



تفکیک و شناسایی مواد موجود در کانتینرها با استفاده از دستگاه های پایش اشعه X با انرژی های بالا و دوگانه^۱

عباسی فشمی، سجاد*^(۱) - محمدزاده، محمد^(۲)

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه راکتور

چکیده:

با اینکه دستگاه های پایش اشعه X با انرژی های بالا و دوگانه توانسته است کیفیت تصاویر داخل کانتینرهای بزرگ را به حد مطلوبی افزایش دهد، اما جداسازی و تفکیک مواد برای آن ها تاکنون انجام نشده است زیرا با توجه به بالا بودن انرژی پرتوهای X، ضریب تضعیف در این محدوده وابستگی پیچیده ای نسبت به عدد اتمی و ضخامت ماده پیدا می کند. هدف از این مقاله ارائه تابع تبدیلی برای تشخیص مواد، مستقل از ضخامت آن ها در سیستم های تشخیصی پرتو X با انرژی بالا است. نتایج این روش نشان می دهد که پاسخ سیستم، تابعی خطی وابسته به عدد اتمی و چگالی ماده می باشد.

کلمات کلیدی: Dual high-energy X-ray imaging, Non-destructive test

مقدمه:

امروزه تصویربرداری با استفاده از پرتوهای X با انرژی دوگانه، به دلیل اطلاعات بیشتری که از چگالی و عدد اتمی ماده در اختیار می گذارد، به طور وسیعی در پزشکی، صنایع و حتی سیستم های امنیتی استفاده می گردد [۱]، [۲]. برای مثال از این سیستم ها برای تصویربرداری از بافت های نرم و میزان تراکم استخوان در بدن انسان استفاده می کنند [۳] - [۶]. از دیگر کاربردهای این سیستم ها استفاده از آن ها جهت تفکیک و شناسایی مواد داخل کیف و ساک های مسافرتی و یا وسایل نقلیه می باشد [۷] - [۱۰]. عموماً ولتاژ تیوب های اشعه X با پرتوهای دوگانه در این سیستم ها بین ۸۰ تا ۶۰۰ کیلو الکترون ولت می باشد یا به عبارتی دیگر حداکثر انرژی طیف اشعه X در این سیستم ها ۶۰۰ کیلو الکترون ولت است. در این محدوده انرژی، به دلیل غالب بودن برهمکنش های فوتوالکتریک و کامپتون، طیف اشعه X از نظر نوع برهمکنش به خوبی قابل جداسازی می باشد؛ به عبارت دیگر با تقریب خوبی می توان برهمکنش غالب در طیف کم انرژی را برهمکنش فوتوالکتریک و برهمکنش غالب در طیف پرانرژی را برهمکنش کامپتون دانست. در نتیجه در این حالت تفکیک و شناسایی مواد مختلف براساس عدد اتمی آنها از پیچیدگی کمتری برخوردار است [۱۱].

این درحالی است که در تصویربرداری از کانتینرهای بزرگ، استفاده از پرتوهای X با انرژی های بالا جهت نفوذ در دیواره های فولادی چگال کانتینر و مواد داخل آن امری اجتناب ناپذیر است. حال آنکه در انرژی

^۱ Dual High-Energy X-ray imaging



های بالا دیگر برهمکنش‌های فوتوالکتریک و کامپتون غالب نبوده و احتمال وقوع برهمکنش تولید زوج نیز افزایش می‌یابد. به همین علت ضریب تضعیف در این محدوده انرژی، رابطه پیچیده تری با چگالی، عدد اتمی و ضخامت ماده پیدا می‌کند که این موجب پیچیده‌تر شدن تفکیک و شناسایی مواد می‌گردد [۹]. لذا در تصویربرداری از کانتینرهای بزرگ، استفاده از پرتوهای پرانرژی در حد چند مگاالکترون ولت و در نتیجه تغییر نوع برهمکنش پرتوها، باعث کاهش قدرت تفکیک و شناسایی نوع مواد داخل کانتینرها می‌شود. هدف اصلی از این مقاله ارائه روشی جدید برای تفکیک و شناسایی مواد در سیستم‌های تشخیصی پرتو X با انرژی بالاست. بدین منظور در این مقاله با استفاده از شدت پرتوهای خارج شده در دو انرژی متفاوت از یک ماده معین، به معرفی تابع تبدیلی برای تشخیص مواد، مستقل از ضخامت آن‌ها پرداخته می‌شود.

روش کار :

برای چشمه مولد اشعه X با طیف انرژی $S(E)$ پاسخ آشکارسازی با حساسیت $D(E)$ با رابطه:

$$I_0(E) = S(E) D(E) \quad (\text{رابطه ۱})$$

بیان می‌شود [۱۲]. حال اگر جسمی به ضخامت $t(cm)$ و با ضریب تضعیف $\mu(cm^{-1})$ بین چشمه و آشکارساز قرار گیرد، آنگاه پاسخ آشکارساز با رابطه:

$$I(E) = S(E) D(E) e^{-\mu(\rho.E.Z) \cdot t - \varepsilon(E)} \quad (\text{رابطه ۲})$$

قابل محاسبه است [۱۲]. در این رابطه، $\varepsilon(E)$ بیانگر تضعیف پرتو X قبل از رسیدن به هدف و پس از آن تا رسیدن به آشکارساز است. لازم به ذکر است که $\varepsilon(E)$ در آزمایش‌های متفاوت مقداری ثابت دارد و فقط با تغییر انرژی پرتوی ورودی تغییر می‌کند. رابطه ۲ نشان می‌دهد که ضریب تضعیف ماده، به چگالی، عدد اتمی موثر و انرژی‌های پرتو وودی وابسته است.

حال با تقسیم بیان می‌شود [۱۲]. حال اگر جسمی به ضخامت $t(cm)$ و با ضریب تضعیف $\mu(cm^{-1})$ بین چشمه و آشکارساز قرار گیرد، آنگاه پاسخ آشکارساز با رابطه:

(رابطه ۲ بر برای چشمه مولد اشعه X با طیف انرژی $S(E)$ پاسخ آشکارسازی با حساسیت $D(E)$ با

رابطه:، نسبت شدت فوتون‌های منتقل شده به فوتون‌های اولیه برای هریک از چشمه‌های کم‌انرژی و پرانرژی برابر خواهد شد با:

$$R_{LE}(E) = \left[e^{-\mu(\rho.E.Z) \cdot t - \varepsilon(E)} \right]_{LE} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$R_{HE}(E) = \left[e^{-\mu(\rho.E.Z) \cdot t - \varepsilon(E)} \right]_{HE} \quad (\text{رابطه ۴})$$

به منظور خطی سازی عبارات نمایی در روابط ۳ و ۴، با لگاریتم گیری از این روابط خواهیم داشت:



$$PR_{LE}(E) = \ln[e^{-\mu(\rho, E, Z) \cdot t - \varepsilon(E)}]_{LE} = -[\mu(\rho, E, Z) \cdot t + \varepsilon(E)]_{LE} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$PR_{HE}(E) = \ln[e^{-\mu(\rho, E, Z) \cdot t - \varepsilon(E)}]_{HE} = -[\mu(\rho, E, Z) \cdot t + \varepsilon(E)]_{HE} \quad (\text{رابطه ۶})$$

با انتگرال گیری از روابط ۵ و ۶ حول طیف های کم انرژی و پر انرژی X می توان این روابط را مستقل از انرژی بدست آورد:

$$LEPS = -\left[\int_0^{E_{max}} PR_{LE}(E) dE\right]_{LE} = -\mu_{LE}(\rho, Z) \cdot t - \varepsilon_{LE} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$HEPS = -\left[\int_0^{E_{max}} PR_{HE}(E) dE\right]_{HE} = -\mu_{HE}(\rho, Z) \cdot t - \varepsilon_{HE} \quad (\text{رابطه ۸})$$

همانطور که در روابط ۷ و ۸ مشاهده می گردد $LEPS$ و $HEPS$ فقط به ضخامت ماده و ضریب تضعیف آن وابسته اند. بنابراین با محاسبه ضخامت t از رابطه ۷ ($t = -\frac{LEPS + \varepsilon_{LE}}{\mu_{LE}(\rho, Z)}$) و جایگذاری آن در رابطه ۸ به تابع تبدیلی خطی و مستقل از ضخامت برای ماده مورد نظر خواهیم رسید:

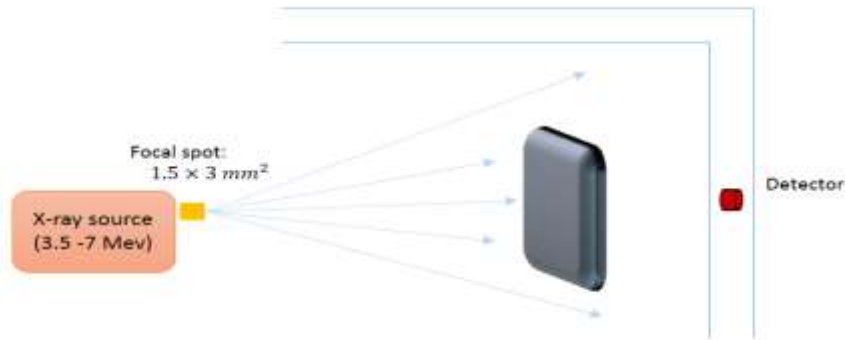
$$(HEPS) = \frac{\mu_{HE}(\rho, Z)}{\mu_{LE}(\rho, Z)} (LEPS) + f(\rho, Z) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن:

$$f(\rho, Z) = \frac{\mu_{HE}(\rho, Z)}{\mu_{LE}(\rho, Z)} \cdot \varepsilon_{LE} - \varepsilon_{HE} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

این رابطه بیانگر این نکته است که براساس تابع تبدیل فوق، رابطه بین پاسخ آشکارسازهای کم انرژی و پر انرژی ($LEPS$ و $HEPS$) رابطه ای خطی و تنها وابسته به نوع ماده است. در نتیجه با تبدیل پاسخ این آشکارسازها به $LEPS$ و $HEPS$ و بررسی رابطه خطی بین آن دو، نوع ماده مورد نظر با استفاده از دو کمیت $f(\rho, Z)$ و $\frac{\mu_{HE}(\rho, Z)}{\mu_{LE}(\rho, Z)}$ قابل شناسایی است.

بدین منظور و برای شناسایی مقادیر $f(\rho, Z)$ و $\frac{\mu_{HE}(\rho, Z)}{\mu_{LE}(\rho, Z)}$ برای هر ماده، دستگاه پایش پرتو X با انرژی های بالا و دوگانه، با استفاده از کد MCNP شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی نوع و چیدمان تجهیزات مختلف مطابق با چیدمان استفاده شده در پروژه BAM در مقاله [۹] در نظر گرفته شده است (شکل شماره ۱).



شکل شماره ۱: چیدمان شبیه‌سازی شده برای دستگاه پایش پرتو X با انرژی بالا و دوگانه

در این چیدمان مولد پرتو X، یک نوع بتاترون پالسی با هدفی از جنس تانتالیوم به ضخامت ۰,۶ میلی‌متر می‌باشد. به منظور حذف بخش کم انرژی طیف برمشترلانگ، از پیش فیلتری مسی به ضخامت‌های ۴ و ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است که به ترتیب در چشمه‌های کم‌انرژی و پرانرژی به کار می‌روند. لازم به ذکر است که آشکارساز شبیه‌سازی شده یک آشکارساز سوسوزن از جنس Gd2O2S با اندازه‌ای ۲۰۰ میکرومتر در ۲۰۰ میکرومتر است که پرتوهای یونیزان را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.

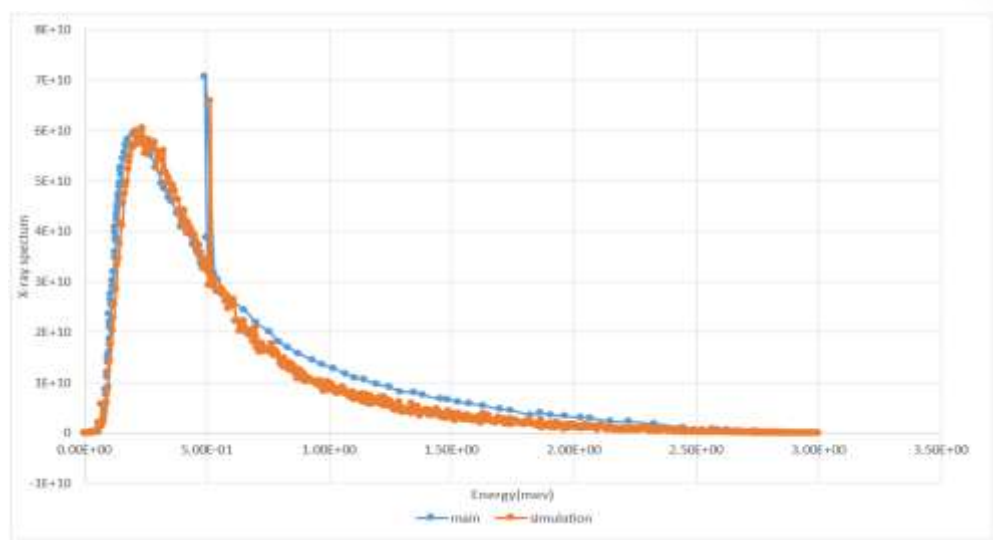
نتایج:

با شبیه‌سازی این دستگاه در MCNP، طیف کم‌انرژی و پرانرژی حاصل از شبیه‌سازی بتاترون در شکل شماره ۲ و ۳ رسم شده است. به منظور اعتبارسنجی صحت این شبیه‌سازی هریک از طیف‌های بدست آمده با مقادیر متناظر آن در آزمایش موسسه BAM مقایسه شده اند [۱۳]. در این شکل ماکزیمم خطای نسبی طیف محاسبه شده از طیف اصلی ۱۸ درصد است که در انرژی‌های بالاتر اتفاق می‌افتد؛ دلیل این امر کاهش تعداد پرتوها در این انرژی هاست که به دلیل کاهش نمونه‌های آماری باعث به وجود آمدن خطای محاسباتی می‌گردد.

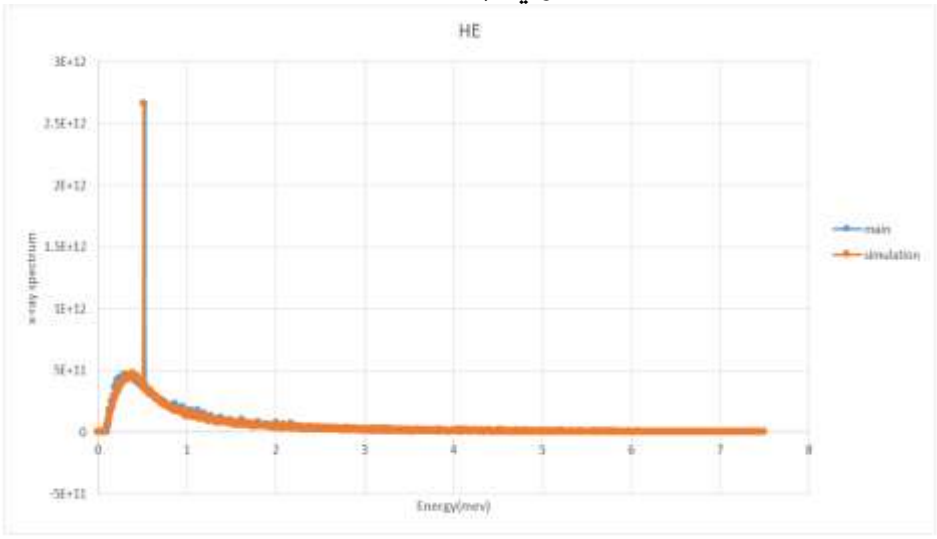
همچنین، حساسیت آشکارساز (که به صورت حاصل ضرب احتمال برهمکنش فوتون در متوسط انرژی منتقل شده در هر برهمکنش تعریف می‌شود [۱۳]) نیز با استفاده از کد MCNP محاسبه شده و در شکل شماره ۴ با مقدار متناظر در پروژه BAM اعتبارسنجی شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد نتایج شبیه‌سازی به خوبی با نتایج عملی تطابق دارد؛ بنابراین این چیدمان می‌تواند جهت محاسبه مقادیر

$$\mu_{HE}(\rho, Z)$$

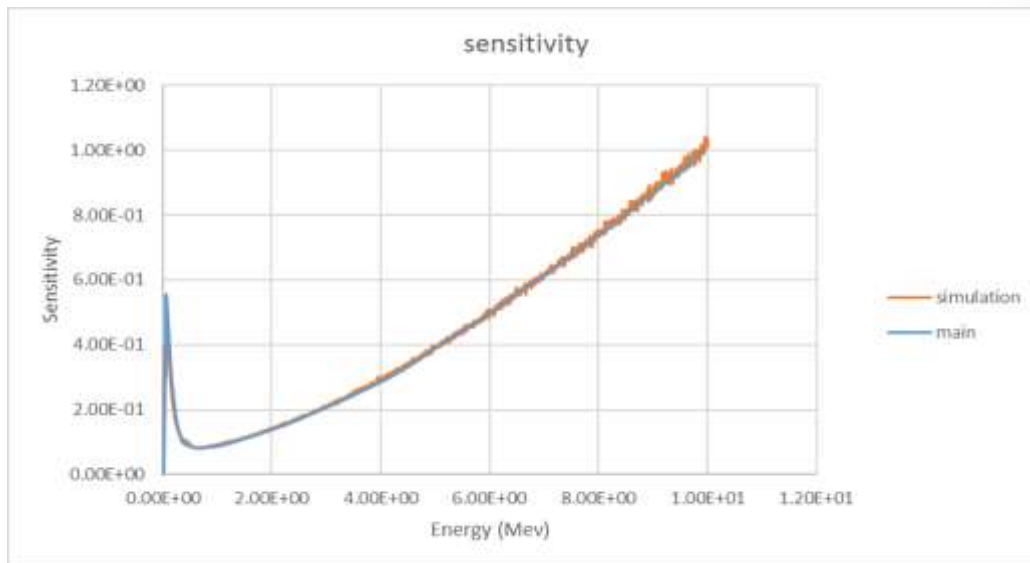
و $\mu_{LE}(\rho, Z)$ به ازای مواد مختلف به کار گرفته شود.



شکل شماره ۲: طیف پرتوی X برای چشمه کم انرژی. رنگ آبی نتایج حاصل از موسسه BAM و رنگ نارنجی حاصل از شبیه سازی با MCNP

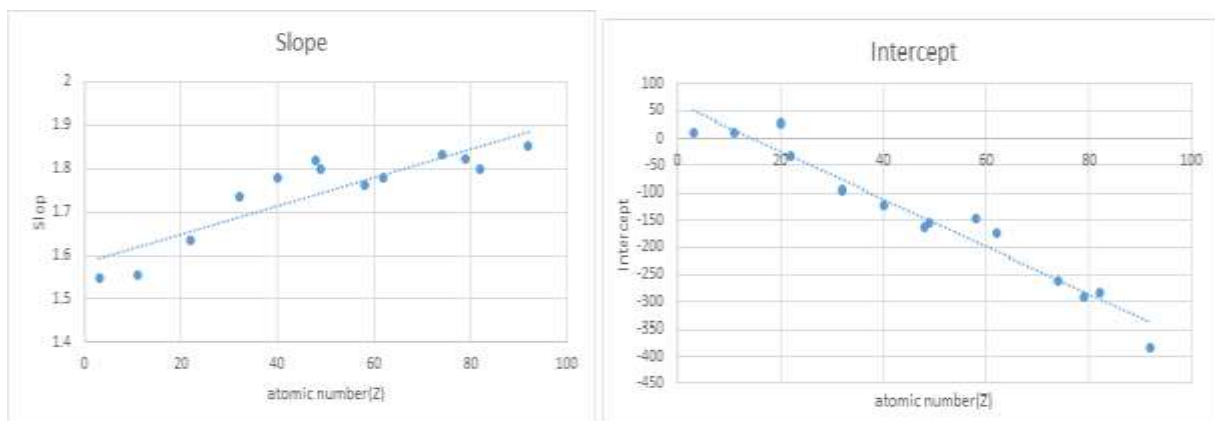


شکل شماره ۳: طیف پرتوی X برای چشمه پر انرژی. رنگ آبی نتایج حاصل از موسسه BAM و رنگ نارنجی حاصل از شبیه سازی با MCNP



شکل شماره ۴: حساسیت آشکارساز. رنگ آبی نتایج حاصل از موسسه BAM و رنگ نارنجی حاصل از شبیه سازی با MCNP

جهت محاسبه مقادیر $f(\rho, Z)$ و $\mu_{LE}(\rho, Z)$ مواد مختلف با ضخامت های متفاوت در مقابل مولد پرتوهای X قرار گرفته و با تبدیل پاسخ آشکارسازهای کم انرژی و پر انرژی به LEPS و HEPS و محاسبه رابطی خطی بین آنها، مقادیر $f(\rho, Z)$ و $\mu_{LE}(\rho, Z)$ را برای هر ماده می توان بدست آورد. این نتایج در شکل شماره ۵ رسم شده است. لازم به ذکر است که منظور از Slope همان $\mu_{LE}(\rho, Z)$ و منظور از Intercept همان $f(\rho, Z)$ است.



شکل شماره ۵: شکل سمت چپ: تغییرات Slope به ازای عدد اتمی متفاوت. شکل سمت راست: تغییرات Intercept به ازای تغییرات عدد اتمی

بحث و نتیجه گیری :



در این مقاله روشی برای تفکیک و شناسایی مواد مختلف با استفاده از دستگاه پایش پرتو X با انرژی بالا و دوگانه ارائه شد. بدین منظور دستگاه مذکور با استفاده از کد MCNP شبیه‌سازی گردید که نتایج آن نیز با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی مقایسه گشت. در ادامه باتوجه به سازگاری خوبی که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با آزمایشات تجربی داشت مقادیر $f(\rho, Z)$ و $\mu_{LE}(\rho, Z)$ برای هر ماده بدست آمد که همانطور که در متن بدان اشاره شد این مقادیر فقط وابسته به عدد اتمی و چگالی ماده مورد نظر هستند. لذا با تبدیل پاسخ آشکارسازهای کم‌انرژی و پرانرژی به LEPS و HEPS و در نهایت بررسی رابطه خطی بین آن‌ها، نوع ماده را مستقل از ضخامت آن می‌توان شناسایی نمود.

مراجع :

- [1] L. Li, R. Li, S. Zhang, T. Zhao, and Z. Chen, "A dynamic material discrimination algorithm for dual MV energy X-ray digital radiography," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 114, pp. 188–195, 2016.
- [2] K. H. Kim, S. M. Myoung, and Y. H. Chung, "Design of parallel dual-energy X-ray beam and its performance for security radiography," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Equip.*, vol. 652, no. 1, pp. 66–68, 2011.
- [3] E. Neelis *et al.*, "Bone health of children with intestinal failure measured by dual energy X-ray absorptiometry and digital X-ray radiogrammetry," *Clin. Nutr.*, 2017.
- [4] A. M. Parker, L. Yang, M. Farzi, J. M. Pozo, A. F. Frangi, and J. M. Wilkinson, "Quantifying Pelvic Periprosthetic Bone Remodeling Using Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Region-Free Analysis," *J. Clin. Densitom.*, no. 7, pp. 1–6, 2017.
- [5] S. Ayyappan, B. Niveditha, and G. J. Breur, "Determination of baseline bone mineral density using dual energy X-ray absorptiometry in Suffolk-Dorset hybrid ewes," *Int. J. Vet. Sci. Med.*, vol. 5, no. 1, pp. 41–46, 2017.
- [6] H. Wasserman, J. M. O'Donnell, and C. M. Gordon, "Use of dual energy X-ray absorptiometry in pediatric patients," *Bone*, 2016.
- [7] A. Mazoochi, F. Rahmani, F. Abbasi Davani, and R. Ghaderi, "A novel numerical method to eliminate thickness effect in dual energy X-ray imaging used in baggage inspection," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Equip.*, vol. 763, pp. 538–542, 2014.
- [8] Y. Melnikov, P. Avtonomov, V. Kornienko, and Y. Olshansky, "Detection of Dangerous Materials and Illicit Objects in Cargoes and Baggage: Current Tools, Existing Problems and Possible Solutions," *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.*, vol. 8, no. 1, 2011.
- [9] S. Kolkoori, N. Wrobel, S. Hohendorf, and U. Ewert, "High energy X-ray imaging technology for the detection of dangerous materials in air freight containers," *2015 IEEE Int. Symp. Technol. Homel. Secur. HST 2015*, no. 13, 2015.
- [10] A. Y. Saverskiy, D.-C. Dinca, and J. M. Rommel, "Cargo and Container X-Ray Inspection with Intra-Pulse Multi-Energy Method for Material Discrimination," *Phys. Procedia*, vol. 66, pp. 232–241, 2015.
- [11] V. Rebuffel and J. Dinten, "Dual-Energy X-Ray Imaging : Benefits and Limits," pp. 1–12, 2006.
- [12] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, vol. 3. 2000.
- [13] S. Kolkoori, N. Wrobel, A. Deresch, B. Redmer, and U. Ewert, "in Cargo Containers," no. Ecnadt, 2014.



بیست و چهارمین کنفرانس هسته ای ایران



P: ۱۲۲۸

۳۰ و ۳۱ اسفندماه - دانشگاه اصفهان