



محاسبه کرنل دزجذبی فوتون در فانتوم همگن آب با استفاده از ابزار مونت کارلو Geant4

کیوان طبایی و مجتبی شمسایی زفرقندی

دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران

پست الکترونیکی: Keyvantabaei@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷)

چکیده:

امروزه یکی از روش‌های دزسنجی در پرتودهی خارجی انجام محاسبات پیچش/برهم‌نهی با بهره‌گیری از کرنل دزجذبی فوتون است. کرنل دزجذبی برابر با توزیع دزجذب شده حول محل برهم‌کنش فوتون بر واحد تعداد برهم‌کنش‌های اولیه انجام شده درون یک حجم کوچک از ماده است. هدف از انجام این پژوهش محاسبه کرنل دزجذبی فوتون و مطالعه رفتار شعاعی و زاویه‌ای آنها است. در این پژوهش کرنل دزجذبی با روش مبتنی بر ابزار مونت کارلو Geant4 برای فوتون تک‌انرژی در بازه انرژی $0.13\text{MeV} - 5\text{MeV}$ در یک ماده همگن در مختصات کروی محاسبه شده است. به منظور مطالعه دقیق، مقدار آن براساس ذرات باردار تولیدشده در برهم‌کنش‌های متوالی فوتون گروه‌بندی شد. با توجه به نتایج، مقدار کرنل دزجذبی با افزایش زاویه، نسبت به امتداد جهت فوتون اولیه، به سرعت کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله شعاعی از محل برهم‌کنش، مقدار آن افزایش و سپس شدیداً کاهش یافت. کرنل دزجذبی برای فوتون با انرژی اولیه پایین حول محل برهم‌کنش تقریباً به صورت متقارن توزیع شد، درحالی که با افزایش انرژی اولیه، در زاویه‌های روبه‌جلو توزیع شد.

واژه‌های کلیدی: کرنل دزجذبی، دزسنجی، پیچش/برهم‌نهی، مونت کارلو، Geant 4

. مقدمه

میان شاراولیه فوتون و کرنل، توزیع سه بعدی دزجذبی در ماده به دست می‌آید. دزسنجی به روش محاسبات پیچش از دقت بالایی برخوردار است و از نظر زمانی، نسبت به روش مستقیم مونت کارلو، به صرفه‌تر است [۱-۱۲]. پژوهش‌هایی در زمینه مقایسه و ارزشیابی محاسبه توزیع دزجذبی به روش محاسبات پیچش و دیگر روش‌ها انجام شده است [۱۳-۱۶]. کرنل دزجذبی (ADK) به معنای توزیع دزجذب شده حول محل برهم‌کنش فوتون بر واحد تعداد برهم‌کنش‌های اولیه انجام شده درون یک حجم کوچک از ماده است. امروزه در بسیاری از سامانه‌های طراحی درمان پرتودرمانی از کرنل دزجذبی در انجام محاسبات پیچش استفاده می‌شود [۶، ۷ و

زمانی که یک فوتون در یک محل از ماده برهم‌کنش انجام می‌دهد، کرنل^۱ توصیف‌کننده چگونگی توزیع انرژی انباشته‌شده حول آن محل در ماده است که در یکاهای متفاوت محاسبه شده است. با استفاده از کرنل و شاراولیه فوتون می‌توان دزجذبی را در ماده محاسبه کرد. محاسبه دزجذبی یکی از مهم‌ترین مراحل انجام پرتودرمانی است. به طور کلی سه روش تا به امروز برای دزسنجی شناخته شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از: روش تصحیح، روش مستقیم مونت کارلو و روش محاسبات پیچش^۲. زمانی که یک ماده توسط یک شاراولیه فوتون پرتودهی شد، با محاسبه پیچش

کرنل دز جذبی پراکنده نخستین به روش شبیه‌سازی مونت کارلو، کرنل دز جذبی پراکنده دومین با استفاده از معادله کلین-نیشینا و کرنل دز جذبی پراکنده مراتب بالاتر با مدل‌سازی شار ذرات باردار با استفاده از معادله پواسون [۳].

در روش مستقیم که مبتنی بر شبیه‌سازی به روش مونت کارلو است، یک فانتوم به چندین عنصر کوچک حجمی^۱ تقسیم می‌شود. با ردیابی ذرات ثانویه و محل انباشت انرژی توسط آنها، مقدار کرنل دز جذبی در هر عنصر حجمی محاسبه می‌شود. تقسیم‌بندی فانتوم می‌تواند در هر نوع دستگاه مختصات انجام شود، در نهایت محاسبات پیچش جهت دست‌یافتن به دز جذبی در آن دستگاه انجام می‌شود [۴، ۶، ۷، ۱۷، ۲۲-۲۹]. ماکیه با استفاده از ابزار مونت کارلو EGSnrc کرنل را در مختصات کروی محاسبه کرده است. او مقادیر آن را براساس برهم‌کنش‌های متوالی فوتون گروه‌بندی کرده است [۱۷]. به علاوه، کرنل دز جذبی در مختصات دکارتی با عناصر حجمی مکعبی در قدرت تفکیک‌های مختلف محاسبه شده است [۴]. آئشو کرنل را با عنوان تابع نقطه گستر محاسبه کرده است. تابع نقطه گستر توزیع کسری از انرژی است که در محل برهم‌کنش آزاد شده و توسط ذرات ثانویه حول آن محل انباشت می‌شود [۷]. همچنین کرنل تحت عنوان توزیع دز دیفرانسیل باریکه پرتو^۳ به دست آمده است. توزیع دز دیفرانسیل باریکه پرتو برابر با توزیع دز جذبی حول محل برهم‌کنش فوتون بر واحد چگالی برخورد است. چگالی برخورد برابر با تعداد فوتون‌ها بر واحد حجم ماده است که اولین برهم‌کنششان را درون یک حجم کوچک از ماده انجام می‌دهند [۶].

در این مطالعه با استفاده از ابزار مونت کارلو Geant4، کرنل دز جذبی فوتون تک‌انرژی در بازه انرژی ۵ MeV - ۰/۳ MeV محاسبه شده است. مقادیر آن بر اساس مرتبه پراکندگی ذرات باردار تولیدشده در برهم‌کنش‌های متوالی فوتون گروه‌بندی شده‌اند. به این ترتیب، کرنل دز جذبی به گروه‌های کرنل دز جذبی پراکنده نخستین که به اختصار کرنل نخستین، کرنل دز جذبی پراکنده دومین که به اختصار کرنل دومین، کرنل دز جذبی پراکنده سومین که به اختصار کرنل سومین، کرنل دز جذبی پراکنده مراتب بالاتر که به اختصار کرنل مراتب بالاتر و کرنل دز جذبی پراکنده

[۱۷]. به طور تقریبی، در یک ماده همگن، کرنل دز جذبی تحت انتقال فضایی در ماده بدون تغییر باقی می‌ماند. یعنی کرنل دز جذبی به دست آمده حول یک نقطه از ماده همگن برابر با کرنل دز جذبی به دست آمده حول یک نقطه دیگر درون همان ماده است. بنابراین زمانی که مقدار آن در یک نقطه از ماده به دست آمد، آن را می‌توان در تمام نقاط دیگر ماده استفاده کرد [۴، ۶ و ۷]. در مواد ناهمگن، مقدار کرنل دز جذبی حول نقاط متفاوت درون ماده یکسان نیست، زیرا برهم‌کنش فوتون و ذرات ثانویه در تمام حجم ماده یکسان نخواهد بود. از این رو، رویکرد متداول برای استفاده از کرنل دز جذبی فوتون تک‌انرژی در مواد ناهمگن، در نظر گرفتن تغییرات چگالی میان محل برهم‌کنش و محل دز جذب شده است [۴، ۶، ۷، ۱۲ و ۱۸].

کرنل دز جذبی به روش تحلیلی و روش مستقیم مونت کارلو محاسبه می‌شود. همچنین، مقدار آن به روش نیمه‌تحلیلی، یعنی با ترکیب روش تحلیلی و روش مونت کارلو، محاسبه می‌شود. برخی از محققان آن را بر اساس مرتبه پراکندگی ذرات باردار تولیدشده گروه‌بندی کرده و به صورت جداگانه محاسبه کرده‌اند. یعنی توزیع دز جذب شده توسط ذرات باردار تولید شده در اولین برهم‌کنش فوتون، دومین برهم‌کنش فوتون و به این ترتیب تا مراتب بالاتر برهم‌کنش محاسبه و گروه‌بندی شده است.

رویکرد در روش تحلیلی مبتنی بر معادلاتی است که تراپرد ذرات را در ماده توصیف می‌کنند. در محدوده انرژی که احتمال رویداد برهم‌کنش کامپتون از دیگر برهم‌کنش‌ها بیشتر است، می‌توان با استفاده از معادله کلین-نیشینا کرنل دز جذبی را به ازای پراکندگی‌های متوالی فوتون محاسبه کرد [۵]. مقدار کرنل دز جذبی را همچنین می‌توان با انجام واپیچش یک توزیع دز حاصل شده توسط یک باریکه فوتون محاسبه کرد [۱۹]. با توجه به این که مقدار آن حول محل برهم‌کنش با تغییرات شعاعی و زاویه‌ای تغییر می‌کند، بنابراین با بررسی رفتار آن حول محل برهم‌کنش می‌توان آن را مدل‌سازی کرد [۱۲ و ۲۰]. به طور کلی مقدار آن را می‌توان با مدل‌سازی شار فوتون‌های پراکنده شده در برهم‌کنش‌های متوالی فوتون در ماده محاسبه کرد [۱۰ و ۲۱]. یک رویکرد در روش نیمه‌تحلیلی عبارت است از: محاسبه

۲. Differential Pencil Beam dose distribution

^۱ Voxel

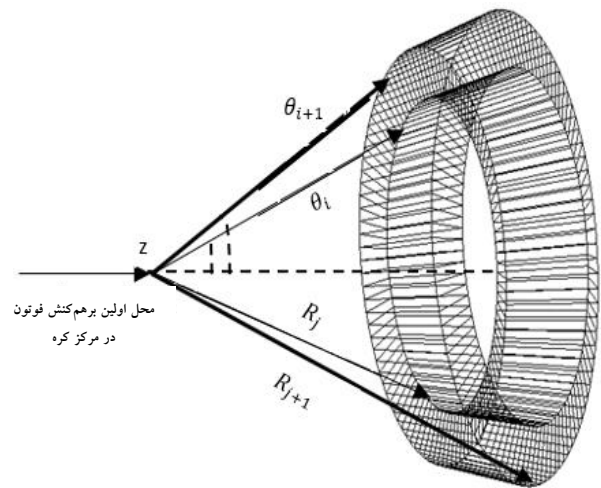
۱. Point spread function

شبیه‌سازی ترابرد ذرات در ماده است و با دسترسی آزاد (متن-باز) به کاربران ارائه شده و توسط محققان مختلف توسعه داده شده است. از این ابزار برای انجام مطالعات در زمینه فیزیک انرژی‌های بالا، فیزیک هسته‌ای، نجوم و پزشکی استفاده می‌شود. این ابزار از مجموعه‌ای از کلاس‌ها تشکیل شده که هر یک وظیفه مشخصی را بر عهده دارد و کاربر با ارث‌بری از این کلاس‌ها، برنامه مورد نیاز را توسعه می‌دهد. از مزیت‌های بسیار مهم این ابزار که آن را نسبت به دیگر کدها و ابزارهای شبیه‌سازی متمایز می‌کند، دارا بودن طیف گسترده‌ای از مدل‌های فیزیکی برهم‌کنش، داده‌های سطح مقطع برهم‌کنش و ذرات گوناگون است که کاربر می‌تواند بر اساس فیزیک حاکم بر مسئله، آنها را به برنامه اضافه کند.

برای اجرا شدن برنامه حداقل سه کلاس، کلاس‌های اجباری، باید توسط کاربر توسعه داده شود. این کلاس‌ها شامل `PhysicsList`، `DetectorConstruction`، `PrimaryGeneratorAction` هستند. به علاوه، کاربر می‌تواند با استفاده از دیگر کلاس‌ها، کلاس‌های اختیاری، نظیر `G4UserRunAction` و `G4UserSteppingAction` ذرات را دنبال کند و کمیت‌های مورد نظر خود را محاسبه کند. در ادامه نحوه محاسبه گروه‌های کرنل در این پژوهش با استفاده از کلاس‌های اختیاری توضیح داده شده است. [۳۰ و ۳۱].

۲.۲. تعریف هندسه و فیزیک مسئله

کرنل دزجذبی در مختصات کروی به عنوان تابعی از شعاع و زاویه، نسبت به امتداد جهت فوتون اولیه، محاسبه شده است. مطابق با شکل ۱ هندسه شبیه‌سازی شده یک کره با شعاع $62/5$ cm است. این کره در راستای زاویه‌ای به 48 پوسته مخروطی با فاصله زاویه‌ای $3/75^\circ$ تقسیم شده است. همچنین این کره در راستای شعاعی به 25 پوسته کروی تقسیم شده است. ضخامت پوسته‌های کروی به صورت نامساوی در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که با فاصله از مرکز، ضخامت آنها افزایش می‌یابد؛ زیرا با توجه به برهم‌کنش ذرات باردار با ماده انتظار می‌رود که شعاع‌های کوچک در کرنل دزجذبی از اهمیت بالایی برخوردار باشند. در نتیجه، این کره به 1200 عنصر حجمی بخش‌بندی شده است.



شکل ۱. هندسه شبیه‌سازی شده، عنصر حجمی (i, j) در شکل نشان داده شده است.

تابش ترمزی و نابودی که کرنل تابشی نامیده می‌شود، تقسیم شده است. کرنل نخستین دزجذبی برابر با توزیع دزجذب شده در ماده توسط کل ذرات باردار تولیدشده در اولین برهم‌کنش فوتون است، کرنل دومین دزجذبی برابر با توزیع دزجذب شده در ماده توسط کل ذرات باردار تولیدشده در دومین برهم‌کنش فوتون است و به همین ترتیب تا مراتب بالاتر. کرنل تابشی دزجذبی برابر با توزیع دزجذب شده در ماده توسط فوتون‌های نابودی و تابش ترمزی است. علاوه بر این گروه‌بندی، با هدف تحقیق دقیق‌تر، برای کرنل نخستین دزجذبی یک زیرگروه تعریف شده است. زیرگروه کرنل نخستین دزجذبی برابر با توزیع دزجذب شده در ماده توسط اولین ذرات باردار تولیدشده در اولین برهم‌کنش فوتون است. نوآوری و تفاوت این پژوهش با پژوهش‌های پیشین تعریف و مطالعه زیرگروه برای کرنل نخستین (زیرگروه کرنل نخستین) است. با توجه به این که ذرات این گروه سهم عظیمی از کل انرژی انباشت شده توسط فوتون اولیه در ماده را تشکیل می‌دهند، بنابراین مطالعه آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲. روش انجام پژوهش

۱.۲. ابزار شبیه‌سازی Geant4

رویکرد در نظر گرفته شده در انجام این پژوهش مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو با استفاده از ابزار Geant4 است که یک ابزار برای

E_0 انرژی اولیه فوتون است. مقادیر کرنل انرژی انباشت، کرنل دز جذبی و کسر انرژی انباشته شده بر اساس گروه بندی ذکر شده در هر عنصر حجمی محاسبه شد.

۳.۲. نحوه محاسبه کرنل در Geant4

انرژی انباشته شده توسط هر ذره در هر مرحله درون هر عنصر حجمی در کلاس `G4UserSteppingAction` محاسبه می شود. هر مرحله یک نقطه آغاز و پایان دارد و ذره در فاصله میان این دو نقطه برهم کنش انجام می دهد. به منظور محاسبه گروه های کرنل، یعنی اضافه کردن انرژی انباشته شده توسط هر ذره در هر مرحله به گروه کرنل متناظر، ابتدا باید تعیین شود ذره به کدام گروه کرنل تعلق دارد. برای انجام این کار از تابع های `(GetParentID)` و `(GetTrackID)` متعلق به کلاس `G4Track` استفاده شده است. به این کلاس می توان توسط شی `G4step` حاضر در کلاس `G4UserSteppingAction` دسترسی پیدا کرد. ذرات در ابزار `Geant4` یک ذره مادر دارند، آنها در برهم کنش ذره مادر تولید می شوند. تابع `(GetParentID)` یک عدد بزرگ تر مساوی با صفر بازمی گرداند. این عدد مشخصه ذره مادر را نشان می دهد. مقدار بازگشتی این تابع برای ذرات اولیه تابانده شده از چشمه صفر است و مقدار آن برای ذرات تولید شده در برهم کنش ذره اولیه ۱ است. به همین ترتیب مقدار `ParentID` به ذرات تولید شده در طول اجرای برنامه اختصاص داده می شود. تابع `(GetTrackID)` یک عدد صحیح بزرگ تر از صفر باز می گرداند. این عدد شمارنده ذرات ثانویه تولید شده در برهم کنش ذره مادر است. به اولین ذره تولید شده در برهم کنش ذره مادر مقدار ۱ اختصاص داده می شود و به همین ترتیب تا زمانی که ترابرد ذره مادر خاتمه یابد، مقدار `TrackID` به ذرات ثانویه اختصاص داده می شود. با تعیین مقدار `ParentID` و `TrackID` هر ذره، گروه کرنل آن ذره مشخص می شود. در کلاس `G4UserSteppingAction` ذرات در هر مرحله با این روش بررسی می شوند، گروه آنها مشخص می شود و مقدار انرژی انباشته شده توسط آنها در هر عنصر حجمی محاسبه می شود. مقدار محاسبه شده به کلاس `G4Run` ارسال می شود و در آنجا در گروه کرنل متناظر برای هر عنصر حجمی جمع بسته می شوند. در انتهای برنامه، در کلاس `G4UserRunAction` مقدار

از مدل فیزیک `emstandard_opt4` جهت ترابرد ذرات در شبیه سازی استفاده شد. فوتون ها در راستای محور Z به مرکز کره تابانده شدند. آنها با استفاده از روش بایاسینگ^۲ (روش تقسیم^۳) وادار به انجام اولین برهم کنش خود در یک حجم کوچک در مرکز کره شدند. در این روش فوتون با ورود به حجم کوچک به دو فوتون با همان انرژی اولیه تقسیم می شود. یک فوتون در این حجم وادار به برهم کنش می شود و فوتون دیگر وادار به خروج از حجم بدون برهم کنش می شود. تنها انرژی انباشته شده توسط فوتونی که در حجم کوچک برهم کنش انجام داده است، محاسبه شد. اگر R_j و R_{j+1} به ترتیب شعاع داخلی و خارجی یک پوسته کروی باشند و θ_j و θ_{j+1} به ترتیب زاویه داخلی و خارجی یک پوسته مخروطی باشند، آنگاه هر عنصر حجمی با نماد (i, j) نشان داده می شود. اگر c نشان دهنده گروه باشد، آنگاه کرنل انرژی انباشت گروه c در عنصر حجمی (i, j) برابر است با:

$$EDK_c(i, j) = \frac{\sum_n [\Delta E_c(i, j)]_n}{N}, \quad (1)$$

مقدار انرژی انباشته شده توسط ذرات گروه c در n امین برهم کنش درون عنصر حجمی (i, j) است و N تعداد فوتون های اولیه است. کرنل انرژی انباشت درون عنصر حجمی (i, j) برابر با مجموع مقادیر در تمام گروه ها است:

$$EDK(i, j) = \sum_c EDK_c(i, j), \quad (2)$$

با تقسیم آن به جرم هر عنصر حجمی، مقدار کرنل دز جذبی برای گروه c درون عنصر حجمی (i, j) محاسبه می شود:

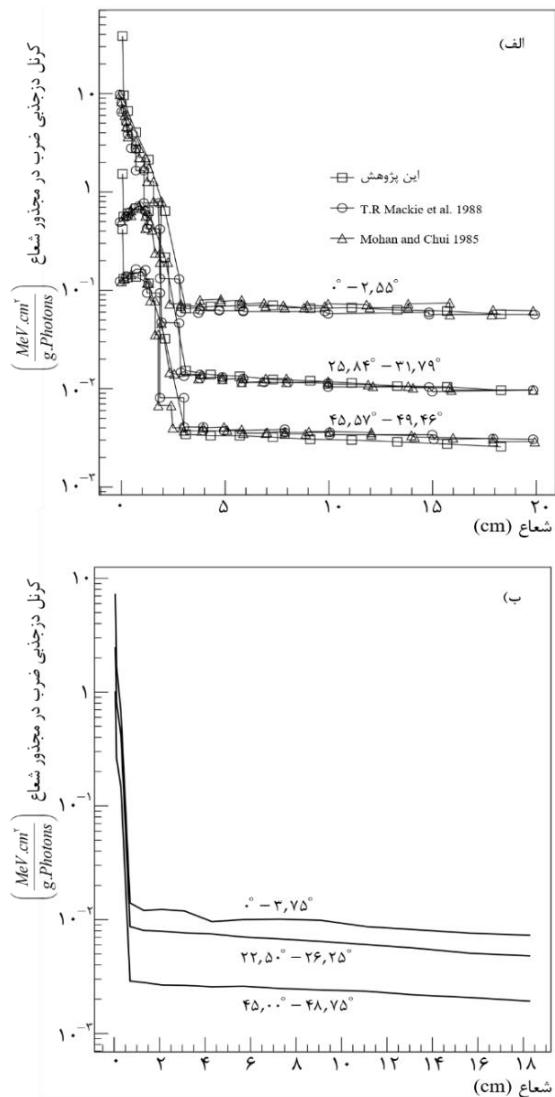
$$ADK_c(i, j) = \frac{EDK_c(i, j)}{M(i, j)}, \quad (3)$$

که $M(i, j)$ جرم عنصر حجمی (i, j) است. کرنل دز جذبی درون عنصر حجمی (i, j) برابر با مجموع مقادیر گروه های کرنل دز جذبی است:

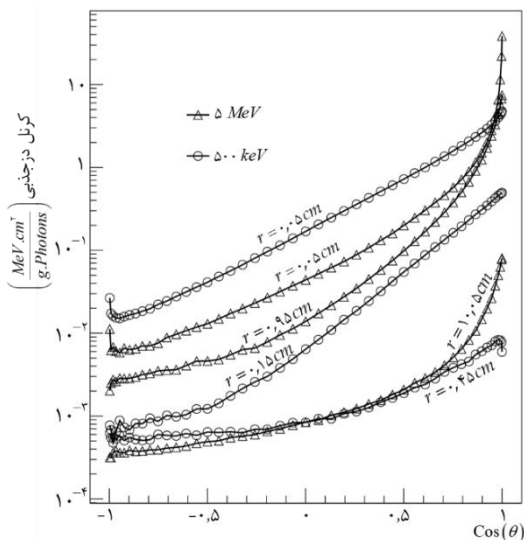
$$ADK(i, j) = \sum_c ADK_c(i, j), \quad (4)$$

کسر انرژی انباشته شده برای هر گروه کرنل درون عنصر حجمی (i, j) برابر است با:

$$f_{E_c}(i, j) = \frac{EDK_c(i, j)}{E_0}, \quad (5)$$



شکل ۲. تغییرات شعاعی کرنل دزجذبی در سه پوسته مخروطی متفاوت نشان داده شده است. (الف) انرژی اولیه فوتون ۵ MeV، در این شکل نتایج با [۶ و ۱۷] مقایسه شده است و (ب) انرژی اولیه فوتون ۱۲۵ MeV.



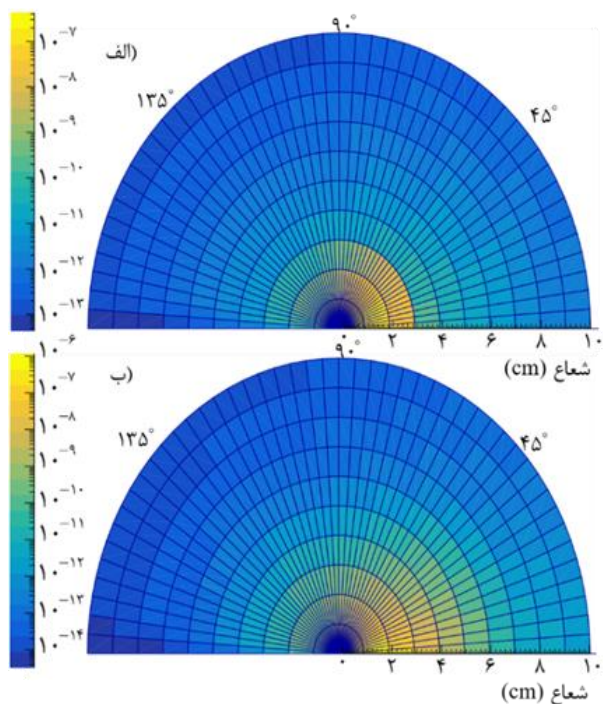
شکل ۳. تغییرات زاویه‌ای کرنل دزجذبی در شعاع‌های ثابت.

مجموع انرژی انباشته شده برای هر گروه کرنل به جرم عنصر حجمی تقسیم شده و گروه‌های کرنل دزجذبی در هر عنصر حجمی به دست می‌آیند.

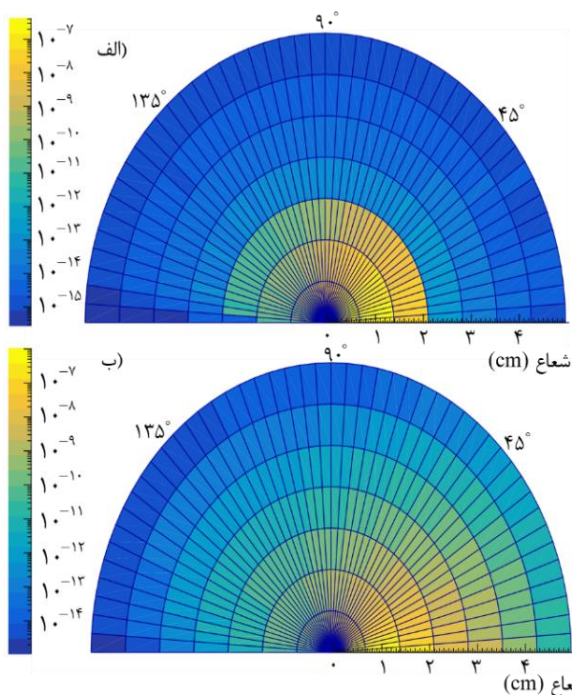
۳. بحث و نتایج

تغییرات شعاعی کرنل دزجذبی در سه پوسته مخروطی برای انرژی‌های ۱/۲۵ MeV و ۵ MeV در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور مقایسه نتایج با [۶ و ۱۷] و مقادیر آن در مجذور شعاع داخلی پوسته کروی ضرب شده است. به این ترتیب اثر عکس مجذوری (اثر هندسی) حذف می‌شود و مقادیر تنها حاصل تضعیف و پراکندگی ذرات ثانویه در ماده خواهند بود. با افزایش شعاع از محل برهم کنش فوتون، مقدار کرنل دزجذبی در یک محدوده شعاعی افزایش می‌یابد و سپس کاهش شدید پیدا می‌کند، زیرا ذرات زیرگروه کرنل نخستین به انتهای برد خود رسیده‌اند. با افزایش انرژی اولیه فوتون وسعت شعاعی این محدوده افزایش می‌یابد، زیرا این ذرات با انرژی جنبشی بزرگ‌تر تولید می‌شوند و زمان برهم کنش کولنی آنها با هسته و الکترون‌های ماده کاهش می‌یابد، بنابراین انرژی خود را در شعاع‌های بزرگ‌تر انباشت می‌کنند. با توجه به این که کسر عظیمی از مقادیر در این محدوده مختص به کرنل نخستین دزجذبی است، بنابراین در شعاع‌های بزرگ مقدار کرنل دزجذبی برابر با مجموع مقادیر گروه‌های کرنل دزجذبی در مراتب بالاتر است که تنها برابر با کسر کوچکی از کرنل نخستین دزجذبی هستند. بخش بزرگی از مقدار کرنل دزجذبی در پوسته مخروط ۳/۷۵° جذب شده است که نشان‌دهنده پراکندگی ذرات باردار در راستای روبه جلو است.

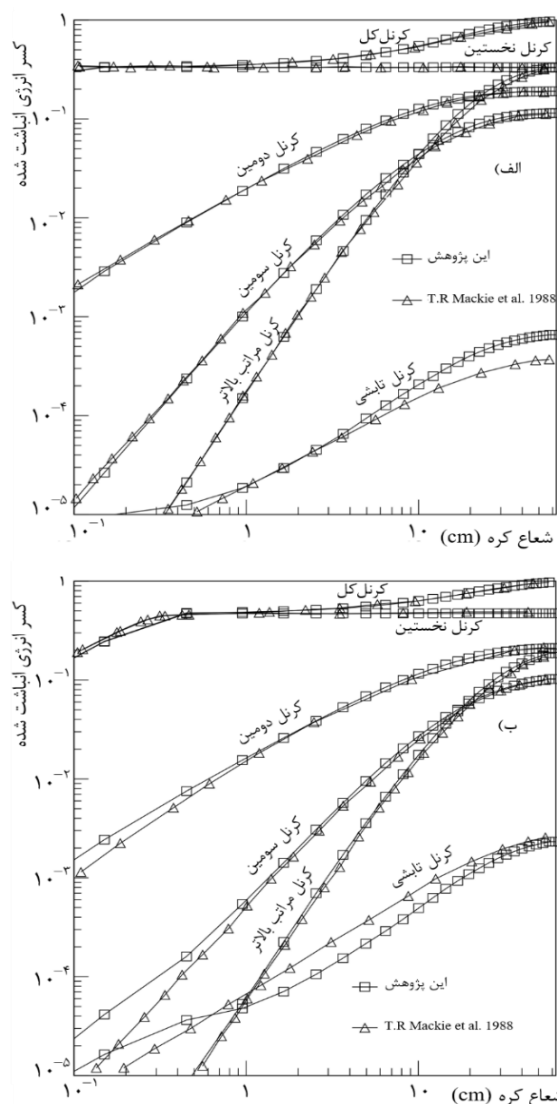
در شکل ۳ تغییرات کرنل دزجذبی برحسب زاویه برای انرژی‌های ۵ MeV و ۱۲۵ keV نشان داده شده است. با افزایش زاویه، مقدار آن به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با افزایش انرژی اولیه فوتون، کاهش مقدار آن با شیب تندتری انجام می‌شود. به ازای انرژی اولیه ۱۲۵ keV مقدار کرنل دزجذبی در شعاع ۰/۵ cm از محل برهم کنش در زاویه ۴۵° تقریباً ۱۰ برابر مقدار کرنل دزجذبی در زاویه ۹۰°



شکل ۵. کرنل دز جذبی برای تمام پوسته‌های مخروطی برحسب یکای $\frac{cGy}{Photon.MeV}$ نمایش داده شده است (الف) انرژی اولیه فوتون 5 MeV و (ب) انرژی اولیه فوتون 5 MeV .

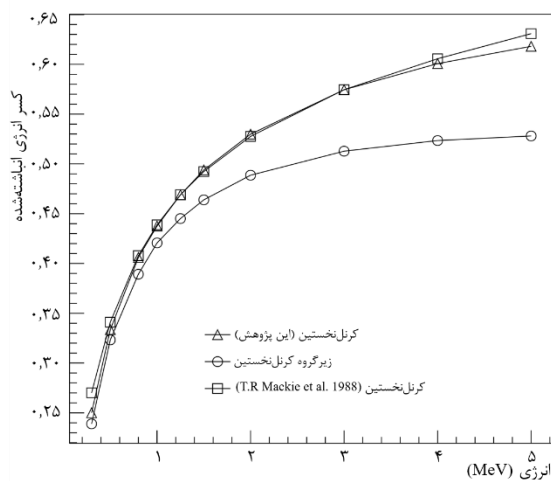


شکل ۶. کرنل‌نخستین دز جذبی برای تمام پوسته‌های مخروطی برحسب یکای $\frac{cGy}{Photon.MeV}$ نمایش داده شده است (الف) انرژی اولیه فوتون 5 MeV و (ب) انرژی اولیه فوتون 5 MeV .



شکل ۴. تغییرات شعاعی کسر انرژی انباشته شده توسط گروه‌های کرنل درون کره‌های هم‌مرکز با فانتوم (الف) انرژی اولیه فوتون 5 MeV و (ب) انرژی اولیه فوتون 5 MeV در این شکل نتایج با [۱۷] مقایسه شده است.

است. در شکل ۴ تغییرات شعاعی کسر انرژی انباشته شده توسط گروه‌های کرنل درون کره‌های هم‌مرکز با فانتوم نشان داده شده است. از آنها می‌توان برای تخمین کسر انرژی انباشته شده توسط هر یک از گروه‌های کرنل استفاده کرد. در شعاع‌های کوچک مقادیر در تمامی گروه‌ها به صورت نمایی افزایش می‌یابد. مقادیر گروه‌ها در مراتب بالا از مقادیر در مراتب پایین کمتر است، زیرا کسر زیادی از انرژی فوتون در برهم‌کنش‌های اول منتقل می‌شود. با توجه به نمودار، کسر انرژی انباشته شده گروه کرنل‌نخستین بعد از شعاع

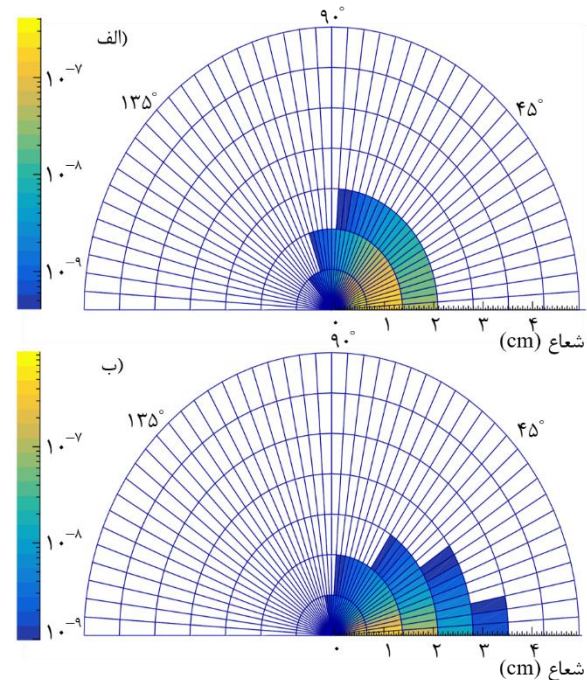


شکل ۸. تغییرات کسر انرژی انباشته شده توسط کرنل نخستین و زیرگروه آن برحسب انرژی اولیه فوتون.

میان مقدار زیرگروه و مقدار کرنل نخستین بیشتر می شود، به صورتی که تا انرژی ۱ MeV اختلاف کمتر از یک درصد است و در انرژی ۵ MeV به ۱۰ درصد می رسد. به این ترتیب با افزایش انرژی اولیه فوتون سهم ذرات زیرگروه کرنل نخستین در انرژی انباشت شده درون ماده کاهش می یابد و کسر عظیمی از کل انرژی توسط دیگر ذرات انباشت می شود.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، کرنل دزجذبی فوتون تک انرژی با استفاده از ابزار مونت کارلو Geant4 در فانتوم آب کروی در بازه انرژی ۵ MeV - ۰/۳ MeV محاسبه شد. مقدار آن برحسب ذرات باردار تولید شده در پراکندگی های متوالی فوتون گروه بندی شد. مقادیر محاسبه شده با خطای آماری کمتر از ۵ درصد به دست آمدند. تغییرات شعاعی و زاویه ای کرنل دزجذبی حول محل برهم کنش به دقت بررسی شد. مقدار آن با افزایش زاویه به سرعت کاهش یافت. با افزایش فاصله شعاعی از محل برهم کنش مقدار آن پس از رشد در یک محدوده، شدیداً کاهش یافت. با افزایش انرژی اولیه فوتون، کسر بسیاری از مقدار آن در زاویه روبه جلو توزیع شد. کرنل دزجذبی محاسبه شده با نتایج به دست آمده توسط موهان و ماکیه [۶ و ۱۷] مقایسه شد و توافق خوبی میان آنها به دست آمد. با افزایش انرژی اولیه فوتون در مقدار کرنل تابشی به دست آمده و مقدار محاسبه شده توسط ماکیه تفاوت مشاهده شد. علت آن می تواند مدل فیزیک استفاده شده در شبیه سازی باشد. محاسبه زیرگروه کرنل نخستین نوآوری و



شکل ۷. زیرگروه کرنل نخستین دزجذبی برای تمام پوسته های مخروطی برحسب یکای $\frac{cGy}{Photon.MeV}$ نمایش داده شده است. (الف) انرژی اولیه فوتون ۰/۵ MeV و (ب) انرژی اولیه فوتون ۵ MeV.

متناظر با برد ذرات زیرگروه کرنل نخستین تقریباً ثابت باقی می ماند. شیب اندک این نمودار پس از این شعاع به دلیل انباشت انرژی توسط ذراتی است که در برهم کنش های ذرات زیرگروه کرنل نخستین پراکنده شده اند.

مقدار کرنل دزجذبی در هر عنصر حجمی در شکل ۵ نشان داده شده است. زمانی که انرژی اولیه فوتون کم است مشاهده می شود که کرنل دزجذبی حول محل برهم کنش تقریباً به صورت متقارن توزیع شده است، در حالی که با افزایش انرژی اولیه فوتون مقدار آن در زاویه بیشتر از ۹۰° کاهش می یابد. دزجذبی در این زاویه ها اغلب به واسطه کرنل دزجذبی در مراتب بالا است؛ زیرا همانطور که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود، کرنل نخستین دزجذبی، مخصوصاً با افزایش انرژی اولیه فوتون، در زاویه های کوچک جذب شده است.

شکل ۸ کسر انرژی انباشته شده توسط کرنل نخستین و زیرگروه آن در کل کره را نشان می دهد. مقادیر کسر انرژی انباشته شده توسط کرنل نخستین با مقادیر محاسبه شده توسط ماکیه مقایسه شده است. همچنان که انرژی اولیه فوتون افزایش می یابد، اختلاف

ماده تغییر نمی‌کنند، از کرنل دزجذبی به دست‌آمده می‌توان در تمام نقاط دیگر یک ماده همگن استفاده کرد و به این ترتیب توزیع دزجذبی را برای یک شار فوتون تک‌انرژی محاسبه کرد.

وجه تمایز این پژوهش نسبت پژوهش‌های پیشین است. با افزایش انرژی‌اولیه فوتون اهمیت این زیرگروه کاهش یافت و سهم دیگر گروه‌های کرنل افزایش پیدا کرد. با تقریب این که مقادیر کرنل دزجذبی در یک ماده همگن تحت انتقال فضایی در

مراجع

1. A Boyer and E Mok, in "Proceedings of the Eighth International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy" (1984) 14.
2. T Mackie and J Scrimger, in "Proceedings of the Eighth International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy" (1984) 36.
3. A Boyer and E Mok, *Medical physics* **12** (1985) 169.
4. T Mackie, J Scrimger and J Battista, *Medical physics* **12** (1985) 188.
5. A L Boyer and E C Mok, *Medical physics* **13**(1986) 503.
6. R Mohan, C Chui, and L Lidofsky, *Medical physics* **13** (1986) 64.
7. A Ahnesjö P Andreo, and A Brahme, *Acta Oncologica* **26** (1987) 49.
8. D Liu and R S Sloboda, *Medical physics* **41** (2014) 051701.
9. A Iwasaki et al., *Radiological physics and technology* **4** (2011) 203.
10. S A Naqvi M A Earl, and D M Shepard, *Physics in Medicine & Biology* **48** (2003) 2101.
11. L Tillikainen et al., *Physics in Medicine & Biology* **53** (2008) 3821.
12. A Ahnesjö, *Medical physics* **16** (1989) 577.
13. D Finocchiaro, *Plos one* **15** (2020) e0236466.
14. S Singh, *biomedical physics & engineering* **9** (2019) 613.
15. A M Reinhart et al., *The British journal of radiology* **90** (2017) 20160426.
16. S Kimura et al., *Radiological physics and technology* **4** (2011) 216.
17. T Mackie et al., *Physics in Medicine & Biology* **13** (1988) 1.
18. Dieudonné A et al., *Journal of nuclear medicine* **54** 236 (2013).
19. A Ahnesjö, in "8th International Conference on Computers in Radiotherap" (1984) 17.
20. A Ahnesjö, M Saxner, and A Trepp, *Medical physics* **19** (1992) 263.
21. S Bartzsch and U Oelfke, *Medical physics* **40** (2013) 111714.
22. S A Graves, *Medical physics* **46** (2019) 5284.
23. V Klimanov et al., *Moscow University Physics Bulletin* **71** (2016) 431.
24. J Y Huang et al., *Medical physics* **40** (2013) 121721.
25. C Janicki and J Seuntjens, *Medical physics* **31** (2004) 814.
26. A M Bergman, K Otto and C Duzenli, *Medical physics* **31** (2004) 3279.
27. B M Mendes, *Radiation Physics and Chemistry* **181** (2021) 109327.
28. H Uusijärvi et al., *Cancer biotherapy and radiopharmaceuticals* **24** (2009) 416.
29. E Mainegra-Hing, D Rogers, and I Kawrakow, *Medical physics* **32** (2005) 685.
30. S Agostinelli et al., *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **506** (2003) 250.
31. J Allison et al., *IEEE Transactions on nuclear science* **53** (2006) 270.

