فصلنامه سرامیک ایران

# خواص محافظ پرتوهای یونیزان الیاف سرامیکی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو

محمدرضا علی‌پور[۱]، مهدی عشقی[۲]*

[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد فیزیک هسته‌ای، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران
[۲] هیئت علمی و استادیار گروه فیزیک، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران

**چکیده:** *در این پژوهش، ویژگی‌های محافظ پرتوهای یونیزان (گاما و نوترون) الیاف سرامیکی Nextel-312، Nextel-440، Nextel-550، Nextel-720 را با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت‌کارلویی Geant4 بررسی کردیم. در این بررسی، کمیت‌های مربوط به تضعیف فوتون مانند: ضریب تضعیف جرمی (μm)، لایه نیم‌مقدار (HVL) و مسیر آزاد میانگین (MFP) در محدوده ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگاالکترون‌ولت و سطح مقطع جذب نوترون‌های سریع برای سطوح مختلف انرژی محاسبه کردیم. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، آن‌ها را با نتایج مستخرج از پایگاه داده XMuDat مقایسه کردیم که نشان می‌دهد توافق خوبی با یکدیگر دارند. توافق بین داده‌های مستخرج از پایگاه XMuDat و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌سازی مونت‌کارلویی یک روش خوب جهت بررسی ویژگی‌های حفاظ پرتوی گاما می‌باشد. همچنین، نتایج به دست آمده الیاف سرامیک‌ها در مقایسه با مواد حفاظ مرسوم مانند بتن، کمیت‌های تضعیف مؤثرتری را علاوه بر خواص فیزیکی نشان می‌دهد. سرامیک Nextel-720 به‌دلیل چگالی بالاتر، مطلوب‌ترین حالت را در مقایسه با دیگر سرامیک‌های بررسی‌شده دارد.*

**کلمات کلیدی:** *پرتو گاما و نوترون، حفاظ، سرامیک، شبیه‌سازی مونت‌کارلو.*

**نویسنده اول:**
مهندس محمدرضا علی‌پور
**نویسنده مسئول:**
دکتر مهدی عشقی
دانشگاه جامع امام حسین (ع)
* eshgi54@gmail.com

**نوع مقاله:** پژوهشی
**صفحه‌های:** ۴۸ تا ۵۶
**شاپا چاپی:** ۱۷۳۵-۳۳۵۱
**شاپا الکترونیکی:** ۲۷۸۳-۳۰۹۷
**زبان نشریه:** فارسی
**دسترس‌پذیر در نشانی:**
www.JICERS.ir
**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۲/۰۲/۱۳
**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۲/۰۷/۲۲
DOR: 20.1001.1.17353351.1402.19.0.2.5

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از پرتوهای یونیزان بسیار مورد توجه قرار گرفته است، جدا از فواید پرتوها در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، مراکز تحقیقاتی، صنعت و کشاورزی، اثرات نامطلوب و خطرناک پرتوها به چالشی برای فیزیکدانان تبدیل شده است. برای کاهش اثرات نامطلوب پرتوها، باید ماهیت آن‌ها را درک کرد. استفاده از حفاظ برای کاهش اثرات بیولوژیکی این پرتوها در مراکزی که با پرتوهای یونیزان سروکار دارند، بسیار مهم است. بنابراین، محققان را به مطالعه موادی سوق داد که توانایی محافظت در برابر پرتو را دارند. همچنین آگاهی از برهم‌کنش تشعشعات با بدن انسان و مواد مختلف برای طراحی محافظ بسیار مهم است [۱]. متداول‌ترین ماده برای محافظت در برابر پرتوهای گاما، سرب است. همچنین، از مواد محافظ بر پایه فلزات سنگین مانند مس، بیسموت، تنگستن، فولاد و ... به‌عنوان محافظ در برابر پرتو استفاده می‌شود. با این حال، سرب به‌دلیل چگالی بالا و هزینه کم مورد توجه بوده و هست؛ اما محدودیت‌هایی برای استفاده از سرب مانند وزن، سمیت، پایداری شیمیایی کم وجود دارد [۲]. در سال‌های

اخیر، مطالعات زیادی بر روی مواد مختلف برای توسعه عملکرد مواد محافظ رایج و معرفی مواد جدید انجام شده است [۳]. آکورت و همکاران، از باریت، مرمر و لیمرا برای محاسبه ضرایب تضعیف فوتون استفاده کردند [۴]. نجم و همکاران، ضریب تضعیف پرتو گاما را برای سرامیک، گرانیت، آجر، بتن و مرمر اندازه‌گیری کردند [۵]. اتو و همکاران، خواص محافظ نوترون نمونه‌های سرامیکی حاوی مولیبدان را مورد مطالعه قرار دادند [۶]. نمونه‌ی دیگر سرامیکی برای پرتو گاما و نوترون توسط کاکال و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۷]. آن‌ها از آزمایش‌های خود به این نتیجه رسیدند که این مواد محافظ‌های خوبی هستند. برای یافتن مواد ایده‌آل برای محافظت در برابر تشعشع، باید ویژگی‌هایی از جمله مقاومت در برابر حرارت، رسانندگی گرمایی، چگونگی حفظ ساختار خود پس از دوره‌های طولانی مدت استفاده، توانایی جذب نوترون‌های با سرعت بالا و حرارتی، توانایی تضعیف پرتو گاما، مقاوم در برابر خوردگی، هزینه و توانایی قالب‌گیری را در نظر گرفت. در دهه گذشته، مواد کامپوزیتی برپایه سرامیک‌ها به طور فزاینده‌ای به عنوان یک ماده مطلوب پیشنهاد شده‌اند. این مواد به راحتی قابل استفاده هستند، در حال حاضر برای کاربردهای صنعتی به صورت انبوه تولید می‌شوند و در شرایط دمای بالا بسیار مقاوم هستند. با توجه به خواص ذکر شده‌ی سرامیک‌ها، آن‌ها کاندیدای مناسبی برای حفاظت در برابر تشعشع می‌باشند [۸]. مواد و مسیرهای پردازش جدید فرصت‌هایی را برای تولید ساختارهای پیشرفته با کارایی بالا برای کاربردهای مختلف فراهم می‌کند. کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی[1] یکی از این مواد امیدوارکننده هستند. با ترکیب مواد مختلف زمینه سرامیکی با الیاف مناسب، می‌توان خواص جدیدی ایجاد کرد و سرامیک‌هایی برای زمینه‌های مختلف طراحی کرد. تقاضا برای مواد سبک وزن، ارزان و مقاوم در برابر دمای بالا برای هوافضا و سایر کاربردها باعث توسعه کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی شد [۹]. نمونه‌های شناخته شده برای الیاف سرامیکی اکسیدی، الیاف ساخته شده ازآلومینیا ($Al_2O_3$)، مولایت[2] (اکسیدهای مخلوط $Al_2O_3$ و $SiO_2$)، بوریک آلومینیا[3] (اکسیدهای مخلوط $Al_2O_3$ ,$Si_2O$ ,$B_2O_3$) هستند [۱۰]. همه این الیاف‌ها دارای ریزساختار های پلی‌کریستالی هستند و با مقادیر بالایی از استحکام کششی و مدول مشخص می‌شوند. به دلیل ماهیت اکسیدی آن‌ها در برابر اکسیداسیون در دماهای بالا نیز پایدار هستند [۱۱]. الیاف سرامیکی Nextel–۳۱۲ با استفاده از تکنیک سل– ژل تولید می‌شود. این الیاف دارای قطر متوسط ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر هستند. در ترکیب با الیاف ریزمقیاس، این ویژگی‌ها منجر به الیافی می‌شود که می توانند روی پارچه بافته شوند [۱۲]. الیاف سرامیکی Nextel–۴۴۰ عملکرد بهتری در دمای بالا در مقایسه با الیاف Nextel– ۳۱۲ به دلیل محتوای پایین $B_2O_3$ دارند. این ساختار با یک فاز مولایت و کریستال‌های $Al_2O_3$ پراکنده در یک ماتریس سیلیس آمورف مشخص می‌شود. فاز سیلیس آمورف منجر به سرعت خزش بالا در دماهای بالاتر می‌شود. به دلیل قطر ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متری الیاف سرامیکی Nextel–۳۱۲، می‌توان این الیاف را به پارچه‌هایی مقاوم تبدیل کرد [۱۳–۱۴]. الیاف سرامیکی Nextel–۵۵۰، ساختار این الیاف توسط بلورهای $Al_2O_3$ تعبیه شده در فاز سیلیس آمورف تعیین می‌شود. به دلیل عدم وجود اکسید بور، الیاف عملکرد بهتری در دماهای بالا نسبت به الیاف سرامیکی Nextel–۳۱۲ و Nextel–۴۴۰ دارند [۱۵]. الیاف سرامیکی Nextel–۷۲۰ از طریق فناوری فرآیند سل– ژل تولید می‌شوند. این الیاف دارای ساختار سنگدانه موزائیکی با قطر دانه‌های در حدود ۰/۵ میلی‌متر با خطوط موج دار هستند. الیاف سرامیکی Nextel–۷۲۰ بالاترین مقاومت در برابر خزش را در بین تمام الیاف سرامیکی ریز مقیاس تا دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. [۱۶]

هدف از این تحقیق، بررسی محافظ‌های الیاف سرامیکی باکیفیت و سبک که از مواد ارزان قیمت ساخته شوند، توانایی تولید صنعتی و انبوه را داشته باشند و برای جایگزینی مواد رایجی که برای تضعیف پرتو گاما و نوترون استفاده می‌شوند، مناسب باشند.

## ۲– فعالیت‌های شبیه‌سازی

بسته نرم‌افزاری Geant4: این ابزار بستری برای «شبیه‌سازی عبور ذرات از ماده» با استفاده از روش‌های مونت‌کارلو، که روشی تقریبا دقیق برای تأیید نتایج و بهینه‌سازی یک تحقیق است. این بسته، جانشین مجموعه ابزارهای نرم‌افزاری GEANT است که

[1] Ceramic Matrix Composites
[2] Mullite
[3] Boric Alumina

توسط همکاری Geant4 توسعه یافته است و برای اولین بار از برنامه‌نویسی شی‌گرا استفاده می‌کند. این کد دارای کتابخانه‌های مختلفی شامل سطح مقطع (احتمال برهم‌کنش) ذرات مختلف در محیط‌های مختلف می‌باشد. یکی از ویژگی‌های قابل توجه این کد، رایگان و استحکام بالا برای ایجاد هندسه، فیزیک برهم‌کنش ذرات و چشمه پرتو است [۱۸-۱۷]. شروع این شبیه‌سازی با یک طیف گاما با انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت می‌باشد که بر روی نمونه‌ها تابیده می‌شود. نمونه‌ها به‌صورت مکعب مستطیل بعد از کولیماتور (برای تمرکز یک پرتو و اطمینان از حرکت پرتوهای گاما به صورت موازی از کولیماتور استفاده می‌شود)، و چشمه گاما قرار می‌گیرد. سپس، فوتون‌های خروجی از نمونه‌ها با استفاده از آشکارساز ثبت می‌شوند. برای تحلیل ضرایب تضعیف نمونه‌ها، با استفاده از روش انتقال، طبق قانون بیر-لامبرت[1] بر اساس شدت فوتون فرودی و میزان تضعیف به دست می‌آید. تضعیف فوتون‌ها به وسیله شبیه‌سازی تمام فرآیندهای فیزیکی احتمالی برای فوتون‌ها (مانند اثرات فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی ریلی، تولید زوج) و تابش ترمزی، یونیزاسیون و نابودی پوزیترون برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها تعیین می‌شود. این فرآیندها با استفاده از مدل‌های فیزیک الکترومغناطیس کم انرژی لیورمور در «G4EmLivermorePhysics» شبیه‌سازی می‌شوند. این مدل‌های فیزیک مبتنی بر بسته لیورمور[2] هستند که از کتابخانه داده‌های ارزیابی‌شده استفاده می‌کند که داده‌هایی را برای محاسبه برش‌ها هنگام مدل‌سازی برهم‌کنش فوتون‌ها و الکترون‌ها با ماده ارائه می‌دهد [۱۹].

## ۳- نتایج وبحث

مشخصات الیاف سرامیکی شامل چگالی و کسر وزنی عناصر تشکیل‌دهنده این مواد در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع نیز در این جدول آورده شده است. سطح مقطع حذف نوترون‌های سریع نشان می‌دهد، چقدر احتمال دارد که یک نوترون سریع از یک ماده از طریق واکنش هسته‌ای با هسته هدف حذف شود. مقدار سطح مقطع حذف سریع نوترون به ماده جاذب و انرژی نوترون‌های فرودی بستگی دارد. با توجه به جدول ۱ سرامیک Nextel-312 عملکرد بهتری برای حذف نوترون‌های سریع دارد.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی در سرامیک‌های منتخب

| سرامیک‌ها | سطح مقطع حذف نوترون های سریع ($cm^{-1}$) | کسر وزنی ترکیبات | | | کسر وزنی عناصر | | | | چگالی ($g.cm^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $Al_2O_3$ | $Si_2O_3$ | $B_2O_3$ | Al | O | Si | B | |
| Nextel-312 | 0/96 | 62/5 | 24/5 | 13 | 0/3431 | 0/4883 | 0/14 | 0/0286 | 2/7 |
| Nextel-440 | 0/106 | 70 | 28 | 2 | 0/3706 | 0/4709 | 0/1543 | 0/0042 | 3/05 |
| Nextel-550 | 0/105 | 73 | 27 | -- | 0/3841 | 0/468 | 0/1479 | -- | 3/03 |
| Nextel-720 | 0/118 | 85 | 15 | -- | 0/4484 | 0/4692 | 0/0824 | -- | 3/4 |

ضریب تضعیف جرمی هر نمونه با شبیه‌سازی Geant4 انجام شد و این نتایج با برنامه XMuDat در محدوده انرژی فوتون ۰/۰۱۵ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت مقایسه شد. ما آن‌ها را در جدول ۲ نشان داده‌ایم. همان‌طور که قابل مشاهده است، نتایج محاسبه شده برای مواد مورد بررسی مطابقت عالی را نشان می‌دهد. همچنین از جدول ۲ می‌توان مشخص کرد که ضریب تضعیف جرمی برای Nextel -۵۵۰ به نسبت دیگر سرامیک‌ها، مقادیر بالاتری دارد.

ضریب تضعیف خطی (μ) یک عامل کلیدی برای ارزیابی اثر پرتو گاما با مواد مورد مطالعه است و می‌تواند از قانون بیر- لامبرت به شرح زیر در معادله (۱) استنباط شود [۲۰]:

[1] Beer-Lambert law
[2] Livermore

$$\xrightarrow{I=I_0e^{-\mu x}} \mu = \frac{1}{x} ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (۱)$$

که $I_0$ شدت فوتون ورودی، I شدت فوتون عبور کرده (تضعیف شده)، x ضخامت ماده جاذب می‌باشد.

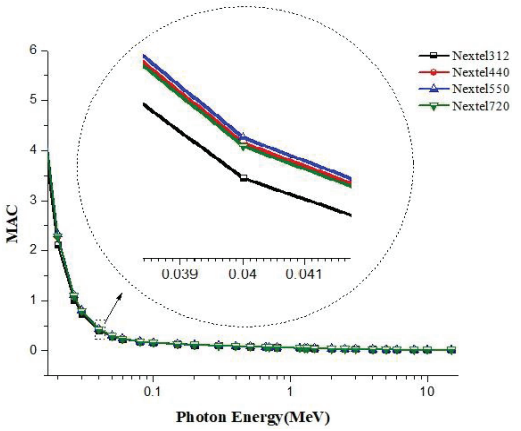
| انرژی (MeV) | Nextel-312 | | Nextel-440 | | Nextel-550 | | Nextel-720 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Geant4 | XMuDat | Geant4 | XMuDat | Geant4 | XMuDat | Geant4 | XMuDat |
| ۰/۰۱۵ | 4/77003 | 4/78 | 5/19717 | 5/208 | 5/26237 | 5/274 | 5/17103 | 5/191 |
| ۰/۰۲ | 2/1163 | 2/097 | 2/29736 | 2/276 | 2/32529 | 2/304 | 2/28871 | 2/266 |
| ۰/۰۲۶۳۴ | 1/02281 | 1/157 | 1/10212 | 1/249 | 1/11433 | 1/263 | 1/09812 | 1/242 |
| ۰/۰۵ | 0/28924 | 0/2884 | 0/300692 | 0/2999 | 0/302366 | 0/3016 | 0/299374 | 0/2988 |
| ۰/۰۵۹۵۴ | 0/235933 | 0/233 | 0/242788 | 0/2397 | 0/243787 | 0/2407 | 0/241977 | 0/2389 |
| ۰/۸ | 0/184502 | 0/1842 | 0/187424 | 0/1872 | 0/187834 | 0/1876 | 0/186946 | 0/1867 |
| ۰/۱ | 0/162286 | 0/1628 | 0/163882 | 0/1644 | 0/164094 | 0/1647 | 0/163517 | 0/164 |
| ۰/۱۵ | 0/136147 | 0/1371 | 0/136753 | 0/1377 | 0/136812 | 0/1378 | 0/136437 | 0/1374 |
| ۰/۴ | 0/0945616 | 0/09428 | 0/0947034 | 0/09442 | 0/0947004 | 0/09442 | 0/094489 | 0/09421 |
| ۰/۵۱۱ | 0/0856837 | 0/08596 | 0/0858004 | 0/08608 | 0/0857958 | 0/08608 | 0/0856063 | 0/08589 |
| ۰/۶۶۱۷ | 0/0766855 | 0/07614 | 0/0767836 | 0/07624 | 0/0767785 | 0/07623 | 0/0766099 | 0/07607 |
| ۰/۸ | 0/0703294 | 0/06973 | 0/0704167 | 0/06981 | 0/0704116 | 0/06981 | 0/0702574 | 0/06966 |
| ۱/۱۷۳ | 0/0582772 | 0/05793 | 0/0583475 | 0/058 | 0/0583429 | 0/05799 | 0/0582155 | 0/05787 |
| ۱/۲۷۵ | 0/0558223 | 0/05539 | 0/0558903 | 0/05546 | 0/055886 | 0/05545 | 0/0557639 | 0/05533 |
| ۳۳۳/۱ | 0/0545427 | 0/0542 | 0/0546097 | 0/05427 | 0/0546056 | 0/05426 | 0/0544863 | 0/05414 |
| ۱/۵ | 0/0512564 | 0/05098 | 0/0513223 | 0/05104 | 0/0513189 | 0/05104 | 0/0512066 | 0/05093 |
| ۲ | 0/0439821 | 0/044 | 0/0440536 | 0/04407 | 0/0440533 | 0/04407 | 0/0439559 | 0/04398 |
| ۲/۵ | 0/0390964 | 0/03566 | 0/0391804 | 0/03575 | 0/0391837 | 0/03576 | 0/0390957 | 0/03568 |
| ۵ | 0/0279076 | 0/02592 | 0/0280653 | 0/02611 | 0/0280846 | 0/02613 | 0/0280157 | 0/02607 |
| ۶ | 0/0258746 | 0/02441 | 0/0260582 | 0/02462 | 0/0260825 | 0/02465 | 0/0260162 | 0/02458 |
| ۸ | 0/0233305 | 0/02332 | 0/0235587 | 0/02355 | 0/0235915 | 0/02358 | 0/0235278 | 0/02352 |
| ۱۰ | 0/0218571 | 0/02251 | 0/0221222 | 0/02276 | 0/0221619 | 0/0228 | 0/022099 | 0/02273 |
| ۱۵ | 0/0201199 | 0/02013 | 0/0204554 | 0/02047 | 0/0205078 | 0/02052 | 0/0204443 | 0/02045 |

جدول ۲: ضرایب تضعیف جرمی بر حسب انرژی فوتون برای سرامیک‌های منتخب

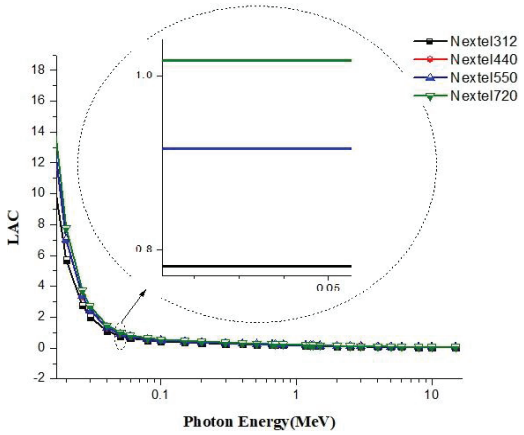
شکل ۱، تغییر مقادیر ضریب تضعیف جرمی را به عنوان تابعی از انرژی فوتون نشان می‌دهد. ضریب تضعیف جرمی اولین کمیتی است که در حوزه حفاظ باید مورد بررسی قرار گیرد. این ضریب، در علم فیزیک و مواد برای توصیف توانایی یک ماده در کاهش شدت پرتو در هنگام عبور از ماده جاذب استفاده می‌شود، به عوامل متعددی از جمله انرژی پرتو، نوع پرتو، ترکیب اتمی و درصد مواد تشکیل‌دهنده بستگی دارد. به طور کلی، مواد با عدد اتمی بالا (یعنی آن‌هایی که دارای پروتون‌های زیادی در هسته خود هستند) و چگالی بالا تمایل دارند، ضرایب تضعیف جرمی بالاتری برای نوع خاصی از تابش دارند. ضریب تضعیف جرمی توصیف اساسی‌ترین از برهم‌کنش ماده با تابش را ارائه می‌دهد و برای مقایسه ویژگی‌های مواد مختلف مفیدتر است. نتایج به دست آمده از ضرایب تضعیف جرمی در محدوده انرژی ۰/۰۱۵ تا ۱۵ مگا الکترون‌ولت مطابق شکل ۲ نشان داده شده است. مقادیر ضرایب تضعیف جرمی هنگامی که انرژی فوتون کم (کم‌تر از ۵۰۰ کیلو الکترون‌ولت) است، بزرگ می‌باشد. هنگامی که انرژی فوتون

کوچک است (۰/۰۱۵ MeV– ۰/۵)، می‌توان کاهش قابل توجهی در مقادیر ضریب تضعیف جرمی به دلیل تسلط فرآیند فوتوالکتریک در این محدوده انرژی را مشاهده کرد. با افزایش انرژی فوتون (۰/۵ MeV–۱/۵)، کاهش جزئی به دلیل برهم‌کنش کامپتون مشاهده شد. با افزایش بیش‌تر انرژی فوتون (۱/۵ تا ۱۰ مگا الکترون‌ولت)، یک افزایش بسیار ناچیز در مقادیر ضریب تضعیف جرمی به دلیل فرآیند تولید و نابودی زوج الکترون– پوزیترون مشاهده می‌شود، ولی به‌دلیل افزایش بسیار جزئی در نمودار به‌خوبی مشخص نمی‌باشد. به دلیل نزدیک بودن چگالی سرامیک‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای در شکل برای سرامیک‌ها مشاهده نمی‌شود، ولی در قسمت بزرگنمایی شده نمودار به وضوح مشخص می‌باشد که سرامیک Nextel–۳۱۲ قدر تضعیف کم‌تری نسبت به سایرین دارد.

ضریب تضعیف خطی (LAC)[1] یک کمیت ارزشمند است که برای درک رفتار تضعیف پرتو گاما توسط سرامیک‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضریب تضعیف خطی اطلاعات مستقیمی در مورد احتمال برهم‌کنش پرتو گاما با سرامیک‌ها را می‌دهد. مقادیر بالای ضریب تضعیف خطی به شدت احتمال پراکندگی و جذب بیش‌تر پرتو گاما را نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۲ آورده شده است، که نشان می‌دهد ضریب تضعیف خطی به شدت به انرژی بستگی دارد. مشخص شد که ضریب تضعیف خطی با سرعت سریع بین ۰/۰۱۵ تا ۰/۱ کیلو الکترون‌ولت کاهش می‌یابد، اما در انرژی‌های بالاتر به آرامی کاهش می‌یابد. مشخص شد که ضریب تضعیف خطی با چگالی افزایش می‌یابد و این نتیجه مورد انتظار است. زیرا ضریب تضعیف خطی یک کمیت وابسته به چگالی است. همانطور که در بزرگنمایی نیز مشخص می‌باشد، سرامیکی که دارای چگالی کم‌تری می‌باشد عملکرد ضعیفی در مقابل پرتو گاما دارد و سرامیک با چگالی بیش‌تر به طور پیوسته پرتو را بهتر تضعیف می‌کند.




شکل ۱: تغییرات ضریب تضعیف جرمی برای سرامیک‌ها برحسب انرژی فوتون‌ها




شکل۲: تغییرات ضریب تضعیف خطی برای سرامیک‌ها برحسب انرژی فوتون‌ها

سومین کمیتی که در حوزه حفاظ مورد بررسی قرار می‌گیرد، مسیر آزاد میانگین است. میانگین فاصله یک فوتون بین دو برهم‌کنش را نشان می‌دهد. تغییر مسیر آزاد میانگین با انرژی فوتون فرودی در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان ذکر است که هر چه مقدار مسیر آزاد میانگین ماده مورد بررسی کم‌تر باشد، خواص محافظ بهتری خواهد داشت. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که فوتون‌های کم انرژی می‌توانند انرژی خود را در فاصله کوتاهی از دست بدهند، اما فوتون‌های پرانرژی برای از دست دادن انرژی خود به فاصله طولانی‌تری نیاز دارند. منحنی‌های مقایسه‌ای میانگین مسیرهای آزاد برای سرامیک‌ها مورد بررسی شده نشان می دهد مقادیر مسیر آزاد میانگین برای همه نمونه‌ها با افزایش انرژی افزایش می‌یابد. در شکل ۳ همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی مقدار مسیر آزاد میانگین برای سرامیک‌های با چگالی نزدیک به هم متفاوت است، که این خود نشان دهنده تاثیر مستقیم چگالی بر عملکرد سرامیک‌ها می‌باشد.

چهارمین کمیتی که در حوزه حفاظ باید مورد بررسی قرار می‌گیرد، لایه نیم‌مقدار است. لایه نیم‌مقدار یک کمیت مهم در طراحی

[1] Linear Attenuation Coefficient

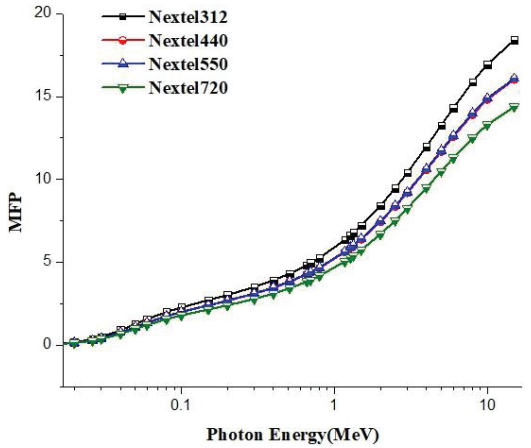
مواد محافظ پرتویی است. زیرا از آن برای تعیین ضخامت مواد محافظ موردنیاز برای کاهش شدت تابش به سطح مطلوب استفاده می‌شود. رابطه مستقیمی بین افزایش ضریب تضعیف خطی و کاهش ضخامت لایه نیم‌ارزش وجود دارد. کم‌تر بودن لایه نیم‌مقدار به معنای ضخامت سرامیک نازک‌تری است که برای کاهش نیمی از شدت فوتون لازم است و به شرح زیر از معادله (۲) استنباط می‌شود [۲۱]:

$$HVL(cm) = \frac{ln2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (۲)$$

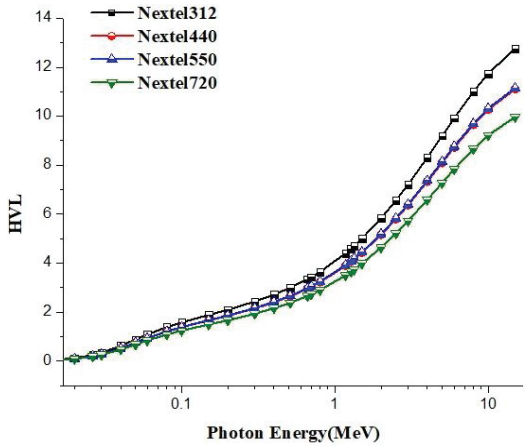
مقادیر محاسبه شده لایه نیم‌مقدار به عنوان تابعی از انرژی در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که سرامیک با مقادیر چگالی بالاتر دارای مقدار کم‌تری از لایه نیم مقدار می‌باشد که با یافته‌های قبلی مطابقت دارد. لایه نیم‌مقدار به عوامل مختلفی از جمله انرژی تابش، ترکیب اتمی و مولکولی ماده و چگالی مواد بستگی دارد. Nextel-۳۱۲ به دلیل داشتن عناصر با عدد اتمی کم‌تر و در نتیجه چگالی الکترونی کم‌تر دارای ضخامت لایه نیم‌مقدار بیش‌تری نسبت به دیگر سرامیک‌ها می‌باشد.

پنجمین کمیتی که در حوزه حفاظ مورد بررسی قرار می‌گیرد، لایه یک‌دهم کننده است. در طراحی مواد محافظ پرتو، از لایه یک‌دهم کننده برای تعیین ضخامت ماده محافظ مورد نیاز برای دستیابی به سطح مطلوبی از تضعیف پرتو گاما استفاده می‌شود. لایه یک‌دهم کننده اطلاعات مستقیمی برای ضخامت نمونه‌ها می‌دهد که می‌تواند مقدار مشخصی از تابش را کاهش دهد، با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$TVL(cm) = \frac{ln10}{\mu} \quad (۳)$$




شکل۳: تغییرات مسیر آزاد میانگین برای سرامیک‌ها برحسب انرژی فوتون‌ها

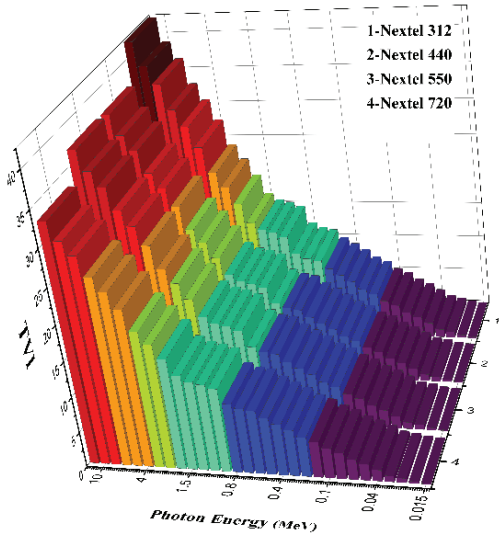



شکل۴: تغییرات لایه نیمه‌مقدار برای سرامیک‌ها برحسب انرژی فوتون‌ها

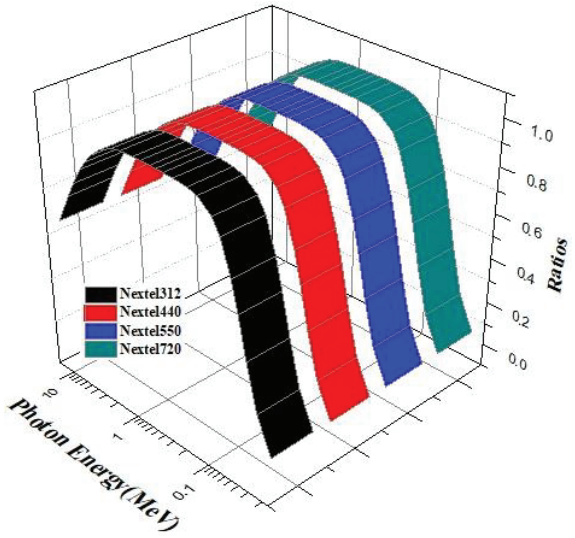
لایه یک‌دهم کننده همچنین اطلاعاتی در مورد توانایی نمونه‌ها موجود در محافظت مؤثر از تشعشع می‌دهد. به همین دلیل، ما لایه یک‌دهم کننده را برای نمونه‌ها محاسبه کردیم و در شکل ۵ ضخامت به صورت ورقه‌هایی برای درک بهتری از ضخامت ترسیم کردیم. ظاهراً، لایه یک‌دهم کننده برای چهار سرامیک با تغییر چگالی از ۳/۴ $g/cm^3$ به ۲/۷ کاهش یافت. نتایج نشان می دهد که در انرژی‌های پایین تفاوت چندانی بین سرامیک‌ها وجود ندارد ولی با افزایش انرژی تفاوت قابل توجهی بین ضخامت سرامیک‌ها ایجاد می‌شود، پس می‌توان از سرامیکNextel-۳۱۲ که چگالی کم‌تری نسبت به دیگر سرامیک‌ها دارد در انرژی‌های پایین استفاده کرد. از طرف دیگر، ما به یک لایه نازک از هر نمونه برای محافظت از فوتون‌های کم‌انرژی نیاز خواهیم داشت، پس کم‌ترین مقدار لایه یک‌دهم کننده برای Nextel-۷۲۰ می‌باشد.

نسبت ضریب پراکندگی کامپتون به ضریب تضعیف کل معیاری از سهم نسبی پراکندگی کامپتون در تضعیف یک پرتو در هنگام عبور از یک ماده را نشان می‌دهد .پراکندگی کامپتون یکی از فرآیندهای اولیه‌ای است که توسط آن پرتوهای ایکس و گاما با ماده برهم‌کنش می‌کنند. در این فرآیند، یک فوتون با یک الکترون در ماده برهم‌کنش می‌کند و مقداری از انرژی خود را از دست می

دهد و باعث می‌شود فوتون در جهت جدیدی پراکنده شود. چون پراکندگی کامپتون در انرژی ۱/۵–۰/۵ مگا الکترون‌ولت پدیده غالب می‌باشد به وضوح در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی نمودار با شیب تندی افزایش می‌یابد و در انرژی ۱ مگا الکترون‌ولت به حداکثر میزان خود می‌رسد (یعنی بیشینه مقدار در نزدیکی انرژی آستانه تولید زوج که ۱/۰۲۲ مگا الکترون‌ولت می‌باشد رخ می‌دهد) و پس از آن با کاهش پراکندگی کامپتون با شیب زیادی به صفر میل می‌کند.




شکل۵: تغییرات لایه یک‌دهم مقدار برای سرامیک‌ها برحسب انرژی فوتون‌ها




شکل۶: نسبت برهم‌کنش کامپتون به کل برهم‌کنش برای سرامیک برحسب انرژی فوتون‌ها

## ۴– نتیجه‌گیری

مجموعه حفاظ با ترکیب حاوی مواد $Al_2O_3$-$Si_2O_3$-$B_2O_3$ با استفاده از ابزار شبیه‌سازی Geant4 مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. دقت و صحت شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های تجربی موجود در برنامه XMuDat تأیید شد. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین شبیه‌سازی‌ها و اندازه‌گیری‌های تجربی وجود دارد. در این مطالعه از ابزار شبیه‌سازی Geant4 برای بررسی کمیت‌های اصلی تضعیف فوتون در برابر تابش گاما و نوترون استفاده کردیم. کمیت‌های حفاظت در برابر پرتو گاما و نوترون مانند لایه نیم‌مقدار (HVL)، مسیر آزاد میانگین (MFP)، ضریب تضعیف جرمی ($\mu$m) و سطح مقطع جذب نوترون‌های سریع برای چهار سرامیک در محدوده انرژی ۰/۰۱۵–۱۵ مگا الکترون‌ولت محاسبه شد. نتایج به‌گونه‌ای بود که با افزایش چگالی ضریب تضعیف خطی و لایه نیم مقدار و یک‌دهم مقدار به ترتیب افزایش می‌یابند. همچنین، عملکرد تضعیف سرامیک‌ها با کاهش انرژی گاما بهبود یافت. علاوه بر این، مقادیر محاسبه شده، نشان می‌دهد که سرامیک‌ها علاوه بر تضعیف مؤثر پرتو گاما، به دلیل وجود عنصر بور که کندکننده خوبی برای نوترون‌ها می‌باشد، عملکرد خوبی در کندسازی نوترون‌ها نیز دارد. همچنین، به دلیل وجود $Si_2O_3$ در این ترکیب‌ها (بهبود بخشیدن به خواص پایداری گرمایی و شیمیایی ترکیب) می‌تواند به عنوان بهترین ترکیب حفاظ پرتو گاما و نوترون در نظر گرفته شود.

## تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## مراجع

[1]. Q. Chen, K.A. Naseer, K. Marimuthu, P. Suthanthira, B. Mia, K.A. Mahmoud, M.I. Sayyed “Influence of

modifier oxide on the structural and radiation shielding features of $Sm^{3+}$doped calcium telluro-fluoroborate glass systems", Journal of the Australian Ceramic Society, 2020, 57, 275–286.
[2]. D. Cao, G. Yang, M. Bourham, D. Moneghan, "Gamma radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate) composites", Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52 (11), 2613-2619.
[3]. M. Eshghi, "Investigation of radiation protection features of the $TeO_2$–$B_2O_3$–$Bi_2O_3$–$Na_2O$–$NdCl_3$ glass systems", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31, 16479–16497.
[4]. Akkurt, C. Basyigit, S. Kilincarslan, "The photon attenuation coefficients of barite, marble and limra", Annals of Nuclear Energy, 2004, 31(5), 577–582.
[5]. L.A. Najam, A.K. Hashim, H.A. Ahmed, and I.M. Hassan, "Study the Attenuation Coefficient of Granite to Use It as Shields against Gamma Ray", Detection, 2016, 04 (02), 33–39.
[6]. B. Oto, E. Kavaz, H. Durak, A. Aras, and Z. Madak, "Effect of addition of molybdenum on photon and fast neutron radiation shielding properties in ceramics", Ceramics International, 2019, 45 (17), 23681–23689.
[7]. F. Akman, Z.Y. Khattari, Kaçal, M.I. Sayyed and F. Afaneh, "The radiation shielding features for some silicide, boride and oxide types ceramics", Radiation Physics and Chemistry, 2019, 160, 9–14 .
[8]. Q. Li, X. Yin, W. Duan, L. Kong, X. Liu, L. Cheng, L. Zhang, "Improved dielectric and electromagnetic interference shielding properties of ferrocene-modified poly-carbosilane derived SiC/C composite ceramics", Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34, 2187–2201.
[9]. D. Schawaller, B. Clau, M. R. Buchmeiser, "Ceramic Filament Fibers–A Review", Macromolecular Materials and Engineering, 2012, 297, 502–522.
[10]. A.R. Bunsell, M.H. Berger, "Fine diameter ceramic fibres", Journal of the European Ceramic Society, 2000, 20, 2249.
[11]. G.E. Yu, M. Edirisinghe, D.S. Finch, B. Ralph and J. Parrick, "Synthesis of α-silicon nitride powder from a polymeric precursor", Journal of the European Ceramic Society, 15 (6), 581–590, 2018.
[12]. M. Ge,C. Cao, J. Huang,S. Li, Z. Chen, K. Zhang, S.S. Al-Deyab ,Y. Lai, "A Review of One-dimensional TiO2 Nanostructured Materials for Environmental and Energy Applications", Journal of Materials Chemistry A., 2013, 1, 1- 26.
[13]. Y. Kodera, C.L. Hardin, J.E. Garay, "Transmitting, emitting and controlling light: processing of transparent ceramics using current-activated pressure-assisted densification", Scripta Materialia, 2013, 69, 149-154.
[14]. صحرانژاد نعمت الله، سرپولکی حسین، رضایی حمیدرضا، کاویانی سعید. بررسی تاثیر دما و زمان بر خواص کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) آلومینا-آلومینیوم. فصلنامه سرامیک ایران. ۱۳۸۸; ۵ (۲) :۳۵-۴۳.
[15]. مرساق دزفولی سعید، باغشاهی سعید، نعمتی علی، کاظمی ارغوان. مطالعه خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC) تقویت شده با فیبرهای اکسیدی. فصلنامه سرامیک ایران. ۱۳۹۵; ۱۲ (۴):۵۰-۵۸.
[16]. Peigney,"Composite materials: tougher ceramics with nanotubes", Nature Materials, 2003, 3, 15-16.
[17]. R. Lucas, C.E. Davis, W.J. Clegg, D. Pizon, F. Babonneau, S. Foucaud, G. Antou, A. Maître,"Elaboration of ZrC-SiC composites by spark plasma sintering using polymer-derived ceramics", Ceramics International, 2014, 40, 15703-15709.
[18]. Lee J. and Kang J.K., "Study on GEANT4 Code Applications to Dose Calculation Using Imaging Data", Journal of the Korean Physical Society, 2015, 67, 195–198 .
[19]. Özdemir T., Yılmaz S.N., "Hexagonal boron nitride and polydimethylsiloxane: a ceramic rubber composite material for neutron shielding", Radiation Physics and Chemistry, 2018, 152, 93–99.
[20]. Incerti S., baldacchino G., bernal M., Capra R., champion C. and et al, "the geant4-dna project", International Journal of Modeling, 1, 157-178, 2010.
[21]. Ripin A., Mohamed F., Choo T.F., Yusof M.R., Hashim S. and Ghoshal S.K., "X-ray shielding behavior of kaolin derived mullite-barites ceramic", Radiation Physics and Chemistry, 2018, 144, 63–68.
[22]. Kim S.C. and Cho S.H., "Analysis of the correlation between shielding material blending characteristics and porosity for radiation shielding films", Applied Sciences, 2019, 9(9), 1765.

# Ionizing Radiation Shielding Properties of Ceramic Fibers Using Monte Carlo Simulation

**Alipoor M.R.[1], Eshghi M.[2]***

**Department t of Physics, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran**

* eshgi54@gmail.com, meshghi@ihu.ac.ir

**Abstract:** In this research, we investigated the protective characteristics of ionizing rays (gamma and neutron) of Nextel-312, Nextel-440, Nextel-550, Nextel-720 ceramic fibers using Geant4 Monte Carlo simulation tool. In this study, parameters related to photon attenuation such as: mass attenuation coefficient ($\mu$m), half-value layer (HVL) and mean free path (MFP) in the range of 0.015 to 15 MeV and the absorption cross section of fast neutrons for different energy levels were calculated. To validate the simulation results, we compared them with the results extracted from the XMuDat database, which shows that they are in good agreement with each other. The agreement between the data extracted from the XMuDat database and the results of the simulations of this study shows that Monte Carlo modeling is a good method to investigate the properties of gamma ray shielding. Also, the obtained results of ceramic fibers show more effective attenuation parameters in addition to physical properties compared to conventional protective materials such as concrete. Due to its higher density, Nextel-720 ceramic has the most favorable condition compared to other investigated ceramics.

**Keywords:** Gamma-ray and neutron, Shielding, Ceramic, Monte Carlo simulation.