





دانشگاه شاهرود

دانشکده فیزیک

گروه هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد

مشخص نمودن حفره هوا در بتون با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما به روش مونت کارلو

زهرا کیانی هرچگانی

استاد راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

شهریور ماه ۱۳۹۴

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : فیزیک

گروه : گروه هسته‌ای

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهرا کیانی هرچگانی به شماره دانشجویی: ۹۱۰۶۳۳۴

تحت عنوان: مشخص نمودن حفره هوا در بتون با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما به روش مونت کارلو

در تاریخ ۱۳۹۴/۶/۳۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : دکتر حسین توکلی عنبران

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی : دکتر عنابستانی		نام و نام خانوادگی : دکتر محمدرضا شجاعی
			نام و نام خانوادگی : دکتر حسن حسن آبادی

تقدیم بہ

خدائی کہ آفرید

جہان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق

را

و بہ پدر، مادر و خواہر عزیزم کہ عشقان را در وجودم دمید

پاسگذاری

پاس آفریننده عشق را و پاس کسانی که آموختن را عشق می دانند. با پاس از استاد
که انقدرم جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران که راهمایی های ارزشمند، تشویق ها و
سعه صدر ایشان باعث دلگرمی در انجام پروژه حاضر گردید. همچنین از تمام کسانی که در به
سرانجام رسیدن پروژه مرایاری نموده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چشم دل باز کن که جان بینی آن چه نادیدنی است آن بینی

دل هر زده که بشکافی آفتابش در میان بینی

تعهد نامه

اینجانب زهرا کیانی هرچگانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مشخص نمودن حفره هوا در بتون با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما به روش مونت کارلو تحت راهنمایی دکتر حسین توکلی عنبران متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.

چکیده:

بتن به عنوان یک ماده‌ی ساختمانی بسیار مهم سال‌هاست که در صنعت ساختمان و سازه‌های دیگر به کار رفته است. در صورتی که این ماده طبق اصول صحیح ساخته و نگهداری شود، پایایی و دوام بالایی خواهد داشت. اولین گام در هر پروژه‌ی ترمیم یا بهسازی، ارزیابی دقیق و منطقی از وضعیت فعلی سازه است. اما در اثر انتخاب مصالح نامناسب، کیفیت ضعیف اجرا و عدم نگهداری، خرابی‌هایی به ویژه در مناطق سخت و خورنده برای بتن اتفاق می‌افتد. ممکن است بتن در حین کاربرد نیز دچار زوال یا خرابی شود و در نتیجه امکان دارد بتن موجود نتواند آن گونه که در اصل مورد نظر بوده و طراحی شده است، عمل نماید.

در طی سالیان متمادی آزمایش‌های مختلف عمرانی و فیزیکی در سیمان و بتن جهت بالاتر بردن ویژگی‌های این مواد انجام شده است. میکروسلیس، آنالیز تصویری، کوره سرباره و ... از جمله روش‌های مفید جهت بالاتر بردن کیفیت بتن می‌باشند که در طی پژوهش‌های مختلف صورت گرفته‌اند. کیفیت مخلوط سیمان و بتن بستگی شدیدی به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و معدنی آن‌ها دارد. بر پایه‌ی این ویژگی‌ها محققان از دستورالعمل‌هایی مناسب جهت بهتر نمودن عملکرد بتن و سیمان استفاده نمودند. بنابراین به منظور مقاوم‌تر نمودن مخلوط‌های سیمانی و بتنی، تعیین حفره‌ها و تخلخل‌های مختلف در بتن امری ضروری می‌باشد. در پژوهش‌های قبلی صورت گرفته از روش فلش لیزر جهت اندازه‌گیری حرارت ویژه استفاده شده است. در راستای بهبود بخشیدن به این پژوهش‌ها و افزایش کیفیت بتن، حفره‌های موجود در بتن را بررسی نمودیم. در این پژوهش با توجه به اهمیت دوام بتن، مکان‌یابی حفره‌ی هوا در بتن با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما به روش مونت کارلو، صورت گرفته تا مورد بهره‌برداری دست‌اندرکاران بتنی قرار گیرد. هدف از این آزمایش افزایش مقاومت کاری بتن می‌باشد. مواد به کار رفته در این آزمایش، بتن مکعبی شکل ساخته شده از سیمان با ابعاد ۱۵ cm می‌باشد. آشکارساز HPGe در یک سمت بتن و چشمه ^{137}Cs در سمت دیگر بتن قرار گرفتند.

نتایج حاصل از مکان‌یابی حفره، توسط کد شبیه‌سازی بدست آمد و عمق حفره‌ی هوا و تفکیک مکانی دو حفره مورد بررسی قرار گرفتند و کنتراست حاصل از آن‌ها بدست آمد و به این صورت بیش‌ترین عمقی که حفره‌ی هوا می‌تواند در آن قرار گیرد تعیین گردید. طبق این پژوهش حفره‌ای که در سطح بتن قرار دارد بیش‌ترین ضریب تضعیف و انرژی را جذب می‌کند و باعث افزایش تخریب بتن می‌شود. همچنین بهترین دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز از بین شعاع‌های مختلف از قبیل ۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ برای دهانه‌ی موازی‌ساز تعیین شد و بهترین دهانه با شعاع ۱ cm که دارای بیش‌ترین کنتراست و قدرت تفکیک پذیری بالا بود، بدست آمد. خطای نسبی کنتراست زیر ۵٪ بود که بهترین حالت را به دست می‌دهد.

کلمات کلیدی: پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما، شبیه‌سازی به روش مونت کارلو، آشکارساز HPGe، حفره هوا، بتن، کنتراست.

فهرست مطالب

۱	فصل اول مبانی فیزیکی	۱
۲	۱-۱ مقدمه:	۱-۱
۵	۲-۱ پرتوهای گاما:	۲-۱
۶	۳-۱ جذب نمایی:	۳-۱
۷	۴-۱ ساز و کار برهم کنش:	۴-۱
۷	۵-۱ مفاهیم:	۵-۱
۸	۶-۱ تابش‌های الکترومغناطیسی:	۶-۱
۹	۷-۱ تولید زوج:	۷-۱
۱۰	۸-۱ اثر فوتوالکتریک:	۸-۱
۱۱	۹-۱ پراکندگی کامپتون:	۹-۱
۱۴	۱۰-۱ ضریب تضعیف کل:	۱۰-۱
۱۷	۱۱-۱ آشکارسازهای نیمرسانا:	۱۱-۱
۱۸	۱۲-۱ پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز:	۱۲-۱
۲۰	۱۳-۱ آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe):	۱۳-۱
۲۱	۱۴-۱ آسیب ناشی از تابش بر آشکارسازهای نیمرسانا:	۱۴-۱
۲۳	فصل دوم کد شبیه‌سازی MCNP	۲۳
۲۴	۱-۲ مقدمه:	۱-۲
۲۵	۲-۲ تاریخچه‌ی MCNP:	۲-۲
۲۶	۳-۲ روش مونت کارلو در تراپرد ذرات:	۳-۲
۲۷	۴-۲ واکنش‌ها و داده‌های هسته‌ای:	۴-۲
۲۸	۵-۲ مشخصات چشمه:	۵-۲
۲۹	۶-۲ tally و خروجی:	۶-۲
۲۹	۷-۲ هندسه‌ی MCNP:	۷-۲
۳۰	۸-۲ خطای هندسی:	۸-۲

۳۰.....	کارت سلول ۹-۲
۳۲.....	کارت سطوح ۱۰-۲
۳۲.....	کارت تعریف صفحه ۱۱-۲
۳۲.....	کارت P ۱-۱۱-۲
۳۳.....	کارت PX ۲-۱۱-۲
۳۳.....	کارت PY ۳-۱۱-۲
۳۳.....	کارت PZ ۳-۱۱-۲
۳۴.....	کارت سطوح مکعب ۱۲-۲
۳۴.....	کارت تعریف کره ۱۳-۲
۳۴.....	کارت S ۱-۱۳-۲
۳۴.....	کارت SO ۲-۱۳-۲
۳۴.....	کارت SX ۳-۱۳-۲
۳۵.....	کارت SY ۴-۱۳-۲
۳۵.....	کارت SZ ۵-۱۳-۲
۳۵.....	کارت تعریف استوانه ۱۴-۲
۳۵.....	کارت C/X ۱-۱۴-۲
۳۶.....	کارت CX ۲-۱۴-۲
۳۶.....	کارت C/Y ۳-۱۴-۲
۳۶.....	کارت CY ۴-۱۴-۲
۳۷.....	کارت C/Z ۵-۱۴-۲
۳۷.....	کارت داده ۱۵-۲
۳۸.....	کارت نوع مسأله (MODE) ۱-۱۵-۲
۳۹.....	چشمه و معیارهای آن ۲-۱۵-۲

فصل سوم شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده از مکان‌یابی حفره‌ی هوا در بتن.....	۴۱
۱-۳ مقدمه.....	۴۲
۲-۳ محاسبات عددی.....	۴۵
۳-۳ XCOM.....	۴۹
۴-۳ انرژی چشمه.....	۵۷
۵-۳ زاویه‌ی پراکندگی.....	۵۷
۶-۳ شبیه‌سازی.....	۵۹
۷-۳ مقایسه کنتراست حفره‌ها در شش عمق مختلف.....	۶۸
۸-۳ تعیین شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز.....	۶۹
۹-۳ تعیین بیشینه عمق قرارگیری تک حفره‌ی هوا در بتن.....	۷۳
۱۰-۳ تعیین بیشینه عمق قرارگیری دو حفره‌ی هوا مماس در بتن.....	۷۵
۱۱-۳ مقایسه کنتراست‌های بدست آمده برای حالات مختلف حفره در بتن.....	۸۱
۱۲-۳ بحث و نتیجه‌گیری.....	۸۲
پیشنهادات.....	۸۴
پیوست نحوه‌ی اجرای نرم‌افزار XCOM.....	۸۵
منابع.....	۹۴

فهرست جداول

- جدول (۱-۳) مقادیر ضریب تضعیف جرمی بتن با استفاده از نرم افزار Xcom..... ۴۹
- جدول (۲-۳) تغییرات ضریب تضعیف جرمی بتن با استفاده از نرم افزار Xcom..... ۵۰
- جدول (۳-۳) ترکیبات تشکیل دهنده هوا همراه با درصد وزنی مربوط به آنها..... ۵۴
- جدول (۴-۳) تغییرات ضریب تضعیف جرمی هوا با استفاده از نرم افزار Xcom..... ۵۵
- جدول (۵-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۱ cm از مرکز بتن..... ۶۲
- جدول (۶-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۲ cm از مرکز بتن..... ۶۳
- جدول (۷-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۳ cm از مرکز بتن..... ۶۴
- جدول (۸-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۴ cm از مرکز بتن..... ۶۵
- جدول (۹-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۵ cm از مرکز بتن..... ۶۶
- جدول (۱۰-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۶ cm از مرکز بتن..... ۶۷
- جدول (۱۱-۳) تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکارساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱ cm از سطح بلوکه قرار دارد..... ۷۰
- جدول (۱۲-۳) تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکارساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه قرار دارد..... ۷۱
- جدول (۱۳-۳) مقایسه‌ی تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکار. در دو حالت. (a) آشکارساز در فاصله‌ی ۱ cm از سطح بلوکه است. (b) آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه است..... ۷۲
- جدول (۱۴-۳) تغییرات کنتراست و خطا مربوط به شش حفره با شعاع‌های مختلف در عمق ۶ cm از مرکز بتن..... ۷۴
- جدول (۱۵-۳) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۰/۴۵ cm..... ۷۶
- جدول (۱۶-۳) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۱/۵ cm..... ۷۷
- جدول (۱۷-۳) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۲/۵ cm..... ۷۸
- جدول (۱۸-۳) خلاصه‌ای از نتایج محاسبه کنتراست تک حفره‌ی هوا در بتن توسط کد MCNP..... ۸۲
- جدول (۱۹-۳) خلاصه‌ای از نتایج محاسبه کنتراست دو حفره‌ی هوا در بتن توسط کد MCNP..... ۸۳

فهرست نمودار

- نمودار (۱-۳) تغییرات ضریب تضعیف جرمی بتن بر حسب انرژی در بازه 0.001 MeV تا 1000000 با استفاده از نرم افزار Xcom..... ۴۹
- نمودار (۲-۳) تعیین ضریب تضعیف جرمی هوا بر حسب انرژی در بازه 0.001 MeV تا 1000000 با استفاده از نرم افزار Xcom ۵۵
- نمودار (۳-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 1 cm از مرکز بتن..... ۶۲
- نمودار (۴-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 2 cm از مرکز بتن..... ۶۳
- نمودار (۵-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 3 cm از مرکز بتن..... ۶۴
- نمودار (۶-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 4 cm از مرکز بتن..... ۶۵
- نمودار (۷-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 5 cm از مرکز بتن..... ۶۶
- نمودار (۸-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق 6 cm از مرکز بتن..... ۶۷
- نمودار (۹-۳) مقایسه کنتراست حفره با شعاع‌های 0.25 cm تا 3 cm در شش عمق 1 cm تا 6 cm ۶۸
- نمودار (۱۰-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی 1 cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های 0.001 cm ، 0.01 ، 0.025 ، 0.075 ، 0.150 ، 0.250 ، 0.350 ، 0.450 ، $1/5$ ، $2/5$ را برای حفره‌ی هوا در داخل بتن در نظر گرفتیم..... ۷۰
- نمودار (۱۱-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی 10 cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های 0.001 cm ، 0.01 ، 0.025 ، 0.075 ، 0.150 ، 0.250 ، 0.350 ، 0.450 ، $1/5$ ، $2/5$ را برای حفره‌ی هوا در داخل بتن در نظر گرفتیم..... ۷۱
- نمودار (۱۲-۳) مقایسه‌ی تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز هنگامی که (a) آشکارساز در فاصله‌ی 1 cm از سطح بلوکه است. (b) آشکارساز در فاصله‌ی 10 cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های 0.001 cm ، 0.01 ، 0.025 ، 0.075 ، 0.150 ، 0.250 ، 0.350 ، 0.450 ، $1/5$ ، $2/5$ را برای حفره‌ی داخل بتن در نظر گرفتیم..... ۷۲

- نمودار (۳-۱۳) تغییرات کنتراست و خطای کنتراست بر حسب شعاع در عمق ۶ cm از مرکز بتن..... ۷۴
- نمودار (۳-۱۴) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۰/۴۵ cm و در شش عمق مختلف بتن..... ۷۶
- نمودار (۳-۱۵) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۱/۵ cm و در شش عمق مختلف بتن..... ۷۷
- نمودار (۳-۱۶) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۲/۵ cm و در شش عمق مختلف بتن..... ۷۸
- نمودار (۳-۱۷) تغییرات کنتراست بر حسب فاصله، حفره‌های هوا از مرکز بتن با شعاع‌های ۰/۴۵ cm، ۱/۵ و ۲/۵ در شش عمق مختلف از ۰ تا ۶ cm قرار گرفته‌اند. نمودار قرمز کنتراست حفره با شعاع ۰/۴۵ cm، نمودار مشکی کنتراست حفره با شعاع ۱/۵ و نمودار آبی کنتراست حفره با شعاع ۲/۵ cm را نشان می‌دهند..... ۸۰

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) عبور یک باریکه‌ی کاملاً هم خط شده از تیغه‌ی ۱، هر ذره دست خوش برهم‌کنش‌های متفاوتی می‌شود. شکل (۱-۲) یک ذره یا بدون آسیب می‌ماند یا حذف می‌شود [۲۲]..... ۸
- شکل (۳-۱) پراکندگی کامپتون: برخورد کشسان بین یک فوتون و یک الکترون [۲۴]..... ۱۳
- شکل (۴-۱) وابستگی سطح مقطع کامپتون به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۲۴]..... ۱۴
- شکل (۵-۱) اهمیت نسبی سه برهم‌کنش عمده‌ی گاما [۲۴]..... ۱۵
- شکل (۶-۱) ضرایب تضعیف جرمی برای سرب ($z = 82, \rho = 11.5 * 10^3 \text{ kg/m}^3$) [۲۴]..... ۱۶
- شکل (۷-۱) شدت باریکه‌ی تراگسیلیده (فقط ذراتی که برهم‌کنش انجام نداده‌اند) به صورت نمایی با ضخامت ماده کاهش می‌یابد [۲۴]..... ۱۶
- شکل (۱-۲) تصویر گرفته شده از چیدمان آشکارساز، بتن و چشمه در مونت کارلو توسط برنامه MCNPX..... ۳۸
- شکل (۱-۳) نمونه‌ای از یک بتن بی‌کیفیت که به علت دارا بودن حفره‌های متعدد ترک‌دار شده است..... ۴۲
- شکل (۲-۳) هندسه قرارگرفتن آشکارساز، چشمه و بتن در روش مونت کارلو جهت تعیین ضریب تضعیف پرتو گاما..... ۴۵
- شکل (۳-۳) طرحی از چیدمان آشکارساز، بتن و چشمه در کد MCNP (آشکارساز در سمت راست بتن مکعب شکل و چشمه در قسمت بالای بتن قرار دارند). در این تصویر سطوح استفاده شده در کد MCNP با اعداد نشان داده شده‌اند..... ۴۸
- شکل (۴-۳) تصویر جدول بدست آمده از نرم‌افزار Xcom، در این جدول فرآیندهای مورد نظر خود را انتخاب نموده و آن‌ها را جدول بندی می‌نمائیم..... ۵۳
- شکل (۵-۳) طرح بدست آمده از کد MCNPX که بتن، آشکارساز، چشمه و دو حفره‌ی هوا با شعاع 0.6 cm به صورت مماس هم در عمق $4/9 \text{ cm}$ از بتن قرار گرفته‌اند..... ۵۹
- شکل (۶-۳) طرحی از چیدمان بتن، آشکارساز، چشمه به همراه فضای تعریف شده در MCNPX که این هندسه در آن قرار گرفته است..... ۶۰

فصل اول

مبانی فیزیکی

۱-۱ مقدمه:

پیشرفت صنایع شیمیایی و دیگر تکنولوژی‌های وابسته و مواد خورنده فولاد و مضر برای بتن از یک طرف و گسترش عملیات ساختمانی با ابعاد بزرگ در نواحی دارای آب و هوای نامساعد با خاک شور و آب‌های حاوی مواد معدنی زیاد از طرف دیگر و به خصوص بنا کردن سازه‌های بتنی مسلح مهم و حیاتی که باید دارای پایداری و دوام خاصی باشند، انجام دادن تحقیقات جامعی را در مورد دوام بتن مسلح و غیر مسلح ضروری ساخته است.

بتن در تعریف کلی به هر ماده یا محصولی گفته می‌شود که از یک ماده چسبنده، با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده است. ماده چسبنده مورد نظر عموماً از فعل و انفعالات سیمان‌های هیدرولیکی و آب تشکیل می‌شود. بتن سیمانی، ماده‌ای است که از مخلوط کردن سیمان و آب به عنوان ماده چسبنده، شن، ماسه و یا سنگدانه به عنوان جسم پر کننده ساخته می‌شود.

بتن به عنوان یک ماده ساختمانی، نزدیک به دو قرن است که در صنعت ساختمان به کار می‌رود. علی‌رغم این قدمت کاربرد، تا قبل از چند دهه اخیر، دوام بتن مورد توجه طراحان و سازندگان آن نبوده است. خرابی‌های زودرس به خصوص در ساختمان‌های با جدار نازک و ساختمان‌هایی که در محیط‌های مخرب برای بتن ساخته می‌شوند نظیر ساختمان‌های دریایی، نگرانی وسیعی را در اذهان طراحان بتن به وجود آورده است. لذا گسترش کاربرد بتن و بتن مسلح به عنوان مصالح ساختمانی با دوام در سازه‌ها اعم از ساختمان‌های مسکونی و بناهای بزرگ صنعتی، جاده‌ها، پل‌ها، اسکله‌ها و ... شناخت خواص بتن، تکنولوژی و کاربرد صحیح آن را برای تأمین عمر مفید طراحی شده، ضروری می‌سازد. منظور از عمر مفید مصالح ساختمانی یا اجزای ساختمان یا یک ساختمان، مدت زمانی است که طی آن بنا یا مصالح، خواص اصلی خود را برای برآوردن یک سری نیازهای تعیین شده بر حسب شرایط استفاده حفظ نمایند. بتن نیز به عنوان یکی از مصالح ساختمانی و اجزای تشکیل دهنده یک سازه، دارای عمر مفید مشخص و تعیین شده‌ای است که بر اثر آسیب دیدگی‌های ناشی از عوامل

گوناگون ممکن است تحت تأثیر قابل ملاحظه‌ای قرار گرفته و عملکرد مطلوبش را از دست بدهد. در حالی که سازه‌هایی همچون سدها و نیروگاه‌های آبی، پل‌ها، تونل‌ها، موج شکن‌ها، اسکله‌ها و دیگر سازه‌های بتنی یا بتنی مسلح با وجود قرار داشتن در معرض شرایط محیطی ویژه و حاد باید قرن‌ها عمر کنند، اما مواردی دیده شده است که بتن بر خلاف انتظار عملکرد خوبی نداشته و خیلی زودتر از عمر پیش‌بینی شده آسیب دیده و یا به کلی خراب شده است [۱].

بتن متشکل از سنگ، ماسه، سیمان و آب می‌باشد. ترکیبات سنگ و ماسه بستگی به جنس سنگ دارد که آن هم به منطقه و کانی و ... وابسته است. ترکیبات سیمان عبارت‌اند از: مصالح آهکی (حدود ۶۰٪ الی ۶۷٪)، رس (حدود ۳٪ الی ۷٪)، سیلیس (۱۷٪ الی ۲۷٪) و اکسیدهای معدنی که شامل: Fe_2O_3 اکسید آهن (۵٪ الی ۶٪)، Na_2O اکسید سدیم (۰/۲٪ الی ۱/۳٪)، MnO اکسید منیزیم (۰/۱٪ الی ۴/۵٪)، K_2O اکسید پتاسیم (۰/۲٪ الی ۱/۳٪)، Al_2O_3 اکسید آلومینیوم (۳٪ الی ۸٪).

اطلاعات مورد نیاز جهت بررسی ساختار یک ماده، به فوتون پراکنده شده در برخورد با الکترون بستگی دارد. در ماده‌ی هدف، اطلاعات کمی مربوط به چگالی الکترون را از طریق پراکندگی کامپتون بررسی می‌نمایند [۲]. ضرایب تضعیف به ترکیبات شیمیایی ماده‌ی جذب‌کننده و انرژی حاصل از پرتوهای گاما بستگی دارند. از روش عبور پرتو گاما برای اندازه‌گیری‌های پارامترهایی از قبیل ضریب تضعیف فوتون، تخلخل و ... استفاده می‌شود. وجود حفره در بتن باعث ایجاد عوامل مخرب در آن می‌شود و این امر سبب تخریب بتن در آب و هواهای متعدد از جمله سرما می‌گردد [۳]. این مسأله به اندازه حفره‌ی و محتوای آن و همچنین محل قرار گرفتن آن در بتن بستگی دارد [۴]. این مشخصات معمولاً بر اساس نیم فاصله بین حفره‌ها تعیین می‌گردند [۵-۷]. دو استاندارد در تعیین فاصله بین حفره‌ها در نظر گرفته می‌شود [۸،۹]. این دو اصل به تمام اندازه‌گیری‌های فواصل حفره نیازمند هستند [۱۰]. به منظور تعیین حفره‌هایی با ابعاد متفاوت و تفکیک مکانی آن‌ها در یک ضخامت

مشخص از بتن، از روش پراکندگی کامپتون یا به عبارت دیگر تست غیرمخرب (^1NDE) استفاده شده است [۱۱]. برای تعیین حفره در مواد پلاستیکی آزمایشاتی صورت گرفته و بیشترین عمق مربوط به حفره تعیین گردیده است [۱۲]. با استفاده از روش مونت کارلو می توان کمترین و بیشترین فاصله بین دو حفره را به دست آورد. این تحقیق توسط روش آنالیز و تصویر برداری صورت گرفته و فاصله‌های مختلف بین حفره‌های متعدد تعیین گشته است [۱۳]. همچنین با استفاده از روش آنالیز اندازه‌های مرتبط با حفره‌های گوناگون در عمق‌های مختلف نمونه‌هایی از قبیل بتن را محاسبه کرده‌اند [۱۴]. روش پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما، به دلیل نفوذ این پرتوها در عمق‌های مختلف و همچنین به دست دادن اطلاعات بسیار زیاد در مورد چگالی ماده‌ی هدف، از جمله روش‌های غیر مخرب و مفید در پزشکی و صنعت محسوب می‌گردد. [۱۵]. استفاده از روش پراکندگی کامپتون در پزشکی به ۱۰ سال گذشته برمی‌گردد. [۱۶].

مولین و همکارانش، توسط پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما، مواد کامپوزیت‌های چندلایه و بلوک‌هایی ساخته شده از آلومینیوم را با چشمه ^{60}Co و آشکارساز HPGe مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. شرف، روش‌های تست غیر مخرب را جهت توزیع چگالی در ماده توسط پراکندگی کامپتون و با آشکارساز Si(Li) ارائه نمود [۱۸]. در پژوهشی دیگر، شرما و همکارانش جهت تعیین ضخامت لوله‌ها و نوع ماده‌ی درون آن‌ها از روش پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما، استفاده نمودند [۱۹]. توسط پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما، ارتفاع پالس‌های حاصل از طیف‌های پرتوهای گاما را مشاهده نمودند. همچنین توسط روش مونت کارلو، تابع پاسخ آشکارساز را می‌توان محاسبه نمود. بدین شکل که تعداد فوتوهای رسیده به آشکار ثبت شده و ضریب تضعیف فوتون‌های ورودی را محاسبه می‌نماید [۱۸].

روش پراکندگی گاما برای بررسی مواد بسیار مناسب می‌باشد از این رو به شدت به چگالی اتمی و در

حقیقت به چگالی جرمی بستگی دارد که این مفهوم واکنش کامپتون بین فوتون‌های فرودی و الکترون‌های ماده را می‌رساند [۲۰]. پراکندگی کامپتون از یک حجم مشخص از ماده مورد بررسی، به وسیله‌ی یک آشکارساز در زاویه‌ای مشخص نسبت به هدف مشخص می‌شود [۲۱]. در این پژوهش هدف ما مشخص نمودن حفره‌ی هوا در بتن با استفاده از پراکندگی کامپتون پرتوهای گاما به روش مونت کارلو بوده است. در این برنامه آشکارساز مورد استفاده را، HPGe و در یک هندسه مناسب با چشمه‌ی ^{137}Cs ، در انرژی 0.661 MeV ، در نظر گرفتیم.

۲-۱ پرتوهای گاما:

پرتوهای گاما عبارت‌اند از تابش‌های الکترومغناطیسی تک انرژی که از هسته‌های برانگیخته حاصل از تبدیل پرتوزا گسیل می‌شوند. گسیل این پرتوها خود سازوکاری است که توسط آن انرژی برانگیختگی هسته‌ها آزاد می‌شود.

از آن‌جا که متخصص فیزیک بهداشت با تمام تابش‌های گسیل شده از مواد پرتوزا سروکار دارد و چون پرتو X از پرتو گاما متمایز ناپذیر است، در ارزیابی خطرات تابش باید پرتوهای مشخصه X حاصل از ساختار بدون هسته‌ای ایزوتوپ‌ها را نیز در نظر بگیرد. اما به دلیل انرژی اندک پرتوهای مشخصه‌ی X عمدتاً در مواردی که ایزوتوپ‌های پرتوزا در داخل محیط قرار می‌گیرند حائز اهمیت می‌شوند. از نظر فیزیک بهداشت، پرتوهای گامای حاصل از نابودی متقابل پوزیترون را باید در نظر گرفت. برای مثال، هنگامی که خطرات تابشی ^{22}Na را بررسی می‌کنیم، لازم است که علاوه بر فوتون گاما 1.277 MeV که در طرح واپاشی نموده می‌شود، دو فوتون ناشی از فرایند نابودی را نیز در نظر بگیریم. ابتدا فوتون‌های اخیر در طرح واپاشی نشان داده نمی‌شود. بنابراین، دستورالعمل کلی در فیزیک بهداشت این است که در تمام مسائل مربوط به حفاظها، دزسنجی و ارزیابی خطرات تابش، گسیل پوزیترون را باید همراه با تابش گاما در نظر گرفت [۲۲].

۳-۱ جذب نمایی:

چگونگی تضعیف تابش گاما با تضعیف هر دو تابش بتا و آلفا متفاوت است. در حالی که هر دوی این تابش‌های ذره‌ای بردهای مشخص در ماده دارند و بنابراین کاملاً قابل جذب‌اند، در مورد تابش گاما با افزایش ضخامت جذب فقط از شدت تابش کاسته می‌شود و جذب کامل صورت نمی‌گیرد. اگر اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسه‌ی خوب، یعنی با استفاده از یک باریکه‌ی تابشی باریک و کاملاً موازی انجام و اطلاعات حاصل روی کاغذ لگاریتمی رسم شود، در صورتی که پرتو گاما تک انرژی باشد، یک خط مستقیم حاصل خواهد شد. اگر پرتو گاما چند رنگ (چند انرژی) باشد، شکل به صورت منحنی خواهد شد.

معادله‌ی ضریب تضعیف پرتو گاما چنین است:

$$\mu = \frac{1}{t} \ln \frac{I_0}{I} \quad (1-1)$$

که در آن I_0 شدت پرتو گاما در ضخامت صفر ماده جذب، t ضخامت ماده جذب، I شدت پرتو گاما پس از عبور از ضخامت t در ماده جذب و μ ضریب منحنی جذب یا ضریب تضعیف است.

از آنجا که در یک معادله نمایی لازم است که نماد بدون بعد باشد، بعد μ و t باید عکس یکدیگر شود (یعنی اگر ضخامت جذب برحسب سانتی‌متر اندازه‌گیری شود آن‌گاه بعد ضریب تضعیف که ضریب تضعیف خطی μ_l خوانده می‌شود، باید در « cm^{-1} » باشد. اگر t برحسب g/cm^2 باشد، در این صورت ضریب جذب را ضریب تضعیف جرمی μ_m می‌گویند که بعد آن باید برابر (g/cm^2) یا (cm^2/g) باشد. ارتباط بین μ_l و μ_m با معادله‌ی زیر داده می‌شود:

$$\mu_l (cm^{-1}) = \mu_m \left(\frac{cm^2}{g} \right) \times \rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (2-1)$$

که در آن ρ چگالی ماده‌ی جذب است.

ضریب تضعیف عبارت است از کسری از باریکه‌ی پرتو گاما که در طی گذار از واحد ضخامت ماده‌ی جذب ناپدید می‌شود. ضریب تضعیفی را که بدین ترتیب تجزیه شده گاهی ضریب تضعیف کل می‌نامند [۲۲].

۴-۱ ساز و کار برهم‌کنش:

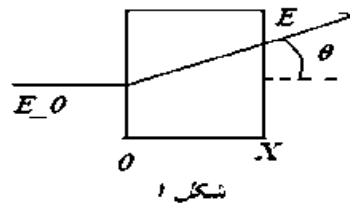
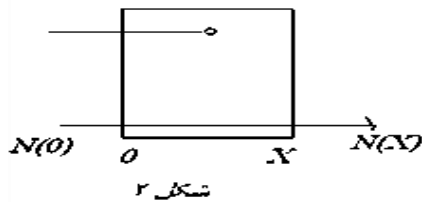
درست است که در عبور ذرات باردار و فوتون‌ها از ماده بر هم‌کنش‌هایی هم با هسته روی می‌دهد، ولی عمدتاً اتلاف انرژی و پدیده‌های پراکندگی اصلی ناشی از برهم‌کنش با الکترون‌های اتمی است. با توجه به این که هسته‌ها فقط کسر بسیار کوچکی در حدود 10^{-8} از حجم اتم‌ها را اشغال می‌کنند، احتمال برخورد ذره با الکترون تقریباً 10^{-8} بار بیش از احتمال برخورد با هسته است. از این رو ساز و کار غالب در کاهش انرژی ذرات باردار، پراکندگی کولنی آن‌ها در رویارویی با الکترون‌های اتمی است [۲۳].

در امور حفاظت در برابر تابش، چهار نوع برهم‌کنش اصلی پرتو گاما را با ماده حائز اهمیت می‌دانند. دو تا از این فرآیندها که یکی جذب فوتوالکتریک و دیگری پراکندگی کامپتون است، فقط به برهم‌کنش با الکترون‌های مداری ماده‌ی جاذب مربوط می‌شوند، در حالی که انرژی‌های فوتون‌ها خیلی از $1/02 \text{ MeV}$ (انرژی معادل جرم سکون دو الکترون) بیشتر نیست، نقش غالب خواهند داشت. در حالی که انرژی فوتون‌ها بیش‌تر است، تولید زوج که نتیجه‌ی تبدیل مستقیم انرژی الکترومغناطیسی به جرم است، به وقوع خواهد پیوست. همه‌ی این برهم‌کنش‌ها به گسیل الکترون از ماده‌ی جاذب منجر می‌شوند. فوتون‌ها با انرژی خیلی زیاد ($E \gg 2 m_0c^2$) همچنین ممکن است جذب هسته‌های اتمی ماده‌ی جاذب شوند که در این صورت، هسته‌های برانگیخته، طی چند واکنش هسته‌ای تابش‌های دیگری از خود گسیل خواهند کرد [۲۲].

۵-۱ مفاهیم:

باریکه‌ای کاملاً هم‌خط شده از ذرات تک انرژی را که از تیغه‌ای از ماده عبور می‌کنند در نظر می‌گیریم. خواص باریکه پس از عبور به طبیعت ذرات و نوع ماده‌ی مورد گذار بستگی دارد و ما ابتدا دو حالت حدی را که شدیداً مورد توجه هستند بررسی می‌کنیم. در حالت اول که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، ذره‌ی تابشی دست‌خوش برهم‌کنش‌های متعددی می‌شود. ذره در برهم

کنش مقدار کمی از انرژی خود را از دست می‌دهد و تحت زاویه ی کوچکی پراکنده می‌شود. در حالت دوم که در شکل (۱-۲) تشریح شده است، یا ذره بدون هیچ آسیبی از ماده‌ی مورد گذار عبور می‌کند و یا در یک برخورد مهلک از باریکه حذف می‌شود.



شکل (۱-۱) عبور یک باریکه‌ی کاملاً هم خط شده از تیغه‌ی ۱، هر ذره دست خوش برهم‌کنش‌های متفاوتی می‌شود. شکل (۲-۱) یک ذره یا بدون آسیب می‌ماند یا حذف می‌شود [۲۲].

۱-۶ تابش‌های الکترومغناطیسی :

پرتوهای ایکس و پرتوهای گاما تابش الکترومغناطیسی هستند. اگر آن‌ها به صورت ذره در نظر بگیریم، وقتی با سرعت نور، c ، حرکت می‌کنند، جرم سکون و بار آن‌ها صفر است. پرتوهای ایکس و پرتوهای گاما وقتی به صورت ذره در نظر گرفته می‌شوند، مشترکاً فوتون نامیده می‌شوند. رابطه‌ی بین انرژی، بسامد و طول موج λ عبارت است از:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad (۱-۳)$$

تمایز روشنی بین پرتوهای ایکس و پرتوهای گاما وجود ندارد. عمدتاً، فوتون‌های با $E < 1MeV$ را پرتو ایکس می‌نامند. γ ها، فوتون‌های با $E > 1MeV$ هستند. تولید پرتوهای ایکس عمدتاً در اثر گذارهای اتمی صورت می‌گیرد. پرتوهای گاما در گذارهای هسته‌ای گسیل می‌شوند. سیاهه‌ی برهم‌کنش‌های ممکن فوتون‌ها طویل است. در این‌جا فقط سه مورد از آن‌ها مورد بررسی قرار خواهیم داد: اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، و تولید زوج [۲۳].

۷-۱ تولید زوج :

فوتونی که انرژی اش بیش تر از $1/0.2 \text{ MeV}$ است، هنگامی که از نزدیکی یک هسته می گذرد، ممکن است خود به خود نابود و انرژی اش به صورت یک پوزیترون و یک الکترون پدیدار شود.

جرم هر یک از دو ذره برابر $c^2 m_0$ یا 0.51 MeV و انرژی جنبشی کل آن ها در حدود $(hf - 2m_0 c^2)$ است. برای حفظ پایستگی تکانه، لازم است که این تبدیل انرژی به جرم در حضور یک ذره دیگر (نظیر یک هسته) صورت گیرد. انرژی جنبشی هسته ای پس زنده خیلی کم است. بنابراین در عمل می توان گفت که آن چه از انرژی فوتون بعد از تشکیل جرم زوج باقی می ماند، به صورت انرژی جنبشی زوج پدیدار می شود. این پدیده ممکن است در مجاورت یک الکترون نیز صورت گیرد، ولی احتمال وقوع آن در مجاورت هسته بسیار بیش تر است. علاوه بر این، انرژی آستانه برای تولید زوج در مجاورت الکترون برابر با $4m_0 c^2$ است. این انرژی آستانه بزرگ تر، از آن جهت ضروری است که الکترون - پوزیترون تقریباً متناسب است $(z^2 + z)$ و از این رو مواد جاذب با اعداد اتمی بالاتر اهمیت بیشتری در این مورد خواهند داشت. وقتی انرژی فوتون از مقدار آستانه $1/0.2 \text{ MeV}$ تا 5 MeV افزایش یابد، سطح مقطع هم به آهستگی افزایش خواهد یافت. برای انرژی های بالاتر، سطح مقطع متناسب با لگاریتم انرژی فوتون است. همین سطح مقطع فزاینده است که منجر به افزایش ضریب تضعیف در انرژی های بالا می شود. پس از تولید زوج، پوزیترون و الکترون به سمت جلو (نسبت به جهت فوتون اولیه) پرتاب می شوند و انرژی جنبشی شان را، همانند هر الکترون پر انرژی دیگر از طریق برانگیزش، یونش، و تابش ترمزی از دست می دهند. هنگامی که پوزیترون تمام انرژی جنبشی اش را از دست داد، با یک الکترون ترکیب می شود و دو کوانتوم تابش نابودی تولید می کند که انرژی هر کدام برابر 0.51 MeV است. از این رو هنگامی که فوتونی با انرژی 1.0 MeV از جاذبی سربی عبور می کند، به یک زوج الکترون - پوزیترون تبدیل می شود که انرژی جنبشی هر یک $4/5 \text{ MeV}$ است. این انرژی جنبشی هم مثل انرژی ذرات بتا در ماده ی جاذب تلف می شود. آن گاه پوزیترون در اثر ترکیب با یک الکترون از ماده ی جاذب نابود می شود و به این ترتیب دو فوتون با انرژی های

0/51 MeV در ماده‌ی جاذب خارج می‌شوند (این فوتون‌ها همچنین می‌توانند در فرآیندهای پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک شرکت کنند). بدین ترتیب حاصل برهم‌کنش تولید زوج در این حالت چنین می‌شود: یک فوتون منفرد به انرژی 10 MeV به صورت دو فوتون با انرژی‌های 0/51 MeV در می‌آیند و 8/98 MeV از انرژی باقی مانده در محیط جاذب تلف می‌شود.

۸-۱ اثر فوتوالکتریک :

اثر فوتوالکتریک، برهم‌کنشی است بین یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید. در اثر این برهم‌کنش فوتون ناپدید می‌شود و یکی از الکترون‌های اتمی به صورت یک الکترون آزاد به نام فوتوالکترون به بیرون رانده می‌شود. به دلیل عدم پایداری انرژی و تکانه، یک الکترون آزاد نمی‌تواند فوتون را کاملاً جذب کند از این رو فوتوالکتریک برای فوتون فرودی با انرژی معین گرایش زیادی به انجام شدن در مقیدترین لایه‌ی الکترونی قابل دسترس اتم دارد. چون در این صورت تکانه به آسانی به اتم انتقال داده می‌شود. انرژی جنبشی فوتوالکترون لایه‌ی K عبارت است از:

$$E_e = h\nu - B_k \quad (4-1)$$

که B_k در آن انرژی یونندگی (کار لازم برای کندن الکترون از) لایه‌ی K است. احتمال رخداد این برهم‌کنش را سطح مقطع فوتوالکتریک یا ضریب فوتوالکتریک می‌نامند.

سطح مقطع در محدوده‌ی انرژی از 0/1 MeV تا 0/35 MeV با عدد اتمی Z و طول موج تابش λ به شکل:

$$\sigma_T = Z^5 \lambda^{7/2} \quad (5-1)$$

تغییر می‌کند. به‌علاوه در جذب فوتوالکتریک جهش‌های ناپیوسته‌ای در انرژی‌های متناظر با انرژی بستگی لایه‌های الکترونی وجود دارد. یعنی، انرژی بستگی یک الکترون از لایه‌ی K، مثلاً در سرب برابر

۸۸KeV است. فوتون‌های با انرژی کم‌تر از این مقدار نمی‌توانند فوتوالکتردهای لایه‌ی K سرب را آزاد کنند. با افزایش انرژی فوتون به بیش از ۸۸KeV، آمادگی الکترون‌های لایه‌ی K برای شرکت در فرآیند جذب فوتوالکتریک سبب افزایش ناگهانی احتمال جذب می‌شود که به لبه‌ی جذب K معروف است. حفره‌ی الکترونی ایجاد شده در اتم به واسطه‌ی بیرون اندازی فوتوالکتردهای منجر به گسیل پرتو ایکس مشخصه یا فوتوالکتردهای کم انرژی موسوم به الکترون‌های اوژه از لایه‌های الکترونی کم‌مقیدتر به عنوان یک فرآیند ثانوی برای اتم‌های سبک می‌گردد [۲۴].

۹-۱ پراکندگی کامپتون

همان‌گونه که در شکل (۱-۳) نموده شده است، پراکندگی کامپتون عبارت است از برخوردی کشسان بین یک فوتون و یک الکترون آزاد (الکترون آزاد الکترونی است که انرژی بستگی‌اش به اتم خیلی کم‌تر از انرژی الکترون فرودی است). البته، در شرایط متعارفی، تمام الکترون‌های موجود در یک محیط آزاد نیستند بلکه مقیدند. با این همه، اگر انرژی فوتون از مرتبه‌ی KeV یا بیشتر باشد، در حالی که انرژی بستگی الکترون از مرتبه‌ی eV است، الکترون را می‌توان آزاد انگاشت. پس از یک پراکندگی کامپتون، فوتون ناپدید نمی‌شود. فقط راستای حرکت و انرژی آن تغییر می‌کنند. انرژی فوتون به مقدار معینی کاهش می‌یابد که به الکترون داده می‌شود. بنابراین، از پایستگی انرژی (با فرض این که الکترون پیش از برخورد ساکن است) خواهیم داشت:

$$T = E_{\gamma} - E_{\gamma'} \quad (۶-۱)$$

اگر معادله‌ی قبل را همراه با معادله‌های پایستگی اندازه‌ی حرکت به کار بریم، انرژی فوتون پراکنده را به صورت تابعی از زاویه‌ی پراکندگی θ می‌توان محاسبه کرد.

نتیجه عبارت است از :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos\theta)E_{\gamma}/mc^2} \quad (۷-۱)$$

با استفاده از معادله‌های انرژی جنبشی الکترون به دست می‌آید :

$$T = \frac{(1-\cos\theta)E_\gamma/mc^2}{1+(1-\cos\theta)E_\gamma/mc^2} E_\gamma \quad (8-1)$$

موضوع خیلی مهم در اندازه‌گیری پرتوها، انرژی بیشینه و کمینه‌ی فوتون و الکترون پس از برخورد است. انرژی کمینه‌ی فوتون وقتی به دست می‌آید که $\theta = \pi$. این البته، با انرژی بیشینه‌ی الکترون هم‌خوان است.

از معادله‌ی،

$$E_{\gamma,min} = \frac{E_\gamma}{1+2E_\gamma/mc^2} \quad (9-1)$$

و

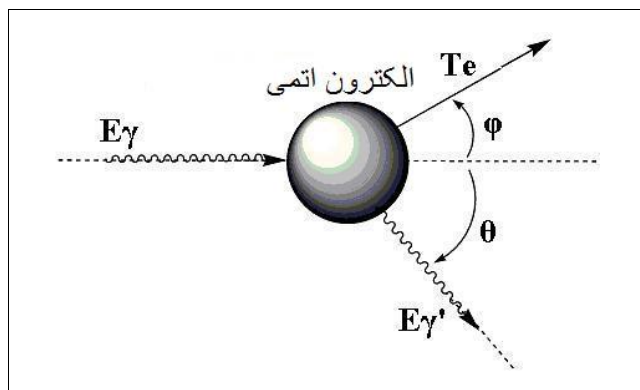
$$T_{max} = \frac{2E_\gamma/mc^2}{1+2E_\gamma/mc^2} E_\gamma \quad (10-1)$$

این که انرژی فوتون پراکنده، در $\theta = 0$ به بیشینه می‌رسد، به این معناست که برخورد رخ نداده است. از معادله‌ی (9-1) و (10-1)،

$$E_{\gamma,max} = E_\gamma$$

$$T_{min} = 0$$

نتیجه‌ای که از معادله‌ی (9-1) می‌توان گرفت این است که انرژی کمینه‌ی فوتون پراکنده بزرگ‌تر از صفر است. بنابراین، در پراکندگی کامپتون، غیر ممکن است که تمامی انرژی فوتون فرودی به الکترون داده شود. انرژی داده شده به فوتون در فاصله‌ای برابر با برد الکترون در داخل ماده از دست می‌رود. فوتون پراکنده ممکن است فرار کند [۲۳].



شکل (۳-۱) پراکندگی کامپتون: برخورد کشسان بین یک فوتون و یک الکترون [۲۴].

احتمال رخداد پراکندگی کامپتون را اصطلاحاً ضریب کامپتون یا سطح مقطع کامپتون می‌نامند. این ضریب تابع پیچیده‌ای از انرژی فوتون است، اما می‌توان آن را به صورت

$$\sigma(m^{-1}) = NZf(E_\gamma) \quad (11-1)$$

نوشت که در آن

احتمال رخداد بر هم‌کنش کامپتونی بر واحد راه پیموده $\sigma =$

تابعی از E_γ است

اگر چگالی اتم، N ، را صریحاً بنویسیم، معادله‌ی (۱۱-۱) به شکل زیر در می‌آید

$$\sigma \sim \rho \frac{N_A}{A} Z f(E_\gamma) \sim \rho \left(\frac{N_A}{A} \right) \frac{A}{2} f(E_\gamma) \sim \rho \frac{N_A}{2} f(E_\gamma) \quad (12-1)$$

در به دست آوردن معادله‌ی (۱۲-۱) از این واقعیت استفاده شده است که برای اکثر مواد، جز هیدروژن، $A \approx 2Z$ تا $A \approx 2.6Z$ است. بنابر معادله‌ی (۱۲-۱)، احتمال رخداد پراکندگی کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده بوده و در عوض به چگالی ماده وابسته است.

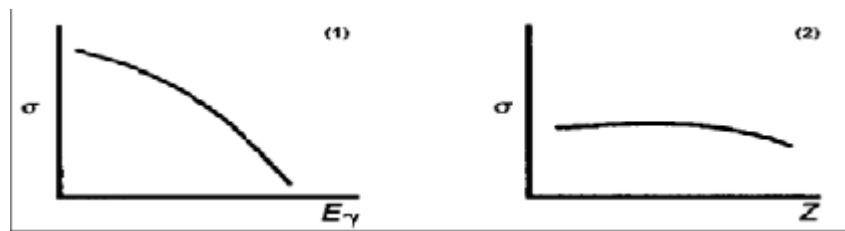
شکل (۴-۱) نشان می‌دهد که چگونه σ به صورت تابعی از E_γ و Z تغییر می‌کند. اگر سطح مقطع کامپتون را برای یک ماده بدانیم، با استفاده از معادله‌ی (۱۱.۱) می‌توان آن را برای هر ماده‌ی دیگری

محاسبه کرد (برای فوتون‌های با انرژی یکسان):

$$\sigma_2(m^{-1}) = \sigma_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (13-1)$$

که σ_1 و C_2 بر حسب m^{-1} هستند، اگر σ_2 و σ_1 بر حسب m^2/kg داده شوند، معادله‌ی (۱۳-۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$\sigma_2 \left(\frac{m^2}{kg} \right) = \sigma_1 \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (14-1)$$



شکل (۴-۱) وابستگی سطح مقطع کامپتون به (۱) انرژی فوتون و (۲) عدد اتمی ماده [۲۴].

۱-۱۰ ضریب تضعیف کل

وقتی یک فوتون در درون یک ماده حرکت می‌کند، ممکن است از طریق هر یک از سه برهم‌کنش عمده‌ای که پیش از این مورد بحث قرار گرفت، برهم‌کنش نماید. فوتون ممکن است در اثر جذب فوتوالکتریک یا تولید زوج نابود شود یا در اثر پراکندگی کامپتون منحرف شود و به آشکارساز نرسد. فوتون‌هایی به آشکارساز می‌رسند که هیچ برهم‌کنشی نداشته باشند. البته تعداد این‌ها از فوتون‌های موجود در باریکه‌ی فرودی کم‌تر است [۲۳]. شکل (۵-۱) اهمیت نسبی سه برهم‌کنش یاد شده را وقتی E و Z تغییر می‌کنند نشان می‌دهد: فوتونی را با $E = 0.1 \text{ MeV}$ در نظر بگیرید. اگر این ذره در کربن ($Z = 6$) حرکت کند، اثر کامپتون برترین ساز و کاری است که این فوتون از طریق آن برهم‌کنش می‌نماید. اگر همین فوتون در ید حرکت کند ($Z = 53$)، برهم‌کنش فوتوالکتریک نقش برتر را دارد. برای یک گامای 1 MeV ، اثر کامپتون صرف نظر از این که Z چه باشد نقش برتر را دارد. اگر یک فوتون 10 MeV در کربن حرکت کند، بخش چشم‌گیر برهم‌کنش آن از طریق پراکندگی کامپتون است. همین فوتون اگر وارد ید شود، بیش‌تر از طریق تولید زوج برهم‌کنش خواهد کرد.

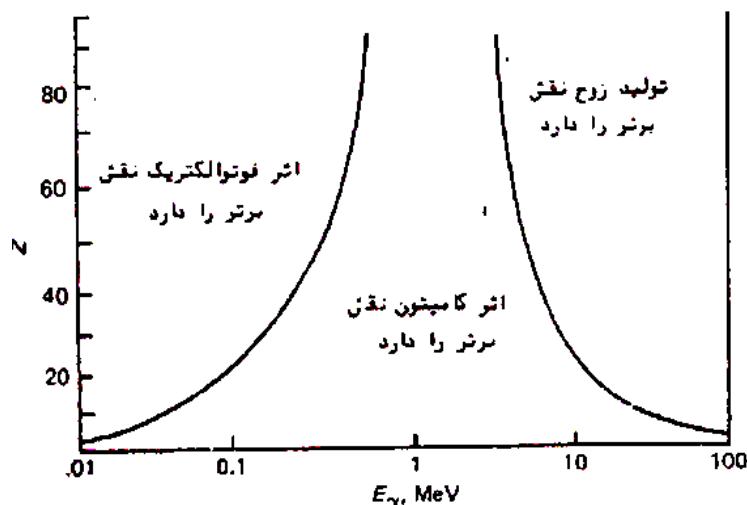
احتمال کل بر هم کنش، μ ، که اصطلاحاً ضریب تضعیف خطی کل نامیده می‌شود برابر با حاصل جمع سه احتمال است:

$$\mu(m^{-1}) = \tau + \sigma + k \quad (15-1)$$

از نظر فیزیکی، μ احتمال بر هم کنش بر واحد فاصله است.

جدول‌هایی هستند که μ را برای تمام عناصر، و برای بسیاری از انرژی‌های فوتون به دست می‌دهند. بیش‌تر جدول‌ها μ را بر حسب یکاهای m^2/kg (یا cm^2/g) می‌دهند، زیرا در این یکاها ذکر چگالی ماده ضرورتی ندارد. اگر μ بر حسب m^2/kg (یا cm^2/g) داده شود، آن را ضریب تضعیف جرمی کل می‌نامند. رابطه‌ی بین ضریب‌های خطی و جرمی به صورت زیر است:

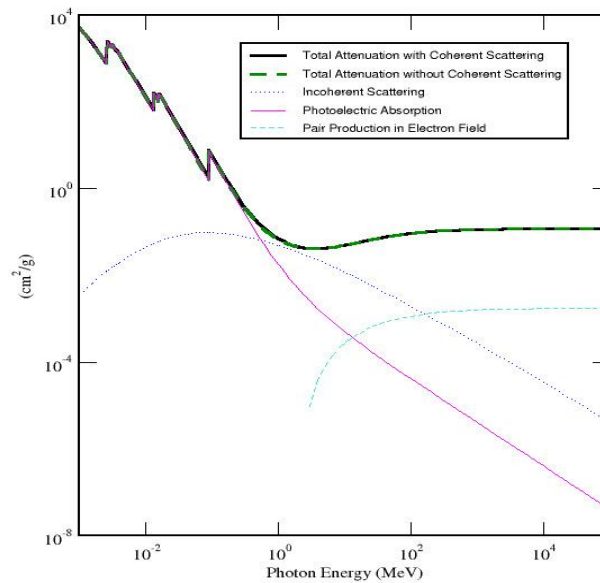
$$\mu(m^2/kg) = \frac{\mu(m^{-1})}{\rho(kg/m^3)} \quad (16-1)$$



شکل (۵-۱) اهمیت نسبی سه برهم‌کنش عمده‌ی گاما [۲۴].

شکل (۶-۱) تک تک ضریب‌ها و نیز ضریب تضعیف جرمی کل را برای سرب، به صورت تابعی از انرژی فوتون نشان می‌دهد. ضریب تضعیف جرمی کل دارای یک کمینه است زیرا وقتی E افزایش یابد، τ کاهش می‌یابد. و k افزایش می‌یابد، در حالی که σ چندان تغییری نمی‌کند. با این همه، کمینه‌ی μ برای تمام عناصر در یک انرژی رخ نمی‌دهد. برای سرب، μ در $E \sim 3.5 MeV$ به کمینه می‌رسد، برای

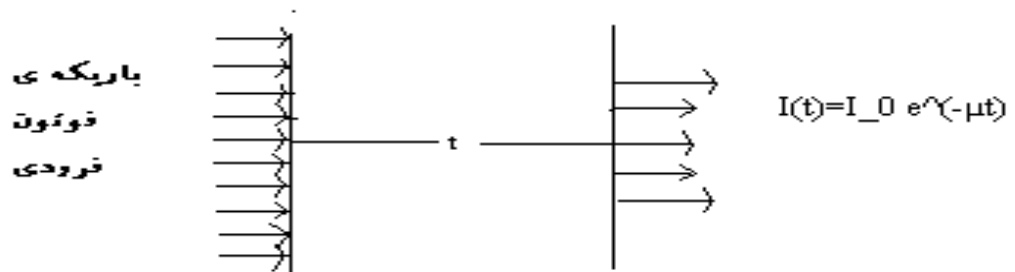
آلومینیوم، کمینه در 20 MeV، و برای NaI، در 5 MeV است.



شکل (۶.۱) ضرایب تضعیف جرمی برای سرب ($z = 82, \rho = 11.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) [۲۴].

اگر یک باریکه‌ی موازی از پرتوهای گامای تک انرژی وارد ماده‌ای به ضخامت t شود، کسری از باریکه که بی هیچ برهم‌کنشی از ماده می‌گذرد برابر $e^{-\mu t}$ است. شکل (۷-۱) احتمال این که یک فوتون بدون هیچ برهم‌کنشی از ضخامت t بگذرد چنین است:

$$t \text{ ضخامت از عبور } = \frac{\text{تعداد فرودی/تعداد عبور کرده}}{I_0} = \frac{I_0 e^{-\mu t}}{I_0} = e^{-\mu t}$$



شکل (۷-۱) شدت باریکه‌ی تراگسیلیده (فقط ذراتی که برهم‌کنش انجام نداده‌اند) به صورت نمایی با ضخامت ماده

کاهش می‌یابد [۲۴].

کاهش نسبی شدت، در عبور از ضخامت dt ماده برابر است با

$$-\frac{dI}{I} = \mu dt \quad (17-1)$$

و بنابراین شدت خروجی از ضخامت t عبارت است از

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (18-1)$$

ضریب تضعیف جرمی، μ/ρ ، برابر است با

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{t} \ln \frac{I_0}{I} \quad (19-1)$$

که در آن ρ چگالی ماده‌ی جاذب است.

۱۱-۱ آشکارسازهای نیمرسانا

آشکارسازهای نیمرسانا وسیله‌های حالت جامدی هستند که تقریباً مانند اتاقک‌های یونش کار می‌کنند. حامل‌های بار در نیمرساناها، از الکترون و حفره تشکیل می‌شوند. در حال حاضر، کارسازترین آشکارهای نیمرسانا از سیلیسیم و ژرمانیوم ساخته می‌شوند.

مهم‌ترین برتری آشکارسازهای نیمرسانا، در مقایسه با دیگر شمارنده‌های تابشی، قدرت تفکیک انرژی بسیار بالای آن‌ها است. یعنی توانایی آن‌ها در تفکیک انرژی ذرات از میان یک طیف چند-انرژی. امتیازهای دیگر عبارتند از:

- ۱- پاسخ خطی (ارتفاع تپ بر حسب انرژی ذره) در گستره‌ی وسیعی از انرژی.
- ۲- بازدهی بالاتر به ازای یک اندازه‌ی معین، به علت چگالی بالای ماده‌ی جامدی که در ساختمان آن‌ها به کار می‌رود.

۳- امکان ساختن آن‌ها به شکل‌های هندسی خاص.

۴- زمان خیزش سریع تپ (نسبت به شمارنده‌های گازی)

۵- توانایی کار در خلا.

۶- حساس نبودن به میدان‌های مغناطیسی

سرشتی‌های آشکارسازهای نیمرسانا نه تنها به نوع ماده‌ای که به کار می‌رود - مثل Ge و Si- بلکه به نحوه‌ی شکل دهی به نیمرسانا و آماده سازی آن نیز بستگی دارد. نوع، اندازه، شکل و نحوه‌ی آماده سازی بلوری نقش تعیین کننده‌ای در کار آشکارسازهای نیمرسانا دارند.

۱-۱۲ پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز

کار یک آشکارساز، اساساً مبتنی بر ویژگی‌های پیوند p-n با پیش‌ولت وارون بنا شده است. چگونگی کار آشکارسازهای نیمرسانا به ناحیه‌ی پیوند p-n که در آن میدان الکتریکی وجود دارد بستگی دارد الکترون‌ها و حفره‌هایی که در آن ناحیه تولید می‌شوند خود را در محیطی مشابه با آن چه که الکترون‌ها و یون‌ها در یک اتاق یونش می‌بینند می‌بایند با این همه اختلاف‌های بین این دو نوع آشکارساز وجود دارد.

در شمارنده‌های گازی تحرک الکترون هزاران بار بیش از تحرک یون‌هاست. در نیمرساناها تحرک الکترون فقط دو تا سه بار بیش از تحرک حفره‌هاست زمانی که طول می‌کشد تا همه‌ی بار تولید شده در یک شمارنده‌ی گازی جمع آوری شود از مرتبه‌ی میلی ثانیه است. در نیمرساناها ناحیه‌ی حساس شمارنده فقط چند میلی‌متر و سرعت الکترون‌ها و حفره‌ها چنان است که حامل‌های بار می‌توانند در زمانی از مرتبه‌ی 10^{-7} s ناحیه‌ی حساس را پیموده و جمع آوری شوند. در آشکارسازهای یونشی یا نیمرسانا همیشه هدف این است که تمام بارهای تولید شده از ذره‌ی ورودی جمع آوری شوند. این کارها با کاربست یک میدان الکتریکی در آشکارساز عملی می‌شود به گونه‌ای که هیچ باز ترکیبی از الکترون‌ها و یون‌ها (یا حفره‌ها) پیش از جمع آوری آن‌ها صورت نمی‌گیرد. در آشکارسازهای نیمرسانا

حتی اگر باز ترکیب صفر باشد بعضی از حامل‌های بار ممکن است در دام‌های بلور از قبیل کاستی‌های شبکه‌ای تهی جاها، و در رفتگی‌ها از دست بروند تابش فرودی ناراستی‌هایی در بلور ایجاد می‌کند که کارایی آن را خراب کرده و نتیجه طول عمر آن را کاهش می‌دهند.

ظرفیت پیوند $p-n$ مهم است زیرا بر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز تاثیر می‌گذارد. ظرفیت C عبارت است از

$$C = \epsilon \frac{A}{4\pi x_0} \quad (20-1)$$

که در آن

ϵ ثابت دی الکتریک ماده =

A مساحت سطح آشکار ساز =

x_0 عمق تهی (ضخامت آشکار ساز) =

داریم :

$$C \sim \frac{1}{\sqrt{V_b}} \quad (21-1)$$

خلاصه این که ماده‌ای که برای ساختن یک آشکارساز به کار می‌رود باید ویژگی‌های معینی داشته باشد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت هستند از

۱- مقاومت ویژه بالا. این عامل اصلی است زیرا در غیر این صورت جریان تحت اثر میدان الکتریکی شارش خواهد یافت و بار تولید شده از ذرات منجر به تهی خواهد داشت که ممکن است تحت الشعاع جریان دائمی قرار گیرد.

۲- **تحرک بالای حامل‌ها.** الکترون‌ها و حفره‌ها باید بتوانند به سرعت حرکت کنند و پیش از این که شانس باز ترکیب با گیر افتادن را پیدا کنند گردآوری شوند. این در تعارض با (۱) است زیرا در اجسام با مقاومت ویژه‌ی بالا تحرک حامل‌ها پایین است. ثابت شده است که مواد نیمرسانایی که با ناخالصی آلاینده شده‌اند دارای ترکیب مناسب مقاومت ویژه و تحرک حامل‌ها هستند.

۳- **توانایی تحمل میدان‌های الکتریکی قوی.** اهمیت آن ناشی از این واقعیت است که هر چه میدان قوی‌تر باشد جمع آوری بار سریع‌تر خواهد شد. همچنین وقتی میدان الکتریکی افزایش می‌یابد عمق ناحیه حساس برای بعضی آشکارسازها زیاد می‌شود.

۴- **شبکه‌ی بلوری کامل.** به غیر از ناخالص‌هایی که از بیرون تزریق می‌شود ماده‌ی آشکارساز نیمرسانا باید متشکل از یک شبکه‌ی بلوری کامل بدون هیچ‌گونه ناراستی، اتم گمشده یا اتم‌های میانی باشد هر یک از این ناراستی‌ها ممکن است به صورت یک دام برای بارهای در حال حرکت عمل کند.

۱-۱۳ آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe)

تولید ژرمانیوم با خلوص بالا (HPGe) با غلظت ناخالصی 10^6 اتم بر متر مکعب ساختن آشکارسازهای بدون سوق لیتیوم را امکان‌پذیر ساخته است. آشکارساز صرفاً با کار بست یک پیش ولت وارون در دو سر یک قطعه ژرمانیوم ساخته می‌شود، عمق حساس آشکارساز (لایه‌ی تهی شده) بستگی به غلظت ناخالصی و ولتاژ کار بسته دارد. چگونگی ساخت آشکارسازهای (HPGe) مانند روش‌های مربوط به آشکارسازهای Ge(Li) است با این تفاوت که دیگر به فرآیند سوق لیتیوم نیازی نیست.

مرحله‌ی مهم در ساخت آشکارسازهای (HPGe) نصب اتصالات‌های اهمی است اتصال سمت n (بر روی سطح جلویی) با پخش کردن لیتیوم در درون بلور یا با رسوب دادن طلا یا پالادیوم بر روی آن تأمین می‌شود در یک دستاورد تازه‌ی گزارش شده از سوی یکی از تولیدکنندگان، اتصال فلزی قسمت جلو حذف شده است اتصال خوب سمت پشت با استفاده از فلزات یا با کاشت برن تأمین می‌شود.

آشکارسازهای (HPGe) را به صورت تخت یا هم محور می‌سازند آشکارسازهای هم‌محور قلب مرکزی سوق داده نشده‌ی آشکارسازهای Ge(Li) را ندارند، بنابراین بخش مرکزی را در راستای محور بلور بر می‌دارند و اتصالی در داخل حفره‌ی مرکزی ایجاد می‌کنند آشکارسازهای HPGe را می‌توان هم با ژرمانیوم نوع n و هم با نوع p ساخت. کپه‌هایی از ژرمانیوم با خلوص بالا تا شعاع 60 mm تولید شده اند و این امر ساختن آشکارسازهای هم محور با حجمی تا $2 \times 10^5 \text{mm}^3$ را امکان پذیر ساخته است. برتری آشکارسازهای HPGe این است که می‌توان آن‌ها را در دمای اتاق نگهداری کرد زیرا در آن‌ها سوق لیتیم حضور ندارد.

۱-۱۴ آسیب ناشی از تابش بر آشکارسازهای نیمرسانا

ساخت و کار یک آشکارساز نیمرسانا بر پایه‌ی این فرض پیشین است که با یک بلور کامل که شامل مقدار معلومی ناخالصی است آغاز کنیم حتی اگر چنین چیزی در آغاز کار واقعیت داشته باشد آشکارساز نیمرسانا پس از این که در معرض تابش قرار گرفت آسیب خواهد دید. نوع اصلی آسیب ناشی از تابش از برخورد اتم ممکن است به یک مکان میانین جا به جا شود و به این ترتیب یک زوج تهی جا مکان میانین موسوم به ناراستی فرنکل ایجاد کند یک اتم پس زده ممکن است انرژی کافی برای جابه جا کردن اتم‌ها داشته باشد بنابراین یک ذره‌ی فرودی ممکن است چندین ناراستی فرنکل تولید کند.

کاستی‌های بلوری بر کار آشکارساز تأثیر می‌گذارند زیرا ممکن است به صورت مراکز گیراندازی الکترون‌ها و حفره‌ها درآیند یا ممکن است حالت‌های تازه‌ی انرژی بازده جمع‌آوری بار جریان نشتی زمان خیزش تپ قدرت تفکیک انرژی و سایر ویژگی‌های آشکارساز را تغییر دهند.

الکترون و فوتون در مقایسه با ذرات باردار و نوترون آسیب تابشی ناچیزی وارد می‌کنند. ذرات باردار سنگین‌تر و پرنرژی‌تر آسیب بیشتری از ذرات سبک‌تر و کم انرژی‌تر وارد می‌سازند.

آشکارسازهای Ge(Li) نسبت به پرتوهای گاما آسیب‌پذیر نیستند اما در یک میدان آمیخته $n-\gamma$ از

نوترون‌ها آسیب می‌بینند با این همه پس از گرم کردن و سوق دوباره می‌توان آسیب وارده را برطرف

کرد. آشکارسازهای HPGe تقریباً به همان اندازه‌ی آشکارسازهای Ge(Li) آسیب می‌بینند [۲۴].

فصل دوم

کد شبیه‌سازی MCNP

۱-۲ مقدمه

روش مونت کارلو^۱ یک روش عددی برای حل مسائل ریاضی به وسیله‌ی نمونه‌برداری تصادفی است. این روش به عنوان یک تکنیک عددی جامع بعد از ورود کامپیوتر به زمینه‌ی محاسبات عددی ظهور پیدا کرد. زمینه‌های کاربردی این روش با ظهور کامپیوترهای پیشرفته‌ی جدید، گسترش زیادی پیدا کرد [۲۵]. MCNP^۲ کد مونت کارلویی چند منظوره بوده که می‌تواند برای محاسبات ترابرد^۳ فقط نوترون؛ فقط فوتون؛ فقط الکترون؛ ترابرد حالات جفت شده‌ی نوترون/ فوتون/ الکترون؛ نوترون/ فوتون؛ فوتون/ الکترون و الکترون/ فوتون مورد استفاده قرار می‌گیرد. از موارد کاربرد MCNP می‌توان به استفاده از آن در حفاظت در برابر تابش و دزیمتری، محاسبات شیلد کردن تشعشعات مختلف، رادیوگرافی، فیزیک پزشکی، ایمنی بحرانیت هسته‌ای، طراحی و تحلیل آشکارسازها، اکتشاف نفت (Nuclear Oil Well Login)، طراحی هدف در شتاب‌دهنده‌ها، طراحی رآکتورهای شکافت و همجوشی و آلودگی‌زدایی، نام برد. MCNP توانایی پیکره‌بندی و شبیه‌سازی سه بعدی مواد را درون سلول‌هایی که با سطوح درجه‌ی یک و دو و نیز در بعضی حالات (مانند چنبره و بیضوی) درجه‌ی چهار مرزبندی شده‌اند، دارد. توانایی محاسبه‌ی ویژه‌ی مقادیر سیستم‌های حاوی مواد شکافت‌پذیر (K_{eff}) نیز یکی از خصوصیات ارزشمند کد است. یکی دیگر از نقاط قوت MCNP داشتن اطلاعات مربوط به انرژی‌های پیوسته است. تمام انواع واکنش‌هایی که نوترون‌ها در برخورد با هسته دارند (شکافت، پراکندگی الاستیک، پراکندگی غیر الاستیک و ...) در کد MCNP در نظر گرفته شده و کتابخانه‌های سطح مقطع این برهم‌کنش‌ها موجود است. در کد، برای اندرکنش فوتون‌ها، پراکندگی‌های همدوس و ناهمدوس، امکان گسیل فلونورسانس پس از جذب فوتوالکتریک، تولید زوج (الکترون پوزیترون)، گسیل در محل نابودی زوج و تابش ترمزی در نظر گرفته شده و کتابخانه‌های آن‌ها وجود دارد.

1. Monte carlo
2. Monte carlo N-particles
3. Transport

خصوصیت‌های ارزشمند و مهمی که MCNP را بسیار فراگیر کرده و استفاده از آن را آسان کرده است، توانایی کد در تولید چشمه‌های عمومی، سطحی، حجمی و چشمه‌های بحرانی، رسم هندسه‌ی ورودی و رسم خروجی برنامه، توانایی به کارگیری روش‌های کاهش واریانس، انعطاف‌پذیر بودن ساختار محاسبات خروجی و یک مجموعه‌ی وسیع از داده‌های سطح مقطع است. برنامه‌ی ورودی که توسط کاربر تولید و تعریف می‌شود، متعاقباً توسط کد MCNP خوانده می‌شود. فایل ورودی شامل اطلاعاتی درباره‌ی فضای مسأله از قبیل خصوصیات هندسه، توصیف مواد، انتخاب سطح مقطع‌ها، مکان و مشخصات چشمه‌ی نوترون، فوتون یا الکترون، نوع جواب خواسته شده یا توصیف Tally و تکنیک‌های کاهش واریانس استفاده شده برای بهبود بازدهی محاسبات و یا کاهش زمان انجام محاسبات است [۲۶].

۲-۲ تاریخچه‌ی MCNP

اولین تلاش‌ها به منظور استفاده از اعداد تصادفی در حل مسائل ریاضی، در سال ۱۷۷۲ آغاز شد و به دنبال آن لاپلاس در سال ۱۷۸۶ اظهار داشت که عدد π را می‌توان با استفاده از اعداد تصادفی ساخت. روش مونت کارلو از فعالیت‌های انجام شده در آزمایشگاه لوس آلاموس^۱ در طی سال‌های دهه‌ی ۱۹۴۰ در طول جنگ جهانی دوم و با تلاش دانشمندان برجسته‌ای از جمله انریکو فرمی^۲ ابداع شد. در سال ۱۹۴۷ فرمی دستگاهی که آن را FERMIAC نامید ساخت که قادر با استفاده از روش نمونه‌برداری تصادفی، حرکات نوترون‌ها را در یک ماده‌ی شکافت‌پذیر ردیابی و پیش‌بینی کند.

با پیشرفت در زمینه‌ی علوم کامپیوتر، روش مونت کارلو نیز پیشرفت‌های زیادی کرد و کامپیوتر در محاسبات مونت کارلو به کار گرفته شد. به این ترتیب در سال ۱۹۶۳ در لوس آلاموس اولین کد مونت کارلویی ترابرد ذرات به نام MCS نوشته شد. در سال ۱۹۶۵ به دنبال MCS، MCN برای حل مسائل اندرکنش نوترون نوشته شد. در نهایت در سال ۱۹۷۷، با توسعه و ادغام چندین برنامه که برای ذرات

1. Los Alamos
2. Enrico Fermi

مختلف نوشته شده بود، کد MCNP، که در آن زمان کد مونت کارلویی نوترون- فوتون نامیده می‌شد، تهیه گردید. با گذشت زمان، این کد توسعه داده شد و به صورت نسخه‌های مختلفی (از جمله MCNP3، MCNP4، MCNPX) به بازار عرضه گردید.

۲-۳ روش مونت کارلو در ترابرد ذرات

روش مونت کارلو می‌تواند به عنوان نظریه‌ی تکرار در یک فرآیند آماری (مانند واکنش ذرات هسته‌ای با مواد) مورد استفاده قرار گیرد و خصوصاً توسط کدهای کامپیوتری برای حل مسائل پیچیده‌ای که از روش‌های جبری استفاده کرده و قابل مدل شدن نیستند، مفید است. برای توصیف کلیه‌ی پدیده‌های طبیعی و در جایی که رخدادها از الگوهای آماری پیروی می‌کنند، قاعده‌ی توزیع احتمال حاکم است. فرآیند نمونه‌برداری آماری بر مبنای انتخاب اعداد تصادفی (بین صفر و یک) مانند انداختن تاس در بازی است که به همین دلیل نام مونت کارلو برای آن انتخاب شد. در ترابرد ذرات، تکنیک مونت کارلو یک تکنیک کاملاً واقع‌گرایانه و به طور کلی یک تجربه‌ی نظری است. در ترابرد ذرات با استفاده از روش مونت کارلو از این حقیقت استفاده می‌شود که ذرات یک چشمه تا زمانی زنده هستند که مرگشان به وسیله‌ی برخی حالات مانند جذب، گریز از محیط و غیره، فرا می‌رسد. به طور کاملاً تصادفی اعداد بین صفر و یک انتخاب می‌شوند تا بر اساس قوانین فیزیک و احتمالات (ترابرد اطلاعات) حاکم بر فرآیندها (شیمیایی) و مواد مورد بحث، تعیین کنند که واکنش به چه تعداد (اگر داشته باشد) و در کجا، رخ می‌دهد. نکته‌ی مهم این‌که MCNP بازخوانی ذرات ذخیره شده را به گونه‌ای انجام می‌دهد که آخرین ذره‌ی ذخیره شده در بانک اطلاعاتی، به عنوان اولین ذره‌ی بازخوانی شده می‌باشد.

۲-۴ واکنش‌ها و داده‌های هسته‌ای

در MCNP کتابخانه‌های داده‌های اتمی و کتابخانه‌های داده‌های هسته‌ای وجود دارد. منابع اصلی داده‌های هسته‌ای بر اساس برآوردهای انجام شده از مجموعه‌های $^1\text{ENDF}$ ، $^2\text{ENDL}$ و $^3\text{ACTL}$ است که در لیورمور^۴ گردآوری شده و برآوردهای انجام شده توسط گروه (T-2)^۵ در لوس آلاموس است. در این کد، بیش از ۵۰۰ جدول شامل اطلاعات مربوط به اندرکنش نوترون، برای تقریباً ۱۰۰ عنصر و ایزوتوپ مختلف فراهم شده و در دسترس است. در طبیعت، داده‌های الکترون و فوتون، داده‌های اتمی هستند نه داده‌های هسته‌ای. جداول اندرکنش فوتون، برای تمامی عناصر از $Z=1$ تا $Z=94$ موجود است. جدول داده‌های مربوط به اندرکنش فوتون، شامل پراکندگی همدوس و ناهمدوس، جذب فوتوالکتریک با امکان گسیل فلئورسانس و تولید زوج است. علاوه بر داده‌های فوق، در کد MCNP جداول داده‌های حرارتی نیز برای استفاده در پراکندگی ذرات حرارتی، وجود دارد.

زمانی که انرژی نوترون‌ها به اندازه‌ی کافی کاهش می‌یابد، تأثیرات کریستالی و مقید بودن شیمیایی (مولکولی) اهمیت پیدا می‌کند و به این منظور در دماهای مختلف داده‌های مربوط به آب سبک و سنگین، برلیوم فلزی، برلیوم اکسید، بنزن، گرافیت، پلی اتیلن، زیرکونیوم و هیدروژن در زیرکونیوم هیدرات، موجود است.

1 Evaluated Nuclear Data File
2 Evaluated Nuclear Data Library
3 Activation Library
4 Livermore
5 Applied Nuclear Science

به طور کلی این کد توانایی حل مسائل مربوط به ترابرد ذرات را دارد. از این کد می‌توان در موارد زیر استفاده نمود:

- ترابرد نوترون به تنهایی
- ترابرد فوتون به تنهایی
- ترابرد الکترون به تنهایی
- ترابرد نوترون و فوتون
- ترابرد فوتون و الکترون
- ترابرد فوتون و نوترون و الکترون

البته در استفاده از کد MCNP برای ذرات مختلف، محدودیت انرژی نیز وجود دارد، به طوری که تنها قادر به انجام محاسبات مربوط به نوترون در بازه‌ی انرژی $20\text{ MeV} - 10^{-11}$ و برای فوتون‌ها و الکترون‌ها در بازه‌ی انرژی $1\text{ KeV} - 1000\text{ MeV}$ است.

۲-۵ مشخصات چشمه

در MCNP برای کاربر این امکان وجود دارد که چشمه (جهت)، ممکن است دارای توزیع احتمال مستقل باشند. همچنین گاهی ممکن است تعدادی از متغیرهای چشمه به متغیرهای دیگری وابسته باشند (مانند وابستگی انرژی به زاویه)، بنابراین توسعه‌ی ساختار چشمه از مقدمات و امکانات MCNP است. همچنین تعدادی از توابع توزیع احتمال معتبر برای برخی متغیرهای چشمه در کد در نظر گرفته شده است. از این میان می‌توان به توابع تحلیلی مختلفی که برای طیف انرژی شکافت و همجوشی مانند وات، ماکسول و گاوسی در کد وجود دارد، اشاره کرد. از دیگر خصوصیات کد امکان تعریف چشمه‌ی بحرانیّت توسط کاربر به منظور ارزیابی مقدار K_{eff} است.

۶-۲ tally و خروجی

کاربر می‌تواند به کد فرمان دهد تا خروجی‌های مختلف وابسته به جریان ذرات، شار ذرات و انرژی را تولید کند. به این فرمان‌ها که توسط کاربر به کد داده می‌شود، در اصطلاح tally می‌گویند.

خروجی تالی‌های کد MCNP در تمام حالات به جز خروجی چشمه‌ی بحرانیت، بر حسب یک ذره، نرمالیزه می‌شود. در خروجی برنامه به دنبال تالی، جزئیات مربوط به محاسبات نیز آورده شده است. همچنین در فایل خروجی ساخته شده توسط MCNP، به منظور بررسی و صحت محاسبات، ۱۰ نوع چک آماری مختلف برای هر کدام از تالی‌های خواسته شده انجام وبه کاربر نشان داده می‌شود. همچنین در برخی حالات امکان نمایش نتایج خروجی به صورت گرافیکی وجود دارد.

۷-۲ هندسه‌ی MCNP

هندسه‌ی کد MCNP4C در مختصات کارتزین می‌باشد. کد MCNP4C، توانایی رسم هندسه‌ی داده شده را به منظور بررسی و چک خطاهای هندسه، داراست. کاربر می‌تواند هندسه‌ی رسم شده توسط کد MCNP4C را در سه جهت X، Y و Z مشاهده کند. به صورت پیش‌فرض هندسه‌ی نمایش داده شده توسط کد MCNP4C، در صفحه‌ی $PZ=0$ است و می‌توان آن را تغییر داد.

واحدهای مورد استفاده در کد MCNP4C به صورت زیر است:

۱. طول بر حسب cm
۲. انرژی بر حسب MeV
۳. زمان بر حسب Shakes (10^{-8} s)
۴. دما بر حسب MeV (KT)
۵. دانسیته‌ی اتمی بر حسب اتم بر بارن سانتی‌متر (Atom/barn-cm)
۶. دانسیته‌ی جرمی بر حسب g/cm^3

۷. سطح مقطع بر حسب بارن (10^{-24} cm^2)

۸. اعداد حرارتی بر حسب MeV/Collision

۹. نسبت وزن اتمی بر حسب جرم نوترون ($1/0.08664967$) می باشد که در این واحد عدد

آووگادرو $0.59703109 \times 10^{-24}$ در نظر گرفته شده است.

۲-۸ خطای هندسی

یک نوع مهم از خطای ورودی وجود دارد که MCNP در حین پردازش داده‌ها از فایل ورودی، آن را تشخیص نخواهد داد. MCNP قادر نیست هم‌پوشانی سلول‌ها یا شکاف‌های بین سلول‌ها را تا زمانی که یک ذره واقعاً گم شود، تشخیص دهد. در این هنگام ممکن است ماهیت خطا مبهم بماند. وقتی که یک ذره برای بار اول گم می‌شود، تاریخچه مجدداً اجرا می‌شود تا خروجی ویژه‌ای را در فایل OUP تولید نماید. چاپ ثبت وقایع در طی اجرای مجدد روشن می‌شود. ثبت وقایع، تمام گذرگاه‌های سطحی را نشان خواهد داد و به ما خواهد گفت که مسیر ذره به نقطه‌ی بعدی در هندسه رفته است. زمانی که دوباره یک ذره گم می‌شود، توصیفی از موقعیت در آن نقطه چاپ می‌شود. معمولاً می‌توان دلیل گم شدن ذره را از این خروجی پیدا کرد.

۲-۹ کارت سلول

در این کد، فضای شبیه‌سازی شده از سلول‌های مختلف تشکیل می‌شود که هر سلول توسط یک کارت سلول تعریف می‌شود. هر سلول توسط شماره‌ی سلول، شماره‌ی ماده، چگالی ماده و شماره‌ی سطوحی که ماده در آن قرار دارد توصیف می‌شود. حداکثر سلول‌ها در یک برنامه‌ی ورودی ۹۹۹۹۹ عدد است. شماره‌ی سلول‌ها نمی‌تواند یکسان باشد و هر سلول شماره‌ی خاص خود را دارد.

بعد از تعریف کامل سلول، می‌توان درجه‌ی اهمیت سلول مورد نظر را (با استفاده از کارت IMP) برای ترابرد ذرات مختلف مشخص کرد. در تمام برنامه‌های نوشته شده برای کد، باید بیرونی‌ترین سلول،

تهی (Void) در نظر گرفته شده و درجه‌ی اهمیت سلول، مشخص کننده‌ی فضای خارجی هندسه‌ی مورد نظر، صفر انتخاب شود تا ترابرد یک ذره به محض ورود به آن سلول خاتمه یابد.

فرم کلی تعریف کارت سلول به صورت زیر است:

J m d geometry parameters

j = شماره‌ی کارت سلول

m = شماره‌ی ماده‌ای که سلول را پر می‌کند

d = چگالی ماده‌ی درون سلول (در صورتی که سلول تهی باشد مقدار نمی‌گیرد)

Geometry = کارت‌های مشخص کننده‌ی هندسه

Parameters = پارامترهای مشخصه‌ی سلول

شماره‌ی سلول (j) اولین عدد ورودی بوده و باید در یکی از ۵ ستون اول سطر قرار بگیرد. عدد بعدی به عنوان شماره‌ی ماده‌ای است که سلول را پر کرده است و می‌تواند هر عددی به دل‌خواه کاربر انتخاب شود.

عدد بعدی دانسیته‌ی ماده است. عدد مثبت نشان دهنده‌ی دانسیته‌ی اتمی بر حسب واحد $10^{24} \text{ atom/cm}^3$ و علامت منفی نشان دهنده‌ی دانسیته‌ی جرمی بر حسب واحد g/cm^3 است. در صورتی که سلول مورد نظر ماده نداشته باشد، شماره‌ی ماده صفر در نظر گرفته می‌شود و برای چگالی هیچ مقداری ثبت نمی‌شود.

۲-۱۰ کارت سطوح

هر سلول به وسیله‌ی سطوحی که آن را از سلول‌های دیگر مجزا می‌کند مشخص می‌شود. حداکثر تعداد سطوح در برنامه‌ی ورودی برابر ۹۹۹۹۹ عدد بوده و ساختار آن به شکل زیر است:

List n a j

j = شماره‌ی سطح

n = شماره‌ی کارت انتقال (در صورت نیاز)

a = مشخص کننده‌ی نوع سطح

List = پارامترهای سطح

شماره‌ی سطح (j) اولین عددی است که در سطر مورد نظر وارد می‌شود و باید در یکی از ستون‌های ۱ تا ۵ قرار گیرد. این شماره نباید از ۵ رقم تجاوز کند. پارامتر n، شماره‌ی کارت انتقال است. فرض کنید تعریف صفحه‌ای مورد نظر باشد که به هیچ یک از صفحات مختصات عمود نباشد، در این صورت می‌توان دستگاه مختصات دومی یافت که نسبت به دستگاه اول دارای زاویه‌ی θ باشد. اگر n حذف شود یا برابر صفر باشد، بیانگر مختصات تغییر شکل نیافته است و اگر n بزرگ‌تر از صفر باشد، بیانگر شماره‌ی یک کارت TRn (کارت انتقال) است. شماره‌ی سطوح نمی‌تواند یکسان باشد.

۲-۱۱ کارت تعریف صفحه

۲-۱۱-۱ کارت P

این کارت عمومی برای تعریف صفحه است. با توجه به معادله‌ی ریاضی صفحه، برای تعریف صفحه با استفاده از این کارت، چهار پارامتر نیاز است.

j P A B C D

1 P 1 2 3 7

به عنوان مثال اگر داشته باشیم:

این دستور نشان‌دهنده‌ی صفحه‌ای است که از تقاطع سه نقطه $X=7$ ، $Y=7/2$ ، $Z=7/3$ ساخته شده است.

۲-۱۱-۲ کارت PX

از این کارت برای تعریف صفحات عمود بر محور X استفاده می‌شود. برای تعریف صفحه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور X است.

j PX D

j PX 2

۳-۱۱-۲ کارت PY

از این کارت برای تعریف صفحات عمود بر محور Y استفاده می‌شود. برای تعریف صفحه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور Y است.

j PY D

j PY 4

۴-۱۱-۲ کارت PZ

از این کارت برای تعریف صفحات عمود بر محور Z استفاده می‌شود. برای تعریف صفحه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است که نشان‌دهنده‌ی محل تلاقی صفحه با محور Z است.

j PZ D

j PZ 8

۲-۱۲ سطوح مکعب

اواین گام در تعریف یک مکعب، استفاده از انواع سطوح مشخص شده و تعریف مناسب پارامترهای مورد نیاز برای سطح است. هندسه‌ی این مسأله از صفحات عمود بر هم در جهات X ، Y ، Z تشکیل شده است. نمادهای مربوط در مسأله PX ، PY ، PZ می‌باشند.

۲-۱۳ کارت تعریف کره

۲-۱۳-۱ کارت S

این یک کارت عمومی برای تعریف کره است. با توجه به معادلات ریاضی کره، برای تعریف کره با استفاده از این کارت، چهار پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad S \quad ABCD$$

سه عدد اول مختصات (X, Y, Z) مرکز کره را مشخص می‌کند و عدد چهارم شعاع کره است.

۲-۱۳-۲ کارت SO

از این کارت برای تعریف کره که محور آن در مرکز مختصات قرار می‌گیرد، استفاده می‌شود. برای تعریف کره با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است و آن شعاع کره خواهد بود.

$$j \quad SO \quad R$$

۲-۱۳-۳ کارت SX

از این کارت برای تعریف کره‌ی عمود بر محور X استفاده می‌شود. برای تعریف کره با استفاده از این کارت، دو پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad SX \quad x \quad r$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور X ، و عدد دوم شعاع کره است.

۲-۱۳-۴ کارت SY

از این کارت برای تعریف کره‌ی عمود بر محور Y استفاده می‌شود. برای تعریف کره با استفاده از این کارت، دو پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad SY \quad x \quad r$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور Y، و عدد دوم شعاع کره است.

۲-۱۳-۵ کارت SZ

از این کارت برای تعریف کره‌ی عمود بر محور Z استفاده می‌شود. برای تعریف کره با استفاده از این کارت، دو پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad SZ \quad x \quad r$$

عدد اول مرکز کره بر روی محور Z، و عدد دوم شعاع کره است.

۲-۱۴-۱۴ کارت تعریف استوانه

۲-۱۴-۱ کارت C/X

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت و موازی محور X استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، سه پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad C/X \quad y \quad z \quad r$$

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه YZ و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این تعریف استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور X تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات PX استفاده کنید.

۲-۱۴-۲ کارت CX

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت بر روی محور x استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است و آن شعاع استوانه خواهد بود.

$$j \quad CX \quad r$$

۲-۱۴-۳ کارت C/Y

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت و موازی محور Y استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، سه پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad C/Y \quad x \quad z \quad r$$

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه XZ و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این تعریف استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور Y تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات PY استفاده کنید.

۲-۱۴-۴ کارت CY

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت بر روی محور Y استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است و آن شعاع استوانه خواهد بود.

$$j \quad CY \quad r$$

۲-۱۴-۵ کارت C/Z

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت و موازی محور Z استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، سه پارامتر مورد نیاز است.

$$j \quad C/Z \quad x \quad y \quad r$$

دو عدد اول، مختصات محور استوانه در صفحه XY و عدد سوم شعاع استوانه است. با استفاده از این

تعریف استوانه‌ای ساخته می‌شود که به موازات محور Z تا بی‌نهایت امتداد دارد و برای محدود کردن آن باید از صفحات PZ استفاده کنید.

۲-۱۴-۶ کارت CZ

از این کارت برای تعریف استوانه‌ی بی‌نهایت بر روی محور Z استفاده می‌شود. برای تعریف استوانه با استفاده از این کارت، یک پارامتر مورد نیاز است و آن شعاع استوانه خواهد بود.

$j \quad CZ \quad r$

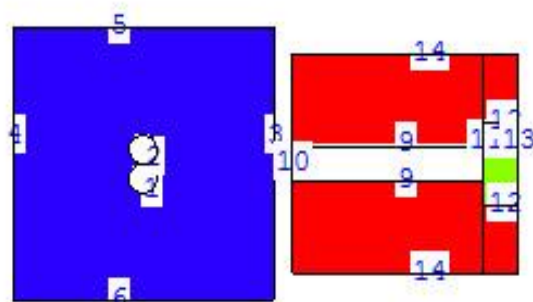
۲-۱۵ کارت داده

این قسمت که آخرین بخش از فایل ورودی می‌باشد و در برگیرنده‌ی نوع ذرات، مواد، چشمه‌های تابش، نوع خروجی یا تالی، روش‌های کاهش واریانس و غیره است. نام کارت، اولین پارامتری است که در سطر مورد نظر وارد شده و باید در یکی از ستون‌های ۱ تا ۵ قرار گیرد. در این قسمت نمی‌توان از دو کارت هم‌نام استفاده کرد.

در شکل (۲-۱) تصویری از چیدمان آزمایش که توسط برنامه MCNPX گرفته شده است را نمایش دادیم. شماره سطوح آشکارساز، بتن، حفره‌ی هوا که در داخل بتن قرار دارد و چشمه در این شکل مشخص شده است.

09/10/15 21:24:39
r of collimator:10 cm distance

probid = 09/10/15 21:21:38
basis: XY
(1.000000, 0.000000, 0.000000)
(0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
(0.00, 0.00, 0.00)
extent = (25.70, 25.70)



شکل (۱-۲) تصویر گرفته شده از چیدمان آشکارساز، بتن و چشمه در مونت کارلو توسط برنامه MCNPX.

با توجه به شکل (۱-۲) می‌توان هندسه خوب و مناسب را توسط آشکارساز، ماده مورد نظر که در این پژوهش بتن بوده و چشمه، جهت اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما و تابع پاسخ با تابشی کاملاً موازی و باریک شبیه‌سازی نمود.

۲-۱۵-۱ کارت نوع مسأله (MODE)

با استفاده از این کارت، کاربر نوع ذراتی را که نیاز است تا در مسأله تولید شوند مشخص می‌کند. به طور کلی کاربر بنا به نیاز خود می‌تواند نوع ذرات ترابرد شده در مسأله (نوترون، فوتون و الکترون) را انتخاب کند. فرم کلی این کارت که کارت MODE نام دارد به صورت زیر است:

MODE x_1, \dots, x_i $x_i=N$ or P or E

اگر کارت MODE توسط کاربر استفاده نشود، MCNP به طور پیش‌فرض، مسأله را برای نوترون حل می‌کند. نوع مسأله در واقع بیانگر این است که شبیه‌سازی برای چه ذراتی انجام شود.

۲-۱۵-۲ چشمه و معیارهای آن

برای تمامی مسائل MCNP چشمه به چهار شکل تعریف می‌شود:

- چشمه‌های عمومی با استفاده از دستور SDEF
 - چشمه‌های سطحی با استفاده از دستورات SSW/SSR
 - چشمه‌ی بحرانی با استفاده از دستور KCODE
 - چشمه‌ی خاص تعریف شده توسط کاربر
- چشمه‌هایی که در مسائل مختلف با آن‌ها کار داریم معمولاً از نوع چشمه‌های نقطه‌ای، سطحی، حجمی، و چشمه‌های بحرانی هستند. کارت MODE که در قسمت قبل به آن اشاره کردیم، به عنوان بخشی از خصوصیات چشمه (در مواردی دلالت بر نوع ذره‌ای که از چشمه آغاز می‌شود دارد) به کار می‌رود [۲۵].

یک چشمه برای هر ذره‌ای که تولید می‌کند، مقادیر متغیرهای زیر را باید تعریف نماید:

- ERG، انرژی ذره (MeV)
- TME، زمانی که ذره آغاز می‌شود
- WWW، VVV، UUU جهت پرواز ذره
- XXX، YYY، ZZZ، موقعیت ذره
- IPT، نوع ذره
- WGT، وزن آماری ذره
- ICL، سلولی که در آن ذره آغاز می‌شود
- JSU، سطحی که در آن جا ذره شروع می‌شود. یا صفر اگر نقطه‌ی شروع روی هیچ سطحی نباشد.

فصل سوم

شبیه‌سازی و نتایج بدست آمده از مکان‌یابی

حفره‌ی هوا در بتن

۱-۳ مقدمه:

بتن همیشه به دلخواه ما رفتار نمی‌کند و بعضی رفتارهای نا مطلوب مانند خرد شدن، پوسته شدن، ترک خوردگی، نشتی، خیز یا نشت در بتن مشاهده می‌شود. توسعه‌ی روش‌های مؤثر ترمیم بتن نیازمند شناخت انواع و علل این رفتارهای نا مطلوب است. شناخت علت‌ها سبب می‌شود که راه‌کار ترمیم هم علت و هم تأثیر رفتار را در بر گیرد و در نتیجه کار ترمیم موفق و دیر پا خواهد بود [۱]. در شکل (۱-۳) نمونه‌ای از بتن حفره‌دار و بی‌کیفیت نشان داده شده است.



شکل (۱-۳) نمونه‌ای از یک بتن بی‌کیفیت که به علت دارا بودن حفره‌های متعدد ترک‌دار شده است.

معمولاً تست‌های مخرب دارای هزینه‌های بالا و مشکلات فنی است به همین دلیل بیش‌تر از تست غیر مخرب بتن استفاده می‌شود. یکی از تست‌های غیر مخرب که می‌توان به آن اشاره نمود، استفاده از پرتو نگاری گاما (Radiography gamma) هست که دارای کاربردها و محدودیت‌های زیر می‌باشد:

کاربردها:

- معمولاً در مواد متراکم استفاده می‌شود.
- در همه اشکال و صورت‌ها استفاده می‌شود: ریخته‌گری، جوشکاری، جو زمین، وسایل دریایی و قطعات اتومبیل.

هر جا که ضخامت زیاد است یا دسترسی به مولدهای تولید اشعه‌ی X محدود است استفاده می‌شود.

محدودیت‌ها:

- اتفاقات تشعشعی.
 - کاهش حساسیت با افزایش ضخامت.
 - حساسیت اشعه‌ی X را ندارد.
- به منظور تعیین حفره‌هایی با ابعاد متفاوت و تفکیک مکانی آن‌ها در یک ضخامت مشخص از بتن، از روش پراکندگی کامپتون یا به عبارت دیگر تست غیرمخرب (NDE^۱) استفاده شده است [۱۱].

۱

1. Non-destructive evaluation.

تست غیر مخرب در موارد زیر دارای کاربرد است:

۱- تعیین خوردگی در استیل نواری پنهان در بتن، تعیین حفره‌های با ضخامت بزرگ‌تر از ۲۰ mm در بتن. تعیین ترک‌ها قبل از این که منتشر شوند و باعث شکستگی بتن شوند، بسیار ضروری است.

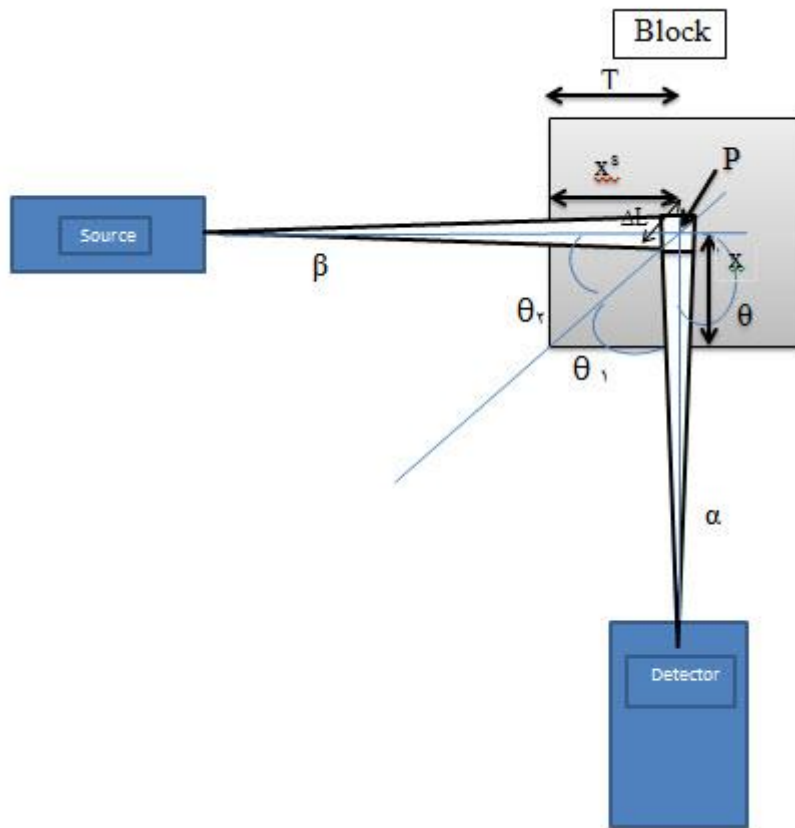
۲- تعیین محل ترک‌ها در دیواره‌های رآکتورهای هسته‌ای و دیواره‌های سد. بنابراین تکنیک‌های NDE برای تعیین ساختار ترک‌ها بسیار ضروری و مورد نیاز است.

روش پراکندگی گاما برای بررسی مواد بسیار مناسب می‌باشد از این رو به شدت به چگالی اتمی و در حقیقت به چگالی جرمی بستگی دارد که این مفهوم واکنش کامپتون بین فوتون‌های فرودی و الکترون‌های ماده را می‌رساند [۲۷].

پراکندگی کامپتون از یک حجم مشخص از ماده مورد بررسی، به وسیله‌ی یک آشکارساز در زاویه‌ای مشخص نسبت به هدف مشخص می‌شود. در این پروژه، پرتوهای گاما از حفره‌ها با ابعاد و مکان‌های متفاوت در بتن به منظور تعیین تفکیک مکانی مناسب، عبور داده شد. بنابراین پراکندگی گاما، تفکیک‌پذیری بین مواد با چگالی‌ها و ترکیبات متفاوت را مشخص می‌کند، مثل بتن، حفره و فولاد.

۲-۳ محاسبات عددی:

شکل (۲-۳) پرتوهای ورودی و پرتوهای پراکنده شده را به خوبی وصف نموده و مسیر چشمه تا آشکارساز را در سه گام توصیف نموده است.



شکل (۲-۳) هندسه قرارگرفتن آشکارساز، چشمه و بتن در روش مونت کارلو جهت تعیین ضریب تضعیف پرتو گاما.

گام اول: مرحله‌ی اول حرکت فوتون‌ها از چشمه به سمت نقطه‌ی پراکندگی p که همان حفره‌ی هوا در طول مسیر α است. با چشم پوشی از کاهش شدت پرتو در هوا تا رسیدن به ماده، از قانون Beer-

Bouguer داریم:

$$I_1 = I_0 \exp \left[- \int_0^x \left\{ \frac{\mu(E)}{\rho} \right\} \rho dx' \right] \quad (1-3)$$

که در آن I_0 و I_1 به ترتیب شدت پرتوهای رسیده به حفره‌ی هوا و گسیلی از چشمه، $\frac{\mu(E)}{\rho}$ ضریب تضعیف جرمی مربوط به فوتون‌های با انرژی E ، ρ چگالی ماده و x طول مسیر α در بلوک است. گام دوم: در این مرحله تعداد پرتوهای پراکنده شده در حفره که به سمت آشکارساز گسیل خواهند شد بدست می‌آید. شدت پرتوی I_2 پراکنده شده توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$I_2 = I_1 \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) d\Omega \rho_e(p) \Delta l \quad (2-3)$$

در فرمول فوق $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ سطح مقطع پراکندگی جزئی می‌باشد که متناسب با احتمال پراکندگی پرتوهای گاما در زاویه‌ی θ در المان فضائی $d\Omega$ که از فرمول کلین-نیشنا بدست می‌آید. $\rho_e(p)$ چگالی الکترون در نقطه‌ی p ، Δl قطر حفره می‌باشند. عبارت دیفرانسیل سطح مقطع $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ با رابطه‌ی (3-3) بیان می‌شود:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \alpha^2 r_c^2 p(E_\gamma, \theta)^2 [p(E_\gamma, \theta) + p(E_\gamma, \theta)^{-1} - 1 + \cos^2(\theta)] \quad (3-3)$$

که در این رابطه α^2 و r_c^2 به ترتیب دارای مقادیر ثابت $\frac{1}{137.04}$ و $0.386 pm$ بوده و نسبت انرژی قبل و بعد از برخورد، $p(E_\gamma, \theta)$ ، از طریق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود.

$$p(E_\gamma, \theta) = \frac{1}{1 + (E_\gamma/m_e c^2)(1 - \cos\theta)} \quad (4-3)$$

در رابطه‌ی فوق m_e برابر با مقدار $0.511 \text{ KeV}/c^2$ می‌باشد. چگالی الکترون در نقطه‌ی p خصلتی از ماده است که متناسب با $\rho_e = \frac{\rho Z N_A}{A}$ می‌باشد و در نتیجه متناسب با ρ چگالی فیزیکی می‌باشد که در آن N_A عدد آووگادرو، Z عدد اتمی ماده و A جرم اتمی می‌باشند.

گام سوم: در این مرحله فوتون‌های پراکنده شده از حفره پس از تضعیف در بتن به آشکارساز می‌رسند. در این مرحله شدت پرتو دارای کاهش بیش‌تری است، بنابراین:

$$I_3 = I_2 \exp \left[- \int_0^{x^s} \left\{ \frac{\mu^s(E^s, \theta)}{\rho} \right\} \rho dx' \right] \quad (5-3)$$

که در این جا I_3 شدت پرتوی رسیده به آشکارساز می‌باشد.

$\frac{\mu^s(E^s, \theta)}{\rho}$ ضریب تضعیف جرمی فوتون‌های پراکنده شده با انرژی E^s و زاویه‌ی θ ، x^s طول مسیر β در داخل بتن می‌باشند.

اگر هر سه گام را با هم ترکیب نمائیم و با توجه به آن که تابع راندمان آشکارساز در هر انرژی $R(E)$ فرض شود در نهایت شدت پرتوهای ثبت شده در آشکارساز ناشی از پراکندگی در حفره با رابطه‌ی ذیل بیان می‌شود:

$$I_3 = I_0 \exp \left[- \int_0^x \left\{ \frac{\mu(E)}{\rho} \right\} \rho dx' + \int_0^{x^s} \left\{ \frac{\mu^s(E^s, \theta)}{\rho} \right\} \rho dx' \right] \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) d\Omega \rho_e(p) \Delta l R(E) \quad (6-3)$$

که با جایگزینی زیر:

$$K = \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) d\Omega \rho_e(p) \Delta l R(E) \quad (7-3)$$

و عامل تضعیف با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$AF = \exp - \left[\int_0^x \left\{ \frac{\mu(E)}{\rho} \right\} \rho dx' + \int_0^{x^s} \left\{ \frac{\mu^s(E^s, S)}{\rho} \right\} \rho dx' \right] \quad (8-3)$$

با توجه به شکل (۱-۳) داریم:

$$AF = \exp - \left[\int_0^T \left\{ \frac{\mu(E)}{\rho} \right\} \rho \frac{dt}{\cos \theta_1} + \int_0^T \left\{ \frac{\mu^s(E^s)}{\rho} \right\} \rho \frac{dt^s}{\cos \theta_2} \right] \quad (8-3)$$

از ترکیب روابط ۵، ۶ و ۷ داریم:

$$I_3 = I_0 K A F \quad (9-3)$$

با بدست آوردن I_3 ، می‌توان نسبت I_3 مربوط به بلوک دارای حفره به I_3 مربوط به بلوک بدون حفره (نرمال) را بدست آورد.

$$\frac{I_3(Block2)}{I_3(Block1)} = \frac{\rho(p, Block2) A F(Block2)}{\rho(p, Block1) A F(Block1)} \quad (10-3)$$

برای بلوک بدون حفره، عامل تضعیف را می‌توان با محاسبه‌ی ضریب تضعیف و چگالی جرمی بتن با استفاده از رابطه‌ی (۸-۳) محاسبه نمود [۲۸].

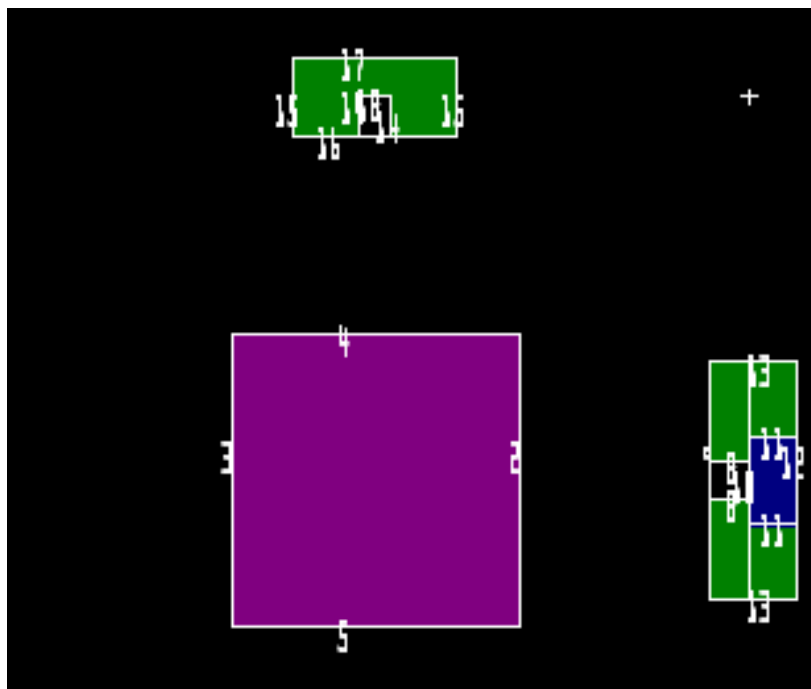
برای محاسبه‌ی عامل تضعیف در بتن‌های حفره‌دار با تفکیک مکانی‌های مختلف، هندسه‌ی مسئله و

بنابراین طول مسیر پیموده شده توسط پرتوهای ورودی پراکنده شده در حفره و بتن حائز اهمیت است. این اطلاعات را با استفاده از کد شبیه سازی MCNP بدست آوردیم که از داده‌های دقیق مربوط به مکان و اندازه‌ی حفره‌ها استفاده نمودیم.

با تکرار دو روش زیر به دفعات مکرر می‌توان موقعیت و اندازه‌ی حفره‌ها را بدست آورد:

۱- کاهش اندازه‌ی حفره: در این حالت قدرت تفکیک پذیری بهتر می‌شود و همچنین خط فاصل بین حفره‌ها بهتر نمایان می‌شود.

۲- با تغییر زاویه‌ی پراکندگی و توزیع چگالی‌های زیاد از بتن.



شکل (۳-۳) طرحی از چیدمان آشکارساز، بتن و چشمه در کد MCNP (آشکارساز در سمت راست بتن مکعب شکل و چشمه در قسمت بالای بتن قرار دارند). در این تصویر سطوح استفاده شده در کد MCNP با اعداد نشان داده شده‌اند.

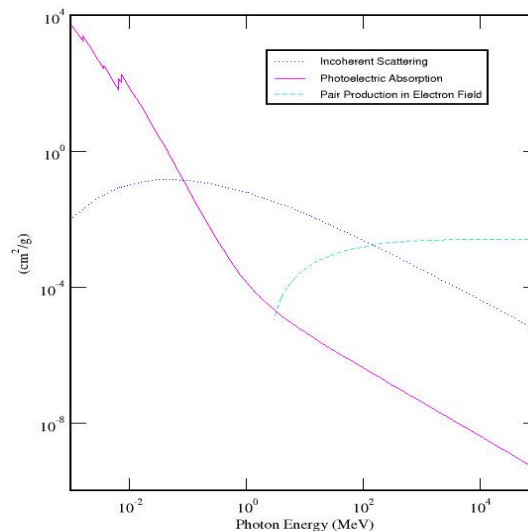
۳-۳ XCOM :

بتن ماده‌ای است که از مخلوط کردن سیمان و آب به عنوان ماده چسبنده و شن و ماسه و یا سنگدانه به عنوان جسم پرکننده ساخته می‌شود. ضرایب تضعیف به ترکیبات شیمیایی بتن و انرژی حاصل از پرتوهای گاما بستگی دارند. بنابراین ما در این پژوهش با استفاده از ترکیبات شیمیایی بتن ضرایب تضعیف بتن و حفره هوا را برای فرآیندهای کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج در بازه‌های مختلف انرژی توسط برنامه Xcom محاسبه نمودیم.

در جدول (۳-۲) ضرایب تضعیف جرمی بتن در انرژی‌های 0.001 تا 10^4 MeV برای سه فرآیند کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج را آورده‌ایم. این جدول تغییرات ضریب تضعیف جرمی را با افزایش انرژی در فرآیندهای مختلف به خوبی نشان می‌دهد.

جدول (۳-۱) مقادیر ضریب تضعیف جرمی بتن با استفاده از نرم‌افزار Xcom

ترکیبات شیمیایی بتن	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	Al ₂ O ₃
درصد وزنی	۰/۰۶	۰/۰۱۳	۰/۰۴۵	۰/۰۱۳	۰/۰۸



نمودار (۳-۱) تغییرات ضریب تضعیف جرمی بتن بر حسب انرژی در بازه‌ی 0.001 تا 100000 MeV با استفاده از

نرم‌افزار Xcom.

جدول (۳-۲) تغییرات ضریب تضعیف جرمی بتن با استفاده از نرم افزار Xcom

Photon energy	Incoher scatter	Photoel. absorb.	Electron pr. Prd.
1.000E-03	1.013E-02	5.399E+03	0.000E+00
1.035E-03	1.068E-02	4.946E+03	0.000E+00
1.072E-03	1.127E-02	4.530E+03	0.000E+00
1.072E-03	1.127E-02	4.530E+03	0.000E+00
1.500E-03	1.848E-02	1.939E+03	0.000E+00
1.560E-03	1.949E-02	1.750E+03	0.000E+00
1.560E-03	1.949E-02	2.519E+03	0.000E+00
2.000E-03	2.683E-02	1.351E+03	0.000E+00
3.000E-03	4.244E-02	4.566E+02	0.000E+00
3.607E-03	5.106E-02	2.748E+02	0.000E+00
3.607E-03	5.106E-02	3.330E+02	0.000E+00
4.000E-03	5.626E-02	2.514E+02	0.000E+00
5.000E-03	6.817E-02	1.356E+02	0.000E+00
6.000E-03	7.825E-02	8.126E+01	0.000E+00
6.539E-03	8.303E-02	6.369E+01	0.000E+00
6.539E-03	8.303E-02	1.330E+02	0.000E+00
6.819E-03	8.536E-02	1.192E+02	0.000E+00
7.112E-03	8.767E-02	1.067E+02	0.000E+00
7.112E-03	8.767E-02	1.819E+02	0.000E+00
8.000E-03	9.407E-02	1.347E+02	0.000E+00
1.000E-02	1.057E-01	7.398E+01	0.000E+00
1.500E-02	1.239E-01	2.409E+01	0.000E+00
2.000E-02	1.342E-01	1.061E+01	0.000E+00
3.000E-02	1.440E-01	3.245E+00	0.000E+00
4.000E-02	1.472E-01	1.375E+00	0.000E+00
5.000E-02	1.474E-01	7.000E-01	0.000E+00
6.000E-02	1.462E-01	4.015E-01	0.000E+00
8.000E-02	1.420E-01	1.657E-01	0.000E+00
1.000E-01	1.372E-01	8.311E-02	0.000E+00
1.500E-01	1.257E-01	2.368E-02	0.000E+00
2.000E-01	1.160E-01	9.791E-03	0.000E+00

3.000E-01	1.015E-01	2.911E-03	0.000E+00
4.000E-01	9.118E-02	1.283E-03	0.000E+00
5.000E-01	8.339E-02	7.034E-04	0.000E+00
6.000E-01	7.720E-02	4.425E-04	0.000E+00
8.000E-01	6.788E-02	2.252E-04	0.000E+00
1.000E+00	6.106E-02	1.401E-04	0.000E+00
1.022E+00	6.042E-02	1.328E-04	0.000E+00
1.250E+00	5.462E-02	8.987E-05	0.000E+00
1.500E+00	4.964E-02	6.484E-05	0.000E+00
2.000E+00	4.238E-02	4.004E-05	0.000E+00
2.044E+00	4.185E-02	3.868E-05	0.000E+00
3.000E+00	3.334E-02	2.178E-05	1.167E-05
4.000E+00	2.781E-02	1.469E-05	4.763E-05
5.000E+00	2.402E-02	1.101E-05	9.489E-05
6.000E+00	2.123E-02	8.774E-06	1.457E-04
7.000E+00	1.908E-02	7.281E-06	1.964E-04
8.000E+00	1.737E-02	6.215E-06	2.457E-04
9.000E+00	1.596E-02	5.419E-06	2.929E-04
1.000E+01	1.479E-02	4.802E-06	3.378E-04
1.100E+01	1.380E-02	4.309E-06	3.804E-04
1.200E+01	1.294E-02	3.907E-06	4.206E-04
1.300E+01	1.219E-02	3.574E-06	4.587E-04
1.400E+01	1.153E-02	3.292E-06	4.950E-04
1.500E+01	1.095E-02	3.052E-06	5.293E-04
1.600E+01	1.043E-02	2.844E-06	5.621E-04
1.800E+01	9.528E-03	2.502E-06	6.230E-04
2.000E+01	8.787E-03	2.234E-06	6.786E-04
2.200E+01	8.161E-03	2.017E-06	7.299E-04
2.400E+01	7.627E-03	1.839E-06	7.770E-04
2.600E+01	7.161E-03	1.689E-06	8.208E-04
2.800E+01	6.755E-03	1.562E-06	8.616E-04
3.000E+01	6.397E-03	1.452E-06	8.997E-04
4.000E+01	5.083E-03	1.076E-06	1.059E-03
5.000E+01	4.243E-03	8.542E-07	1.183E-03
6.000E+01	3.655E-03	7.081E-07	1.282E-03

8.000E+01	2.883E-03	5.279E-07	1.434E-03
1.000E+02	2.393E-03	4.206E-07	1.548E-03
1.500E+02	1.704E-03	2.789E-07	1.741E-03
2.000E+02	1.336E-03	2.086E-07	1.866E-03
3.000E+02	9.470E-04	1.387E-07	2.022E-03
4.000E+02	7.417E-04	1.039E-07	2.118E-03
5.000E+02	6.141E-04	8.307E-08	2.184E-03
6.000E+02	5.258E-04	6.918E-08	2.234E-03
8.000E+02	4.106E-04	5.185E-08	2.303E-03
1.000E+03	3.378E-04	4.147E-08	2.348E-03
1.500E+03	2.359E-04	2.763E-08	2.418E-03
2.000E+03	1.826E-04	2.072E-08	2.457E-03
3.000E+03	1.270E-04	1.381E-08	2.501E-03
4.000E+03	9.799E-05	1.035E-08	2.526E-03
5.000E+03	8.012E-05	8.284E-09	2.542E-03
6.000E+03	6.794E-05	6.902E-09	2.553E-03
8.000E+03	5.234E-05	5.177E-09	2.568E-03
1.000E+04	4.273E-05	4.141E-09	2.577E-03
1.500E+04	2.954E-05	2.761E-09	2.590E-03
2.000E+04	2.271E-05	2.070E-09	2.598E-03
3.000E+04	1.566E-05	1.380E-09	2.605E-03
4.000E+04	1.202E-05	1.035E-09	2.609E-03
5.000E+04	9.791E-06	8.282E-10	2.612E-03
6.000E+04	8.276E-06	6.901E-10	2.614E-03
8.000E+04	6.346E-06	5.176E-10	2.616E-03
1.000E+05	5.162E-06	4.141E-10	2.617E-03

در شکل (۳-۳) تصویر قسمتی از جدول حاوی ضرایب تضعیف جرمی بر حسب انرژی حاصل از برنامه Xcom را ملاحظه می‌نمائیم. طبق این تصویر فرآیندهای مورد نظر خود برای مثال کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج را در قسمت بالای جدول انتخاب می‌نمائیم. سپس داده‌ها به صورت جدول بندی در اختیار ما قرار می‌گیرند.

Edge	(required) Photon Energy MeV	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
		cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g	cm ² /g
	1.000E-03	2.889E+00	1.013E-02	5.399E+03	0.000E+00	0.000E+00	5.402E+03	5.399E+03
	1.035E-03	2.873E+00	1.068E-02	4.946E+03	0.000E+00	0.000E+00	4.949E+03	4.946E+03
	1.072E-03	2.856E+00	1.127E-02	4.530E+03	0.000E+00	0.000E+00	4.533E+03	4.530E+03
11 K	1.072E-03	2.856E+00	1.127E-02	4.530E+03	0.000E+00	0.000E+00	4.533E+03	4.530E+03
	1.500E-03	2.676E+00	1.848E-02	1.939E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.941E+03	1.939E+03
	1.560E-03	2.650E+00	1.949E-02	1.750E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.752E+03	1.750E+03
13 K	1.560E-03	2.650E+00	1.949E-02	2.519E+03	0.000E+00	0.000E+00	2.521E+03	2.519E+03
	2.000E-03	2.456E+00	2.683E-02	1.351E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.354E+03	1.351E+03
	3.000E-03	2.052E+00	4.244E-02	4.566E+02	0.000E+00	0.000E+00	4.587E+02	4.566E+02
	3.607E-03	1.839E+00	5.106E-02	2.748E+02	0.000E+00	0.000E+00	2.767E+02	2.748E+02
19 K	3.607E-03	1.839E+00	5.106E-02	3.330E+02	0.000E+00	0.000E+00	3.349E+02	3.330E+02
	4.000E-03	1.714E+00	5.626E-02	2.514E+02	0.000E+00	0.000E+00	2.532E+02	2.515E+02
	5.000E-03	1.441E+00	6.817E-02	1.356E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.371E+02	1.356E+02
	6.000E-03	1.221E+00	7.825E-02	8.126E+01	0.000E+00	0.000E+00	8.256E+01	8.134E+01
	6.539E-03	1.121E+00	8.303E-02	6.369E+01	0.000E+00	0.000E+00	6.489E+01	6.377E+01
25 K	6.539E-03	1.121E+00	8.303E-02	1.330E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.342E+02	1.331E+02
	6.819E-03	1.074E+00	8.536E-02	1.192E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.203E+02	1.193E+02
	7.112E-03	1.027E+00	8.767E-02	1.067E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.078E+02	1.068E+02
26 K	7.112E-03	1.027E+00	8.767E-02	1.819E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.830E+02	1.820E+02

شکل (۳-۴) تصویر جدول بدست آمده از نرم‌افزار Xcom، در این جدول فرآیندهای مورد نظر خود را انتخاب نموده و آن‌ها را جدول بندی می‌نمائیم.

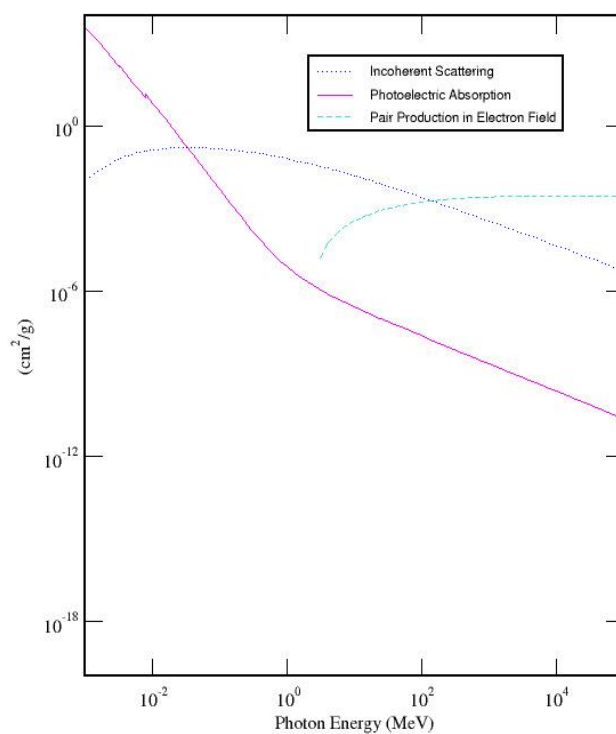
در این پژوهش ضریب تضعیف جرمی را بر حسب انرژی برای حفره‌ی هوا بدست آوردیم. هوا متشکل از چندین گاز است که ترکیبات و درصد وزنی متعارف برای آن را در جدول (۳-۳) نشان داده‌ایم.

جدول (۳-۳) ترکیبات تشکیل دهنده هوا همراه با درصد وزنی مربوط به آن‌ها

ترکیبات شیمیایی هوا	N	O _۲	Ar	CO ₂
درصد وزنی	۰/۷۸	۰/۲۱	۰/۰۱	۰/۰۱

بر حسب ترکیبات هوا و درصد وزنی هرکدام از این ترکیبات نمودار ضریب تضعیف جرمی هوا بر حسب انرژی برای سه فرآیند مختلف از قبیل کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج را بدست آوردیم. نمودار (۲-۳) محاسبه ضریب تضعیف جرمی هوا بر حسب انرژی‌های 0.001 MeV تا 10^4 را نشان می‌دهد. نتیجه‌ی حاصل از این نمودار نشان‌دهنده‌ی کاهش ضریب تضعیف جرمی هوا نسبت به ضریب تضعیف جرمی بتن در بازه‌ی انرژی 0.001 MeV تا 10^4 می‌باشد. بنابراین تغییرات کنتراست در حفره‌ی هوا نسبت به تغییرات کنتراست در بتن بسیار کم‌تر می‌باشد.

طبق این نمودارها به این نتیجه رسیدیم که احتمال افزایش برهم‌کنش‌های کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج با افزایش چگالی اتمی و عدد اتمی افزایش می‌یابد. بتن ماده‌ای متشکل از ترکیبات بسیار زیاد می‌باشد و بنابراین دارای چگالی اتمی بالا و عدد اتمی بیش‌تری نسبت به هوا می‌باشد. در نتیجه احتمال برهم‌کنش پرتو با ماده در بتن بیش‌تر از حفره‌ی هوای داخل بتن می‌باشد. همچنین احتمال برهم‌کنش پرتو در حفره‌ی هوا نیز با توجه به اندازه‌ی حفره متغیر می‌باشد بدین شکل که با افزایش شعاع حفره‌ی هوا احتمال برهم‌کنش پرتو افزایش یافته و کنتراست افزایش می‌یابد. ضرایب تضعیف جرمی هوا بر حسب انرژی را در جدول (۴-۳) نشان داده‌ایم. این جدول مقادیر ضریب تضعیف جرمی هوا را در سه فرآیند کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج نشان داده است. طبق داده‌های بدست آمده ضریب تضعیف جرمی هوا در فرآیند فوتوالکتریک و کامپتون با افزایش انرژی، کاهش یافته است.



نمودار (۳-۲) تعیین ضریب تضعیف جرمی هوا بر حسب انرژی در بازه‌ی ۰.۰۰۱ MeV تا ۱۰۰۰۰۰ با استفاده از نرم‌افزار

.Xcom

جدول (۳-۴) تغییرات ضریب تضعیف جرمی هوا با استفاده از نرم‌افزار Xcom

Photon energy	Incoher scatter	Photoel.absorb.	Electron pr. Prd.
1.000E-03	1.042E-02	3.639E+03	0.000E+00
1.500E-03	2.122E-02	1.204E+03	0.000E+00
2.000E-03	3.344E-02	5.344E+02	0.000E+00
3.000E-03	5.747E-02	1.644E+02	0.000E+00
3.203E-03	6.193E-02	1.355E+02	0.000E+00
3.203E-03	6.193E-02	1.467E+02	0.000E+00
4.000E-03	7.761E-02	7.652E+01	0.000E+00
5.000E-03	9.315E-02	3.933E+01	0.000E+00
6.000E-03	1.049E-01	2.268E+01	0.000E+00
7.709E-03	1.191E-01	1.056E+01	0.000E+00
7.709E-03	1.191E-01	1.361E+01	0.000E+00
8.000E-03	1.210E-01	1.221E+01	0.000E+00
1.000E-02	1.313E-01	6.321E+00	0.000E+00
1.500E-02	1.469E-01	1.864E+00	0.000E+00
2.000E-02	1.554E-01	7.737E-01	0.000E+00
3.000E-02	1.623E-01	2.204E-01	0.000E+00
4.000E-02	1.629E-01	8.953E-02	0.000E+00
5.000E-02	1.612E-01	4.431E-02	0.000E+00
6.000E-02	1.584E-01	2.487E-02	0.000E+00

8.000E-02	1.522E-01	9.969E-03	0.000E+00
1.000E-01	1.459E-01	4.900E-03	0.000E+00
1.500E-01	1.323E-01	1.354E-03	0.000E+00
2.000E-01	1.216E-01	5.502E-04	0.000E+00
3.000E-01	1.060E-01	1.604E-04	0.000E+00
4.000E-01	9.505E-02	6.996E-05	0.000E+00
5.000E-01	8.683E-02	3.812E-05	0.000E+00
6.000E-01	8.034E-02	2.389E-05	0.000E+00
8.000E-01	7.060E-02	1.213E-05	0.000E+00
1.000E+00	6.349E-02	7.541E-06	0.000E+00
1.022E+00	6.283E-02	7.101E-06	0.000E+00
1.250E+00	5.678E-02	4.809E-06	0.000E+00
1.500E+00	5.159E-02	3.477E-06	0.000E+00
2.000E+00	4.404E-02	2.161E-06	0.000E+00
2.044E+00	4.348E-02	2.090E-06	0.000E+00
3.000E+00	3.465E-02	1.187E-06	1.212E-05
4.000E+00	2.890E-02	8.061E-07	4.949E-05
5.000E+00	2.496E-02	6.066E-07	9.863E-05
6.000E+00	2.206E-02	4.851E-07	1.515E-04
7.000E+00	1.983E-02	4.036E-07	2.043E-04
8.000E+00	1.805E-02	3.452E-07	2.555E-04
9.000E+00	1.659E-02	3.015E-07	3.046E-04
1.000E+01	1.537E-02	2.675E-07	3.514E-04
1.100E+01	1.434E-02	2.403E-07	3.958E-04
1.200E+01	1.344E-02	2.182E-07	4.378E-04
1.300E+01	1.267E-02	1.997E-07	4.777E-04
1.400E+01	1.198E-02	1.840E-07	5.155E-04
1.500E+01	1.137E-02	1.707E-07	5.515E-04
1.600E+01	1.083E-02	1.592E-07	5.858E-04
1.800E+01	9.902E-03	1.402E-07	6.497E-04
2.000E+01	9.130E-03	1.252E-07	7.081E-04
2.200E+01	8.481E-03	1.132E-07	7.621E-04
2.400E+01	7.924E-03	1.032E-07	8.118E-04
2.600E+01	7.442E-03	9.484E-08	8.581E-04
2.800E+01	7.021E-03	8.774E-08	9.014E-04
3.000E+01	6.648E-03	8.162E-08	9.417E-04
4.000E+01	5.283E-03	6.053E-08	1.112E-03
5.000E+01	4.408E-03	4.809E-08	1.244E-03
6.000E+01	3.799E-03	3.990E-08	1.351E-03
8.000E+01	2.996E-03	2.974E-08	1.517E-03
1.000E+02	2.487E-03	2.371E-08	1.643E-03
1.500E+02	1.771E-03	1.574E-08	1.860E-03
2.000E+02	1.389E-03	1.178E-08	2.003E-03
3.000E+02	9.842E-04	7.831E-09	2.184E-03
4.000E+02	7.708E-04	5.867E-09	2.297E-03
5.000E+02	6.379E-04	4.690E-09	2.376E-03
6.000E+02	5.464E-04	3.907E-09	2.434E-03
8.000E+02	4.266E-04	2.929E-09	2.515E-03
1.000E+03	3.510E-04	2.342E-09	2.570E-03
1.500E+03	2.451E-04	1.560E-09	2.653E-03

2.000E+03	1.897E-04	1.170E-09	2.699E-03
3.000E+03	1.319E-04	7.798E-10	2.751E-03
4.000E+03	1.018E-04	5.847E-10	2.781E-03
5.000E+03	8.327E-05	4.678E-10	2.800E-03
6.000E+03	7.061E-05	3.898E-10	2.813E-03
8.000E+03	5.438E-05	2.923E-10	2.831E-03
1.000E+04	4.442E-05	2.338E-10	2.842E-03
1.500E+04	3.069E-05	1.559E-10	2.857E-03
2.000E+04	2.359E-05	1.169E-10	2.865E-03
3.000E+04	1.627E-05	7.795E-11	2.874E-03
4.000E+04	1.249E-05	5.846E-11	2.879E-03
5.000E+04	1.017E-05	4.677E-11	2.882E-03
6.000E+04	8.598E-06	3.898E-11	2.884E-03
8.000E+04	6.593E-06	2.923E-11	2.887E-03
1.000E+05	5.365E-06	2.338E-11	2.889E-03

۳-۴ انرژی چشمه:

هر چه انرژی چشمه بیش تر باشد، زاویه پراکندگی کوچکتری بدست می‌دهد. یا به عبارت دیگر بالا بودن احتمال پراکندگی مستلزم کاهش انرژی چشمه است. افزایش انرژی فوتون‌های ورودی، اثر تضعیف و حوادث ناشی از پراکندگی را کاهش می‌دهد. رابطه کلین- نشینا این موضوع را نشان می‌دهد. با کاهش احتمال پراکندگی در انرژی‌های بالا، تفاوت نسبی بین حفره‌ها در بتن نیز کاهش می‌یابد. هر چه دهانه‌ی موازی ساز آشکارساز کوچک‌تر شود تفکیک پذیری بهتری به دست می‌آید. لذا در این پژوهش برای دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز با شعاع‌های مختلف کد شبیه‌سازی را به کار بردیم و بهترین شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز را تعیین نمودیم.

۳-۵ زاویه پراکندگی:

احتمال پراکندگی و تضعیف، به انرژی تابشی و زاویه پراکندگی بستگی دارد. انرژی چشمه و زاویه پراکندگی دو اصل مهم در اثر تابع پاسخ آشکارساز هستند. رابطه کلین- نشینا برای فوتون‌های ورودی با انرژی‌های مشخص، نشان می‌دهد که با کاهش زاویه پراکندگی عموماً احتمال پراکندگی افزایش می‌یابد و بنابراین تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند افزایش می‌یابند. با افزایش

زاویه‌ی پراکندگی، تابع پاسخ آشکارساز به اوج می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد. کاهش تابع پاسخ آشکارساز نشان دهنده‌ی کاهش احتمال پراکندگی در زاویه‌های پراکندگی بزرگ می‌باشد.

سرانجام، تابع پاسخ آشکارساز مجدداً شروع به افزایش می‌کند که به دلیل سیگنال‌هایی از پراکندگی‌های متعدد در زاویه‌های پراکندگی خیلی بالاست. بنابراین، نتیجه می‌شود که یک ترکیب بهینه از انرژی چشمه و زاویه‌ی پراکندگی وجود دارد که حداکثر تابع پاسخ آشکارساز را می‌دهد.

رابطه‌ی زیر تابع پاسخ آشکارساز را بیان می‌کند:

$$S' = \frac{1}{R^2} e^{-\mu t} p(E \rightarrow E', \theta) e^{-\mu' t'} \frac{1}{R'^2} \quad (11-3)$$

که S' تابع پاسخ آشکارساز با احتمال رسیدن فوتون به آشکارساز (per unit area per unit photon)، R و R' به ترتیب فواصل از چشمه و آشکارساز، μ ، μ' ، به ترتیب ضرائب تضعیف در انرژی‌های E و E' ، t و t' نشان‌دهنده‌ی ضخامت‌های ماده‌ی جاذب هستند و $p(E \rightarrow E', \theta)$ احتمال پراکندگی کلین - نشینا از E به E' با زاویه‌ی θ می‌باشد.

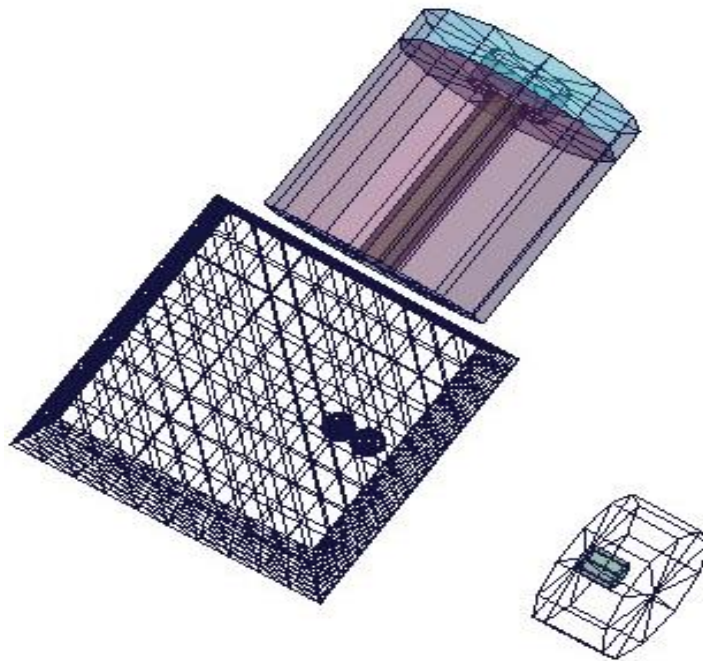
E' طبق رابطه (۷-۱) که در فصل اول به آن اشاره نمودیم، از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$E' = \frac{E}{\left[1 + (1 - \cos \theta) \left(\frac{E}{mc^2}\right)\right]}$$

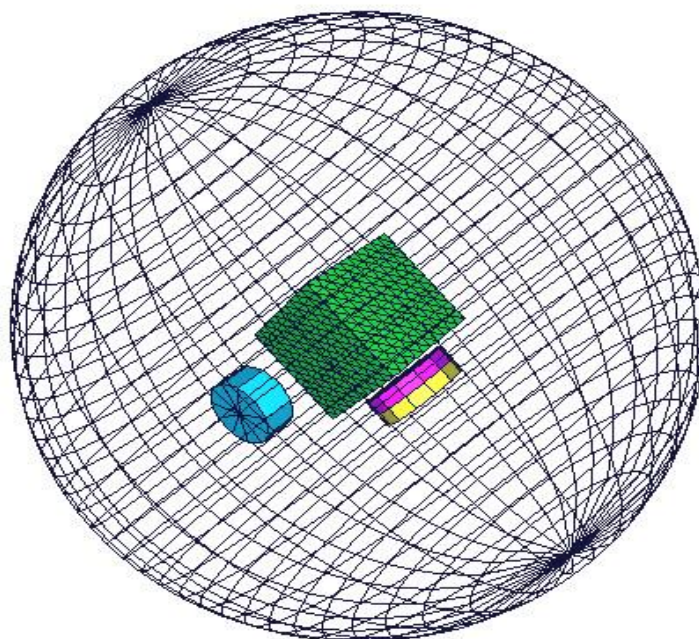
که E و E' انرژی‌های ورودی و پراکنده هستند، و mc^2 جرم سکون الکترون و θ زاویه‌ی پراکندگی می‌باشد [۲۸].

۳-۶ شبیه‌سازی:

بتن با ابعاد 15 cm^3 داریم که چشمه‌ی سزیم دارای محافظ سرب در یک سمت بتن و آشکارساز HPGe در سمت دیگری از این بتن قرار گرفته است. مبدأ سه بعدی را در مرکز بتن قرار دادیم. در شکل (۳-۳) طرحی از بتن، آشکارساز و چشمه و همچنین دو حفره مماس بر هم را به صورت سه بعدی نشان داده‌ایم. شکل (۴-۳) نیز طرحی سه بعدی از چیدمان بتن، آشکارساز، چشمه و فضایی که برای آن‌ها در برنامه MCNP تعریف نموده‌ایم را نشان می‌دهد. این تصاویر توسط برنامه MCNPX27 گرفته شده است.



شکل (۵-۳) طرح بدست آمده از کد MCNPX که بتن، آشکارساز، چشمه و دو حفره‌ی هوا با شعاع 0.6 cm به صورت مماس بر هم در عمق $4/9 \text{ cm}$ از بتن قرار گرفته‌اند.



شکل (۶-۳) طرحی از چیدمان بتن، آشکارساز، چشمه به همراه فضای تعریف شده در MCNPX که این هندسه در آن قرار گرفته است.

چشمه در فاصله‌ی ۱۹/۵ cm از بتن قرار دارد. آشکارساز را در دو فاصله‌ی متفاوت از بتن مورد بررسی قرار دادیم. ابتدا آشکارساز را در فاصله‌ی ۱۰/۵۲۵ cm و سپس در فاصله‌ی ۱ cm از بتن قرار دادیم. آشکارساز HPGe دارای شعاع ۲/۲۵ cm و طول ۴۰/۵ mm و راندمان نسبی شمارش در محدوده‌ی ۸۰٪ و قدرت تفکیک ۱/۸ KeV می‌باشد. چشمه‌ی ^{137}Cs دارای قدرت ۱۵۳/۹۲ GBq، درون محافظ سربی با ارتفاع ۴ cm و شعاع ۴/۳ cm می‌باشد. برنامه‌های شبیه‌سازی در زمان‌های مشخصی به منظور داشتن خطای نسبی زیر ۵٪ اجرا شدند. ابتدا بتن بدون حفره را به منظور بدست آوردن تابع پاسخ اولیه (R_1) و سپس بتن با حفره دارای شعاع‌های مختلف را به منظور بدست آوردن تابع پاسخ نهایی (R_2) مورد بررسی قرار دادیم. کنتراست (Contrast) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

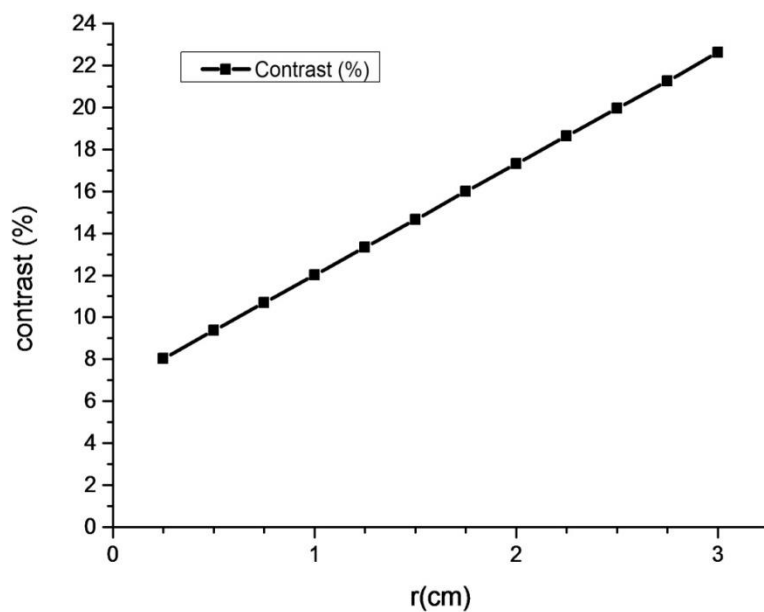
$$c = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \times 100 \quad (12-3)$$

با توجه به رابطه‌ی بالا خطای نسبی کنتراست از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial R_1} \sigma_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial R_2} \sigma_{R_2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_1^2} \sigma_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{-1}{R_2} \sigma_{R_2}\right)^2} = \sqrt{\frac{R_2^2}{R_1^4} \sigma_{R_1}^4 + \frac{\sigma_{R_2}^2}{R_2^2}} =$$

$$\left(\frac{R_2}{R_1} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_2}}{R_2}\right)^2}\right) \times 100 \quad (13-3)$$

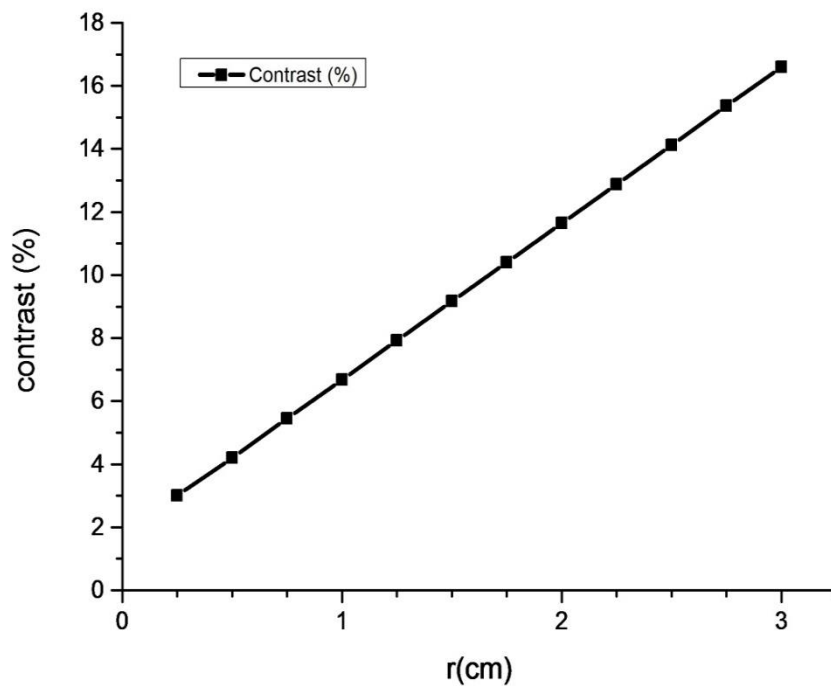
جداول (۳-۵) تا (۳-۱۰) همراه با نمودارهای مربوط به آن‌ها تغییرات کنتراست مربوط به حفره‌های متعدد همراه با شعاع‌های مختلف را نشان می‌دهند. طبق این جداول و نمودارها کنتراست با زیاد شدن شعاع حفره‌های هوا افزایش می‌یابد. با افزایش شعاع حفره‌ها حجم حفره‌های هوا افزایش یافته و در نتیجه احتمال افزایش تعداد برهم‌کنش‌های موجود در داخل حفره‌ی هوا زیاد می‌شود. افزایش تعداد برهم‌کنش‌های پرتو با ماده، افزایش ضریب تضعیف و در نهایت افزایش کنتراست را در بر دارد. لذا حفره‌هایی که دارای بیش‌ترین شعاع هستند، به دلیل بالاتر بودن کنتراست، دارای قابلیت رؤیت بیش‌تری نسبت به حفره‌های هوا با شعاع کم‌تر می‌باشند.



نمودار (۳-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۱ cm از مرکز بتن

جدول (۵-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۱ cm از مرکز بتن

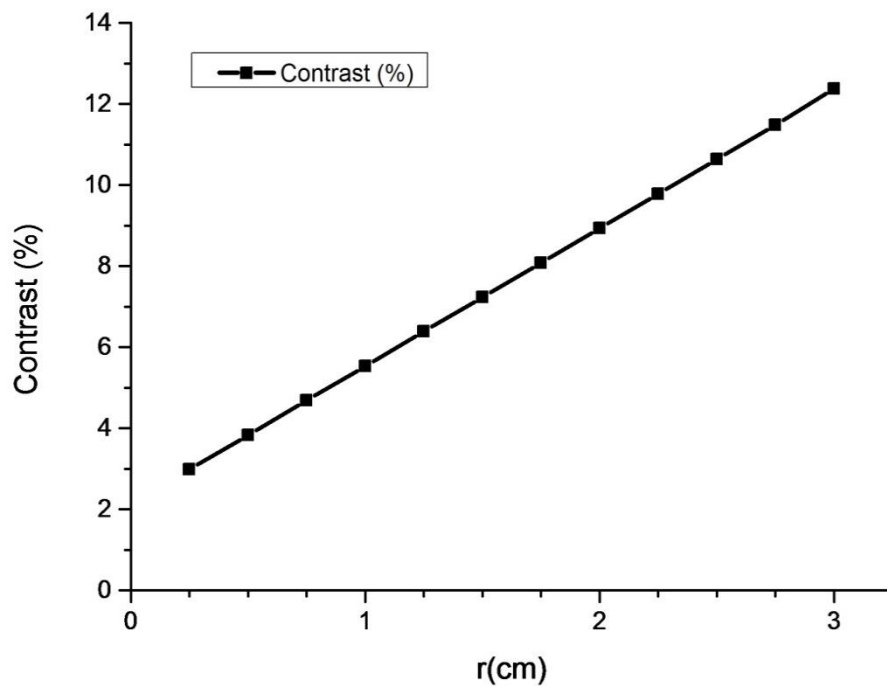
r(cm)	Contrast (%)	r(cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۸/۰۳۵	۱/۷۵	۱۵/۹۸۵
۰/۵	۹/۳۶	۲	۱۷/۳۱
۰/۷۵	۱۰/۶۸۵	۲/۲۵	۱۸/۶۳۵
۱	۱۲/۰۱	۲/۵	۱۹/۹۶
۱/۲۵	۱۳/۳۳۵	۲/۷۵	۲۱/۲۸۵
۱/۵	۱۴/۶۶	۳	۲۲/۶۱



نمودار (۳-۴) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۲ cm از مرکز بتن

جدول (۳-۶) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۲ cm از مرکز بتن

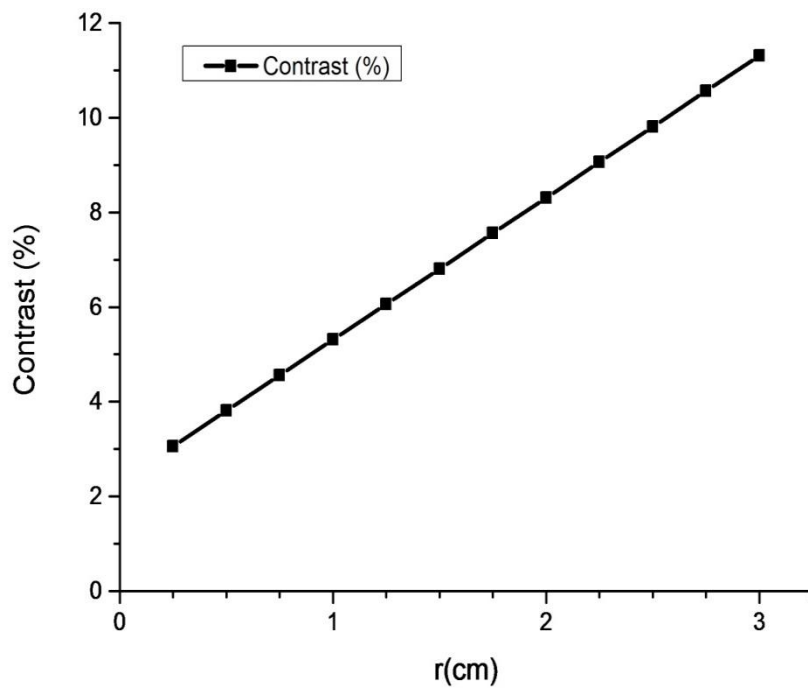
r (cm)	Contrast (%)	r (cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۳	۱/۷۵	۱۰/۴
۰/۵	۴/۲	۲	۱۱/۶۴
۰/۷۵	۵/۴۴	۲/۲۵	۱۲/۸۸
۱	۶/۶۸	۲/۵	۱۲/۱۴
۱/۲۵	۷/۹۲	۲/۷۵	۱۵/۳۶
۱/۵	۹/۱۶	۳	۱۶/۶



نمودار (۳-۵) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۳ cm از مرکز بتن

جدول (۳-۷) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۳ cm از مرکز بتن

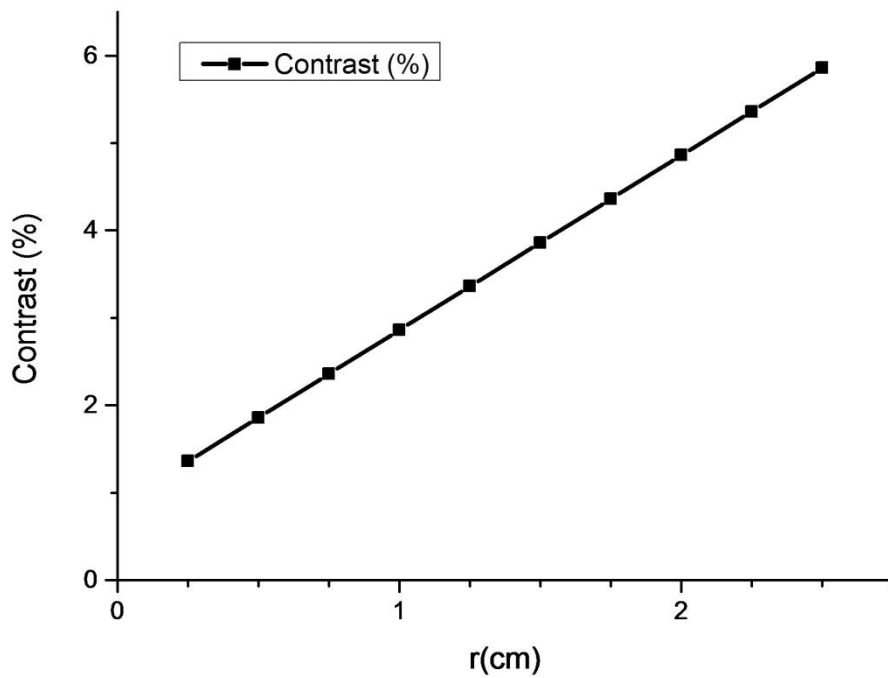
r (cm)	Contrast (%)	r (cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۲/۹۸	۱/۷۵	۸/۰۸
۰/۵	۳/۸۳	۲	۸/۹۳
۰/۷۵	۴/۶۸	۲/۲۵	۹/۷۸
۱	۵/۵۳	۲/۵	۱۰/۶۳
۱/۲۵	۶/۳۸	۲/۷۵	۱۱/۴۸
۱/۵	۷/۲۳	۳	۱۲/۳۷



نمودار (۳-۶) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۴ cm از مرکز بتن

جدول (۳-۸) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۴ cm از مرکز بتن

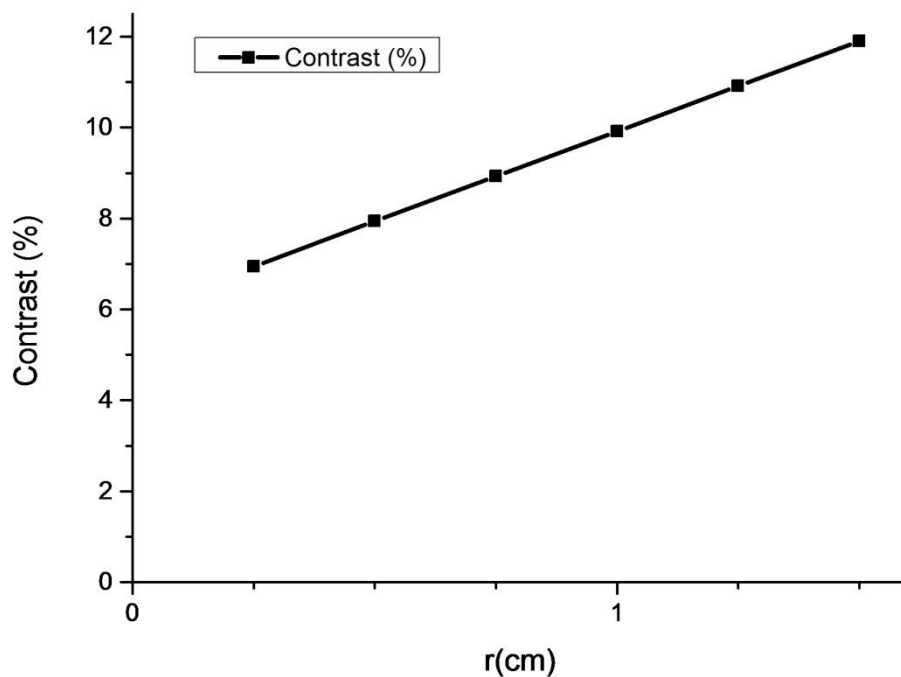
r (cm)	Contrast (%)	r (cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۳/۰۵۹	۱/۷۵	۷/۵۵۹
۰/۵	۳/۸۰۹	۲	۸/۳۰۹
۰/۷۵	۴/۵۵۹	۲/۲۵	۹/۰۵۹
۱	۵/۳۰۹	۲/۵	۹/۸۰۹
۱/۲۵	۶/۰۵۹	۲/۷۵	۱۰/۵۵۹
۱/۵	۶/۸۰۹	۳	۱۱/۳۰۹



نمودار (۷-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۵ cm از مرکز بتن

جدول (۹-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۵ cm از مرکز بتن

r (cm)	Contrast (%)	r (cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۱/۳۶	۱/۵	۳/۸۶
۰/۵	۱/۸۶	۱/۷۵	۴/۳۶
۰/۷۵	۲/۳۶	۲	۴/۸۶
۱	۲/۸۶	۲/۲۵	۵/۳۶
۱/۲۵	۳/۳۶	۲/۵	۵/۸۶



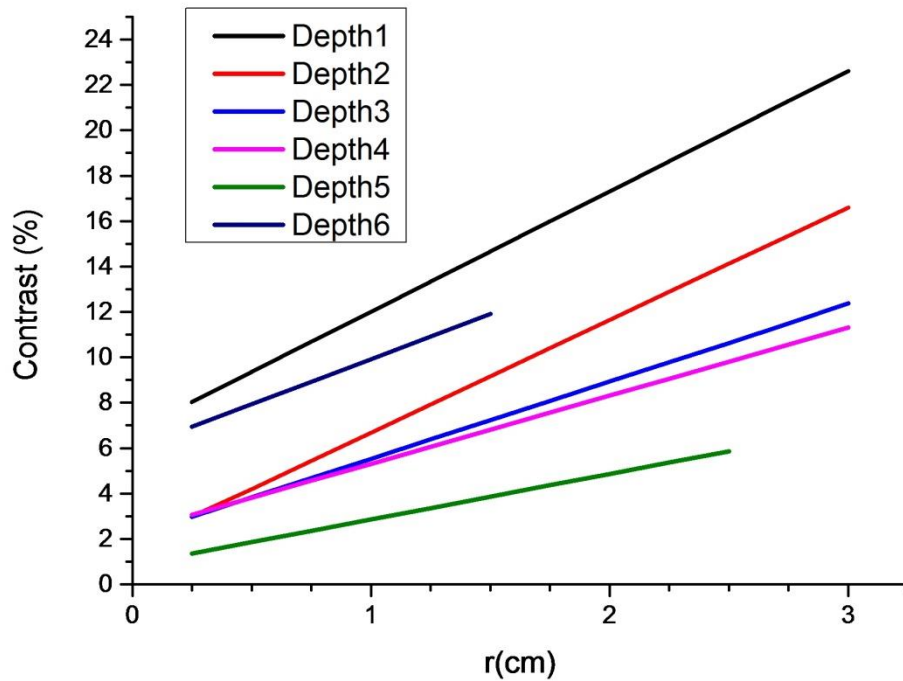
نمودار (۸-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا برای عمق ۶ cm از مرکز بتن

جدول (۱۰-۳) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا در عمق ۶ cm از مرکز بتن

r (cm)	Contrast (%)
۰/۲۵	۶/۹۴۴
۰/۵	۷/۹۳۶
۰/۷۵	۸/۹۲۸
۱	۹/۹۲
۱/۲۵	۱۰/۹۱۲
۱/۵	۱۱/۹۰۴

۳-۷ مقایسه کنتراست حفره‌ها در شش عمق مختلف:

کنتراست حفره‌های هوا با شعاع‌هایی از قبیل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۲/۲۵، ۲/۵، ۲/۷۵، ۳ با گام‌های ۰/۲۵ را توسط برنامه MCNP تعیین نمودیم. طبق جداول (۳-۵) تا (۳-۱۰) مقایسه‌ای از تغییرات کنتراست حفره‌ی هوا با شعاع‌های مشخص در شش عمق از ۱ cm تا ۶ cm در نمودار (۳-۹) آورده شده است.



نمودار (۳-۹) مقایسه کنتراست حفره با شعاع‌های ۰/۲۵ cm تا ۳ cm در شش عمق ۱ cm تا ۶ cm.

طبق نمودار (۳-۹)، میزان رؤیت حفره‌های هوا در عمق‌های مختلف بتن به اندازه‌ی شعاع حفره‌های هوا بستگی دارد. بنابراین بیش‌ترین کنتراست‌ها مربوط به حفره‌های هوا با بیش‌ترین شعاع در عمق‌های ۰ تا ۶ cm می‌باشند.

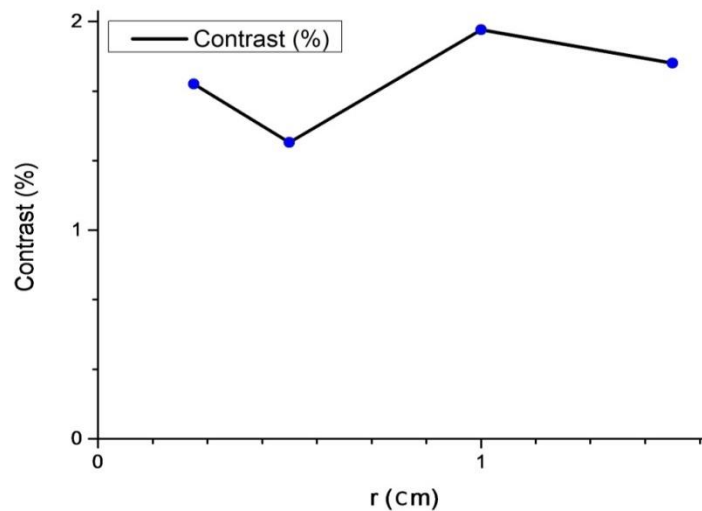
۳-۸ تعیین شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز:

مرکز حفره بر مرکز بلوکه منطبق است. کنتراست مربوط به کره‌هایی با شعاع‌های 0.01 ، 0.001 cm، 0.25 ، 0.075 ، 0.15 ، 0.25 ، 0.35 ، 0.45 ، 0.5 ، $2/5$ و شعاع‌های دهانه‌ی موازی‌ساز با اندازه‌های 0.5 ، 1 ، 1.5 cm و برای دو وضعیت محاسبه گردید. وضعیت اول، حالتی را نشان می‌دهد که آشکارساز در فاصله‌ی 1 cm از سطح بلوکه است و وضعیت دوم حالتی است که آشکارساز در فاصله‌ی 10 cm از سطح بلوکه قرار دارد. بهترین حالت برای موازی‌ساز حالتی است که بیش‌ترین کنتراست برای آن حاصل شده باشد.

طبق توضیحات بالا و محاسبات صورت گرفته توسط کد شبیه‌سازی MCNP4C، شعاع 1 cm برای دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز بدست آمد.

نمودار (۳-۱۰) و (۳-۱۱) کنتراست حفره‌ها با شعاع‌های مشخص که در متن بالا به آن‌ها اشاره نمودیم را بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز نشان می‌دهند. نمودار (۳-۱۰) وضعیتی را نشان می‌دهد که آشکارساز در فاصله 1 cm از سطح بلوکه است. نمودار (۳-۱۱) نشان دهنده حالتی است که آشکارساز در فاصله‌ی 10 سانتی‌متر از سطح بلوکه قرار دارد.

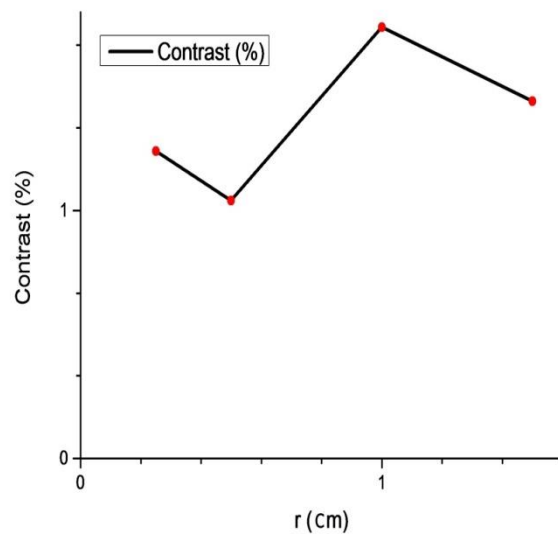
با مقایسه این دو نمودار به این نتیجه می‌رسیم که بهترین حالت برای شعاع دهانه موازی‌ساز آشکارساز که بیش‌ترین کنتراست در آن برای هر دو وضعیت بالا بدست آمده است، 1 cm می‌باشد. نمودار (۳-۱۲) مقایسه دو وضعیت آشکارساز را برای تعیین بهترین مقدار شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز نشان می‌دهد. مقادیر کنتراست را بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز آشکارساز در جداول (۳-۱۰)، (۳-۱۱) و (۳-۱۲) نشان داده‌ایم.



نمودار (۳-۱۰) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱ cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های ۰/۰۰۱ cm، ۰/۰۱ cm، ۰/۰۲۵ cm، ۰/۰۷۵ cm، ۰/۱۵۰ cm، ۰/۲۵۰ cm، ۰/۳۵۰ cm، ۰/۴۵۰ cm، ۱/۵ cm، ۲/۵ cm را برای حفزه‌ی هوا در داخل بتن در نظر گرفتیم.

جدول (۳-۱۱) تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکارساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱ cm از سطح بلوکه قرار دارد.

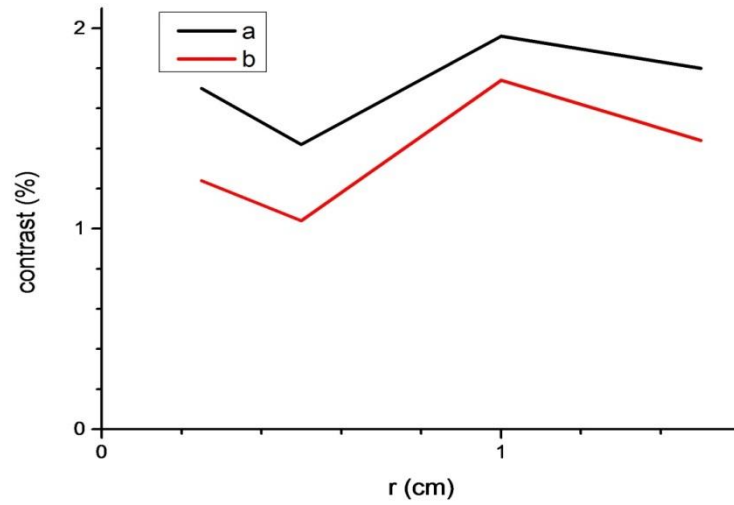
r (cm)	Contrast (%)
0.25	1.7
0.5	1.42
1	1.96
1.5	1.8



نمودار (۳-۱۱) تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه موازی‌ساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱۵۰، ۰/۲۵۰، ۰/۳۵۰، ۰/۴۵۰، ۱/۵، ۲/۵ را برای حفره‌ی هوا در داخل بتن در نظر گرفتیم.

جدول (۳-۱۲) تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکارساز هنگامی که آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه قرار دارد.

r (cm)	Contrast (%)
0.25	1.24
0.5	1.04
1	1.74
1.5	1.44



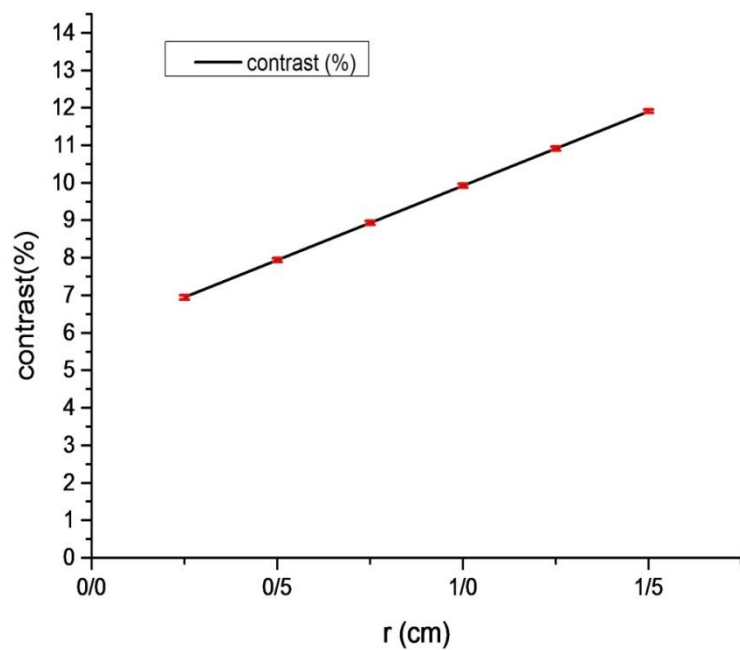
نمودار (۳-۱۲) مقایسه‌ی تغییرات کنتراست بر حسب شعاع دهانه‌ی موازی‌ساز هنگامی که (a) آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه است. شعاع‌های ۰/۰۱، ۰/۰۱، ۰/۰۲۵، ۰/۰۷۵، ۰/۱۵۰، ۰/۲۵۰، ۰/۳۵۰، ۰/۴۵۰، ۱/۵، ۲/۵ را برای حفره داخل بتن در نظر گرفتیم.

جدول (۳-۱۳) مقایسه‌ی تغییرات کنتراست بر حسب چهار شعاع دهانه موازی‌ساز آشکار. در دو حالت (a) آشکارساز در فاصله‌ی ۱ cm از سطح بلوکه است. (b) آشکارساز در فاصله‌ی ۱۰ cm از سطح بلوکه است.

r (cm)	a	b
0.25	1.7	1.24
0.5	1.42	1.04
1	1.96	1.74
1.5	1.8	1.44

۳-۹ تعیین بیشینه عمق قرارگیری تک حفره‌ی هوا در بتن:

به منظور تعیین بیش‌ترین عمق در بتن که حفره می‌تواند در آن قرار بگیرد، کنتراست برای حفره با شعاع‌های مختلف از جمله ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۲/۲۵، ۲/۵، ۲/۷۵ و ۳ cm در فواصل ۱ cm تا ۶ cm از سطح بلوکه به طوری که مرکز حفره ابتدا منطبق با مرکز بتن و در نهایت سطح حفره مماس بر سطح بلوکه باشد، را محاسبه نمودیم. طبق محاسبات صورت گرفته توسط کد شبیه‌سازی، کنتراست با افزایش شعاع حفره‌ها روند صعودی داشته است. لذا حفره با شعاع ۳ Cm دارای بیش‌ترین کنتراست بوده و نسبت به مابقی شعاع‌ها قابلیت رؤیت بیش‌تری دارد. در عمق‌های ۱ cm تا ۶ cm، حفره با شعاع ۱/۵ cm در عمق ۶ cm از مرکز بتن به دلیل داشتن کنتراست بالای ۵٪ بیش‌ترین قابلیت رؤیت را دارا می‌باشد. همچنین در عمق ۶ cm حفره‌های هوا با شعاع‌های مختلف، کنتراست بالای ۵٪ دارند که نشان می‌دهد در این عمق حفره‌ی هوا با کم‌ترین شعاع نیز قابل رؤیت می‌باشد. نمودار (۳-۱۳) محاسبات کنتراست بر حسب شعاع‌های مختلف حفره‌ی هوا را در عمق ۶ Cm از مرکز بلوکه به همراه خطای کنتراست نشان می‌دهد.



نمودار (۳-۱۳) تغییرات کنتراست و خطای کنتراست بر حسب شعاع در عمق ۶ cm از مرکز بتن

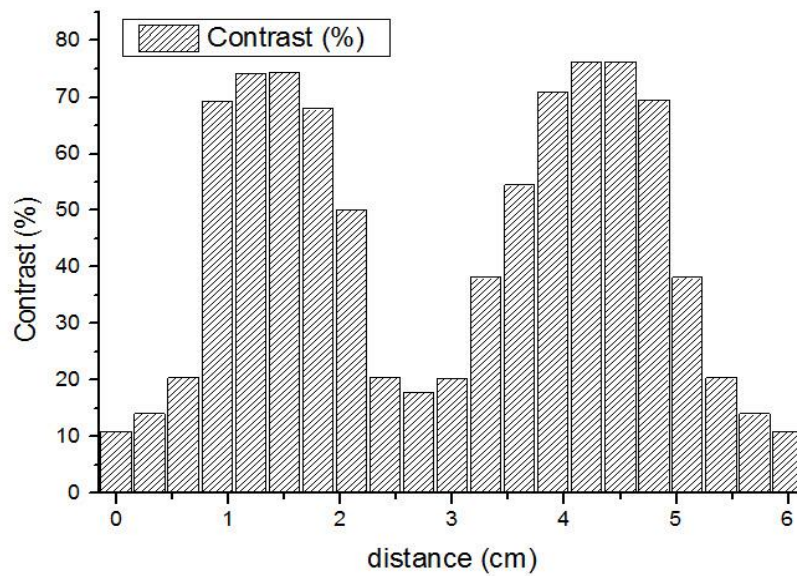
جدول (۳-۱۴) تغییرات کنتراست و خطا مربوط به شش حفره با شعاع‌های مختلف در عمق ۶ cm از مرکز بتن

R Cm)	Contrast	σ_c
۰/۲۵	۶/۹۴۴	۰/۰۵۷۹
۰/۵	۷/۹۳۶	۰/۰۵۶۲
۰/۷۵	۸/۹۲۸	۰/۰۵۶۲
۱	۹/۹۲	۰/۰۵۳۱
۱/۲۵	۱۰/۹۱۲	۰/۰۴۸۲
۱/۵	۱۱/۹۰۴	۰/۰۴۶۵

۳-۱۰ تعیین بیشینه عمق قرار گیری دو حفره‌ی هوا مماس در بتن:

به منظور تعیین بیش‌ترین عمق دو حفره‌ی مماس در وضعیتی که مبدأ مختصات در مرکز بتن قرار دارد، کنتراست برای حفره با شعاع‌های مختلف از جمله ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۲۵، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۲/۲۵، ۲/۵، ۲/۷۵ و ۳ و در فواصل ۱ cm تا ۶ cm از مرکز بلوکه به طوری که در نهایت سطح دو حفره بر سطح بلوکه مماس باشد، محاسبه شد. طبق محاسبات صورت گرفته توسط کد شبیه‌سازی، کنتراست با افزایش شعاع حفره‌ها افزایش یافته است.

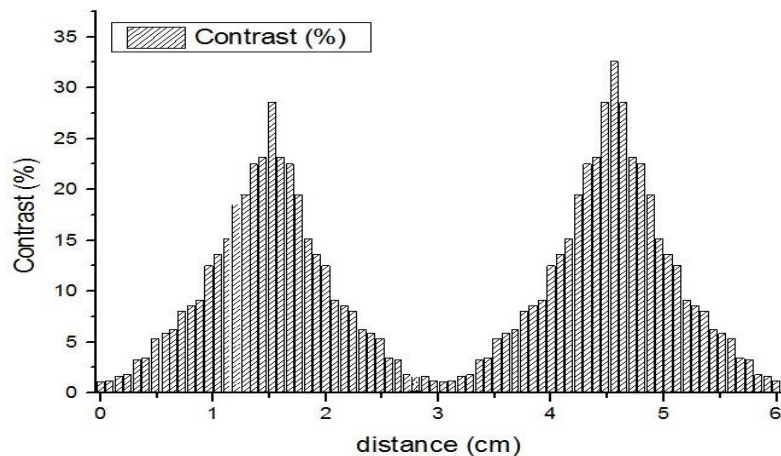
نمودارهای (۳-۱۴) تا (۳-۱۶) برای دو حفره مماس بر هم در فواصل ۱ cm تا ۶ cm و برای شعاع‌های ۰/۴۵، ۱/۵ و ۲/۵ رسم شده‌اند. هنگامی که پرتوهای گاما وارد حفره‌ی هوا می‌گردند، به دلیل اینکه حفره در ابتدا دارای کم‌ترین شعاع است کنتراست کاهش داشته و سپس با پیشروی پرتو در داخل حفره‌ی هوا و با افزایش شعاع حفره‌ی هوا، احتمال اندرکنش‌های پرتو با ماده افزایش یافته و کنتراست افزایش می‌یابد. افزایش کنتراست در مرکز حفره به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد که به صورت قله این افزایش نشان داده شده است. سپس مجدداً با کاهش شعاع حفره‌ی هوا کنتراست کاهش یافته و در مرکز دو حفره‌ی مماس بر هم کنتراست به پائین‌ترین مقدار خود می‌رسد. به همین دلیل نمودارهای مربوط به دو حفره‌ی هوا مماس بر هم در عمق‌های مختلف و با شعاع‌های گوناگون به شکل سینوسی می‌باشند.



نمودار (۳-۱۴) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۰/۴۵ cm و در شش عمق مختلف بتن.

جدول (۳-۱۵) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۰/۴۵ cm

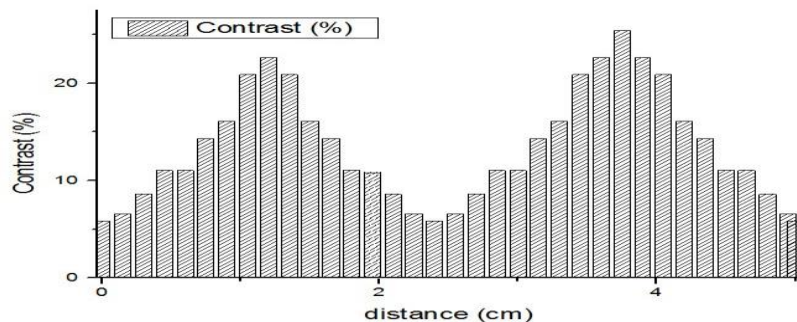
Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)
0	10.9	2.1	50	4.2	76.3
0.3	14	2.4	20.46	4.5	76.22
0.6	20.4	2.7	17.7	4.8	69.5
0.9	69.3	3	20.23	5.1	38.1
1.2	74.2	3.3	38.1	5.4	20.4
1.5	74.4	3.6	54.5	5.7	14
1.8	67.9	3.9	71	6	10.9



نمودار (۳-۱۵) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۱/۵ cm و در شش عمق مختلف بتن.

جدول (۳-۱۶) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۱/۵ cm

Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)
0	1.091	1.28	19.5	2.48	5.28	3.76	8.06	4.96	15.18
0.08	1.19	1.36	22.51	2.56	3.38	3.84	8.7	5.04	13.45
0.16	1.63	1.44	23.21	2.64	3.17	3.92	9.12	5.12	12.75
0.24	1.78	1.52	28.571	2.72	1.69	4	12.5	5.2	9.01
0.32	3.273	1.6	23.14	2.88	1.60	4.08	13.44	5.28	8.42
0.4	3.41	1.68	22.36	2.96	1.15	4.16	15.15	5.36	8.02
0.48	5.357	1.76	19.2	3.04	1.091	4.24	19.5	5.44	6.14
0.58	5.866	1.84	15.04	3.12	1.19	4.32	22.41	5.52	5.76
0.64	6.249	1.92	13.14	3.2	1.63	4.4	23.11	5.6	5.25
0.72	8.0357	2	12.25	3.28	1.68	4.48	28.69	5.68	3.31
0.8	8.594	2.08	9.01	3.36	3.28	4.56	32.2	5.76	3.17
0.88	9.1405	2.16	8.47	3.44	3.39	4.64	28.6	5.84	1.68
0.96	12.5	2.24	7.93	3.52	5.36	4.72	23.02	5.92	1.53
1.04	13.64	2.32	6.03	3.6	5.87	4.8	22.5	6	1.13
1.12	15.178	2.4	5.47	3.68	6.26	4.88	19.33	-	-



نمودار (۳-۱۶) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف قرارگرفتن حفره‌ی هوا از مرکز بتن برای دو حفره‌ی هوا مماس با شعاع‌های ۲/۵ cm و در شش عمق مختلف بتن.

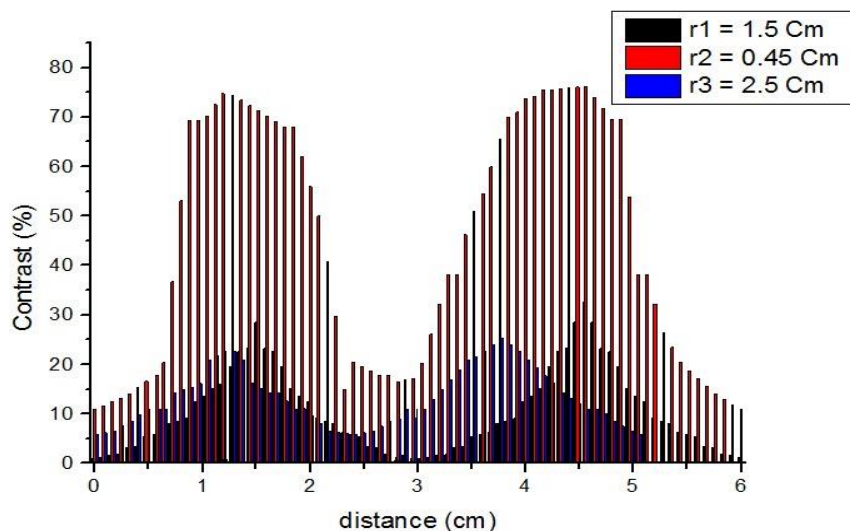
جدول (۳-۱۷) تغییرات کنتراست بر حسب فواصل مختلف حفره‌ی هوا برای شعاع ۲/۵ cm

Distance (Cm)	Contrast (%)	Distance (Cm)	Contrast (%)
0	5.86	2.55	6.64
0.15	6.5476	2.7	8.6
0.3	8.59	2.85	11.04
0.45	11.03095	3	11.012
0.6	11.0119	3.15	14.30
0.75	14.2857	3.3	16.09
0.9	16.098	3.45	20.9
1.05	20.87	3.6	22.520
1.2	22.619	3.75	25.38
1.35	20.79	3.9	22.59
1.5	16.05	4.05	20.80
1.65	14.2	4.2	16.09
1.8	11	4.35	14.18
1.95	11.4	4.5	11.14
2.1	8.4	4.65	11.03
2.25	6.6	4.8	8.45
2.4	5.76	4.95	6.48
5	5.8	-	-

نمودار های (۱۴-۳) و (۱۵-۳) و (۱۶-۳) تغییرات کنتراست را به ترتیب برای حفره‌ی هوا با شعاع‌های ۰/۴۵ cm، ۱/۵ و ۲/۵ و در شش عمق از ۱ cm تا ۶ cm را نشان می‌دهند. طبق نتایج حاصل از این نمودارها و با توجه به این موضوع که انرژی رسیده به حفره‌ای که نزدیک به چشمه می‌باشد بیش‌تر است در نتیجه ضریب تضعیف جرمی حفره‌ای که نزدیک به سطح بتن می‌باشد بیش‌تر بوده و حفره‌ای که به سطح بتن نزدیک‌تر می‌باشد دارای کنتراست بالایی می‌باشد. برای مثال، بیش‌ترین کنتراست با مقادیر ۲۵/۳۸٪ و ۲۲/۶۱۹٪ به ترتیب مربوط به حفره‌ی هوا با شعاع ۲/۵ cm در عمق ۳/۷۵ cm و ۱/۲ از مرکز بتن می‌باشند در حالی که وقتی حفره با شعاع ۰/۴۵ cm در عمق ۴/۸ cm و ۰/۹ از مرکز بتن قرار دارد دارای بیش‌ترین کنتراست به ترتیب ۶۹/۵٪ و ۶۹/۳٪ می‌باشد. همچنین حفره‌ی هوا با شعاع ۱/۵ cm در عمق‌های ۴/۵۶ cm و ۱/۵۲ دارای مقادیر کنتراست به ترتیب ۳۲/۲٪ و ۲۸/۹۷۱٪ می‌باشد. بنابراین طبق مقایسه‌ای که صورت گرفت حفره‌ای که نزدیک‌تر به سطح بتن می‌باشد دارای بیش‌ترین کنتراست بوده و احتمال رؤیت بیش‌تری دارد. نمودارهای مربوط به دو حفره‌ی مماس بر هم به صورت دو قله‌ای می‌باشند. انرژی در مرکز حفره‌ی هوا به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. زمانی که پرتو وارد حفره‌ی هوا می‌گردد با افزایش شعاع حفره برهم‌کنش پرتو با گازهای تشکیل دهنده‌ی هوا بیش‌تر می‌شود و بنابراین کنتراست افزایش می‌یابد. افزایش کنتراست در مرکز حفره باعث ایجاد قله در تصویر اسکن شده می‌شود. سپس با کاهش شعاع حفره مجدداً برهم‌کنش پرتو با گازهای تشکیل دهنده‌ی هوا کاهش می‌یابد و کنتراست کاهش پیدا می‌کند تا این‌که در لبه‌ی انتهایی حفره به کم‌ترین مقدار خود برسد. لذا این مراحل برای حفره‌ی دوم نیز تکرار می‌گردد و نموداری مشابه با نمودار حفره‌ی اول به صورت تک قله به ما می‌دهد.

نمودار (۱۷-۳) توضیحات مربوط به مقایسه سه حفره‌ی هوا با شعاع‌های ۰/۴۵ cm، ۱/۵ و ۲/۵ را نشان می‌دهد. این نمودار بر حسب سه نمودار (۱۴-۳)، (۱۵-۳) و (۱۶-۳) و جداول (۱۵-۳)، (۱۶-۳) و (۱۷-۳) ترسیم شده است. طبق این نمودار دو حفره مماس بر هم با شعاع ۰/۴۵ cm دارای

بیشترین کنتراست ۶۹/۵٪ و ۶۹/۳٪ در عمق‌های ۴/۸ cm و ۰/۹ می‌باشند. دو حفره مماس با شعاع ۱/۵ cm کنتراست ۳۲/۲٪ و ۲۸/۵۷٪ را در عمق ۴/۵۶ cm و ۱/۵۲ نشان می‌دهند. همچنین کنتراست ۲۲/۶۱٪ و ۲۵/۳٪ در عمق‌های ۱/۲ cm و ۳/۷۵ مربوط به دو حفره مماس با شعاع ۱/۵ cm می‌باشند. طبق داده‌هایی که بدست آوردیم بیشترین کنتراست‌های حفره‌ی هوا متعلق به عمق ۴/۸ cm بود که به سطح بتن و همچنین به چشمه نزدیک‌تر است.



نمودار (۳-۱۷) تغییرات کنتراست بر حسب فاصله، حفره‌های هوا از مرکز بتن با شعاع‌های ۰/۴۵ cm، ۱/۵ و ۲/۵ در شش عمق مختلف از ۰ تا ۶ cm قرار گرفته‌اند. نمودار قرمز کنتراست حفره با شعاع ۰/۴۵ cm، نمودار مشکی کنتراست حفره با شعاع ۱/۵ cm و نمودار آبی کنتراست حفره با شعاع ۲/۵ cm را نشان می‌دهند.

سه حفره با شعاع‌های ۰/۴۵ cm، ۱/۵ و ۲/۵ در نمودار (۳-۱۷) نشان داده شده‌اند. طبق نتایج حاصل از مقایسه این سه حفره پی می‌بریم بیشترین درصد کنتراست مربوط به حفره با شعاع ۰/۴۵ cm در عمق ۴/۸ cm می‌باشد. لذا احتمال برهم‌کنش کامپتون در این حفره به علت دریافت بیشترین میزان انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش احتمال برهم‌کنش پرتو با ماده ضریب تضعیف افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه کنتراست به بیشترین مقدار خود می‌رسد که این افزایش را در قله مربوط به نمودار کنتراست تمامی حفره‌های هوا ملاحظه می‌نمائیم. از طرفی کمترین مقدار کنتراست بین دو قله در هر نمودار مرکز دو حفره‌ی مماس بر هم را نشان می‌دهد.

۳-۱۱ مقایسه کنتراست‌های بدست آمده برای حالات مختلف حفره در بتن:

۱. برای بتن در هر عمق و فاصله‌ی مشخص از مرکز بتن، مقدار کنتراست با افزایش فاصله از مرکز بتن افزایش می‌یابد. یعنی حفره‌هایی که از مرکز بتن دورتر و به سطح بتن نزدیک‌تر هستند دارای کنتراست بالاتری بوده و کیفیت بتن را کاهش می‌دهند. وجود این حفره‌ها در سطح بتن باعث تخریب و ترک‌دار شدن بتن می‌گردد.

۲. در تمامی عمق‌های بتن کنتراست حفره‌های هوا با شعاع‌های مختلف بسته به ابعاد آن حفره متغیر می‌باشد. برای مثال در عمق ۱ cm از مرکز بتن شاهد کم‌ترین و بیش‌ترین میزان کنتراست به ترتیب برای کم‌ترین و بیش‌ترین شعاع حفره‌ی هوا هستیم. حفره‌هایی که دارای شعاع بسیار پائین بوده غیر قابل رؤیت محسوب می‌گردند. در صورتی که شعاع حفره‌ها کم باشد احتمال برهم‌کنش پرتوها کاهش می‌یابد. بنابراین این حفره‌ها دارای کنتراست بسیار پائینی می‌گردند.

۳. به منظور بررسی دو حفره در حالت مماس برهم، در هر عمق و فاصله مشخص از مرکز بتن، کنتراست در یک فاصله مشخص از آشکارساز، چشمه و هندسه مناسب دارای قله است.

با توجه به نمودارهای بدست آمده برای کنتراست حفره‌ی هوا در عمق‌ها و فاصله‌های مختلف در بتن در می‌یابیم که کنتراست حفره‌ی هوا در بتن حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین نقش عمق و فواصل مختلفی که حفره‌ها در بتن قرار گرفته‌اند در بهبود کیفیت این ماده‌ی ساختمانی مشخص می‌شود.

۱۲-۳ بحث و نتیجه‌گیری:

تخریب بتن به عواملی از قبیل اندازه‌ی حفره، محتوای آن و محل قرار گرفتن حفره در بتن بستگی دارد. کنتراست را برای حفره‌های هوا با شعاع‌های مختلف و در شش عمق مختلف بتن از ۱ cm تا ۶ cm از طریق روش مونت کارلو بدست آوردیم. محاسبات نشان می‌دهد که حفره‌های قابل رؤیت دارای کنتراست بالای ۵٪ می‌باشند. نمودار بر حسب فرمول $C = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100$ رسم شده که در آن C، کنتراست و R_1 و R_2 به ترتیب توابع پاسخ مربوط به بتن بدون حفره و بتن با حفره می‌باشند. طبق نمودارها و جداول، کنتراست حفره‌های هوا بر حسب شعاع حفره و در شش عمق مختلف، کم‌ترین کنتراست مربوط به حفره با شعاع ۰/۲۵ cm و بیش‌ترین کنتراست مربوط به حفره با شعاع ۳ cm می‌باشد. اگر اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسه‌ی خوب، یعنی با استفاده از یک باریکه‌ی تابشی باریک و کاملاً موازی انجام و اطلاعات روی کاغذ لگاریتمی رسم شود، در صورتی که پرتو گاما تک انرژی باشد، یک خط مستقیم حاصل خواهد شد. بیش‌ترین کنتراست حفره‌ها بهترین حالت را برای رؤیت و بررسی مشخصات مختلف حفره‌ی هوا برای ما فراهم می‌نماید. در این تحقیق ۱۰۰۰ برنامه توسط کد MCNP اجرا نمودیم که نتایج آن‌ها به اختصار در جدول (۱۸-۳) آمده است.

جدول (۱۸-۳) خلاصه‌ای از نتایج محاسبه کنتراست تک حفره‌ی هوا در بتن توسط کد MCNP

عمق تک حفره (cm)	شعاعی که در آن کنتراست بیشینه رخ می‌دهد (cm)	بیشینه کنتراست (%)
۲۲/۶۱	۳	۱
۱۶/۶	۳	۲
۱۲/۳۷	۳	۳
۱۱/۳۰۹	۳	۴
۵/۸۶	۲/۵	۵
۱۱/۹۰۴	۱/۵	۶

جدول (۳-۱۹) خلاصه‌ای از نتایج محاسبه کنتراست دو حفره‌ی هوا در بتن توسط کد MCNP

شعاع حفره (cm)	بیش‌ترین عمق حفره‌ی اول (cm)	بیش‌ترین کنتراست حفره‌ی اول (%)	بیش‌ترین عمق حفره‌ی دوم (cm)	بیش‌ترین کنتراست حفره‌ی دوم (%)
۰/۴۵	۰/۹	۶۹/۳	۴/۸	۶۹/۵
۱/۵	۱/۵۲	۲۸/۵۷	۴/۵۶	۳۱/۲
۲/۵	۱/۲	۲۵/۳	۳/۷۵	۲۲/۶۷

حفره‌هایی که در سطح بتن قرار دارند دارای بیش‌ترین میزان کنتراست هستند و قرار گرفتن آن‌ها در سطح بتن باعث افزایش تخریب بتن و بی‌کیفیت شدن آن‌ها می‌گردد. با افزایش شعاع حفره‌ها احتمال برهم‌کنش کامپتون افزایش می‌یابد و در نتیجه اختلاف شمار تابش‌های پراکنده با حالتی که حفره‌ی هوا دارای شعاع کم‌تری می‌باشد، بیش‌تر می‌شود. از این رو با افزایش شعاع حفره‌ها کنتراست افزایش می‌یابد. تفاوت نسبی بین حفره‌ها با کاهش احتمال پراکندگی یا کاهش کنتراست در انرژی‌های بالا کاهش می‌یابد. احتمال پراکندگی و تضعیف به انرژی تابشی و زاویه‌ی پراکندگی بستگی دارد. انرژی چشمه و زاویه‌ی پراکندگی دو اصل مهم در اثر تابع پاسخ آشکارساز هستند. با کاهش زاویه‌ی پراکندگی احتمال پراکندگی افزایش می‌یابد و در نتیجه تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز می‌رسند افزایش می‌یابند که این امر منجر به افزایش کنتراست می‌گردد. تابع پاسخ آشکارساز با افزایش زاویه‌ی پراکندگی، افزایش یافته و سپس به علت کاهش احتمال پراکندگی در زاویه‌های پراکندگی بزرگ، کاهش می‌یابد. به دلیل وجود سیگنال‌ها از پراکندگی‌های متعدد در زاویه‌های پراکندگی بالا، تابع پاسخ مجدداً شروع به افزایش می‌کند. بنابراین یک هندسه‌ی مناسب از چشمه، آشکارساز و ماده‌ی هدف بهترین نتایج را برای تابع پاسخ و کنتراست می‌دهد. لذا با بررسی محل قرار گرفتن حفره‌های مختلف و متعدد در عمق‌های گوناگون بتن و از بین بردن حفره‌های مخرب در بتن، می‌توان مقاومت فشاری و طول عمر انواع بتن‌ها را افزایش داد و گامی بزرگ در صنعت ساختمان‌سازی برداشت.

پیشنهادات:

- با توجه به این که بتن یک ماده ساختمانی بسیار مهم است که سالها در صنعت ساختمان سازی و سازه های دیگر به کار رفته است، در صورتی که این ماده طبق اصول صحیح ساخته و نگهداری شود، پایایی و دوام بالایی خواهد داشت. در یک بتن امکان وجود حفره های متعدد در عمق ها و فواصل گوناگون بسیار زیاد می باشد. لذا تعیین تفکیک مکانی حفره بسیار حائز اهمیت می باشد. بدین منظور می توان از طریق روش مونت کارلو کم ترین و بیش ترین فاصله بین دو حفره را تعیین نمود. لذا به عنوان پیشنهاد برای بهبود بخشیدن به ساخت و تولید این ماده با مقاومت و استحکام بالا آزمایشاتی از قبیل تعیین کم ترین و بیش ترین فاصله دو حفره در تمامی عمق ها می تواند مورد بررسی قرار بگیرد.
- با عبور پرتو گاما از بتن و استفاده از روش مونت کارلو می توان انواع حفره با کم ترین شعاع در عمق های مختلف رو تعیین نمود. این روش در بالاتر بردن کیفیت انواع بتن بسیار مؤثر واقع خواهد شد.
- با تغییر دادن زاویه ی آشکارساز و همچنین زاویه ی پراکندگی می توان نتایج خوبی را برای محاسبه کنتراست بدست آورد.
- جهت تعیین حفره و مشخصات حفره ی موجود در بتن از طریق روش مونت کارلو می توان نوع آشکارساز را تغییر داد.
- تمامی آزمایشات انجام شده را می توان برای مواد دیگر جایگزین بتن انجام داد و کنتراست حفره ی هوا را برای آنها محاسبه نمود.

پیوست

نحوه‌ی اجرای نرم‌افزار XCOM

اطلاعات پراکندگی و جذب فوتون‌ها (پرتو x - پرتوهای گاما) برای بسیاری از علوم ، مهندسی و پزشکان مورد نیاز می‌باشد بعضی از جداول نیز تعداد محدودی از داده‌های ترکیبات و مخلوط‌ها را در بردارند. در عمل مشاهده کلیه سطح مقطع‌های مورد نیاز به صورت جدول ممکن نیست. علاوه بر این همواره سطح مقطع‌ها به انرژی‌های بیش‌تر از فوتون‌هایی که در جدول هستند نیاز دارند.

سطح مقطع‌های فوتون برای ترکیبات را می‌توان به صورت دقیق (به استثنای انرژی‌های نزدیک به لبه‌ی جذب) به عنوان حاصل جمع‌های وزنی اجزای اصلی اتمی بدست آورد. هرچند کار عددی مورد نیاز بسیار وقت‌گیر است و کار با این واقعیت که سطح مقطع‌های ضرایب جذب و میرایی کل در لبه‌های جذب ناپیوسته هستند، بیشتر پیچیده می‌شود. وقوع تکرار این ناپیوستگی‌ها، جدول‌های سطح مقطع‌ها برای انرژی فوتون‌ها در بالا و پایین همه لبه‌های جذب برای کلیه ناپیوستگی‌های اتمی مطلوب می‌سازد و این کار به درج موارد بیش‌تری نیاز دارد.

یک روش تناوبی راحت برای به وجود آوردن سطح مقطع‌ها و ضرایب میرایی برای ترکیبات و مخلوط‌ها مورد نیاز می‌باشد، برنامه وب به نام Xcom این کار را به سرعت برای هر عنصر، ترکیب یا مخلوط در انرژی‌های بین ۱ KeV تا ۱۰۰ GeV اجرا می‌کند. برنامه Xcom می‌تواند سطح مقطع‌ها را روی یک شبکه استاندارد انرژی (که فاصله‌ها تقریباً لگاریتمی هستند) یا روی یک شبکه انتخابی بوسیله کاربر یا برای مخلوطی از هر دو شبکه تولید کند. سطح مقطع‌های انرژی‌ها بلافاصله به صورت اتوماتیکی بالا و پایین کلیه لبه‌های جذب می‌آیند. Xcom دو فرم خروجی را تهیه می‌کند:

(a) جداولی که حاوی انرژی و ضرائب تضعیف می‌باشند.

(b) نمایش نموداری داده‌های جدولی

این برنامه، سطح مقطع کلی و ضرایب میرایی را همانند سطح مقطع‌های جزئی برای فرآیندهای زیر

تهیه می‌کند، پراکندگی کامپتون، جذب فوتو الکترون و تولید زوج.

حاصل جمع تمام ضرایب برای فرآیندهای مجزا برابر با ضرایب میرایی کلی است. ضرایب میرایی کلی برای پراکندگی ناکشسان به دلیل کاربرد آنها در محاسبات انتقال اشعه- گاما، نیز در این جداول آورده شده است.

ضرایب میرایی به صورت مجزا و ضرایب میرایی کل برای ترکیبات یا مخلوط‌ها از حاصل جمع کمیت‌های مناسب اجزای سازنده اتمی به دست آورده می‌شوند. درصد وزنی که از فرمول شیمیایی مربوط به اجزای سازنده ماده محاسبه می‌شود توسط کاربر در Xcom وارد می‌شوند. هر چند برای مخلوط‌ها، کاربر باید، درصد وزنی ترکیبات متنوع را محاسبه کند.

بعضی از محدودیت‌ها از قبیل این‌که، Xcom نمی‌تواند ضرایب جذب انرژی مربوط به تغییر انرژی فوتون‌ها برای انرژی جنبشی دومین فوتو کامپتون و جفت الکترون‌ها را محاسبه کند، نیز باید در نظر گرفت.

پایگاه داده‌ای عناصر

پایگاه داده‌ای جامع برای کلیه عناصر در محدوده‌ی گسترده‌ای از انرژی‌ها از پراکندگی‌های ناکشسان و کشسان مربوط به سطح مقطع‌ها و جذب فوتو الکترون و تولید زوج در جدول بندی‌ها استفاده شده‌اند.

سطح مقطع‌های پراکندگی ناکشسان (Compton) از ترکیب فرمول Nishin-klein و نقش پراکندگی ناکشسان Hartree-Fock حاصل شده است. اصطلاحات پراکندگی دابل کامپتون و تابشی را نیز شامل می‌شود. سطح مقطع‌های پراکندگی از ترکیب فرمول Thompson و فاکتورهای اتمی نظریه نسبیت Hartree-Fock بدست آمده است. سطح مقطع‌های فوتو الکترون scofield بوسیله یک محاسبه تغییر فاز برای یک پتانسیل مرکزی اتمی Hartree - Slater حاصل شده است. نتایج Scofield

تنها $1/5 \text{ MeV}$ توسعه داده شده است. در انرژی‌های بالاتر، جایی که سطح مقطع فوتوالکتریک نسبتاً کوچک است فرمول حاصل جمع - تجربی ارزش‌های $1/5 \text{ MeV}$ Scofield را به محدوده انرژی بالای بدون علامت محاسبه شده Pratt متصل می‌کند. سطح مقطع‌ها برای تولید زوج داده شده بر پایه ترکیبات پیچیده فرمول‌هایی از تئوری Bethe-Heitler با مدل‌هایی تئوری متنوع دیگر که برای محاسبه مورد غربال‌گری Coulomb و اصطلاحات تابش قرار می‌گیرد، می‌باشد.

برای عناصری با عدد اتمی از ۲ تا ۵۴، Scofield فاکتورهای اصلاحی پوسته‌های فرعی اتمی مجزا با سطح مقطع‌های تولید زوج را مجدداً نرمال‌سازی کرد چنان که آن‌ها به صورت تقریبی با مدل نسبیت Hartree-Fock بیش از مدل Hartree-Slater استفاده شده در محاسبه اصلی، مطابقت دارد. این نرمال‌سازی مجدد بری پوسته‌های اتمی بیرونی بسیار اهمیت دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، زمانی که نرمال‌سازی مجدد صورت نگیرد بهتر است. بنابراین، نرمال‌سازی مجدد در پایگاه داده‌ای برای برنامه Xcom را حذف می‌کنیم.

درون‌یابی و ترکیب

به منظور درون‌یابی با توجه به انرژی فوتون، سطح مقطع‌های پراکندگی ناکشسان و کشسان و ضرایب میرایی کل بوسیله لبه مکعبی لوگ - لوگ تخمین زده شده به عنوان انرژی مشخص شده‌اند. برای تولید زوج به سطح مقطع‌ها، کمیت مناسب، لگاریتم کمیت $(1 - E/E')^3 \sigma_{\text{PAIR}}$ است به طوری که در آن E انرژی فوتون، E' انرژی آستانه برای تولید زوج و σ_{PAIR} سطح مقطع است.

قالب‌سازی به صورت جداگانه برای زوج تولیدی در زمینه خنثی سازی اتمی ($E' = 1/022 \text{ MeV}$) و در زمینه الکترون‌های اتمی ($E' = 2/044 \text{ MeV}$) انجام می‌گیرد.

سطح مقطع جذب فوتوالکتریک ترکیب شده برای کلیه بدنه‌ها به صورت مشابه با استفاده از قالب‌های بالبه مکعبی لوگ - لوگ درج می‌شوند، اما تنها در بالای انرژی، لبه جذب پوسته k می‌باشد. پایین

این انرژی، درون یابی در لگاریتم سطح مقطع جذب لگاریتم انرژی فوتون مناسب است. قالب سازی جداگانه برای هر پوسته به منظور پرهیز از اشتباه که ممکن است به وسیله لبه های جذب مقطع درون یابی رخ دهد، لازم می باشد. قالب سازی لوگ- لوگ خطی معادلی برای این فرض است که سطح مقطع فوتو الکتریک متناسب با قدرتی از انرژی فوتون است و بهتر از غالب لبه مکعبی لوگ- لوگ نزدیک لبه های جذب می باشد. انفعال ضرایب و میرایی کلی ضرایب برای ترکیبات به عنوان حاصل جمع های تنظیم شده در بالای ضرایب متناظر برای عناصر اجرا می شود. Xcom به صورت اتوماتیک، فاکتورهای وزن را محاسبه می کند، به عنوان مثال کسرهای با وزن های اجزای سازنده اتمی، از فرمول شیمیایی ترکیب بوسیله کاربر وارد می شوند. برای مخلوط، کاربر باید کسرهای با وزن ترکیبات را وارد کند.

چگونگی راه اندازی برنامه xcom

مرور

دو راه برای استفاده از پایگاه داده های Xcom وجود دارد. متن موضوع اصلی، فهرست اصلی داده ها را می دهد، متن دیگر به کاربر اختیارات و ویژگی های پیش تری ارائه می دهد. (برای مثال uploading گراف کردن و جدول گرافیکی). ما بقی اطلاعات در این متن برای هر دو راه خروجی مناسب می باشد. دو راه برای بدست آوردن مجدد داده ها وجود دارد. شکل اول، شکل مناسب دوم را تولید می کند. شکل اول مربوط به اطلاعات کلی است. (نوع مواد: عنصر، ترکیب یا مخلوط) ($Z \leq 100$) دوم اطلاعات پیش تری می دهد.

زمینه های ورودی خاص در پایین توصیف شده اند.

شکل اول

موادی که برای برش های عرضی محاسبه شده اند را می توان به عنوان یک عنصر، ترکیب یا مخلوط معین کرد. برنامه، ارزش انرژی های استاندارد را معین خواهد ساخت، اما کاربر نیز ممکن است

انرژی‌های اضافی را وارد کند. این کار را می‌توان بوسیله وارد کردن ارزش‌ها با دست یا با استفاده از آپلود کردن فایل انجام داد. (توجه، خواننده شما بایستی موافق با فایل آپلود باشد.) این اطلاعات برای ساختن یک فرم خاص با اختیاراتی که در زیر توضیح داده شده اند استفاده می‌شود.

عناصر

عناصر، ممکن است با عدد اتمی یا نشانه شیمیایی آن‌ها انتخاب شوند. تنها عناصر ۱ تا ۱۰۰ در دسترس می‌باشند.

ترکیبات

فرمول‌های شیمیایی ترکیبات، باید در علائم شیمیایی استاندارد با مورد بالایی و پایینی آن‌ها ثبت شوند. هر چند، به خاطر محدودیت‌های سخت افزار، زیر نویس‌ها را باید روی خط نوشت. برای مثال، فرمول تنگتن کلسیم را باید به شکل $CaWO_4$ وارد کرد. پرانتزها، فاصله‌ها و نقطه را نباید استفاده کرد. برای مثال فرمول فسفات کلسیم را به این صورت وارد می‌کنند $Ca_3P_2O_8$ (و نه به شکل $(Ca_3(po_4)_2$).

موادی که تنها از مولکول‌ها و تنها یک نمونه اتم تشکیل شده‌اند را می‌توان به عنوان عنصر یا ترکیب معین کرد. برای مثال مولکول نیتروژن را به عنوان یک عنصر یا ترکیب معین کرد. برای مثال مولکول نیتروژن را به عنوان یک عنصر با نشانه N یا یک ترکیب با فرمول N_2 قلم‌داد کرد.

مخلوط

مخلوط‌ها ممکن است از ترکیبات عنصری یا ترکیبات «مربک» تشکیل شوند. این به خاطر راحتی کار است و نتیجه را عوض نمی‌کند.

کاربر باید نشانه شیمیایی یا فرمول (همان‌طور که در بالا مشخص شد) همانند کسری با وزن هر ترکیب را مشخص کند. سپس برنامه این داده‌های ورودی را برای معین کردن کسرهای وزن اجزای

سازنده اتمی مجزا به عنوان حاصل از این کسرها، محاسبه کند. اگر در داده‌های ورودی، حاصل کسرها با وزن، به واحد اضافه نشوند، داده ورودی پذیرفته می‌شود و برنامه مجدداً کلیه کسرهای شامل وزن را همان‌طور که به واحد اضافه می‌شوند نرمال می‌کند.

عناوین خروجی انتخابی

این عنوان که ممکن است شامل فاصله‌های جاسازی شده باشد در بالای صفحه خروجی ظاهر خواهد شد.

فهرست انرژی

کاربران می‌توانند (۱) خروجی‌ها را برای شبکه انرژی استاندارد محدود کنند، (۲) انرژی‌های انتخابی آن‌ها را به شبکه استاندارد اضافه کنند، یا (۳) خروجی‌ها را برای مجموعه‌ای از انرژی‌های انتخاب شده بوسیله آن‌ها محدود کنند، در حالت دوم، انرژی‌های اضافی در شبکه انرژی استاندارد طبق بزرگی آن‌ها ادغام شده‌اند. همچنین آن‌ها را با یک رنگ متفاوت در جدول خروجی برای مشخص کردن ارزش آن‌ها از شبکه استاندارد نشانه داده‌اند.

اگر انرژی‌های اضافی وارد شده بوسیله کاربر انجام شده باشد، این کار را می‌توان با یک فایل ورودی مناسب قبلی انجام داد. این فایل (که در هر راهنمای مناسب روی یک فلاپی یا CD ذخیره شده) باید فهرستی از انرژی‌ها با بخش‌های جدا شده بوسیله Return یا Enter را پوشش دهد.

اخطار: بیش‌تر از ۷۵ انرژی را نمی‌توان برای یک عنصر تنها اضافه کرد. حتی کم‌تر از آن ممکن است غیر قابل قبول باشد اگر اجزای اصلی چندگانه وجود داشته باشد. شبکه استاندارد به تنهایی ممکن است انرژی‌های زیادی را تحت پوشش قرار دهد که اجزای اصلی زیادی وجود داشته باشند.

واحدهای خروجی

برای ترکیبات و مخلوطها، کمیت ها در واحد Gm^2/g می باشند.

نمودار

هر شماره‌ای از هفت ضریب ممکن است به طور هم‌زمان رسم شوند. اگر هیچ گزینه‌ای کنترل نشود، ممکن است هر کدام از انتخاب‌های دیگر نادیده گرفته شود و هیچ نموداری نشان داده نخواهد شد. توجه: داده می‌تواند سریع‌تر نشان داده شود در صورتی که نمایش نمودار زمان طولانی‌تری می‌برند.

زوم کردن به جلو با تعریف دوباره حوزه انرژی ممکن می‌باشد. اگر چه حداقل حوزه انرژی (بالاترین حد زوم) یک بزرگی است (برای مثال 0.01 تا 0.1) دکمه‌های سمت راست را می‌توان برای تغییر اندازه‌ی تصویر استفاده کرد که ممکن است برای پرینت گرفتن قابل استفاده باشد. ارزش‌های داده شده برای عرض تصویر به واحد پیکسل می‌باشند. نمودار (۳-۱) مربوط به ضریب تضعیف جرمی بر حسب انرژی برای ترکیبات شیمیایی بتن موجود در جدول شماره (۳-۱) می‌باشد. این نمودار را بر اساس درصد وزنی ترکیبات سازنده بتن در انرژی‌های 0.001MeV تا 10^4 و از طریق نرم‌افزار Xcom ترسیم نمودیم. طبق این نمودار که ضریب تضعیف جرمی را برای سه فرآیند کامپتون، تولید زوج و فوتوالکتریک نشان می‌دهد، با افزایش انرژی مقادیر ضرایب تضعیف جرمی برای دو فرآیند کامپتون و فوتوالکتریک کاهش می‌یابد. زمانی که انرژی فوتون افزایش می‌یابد، سطح مقطع به آهستگی افزایش پیدا می‌کند. افزایش سطح مقطع باعث افزایش ضریب تضعیف در انرژی‌های بالا می‌شود.

جدول خروجی

اعداد اتمی و کسرهای با وزن اجزای اتمی سازنده در جدول داده شده‌اند. ستون سمت چپ بیش‌تر طرحی از لبه‌های جذب ($K, L_1, L_2, L_3, M_1, M_2, \dots$) را به خوبی عدد اتمی مربوط به اجزای سازنده اتمی می‌دهد. داده‌های انرژی دقیقاً در زیر و بالای هر لبه در دو خط داده شده‌اند. باید توجه داشت

که شبکه انرژی استاندارد به صورت اتوماتیک، حداقل یک انرژی دیگر بین هر دو لبه جذب متوالی را شامل می‌شود برای مواد با شماره اتمی $Z \leq 10$ ، هیچ لبه جذبی در بالای حداقل انرژی 1 KeV وجود ندارد [۲۹].

منابع

- [۱]. رمضانپور ع، پیدایش م، دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی، جلد اول، چاپ اول، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران، ص ۲۱۶، ۱۳۷۶.
- [2] Holt, R. S., M. J. Cooper, and D. F. Jackson. "Gamma-ray scattering techniques for non-destructive testing and imaging." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 221.1 (1984): 98-104.
- [3] Atilh. Le. *beton expose aux aggression hivernales*. Documentation Technique No. 1, January 1989.
- [4] Hover KC. *Air content and unit weight of hardened concrete*. In: Klieger P, Lamond JF, editors. Significance of tests and properties of concrete making materials, vol. 169C. ASTM STP; 1994. P.296-14.
- [5] Meilenz RC, Wolkodoff VE, Backstrom JE, Flack HL. *Origin, evolution, and effect of air-void system in concrete*. Part 1 Entrained air in unhardened concrete. Proc Amer Concr Inst 1958;55:95-121.
- [6] Powers TC. *Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete*. J Amer Concr Inst 1954;50:741-60.
- [7] Pigeon M, Lachance M. *Critical air-void spacing factors for concretes submitted to slow freeze-thaw cycles*. Amer concr Inst J 1981;78(4):282-91.
- [8] Afnor nf en 480-11. Adjuvants pour betons, mortiers et coulis Methode d'essais_ Partie 11: *Determination des caracteristiques des vides d'air dans le beton durci*. Norme Europeene, Norme Francaise, French standard, March 1999.
- [9] ASTM C 457-90. *Standart test method for microscopical determination of parameters of the air-void system in hardened concrete*. December 1990.
- [10] Power TC. *The air requirement of forst resistant concrete*. Proc Highway Res Board 1949;29:184-211.

[11] Afnor nf en 480-11. Adjuvants pour betons, mortiers et coulis Methode d'essais_ Partie 11: *Determination des caracteristiques des vides d'air dans le beton durci. Norme Europeene, Norme Francaise, French standard*, March 1999.

[12] farhad Ansari. *A new method for assessment of air voids in plastic concrete*. 1990.

[13] Anne-Sphie Dequiedt, Michel Coster, Liliane Chermant, Jean-Louis Chermant. *Distances between air-voids in concrete by automatic methods*. 2001.

[14] Kalliopi K. Aligizaki, Philip D. Cady. *Air content and size distribution of air voids in hardened cement pastes using the section-analysis method*. May 1998.

[15] Andriole, Gerald L., et al. "Mortality results from a randomized prostate-cancer screening trial." *New England Journal of Medicine* 360.13 (2009): 1310-1319.

[16] Speller, R. D., and J. A. Horrocks. "Photon scattering-a new source of information in medicine and biology?." *Physics in medicine and biology* 36.1 (1991): 1.

[17] Mullin, S. K., and E. M. A. Hussein. "A Compton-scatter spectrometry technique for flaw detection." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 353.1 (1994): 663-667.

[18] Sharaf, J. M. "Nondestructive inspection of low atomic number media using inelastic photon scattering." *Applied Radiation and Isotopes* 65.12 (2007): 1330-1336.

[19] Sharma, Amandeep, B. S. Sandhu, and Bhajan Singh. "Incoherent scattering of gamma photons for non-destructive tomographic inspection of pipeline." *Applied Radiation and Isotopes* 68.12 (2010): 2181-2188.

[20] Sharaf, M. J. "Assessment of photon compton scattering method for the characterization of {tissue substitute materials." (2000).

[21] Mooney, M. J., et al. "Monitoring and correction of multiple scatter during clinical Compton scatter densitometry measurements." *Physics in medicine and biology* 41.11 (1996): 2399.

[22] Cember, Herman. "Introduction to health physics." *Introduction to health physics*. (1969).

[23] Friedlander, Gerhart, E. S. Macias, and Joseph W. Kennedy. *Nuclear and radiochemistry*. John Wiley & Sons, 1981.

[24] Knoll, Glenn F. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.

[۲۵] سید پژمان شیر مردی، علی طاهری، جمال امیری، کاربرد کد شبیه سازی MCNP در محاسبات هسته‌ای، جلد اول، چاپ اول، انتشارات سنوبرک، کرج، ص ۲۲۸، ۱۳۸۹.

[26] X-5 Monte carlo team, *MCNP-A General Monte carlo N-particle Transport Cod, Version 5*, April 24, 2013.

[۲۷] قاسم حیدری نژاد، آزمایش‌های غیر مخرب و نیمه مخرب، جلد اول، چاپ اول، ۱۳۷۰.

[28] Shivaramu, Arijit Bose, M. Margret, *Gamma scattering of concrete block for detection of voids*, 2010.

[29] [http://www.google.com/xcom/NIST_XCOM_photon_cross_sect_Data_base_Elements Database](http://www.google.com/xcom/NIST_XCOM_photon_cross_sect_Data_base_Elements_Database).

Abstract:

Concrete as a very important building material has been used in the construction industry and other structures for many years. If this material is constructed and maintained in accordance with the proper principles it would have high reliability and durability. The first step in any repair or improvement project, is reasonable and accurate assessment of the current state of the structure. But because of the choice of inappropriate materials, poor quality and lack of maintenance run, particularly in the hard and corrosive areas failures occur for concrete. Concrete may also declines and damages during application and as a result, the existing concrete may not be as originally intended and designed to operate.

In many years, for increasing property of cement and concrete material, the different physical and development experiments done. During of different research, many method such as micro silica, image analysis, furnace slag and ..., have been for increasing quality of concrete. The quality of concrete and cement has been depended of physical, chemical and mineral properties. In base of this properties, researchers use of suitable instructions for improving performance of cement and concrete. determination hole and porosities of concrete is necessary to retrofitting cement and concrete mixture. In previous research, flash laser method was used to measurement special heat. In order to improve on this research and increasing quality of concrete, the holes of concrete checked.

In this study, considering the durability of concrete, locate the air hole in concrete using Compton scattering of gamma rays in the Monte Carlo method has been used to exploit those involved in concrete. Materials used in this experiment, cubic concrete is made of cement with dimensions 15 cm. HPGGe detector on one side of the concrete and fountain ^{137}Cs were on the other side of concrete.

The results of positioning holes, obtained by the simulation code and the air hole depth and spatial resolution both holes Were examined And contrast results obtained. And in this case, the maximum depth of the air cavity can be etermined. According to the study A hole in the concrete surface absorbs Most of the attenuation coefficient and energy and Causes increasing concrete demolition and . The entrance of the detector collimator

between different rods such 1.5, 1, 0.5, 0.25 cm for entrance collimator was determined and The radius of the crater with the highest contrast and high-resolution 1 cm were found . the relative error of Contrast was below 5%.

Keywords: Gamma rays Compton scattering, Monte Carlo simulation concrete, HPGe detector, Concrete, Air hole, Contrast,.



University Of Shahrood

Faculty Of Physics

Master Of Science Thesis

**Determine the air voids in concrete using gamma rays
Compton scattering by Monte Carlo method**

Zahra Kiani-Harchegani

Supervisor

Dr. Hossein Tavakoli-Anbaran

February 2015