

طراحی حفاظ و دزیمتری سامانه بازرسی کامیون مدل ثابت و سیار با منبع تابش شتاب دهنده خطی الکترون

سیدمرتضی اسمعیلی* و روح‌الله قادری

گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۴۳۹۳-۸۷۳۸۱

پست الکترونیکی: seyedmortezaesmaeili91@gmail.com

چکیده

در این پژوهش دز نشت کرده از سوله بازرسی کامیون، دز جذب شده توسط راننده کامیون و اپراتور و ضخامت بتن مورد نیاز برای دیواره‌های سوله بازرسی به وسیله کد MCNPX2.6 محاسبه شده است. قسمت تولید کننده تابش ایکس سامانه بازرسی کامیون شبیه‌سازی شده، شتاب دهنده LinatronMi6 می‌باشد و فقط قسمت انتهایی این شتاب‌دهنده (باریکه الکترونی برخورد کننده به آند، آند، فیلترها و موازی‌سازهای در مسیر فوتون تولید شده) شبیه‌سازی شده است. ابتدا جریان باریکه الکترونی بهینه با انرژی ۶ MeV در LinatronMi6 به گونه‌ای محاسبه شده است که آهنگ دز در فاصله ۱ m از شتاب‌دهنده، $\frac{8 \text{ Gy}}{\text{min}}$ باشد، سپس آهنگ دز جذب شده توسط راننده کامیون در سرعت‌های $\frac{m}{s}$ ۰/۲، $\frac{m}{s}$ ۱، $\frac{m}{s}$ ۲، $\frac{m}{s}$ ۳، $\frac{m}{s}$ ۴ محاسبه شده است همچنین برای محموله کامیون سه جنس هوا، آب و آهن در نظر گرفته شده است و در هر سه حالت مقدار دز جذب شده توسط راننده محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند هر چقدر سرعت کامیون کم‌تر باشد و محموله عدد اتمی و چگالی بالاتری داشته باشد، دز جذب شده توسط راننده بیش‌تر می‌شود. هنگامی که سرعت کامیون $\frac{m}{s}$ ۰/۲ است و جنس محموله از آهن است (بدترین حالت)، ۳ mm استیل و ۱۰/۵ mm سرب برای حفاظ‌گذاری اتاق اپراتور کافی می‌باشد. در انتهای این تحقیق ضخامت بتن مورد نیاز برای دیواره‌های سوله بازرسی محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند ۵۲ cm بتن در قسمت دروازه بازرسی و ۴۰ cm در بقیه قسمت‌ها کافی است تا مقدار دز نشت کرده از دیواره سوله کمتر از $\frac{0.05 \mu\text{Sv}}{h}$ باشد.

کلیدواژه‌گان: سامانه بازرسی کانتینری، دز جذب شده توسط راننده کامیون، دزیمتری سامانه بازرسی کامیون، شبیه‌سازی MCNPX2.6

۱. مقدمه

سامانه بازرسی کامیون دریافتن کالاهای غیرقانونی مانند اسلحه، مواد منفجره، مواد مخدر، مواد شکافت‌پذیر، کالاهای قاچاق و حتی قاچاق انسان و... کاربرد دارد، این سامانه‌ها به وسیله تابش ایکس یا گاما از کامیون تصویربرداری انجام می‌-

می‌شود و هم نقش موازی‌ساز اولیه را ایفاء می‌کند. فوتون عبوری از فلز سرب با یک سطح دایره‌ای از جنس استیل به شعاع ۲ cm و ضخامت ۳ mm برهم کنش انجام می‌دهد [۱،۳].

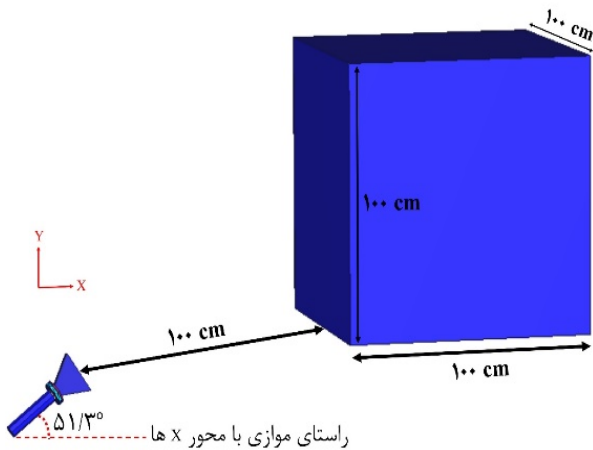
استیل با توجه به عدد اتمی ($Z \approx 26$) و چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$) می‌تواند فوتون‌های با انرژی پایین که دز بیش‌تری را در محیط برجا می‌گذارند، را جذب نماید و از این طریق دز برجا گذاشته شده در محیط اطراف توسط فوتون ایکس کم‌تر شود. فوتون ایکس بعد از برهم کنش با فلز استیل وارد موازی‌ساز می‌شود، موازی‌ساز تابش خروجی از سطح استیل را به سمت محموله مورد بازرسی هدایت می‌کند و باعث می‌شود فوتون خروجی از سطح استیل در راستای افق (راستای محور Z در شبیه‌سازی) تحت زاویه ۰/۵ درجه و در راستای عمود (راستای محور Y در شبیه‌سازی) تحت زاویه ۶۰ درجه به سمت محموله و آشکارسازها هدایت شود. این کار، پرتوهای پراکنده غیرضروری را به حداقل می‌رساند و کیفیت تصویر اسکن شده را بهبود می‌بخشد. موازی‌ساز از لایه‌های ۱ mm آهن و ۵ mm سرب تشکیل شده است که ضریب میرایی بالایی دارند [۳،۱].

برای محاسبه جریان بهینه در شتاب‌دهنده چندین شبیه‌سازی انجام شده است که در آن‌ها یک چشمه الکترونی به شکل دایره که دارای قطر ۱ mm است، به‌عنوان باریکه الکترونی در نظر گرفته شده است. این چشمه الکترون‌هایش را در راستای محور X به سمت مرکز سطح تنگستن می‌تاباند. فضای مابین چشمه الکترونی و تنگستن خلأ قرار داده شده است. در فاصله ۱ m از سطح استیل یک مکعب به ابعاد ۱۰۰ cm در نظر گرفته شده است و به‌وسیله کد MCNPX2.6 مقدار دز در این مکعب محاسبه شده است. باریکه الکترونی برخوردکننده به سطح تنگستن به صورت پیوسته نیست، بلکه این باریکه به صورت گسسته و خوشه‌ای

دهند. تصویربرداری به دو صورت امکان‌پذیر است؛ قسمت تولید کننده تابش ایکس یا گاما و آرایه‌ای از آشکارسازها ثابت باشند و کامیون از میان آن‌ها عبور کند و یا اینکه کامیون در جای خود ثابت باشد و قسمت تولید کننده تابش و آرایه‌ای از آشکارسازها (دروازه بازرسی) حرکت کرده و کامیون را بررسی نمایند. که هر دو حالت در نظر گرفته شده است. قسمت تولید کننده تابش ایکس یا گاما باید فوتونی با انرژی در محدوده ۱ MeV تا ۱۰ MeV را تولید نماید تا بتواند در محموله کامیون نفوذ نماید (نفوذش در فولاد بیش‌تر از ۲۰ سانتی‌متر باشد) و تصویری با کیفیت از محموله بوسیله آشکارسازها ثبت گردد. استفاده از این سامانه‌ها از سال ۲۰۰۷ گسترش پیدا کرده است [۲،۱].

۲. جریان بهینه در شتاب‌دهنده LinatronMi6

باریکه الکترونی بعد از رسیدن به انرژی ۶ MeV در شتاب‌دهنده LinatronMi6، به یک سطح دایره‌ای از جنس فلزی سخت مانند تنگستن برخورد می‌کند. این سطح شعاع ۱ cm و ضخامت ۲ mm را دارا می‌باشد. باریکه الکترونی برخورد کرده به این سطح، فوتون با حداکثر انرژی ۶ MeV را تولید می‌کند، زیرا الکترون‌ها باعث یونش و برانگیزش اتم‌های تشکیل دهنده تنگستن شده و در نهایت فوتون‌های تابش ترمزی ایجاد می‌شوند. بعد از سطح تنگستن یک سطح دایره‌ای از سرب به شعاع ۲ cm و ضخامت ۶ mm قرار داده شده است، از این فلز یک قسمت مکعبی به ابعاد ۱ mm (در راستای محور Z) و ۳ mm (در راستای محور Y) و به ضخامت ۶ mm (در راستای محور X) بریده شده است. این قسمت بریده شده، فوتون تولید شده از سطح تنگستن را بدون کاهش انرژی از سرب عبور می‌دهد. بنابراین سرب قرار داده شده بعد از تنگستن هم برای انتقال گرمای تولید شده در تنگستن استفاده



شکل (۳): هندسه شبیه‌سازی شده قسمت انتهایی LinatronMi6 و مکعب در فاصله ۱ m از تنگستن.

جدول ۱ آهنگ دز بر حسب $\frac{Sv}{h}$ را در هر شدت جریان باریکه الکترونی نشان می‌دهد.

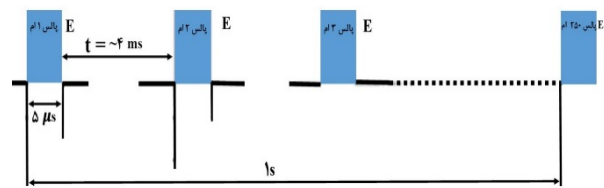
جدول (۱): آهنگ دز برجا گذاشته شده در فاصله ۱ m از شتاب-

دهنده در مکعب شکل ۳ بر حسب $\frac{Sv}{h}$ در هر شدت جریان باریکه الکترونی.

شدت جریان (mA)	آهنگ دز $\frac{Sv}{h}$
۵۰	$4/628 \times 10^4$
۱۰	$8/012 \times 10^3$
۱	$8/108 \times 10^2$
۰/۵۸	$4/788 \times 10^2$

در کد MCNPX2.6 خطای محاسبات باید زیر ۰/۰۱ باشد تا نتایج شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک شوند، بنابراین دقت اعداد مربوط به شبیه‌سازی در این پژوهش، زیر ۰/۰۱ است.

می‌باشد. در شتاب‌دهنده LinatronMi6 زمان هر خوشه، $5 \mu s$ است و هر خوشه از باریکه در هر ثانیه ۲۰۰ تا ۳۰۰ بار تکرار می‌شود، در این پژوهش برای تکرار باریکه در هر ثانیه، به طور میانگین، عدد ۲۵۰ در نظر گرفته شده است [۴]. بنابراین در هر ثانیه ۲۵۰ خوشه از باریکه با مدت زمان $5 \mu s$ ، به تنگستن برخورد می‌کند. با توجه به شکل ۱ و رابطه ۱ می‌توان فاصله زمانی بین هر خوشه از باریکه را محاسبه نمود.

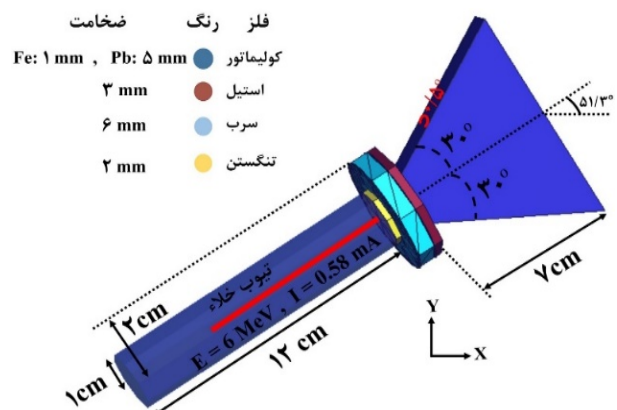


شکل (۱): طرح کلی از فاصله زمانی بین دو خوشه از باریکه

الکترونی در شتاب‌دهنده Linatron Mi6 [۴].

$$249(t + 5) = 10^6 \mu s \rightarrow t = 4.01ms \quad (1)$$

در نتیجه باریکه در مدت زمان $5 \mu s$ وجود دارد و در مدت زمان ۴ ms وجود ندارد [۵]. شکل‌های ۲ و ۳ هندسه شبیه‌سازی شده از انتهای LinatronMi6 و مکعبی که برای دزسنجی قرار داده شده است را در فضای MCNPX2.6 نشان می‌دهند.



شکل (۲): هندسه شبیه‌سازی شده از باریکه الکترونی، تیوب خلاء،

تنگستن، سرب، استیل و موازی‌ساز.

۳. دز جذب شده توسط راننده

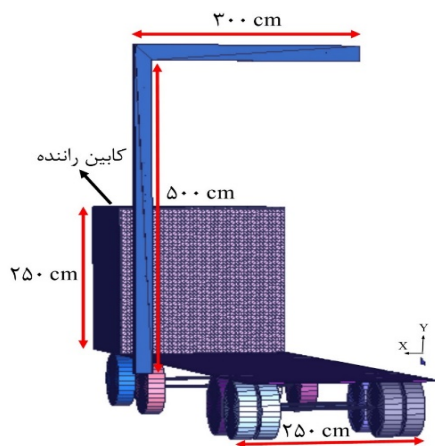
برای شبیه‌سازی راننده و اپراتور در فضای MCNPX2.6 از فانتوم MIRD استفاده شده است. شکل ۴ راننده و اپراتور شبیه‌سازی شده در فضای MCNPX2.6 را نشان می‌دهد.



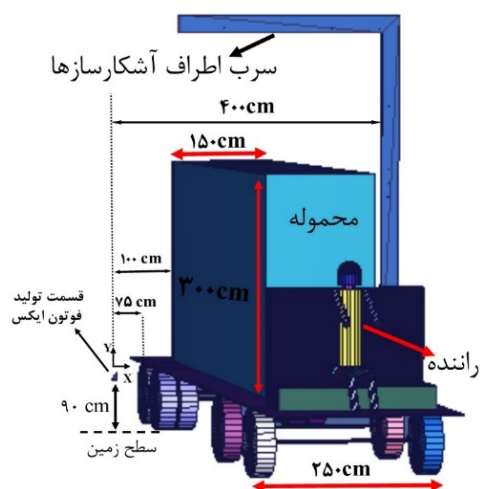
شکل (۴): راننده و اپراتور شبیه‌سازی شده در فضای

MCNPX2.6

توسط راننده، ۵ سرعت $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ ، $\frac{m}{s}$ برای کامیون در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۵ و ۶ کامیون و محموله شبیه‌سازی شده در فضای MCNPX2.6 را نشان می‌دهند.



شکل (۵): کامیون شبیه‌سازی شده در فضای MCNPX2.6



شکل (۶): کامیون شبیه‌سازی شده بدون اتاقک راننده، در فضای

MCNPX2.6

مقادیر دز جذب شده توسط راننده و نشن کرده از سوله بازرسی در مقالات، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول (۲): دز جذب شده توسط راننده و نشن کرده از سوله.

شماره مرجع	دز راننده ($\frac{\mu Sv}{Scar}$)	سرعت کامیون ($\frac{m}{s}$)	دز نشن کرده از سوله ($\frac{\mu Sv}{h}$)
۵	۰/۰۵	۵/۵	۰/۵
۶	۰/۰۲	۱/۹	۰/۵
۷	۰/۲۵	۰/۲	۰/۵
۸	۰/۰۵	۱/۳	۰/۵
۹	۰/۵	۱/۴	۰/۵

برای اینکه حرکت کامیون در کد MCNPX2.6 در نظر گرفته شود باید با توجه به سرعت کامیون چندین شبیه‌سازی انجام شود و در هر شبیه‌سازی محل کامیون نسبت به محل آن در شبیه‌سازی قبلی جابه‌جا شود. در واقع هر شبیه‌سازی برای یک ثانیه از حرکت کامیون می‌باشد و مدت زمان بازرسی به طور کامل کامیون را در هر سرعت گفته شده، محاسبه شده است

راننده و اپراتور از پرتوهای اولیه دز دریافت نمی‌کنند، دز جذب شده توسط آن‌ها ناشی از پرتوهای پراکنده شده از محموله و دیواره سوله است [۶]. برای بررسی اثر جنس محموله در مقدار دز جذب شده توسط راننده سه جنس مختلف هوا، آب و آهن برای محموله در نظر گرفته شده است و برای بررسی سرعت حرکت کامیون در مقدار دز جذب شده

جدول (۳): تعداد خوشه برخورد کرده به تنگستن و تعداد شبیه

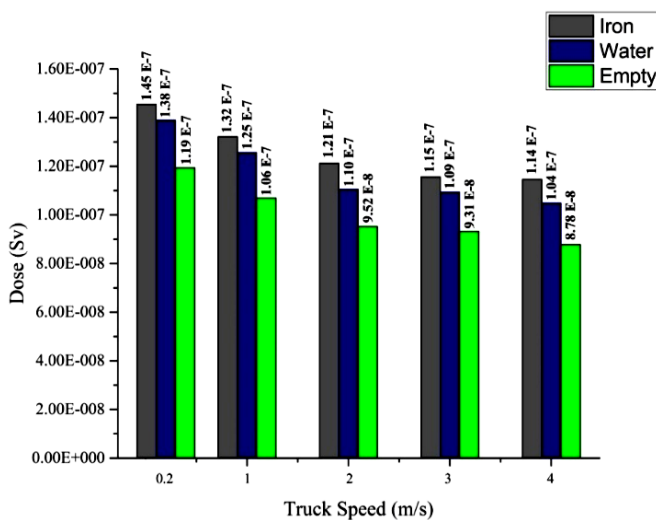
سازی‌ها در هر سرعت کامیون

تعداد شبیه سازی‌ها	تعداد خوشه	سرعت کامیون $\frac{m}{s}$
۳۰	۷۴۹۰	۰/۲
۶	۱۴۹۸	۱
۳	۷۴۹	۲
۲	۴۹۹	۳
≈ ۲	۴۹۹	۴

شکل ۷ تفاوت بین دز جذب شده توسط راننده در سرعت‌های

$\frac{m}{s}$ ۰/۲، ۱، ۲، ۳ و ۴ و جنس مختلف محموله را

نشان می‌دهد.



شکل (۷): دز جذب شده توسط راننده در سرعت‌های مختلف و

جنس مختلف محموله.

۴. ضخامت بتن مورد نیاز برای دیواره سوله

بازرسی و حفاظ‌گذاری اتاق کنترل

همان‌طور که گفته شد برای بازرسی کامیون دو راه وجود دارد:

(۱) کامیون حرکت کند و دروازه بازرسی ثابت باشد.

(۲) دروازه بازرسی حرکت کند و کامیون ثابت باشد.

[۷]. در نتیجه تعداد شبیه‌سازی‌هایی که برای هر سرعت باید

انجام شود برابر این مدت زمان برحسب ثانیه می‌باشد. سپس

مقادیر دز به دست آمده در شبیه‌سازی‌ها با هم جمع شده است

تا مقدار دز جذب شده توسط راننده در بازرسی محموله به

دست آید. بنابراین باید در هر سرعت، محاسبه شود که

محموله کامیون در چند ثانیه به طور کامل مورد بازرسی قرار

می‌گیرد و تعداد ثانیه‌ها برابر تعداد شبیه‌سازی‌هایی است که در

هر سرعت باید انجام شود تا محموله کامیون به طور کامل

مورد بازرسی قرار گیرد [۸].

با داشتن سرعت حرکت کامیون می‌توان محاسبه کرد که در

مدت مورد نظر چند خوشه از باریکه الکترونی به تنگستن

برخورد می‌نماید. با توجه به اینکه طول محموله کامیون m

۶/۵ است (به طور تقریبی برابر m ۶ در نظر گرفته شد)،

جدول ۳ تعداد شبیه‌سازی‌هایی که در هر سرعت باید انجام

شود و تعداد خوشه باریکه الکترونی برخورد کرده به تنگستن

را نشان می‌دهد [۹]. رابطه ۲ روش محاسبه تعداد خوشه

الکترونی برخورد کرده به سطح تنگستن در سرعت نوعی $\frac{m}{s}$

۰/۲ را نشان می‌دهد. در این رابطه n تعداد خوشه الکترونی

برخورد کرده به سطح تنگستن است و $n-1$ تعداد فواصل زمانی

است که الکترونی به تنگستن برخورد نمی‌کند.

$$(n \times 5 \mu s) + (n-1)(4000 \mu s) = 30 \times 10^6 \rightarrow n = 7489.6 \quad (2)$$

بنابراین در سرعت $\frac{m}{s}$ ۰/۲، که ۳۰ ثانیه اسکن کردن

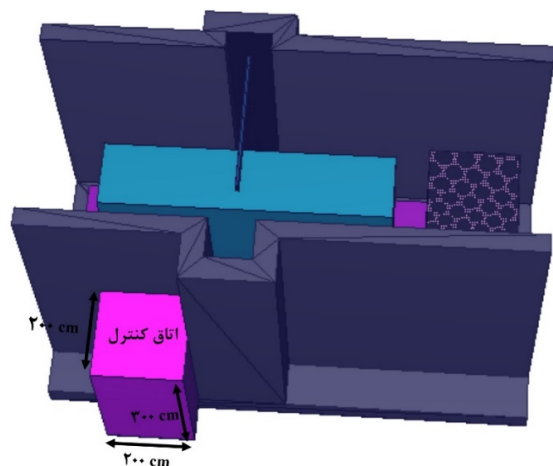
کامیون ۶ متری طول می‌کشد، تعداد ۷۴۹۰ خوشه الکترونی به

سطح تنگستن برخورد می‌کنند که این عدد باید در خروجی

MCNPX ضرب شود تا نتایج به واقعیت نزدیک شوند.

جدول ۳، تعداد خوشه برخورد کرده به تنگستن را در هر

سرعت کامیون نشان می‌دهد.

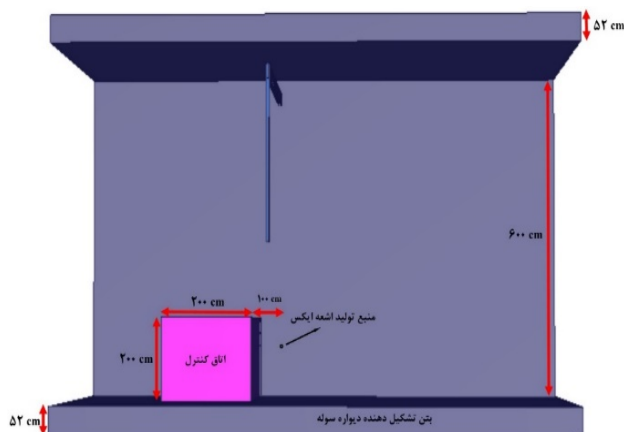


شکل (۹): سوله و اتاق کنترل شبیه‌سازی شده در فضای

.MCNPX2.6

۲.۴. دروازه بازرسی حرکت کند

شکل ۱۰ دیواره‌های سوله بازرسی و اتاق کنترل را در این حالت نشان می‌دهد، تمام قسمت‌های سوله بازرسی باید ضخامت ۵۲ cm را داشته باشند تا مقدار دز نشت کرده از سوله کم‌تر از $0.05 \frac{\mu Sv}{h}$ شود.



شکل (۱۰): ضخامت بتن برای قسمت‌های مختلف سوله بازرسی

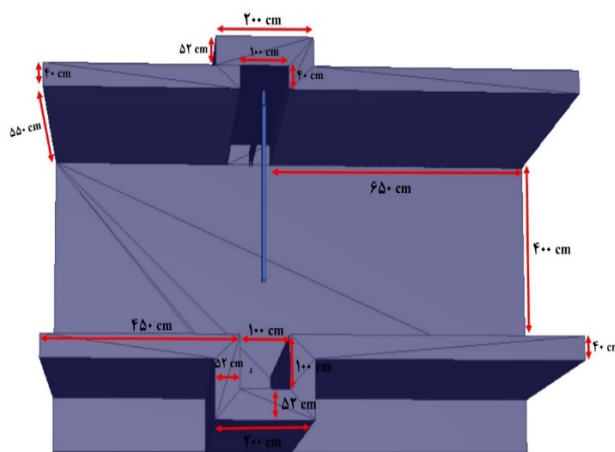
در حالت حرکت دروازه بازرسی

در این حالت اتاق کنترل که اپراتور در آن حضور دارد داخل سوله بازرسی قرار دارد. با مد نظر قرار دادن نشت پرتو از شتاب‌دهنده LinatronMi6 در محاسبات و با در نظر گرفتن بدترین حالت (جنس محموله از آهن و سرعت کامیون

به‌منظور محاسبه میزان دز در داخل سوله و نشت کرده از دیواره سوله، داخل سوله بازرسی به مکعب مستطیل‌هایی با ابعاد ۴۰۰ cm (در راستای محور X)، ۵۵۰ cm (در راستای محور Y) و ۱ cm (در راستای محور Z) تقسیم شده است. در نتیجه در هر یک سانتی‌متر از طول سوله و بیرون از سوله میزان دز محاسبه شده است.

۱.۴. دروازه بازرسی ثابت باشد

شکل ۸ دیواره‌های سوله بازرسی را در این حالت نشان می‌دهد. اگر ضخامت بتن در قسمت دربرگیرنده دروازه بازرسی ۵۲ cm و در بقیه قسمت‌ها ۴۰ cm باشد، مقدار دز نشت کرده از دیواره سوله کم‌تر از $0.05 \frac{\mu Sv}{h}$ می‌باشد.



شکل (۸): ضخامت بتن برای قسمت‌های مختلف سوله بازرسی در

حالت حرکت کامیون.

در این حالت اتاق کنترلی که اپراتور در آن حضور دارد بیرون از سوله بازرسی قرار دارد. شکل ۹ اتاق کنترل و سوله بازرسی را نشان می‌دهد. نشت پرتو از شتاب‌دهنده LinatronMi6 در حدود 10^{-3} است با توجه به این موضوع و در نظر گرفتن جنس محموله از آهن و سرعت کامیون $0.2 \frac{m}{s}$ (بدترین حالت) دز رسیده به اپراتور کم‌تر از $0.05 \frac{\mu Sv}{h}$ می‌باشد [۱۰].

توسط راننده کامیون بستگی به جنس محموله، سرعت حرکت کامیون و انرژی فوتون ایکس دارد. هر چه محموله چگال‌تر باشد، عدد اتمی بالاتری داشته باشد و سرعت حرکت کامیون کم‌تر باشد، دز جذب شده توسط راننده بیش‌تر می‌شود. دز جذب شده توسط راننده در سه حالتی که محموله آب، هوا و آهن باشد، به‌وسیله کد MCNPX2.6 محاسبه شد (فقط سه حالت گاز، مایع و جامد برای محموله در نظر گرفته شد بنابراین هوا، آب و آهن مثال نوعی از این سه حالت مختلف ماده هستند) که در هر سه حالت در حد مجاز بودند و این به شرطی بود که شرایط ایمنی به طور کامل رعایت شود و راننده در معرض فوتون‌های اولیه ایکس قرار نگیرد. ضخامت مناسب بتن برای دیواره‌ها و سقف سوله در دو حالت بازرسی کامیون با لحاظ کردن جنبه‌های اقتصادی پروژه ساخت سوله، محاسبه شد که در حالت حرکت کامیون، ۵۲ cm برای قسمت در برگیرنده آشکارسازها و ۴۰ cm برای سایر قسمت‌ها مقادیر مناسبی بودند و در حالت حرکت دروازه بازرسی تمام قسمت‌های سوله باید ضخامت ۵۲ cm را داشته باشند.

نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که ۳ mm استیل و ۱۰/۵ mm سرب برای دیواره اتاق کنترل لازم است تا دز جذب شده توسط اپراتور کم‌تر از $0/5 \frac{\mu Sv}{h}$ باشد. بنابراین تمامی این موارد در ساخت دستگاه تولید کننده تابش ایکس، بدنه سوله بازرسی و اتاق کنترل باید لحاظ گردد تا دز نشت کرده از سوله و جذب شده توسط راننده و اپراتور در حد مجاز باشد. در نتیجه این پروژه می‌تواند کمک بسیاری در زمینه رعایت مسائل ایمنی سامانه بازرسی کامیون کند.

دز جذب شده توسط اپراتور محاسبه شده است. این مقادیر دز در شرایطی که دیواره اتاق کنترل از ۳ mm استیل و ضخامت‌های مختلف از سرب است، محاسبه شده‌اند. جدول ۴ مقدار دز جذب شده توسط اپراتور در ضخامت‌های مختلف سرب برای سوله بازرسی را نشان می‌دهد.

جدول (۴): دز جذب شده توسط اپراتور در ضخامت‌های مختلف

سرب برای دیواره اتاق کنترل

ضخامت سرب (mm)	دز جذب شده (μSv)
۱	۱۵/۲۰
۷	۲/۱۹
۱۰/۵	۰/۴۸

۵. نتیجه‌گیری

در دنیای نوین امروزی سامانه‌های بازرسی کامیون جزء جدانشدنی زندگی محسوب می‌شوند. توجه به تجهیزات به کار رفته در ارتقاء آن‌ها با توجه به پیشرفت‌های علم مهندسی بسیار ضروری است.

ابتدا سعی شد مقدار دز در فاصله ۱ m از شتاب دهنده LinatronMi6، $\frac{Gy}{min}$ ۸ به دست آید، بنابراین باید جریان باریکه الکترونی آن ۰/۵۸ mA باشد. این نتیجه‌گیری در مراحل ساخت این شتاب‌دهنده باید مدنظر قرار گیرد تا هم تصاویر با کیفیت بالا و هم شرایط ایمنی تا حدی رعایت شود.

از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که دز جذب شده

۶. مراجع

- [1] J. Bendahan, "Vehicle and Cargo Scanning for Contraband", *Physics Procedia*. 90 (2017) 242–255.
- [2] W. Reed, "X-ray cargo screening systems: the technology behind image quality", *Port Technology International*. (2007) 2–35.
- [3] X. Duan, J. Cheng, L. Zhang, Y. Xing, Z. Chen and Z. Zhao, "X-ray cargo container inspection system with few-view projection imaging", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 598 (2009) 439–444.
- [4] A.J. Ituh, "Port security technology for closed container inspection at United States seaports of entry". (2010) 15–50.
- [5] M. Vorogushin, V. Petrunin and S. Ogorodnikov, "Experiments on material recognition for 8-MeV customs inspection system for trucks and large scale containers". *eConf*, 821 (2000) 642–644.
- [6] D.S. Steele, L.C. Howington, J.W. Schuler, J.J. Sostarich, C.R. Wojciechowski, T.W. Sippel. "X-ray inspection system". *eConf*, (1989) 4–10.
- [7] L. Grodzins. "Rapid X-ray inspection system", *Port Technology International*. (1999) 3–12.
- [8] X. Duan, J. Cheng, L. Zhang, Y. Xing, Z. Chen and Z. Zhao, "X-ray cargo container inspection system with few-view projection imaging", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 598 (2009) 439–444.
- [9] R.T. Bernardi and J.F. Moore, "High energy X-ray mobile cargo inspection system with penumbra collimator", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers*. 598 (2004) 120–204.
- [10] C. Tang, H. Chen and Y. Liu, "Electron Linacs for cargo inspection and other industrial applications", *Power*. 10, p. 11kV (2009) 1–7.