس.

انرژی اسمی (kVp)	Y_1 (mGy)	X_1 (mm)	Y_2 (mGy)	X_2 (mm)	Y_3 (mGy)	HVL (mm)
۶۰	۴/۷۰	۲/۰	۲/۵۰	۳/۰	۱/۹۶	۲/۲۵۴
۸۰	۸/۴۷	۳/۰	۴/۲۵	۳/۵	۳/۸۵	۳/۰۱۸
۱۰۰	۱۳/۰۰	۳/۵	۶/۷۷	۴	۶/۲۱	۳/۷۳۶

در جدول ۵ با استفاده از رابطه (۳) و مقادیر HVL از جدول ۴، ضریب میرایی خطی در ضخامت نیمه‌لایه آلومینیوم محاسبه شده است. همچنین با توجه به اینکه از صفحات آلومینیوم با خلوص مطلوب استفاده شده است، می‌توان مقدار چگالی آلومینیوم را $۲/۷ \text{ (g/cm}^3\text{)}$ در نظر گرفت. ضریب میرایی جرمی برای آلومینیوم در ضخامت HVL با تقسیم ضریب میرایی خطی آلومینیوم، به چگالی آن محاسبه شده و در جدول (۵) نشان داده شده است. پس از تعیین ضخامت نیمه‌لایه برای آلومینیوم، انرژی اشعه ایکس برای آلومینیوم با ضخامت‌های کمتر و بیشتر از HVL، (E_1 و E_2) و همچنین ضرایب میرایی جرمی برای این انرژی‌ها از پیوست D از مرجع [۲] استخراج شد. سرانجام با استفاده از رابطه (۴) مقدار انرژی مؤثر پرتو اشعه ایکس در هریک از انرژی‌های اسمی دستگاه رادیولوژی محاسبه شد، که در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۵. مقادیر ضرائب میرایی خطی و جرمی آلومینیوم

با ضخامت HVL در انرژی‌های اسمی مختلف اشعه ایکس.

انرژی اسمی (kVp)	μ آلومینیوم در HVL (cm^{-1})	μ/ρ آلومینیوم در HVL (cm^2/g)
۶۰	۳/۰۷۴	۱/۱۳۸
۸۰	۲/۲۹۶	۰/۸۵۰
۱۰۰	۱/۸۵۵	۰/۶۸۷

جدول ۶. مقدار HVL، ضرائب میرایی جرمی و انرژی‌های مؤثر

به‌ازای انرژی‌های اسمی اشعه ایکس ۶۰ kVp و ۸۰ kVp و ۱۰۰ kVp.

انرژی اسمی (kVp)	کمیته HVL آلومینیوم [Y] (mm)	HVL آلومینیوم (mm)	μ/ρ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)			انرژی فوتون (keV)		
			$(\mu/\rho)_1$	$(\mu/\rho)_{\text{eff}}$	$(\mu/\rho)_2$	E_1	E_2	E_{eff}
۶۰	۱/۵	۲/۲۵۴	۱/۱۲۸	۱/۱۳۸	۳/۴۴۱	۳۰	۲۰	۲۹/۹۵۷
۸۰	۲/۳	۳/۰۱۸	۰/۵۷۰	۰/۸۵۰	۱/۱۲۸	۴۰	۳۰	۳۴/۹۵۶
۱۰۰	۲/۷	۳/۷۳۶	۰/۵۷۰	۰/۶۸۷	۱/۱۲۸	۴۰	۳۰	۳۷/۸۷۸

۵. نتیجه‌گیری

مقادیر کمیته برای ضخامت نیمه‌لایه آلومینیوم در جدول ۶ نمایش داده شده است [۸]. همچنین میزان نفوذپذیری انرژی‌های مؤثر محاسبه‌شده برای لامپ اشعه ایکس توشیبای مورد مطالعه، با میزان نفوذ لازم برای پرتوی ایکس در انرژی‌های تشخیصی مقایسه شد [۲]. بنابر نتایج این تحقیق، مقدار HVL برای آلومینیوم از ضخامت حداقل مورد نیاز برای نیمه‌لایه آلومینیوم بیشتر است. به عبارت بهتر، میزان دامنه نفوذ پرتوی ایکس خروجی از دستگاه رادیولوژی مورد مطالعه از کمیته استاندارد لازم برای این نوع از دستگاه‌ها بیشتر است، که نشان‌دهنده کیفیت نفوذ مطلوب این دستگاه رادیولوژی در طیف انرژی‌های تشخیصی است. به علاوه، با استفاده از HVL آلومینیوم و انرژی اشعه ایکس برای آلومینیوم با ضخامت‌های کمتر و بیشتر از ضخامت نیمه‌لایه، ضرایب میرایی جرمی برای این انرژی‌ها از پیوست D از مرجع [۲] استخراج شد. با استفاده از این داده‌ها و همچنین رابطه (۴)، انرژی مؤثر (انرژی واقعی) دستگاه در انرژی‌های اسمی ۶۰ (kVp) و ۸۰ (kVp) و ۱۰۰ (kVp) محاسبه شد. با مقایسه انرژی‌های مؤثر دستگاه با میزان استاندارد این انرژی‌های مؤثر که در پیوست D از [۲] موجود است، سازگاری انرژی مؤثر این دستگاه با استاندارد نشان داده شد. این تحقیق به عنوان مرجعی برای محاسبه ضخامت نیمه‌لایه و همچنین انرژی مؤثر پرتوی ایکس دستگاه‌های رادیولوژی در مراکز تحقیقاتی و پزشکی مناسب است.

مراجع

1. F.M. Khan. *The physics of Radiation Therapy*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2010).
2. F.H. Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Wiley-VCH, New York, (2008).
3. F. Campeau, J. Fleitz. *Limited Radiography*. Cengage Learning, USA, (2016).
4. J.T. Bushberg, J.M. Boone. *The Essential Physics of Medical Imaging*, 3rd Ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2011).
5. V.F. Andolina, S.L. Lillé. *Mammographic Imaging: A Practical Guide*. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, (2010).
6. R. Hendrick, L. Bassett, , M. Botsco, D. Deibel, S. Feig, J. Gray, A. Haus, R. Heinlein, E. Kitts, E. J. Mccrohan. *Mammography Quality Control Manual*. American College of Radiology, Reston, (1999).
7. AAPM-25. American Association of Physicists in Medicine, American institute of Physics, New York, (1988).