

استفاده از کد SRIM برای محاسبه آسیب ناشی از تابش گاما بر زخم پوش پلی کاپرو لاکتون

INC29-1104

مهسا حسینی*، سعید حمیدی، علی محمدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک

چکیده:

زخم پوش‌های مهندسی بافت به عنوان تجهیزات پزشکی نیاز به استریل کردن دارند. تابش گاما یکی از روش‌های رایج استریلیزاسیون است که باعث آسیب تابشی در مواد شده و خواص مکانیکی و فیزیکی مواد را دستخوش تغییر می‌کند. این مطالعه اثر استریلیزاسیون توسط تابش گاما بر زخم پوش پلی کاپرولاکتون (PCL) را با استفاده از روش شبیه‌سازی مبتنی بر کد MCNPX که اطلاعاتی در مورد اتم‌های پس‌زده اولیه یا PKAها که باعث آسیب می‌شوند را فراهم می‌کند، ارائه شده است. برنامه‌ای به نام GAMMATRACK برای دسترسی به اطلاعات PKAها توسعه داده شده است. خروجی GAMMATRACK را می‌توان به عنوان ورودی برای کد SRIM جهت محاسبه میزان آسیب ناشی از تابش گاما بر روی هدف PCL استفاده کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که آسیب جابجایی در ساختار به دلیل تک جای خالی‌ها به وجود آمده‌اند و با توجه به وجود PKAها ی کم انرژی و هدف کم ضخامت، ایجاد آبشار جابجایی منتفی است. تعداد کل PKAهای هیدروژن، کربن و اکسیژن محاسبه شد و با توجه به اینکه تعداد PKAهای کربن‌های بیشتر از بقیه است، تشکیل پیوند قوی کربن-کربن و ایجاد شبکه‌های پلیمری سه‌بعدی مورد انتظار خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: استریلیزاسیون گاما، آسیب تابشی، کد SRIM، کد MCNPX، داربست PCL.

The use of SRIM code to calculate damage caused by gamma radiation on polycaprolactone scaffold

M. Hoseini*, S. Hamidi, A. Mohammadi

Department of Physics, Faculty of basic science, Arak University, P.O. Box: 38156, Arak, Iran

Abstract:

Tissue engineering scaffolds need to be sterilized as medical equipment. Gamma radiation is one of the common methods of sterilization that causes radiation damage to materials and changes their mechanical and physical properties. This study presents the effect of sterilization by gamma irradiation on a polycaprolactone (PCL) scaffold using a simulation method based on the MCNPX code. It provides information on the primary knocked-out atoms or PKAs that cause damage. A program called GAMMATRACK has been developed to access PKA information. The GAMMATRACK output can be used as input for the SRIM code to calculate the amount of gamma radiation damage on the PCL target.

Results showed that single vacancies caused displacement damage in the structure, and due to the presence of low-energy PKAs and thin target, the creation of a displacement cascade is ruled out. The total number of PKAs of hydrogen, carbon, and oxygen was calculated. Considering that the number of PKA's of carbons is more than others, the formation of robust carbon-carbon bonds and the creation of 3D polymer networks will be expected.

Keywords: Gamma Irradiation Sterilization, Radiation Damage, SRIM code, MCNPX code, PCL Scaffold

۱. مقدمه

مهندسی بافت یک رشته به سرعت در حال رشد در پزشکی بازساختی است و به منظور ترمیم بافت‌های جراحی شده توسعه می‌یابد [۱]. تولید زخم پوش‌های مهندسی بافت به عنوان تجهیزات پزشکی نیاز به استریل کردن دارد. تابش گاما یک روش رایج استریلیزاسیون است زیرا آسیب ناشی از گاما در سطح مولکولی باعث تجزیه DNA باکتری‌ها شده و آن‌ها را می‌کشد [۳، ۱]. مواد پلیمری به شدت نسبت به تابش حساس هستند و خواص آن‌ها با قرار گرفتن در معرض یون‌ها و پرتوهای مختلف تغییر می‌کند. این امر می‌تواند تغییرات خاصی را ایجاد کند، مانند اتصال عرضی^۱ و بریدگی زنجیره‌ای^۲ زنجیره‌های پلیمری، که بر خواص فیزیکی، شیمیایی و سطحی تأثیر می‌گذارد [۴، ۵، ۱]. فرآیند بریدگی زنجیره وزن مولکولی را کاهش می‌دهد و فرآیند اتصال عرضی منجر به تشکیل شبکه‌های سه‌بعدی بزرگ و افزایش وزن مولکولی پلیمر می‌شود [۵، ۲]. از نظر کیفی، زنجیره‌های پلیمری به‌طور هم‌زمان در حین تابش پلیمر به هم متصل شده و یا بریده می‌شوند. با این حال، تسلط یک عامل بر دیگری برای یک پلیمر معین به ساختار پلیمر، دوز تابش، شار و ضخامت نمونه بستگی دارد [۵، ۳]. بنابراین، مواد و سیستم‌هایی با اجزای مقاوم در برابر تابش باید توسعه داده شوند تا از تخریب ناشی از تابش جلوگیری شود، که نیاز به دانش روش‌های تخریب دارد [۵].

اخیراً، مطالعات تجربی زیادی برای بررسی آسیب استریلیزاسیون توسط اشعه گاما انجام شده است که می‌تواند منجر به اصلاح ساختاری یا از دست دادن خواص در داربست‌های پلی کاپرولاکتون (PCL) شود. تمامی این مطالعات محصول نتایج تجربی [۱-۴، ۶، ۷] بوده است و فقدان شبیه‌سازی آسیب در این زمینه احساس می‌شود. در مطالعه‌ای توسط کاسان و همکاران [۶] بر روی زخم پوش PCL، سه نوع تابش ایکس، بتا و گاما مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که تابش منجر به بریدگی زنجیره پلیمری و کاهش میانگین وزن مولکولی (\bar{M}_n) شده است. آگوستین و همکاران [۳] اثرات وابسته به دوز تابش گاما بر روی خواص مواد داربست‌های مهندسی بافت PCL الکترورسی شده را بررسی کردند. وجود گروه‌های عاملی OH (هیدروکسیل) و COOH (کربوکسیل) در غشای PCL در اثر تابش تأیید شده است. در این تحقیق با استفاده از روش مونت کارلو اثر تابش گاما از منبع کبالت-۶۰ بر زخم پوش PCL محاسبه شده است. طیف اولیه اتم‌های پس‌زده اولیه (PKAs) و انواع آن‌ها در زخم پوش PCL به دست آمد. با داشتن درصد PKA از هر نوع اتم، می‌توان تأثیر تابش بر پلیمر را بررسی کرد. نموداری آسیب در امتداد ضخامت هدف نیز به دست آمد که کمک می‌کند قبل از انجام آنالیزهای تجربی، از تأثیر تابش بر ساختار PCL پیش‌آگاهی داشته و با برآورد عمق آسیب، نمونه‌برداری برای انجام آنالیزهای تجربی دقیق‌تر شده و هزینه کارهای تجربی را کاهش داد.

۲. روش کار

بین روش‌های استریل‌سازی، پرتودهی گاما روشی ساده و مؤثر برای حذف بار بیولوژیکی است. هنگامی که تابش با ماده برهم‌کنش می‌کند، مقداری یا تمام انرژی خود را به آن انتقال داده و باعث یونیزه شدن یا تحریک اتم‌ها می‌شود. پرتوهای گاما با سه روش فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، و تولید زوج با مواد برهم‌کنش می‌کنند. در این فرآیندها، انرژی توسط هدف جذب شده و بسته به ترکیب اتمی آن، الکترون‌ها از اتم‌های درون هدف ساطع می‌شوند. حال اگر این الکترون‌های بیرون افتاده یا تابش ثانویه با اتم‌های هدف برخورد کنند و انرژی مبادله شده در برخوردشان بالاتر از انرژی آستانه (که در این حالت انرژی جابجایی^۳ نامیده می‌شود) باشد، این اتم‌های هدف می‌توانند اتم‌های مجاور را از محل اصلی خود (که اتم‌های ثانویه نامیده می‌شوند) جابجا کنند، که منجر به آبخاری از برخوردهای اتمی بعدی می‌شود. این اتم‌های هدف را، اتم‌های پس‌زده^۴ اولیه (PKA) نامیده می‌شوند. این فعل و انفعالات منجر به تغییرات ساختاری مانند نقص نقطه‌ای، بریدگی زنجیره و اتصال عرضی می‌شود [۵، ۷]. از پرتوهای گاما نیز برای اصلاح ساختار متخلخل زخم پوش‌ها نیز استفاده می‌شود. تابش باعث نفوذ فوتون‌ها به مواد، شکستن زنجیره‌های پلیمری و ایجاد رادیکال‌های آزاد می‌شود. این

^۱ Cross-linking^۲ Scission^۳ Displacement Energy^۴ Primary knocked-out atoms

رادیکال‌های آزاد می‌توانند برای ایجاد پیوندهای عرضی بین مولکول‌های مجاور مجدداً ترکیب شوند [۳]. به این ترتیب، برای محاسبه آسیب تابش گاما، می‌توان برهم‌کنش تابش ثانویه (الکترون‌ها) با هدف PCL را شبیه‌سازی کرد [۸،۹].

۱.۲. روش مونت کارلو (MCNPX+SRIM)

آسیب ناشی از تابش یک نقص میکروسکوپی است که خواص مواد را تغییر می‌دهد [۱۰]. پارامتری که معمولاً برای ارتباط آسیب جابجایی استفاده می‌شود، DPA یعنی تعداد اتم‌های اولیه و ثانویه جابجا شده از مکان‌های اصلی خود در نتیجه بمباران ذرات است [۱۱]. به منظور محاسبه طیف انرژی PKAها و محاسبه DPA ناشی از تابش گاما و تخمین اثر استریلیزاسیون بر روی زخم پوش PCL محفظه چشمه کبالت-۶۰، که تجهیزات پزشکی در آن استریل می‌شوند با کد MCNPX شبیه‌سازی شد. این محفظه استوانه‌ای به طول ۱۹ سانتی‌متر و قطر ۱۴ سانتی‌متر است که در سازمان انرژی اتمی ایران نگهداری می‌شود. ترکیب شیمیایی ماده موردنظر برای پلیمر PCL، $(C_6H_{10}O_2)$ با ضخامت ۰/۵ cm (مشابه ضخامت میانگین نمونه‌های واقعی آماده شده در آزمایشگاه) در این محفظه شبیه‌سازی شد و در معرض تابش گامای چشمه کبالت-۶۰ قرار گرفت. فعالیت چشمه ۴۲۰۰ کوری بود.

کد MCNPX یک فایل خروجی تحت عنوان Ptrac چاپ می‌کند، این خروجی حاوی اطلاعات هر NPS می‌باشد، که عبارتند از نوع ذره، مکان و زاویه حرکت آن و نوع واکنشی که ذره انجام داده است. در پیوست I از کتابچه راهنمای MCNPX، فایل Ptrac توضیح داده شده است [۱۲]. برای دستیابی و استخراج اطلاعات فوق از فایل Ptrac، یک برنامه جانبی به نام GAMMATRACK توسط نرم‌افزار MATLAB نوشته شد. این برنامه قادر است ماتریس PKAها شامل کلیه اطلاعات موردنیاز را استخراج، و طیف PKAها را رسم و همچنین میانگین، بیشینه و کمینه انرژی آن‌ها را به ازای هر انرژی پرتوی گامای فرودی، محاسبه نماید و از آن به عنوان ورودی برای SRIM استفاده کند. SRIM [۱۳، ۱۴] کد محبوب دیگری است که برای محاسبه آسیب به یک هدف استفاده می‌شود. فایل ورودی SRIM، trim.dat نامیده می‌شود که با کمک کد GAMMATRACK استخراج شده است. در نهایت، کد مونت کارلو SRIM، انتقال PKAها را در زخم پوش PCL شبیه‌سازی کرده و آسیب ناشی از تابش گاما (اثر استریلیزاسیون) را در واحد جابجایی بر یون-آنگستروم محاسبه می‌کند. انرژی آستانه‌ی جابجایی برای پلیمرها در محدوده ۵-۳ eV است [۱۴] که در این مطالعه انرژی جابجایی ۵ eV در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج

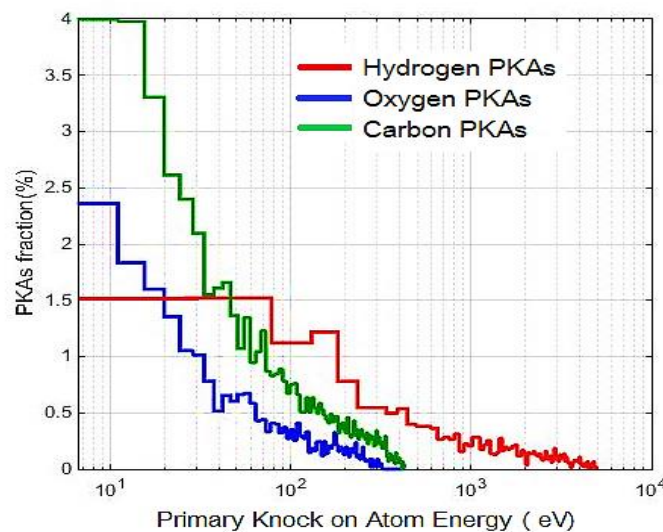
۱.۳. توزیع انرژی PKAها

جدول ۱ حداقل، متوسط و حداکثر انرژی PKAهای هیدروژن، کربن و اکسیژن را توسط برنامه GAMMATRACK نشان می‌دهد. میانگین انرژی PKAها در محدوده ۳۰۰ eV است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اتم‌های اکسیژن و کربن زمانی می‌توانند اتم‌های دیگر را در ساختار PCL بیرون پرتاب کنند و یک سری جابجایی ایجاد کنند که انرژی آن‌ها در محدوده ۱ keV و بیشتر باشد [۱۴]. در انرژی‌های بالاتر از ۴۵۰ eV، احتمال ایجاد آبخار جابجایی با اتم‌های هیدروژن ممکن می‌شود [۱۳، ۱۴]. با این وجود، همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، جمعیت این PKAها ناچیز است. بنابراین احتمال رخداد آبخار منتفی است. شکل ۱ طیف انرژی PKAهای اتم‌های هیدروژن، کربن و اکسیژن را برای زخم پوش PCL توسط برنامه GAMMATRACK نشان می‌دهد. بیشترین درصد مولکولی در مواد با مولکول‌های آلی مانند پلیمرها مربوط به زنجیره‌های کربن و هیدروژن است. فرآیند یونیزاسیون ناشی از تابش ابتدا پیوندهای کووالانسی که به انرژی کمتری برای شکستن و تجزیه به رادیکال‌های آزاد نیاز دارند را می‌شکند [۱۵، ۱۶]. در این حالت پیوند کربن و هیدروژن باز می‌شود و رادیکال‌هایی ایجاد می‌شود که ذرات ناپایداری هستند که می‌توانند با رادیکال‌های دیگر پیوند تشکیل دهند. این یون‌ها دلیل برهم‌کنش‌های شیمیایی بین مولکول‌ها در غلظت‌های مختلف هستند. در نتیجه، رشته‌های پلیمری ایجاد می‌شوند و یک شبکه پلیمری سه‌بعدی را تشکیل می‌دهند که می‌تواند خواص مقاومت مکانیکی، حرارتی و شیمیایی را افزایش دهد [۱۵]. در فرآیند استریلیزاسیون با پرتو گاما، کربنی که برای حذف نیاز به انرژی کمتری دارد، با دریافت انرژی از اتم هیدروژن جدا می‌شود و یک پیوند کوتاه و قوی کربن-کربن تشکیل می‌دهد. از این رو آسیب احتمالی را می‌توان به نوعی یک مزیت در نظر گرفت. همان‌طور که در شکل ۱ یا جدول ۱ نشان داده شده است، درصد PKA کربن بالاتر از اکسیژن و هیدروژن است. بنابراین، تشکیل یک شبکه پلیمری سه‌بعدی برای هدف PCL

ممکن خواهد بود. یک شبکه سه‌بعدی زخم پوش پلیمری را قادر می‌سازد تا رطوبت را بهتر جذب کرده و مولکول‌های آب را به دام بیندازد و با مرطوب نگه داشتن زخم برای مدت طولانی به عملکرد بهتر زخم پوش‌های PCL کمک کند [۲، ۱۷، ۱۸].

جدول ۱. اطلاعات مربوط به حداقل، متوسط و حداکثر انرژی PKA توسط برنامه GAMMATRACK.

انرژی بیشینه (eV)	انرژی میانگین (eV)	انرژی کمینه (eV)	درصد PKA ها	انرژی PKA ها نوع PKA ها
۵۰۰۲/۴۸	۱۲۲۱/۴۰	۵/۱۸	۱۷/۹۲٪	هیدروژن
۴۲۴/۴۱	۱۰۲/۹۵	۵/۰۱	۵۷/۵۱٪	کربن
۳۱۷/۰۱	۸۰/۱۶	۵/۰۱	۲۴/۵۵٪	اکسیژن



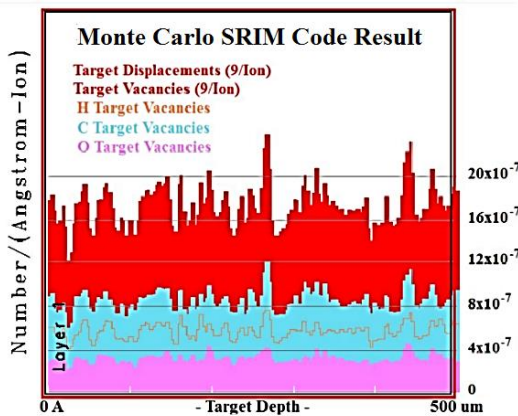
شکل ۱. طیف انرژی PKA ها در نمونه PCL، برای هر نوع PKA (هیدروژن، کربن، و اکسیژن) استرل شده با چشمه کبالت-۶۰ و انرژی آستانه جابجایی ۵eV.

۲.۳. آهنگ آسیب

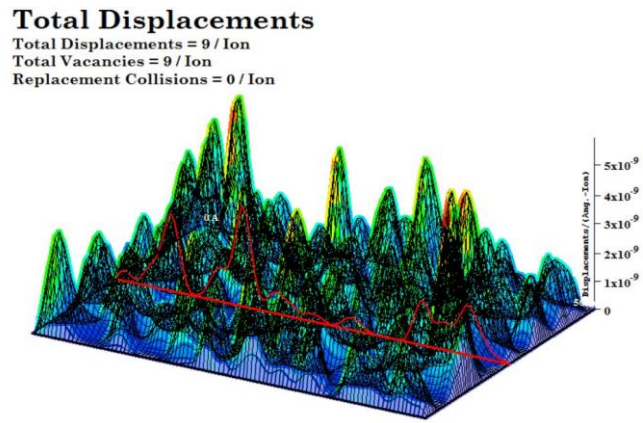
همان‌طور که در شکل ۲ در یک نمایه سه‌بعدی از آسیب جابجایی نشان داده شده است، آسیب می‌تواند منجر به ایجاد جای خالی در هدف یا برخوردهای جایگزین شود. جابجایی‌های به وجود آمده در این مطالعه به دلیل تک جای خالی است و برخوردهای جایگزین نقشی در کل جابجایی‌ها ندارند. تابع توزیع مقادیر جابجایی یک توزیع گاوسی متقارن و یکنواخت با $R^2 = 0/94$ و مقدار میانگین 10^{-7} × ۲/۹۹ و سیگما $2/99 \times 10^{-8}$ است، که نشان دهنده یکنواختی آسیب در طول هدف پلیمری خواهد بود. یکنواختی توزیع آسیب به این معنی است که نمونه‌گیری در آنالیزهای تجربی SEM و TEM پیچیده نخواهد بود و می‌توان با عملکرد مناسب و آگاهی قبلی از توزیع، آزمون و خطا را برای نمونه‌برداری به حداقل رساند.

شکل ۳ تعداد اتم‌های جابجا شده در هدف PCL توسط تابش ثانویه (الکترون‌ها) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، آسیب عمدتاً توسط جابجایی اتم‌های کربن ایجاد می‌شود. نرخ آسیب با استفاده از روش مونت کارلو (SRIM+MCNPX) و روش تئوری، در جدول ۲ نشان داده شده است. محاسبه تئوری آسیب تابشی گاما برای اطمینان بیشتر از نتایج مونت کارلو و جزئیات مقایسه بین نتایج در مقاله‌های دیگر از نویسندگان [۱۹] منتشر شده است. DPA مرتبط‌ترین پارامتر همبستگی برای اهداف محاسبه آسیب است و مقادیر دوز معادل را برای انواع مختلف تابش می‌دهد. به خوبی شناخته شده است که میزان آسیب نقش حیاتی در تورم، خزش و جداسازی املاح ناشی از تابش دارد. از آنجایی که آسیب گاما توسط الکترون‌ها (تابش ثانویه) به ماده القا می‌شود، الکترون با عبور از ماده پس‌زدگی‌های کم انرژی ایجاد می‌کند و در ایجاد نقص نقطه‌ای کارآمدتر است، همان‌طور که نتایج به دست آمده نیز این موضوع را تأیید می‌کند. در مقابل، پس‌زدگی‌های پرانرژی مانند تابش نوترون باعث آسیب آبخاری می‌شود [۱۱]. مشخص شد که در این سطح از انرژی تابش گاما و ضخامت کم هدف، وقوع یک آبخار جابجایی تقریباً غیرممکن است. با این وجود، با توجه به میزان آسیب در روش استرلیزاسیون با اشعه گاما، ریزساختار آسیب‌دیده تغییرات اساسی در خواص فیزیکی و مکانیکی یک ماده ایجاد خواهد کرد. مطالعات

تجربی استریلیزاسیون با اشعه گاما ثابت می‌کنند که این اشعه می‌تواند ساختارهای مولکولی پلیمر را با بریدگی زنجیره‌ای تغییر دهد که استحکام کششی و ازدیاد طول را کاهش می‌دهد یا باعث اتصال عرضی شود که استحکام کششی را افزایش می‌دهد اما ازدیاد طول را کاهش می‌دهد. اتصال عرضی می‌تواند شبکه‌های اتصال عرضی سه‌بعدی در ساختار زخم پوش ایجاد کند که می‌تواند خواص پلیمر را بهبود بخشد، درحالی‌که مشخصات بلوری و در نتیجه چگالی نیز ممکن است با ادامه بریدگی زنجیره تغییر یابد [۲۰، ۱۵]. در این مطالعه، تعداد PKA های هیدروژن، کربن و اکسیژن به دست آمد و نشان داده شد که درصد PKA های کربن بیشتر از اکسیژن و هیدروژن است. بنابراین، تشکیل یک پیوند کربن-کربن قوی با یک شبکه پلیمری سه‌بعدی مورد انتظار خواهد بود. شبکه سه‌بعدی عملکرد زخم پوش‌های PCL را برای مرطوب نگه داشتن زخم برای مدت طولانی‌تری افزایش می‌دهد.



شکل ۳. رویداد آسیب دوبعدی جابجایی برای چشمه کبالت ۶۰ پرتو گاما روی یک نمونه PCL.



شکل ۲. پروفایل سه‌بعدی جابجایی برای چشمه کبالت ۶۰ پرتو گاما روی یک نمونه PCL.

جدول ۲. مقایسه بین نرخ تولید DPA برآورد شده توسط محاسبات نظری و نتایج مونت کارلو.

آهنگ کل جابجایی (DPA/year)		
این مطالعه	$2/05 \times 10^{-9}$	روش مونت کارلو (MCNPX+SRIM code)
[۱۹]	$1/74 \times 10^{-9}$	روش محاسبات تئوری

۴. نتیجه‌گیری

به‌منظور محاسبه آسیب پرتو گاما و تعیین خصوصیات PKA ها و به دنبال مطالعات قبلی آسیب ناشی از نوترون‌ها [۲۰] توسط یک کد توسعه یافته به نام AMTRACK که می‌تواند به عنوان ورودی کد SRIM برای تجزیه و تحلیل آسیب تابش نوترونی برای اهداف مختلف به‌طور سیستماتیک استفاده شود [۱۰، ۲۱، ۲۲]، برنامه‌ای به نام GAMMATRACK برای دستیابی به کد آسیب کامل نوترون-گاما توسعه داده شد. در این روش یک برنامه MATLAB نوشته شد که خروجی‌های MCNPX و SRIM را تجزیه و تحلیل کرده و امکان محاسبه‌ی توزیع انرژی، مکانی و زاویه‌ای PKA های ناشی از عناصر مختلف در یک ترکیب را فراهم می‌آورد و در نتیجه محاسبات آسیب تابش روی ماده قابل محاسبه خواهد بود. در این مطالعه با کمک کد GAMMATRACK، تأثیر استریلیزاسیون توسط پرتو گاما بر روی زخم پوش PCL بررسی شد که کمک می‌کند تا در مورد اثرات قطعی و احتمالی تابش گاما بر روی نمونه‌ها آگاهی قبلی داشته باشیم. با در نظر گرفتن این اثرات و بهینه‌سازی نمونه برای جلوگیری از تخریب ناشی از تابش، می‌توان در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد و مطالعات تجربی کارآمدتری داشت.

۴. مراجع

1. Cottam, E., et al., Effect of sterilisation by gamma irradiation on the ability of polycaprolactone (PCL) to act as a scaffold material. *Medical engineering & physics*, 2009. **31**(2): p. 221-226.
2. Rediguieri, C.F., et al., Impact of sterilization methods on electrospun scaffolds for tissue engineering. *European Polymer Journal*, 2016. **82**: p. 181-195.
3. Augustine, R., et al., Dose-dependent effects of gamma irradiation on the materials properties and cell proliferation of electrospun polycaprolactone tissue engineering scaffolds. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 2015. **64**(10): p. 526-533.
4. Bhaskar, P., et al., Cell response to sterilized electrospun poly (ϵ -caprolactone) scaffolds to aid tendon regeneration in vivo. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2017. **105**(2): p. 389-397.
5. Kumar, V., et al., *Radiation Effects in Polymeric Materials*. 2019: Springer.
6. de Cassan, D., et al., Impact of sterilization by electron beam, gamma radiation and X-rays on electrospun poly-(ϵ -caprolactone) fiber mats. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2019. **30**(4): p. 42.
7. Bosworth, L., A. Gibb, and S. Downes, Gamma irradiation of electrospun poly (ϵ -caprolactone) fibers affects material properties but not cell response. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2012. **50**(12): p. 870-876.
8. Leo, W.R., *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. 2012: Springer Science & Business Media.
9. Toijer, E., *Assessment of primary damage and copper precipitation in cast iron in repository conditions*. 2014.
10. Ardekani, S.F.G. and K. Hadad, Evaluation of radiation damage in belt-line region of VVER-1000 nuclear reactor pressure vessel. *Progress in Nuclear Energy*, 2017. **99** p. 96-102.
11. Li, M. and N. Mokhov. Experience with Moving from Dpa to Changes in Materials Properties. in 46 th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, Sept. 2010.
12. Pelowitz, D.B., et al., Mcnpx 2.7 e extensions. 2011, Los Alamos National Lab.(LANL) ,Los Alamos, NM (United States).
13. Ziegler, J. and J. Biersack, SRIM-2013 software package. see <http://www.srim.org>, 2013.
14. Ziegler, J.F., M.D. Ziegler, and J.P. Biersack, SRIM–The stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010. **268**(11-12): p. 1818-1823.
15. Naikwadi, A.T., et al., Gamma radiation processed polymeric materials for high performance applications: A review. *Frontiers in Chemistry*, 2022. **10**.
16. Carey, F.A. and R.J. Sundberg, *Advanced organic chemistry: part A: structure and mechanisms*. 2007: Springer Science & Business Media.
17. Negut, I., G. Dorcioman, and V. Grumezescu, Scaffolds for wound healing applications. *Polymers*, 2010. **20** (9): 2010.
18. Li, J., et al., Nanofiber/hydrogel core-shell scaffolds with three-dimensional multilayer patterned structure for accelerating diabetic wound healing. *Journal of nanobiotechnology*, 2022. **20**(1): p. 1-18.
19. Hoseini, M., et al., A novel method for investigation of the impact of sterilization by gamma radiation on polycaprolactone scaffold. *Frontiers in Physics*, 2022. **10**: p. 1071269.
20. Mohammadi, A., S. Hamidi, and M.A. Asadabad, The use of the SRIM code for calculation of radiation damage induced by neutrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2017. **412**(Supplement C): p. 19-27.
21. Amirkhani, M.A., et al., Calculation of dpa rate in graphite box of Tehran Research Reactor (TRR). *Nuclear Science and Techniques*, 2019. **30**(6): p. 1-13.
22. Ardekani, S.F.G. and K. Hadad, Monte Carlo evaluation of neutron irradiation damage to the VVER-1000 RPV. *Nuclear Energy and Technology*, 2017. **3**(2): p. 73-80.