

طراحی و ساخت یک اتاقک یونش با صفحات موازی جهت دزیمتری پرتوهای ایکس تشخیصی

بابک شریفی^۱، حسین زمانی زینلی^{۲*}، جمشید سلطانی نبی پور^۱، علی نگارستانی^۱ و ارژنگ شاهور^۲

^۱ گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران.

^۲ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کرج، ایران.

*کرج، انتهای بلوار مؤذن، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۳۱۴۸۶-۴۳۱۱۱

پست الکترونیکی: hzeinali@nrcam.org

چکیده

بیشتر تجهیزات تصویربرداری پزشکی از جمله رادیولوژی تشخیصی و ماموگرافی، نیازمند یک دزیمتر با دقت بالا جهت اندازه‌گیری میزان دز جذب‌شده و همچنین، تضعیف صورت‌گرفته روی باریکه پرتوهای ایکس حین عبور از بافت بدن هستند. آشکارسازهای اتاقک یونش به دلیل سادگی، پاسخ سریع و قابلیت اطمینان بالا، یکی از مناسب‌ترین ابزارهای دزیمتری پرتوهای ایکس در محدوده تشخیصی پرتوها به‌شمار می‌روند. طرح پیش رو، به موضوع طراحی و ساخت یک اتاقک یونش صفحه موازی با دو حجم حساس، جهت دزیمتری باریکه مولد پرتوهای ایکس می‌پردازد. این آشکارساز می‌تواند به‌عنوان یک دزیمتر مرجع جهت دزیمتری باریکه مولد پرتوهای ایکس در آزمایشگاه‌های استاندارد دزیمتری مورد استفاده قرار گیرد. جریان ناشی بسیار پایین، بازده جمع‌آوری یونی و پایداری بالای اتاقک یونش ساخته‌شده، چند نمونه از ویژگی‌های بارز این آشکارساز نسبت به نمونه‌های مشابه ساخته شده است که عموماً از انتخاب مواد مناسب در ساخت و همچنین، طراحی بهینه الکتروود جمع‌کننده ناشی می‌شود. علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی مربوط به کد مونت کارلو، تأثیر ناچیز الکتروود مرکزی بر روی عملکرد اتاقک یونش ساخته‌شده را نشان می‌دهد.

کلیدواژگان: آشکارساز اتاقک یونش با صفحات موازی، باریکه مولد پرتوهای ایکس تشخیصی، آزمون‌های کنترل کیفی، دزیمتری.

۱. مقدمه

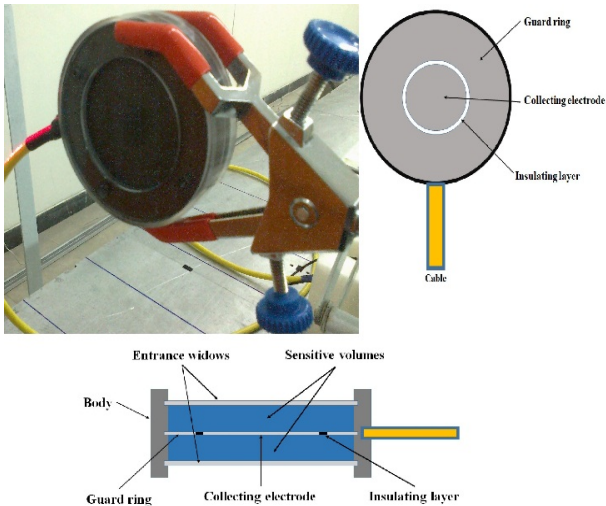
نسبت به نمونه‌های مشابه اتاقک یونش استوانه‌ای، پاسخ بهتری دارند که همین امر موجب بالا رفتن دقت و بازده این نوع از آشکارسازها می‌شود [۲].

طرح پیش رو، ساخت و طراحی یک نوع بهینه از اتاقک‌های یونش با صفحات موازی بوده که برخلاف آشکارسازهای صفحه موازی رایج که از یک حجم حساس استفاده می‌شود، در آن از دو حجم حساس مابین دو پنجره ورودی و یک الکتروود جمع‌کننده استفاده شده است.

برای بررسی نحوه عملکرد و کنترل کیفیت آشکارساز ساخته‌شده مطابق با استانداردهای تعیین‌شده از سوی آژانس

تهیه تصاویر پزشکی با استفاده از دستگاه‌های رادیولوژی تشخیصی و ماموگرافی، همچنین محاسبات مربوط به طراحی درمان با استفاده از باریکه فوتونی یا الکترونی، به یک دزیمتر با دقت و قدرت تفکیک بالا در تشخیص شدت و انرژی باریکه نیاز دارد [۱]. طراحی و ساخت اتاقک‌های یونش با صفحات موازی در چند سال اخیر، به‌طور چشمگیری مورد استفاده قرار گرفته است. این نوع از آشکارسازها یکی از کاربردی‌ترین نوع دزیمتر پرتوهای یون‌ساز محسوب می‌شوند. به دلیل مسطح بودن پنجره‌های ورودی این نوع ویژه از اتاقک‌های یونش،

الکتریکی و محدود کردن حجم حساس، از تعبیه الکترود محافظ (گارد رینگ) استفاده شده است. جهت تولید الکترود محافظ از دو ورقه گرافیت (مشابه الکترودهای جمع کننده بار) که توسط یک لایه نازک عایق از الکترود وسط، ایزوله است به دو طرف الکترود وسط متصل می شود. شایان ذکر است که طول الکترود محافظ می بایست از ۱/۵ برابر فاصله میان الکترودهای ورودی و الکترود وسط بیشتر باشد.



شکل ۱: نمایی از اتاقک یونش ساخته شده و شمای هندسی الکترود مرکزی و نمای جانبی آن

اطلاعات فنی مربوط به این محصول در جدول شماره (۱) مشخص شده است. در طراحی آشکارساز بایستی به این نکته دقت کرد که وجود گرد و غبار یا هر گونه لکه و ترک خوردگی بر روی الکترودها، به افزایش جریان ناشی و بالا رفتن خطای اندازه گیری منجر می شود [۴].

جدول ۱: اطلاعات فنی آشکارساز ساخته شده

مقدار	ویژگی ها
۲۹/۴	حجم هوای داخل اتاقک یونش (cm^3)
۹/۶۵	حجم حساس آشکارساز (cm^3)
۰/۷	چگالی ورق گرافیتی (gr/cm^3)
۰/۵	ضخامت پنجره ورودی (mm)
۰/۱	ضخامت الکترود مرکزی (ورق گرافیتی) (mm)
۵۶	قطر الکترود مرکزی (mm)
۸۶	قطر خارجی آشکارساز (mm)

بین المللی انرژی اتمی، این محصول تحت سری های استاندارد پرتو ایکس و چشمه های گاما و بتا در آزمایشگاه دژیمتری استاندارد ثانویه کرج - ایران، آزمایش شده که در ادامه به آن ها اشاره خواهد شد. نتایج حاصل از شبیه سازی به کمک کدهای مونت کارلو نیز اطلاعات مفیدی از درصد انرژی به جای گذاشته پرتوهای یون ساز در حجم های حساس آشکارساز، میزان تضعیف صورت گرفته در مواد مختلف به کار برده شده در طراحی الکترودها و تأثیر الکترود مرکزی بر عملکرد آشکارساز به دست می دهد.

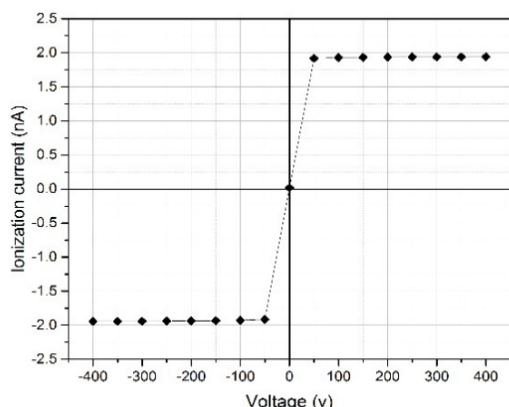
۲. جنبه های فیزیکی

در طراحی آشکارساز حاضر، برخلاف آشکارسازهای صفحه موازی رایج که تنها دارای یک حجم حساس ایجاد شده مابین پنجره ورودی و الکترود جمع کننده است، از ایده تعبیه الکترود مرکزی به صورت کاملاً قرینه مابین دو پنجره ورودی استفاده شده است. این روش طراحی، منجر به تولید دو حجم حساس تنها با یک سیستم جمع کننده یون می شود. استفاده از این روش جهت تولید دو حجم حساس تنها توسط یک صفحه الکترود مرکزی جمع کننده یون، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، علاوه بر بهینه کردن آشکارساز از لحاظ اقتصادی، به بالا رفتن دامنه جریان حاصل از یونش تولید شده ناشی از دو برابر شدن حجم حساس نسبت به اتاقک های یونش رایج منجر شده است. همین امر منجر به بهبود پاسخ این دژیمتر نسبت به سایر اتاقک های یونش با صفحات موازی رایج نیز می شود [۳]. طراحی الکترود مرکزی به وسیله صفحات گرافیتی خالص با چگالی جرمی بسیار پایین و مجهز به الکترود جمع کننده، از جمله نکات مثبت و ارتقای این نوع از آشکارسازها نسبت به مدل های مشابه است.

۳. طراحی و نحوه ساخت

در طرح پیش رو که نمای آن در شکل (۱) مشخص شده است، از یک بدنه و دو پنجره از جنس پلکسی گلاس، با ضخامت ۰/۵ میلی متر که دیواره داخلی پنجره ها را با گرافیت پوشانده، استفاده شده است. الکترود مرکزی از صفحات نازک و آماده از جنس گرافیت به ضخامت ۰/۱ میلی متر و چگالی جرمی بسیار پایین تشکیل شده است. به منظور هر چه یکنواخت تر کردن میدان

می توان اثر پلاریته و لتاژ منبع روی جمع آوری بار و بازده جمع آوری بار را محاسبه کرد.



شکل ۲: منحنی اشباع اتاقک یونش ساخته شده

برای محاسبه اثر پلاریته بر روی میزان بار جمع آوری شده، می بایست اختلاف میانگین بارهای حاصل از یونیزاسیون در ولتاژهای کاری قرینه را محاسبه کرد. مطابق طرح پیشنهادی تعیین شده، برای محاسبه اثر پلاریته، از رابطه (۳) استفاده می شود [۵]:

$$K_{pol} = \frac{|M_+| + |M_-|}{2.M} \quad (3)$$

در این رابطه، M_+ و M_- به ترتیب، مقدار بار جمع آوری شده در پلاریته های مثبت و منفی منبع و M مقدار بار جمع شده در ولتاژ کاری معمول اتاقک یونش (چه مثبت و چه منفی) است. مطابق استاندارد اثر پلاریته بر میزان نسبت جمع آوری بار، نباید از ۱٪ بیشتر باشد [۶]. در این اتاقک یونش جدید، این مقدار در بیشترین حالت برای ولتاژ ± 50 V، حدوداً ۰/۱۵٪ بوده است.

در صورتی که به اتاقک یونش و لتاژ کاری مناسبی اعمال نشود، ممکن است زوج یون های تولید شده در حجم حساس قبل از جمع آوری توسط الکترودها، مجدداً بازترکیب شوند. بازده جمع آوری بار برای باریکه پیوسته دستگاه پرتودرمانی، طبق رابطه زیر محاسبه می شود [۵]:

$$K_{sat} = \frac{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2 - \frac{M_1}{M_2}} \quad (4)$$

که M_1 و M_2 به ترتیب، بار جمع آوری شده حاصل از یونش توسط آشکارساز در ولتاژهای V_1 و V_2 بوده که در اینجا برای

برای اعمال ولتاژ به الکترودها و جمع آوری بار حاصل از یونش از کابل کواکسیال و فیش BNC استفاده می شود. از یک الکترومتر شرکت PTW مدل UNIDOSE جهت اندازه گیری جریان یونش و اعمال ولتاژ جهت انجام آزمایش ها استفاده شده است. از دستگاه های پرتودهی ^{60}Co و ^{137}Cs و همچنین، دستگاه مولد پرتو X مدل زیمنس در گستره دُز تشخیصی برای انجام آزمایش های کنترل کیفیت این آشکارساز استفاده شده است.

۴. نتایج آزمایش های کنترل کیفیت

عملکرد اتاقک یونش ساخته شده، توسط اثر پلاریته و به دست آوردن منحنی اشباع، میزان جریان ناشی و آزمایش های تکرارپذیری و پایداری، خطی بودن و کالیبراسیون و به دست آوردن منحنی های وابستگی انرژی پاسخ آشکارساز مورد ارزیابی قرار گرفته است که در ادامه به آن ها اشاره خواهد شد.

۴.۱. منحنی اشباع، اثر پلاریته و بازده جمع آوری یون

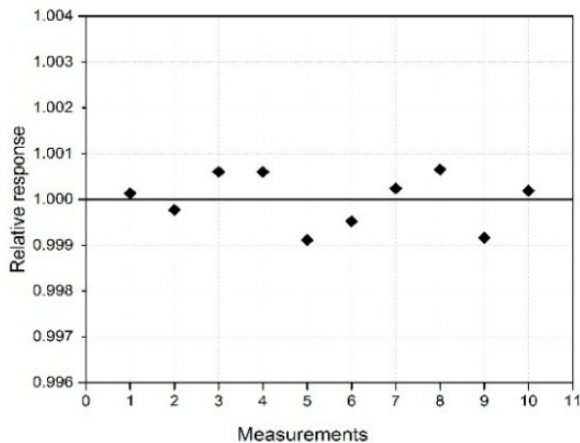
برای مشخص کردن بهترین محدوده ولتاژ کاری، منحنی اشباع اتاقک یونش رسم شده است. برای انجام این آزمایش، اتاقک را در فاصله ثابت تحت تابش دستگاه پرتودرمانی ^{60}Co picker v9 قرار داده و مقادیر جریان تصحیح شده حاصل از یونیزاسیون در ولتاژهای اعمالی مختلف از 400 V تا 40 V محاسبه می شود (در هر مرحله 50 ولت به ولتاژ اعمالی افزوده می شود). گفتنی است که جریان تصحیح شده حاصل از یون سازی مطابق استاندارد، از رابطه زیر محاسبه می شود [۵]:

$$I_{ionization} = K_{TP} \cdot I_{chamber} \quad (1)$$

$$K_{TP} = \frac{273.16 + T(^{\circ}\text{C})}{293.16} \times \frac{1013.25}{P(\text{mb})} \quad (2)$$

در رابطه فوق، T و P به ترتیب، دما و فشار محیط اطراف اتاقک یونش و $I_{chamber}$ جریان حاصل از یونش خوانده شده توسط الکترومتر، بدون تأثیر فاکتور تصحیح مربوط به عوامل محیطی است. مطابق شکل (۲) اتاقک در تمامی ولتاژهای اعمالی، پاسخ تقریباً یکسانی دارد. بهترین ولتاژ انتخاب شده برای انجام آزمایش ها 250 ولت است. با توجه به شکل (۲)،

کل بارهای اندازه‌گیری شده برای آشکارساز، نباید از $\pm 0.3\%$ بیشتر باشد [۶]. بیشینه انحراف معیار از میانگین کل بارهای اندازه‌گیری شده در این آشکارساز، مطابق شکل (۳) کمتر از 0.83% بوده است.



شکل ۳: نتیجه آزمایش پایداری اتاقک یونش ساخته شده

۴.۴. آزمایش خطی بودن پاسخ بر حسب نرخ کرمای هوا

در این آزمایش، پس از صفر نمودن جریان ناشی، تحت تابش دستگاه پرتودرمانی در فواصل مختلف آشکارساز از چشمه، جریان تصحیح شده حاصل از یونش، مطابق رابطه (۱) محاسبه شده و مطابق با آن، نمودار نرخ کرمای موثر هوا بر اساس جریان حاصل از یون سازی رسم می‌شود. مطابق شکل (۴) مقدار جریان حاصل از یونش بر حسب تابعی از کرمای هوا ناشی از دستگاه پرتودهی کبالت Theratron 780c در فواصل مختلف دهانه کولیماتور تا سطح آشکارساز، یعنی از فاصله $SSD = 100 \text{ cm}$ تا فاصله $SSD = 65 \text{ cm}$ به صورت خطی با ضریب همبستگی $1/000$ به دست آمده است. مقدار فاکتور کالیبراسیون یک آشکارساز مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۵]:

$$N_k = \frac{K_{new,air,60Co}}{I_{read}(nA) \cdot K_{TP}} \text{ (Gy/C)} \quad (5)$$

در این اتاقک یونش ساخته شده، مقدار فاکتور کالیبراسیون برابر با $0.17 \text{ mGy/nC} \pm 0.23\%$ به دست آمده است.

مثال، $V_1 = 400 \text{ V}$ (یا -400 V) و $V_2 = 200 \text{ V}$ (یا -200 V) فرض شده است (یا هر زوج ولتاژی که نسبت V_1/V_2 برابر ۲ باشد). مطابق استاندارد، بازده جمع‌آوری یون باید از 99% بیشتر باشد [۶]. در آشکارساز ساخته شده، این مقدار در بدترین حالت، مطابق با نتایج به دست آمده از مقادیر بار جمع‌آوری شده در ولتاژهای کاری مختلف اعمالی به اتاقک یونش، $99/91\%$ به دست آمد. در نتیجه، مقدار فاکتور باز ترکیب یونی که در واقع، عکس بازده جمع‌آوری یون است، برای ولتاژ کاری ± 50 ولت، برابر با $1/0008$ به دست می‌آید.

۲.۴. جریان ناشی

مطابق استاندارد، در صورتی که مقدار جریان ناشی پس از قطع پرتو دهی در مدت زمان کوتاهی، به کمتر از 1% جریان اصلی برسد، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد [۶]. در آشکارساز حاضر، با ولتاژ کاری 400 ولت در حالت بی‌باری، جریان ناشی در حدود $4/9 \times 10^{-17}$ آمپر است. در صورتی که به مدت طولانی تحت تابش دستگاه ^{60}Co picker v9 قرار گیرد، پس از قطع تابش در مدت زمان چند ثانیه، جریان به حدود 0.473% از جریان حاصل از یونش خواهد رسید. در چند بار انجام این آزمایش، همین نتیجه حاصل می‌شود که دلیلی بر ناچیز بودن جریان ناشی این آشکارساز است.

در روشی دیگر، برای محاسبه جریان ناشی، چشمه پرتوزای ^{90}Sr را روی پنجره ورودی اتاقک قرار داده و پس از جمع‌آوری بار به اندازه 1 nC توسط اتاقک یونش بلافاصله چشمه را برداشته و مشاهده می‌شود که در مدت زمان حدود ۲ ثانیه جریان ناشی به کمتر از 0.473% جریان حاصل از یونیزاسیون کاهش می‌یابد.

۳.۴. آزمایش پایداری

در این آزمایش، ۱۰ مرتبه اتاقک را تحت تابش دستگاه پرتودرمانی ^{60}Co picker v9 قرار داده و پس از رسیدن به حالت پایدار در فواصل زمانی ۱۰ ثانیه‌ای، مقدار بار جمع شده حاصل از یونش را اندازه‌گیری کرده و پس از قطع پرتو دهی و سپری شدن زمان چند دقیقه‌ای، مراحل فوق مجدداً تکرار شد. مطابق استاندارد تعیین شده، ماکزیمم تغییرات از مقدار میانگین

۶.۴. درصد انرژی تحویل داده شده به حجم‌های حساس

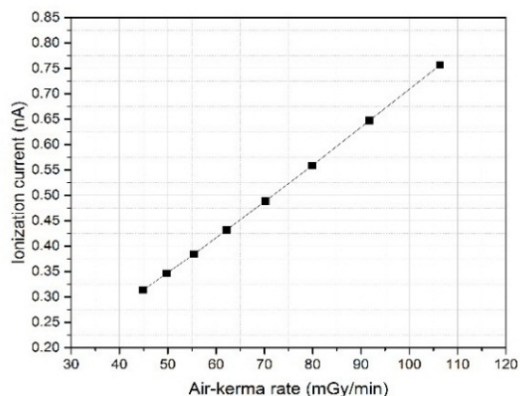
بررسی انرژی برجای گذاشته در حجم‌های هوایی آشکارساز و همچنین، تأثیر پنجره‌های ورودی و خروجی و به‌ویژه الکتروود مرکزی بر روی مسیر باریکه پرتوی X تایید شده به آن، توسط کد شبیه‌ساز FLUKA مشخص می‌کند که این مقدار در دو حجم اول و دوم، تقریباً یکسان است (نسبت $\frac{49}{2}$ درصد در حجم حساس اول به $\frac{50}{8}$ درصد در حجم حساس دوم).

دلیل عمده آن استفاده از مواد به‌کاررفته مناسب در تولید الکتروود جمع‌کننده است. همچنین، به دلیل عدم استفاده از اتصالات مسی یا هر نوع فلز دیگر، تولید الکترون‌های ثانویه در کمترین حد خود قرار داشته که به کاهش خطا، پاسخ سریع و تضعیف بسیار ناچیز روی پرتوهای عبوری از اتاقک یونش، نسبت به سایر اتاقک‌های یونش رایج ساخته شده منجر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از اتاقک‌های یونش به دلیل سادگی طراحی، اقتصادی بودن و پاسخ مناسب، یکی از کاربردی‌ترین تجهیزات در مانیترینگ و دزیمتری پرتوهای یون‌ساز در گستره تشخیصی و درمانی به‌شمار می‌رود. انتخاب مناسب جنس الکتروود جمع‌کننده و تعبیه الکتروود محافظ از جنس ورقه‌های گرافیت با ضخامت بسیار پایین و چگالی مناسب، برخلاف روش‌های رایج ساخت آشکارسازهای اتاقک یونش، شرایطی فراهم می‌آورد که کمترین تضعیف روی باریکه عبوری از حجم‌های حساس این اتاقک یونش ایجاد شود. همچنین، به دلیل عدم استفاده از اتصالات مسی در الکتروود جمع‌کننده، میزان تولید الکترون‌های ثانویه به حداقل رسیده و مطابق نتایج حاصل از انرژی به‌جا گذاشته پرتوهای یون‌ساز در حجم‌های حساس اتاقک یونش توسط کد شبیه‌ساز FLUKA مشخص می‌شود که اتصالات و جنس الکتروودها تأثیر بسیار ناچیزی روی پاسخ و عملکرد این اتاقک یونش با صفحات موازی می‌گذارد.

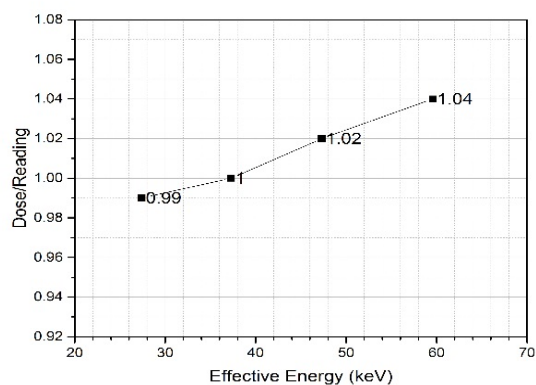
نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف که به‌طور مفصل به آن‌ها اشاره شد، مشخص می‌کند که این آشکارساز می‌تواند به‌عنوان یک اتاقک یونش مرجع و استاندارد در مراکز آزمایشگاهی، برای مانیترینگ و دزیمتری پرتوهای یون‌ساز قرار گیرد.



شکل ۴: نتیجه آزمایش خطی بودن پاسخ بر حسب نرخ کرما

۵.۴. آزمایش وابستگی انرژی

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک آشکارساز، تعیین بهترین محدوده تشخیصی پرتوهای تایید شده به آن است [۷]. برای انجام این آزمایش از سری‌های استاندارد پرتوی X که توسط دستگاه Siemens Stabilipan موجود در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه، مطابق استاندارد پیشنهادی تولید شده است، استفاده می‌شود [۵]. همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، اختلاف بسیار ناچیزی در مقدار بار اندازه‌گیری شده در انرژی‌های مختلف پرتوی X در محدوده انرژی تشخیصی دیده می‌شود که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در واقع، این نمودار مشخص می‌کند که آشکارساز ساخته شده دارای پاسخ پایداری در محدوده انرژی تشخیصی پرتوهای X بوده و همچنین، بیانگر این موضوع است که آشکارساز ساخته شده می‌تواند به‌عنوان یک دزیمتر مرجع، جهت اندازه‌گیری میزان دز پرتوهای X تشخیصی در آزمایشگاه‌های دزیمتری و همچنین، دستگاه‌های تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۵: نتیجه حاصل از آزمایش وابستگی انرژی، نرمالیزه شده به انرژی ۳۷/۳ keV پرتوهای X

۶. تشکر و قدردانی

صورت گرفته است، از همه کارکنان بخش آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه آن گروه صمیمانه تشکر می‌شود.

با توجه به اینکه تمامی مراحل این پروژه، از مرحله طراحی و ساخت تا انجام تمامی آزمایش‌های کنترل کیفیت در گروه آشکارسازی و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها- کرج

۷. مراجع

- [1] Khan, F.M., Physics of Radiation Therapy, University of Minnesota Medical School, Minnesota, 2003.
- [2] Tsoulfanidis, N., Landsberger, S., Measurement and detection of radiation. CRC press, 2010.
- [3] Perini, A.P., Neves, L.P., Caldas, L.V.E., Investigation of the applicability of a special parallel-plate ionization chamber for x-ray beam dosimetry, Radiation Physics and Chemistry, Vol 95, pp. 94–97, 2014.
- [4] Perini, A.P., Neves, L.P., Fernandez, J.M., Khoury, H.J., Caldas, L.V.E., A new parallel plate graphite ionization chamber as a ^{60}Co gamma radiation reference instrument, Radiation Physics and Chemistry, Vol 95, pp. 106–108, 2014.
- [5] International Atomic Energy Agency, Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice, Technical reports series no. 457, Vienna, 2007.
- [6] International Electrotechnical Commission, Medical electrical equipment dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy, Standard IEC 60731, Geneva, 2011.
- [7] Costa, A.M., Caldas, L. V. E., Response characteristics of a tandem ionization chamber in standard X-ray beams, Applied Radiation and Isotopes, Vol 58, pp. 495 -500, 2003.