



کتابچه مقالات

۳۱ امین کنفرانس هسته ای ایران

» در این کتابچه، مقالات منتخب ارائه شده در ۳۱ امین کنفرانس ملی هسته ای ایران که از ۲۳ تا ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ در مشهد برگزار شد، خواهید یافت.
» امیدواریم آن را مفید و لذت بخش بیابید!

مقالات حوزه:

کاربرد پرتوها در صنعت



پژوهشگاه علوم و فنون
هسته ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



انجمن هسته ای ایران

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پژوهشگران گرامی، اساتید ارجمند و همکاران محترم،

مایه افتخار و مسرت بنده است که به عنوان رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران، خیرمقدم گرم و صمیمانه خود را تقدیم شما عزیزان می‌نمایم. در ادامه موفقیت چشمگیر دوره‌های پیشین این کنفرانس، امسال نیز شاهد گردهمایی استثنایی و پربار دانشجویان، پژوهشگران و اندیشمندان برجسته از دانشگاه‌های کشور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران و کارشناسان صنعت هستیم. کنفرانس امسال، با توجه به بازخوردهای ارزشمند دوره‌های قبل و نیازهای روز جامعه علمی و صنعتی، با رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر برگزار می‌شود. محورهای متنوع کنفرانس شامل تکنولوژی و ایمنی راکتورهای هسته‌ای، چرخه سوخت، مواد و پسماند هسته‌ای، غنی سازی و تولید ایزوتوپ پایدار، پرتوپزشکی و پزشکی هسته‌ای، کاربرد پرتوها در صنعت، کاربرد پرتوها در غذا، دامپروری و کشاورزی، شتابدهنده و دستگاه‌های مولد پرتو، آشکارسازی و دزیمتری، فیزیک و فناوری پلاسما و گداحت هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای، فناوری کوانتومی، مطالعات راهبردی و نرم می‌باشد. با افتخار اعلام می‌کنم که امسال بیش از ۳۷۰ مقاله کامل پذیرفته شده برای ارائه در این کنفرانس خواهیم داشت که از میان ۷۳ ارائه به صورت شفاهی و ۳۰ ارائه به صورت پوستر خواهند بود. همچنین با توجه به استقبال گسترده سال‌های گذشته، حدود ۳۰ نشست تخصصی و نیز نمایشگاه جانبی با رویکردی کاربردی‌تر و متنوع‌تر برگزار خواهند شد. پیش‌بینی می‌شود با احتساب فعالیت‌های جانبی، در حدود ۱۰۰۰ پژوهشگر در این رویداد علمی-فرهنگی در شهر مقدس مشهد حضور یابند. یکی از اهداف اصلی کنفرانس امسال، ایجاد پل ارتباطی مؤثرتر میان دانشگاه و صنعت است. ما معتقدیم دستاوردهای علمی زمانی ارزشمندتر خواهند بود که در مسیر حل مسائل واقعی جامعه و صنعت به کار گرفته شوند. از این رو، بخش ویژه‌ای به ارائه فرصت‌های همکاری میان پژوهشگران و صنایع اختصاص یافته است. در پایان، برای تمامی شرکت‌کنندگان، تجربه‌ای سرشار از دستاوردهای علمی، آموزنده و تحول‌آفرین را آرزومندم و امیدوارم این کنفرانس بتواند در ایجاد مسیری هموارتر برای گسترش کاربردهای یافته‌های علمی در صنعت و زندگی روزمره فراهم سازد.

با احترام،

دکتر جواد کریمی ثابت

رئیس سی و یکمین کنفرانس ملی علوم و فنون هسته‌ای ایران



برگزار کنندگان:



انجمن هسته‌ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



پرو، شگاه علوم و فنون هسته‌ای



حمایت کنندگان:



Sharif University
of Technology

دانشگاه صنعتی شریف



Amirkabir University
of Technology

دانشگاه صنعتی امیرکبیر



Shahid Beheshti
University

دانشگاه شهید بهشتی



FERDOWSI UNIVERSITY
OF MASHHAD

دانشگاه فردوسی مشهد



K. N. Toosi University
of Technology

دانشگاه خواجه نصیرالدین
طوسی



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته

دانشگاه تحصیلات تکمیلی
کرمان



Isfahan University

دانشگاه اصفهان



Shiraz University

دانشگاه شیراز

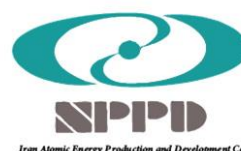


شرکت مصباح انرژی
(سهامی خاص)

شرکت مصباح انرژی



تولید مواد اولیه و سوخت
هسته‌ای ایران



شرکت مهندسی و توسعه
صنایع انرژی نوین



Energy Industry
Development Engineering Co.



شرکت فناوری‌های
پیشرفته ایران



مرکز ملی نظام کیفیت و استاندارد اتمی ایران

مرکز ملی نظام کیفیت و
استانداردسازی اتمی ایران



مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور

مرکز نظام ایمنی هسته‌ای
کشور



Radiation Application
Development Co.

شرکت توسعه کاربرد پرتوها



فهرست مقالات

- ۸.....مدل‌سازی رفتار ردیاب ^{238}T برای بهینه‌سازی ازدیاد برداشت نفت با شبیه‌ساز ECLIPSE (کد مقاله : ۱۰۰۸).....
- مقایسه آهنگ دز گاما میله کبالت-۶۰ و دسته سوخت مصرف شده در راکتور VVER-1000 و تعیین میزان ضخامت مورد نیاز حفاظ برای انتقال این میله (کد مقاله : ۱۰۱۰)..... ۱۸
- شناسایی سریع مکان و نوع مواد پرتوزا با پهنادهای مجهز به سیستم‌های بینایی ماشین و سنجشگرهای هسته ای (کد مقاله : ۱۰۴۲)..... ۲۵
- بهینه سازی برنامه بارگذاری چشمه های کبالت ۶۰ در سیستم تابش گاما (کد مقاله : ۱۱۰۹)..... ۳۲
- حذف رنگینه مالاشیت سبز با استفاده از جاذب طبیعی سنتز شده به روش پرتویی (کد مقاله : ۱۱۲۱)..... ۳۸
- طراحی یک سیستم مقطع‌نگاری رایانه ای با پرتو گاما برای تشخیص انباشت رسوبات در خطوط انتقال نفت (کد مقاله : ۱۱۵۸)..... ۴۵
- تشخیص رژیم و پیش‌بینی کسر حجمی هوا در جریان دوفازی آب و هوا با استفاده از روش غیرتهاجمی تضعیف گاما و شبکه عصبی کانولوشنال (کد مقاله : ۱۱۵۹)..... ۵۳
- بررسی تجربی اثر باریکه الکترون با انرژی ۱۰ MeV بر ترانزیستورهای BJT نوع NPN (کد مقاله : ۱۱۶۴)..... ۶۱
- ایجاد یک مدل هوش مصنوعی برای ارزیابی پارامترهای سیستم اسکن قطار مبتنی بر شتاب‌دهنده (کد مقاله : ۱۱۸۷)..... ۷۰
- افزایش اتصال عرضی در بازیافت پرتویی ضایعات پلی پروپیلن با استفاده از مونومر چند عاملی (کد مقاله : ۱۱۸۸)..... ۷۹
- آزمایش نمونه اولیه باتری بتاواتائیک و اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی ترکیبی FLUKA+SILVACO با داده‌های تجربی آن (کد مقاله : ۱۱۹۱)..... ۸۷
- اندازه گیری سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی واکنش $^{177}\text{Yb}(n,\gamma)^{176}\text{Yb}$ در روش غیرمستقیم تولید رادیوایزوتوپ ^{177}Lu در راکتور تحقیقاتی تهران (کد مقاله : ۱۱۹۶)..... ۹۵
- طراحی دستگاه عیب‌یاب خط تولید لوله‌های پلی اتیلن به روش هسته‌ای با استفاده از ابزار شبیه سازی GEANT4 (کد مقاله : ۱۱۹۷)..... ۱۰۰
- ساخت آمیزه پلیمری بر پایه پلی اتیلن مقاوم به شعله جهت تولید درپوش های حرارتی با استفاده از شتاب‌دهنده الکترون (کد مقاله : ۱۱۹۹)..... ۱۰۷
- بکارگیری پرتو یونیزان الکترون برای تولید هیدروژل PVP و PVP/CMC: مقایسه رفتار فیزیکی (کد مقاله : ۱۲۰۵)..... ۱۱۳
- توسعه سنسور رنگ قرمز، سبز، آبی (RGB) برای تشخیص کالای پرتودهی شده (کد مقاله : ۱۲۰۷)..... ۱۲۰
- کاربرد فناوری پرتودهی در فرآوری نفت خام سنگین و ترکیبات هیدروکربنی (کد مقاله : ۱۲۰۸)..... ۱۲۶



- ۱۳۸..... ساخت فیلم شناساگر حساس به پرتوالکترون بر پایه پلی وینیل کلراید (کد مقاله : ۱۲۱۱).....
- شبهه سازی عددی فرایند ترموگرافی نوری در کامپوزیت های لایه ای زمینه رزین تقویت شده با فیبرکربنی (کد مقاله : ۱۲۱۸).....
- ۱۴۵.....
- عنوان سنتز هیدروژل مبتنی بر (۲-هیدروکسی اتیل) متاکریلات/پلی وینیل پیرولیدون توسط تابش گاما (کد مقاله : ۱۲۲۲).....
- ۱۵۵.....
- تعیین مدت زمان تاخیر جهت ورود به اتاق پرتودهی در تاسیسات پرتودهی سیم و کابل توسط شتاب دهنده ELV-8 بر اساس محاسبات نرخ تولید آزن در هوا (کد مقاله : ۱۲۴۰).....
- ۱۶۳.....
- تشخیص رسوب در لوله های نفتی به روش GCT: بررسی الگوهای مختلف رسوب و الگوریتم های بازسازی تصویر (کد مقاله : ۱۲۵۰).....
- ۱۷۳.....
- بررسی تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه آسیب دز یونیزان کل (TID) در ترانزیستورهای ماسفت با فناوری میکرونی و نانومتری به کمک شبهه سازی با نرم افزار Silvaco TACD (کد مقاله : ۱۲۶۱).....
- ۱۷۹.....
- شبهه سازی مونت کارلو بر اثر چیدمان لایه ها در یک پناهگاه در برابر پروتون های رویداد ذرات خورشیدی برای حفاظت فضا نوردان در مأموریت های فضایی عمیق (کد مقاله : ۱۲۶۴).....
- ۱۸۷.....
- ارزیابی عملکرد نانوالیاف پلیمری پرتوپیوندی حاصل از الکتروریسی همزمان پلی آکریلونیتریل و نانوذرات NaA در جذب دی اکسید کربن (کد مقاله : ۱۲۸۰).....
- ۱۹۴.....
- بررسی امکان ارزیابی خوردگی دیواره خط لوله فلزی با استفاده از روش هیبریدی عبور/پس پراکندگی پرتوی گاما (کد مقاله : ۱۳۱۲).....
- ۲۰۱.....
- حذف رنگ مالاشیت گرین از پساب های آبی با استفاده از جاذبه های هیدروژلی بر پایه کیتوسان-کورکامین اصلاح سطحی شده با پروسیانیدین ب ۱ به کمک روش پرتودهی گاما (کد مقاله : ۱۴۰۰).....
- ۲۰۸.....
- بررسی تاثیر زاویه پرتودهی تابش پروتون بر جریان گذرای ناشی از آسیب پرتویی تک رخدادی در ترانزیستورهای ماسفت (کد مقاله : ۱۴۰۳).....
- ۲۱۵.....
- شبهه سازی شکل دهنده طیف برای رادیوگرافی نوترونی با استفاده از MCNP6 (کد مقاله : ۱۴۲۶).....
- ۲۲۲.....
- بررسی تاثیر پرتو الکترونی بر روی خواص مکانیکی پلیمر پلی اتیلن با استفاده از سامانه شتاب دهنده CELV-8 (کد مقاله : ۱۴۲۹).....
- ۲۲۹.....
- مروری بر گوگردزایی از محصولات پتروشیمی با استفاده از پرتو یونیزه کننده (کد مقاله : ۱۴۳۲).....
- ۲۳۷.....
- مقایسه و بررسی نتایج تجربی ویژگی های دزیمتری نانوکامپوزیت های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر با استفاده از پرتوهای گاما (کد مقاله : ۱۴۵۳).....
- ۲۴۳.....
- بررسی تاثیر فیلتر مغناطیسی بر جریان یون خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ (کد مقاله : ۱۴۷۱).....
- ۲۵۲.....



- بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین تانک تأخیری راکتور تحقیقاتی ده مگاوات (کد مقاله : ۱۴۹۳)..... ۲۵۹
- بررسی پایداری عملکرد ترانزیستور ماسفت BS170 به عنوان دزیمتر فعال در محدوده دز کل ۱ تا ۱۰۰ گری (کد مقاله :
۱۵۰۰)..... ۲۶۷
- امکان سنجی و شبیه‌سازی حفاظ گاما فوق سبک با فناوری فوم فلزی به کمک شبیه‌ساز مونت کارلو گیت (کد مقاله : ۱۵۰۱)
..... ۲۷۵
- بررسی و توسعه تجهیزات مورد استفاده جهت بکارگیری به عنوان دزیمتر: پژوهش های صورت گرفته مبتنی بر دزیمترهای نیمه
رسانا (کد مقاله : ۱۵۰۳)..... ۲۸۲
- شبیه سازی لامپ پرتو ایکس صنعتی و دزیمتر کامپوزیت با استفاده از Geant4 (کد مقاله : ۱۵۰۵)..... ۲۹۵
- کاربرد ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس در اندازه گیری جریان چندفازی (کد مقاله : ۱۵۰۸)..... ۳۰۱
- ترکیب تکنیک گاما و پیش شرط ساز با پره های مارپیچی در اندازه گیری کسر گاز تر (کد مقاله : ۱۵۱۱)..... ۳۰۸
- ترکیب تکنیک گاما و شبکه عصبی مصنوعی در تشخیص الگوی انباشت و ضخامت رسوب (کد مقاله : ۱۵۱۳)..... ۳۱۴
- تهیه آمیزه پلیمری به منظور تولید کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم به کمک پرتو دهی الکترون (کد مقاله : ۱۵۱۸)..... ۳۲۱



مدل سازی رفتار ردیاب CH_3T برای بهینه سازی ازدیاد برداشت نفت با شبیه ساز ECLIPSE (کد

مقاله : ۱۰۰۸)

پر بار ، امیر جواد^۱؛ آفریده، حسین*^۱؛ رشیدی، فریبرز^۲

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی، مهندسی هسته‌ای

^۲دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی شیمی، مهندسی شیمی

چکیده

در صنایع نفت و گاز، استفاده از ردیاب‌های هسته‌ای یکی از ابزارهای مؤثر برای تحلیل جریان سیالات و ارزیابی رفتار مخازن هیدروکربوری است. این روش‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره انتقال سیال، حجم منافذ جاروب شده، و ارتباط هیدرودینامیکی بین چاه‌های تزریقی و تولیدی ارائه می‌دهند که در بهینه‌سازی مدیریت مخازن و طراحی پروژه‌های ازدیاد برداشت اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش، رفتار ردیاب هسته‌ای CH_3T در یک مخزن نفتی با استفاده از شبیه‌ساز ECLIPSE، شبیه‌سازی و تحلیل شد. ردیاب از چاه تزریقی I وارد مخزن گردید و پاسخ آن در دو چاه تولیدی P^1 و P^2 مورد ارزیابی قرار گرفت. با تحلیل تغییرات نمودار ردیاب در واحد زمان، پارامترهایی از قبیل حجم منافذ جاروب شده در فاز گاز، سرعت جریان گاز در مخزن و ارتباط هیدرودینامیکی میان چاه‌های تزریقی و تولیدی محاسبه شد. نتایج نشان داد که چاه تولیدی P^1 دارای بیشترین حجم منافذ جاروب شده و بالاترین ردیاب دریافتی است، که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم و قوی میان چاه تزریقی I و چاه تولیدی P^1 می‌باشد. یافته‌های این پژوهش، اطلاعات مهمی در زمینه انتقال گاز و جریان سیال در مخزن ارائه داده و علاوه بر بهبود مدیریت مخازن، پایه‌ای مناسب برای طراحی بهینه پروژه‌های ازدیاد برداشت نفت^۱ فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: ردیاب هسته‌ای CH_3T ، شبیه‌ساز ECLIPSE، حجم منافذ جاروب شده، ارتباط هیدرودینامیکی، سرعت گاز

Modeling the Behavior of CH_3T Tracer for Optimizing Enhanced Oil Recovery Using ECLIPSE Simulator

Porbar, Amir Javad^۱ ; Afarideh, Hossein^{*۱} ; Rashidi, Fariborz^۲

^۱Amirkabir University of Technology, Department of Physics and Energy Engineering, Nuclear Engineering

^۲Amirkabir University of Technology, Department of Chemical Engineering, Chemical Engineering

Abstract

In the oil and gas industry, the use of nuclear tracers is one of the effective tools for analyzing fluid flow and evaluating the behavior of hydrocarbon reservoirs. These methods provide valuable information about fluid transport, swept pore volume, and the hydrodynamic

^۱ Enhanced Oil Recovery (EOR)



connectivity between injection and production wells, which are crucial for optimizing reservoir management and designing enhanced oil recovery projects. In this study, the behavior of the nuclear tracer CH_4T was simulated and analyzed in an oil reservoir using the ECLIPSE simulator. The tracer was injected into the reservoir through injection well I, and its response was evaluated in two production wells, P_1 and P_2 . By analyzing the tracer curve over time, parameters such as the swept pore volume in the gas phase, gas flow velocity in the reservoir, and the hydrodynamic connectivity between the injection and production wells were calculated. The results indicated that production well P_1 exhibited the highest swept pore volume and tracer recovery, demonstrating a strong and direct connection between injection well I and production well P_1 . These findings provide critical insights into gas transport and fluid flow in the reservoir and, in addition to enhancing reservoir management, offer a robust foundation for optimizing the design of enhanced oil recovery projects.

Keywords: nuclear tracer CH_4T , ECLIPSE simulator, swept pore volume, hydrodynamic connectivity, gas velocity

۱- مقدمه

با کاهش تولید در میادین نفتی و افزایش چالش‌ها در بهره‌برداری اقتصادی از این منابع، فناوری‌های ازدیاد برداشت نفت به‌طور فزاینده‌ای برای تضمین تأمین پایدار نفت و کاهش افت تولید اهمیت یافت. این فناوری‌ها نقش اساسی در بهبود ضریب بازیافت از مخازن نفتی و استخراج نفت باقی‌مانده ایفا می‌کنند. در فرآیندهای ازدیاد برداشت، از طیف گسترده‌ای از مواد شیمیایی استفاده می‌شود که هر یک باهدف بهبود ویژگی‌های تزریق و تولید طراحی شده است. به‌عنوان نمونه، تزریق محلول‌های قلیایی، پلیمرها، سورفکتانت‌ها و ترکیبات مختلف این مواد از جمله روش‌های رایج در این حوزه هستند [۱]. علاوه بر این، روش‌های پیشرفته‌تری نیز توسعه یافته است که شامل تزریق آب یا گاز با تغییرات مهندسی شده، استفاده از فوم برای افزایش کارایی جابه‌جایی سیالات، و به‌کارگیری نانو ذرات برای مسدودسازی منافذ بزرگ‌تر و افزایش بازیافت از لایه‌های کم نفوذ می‌باشد. این روش‌ها، با توجه به ویژگی‌های پیچیده مخازن نفتی، امکان طراحی برنامه‌های هدفمند برای بهره‌برداری بهینه از منابع هیدروکربنی را فراهم می‌آورند. یکی از چالش‌های اساسی در عملیات ازدیاد برداشت، ارزیابی کمی پتانسیل نفت باقی‌مانده در مخازن و تحلیل اثربخشی اقدامات انجام شده برای افزایش بازیابی در جاروب شدن منافذ مخازن است. این ارزیابی‌ها عمدتاً از طریق مطالعات پیلوت و شبیه‌سازی‌های دقیق صورت می‌گیرد. یکی از فناوری‌های نوین و مؤثر که در این زمینه توسعه یافته است، استفاده از فناوری ردیاب است. این فناوری به‌عنوان ابزاری پیشرفته برای بررسی رفتار جریان سیالات، تعیین اتصالات درون چاهی، و ارزیابی میزان جابه‌جایی سیالات تزریقی در مخزن عمل می‌کند و اطلاعات ارزشمندی برای تحلیل فرآیندهای ازدیاد برداشت ارائه می‌دهد. فناوری ردیاب، به‌ویژه در مراحل پایش تولید ثانویه و ثالثیه، کاربردهای متعددی دارد. در تست‌های موسوم به ردیابی بین چاهی، از این فناوری برای پایش حرکت آب یا گاز تزریق شده استفاده می‌شود. این ردیاب‌ها عموماً مواد شیمیایی یا ایزوتوپ‌هایی هستند که به‌گونه‌ای طراحی شده که بدون ایجاد واکنش یا تغییر در فاز تزریقی، حرکت سیال را در محیط مخزن دنبال کنند. این قابلیت امکان تحلیل دقیق ارتباط بین چاه‌های تزریق و تولید، برآورد حجم منافذ جاروبی، و شناسایی نواحی با ناهمگنی بالا را فراهم می‌آورد. ردیاب‌ها به‌طور کلی به‌عنوان ذرات بسیار کوچک و قابل‌شناسایی تعریف

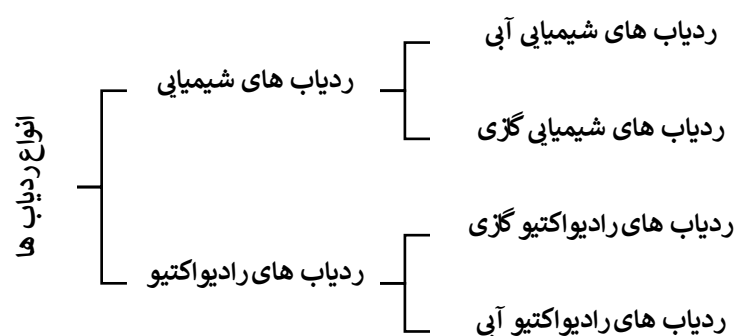


می‌شوند. این ذرات پیش از تزریق به مخزن، تحت فرآیند رقیق‌سازی قابل‌توجهی قرار می‌گیرند و لازم است به حد کافی در محیط تزریق شده حضور داشته باشند تا بتوانند در چاه‌های تولیدی شناسایی شوند. این فناوری، با توجه به دقت بالای خود، یکی از ابزارهای کلیدی در بررسی فرآیندهای ازدیاد برداشت و بهینه‌سازی تولید از مخازن نفتی محسوب می‌شود [۲].

۲- روش کار

۲-۱- تئوری آزمایش

برای چندین دهه، ردیاب‌های رادیواکتیو به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی برای اهداف تحقیقاتی متنوع به‌طور گسترده مورد استفاده و شناخت قرار گرفته است. این ردیاب‌ها به دلیل توانایی بالای آن‌ها در فراهم کردن داده‌های دقیق و قابل اعتماد، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات زیرسطحی و تحلیل فرآیندهای مخزنی دارند. یکی از کاربردهای مهم ایزوتوپ‌های رادیواکتیو، برچسب‌گذاری بر روی مواد شیمیایی است که امکان ارائه ابزارهایی با حساسیت و انتخاب پذیری بالا را فراهم می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود تا این ردیاب‌ها به‌طور مؤثر برای تحلیل‌های پیچیده و دقیق در مخازن نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرند. ویژگی‌های ردیاب‌ها به‌طور انحصاری توسط ترکیب شیمیایی آن‌ها تعیین می‌شود و این ترکیب شیمیایی نه تنها کاربرد آن‌ها را مشخص می‌کند، بلکه قابلیت ردیابی و تحلیل آن‌ها را نیز بهبود می‌بخشد [۳]. ردیاب‌های رادیواکتیو و شیمیایی نقش مهمی در شناسایی ناهمگنی‌های مخزن، ارزیابی کیفیت مخزن، تعیین عوامل بازیابی و بررسی کارایی فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت دارند. در شکل ۱، دسته‌بندی انواع ردیاب‌های میدانی به صورت جامع ارائه شده است که نمای کلی از تنوع و کاربرد این ابزارهای حیاتی در صنعت نفت و گاز را نشان می‌دهد. این دسته‌بندی‌ها نه تنها کاربردهای خاص هر نوع ردیاب را نشان می‌دهند، بلکه به‌عنوان راهنمایی برای انتخاب نوع مناسب ردیاب در شرایط خاص مخزنی عمل می‌کنند.



شکل ۱: دسته‌بندی انواع ردیاب‌ها

پیش از آغاز هر پروژه میدانی، برنامه‌ریزی دقیق و عملیاتی ضروری است. یکی از بخش‌های کلیدی در انجام تست ردیاب در محیط میدانی، تعیین نوع و مقدار ردیاب مورد استفاده است. در این مطالعه، با توجه به استفاده از ردیاب گازی هسته‌ای، میزان ردیاب مورد نیاز در مخازن نفتی بر اساس رابطه ۱ و ۲ محاسبه می‌شود [۴]:



$$V_p = \pi \times x^2 \times h \times \phi \times S_g \quad (1)$$

$$A_s = e \times DL \times V_p \quad (2)$$

V_p = حجم محیط متخلخل DL = حد تشخیص A_s = اکتیویته چشمه تزریقی

S_g = اشباع گاز ϕ = تخلخل x = فاصله بین چاه تزریقی و تولیدی

e = ضریب تیونینگ بین ۱۰ تا ۱۰۰ h = ضخامت مخزن در لایه موردنظر

پس از تزریق ردیاب در میدان نفتی، فرآیندهای نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل آغاز می‌شود. این مراحل برای ردیابی دقیق مسیر حرکت ردیاب در مخزن، بررسی تغییرات آن در طول زمان و ارزیابی رفتار سیالات در محیط مخزنی انجام می‌شوند. انتخاب روش‌های مناسب نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل، نقش حیاتی در دستیابی به نتایج دقیق و قابل اعتماد دارد. ردیاب CH_3T یک ردیاب شیمیایی پیشرفته با برچسب‌گذاری ایزوتوپ رادیواکتیو تریتیوم است (جدول ۱). این ردیاب به دلیل خواص منحصر به فرد خود، مانند حساسیت بالا، پایداری در شرایط مخزنی و قابلیت تشخیص دقیق، به‌طور گسترده در مطالعات مهندسی مخزن و ازدیاد برداشت استفاده می‌شود. پس از آماده‌سازی، ردیاب CH_3T همراه با فاز مرجع از طریق چاه تزریقی، به مخزن تزریق می‌شود. این فرآیند به گونه‌ای طراحی می‌شود که ردیاب بتواند به‌طور یکنواخت در مخزن توزیع شود و به‌طور مؤثر رفتار سیالات مخزنی را ردیابی کند. سپس، در چاه‌های تولیدی اطراف مخزن، نمونه‌برداری انجام شده و داده‌های حاصل با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته آزمایشگاهی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. استفاده از ردیاب‌های هسته‌ای مانند CH_3T علاوه بر ارائه داده‌های دقیق، امکان انجام مطالعات جامع‌تری را فراهم می‌کند که برای بهینه‌سازی تولید و مدیریت مخازن حیاتی است.

جدول ۱: ویژگی‌های ردیاب گازی هسته‌ای CH_3T

فرمول	انرژی و نوع واپاشی	نیمه عمر
شیمیایی	(KeV)	(سال)
CH_3T	β^- (۱۸.۵)	۱۲.۳۲

۲-۲- روش تفسیر حجم جاروب منافذ مخزن به همراه ردیاب

روش تحلیل توزیع زمان اقامت^۲ شامل استخراج نقاط زمانی از منحنی پاسخ ردیاب است. این تکنیک، که در ابتدا برای مخازن راکتورهای بسته توسعه یافت، امروزه به‌طور گسترده‌تری در شرایط عمومی‌تر و برای محیط‌های متخلخل به کار گرفته

^۲ Residence-Time Distribution (RTD)



می‌شود. این روش به توصیف محیط‌های متخلخل تحت تزریق ردیاب و تخمین هندسه جریان کمک می‌کند [۵]. مومنتها و کاربردهای آن همگی بر اساس تحلیل توزیع زمان اقامت ردیاب است. ذرات ردیاب درواقع از طریق مسیرهای مختلف حرکت می‌کنند، بنابراین زمانه‌ای متفاوتی از آن‌ها برای جابه‌جایی از چاه تزریقی به چاه تولیدی موردنیاز است. توزیع چنین دوره‌های زمانی را توزیع زمان اقامت ردیاب در سیستم می‌گویند. با استفاده از روش مومنتها، و با رعایت شرایط مرزی می‌توان به تخمین مناسب حجم منافذ جاروب شده دست‌یافت [۵].

$$E(t) = \frac{C(t)Q_P(t)}{M} \quad (3)$$

در معادله ۳، $C(t)$ نشان‌دهنده غلظت ردیاب تولیدشده در چاه تولیدی، $Q_P(t)$ نرخ تولید و M مقدار ردیاب تزریق‌شده از چاه تزریقی موردنظر است. در حالتی که سیستم شامل چندین چاه تولیدی j با نرخ تولید $Q_{Pj}(t)$ باشد، توزیع زمان اقامت برای هر جفت چاه تزریقی i و تولیدی j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_j(t) = \frac{C_j(t)Q_{Pj}(t)}{M} \quad (4)$$

مومنت صفر نشان‌دهنده مقدار نسبی ردیاب تولیدشده در چاه تولیدی j است و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$m_{0,j} = \int_0^{+\infty} E_j(t).dt = \frac{1}{M} \int_0^{+\infty} C_j(t)Q_{Pj}(t).dt = \frac{m}{M} \quad (5)$$

با استفاده از معادله (۵)، می‌توان به راحتی سهم بازیابی ردیاب و میزان اتصال بین چاه تزریقی و تولیدی را محاسبه کرد. این مومنت را می‌توان برای تعیین نسبت سیال تزریقی که بین چاه تزریقی i و چاه تولیدی j جریان می‌یابد، به کاربرد.

مومنت اول زمان اقامت ردیاب بین چاه تزریق کننده i و تولیدکننده j را نشان می‌دهد:

$$m_{1,j} = \int_0^{+\infty} t.E_j(t).dt \quad (6)$$

و همچنین، مومنت دوم میزان پراکندگی ردیاب‌ها را نشان می‌دهد:

$$m_{2,j} = \int_0^{+\infty} t^2.E_j(t).dt \quad (7)$$

آساکاوا^۳، معادلات دیفرانسیل جزئی را که جریان ردیاب در مخزن ناهمگن سه‌بعدی و ردیاب بین فازها توصیف می‌کند استخراج کرد و نشان داد که چگونه می‌توان از این راه‌حل برای محاسبه حجم جاروب منافذ به‌عنوان تابعی از زمان استفاده کرد [۶].

^۳ Asakawa



$$t^* = \frac{m_{\backslash,j}}{m_{\cdot,j}} \quad (8)$$

$$t^* = \frac{\int_0^\infty q_j A_{ij} t \cdot dt}{\int_0^\infty q_j A_{ij} \cdot dt} \quad (9)$$

$$V_{Sij} = q_i \frac{A}{A_{\cdot}} t^* \quad (10)$$

$$A = \int_0^\infty q_j A_{ij} \cdot dt \quad (11)$$

در معادله ۱۰، A بازیابی کل ردیاب است که در چاه تزریقی i تزریق و در چاه تولیدی j مشاهده می‌شود، A مجموع ردیاب تزریق شده به مخزن می‌باشد و q_i و q_j به ترتیب نرخ‌های تزریق و تولید می‌باشند. همچنین به‌طور کلی یک ردیاب تزریق شده به چاه i به بیش از یک چاه تولیدی j جریان می‌یابد که با استفاده از معادله ۸ می‌توان زمان اقامت هر ردیاب در چاه تولیدی موردنظر را محاسبه کرد. معادله ۹ تعمیم مفاهیم اولیه زمان اقامت است و نرخ‌های تولید، تزریق و بازیابی ردیاب نسبی را در خود جای می‌دهد. به‌طور کلی یک ردیاب تزریقی معین در چاه‌های چندگانه تولید می‌شود، بنابراین معادله ۱۰، حجم جاروب بین یک چاه تزریقی معین i و تولیدی j را توصیف می‌کند که در آن ردیاب مشاهده می‌شود [۵-۷].

۳-۲- شبیه‌سازی آزمایش

در این پژوهش، یک مخزن واقعی با استفاده از نرم‌افزار پیشرفته Petrel طراحی و سپس با بهره‌گیری از شبیه‌ساز عددی ECLIPSE100، فرآیند تزریق و حرکت ردیاب شبیه‌سازی شد (شکل ۱). هدف اصلی این مطالعه، بررسی رفتار یک ردیاب گازی هسته‌ای تزریق شده همراه با گاز در مخزن و تحلیل نحوه توزیع و حرکت آن به‌سوی چاه‌های تولیدی است. در این شبیه‌سازی، یک ردیاب گازی هسته‌ای با قدرت ۵۰ کوری همراه با گاز از طریق چاه تزریقی i به مخزن وارد شد. سپس حرکت ردیاب به سمت چاه‌های تولیدی $P1$ و $P2$ مورد مطالعه قرار گرفت. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق جریان گاز در مخزن و تحلیل پارامترهای کلیدی مرتبط با تزریق و تولید را فراهم می‌سازد. ویژگی‌های کلی مخزن طراحی شده که مبنای شبیه‌سازی قرار گرفته، در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. این مدل‌سازی نتایج ارزشمندی در زمینه رفتار سیالات در مخازن زیرسطحی ارائه داده و نقش مهمی در بهینه‌سازی فرایندهای تزریق و برداشت ایفا می‌کند. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای درک بهتر رفتار گاز و ردیاب در محیط‌های مخزنی و همچنین بهبود عملکرد پروژه‌های ازدیاد برداشت مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۲: ویژگی مخزن طراحی شده

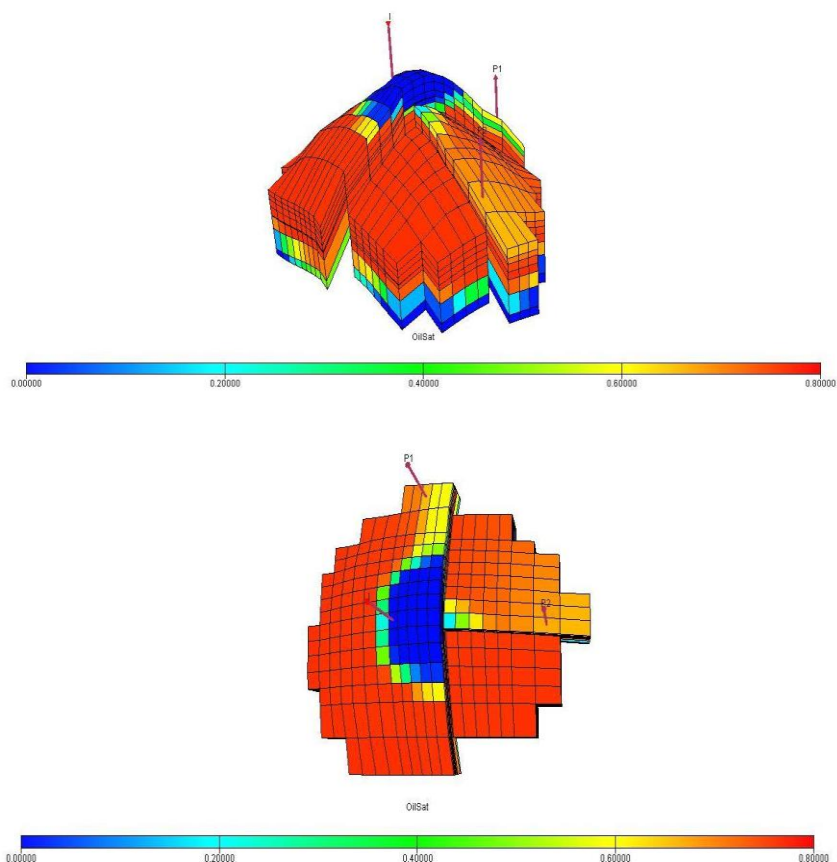
اشباع آب	اشباع نفت	اشباع گاز	تخلخل	تراوایی (میلی داریسی)
۰.۲۵	۰.۶۵	۰.۱	۰.۲	۳۰

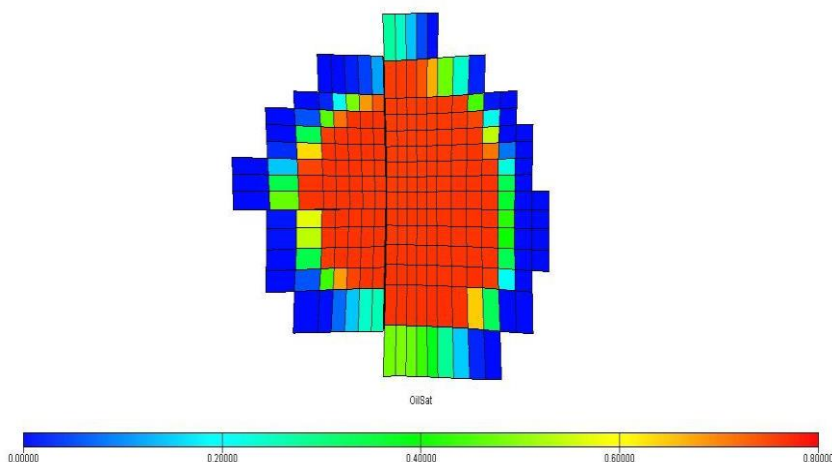


جدول ۳: فاصله و دبی چاه‌های موردنظر در مخزن طراحی شده

چاه‌ها	دبی (stb/day)	فاصله (متر)
I	۱۰۰۰۰	-
P1	۲۵۰۰۰	۲۵۰۰
P2	۲۵۰۰۰	۳۰۰۰

برای جمع‌آوری داده‌ها از آشکارساز سوسوزن مایع استفاده شد. با توجه به انرژی پایین پرتو بتای منتشرشده از تریتیوم، این آشکارساز به دلیل حساسیت بالای خود گزینه‌ای ایده آل برای این هدف محسوب می‌شود. از آنجاکه ردیاب مورد استفاده به صورت گاز است، ابتدا گاز در یک محلول مایع حل می‌شود تا امکان انجام تحلیل‌های دقیق فراهم گردد. این فرآیند نه تنها قابلیت تشخیص سیگنال‌های ضعیف بتا را افزایش می‌دهد، بلکه دقت و صحت نتایج را نیز تضمین می‌کند.

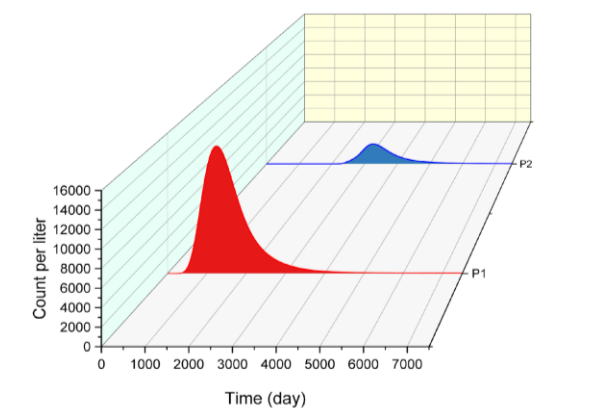




شکل ۱: نماهای متفاوت از مخزن طراحی شده

۳- نتایج

در این مطالعه، با استفاده از نمودار غلظت-زمان ردیاب CH_3T (شکل ۲)، حجم جاروب شده، زمان اقامت ردیاب و سرعت فاز گاز در مخزن محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است:



شکل ۲: نمودار غلظت-زمان ردیاب CH_3T در چاه‌های تولیدی P1 و P2 (مدت زمان آشکارسازی ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است).

با توجه به غلظت‌های اندازه‌گیری شده از ردیاب در چاه‌های تولیدی، می‌توان برای افزایش ایمنی در برابر خطرات مواد رادیواکتیو از ضریب تیونینگ ۱۰ جهت محاسبه قدرت ردیاب استفاده کرد. با این حال، به منظور دستیابی به رزولوشن بالاتر در چاه‌های تولیدی، ضریب تیونینگ ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که معادل قدرت ۵۰ کوری چشمه است. در عین حال، این محاسبات را می‌توان با همان قدرت ۵ کوری نیز انجام داد.



جدول ۴: نتایج حجم جاروب شده و رفتار دینامیکی گاز در مخزن طراحی شده با استفاده از ردیاب CH_3T

سهم بازیابی ردیاب در چاه	سرعت گاز (متر بر روز)	حجم منافذ جاروب شده (مترمکعب)	زمان اقامت (روز)	زمان میانشکنی (روز)	چاه
تولیدی (درصد)					۱
۸۵	۱.۵	۲۱۷۰۰۰	۱۶۱۱	۳۵۲	P1
۱۵	۰.۸۲	۹۶۸۰۰۰	۳۶۵۸	۲۲۵۲	P2

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار یک ردیاب گازی هسته‌ای CH_3T در یک مخزن واقعی با استفاده از شبیه‌ساز ECLIPSE100 بررسی شد. نتایج نشان داد که ردیاب تزریق شده همراه با گاز، اطلاعات ارزشمندی درباره توزیع جریان گاز و حجم منافذ جاروب شده در مخزن ارائه می‌دهد. سهم بازیابی ردیاب در چاه‌های تولیدی، تفاوت قابل توجهی را بین دو چاه P1 و P2 نشان داد، به طوری که سهم بازیابی در P1 (۸۵ درصد) به مراتب بیشتر از P2 (۱۵ درصد) بود. این موضوع نشان‌دهنده جریان غالب گاز به سمت P1 و نقش مؤثر آن در تولید است. علاوه بر این، زمان میان‌شکنی کوتاه‌تر و حجم منافذ جاروب شده بیشتر در P1، اثربخشی بالاتر این چاه در تولید را تأیید کرد. در مقابل، زمان اقامت طولانی‌تر ردیاب در P2 به همراه سهم بازیابی کمتر، بیانگر چالش‌های احتمالی در انتقال گاز به این چاه است که می‌تواند ناشی از عواملی مانند تراوایی کمتر یا مسیر طولانی‌تر باشد. به منظور دستیابی به دقت بالاتر در شبیه‌سازی، از قدرت ۵۰ کوری برای ردیاب CH_3T استفاده شد. با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از قدرت ۵ کوری می‌توانست دقت کافی را فراهم کرده و درعین حال میزان مواد رادیواکتیو مورد نیاز را کاهش دهد. به طور کلی، استفاده از ردیاب CH_3T ابزار قدرتمندی برای ارزیابی رفتار سیالات در مخازن زیرسطحی و بهینه‌سازی فرایندهای تزریق و برداشت ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی بهتر پروژه‌های مدیریت مخزن و ازدیاد برداشت در آینده مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

- [۱] Lake, L. W., Johns, R., Rossen, B., & Pope, G. A. (۲۰۱۴). *Fundamentals of enhanced oil recovery* (Vol. ۱, p. ۱). Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- [۲] Du, Y., & Guan, L. (۲۰۰۵, April). Interwell tracer tests: lessons learned from past field studies. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition* (pp. SPE-۹۳۱۴۰). SPE.
- [۳] Chapter ۳ Interwell water tracers, Editor(s): Bernard Zemel, *Developments in Petroleum Science*, Elsevier, Volume ۴۳, ۱۹۹۵, Pages ۸۹-۱۳۵, ISSN ۰۳۷۶-۷۳۶۱, ISBN ۹۷۸۰۴۴۴۸۸۹۶۸۳.

- [۴] Patidar, A. K., Joshi, D., Dristant, U., & Choudhury, T. (۲۰۲۲). A review of tracer testing techniques in porous media specially attributed to the oil and gas industry. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12(۱۲), ۳۳۳۹-۳۳۵۶.
- [۵] Shook, G. M., & Forsmann, J. H. (۲۰۰۵). *Tracer interpretation using temporal moments on a spreadsheet* (No. INL/EXT-۰۵-۰۰۴۰۰). Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States).
- [۶] Asakawa, K. (۲۰۰۵). *A generalized analysis of partitioning interwell tracer tests*. The University of Texas at Austin.
- [۷] Shook, G. M., Pope, G. A., & Asakawa, K. (۲۰۰۹, October). Determining reservoir properties and flood performance from tracer test analysis. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-۱۲۴۶۱۴). SPE.



مقایسه آهنگ دز گاما میله کبالت-۶۰ و دسته سوخت مصرف شده در راکتور VVER-1000 و

تعیین میزان ضخامت مورد نیاز حفاظ برای انتقال این میله (کد مقاله : ۱۰۱۰)

پور رستم، امیر - ابراهیمزاده، رضا - یوسف پور، فرامرز - غلامزاده، زهره - صادقی، ناهید - رک رک، بهروز -

منصوری، محمدحسین -

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده:

رادیو ایزوتوپ ^{60}Co به‌طور معمول در راکتورهای آب‌سنگین تولید می‌شود. با این حال اکثر راکتورها آب سبک تحت فشار (PWR) هستند، اگر بتوان از ظرفیت این راکتورها نیز برای تولید ^{60}Co استفاده کرد عرضه جهانی این محصول تا حد زیادی افزایش می‌یابد. در این کار، محاسبات آهنگ دز گاما در میله کبالت-۶۰ پرتودیده در راکتور VVER-۱۰۰۰ و مقایسه آن با آهنگ دز گاما یک دسته سوخت توسط کدهای هسته‌ای $\text{ORIGEN}^{۲,۱}$ و $\text{MCNPX}^{۲,۷}$ هدف قرار گرفته است. محاسبات انجام شده نشان داد که بلافاصله پس از خاموشی راکتور آهنگ دز گاما در میله کبالت-۵۹ پرتودهی شده در راکتور حدود ۲۵ برابر کمتر است و آهنگ دز میله کبالت باگذشت زمان تریخیس از راکتور تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین محاسبات کد MCNPX نشان داد که حدود ۲۲ cm سرب برای ساخت کسک حمل و نقل این میله کبالت کافی است و دز بیشینه سطح کسک محتوی میله کبالت-۶۰ در این حالت $۰/۶۹۴ \text{ mSv/h}$ خواهد بود.

کلمات کلیدی: تولید کبالت-۶۰، راکتور VVER-۱۰۰۰، کد ORIGEN ، کد MCNPX ، محاسبات آهنگ دز، ضخامت کسک سربی

Comparison of gamma dose rates of cobalt- ^{60} rods and spent fuel assembly in the VVER-۱۰۰۰ reactor and determination of the required shielding thickness for transporting this rod

Pourroostam, Amir, Ebrahimzadeh, Reza, Yousefpour, Faramarz, Gholamzadeh*,
Zohreh, Sadeghi, Nahid, Rokrok, Behrooz, Mansouri, Mohammad Hossein,
Reactor and Nuclear Safety Research Institute, Institute of Nuclear Science and Technology,
Tehran, Iran

Abstract:

The ^{60}Co radioisotope is typically produced in heavy water reactors, however most reactors are pressurized light water (PWR), if the capacity of these reactors can also be used to produce ^{60}Co , the global supply of this product will increase significantly. In this work, the calculation of the gamma dose rate in the cobalt- ^{60} rod irradiated in the VVER-۱۰۰۰ reactor and its comparison with the gamma dose rate of a fuel assembly by the nuclear codes $\text{ORIGEN}^{۲,۱}$ and $\text{MCNPX}^{۲,۷}$ is targeted. The calculations showed that immediately after the reactor shutdown, the gamma dose rate in the cobalt- ^{60} rod irradiated in the reactor is about ۲۵ times lower, and the cobalt rod dose rate does not change much with the passage of time after its discharge. Also, MCNPX code calculations showed that about ۲۲ cm of lead is sufficient to construct the cask for transporting this cobalt rod, and the maximum dose on the surface of the cask containing the cobalt- ^{60} rod in this case will be $۰,۶۹۴ \text{ mSv/h}$.

Key words: Cobalt- ^{60} production, VVER-۱۰۰۰ reactor, ORIGEN code, MCNPX code, dose rate calculations



۱- مقدمه:

کبالت-۶۰ (نیمه عمر = ۵/۲۷ سال) بزرگ‌ترین رادیو ایزوتوپ تجاری درآمدزا در جهان است. بیشتر استفاده فعلی آن در صنعت استریلیزاسیون، عمدتاً برای محصولات پزشکی در نظر گرفته شده برای مصرف انسان است. لازم به ذکر است که استفاده از این رادیو ایزوتوپ برای پرتودهی مواد غذایی نیز به صورت روزافزون در حال گسترش است. پرتودهی مواد غذایی در بیش از ۳۸ کشور تأیید شده و در حال انجام است [۱].

در سال‌های اخیر، تقاضا برای ایزوتوپ رادیواکتیو کبالت-۶۰ بیشتر به دلیل کاربردهای گسترده آن در استریل کردن تجهیزات پزشکی، پرتودهی مواد غذایی به منظور افزایش ماندگاری و نیز درمان تومورها افزایش یافته است. تولید آن در حال حاضر بیشتر در راکتورهای CANDU یا RMBK انجام می‌شود. در حال حاضر، تولید ^{60}Co در PWR ها به طور گسترده مورد مطالعه قرار نگرفته است. لازم به ذکر است که برای افزایش آهنگ واکنش $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$ موقعیت میله‌های ^{59}Co در راکتور، میزان تولید را تعیین می‌کند.

زانگ و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش شبیه‌سازی و کد MCNPX نشان دادند با در نظر گرفتن تعداد متفاوت میله‌های ^{59}Co ، طرح‌های مختلف تأثیر متفاوتی دارند، اما تأثیر آن‌ها زیاد نیست. به طور کلی، طرح دارای چهار میله ^{59}Co تأثیر کمی در عملکرد راکتور PWR مدل شده دارند و پارامترهای راکتور تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. بنابراین، آن‌ها به صورت تئوری نشان دادند استفاده از PWR برای تولید ^{60}Co امکان‌پذیر است [۲].

در یک پژوهش انجام شده در سال ۲۰۲۴، محققان نشان داده‌اند راکتور آب تحت فشار AP1000 می‌تواند به عنوان یک تأمین‌کننده جدید احتمالی ^{60}Co در نظر گرفته شود. در این بررسی، به طور خاص، سه دسته سوخت مختلف، با انواع مختلف و تعداد جاذب‌های قابل سوزاندن نوترون مورد استفاده و پنج غنی‌سازی سوخت مورد بررسی قرار گرفتند. کبالت طبیعی (^{59}Co) به عنوان یک میله با پوشش آلومینیومی نازک در ۴، ۶ یا ۸ لوله راهنما در دسته‌های سوخت قرار داده شد. تمام محاسبات با استفاده از کد ترابرد نوترون مونت کارلو SERPENT2 با قابلیت محاسبات مصرف سوخت انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد میله‌های کبالت در واقع منجر به تولید مقدار بیشتری از ^{60}Co شد، با این حال، میانگین تولید در هر میله را تحت تأثیر قرار نداد، اما راکتیویته قلب را کاهش داد [۳]. همچنین وستینگهوس در سال ۲۰۲۰ به بررسی تولید در راکتورهای PWR پرداخته است و نیز بیان نموده است که انتظار می‌رود که مجموعه‌های ^{60}Co در حین جابجایی، آهنگ دز بالاتری نسبت به دسته‌های سوخت استاندارد تولید کنند [۴].

در این پژوهش، مقایسه آهنگ دز گاما میله کبالت-۵۹ پرتودیده در یک سیکل کاری راکتور VVER-1000 و نیز آهنگ دز یک دسته سوخت این راکتور هدف کار قرار گرفته است.

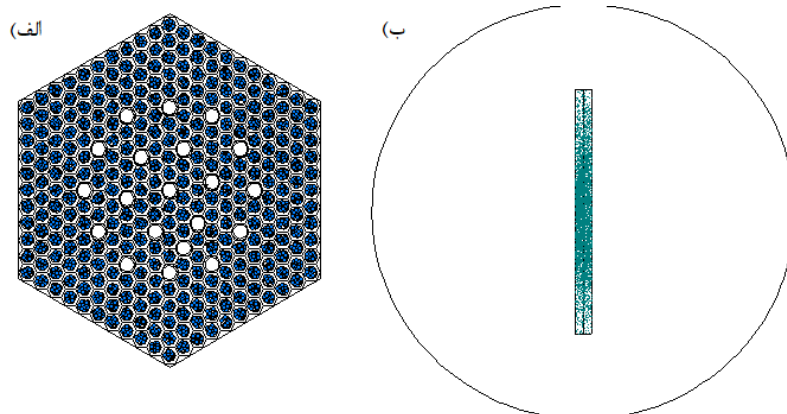
راکتور واحد یکم نیروگاه اتمی بوشهر از نوع آب سبک تحت فشار هست که توان تولید ۳۰۰ MW(t) انرژی گرمایی را داشته و متشکل از یک پوسته از جنس فولاد کربنی است که با فولاد ضدزنگ پوشش داده شده است و درون آن قلب راکتور (Core)، سپر حرارتی و نوترونی (Core baffle)، نگهدارنده قلب (Core barrel) می‌باشد. آب سبک به عنوان کند کننده نوترون و خنک‌کننده استفاده می‌شود. تعداد ۳۱۱ میله سوخت با آرایش شش ضلعی، یک دسته سوخت را می‌سازند و تعداد ۱۶۳ دسته سوخت در کنار هم قلب راکتور را تشکیل می‌دهند.



از آنجائی که سوخت راکتور بوشهر پس از سیکل کاری از قلب خارج شده و به استخر سوخت مصرفی منتقل می‌شود، در این مطالعه لازم است بررسی گردد حضور میله کبالت درون دسته سوخت، دز آن را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد یا خیر. زیرا این مسئله در حفاظ سازی و پرتوگیری کارکنان نیروگاه حائز اهمیت خواهد بود.

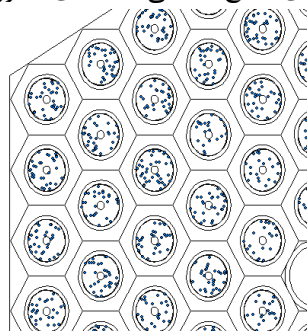
۲- روش کار:

به منظور محاسبه دز یک دسته سوخت راکتور بوشهر، این دسته سوخت در کد MCNPX مدل گردید. چشمه گاما روی میله‌های این دسته سوخت مطابق شکل ۱ مدل گردید. نمای دقیق‌تر توزیع چشمه روی هر میله سوخت در شکل ۲ ارائه شده است. به منظور انجام دقیق محاسبات، توزیع چشمه به گونه‌ای تعریف گردید که فقط حجم میله سوخت را دربر گیرد و نیز توزیع محوری آن نیز به صورت گاوسی در نظر گرفته شد. کد محاسباتی MCNPX قادر به ترابرد ۳۴ نوع ذره از جمله ذرات نوترون و فوتون است. این کد محاسباتی قادر است انواع مسائل راکتور و شتاب‌دهنده‌ها را مدل سازی کرده و با همخوانی خوبی نسبت به اندازه گیری‌های تجربی رفتار نوترونیک و یا پرتوایی آن‌ها را مشخص نماید [۵-۷].



شکل (۱) نمای توزیع چشمه گاما روی دسته سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ مدل سازی شده توسط کد MCNPX (الف)

نمای سطح مقطعی (ب) نمای محوری



شکل (۲) نمای توزیع دقیق ذرات چشمه گاما روی میله سوخت هر مجتمع راکتور VVER-۱۰۰۰ مدل سازی

شده توسط کد MCNPX

همچنین میله کبالت-۶۰ پرتودیده در راکتور VVER-۱۰۰۰ و توزیع چشمه گاما در امتداد محوری و شعاعی آن نشان به همین صورت مدل گردید. لازم به ذکر است، محاسبات مذکور برای بارگذاری تنها یک میله کبالت در راکتور بوشهر انجام گردیده



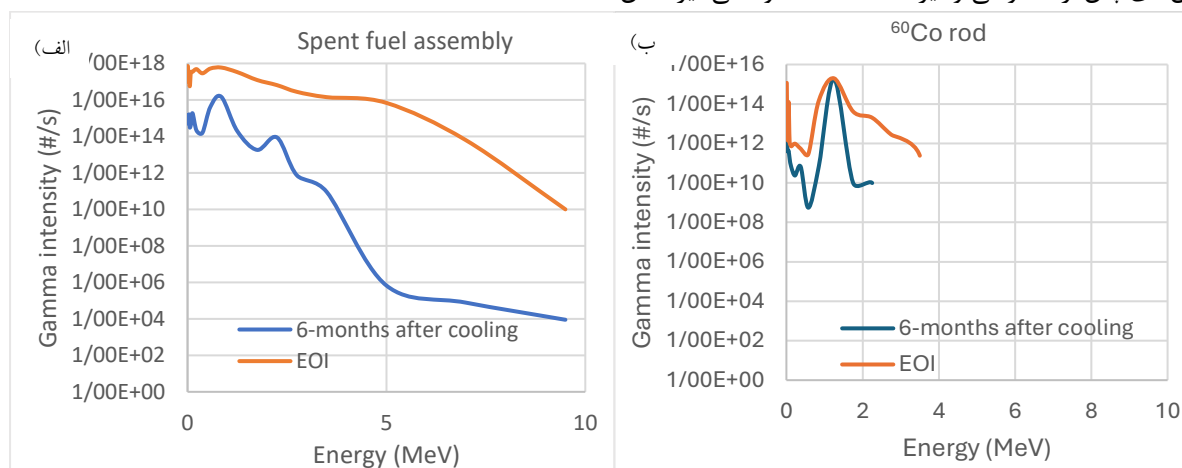
است. قطر این میله همانند میله‌های سوخت راکتور $m 0.06$ و ارتفاع آن نیز همانند ارتفاع میله‌های سوخت راکتور $m 3.53$ انتخاب گردید.

همچنین کد $ORIGEN^{2,1}$ برای محاسبه آهنگ گاما گسیل‌شده از دسته سوخت مصرف‌شده $VVER-1000$ و نیز میله کبالت-۶۰ بارگذاری شده در این راکتور به مدت یک سیکل کاری ۲۹۴ روزه مورد استفاده قرار گرفت. کد $ORIGEN^{2,1}$ یک کد کامپیوتری همه‌کاره محاسبات واپاشی عناصر رادیواکتیو برای استفاده در شبیه‌سازی چرخه سوخت هسته‌ای است که در آزمایشگاه ملی اوکریچ (ORNL) توسعه یافت و در اوایل دهه ۱۹۷۰ در سراسر جهان توزیع شد و برای راکتورهای موجود، از جمله راکتورهای آب تحت فشار، راکتورهای آب جوشان، راکتورهای زاینده سریع فلزات مایع و راکتور اورانیوم دوتریوم کانادا استفاده می‌شود [۸].

آهنگ دز گاما در فاصله $m 1$ مرکز دسته سوخت و نیز چسبیده به سطح آن در مرکز راستای محوری آن (بیشینه دز گاما) با استفاده از تالی F^5 و نیز DE/DF محاسبه گردید. ضرایب تبدیل شار به دز $ICRP-21$ برای انجام محاسبات استفاده گردید. جرم یک دسته سوخت در کد $ORIGEN$ مدل گردید و توان حاصل از شکافت حاصل از کد $MCNPX$ برای محاسبات مصرف سوخت این دسته در ورودی کد مورد استفاده قرار گرفت. محاسبات آهنگ گسیل گاما از دسته سوخت پرتودیده توسط کد $ORIGEN$ انجام گردید و این طیف گاما به عنوان چشمه تحت $SDEF$ در کد $MCNPX$ به منظور محاسبات دز دسته سوخت پرتودیده استفاده گردید. همین روند برای محاسبات آهنگ دز میله کبالت پرتودیده استفاده شد و شار نوترون روی این میله برای محاسبات پرتوزایی این میله در ورودی کد $ORIGEN$ مورد استفاده قرار گرفت.

۳- بحث و نتایج:

در شکل ۳-الف، طیف گامای حاصل از سوخت پرتودیده برای زمانه‌ای پس از خاموشی و نیز ۶ ماه خنک شونده‌ی نشان داده شده است. همچنانکه ملاحظه می‌گردد، طیف گامای دسته سوخت پرتودیده پس از ۶ ماه خنک شونده‌ی به شدت تغییر کرده و تعداد گاما‌های پرانرژی آن به شدت کاهش می‌یابد. در شکل ۳، طیف گامای حاصل از میله کبالت-۵۹ پرتودیده برای زمان‌های پس از خاموشی و نیز ۶ ماه خنک شونده‌ی نیز نشان داده شده است.



شکل (۳) توزیع انرژی چشمه گاما برحسب شدت (الف) سوخت پرتودیده (ب) میله کبالت، محاسبه شده توسط کد

ORIGEN

با استفاده از طیف گامای شکل فوق و کد $MCNPX$ آهنگ دزهای گاما محاسبه گردید. آهنگ دزهای مورد نظر دقیقاً بعد از خاموشی راکتور یعنی ۲۹۴ روز سیکل کاری و نیز ۶ ماه پس از خاموشی راکتور محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد دقیقاً پس از خاموشی راکتور (EOI) آهنگ دز گاما چسبیده به دسته سوخت $mSv/h 3.74 \times 10^4$ و در فاصله $m 1$ از دسته

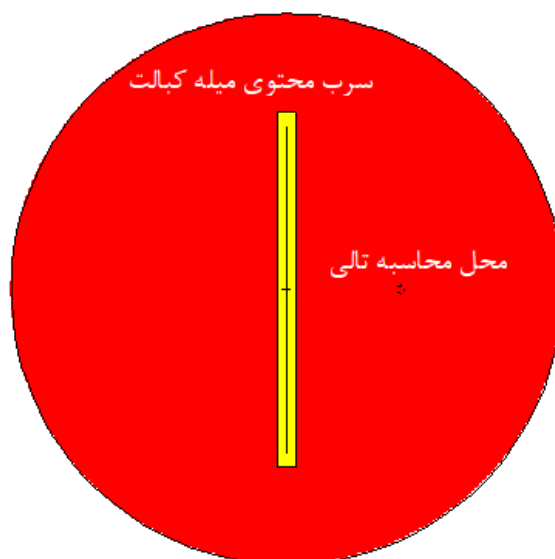


سوخت $2/72 \times 10^7$ mSv/h است. بعد از ۶ ماه خنک شوندگی دسته سوخت آهنگ دزهای گاما در دو حالت چسبیده و فاصله ۱ m دسته سوخت به ترتیب $2/43 \times 10^6$ mSv/h و $1/81 \times 10^5$ mSv/h است.

همانطوریکه شکل ۳-ب نشان می‌دهد، طیف گامای میله کبالت پرتودیده پس از ۶ ماه از خنک شوندگی تغییر خاصی نمی‌کند و تغییرات جزئی طیف نیز مربوط به واپاشی رادیو ایزوتوپ‌های تولیدشده در پوشش زیرکالوی میله کبالت-۶۰ است و خود کبالت-۶۰ با نیمه‌عمر ۵/۲۷ سال و گسیل دو گامای $1/17$ MeV و $1/33$ MeV تغییر خاصی در طیف گاما باگذشت زمان خنک شوندگی ایجاد نخواهند کرد.

در این مورد نیز آهنگ دز گاما در فاصله ۱ m مرکز مجتمع و نیز چسبیده به سطح میله در مرکز راستای محوری آن (بیشینه دز گاما) با استفاده از تالی F^5 ، و نیز DE/DF محاسبه گردید. ضرایب تبدیل شار به دز ICRP-۲۱ برای انجام محاسبات استفاده گردید. جرم یک میله کبالت-۵۹ در کد ORIGEN مدل گردید. آهنگ دزهای موردنظر دقیقاً بعد از خاموشی راکتور یعنی ۲۹۴ روز سیکل کاری و نیز ۶ ماه پس از خاموشی راکتور محاسبه گردید. نتایج محاسبات نشان داد دقیقاً پس از خاموشی راکتور (EOI) آهنگ دز گاما چسبیده به میله $1/49 \times 10^7$ mSv/h و در فاصله ۱ m از میله کبالت پرتودیده $2/17 \times 10^5$ mSv/h است. بعد از ۶ ماه خنک شوندگی این میله، آهنگ دزهای گاما در دو حالت چسبیده و فاصله ۱ m میله پرتودیده به ترتیب $1/26 \times 10^7$ mSv/h و $1/83 \times 10^5$ mSv/h است.

در ادامه محاسبات دز روی سطح یک کسک سربی و فاصله ۱ m آن برای زمان پس از پرتودهی میله کبالت-۵۹ پرتودیده ارائه شده است. مطابق شکل ۴ ضخامت کسک سربی از ۱۸ cm تا ۲۲ cm تغییر داده شد و محاسبات آهنگ دز گاما با استفاده از تالی F^5 و نیز DE/DF انجام گردید.



شکل (۴) شبیه‌سازی محاسبات دز گامای بیشینه روی سطح و فاصله ۱ m از کسک محتوی میله کبالت-۵۹

پرتودیده با استفاده از کد MCNPX

بر اساس مقررات حفاظت پرتویی، در محل باید شرایط زیر برقرار باشد:

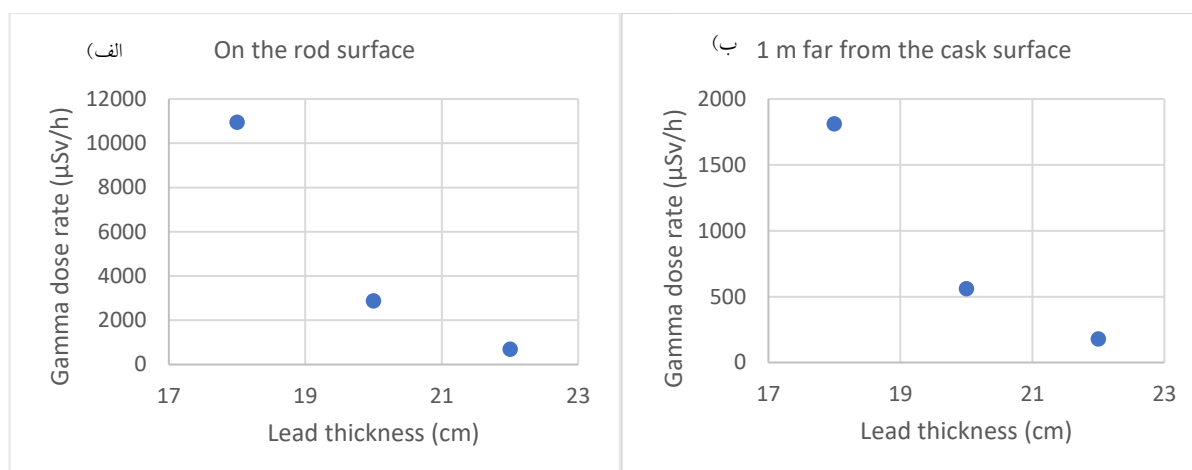
- سطح آهنگ دز برای عموم مردم در حصار زیر $0/25$ mSv/y

- حداکثر میزان آهنگ دز در سطح دیوار بیرونی انبار حدود 1 mSv/y

- 2 mSv/h به عنوان حداکثر میزان دز سطحی یک کسک [۹].



طبق موارد ذکر شده در فوق، آهنگ دز گاما روی سطح کسک محتوی میله کبالت-۶۰ پس از پرتودهی برای ضخامت‌های ۱۸ cm، ۲۰ cm و ۲۲ cm به ترتیب $۱۰/۹۴ \text{ mSv/h}$ ، $۲/۸۷ \text{ mSv/h}$ و $۰/۶۹۴ \text{ mSv/h}$ خواهد بود (شکل ۵-الف). همچنین مقادیر آهنگ دز گامای بیشینه در فاصله ۱ m از سطح کسک شوندگی برای ضخامت‌های ۱۸ cm، ۲۰ cm و ۲۲ cm به ترتیب $۱/۸۱ \text{ mSv/h}$ ، $۰/۵۶۰ \text{ mSv/h}$ و $۰/۱۷۷ \text{ mSv/h}$ خواهد بود (شکل ۵-ب).



شکل (۵) آهنگ دز گامای بیشینه (الف) روی سطح کسک محتوی میله کبالت-۵۹ پرتودیده (ب) آهنگ دز گامای بیشینه به فاصله ۱ m از سطح کسک

۴- نتیجه‌گیری:

محاسبات انجام شده نشان می‌دهد آهنگ دز گاما میله کبالت پرتودیده در راکتور VVER-۱۰۰۰ حدود ۲۵ برابر کمتر از آهنگ دز یک دسته سوخت آن است. همچنین ضخامت ۲۲ cm سرب برای حمل و نقل این چشمه پرتوزا (کبالت-۶۰) تولید شده در میله کافی است تا آهنگ دز در سطح این کسک انتقال کمتر از ۲ mSv/h باقی بماند. همچنین زمان خنک شوندگی برای میله کبالت هیچ‌گونه کاهش آهنگ دز قابل ملاحظه‌ای ایجاد نخواهد کرد ضمن اینکه اکتیویته محصول نیز کاهش می‌یابد.

۵- مراجع:

- ۱- Cobalt ۶۰ - an overview, <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/cobalt-60>
- ۲- Wei Zhang, Feng-Lei Niu, Ying Wu & Zhang-Peng Guo, Feasibility analysis of ^{60}Co production in pressurized water reactors, Nucl. Sci. and Tech., Volume ۳۰, article number ۱۴۷, (۲۰۱۹)
- ۳- Julia Świątkowska & Piotr Darnowski, Analysis of the Cobalt- ^{60} Production in the AP1۰۰۰-Like Pressurized Water Reactor Using SERPENT۲, Arabian Journal for Science and Engineering, ۲۰۲۴
- ۴- Cobalt- ^{60} Production in Westinghouse PWRs, NRC-Westinghouse Technical Exchange Meeting July ۱۵, ۲۰۲۰
- ۵- D.B. Pelowitz, Users' manual version of MCNPX۲,۶,۰, (LANL, LA-CP-۰۷-۱۴۷۳, ۲۰۰۸.)
- ۶- J. K. Shultis, R. E. Faw, An MCNP primer Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, (Kansas State University, copyright ۲۰۰۴-۲۰۱۰.)



- ۷- J F Briesmeister, MCNP- A General Monte Carlo N-Particle Transport code Version^۴C, (Los Alamos National Laboratory Report, USA, LA-۱۳۷۰۹-M ۲۰۰۰.)
- ۸- A.G. Croff. A user's manual for the ORIGEN^۲ computer code, ORNL, ۱۹۸۰.
- ۹- M. Bace, D. Grgic, D. Pevec, CALCULATION OF SPENT FUEL STORAGE CASK PARAMETERS, Nuclear Society of Slovenia, ۲nd Regional Meeting: Nuclear Energy in Central Europe, Portoroz, SLOVENIA, ۱۱.-M. September ۱۹۹۵



شناسایی سریع مکان و نوع مواد پرتوزا با پهپادهای مجهز به سیستم‌های بینایی ماشین و

سنجشگرهای هسته‌ای (کد مقاله: ۱۰۴۲)

اردینی، هادی^۱ - بیگزاده، امیرمحمد^۱

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، نام سازمان یا دانشگاه، تهران، ایران.
* تهران، تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها کد پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

چکیده:

شناسایی و مکان‌یابی دقیق مواد پرتوزا به دلیل خطرات ناشی از پرتوهای یونیزان و پیچیدگی محیط‌های آلوده، همواره چالشی بزرگ بوده است. روش‌های سنتی نظارت بر آلودگی پرتوی، زمان‌بر و پرخطر هستند. در این پژوهش، یک پهپاد مجهز به سنجشگر تشخیص پرتو و دوربین، به‌عنوان یک راه‌حل نوآورانه برای غلبه بر این چالش‌ها معرفی شده است. این سیستم هوشمند، با ترکیب توانایی‌های بینایی ماشین و آشکارسازی پرتو، قادر است به‌سرعت و دقت، مکان و نوع آلودگی رادیواکتیو را در مناطق وسیع شناسایی کند. نتایج نشان می‌دهد که این پهپاد می‌تواند در کمتر از یک دقیقه، اشیاء آلوده را موقعیت‌یابی نماید. **کلمات کلیدی:** موقعیت، نوع، آلودگی‌های پرتوی، بینایی ماشین، پهپاد، ادغام داده‌ها، حادثه پرتوی

Autonomous Drone Detection of Contaminated Radioactive Objects: Fusion Vision and Radioactive Data

Ardiny, Hadi^{1*}, Beigzadeh, Amirmohammad¹

۱. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Box ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶, Tehran - Iran

Abstract:

The accurate identification and location of radioactive sources has long hampered the dangers of ionizing radiation and the complexities of contaminated sites. Traditional monitoring methods are time-consuming and potentially risky. This research presents an innovative solution: a drone with a beam detection sensor and a camera. This intelligent system leverages machine vision and radiation detection to quickly and accurately identify and locate radioactive contamination across vast areas. The drone has demonstrated the ability to locate contaminated objects in under a minute.

Keywords: Localization, type, radiation contamination, machine vision, drone, data fusion, radiation accident

۱ - مقدمه:

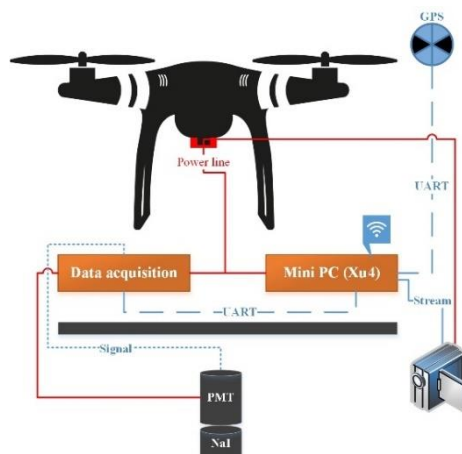
آشکارسازی و مدیریت مواد رادیواکتیو در محیط‌های آلوده همچنان چالش‌های حیاتی برای سلامت و ایمنی عمومی، به‌ویژه پس از حوادث طبیعی و انسانی می‌باشد. آلودگی رادیواکتیو، تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست است و عواقب جبران‌ناپذیری از جمله افزایش ابتلا به سرطان و اختلالات ژنتیکی را به دنبال دارد. لذا، توسعه روش‌های کارآمد برای تشخیص و کاهش این آلودگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به محدودیت‌های ذاتی روش‌های پایش سنتی، ضرورت توسعه



روش‌های نوین و کارآمد برای تشخیص و اندازه‌گیری آلودگی‌های رادیواکتیو بیش‌ازپیش احساس می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر پهبادهای که معمولاً به‌عنوان هواپیماهای بدون سرنشین شناخته می‌شوند، به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای کاربردهای مختلف از جمله جستجو و نجات، نظارت بر کشاورزی و ارزیابی محیط‌زیست ظاهر شده‌اند [۳]. تطبیق‌پذیری، سازگاری و قابلیت‌های عملیاتی از راه دور آن‌ها را به‌ویژه برای محیط‌های خطرناکی که مداخله انسانی خطرناک یا غیرعملی است مناسب می‌کند [۲]. ترکیب اطلاعات حاصل از حسگرهای مختلف مانند دوربین، لیدار و آشکارسازهای پرتوی، در پهبادهای، به ایجاد یک تصویر جامع و دقیق از محیط پیچیده کمک کرده و قابلیت تشخیص اشیاء و مواد را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۳]. به‌طور مثال حسگرهای تصویربرداری، پهبادهای را قادر می‌سازند تا در محیط‌های پیچیده حرکت کنند، از برخورد با موانع اجتناب کنند، و اطلاعات متنی را برای تفسیر ناهنجاری‌های پرتوی شناسایی شده ارائه دهند. در همین حال، آشکارسازهای پرتوی اطلاعات حیاتی در مورد حضور و شدت مواد رادیواکتیو ارائه می‌دهند. ادغام فناوری‌های پیشرفته تشخیص پرتو و تصویربرداری در پهبادهای، تحول شگرفی در مدیریت بحران‌های رادیواکتیو ایجاد کرده است. این پهبادهای با قابلیت بررسی سریع و دقیق مناطق وسیع و ارائه داده‌های بلادرنگ، به ابزاری حیاتی برای شناسایی و مکان‌یابی منابع رادیواکتیو و کاهش خطرات ناشی از پرتوگیری تبدیل شده‌اند. با استفاده از این فناوری، می‌توان به‌سرعت و دقت بالایی به داده‌های موردنیاز برای تصمیم‌گیری در شرایط اضطراری دست‌یافت و عملیات پاک‌سازی را به‌طور مؤثر انجام داد [۴].

بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی بر توسعه سیستم‌های نظارت پرتوی مبتنی بر پرند‌های بدون سرنشین متمرکز شده‌اند که هرکدام دارای ویژگی‌ها و کاربردهای منحصر به فردی هستند. تاولر و همکاران [۵] یک پهباد خودکار مجهز به آشکارساز سوسوزن و نرم‌افزار پیشرفته را برای شناسایی و موقعیت‌یابی دقیق منابع پرتوزا در محیط‌های خطرناک توسعه داده است. این سیستم که در آزمایشگاه سیستم‌های بدون سرنشین دانشگاه ویرجینیا تک طراحی و ساخته شده است، با قابلیت پرواز مستقل و جمع‌آوری داده‌های پرتوزایی در زمان واقعی، یک ابزار ارزشمند برای پاسخگویی به حوادث هسته‌ای و رادیولوژیکی محسوب می‌شود. گومز و همکاران در پژوهش خود [۶]، یک گره حسگر بی‌سیم خود پایدار را برای پایش مستمر تشعشعات در مناطق آلوده و صعب‌العبور طراحی و پیاده‌سازی نموده‌اند. این گره که توسط یک پهباد مستقر و بازیابی می‌شود، به لطف بهره‌گیری از ماژول‌های ارتباطی کم‌مصرف و قابلیت‌های برداشت انرژی، قادر به عملکرد طولانی‌مدت در محیط‌های دورافتاده است. اشتیبینگ [۷] استفاده از پهبادهای متعدد مجهز به آشکارسازهای ذرات Timepix را برای مکان‌یابی دقیق منابع تشعشعات یونساز مورد بررسی قرارداد. تحقیقات آن‌ها دو روش محلی سازی را آزمایش کرد: سازندهای تک هلیکوپتری و چند هلیکوپتری. آن‌ها از طریق شبیه‌سازی و آزمایش‌های دنیای واقعی، کارآمدی این رویکرد را نشان دادند. اردینی و همکاران [۳] یک سیستم نظارت رادیولوژیکی با استفاده از یک آشکارساز کریستالی NaI (Tl) نصب‌شده بر روی یک پهباد چند روتوری توسعه داد. آزمایش‌ها با موفقیت نقاط رادیواکتیو را شناسایی کردند و یک نقشه پرتوی با داده‌های جغرافیایی برای تجسم و تجزیه و تحلیل ایجاد کردند. کونزه و همکاران [۸] یک سیستم طیف‌سنجی گاما مبتنی بر پهباد برای نقشه‌برداری و ارزیابی رادیواکتیویته در سایت‌های اورانیوم در آسیای مرکزی توسعه دادند.

مطالعه حاضر نشان‌دهنده پیشرفت قابل‌توجهی در تشخیص مواد رادیواکتیو، با استفاده از یک رویکرد نوآورانه است که یک پهباد مجهز به آشکارساز مبتنی بر تحلیلگر تک کاناله (SCA) را ادغام می‌کند. این ترکیب منحصر به فرد با امکان شناسایی دقیق آلودگی مشکوک و تشخیص دقیق مواد رادیواکتیو خاص، از روش‌های سنتی پیشی می‌گیرد. SCA به‌عنوان یک اسکنر شکل (۱). طرح‌واره‌ای که اجزای مختلف پهباد کنترل پرتوی را نشان می‌دهد.



رادیاواکتیو بسیار حساس عمل می‌کند و به‌طور انتخابی پالس‌ها را در محدوده انرژی مشخصی شمارش می‌کند. هم‌زمان دوربین پهپاد تصاویر را ضبط می‌کند. با تلفیق این اطلاعات می‌توان موقعیت جسم آلوده را حین پرواز شناسایی نمود. تازگی اصلی این پژوهش در همجوشی داده‌ها نهفته است که ترکیبی از تشخیص پرتو با استفاده از حسگر و شناسایی اشیاء با استفاده از بینایی ماشین به‌صورت هم‌زمان (در لحظه) در یک سیستم پهپادمحور برای مکان‌یابی سریع منابع رادیاواکتیو ارائه می‌دهد. درحالی‌که پژوهش‌های پیشین به بررسی جداگانه کاربردهای سنجش تشعشعات توسط پهپاد برای شناسایی اشیاء پرداخته‌اند، این پژوهش به‌صورت منحصربه‌فرد این دو جریان داده را با یکدیگر ترکیب می‌کند و شناسایی قوی‌تر و دقیق‌تر منابع رادیاواکتیو را ممکن می‌سازد. راه‌حل نوآورانه ارائه‌شده در این مطالعه این پتانسیل را دارد که انقلابی در زمینه واکنش اضطراری هسته‌ای ایجاد کند و ابزار ارزشمندی برای ارزیابی سریع ارائه دهد. با استقرار این سیستم‌های نظارت پرتوی می‌توان آگاهی مکانی را افزایش داد، پرتوگیری را کاهش و کارایی کلی نظارت و پاسخ رادیولوژیکی را بهبود داد.

۲ - مواد و روش‌ها

طرح‌واره سیستم پایش رادیاواکتیو مورد استفاده در مطالعه حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. پهپاد مورد استفاده یک DJI Matrix ۶۰۰، یک پهپاد شش روتور است. برای قرار دادن آشکارساز، لامپ تقویت‌کننده نوری و سایر اجزای الکترونیکی، یک سازه متناسب در زیر پهپاد طراحی و نصب شد. توان تمام مدارها و آشکارساز توسط باتری پرنده تأمین می‌شود. علاوه بر این، یک دوربین برای تصویربرداری در زمان واقعی در کنار آشکارساز نصب شده است. قسمت سیستم پایش پرتوی از اجزای کلیدی زیر تشکیل شده است: (۱) پهپاد چند روتوری، (۲) آشکارساز یدید سدیم (NaI)، (۳) لامپ تقویت‌کننده نوری، (۴) تحلیلگر تک کاناله (SCA)، (۵) دوربین با قدرت تفکیک بالا، (۶) مینی کامپیوتر مرکزی، (۷) سیستم مدیریت توان. برای ارزیابی عملکرد سامانه، ^{137}Cs (۱۰۰ μCi) انتخاب شد. ^{137}Cs ، به‌ویژه، به دلیل ارتباط آن با حوادث هسته‌ای، از نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل توجهی است. این رادیونوکلئید تمایل به تجمع در خاک دارد و می‌تواند توسط گیاهان جذب شود و در نتیجه وارد زنجیره غذایی انسان می‌شود. درحالی‌که ^{137}Cs کاربردهای صنعتی مختلفی از جمله کالیبراسیون تجهیزات تشخیص تشعشع دارد، پتانسیل آن برای آلودگی محیطی یک نگرانی عمده است. برای بررسی یک سناریوی آلودگی در دنیای واقعی، یک سری از اشیاء بر روی زمین مستقر شدند که ^{137}Cs در یکی از آن‌ها به‌عنوان منبع آلودگی قرار داده شد.

پهپاد در طول پرواز ارتفاع ثابتی را حفظ کرد و تصاویر بصری را با دوربین خود ثبت کرد و هم‌زمان اشعه گامای تابشی را ثبت کرد. داده‌های جمع‌آوری شده همچنین شامل اطلاعات موقعیتی به‌دست‌آمده از GPS و حسگرهای واحد اندازه‌گیری اینرسی بر روی سامانه ذخیره شد. بعد از پرواز اطلاعات مورد پردازش قرار گرفت. در مرحله اول و از روی تصاویر موقعیت جسم



درون هر فریم تصویر مشخص می‌شود. برای دستیابی به این هدف از روش «تفریق پس‌زمینه»^۴ استفاده می‌شود. این روش، پس‌زمینه تصویر را از تصویر اصلی کم می‌کند تا جسم موردنظر برجسته‌تر شود. سپس، برای بهبود کیفیت این جداسازی و افزایش وضوح جسم، از تکنیک‌های پردازشی اتساع^۵ و فرسایش^۶ استفاده می‌گردد (شکل ۲). سپس مرکز هر شیء شناسایی شده محاسبه و ثبت می‌شود. برای ایجاد یک چارچوب مرجع ثابت، موقعیت این اشیاء سپس به یک سیستم مختصات جهانی تبدیل می‌شود. این برای کنترل ماهیت پویای صحنه ضروری است، جایی که حرکت پهباد و ظاهر اشیاء جدید می‌تواند بین فریم‌ها متفاوت باشد.

با اختصاص مختصات سراسری به هر شیء، آن‌ها در فریم‌های متعدد دنبال شدند. در ابتدا برای تعیین موقعیت، از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) استفاده شد، اما به دلیل ضعف سیگنال GPS در محیط داخلی آزمایشگاه، این روش کارآمد نبود. برای غلبه بر این محدودیت و حفظ کلیت سیستم، از یک سیستم مبتنی بر کدهای QR استفاده شد. کدهای QR که به‌سادگی توسط الگوریتم‌های بینایی کامپیوتر قابل‌شناسایی هستند، در نقاط مختلف محیط آزمایشگاه قرار داده شدند. موقعیت دقیق این کدها از قبل مشخص شده و در سیستم پهباد تعریف شده است. به این ترتیب، با دریافت و پردازش این کدهای QR توسط پهباد، می‌توان موقعیت نسبی آن را نسبت به کدها و در نتیجه نسبت به کل محیط آزمایشگاه تعیین کرد.



شکل (۲). پانل سمت راست تصویر اصلی و سمت چپ تصویر را با زمینه حذف‌شده نشان می‌دهد.

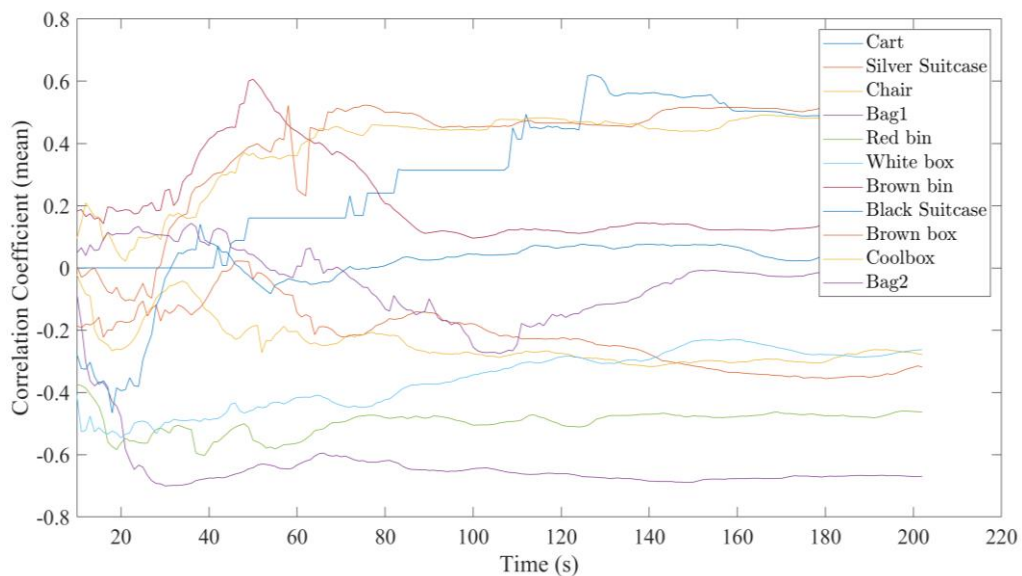
۳ - نتایج

قبل از شروع عملیات پایش، یک اندازه‌گیری پایه از نرخ شمارش میدانی ایجاد شد. این اندازه‌گیری با میانگین ۱۶۰ شمارش در ثانیه، سطح تابش گامای محیط را در کل منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. پهباد مسیر پرواز را با میانگین سرعت ثابت ۱ متر بر ثانیه در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین طی کرد. از مأموریت پروازی ده سری که هر کدام ۲۰۰ ثانیه اطلاعات بود به دست آمد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، موقعیت‌های تک‌تک اشیاء در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش مشخص‌شده در بخش قبل تعیین شد. شکل ۳ مقادیر میانگین محاسبه‌شده برای ضریب همبستگی بین هر جسم و دوربین گامای رادیواکتیو را نشان می‌دهد. تحقیقات قبلی [۹] نشان داده است که اشیاء آلوده ضریب همبستگی منفی زیر ۰.۴- بین فاصله و تعداد پرتوگاما از خود نشان می‌دهند. بنابراین، اشیایی که دارای ضریب همبستگی زیر این آستانه هستند ممکن است به‌عنوان آلوده طبقه‌بندی شوند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شیء به نام Bag^۱ کمترین ضریب همبستگی را نشان می‌دهد، که زیر آستانه تعیین‌شده ۰.۴- است. این نشان‌دهنده وجود یک منبع رادیواکتیو، در داخل جسم است.

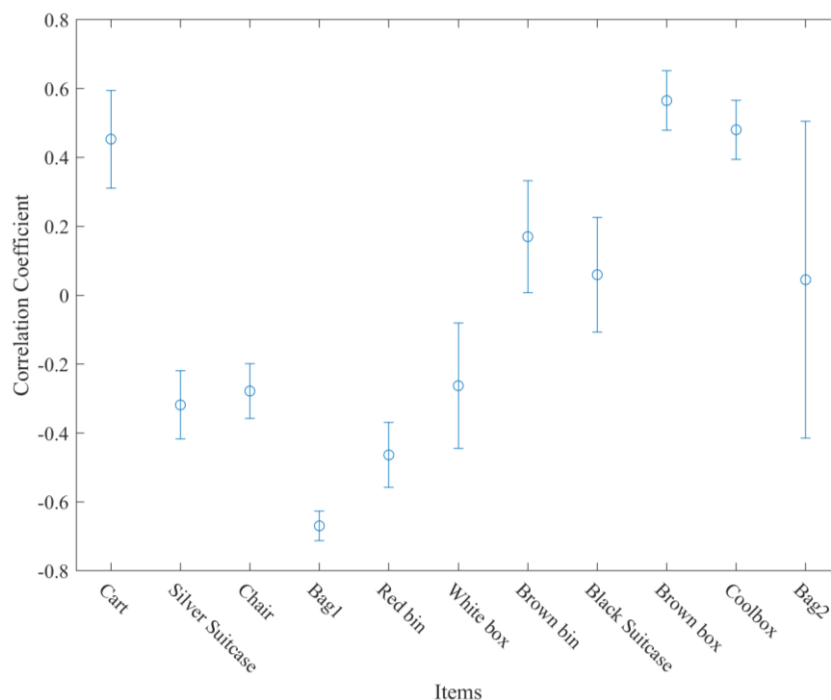
^۴ Background Subtraction

^۵ Dilation

^۶ Erosion



شکل ۳. میانگین ضریب همبستگی بین داده‌های موقعیتی هر جسم و تعداد پرتوهای گامای مربوطه. علاوه بر این، بخش‌های خاصی از نمودارها یک خط صاف و افقی را نشان می‌دهند. این زمانی اتفاق می‌افتد که میدان دید دوربین کل جسم را در یک قاب خاص در برنگیرد و در نتیجه سیگنال قابل تشخیص و یک خط مسطح متناظر در نمودار وجود نداشته باشد.

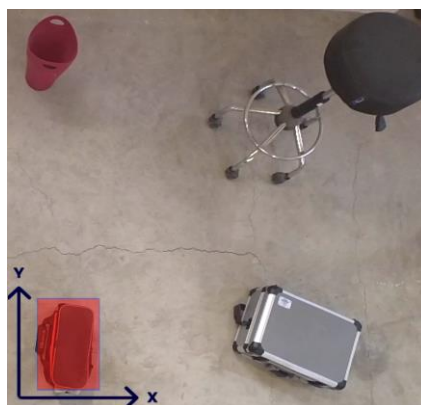


شکل ۴. ضریب همبستگی میانگین و انحراف استاندارد بین داده‌های موقعیتی هر جسم و شمارش پرتوگامای مربوطه پس از ۲۰۰ ثانیه.

شکل ۴ میانگین و انحراف استاندارد ضریب همبستگی را برای هر جسم پس از ۲۰۰ ثانیه جمع آوری داده‌ها در ده ماموریت پروازی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که Bag^۱ کمترین ضریب همبستگی را نشان می‌دهد که به زیر ۰.۴- می‌رسد.



همچنین سطل قرمز ضریب همبستگی زیر ۰.۴- را نشان می‌دهد، که نشان دهنده یک همبستگی منفی قوی با سیگنال آشکارساز است. با این حال، مهم است که توجه داشته باشیم که این همبستگی به آلودگی رادیواکتیو نسبت داده نمی‌شود. مسیر پرواز اولیه پهپاد عمدتاً افقی است (محور X در شکل ۵)، با حداقل حرکت عمودی. علاوه بر این، سطل قرمز و کیف ۱ روی خطی قرار دارند که موازی با محور عمودی است (محور Y در شکل ۴). این شباهت هندسی نشان می‌دهد که هر دو جسم در طول دوره اندازه‌گیری فاصله تقریباً ثابتی از آشکارساز دارند. برای رفع این محدودیت، پهپاد در حالت ایده‌آل نیاز به قابلیت حرکت در هر دو جهت افقی و عمودی دارد. با این حال، به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاه داخلی، حرکت عمودی پهپاد به طور قابل توجهی محدود شد. شکل ۵ به صورت بصری تشخیص یک آلاینده بالقوه را نشان می‌دهد که به عنوان BAG^1 شناسایی شده است.



شکل ۵. یک جعبه مرزی با سایه قرمز، ناحیه مورد نظر (ROI) مربوط به کیسه ۱ را نشان می‌دهد که توسط الگوریتم به عنوان یک شی آلوده طبقه بندی شده است.

۴ - نتیجه گیری

شناسایی و شناسایی مواد رادیواکتیو در محیط‌های آلوده به دلیل ماهیت خطرناک این مواد و مناطق اغلب پیچیده، چالش‌های مهمی را به همراه دارد. روش‌های سنتی، مانند بررسی‌های زمینی و بازرسی‌های دستی، زمان‌بر، کار فشرده هستند و پرسنل را در معرض خطرات احتمالی پرتوی قرار می‌دهند. برای رفع این محدودیت‌ها، این تحقیق استفاده از پهپاد مجهز به آشکارسازهای پرتوی پیشرفته و سیستم‌های بینایی را پیشنهاد کرد. با ادغام این فناوری‌ها، پهپاد رویکردی کارآمدتر، ایمن‌تر و جامع‌تر برای شناسایی و مکان‌یابی مواد رادیواکتیو در میان اشیاء توزیع‌شده، به‌ویژه در سناریوهای پس از حادثه ارائه کرد. این پهپاد در محیط حرکت کرد و از یک الگوریتم حرکت تصادفی برای شناسایی اشیاء آلوده استفاده کرد. نتایج امیدوارکننده نشان داد که الگوریتم ما می‌تواند اشیاء آلوده را در عرض ۴۰ ثانیه شناسایی و علامت‌گذاری کند. این مطالعه همچنین کارایی سیستم پهپاد پیشنهادی را در تشخیص دقیق و شناسایی اشیاء آلوده، بدون توجه به مسیر پرواز پهپاد، نشان می‌دهد.

۵ - مراجع

- [۱] I. Tsitsimpelis, C. J. Taylor, B. Lennox, M. J. Joyce. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments. Prog. Nucl. Energy. ۱۱۱ (۲۰۱۹) ۱۰۹-۱۲۴. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.pnucene.۲۰۱۸.۱۰.۰۲۳.
- [۲] F. Ahmed, J. C. Mohanta, A. Keshari, P. S. Yadav. Recent advances in unmanned aerial vehicles: A review. Arab. J. Sci. Eng. ۴۷ (۷) (۲۰۲۲) ۷۹۶۳-۷۹۸۴. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۳۳۶۹-۰۲۲-۰۶۷۳۸-۰.
- [۳] H. Ardiny, A. M. Beigzadeh. Pre-flight experiments for the unmanned aerial monitoring system (UAMS) radioactive detection under its limitations. J. Nucl. Res. Appl. ۲ (۳) (۲۰۲۲) ۲۳-۲۸. doi: ۱۰.۲۴۲۰۰/jon.۲۰۲۲.۱۰۲۳.



[۴] H. Yao, R. Qin, X. Chen. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—A review. *Remote Sens.* ۱۱ (۱۲) (۲۰۱۹) ۱۴۴۳. doi: ۱۰,۳۳۹۰/rs۱۱۱۲۱۴۴۳.

[۵] J. Towler, B. Krawiec, K. Kochersberger. Radiation mapping in post-disaster environments using an autonomous helicopter. *Remote Sens.* ۴ (۷) (۲۰۱۲) ۱۹۹۵-۲۰۱۵. doi: ۱۰,۳۳۹۰/rs۴۰۷۱۹۹۵.

[۶] Gomez, Andres, Marie Francine Lagadec, Michele Magno, and Luca Benini. "Self-powered wireless sensor nodes for monitoring radioactivity in contaminated areas using unmanned aerial vehicles." In ۲۰۱۵ IEEE sensors applications symposium (SAS), pp. ۱-۶. IEEE, ۲۰۱۵.

[۷] P. Štibinger. Localization of a radiation source by a formation of unmanned aerial vehicles. Bachelor's Thesis. CTU FEE, ۲۰۱۷.

[۸] C. Kunze, B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, S. Altfelder. Development of a UAV-based gamma spectrometry system for natural radionuclides and field tests at central Asian uranium legacy sites. *Remote Sens.* ۱۴ (۹) (۲۰۲۲) ۲۱۴۷. doi: ۱۰,۳۳۹۰/rs۱۴۰۹۲۱۴۷.

[۹] H. Ardiny, A. Beigzadeh. Exploring radiological contamination among the same moving objects based on a fusion between radioactive detectors and surveillance cameras. *Eur. Phys. J. Plus.* ۱۳۹ (۲) (۲۰۲۴) ۱۷۲. doi: ۱۰,۱۱۴۰/epjp/s۱۳۳۶۰-۰۲۴-۰۴۹۷۴-x.



بهینه سازی برنامه بارگذاری چشمه های کبالت ۶۰ در سیستم تابش گاما (کد مقاله : ۱۱۰۹)

قراخانی، میلاد* - فقهی، سید امیر حسین^۱

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

این پژوهش با هدف دستیابی به چینه‌ی بهینه برای چشمه‌های میله‌ای کبالت ۶۰ در سیستم تابش گاما انجام شده است. با توجه به کوتاه بودن نیمه عمر کبالت و هزینه سنگین مترتب بر سالیته پرتودهی جهت خرید و افزایش اکتیویته سالیته، می‌بایست علاوه بر وجود میله‌های قدیمی، از چشمه جدیدی نیز استفاده گردد که قرار دادین این چشمه‌ها در جایگاه‌های مناسب خود یک چالش بزرگ می‌باشد. پارامتر کلیدی مورد بررسی، نسبت یکنواختی دز (DUR) است و در این پژوهش تلاش بر این بوده است که این میزان به حداقل مقدار خود بر اساس چینش چشمه‌ها کاهش یابد. برای بهینه سازی این چینش از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و نتایج آن بر اساس کد MCNPX ارزیابی و اعتبار سنجی شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده این است که هم بر اساس تعداد و هم بر اساس میزان اکتیویته، قرار گرفتن میله‌ها به روش سینوسی بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد و می‌تواند یکنواختی دز را در بهترین حالت خود قرار کند.

کلمات کلیدی: پرتوی گاما، الگوریتم ژنتیک، کد MCNPX، بهینه‌سازی

Optimization of ^{60}Co Source Loading Plan for a Gamma Irradiation Facility

Gharakhani, Milad^{1*} - Fegghi, Seyyed Amir Hossein¹

Abstract:

This study aimed to determine the optimal arrangement of cobalt- ^{60}Co rod sources within a gamma irradiation system. Due to the short half-life of cobalt and the high cost associated with purchasing additional sources to increase the site's activity, it is necessary to supplement existing rods with new ones. A significant challenge is determining the appropriate positioning for these sources. The main focus of this study is the dose uniformity ratio (DUR), and the goal is to minimize this ratio through careful source arrangement. To achieve this, a genetic algorithm was employed to optimize the layout, and the results were evaluated and validated using the MCNPX code. The findings suggest that arranging the rods in a sinusoidal pattern yields the best performance and effectively enhances dose uniformity, considering the number of sources and their activity levels.

Key words: Gamma radiation, Genetic algorithm, MCNPX code, Optimization



۱- مقدمه:

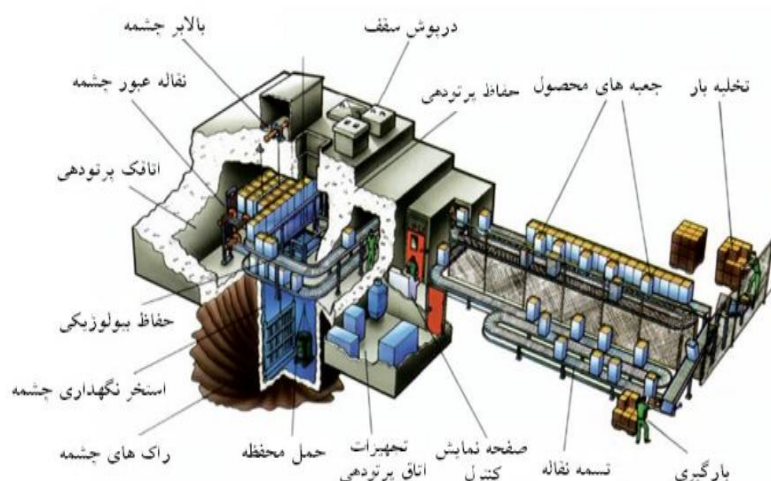
تابش گاما همان طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است به عنوان یکی از موثرترین روش‌های استرلیزاسیون و فرآوری مواد در حوزه‌های پزشکی، صنعتی و کشاورزی شناخته می‌شود. سیستم‌های تابش گاما که بر پایه چشمه‌های رادیواکتیو نظیر ^{60}Co طراحی شده‌اند، در استرلیزاسیون تجهیزات پزشکی، نگهداری طولانی مدت مواد غذایی و کاهش بار میکروبی محصولات، کاربرد گسترده‌ای دارند. از مزایای این فناوری می‌توان به عمق نفوذ بالای پرتوهای گاما و قابلیت کاربرد آن برای مواد حجیم اشاره کرد. [۱]

یکی از چالش‌های اساسی در این سیستم‌ها، یکنواختی توزیع دز (DUR)^۷ مطابق با فرمول (۱) تابشی در محصول است [۲]. یکنواخت نبودن دز می‌تواند به کاهش کیفیت محصول و ناکارآمدی فرآیند پرتودهی منجر شود. برای دستیابی به یکنواختی دز و افزایش کارایی، طراحی مناسب چینش چشمه‌های کبالت اهمیت به‌سزایی دارد. این چینش باید به گونه‌ای باشد که پرتو تابشی به صورت یکنواخت در محصول توزیع گردد. در این راستا، استفاده از روش‌های هوشمند مانند الگوریتم‌های ژنتیک می‌تواند راهکار مناسبی برای بهینه‌سازی چینش چشمه‌های کبالت ارائه دهد. [۳]

در این پژوهش الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهترین چینش چشمه‌های کبالت به کار گرفته شده است. همچنین، با استفاده از شبیه‌سازی کد MCNPX، عملکرد مدل‌های مختلف چینش از نظر یکنواختی دز و افزایش کارایی مطابق با فرمول (۲) ارزیابی گردید.

$$DUR = \frac{D_{max}}{D_{min}} \quad (1)$$

$$E = \frac{D_{min} \times \rho \times V}{A \times \sum f_i E_i} \quad (2)$$



شکل ۱. سیستم پرتودهی گامای پانوراما [۵و۴].

^۷ Dose Uniformity Ratio



۲- روش کار:

برای دستیابی به هدف این پژوهش، یعنی بهینه‌سازی چینش چشمه‌های کبالت در سیستم تابش گاما از ترکیبی از شبیه‌سازی کد MCNPX و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است که مراحل مختلف آن به شرح ذیل می‌باشد:

۱-۲- تعریف سیستم پرتودهی

ابتدا یک سیستم پرتودهی واقعی مبتنی بر چشمه‌های کبالت طراحی شد. این سیستم متشکل از پنج رک^۸ دو طبقه‌ای است که در مجموع جایگاه ۴۵۰ چشمه میله‌ای در آن وجود دارد. محصولات، درون جعبه‌هایی به نام توتباکس^۹ با ابعاد cm^3 $۶۵ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ قرار می‌گیرند به طوری که هر توتباکس در یک زمان مشخص در دو طبقه از مقابل تمامی چشمه‌ها از چهار ردیف عبور خواهند کرد.

۲-۲- شبیه‌سازی با کد MCNPX

شبیه‌سازی دز تابشی با استفاده از کد MCNPX انجام شده است، به این صورت که تمام حجم توتباس در راستای طول به ۲۱ قسمت، در راستای عرض به ۱۳ قسمت و در راستای ارتفاع به ۱۶ قسمت تقسیم‌بندی شده و توسط مش تالی مکعبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به صورت فرضی در تمام طول تمام مسیر، توتباکس قرار داده شده و از همه آن‌ها مش تالی گرفته شده است. بعد از اجرای برنامه، تمام مش‌بندی‌های توتباکس‌ها، با یکدیگر جمع شدند، مشابه با این حالت که یک توتباکس کل مسیر را طی نموده است.

۳-۲- الگوریتم ژنتیک

یک مجموعه از N نقطه در یک فضای جست‌وجو به طور تصادفی جمعیت اولیه^{۱۰} را تشکیل می‌دهد. هر فرد X از این جمعیت، دارای مقدار برازندگی^{۱۱} معینی است که درجه^{۱۲}ی تطبیق آن فرد را با تابع هدف تعیین می‌کند. در حالتی که تابع هدف Z کمینه‌سازی باشد، اگر $Z(X)$ کوچک‌تر باشد، برازندگی X بالاتر خواهد بود. الگوریتم تکاملی در طی نسل‌های متوالی، به طور تدریجی تکامل پیدا می‌کند. در طول نسل‌ها، هدف بهبود برازندگی افراد است، این بهبود، توسط شبیه‌سازی دو مکانیزم اصلی انتخاب^{۱۳} و تولید مثل^{۱۴} که در تکامل موجودات زنده بر اساس نظریه داروین وجود دارد، حاصل می‌شود. [۳]

۴-۲ نرم افزار ۲۰۱۴a MATLAB

نرم افزار مطلب^{۱۴} محیط اصلی اجرای برنامه می‌باشد که به واسطه آن یک فایل کد MCNP تهیه، اجرا و قرائت می‌گردد، که بعد از قرائت، نسبت به پارامترهای DUR و بازده قبلی، فایل جدیدی را که حاصل پردازش الگوریتم ژنتیک (جایگشت‌های مناسب چشمه‌های میله کبالت) بوده است را تهیه، اجرا و قرائت می‌کند تا بهینه‌ترین حالت ممکن را شناسایی نماید.

۳- نتایج:

با توجه به متغییر بودن مواد مورد پرتودهی به صورت تصادفی از یک ماده مرجع با دو ماده سبک و سنگین با چگالی (g/cm^3) ($۰/۱۳$ و $۰/۶$) در چهار نوع چیدمان تجمعی (قرار دادن تمامی چشمه‌ها در رک‌های وسط طبقه بالا و پایین)، چینش مقعری (تجمع چشمه‌ها در رک‌های اطراف بیشتر از رک‌های وسط)، چینش مساوی (قرار دادن چشمه‌ها به صورت مساوی در تمامی

^۸ Rack

^۹ Tote box

^{۱۰} Initial Population

^{۱۱} Fitness Value

^{۱۲} Selection

^{۱۳} Reproduction

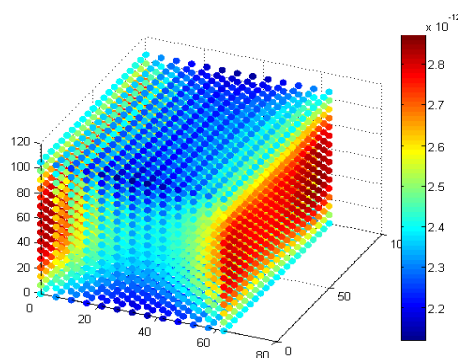
^{۱۴} MATLAB



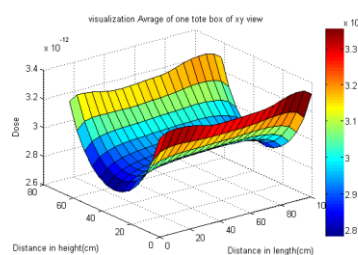
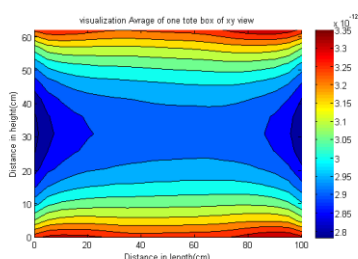
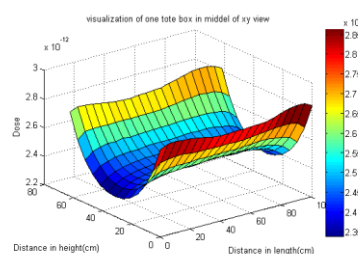
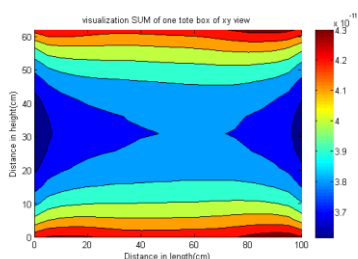
رک‌ها) و چینش تحدبی (تجمع چشمه‌های در رک‌های وسط بیشتر از رک‌های کناری) مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن به شرح جدول ۱ برای پارامتر DUR می‌باشد:

جدول ۱: نتایج DUR بر حسب چینش چشمه‌های کبالت

چگالی	0.13 g/cm^3	0.60 g/cm^3
چینش تجمعی	۱/۴۳۲۶	۲/۱۴۳۱
چینش تقعر	۱/۳۵۹۷	۱/۹۱۵۵
چینش تحدبی (سینوسی)	۱/۲۷۸	۱/۸۹۱
چینش مساوی	۱/۳۷۲۱	۱/۹۴۵۳



شکل ۲. نحوه دریافت دز تجمعی هر توتباکس به ازای ۱ Bq

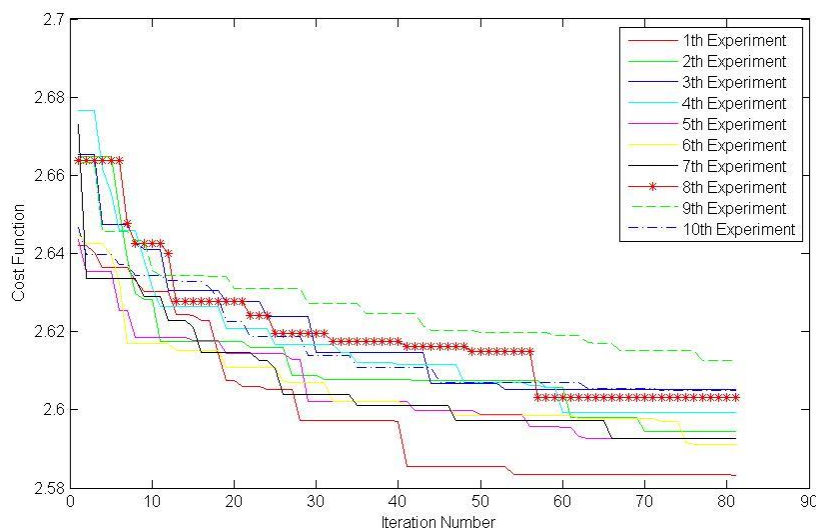


شکل ۳. سطح مقطع XY جهت دریافت دز هر توتباکس به ازای ۱ Bq

نتایج حاصل شده از جدول ۱ گویای این مطلب است که پارامتر DUR در سنگین‌ترین چگالی، بدترین حالت را به خود خواهد گرفت، بنابراین می‌توان ادامه محاسبات را برای ماده با چگالی سنگین انجام داد. نتیجه دیگر حاصل شده گویای این مطلب است که بهترین حالت قرارگیری میله‌های کبالت در حالت تحدبی یا سینوسی می‌باشد. در ادامه با توجه به اهمیت DUR نسبت به بازدهی استفاده از پرتو، سه حالت از چهار حالت اصلی چینش میله‌ها حذف گردیده و صرفاً یک حالت تحدبی را در نظر خواهیم گرفت. سپس الگوریتم ژنتیک را برای جایگزین‌های مختلف میله‌های کبالت در هر جایگاه از رک‌ها اجرا کرده ولی اهمیت بازده



نیز لحاظ گردیده است. مهمترین معیار برای یک سایت پرتودهی این است که بتواند یک محصول را به نحوی پرتودهی کند که DUR کمینه و بازده (جذب بیشترین دز دریافتی در یک زمان ثابت) بیشینه گردد، بنابراین تابع جدیدی به نام تابع هزینه مطابق با فرمول (۳) که نتایج حاصل شده از الگوریتم در ۱۰ آزمایش مطابق با شکل ۴ می‌باشد معرفی می‌گردد.



شکل ۴. نمودار تابع هزینه‌ی حاصل از ده آزمایش

$$\text{تابع هزینه} = \frac{\text{بازده}}{\text{DUR}} \quad (3)$$

جدول ۲: ۴ جایگشت مختلف حاصل از نتیجه ۸۰ تکرار شکل ۴

۱	۲	۳	۴	۵	شماره رک در ردیف بالا
۳	۴	۱۰	۴	۳	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۶
۴	۵	۷	۵	۴	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۹
۳	۵	۶	۵	۳	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۸
۲	۴	۱۳	۴	۲	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۱
۶	۷	۸	۹	۱۰	شماره رک در ردیف پایین
۳	۴	۹	۴	۳	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۶
۴	۵	۶	۵	۴	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۹
۳	۵	۶	۵	۳	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۸
۲	۴	۱۲	۴	۲	تعداد چشمه‌ها از هر رک در آزمایش شماره ۱

جدول ۲ نمونه‌هایی از جایگشت‌های مختلف برای ۴ آزمایش به شماره‌های ۸، ۶، ۱ و ۹ را که نماینده بهترین، بدترین و دو حالت میانی برای تابع هزینه‌های مختلف هستند نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در حالت چیدمان محدبی، شیب



تحدب نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. هر چه این شیب ملایم تر و با نظم بهتری از کناره‌ها به سمت رک مرکزی حرکت کند نتیجه بهتری حاصل شده و مواد مورد پرتو دهی دارای DUR کمتر و جذب انرژی بالاتری خواهند بود.

۴- بحث و نتیجه گیری:

با توجه به نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌های مختلف می‌توان به این نتایج استناد کرد که بعد از گذشت حدوداً یک الی دو نیمه عمر از اکتیو تیه سایت‌های پرتو دهی و لزوم افزایش میله‌های کبالت هم در صورت وجود میله‌های قبلی و هم در صورتی که صرفاً میله‌های جدید در سایت بارگذاری گردند، می‌بایست چینش میله‌ها به نحوی باشد که وقتی از رک‌های کناری به رک مرکزی نزدیک می‌شویم، هم تعداد میله‌ها و هم اکتیو تیه با شیب ملایم افزایش یابد تا بیشتری میزان بازدهی و کمترین میزان DUR برای انواع ماده‌های مورد پرتو دهی حاصل گردد.

۵- مراجع:

[۱] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Directory of Gamma Processing Facilities in Member States", IAEA-DGPF/CD, Vienne, ۲۰۰۴.

[۲] پایان نامه کارشناسی ارشد، اعظم همتی، مصطفی سهراب پور، بررسی کلی دستگاه‌های پرتو دهی گاما به جهت اصلاح پارامترهای طراحی برای سیستم‌های چند منظوره، شهریور ۱۳۹۲

[۳] یقینی.مسعود، "الگوریتم‌های بهینه سازی فراابتکاری"، جلد اول، جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر)، ۱۳۹۵

[۴]- Sharpe, P.H.G., Calibration and traceability in high dose dosimetry, IAEA-TECDOC-۱۰۷۰, Vienna ۲۸۸-۲۸۱, ۱۹۹۹.

[۵]- Morrissey, R.F., and Herring, C.M., 'Radiation sterilization: past, present and future', Radiat. Phys. Chem. ۶۳, ۲۱۷-۲۲۱, ۲۰۰۲.



حذف رنگینه مالاشیت سبز با استفاده از جاذب طبیعی سنتز شده به روش پرتویی (کد مقاله :

(۱۱۲۱)

رادمهر، مهسا^۱ - اخوان، اعظم^۱ - پورستار مرجانی، احمد^۱

۱- گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹ تهران
- ایران

چکیده

در این پژوهش یک سوپرجاذب پلیمری بر پایه پلیمر طبیعی کیتوسان/اکریلیک اسید با استفاده از پرتو گاما در دوز ۲۰ kGy سنتز شد و کاربرد آن برای حذف رنگینه مالاشیت سبز مورد بررسی قرار گرفت. ساختار جاذب سنتز شده توسط طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) تایید شد. تأثیر متغیرهایی شامل زمان تماس ۵-۱۲۰ دقیقه، مقدار جاذب (۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸، ۰/۰۴ g/L) در pH=۴ و غلظت رنگ ۲ mg/L بر حذف رنگ مالاشیت سبز بررسی شد. نتایج آنالیز UV-Vis نشان داد که در غلظت رنگ ۲ mg/L از مالاشیت سبز، با افزایش زمان تماس سوپرجاذب از ۵ تا ۴۵ دقیقه بازدهی حذف رنگ از ۳٪ به ۹۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار جاذب راندمان حذف افزایش و ظرفیت جذب رنگ کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصله، سوپرجاذب سنتز شده می‌تواند به عنوان یک جاذب مؤثر در حذف رنگ مالاشیت سبز از فاضلاب‌های صنعت نساجی و یا منابع آبی با آلودگی رنگی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: سوپرجاذب کیتوسان/اکریلیک اسید، پرتو گاما، حذف رنگ، مالاشیت سبز

Removal of malachite green dye using a natural adsorbent synthesized by radiation method

Radmehr, Mahsa^۱, Akhavan, Azam^{۲*}, Poursattar Marjani, Ahmad^۱

^۱- Department of Organic Chemistry, Faculty of Chemistry, Urmia University, Urmia, Iran

^۲- Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, a polymeric superabsorbent based on the natural polymer chitosan/acrylic acid was synthesized using gamma radiation at a dose of ۲۰ kGy and its application for the removal of malachite green dye was investigated. The structure of the synthesized adsorbent was confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The effects of variables including contact time (۵-۱۲۰ min), adsorbent amount (۰/۰۲, ۰/۰۴, ۰/۰۶, ۰/۰۸, ۰/۰۴ g/L) at pH=۴ and dye concentration of ۲ mg/L on the removal of malachite green dye were investigated. The results of UV-Vis analysis showed that at a dye concentration of ۲ mg/L of malachite green, with increasing the contact time of the superabsorbent from ۵ to ۴۵ min, the dye removal efficiency increased from ۳% to ۹۰%. Also, with increasing the amount of adsorbent, the removal efficiency increased and the dye absorption capacity decreased. Based on the results, the synthesized superabsorbent can be used as an effective adsorbent in removing malachite green dye from textile industry wastewaters or water sources with dye contamination.

Keywords: Chitosan/acrylic acid superabsorbent, Gamma radiation, Dye removal, Malachite green



۱- مقدمه

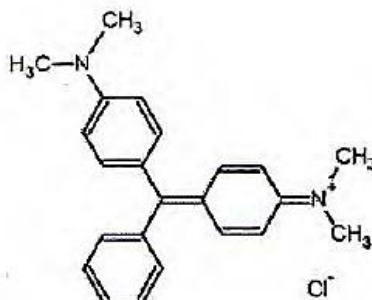
با توجه به گسترش روز افزون واحدهای صنعتی و فاضلاب‌های ناشی از آن، تعداد منابع آبی سالم رو به کاهش است. بنابراین آلودگی منابع آبی یکی از معضلات اجتماعی و اقتصادی محسوب می‌شود. فاضلاب حاصل از کارخانجات و مراکز تولیدی به دلیل دارا بودن ترکیبات گوناگون در مقادیر مختلف روند تصفیه آب را پیچیده می‌کند. یکی از بحرانی‌ترین آلاینده‌ها برای اکوسیستم‌های طبیعی ترکیبات رنگی به خصوص رنگزاهای آلی هستند [۱]. رنگ‌ها عموماً مواد آلی هستند که ساختار پیچیده دارند. این مواد غالباً سمی، دارای خصوصیات سرطان‌زایی، جهش‌زایی، تجزیه بیولوژیکی کم یا غیر قابل تجزیه بیولوژیک هستند که به عنوان یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین آلاینده‌های فاضلاب بسیاری از صنایع نساجی به شمار می‌روند [۲]. در بین آلاینده‌های رنگی مختلف، مالاشیت سبز که یک رنگ کاتیونی است به طور گسترده در صنعت رنگرزی استفاده می‌شود و همچنین در صنعت شایلات به عنوان یک ماده ضد قارچ و میکروب برای کنترل انگل و بیماری‌های ماهیان به کار گرفته می‌شود. رنگ مالاشیت سبز علاوه بر اینکه سمیت و تجمع بیولوژیکی در بافت‌ها دارد، تجزیه زیستی این نوع رنگ با توجه به ساختار آروماتیک آن، در محیط زیست به کندی انجام می‌شود [۳].

جذب از مهمترین تکنیک‌های قابل قبول جهت کاهش غلظت رنگهای حل شده از محلول‌های آبی است. مزایای این فرایند در مقایسه با دیگر فرایندهای جداسازی، سادگی در بهره‌برداری و ارزان بودن آن‌ها است. رایج‌ترین ماده جاذب، کربن فعال است که کارایی زیادی دارد ولی گران بودن و هزینه‌بر بودن احیای آن، باعث شده است که تمایل زیادی برای استفاده از آن نباشد [۴]. علاوه بر این، جاذب‌های مختلف دیگری همچون پوسته تخم مرغ، جاذب معدنی پامیس، بنتونیت و پودر استخوان ماهی برای حذف پساب رنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به هر حال، استفاده از جاذب‌ها با قیمت ارزان و با پتانسیل جذب بالا توسط محققین در حال توسعه می‌باشند که با مقدار مصرف کم، قدرت جذب بالایی داشته باشند و به محیط زیست صدمه نزنند. اخیراً بیشتر بررسی‌های محققان بر روی جاذب‌هایی متمرکز شده است که پایه طبیعی داشته و در مقادیر بالایی در طبیعت موجود باشند و برای محیط زیست مضر نباشند. همچنین، مشکلات اقتصادی و بازیابی جاذبها باعث شده است تا محققان بر روی جاذب‌هایی با قیمت ارزانتر متمرکز شوند [۵]. بسیاری از سوپرجاذب‌ها از پلیمرهای مصنوعی که دارای ثبات کم، هزینه تولید بالا و سازگاری کم با محیط زیست هستند، ساخته شده‌اند و برای غلبه بر این مشکلات از پلی‌ساکاریدهای طبیعی، با قیمت کم، غیر سمی، زیست تخریب پذیر در ساخت سوپرجاذب‌ها استفاده می‌شود [۶]. تاکنون منابع مختلفی برای حذف رنگ مالاشیت سبز و کیتوسان/آکرلیک اسید گزارش شده است که با استفاده از آغازگرها و کاتالیزورها بدون حضور پرتو سنتز انجام شده است [۷ و ۸]. ولی در خصوص حذف رنگ مالاشیت سبز با استفاده از جاذب ساخته شده با استفاده از پرتو گاما گزارشی ارائه نشده است. مزیت‌های استفاده از پرتو گاما برای سنتز سوپرجاذب ساده بودن فرایند و عدم نیاز به آغازگر و کاتالیزور است. از همه مهم‌تر این روش یک روش سبز به شمار می‌رود که با محیط زیست سازگاری دارد.

در این تحقیق با استفاده از پرتو گاما جاذب کیتوسان/آکرلیک اسید سنتز شد و تاثیر استفاده از این روش در عملکرد رنگبری جاذب با بررسی عوامل مؤثر از قبیل pH، زمان تماس، غلظت رنگ و مقدار جاذب مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد تجربی

پلیمر طبیعی کیتوسان از شرکت شیمیایی سیگما آلدردیج خریداری شد و رنگ مالاشیت سبز و تمام مواد شیمیایی دیگر در این کار از شرکت مرک تهیه شده است و تمام محلول‌ها با آب دیونیزه ساخته شدند. مالاشیت سبز یک تری فنیل متان است این رنگ سرطان‌زا، جهش‌زا و سمی است. فرمول کلرید مالاشیت سبز $C_{23}H_{25}ClN_2$ می‌باشد (شکل ۱).



شکل (۱): ساختار گسترده مالاشیت سبز

۱-۲- دستگاه‌ها

شناسایی و آنالیز سوپرجاذب‌ها با استفاده از دستگاه طیف سنجی مادون قرمز بروکر ساخت کشور آلمان و برای تعیین طول موج حداکثر جذب رنگ از دستگاه اسپکتروفتومتر^{۱۵} (UV/Vis Hatch Co, Germany) استفاده شد.

۳- روش‌ها

۱-۳ سنتز جاذب پلیمری

کیتوسان در غلظت ۰/۵ (wt)٪ در محلول اسیداستیک همراه با آب مقطر با استفاده از یک همزن مغناطیسی در دمای اتاق حل و سپس مخلوط خنثی شده (wt) ۷۵٪ اکریلیک‌اسید با هیدروکسید سدیم با محلول کیتوسان در دمای اتاق ترکیب شد. محلول به دست آمده به داخل ویال‌ها منتقل و درزبندی شد و تحت تابش با دز ۲۰ kGy در یک گاما سل Co^{60} با نرخ دز ۲/۵۲ kGy قرار گرفت و ژل سنتز شد. سپس سوپرجاذب کیتوسان/اکریلیک‌اسید به قطعات کوچک بریده شده و در دمای ۴۰ درجه سانتی گراد خشک گردید.

۲-۳ شرح آزمایش

برای تهیه محلول از رنگ مالاشیت سبز با غلظت ۲ mg/L، مقدار ۰/۲ mg از رنگ را در ۱۰۰ ml آب مقطر ریخته و روی همزن مغناطیسی همزده شد (pH = ۴). طیف این محلول توسط دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis بدست آمد (شکل ۲). شکل ۲ حداکثر جذب را برای مالاشیت سبز در طول موج ۶۰۹ nm نشان می‌دهد. در غلظت ۲ mg/L از رنگ، جاذب در مقادیر مختلف ۰ g، ۰/۰۵ g، ۰/۱ g، ۰/۲ g، ۰/۴ g، ۰/۶ g، ۰/۸ g، ۱ g به رنگ افزوده شد. بعد از مدت زمانهای مختلف تماس ۵ تا ۱۲۰ دقیقه، محلولهای رنگ و جاذب از سرنگ صافی عبور داده شد. میزان جذب رنگ محلولها توسط دستگاه اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد.

برای تعیین راندمان حذف رنگ از رابطه (۱) و مقدار ظرفیت جذب از رابطه (۲) استفاده شد.

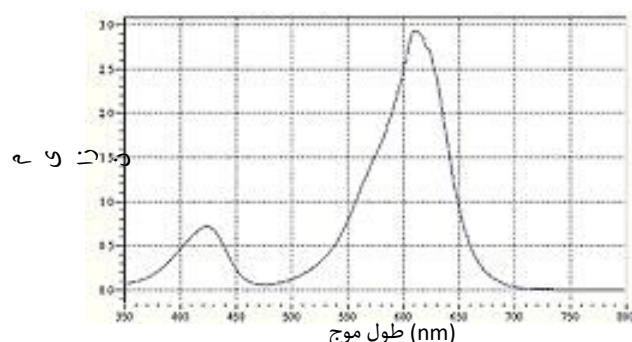
$$(1) \quad R = \frac{C - C_0}{C} \times 100 \quad (\%)$$

در این معادله R راندمان جذب رنگ (برحسب درصد)، C غلظت اولیه رنگ (mg/L) و C_0 غلظت رنگ پس از افزودن جاذب (mg/L) است.

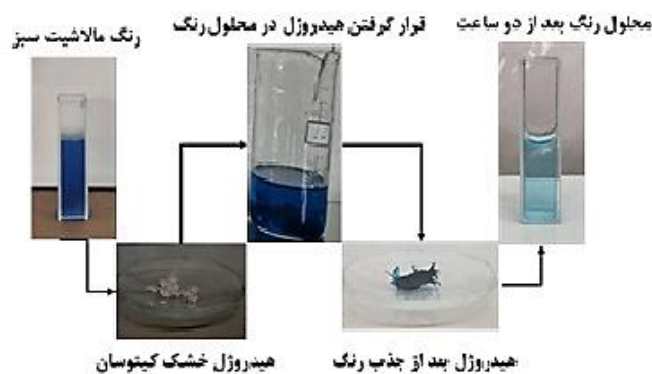
$$(2) \quad Q = \frac{C - C_0}{m} \quad (mg/g)$$

در این معادله Q ظرفیت جذب رنگ C، (mg/g) غلظت اولیه رنگ (mg/L) و C_0 غلظت رنگ پس از افزودن جاذب (mg/L)، m غلظت جاذب (V حجم نمونه (L) است.

^{۱۵} Spectrophotometer



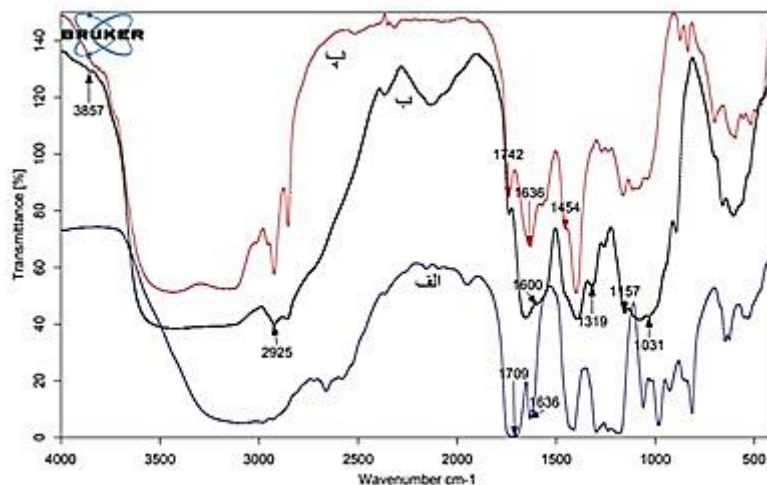
شکل (۲): طیف UV-Vis رنگ مالاشیت سبز



شکل ۳: مراحل جذب رنگ مالاشیت سبز با استفاده از سوپر جاذب کیتوسان/اکریلیک اسید

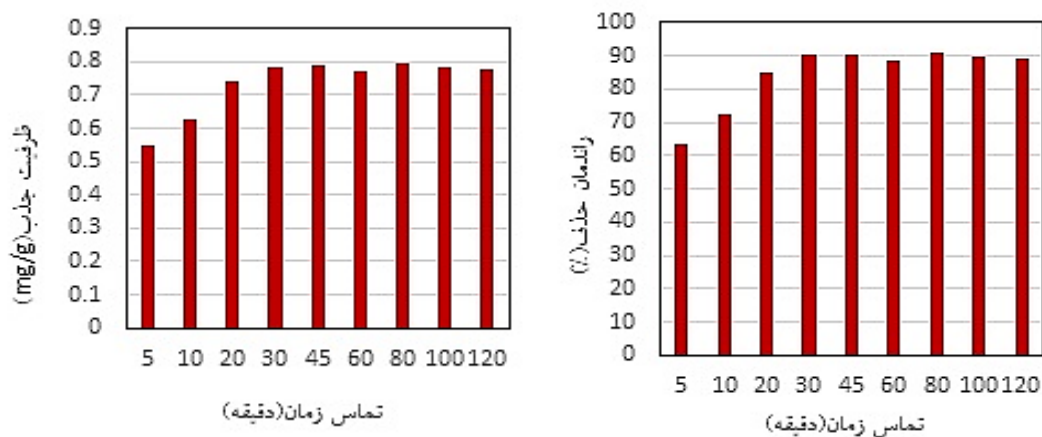
۴- نتایج

طیف FTIR مشخصات ساختاری کامپوزیت سنتز شده را در شکل ۴ نشان می‌دهد. طیف FTIR اکریلیک اسید (شکل ۴_الف) دارای نوارهای برجسته در 1636 cm^{-1} و 1709 cm^{-1} مرتبط با کشش C=O است. در شکل ۴_ب پیک‌های اصلی کیتوسان در 3257 cm^{-1} (کشش O-H)، 2925 cm^{-1} (کشش C-H)، 1600 cm^{-1} (خمش N-H)، 1319 cm^{-1} (کشش C-N) و 1031 cm^{-1} (کشش C-O) نشان داده شده است. در طیف کیتوسان/اکریلیک اسید (شکل ۴_پ)، علاوه بر باندهای مشخصه کیتوسان، سه پیک جذب جدید مشاهده می‌شود. پیک‌های جدید در 1636 cm^{-1} و 1742 cm^{-1} مربوط به گروه کربوکسیل پلی اکریلیک اسید پیوندی است و پیک 1454 cm^{-1} به دلیل کشش نامتقارن C-O آنیون کربوکسیلات پلی اکریلیک اسید پیوند شده بر روی کیتوسان است. این نتایج نشان می‌دهد که مونومرهای اکریلیک اسید بر روی کیتوسان پیوند زده شده اند [۹].



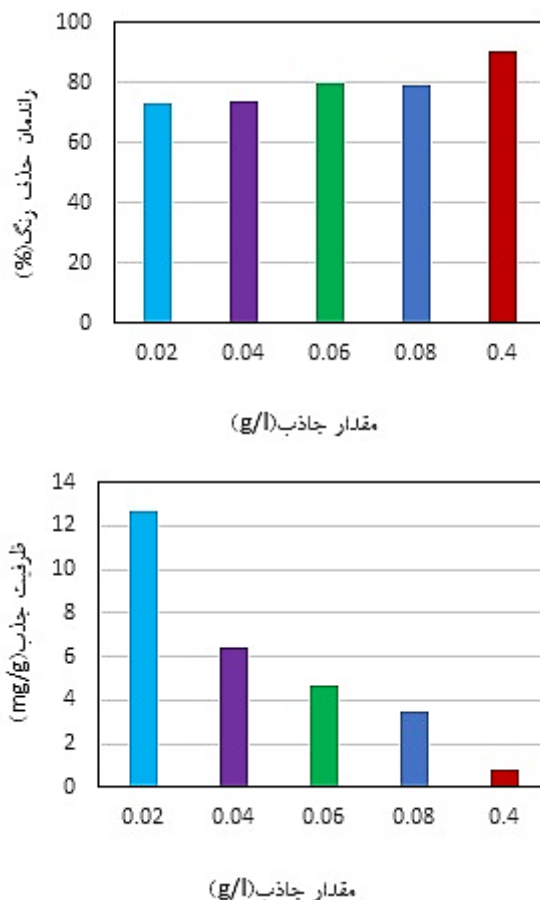
شکل ۴: طیف بینی FTIR جاذب سنتز شده: طیف مادون قرمز، اکریلیک اسید (الف) - کیتوسان (ب) - کیتوسان/اکریلیک اسید (پ)

برای اندازه گیری راندمان حذف و ظرفیت جذب سوپرجاذب، محلول رنگی با غلظت 2 mg/L در $\text{pH} = 4$ و 0.4 g سوپرجاذب کیتوسان تهیه شد و تاثیر مدت زمان تماس از ۵ دقیقه به ۱۲۰ دقیقه بر روی کارایی حذف رنگ مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار (۱) مشاهده می شود با افزایش مدت زمان تماس، در ابتدا مقدار جذب بسیار سریع بوده است و پس از آن، میزان جذب به یک حد ثابت می رسد. این امر می تواند به دلیل کاهش غلظت رنگ با گذشت زمان و کاهش نقاط فعال جاذب باشد [۱۰]. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار (۱)، زمان تماس ۴۵ دقیقه که در آن راندمان حذف ۹۰٪ و ظرفیت جذب 0.788 mg/g می باشد به عنوان زمان تماس بهینه انتخاب گردید



نمودار (۱): تاثیر زمان بر کارایی حذف رنگ ملاشیت سبز توسط سوپرجاذب کیتوسان/اکریلیک اسید

برای بررسی اینکه آیا با مقادیر کمتری از این مقدار جاذب نیز حذف رنگ به طور موثر انجام می شود، مقادیر کمتر از $0.02/0, 0.04/0, 0.06/0, 0.08/0 \text{ g/L}$ در زمان تماس بهینه (۴۵ دقیقه) به محلول رنگی افزوده شده و راندمان حذف و ظرفیت جذب مورد بررسی قرار گرفت (نمودار ۲). طبق نمودار، با کاهش مقدار جاذب، راندمان حذف رنگ تا 72.8% کاهش و ظرفیت جذب تا 0.126 mg/g افزایش می یابد.



نمودار (۲): تأثیر مقدار جاذب بر میزان حذف رنگ مالاشیت سبز توسط مقدار جاذب 4/0 g/L

۵- نتیجه‌گیری

سوپرجاذب‌ها به دلیل جذب بالا و قابلیت احیا و توانایی حذف انواع مختلف آلاینده‌ها کاربرد زیادی پیدا کرده است. همچنین پلیمر طبیعی کیتوسان به دلیل داشتن گروه‌های عاملی موثر (کربوکسیلات و آمید) در ساختار خود می‌تواند نقش مهمی در جذب رنگها از خود نشان دهند. در این مطالعه سوپرجاذب پلیمری بر پایه کیتوسان/اکریلیک اسید توسط پرتو گاما به عنوان یک روش سبز سنتز شد و کاربرد آن در فرآیند حذف رنگ مالاشیت سبز مورد بررسی قرار گرفت. ساختار سوپرجاذب سنتز شده توسط طیف سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) تایید شد. نتایج نشان داد که کیتوسان می‌تواند دارای ظرفیت جذب مناسبی برای آلاینده‌های رنگی داشته باشد. همین‌طور مشخص شد که زمان تماس و مقدار جاذب تأثیر زیادی بر بازدهی حذف دارد. از این رو با توجه به هزینه پایین، غیرسمی بودن و راندمان حذف مناسب، این جاذب می‌تواند به عنوان یک گزینه مؤثر برای حذف رنگ از محلول‌های آبی مورد توجه قرار گیرد. در تحقیقات آینده می‌توان از نانو ذره‌ها به عنوان هیدروژل جاذب رنگ و سایر رنگینه‌ها به جای مالاشیت سبز برای جذب بیشتر در دزهای مختلف پرتو دهی استفاده شود.

۶- منابع

۱. Saskia J. Boardman, Rajan Lad, David C. Green, and Paul D. Thornton. (۲۰۱۷). "Chitosan Hydrogels for Targeted Dye and Protein Adsorption". *Journal of Applied Polymer Science*, ۱۳۴ (۲۱). ۴۴۸۴۶.



۲. Mahmoodi NM, Salehi R, Arami M, Bahrami H. (۲۰۱۱). "Dye removal from colored textile wastewater using chitosan in binary systems". *Desalination*, ۲۶۷(۱): ۶۴-۷۲
۳. Aghel, S., Bahramifar, N. and Younesi, H.) ۲۰۱۶(. "Kinetics of photocatalytic degradation of reactive black B using core-shell TiO_2 -coated magnetic nanoparticle, $\text{Fe}_3\text{O}_4 @ \text{SiO}_2 @ \text{TiO}_2$ ". *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, ۳, ۲۵۳-۲۵۹.
۴. Balla W, Essadki AH, Gourich B, Dassaa A, Chenik H, and Azzi M.)۲۰۱۰(. ("Electrocoagulation/electroflotation of reactive, disperse and mixture dyes in an external-loop airlift reactor". *J Hazard Mater*; ۱۸۴(۱-۳): ۷۱۰-۶.
۵. Sadeghi Kiakhani M, Arami M.)۲۰۱۲(. (Elimination of C.I basic violet ۱۶ from colored textile effluent using chitosan-ethyl acrylate as a bio-adsorbent". *J Advance Mater Coatings*; ۱: ۱۵-۲۶.
۶. Qureshi, M.A., Nishat, N., Jadoun, S., Ansari, M.Z. (۲۰۲۰)."Polysaccharide based superabsorbent hydrogels and their methods of synthesis": A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, ۱, ۲۵. ۱۰۰۰۱۴.
۷. Mirahsani, A., Badiei, A., Shahbazi, A., Hasheminejad, H. and Sartaj, M.) ۲۰۱۵(. "Optimization of the adsorption of malachite green on the NH_2 -SBA-۱۵ nano-adsorbent using the Taguchi method by Qualitek-۴ software an isotherm, kinetic and thermodynamic study". *Journal of Water and Wastewater*, ۲۵(۶), ۱۰-۱۹.
۸. Jayanudin, Retno S. D. Lestari, Dhena Ria Barleany, Alia Badra Pitaloka, Meri Yulvianti, Dimas Prasetyo, Dendy Vito Anggoro and Adam Ruhiatna. (۲۰۲۲). "Chitosan-Graft-Poly (acrylic acid) Superabsorbent's Water Holding in Sandy Soils and Its Application in Agriculture". *Polymers*. ۱۴, ۵۱۷۵.
۹. Benamer a,n .S, Mahlous M. a , Tahtat a .D , Nacer-Khodja a .A, Arabi a .M , Lounici b .H ,and Mameri b N. (۲۰۱۱)." Radiation synthesis of chitosan beads grafted with acrylic acid for metal ions sorption". *Radiation Physics and Chemistry*. ۸۰ ۱۳۹-۱۳۹۷
۱۰. Liu Q, Yang B, Zhang L, Huang R.)۲۰۱۵(.("Adsorption of an anionic azo dye by cross - linked chitosan/bentonite composite". *Intern J bio macro*; ۷۲: ۱۱۲۹-۳۵



طراحی یک سیستم مقطع‌نگاری رایانه‌ای با پرتو گاما برای تشخیص انباشت رسوبات در خطوط

انتقال نفت (کد مقاله : ۱۱۵۸)

زینب متولی باشی نائینی - دکتر محمدرضا محمدیان بهبهانی^{۱۶} - دکتر فرشاد فقیهی - دکتر رسول صفری - دکتر عطاءاله ربیعی

بخش مهندسی هسته‌ای - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه شیراز - ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸ - شیراز - ایران

چکیده:

تهنیشینی رسوبات در لوله‌های نفتی می‌تواند منجر به کاهش بازدهی تولید، انسداد جریان نفت و کاهش ایمنی شود. این پژوهش نتایج طراحی اولیه یک سیستم تشخیص غیر مخرب رسوبات به روش مقطع‌نگاری رایانه‌ای با پرتوهای گاما برای مقاصد تحقیقاتی، با امکانات موجود در بخش مهندسی هسته‌ای دانشگاه شیراز را ارائه می‌کند. به این منظور، سیستم پیشنهادی در کد هسته‌ای ۹.۲ GATE طراحی و الگوریتم‌های بازسازی تصویر شامل الگوریتم پس‌نگاشت فیلترشده (FBP) و الگوریتم MLEM برای دو سناریو رسوبات آلی (پلیاتیلن) و رسوبات معدنی (کلسیمکربنات) پیاده‌سازی و بررسی شدند. نتایج نشان داد که الگوریتم MLEM در کاهش آرتیفکت تصاویر عملکرد بهتری داشته و الگوریتم FBP نیز تصاویر با تباین بالاتری ایجاد می‌کند.

کلمات کلیدی: مقطع‌نگاری رایانه‌ای با پرتو گاما، الگوریتم بازسازی تصویر MLEM، الگوریتم پس‌نگاشت فیلترشده (FBP)، رسوبات آلی و معدنی، شبیه‌سازی GATE

Design of a Gamma Computed Tomography System for Identification of Scale Deposition in Oil Pipelines

Zeinab Motevalli Bashi Naini - Mohammad Reza Mohammadian Behbahani - Farshad Faghihi- Rasool Safari- Ataollah Rabiei

Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University

Abstract:

Scale deposition in oil pipelines can lead to decrease of production efficiency, blockage of oil flow, and safety risks. This research presents the initial design results of a non-destructive scale detection system using gamma-ray computed tomography for research purposes, utilizing the facilities available in the Nuclear Engineering Department of Shiraz University. For this purpose, the proposed system was designed in the GATE ۹.۲ code, and image reconstruction algorithms including the filtered back-projection (FBP) algorithm and the MLEM algorithm

^{۱۶}E-mail: m.mohammadian@saadi.shirazu.ac.ir



were implemented and evaluated for two scenarios of organic (polyethylene) and inorganic (calcium carbonate) scale deposition. The results showed that the MLEM algorithm performs better in reducing image artifacts, while the FBP algorithm produces images of higher contrast. **Key words:** Gamma ray computed tomography, MLEM reconstruction algorithm, Filtered back-projection algorithm, Organic and inorganic scales, GATE simulation

۱ - مقدمه:

در میان انواع مختلف روشهای تشخیص ضخامت رسوبات نفتی، تشخیص غیرمخرب کارآمدترین و مناسبترین رویکرد به شمار می‌آید. روشهای هسته‌ای مانند روشهای مبتنی بر پرتوهای گاما و ایکس نیز که در زمره روشهای اندازه‌گیری سریع و غیرمخرب هستند، برای تشخیص تجمع رسوبات در خطوط لوله به کار گرفته شده‌اند. پژوهش حاضر بر طراحی یک سیستم تشخیص رسوبات در خطوط انتقال نفت با استفاده از روش مقطع‌نگاری رایانه‌ای با تابش گامای عبوری تمرکز دارد. در این رویکرد اطلاعات داخل لوله به‌صورت تصاویر دیجیتالی به دست می‌آیند.

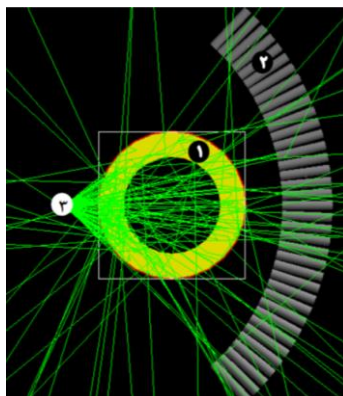
در سال ۲۰۱۹ عسکری و همکاران سیستمی را پیشنهاد دادند که در آن، مقطع‌نگاری پرتو گاما مبتنی بر استفاده از یک آشکارساز سوسوزن میلی‌های $CsI(Na)$ یکپارچه (به‌جای چندین آشکارساز) و چشمه گامای ^{137}Cs توسعه داده شد. به دلیل یکپارچه بودن آشکارساز، این سیستم جهت تعیین موقعیت برهمکنش پرتوهای گاما، از دو تیوب تکثیرکننده فوتونی متصل به دو طرف انتهایی آشکارساز و اندازه‌گیری تضعیف نور درون آشکارساز استفاده می‌کند [۱]. مجدداً در سال ۲۰۱۹ عسکری و همکاران تصویربرداری از چند فانتوم در اندازه‌های مختلف را هم به‌صورت تجربی و هم شبیه‌سازی در برنامه $^{4}Geant$ گزارش کردند. طیف به‌دست‌آمده و قدرت تفکیک انرژی و مکانی در حالت تجربی و شبیه‌سازی مقایسه و مشابهت خوبی بین آن‌ها مشاهده گردید. در این مطالعه سه الگوریتم بازسازی تصویر ART^+ ، $DSGA$ و $MLEM$ با یکدیگر مقایسه شدند [۲]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ توسط Xin و $Wang$ بر روی مقطع‌نگاری پرتو گاما لوله‌های نفتی مبتنی بر نگاشتهای ناقص، برای بهینه‌سازی پارامترهای اسکن و کاهش دوز تابش، انجام شده است. در اینجا از یک چشمه ^{241}Am و یک آرایه ۱۷ تایی آشکارساز $CdZnTe$ استفاده شده است. برای بازسازی تصاویر از الگوریتمهای ART^+ ، $Landweber$ و TV استفاده شده است [۳]. در سال ۲۰۱۲ Kim و همکاران یک سیستم مقطع‌نگاری رایانه‌ای صنعتی قابل حمل را در کد مونت کارلو $MCNPX$ شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتمهای ART^+ ، TV و $MLEM$ تصاویر بازسازی و با هم مقایسه شدند. این گروه در همان سال پژوهش خود را به یک سیستم واقعی توسعه دادند که در آن همه ملزومات پژوهش قبلی در کار عملی رعایت شد، با این تفاوت که تنها از الگوریتم $MLEM$ برای بازسازی تصویر استفاده شده است. در این سیستم تشخیصی از ۳۶ آشکارساز ۷۲ کانالی استفاده شده است [۴]. در سال ۲۰۲۱ $Wibisono$ و همکاران در یک کار تجربی، یک سیستم سیتی اسکن نسل سوم را طراحی کردند که از یک چشمه ^{137}Cs و ۳۱ عدد آشکارساز Nal استفاده می‌کند. در این مطالعه برای بازسازی تصاویر از روش پس‌نگاشت فیلتر شده FBP^{17} استفاده شده است [۵].

^{۱۷} Filtered Backprojection



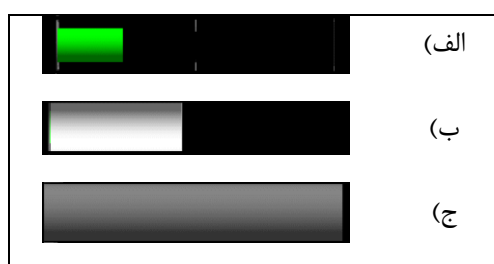
۲- روش کار:

در این پژوهش شبیه‌سازی و طراحی یک سیستم مقطع‌نگاری رایانه‌ای نسل سوم با امکانات موجود در بخش مهندسی هسته‌ای و مرکز تحقیقات تابش دانشگاه شیراز مدنظر بوده است. شکل ۱ تصویر کلی از شبیه‌سازی این دستگاه در کد هسته‌ای GATE ۹.۲ را نشان می‌دهد. جزئیات شبیه‌سازی و ملاحظات لازم در ادامه آورده شده‌اند.



شکل ۱- هندسه سیستم مقطع‌نگاری طراحی شده در کد GATE شامل (۱): لوله، (۲): آرایه آشکارسازها و (۳): چشمه.

در این پروژه لوله‌های با شعاع ۳۰ سانتیمتر از جنس آهن شبیه‌سازی شده است. دو نوع رسوب آلی (پلیاتیلن) و رسوب معدنی (کلسیم‌کربنات) مورد بررسی قرار گرفته و تصاویر بازسازی شده آنها تحت هندسه یکسان با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل ۱، نسبت یک به سه از کل حجم لوله از رسوبات پر شده است و باقی فضا خالی است. ۳۷ عدد آشکارساز سزیم یدید با ارتفاع ۲ اینچ و قطر ۱ اینچ (مشابه آشکارساز موجود در بخش مهندسی هسته‌ای دانشگاه شیراز) با در نظر گرفتن بدنه و سایر اجزای تشکیل‌دهنده آن (شکل ۲) در کد هسته‌ای GATE طراحی شدند. در پیاده‌سازی عملی، لازم است آشکارساز موجود روی موتور پله‌ای سوار شده و برای قرارگیری در ۳۷ نقطه طراحی شده، بچرخد.



شکل ۲- شبیه‌سازی الف) کریستال سزیم یدید داخل محفظه آشکارساز ب) بازتابنده اطراف کریستال آشکارساز با شعاع ۱/۸۹ و ارتفاع ۱۰/۳۷ سانتیمتر ج) محفظه بیرونی آشکارساز از جنس استیل با شعاع ۲ و ارتفاع ۲۱ سانتیمتر.

فاصله چشمه و آشکارساز از مرکز فانتوم برابر ۴۲ سانتیمتر محاسبه شده است. پلیاتیلن با فرمول شیمیایی $(C_2H_4)_n$ متشکل از عناصر با عدد اتمی پایین است که تضعیف چندانی برای پرتو گاما ایجاد نمیکند و بنابراین انتظار میرود با اکتیویته‌های بسیار پایین هم امکان تصویربرداری وجود داشته باشد. اما در رسوب کلسیم کربنات $(CaCO_3)$ به علت عدد اتمی مؤثر بالاتر، میزان



اکتیویته چشمه‌ای که باید استفاده شود بیشتر خواهد بود. به این ترتیب در هر دو سناریو، چشمه نقطه‌ای $137Cs$ در نظر گرفته شد که برای رسوب پلیاتیلن، اکتیویته چشمه ۱۰۰ کیلو بکرل و در رسوب کلسیم کربنات، ۱ مگابکرل تعیین شد.

در این پروژه پس از بدست آوردن شمارش آشکارسازها از خروجی کد هسته‌ای GATE، ابتدا نگاشته‌ها مطابق فرمول (۱) ساخته شدند:

$$p = -\frac{N}{N_0} \quad (1)$$

که در آن N نشان‌دهنده مقادیر شمارش شده آشکارسازها در هر زاویه (با حضور فانتوم) و N_0 مقادیر ثبت شده بدون حضور فانتوم هستند. سپس با استفاده از نگاشته‌های بدست آمده، تصاویر FBP با فیلتر شیپلوگان^{۱۸} بازسازی شدند [۶][۷][۸][۹][۱۰]. در این پروژه ۳۶۰ نگاشت حول یک دایره کامل گرفته شده است. برای الگوریتم تکرارشونده MLEM^{۱۹} تصاویر با پیاده‌سازی فرمول (۲) بازسازی شدند [۸].

$$n_i^{[k+1]} = \frac{n_i^{[k]}}{\sum_j w_{ij}} \cdot \sum_j w_{ij} \frac{p_j}{\sum_l w_{lj} n_l^{[k]}} \quad (2)$$

که در آن بازسازی یک برش دوبعدی با N در N پیکسل در نظر است:

$$\vec{N} = \{n_1, n_2, \dots, n_{N^2-1}\} \quad (3)$$

در این پروژه تصاویر ۱۲۸ در ۱۲۸ پیکسل هستند. هدف بازسازی تصویر، تخمین مقادیر n_i است. p_j ها مؤلفه‌های بردار نگاشت w_{ij} ماتریس سیستم نامیده میشود و مقادیر آن از نسبت ناحیه هاشور خورده هر پیکسل به کل مساحت همان پیکسل در ماتریس سیستم به دست می‌آیند [۸].

۳ - نتایج:

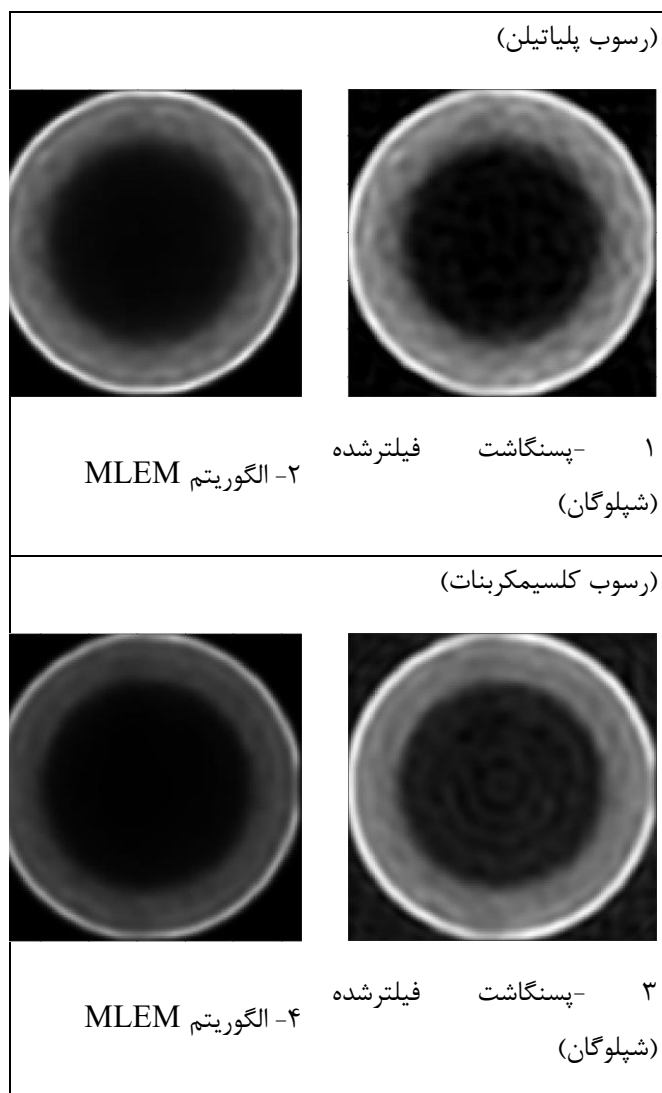
تصاویر بازسازی شده مربوط به دو سناریو رسوبات آلی (پلیاتیلن) و معدنی (کلسیم کربنات) در شکل ۳ آورده شده است. تعداد تکرارهای مناسب الگوریتم MLEM در هر دو مورد، برابر ۳۳ تکرار تعیین شده است (مراحل تعیین تکرار مناسب، برای رعایت اختصار آورده نشده است). در سناریو رسوب پلیاتیلن، ابتدا با آزمون و خطا، کمترین اکتیویته مورد نیاز ۱۰۰ کیلو بکرل تعیین شد. نمودارهای ستون وسط (ستون ۶۴ام) تصاویر بازسازی شده از الگوریتم‌های FBP و MLEM از رسوب پلیاتیلن در شکل ۴

^{۱۸} Shepp-Logan

^{۱۹} Maximum Likelihood Expectation Maximization



قابل‌رؤیت هستند. همچنین در جدول ۱ دو مورد از معیارهای ارزیابی تصاویر بازسازی‌شده ($SSIM^{۲۰}$ و $PMSE^{۲۱}$) آورده شده است.



شکل ۳- تصاویر بازسازی‌شده با الگوریتمهای FBP و MLEM در رسوبات پلیاتیلن و کلسیمکربنات.

در شکل ۴ دیده میشود که نمودار الگوریتم MLEM از آرتیفکت کمتری برخوردار است. همچنین با الگوریتم MLEM، ضخامت لوله با روزلوشن بهتری بازسازی شده است، اگرچه در مرز رسوب و فضای خالی، مات شدگی در تصویر MLEM بیشتر

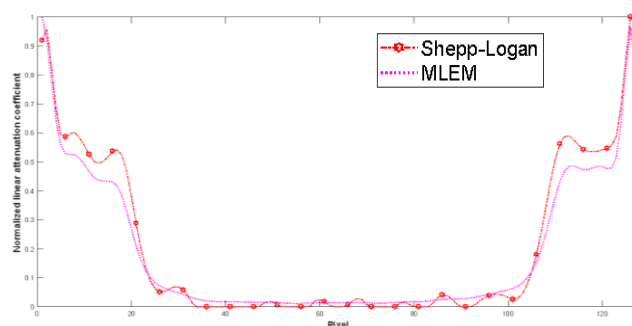
^{۲۰} The Structural Similarity Index measure

^{۲۱} Percentage Mean Squared Error

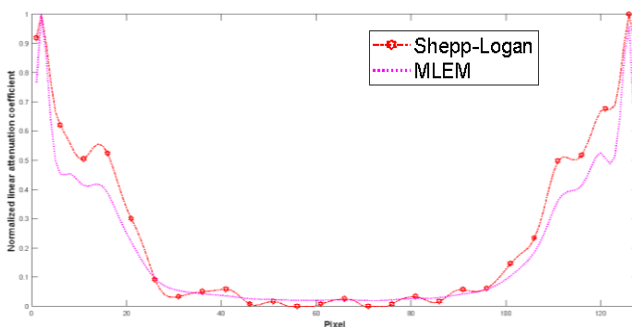


است. از طرفی، نمودار تصویر FBP مقداری بالاتر از نمودار الگوریتم MLEM است که بیانگر تباین بالاتر تصویر بازسازی شده توسط این الگوریتم است.

در رسوبات کلسیمکربنات، ابتدا با آزمون و خطا، کمترین اکتیویته مورد نیاز ۱ مگابکرل تعیین شد. نمودارهای ستون ۱۶۴ تصاویر بازسازیشده در شکل ۵ آمده است. با نگاهی به شکل ۵ دیده میشود که نمودار الگوریتم MLEM از آرتیفکت کمتری برخوردار است. در خصوص قدرت تفکیک و تباین تصاویر بازسازی شده، نتایج مانند رسوبات پلیاتیلن است.



شکل ۴- نمودارهای ستون ۱۶۴ تصاویر بازسازیشده با الگوریتمهای FBP و MLEM در سناریو رسوب پلیاتیلن.



شکل ۵- نمودارهای ستون ۱۶۴ تصاویر بازسازیشده از پسنگاشت فیلترشده و الگوریتم MLEM برای رسوب کلسیمکربنات.

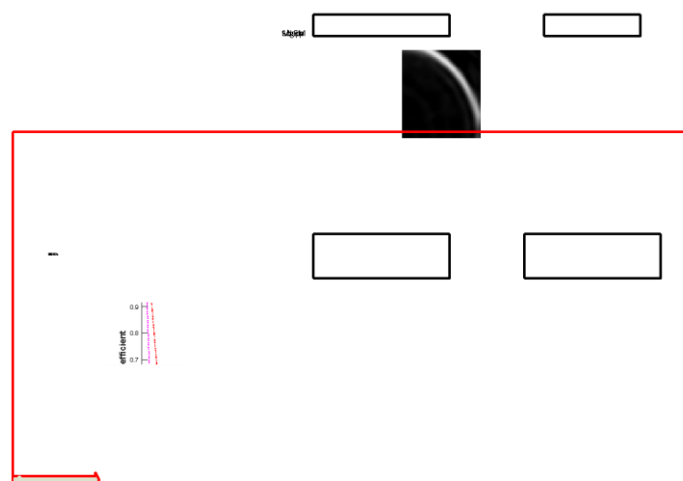
در جدول ۱ دیده میشود که مقادیر SSIM برای الگوریتم MLEM در هر دو نوع رسوبات، نسبت به الگوریتم FBP به مقدار جزئی بیشتر است؛ که بیانگر شباهت بیشتر الگوی بافتاری پیکسلهای تصویر اصلی و تصویر بازسازیشده الگوریتم MLEM است. مقدار خطای مقادیر بازسازی شده پیکسلهای تصویر نسبت به تصویر مورد انتظار را نشان می‌دهد. بنابراین هر چند بافت تصاویر بازسازی شده به تصویر اصلی نزدیک باشد، اما اگر مقدار مطلق مقادیر پیکسل با مقادیر مورد انتظار متفاوت باشد، شاخص PMSE از صفر فاصله خواهد گرفت. در جدول ۱ ملاحظه می‌شود که الگوریتم FBP در شاخص PMSE وضعیت بهتری نسبت به الگوریتم MLEM داشته است، خصوصاً در مورد رسوب پلی اتیلن.



جدول ۱- معیارهای ارزیابی تصاویر بازسازی شده با الگوریتمهای مختلف در رسوبات مختلف.

		SSIM	PMSE
رسوبات پلیاتیلن	FBP	۰.۴۱	۱۴٪
	MLEM	۰.۴۴	۲۸٪
رسوبات $CaCO_3$	FBP	۰.۳	۱۵٪
	MLEM	۰.۳۴	۱۸٪

در شکل ۶، به منظور بررسی هندسه‌های نامتقارن، یک الگوی هلالی از رسوب پلی اتیلن نیز بررسی شده است. با نگاهی به شکل ۶ دیده میشود که الگوریتم MLEM آرتیفکتهای تصویر را به خوبی حذف کرده ولی تباین تصویر این الگوریتم نسبت به FBP پایینتر بوده و تصویر در مجموع تیرهتر دیده می‌شود.



شکل ۶- تصاویر بازسازی شده با الگوریتمهای MLEM و FBP و نمودارهای سطر ۶۴ام تصاویر بازسازی شده از آنها در رسوب پلیاتیلن.

۴ - بحث و نتیجه گیری:

نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر، بخشی از نتایج طراحی و شبیه سازی یک سیستم مقطع نگاری پرتوگاما با کاربرد تحقیقاتی در دانشگاه شیراز است. اکتیویته محاسبه شده برای چشمه به راحتی قابل دسترس است. با طراحی گنتری مناسب، امکان چرخش آشکارساز برای اخذ داده و نگاشت در زوایای مختلف فراهم خواهد شد. دو مورد از الگوریتمهای بازسازی تصویر شناخته شده برای بازسازی تصویر مورد مقایسه قرار گرفتند. با مقایسه نمودارهای شکل ۴ و شکل ۵ میتوان دید به طور کلی با وجود استفاده



از اکتیویته بالاتر، ماتشدگی در سناریو رسوب کلسیمکربنات در مرز بین رسوب و هوا بیشتر بوده است. در مورد الگوریتمهای بازسازی تصویر با اینکه تباین تصویر پسنگاشت فیلترشده بهتر بوده اما این فیلتر عملکرد خوبی در بازسازی ضخامت لوله از خود بروز نداده و آن را پهنتر نشان داده است. همچنین الگوریتم MLEM در کاهش آرتیفکت تصاویر عملکرد بهتری نشان داده است.

نتایج این پژوهش اهمیت توجه به نوع رسوبات و نوع الگوریتم بازسازی تصویر را در طراحی سیستم مقطع‌نگاری گاما نشان داد. بر این اساس در بررسیهای آینده، سایر الگوریتمهای بازسازی تصویر و سایر الگوها و جنس رسوبات داخل لوله نیز بررسی خواهند شد.

۵ - مراجع:

- [۱] M. Askari, A. Taheri, M. Mojtahedzadeh Larijani, A. Movafeghi, and H. Faripour, "A gamma-ray tomography system to determine wax deposition distribution in oil pipelines," Rev. Sci. Instrum., vol. ۹۰, no. ۷, p. ۷۵۱۰۳, ۲۰۱۹.
- [۲] M. Askari, A. Taheri, and A. Movafeghi, "Industrial gamma computed tomography using high aspect ratio scintillator detectors (A Geant^۴ simulation)," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. ۹۲۳, pp. ۱۰۹–۱۱۷, ۲۰۱۹.
- [۳] S. Xin and H. X. Wang, "Gamma-ray CT from incomplete projections for two-phase pipe flow," Rev. Sci. Instrum., vol. ۸۸, no. ۲, p. ۲۵۱۰۶, ۲۰۱۷.
- [۴] J. Kim, S. Jung, J. Moon, J. G. Park, J. Jin, and G. Cho, "Development of transportable gamma-ray tomographic system for industrial application," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. ۶۹۳, pp. ۲۰۳–۲۰۸, ۲۰۱۲.
- [۵] W. Wibisono, B. P. Hadi, P. Sidaurok, P. Prawito, and S. K. Wijaya, "Application of fan-beam computed tomography for the analysis of scaling distribution in geothermal pipeline," in AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, ۲۰۲۱.
- [۶] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and S. L. Eddins, "Using MATLAB®," ۲۰۰۹.
- [۷] J. T. Bushberg, J. A. Seibert, J. Leidholdt, M. Edwin, and J. M. Boone, "The essential physics of medical imaging [kindle edition]." Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, a Wolters Kluwer business, ۲۰۱۲.
- [۸] M. A. Haidekker, "Medical imaging technology." Springer, ۲۰۱۳.
- [۹] R. C. Gonzalez, Digital image processing. Pearson education india, ۲۰۰۹.
- [۱۰] G. L. Zeng, Medical Image Reconstruction: From Analytical and Iterative Methods to Machine Learning. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, ۲۰۲۳.



تشخیص رژیم و پیش‌بینی کسر حجمی هوا در جریان دوفازی آب و هوا با استفاده از روش غیرتهاجمی تضعیف گاما و شبکه عصبی کانولوشنال (کد مقاله : ۱۱۵۹)

- اعرابی جشوقانی، پیمان^{۱*} - شجاعی جشوقانی، فاطمه^۲ - فقهی، سید امیر حسین^۳ - جعفری، آزاده^۵
۱. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، گروه پژوهشی سیستم‌های جانبی و پرتودهی
۲. دانشگاه اصفهان، دانشکده فیزیک، گروه مهندسی هسته‌ای - کاربرد پرتوها
۳. دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی
۴. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها
۵. دانشگاه تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده:

این مطالعه به بررسی ترکیب تکنیک‌های تضعیف پرتو گاما و شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای شناسایی دقیق رژیم‌های جریان و پیش‌بینی کسر حجمی گاز در جریان دوفازی می‌پردازد. داده‌های تجربی با استفاده از یک حلقه جریان دوفازی آب و هوا جمع‌آوری و با یک مدل شبکه عصبی کانولوشنی که برای پیچیدگی‌های دینامیک چندفازی بهینه‌سازی شده است، تحلیل شدند. نتایج نشان‌دهنده استحکام مدل در پیش‌بینی دقیق کسرهای حجمی گاز و طبقه‌بندی رژیم‌های جریانی است. این پژوهش بر هم‌افزایی بین روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر تابش و یادگیری ماشین پیشرفته تأکید دارد و راه‌حل‌های عملی برای بهبود دقت و کارایی اندازه‌گیری در کاربردهای صنعتی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: جریان دوفازی، پیش‌بینی کسر حجمی گاز، تشخیص رژیم جریان، طیف ارتفاع پالس

Non-Invasive Gamma Attenuation and Convolutional Neural Networks for Regime Identification and Air Volume Fraction Prediction in Air-Water Two-Phase Flow

P. Aarabi Jeshvaghani^{۱,۲*}, F. Shojaei Jeshvaghani^۳, SAH. Fegghi^۴, A. Jafari^۵

۱. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran

۲. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran

۳. School of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

۴. Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

۵. School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran



Abstract:

This study explores the integration of gamma-ray attenuation techniques and convolutional neural networks (CNNs) for precise flow regime identification and gas volume fraction prediction in two-phase flow. Experimental data were collected using a specialized flow loop and analyzed with a CNN model, optimized for the complexities of multiphase dynamics. The results demonstrated the model's robustness in accurately predicting gas volume fractions and classifying flow regimes. This work highlights the synergy between radiation-based measurement methods and advanced machine learning, offering practical solutions to improve measurement accuracy and efficiency in industrial applications.

Key words: Two-phase flow, Gas volume fraction prediction, Flow regime identification, Pulse height distribution

۱ - مقدمه:

جریان چندفازی، به عنوان یکی از جنبه‌های بنیادی فرآیندهای صنعتی مانند رآکتورهای هسته‌ای و مهندسی نفت و گاز [۱،۲]، چالشی اساسی در اندازه‌گیری دقیق نرخ جریان و کسر حجمی گاز^{۲۲} محسوب می‌شود. روش‌های متعددی، از جمله تضعیف پرتو گاما [۳،۴] و تکنیک‌های دیگری مانند ونتوری^{۲۳}، اریفیس^{۲۴} و دبی‌سنج مخروطی^{۲۵} [۵-۸]، برای اندازه‌گیری‌های دقیق به کار گرفته می‌شوند. در میان این روش‌ها، تکنیک‌های مبتنی بر تابش به دلیل غیرتهاجمی بودن، سادگی و دقت بالای خود مورد توجه روزافزونی قرار گرفته‌اند [۹،۱۰].

پژوهشگران به طور فزاینده‌ای به تکنیک‌های محاسبات نرم، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی^{۲۶}، برای حل مسائل مربوط به جریان و انتقال حرارت روی آورده‌اند [۱۱،۱۲]. از این رو، ترکیب شبکه عصبی مصنوعی و تکنیک تضعیف پرتو گاما پتانسیل دستیابی به نتایج مثرمتری در شناسایی رژیم جریان و پیش‌بینی کسرهای حجمی را دارد. تکنیک تضعیف پرتو گاما برای شناسایی رژیم جریان و پیش‌بینی کسر حجمی در خطوط لوله جریان دو فازی [۱۳،۱۴] و همچنین شناسایی رژیم جریان همراه با پیش‌بینی کسر حجمی در خطوط لوله جریان سه فازی [۱۵] استفاده می‌شود.

ما^{۲۷} و همکارانش با استفاده از ونتوری و روش تضعیف گاما اقدام به دبی‌سنجی جریان سه فازی هوا-آب-نفت کردند. در این پژوهش از یک خم T شکل برای تبدیل جریان از حالت افقی به عمودی استفاده شده که وظیفه همگن کردن جریان سه فازی را دارد. با در نظر گرفتن ضریب لغزش بین فاز آب و نفت در رژیم مشخص لایه‌ای موفق به پیش‌بینی دبی هر یک از فازها شدند. میزان خطای نسبی برای دبی گاز برابر با $\pm 8\%$ ، برای دبی آب $\pm 15\%$ و برای دبی نفت $\pm 20\%$ گزارش شده است [۱۶].

^{۲۲} Gas Volume Fraction (GVF)

^{۲۳} Venturi

^{۲۴} Orifis

^{۲۵} Cone-meter

^{۲۶} Artificial Neural Networks (ANNs)

^{۲۷} Ma

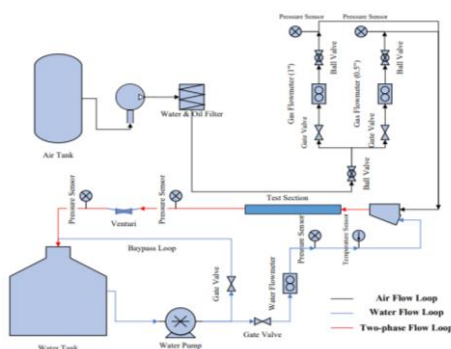


۲- روش انجام کار:

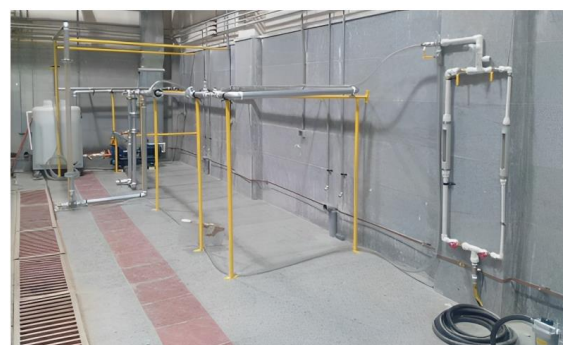
ارزیابی جریان چندفازی با استفاده از فناوری اندازه‌گیری آنلاین توجه قابل توجهی از سوی شرکت‌های برجسته بین‌المللی انرژی، از جمله بریتیش پترولیوم (BP)، جلب کرده است و نقش کلیدی آن به‌عنوان یک فناوری بنیادی که برای شکل‌دهی آینده صنعت نفت و گاز حیاتی است، مورد تأکید قرار گرفته است. کاربرد گسترده این فناوری جنبه‌های اساسی مانند آزمایش چاه، مدیریت مخزن، تخصیص تولید، اندازه‌گیری جریان، پایش ایمنی و فرآیندهای عملیاتی دیگر را در بر می‌گیرد. به‌ویژه، اندازه‌گیری آنلاین جریان سه‌فازی شامل نفت، آب و گاز یکی از حوزه‌های برجسته در زمینه جریان چندفازی و تولید نفت محسوب می‌شود.

۲-۱- حلقه جریان دوفازی

برای بررسی قابلیت کاربرد مدل جریان گاز-مایع، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها بر اساس شرایط واقعی سایت میدان نفتی در پلتفرم آزمایشگاهی مهندسی جریان دوفازی دانشگاه شهید بهشتی انجام شد (شکل ۱). در حلقه جریان دوفازی، مسیر انتقال آب پس از دماسنج و فشارسنج به دو مسیر مجزا تقسیم می‌شود. یکی از مسیرها به‌صورت افقی ادامه می‌یابد و مسیر دیگر یک مسیر عمودی را دنبال می‌کند. در هر دو مسیر، یک ورودی ۱ اینچی برای ورود هوا نصب شده است. پس از اتصال خط هوا به خط آب، هم در مسیرهای عمودی و هم افقی، یک بخش متصل به فلنج برای نصب لوله‌های پلکسی‌گلاس با قطر داخلی ۲ و ۵ سانتی‌متر و طول ۱.۵ متر در نظر گرفته شد تا هدف مشاهده رژیم‌های ایجادشده محقق شود. جزئیات دستگاه‌ها و پارامترهای آزمایشی در جدول ۱ آمده است.



(ب)



(الف)

شکل (۱) الف) حلقه جریان دوفازی دانشگاه شهید بهشتی، ب) شماتیک حلقه جریان و تجهیزات مورد استفاده

جدول (۱) تجهیزات و پارامترهای حلقه جریان دوفازی

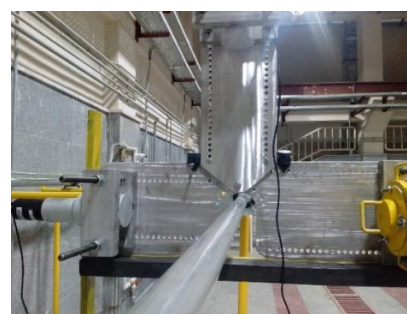
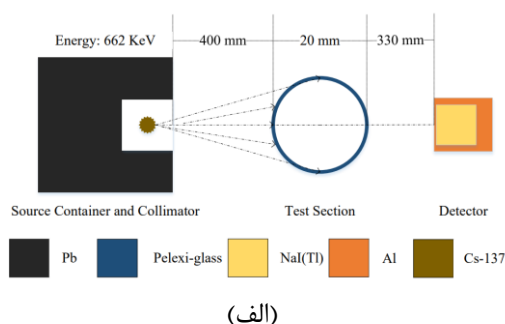
نام	تولید کننده	پارامترها
ماده	--	گاز: هوا مایع: آب
جریان سنج گاز	۰.۵-inch RGD ۱.۰-inch RGD	۰ - ۱۰۰ (L/min) ۱۰۰ - ۱۰۰۰ (L/min)
جریان سنج مایع	۲-inch RSM	۲۰ - ۲۰۰ (L/min)



فشارسنج	Indumart	۰ - ۴۰۰۰ (mbar)
پارامتر اندازه‌گیری	--	اختلاف فشار، فشار و دما

۲-۲- سیستم دریافت داده

سیستم جمع‌آوری داده‌ها شامل یک منبع گاما پرتو ^{137}Cs با فعالیت ۶.۵ میلی‌کوری و یک آشکارساز NaI(Tl) با قطر ۳ اینچ و محفظه آلومینیومی است. آشکارساز به یک سیستم طیف‌سنجی، با نام تحلیلگر چندکاناله دیجیتال^{۲۸}، متصل شده است تا طیف پرتوهای گامای عبوری از مخلوط دو فازی (هوا و آب) در یک لوله پلکسی‌گلاس را ثبت کند. آشکارساز تقریباً در فاصله ۷۵ سانتی‌متری از چشمه قرار داده شده است و فاصله چشمه تا لوله ۴۰ سانتی‌متر است. نمودار شماتیک دستگاه‌های اندازه‌گیری روی حلقه جریان دو فازی در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ قسمت الف نشان داده شده است، محفظه منبع زاویه انتشار را محدود می‌کند و به‌عنوان یک کولیماتور پرتو گاما عمل می‌کند. جزئیات بیشتری در مورد آشکارساز عبوری در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل (۲) الف) شماتیک چینش آشکارساز و چشمه، ب) سیستم دبی‌سنج غیرتهاجمی مورد استفاده این دبی‌سنج به‌راحتی می‌تواند به هر سیستم سیالی اضافه شود بدون اینکه اختلالی در آن ایجاد کند، و به ما امکان می‌دهد نرخ جریان هر جزء را به‌صورت جداگانه اندازه‌گیری کنیم. این دستگاه برای جمع‌آوری سریع داده‌ها بسیار مناسب است و اطلاعات لحظه‌ای در مورد هر بخش از جریان را فراهم می‌کند. ما یک آشکارساز عبوری را انتخاب کردیم که به دلیل نرخ شمارش بالاتر در بازه زمانی کوتاه‌تر، سطح خطای آماری را کاهش می‌دهد. در آزمایش پیش‌رو، یک آشکارساز عبوری با مدت زمان اندازه‌گیری ۱۰ ثانیه به کار گرفته شد.

جدول (۲) تجهیزات و پارامترهای حلقه جریان دوفازی

نوع آشکارساز	سوسوزن ارگانیک - NaI(Tl)
شکل آشکارساز و سائز بدنه	استوانه با قطر و ارتفاع ۳ اینچ
ولتاژ کاری	آلومینیوم با ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر ۷۴۰ ولت
آهنگ نمونه‌گیری	۱۰ ثانیه

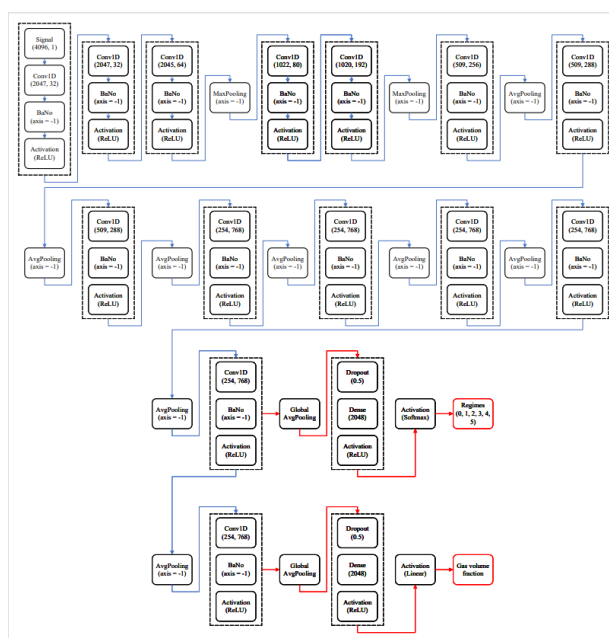
^{۲۸} Digital Multi Channel Analyzer (DMCA)



۳-۲- شبکه عصبی کانولوشنال

شبکه عصبی کانولوشنی^{۲۹} یک شبکه عصبی پیش‌رونده^{۳۰} با محاسبات کانولوشنی و ساختار عمیق است که به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های نماینده یادگیری عمیق شناخته می‌شود. ساختار و حوزه‌های کاربردی کرنل‌های کانولوشنی در CNN بسیار متنوع است. حسگر و نتوری یک ساختار داده‌ای یک‌بعدی برای شناسایی سری‌های زمانی مانند اختلاف فشار است. بنابراین، یک ساختار شبکه عصبی کانولوشنی یک‌بعدی برای ساخت مدل اندازه‌گیری جریان در زمان واقعی استفاده شده است.

مدل CNN آموزش یافته در کد پایتون، ورودی خود را از توزیع ارتفاع پالس^{۳۱} دریافت می‌کند. در سه بازه زمانی ۱۰ ثانیه‌ای سه طیف ارتفاع پالس مجزا برای یک جریان دوفازی (مقدار مشخص دبی آب و هوا) ثبت شده و به عنوان سه عدد ورودی به شبکه کانولوشنال اعمال خواهد شد. این فرآیند نمونه‌گیری برای تمامی حالت انجام می‌شود. این مدل مقادیر خروجی مربوط به کسر حجمی گاز (GVF) و رژیم‌های جریان را تولید می‌کند که با سیگنال‌های مشاهده‌شده از آشکارساز NaI(Tl) همخوانی دارند. حدود ۷۰٪ داده‌ها (۴۸ ورودی) برای آموزش و حدود ۳۰٪ داده‌ها (۲۱ ورودی) برای تست شبکه عصبی مورد استفاده شده است. الگوریتم‌های رگرسیون معمولی به رابطه بین داده‌های با ابعاد بالا (مانند پیکسل‌های تصویر جریان) و داده‌های با ابعاد پایین (مانند GVF و نرخ جریان) می‌پردازند. گنجاندن پاسخ‌های فعال‌سازی غیرخطی تقویت‌شده در الگوریتم CNN تمایز ویژگی‌های غیرخطی را افزایش می‌دهد. این رویکرد سرعت آموزش شبکه را بهبود می‌بخشد. در این مطالعه، مدل Inception v3 در چارچوب الگوریتم CNN برای رسیدن به نگاشت غیرخطی پارامترهای مرتبط با جریان دو فازی هوا-آب (GVF) و تغییرات الگوهای جریان به کار گرفته شده است. برای مشاهده ساختار مدل، به شکل ۳ مراجعه کنید.



شکل (۳) مدل موسوم به CNN با سه طیف ارتفاع پالس در یک دبی مشخص آب و هوا

^{۲۹} Convolutional Neural Network (CNN)

^{۳۰} Feed-forward

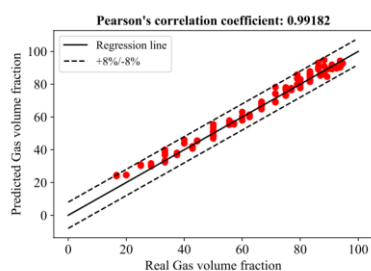
^{۳۱} Pulse Height Distribution (PHD)



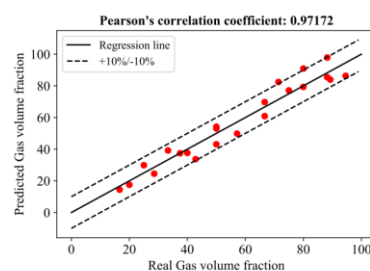
مدل Inception نسخه ۳ شامل حدود ۴۸ لایه عمیق است که از ماژول‌های Inception با کرنل‌های^{۳۲} متنوع (۱×۱، ۳×۳، ۵×۵) برای بهینه‌سازی استخراج ویژگی‌ها استفاده می‌کند. این مدل دارای نرمال‌سازی دسته‌ای^{۳۳}، فیلترهای تجزیه‌شده‌ی کانولوشنی^{۳۴} و یک لایه‌ی کاملاً متصل^{۳۵} نهایی با ۱۰۰۰ نورون است. تعداد پارامترهای آن حدود ۲۳ میلیون بوده و برای بهبود دقت، از روش‌هایی مانند دسته‌بندی کمکی^{۳۶} و هموارسازی برجسب‌ها^{۳۷} بهره می‌برد.

۳- بحث و نتیجه‌گیری:

رابطه بین نتایج تجربی و پیش‌بینی‌شده به صورت مستقل از تغییرات رژیم جریانی، با استفاده از مدل پیشنهادی شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) برای داده‌های آموزش و آزمون در دو نمودار رگرسیون و ضریب همبستگی پیرسون (PCC) در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمودارها دقت و صحت بالای معماری‌های پیشنهادی CNN را به وضوح نشان می‌دهند. دقت مقدار خطای مطلق میانگین^{۳۸} محاسبه شده برای داده‌های آموزش و تست در شبکه کانولوشنال به ترتیب برابر با ۲/۳۶ و ۵ می‌باشد. علاوه بر این، اطلاعات دقیق‌تری از عملکرد شبکه عصبی پیچشی (CNN) در تعیین پیکربندی رژیم می‌توان از ماتریس در هم ریختگی^{۳۹} به دست آورد که توزیع نمونه‌ها را بر اساس کلاس‌بندی‌های پیش‌بینی‌شده برای هر کلاس‌بندی واقعی نشان می‌دهد. در یک طبقه‌بندی با دقت کامل، تمام مقادیر به جز در قطر اصلی ماتریس صفر خواهند بود. در اینجا، کلاس‌بندی‌ها (جریان حبابی، پراکنده، شاخه‌ای، لخته‌ای و حلقوی) در شکل ۵ مرتب شده‌اند.



(a) ب



(b) الف

شکل (۲) نمودار رگرسیون الف) داده‌های تست، ب) داده‌های آموزش

Train dataset labels				
True labels	Bubble	Dispersed	Plug	Annular
	11	0	0	0
	1	42	0	0
	0	0	17	0
	0	0	0	12
	0	0	0	24
Predicted labels				

(a) ب

Test dataset labels				
True labels	Bubble	Dispersed	Plug	Annular
	4	0	0	0
	0	11	0	0
	0	0	4	0
	0	0	0	3
Predicted labels				

(b) الف

^{۳۲} Kernels

^{۳۳} Batch Normalization

^{۳۴} Factorized Convolutions

^{۳۵} Fully Connected

^{۳۶} Auxiliary Classifiers

^{۳۷} Label Smoothing

^{۳۸} Mean Absolute Error (MAE)

^{۳۹} Confusion matrix



شکل (۵) برچسب‌های مقدار واقعی و پیش‌بینی شده (الف) داده‌های تست، (ب) داده‌های آموزش

۴- نتایج:

در این مطالعه جامع، به بررسی حوزه پیچیده اندازه‌گیری جریان چندفازی پرداخته شد و از ترکیب همکاری محور روش‌های تضعیف پرتو گاما و شبکه‌های عصبی مصنوعی، به‌ویژه شبکه‌های عصبی کانولوشنی، بهره گرفته شد. از طریق آزمایش‌های دقیق در یک سامانه پیشرفته حلقه جریان دو فازی، داده‌هایی تحت شرایط دینامیکی متنوع جمع‌آوری شد و قدرت منابع پرتو گاما و سیستم‌های پیشرفته جمع‌آوری داده به کار گرفته شد. مدل CNN که برای مدیریت پیچیدگی‌های دینامیک جریان چندفازی آموزش و تنظیم شده بود، به‌عنوان ابزاری مؤثر در پیش‌بینی دقیق کسر حجمی گاز و شناسایی رژیم‌های جریان پیچیده عمل کرد. نتایج بر پتانسیل قابل توجه ادغام تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین با روش‌های اندازه‌گیری تثبیت‌شده تأکید دارند و رویکردهای نوینی را برای بهبود دقت و کارایی اندازه‌گیری در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی ارائه می‌دهند. این رویکرد جامع نه تنها پیشرفت‌های فعلی در تحلیل جریان چندفازی را ارتقا می‌دهد، بلکه پایه‌ای برای نوآوری‌های آینده در این حوزه مهم فراهم می‌سازد.

۵- مراجع:

- [۱] R. Thorn, G.A. Johansen, B.T. Hjertaker, Three-phase flow measurement in the petroleum industry, Meas. Sci. Technol. ۲۴ (۲۰۱۳). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012003>.
- [۲] V.R. Bom, M.C. Clarijs, C.W.E. van Eijk, Z.I. Kolar, L.M. Scheers, The Optimal X-Ray Energy Problem in Multi-Phase Flow Metering, IEEE Trans. Nucl. Sci. ۵۰ (۲۰۰۳) ۷۱۸-۷۲۲. <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.811279>.
- [۳] P. Aarabi Jeshvaghani, S.A.H. Fegghi, M. Khorsandi, Temperature independent flow-rate prediction in two-phase flow loop using gamma-ray attenuation and Artificial Neural Networks, Radiat. Meas. ۱۲۸ (۲۰۱۹) ۱۰۶۱۷۵. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.106175>.
- [۴] P. Aarabi Jeshvaghani, M. Khorsandi, S.A.H. Fegghi, Flow-rate prediction independent of the regime in a dynamic two-phase flow system using a simple pulse height spectrum of a detector and Artificial Neural Networks, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip. ۱۰۱۷ (۲۰۲۱) ۱۶۵۷۹۴. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165794>.
- [۵] H. Xue, P. Yu, M. Zhang, H. Zhang, E. Wang, G. Wu, Y. Li, X. Zheng, A wet gas metering system based on the extended-throat venturi tube, Sensors. ۲۱ (۲۰۲۱) ۱-۱۹. <https://doi.org/10.3390/s21062120>.
- [۶] B. Tomaszewska-Wach, M. Rzaś, A correction method for wet gas flow metering using a standard orifice and slotted orifices, Sensors. ۲۱ (۲۰۲۱). <https://doi.org/10.3390/s21072291>.



- [۷] K. Yin, Z. He, W. Ma, W. Cui, Q. Zhao, X. Zhang, L. Chen, H. Ge, Z. Chen, A non-intercepting monitoring method for beam position on the target in an accelerator driven system, *Ann. Nucl. Energy.* ۱۵۳ (۲۰۲۱). <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108070>.
- [۸] J. Ye, L. Peng, W. Wang, W. Zhou, Optimization of Helical Capacitance Sensor for Void Fraction Measurement of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Small Diameter Tube, *IEEE Sens. J.* ۱۱ (۲۰۱۱) ۲۱۸۹-۲۱۹۶. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2116110>.
- [۹] B.M. Abbagoni, H. Yeung, Non-invasive classification of gas-liquid two-phase horizontal flow regimes using an ultrasonic Doppler sensor and a neural network, *Meas. Sci. Technol.* ۲۷ (۲۰۱۶) ۸۴۰۰۲. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/8/084002>.
- [۱۰] T. Tambouratzis, I. Pázsit, Non-invasive on-line two-phase flow regime identification employing artificial neural networks, *Ann. Nucl. Energy.* ۳۶ (۲۰۰۹) ۴۶۴-۴۶۹. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.12.002>.
- [۱۱] R. Hanus, M. Zych, M. Kusy, M. Jaszczur, L. Petryka, Identification of liquid-gas flow regime in a pipeline using gamma-ray absorption technique and computational intelligence methods, *Flow Meas. Instrum.* ۶۰ (۲۰۱۸) ۱۷-۲۳. <https://doi.org/10.1016/J.FLOWMEASINST.2018.02.008>.
- [۱۲] G.H. Roshani, S.A.H. Fegghi, S. Setayeshi, Dual-modality and dual-energy gamma ray densitometry of petroleum products using an artificial neural network, *Radiat. Meas.* ۸۲ (۲۰۱۵) ۱۵۴-۱۶۲. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.07.006>.
- [۱۳] J. Chunguo, B. Qiuguo, Flow regime identification of gas/liquid two-phase flow in vertical pipe using RBF neural networks, ۲۰۰۹ Chinese Control Decis. Conf. CCDC ۲۰۰۹. (۲۰۰۹) ۵۱۴۳-۵۱۴۷. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2009.5194992>.
- [۱۴] G.H. Roshani, E. Nazemi, S.A.H. Fegghi, S. Setayeshi, Flow regime identification and void fraction prediction in two-phase flows based on gamma ray attenuation, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* ۶۲ (۲۰۱۵) ۲۵-۳۲. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.006>.
- [۱۵] C. Jing, G. Xing, B. Liu, Q. Bai, Determination of Gas and Water Volume Fraction in Oil Water Gas Pipe Flow Using Neural Networks Based on Dual Modality Densitometry, *Water.* (n.d.) ۱۲۴۸-۱۲۵۳.
- [۱۶] Y. Ma, C. Li, Y. Pan, Y. Hao, S. Huang, Y. Cui, W. Han, A flow rate measurement method for horizontal oil-gas-water three-phase flows based on Venturi meter, blind tee, and gamma-ray attenuation, *Flow Meas. Instrum.* ۸۰ (۲۰۲۱) ۱۰۱۹۶۵. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101965>.



بررسی تجربی اثر باریکه الکترون با انرژی ۱۰ MeV بر ترانزیستورهای BJT نوع NPN (کد

مقاله : ۱۱۶۴)

بهرامی، فرامرز^۱ - رشاد، محمد^۲ - مسیبی، آرمین^۳ - صنیعی، الهام^۱ - شیرمردی، سید پژمان^{۳*} - باقری، رضا^۲ -

شکوهی، شاهین^۳

۱. گروه مهندسی پرتو پزشکی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی

۲. صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، فیزیک و مهندسی انرژی، مهندسی هسته‌ای

۳. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای (NSTRI)

چکیده :

ترانزیستور به عنوان یکی از بزرگ‌ترین اختراعات در تاریخ نوین بوده و از لحاظ اهمیت در کنار ماشین چاپ، خودرو و ارتباطات الکترونیکی قرار دارد. در این مطالعه رفتار ترانزیستورهای BJT که در معرض الکترون‌های پرنرژی ۱۰ MeV خروجی از دستگاه شتاب‌دهنده الکترون (رودوترون TT۲۰۰) مرکز پرتو فرآیند ایران مرکزی- یزد، بررسی شده که شامل ۵ نوع ترانزیستور سیلیکونی NPN با شماره‌های BC۱۰۹، BC۵۵۰، BC۳۹۰، BD۱۳۵، KSP۲۲۲A می‌شود. ضریب تقویت جریان یعنی h_{fe} که همان کمیت β ترانزیستورها قبل و بعد از پرتو دهی در ۱۰ دز از ۰ تا ۴۳.۲۸ کیلو گری اندازه‌گیری شده‌اند و نمودارهای بهره جریان یا همان β ترانزیستور و منحنی مشخصه ولتاژ- جریان ترانزیستور بر اساس تغییرات شدت دز تابشی ترسیم شده و نهایتاً پاسخ ترانزیستورها (تغییرات بتا) بر اساس شدت دز جذبی بررسی و ملاحظه شد که در ترانزیستورهای NPN ترانزیستور نیمه قدرت BD۱۳۵ تغییرات خطی از خود نشان می‌دهند و از آن می‌توان به عنوان گزینه مناسب جهت دزیمتری در بازه ۵۰-۱۰ kGy استفاده نمود.

کلمات کلیدی: دزیمتری، الکترون، ترانزیستور BJT، بتا ترانزیستور، منحنی مشخصه ولتاژ - جریان ترانزیستور، h_{fe}

Experimental investigation of the effect of a ۱۰ MeV electron beam on of BJT(NPN) transistors

Bahrami, Faramarz^۱ - Rashad, Mohammad^۲ - Mosayebi, Armin^۳ - Saniei, Elham^۱ - Shirmardi, Seyed Pezhman^{۳*} Bagheri, Reza^۲ - Shokouhi, Shahin^۳

۱. Department of Medical Radiation Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University

۲. Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Physics and Energy Engineering, Nuclear Engineering

۳. Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI)

Abstract:

The transistor is considered one of the greatest inventions in modern history, ranking alongside the printing press, automobile, and electronic communications in importance. In this study, the behavior of BJT transistors exposed to high-energy ۱۰ MeV electrons emitted from the electron accelerator (Rodotron TT۲۰۰) of the Central Iran Photoprocess Center-Yazd was investigated, which includes ۵ types of NPN silicon transistors with numbers KSP۲۲۲A, BD۱۳۵, ۲N۳۹۰،



BC550, BC109. The current gain coefficient, h_{fe} , which is the same quantity as β , was measured in transistors before and after irradiation at 10 doses from 0 to 43.28 kGy, and the current gain diagrams, or β of the transistor, and the voltage-current characteristic curve of the transistor were drawn based on changes in radiation dose intensity. Finally, the response of the transistors (β changes) based on absorbed dose intensity was examined and observed, which showed linear changes in NPN transistors of the BD135 half-power transistor and can be used as a suitable option for dosimetry in the range of 10-50 KGy.

Key words: Dosimetry, electron, BJT transistor, β transistor, transistor voltage-current characteristic curve, h_{fe}

۱- مقدمه:

ترانزیستور از سوی بسیاری به عنوان یکی از بزرگ‌ترین اختراعات در تاریخ نوین مطرح شده است، در رتبه‌بندی از لحاظ اهمیت در کنار ماشین چاپ، خودرو و ارتباطات الکترونیکی و الکتریکی قرار دارد. ترانزیستور عنصر فعال کلیدی در الکترونیک مدرن است. در یک ریزپردازنده از بیش از یک میلیون و هفتصد هزار ترانزیستور استفاده می‌شود. قیمت کم، انعطاف‌پذیری و اطمینان از ترانزیستور یک قطعه همه‌کاره برای وظایف غیرمکانیکی مثل محاسبه دیجیتال ساخته است [۱-۳]. از آنجا که استفاده از ماسفت‌ها به عنوان آشکارساز دزهای پایین در دوربین‌های گامای پرتو پزشکی و به عنوان سنسور در دستگاه‌های آشکارساز دزیمتری به عنوان آشکارساز دزهای پایین استفاده می‌شوند، می‌توان از ترانزیستور به عنوان دزیمتر مناسب در پرتو دهی الکترون MeV10 شتاب‌دهنده رودوترون نیز استفاده نمود. از آنجا که ترانزیستورهای BJT از نوع سیگنال کوچک دارای عرض نواحی n,p,n و p,n,p کوچکی هستند، در مواجه با ذرات باردار تمامی پارامترها و مشخصه‌های آن‌ها از جمله مهم‌ترین آن‌ها یعنی β زود به اشباع می‌روند و در قبال تغییرات دزهای بیشتر هیچگونه تغییری در آن‌ها مشاهده نمی‌شود (با توجه به نتایج مطالعات پیشین به حالت اشباع می‌رسند) [۴-۸].

بنابراین در رویکرد جدید برخلاف بسیاری از مقالات و آزمون‌های تجربی که در این خصوص صورت گرفته می‌توان از ترانزیستور نیمه قدرت^{۴۰} نیز در کنار ترانزیستورهای قدرت کم^{۴۱} و ترانزیستورهای سیگنال، آزمایش و تست به عمل آورد تا رفتار این ترانزیستورها در قبال شار الکترونی دستگاه شتاب‌دهنده رودوترون با انرژی MeV10 مورد ارزیابی قرار گیرد و مهم‌ترین و اصلی‌ترین ضرورت این پژوهش بررسی رفتار منحنی مشخصه ولتاژ- جریان انواع مختلف ترانزیستورها به ازای دزهای مختلف می‌باشد. البته این پژوهش انتخاب مناسب‌ترین ترانزیستورها با گستره وسیع خطی تغییرات دز می‌باشد که بتوان با کالیبراسیون آن‌ها بهترین دزیمتر در نواحی $<10\text{kGy}$ (Low Dose) و $>10\text{kGy}$ (High Dose) را انتخاب نمود [۹-۱۳].

مطالعه پیشرو به توضیح ترانزیستورهای ان پی ان و بررسی اثر الکترون تولیدی از شتاب‌دهنده الکترونی رودوترون با انرژی MeV10 بر مشخصه ولتاژ-جریان و بهره جریان ترانزیستورهای NPN از نوع BJT پرداخته است.

۲- مواد و روش‌ها:

تابش پرتو الکترون (EBI) از طریق یک دستگاه شتاب‌دهنده الکترونی با انرژی پرتو ۱۰ مگا الکترون ولت، جریان ۳ میلی آمپر و عرض پرتو موثر ۲۵ میلیمتر در سایت پرتو دهی ایران مرکزی شرکت توسعه کاربرد پرتوها انجام شد. پنج نوع ترانزیستور دوقطبی پیوندی NPN شامل BC109، 2N3904، BC550، BD135 و a2222ksp از بازار داخل تهیه شد و سپس هر کدام در بسته‌های سه تایی (سه عدد در هر دز) در معرض تابش پرتوهای الکترونی قرار گرفت. مقدار بهره جریان نمونه‌های آزمایش که

^{۴۰} Medium Power Transistor

^{۴۱} Low Power Transistor



ترانزیستورهای BJT می‌باشند بعد از در معرض تابش قرار گرفتن توسط این پرتو الکترونی در ۱۰ دز مختلف از ۰ تا ۴۳/۲۸ کیلوگری توسط مولتی متر اندازه‌گیری و با مقدار آن قبل از پرتو دهی مقایسه می‌شود. برای نمایش مشخصه ولتاژ-جریان ترانزیستورها بعد از پرتو دهی یک مدار الکتریکی متشکل از دو منبع ولتاژ متغیر می‌بندیم و ترانزیستورها را در این مدارها می‌گذاریم و مقادیر مختلف جریان را به ازای ولتاژهای مختلف توسط مولتی متر ثبت و تغییرات مشخصه ولتاژ-جریان ترانزیستور را اندازه می‌گیریم. سپس توسط نرم‌افزار اکسل منحنی مشخصه ولتاژ - جریان ترانزیستور را رسم می‌نماییم.

۳- نتایج:

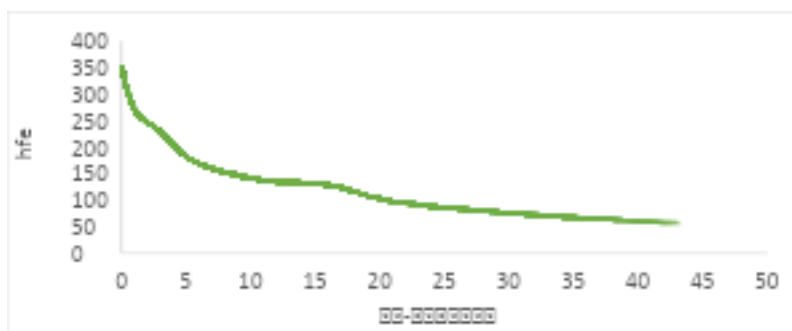
در بخشهای مختلف زیر هر یک از ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی NPN شامل BC۱۰۹، BC۵۵۰، a۲۲۲ksp، ۲N۳۹۰۴، BD۱۳۵ و ۱۰ مگا الکترون ولت (MeV) قرار گرفته و نمودار بهره جریان و تغییرات بهره جریان مورد بررسی قرار گرفت. اثر تابش بر پارامترهای هر مجموعه BJT رفتار مشابهی با مقداری انحراف بین آنها نشان داد. نتایج ارائه شده برای یک پارامتر خاص از اثر یک دز انباشته / زمان تابش تنها بر روی یکی از BJT های مورد بررسی حاصل می‌شود.

۱-۳- ترانزیستور BC۵۵۰ تحت تابش الکترون ۱۰ MeV

در جدول و شکل زیر (جدول و شکل ۱) میزان تغییرات و بهره جریان ترانزیستور BC۵۵۰ تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی آمده که نشان می‌دهد با افزایش میزان دز تابشی روند تغییرات بهره جریان افزایش و میزان بهره جریان کاهش یافته است.

جدول ۱. مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور BC۵۵۰ تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی

ردیف	دوز تابشی (kGy)	بهره جریان h_{fe}	تغییرات بهره جریان $\Delta\beta (h_{fe}\Delta)$
۱	۰	۳۵۳	۰
۲	۱	۲۷۲	۸۱
۳	۳	۲۲۹	۱۲۴
۴	۷۷/۵	۱۷۱	۱۸۲
۵	۸۲/۱۰	۱۳۸	۲۱۵
۶	۰۵/۱۶	۱۲۸	۲۲۵
۷	۶۴/۲۱	۹۵	۲۵۸
۸	۴۶/۳۲	۷۱	۲۸۲
۹	۸۷/۳۷	۶۳	۲۹۰
۱۰	۲۸/۴۳	۵۶	۲۹۷



شکل ۱. بخش ۱ نمودار تغییرات بهره جریان و بخش ۲ نمودار بهره جریان ترانزیستور BC550 تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی

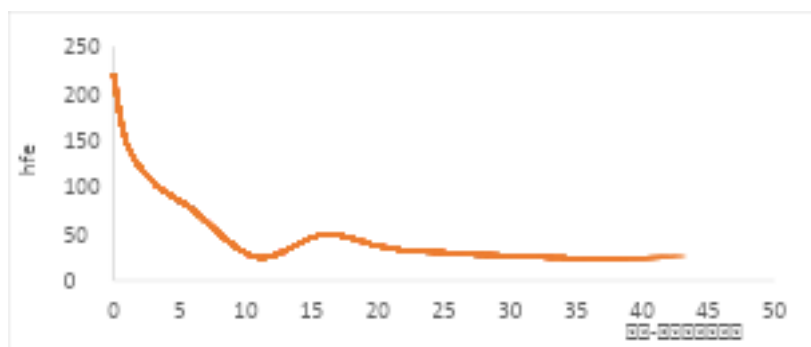
نتایج نشان می‌دهد که تغییرات بهره جریان ترانزیستور پارامتر الکتریکی اصلی تحت تاثیر تابش است. این نکته در کار ما با اندازه گیری جریان های I_c و I_b به عنوان تابعی از ولتاژ بایاس V_{cc} قبل و بعد از تحریک بررسی شد. تغییر فاکتور h_{fe} در بالا مورد استفاده قرار گرفت. تغییر این فاکتور پس از تابش برای BJT های مختلف، با توجه به تغییر مقدار اولیه h_{fe0} حتی برای ترانزیستورهای یکسان قابل مقایسه نیست.

۲-۳- ترانزیستور a2222ksp تحت تابش الکترون ۱۰ MeV

در جدول و شکل زیر (جدول و شکل ۲) میزان تغییرات و بهره جریان ترانزیستور a2222ksp تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی آمده که نشان می‌دهد با افزایش میزان دز تابشی روند تغییرات بهره جریان افزایش و میزان بهره جریان کاهش یافته است.

جدول ۲. مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور a2222ksp تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی

ردیف	دوز تابشی (kGy)	بهره جریان h_{fe}	تغییرات بهره جریان $\Delta\beta (h_{fe}\Delta)$
۱	۰	۲۲۰	۰
۲	۱	۱۴۷	۷۳
۳	۳	۱۰۵	۱۱۵
۴	۷۷/۵	۷۸	۱۴۲
۵	۸۲/۱۰	۲۵	۱۹۵
۶	۰۵/۱۶	۴۹	۱۷۱
۷	۶۴/۲۱	۳۳	۱۸۷
۸	۴۶/۳۲	۲۵	۱۹۵
۹	۸۷/۳۷	۲۳	۱۹۷
۱۰	۲۸/۴۳	۲۶	۱۹۴



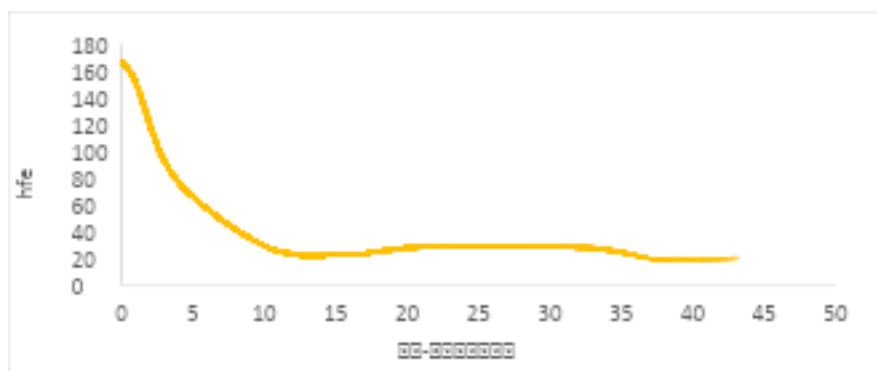
شکل ۲. بخش ۱ نمودار تغییرات بهره جریان و بخش ۲ نمودار بهره جریان ترانزیستور ^{239}Pu تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

۳-۳- ترانزیستور ^{239}Pu تحت تابش الکترون 10 MeV

در جدول و شکل زیر (جدول و شکل ۳) میزان تغییرات و بهره جریان ترانزیستور ^{239}Pu تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی آمده که نشان می‌دهد با افزایش میزان دز تابشی روند تغییرات بهره جریان افزایش و میزان بهره جریان کاهش یافته است.

جدول ۳. مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور ^{239}Pu تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

ردیف	دوز تابشی (kGy)	بهره جریان I_{fe}	تغییرات بهره جریان ΔI_{fe}
۱	۰	۱۶۷	۰
۲	۱	۱۵۱	۱۶
۳	۳	۹۳	۷۴
۴	۷۷/۵	۵۹	۱۰۸
۵	۸۲/۱۰	۲۶	۱۴۱
۶	۰۵/۱۶	۲۳	۱۴۴
۷	۶۴/۲۱	۲۹	۱۳۸
۸	۴۶/۳۲	۲۸	۱۳۹
۹	۸۷/۳۷	۱۹	۱۴۸
۱۰	۲۸/۴۳	۲۰	۱۴۷



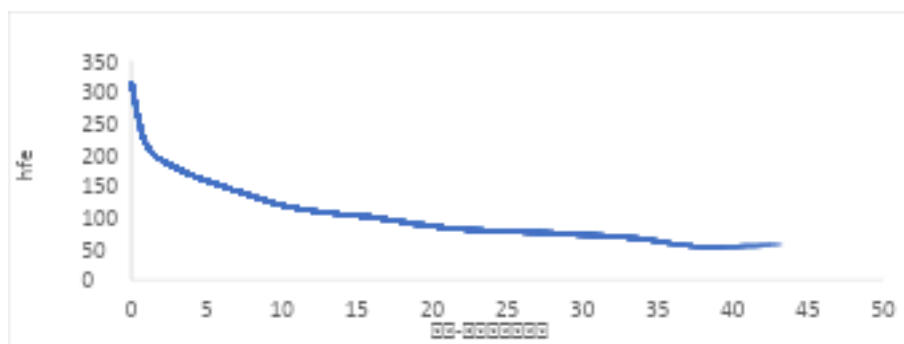
شکل ۳. بخش ۱ نمودار تغییرات بهره جریان و بخش ۲ نمودار بهره جریان ترانزیستور $^{23904}\text{N}$ تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

۳-۴- ترانزیستور ^{109}BC تحت تابش الکترون 10 MeV

در جدول و شکل زیر (جدول و شکل ۴) میزان تغییرات و بهره جریان ترانزیستور ^{109}BC تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی آمده که نشان می‌دهد با افزایش میزان دز تابشی روند تغییرات بهره جریان افزایش و میزان بهره جریان کاهش یافته است.

جدول ۴. مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور ^{109}BC تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

ردیف	دوز تابشی (kGy)	بهره جریان h_{fe}	تغییرات بهره جریان $\Delta\beta(h_{fe}\Delta)$
۱	۰	۳۱۵	۰
۲	۱	۲۱۶	۹۹
۳	۳	۱۷۹	۱۳۶
۴	۷۷/۵	۱۵۲	۱۶۳
۵	۸۲/۱۰	۱۱۵	۲۰۰
۶	۰۵/۱۶	۱۰۰	۲۱۵
۷	۶۴/۲۱	۸۲	۲۳۳
۸	۴۶/۳۲	۶۹	۲۴۶
۹	۸۷/۳۷	۵۳	۲۶۲
۱۰	۲۸/۴۳	۵۷	۲۵۸



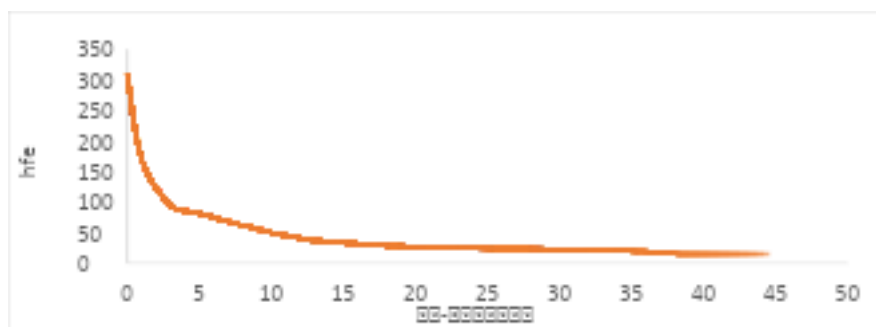
شکل ۴. بخش ۱ نمودار تغییرات بهره جریان و بخش ۲ نمودار بهره جریان ترانزیستور BC109 تحت تابش الکترون 1 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

۳-۵- ترانزیستور BD135 تحت تابش الکترون 10 MeV

در جدول و شکل زیر (جدول و شکل ۵) میزان تغییرات و بهره جریان ترانزیستور BD135 تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی آمده که نشان می‌دهد با افزایش میزان دز تابشی روند تغییرات بهره جریان افزایش و میزان بهره جریان کاهش یافته است.

جدول ۵. مقدار و تغییرات بهره جریان ترانزیستور BD135 تحت تابش الکترون 10 MeV بر اساس افزایش دز تابشی

ردی ف	دوز تابشی (kGy)	بهره جریان h_{fe}	تغییرات بهره جریان $\Delta\beta (h_{fe}\Delta)$
۱	۰	۳۱۰	۰
۲	۱	۱۷۰	۱۴۰
۳	۳	۹۵	۲۱۵
۴	۹۶/۴	۸۱	۲۲۹
۵	۱۵/۱۱	۴۴	۲۶۶
۶	۱۱/۱۶	۳۱	۲۷۹
۷	۳/۲۲	۲۵	۲۸۵
۸	۴۵/۳۳	۲۱	۲۸۹
۹	۴۱/۳۸	۱۵	۲۹۵
۱۰	۶۰/۴۴	۱۵	۲۹۵



شکل ۵. بخش ۱ نمودار تغییرات بهره جریان و بخش ۲ نمودار بهره جریان ترانزیستور ۱۳۵BD تحت تابش الکترون ۱۰ MeV بر اساس افزایش دز تابشی

همانطور که در نمودار شکل های بالا مشخص شد، با افزایش دز پرتوهای الکترون، جریان بهره و تغییرات جریان بهره ترانزیستورها به ترتیب کاهش و افزایش داشته است. میزان این کاهش افزایش در دزهای بالاتر از ۱۰ کیلوگری کمتر بوده ولی در دزهای زیر ۱۰ کیلوگری این تغییرات قابل ملاحظه است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

بر اساس نتایج این پژوهش میتوان نتیجه گرفت که مشخصه ورودی و خروجی ولتاژ-جریان ترانزیستور با تغییرات دز تابشی تغییر می‌کند. مشاهده شد که رفتار بیم الکترونی دستگاه شتاب‌دهنده رودوترون بر مؤلفه عرض ناحیه تهی تأثیر گذاشته و در نتیجه حامل‌های اقلیت و حامل‌های اکثریت در تولید جریان کلکتور و جریان بیس را متأثر نموده و با توجه به نتایج حاصل از میان نمودار ترانزیستورهای NPN مدل BD135 بهترین رفتار را دارد و پهنای نیمه‌هادی‌های N و P به کار رفته در ساختمان داخلی آن عریض‌تر و حجیم‌تر است و تغییرات بهره جریان نسبت به تغییرات دز پرتو تابشی، به صورت خطی تغییر می‌کند و می‌تواند بعنوان یک دزیومتر در محدوده وسیعی از دز بالا استفاده گردد.

۵- مراجع:

- [۱] Maftunzada, S. A. L. (۲۰۲۴). TRANSISTORS: THE CORNERSTONE OF MODERN ELECTRONICS. Academic research in educational sciences, ۵(۱۰), ۹۲-۹۸
- [۲] Pradeep, T. M., Hegde, V. N., Pushpa, N., Bhushan, K. G., Kumar, M., & Prakash, A. P. (۲۰۲۰, November). An investigation of ۱۰ MeV electron irradiation on silicon NPN transistors. In AIP Conference Proceedings (Vol. ۲۲۶۵, No. ۱). AIP Publishing.
- [۳] Yang, J., Gao, Y., Jiao, Q., Wei, Y., Li, H., & Li, X. (۲۰۲۰). Effect of electric field on radiation defects in NPN transistors. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, ۴۶۷, ۱۱۴-۱۱۷.
- [۴] Atallah, J. G., & Ismail, M. (۲۰۲۴). Transistors. In Integrated Electronic Circuits (pp. ۸۹-۱۲۱). Cham: Springer International Publishing.
- [۵] Busarello, T. D. C., Simões, M. G., & Pomilio, J. A. (۲۰۲۴). Semiconductor diodes and transistors. In Power Electronics Handbook (pp. ۱۷-۵۲). Butterworth-Heinemann.
- [۶] Rai, H., Singh, K. R., & Pandey, S. S. (۲۰۲۴). Transistor based electrochemical devices: fundamentals to applications.
- [۷] Carotenuto, R., Iero, D., Pezzimenti, F., Della Corte, F. G., & Merenda, M. (۲۰۲۴). Considerations on External Heat Transfer in Saturated Bipolar Junction Transistors. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.



- [۸] Srividya, B. V., & Smitha, S. (۲۰۲۴). An Overview of Distinct Electronic Devices and Circuits. *Cognitive Predictive Maintenance Tools for Brain Diseases*, ۷۳-۹۲
- [۹] Polyakov, A. Y., Lee, I. H., Smirnov, N. B., Govorkov, A. V., Kozhukhova, E. A., Kolin, N. G., ... & Pearton, S. J. (۲۰۱۱). ۱۰ MeV electrons irradiation effects in variously doped n-GaN. *Journal of Applied Physics*, ۱۰۹(۱۲)
- [۱۰] Vavilov, V. S., Kekelidze, N. P., & Smirnov, L. S. (۱۹۶۵). Effects of radiation on semiconductors. New York: Consultants Bureau.
- [۱۱] Naik, K. G., Bhat, S., & Sangeev, G. (۲۰۱۳). The effect of electron irradiation on BJTs and MOSFETs at elevated temperatures. *Arch. Phy. Res*, ۴(۲), ۷۴-۸۶
- [۱۲] Boylestad, R., & Nashelsky, L. (۲۰۱۴). *Electronic devices and circuit theory*. Prentice Hall.
- [۱۳] Pien, C. F., Amir, H. F., Salleh, S., & Muhammad, A. (۲۰۱۰). Effects of total ionizing dose on bipolar junction transistor. *American Journal of Applied Sciences*, ۷(۶), ۸۰۷.



ایجاد یک مدل هوش مصنوعی برای ارزیابی پارامترهای سیستم اسکن قطار مبتنی بر

شتاب‌دهنده (کد مقاله: ۱۱۸۷)

صفری، رسول^۱ - فلاحتی، میثم^۲ - رحیمی، محمدحسن^۳

۱. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای

۲. دانشگاه امام حسین (ع)، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

۳. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

تنوع پارامترها، پیچیدگی‌های هندسی مسئله و نیاز به تراورد تعداد ذرات بسیار بالا باعث شده است که ابزارهای مونت کارلو در پژوهش‌های مربوط به طراحی و توسعه سامانه‌های بازرسی قطار مبتنی بر ایکس فاقد سرعت لازم باشند. در این پژوهش یک مدل هوش مصنوعی اختصاصی برای ارزیابی سریع و دقیق اثرات متغیرهای مختلف روی یک سیستم بازرسی قطار مبتنی بر تابش ایکس شتاب‌دهنده ایجاد شد. این مدل به کمک داده‌های شبیه‌سازی مونت کارلو به گونه‌ای آموزش دید که نسبت به پارامترهای مختلفی از جمله محدودیت‌های دز تابشی، نسبت تباین به نویز تصویر، حساسیت تباین تصویر، مد تابشی و انرژی شتاب‌دهنده، جریان شتاب‌دهنده، نرخ پالس و پهنای زمانی پالس شتاب‌دهنده، سرعت اسکن، ضخامت حفاظها در نواحی مختلف، ضخامت کریستال‌ها، پهنای کریستال‌ها و تعداد خطوط سیستم آشکارسازی منعطف است و می‌تواند تأثیر این پارامترها را روی دز تابشی با خطای کمتر از ده درصد و با صرف زمانی کمتر از یک دقیقه ارزیابی کند. مدل آموزش‌دیده شده در قالب یک وب اپلیکیشن در دسترس قرار گرفته است و می‌تواند برای پژوهش‌های مربوط به طراحی سیستم‌های اسکن قطار مورد استفاده قرار گرفته و سرعت پژوهش‌های این حوزه را به شکل قابل توجهی ارتقا دهد.

کلمات کلیدی: تصویربرداری پرتو ایکس، شتاب‌دهنده، مونت کارلو، یادگیری عمیق، سامانه بازرسی قطار

Creating an AI Model for Evaluating Parameters of an Accelerator-Based Train Inspection System

Safari, Rasool^{۱*}, Falahati, Meysam^۲, Rahimi, MohamadHasan^۳

۱. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Nuclear Engineering

۲. Imam Hossein University, Faculty of Basic Sciences, Department of Physics

۳. Shahid Beheshti University, Faculty of Nuclear Engineering, Department of Radiation Application

Abstract:

The diversity of parameters, the geometric complexities of the problem, and the need to transport a very large number of particles have led to Monte Carlo tools lacking the necessary speed for research related to the design and development of X-ray train scanning systems. In this study, a specialized artificial intelligence model was developed for the rapid and accurate evaluation of the effects of various variables on an accelerator-based train inspection system. The model was trained using Monte Carlo simulation data in such a way that it can adapt to a wide range of parameters, including radiation dose limits, image contrast-to-noise ratio, image contrast sensitivity, radiation mode and accelerator energy, accelerator current, pulse rate and pulse width, scan speed, shield thickness in different regions, crystal thickness, crystal width, and the number of detection system lines. The model can assess the impact of these parameters with an error margin of less than ۱۰% in under one minute. The trained model is available as a web application and can be used for research on the design of train scanning systems, significantly accelerating studies in this field.



Keywords: X-ray Imaging, Accelerator, Monte Carlo, Deep Learning, Train Inspection

۱- مقدمه:

افزایش روزافزون حجم تبادلات بین‌المللی و نقش قابل توجه سیستم حمل‌ونقل ریلی در این حوزه، پایش محموله‌های ریلی را به دلایل امنیتی و جلوگیری از قاچاق بیش از پیش مورد توجه قرار داده است. سیستم‌های اسکن مبتنی بر تابش اشعه ایکس شتاب‌دهنده‌ها از مهم‌ترین ابزارها در این مسیر به شمار می‌آیند. طراحی یک سیستم اسکن قطار یک چالش پیچیده است؛ چراکه این سیستم از پارامترهای متنوعی متأثر است و توجه به این پارامترها حین طراحی ضروری است. از جمله این پارامترها می‌توان به این موارد اشاره کرد [۱ و ۲]: سرعت اسکن مدنظر، مد انرژی شتاب‌دهنده (تک انرژی یا دو انرژی که قابلیت تفکیک مواد را مشخص می‌کند)، جریان شتاب‌دهنده، نرخ پالس شتاب‌دهنده، پهنای پالس شتاب‌دهنده، نسبت تباین^{۴۲} به نویز مدنظر (حداقل مقدار قابل قبول برابر با ۴ طبق معیار رز^{۴۳})، حساسیت تباین مدنظر (حداکثر ۱ درصد در ۲۰۰ میلی‌متر استیل)، جنس و ضخامت کریستال‌های سیستم آشکارسازی، پهنای کریستال‌ها، تعداد خطوط^{۴۴} سیستم آشکارسازی، محدودیت‌های دز تابشی (بنا بر استاندارد INSO-۲۲۶۵۱ آهنگ دز در خارج از منطقه حفاظت‌شده باید کمتر $2/5 \mu\text{sv/hr}$ و آهنگ دز در اتاق کنترل کمتر از $1 \mu\text{sv/hr}$ باشد)، طراحی حفاظ‌ها، الگوریتم‌های نرم‌افزاری پردازش تصویر و همچنین قیمت نهایی و ملاحظات اقتصادی سیستم.

بنابراین به با یک فضای حالت بسیار متنوع و پیچیده مواجه هستیم که در طراحی یک سیستم اسکن ریلی باید مورد توجه قرار گیرد. این فضای جستجوی درهم‌تنیده و وسیع، باعث شده است که پژوهش‌های مربوط به طراحی‌های سیستم‌های بازرسی به حالت‌هایی محدود باشند که در آن‌ها چندین پارامتر ثابت فرض شده و تأثیر چند پارامتر محدود بررسی می‌شوند. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۰۹، سیستم بازرسی غیر مخرب کانتینرهای بار با استفاده از فناوری تصویربرداری گاما با نام ROBOSCAN ۱M توسعه یافت [۳]. در این پژوهش تغییر چشمه تابشی (از ایکس به گاما) مدنظر بود. در سال ۲۰۱۳ پژوهشی در این حوزه انجام شد که در آن پارامتر متغیر عدد اتمی و چگالی محموله قطار بود [۴]. در سال ۲۰۲۱، تحقیقی توسط Lim و همکاران انجام شد [۵] که در آن بررسی تأثیر جهت تابش مدنظر بود و پارامترهای دیگر ثابت بودند. در سال ۲۰۲۲، تحقیقی با عنوان "کاربرد و پیشرفت‌های فناوری‌های رادیوگرافی و نوین در بازرسی غیر مخرب اشیا" توسط مامچور و همکاران منتشر شد [۶] که در آن مد تابشی (دو انرژی یا تک انرژی) پارامتر متغیر بود و دیگر پارامترها ثابت در نظر گرفته شدند.

بنابراین به‌عنوان یک جمع‌بندی از شرایط، در زمینه مطالعات مربوط به سیستم‌های اسکن ریلی با یک حجم قابل توجه از پارامترها مواجه هستیم که باعث می‌شود مطالعات در این زمینه بسیار کند و زمان‌بر باشند؛ چراکه با یک فضای جستجوی گسترده مواجه هستیم، امکان انجام محاسبات تحلیلی به دلیل پیچیدگی‌های موجود وجود ندارد و همچنین محاسبات تریابردی و مونت کارلویی در این فضا نیز به‌کندی پیش می‌روند و زمان‌بر هستند. در این گونه موقعیت‌ها یک راه‌حل استفاده از ظرفیت‌های هوش مصنوعی است [۷-۹]. در این پژوهش یک مدل هوش مصنوعی آموزش‌دیده شده معرفی می‌شود که نسبت به اکثر پارامترهای درگیر در یک سیستم بازرسی ریلی انعطاف دارد و به کمک آن می‌توان بسته به نیازها و قیدها نسبت به استخراج پارامترهای بهینه یک سیستم بازرسی ریلی اقدام کرد. مدل آموزش‌دیده شده برای استفاده در قالب یک وب اپلیکیشن تحت ادرس <https://rsafari.liara.run> در دسترس است.

^{۴۲} کنتراست

^{۴۳} Rose criterion

^{۴۴} Lines



۲- روش کار:

۲-۱- طرح ایده:

معماری یک شبیه‌سازی مونت‌کارلو با یک معماری هوش مصنوعی شباهت‌های جالب‌توجهی دارد: هر المان از هندسه را می‌توان با یک نورون عصبی متناظر کرد به‌طوری‌که مشخصات فیزیکی آن المان (چگالی، سطح مقطع‌های برهم‌کنشی به‌زای بین‌های انرژی مختلف) در قالب یک ورودی به آن وارد شود. وزن قدرت ارتباطی بین نورون‌ها در این شباهت‌سازی را می‌توان به‌عنوان احتمال انتقال فوتون‌ها بین المان‌های هندسی مختلف در نظر گرفت (پراکندگی از یک المان هندسی به المان دیگر، در این رویکرد برهم‌کنش فوتوالکتریک در یک المان متناظر با عدم ارتباط نورون متناظر با نورون‌های لایه‌های بعدی است). به‌ازای هر نورون نیز می‌توان یک خروجی از مدل استخراج کرد (انرژی جذب شده). این مدل از نورون‌ها را می‌توان جایگزین کل حجم شبیه‌سازی کرد به جز لایه ورودی. در لایه ورودی نورون‌ها اطلاعات بیم تابشی را دریافت می‌کنند به‌طوری‌که یک صفحه دوبعدی از نورون‌ها در اولین لایه از شبکه عصبی به‌گونه‌ای قرار می‌گیرد که این صفحه نماینده‌ای از اطلاعات فوتون‌ها در صفحه متناظر در شبیه‌سازی است (برای تصور بهتر می‌توان حالتی مثل فضای فاز را تصور کرد). هر کدام از نورون‌ها در این صفحه حاوی اطلاعاتی از جمله انرژی و جهت فوتون است. بدین ترتیب یک فضای چندبعدی (فضای تانسوری) از ورودی‌ها و خروجی‌ها ایجاد می‌شود. این طراحی به شکل ویژه فرایند شبیه‌سازی را به شکل قابل‌توجهی تسریع می‌کند. با این رویکرد، اطلاعات دز را می‌توان مستقیماً از خروجی‌های نورون‌ها (که مقادیر انرژی جذب شده بودند) استخراج کرد. در مورد پارامترهای تصویر نیز می‌توان به‌سادگی اطلاعات انرژی ثبت شده در نورون‌های متناظر با سیستم آشکارسازی (کریستال‌ها) مورد بهره‌برداری قرار داد.

چالش برانگیزترین جنبه این ایده در این حقیقت نهفته است که افزایش المان‌های هندسی به معنی افزایش تعداد نورون‌های شبکه عصبی متناظر است و این موضوع در کنار این حقیقت که به هر نورون در این طرح چندین داده (چگالی و سطح مقطع‌های برهم‌کنشی فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و پراکندگی ریلی و تولید زوج) وارد و یک داده (انرژی جذب شده) نیز دریافت می‌شود، باعث می‌شود که تعداد پارامترهای شبکه عصبی بسیار قابل‌توجه شود. برای رفع این مشکل نیز یک رویکرد مورد استفاده قرار گرفته به‌طوری‌که ابتدا مدل با در نظر گرفتن المان‌های هندسی بزرگ (در مقایسه با مسافت آزاد میانگین فوتون‌ها) آموزش دید و طی چندین مرحله متوالی ابعاد المان‌های هندسی به مسافت آزاد میانگین نزدیک و نزدیک‌تر شد. به این ترتیب و پس از اعمال یک مدل رگرسیون ثانویه، مدل نهایی موفق به پیش‌بینی مقادیر متناظر با مش‌بندی‌های ریز از روی حالت‌هایی با مش‌بندی بزرگ‌تر (که طبعاً متناظر با تعداد نورون‌های کمتر بوده‌اند شد).

با این ایده می‌توان یک معماری هوش مصنوعی ایجاد کرد که همانند پلتفرم‌های مدل‌سازی مونت‌کارلو قابل انعطاف باشد (توانایی تغییرات گسترده هندسه و چشمه را داشته باشد) اما زمان بسیار زیاد مربوط به ترابرد مونت‌کارلو را دور بزند. همچنین ارائه سطح مقطع‌های برهم‌کنشی به نورون‌ها باعث می‌شود که با وجود فزونی تعداد پارامترهای مدل، مدل سریعاً و به‌خوبی ترابرد ذرات را آموزش ببیند. در حقیقت با تناظر بین المان‌های هندسی (وکسل‌های هندسی) با نورون‌های عصبی مصنوعی و اعمال پارامترهای فیزیکی (سطح مقطع‌ها و چگالی‌ها) به‌عنوان ورودی به این نورون‌های مصنوعی باعث می‌شویم که یک ساختار تلفیقی از مونت‌کارلو - شبکه عصبی داشته باشیم.

۲-۲- اجرای ایده:

بر اساس نیازمندی ایجاد شده برای تیم پژوهشی در راستای طراحی و ارزیابی یک سیستم اسکن ریلی بهینه، ما ایده خود را به شکل خاص روی این موضوع جهت‌دهی کردیم. همچنین برای تسریع زمان ایجاد دیتابیس و آموزش و محدود کردن پارامترها، فواصل بین اجزا مختلف سیستم اسکن را ثابت در نظر گرفتیم. همچنین جنس مواد را به یتن، استیل، سزیم یدید و هوا محدود کردیم به‌طوری‌که یک چیدمان کلی برای سیستم اسکن ریلی در نظر گرفته شد که در آن ابعاد مناطق حفاظت‌شده



برابر با $30 \times 100 \text{ m}^2$ ، فاصله بین شتاب‌دهنده و قطار برابر با 250 cm و فاصله بین قطار و سیستم آشکارسازی برابر با 310 cm بود. همچنین دیواره‌های بتنی نواحی حفاظت‌شده نیز به طول 50 متر و ارتفاع 4 متر لحاظ شدند. اتاقک شتاب‌دهنده و اتاقک آشکارساز نیز از جنس بتن لحاظ شدند. جنس کریستال‌های سیستم آشکارسازی نیز CSI در نظر گرفته شد. بدین منظور 800 حالت مختلف از سیستم اسکن ریلی مطابق با شکل (۱) شبیه سازی شدند. سطح مقطع‌های مورد نیاز از مرجع XCOM دریافت شدند. شبکه عصبی یادگیری عمیق مد نظر در محیط پایتون با استفاده از ماژول Tensorflow پیاده‌سازی شد. از 600 لایه Dense به همراه توابع فعال‌ساز ReLU و Sigmoid استفاده شد به طوری که در هر لایه به طور میانگین 9 هزار نورون تعبیه شده بود. تعداد پارامترهای آموزش پذیر مدل بالغ بر 154 میلیارد پارامتر بود. برای آموزش مدل از یک واحد پردازشگر گرافیکی NVIDIA RX 4090 استفاده شد. فرایند نرمالایز کردن داده‌ها نیز پیاده سازی شد. به منظور ارتقا فرایند نرمالایز سازی، تمایز هر مجموعه از دیتاها نسبت به یک حالت مرجع نیز استخراج شد و اختلاف بدست آمده با حالت رفرنس در نهایت برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار گرفت. ده درصد از دیتابیس برای تست و اعتبارسنجی حین آموزش^{۴۵} و 90 درصد برای آموزش مورد استفاده قرار گرفت. برای صحت سنجی فرایند شبیه سازی، حالت ارائه شده در پژوهشی مربوط به استخراج پارامترهای دز یک شتاب‌دهنده مدل سازی و به مقایسه نتایج پرداخته شد. اختلاف در نتایج کمتر از 7.6% بود. پارامترهای ورودی به شبکه همان‌طور که قبلاً ذکر شد عبارت بودند از: مشخصات فوتون‌ها (انرژی و جهت) در لایه اول، سطح مقطع‌های برهم کنشی و چگالی مواد در نورون‌های لایه‌های دیگر از شبکه. خروجی شبکه نیز به انرژی جذب شده در هر نورون از لایه‌ها (به جز لایه متناظر با فوتون‌های ورودی یا همان لایه اول) اختصاص داشت. پس از اطمینان از آموزش مناسب شبکه، به طریق زیر از آن برای استخراج نتایج مورد نیاز (دز در نواحی مختلف) به‌ازای طراحی مورد نظر از سیستم بازرسی ریلی استفاده شد:

۱. اسکریپت کد GATE حالت مورد نظر ایجاد می‌شد.
۲. از این اسکریپت برای ایجاد فضای وکسلی هندسه استفاده می‌شد.
۳. از هندسه وکسلی برای ایجاد تانسور اطلاعات هندسی (سطح مقطع‌ها، چگالی‌ها و...) استفاده می‌شد.
۴. اطلاعات تانسور فضای هندسی و همچنین فضای فاز ناشی از چشمه به شبکه ارسال می‌شد.
۵. اختلاف بین تانسور اطلاعات هندسی و فضای فاز با حالت رفرنس استخراج می‌شد و بر اساس آن یک تانسور اختلاف ایجاد می‌شد.
۶. شبکه یادگیری عمیق در قدم بعد بر اساس تانسور اختلاف ورودی‌ها، یک تانسور اختلاف خروجی را ایجاد می‌کرد.
۷. ماتریس (تانسور) خروجی در بردارنده مقادیر انرژی جذب شده در نورون‌ها (نسبت به حالت رفرنس) بود. به جهت تسهیل کردن استفاده از مدل، یک وب اپلیکیشن تحت آدرس <https://rsafari.liara.run> ایجاد شد که باتکیه بر آن کاربر می‌تواند با تغییر پارامترهای طول هر قطار برحسب کیلومتر، سرعت قطار (سرعت اسکن برحسب کیلومتر بر ساعت)، ضخامت بتن دیواره‌های اتاقک شتاب‌دهنده برحسب سانتی‌متر، ضخامت بتن دیواره‌های اتاقک آشکارساز برحسب سانتی‌متر، ضخامت بتن دیواره‌های نزدیک به مرزهای ناحیه حفاظت‌شده برحسب سانتی‌متر، مد تابشی (تک انرژی یا دو انرژی) شتاب‌دهنده و انرژی نامی شتاب‌دهنده، نرخ پالس شتاب‌دهنده برحسب Hz، پهنای زمانی هر پالس، جریان پالس برحسب میلی‌آمپر، ضخامت کریستال‌ها برحسب میلی‌متر، تعداد خطوط‌های آشکارسازی، عرض هر خط سیستم آشکارسازی برحسب میلی‌متر، ضخامت معادل دیواره قطار و محموله برحسب میلی‌متر استیل، حساسیت تباین مورد نظر برحسب درصد، نسبت سیگنال به نویز مورد نظر و نسبت زمان هر اسکن به زمان پردازش به استخراج مقادیر آهنگ دز در نقاط مختلف (از جمله اطراف اتاقک شتاب‌دهنده، مرزهای نواحی حفاظت شده و آهنگ دز لوکوموتیوران) بپردازد.

^{۴۵} از آن جایی که داده‌های اعتبارسنجی نقشی در فرایند آموزش مدل نداشتند، از این داده‌ها نیز جهت تست استفاده شد و بدین شکل 10 درصد از داده‌ها به تست اختصاص یافت.



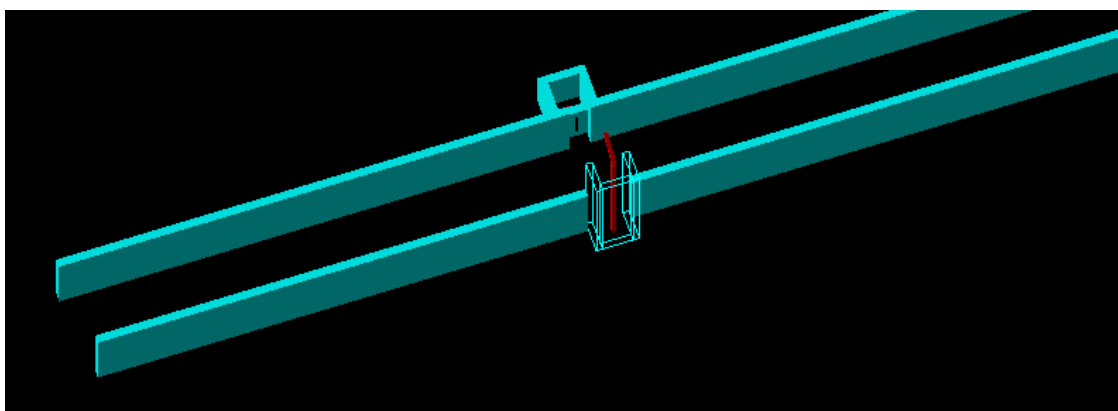
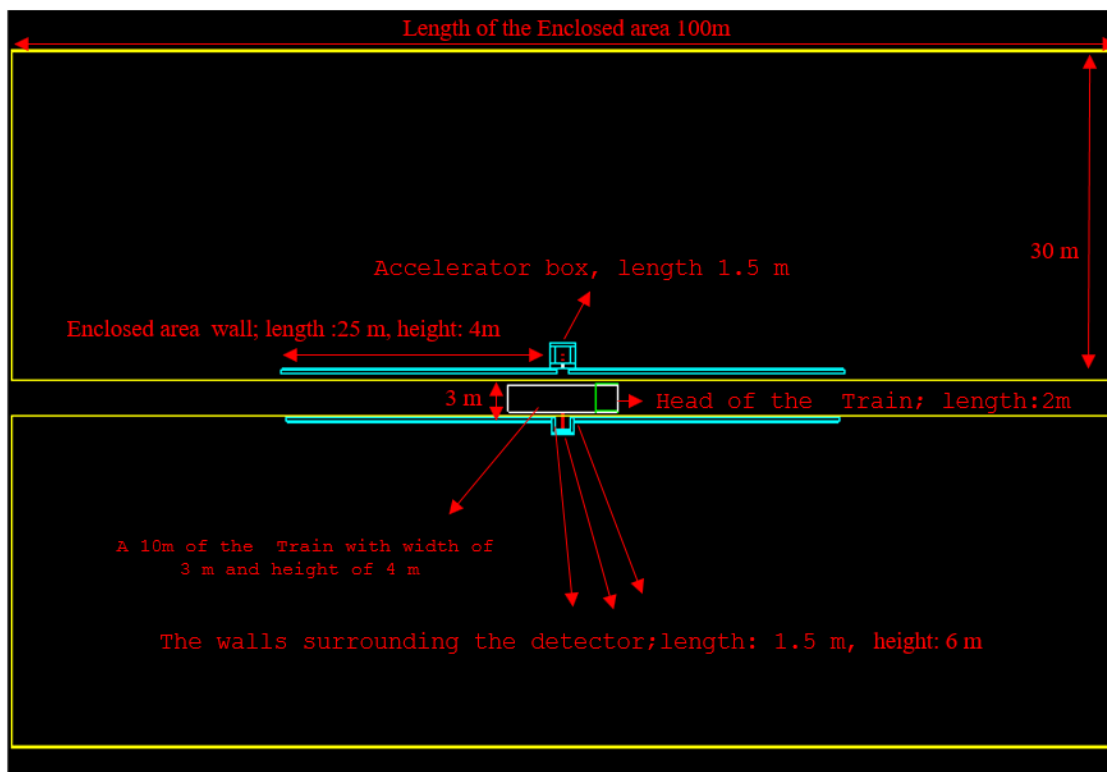
۳- نتایج:

شکل (۲) تغییرات تابع هزینه (Loss function) را به ازای تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد. در شکل (۳) نیز خروجی‌های مربوط به تست مدل ارایه شده است. در قسمت (الف) از این شکل میانگین درصد اختلاف مقادیر دز پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی در نقاط مختلف ناحیه به ازای داده‌های تست ارائه شده است. در قسمت‌های (ب) و (ج) از این شکل نیز توزیع فراوانی مقادیر اختلاف و خطای نسبی ارائه شده‌اند. بر این اساس شکل دقت مدل روی داده‌های تست نزدیک به ۹۰ درصد بوده است. در شکل (۴) نیز مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده به ازای یک نقطه از محیط در تست‌های مختلف ارایه شده است و میانگین خطایی کمتر از ۹.۶٪ را نشان می‌دهد.

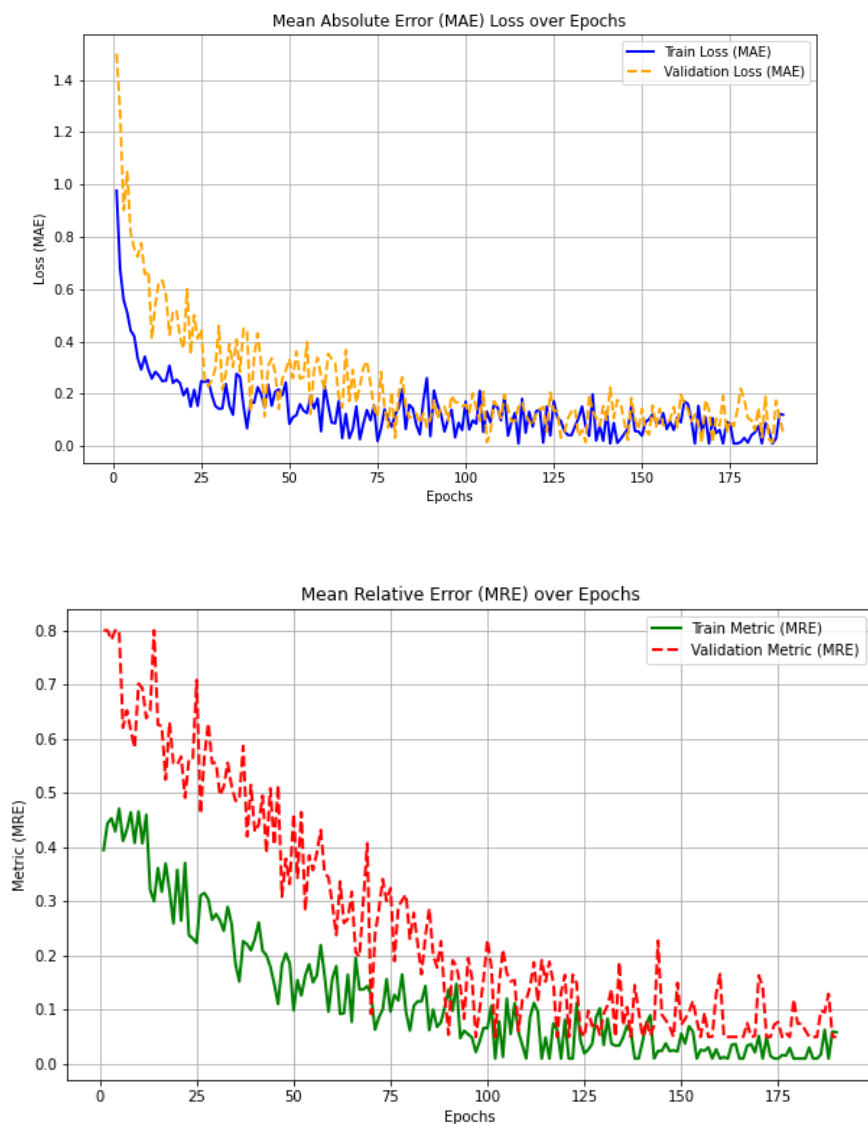
۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه بر اساس هوش مصنوعی یک ایده برای فائق آمدن بر زمان طولانی ترابرد مونت کارلو ارائه و در زمینه مدل‌سازی سیستم اسکن ریلی پیاده‌سازی و خروجی آن در قالب یک وب اپلیکیشن معرفی شد. باتکیه بر این وب اپلیکیشن کاربر می‌تواند نسب به ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف روی آهنگ دز در نقاط مختلف از سیستم بازرسی قطار پردازد. از جمله این پارامترها عبارتند از: طول هر قطار برحسب کیلومتر، سرعت قطار (سرعت اسکن برحسب کیلومتر بر ساعت)، ضخامت بتن دیواره‌های اتاقک شتاب‌دهنده برحسب سانتی‌متر، ضخامت بتن دیواره‌های اتاقک آشکارساز برحسب سانتی‌متر، ضخامت بتن دیواره‌های نزدیک به مرزهای ناحیه حفاظت‌شده برحسب سانتی‌متر، مد تابشی (تک انرژی یا دو انرژی) شتاب‌دهنده و انرژی نامی شتاب‌دهنده، نرخ پالس شتاب‌دهنده برحسب Hz، پهنای زمانی هر پالس، جریان پالس برحسب میلی‌آمپر، ضخامت کریستال‌ها برحسب میلی‌متر، تعداد خطوط آشکارسازی، عرض هر خط سیستم آشکارسازی برحسب میلی‌متر، ضخامت معادل دیواره قطار و محموله برحسب میلی‌متر استیل، حساسیت تباین مدنظر برحسب درصد، نسبت سیگنال به نویز مدنظر و نسبت زمان هر اسکن به زمان پردازش. دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی مقادیر دز (بیش از ۹۰ درصد) و پوشش حجم بالایی از پارامترها، می‌تواند این مدل را به ابزاری قابل توجه در طراحی سیستم‌های بازرسی قطار تبدیل کند.

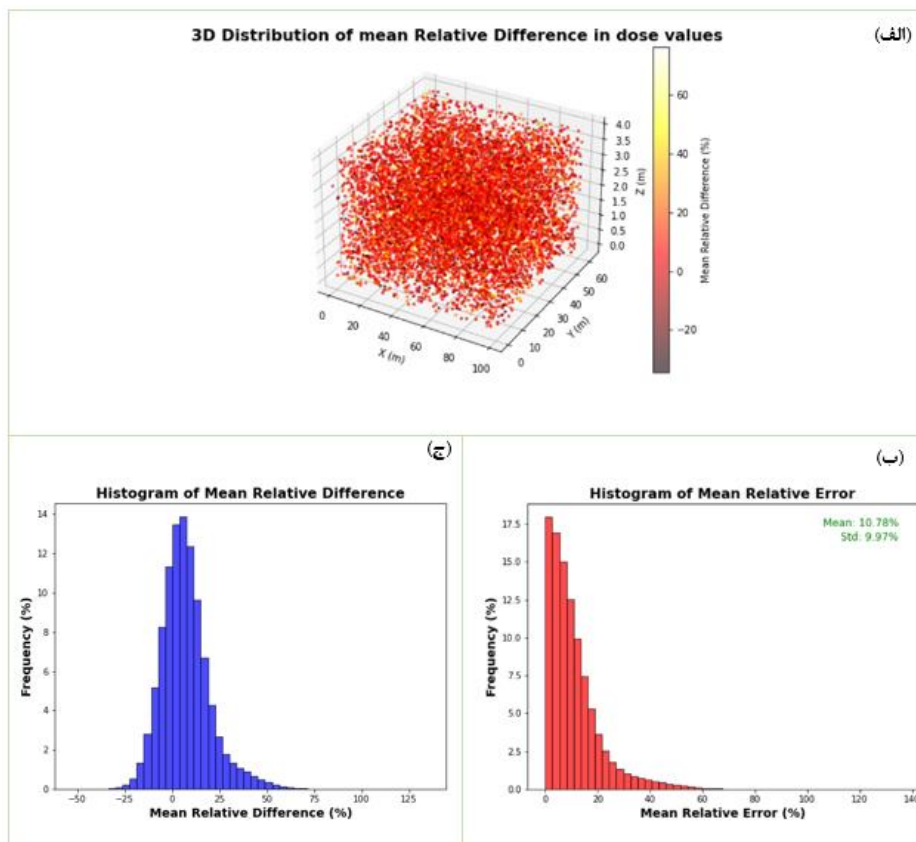
هرچند در آموزش مدل به دلیل کاهش پیچیدگی و تسریع فرایند آموزش به حالتی محدود شده‌ایم که ابعاد فضا و فواصل بین اجزا ثابت در نظر گرفته شده‌اند؛ اما پارامترهای دیگر از جمله ضخامت اجزا مختلف، ابعاد کریستال‌ها، مد و انرژی شتاب‌دهنده و... انعطاف داشته‌اند و افزایش درجه آزادی مدل با افزایش حجم پایگاه امکان‌پذیر است. چالش اصلی در این زمینه به لزوم ارتقای سخت‌افزارهای مورد نیاز برای آموزش مدل با افزایش تعداد پارامترها برمی‌گردد. همچنین ایده مطرح شده در این جا می‌تواند به‌طور کلی برای مدل‌سازی‌های مونت کارلو در حوزه‌های مختلف (از جمله پزشکی هسته‌ای و طراحی درمان و...) برای تسریع مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گیرد.



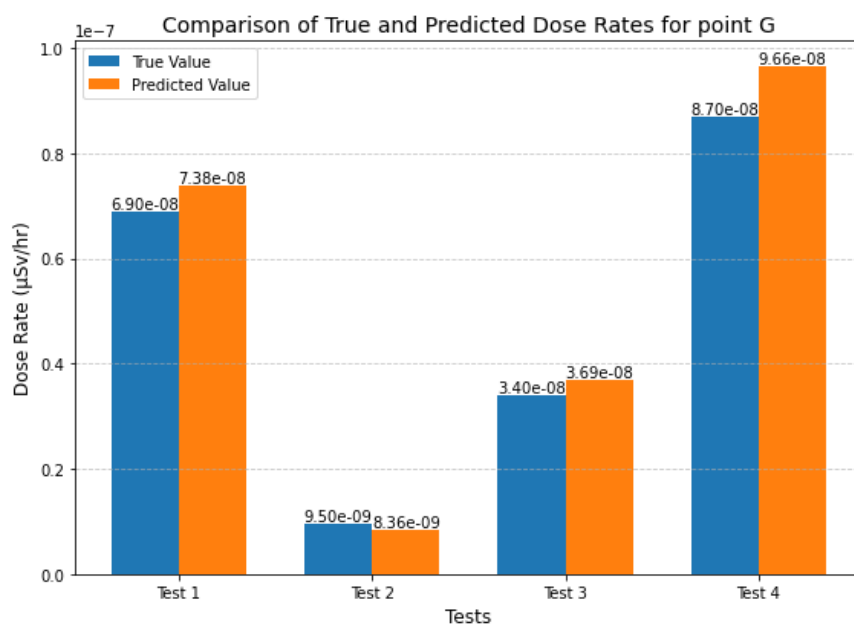
شکل (۱). طرح‌واره‌ای از یکی از حالت‌های شبیه‌سازی‌شده (بالا) و نمایی از معماری هندسی طرح (پایین). ناحیه اریب سیستم آشکارسازی در این نما قابل رؤیت است. به جهت نمایش ملموس‌تر، هندسه‌هایی مانند قطار، مرزهای نواحی حفاظت‌شده و کف و سقف اتاقک شتاب‌دهنده در شکل پایین به تصویر کشیده نشده‌اند. همچنین در تصویر پایین دیواره‌های محفظه آشکارساز به شکل wireframe نمایش داده شده‌اند.



شکل (۲). تغییرات تابع هزینه (بالا) و معیار خطای نسبی (پایین) به ازای تکرارها.



شکل (۳). توزیع مقادیر میانگین اختلاف نسبی در نقاط مختلف (الف) و توزیع فراوانی مربوط به مقادیر میانگین اختلاف های نسبی (ب) و خطاهای نسبی (ج) به ازای داده های تست.



شکل (۴). مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده از آهنگ دز در نقطه G به ازای ۴ تست مختلف.



۵-مراجع:

۱. Kutsaev, S.V., et al. Electron linac with deep energy control for Adaptive Rail Cargo Inspection System. in ۲۰۱۵ IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, NSS/MIC ۲۰۱۵. ۲۰۱۶.
۲. Kutsaev, S., et al. Electron Accelerators for Novel Cargo Inspection Methods. in Physics Procedia. ۲۰۱۷.
۳. Molder, C., et al., Automated non-intrusive cargo inspection system using gamma-ray imaging (ROBOSCAN ۱M). Proceedings of the ۸th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation, ۲۰۰۹(February ۲۰۰۹).
۴. Langeveld, W.G.J., et al. A whole-system approach to x-ray spectroscopy in cargo inspection systems. in AIP Conference Proceedings. ۲۰۱۳.
۵. Lim, C.H., et al., Advanced container inspection system based on dual-angle X-ray imaging method. Journal of Instrumentation, ۲۰۲۱. ۱۶(۸).
۶. Mamchur, D., et al., Application and Advances in Radiographic and Novel Technologies Used for Non-Intrusive Object Inspection, in Sensors. ۲۰۲۲.
۷. Zhang, Q., et al., A survey on deep learning for big data, in Information Fusion. ۲۰۱۸.
۸. Najafabadi, M.M., et al., Deep learning applications and challenges in big data analytics. Journal of Big Data, ۲۰۱۵. ۲(۱).
۹. Sarrut, D., et al., Artificial Intelligence for Monte Carlo Simulation in Medical Physics. Frontiers in Physics, ۲۰۲۱. ۹.
۱۰. Jan, S., et al., GATE: A simulation toolkit for PET and SPECT. Physics in Medicine and Biology, ۲۰۰۴. ۴۹(۱۹).
۱۱. Joshi, D. S., & Sarkar, P. K. Estimation of radiation source term and concrete shield thickness for low energy particle accelerators. Indian Journal of Pure and Applied Physics, ۲۰۱۰, ۴۸(۱۱), ۷۷۱-۷۷۳.



افزایش اتصال عرضی در بازیافت پرتویی ضایعات پلی پروپیلن با استفاده از مونومر چند عاملی (کد مقاله: ۱۱۸۸)

زهرا رفیعی سرمزده^۱، میثم تراب مستعدی^۱، سید مرتضی زاهدی دیزجی^۲، مریم کریمی^۳

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران
۲. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران
۳. پژوهشکده فیزیک و شتابگر، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران

چکیده:

در این پژوهش، امکان افزایش اتصالات عرضی در فرآیند بازیافت پرتویی ضایعات پلی پروپیلن (PPW) با استفاده از مونومر چند عاملی تری متیلول پروپان تری متاکریلات (TMPTMA) مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های کامپوزیتی با درصدهای وزنی مختلف PPW (۰، ۵، ۱۰ و ۱۵٪) و دو درصد وزنی TMPTMA تهیه و تحت تابش الکترونی با دز ۴۰ کیلوگری (kGy) در اتمسفر هوا قرار گرفتند. نتایج آنالیز FTIR نشان داد که در نمونه‌های پرتودهی شده، پیک مربوط به اکسیداسیون و تخریب زنجیره‌های پلیمری در محدوده ۱۷۲۹-۱۷۳۵ cm⁻¹ ظاهر نشد، که نشان‌دهنده عدم وقوع تخریب تابشی به دلیل حضور TMPTMA بود. بررسی شاخص جریان مذاب (MFI) نیز تأیید کرد که پرتودهی منجر به تشکیل اتصالات عرضی و کاهش قابل توجه MFI در نمونه‌ها شده است، در حالی که در نمونه‌های بدون پرتودهی با افزایش محتوای PPW مقدار MFI افزایش چشمگیری داشته است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از TMPTMA به عنوان عامل ایجادکننده اتصالات عرضی، نه تنها از تخریب پلی پروپیلن جلوگیری می‌کند، بلکه امکان بازیافت مؤثر PPW را نیز فراهم می‌سازد.

کلمات کلیدی: تابش دهی، مونومر چند عاملی، بازیافت پرتویی، پلی پروپیلن

Enhancing Crosslinking in Radiation Recycling of Polypropylene Waste Using a Multifunctional Monomer

Rafiei-Sarmazdeh. Z^{۱*}, Meisam Torab-Mostaedi^۱, Zahedi-Dizaji. S. M^۲, Karimi. M^۳

۱. Nuclear Fuel Cycle School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
۲. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
۳. Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, we investigated the potential for enhancing crosslinking in the radiation recycling process of polypropylene waste (PPW) using the multifunctional monomer trimethylolpropane trimethacrylate (TMPTMA). Composite samples with varying weight percentages of PPW (۰٪, ۵٪, ۱۰٪, and ۱۵٪) and ۲ wt% TMPTMA were prepared and subjected to electron beam



irradiation at doses of ۰ and ۴۰ kGy in an air atmosphere. Fourier-transform infrared (FTIR) analysis revealed that in the irradiated samples, no peaks corresponding to oxidation or polymer chain degradation appeared in the range of ۱۷۲۹-۱۷۳۵ cm^{-1} , indicating the absence of radiation-induced degradation due to TMPTMA. Melt flow index (MFI) analysis further confirmed that irradiation led to the formation of crosslinks and a significant reduction in MFI in the samples. In contrast, non-irradiated samples exhibited a substantial increase in MFI with higher PPW content. This study demonstrates that the use of TMPTMA as a crosslinking agent not only prevents the degradation of polypropylene but also facilitates the effective recycling of PPW.

Key words: Polypropylene, Radiation recycling, Multifunctional monomer, Irradiation

۱ - مقدمه:

شرح پلی پروپیلن^{۴۶} (PP) به عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای ترموپلاستیک، نقش مهمی در صنایع مختلف ایفا می‌کند. این پلیمر به دلیل خواص مطلوبی همچون سبکی، مقاومت شیمیایی، قابلیت فرآوری آسان و هزینه تولید نسبتاً پایین، در تولید محصولات متنوعی از جمله بسته‌بندی‌ها، قطعات خودرو، منسوجات و لوازم خانگی استفاده می‌شود. با توجه به آمارهای جهانی، مصرف پلی پروپیلن سالانه به طور پیوسته در حال افزایش است و این موضوع باعث شده تا مدیریت ضایعات پلی پروپیلن^{۴۷} (PPW) به یک چالش مهم زیست محیطی و اقتصادی تبدیل شود. بازیافت این پلیمر نه تنها باعث کاهش آلودگی‌های محیطی ناشی از تجمع ضایعات پلاستیکی می‌شود، بلکه به حفظ منابع نفتی و کاهش هزینه‌های تولید نیز کمک می‌کند.

یکی از روش‌های نوین و مؤثر در بازیافت پلیمرها، استفاده از فناوری پرتویی است. این روش با اعتبار پرتوهای یون‌ساز مانند پرتوهای گاما یا الکترونی، امکان ایجاد تغییرات ساختاری در پلیمرها را فراهم می‌کند که منجر به بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها می‌شود. با این حال به دلیل وجود اتم‌های کربن نوع سوم در هر جایگاه از زنجیره اصلی، PP مستعد تخریب و شکست زنجیره بوده و مقاومت کمتری در برابر پیری، شرایط جوی و پرتوایی دارد. این تخریب می‌تواند باعث کاهش وزن مولکولی، ایجاد شکست در زنجیره‌های پلیمری و در نهایت افت خواص مکانیکی و حرارتی شود [۱].

اتصالات عرضی پلیمرها باعث بهبود چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی مانند سختی، مدول یانگ، مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر حلال‌ها می‌شود. به‌ویژه، اتصالات عرضی با استفاده از پرتو الکترونی به‌طور گسترده‌ای برای بهبود پایداری حرارتی چندین پلیمر در صنایعی مانند عایق کاری کابل‌ها، لوله‌ها و ورق‌های جمع‌شونده با حرارت و محصولات فوم‌شده با اشکال مختلف استفاده شده است. برای افزایش چگالی اتصال عرضی در فرآیند تابش دهی پلیمرها، روش‌های متعددی وجود دارد: استفاده از جوه‌های بی اثر، استفاده از انتی اکسیدان‌ها برای رفع تخریب بعد از تابش، روش درمان پلاسما/یونی (مانند آرگون) [۲]، استفاده از متحرک‌کننده‌ها^{۴۸} می‌تواند تخریب را در حین و پس از تابش کاهش داده و از دست رفتن خواص ناشی از فرآیند تابش جلوگیری

^{۴۶} Polypropylene (PP)

^{۴۷} Polypropylene Waste (PPW)

^{۴۸} Mobilizer



می‌نماید [۳]. استفاده از مونومرهای دو و چند عاملی یکی دیگر از راه‌های صنعتی برای کاهش مقدار تخریب و افزایش چگالی پیوند عرضی در انواع ترموپلاستیک هاست [۴]. تا کنون از مونومرهای چند عاملی مختلفی به منظور افزایش سهم کراس لینک برای انواع مختلف پلیمرها استفاده شده است که از آن جمله میتوان به سیلان‌ها و وینیل سیلان‌ها، آلیلاکریلات‌ها، دی‌وینیل سولفون‌ها و غیره به عنوان مونومرهای چند عاملی برای انواع ترموپلاستیک‌ها در صنعت و تحقیقات علمی اشاره نمود [۱، ۴-۶]. مونومرهای چند عاملی در واقع ترکیبات آلی حاوی چندین گروه عاملی فعال هستند که قادر به ایجاد پیوند کووالانسی با سایر مونومرها یا زنجیره‌های پلیمری هستند. استفاده از مونومرهای چند عاملی در شیمی پلیمرها امکان تشکیل ساختارهای متقاطع متراکم را فراهم میکند که برای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی ترموپلاستیکها بسیار مهم هستند [۷]. بنابراین، بررسی و بهینه‌سازی شرایط پرتودهی برای بازیافت مؤثر پلی‌پروپیلن و کاهش اثرات تخریبی آن، از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش با هدف بررسی استفاده از مونومر چند عاملی تری‌متیلول پروپان تری‌متاکریلات^{۴۹} (TMPTMA) و بررسی نقش و مکانیزم آن در بازیافت پرتویی ضایعات پلی‌پروپیلن انجام شده است.

۲- روش کار:

۲-۱- مواد

در این تحقیق از پلی‌پروپیلن گرید ZR230 C با نام تجاری Parslen PP تولید شرکت زرشیمی استفاده شد. این گرید به دلیل دارا بودن مقاومت حرارتی و خزشی مناسب و همچنین مقاومت بالا در برابر ضربه انتخاب گردید. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این ماده شامل شاخص جریان مذاب (MFI) برابر با ۰،۳۵g/10min (مطابق استاندارد ASTM D ۱۲۳۸)، در دمای ۲۳۰ °C و تحت بار ۲،۱۶kg، استحکام کششی در نقطه تسلیم برابر با ۲۸ MPa (بر اساس استاندارد ASTM D ۶۳۸)، ازدیاد طول در نقطه تسلیم برابر با ۱۵٪ (بر اساس استاندارد ASTM D ۶۳۸) و مدول خمشی برابر با ۱۰۰۰ MPa (بر اساس استاندارد ASTM D ۷۹۰) می‌باشد. همچنین، از ضایعات لوله‌های پلی‌پروپیلن به عنوان منبع پلی‌پروپیلن بازیافتی در این پژوهش استفاده شد. علاوه بر این، TMPTMA با فرمول شیمیایی C₁₈H₂₆O₆، با جرم مولکولی ۳۳۸ g/mol و چگالی ۱،۰۶g/mL، تهیه‌شده از شرکت سیگما آلدریج، به عنوان عامل ایجاد شبکه اتصالات عرضی در ماتریس پلیمری به میزان ۲٪ وزنی در تمامی نمونه‌ها و بدون هیچ گونه اصلاح یا خالص‌سازی اضافی افزوده شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

کلیه ابتدا پلی‌پروپیلن در دمای ۱۷۵ °C و با سرعت ۳۰ rpm در یک میکسر غلطکی ذوب شده و سپس PPW با درصدهای وزنی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد به همراه ۲ درصد وزنی TMPTMA به PP مذاب اضافه شده و به مدت ۶ دقیقه زمان داده شد تا به طور کامل همگن شوند و اطمینان حاصل شود که مواد به طور یکنواخت توزیع شده‌اند. پس از آماده‌سازی مخلوط، صفحات کامپوزیتی با ابعاد ۸ × ۷ cm در دمای ۱۷۵ °C و تحت فشار ۲،۵ MPa قالب‌گیری شدند. نمونه‌های تهیه‌شده سپس تحت

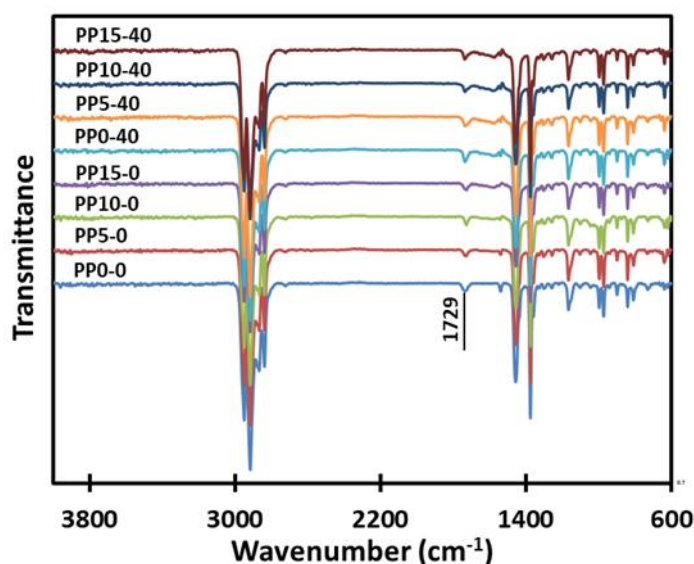
^{۴۹}Trimethylolpropane Trimethacrylate (TMPTMA)



تابش الکترونی با دز ۴۰ kGy در اتمسفر هوا قرار گرفتند. نمونه‌ها بر حسب محتوای PPW و دز دریافتی به عنوان مثال با کدهای PP-۰۱۵ و PP-۴۰۱۵ نام گذاری شدند.

۳- بحث و نتایج

بررسی طیف FTIR-ATR نمونه‌های PP، PP10، PP5، PP0، PP-۰۱۵ در غیاب و حضور تابش در شکل ۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است شدت پیک مربوط به اکسیداسیون و تخریب زنجیره‌های پلیمری که در ۱۷۲۹-۱۷۳۵ cm^{-1} ظاهر شده در نمونه‌های پرتودهی شده نسبت به نمونه‌های بدون تابش دهی تغییری نکرده است که نشان دهنده عدم وقوع تخریب تابشی است که به دلیل استفاده از مونومر چند عاملی کاملاً قابل انتظار می‌باشد. همچنین پیک اضافه دیگری که نشان دهنده تشکیل گونه جدیدی در نتیجه تخریب باشد دیده نمی‌شود.



شکل (۱) طیف FTIR نمونه‌های پلی پروپیلن پرتودهی نشده و پرتودهی شده در دز ۰ و ۴۰ kGy

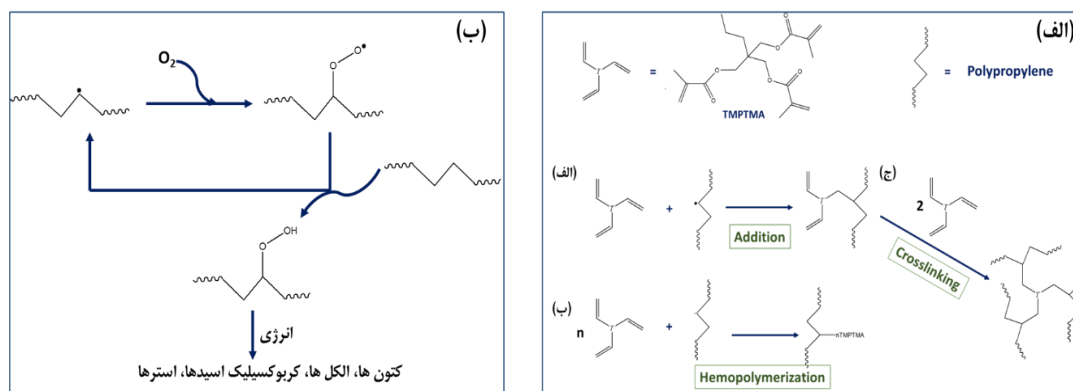
TMPTMA شامل سه پیوند دوگانه انتهایی در یک مولکول است. واکنش اولین واحد وینیل منجر به انشعاب (واکنش الف، شکل ۲الف) می‌شود، در حالی که واکنش‌های بعدی ممکن است به پلیمریزاسیون TMPTMA (واکنش ب، شکل ۲الف که به دلیل ممانعت فضایی و غلظت کم غیرمحتمل است) و پیوند عرضی با زنجیره‌های پلیمری (واکنش ج، شکل ۲الف) منجر شوند. درجه پیوند عرضی به مقدار بهینه پیوندهای دوگانه جانبی و دوز جذب‌شده وابسته است و افزودن افزودنی‌های واکنشی مناسب به PP قبل از تابش منجر به افزایش پیوند عرضی می‌شود [۸].

علاوه بر این، به خوبی شناخته شده است که در صورت عدم کنترل شرایط پرتودهی، تابش PP در حضور هوا می‌تواند منجر به اکسیداسیون پلیمر و در نتیجه از دست رفتن خواص مکانیکی برتر آن شود. اکسیژن به راحتی با رادیکال‌های آلکیل واکنش



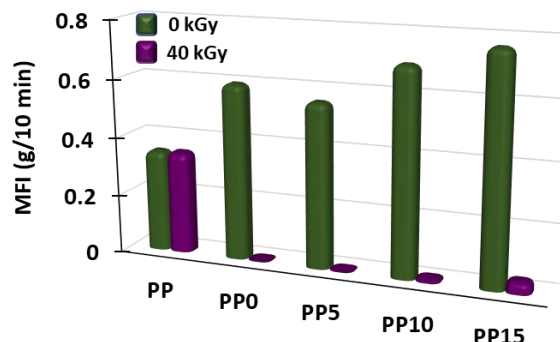
می‌دهد و گونه‌هایی مانند هیدروپراکسیدها، الکل‌ها، اسیدها، کتون‌ها و غیره را تشکیل می‌دهد که می‌توان آن را با شکل ۲ ب (چرخه بولند^{۵۰}: طرح اکسیداسیون هیدروکربن‌ها) توضیح داد [۸].

تخریب و اکسیداسیون پلی پروپیلن منجر به تشکیل گروه کربونیل و ظهور پیک مشخصه ای در حوالی 1173 cm^{-1} می‌گردد و میزان اکسیداسیون ناشی از تابش با افزایش دوز و همچنین با زمان قرارگیری افزایش می‌یابد [۸]. با استفاده از مونومرهای چند عاملی که می‌توانند چگالی پیوند عرضی را افزایش دهند و/یا دوز تابش را در همان چگالی پیوند عرضی کاهش دهند، اکسیداسیون PP مهار میگردد [۸].



شکل (۲) (الف) ساختار شیمیایی و شماتیک مکانیزم عمل مونومر چند عاملی TMPTMA و (ب) چرخه بولند: شماتیک اکسیداسیون هیدروکربن‌ها

شکل ۳ اثرات تابش الکترونی را بر شاخص MFI نمونه‌های مخلوط حاوی PPW نشان می‌دهد. شاخص مذاب برای PP مقدار $0.35\text{ g}/10\text{ min}$ می‌باشد. بدون پرتودهی، با افزودن PPW به بستر PP و افزایش محتوای آن، مقدار MFI افزایش می‌یابد. نمونه PP بدون افزودن PPW و به دلیل یکبار فراوری حرارتی افزایش بیش از ۷۰٪ را در مقدار MFI نشان می‌دهد. تنها نمونه حاوی ۵٪ وزنی از PPW، کاهش اندکی در MFI را نسبت به نمونه PP نشان می‌دهد. علت این امر را میتوان به حضور PPW نسبت داد. ضایعات پلی‌پروپیلن به دلیل واکنشهای اکسیداتیو که در طول زمان به دلیل مجاورت در معرض هوا و گرما در آن رخ داده است، علاوه بر تخریب زنجیره و کم شدن وزن ملکولی آن، میتواند دارای پیوندهای متقاطع عرضی گردد. حضور این ساختار باعث کاهش شاخص جریان مذاب آن نسبت به PP میشود. با افزایش محتوای PPW، حضور زنجیره‌های کوتاه در ساختار PP تاثیر بیشتری را در رقابت با ساختارهای دارای پیوند عرضی نشان داده و MFI افزایش می‌یابد.



شکل (۳) شاخص جریان مذاب به عنوان تابعی از نوع مخلوط پلیپروپیلن حاوی PPW در دزهای ۰ و ۴۰ (مقدار MFI برای PP و ۵PP در دز ۴۰ kGy قابل اندازه گیری نبوده و در منحنی صفر در نظر گرفته شده است)

با این حال زمانی که نمونه‌ها پرتوافروری میشوند تغییرات مقدار شاخص جریان مذاب در فرمولاسیونهای تهیه شده، نسبت به مخلوط پلیمری بدون پرتودهی متناظر خود کاهش شدیدی یافته است که نشان دهنده تشکیل پیوند عرضی با پرتودهی نمونه‌هاست به نحویکه مقدار آن برای نمونه PP و ۵PP قابل اندازه گیری نیست. لازم به ذکر است در رسم نمودار (شکل ۴) مقدار آن برای این دو نمونه صفر در نظر گرفته شده است. با افزایش محتوای وزنی PPW، نمونه‌های مخلوط پلیمری مذاب اندکی جریان یافته و مقدار MFI به ترتیب برای نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵٪ وزنی از PPW به ۰/۰۱ g/10min و ۰/۰۴ میرسد. سه مکانیزم و واکنش برای عملکرد این مونومر در پرتوافروری پلیمرها وجود دارد:

- ۱- تشکیل ساختار سه بعدی دارای پیوند متقاطع این مونومر با خود: یکی از واکنش‌های پیشنهادی برای این مونومر، کراس لینک تابشی TMPTMA با خود است. این در حالی است این مونومر به دلیل ساختار شاخه دار حجیم خود و ممانعت فضایی امکان تشکیل کراس لینک و ساختار سه بعدی با خود را ندارد که در مقالات [۸-۱۱] به این موضوع اشاره و تاکید شده است.
- ۲- هموپلیمریزه شدن: یکی از احتمالات در خصوص مکانیزم عمل این مونومر آن است که این مونومر هموپلیمریزه شود که احتمال آن نیز با توجه به غلظت پایین آن بسیار اندک است. در صورت هموپلیمریزه شدن این مونومر به دلیل عدم وقوع کراس لینک، باید MFI نمونه پرتودهی شده مساوی یا بیشتر از نمونه‌های بدون پرتودهی شود، که مشاهده میشود نمونه‌های پرتودهی شده MFI کمتر از نمونه‌های بدون پرتودهی را دارند ($MFI=0$).

- ۳- تشکیل کراس لینک تابشی با پلی پروپیلن: واکنش سوم محتمل آن است که این مونومر شبکه سه بعدی با پلی پروپیلن تشکیل دهد که مکانیزم آن در شکل ۱ نشان داده شده است و اساس استفاده از این ترکیب در بازیافت پرتویی پلی پروپیلن نیز بر این اساس بوده است.

میتوان نتیجه گرفت در غیاب تابشدهی، فراوری حرارتی PP و افزودن ضایعات PP به دلیل تخریب زنجیرها و کاهش طول زنجیرهای پلیمری، منجر به افزایش MFI میگردد. اما از سوی دیگر، پرتوافروری باعث ایجاد اتصالات عرضی در سراسر مخلوط پلیمری شده و اثر منفی افزایش PPW و فراوری حرارتی کامپوزیت را تا حد زیادی کاهش داده و سرعت افزایش MFI را با افزایش محتوای PPW نیز کاهش میدهد.



۴- بحث و نتیجه گیری:

این پژوهش نشان داد که استفاده از مونومر چندعاملی TMPTMA در فرآیند بازیافت پرتویی ضایعات پلی پروپیلن، تأثیر قابل توجهی در افزایش اتصالات عرضی و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دارد. نتایج حاصل از آنالیز FTIR و MFI تأیید کرد که پرتودهی در حضور TMPTMA از تخریب زنجیره‌های پلیمری جلوگیری کرده و تشکیل شبکه‌های اتصال عرضی را تسهیل می‌کند. این یافته‌ها حاکی از آن است که این روش می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بازیافت ضایعات پلی پروپیلن و کاهش آلودگی‌های محیطی ناشی از پلاستیک‌ها مورد استفاده قرار گیرد. از دیدگاه صنعتی، این روش می‌تواند هزینه‌های مرتبط با تولید پلی پروپیلن را کاهش داده و به حفظ منابع نفتی کمک کند. همچنین، از نظر علمی، این پژوهش مسیرهای جدیدی را برای تحقیقات آینده در زمینه بهینه‌سازی دز پرتودهی، بررسی تأثیر سایر مونومرهای چندعاملی و مطالعه رفتار پلی پروپیلن در شرایط مختلف محیطی باز می‌کند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند نیاز به کنترل دقیق شرایط پرتودهی و تأثیر احتمالی ناخالصی‌های موجود در PPW بر خواص نهایی کامپوزیت‌ها باید در مطالعات آینده مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع:

- [۱] R. Bouregba, B. A. Bachir Bouiadjra, M. M. Bouziane, M. A. Bellali, and M. J. J. o. P. M. Salem, "Effect of Thermal Ageing on the Thermal and Mechanical Properties of Polypropylene and Polypropylene Micro-Composites," vol. ۴۱, no. ۳, ۲۰۲۴.
- [۲] X. Wu, C. Wu, G. Wang, P. Jiang, and J. Zhang, "A crosslinking method of UHMWPE irradiated by electron beam using TMPTMA as radiosensitizer," Journal of Applied Polymer Science, vol. ۱۲۷, ۰۱/۰۵ ۲۰۱۳.
- [۳] A. Plota-Pietrzak, A. J. S. M. Masek, and Technologies, "Functionalized metal oxide particles with antioxidant as new carriers providing higher stability of polyolefin products," vol. ۴۰, p. e۰۰۸۸۵, ۲۰۲۴.
- [۴] R. Patterson, A. Kandelbauer, U. Müller, and H. Lammer, "Chapter ۱۵ - Cross-linked thermoplastics," in Handbook of Thermoset Plastics (Fourth Edition), H. Dodiuk, Ed. Boston: William Andrew Publishing, ۲۰۲۲, pp. ۷۱۹-۷۵۶.
- [۵] H. XU et al., "Preparation and Application of Radiation-crosslinked Polypropylene by One-step Process for Corrosion Prevention of High-temperature Pipelines," Materiale Plastice, vol. ۶۱, no. ۴, ۲۰۲۴.
- [۶] J. C. Hernández-Ortiz et al., "The Relevance of Multi-Injection and Temperature Profiles to Design Multi-Phase Reactive Processing of Polyolefins," Macromolecular Theory and Simulations, vol. ۲۸, no. ۶, p. ۱۹۰۰۰۳۵, ۲۰۱۹/۱۱/۰۱ ۲۰۱۹.
- [۷] M. A. S. N. Weerasinghe et al., "Educational series: turning monomers into crosslinked polymer networks," Polymer Chemistry, ۱۰,۱۰۳۹/D۳PY۰۰۹۱۲B vol. ۱۴, no. ۳۹, pp. ۴۵۰۳-۴۵۱۴, ۲۰۲۳.



- [۸] A. Foroozan, T. Behboodi, and Y. Jahani, "The influence of branching efficiency on the rheology and morphology of melt state long chain branched polypropylene/polybutene-۱ blends," (in en), Polyolefins Journal, vol. ۶, no. ۱, pp. ۱-۱۱, ۲۰۱۹.
- [۹] A. Yoshiga, H. Otaguro, D. F. Parra, L. F. C. P. Lima, and A. B. Lugao, "Controlled degradation and crosslinking of polypropylene induced by gamma radiation and acetylene," Polymer Bulletin, vol. ۶۳, no. ۳, pp. ۳۹۷-۴۰۹, ۲۰۰۹/۰۹/۰۱ ۲۰۰۹.
- [۱۰] J. Gao, Y. Lu, G. Wei, X. Zhang, Y. Liu, and J. Qiao, "Effect of radiation on the crosslinking and branching of polypropylene," Journal of Applied Polymer Science, vol. ۸۵, no. ۸, pp. ۱۷۵۸-۱۷۶۴, ۲۰۰۲/۰۸/۲۲ ۲۰۰۲.
- [۱۱] S.-H. Shin, S. Petrov, and Chemistry, "Crosslinking and degradation of polypropylene by electron beam irradiation in the presence of trifunctional monomers," Radiation Physics and Chemistry, vol. ۶۹, no. ۳, pp. ۲۳۹-۲۴۴, ۲۰۰۴.



آزمایش نمونه اولیه باتری بتا ولتائیک و اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی ترکیبی FLUKA+SILVACO با داده‌های تجربی آن (کد مقاله: ۱۱۹۱)

طلائی نیک، فاطمه^۱ - اطاعتی، غلامرضا^۱ - عینیان، محمدرضا^۲ - مؤیدی، حسین^۱ - آفریده، حسین^۱
۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده فیزیک و مهندسی انرژی
۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش در راستای بهبود و کاهش خطای شبیه‌سازی باتری‌های بتا ولتائیک و بهینه‌سازی طراحی آن‌ها، کد ترکیبی FLUKA+SILVACO توسعه داده شد و با نمونه اولیه باتری ساخته شده در همین پژوهش بر پایه سیلیکون و استرانسیوم-۹۰ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. اندازه‌گیری وابسته به مکان چشمه استرانسیوم-۹۰ و مقایسه آن با نتایج شبیه‌سازی کد ترکیبی نشان داد که اختلاف نتایج محاسباتی و تجربی برای جریان اتصال کوتاه در بازه ۲/۳۰-۹/۴۲٪ و برای ولتاژ مدار باز در بازه ۱۲/۷۱-۲/۳۰٪ بدست آمد.

کلمات کلیدی: فلوکا، سیلواکو، باتری بتا ولتائیک، استرانسیوم-۹۰، سیلیکون

Testing a beta-voltaic battery prototype and validating the FLUKA+SILVACO combinatorial code simulation method with its experimental data

Talaeinik, Fatemeh^{۱*}; Etaati, Gholamreza^۱, Einian^۲, Mohammadreza; Moayedy,
Hossein^۱; Afarideh, Hossein^۱

^۱. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology,
Tehran, Iran

^۲. Department of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, in order to improve and reduce the simulation error of beta-voltaic batteries and optimize their design, the SILVACO+FLUKA hybrid code was developed and validated with a prototype battery made in the same study based on silicon and strontium-90. The location-dependent measurement of the strontium-90 source and its comparison with the simulation results of the hybrid code showed that the difference between the computational and experimental results for the short-circuit current was in the range of 2.30-9.42% and for the open-circuit voltage was in the range of 12.71-2.30%.

Key words: FLUKA, SILVACO, betavoltaic Battery, strontium-90, silicon



۱- مقدمه

در راستای تأمین فناوری‌های منابع انرژی سازگار با محیط زیست در سراسر جهان در کنار گزینه‌هایی مانند سلول‌های خورشیدی، باتری‌های شیمیایی جدید، تأمین‌کننده‌های میکروویو و مولدهای ارتعاش، انرژی هسته‌ای و باتری‌های بتاولتائیک^{۵۱} برای تأمین منابع انرژی کم‌توان گزینه‌ای بی‌نظیر محسوب می‌شوند. ویژگی‌های منحصر به فرد باتری‌های بتاولتائیک شامل عدم تأثیرپذیری از شرایط محیطی پر فشار و دما، عمر عملیاتی بسیار بالا، چگالی انرژی ویژه فوق‌العاده، عدم نیاز به ذخیره‌سازی سوخت، عملکرد خروجی پایدار، امکان ساخت در مقیاس کوچک و فشرده‌سازی [۲۳] کاربرد این باتری‌ها را در محیط‌های بحرانی از لحاظ دما و فشار مانند فضا، اعماق دریا و مناطق قطبی و تأمین‌کننده توان در سطح نانو و میکرو برای اینترنت اشیا، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، زیست‌پزشکی، صنعتی، نظامی و تجاری را گسترش داده‌است.

تلاش‌های تحقیقاتی امروزه در راستای بهبود توان خروجی و بازدهی تبدیل انرژی^{۵۲} باتری بتاولتائیک، به بررسی چندین ماده جاذب تابش بتا یعنی نیمه‌رسانای مناسب (C, GaN, SiC, ZnO، و غیره) و ساختار مبدل (p-n, p-i-n، شاتکی) و همچنین به طور موازی، منابع رادیوایزوتوپ (^3H ، ^{147}Pm ، ^{63}Ni)، و غیره) منجر شده است [۳]. علاوه بر این، برخی مطالعات سعی دارند با شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر عملکرد باتری بتاولتائیک در طول فرآیند ساخت، بهینه‌سازی و دستیابی به حداکثر عملکرد را پیش بگیرند [۳]. این نتایج نظری اغلب با کارهای تجربی برای به دست آوردن یافته‌های دقیق‌تر مقایسه می‌شوند. در این زمینه، ابزار و روش‌های شبیه‌سازی متعددی در تحقیقات و مطالعات باتری‌های بتاولتائیک به کار گرفته شده است.

از عمده‌ترین روش‌ها می‌توان به محاسبه انرژی انباشت با کد MCNPX در چند لایه از ضخامت باتری و محاسبه جریان از طریق روابط تحلیلی احتمال وابسته به مکان جمع‌آوری حامل‌ها و یا برازش منحنی انرژی انباشت حاصل از کدهای مونت‌کارلو برای دستیابی به تابعی جهت محاسبه پارامترهای باتری از طریق معادله پیوستگی حامل‌های اقلیت اشاره کرد [۴-۹].

تبدیل انرژی انباشت یونیزاسیون به دست آمده توسط Geant4 به نرخ تولید الکترون-حفره و نگاشت به نرم‌افزار COMSOL Multiphysics، برای شبیه‌سازی پارامترهای الکتریکی باتری یکی دیگر از روش‌ها در مطالعات روز است [۱۰ و ۱۱]، اما در اکثر مطالعات مقایسه نتایج با داده‌های تجربی و گزارش خطا وجود ندارد. در این میان تنها تحقیقات انجام شده با استفاده از کد MCNPX و SILVACO توسط پدram ملکی و همکاران [۱۲] و همچنین سهیل حاجی‌بابا و همکاران [۱۳] و با استفاده از کد FLUKA و SILVACO مربوط به تحقیقات اخیر ما [۱۴ و ۱۵] است. در این تحقیقات نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی و محاسباتی سایرین مقایسه شده که نشان دهنده بهبود بسیار در تطبیق شبیه‌سازی با نتایج تجربی است.

در این مقاله نیز در راستای هر چه دقیق‌تر کردن شبیه‌سازی، پارامترهای مؤثر توزیع انرژی و تولید الکترون-حفره در باتری از طریق کد ترکیبی FLUKA+SILVACO محاسبه شده که در نهایت با نمونه تجربی سلول بتاولتائیک ساخته شده در همین پژوهش که در ادامه تشریح می‌شود، مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. به این ترتیب علاوه بر اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی با کد ترکیبی، حساسیت باتری به مکان چشمه شبیه‌سازی و با نتایج آزمایش مقایسه شد.

^{۵۱} Betavoltaic Batteries

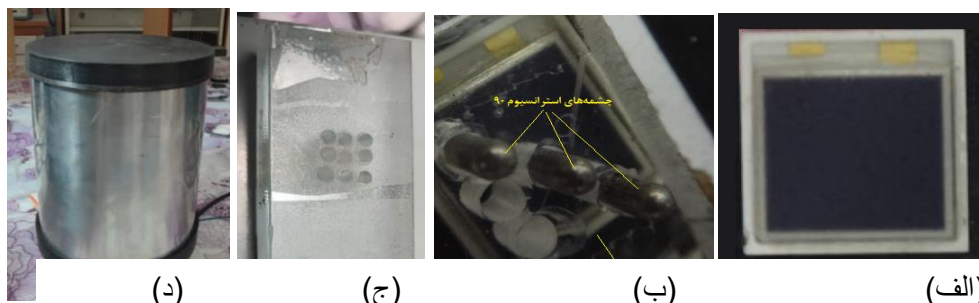
^{۵۲} Energy Conversion Efficiency (ECE)



۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ساخت و چیدمان آزمایش باتری بتاولتاژیک

در این آزمایش، چشمه استرانسیوم-۹۰ و نیمه‌رسانای سیلیکونی به کار برده شده است. فعالیت رادیوایزوتوپ ^{90}Sr برابر ۱۰ mCi است که به شکل استوانه به قطر ۱ mm و ضخامت ۱ mm در انتهای کپسول میله‌ای از جنس استیل به قطر ۱ mm و ۲ cm است به طوری که تابش استرانسیوم از کپسول بدون درپوش خارج می‌شود. ابعاد نیمه‌رسانا نیز $1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$ با روکشی از رزین اپوکسی با ضخامت ۰/۲ mm روی سطح و زیر لایه‌ای از سرامیک به ضخامت ۱/۸ mm با نام تجاری S۳۵۹۰-۰۸ از شرکت هاماماتسو ژاپنی است. چشمه از طریق یک نگه‌دارنده از جنس پلکسی گلس روی نیمه‌رسانا قرار می‌گیرد. در نهایت چشمه و نیمه‌رسانا و تمام اتصالات آن در داخل محفظه بسته‌ای از جنس استیل قرار گرفته و به زمین متصل می‌شود تا از امواج الکترومغناطیسی و نور محیط و نوفه ناشی از برق شهری (۵۰ Hz) ممانعت شود. تجهیزات مذکور در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) الف- نیمه‌رسانای سیلیکونی S۳۵۹۰-۰۸ و ب- کپسول چشمه میله‌ای استرانسیوم-۹۰ ج- نگه‌دارنده چشمه د- محفظه استریل

همچنین یک فیلتر پایین‌گذر با مقادیر 100Ω ، ۱۰۰ mH و $10 \mu\text{F}$ جهت حذف نویزهای دیگر از جمله فرکانس تجزیه چشمه، استفاده شده که فرکانس‌های بالاتر از ۱۶۰ Hz را حذف می‌کند. در شکل (۲ الف) مدار معادل چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده است:

جریان و ولتاژ نیز از طریق مولتی‌متر با نام تجاری Tektronix DMM4050 با دقت ۵ رقم اعشار اندازه‌گیری می‌شود. برای اتصالات از کابل‌های هم محور U/A-58RG با کانکتور BNC استفاده شد.

۲-۲- شبیه‌سازی با کد ترکیبی SILVACO+FLUKA

با توجه به برخی ویژگی‌های منحصر به فرد کد مونت کارلوی Fluka در این پژوهش در مرحله اول شبیه‌سازی، برای محاسبه ترابرد و تولید زوج الکترون-حفره استفاده از این کد هسته‌ای مدنظر قرار گرفته است. در مرحله دوم، برای شبیه‌سازی دقیق ترابرد الکترون-حفره در نیمه‌رسانا و محاسبات جریان و ولتاژ از کد شناخته شده و معتبر SILVACO استفاده شده است. کد SILVACO مجموعه‌ای بسیار قدرتمند برای طراحی و شبیه‌سازی قطعات نیمه‌رسانا و زیرمجموعه ATLAS از این نرم‌افزار شامل مجموعه کاملی از مدل‌های فیزیکی و دارای یک مترجم زبان C داخلی است که به بسیاری از مدل‌های موجود در

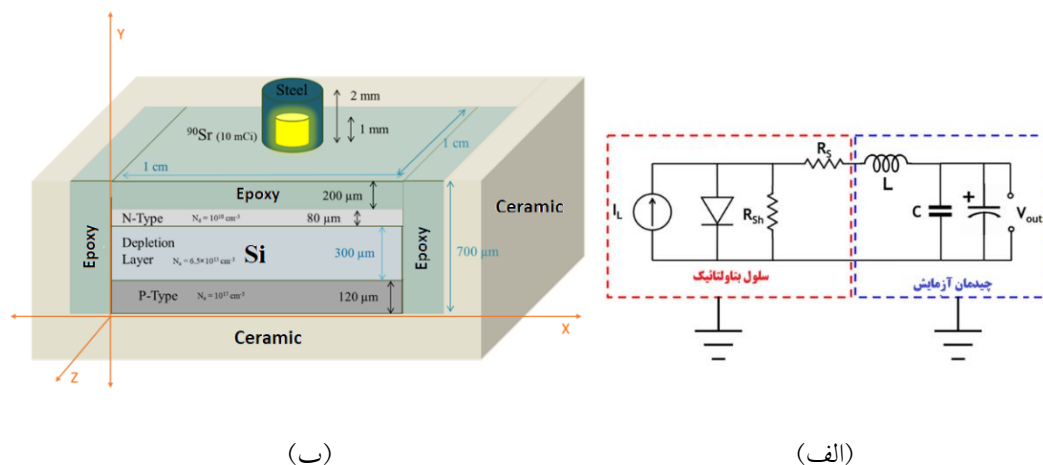


ATLAS امکان اصلاح می‌دهد. برای استفاده از مفسر C در SILVACO ۵۳، باید توابع زبان C حاوی توضیحات تحلیلی مدل نوشته شود.

بنابراین ابتدا در کد FLUKA با استفاده از سه کارت RADDECAY، DCYSCORE و HI-PROPE چشمه حجمی استرانسیوم-۹۰ و هندسه مذکور نیمه‌رسانای سیلیکونی و مواد اطراف آن شبیه‌سازی شد و سپس میزان فعالیت چشمه و انرژی لازم جهت تولید زوج الکترون-حفره در سیلیکون روی انرژی نهشتی به دست آمده در باتری با خروجی USRBIN اعمال و تعداد الکترون-حفره تولید شده حاصل شد. در مرحله دوم در شبیه‌ساز ATLAS از طریق دستور BEAM و پارامتر F3.radiate یک فایل کتابخانه‌ای به زبان C ایجاد شد که شامل تعریف نرخ تولید تعداد الکترون-حفره به دست آمده از محاسبات مونت کارلو با کد FLUKA در هر موقعیت خاص از X، Y و Z است و در نهایت با به کارگیری مدل فیزیکی شامل پارامترهای CONMOB، FLDMOB، SRH، AUGER و BGN و دستور SOLVE و EXTRACT جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز باتری محاسبه گردید.

برای شبیه‌سازی این آزمایش هندسه و تمامی لایه‌های نیمه‌رسانا، روکش و زیرلایه آن با لحاظ مقادیر گزارش شده در برگه داده فوتودیود سیلیکونی S3590-08 و همچنین بخشی از مفروضات همانند شکل (۲) تعریف شد.

توجه به این نکته لازم است که عدم گزارش دقیق و مجزای ضخامت لایه اپوکسی و سیلیکون و همچنین غلظت‌های ناخالصی هر یک از نواحی ذاتی، نوع n و نوع p در برگه داده نیمه‌رسانای هاماماتسو، با در نظر گرفتن نزدیک‌ترین اعداد برای پارامترهای فوق در سایر باتری‌ها و تغییر آن‌ها و تکرار شبیه‌سازی‌ها در نهایت نزدیک‌ترین نتیجه به داده‌های تجربی حاصل شد. در جدول (۲) داده‌های مفروض برای این نیمه‌رسانا آورده شده است.



شکل (۲) الف- برشی از نمای سه‌بعدی نیمه‌رسانای سیلیکونی S3590 با زیرلایه سرامیک و روکش رزین اپوکسی و چشمه استرانسیوم-۹۰ در کپسول استیل (ابعاد با خطوط آبی‌رنگ از دفترچه راهنمای نیمه‌رسانا استخراج شده است). ب- مدار معادل بتاولتائیک و چیدمان آزمایش

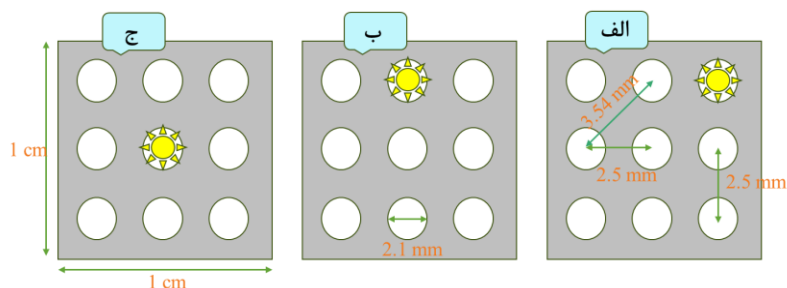


جدول (۲) پارامترهای مفروض برای نیمه‌رسانای هاماماتسو در شبیه‌سازی.

غلظت ناحیه n	غلظت ناحیه p	غلظت ناحیه ذاتی	ضخامت لایه اپوکسی	ضخامت لایه سیلیکونی
$\#/cm^3$ 10^{18}	$\#/cm^3$ 10^{17}	$\#/cm^3 \times 10^{13}$ $6/5$	$200 \mu m$	$500 \mu m$

۳- روش کار

از آنجایی که چشمه مورد آزمایش در باتری مبتنی بر سیلیکون و استرانسیوم-۹۰ از نوع میله‌ای و نگه‌دارنده مورد استفاده مطابق شکل (۱) دارای جایگاه‌های متعدد برای کپسول چشمه است، امکان آزمایش اثر موقعیت چشمه نیز وجود داشته و لذا یک چشمه میله‌ای ۱۰ میلی کوری در سه موقعیت متفاوت روی نیمه‌رسانا قرار داده شد. حالت‌های مورد آزمایش موقعیت چشمه در شکل (۳) آورده شده است.



شکل (۳) موقعیت چشمه میله‌ای در الف) گوشه نگه‌دارنده ب) کناره نگه‌دارنده ج) مرکز نگه‌دارنده.

۴- نتایج و بحث

از آزمایش چشمه میله‌ای استرانسیوم-۹۰ در موقعیت مرکزی نگه‌دارنده جریان 238 ± 1 nA و ولتاژ 142 ± 1 mV و از شبیه‌سازی آن جریان و ولتاژ به ترتیب برابر $228/9$ nA و $138/7$ mV حاصل شد که در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به دقت اندازه‌گیری مولتی‌متر مورد استفاده در آزمایش انحراف اندازه‌گیری $1 \pm$ میلی‌ولت و $1 \pm$ نانوامپر در تمامی نتایج تجربی گزارش شده وجود دارد.

جدول (۱) مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش عملی با چشمه استرانسیوم-۹۰ در موقعیت مرکزی نگه‌دارنده

مشخصه‌های میکروباتری	نتایج تجربی	شبیه‌سازی
ولتاژ مدار باز (mV)	۱۴۲	۱۳۸٫۷
جریان اتصال کوتاه (nA)	۲۳۸	۲۲۸٫۹

به این ترتیب نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با نتایج تجربی دارای خطای $3/81\%$ و $2/32\%$ به ترتیب در مقدار جریان و ولتاژ است.



نتایج حاصل از آزمایش این سه موقعیت مطابق جدول (۳) است که هر خانه از آن بیانگر موقعیت چشمه روی نگه‌دارنده و نیمه‌رساناست. در مکان رنگ‌های مشابه به دلیل تقارن، اعداد یکسان ثبت شده است و فقط برای مکان‌های نامتقارن (مطابق شکل ۳) آزمایش انجام شده است.

جدول (۳) نتایج آزمایش تجربی (الف) ولتاژ مدارباز بر حسب میلی‌ولت (ب) جریان اتصال کوتاه بر حسب نانو آمپر

(ب)			(الف)		
-	216 ± 1	196 ± 1	-	139 ± 1	135 ± 1
-	238 ± 1	-	-	142 ± 1	-
=	-	-	-	-	-

با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان مشاهده کرد که با جابه‌جایی چشمه میله‌ای به اندازه 3.53 mm از مرکز به سمت گوشه ولتاژ به میزان 7 mV کاهش داشته و به طور مشابه جریان نیز 42 nA کمتر شده است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت حساسیت ولتاژ و جریان نسبت به مکان چشمه به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta V / \Delta x = 1.98 \text{ V/m} \quad (1)$$

$$\Delta I / \Delta x = 11.88 \text{ VnA/mm} \quad (2)$$

به طور مشابه حساسیت مکانی ولتاژ و جریان در انتقال چشمه از مرکز به کناره نیز عبارت است از:

$$\Delta V / \Delta x = 1.20 \text{ V/m} \quad (3)$$

$$\Delta I / \Delta x = 8.80 \text{ VnA/mm} \quad (4)$$

بنابراین با محاسبه میانگین حساسیت می‌توان نتیجه گرفت ساختار باتری مورد آزمایش دارای حساسیت مکانی ولتاژ و جریان به ترتیب برابر 1.59 V/m و 10.34 nA/mm است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه در جدول (۴) مطابق مکان هر مقدار آورده شده است.

جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی (الف) ولتاژ مدارباز بر حسب میلی‌ولت (ب) جریان اتصال کوتاه بر حسب نانو آمپر

(ب)			(الف)		
-	221,22	214,23	-	127,68	117,84
-	228,92	-	-	138,73	-
-	-	-	-	-	-



به این ترتیب میانگین حساسیت ولتاژ و جریان نسبت به مکان چشمه، مطابق نتایج شبیه‌سازی به ترتیب برابر V/m و 5.16 و 3.62 nA/mm است. در جدول (۵) خطاهای حاصل از مقایسه نتایج تئوری و عملی گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود که نتایج شبیه‌سازی جریان مدار باز اختلاف 9.30% و ولتاژ اتصال کوتاه اختلاف 12.71% و ولتاژ اتصال کوتاه اختلاف 2.42% را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف هم مربوط به گوشه‌های باتری است. این موضوع می‌تواند به دلایل: اختلاف جمع‌آوری بارها در عمل و تئوری به خاطر نحوه اتصالات نیمه‌رسانا، دقیق نبودن مقدار و نحوه توزیع ناخالصی‌ها در عمل و آنچه گزارش شده با شبیه‌سازی، دقت ابعاد هندسی گزارش شده در بخش‌های مختلف باتری و در نهایت دقت محاسبات و شبیه‌سازی‌های سیلواکو و فلوکا باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی کد ترکیبی FLUKA+SILVACO با نتایج تجربی حاصل از ساخت اولیه سلول بتاولتائیک با چشمه استرانسیوم-۹۰ و نیمه‌رسانای سیلیکونی ژاپنی دقت بالا و میانگین خطای 9.5% برای ولتاژ مدار باز و 5.6%

جدول (۵) درصد خطای ناشی از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایش (الف) و ولتاژ مدار باز (ب) جریان اتصال کوتاه

(ب)			(الف)		
-	۲٫۴۲	۹٫۳۰	-	۸٫۱۴	۱۲٫۷۱
-	۳٫۸۱	-	-	۲٫۳۰	-
-	-	-	-	-	-

$\%$ برای جریان اتصال کوتاه را نشان داد. این میزان دقت در محاسبه پارامترهای الکتریکی باتری به ویژه در قیاس با روابط تحلیلی که بسیاری از شرایط غیرایده‌آل ساختار سیلیکون و چشمه در آن‌ها لحاظ نمی‌شود، بیانگر قابلیت بالای شبیه‌سازی کد ترکیبی FLUKA+SILVACO است. این دستاورد امکان طراحی و بهینه‌سازی باتری را هر چه بیشتر و از منظر ویژگی‌های مختلف چشمه، هندسه و توزیع آن روی نیمه‌رسانا و همین‌طور از منظر ویژگی‌های مختلف نیمه‌رسانا از قبیل عمق اتصال، عرض ناحیه ذاتی، غلظت‌های دوپینگ، وجود نقص در ساختار کریستال و غیره فراهم می‌کند.

۶- مراجع

- [۱] طلائی‌نیک، فاطمه؛ ساخت، طراحی و شبیه‌سازی میکروباتری‌های بتاولتائیک با استفاده از کد ترکیبی FLUKA_SILVACO. کتابخانه دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۴۰۳.
- [۲] Mathew, M. D. Nuclear Energy: A Pathway towards Mitigation of Global Warming. Prog. Nucl. Energy ۲۰۲۲, ۱۴۳, ۱۰۴۰۸۰.
- [۳] NASEEM, Muhammad Bilal, et al. Betavoltaic nuclear battery: a review of recent progress and challenges as an alternative energy source. The Journal of Physical Chemistry C, ۲۰۲۳, ۱۲۷, ۱۶: ۷۵۶۵-۷۵۷۹.
- [۴] TANG, XiaoBin, et al. Optimization design and analysis of Si- ^{63}Ni betavoltaic battery. Science China Technological Sciences, ۲۰۱۲, ۵۵: ۹۹۰-۹۹۶



- [۵] Rahmani, F.; Khosravinia, H. Optimization of Silicon Parameters as a Betavoltaic Battery: Comparison of Si p-n and Ni/Si Schottky Barrier. *Radiat. Phys. Chem.* ۲۰۱۶, ۱۲۵, ۲۰۵-۲۱۲.
- [۶] Rahastama, Swastya, and Abdul Waris. "Analytical study of ^{90}Sr betavoltaic nuclear battery performance based on pn junction silicon." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. ۷۳۹. No. ۱. IOP Publishing, ۲۰۱۶.
- [۷] Guoping, Z. U. O., Z. H. O. U. Jianliang, and K. E. Guotu. "A Simple theoretical model for ^{63}Ni betavoltaic battery." *Applied Radiation and Isotopes* ۸۲, ۲۰۱۳.
- [۸] BOUZID, F., et al. Design considerations on $^4\text{H-SiC}$ -based p-n junction betavoltaic cells. *Applied Physics A*, ۲۰۲۲, ۱۲۸,۳: ۲۳۴.
- [۹] Moayedi, Hosein, et al. "Optimization Design and Simulation of a betavoltaic nuclear battery based on Sr/Y-^{90} with MCNP/Geant4 codes.", ۲۰۲۲.
- [۱۰] GHASEMABADI, Davood; DIZAJI, Hossein Zaki; ABDOLLAHZADE, Massud. Evaluation of GEANT4 and COMSOL Multiphysics coupling capabilities by simulation of an optimized betavoltaic battery. *Journal of Nuclear Research and Applications*, ۲۰۲۳, ۳,۲: ۲۲-۲۶.
- [۱۱] Altana, Carmen, Francesco Cottone, and Daniele Mengoni. "First Simulations on Higher-Efficiency Betavoltaic Battery Integrated with Electrets for Space, Medicine and Remote Sensing Applications." ۲۰۲۲ ۲۱st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS). IEEE, ۲۰۲۲.
- [۱۲] Maleki, Pedram, and Tetehtani, Gholamreza. Increasing the simulation capabilities of beta-voltaic microbatteries using MCNPX-SILVACO combined code. *Journal of Nuclear Sciences and Techniques*, ۴۱(۳ (serial ۹۳)), ۲۰۱۹.
- [۱۳] Hajibaba, Soheil, et al. "Simulation and fabrication of an alpha-radioluminescence nuclear battery using Am-^{241} .", ۲۰۲۲.
- [۱۴] Fatemeh, Talaeinik, et al. "Simulation of beta-voltaic battery by hybridizing FLUKA and MCNPX Monte carlo codes with SILVACO code and comparing it with experimental results.", ۲۰۲۴ ۴۰st Annual physics Conference of Iran. Arak University. ۲۰۲۴.



اندازه گیری سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ در روش

غیر مستقیم تولید رادیوایزوتوپ ^{177}Lu در راکتور تحقیقاتی تهران (کد مقاله: ۱۱۹۶)

صادقچه، زهرا^۱ - جوکار، علیرضا^۲ - سوهانی، مسلم^۱ - شاکری جویباری، بنین^۲ - عزیزاکرم، حمید^۳

۴. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، گروه فیزیک هسته‌ای

۵. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

۶. شرکت پارس ایزوتوپ

چکیده:

در این کار تحقیقاتی سطح مقطع نوترون حرارتی واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ به روش فعالسازی در طیف حرارتی نوترونی راکتور تحقیقاتی تهران اندازه‌گیری شد. هدف خالص و غنی‌شده $^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ ۹۸/۵ درصد به مدت ۱۰ دقیقه در کانال پرتو دهی D^6 بمباران شد. شار نوترون‌ها در موقعیت نمونه هدف $^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ با استفاده از شاهد ^{197}Au و ^{98}Mo اندازه‌گیری شد. پودر اکسید ایتربیم، اکسید طلا و اکسید مولیبدن در ترکیب اسید نیتریک و اسید کلریدریک حل شد و ترکیب بعد از خشک شدن با و بدون پوشش استوانه‌ای به ضخامت ۱ mm از جنس کادمیوم بمباران شدند. طیف‌های گامای نمونه‌های پرتو دهی‌شده به وسیله آشکارساز HPGe کالیبره شده اندازه‌گیری شد. مقدار سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ 2.79 ± 0.22 بارن بدست آمد.

کلمات کلیدی: ایتربیم ^{176}Yb ، سطح مقطع، رادیوایزوتوپ، گیراندازی نوترون

Measurement of the thermal neutron capture cross section of the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ reaction in the indirect method of producing the ^{177}Lu radioisotope in the Tehran Research Reactor

Sadeghche, Zahra¹, Jokar, Ali Reza², Sohani, Moslem¹, Shakeri jooybari, Banin², Aziakram, Hamid³

۱. Shroud university of technology, physics and nuclear engineer

۲. Atomic Energy Organization of Iran, Research Institute of Nuclear

۳. Pars Isotope Company

Abstract:

In this research work, the thermal neutron cross-section the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ reaction was measured by the activation method using thermal neutron spectrum of the Tehran Research Reactor. The pure $^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ sample enriched by ۹۸.۵% was irradiated in for ۱۰ min in the channel D^6 . The neutron flux at the $^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ sample position was determined with ^{197}Au and ^{98}Mo activation monitors. Ytterbium oxide, Gold oxide and Molybdenum oxide powders, all dissolved in a mixture of hydrochloric acid and nitric acid, were bombarded with and without a cylindrical ۱ mm Cd shield box. The gamma-ray spectra from the irradiated samples were measured with a calibrated high-purity Ge detector. The thermal neutron capture cross-section value for the $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ reaction was found to be 2.79 ± 0.22 b.

Key words: Ytterbium ^{176}Yb , Cross section, radioisotope, neutron capture



۱- مقدمه:

با توجه به رشد سرطان در جهان در طی چند سال گذشته، رادیوایزوتوپ‌ها بدلیل استفاده در تولید رادیوداروها مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. در این میان، لوتسیم- ^{177}Lu ، به‌عنوان یک ایزوتوپ رادیواکتیو از خانواده لانتانیدها جایگاه ویژه‌ای دارد و در سال‌های اخیر به‌عنوان یک رادیوایزوتوپ با پتانسیل بالا برای مقاصد درمانی مطرح شده است. ^{177}Lu با نیمه عمر ۶/۷ روز با تابش β^- با انرژی‌های ماکزیمم ۴۹۷ keV (۷۸.۶٪)، ۳۸۴ keV (۹.۱٪)، ۱۷۶ keV (۱۲.۲٪) به ^{177}Hf واپاشی می‌کند [۱].

^{177}Lu از طریق دو روش مستقیم و غیرمستقیم تولید می‌شود. در روش مستقیم می‌توان از طریق واکنش $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$ و همچنین در روش غیر مستقیم می‌توان از طریق واکنش $^{176}\text{Lu} \rightarrow ^{177}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$ به ^{177}Lu دست پیدا کرد. در روش مستقیم به دلیل سطح مقطع بالا واکنش می‌تواند با فعال‌سازی هدف ^{176}Lu با نوترون حرارتی ^{177}Lu تولید کرد. از آنجایی که غنای ^{176}Lu حدود ۲/۶٪ است، برای دسترسی به اکتیویته ویژه بالاتر از هدف غنی‌شده استفاده می‌شود [۲]. روش دیگر تولید ^{177}Lu ، روش غیر مستقیم، از واپاشی β^- هسته ^{177}Yb ناشی از فعال‌سازی هدف ^{176}Yb است. باید توجه داشت که در این روش جداسازی Lu از Yb نیازمند صرف هزینه بالا و روش‌های جداسازی پیچیده می‌باشد [۳، ۴]. با این حال چشم‌اندازهای خوبی در تولید ^{177}Lu به روش غیرمستقیم برای درمان هدفمند با رادیوایزوتوپ‌ها شکل گرفته است و بسیاری از مراکز تولیدکننده قویاً این روش را دنبال می‌کنند.

هدف از این مقاله اندازه‌گیری سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی در واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ برای استفاده در تولید ^{177}Lu به روش غیر مستقیم است.

۲- روش کار:

همانگونه که پیشتر به آن اشاره شد رادیوایزوتوپ ^{177}Lu از دو روش مستقیم و غیر مستقیم تولید می‌شود، در این مقاله به محاسبه سطح مقطع حرارتی واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ در روش غیر مستقیم تولید رادیوایزوتوپ ^{177}Lu پرداخته شده است. از این رو برای محاسبه سطح مقطع حرارتی نوترون در واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ دو عنصر طلا- ^{197}Au و مولیبدن- ^{98}Mo به عنوان شاهد^{۵۴} مورد استفاده قرار گرفته است. به این صورت که دو شاهد ^{197}Au و ^{98}Mo به همراه ^{176}Yb تحت تابش شار نوترون قرار گرفته و اقدام به طیف‌سنجی^{۵۵} گاما شده، سپس با استفاده از روابط مربوط که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود سطح مقطع حرارتی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است پیش از انجام طیف‌سنجی گاما بازده آشکارساز توسط چشمه‌های استاندارد اندازه‌گیری شده است که در ادامه به توضیحات چگونگی انجام کار پرداخته می‌شود.

۲-۱- محاسبه بازده^{۵۶} آشکارساز

برای تعیین بازده آشکارساز از پنج چشمه استاندارد ^{60}Co ، ^{133}Ba ، ^{152}Eu ، ^{137}Cs و ^{241}Am استفاده شد این چشمه‌ها به دلیل ساطع کردن گاماهایی با شدت انتشار^{۵۷} شناخته شده برای مدرج سازی^{۵۸} آشکارساز مناسب هستند. اندازه‌گیری‌ها در دو فاصله ۹/۵ سانتی‌متری آشکارساز انجام شد. بازده آشکارساز برای هر دو فاصله از رابطه (۱) بدست می‌آید [۵].

$$\varepsilon = \frac{N_E}{I_\gamma \cdot A \cdot t_m} \quad (1)$$

^{۵۴} Monitor

^{۵۵} Spectrometry

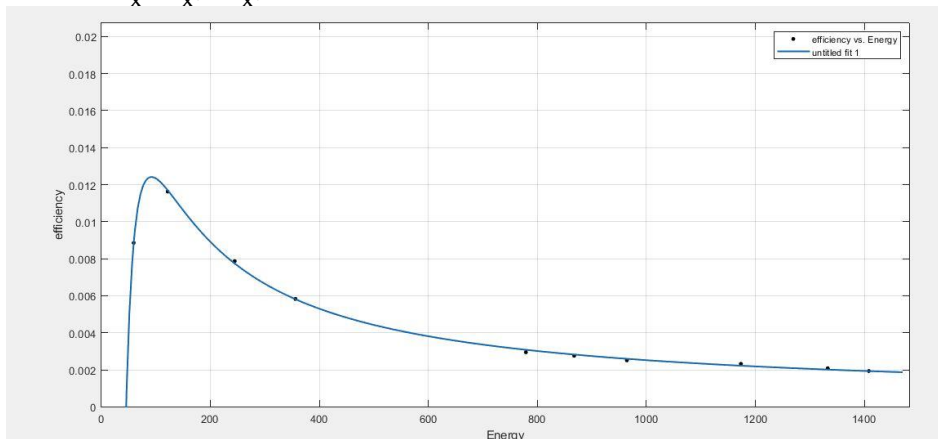
^{۵۶} Efficiency

^{۵۷} Emission intensity

^{۵۸} Calibration



در این رابطه N_E ، A و I_γ به ترتیب تعداد شمارش‌های زیر قله انرژی، اکتیویته و شدت انتشار می‌باشد. شکل (۱) تغییرات بازده آشکارساز در فاصله ۹/۵ سانتی‌متری بر حسب انرژی نشان می‌دهد، داده‌ها با تابع $a + \frac{b}{x} + \frac{c}{x^2} + \frac{d}{x^3}$ برازش شده‌اند.



شکل (۱) تغییرات بازده آشکارساز

ضرایب برازش برای فاصله ۹/۵ سانتی‌متر به صورت $0.00011259 + 0.3356x^{-1} - 14/3x^{-2} + 0.2271x^{-3}$ محاسبه شد. خطای نسبی بین داده‌های تجربی و مقادیر برازش برابر با ۱٪ درصد بود که نشان‌دهنده کیفیت مناسب برازش است.

۲-۲- مباحث نظری

سطح مقطع واکنش گیراندازی نوترون حرارتی نسبت به یک شاهد با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$\sigma_{x.th} = \frac{(R_x - F_{Cd}R_{x.Cd})}{gG_{th}\varphi_{th}} \quad (2)$$

که در این رابطه R_x و $R_{x.Cd}$ به ترتیب نرخ‌های واکنش برای ایزوتوپ پرتودهی شده بدون پوشش و با پوشش کادمیوم، F_{Cd} ضریب تصحیح کادمیوم، g نشان‌دهنده انحراف سطح مقطع حرارتی از قانون عکس سرعت نوترون‌ها، G_{th} ضریب خودحفاظتی برای نوترون‌های حرارتی می‌باشند.

نرخ‌های واکنش R_x و $R_{x.Cd}$ را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) تعیین کرد.

$$R = \frac{N_p M e^{\lambda t_d}}{N_A m I_\gamma \epsilon t_m \theta (1 - e^{-\lambda t_{irr}})} \quad (3)$$

که در رابطه فوق N_p تعداد شمارش‌ها زیر قله گاما، ϵ بازده مطلق آشکارساز برای انرژی موردنظر، t_{irr} زمان پرتودهی، t_d مدت زمان بین انتهای پرتودهی و شروع شمارش، t_m زمان شمارش، λ ثابت واپاشی، I_γ شدت انتشار، θ فراوانی ایزوتوپ موردنظر در نمونه پرتودیده، λ ثابت واپاشی، m جرم نمونه، M جرم اتمی، N_A عدد آووگادرو می‌باشد. طیف‌های گاما بعد از طی یک زمان مناسب بعد از پرتودهی نمونه جمع‌آوری و ثبت می‌شود. همانطور که از رابطه (۲) می‌توان مشاهده کرد برای اندازه‌گیری سطح



مقطع گیراندازی نیاز به محاسبه دقیق شار حرارتی در موقعیت پرتودهی نمونه داریم. شار نوترون‌های حرارتی معادل در جایگاه پرتودهی شاهد‌های ^{98}Mo و ^{197}Au از طریق رابطه (۴) تعیین می‌شود.

$$\varphi_{\text{th}} = \frac{(R_x - F_{\text{Cd}} R_{x,\text{Cd}})}{g G_{\text{th}} \sigma} \quad (4)$$

که در رابطه (۴) σ سطح مقطع شاهد‌های ^{98}Mo و ^{197}Au می‌باشد [۶،۷،۸]. همچنین داده‌های هسته‌ای مورد نیاز برای این اندازه‌گیری‌ها شار و نرخ واکنش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: داده‌های هسته‌ای مورد نیاز برای تعیین شار و نرخ واکنش

نمونه	واکنش	نیمه‌عمر (ساعت)	ضریب تصحیح F_{Cd} کادمیم	پارامتر g 300 K	سطح مقطع نوترون‌های حرارتی σ_0 (b)	انرژی گاما (keV)	I_γ (%)
Mo	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{98}\text{Mo}$	۶۶/۹۵	۱	۱/۰۰۰۴	۳۷/۱۸	۷۳۹	۱۲/۱۳
Au_2O_3	$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$	۶۴/۶۸	۰/۹۹۱	۱/۰۰۵۴	۹۸/۶۵	۴۱۲	۹۵/۵۳
Yb_2O_3	$^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb}$	۱/۹	۱	۱/۰۰۵۳	-	۱۵۰	۲۰/۳

۳- روش آزمایش

برای اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش هسته‌ای $^{176}\text{Yb}(n, \gamma)^{177}\text{Yb}$ از فویل مولیبدن (Mo) و اکسید طلا (Au_2O_3) به طور همزمان برای اندازه‌گیری شار نوترون‌ها استفاده شد. برای این منظور پودر اکسید ایتربیوم ($^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$) غنی شده (با درجه خلوص ۹۸/۵ درصد) را همراه مولیبدن و اکسید طلا در 100°C محلول تیزاب سلطانی که ترکیبی از اسید نیتریک و اسید کلریدریک به ترتیب به نسبت ۱ به ۳ حل شد. 40 mL از محلول ساخته شده که شامل $72\text{ }\mu\text{g}$ مولیبدن، $65\text{ }\mu\text{g}$ اکسید طلا و $2/5\text{ }\mu\text{g}$ اکسید ایتربیوم است، جدا شده و داخل کپسول کوارتز به ضخامت 1 mm میلیمتر، قطر خارجی 6 mm و ارتفاع 20 mm ریخته شد. کپسول به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 80°C در آون قرار داده شده تا محلول کاملاً خشک شده و در انتهای کپسول کوارتز رسوب کند. بعد از جوش دادن سر کپسول حاوی نمونه‌ها، آن‌ها را داخل محفظه آلومینیومی با پوشش کادمیوم و بدون پوشش کادمیوم قرار داده و در راکتور تهران به مدت ۱۰ دقیقه بمباران شد. نمونه‌های پرتودهی شده بعد از ترخیص از راکتور برای شمارش و تعیین اکتیویته ایزوتوپ‌های مورد نظر به آزمایشگاه اسپکترومتري گاما منقل شدند. با توجه به نیمه عمر پایین $1/9$ ساعت ^{176}Yb نمونه‌ها دو ساعت بعد از اتمام پرتودهی شمارش شدند. لازم به توضیح است که با توجه به مقدار کم مواد استفاده شده، ابعاد و ضخامت لایه رسوب داده شده در انتهای کپسول ناچیز خواهد بود بطوری که می‌توان از اثر ضریب خودحفاظی نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی بر سطح مقطع واکنش‌های صرف نظر کرد.

۴- نتایج:

جدول (۲) شار نوترون بدست آمده توسط شاهد‌های ^{197}Au و ^{98}Mo را نشان می‌دهد. عدم قطعیت مقادیر شار اندازه‌گیری شده مربوط به خطای آماری سطح زیر قله‌ها (کمتر از ۲ درصد) و عدم قطعیت سیستماتیک مربوط به بازه آشکارساز (۵ درصد) است. همانگونه که مشاهده می‌کنید مقدار بدست آمده توسط هر دو شاهد در محدوده عدم قطعیت آزمایش با یکدیگر سازگار



هستند. سطح مقطع واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ با استفاده از از رابطه (۲) و مقادیر شار حرارتی بدست آمده توسط مونیتورها بدست آمد. مقدار میانگین اندازه‌گیری شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲: نتایج شار نوترون و سطح مقطع

میانگین (بارن)	سطح مقطع واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ (بارن)	شار نوترون های حرارتی ($\text{n/cm}^2.\text{s}^{-1}$) $\times 10^{13}$	شاهد
$2/\pm 79./22$	$2/\pm 87./22$	$9/\pm 63./53$	^{197}Au
	$2/\pm 72./22$	$9/\pm 14./51$	^{98}Mo

۵- بحث و نتیجه گیری:

لوتسیم-۱۷۷ به عنوان یکی از رادیوایزوتوپ‌های پرکاربرد در درمان هدفمند سرطان می‌باشد که از طریق دو روش تولید مستقیم و غیرمستقیم قابل دستیابی است. در این پژوهش، هدف اندازه‌گیری سطح مقطع گیراندازی نوترون حرارتی در واکنش $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ برای استفاده در تولید ^{177}Lu به روش غیر مستقیم بوده‌است. از این رو به منظور اندازه‌گیری شار در نقطه پرتودهی از ایزوتوپ‌های ^{197}Au و ^{98}Mo به عنوان شاهد استفاده گردید. همچنین برای محاسبه سطح مقطع واکنش نمونه اکسید ایتربوم به همراه شاهد به دو صورت با پوشش و بدون پوشش کادمیوم پرتودهی شد. در نهایت نتایج تجربی بیانگر آن است که سطح مقطع جذب نوترون حرارتی برای واکنش مورد مطالعه تقریباً برابر با $2/\pm 79 \pm 0./22$ بارن است. که این مقدار با توجه به شرایط راکتور توافق خوبی با مقدار تئوری $2/2$ بارن دارد.

۶- مراجع:

- [۱] M.R.A. Pillai, Sudipa Chakraborty, Tapas Das, production logistics of ^{177}Lu for radionuclide therapy. Applied Radiation and Isotopes ۵۹ (۲۰۰۳) ۱۰۹-۱۱۸.
- [۲] Z. Dvorakova, R. Henkleman, X. Lina, A. Turler, H. Gerstenberg, Production of ^{177}Lu at the new research reactor FRM-II: Irradiation yield of $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)^{177}\text{Lu}$. Applied Radiation and Isotopes (۲۰۰۸) ۱۴۷-۱۵۱.
- [۳] Deepa, S., et al., Conversion electron measurements and determination of rotational parameters in ^{177}Lu and ^{177}Hf . The European Physical Journal A, (۲۰۱۲). ۴۸: p. ۱-۱۱.
- [۴] Dvoráková, Z., Production and chemical processing of ^{177}Lu for nuclear medicine at the Munich research reactor FRM-II. (۲۰۰۷), Technische Universität München.
- [۵] Tan, V. H., & Son, P. N. Thermal neutron radiative capture cross-section of $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ reaction (۲۰۱۶). Journal of Physics: Conference Series, ۷۲۶, ۰۱۲۰۰۴.
- [۶] Lamarsh, J. R. Introduction to Nuclear Reactor Theory (۱۹۸۳). Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [۷] Zsolnay, É. M. Determination of thermal neutron flux in the core of the reactor. Budapest University of Technology and Economics (BME).
- [۸] Tran, V. H., Sakamoto, Y., & Yasuda, H. Calculation of Neutron Flux Characteristics of Dalat Reactor Using MCNP۴A Code (۱۹۹۸). Japan Atomic Energy Research Institute.



طراحی دستگاه عیب‌یاب خط تولید لوله‌های پلی اتیلن به روش هسته‌ای با استفاده از ابزار

شبیه سازی GEANT4 (کد مقاله : ۱۱۹۷)

خوشحال، امیررضا^۱ - بابامحمدی، شراره^۱ - زیدآبادی نژاد، مجید^۱

۱. گروه مهندسی هسته ای، دانشکده علوم و فناوری های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته،

کرمان، ایران

چکیده:

به منظور افزایش بهره‌وری، بهبود کیفیت محصول و همچنین افزایش ایمنی، عیب‌یابی لوله‌ها در خط تولید یک امر ضروری به شمار می‌آید. در این تحقیق با استفاده از روش‌های هسته‌ای اقدام به عیب‌یابی لوله‌های پلی اتیلن در خط تولید با استفاده از ابزار شبیه سازی GEANT4 (GEOMETRY AND TRACKING) شد. این شبیه سازی در سه حالت مختلف لوله، یک لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای عمودی و افقی از جنس پلی اتیلن با دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs با اکتیویته ۱۵ میلی‌کوری مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه سازی لوله‌های معیوب در مقایسه با لوله سالم، تضعیف کمتری در عبور فوتون‌ها ایجاد می‌کنند. به طوری که درصد فوتون‌های رسیده به آشکارساز برای چشمه‌های ^{60}Co و ^{137}Cs به ترتیب در لوله سالم، ۸۸/۶۵٪ و ۸۴/۳۴٪، معیوب افقی ۸۹/۷۵٪ و ۸۵/۸۱٪ و معیوب عمودی ۹۰/۴۴٪ و ۸۶/۶۷٪ می‌باشد.

کلمات کلیدی: ^{60}Co ، ^{137}Cs ، ابزار شبیه سازی GEANT4، لوله پلی اتیلن، چشمه رادیواکتیو

Design of a Nuclear-Based Inspection System for Polyethylene Pipe Production Line Using GEANT⁴ Simulation

Khoshhal, Amir Reza^{1*}, Babamohammadi, Sharareh¹, Zaidabadi nejad, Majid¹

۱. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran

Abstract:

To enhance efficiency, improve product quality, and ensure safety, defect detection in production line pipes is Considered essential. In this study, nuclear techniques were employed to detect defects in polyethylene pipes on a production line using the GEOMETRY AND TRACKING (GEANT⁴) simulation toolkit. The simulation was Conducted on three different pipe Conditions: one intact pipe and two defective pipes with vertical and horizontal defects, all made of polyethylene. Two radioactive sources, ^{60}Co and ^{137}Cs , were used for evaluation. The simulation results demonstrated that defective pipes attenuated fewer photons Compared to the intact pipe. The percentage of photons reaching the detector for the ^{60}Co and ^{137}Cs sources was ۸۸,۶۵٪ and ۸۴,۳۴٪, respectively, for the intact pipe; ۸۹,۷۵٪ and ۸۵,۸۱٪ for the horizontally defective pipe; and ۹۰,۴۴٪ and ۸۶,۶۷٪ for the vertically defective pipe.

Key words: ^{60}Co , ^{137}Cs , GEANT⁴ simulation toolkit, polyethylene pipe, radioactive source

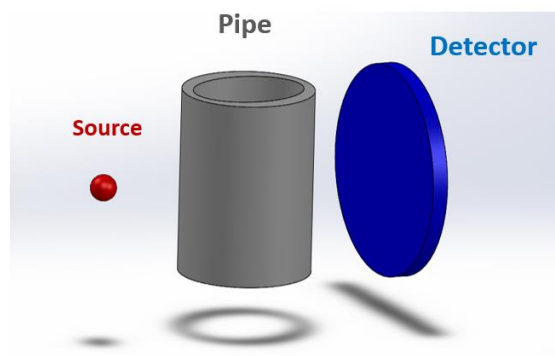


۱- مقدمه:

شناسایی و بررسی سلامت لوله در خطوط تولید با انجام فرایندهای عیب یابی موجب می‌شود تا از بروز مشکلات احتمالی مانند خسارت‌های مالی و همچنین کاهش طول عمر تجهیزات جلوگیری شود. عیب یابی لوله‌ها در خطوط تولید شامل رسیدگی به چالش‌های مختلف برای بهینه سازی و کاهش خرابی‌هاست [۱-۴]. همچنین استفاده از روش‌های غیر مخرب که نیازی به برش یا آسیب رساندن به لوله نباشد مفید است این کار در سال ۲۰۱۵ با روش امواج مایکروویو به انجام رسید [۵]. در سال ۱۹۶۰ گرانو و همکاران روش‌های الکترومغناطیسی را ارائه دادند که راه‌حل‌های موثری برای تشخیص مشکلات و عیوب لوله‌ها ارائه می‌دهند. این تکنیک‌ها می‌توانند عیوب لوله‌های غیرآهنی را از طریق تحلیل توزیع جریان و پالس‌های سیگنال از سیستم‌های کوئل شناسایی کنند [۶]. در سال ۲۰۰۶ Deutsch و همکارانش سیستم‌های بازرسی اولتراسونیک خودکار در کارخانه‌های لوله‌سازی به کار گرفته شده را مورد بررسی قرار دادند که سرعت بالا و قابلیت اطمینان زیادی برای بررسی عیوب لوله‌ها در خط تولید داشتند [۷]. با وجود مؤثر بودن تست اولتراسونیک، این روش به شدت به تخصص اپراتور وابسته است و ممکن است نتایج آن تا حدی وابسته به نظر شخصی باشد. راه‌های مختلف ساخت لوله برای صنایع گوناگون و همچنین روش‌های تولید پیچیده آنها و ایجاد راه‌هایی برای بهینه‌سازی تولید حائز اهمیت می‌باشد [۸]. در صنایع مختلف از جمله کشتی‌سازی و خودروسازی ساخت لوله‌های آب، تولید لوله‌های نفت و گاز و سایر صنایع بر روی بهتر کردن تولید لوله تمرکز می‌کنند [۹-۱۱]. ابزار شبیه‌سازی GEANT ۴ امکان ارائه تخمین‌های سریع‌تری از دز تابش را فراهم می‌کند. این ابزار که در سال ۱۹۹۸ توسط CERN توسعه یافت، برای شبیه‌سازی انتقال ذرات در مواد مختلف طراحی شده و از روش مونت کارلو (MC) برای مدل‌سازی تابش‌های یونیزان، از جمله فوتون‌های یونیزه‌شده، استفاده می‌نماید [۱۲]. GEANT ۴ قابلیت شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات در مواد گوناگون را به همراه مدل‌های فیزیکی، رهگیری، نمایش‌سازی و مدیریت هندسه داراست. این ابزار شبیه‌سازی می‌تواند شرایط واقعی آزمایشگاهی را با گستره انرژی بین ۱ الکترون‌ولت تا ترا الکترون‌ولت بازسازی کند. GEANT ۴ که بر اساس زبان برنامه‌نویسی شیء‌گرا ++C طراحی شده، کاربردهای متعددی در زمینه‌های مختلفی مانند فیزیک پزشکی، هسته‌ای، فیزیک ذرات، طراحی شتاب‌دهنده‌ها و مهندسی فضایی دارد [۱۳، ۱۴]. این مطالعه بر روی اهمیت خط تولید در بهبود بهره‌وری و کیفیت تولید در صنایع مختلف تاکید دارد. در این مطالعه به بررسی و ارزیابی عیوب لوله‌های پلی اتیلنی آب در خط تولید پرداخته شده است. در این تحقیق لوله پلی اتیلن در ضخامت‌های مختلف مورد شبیه‌سازی قرار داده شده است که با یک آشکارساز و دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs میزان فوتون‌های رسیده به آشکارساز را در ضخامت‌های متفاوت بررسی شده است.

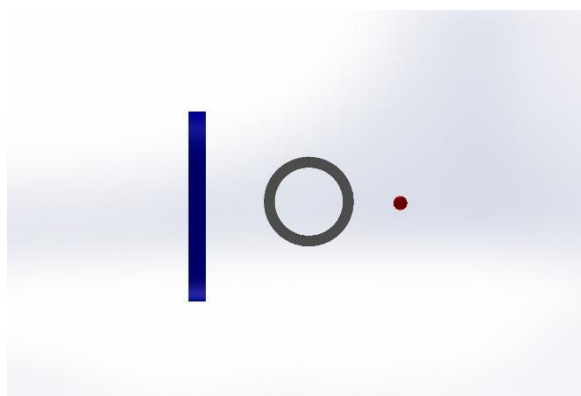
۲- روش کار:

در این مطالعه که هدف آن طراحی یک سیستم عیب‌یاب خط تولید لوله‌های پلی اتیلن می‌باشد، از نسخه ۱۱.۱.۳ ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو GEANT ۴ و یک سیستم ۴ هسته‌ای با ۶ گیگ رم جهت طراحی و یک سیستم ۶۰ هسته و ۱۶۰ گیگ رم جهت پردازش استفاده شده است. در شکل ۱ شماتیک قرارگیری لوله‌ها نسبت به آشکارساز و چشمه نشان داده شده است.

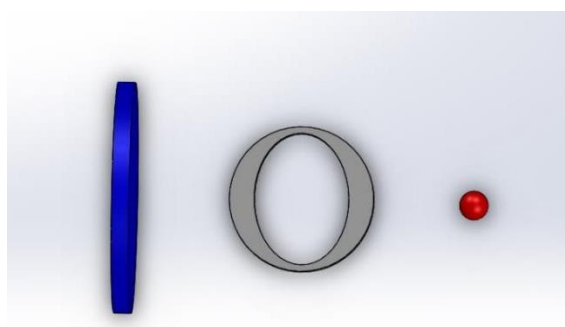


شکل ۱: شماتیک قرارگیری لوله‌ها نسبت به آشکارساز و چشمه

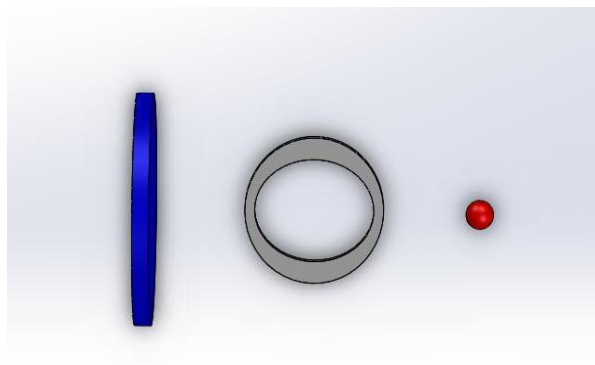
در شکل ۲، ۳ و ۴ لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای عمودی و افقی از نمای بالا نشان داده شده است. جنس لوله ها پلی اتیلن با چگالی ۰/۸۱۲۸ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد.



شکل ۲: لوله سالم



شکل ۳: لوله معیوب و ناقص در راستای عمودی

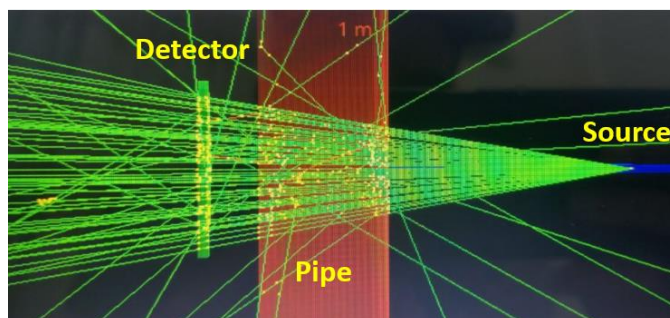


شکل ۴: لوله معیوب و ناقص در راستای افقی

قطر دایره داخلی لوله سالم ۱۱۰ میلی‌متر و قطر خارجی آن ۱۳۴/۶ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت لوله های معیوب در راستای محور افقی و عمودی به میزان ۵ درصد کاسته شدند و دایره داخلی لوله ها به شکل بیضی درآمدند. لوله ها تحت تابش پرتوهای گاما با تعریف دو چشمه نقطه ای همسانگرد ^{137}Cs با گاما تک انرژی ۰/۶۶۲ مگاالکترون ولت و ^{60}Co با گاما هایی با انرژی های ۱/۱۷ مگاالکترون ولت و ۱/۳۳ مگاالکترون ولت، با اکتیویته ۱۵ میلی کوری قرار گرفتند. تابش به لوله ها با زاویه ۲۵ درجه کولیمیت شدند تا پرتوها به طور کامل بخش مقطعی لوله ها را در بر گیرند. جهت شمارش فوتون های عبوری، یک آشکارساز سوسونز NaI به شکل استوانه و با قطر ۲۰۰ میلی‌متر تعریف شد. فاصله ی چشمه تا لوله ۲۵۱/۳ میلی‌متر و فاصله لوله تا آشکارساز ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این فواصل و زوایا با استفاده از نرم افزار اتوکد بدست آمدند تا سیستم طراحی شده بیشترین بازدهی را داشته باشد و همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است این فواصل با توجه به زاویه ۲۵ درجه کولیمیت شده چشمه ها، تمام مقطع لوله را در بر گرفته و کاملاً به آشکار ساز رسیده است. بدین شکل نقص در لوله ها با دقت بالاتری نمایان می‌شود. تعداد فوتون های اولیه تابیده شده به لوله ها از چشمه ^{60}Co ذره می‌باشد تا خطای آماری کمتر از ۵ درصد باشد. تعداد فوتون های عبوری از لوله ها ثبت و میزان تضعیف ها در شرایط مختلف اندازه گیری شده است.

۳- نتایج:

در ابزار شبیه سازی ۴GEANT ابتدا یک لوله از جنس پلی اتیلن (C_2H_4) طراحی شد سپس آشکارساز NaI عمود بر لوله در سه ضخامت مختلف طراحی شد. در شکل ۵ شماتیک نحوه قرار گیری لوله نسبت به آشکارساز و چشمه در ابزار شبیه سازی ۴GEANT مشاهده می‌شود. در جدول ۱ نتایج حاصل از میزان فوتون های عبوری در سه حالت ، لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای عمودی و افقی مشاهده می‌شود.

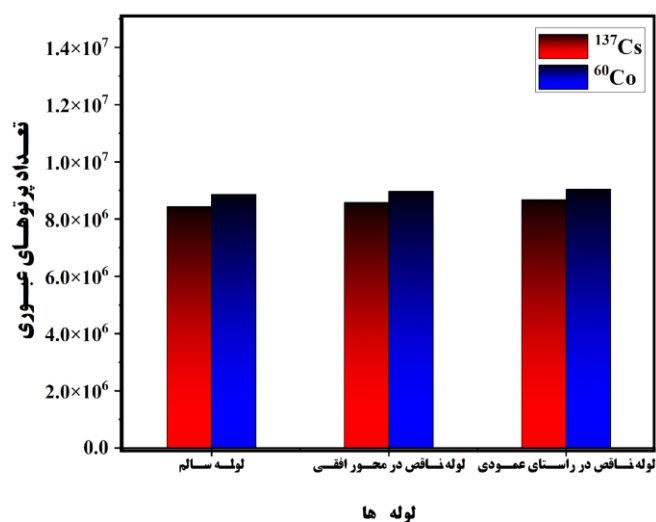


شکل ۵: شماتیک نحوه قرار گیری لوله نسبت آشکارساز و چشمه را در ابزار GEANT^۴

جدول ۱: میزان فوتون های عبوری از لوله پلی اتیلن

چشمه رادیواکتیو	لوله سالم	لوله ناقص (کاهش ضخامت ۵ درصدی) در راستای محور افقی	لوله ناقص (کاهش ضخامت ۵ درصدی) در راستای محور عمودی
Co^{60}	۸۸۶۵۳۹۰	۸۹۷۵۵۰۰	۹۰۴۴۵۴۰
Cs^{137}	۸۴۳۴۸۹۰	۸۵۸۱۲۹۰	۸۶۷۹۷۰۰

در شکل ۶ میزان فوتون های عبوری در لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای عمودی و افقی در دو چشمه Co^{60} و Cs^{137} با اکتیویته و شرایط مشابه را نسبت بهم مشاهده می شود.



شکل ۶: میزان فوتون های عبوری در سه حالت یک لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای عمودی و افقی در دو چشمه Co^{60} و Cs^{137} با اکتیویته ۱۵ میلی کوری



۴- بحث و نتیجه گیری:

این پژوهش نشان می‌دهد که به کارگیری فناوری نوین در تولید بهبود و اصلاح فرایندهای ساخت و استفاده از روش‌های پیشرفته برای کنترل کیفیت لوله‌ها نقش بسیار مهمی در افزایش بازدهی تولید و ارتقای کیفیت نهایی محصول در صنایع مختلف دارد. در این تحقیق با استفاده از ابزار شبیه سازی GEANT4 سه لوله از جنس پلی اتیلن در ضخامت‌های متفاوت مورد شبیه سازی قرار گرفت. در این تحقیق برای ارزیابی و بررسی کنترل کیفی لوله‌ها از آشکارساز سوسوزن NaI و از دو چشمه ^{60}Co و ^{137}Cs با اکتیویته ۱۵ میلی کوری استفاده شد. طبق نتایج به دست آمده از شبیه سازی میزان فوتون‌های رسیده به آشکارساز زمانی که چشمه ^{60}Co بوده است در یک لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای افقی و عمودی به ترتیب ۸۸۶۵۳۹۰ و ۸۹۷۵۵۰۰ است. نتایج نشان می‌دهد که دلیل تضعیف بیشتر فوتون در لوله سالم، دو لوله ناقص افقی، ۱۱۰۱۱۰ ذره و لوله ناقص عمودی ۱۷۹۱۵۰ ذره بیشتری نسبت به لوله سالم از خود عبور می‌دهند. و زمانی که چشمه ^{137}Cs است میزان فوتون‌های رسیده به آشکارساز در یک لوله سالم و دو لوله معیوب در راستای افقی و عمودی به ترتیب برابر با ۸۴۳۴۸۹۰ و ۸۵۸۱۲۹۰ است. که نتایج نشان می‌دهد که دلیل تضعیف بیشتر فوتون در لوله سالم، لوله ناقص افقی ۱۴۶۴۰۰ ذره و لوله ناقص عمودی ۲۴۴۸۱۰ ذره بیشتری نسبت به لوله سالم از خود عبور می‌دهند که طبق نتایج به دست آمده میزان پرتوهای عبوری از لوله های معیوب نسبت به لوله سالم به دلیل اینکه ۵ درصد از ضخامت آن‌ها در راستای محور عمودی و افقی کم شده است بیشتر می باشد. این میزان برای لوله سالم برای چشمه ^{60}Co ، ۶۵/۸۸ % و برای ^{137}Cs ، ۳۴/۸۴ % و برای لوله‌ی ناقص در راستای افقی به ترتیب برابر ۸۹/۷۵ درصد و ۸۵/۸۱ درصد و برای لوله‌ی معیوب در راستای عمودی به ترتیب برابر ۹۰/۴۴ و ۸۶/۷۹ درصد می باشد. نتایج نشان می‌دهند که این سیستم در زمان کوتاه، پاسخی مناسب جهت وجود عیب در لوله تولید شده می‌دهد. همچنین با توجه به شکل ۵ میزان فوتون‌های آشکارسازی شده در ^{137}Cs بیشتر از ^{60}Co می باشد علت این امر این است ^{60}Co دارای انرژی های (۱/۱۷ و ۱/۳۳) بیشتر نسبت به انرژی (۰/۶۶۲ MeV) ^{137}Cs می باشد. با استفاده از روش هسته‌ای که امروزه به عنوان روشی نوین در عرصه علم شناخته می‌شود می‌توان بدون نیاز به خرابی و در زمان کم در تشخیص عیوب لوله‌های پلی اتیلن آب نقش مهم و مفیدی را ایفا کرد.

۵-مراجع:

- [۱] Barshinger J, Rose JL, Avioli Jr MJ. Guided wave resonance tuning for pipe inspection. J. Pressure Vessel Technol.. ۲۰۰۲ Aug ۱;۱۲۴(۳):۳۰۳-۱۰.
- [۲] Shamir U, Howard CD. An analytic approach to scheduling pipe replacement. Journal-American Water Works Association. ۱۹۷۹ May;۷۱(۵):۲۴۸-۵۸.
- [۳] Antaki GA. Piping and pipeline engineering: design, Construction, maintenance, integrity, and repair. CRC Press; ۲۰۰۳ May ۲۸.
- [۴] Kanakoudis VK. A troubleshooting manual for handling operational problems in water pipe networks. Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA. ۲۰۰۴ Mar ۱;۵۳(۲):۱۰۹-۲۴.
- [۵] Alobaidi WM, Alkuam EA, Sandgren E, Al-Rizzo HM. Enhancing production efficiency of oil and natural gas pipes using microwave technology. Energy and Power Engineering. ۲۰۱۵;۷(۱۰):۴۴۰.
- [۶] Graneau P, SWASN S. Electromagnetic Fault Detection on non-ferrous pipes. INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS. ۱۹۶۰ Feb ۱;۸(۲):۱۲۷-۴۷.



- [۷] Deutsch WA, Schulte P, Joswig M, Kattwinkel R. Automatic inspection of welded pipes with ultrasound. Proceedings of the 9th ECNDT, Berlin. ۲۰۰۶ Sep.
- [۸] Alobaidi WM, Alkuam EA, Al-Rizzo HM, Sandgren E. Applications of ultrasonic techniques in oil and gas pipeline industries: A review. American Journal of Operations Research. ۲۰۱۵;۵(۰۴):۲۷۴.
- [۹] Olbrich M, Wuest H, Riess P, Bockholt U. Augmented reality pipe layout planning in the shipbuilding industry. In ۲۰۱۱ 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality ۲۰۱۱ Oct ۲۶ (pp. ۲۶۹-۲۷۰). IEEE.
- [۱۰] Lopes R, Silva FJ, Godina R, Campilho RD, Dieguez T, Ferreira LP, Baptista A. Reducing scrap and improving an air Conditioning pipe production line. Procedia Manufacturing. ۲۰۲۰ Jan ۱;۵۱:۱۴۱۰-۵.
- [۱۱] Mthimkhulu Z, Adebajo H, Adeliyi TT. Designing A Frugal Inspection Robot for Detecting In-Pipe Leaks in The Oil And Gas Sector. In ۲۰۲۳ Conference on Information Communications Technology and Society (ICTAS) ۲۰۲۳ Mar ۸ (pp. ۱-۶). IEEE.
- [۱۲] A. Khoshhal and A. Esmaili Torshabi, "Feasibility of Anthropomorphic Head Phantom Design Using DLP 3D Printing for Dosimetry," *Journal of Nuclear Research and Applications*, vol. ۴, no. ۳, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۲۴.
- [۱۳] A. B. Khatibani, A. R. Khoshhal, E. B. Tochaee, S. R. Jamnani, and H. M. Moghaddam, "Physical and gamma radiation shielding features of Sm^{2}O_3 /graphene nanoparticles: A Comparison between experimental and simulated gamma shielding capability," *Inorganic Chemistry Communications*, p. ۱۱۲۷۷۲, ۲۰۲۴.
- [۱۴] A. R. Khoshhal, A. B. Khatibani, Z. Tirehdast, M. Shaddoust, and M. Nirouei, "Evaluation of experimental and simulated gamma ray shielding ability of $\text{ZnCo}^{2}\text{O}_4$ and $\text{ZnCo}^{2}\text{O}_4$ /graphene nanoparticles," *Optical Materials*, vol. ۱۵۶, p. ۱۱۵۹۵۳, ۲۰۲۴.



ساخت آمیزه پلیمری بر پایه پلی اتیلن مقاوم به شعله جهت تولید درپوش های حرارتی با

استفاده از شتابدهنده الکترون (کد مقاله : ۱۱۹۹)

خیرخواه، یحیی^۱-بنائی، مریم^۲

۱. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

درپوش‌های مخابراتی قطعاتی پلاستیکی هستند که برای مسدود ساختن انتهای کابل‌های مخابراتی و نیز گاهی کابل‌های صنعت برق به کار می‌رود و باعث جلوگیری از ورود و جذب خاک، گرد و غبار و رطوبت به داخل کابل می‌شوند. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از ماده پلیمری از نوع پلی اتیلن سبک داخلی و سایر مواد افزودنی، آمیزه‌ای مناسب و ضد شعله جهت ساخت درپوش مذکور تهیه گردد. برای این منظور در ابتدا سعی شد تا آمیزه‌هایی برپایه مواد پلیمری از نوع پلی اتیلن سبک و اتیلن وینیل استات و نیز کنسانتره دوده با مقادیر متفاوتی از مواد ضد شعله آماده کرده و از آنها صفحاتی صاف تهیه شود. در ادامه به منظور شبکه‌ای نمودن، صفحات با باریکه الکترون پرتو دهی گردید، سپس در جهت کنترل کیفی آنها، خواص مکانیکی آمیزه‌ها قبل و پس از آزمون فرسودگی، همچنین مقاومت آنها در برابر شعله اندازه‌گیری و مورد بررسی قرار گرفت و آمیزه بهینه مشخص گردید.

کلمات کلیدی: درپوش، ضد شعله، باریکه الکترونی، اتصال عرضی

Making a polymer mixture based on flame-resistant polyethylene for the production of thermal caps using an electron accelerator

Kheirkhah Yahya^{۱*}, Banaei, Maryam^۲

۱. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Research Institute of Radiation Application

۲. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co., Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)

Abstract:

Telecommunication caps are plastic parts that used to block the ends of cables and prevent the absorption of dirt, dust and moisture. In this research, an attempt made to prepare a flame retardant mixture for cap making by using internal light polyethylene and other additives. At first, mixtures based on light polyethylene and ethylene vinyl acetate with different amounts of flame retardant materials prepared and then smooth plates prepared from them. In order to mesh, the plates irradiated with electron beam, then the mechanical properties of the mixtures before and after the wear test, as well as their resistance to flame measured and the optimal mixture was determined.

Key words: End cap, flame retardant, electron beam, crosslinking



۱ - مقدمه:

امروزه استفاده از محصولات قابل انقباض حرارتی در صنایع کابلسازی و مخابرات، جهت عایقکاری محل اتصالات و محافظت آنها در برابر خوردگی افزایش یافته است. در فرآیند تولید این مواد، محصول شبکه‌ای شده در دمای بالا کشیده شده و در همان حالت سرد می‌گردد. در اثر جهتگیری مولکولی زنجیره‌های پلیمر، حافظه‌ای در ساختار ماده بوجود می‌آید که تنش اعمال شده در هنگام کشش را حفظ می‌کند. آزاد شدن این تنش محبوس در اثر اعمال حرارت، باعث برگشت این مواد به حالت اولیه می‌گردد که از همین ویژگی برای عایق کاری محل اتصالات استفاده می‌شود. پلی‌الفینها و کوپلیمرهای آنها به عنوان پلیمرهای حافظه‌دار برای تولید محصولات قابل انقباض توسط حرارت بکار می‌روند. وجود نواحی کریستالی در این مواد، باعث حفظ ساختار منبسط شده و ایجاد حافظه در به خاطر سپردن شکل اولیه این محصولات می‌شود [۳-۱]. ضعف پلی‌اتیلن در کاربردهای صنعتی دمای ذوب نسبتاً پایین آن است که با شبکه‌ای کردن می‌توان تاحدی بر آن غلبه نمود. مقاومت پلی‌الفینها در برابر شعله را می‌توان با استفاده از مواد شیمیایی تأخیردهنده شعله بهبود بخشید. این مواد با مکانیسمهای مختلف مقاومت ماده در برابر شعله را افزایش می‌دهند. بعضی از آنها مانند $Al(OH)_3$ و $Mg(OH)_2$ نمی‌سوزند و به صورت گرماگیر تجزیه شده و آب تولید می‌کنند. گونه‌های دیگر نظیر هالیدهای مختلف مستقیماً به ساختار شیمیایی پلیمر وارد شده و با آزادسازی ترکیبات هالوژن‌دار در طول احتراق، نه تنها نرخ آزادسازی حرارت را کاهش می‌دهند بلکه با رادیکالهای آزاد، ترکیب شده و با مصرف آنها واکنش احتراق را کند می‌کنند [۷-۴]. درپوش قطعه‌ای است که نصب آن در انتهای کابل‌های مخابراتی مانع از نفوذ رطوبت و گرد و غبار به درون کابل می‌شود. شکل (۱) نمونه‌ای از درپوش را نشان می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات فنی درپوش

مقدار	واحد	خواص
Min 10	Mpa	Tensile
Min 300	%	Ultimate elongation
Min 45 shore D		Hardness
Min 8	Mpa	Tensile after aging (at 136°C for 168 hrs)
Min 200	%	Elongation after aging (at 136°C for 168 hrs)
Min 2.5	%	Carbon black content



شکل (۱) نمونه‌ای از

درپوش حرارتی



جهت تولید این محصول ابتدا توسط دستگاه مخلوط‌کن آمیزه‌هایی با درصدهای مختلف از پلی‌اتیلن سبک، اتیلن وینیل استات و مواد ضد شعله تهیه شد. به کمک دستگاه پرس از این آمیزه‌ها صفحاتی تهیه گردید که با باریکه الکترونهای 10 MeV در گستره دز جذبی 120 تا 170 کیلوگری پرتودهی شد. سپس خواص مکانیکی آمیزه‌ها از قبیل استحکام کششی، درصد ازدیاد طول و سختی قبل و بعد از پرتودهی، همچنین شاخص حدی اکسیژن نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و ترکیب درصد بهینه افزودنیها با در نظر گرفتن خواص مذکور تعیین گردید. لازم به ذکر است که برای انتخاب مواد اولیه و دستیابی به ترکیب درصد بهینه از مرجع مشخصات مواد درپوشهای مخابراتی استفاده شده است. جدول ۱ حداقل خواص لازم در تهیه آمیزه مناسب را نشان می‌دهد.

۲- روش کار:

در این تحقیق از پلی‌اتیلن سبک، اتیلن وینیل استات 18% ، کنستانتره دوده 40% و ضد اکسند ایرگانوکس 1010 استفاده شد. از تری اکسید آنتیموان و دکابرومودی فنیل‌اتر به منظور مقاوم کردن آمیزه‌ها در برابر شعله و همچنین از کلسیم استئارات بعنوان روان‌کننده استفاده شد. شاخص جریان مذاب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Extrusion Plastometer (Zwick ۱۰۰) تعیین شد [۸]. برای اختلاط اولیه مواد از دستگاه مخلوط‌کن دو بازویی و برای شکل‌دهی نمونه‌ها به صورت صفحه از دستگاه پرس هیدرولیکی استفاده گردید. میزان استحکام کششی و درصد افزایش طول نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کشش Instron ۴۴۱۱ در دمای محیط اندازه‌گیری شد. در ادامه سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختیسنج، مطابق با ShoreD تعیین گردید.

شاخص حدی اکسیژن نمونه‌ها توسط دستگاه Flammability Tester و میزان شبکه‌ای شدن با آزمون ژل اندازه‌گیری شد. شبکه‌ای کردن نمونه‌ها با استفاده از باریکه الکترونهای 10 MeV حاصل از دستگاه شتاب‌دهنده الکترون مدل Rhodotron TT ۲۰۰ انجام شد. همچنین خواص مکانیکی نمونه‌ها پس از آزمون فرسودگی حرارتی در شرایط دمایی 160°C به مدت 136 h و 168 h اندازه‌گیری گردید. در ابتدا با استفاده از دستگاه مخلوط‌کن از مواد اولیه سه آمیزه در دمای 160°C و دور 50 rpm تهیه شد و سپس توسط دستگاه پرس هیدرولیکی در دمای 170°C و فشار 95 bar صفحاتی به ضخامت 2 mm میلیمتر تهیه گردید. سپس خواص مکانیکی و شاخصهای جریان مذاب نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۲ ترکیب درصد سه آمیزه اولیه و خواص آنها قبل از پرتودهی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: ترکیب درصد سه آمیزه اولیه و خواص آنها قبل از پرتودهی

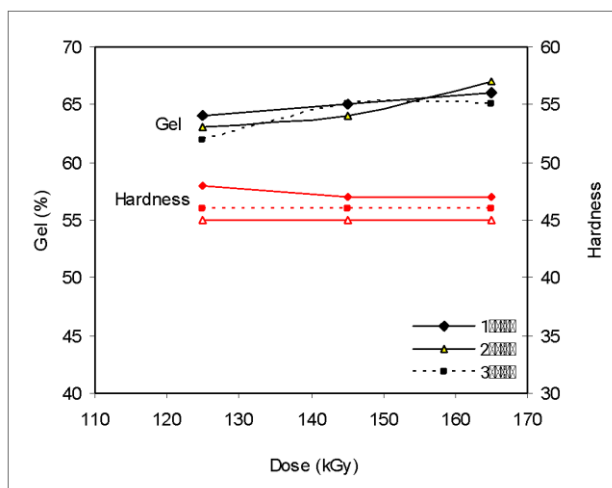
شماره آمیزه	پلی اتیلن سبک (٪)	اتیلن وینیل استات (٪)	کنستانتره دوده (٪)	Tensile (Mpa)	Ultimate elongation (%)	Hardness (Shore D)	MFI (g/10min)
۱	۷/۸۳	۱۰	۳/۶	۸	۳۹۲	۴۴	۵/۲۶
۲	۷/۸۶	۷	۳/۶	۳/۸	۳۸۳	۵/۴۴	۲۲
۳	۷/۸۸	۵	۳/۶	۵/۸	۳۸۰	۵/۴۵	۵/۱۶



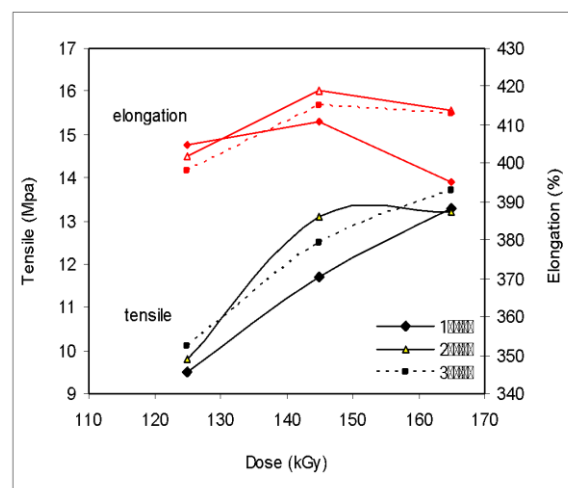
از آنجایی که خواص جدول ۱ مربوط به محصول درپوش و یا عبارتی آمیزه درپوش پس از پرتودهی می‌باشد. به همین منظور آمیزه‌ها در محدوده دز جذبی ۱۷۰-۱۲۰ کیلوگری با باریکه الکترونیهای ۱۰ MeV پرتودهی شدند.

۳ - نتایج:

شکل ۲ میزان استحکام کششی و درصد افزایش طول آمیزه‌ها و شکل ۳ میزان شبکه‌ای شدن و سختی آمیزه‌ها را در دزهای مختلف نشان می‌دهد. طبق این نمودارها با افزایش دز جذبی استحکام کششی و درصد ژل افزایش یافته است. مقایسه نتایج با داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که استحکام کششی، درصد افزایش طول تا پارگی و درصد ژل هر سه آمیزه در حد قابل قبولی قرار دارد. اما آمیزه شماره ۳ در دز جذبی ۱۴۵ کیلوگری از سختی و استحکام کششی قابل قبولی برخوردار است. بنابراین آمیزه شماره ۳ بعنوان آمیزه مناسب انتخاب گردید.



شکل (۳) میزان شبکه‌ای شدن و سختی در دزهای مختلف



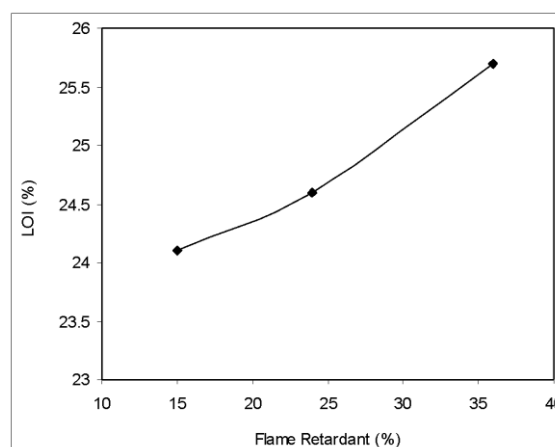
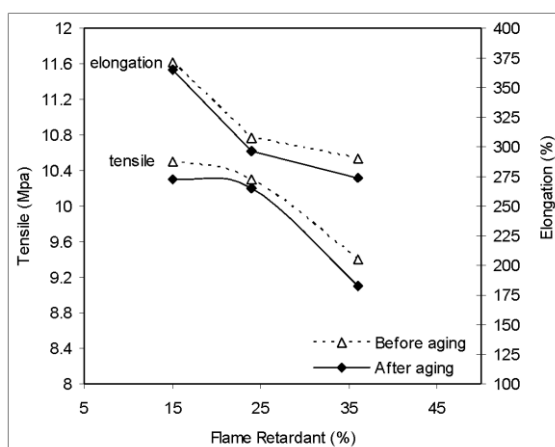
شکل (۲) میزان استحکام کششی و درصد افزایش طول در دزهای مختلف

در ادامه به منظور مقاوم نمودن آلیاژ حاصل نسبت به شعله از مواد ضد شعله به نسبت دو به یک از DBDPE و Sb_2O_3 و نیز از آنتی اکسیدانت بمقدار ۰/۳۵ درصد برای حفظ خواص آمیزه پس از آزمون فرسودگی حرارتی استفاده شد. جدول ۳ ترکیب درصد افزودنیها را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در این قسمت هدف افزایش مقاومت آمیزه نسبت به اشتعال است، لذا آزمون LOI بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در شکل ۴ میزان LOI آمیزه‌های فوق برحسب درصد افزایش مواد بازدارنده شعله نشان داده شده است. به منظور شبکه‌ای کردن، آمیزه‌های فوق در دز جذبی ۱۴۵ کیلوگری پرتودهی شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها در حالت قبل و بعد از آزمون فرسودگی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ نشان دهنده خواص بعد از آزمون فرسودگی است. آمیزه شماره ۶ از این شرایط لازم برخوردار است و به عنوان آمیزه بهینه انتخاب شد.



جدول ۳: ترکیب درصد سه آمیزه حاوی مواد ضد شعله

شماره آمیزه	پلی اتیلن سبک (%)	EVA (%)	کنستانتره دوده (%)	Irganox ۱۰۱۰ (%)	مواد ضد شعله (%)	کلسیم استئارات (%)
۵	۳۵/۷۲	۵	۳/۶	۳۵/۰	۱۵	۱
۶	۳۵/۶۳	۵	۳/۶	۳۵/۰	۲۴	۱
۷	۳۵/۵۱	۵	۳/۶	۳۵/۰	۳۶	۱



شکل (۵) اثرمیزان مواد بازدارنده شعله بر استحکام کششی و

درصد افزایش طول قبل و بعد از آزمون فرسودگی

شکل (۴) اثرمیزان مواد بازدارنده شعله بر شاخص حدی اکسیژن

به منظور آزمایش آمیزه انتخابی در شرایط عملیاتی و رفع مشکلات و نقایص موجود در فرآیند تزریق، پرتودهی و انبساط، مقدار ۱۰ کیلوگرم از آمیزه شماره ۶ توسط دستگاه اکسترودر دو پیچ به شکل گرانول تهیه شد و با استفاده از دستگاه تزریق درپوش اولیه مورد نظر تولید گردید. جهت شبکه‌ای کردن، محصول (درپوشها) با باریکه الکترونیهای MeV ۱۰ در دز جذبی kGy ۱۴۵ پرتودهی شدند. پس از آن برای عمل انبساط لازم است که درپوشها در آون تا دمای ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد بمدت ۵ تا ۶ دقیقه پیش گرم شوند و سپس نمونه‌ها در داخل دستگاه انبساط کننده، منبسط شدند و نمونه درپوشهایی در اندازه‌های ۵ و ۶ مطابق شکل ۶ تولید شدند.



شکل (۶) نمونه‌ای از درپوش حرارتی تولیدی در اندازه های ۴ و ۵



۴ - بحث و نتیجه گیری:

با افزایش دز جذبی میزان استحکام کششی و درصد شبکه‌ای شدن افزایش می‌یابد این در حالی است که با تشکیل اتصالات عرضی درصد ازدیاد طول و شاخص جریان مذاب کاهش یافته و سختی نمونه‌ها تغییر چندانی نکرده است. همچنین با افزایش مواد ضد شعله، شاخص اکسیژن خواهی افزایش یافته ولی خواص مکانیکی سیر نزولی دارد. بنابراین با انتخاب مواد، افزودنی‌ها و دز جذبی مناسب امکان کسب حداقل خواص لازم مطابق جدول ۱ جهت تولید درپوشه‌ای حرارتی فراهم می‌شود.

۵ - مراجع:

- [۱] H.A. Khonakdar, J. Morshedian, U. Wagenknecht, "An Investigation of Chemical Crosslinking Effect on Properties of High-Density Polyethylene", Polymer, Vol. ۴۴, PP. ۴۳۰۱-۴۳۰۹, ۲۰۰۳.
- [۲] S. Dadbin, M. Frounchi, M. Haji Saeid, F. Gangi, "Molecular Structure and Physical Properties of E-Beam Crosslinked Low-Density Polyethylene for Wire and Cable Insulation Applications", Journal of Applied Polymer Science, Vol. ۸۶, No. ۸, pp. ۱۹۵۹-۱۹۶۹, ۲۰۰۲.
- [۳] J. Gheysari, A. Behjat, "Radiation Crosslinking of LDPE and HDPE with ۵ and ۱۰ MeV Electron Beams", European Polymer Journal, ۳۷, PP. ۲۰۱۱-۲۰۱۶, ۲۰۰۱.
- [۴] A.A. Basfar, "Flammability of radiation cross-linked low density polyethylene as an insulating material for wire and cable", Radiation Physics and Chemistry, Vol. ۶۳, PP. ۵۰۵-۵۰۸, ۲۰۰۲.
- [۵] S.R. Chowdhury, J.K. Mishra, C.K. Das, "Study of Heat Shrinkability and Flame Retardancy of Poly(ethylene vinyl acetate) /Epichlorohydrin Blends", Macromol. ater. Eng. ۲۸۶, pp. ۲۴۳-۲۴۷, ۲۰۰۱.
- [۶] L. Yu, W. Wang, W. Xiao, "The effect of decabromodiphenyl oxide and antimony trioxide on flame retardation of ethylene-propylene-diene copolymer/polypropylene blends", Polymer Degradation and Stability, Vol. ۸۶, PP. ۶۹-۷۳, ۲۰۰۴.
- [۷] F. Carpentier, S. Bourbigot, M. L. Bras, R. Delobel, M. Foulon, "Charring of fire retarded ethylene vinyl acetate copolymer-magnesium hydroxide/zinc borate formulations", Polymer Degradation and Stability, Vol. ۶۹, PP. ۸۳-۹۲, ۲۰۰۰.
- [۸] ASTM D۱۲۳۸, "Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer", ۱۹۹۵.



بکارگیری پرتو یونیزان الکترون برای تولید هیدروژل PVP و PVP/CMC: مقایسه رفتار

فیزیکی (کد مقاله: ۱۲۰۵)

بنائی، مریم* - دهشیری، سعیده^۱ - خیرخواه، یحیی^۲ - ابوالفضل^۱
۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتوآیند ایران مرکزی (یزد)
۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

هیدروژل‌های پلی وینیل پیرولیدون (PVP)/کربوکسی متیل سلولز (CMC) و PVP به وسیله پرتودهی الکترون سنتز شد و در دزهای ۲۵ کیلوگری و ۳۵ کیلوگری پرتودهی شد. خواص هیدروژل‌ها مانند درصد ژل، رفتار تورمی و دهیدراسیون بررسی شد. مقایسه هیدروژل‌های PVP و PVP/CMC نشان داد در هیدروژل PVP/CMC شفافیت و ارتجاعی بودن بهبود یافته است. زمانی که محتویات PVP در PVP/CMC افزایش می‌یابد درصد ژل نیز افزایش یافته در حالیکه سرعت تورم و دهیدراسیون کاهش می‌یابد. خواص بهبود یافته هیدروژل CMC/PVP مانند ارزان بودن مواد بکار رفته آن را بعنوان جایگزین مناسب برای هیدروژل PVP معرفی می‌کند.

کلمات کلیدی: هیدروژل، ژل، تورم، دهیدراسیون، رفتار فیزیکی

Employment of electron radiation for production of PVP and PVP/CMC: Comparative of the physical behavior

Banaei, Maryam^{۱*}, Dehshiri, Saeidah^۱, Kheirkhah Yahya^۲, Jomhoori, abolfazl^۱

۱. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co., Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)
۲. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Research Institute of Radiation Application

Abstract:

Poly vinyl pyrrolidone (PVP)/Carboxymethyl cellulose (CMC) and PVP hydrogels synthesized by electron beam irradiation and irradiated in ۲۵kGy and ۳۵kGy doses. The properties of the hydrogels such as gel fraction, swelling behavior and dehydration investigated. Compared with PVP and PVP/CMC hydrogels, PVP/CMC blend hydrogels possessed improved flexibility and transparency. As the content of PVP in PVP/CMC blend hydrogels increased, the gel fraction increased while the swelling rate and dehydration decreased. The improved properties in PVP/CMC as well as the cheapness of the materials suggest that PVP/CMC blend hydrogel can be good candidate as PVP hydrogel.

Key words: Hydrogel, Gel, Swelling, Dehydration, Physical behavior



۱- مقدمه:

هیدروژل‌ها، پلیمرهای آب دوست با پیوند عرضی بوده (یا گروهی از شبکه‌های پلیمری که زنجیره‌های آن‌ها با اتصالات عرضی به هم متصل شده‌اند) و قادرند مقادیر زیادی آب را در خود جذب نموده تا به حالت تعادل برسند [۱]. هیدروژل‌ها استفاده‌های متعددی دارند از جمله در پزشکی، محصولات آرایشی و بهداشتی، مواد نگهدارنده آب، منعقد کننده لجن، غلیظ کننده و ... کاربرد دارند [۲].

اولین هیدروژل سنتزی برای پوشش زخم در سال ۱۹۸۶ توسط روسیاک و پولند^{۶۰} با بکارگیری تکنیک پرتودهی آماده‌سازی گردید. این هیدروژل برای کاهش درد و بهبود سریعتر بکار گرفته شد. در تولید این هیدروژل از تکنیک پرتودهی استفاده گردید که باعث می‌گردد تا شبکه‌ای شدن و استریل هم زمان صورت پذیرد [۳]. پرتودهی به محلول آبی پلیمر منجر به تشکیل رادیکال‌های پلیمری می‌شود که برهمکنش آن‌ها با یکدیگر باعث تشکیل پیوند کووالانسی می‌شود و در نتیجه شبکه سه بعدی پلیمری آب دوست و غیرقابل حل را به وجود می‌آورد. این روش یک روش ساده است و نیازی به اضافه نمودن مواد شیمیایی از قبیل آغازگر و عامل شبکه‌ای کننده ندارد [۴].

مطالعه دیگری در مورد کاربرد فرآیند پرتودهی برای تهیه هیدروژل توسط لوگو و همکاران^{۶۱} نیز انجام شد و نشان دادند تکنیک پرتودهی ابزاری قدرتمند برای تولید هیدروژل شیمیایی خالص با خواص بهبود داده شده است. علاوه بر این، شرایط فرآیند می‌تواند به آسانی کنترل و تغییر کند [۵].

اخیراً اثرهای سولزی زیست تخریب پذیر مانند کربوکسی متیل سلولز محلول در آب برای ساخت هیدروژل بدون استفاده از عامل شبکه‌ای کننده استفاده شده است [۶]. و بدلیل اینکه این ماده به وسیله آنزیم سلولز تخریب می‌گردد به عنوان ماده زیست سازگار شناخته شده است [۷]. مطالعات انجام شده توسط لیو و همکاران^{۶۲} نیز نشان داد کربوکسی متیل سلولز می‌تواند در شرایط مناسب پرتودهی به هیدروژل تبدیل شود [۸].

با توجه به خواص کربوکسی متیل سلولز، در دسترس بودن و ارزان بودن آن، به هیدروژل PVP اضافه شد و رفتار فیزیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن این ماده به میزان ۱٪ و ۲٪ در ساختار هیدروژل می‌تواند رفتار فیزیکی مناسبی را از خود نشان دهد و این هیدروژل جایگزین مناسبی برای هیدروژل PVP گردد.

۲- بخش تجربی:

۲-۱- مواد و تجهیزات مورد نیاز

نمونه‌های هیدروژل با استفاده از ترکیب پلی وینیل پیرولیدون، آگار، پلی اتیلن گلیکول و کربوکسی متیل سلولز (CMC) آماده سازی گردید. پلی وینیل پیرولیدون و پلی اتیلن گلیکول با جرم مولکولی ۲۰۰ ساخت شرکت BASF، آگار ساخت شرکت Difco و نیز CMC ساخت شرکت Sigma Aldrich استفاده گردید. برای ساخت هیدروژل از آب دو بار تقطیر در pH خنثی استفاده شد زیرا کربوکسی متیل سلولز موجود در هیدروژل به شدت حساس به غلظت نمک‌های معدنی می‌باشد. به طوری که نسبت تورم با افزایش قدرت یونی محلول به شدت کاهش می‌یابد. حضور کربوکسی متیل سلولز در محیط بازی تورم

^{۶۰} Rosiak in Poland

^{۶۱} Lugao et. al.

^{۶۲} Liu et. al.



بالایی را دارد. در محیط اسیدی با افزایش pH تفکیک باندهای یونی اتفاق می‌افتد و حضور بار باعث ایجاد نیروی دافعه بر روی زنجیره پلیمری می‌شود و تورم هیدروژل اتفاق می‌افتد [۳].
برای پرتودهی نیز از شتابدهنده الکترون TT^{200} با قدرت $MeV 10$ مستقر در مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد) استفاده شد.

۳- روش کار

هیدروژل PVP مطابق روشی که قبلاً بیان شده آماده سازی شد [۹]. بعد از آماده‌سازی هیدروژل CMC PVP را اضافه نموده و همزدن را ادامه داده تا یک محلول یکنواخت بدست آید. بعد آن را داخل قالب مناسب ریخته و اجازه داده شد تا محلول سرد گردد. در اثر سرد شدن، نمونه‌ای با ساختار ژل مانند و با ویسکوزیته بالا خواهیم داشت. بمنظور استریلیزاسیون و شبکه‌ای نمودن ژل‌های بدست آمده، پرتودهی در دز $25 kGy$ و $35 kGy$ با شتابدهنده الکترون TT^{200} با قدرت $MeV 10$ انجام گردید. هیدروژل بدست آمده PVP/CMC نامیده شد همچنین هیدروژل بدون افزودن CMC، هیدروژل PVP در نظر گرفته شد [۹]. سپس درصد ژل، رفتار تورمی و دهیدراسیون هیدروژل‌های PVP و ترکیبی PVP/CMC اندازه‌گیری شد و با یکدیگر مقایسه گردید.

برای محاسبه درصد ژل ابتدا هیدروژل‌ها را به دقت وزن نموده (W_0) و استخراج با آب مقطر و سیستم سوکسله انجام می‌دهیم. سپس نمونه‌ها را در آون خشک نموده و آن را وزن می‌کنیم (W_1) جز حل شده از طریق معادله (۱) محاسبه شده و سپس درصد ژل از معادله (۲) بدست می‌آید.

$$\text{Sol fraction (\%)} = (W_0 - W_1) / W_1 \times 100 \quad \text{معادله (۱)}$$

$$\text{Gel fraction (\%)} = 100 - \text{Sol fraction} \quad \text{معادله (۲)}$$

برای تعیین تورم هیدروژل با وزن (W_1) در آب دو بار تقطیر فرو برده و در زمان مشخص وزن آن را یادداشت می‌کنیم (W_2) سپس درجه تورم از معادله ۳ محاسبه می‌کنیم.

$$\text{Swelling (\%)} = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100 \quad \text{معادله (۳)}$$

برای بررسی دهیدراسیون هیدروژل‌های تهیه شده نیز آن‌ها را در داخل آورن در دمای $37^\circ C$ درجه سانتیگراد قرار داده و وزن آن‌ها را برای مدت زمان خاص مورد بررسی قرار می‌دهیم و درصد کاهش وزن را نسبت به وزن اولیه که متناسب با از دست دادن آب است بدست می‌آوریم.

۴- نتایج:

ابتدا برای تهیه هیدروژل CMC/PVP، هیدروژل با درصدهای وزنی متفاوت از CMC تهیه گردید و مشاهده شد که در درصدهای بالاتر الف. حل شدن این ماده مشکل است و ب. زمانی که پرتودهی انجام می‌گردید بافت هیدروژل نهایی استحکام مناسب نداشت. بنابراین درصدهای ۱ و ۲ درصد وزنی که بهترین جواب را داشت انتخاب گردید. سپس به منظور مقایسه هیدروژل PVP با هیدروژل CMC/PVP چهار نوع هیدروژل در نظر گرفته شد. هیدروژل شاهد (هیدروژل PVP)، دو نوع هیدروژل



دیگر که به ترتیب ۱ و ۲ درصد وزنی CMC به جای ماده PVP استفاده شد و هیدروژل دیگری که ۱ درصد وزنی CMC جایگزین آگار گردید و به ترتیب هیدروژل‌ها را از ۱ تا ۴ کد گذاری شد.

درصدهای مختلفی از CMC تهیه گردید و مشاهده شد که در درصدهای بالاتر الف. حل شدن این ماده مشکل است و ب. زمانی که پرتودهی انجام می‌گردد بافت هیدروژل نهایی استحکام مناسب نداشت.

۴-۱- درصد ژل

زمانی که هیدروژل PVP با اضافه نمودن انواع پلی ساکاریدها با پرتودهی ساخته می‌شود در اثر پرتودهی PVP شبکه‌ای شده در حالیکه هم زمان پلی ساکاریدها تخریب شده به زنجیره‌های شبکه ای شده پلیمر پیوند می‌شوند و یا شبکه‌ای شدن فیزیکی در آن اتفاق می‌افتد [۱۰]. و در نهایت هیدروژل تشکیل می‌شود. هیدروژل بدست آمده را به چند قطعه تقسیم نموده و درصد ژل آن اندازه‌گیری شد و انحراف استاندارد آن گزارش گردید. جدول (۱) درصد ژل هیدروژل‌های تهیه شده در دزهای ۲۵kGy و ۳۵ kGy را نشان می‌دهد.

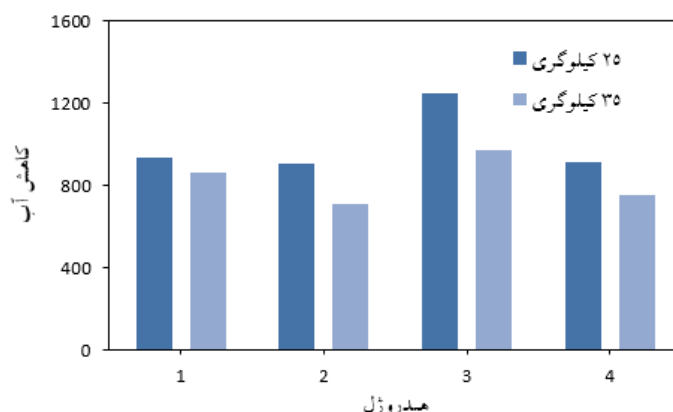
جدول ۱: درصد ژل هیدروژل‌ها تهیه شده در دزهای ۲۵kGy و ۳۵ kGy

نام هیدروژل	درصد ژل در دز ۳۵ کیلوگری	انحراف استاندارد	درصد ژل در دز ۲۵ کیلوگری	انحراف استاندارد
۱	۶۵/۴۵	۱/۴	۶۴/۶۳	۱/۳
۲	۵۶/۳۳	۰/۶	۵۴/۲۳	۰/۳۲
۳	۵۱/۸۶	۰/۹	۵۰/۱۸	۰/۹۳
۴	۶۰/۸۳	۰/۶	۵۷/۳۹	۰/۵

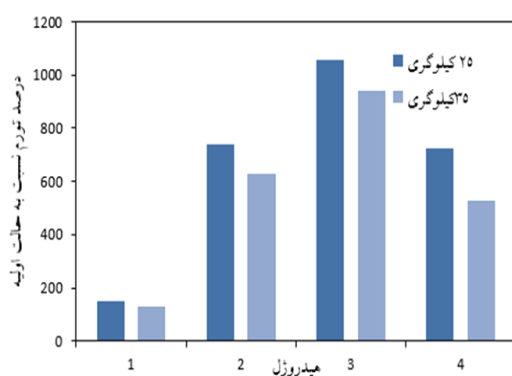
همانگونه که مشاهده می‌گردد با مقایسه درصد ژل برای هر یک از هیدروژل‌ها نسبت به خودشان در دزهای بکار گرفته شده ۲۵ kGy و ۳۵ kGy تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد یعنی تغییر دز، تغییر فاحشی را در درصد ژل به وجود نمی‌آورد. در صورتی که با مقایسه هیدروژل‌های ۲ و ۳ با هیدروژل PVP مشاهده می‌گردد هر چه درصد CMC استفاده شده افزایش یابد مقدار درصد ژل نیز کاهش می‌یابد، و با مقایسه هیدروژل ۴ و ۲ مشاهده می‌گردد که درصد ژل در هیدروژل ۴ بیشتر است که بدلیل این است که با وجود درصد یکسان CMC چون مقدار PVP بیشتر است شبکه‌ای شدن در آن بیشتر اتفاق افتاده و ژل بیشتری را نشان می‌دهد. در نهایت آنچه موجب تغییر درصد ژل است حضور ماده CMC در فرمول هیدروژل می‌باشد که افزایش مقدار آن باعث کاهش درصد ژل می‌گردد.

۴-۲- درصد تورم

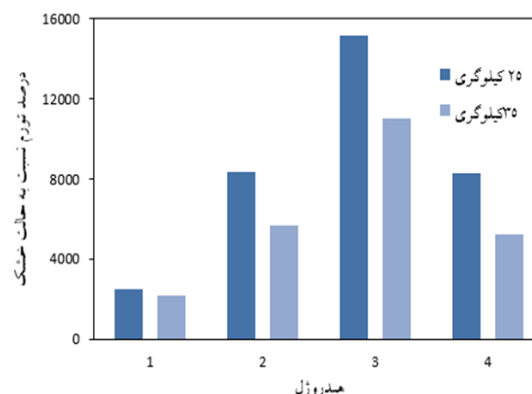
برای به دست آوردن میزان تورم هیدروژل‌های تهیه شده نسبت به حالت خشک، ابتدا قطعات کوچکی از هیدروژل‌ها را وزن نموده و سپس میزان درصد کاهش آب آن‌ها را محاسبه می‌کنیم. شکل (۱)



شکل (۱) کاهش آب در هیدروژل های ۱، ۲، ۳ و ۴ در دز پرتو دهی ۲۵ kGy و ۳۵ kGy



شکل (۳) درصد تورم نسبت به حالت اولیه در هیدروژل های ۱، ۲، ۳ و ۴ بر اساس دز پرتو دهی ۲۵ kGy و ۳۵ kGy



شکل (۲) درصد تورم نسبت به حالت خشک در هیدروژل های ۱، ۲، ۳ و ۴ بر اساس دز پرتو دهی ۲۵ kGy و ۳۵ kGy

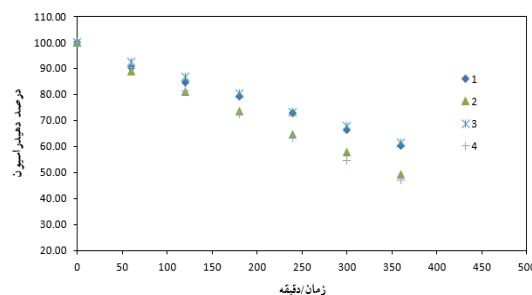
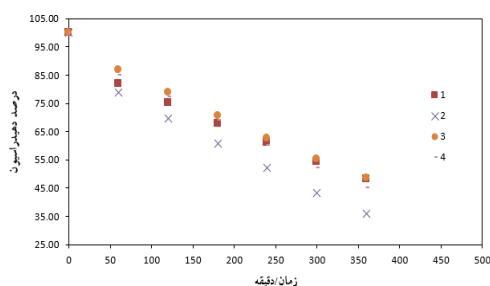
در شکل (۱) مشاهده می‌گردد هیدروژل تهیه شده با درصد بیشتر CMC کاهش آب بیشتری را دارند. شکل (۲) و (۳) درصد تورم نسبت به حالت خشک و نسبت به حالت اولیه به ترتیب در هیدروژل های ۱، ۲، ۳ و ۴ در دز ۲۵ kGy و ۳۵ kGy نشان می‌دهند. درصد تورم در دو شکل مذکور، زمانی که پرتو دهی در دز ۲۵ کیلوگری انجام می‌شود مقدار بیشتری را نشان می‌دهد در حالیکه مقدار تورم در دز ۳۵ کیلوگری مقدار کمتری است که می‌تواند بدلیل شبکه‌ای شدن بیشتر مولکول‌های PVP در هیدروژل باشد. بطور کلی روند در هر دو شکل به صورت یکسان می‌باشد. تفاوت در تورم برای هیدروژل PVP از سایر هیدروژل‌ها کمتر بوده و در هیدروژل‌های دیگر مقدار و تفاوت آن با مقدار CMC متناسب است.

وقتی زنجیره‌های پلی الکترولیت تشکیل یک شبکه شامل گروه‌های یونیزه شونده می‌دهند بدلیل برهمکنش‌های بین مولکولی غیر کووالانسی، از قبیل دافعه کولنی، پیوند هیدروژنی و نیروهای قطبی حضور یون متحرک در ژل باعث افزایش مقدار متورم شدن می‌گردد [۱۱]. بنابراین برهمکنش پلیمر افزایش یافته و موجب بالا رفتن سرعت جذب آب می‌شود و سرعت تورم در هیدروژل محتوی CMC بالاتر، افزایش می‌یابد [۱۲].



۳-۴- دئیدراسیون

شکل (۴) و (۵) روند دئیدراسیون هیدروژل‌های مورد بررسی را در دزهای ۲۵ و ۳۵ کیلوگری نشان می‌دهد همانگونه که مشاهده می‌گردد همه هیدروژل‌های ساخته شده توانایی از دست دادن آب را دارند و با شیب ملایمی آب خود را از دست می‌دهند و در اثر گذشت زمان روند از دست دادن آب برای تمام هیدروژل‌ها انجام می‌گردد. با این تفاوت که روند دئیدراسیون برای هیدروژل PVP نسبت به سایر هیدروژل‌ها آهسته‌تر و با شیب ملایم‌تری صورت می‌گیرد.



شکل (۴) درصد دئیدراسیون هیدروژل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در دز پرتودهی ۳۵ kGy
شکل (۵) درصد دئیدراسیون هیدروژل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در دز پرتودهی ۲۵ kGy

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه هیدروژل‌های PVP و PVP/CMC ساخته شد و مقادیر درصد ژل، تورم و دئیدراسیون در آن‌ها بررسی شد. در اثر پرتودهی به هیدروژل‌ها، به دلیل وجود محلول آبی و شکسته شدن مولکول‌های آب، یون‌ها و رادیکال‌های فعالی به وجود می‌آیند که باعث یونیزه شدن سایر مولکول‌ها می‌شوند. مولکول‌های PVP که به رادیکال‌های فعالی تبدیل شده اند با برهمکنش با یکدیگر می‌توانند هیدروژل را به وجود آورند. با اضافه نمودن CMC به ترکیب هیدروژل PVP، در اثر پرتودهی مولکول‌های CMC شکسته شده می‌توانند با مولکول PVP تشکیل شبکه را بدهند و در نهایت هیدروژلی بدست می‌آید که خاصیت ارتجاعی، شفافیت، تورم و دئیدراسیون بالاتر را دارد اما میزان درصد ژل کمتری را نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت هیدروژلی که در آن CMC به میزان ۱ تا ۲ درصد جایگزین PVP شده است می‌توان به عنوان جایگزین هیدروژل PVP بکار برده شود.

۶- مراجع

- [۱] M.; Abdel Wahab, A.W.; El-Naggar, S.G.; Abd Alla, H.M.; Said, Materials Chemistry and Physics ۹۵ (۲۰۰۶) ۱۵۸-۱۶۳.
- [۲] S.N.; Azizi, M.M.; Lakouraj, Journal of Babol University of Medical Sciences ۱۰(۲) (۲۰۰۸) ۳۶-۴۳.
- [۳] P.; Liu, J.; Peng, J.; Li, J.; Wu, Radiation Physics and Chemistry ۷۲ (۲۰۰۵) ۶۳۵-۶۳۸.
- [۴] R.A.; Wach, B.; Rokita, N.; Bartoszek, Y.; Katsumura, P.; Ulanski, J.M.; Rosiak, Carbohydrate Polymers ۱۱۲ (۲۰۱۴) ۴۱۲-۴۱۵.
- [۵] A.B.; Lugao, S.M.; Malmonge, Nucl. Instrum. Methods B ۱۸۵ (۲۰۰۱) ۳۷-۴۲.



- [۶] I.; Fei, R.A.; Wach, H.; Mitomo, F.; Yoshii, T.; Kume, J. Appl. Polym. Sci. ۷۸ (۲۰۰۰) ۲۷۸–۲۸۳.
- [۷] R.A.; Wach, H.; Mitomo, F.; Yoshii, T.; Kume, ۲۰۰۱. J. Appl. Polym. Sci. ۸۱ (۲۰۰۱) ۳۰۳۰–۳۰۳۷.
- [۸] P.F.; Liu, M.L.; Zhai, J.Q.; Li, J.; Peng, J.L.; Wu, ۲۰۰۲. Radiat. Phys. Chem. ۶۲ (۲۰۰۲) ۵۲۵–۵۲۸.
- [۹] M.; Banaei, S.; Dehshiri, SP.; Shirmardi, J Nucl Ene Sci Power Generat Technol (۲۰۱۶) ۵:۲.
- [۱۰] M.L.; Zhai, H.F.; Ha, F.; Yoshii, K.; Makuuch, Radiat. Phys. Chem. ۵۷ (۲۰۰۰) ۴۵۹.
- [۱۱] J.M.; Rosiak, P.; Ulanski, Radiat. Phys. Chem. ۵۵ (۱۹۹۹) ۱۳۹.
- [۱۲] M.; Wang, L.; Xu, H.; Hu, M.; Zhai, J.; Peng, Y.; Nho, J.; Li, G.; Wei, Nuclear Instruments and Methods in physics Research B ۲۶۵ (۲۰۰۷) ۳۸۵–۳۸۹



توسعه سنسور رنگ قرمز، سبز، آبی (RGB) برای تشخیص کالای پرتودهی شده (کد مقاله :

(۱۲۰۷)

بنائی، مریم^{*}، انوری تفتی، فاطمه^۱

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتوآیند ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

یک سنسور رنگی ارزان قیمت قرمز، سبز، آبی (RGB) برای تعیین دز تابش توسعه داده شد. شناساگری که از پلی وینیل کلراید و رنگ حساس به pH ساخته شده است، توسط پرتوهای الکترونی در دزهای مشخص پرتودهی شد. سپس شناساگر شاهد و شناساگر پرتودهی شده مستقیماً بالای سنسور رنگ RGB (اسکنر) قرار گرفت. نور منعکس شده از شناساگر برای تغییر رنگ RGB پس از قرار گرفتن در معرض پرتو بررسی شد. تغییرات سریع در رنگ شناساگر از زرد به قرمز زمانی که دز پرتودهی افزایش یافت رخ داد. نتایج نشان می‌دهد که سنسور رنگ RGB می‌تواند تغییر رنگ در اثر پرتودهی را تشخیص داده و کالای پرتودهی شده را از کالای پرتودهی نشده متمایز سازد.

کلمات کلیدی: شناساگر، سنسور تشخیص رنگ، باریکه الکترون، پلی وینیل کلراید

Development of red, green, blue (RGB) color sensor to identifying the irradiated product

Banaei, Maryam^{1*}, Anvari Tafti, Fatemeh¹

1. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co.,
Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)

Abstract

An inexpensive red, green, blue (RGB) color sensor was develop for detecting irradiation dose. The indicator, which is made of poly vinyl chloride and pH sensitive dye, irradiated by electron beam at certain doses. Then the blank indicator and irradiated indicator were place directly above the RGB color sensor (scanner). Light reflected from the indicator was monitor for RGB color change upon exposure to radiation. A rapid color changes from yellow to red occurred when the dose of radiation increased. The result show that the RGB color sensor can detect changing in color due to radiation effect and distinguish the irradiated product from the non-irradiated product.

Keywords: indicator, Color detection sensor, Electron beam irradiation, Poly vinyl chloride



۱- مقدمه :

استفاده از تکنیک پرتودهی اشعه گاما و الکترون کاربردهای گسترده‌ای دارد [۱] شامل صنایع، پزشکی [۲]، استریلیزاسیون، پرتودهی مواد غذایی، تصفیه آب [۳] و سایر مواد معدنی، ایجاد اتصال عرضی پلیمرها و ... شناساگرها نقش اساسی برای اندازه-گیری پرتوهای یونیزان ایفا می‌نمایند. زمانی که یک شناساگر در معرض پرتودهی قرار می‌گیرد ایجاد دگرگونی بصری با جذب دز پرتودهی به شکل تغییر رنگ در ناحیه مرئی همراه با تغییرات فیزیکی و شیمیایی است صورت می‌پذیرد [۴]. معیار مهمی که در شناساگرها مورد توجه قرار می‌گیرد پایداری، ثبات، سادگی، کاربرد آسان و هزینه آن است [۵]. یک معیار مهم برای انتخاب رنگ در توسعه شناساگر این است که آن‌ها باید تغییر رنگ داشته باشند [۶]. متیل نارنجی و دی متیل زرد از جمله رنگ‌هایی هستند که در برابر پرتو تغییر رنگ در آن‌ها ایجاد می‌شود بنابراین از این دو رنگ در این تحقیق استفاده شده است. مواد پلیمری مختلف مانند وینیل استات [۷]، پلی وینیل کلرید [۸]، پلی وینیل الکل [۹] و ... به عنوان ماتریس در ساخت شناساگر استفاده می‌شود تغییر در ماتریس پلیمری بسته به ترکیب و نوع رنگ استفاده شده دارد. در اثر پرتودهی و با جذب دز توسط شناساگر تغییر بصری در رنگ شناساگر اتفاق می‌افتد. هدف از ساخت شناساگر بر پایه پلی وینیل کلراید و بکارگیری دی متیل زرد و متیل نارنجی دستیابی به شناساگری است که در محدوده ۰ تا ۵۰ کیلوگری دز پرتودهی توسط الکترون بتواند کالای پرتودهی شده را از پرتودهی نشده متمایز نماید. به منظور تحلیل و تجزیه نتایج پاسخ دهی شناساگرهای ساخته شده برای اولین بار در کار حاضر از تکنیک رنگ‌سنجی و با استفاده از معادله اقلیدسی تفاوت رنگ کل بین نمونه پرتودهی شده و پرتودهی نشده محاسبه شد. از مهمترین نتایج این بررسی می‌توان به تغییر در رنگ شناساگر تهیه شده در اثر پرتودهی و همچنین پایداری شناساگر قبل از پرتودهی و تکرارپذیری آن اشاره نمود.

۲- روش کار

۱-۲- مواد

پلی وینیل کلراید با جرم مولکولی پایین، دی متیل زرد، متیل اتیل کتون، سیکلو هگزانون، متیل نارنجی، اوریل آمین، سود از شرکت مرک آلمان و سیگما آلدریج خریداری شد. هیدروکلرید اسید از شرکت مجلی ساخت ایران تهیه شد. تمام مواد دارای خلوص بالا بوده و بدون خالص سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- روش تهیه شناساگر

ابتدا پلی وینیل کلراید ۵ درصد وزنی- حجمی در مخلوط حلال متیل اتیل کتون: سیکلو هگزانون به نسبت ۱:۱ تهیه گردید. سپس رنگ دی متیل زرد و متیل نارنجی به آن اضافه شد و هم زدن به مدت دو ساعت ادامه یافت تا کاملاً رنگ‌ها در داخل محلول حل گردد. بعد از آماده سازی محلول، آن را در داخل پتری دیش ریخته و در فضای اتاق قرار داده تا کاملاً خشک گردد. بعد از گذشت دو روز فیلم نازکی بدست می‌آید که آن را به قطعات کوچک ۲×۲ سانتی‌متر برش داده تا پرتودهی گردد.

۲-۳- پرتودهی با باریکه الکترون

برای بررسی اثر پرتودهی، نمونه‌های آماده شده در دزهای مختلف ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوگری تحت تابش باریکه الکترون توسط دستگاه شتاب‌دهنده الکترون (مدل TT ۲۰۰) با انرژی ۱۰ MeV و توان ۸۰ kW بدون اعمال دما و در دمای محیط، مستقر در مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد) قرار گرفتند.

۲-۴- مشخصه یابی با استفاده از تغییرات رنگ قرمز، سبز و آبی (RGB رنگ)

بمنظور بررسی نتایج آزمایشات، پاسخ‌دهی شناساگرها نسبت به پرتو الکترون از نمونه‌های پرتودهی شده در دزهای مختلف و نمونه پرتودهی نشده استفاده گردید. سپس جهت بررسی بیشتر تغییرات پاسخ‌دهی شناساگرها نسبت به باریکه الکترون (تغییر رنگ از رنگ پایه به رنگ دیگر) از اسکنر رنگی (CanoScan ۵۶۰۰F) Canon و قرار دادن شناساگر بر روی صفحه آن جهت اسکن نمونه استفاده شد. بمنظور تجزیه و تحلیل رنگ از نرم افزار paint استفاده شد و مقادیر RGB متشکل از مقادیر رنگ قرمز، آبی و سبز مشخص گردید سپس داده‌ها بر حسب تفاوت رنگ کل (ΔC) بین نمونه‌های پرتودهی شده و



نمونه پرتو دهی نشده با استفاده از معادله فاصله اقلیدسی محاسبه شد [۱۰] و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید.

$$\Delta C = \sqrt{(\Delta R)^2 + (\Delta G)^2 + (\Delta B)^2} \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن ΔC تفاوت رنگ کل، ΔR ، ΔG ، ΔB به ترتیب تغییرات در رنگ قرمز، سبز و آبی از مقدار شاهد (نمونه پرتو دهی نشده) نسبت به نمونه پرتو دهی شده می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی تفاوت رنگ ظاهری

مقایسه بصری نمونه‌های پرتو دهی شده در دزهای مختلف از ۱۰ کیلوگری تا ۵۰ کیلوگری نسبت به نمونه پرتو دهی نشده (شاهد) در شکل (۱) نشان داده شده است. رنگ نمونه اولیه قبل از پرتو دهی به رنگ زرد و در اثر اعمال پرتو دهی به قرمز و قرمز تیره تغییر رنگ می‌دهد. این تغییر رنگ متناسب با افزایش دز پرتو دهی بوده و با افزایش دز پرتو دهی از ۰ کیلوگری به ۵۰ کیلوگری این تغییرات بیشتر مشاهده می‌گردد. تغییرات ایجاد شده در نمونه‌های پرتو دهی شده مربوط به تغییر در ساختار رنگ‌های بکار گرفته شده در بستر پلیمر پلی‌وینیل کلراید می‌باشد. تغییرات ظاهری در نمونه‌های پرتو دهی شده به وسیله آنالیز رنگ تأیید می‌گردد.

دز پرتو دهی (کیلوگری)	۰	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۴۰	۵۰

شکل (۱) تغییر رنگ بصری شناساگر بر اساس تغییر در دز پرتو دهی از ۰ کیلوگری تا ۵۰ کیلوگری

۳-۲- محاسبه تفاوت رنگ کل

هنگامی که شناساگر در معرض پرتو الکترون قرار می‌گیرد رنگ آن تغییر می‌کند. مقادیر رنگ قرمز، آبی و سبز هر یک از شناساگرها قبل و بعد از پرتو دهی در دزهای مختلف پرتو دهی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوگری به طور جداگانه پس از اسکن کردن نمونه‌ها توسط اسکنر رنگی با استفاده کامپیوتر و استفاده از نرم افزار خوانده شد. این مقادیر بر حسب دز پرتو دهی در جدول (۱) آمده است. با استفاده از مقادیر رنگ قرمز، آبی و سبز، مقدار تفاوت رنگ کل با استفاده از معادله اقلیدسی (معادله ۱) محاسبه گردید. نتایج نشان داد با افزایش دز پرتو دهی تفاوت رنگ کل نیز افزایش می‌یابد که نشان دهنده تغییر رنگ از رنگ نمونه شاهد (زرد) به رنگ قرمز می‌باشد. افزایش دز پرتو دهی تا ۳۰ kGy باعث افزایش مثبتی در مقدار تفاوت رنگ کل می‌گردد که تأکیدی بر تغییر رنگ است و در دزهای بالاتر مقادیر تفاوت رنگ کل به یکدیگر نزدیک می‌گردد که نشان دهنده تغییر رنگ کمتری در نمونه‌ها است.

تغییرات در رنگ نمونه‌های تولید شده به شدت وابسته به برهمکنش بین گروه‌های عاملی در رنگ آزو و پلیمر می‌باشد [۱۱]. طبیعت کروموفور رنگ بکار گرفته شده و ساختار ناپایدار الکتریکی آن باعث شده است تا رنگ آزو پتانسیل گیرندگی الکترون را داشته باشد [۱۲]. تغییر در رنگ به دلیل حضور الکترون‌ها است که می‌تواند یون‌های هیدروژن را جذب و یا واجذب نماید. در رنگ‌های بکار گرفته شده گروه $-N=N-$ دارای باند دوگانه است که می‌تواند به پروتونه شدن کمک نماید و دلیلی برای کاهش رنگ باشد [۱۳].

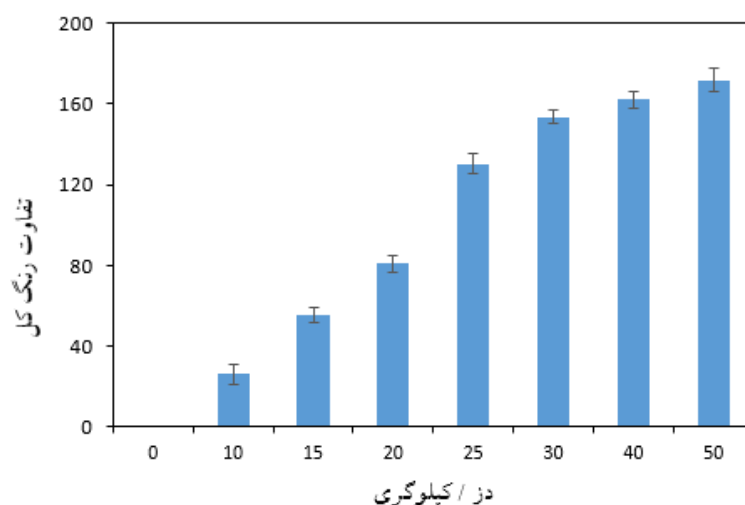
همچنین تغییر در ساختار بدلیل الکترون‌گاتیویته بالای رنگ است که باعث می‌گردد باندهای دوگانه موجود در مولکول رنگ تمایل به جذب داشته باشند و تشکیل گروه کروموفور را بدهند [۱۴-۱۵].



جدول (۱) مقادیر رنگ قرمز، آبی و سبز و تفاوت رنگ کل شناساگر بر اساس دز پرتودهی

ردیف	دز پرتودهی/کیلوگری	قرمز	آبی	سبز	تفاوت رنگ کل
۱	۰	۲۲۱	۱۰	۱۳۵	۰
۲	۱۰	۲۲۲	۰	۱۲۹	۲۶/۳۲
۳	۱۵	۲۱۴	۷۷	۰	۵۹/۲۷
۴	۲۰	۲۰۴	۰	۷۶	۸۰/۹۲
۵	۲۵	۱۷۸	۲۵	۴۹	۱۲۴/۳۸
۶	۳۰	۱۸۰	۱۸	۷	۱۵۳/۷۷
۷	۴۰	۱۷۴	۱۹	۰	۱۶۲/۲۹
۸	۵۰	۱۵۴	۳۷	۰	۱۷۱/۶۳

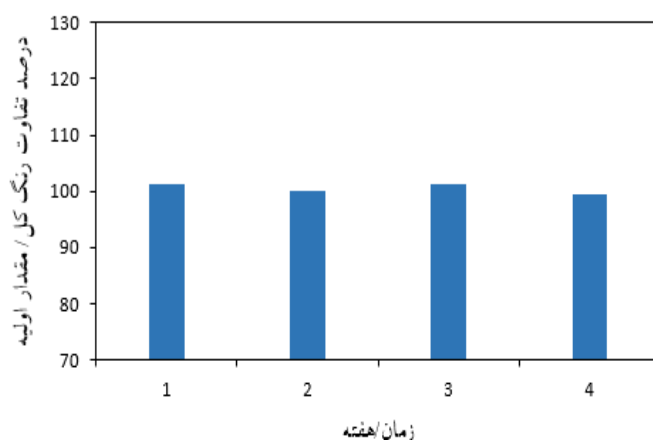
با توجه به اینکه در ساخت نمونه‌ها از رنگ‌های آزو استفاده شده است انتظار بر این است که با پرتودهی به نمونه‌ها، ساختار جدید رنگ تشکیل گردد و این تغییر ساختاری باعث می‌شود تا تغییر رنگ مشاهده گردد. چنانچه منحنی تفاوت رنگ کل نیز بر حسب دز پرتودهی رسم گردد شکل (۲)، مشاهده می‌شود که تغییرات تفاوت رنگ کل، متناسب با دز پرتودهی است. تفاوت رنگ کل در دزهای پایین مقادیر کمتری دارد یعنی بدلیل کم بودن دز پرتودهی تعداد مولکول‌های رنگ کمتری دچار تغییر شده‌اند و بعد از آن با افزایش دز پرتودهی، مقدار تفاوت در رنگ کل به یکدیگر نزدیک می‌شود که نشان دهنده تغییرات ساختاری اکثر مولکول‌های رنگ می‌باشد.



شکل (۲) تغییرات تفاوت رنگ کل بر حسب دز پرتودهی ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوگری

۳-۳- پایداری زمانی قبل از پرتودهی

برای بررسی پایداری زمانی، شناساگرهایی در شرایط یکسان ساخته شد. سپس در فواصل زمانی مختلف بعد از دو روز، یک، دو، سه و چهار هفته تحت تابش پرتو الکترون (دز ۳۰ kGy) قرار داده شد. لازم به ذکر است نمونه‌ها در شرایط محیط نگهداری شدند. مشاهده گردید نمونه‌ها در اثر تابش پرتو الکترون تغییر رنگ داده و پایداری مناسبی دارند و می‌توان از آن‌ها برای تشخیص کالای پرتودهی شده از کالای پرتودهی نشده استفاده نمود و برای حداقل ۴ هفته قبل از پرتودهی نمونه‌ها را نگهداری نمود. شکل (۳) نمودار درصد تفاوت رنگ کل نمونه‌ها به مقدار تفاوت رنگ کل در بازه زمانی یک، دو، سه و چهار هفته را نشان می‌دهد.



شکل (۳) نمودار درصد تفاوت رنگ کل / مقدار اولیه بعد از پرتودهی در دز 30 kGy به نمونه‌ها بر حسب زمان یک، دو، سه و چهار هفته

۴-۳- تکرار پذیری

برای بررسی تکرار پذیری، ۳ نمونه با فرمول یکسان در زمان‌های مختلف تهیه شد. و بعد از آن در شرایط یکسان خشک نموده و سپس نمونه‌ها پرتودهی شد. نتایج تغییرات رنگ شناساگر نشان داد نمونه‌هایی که در زمان‌های مختلف با فرمول یکسان ساخته شده‌اند زمانی که تحت پرتودهی با باریکه الکترونی در دزهای مختلف $10, 15, 20, 25, 30, 40$ و 50 kGy قرار می‌گیرند تفاوت رنگ کل به ترتیب $4/94 \pm 26/32, 3/74 \pm 59/27, 4/28 \pm 80/92, 5/11 \pm 124/38, 3/53 \pm 153/77$ و $3/98 \pm 162/29$ و $5/82 \pm 171/63$ نشان می‌دهند. بنابراین می‌توان گفت که شناساگر ساخته شده در دزهای مختلف تکرارپذیری خوبی دارد.

۴- نتیجه گیری

ساخت شناساگر با استفاده از پلی وینیل کلراید و رنگ‌های آزو دی متیل زرد و متیل نارنجی در محلول آلی دی متیل کتون و سیکلو هگزانون انجام گردید. در اثر پرتودهی به نمونه‌های تهیه شده تغییر رنگ از زرد به قرمز مشاهده می‌گردد که مربوط به آزاد شدن کلر موجود بر روی پلی وینیل کلراید و ایجاد تغییر ساختاری در رنگ‌های آزو بکار گرفته شده می‌باشد. تفاوت رنگ کل می‌تواند نشان دهنده تغییر رنگ و شاخصی برای پرتودهی کالا در نظر گرفته شود. به طوریکه با افزایش دز پرتودهی، تفاوت در رنگ کل نیز افزایش می‌یابد به ویژه از 15 kGy به بالا تغییر رنگ به صورت بصری نسبت به نمونه اولیه کاملاً واضح می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد این شناساگر پایداری مناسب به مدت یکماه قبل از پرتودهی و تکرارپذیری خوبی در برابر پرتودهی دارد و می‌توان به عنوان وسیله‌ای برای متمایز ساختن کالاهای پرتودهی شده از پرتودهی نشده به خصوص در دزهای بین $50-15 \text{ kGy}$ استفاده نمود.

۵- مراجع

- [۱] Bhat, N.V.; Nate, M.M.; Bhat, R.M.; Bhatt, B.C.; Indian J. Pure Appl. Phys. ۴۵, ۲۰۰۷, ۵۴۵-۵۴۸.
- [۲] Banaei, M.; Dehshiri, S.; Shirmardi, SP., J Nucl Ene Sci Power Generat Technol ۲۰۱۶, ۵:۲.



- [۳] Emami-Meibodi, M.; Banaei, M.; Parsaeian, MR.; Int J Water Wastewater Treat ۲۰۱۶, ۲:۴.
- [۴] Laranjeira, J.M.G. ; Khoury, H.J. ; De Azevedo, W.M.; De Vasconcelos, E.A. ; Da Silva, E.F.; Mater. Charact. ۲۰۰۳, ۵۰, ۱۲۷-۱۳۰.
- [۵] Oberoi, P.R.; Maurya, C.B.; Mahanwar, P.A.; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. Atoms. ۲۰۱۹, ۴۵۵, ۲۱-۲۷.
- [۶] The Hussain, J. Basic Appl. Sci. ۲۰۱۳, ۴۲۰-۴۲۳.
- [۷] Oberoi, P.; Maurya, C.; Mahanwar, P.; Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng. ۱۰, ۲۰۱۶, ۱۱۶۹-۱۱۷۳.
- [۸] Kattan, M.; Daher, Y.; Alkassiri, H.; Radiat. Phys. Chem. ۷۶, ۲۰۰۷, ۱۱۹۵-۱۱۹۹.
- [۹] بنائی، م. انوری تفتی، ف. برشان، س. بررسی اثر پرتو دهی الکترون بر روی محلول پلیمری حاوی رنگ دی متیل یلو، بیست و نهمین کنفرانس ملی هسته ای ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی ، ۷ اسفند ماه ۱۴۰۱
- [۱۰] Greenawald, L.A.; Boss, G.R.; Snyder, J.L.; ACS ۲۰۱۷, ۲(۱۰) ۱۴۵۸-۱۴۶۶.
- [۱۱] Priyanka, R.O.; Chandan, A.F.; Chandra B.M.; Prakash A.M.; Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B ۴۶۶, ۲۰۲۰, ۸۲-۸۹
- [۱۲] Dos Santos, A.B.; Traverse, J.; Cervantes, F.J.; Van Lier, J.B.; Biotechnol. Bioeng. ۸۹, ۲۰۰۵, ۴۲-۵۲.
- [۱۳] Jamal, F.; Qidwai, T.; Pandey, P.K.; Singh, R.; Singh, S.; Catal. Commun. ۱۲, ۲۰۱۱, ۱۲۱۸-۱۲۲۳.
- [۱۴] Lin, Y.; Yang, C.; Xiu, R.; Wang, J. ; Wei, Y.; Sun, Y.; Water Sci. Technol. ۶۹, ۲۰۱۴, ۳۷۱-۳۷۷.
- [۱۵] Kovacs, A.; Wojnarovits, L.; Mclaughlin, W.L.; Ebrahim, E.S.E.; Miller, A.; Radiat. Phys. Chem. ۴۷, ۱۹۹۶, ۴۸۳-۴۸۶



کاربرد فناوری پرتودهی در فرآوری نفت خام سنگین و ترکیبات هیدروکربنی (کد مقاله :

(۱۲۰۸)

بنائی، مریم^۱ - انوری تفتی، فاطمه^۱ - قاسمی ترک آباد، مرتضی - دهشیری، سعیده^۱ - احمدیان، ونوس^۱
۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتوآیند ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

فرآیندهای مرسوم در کراکینگ نفت خام سنگین و حذف سولفور از ترکیبات هیدروکربنی، به دلیل نیاز به شرایط عملیاتی فشار و دمای بالا و استفاده از کاتالیزورهای گران قیمت به عنوان فرآیندهای پرسود شناخته نمی‌شوند. لذا تحقیقات بر روی فناوری‌های نوظهور در این زمینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیشینه استفاده از فناوری پرتودهی در فرآوری مواد و همچنین فرآوری نفت خام و مشتقات آن، نشان می‌دهد که امکان غلبه بر مشکلات این فناوری و معرفی آن به صنعت نفت وجود دارد. لذا انجام تحقیقات هدف‌دار در زمینه افزایش کیفیت نفت خام، شکست آن، گوگردزدایی از نفت خام و مشتقات آن و استفاده در فرآوری گاز طبیعی می‌تواند منجر به ارائه فناوری جدیدی با بازدهی بالاتر تحت شرایط عملیاتی مناسب‌تر (فشار و دما) به صنعت شود. هدف از این تحقیق، بررسی پتانسیل فناوری پرتودهی در فرآوری نفت خام و گاز طبیعی است.

کلید کلیدی: فناوری پرتودهی، نفت خام سنگین، ترکیبات هیدروکربنی، گاز طبیعی

Application of radiation technology in the processing of heavy crude oil and hydrocarbon compounds

Banaei, Maryam^{۱*}, Anvari Tafti, Fatemeh^۱, Ghasemi Torkabad, Morteza^۱, Dehshiri, Saeideh^۱, Ahmadian, Venus^۱

^۱ Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co.,
Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)

Abstract:

Conventional processes in cracking of heavy crude oil and removing of sulfur from hydrocarbon compounds are not known as profitable processes due to the need for operating conditions of high pressure and temperature and expensive catalysts. Therefore, research on emerging technologies in this field has a special importance. The history of using radiation technology in material processing as well as processing of crude oil and its derivatives shows that it is possible to overcome the problems of this technology and introduce it to the oil industry. Therefore, conducting targeted research in of field upgrading of crude oil, its cracking, desulfurization of crude oil and its derivatives and using in natural gas processing can lead to providing a new technology with higher efficiency under more suitable operating conditions (pressure and temperature) to the industry. The purpose of this research is to investigate the potential of irradiation technology in the processing of crude oil and natural gas.

Keywords: Irradiation technology, Heavy crude oil, Hydrocarbon compounds, Natural gas



۱- مقدمه:

کل ذخایر نفت جهان در شکل (۱) نشان داده شده است [۱]. ایران نیز جزو کشورهایی با ذخایر و منابع هیدروکربنی بالا است. با توجه به افزایش تقاضا و برداشت از مخازن رایج و سبک نفتی و کاهش این ذخایر، لزوم استفاده از ذخایر نفت سنگین در آینده نه‌چندان دور بدیهی خواهد بود. هم‌اکنون تقاضا برای نفت خام سنگین و فوق سنگین بسیار کم است. زیرا تولید، انتقال و پالایش آن بسیار پرهزینه و پیچیده است. لذا بررسی و ارائه فناوری مناسب جهت ارتقای کیفیت نفت خام سنگین و یا تبدیل آن به اجزای سبک‌تر ضروری می‌باشد. در حال حاضر، فناوری‌هایی برای ارتقای نفت خام در مقیاس تجاری توسط شرکت‌های نفتی استفاده می‌شود اما فناوری‌هایی نیز در سطوح مختلف توسعه (آزمایشگاهی، پایلوت و ...) وجود دارد [۲]. برای بهره‌برداری صحیح و بهینه از ذخایر هیدروکربنی باید حذف یا کاهش ناخالصی‌های متعدد موجود در آن که عمدتاً شامل ترکیبات گوگردی، نظیر هیدروژن سولفید، کربونیل سولفید، دی‌سولفید کربن، مرکاپتان‌ها، آلکن سولفیدها، سولفیدهای آروماتیک، دی‌سولفیدها، سولفیدهای حلقوی اشباع و تیوفن‌ها است انجام شود. حضور این ترکیبات در محصولات هیدروکربنی عامل بروز مشکلات متعددی نظیر خوردگی، مسمومیت کاتالیزورهای تأسیسات دریافت‌کننده این محصولات، مشکلات زیست‌محیطی، کاهش ارزش حرارتی و کاهش قیمت می‌باشد. لذا تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور دستیابی به روش‌ها و فناوری‌های حذف یا کاهش این آلاینده‌ها تا حد مطلوب از سوی بسیاری از مراکز تحقیقاتی، شرکت‌ها و صنایع وابسته در حال انجام است [۳].

برخلاف فرآیندهای مرسوم، فرآوری مواد با پرتوهای الکترونی روشی ایمن و اقتصادی بوده و دارای سابقه موفق ۵۰ ساله در صنعت است و طیف گسترده‌ای از کاربردهای تجاری را دارا می‌باشد [۲]. از سال ۱۹۲۰ میلادی تحقیقات جهت بررسی اثر پرتوهای بر شیمی هیدروکربن‌ها آغاز شد [۴]. ساترلند و آلن^{۶۳} در سال ۱۹۶۱، استفاده از پرتو گاما برای تبدیل الفین‌ها به مواد پلیمریزه و تبدیل پارافین به دیمرها، الفین‌ها و محصولات گازی مانند CH_4 و H_2 را بررسی کردند. در سال ۱۹۶۵ سالوی و فالکونر^{۶۴} با مطالعه اثر پرتو گاما بر روی n-هگزادکان، نشان دادند که پرتوهای به این ماده به نوع منبع و نرخ دز وابسته نیست [۵]. در سال ۱۹۸۶، اسکریپچنکو^{۶۵} و همکاران نتایج آزمایشگاهی تجزیه ترکیبات نفتی با پرتوهای گاما را منتشر کردند. آن‌ها پرتوهای ماده نفتی را در ابتدا انجام داده و در مرحله بعد در دمای 260°C تقطیر کردند. وو و همکاران^{۶۶} اثر پرتوهای گاما به‌همراه شکست حرارتی n-C_{16} را بررسی کرده و دریافتند که پرتوهای فرآیند شکست را افزایش می‌دهد [۶ و ۷]. شکل (۲) رابطه طول زنجیر با دما در شکست حرارتی هیدروکربن‌ها را نشان می‌دهد [۸]. پرتوهای نفت سنگین و اسکوز حاوی سولفور و پارافین بالا تحت نرخ دز بالا (۱ تا 4 kGy/s) توسط زایکینا و همکاران^{۶۷} نشان داد که در فرآیند شکست دمایی-پرتویی^{۶۸} RTC محتویات سولفور کاهش یافته و ایزومریزاسیون^{۶۹} و پلیمریزاسیون^{۷۰} اتفاق می‌افتد. همچنین، فرآیند RTC قیر میزان ایزوپارافین تولیدی و بازده نفت سبک را با کاهش ملایم ترکیبات آروماتیک افزایش می‌دهد [۹-۱۲]. بر اساس تجربیات و پژوهش‌های محققین، داده‌های آزمایشگاهی و پیشرفت‌های حاصل از فناوری‌های موجود، امکان استفاده از فناوری پرتوهای در زمینه‌های کراکینگ^{۷۱} نفت خام سنگین، مرکاپتان‌زدایی^{۷۲} و گوگردزدایی از نفت خام و مشتقات آن، تولید الفین‌های^{۷۳} با وزن مولکولی بالا

^{۶۳}- Sutherland and Alen

^{۶۴}- Salvoy and Falconer

^{۶۵}- Skripchenko

^{۶۶}- Wu et al.

^{۶۷}- Zaykina et al.

^{۶۸}- Radiation-Thermal Cracking

^{۶۹}- Isomerization

^{۷۰}- Polymerization

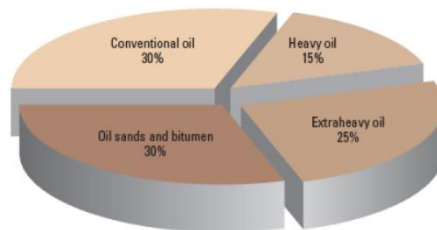
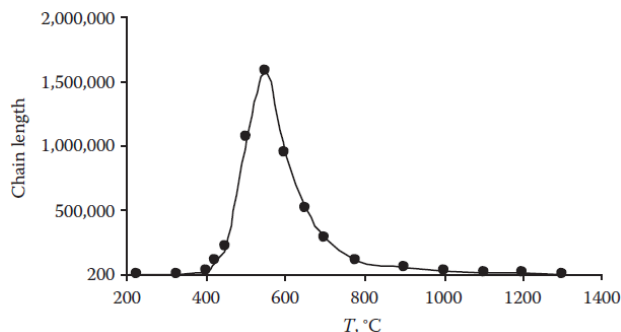
^{۷۱}- Cracking

^{۷۲}-Demercaptanization

^{۷۳}-Olefins

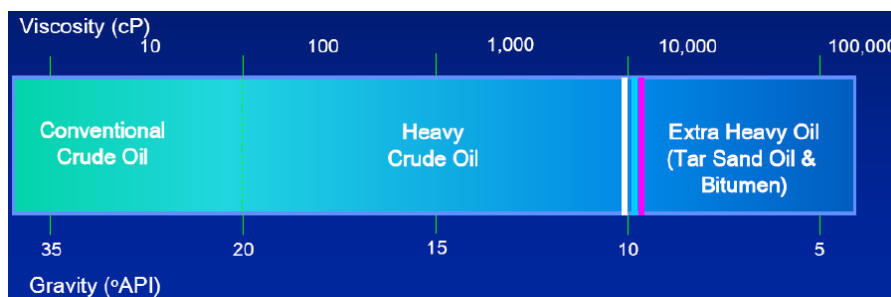


و حذف ترکیبات گوگردی گاز طبیعی وجود دارد [۱۳]. با توجه به موارد فوق، مسئله‌ای که در این پژوهش دنبال خواهد شد بررسی پتانسیل فناوری پرتودهی در فرآوری نفت خام و گاز طبیعی است.



شکل (۲): رابطه طول زنجیر با دما در شکست حرارتی هیدروکربنها [۸].

شکل (۱): کل ذخایر نفت جهان [۱]



شکل (۳): محدوده ویسکوزیته و API برای نفت معمولی تا فوق سنگین [۱۴].

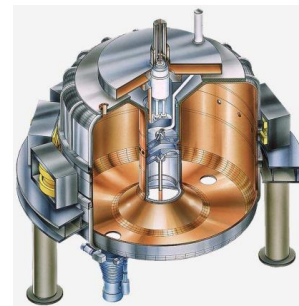
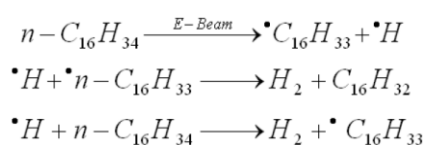
۲- ارتقای کیفیت نفت خام سنگین

فناوری‌های توسعه‌یافته برای ارتقای نفت خام سنگین، شامل فرآیندهای مبتنی بر دفع کربن، افزودن هیدروژن و یا ترکیب این دو روش بوده و اکثر آن‌ها دارای تجربه‌های تجاری اثبات‌شده هستند. در بین این فناوری‌ها، فرآیندهای مبتنی بر دفع کربن ۵۶٪ از کل ظرفیت فرآوری در جهان را به دلیل سرمایه‌گذاری نسبی کم، پوشش داده است. استفاده از فرآیندهای فعلی بدلیل مصرف انرژی حرارتی بالا، استفاده از مواد شیمیایی و کاتالیست‌های گران‌قیمت، برای فرآوری نفت خام سنگین و فوق سنگین، مناسب نبوده و با مشکلاتی همراه است، لذا فناوری‌های جدید نظیر استفاده از تکنولوژی پرتودهی که ممکن است انرژی کمتری نیاز داشته باشد و همراه با کاهش مصرف مواد شیمیایی و کاتالیست‌ها می‌باشد [۴]. به‌عنوان راه‌حل امیدوارکننده پیشنهاد شده‌اند که بر ارتقای ویژگی‌های نفت خام نظیر افزایش شاخص کیفی طبق استاندارد انجمن نفت آمریکا (API)^۴، کاهش ویسکوزیته و محتوای ناخالصی‌های گوگرد، نیتروژن و فلزات، حمل‌ونقل آسان‌تر و تغذیه به پالایشگاه‌ها متمرکز شده‌اند [۲]. شکل (۳) محدوده ویسکوزیته و API برای نفت معمولی تا فوق سنگین را نشان می‌دهد [۱۴].

انواع مختلف دستگاه شتابدهنده الکترون وجود دارند یکی از آن‌ها دستگاه شتابدهنده الکترون مدل TT۲۰۰ است شکل (۴) که در مجتمع پژوهشی پرتو فرآیند یزد وجود دارد. همچنین یک دستگاه شتابدهنده پرقدرت دیگر نیز در این واحد طراحی و ساخته شده است [۱۵]. این شتابدهنده‌ها، دستگاه‌هایی هستند که الکترون‌های تولید شده بوسیله یک تفنگ الکترونی را در محیط خلاء و تحت یک میدان قوی الکتریکی شتاب داده و در نهایت بوسیله یک میدان مغناطیسی نوسان‌کننده بر روی هدف مورد نظر می‌تابند. انرژی منتقل شده توسط این پرتوها با تولید رادیکال‌های آزاد، گونه‌های برانگیخته و ... و انجام



واکنش‌های زنجیره‌ای باعث تغییرات فیزیکی و شیمیایی در ماده شده و در نهایت منجر به پلیمریزاسیون، ایجاد پیوند عرضی، تخریب، شکست زنجیره و ... می‌گردد. انواع مختلف پرتوها با شکست پیوند C-H و C-C در مولکول‌های هیدروکربن باعث تولید مواد با جرم مولکولی و گرانی کمتر از مواد اولیه می‌گردد. به عنوان مثال مکانیسم واکنش‌های شیمیایی ناشی از شکست پرتوی حرارتی $n-C_{16}$ در شکل (۵) دیده می‌شود.



شکل (۵): واکنش‌های شیمیایی ناشی از شکست پرتوی حرارتی $n-C_{16}$ [۵]

شکل (۴): دستگاه شتاب‌دهنده الکترون مدل TT ۲۰۰

فناوری پرتودهی برای فرآوری نفت خام سنگین در شرکت Petrobeam اجرا گردید. این فرآیند، فناوری کراکینگ سرد^{۷۵} است که از الکترون‌های با انرژی بالا بجای کاتالیزور استفاده شده و ویسکوزیته نفت سنگین را کاهش می‌دهد. یعنی الکترون باعث اعمال تغییرات در نفت خام شده، نیازی به کاتالیزورهای گران‌قیمت نبوده و نسبت به روش‌های حرارتی و شیمیایی مرسوم، از نظر زیست‌محیطی بی‌خطرتر است. بلوک دیگرام این فرآیند در شکل (۶) نشان داده شده است [۲]. مطالعه و تحقیق برای استفاده از پرتودهی سال‌ها توسط دانشمندان شرکت PetroBeam انجام شده و برنامه‌ریزی در بخش‌های میانی و پایین‌دستی صنعت نفت انجام شده است. آزمایش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی نشان داده‌اند که اجزای سنگین مانند آسفالتین‌ها در نفت خام و قیر در اثر فرآوری به کمک پرتوهای الکترون تا حدی تجزیه می‌شوند [۲]. این شرکت با همکاری شرکت IBA دستگاه شتاب‌دهنده الکترون TT ۱۰۰۰ رودترون را به این منظور پیشنهاد دادند. لازم به ذکر است که اطلاعاتی در رابطه با موفقیت این شرکت در صنعتی نمودن این فناوری یافت نشد.

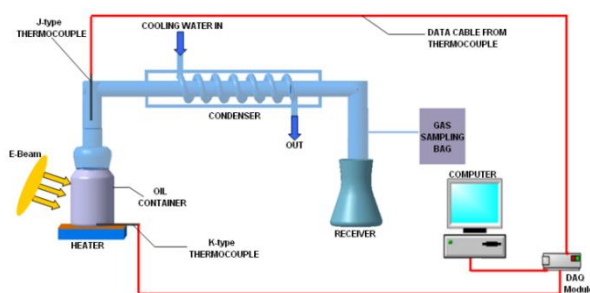
۳- کراکینگ نفت خام

مسعود الفی و همکاران^{۷۶} نشان دادند الف: استفاده از فناوری پرتودهی الکترون بر روی نفت سنگین، باعث شکست ترکیبات هیدروکربنی بزرگ شده و ویسکوزیته به میزان ۳۰٪ نسبت به فرآیند حرارتی کاهش می‌یابد. ب: فرآیند پرتودهی بر شکست حرارتی اثرگذار است و می‌تواند محتویات آروماتیک آسفالتین را به ترکیبات هیدروکربنی سبک‌تر تبدیل نموده و این محصولات

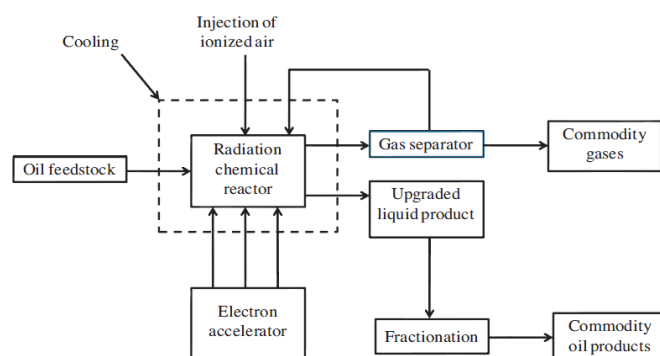
^{۷۵} - Cold Cracking
^{۷۶} - Masoud Alfi et al.



بعد از شکسته شدن پایدار می‌باشند [۱۶]. یانگ و همکاران^{۷۷} در آزمایش شکست آسفالتین^{۷۸} (ترکیبات سنگین نفتی) نشان دادند که فرآیند پرتودهی با باریکه الکترونی موجب افزایش نفت سبک بدلیل افزایش تخریب مولکول‌های هیدروکربن سنگین شده و کیفیت هیدروکربن را بالایی‌برد. شکل (۷) شماتیک آزمایشی شکست آسفالتین را نشان می‌دهد. آن‌ها فرآیند شکست دمایی (TC) و RTC را با هم مقایسه نموده و مشاهده نمودند که RTC اجزای سبک‌تری نسبت به TC دارد (شکل ۸) و همچنین مطالعه اقتصادی نشان داد استفاده از این فرآیند از نظر اقتصادی در صنایع نفت امکان‌پذیر است [۴].

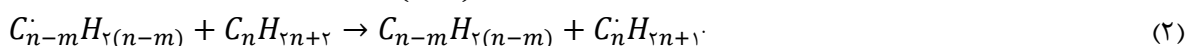


شکل (۷): شماتیک آزمایشی شکست آسفالتین

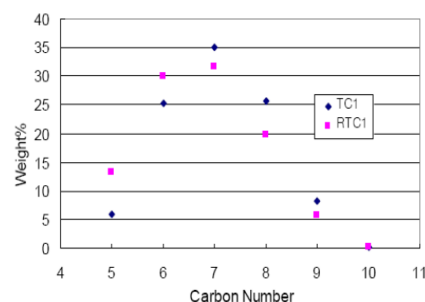
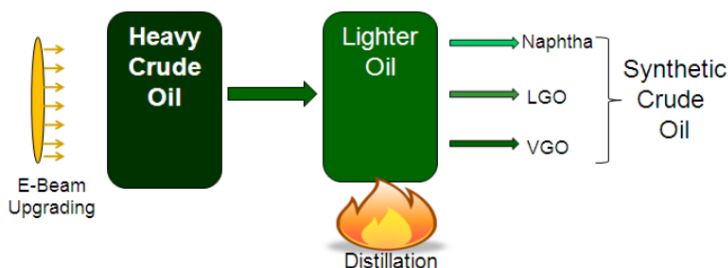


شکل (۶): دیاگرام جعبه‌ای فرآیند شرکت PetroBeam [۲].

مترویل و پونوماری^{۷۹} استفاده از فناوری پرتوالکترون برای کراکینگ مخلوط $C_{17}-C_{120}$ پارافین، در دمای ۳۵۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تقطیر میزان ۶۱/۵ wt% آلکان و ۳۸/۵ wt% آلکن را نشان داد و مولکول‌های محصول به‌دست‌آمده به‌طور متوسط دارای ۱۳ اتم کربن بودند. جزء گازوئیل موجود در میعانات ۳۲/۳ wt% بود. درصد محصولات به‌دست‌آمده به دمای اعمال شده و خروجی راکتور بستگی دارد. مکانیسم پیشنهادی این گروه شامل مراحل زیر است [۱۷].



استخراج میعانات، محصول دو مرحله است. قسمت اعظم آلکن‌ها در مرحله حرارتی ماکرورادیکال‌های $C_n H_{2n+1}$ به وجود می‌آیند. با شروع فرآیند شیمیایی-پرتویی نیز قسمت عمده رادیکال‌های اولیه دارای الکترون جفت نشده بر روی اتم‌های کربن مرکزی تشکیل می‌گردد. قطعه‌قطعه شدن این ماکرورادیکال‌ها منجر به پیدایش محصولات اشباع و غیراشباع می‌شود. به‌دلیل تشکیل باندهای دوگانه آلکن در موقعیت β و محل قرار گرفتن الکترون جفت نشده و اثر آن‌ها روی تخریب ماکرومولکول‌های اولیه، مولکول‌های آلکن به‌وجود آمده کوچک‌تر از آلکان‌ها خواهند بود. به‌طور کلی مرحله اول پیش‌نیاز برای تشکیل آلکان‌ها است [۱۷].

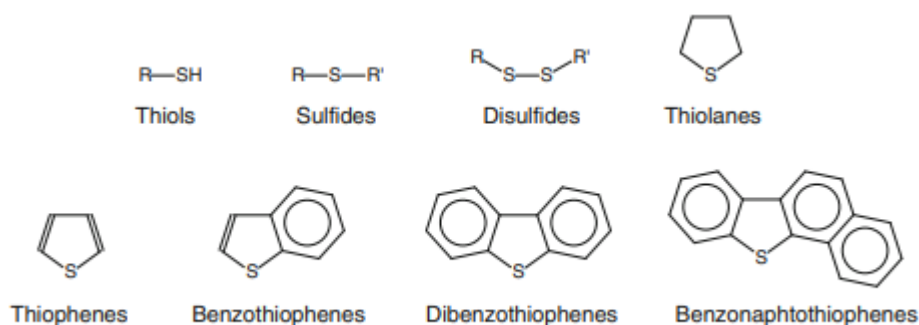


شکل (۹): طراحی مفهومی تأسیسات ارتقاء با E-Beam (سیستم Batch) [۱۸].

شکل (۸): توزیع اجزا نفتا در فرآیند RTC نسبت به TC، (RTC اجزای سبک‌تری نسبت به TC دارد) [۴]

۴- گوگردزدایی از نفت خام و مشتقات آن

گوگرد بعد از عناصر کربن و هیدروژن بیشترین عنصر را در نفت خام تشکیل می‌دهد میانگین مقدار سولفور در نفت خام ۰/۰۳ تا ۷/۸۹ درصد وزنی است [۱۹]. که به دو صورت آلی و معدنی مشاهده می‌گردد. سولفور معدنی به صورت عنصری، H_2S و پیریت که به شکل محلول و یا رسوب است [۲۰]. ترکیبات آلی گوگردی مانند تیول، سولفیدها و تیوفن‌ها از اصلی‌ترین ترکیبات گوگرد در نفت خام می‌باشند. برخی از مهمترین ترکیبات آلی گوگردی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش ویسکوزیته و بالا رفتن دانسیته مقدار ترکیبات پیچیده سولفور در نفت خام افزایش می‌یابد. گوگردهای حلقوی آلیفاتیک (تیواترها) و گوگردهای حلقوی به راحتی با فرآیند گوگردزدایی هیدروژنی^{۸۰} و یا حرارتی حذف می‌گردند. از طرف دیگر گوگرد موجود در حلقه‌های آروماتیک مانند تیوفن و بنزولوگ‌ها^{۸۱} (شامل بنزوتیوفن، دی بنزوتیوفن، بنزوفتوتیوفن) در مقابل این دو فرآیند بسیار مقاوم هستند [۲۱].



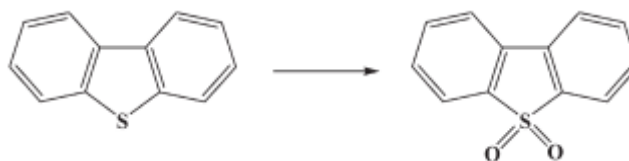
شکل (۱۰): ترکیبات مهم گوگردی در نفت خام

گوگردزدایی اکسیژنی^{۸۲} (ODS) تکنولوژی جذابی برای کاهش گوگرد در دمای و فشار پایین است [۲۲]. در این روش سولفیدهای سنگین به وسیله اضافه شدن یک یا دو اتم اکسیژن به گوگرد با استفاده از اکسید کننده‌ها و بدون شکست پیوند گوگرد-کربن به ترتیب به سولفوکسید و سولفون تبدیل می‌گردد. سپس این ترکیبات با استخراج و یا در حضور جاذب بدلیل ایجاد قطبیت حذف می‌گردد. اکسیداسیون دی بنزوتیوفن می‌تواند [۲۳-۲۵]. مطابق شکل ۱۱ نشان داده شود.

۸۰- Hydro desulfurization-

۸۱- Benzologs-

۸۲- Oxidative desulfurization-



شکل (۱۱). اکسیداسیون دی بنزوتیوفن

اکسیداسیون دی بنزوتیوفن به مشتقات آن باعث افزایش قطبیت و وزن مولکولی می گردد که باعث جداسازی آن بوسیله استخراج [۲۶]، تقطیر [۲۷] و یا جذب [۲۸] می شود. هر یک از این روش ها می تواند برای جداسازی ترکیبات گوگردی بکار برده شود. در پتروشیمی از روش استخراج با حلال بیشتر استفاده می شود و بعد از آن عملیات تقطیر برای جداسازی حلال بکار می رود [۲۹-۳۰].

اما تفاوت قطبیت بین ترکیبات گوگردی ایجاد شده و هیدروکربن های آروماتیک بسیار کم است. بنابراین بکارگیری روش استخراج به تنهایی همراه با ازدست دادن ترکیبات هیدروکربنی مفید در طی فرآیند کاهش ترکیبات گوگردی و حذف آن است [۲۹ و ۳۱-۳۳]

بنابراین روش اکسیداسیونی که بتواند باعث افزایش قطبیت ترکیبات گوگردی و به دنبال آن حذف آن ها شود دارای اهمیت است. تکنیک پرتودهی در کنار روش گوگردزدایی اکسیژنی می تواند بکار برده شود. زیکینا و همکاران نشان دادند پرتودهی به طور موثر می تواند مرکاپتان ها و دیگر گونه های سولفوریک سبک را به سولفون، سولفوکساید و اسید تبدیل نماید. روش پرتودهی برای گوگردزدایی شامل دو مرحله الف. پرتودهی ب. استخراج ترکیبات گوگردی اکسید شده سنگین است. در مرحله اول گوگردزدایی انجام نمی شود اما اکسیداسیون قوی مواد گوگردی در مرحله اول باعث از بین بردن خوردگی شیمیایی و بالابردن حذف آن ها می گردد. حذف بالای گوگرد در این روش بدلیل بکارگیری فرآیند اکسیداسیون دوگانه است پرتودهی همراه با ازن تولیدی حاصل از بمباران الکترون های پرانرژی به مولکول های هوا که در اینجا می تواند نقش اکسیدکننده را داشته باشد [۳۴]. بسفار و همکاران^{۸۳} در سال ۲۰۱۲، روشی را برای حذف گوگرد از نفت خام با استفاده از تابش گاما پیشنهاد دادند [۳۵] که شامل اکسیداسیون ترکیب گوگردی در نفت خام یا سوخت دیزل با افزودن حداقل یکی از عوامل اکسیدکننده (مانند H_2O_2)، پرتودهی و سپس استخراج به کمک حلال است. عامل اکسیدکننده قبل از پرتودهی به نفت اضافه شده در حالی که فرآیند استخراج با حلال پس از پرتودهی انجام می شود. دز جذب شده در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگری بود. نتایج این روش منجر به کاهش ۳۶٪ گوگرد در نفت خام سنگین عربستان و ۷۸٪ در سوخت دیزل با دز جذبی ۲۰۰ کیلوگری شد.

۵- استفاده از فناوری پرتودهی در فرآوری گاز طبیعی

گاز طبیعی مهم ترین و پرتعدادترین سوخت فسیلی در عصر حاضر و آینده است. گاز طبیعی موجود در مخازن عمیق زیرزمینی ممکن است حاوی چندین جزء غیرهیدروکربنی مانند گازهای اسیدی سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن باشد که ترکیبات نامطلوبی بوده و مشکلات فنی متعددی از جمله خوردگی و آلودگی زیست محیطی را ایجاد می کنند. طبق قراردادها، مقدار مجاز CO_2 و H_2S در جریان گاز طبیعی به ترتیب حدود ۴ ppm و ۲٪ است. بنابراین، قبل از انتقال گاز طبیعی از طریق خطوط لوله، باید این گازها حذف و غلظت آن ها به حد استاندارد رسانده شود [۳۶]. گاز طبیعی حاوی مقادیر بالای H_2S و CO_2 را اصطلاحاً گاز ترش نامیده و فرآیند حذف آن ها از جریان گاز را شیرین سازی گاز گویند. فرآیندهای زیادی برای حذف این گازها از گاز طبیعی در شرایط عملیاتی مختلف و غلظت های مختلف H_2S و CO_2 در گاز ترش، توسعه یافته است. این فرآیندها



شامل جذب فیزیکی و شیمیایی، فرایندهای غشایی و ... می‌شود. از عوامل مؤثر در انتخاب نوع فرآیند شیرین‌سازی گاز ترش می‌توان به نوع ناخالصی‌های موجود در گاز، غلظت ناخالصی‌ها، جذب انتخابی گازهای اسیدی، شرایط دما و فشار گاز، اقتصادی بودن فرآیند و ... اشاره نمود.

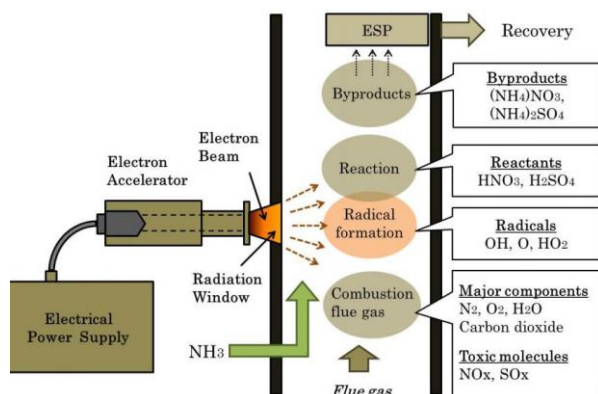
به طور کلی یکی از مهم‌ترین مراحل فرآوری گاز، مرحله حذف گازهای اسیدی CO_2 و H_2S است (واحد AGR^{84}). گازهای اسیدی معمولاً با جذب در محلول آمین جداسازی شده و به واحد حذف سولفور فرستاده می‌شوند. در واحد AGR گازهای اسیدی و ترکیبات گوگردی آلی (مانند مرکاپتان و COS) موجود در گاز طبیعی حذف‌شده تا مطابق با استانداردهای فرآیند مایع‌سازی⁸⁵ (LNG) یا تولید گاز برای فروش باشد. آمین⁸⁶ به‌صورت جریان مخالف در داخل ستون جذب در تماس با گاز ترش قرار گرفته و گازهای اسیدی توسط آن جذب می‌شوند. این فرآیند یک فرآیند مرطوب است، انجام فرآیند آب‌گیری توسط غریبال مولکولی در مرحله بعدی ضروری است. لازم به ذکر است که برخی از فرایندها نمی‌توانند ترکیبات گوگردی آلی را حذف کنند لذا بستر غریبال مولکولی گاهی این وظیفه را داشته و به این موضوع کمک می‌کند [۳۷].

گاز H_2S حذف‌شده در فرآیند AGR به‌عنوان گاز اسیدی به واحد بازیابی گوگرد (واحد SRU^{87}) فرستاده می‌شود. در واحد SRU ، گاز H_2S به‌صورت گوگرد عنصری از طریق واکنش Claus بازیابی می‌شود (شکل ۱۲). واکنش‌ها در دو مرحله انجام می‌شود: مرحله اول واکنش شعله و مرحله دوم، واکنش کاتالیزوری. اولی شامل یک مشعل با کارایی بالا، محفظه اختلاط و بویلر حذف حرارت است. درحالی‌که دومی دارای دو تا سه مرحله راکتور است. میزان بازیابی گوگرد در این فرآیند حدود ۹۵٪ تا ۹۷٪ است. گاز خروجی از این واحد که حاوی گوگرد بازیابی نشده است به واحد تصفیه گازهای خروجی (واحد TGT) ارسال می‌شود. گوگرد بازیابی شده ذخیره شده و پس از انجام فرآیند گاززدایی برای حذف H_2S به‌عنوان محصول ارسال می‌شود. فرآیند Claus یک فرآیند تعادلی است اما در فرآیند اصلاح‌شده آن با کاتالیزورهای اکسیداسیون مستقیم، می‌توان به نسبت بازیابی ۹۹٪ بدون داشتن گاز خروجی از واحد (TGT) دست یافت. در فرآیند Claus انتخاب مشعل‌های مناسب اهمیت داشته و می‌بایست از کاتالیزورهای مناسب برای اطمینان از نرخ بازیابی بالا و عمر طولانی استفاده شود [۳۸].

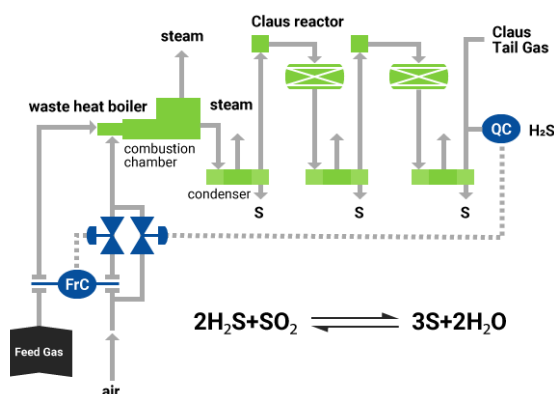
در رابطه با کاربرد فناوری پرتودهی در حذف ترکیبات گوگردی موجود در گاز طبیعی، پژوهشی مشاهده نشد. اما، در رابطه با پرتودهی جریان‌های گازی جهت حذف آلاینده‌های موجود در آن‌ها، می‌توان به تحقیقات انجام‌شده بر روی حذف گازهای SO_x و NO_x حاصل از احتراق اشاره نمود (شکل ۱۳). تحقیقات گسترده‌ای با استفاده از پرتو الکترونی در تصفیه گاز دودکش از مقیاس آزمایشگاهی تا پیلوت در کشورهای نظیر ژاپن، آلمان، ایالات متحده، عربستان سعودی و بلغارستان انجام‌شده است. حتی این فناوری، در مقیاس صنعتی در کشورهای چین، ژاپن و لهستان توسعه‌یافته است [۳۹].

در پژوهشی دیگر حذف ترکیبات گوگردی بدو مانند سولفید هیدروژن (H_2S)، متیل مرکاپتان (CH_3SH)، دی متیل سولفید ($\text{DMS: (CH}_3)_2\text{S}$) و دی متیل دی سولفید ($\text{DMDS: (CH}_3)_2\text{S}_2$) حاصل از منابع مختلف طبیعی و یا ناشی از فعالیت‌های انسان‌ها، به کمک پرتوهای الکترون بررسی شده است. در این پژوهش به بررسی فاکتورهای مؤثر بر فرآیند، مکانیسم اثر الکترون بر ترکیبات گوگردی و محصولات ثانویه تولیدی پرداخته و نهایتاً یک سیستم هیبریدی با ترکیب دو فناوری مختلف (پرتو الکترونی و اسکرابر جریان متقاطع) برای کنترل ترکیبات گوگردی ناشی از یک مرکز تصفیه فاضلاب معرفی شد (شکل ۱۴).

⁸⁴- Acid Gas Removal
⁸⁵- Liquefied natural gas
⁸⁶-Amine
⁸⁷- Sulfur Recovery Unit

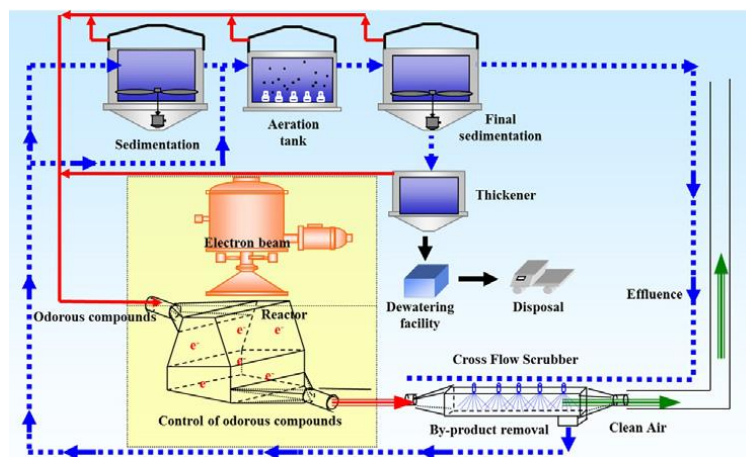


شکل (۱۳): تصفیه گازهای حاصل از احتراق با پرتو الکترونی



شکل (۱۲): فرآیند واحد بازیابی گوگرد (واحد SRU)

نتایج نشان می‌دهد امکان تخریب و حذف کامل ترکیبات گوگردی به کمک پرتو الکترونی و تبدیل آن‌ها به محصولات جانبی H_2SO_4 و SO_2 وجود دارد. این محصولات نیز به راحتی توسط اسکرابر جمع‌آوری می‌شوند [۴۰-۴۲]. به نظر می‌رسد که می‌توان به کمک فناوری پرتو دهی ترکیبات گوگردی مضر موجود در گاز طبیعی را تخریب و به ترکیبات مفید تبدیل نمود. لذا با انجام تحقیقات بیشتر می‌توان به استفاده از این فناوری جدید به جای واحد SRU که نیازمند شرایط دمایی خاص و کاتالیزور است، امیدوار بود.



شکل (۱۴): شمایی از سیستم هیبریدی متشکل از پرتوهای الکترون و اسکرابر جهت حذف ترکیبات گوگردی

۶- نتیجه‌گیری

افزایش تدریجی قیمت نفت، افزایش میزان مصرف سالانه انرژی در ایران و داشتن ذخایر قابل توجه نفت سنگین، در کنار کاهش منابع نفت سبک، از مهمترین عوامل توجه به توسعه کاربری مخازن نفت سنگین است، اما نبود تکنولوژی‌های به صرفه برای استخراج، انتقال و ارتقای کیفی نفت سنگین از توسعه‌ی این ذخایر جلوگیری می‌کند. در روش‌های متداول ارتقاء نفت سنگین، علاوه بر صرف انرژی حرارتی زیاد، به مواد شیمیایی و کاتالیزورهای گران قیمت نیاز است لذا گروه جدیدی از فناوری‌ها به عنوان راه حل امیدوارکننده برای حل این مشکلات پدیدار شده‌اند. تمرکز این فناوری‌ها بر ارتقای ویژگی‌هایی از نفت خام نظیر کاهش ویسکوزیته و حذف ناخالصی گوگرد آن است. از بین روش‌های جدید در حال بررسی توسط محققین، فرآوری نفت خام سنگین به کمک فناوری پرتو دهی با قابلیت انجام در فشار و دمای محیط بدون استفاده از واکنشگرها و کاتالیست‌های اضافی، می‌تواند یکی از روش‌های با پتانسیل مطلوب در این خصوص باشد [۴۳]. با استفاده از فناوری پرتو دهی الکترون، نیاز به انرژی و استفاده



از مواد شیمیایی و کاتالیزورها کاهش یافته طراحی تاسیسات می‌تواند ساده‌تر شود و در کاهش هزینه‌های انتقال و عمل‌آوری نفت سنگین و قیر موثر واقع شود. تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش میزان دز جذبی، سرعت کاهش ویسکوزیته ابتدا زیاد شده و سپس کاهش می‌یابد. دزهای بالا با تجمع رادیکال‌های آزاد در یک مکان، سبب پیشرفت واکنش‌های رادیکالی هیدروکربن‌های سبک به باند‌های دوگانه و هیدروکربن‌های اولفینی می‌گردد. همچنین ایزومریزاسیون درون مولکولی تحت دما و دز بالاتر بیشتر است و برخی رادیکال‌های آلکیلی ایجاد شده تثبیت می‌شوند. مطالعات نشان داده که سرعت ایزومریزاسیون علاوه بر دما و دز جذبی به خواص هیدروکربن‌های اولیه نیز بستگی دارد. با توجه به تاثیر پرتودهی الکترونی بر کاهش میزان گرانی و افزایش درجه API، استفاده از این روش‌های نوین جهت جلوگیری از صرف هزینه‌های سنگین جهت جابجایی سیال با ویسکوزیته بالا در خطوط انتقال، امری ضروری به نظر می‌رسد.

با توجه به این‌که کشور ایران جزو کشورهایی با ذخایر و منابع هیدروکربنی بالا در جهان است لذا انجام تحقیقات بر روی فناوری‌های نوظهور در رابطه با فرآوری نفت خام و گاز طبیعی، به خصوص فناوری‌های مبتنی بر دانش هسته‌ای، منجر به توسعه فناوری‌های مرتبط با صنعت نفت و گاز و زمینه‌ساز افزایش توان رقابت این صنعت کلیدی کشور در بین رقبای خواهد شد.

۷- مراجع

- [۱] Alboudwarej, H.; Felix, J.; Taylor, S. ; Badry, R.; Bremner, C.; Brough, B.; Skeates, C.; Baker, A.; Palmer, D.; Pattison, K.; Beshry, M.; Brown, G.; Calvo, R.; Triana, J.A.C.; Hathcock, R.; Koerner, K.; Houghes, T.; Kundu, D.; Cardenas, J.L.; West, C.; *Highlighting Heavy Oil*, Oil Field Review Report, Schlumberger (۲۰۰۶).
- [۲] Luis, C.; Castañeda, José A.D.; Muñoz, Jorge Ancheyta, *Catalysis Today* ۲۲۰ – ۲۲۲ (۲۰۱۴) ۲۴۸–۲۷۳.
- [۳] Khlaif, T. H.; Bded, A.S.; 1st International Conference on Petroleum Technology and Petrochemicals, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering ۵۷۹ (۲۰۱۹) ۰۱۲۰۱۲
- [۴] Yang, D.; Kim, J.; Silva, C.F. ; Barrufet, M.A. ; Moreira, R. ; SPE annual Technical Conference and Exhibition held in Florence . Italy, ۱۹-۲۲, (۲۰۱۰)
- [۵] Salvoy, R.; Falconer, W.E.; *Journal of Physics and Chemistry* ۶۹ (۱۹۶۵) ۲۳۴۵-۲۳۵۰.
- [۶] Wu, G.; Katsumura, Y.Z.; Matsuura, C.; Ishigure, K.; Kubo, J. ; *Industrial & Engineering Chemistry Research* ۳۶ (۶), (۱۹۹۷) ۱۹۷۳-۱۹۷۸.
- [۷] Wu, G.; Katsumura, Y.Z.; Matsuura, C.; Ishigure, K.; Kubo, J.; *Industrial & Engineering Chemistry Research* ۳۶ (۹), (۱۹۹۷) ۳۴۹۸-۳۵۰۴.
- [۸] Zaikin, Y.; Zaikina, R.; *Petroleum Radiation Processing*, CRC Press, Tylor and Francis Group
- [۹] Zaykina, R.F.; Zaykin, Y.A.; Mirkin, G.; Nadirov, N.K.; *Radiation Physics and Chemistry* ۶۳ (۳-۶), (۲۰۰۲) ۶۱۷-۶۲۰.
- [۱۰] Zaykin, Y.A.; Zaykina, R.F.; Silverman, J.; *Radiation Physics and Chemistry* ۶۹ (۳), (۲۰۰۴a) ۲۲۹-۲۳۸.
- [۱۱] Zaykina, R.F.; Zaykin, Y.A.; Yagudin, S.G.; Fahrudinov, I.M.; *Radiation Physics and Chemistry* ۷۱ (۱-۲), (۲۰۰۴b) ۴۶۷-۴۷۰.
- [۱۲] Zaykin, Y.A.; and Zaykina, R.F.; *Radiation Physics and Chemistry* ۷۱(۱-۲), (۲۰۰۴c) ۴۷۱-۴۷۴.



[۱۳] Zaykina, R.F.; Yu. Zaykin, A.; Mirkin, G.; Nadirov, N.K.; Radiation Physics and Chemistry ۶۳ (۲۰۰۲) ۶۱۷-۶۲۰.

[۱۴] Khan, M.R.; Crude Value Enhancement: An Emerging Opportunity for Innovation in E&P. Paper SPE ۱۱۲۸۰۹. SPE Distinguished lecture during ۲۰۰۶-۲۰۰۷.

[۱۵] عسکری لجایر، بهنام، نجفی، نصرت اله، مقیسه، ابراهیم، نشریه تابش و فناوری هسته ای، دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶

[۱۶] Alfi, M.; Barrufet, M.A.; Moreira, R.G.; Da Silva, P.F.; Mullins, O.C.; Fuel ۱۵۴ (۲۰۱۵) ۱۵۲-۱۶۰.

[۱۷] Metreveli, K.; Ponomarev, A. V.; High Energy Chemistry, ۵۰(۲), (۲۰۱۶) ۹۷-۱۰۰.

[۱۸] Daegil, Y.; Heavy oil upgrading from electron beam (E-Beam) irradiation. A Thesis

[۱۹] Mehran, S.; Amarjeet, B.; Argyrios, M.; Biotechnol Adv ۲۵, (۲۰۰۷) ۵۷۰-۵۹۶.

[۲۰] Agarwal, P.; Sharma, DK.; Energy Fuels ۲۴, (۲۰۱۰) ۵۱۸-۵۲۴.

[۲۱] Gray, MR.; Ayasse, AR.; Chan, EW. Veljkovic, M.; Kinetics of hydrodesulfurization of thiophenic and sulfide sulfur in Athabasca bitumen (۱۹۹۵).

[۲۲] Ali, M. H.; Al-Maliki, A.; El-Ali, B.; Martinie, G.; Siddiqui, M. N.; Fuel, ۸۵, (۲۰۰۶) ۱۳۵۴-۱۳۶۳.

[۲۳] Liu, W. Y.; Lei, Z. L.; and Wang, I. K.; Energy Fuels, ۱۵, (۲۰۰۱) ۳۸-۴۳.

[۲۴] S. Otsuki, T. Nonaka, N. Takashima, W. Qian, A. Ishihara, T. Imai and T. Kabe, Energy Fuels, ۱۴, (۲۰۰۰) ۱۲۳۲-۱۲۳۹.

[۲۵] Zannikos, F.; Lois, E.; Stournas, S.; Fuel Process. Technol., ۴۲, (۱۹۹۵) ۳۵-۴۵.

[۲۶] Tam, P. S. ; Kittrell, J. R.; Eldridge, J. W. ; Ind. Eng. Chem. Res., ۲۹, (۱۹۹۰) ۳۲۱-۳۲۴.

[۲۷] Dolbear, G. E. ; Skov, E. R. ; Am. Chem. Soc, Div. Pet. Chem., ۴۵, (۲۰۰۰) ۳۷۵-۳۷۸.

[۲۸] Aida, T.; Yamamoto, D.; Sakata, K.; Adv. Mater., ۵, (۱۹۹۳) ۳۹۱-۳۹۵.

[۲۹] Babich, I.V.; Moulijn, J. A.; Fuel, ۸۲, (۲۰۰۳) ۶۰۷-۶۳۱.

[۳۰] Gore, W.; US Patent, ۶۲۷۴۷۸۵, (۲۰۰۱).

[۳۱] Abotsi, G. M. K.; Scaroni, A. W.; Fuel Process. Technol., ۲۲, (۱۹۸۹) ۱۰۷-۱۳۳

[۳۲] Shiraishi, Y.; Tachibana, K.; Hirai, T.; Komasa, I.; Ind. Eng. Chem. Res., ۴۱, (۲۰۰۲) ۴۳۶۲-۴۳۷۵.

[۳۳] Y. Shiraishi, Y.; Hirai, T.; Komasa, I.; J. Chem. Eng. Jpn., ۳۵, (۲۰۰۲) ۱۳۰۵-۱۳۱۱.

[۳۴] Zaykina, R. F.; Zaykin, Y. A.; Mamaonava, T. B.; Nadirov, N. K.; Radiat. Phys. Chem., ۶۳, (۲۰۰۲) ۶۲۱-۶۲۴.

[۳۵] Basfar, A.A.; Mohamed, K.A.; US Patent, No. US ۲۰۱۲/۰۱۳۸۴۴۹ A۱, (۲۰۱۲).

[۳۶] Sharifi, A.; Amiri, E.L.; IFP Energies nouvelles (۲۰۱۷) ۷۲, ۲۴.

[۳۷] <https://www.chiyodacorp.com/en/service/upstream-gasprocessing/acid-gas-removal-agr/>

[۳۸] <https://www.chiyodacorp.com/en/service/upstream-gasprocessing/sulfur-recovery-unit-sru/>

[۳۹] Park, J.H.; Ahn, J.W.; Kim, K.H.; Son, Y.S.; Volume ۳۵۵, ۱ (۲۰۱۹) ۳۵۱-۳۶۶.

[۴۰] Son, Y.S.; Kim, J.C.; Chemical Engineering Journal ۲۶۲ (۲۰۱۵) ۲۱۷-۲۲۳.

[۴۱] Son, Y.S.; Jung, I.H.; Lee, S.J.; Koutrakis, P.; Kim, J.C.; Chemical Engineering Journal ۲۶۹ (۲۰۱۵) ۲۷-۳۴.

[۴۲] Son, Y.S.; Jung, I.H.; Lee, S.J.; Kim, J.C.; Chemical Engineering Journal ۲۷۴ (۲۰۱۵) ۹–۱۶.

[۴۳] Ponomarev, A. V. ; Pershukov, V. A. ; Smirnov, V. P. ; Physics of Atomic Nuclei, ۷۸(۱۴), (۲۰۱۵) ۱۶۶۶–۱۶۶۹.



ساخت فیلم شناساگر حساس به پرتو الکترون بر پایه پلی وینیل کلراید (کد مقاله: ۱۲۱۱)

بنائی، مریم^۱، انوری تفتی، فاطمه^۱، برشان، سعید^۱، دهشیری، سعیده^۱، احمدیان، ونوس^۱
^۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد)

چکیده

شناساگر پلی وینیل کلراید حساس به پرتو الکترون ساخته شد و تغییر در خواص نوری آن مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های شناساگر ساخته شده در دزهای مختلف از ۰ تا ۵۰ kGy تحت تابش باریکه الکترون قرار گرفتند. تغییر رنگ از زرد به قرمز در اثر پرتو دهی مشاهده شد و تغییرات رنگ به صورت بصری تأیید گردید. همچنین به وسیله دستگاه طیف سنجی UV-vis تغییرات در باند جذبی در طول موج ۵۲۵ nm بررسی شد و مشاهده گردید که شدت جذب با افزایش دز جذبی افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد این فیلم می‌تواند بعنوان یک شناساگر برای متمایز ساختن کالای پرتو دهی شده از کالای پرتو دهی نشده مورد استفاده قرار گیرد.

کلید کلیدی: پرتو الکترون، پلی وینیل کلراید، تغییر رنگ، شناساگر

Fabrication of electron beam sensitive indicator film based on poly vinyl chloride

Banaei, Maryam^{۱*}, Anvari Tafti, Fatemeh^۱, Barshan, Saeid^۱, Dehshiri, Saeideh^۱, Ahmadian, Venous^۱

^۱. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co.,
Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)

Abstract

A poly vinyl chloride indicator sensitive to electron beam irradiation was make and the changes in its optical properties were studied. The indicator samples in different doses from ۰ to ۵۰ kGy were subjected to electron beam irradiation. The color change from yellow to red was observed due to irradiation and the color change confirmed visually. Also the changes in the absorption band at the wavelength of ۵۲۵ nm were checked by UV-vis spectrometer and it was observed that the intensity of absorption increases with the increase of absorption dose. The results of this study also showed that this film can used as an indicator to distinguish the irradiated product from the non-irradiated product.

Keywords: electron beam irradiation, polyvinyl chloride, color change, indicator



۱- مقدمه :

شناساگرها عمدتاً برای تشخیص کالاهای پرتودهی شده از کالاهای پرتودهی نشده بکار می‌روند [۱]. از مزایای یک شناساگر، سبکی و قابل حمل بودن آن است. بسیاری از مواد شامل یک یا چند پلیمر با یک رنگ برای توسعه و تحقیق بر روی شناساگرها بکار گرفته شده‌اند. پلیمرهای استفاده شده بدین منظور شامل پلی وینیل الکل [۲-۳]، پلی کربنات [۴]، پلی وینیل کلراید [۵] و ... و مواد رنگی شامل کروسل قرمز [۶]، تترازولیوم بنفش [۷]، رنگ‌های آزو و ... هستند.

همچنین مخلوط‌هایی از پلیمرهای کلردار برای ساخت شناساگرهای مورد استفاده برای پرتوهای گاما و الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸-۹]. آن‌ها حاوی رنگ‌های حساس به pH بوده و حضور ترکیبات کلردار باعث حلالیت بیشتر آن‌ها می‌گردد. به عنوان مثال مخلوط دی هیدروکلرین ها و یک اسید دارای pH پایینی است. پایین بودن pH باعث افزایش حساسیت ترکیب رنگی برای تغییر رنگ می‌گردد [۱۰].

بررسی‌های قبلاً انجام شده بر روی محلول حاوی پلیمر، پلی وینیل الکل و رنگ آزو در محلول آبی و در حضور ماده کلردار بخوبی نشان داد که پرتوهای الکترونی می‌توانند با رادیولیز آب و همچنین تولید رادیکال کلر، باعث تغییر ساختار رنگ آزو گردیده و در نهایت رنگ محلول پلیمری را تغییر دهد [۱۱]. تفاوت کار حاضر با مطالعه از قبل انجام شده را می‌توان بدین شرح بیان نمود، پلیمر پلی وینیل کلراید حل شده در حلال آلی بدلیل داشتن گروه عاملی کلر، جایگزین پلی وینیل الکل گردیده و ماده کلردار از ترکیب حذف شده است. علاوه بر این از مخلوط دو رنگ آزو استفاده شد. همچنین نمونه محصول بصورت جامد جایگزین نمونه محلول گردید که نگهداری و جا به جایی آن راحت تر باشد. سپس نمونه‌های جامد تهیه شده در دزهای مختلف پرتودهی شد و تغییرات رنگ نمونه توسط دستگاه اسپکتروفتومتر بررسی گردید. نتایج این تحقیق تغییر رنگ نمونه را در اثر پرتودهی نشان داد همچنین مشاهده شد که نمونه‌های جامد قبل از پرتودهی پایداری مناسبی در برابر نور و رطوبت محیط دارند.

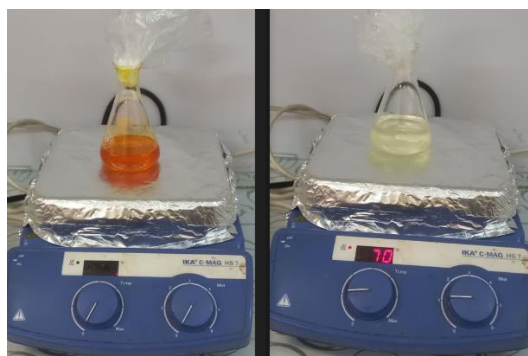
۲- روش کار

۲-۱- مواد و تجهیزات

اتانول، متیل اتیل کتون، سیکلو هگزانون به عنوان حلال و پلیمر پلی وینیل کلراید پودری آزمایشگاهی با جرم مولکولی متوسط ۴۳۰۰۰ گرم بر مول، دی متیل یلو، متیل اورنج، سود از شرکت مرک آلمان و سیگما آلدریج خریداری شد. هیدروکلرید اسید از شرکت مجللی ساخت ایران تهیه شد. نمونه‌ها پس از آماده شدن تحت تابش پرتوالکترون در دزهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ کیلوگری قرار گرفتند. از دستگاه اسپکتروفتومتر DR۵۰۰۰ برای بررسی تغییرات باند جذبی شناساگر استفاده شد. تابش الکترون توسط دستگاه شتاب‌دهنده الکترون (مدل TT ۲۰۰) با انرژی ۱۰ MeV و توان ۸۰ kW، مستقر در مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد) تامین گردید.

۲-۲- روش تهیه شناساگر

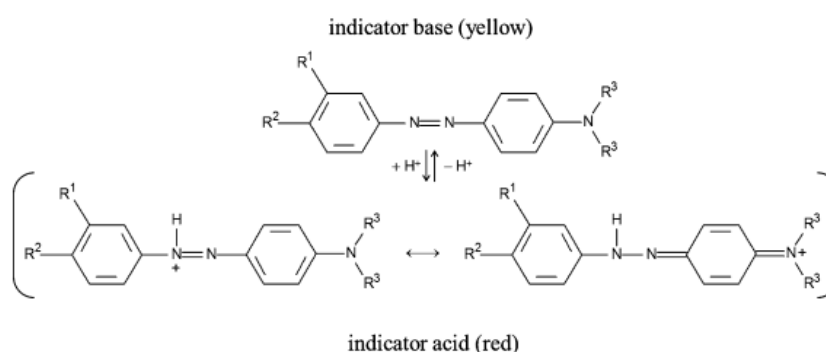
ابتدا مخلوط حلال متیل اتیل کتون: سیکلو هگزانون به نسبت ۱:۱ تهیه شد. سپس ۵ درصد وزنی - حجمی پلی وینیل کلراید به آن اضافه گردید و با هیتر استیرر IKA C MAG-SV و به کمک مگنت بهم زده شد (برای بدست آوردن مقدار بهینه پلیمر درصدهای مختلف ۷ تا ۱۷ درصد وزنی-حجمی آن بکار برده شد و پس از بررسی بهترین تغییر رنگ در ۵ تا ۷ درصد وزنی حجمی مشاهده گردید که کمترین مقدار یعنی ۵ درصد وزنی - حجمی در نظر گرفته شد). پس از حل شدن کامل پلیمر در حلال، رنگ دی متیل یلو و متیل اورنج به آن اضافه شد و هم زدن به مدت دو ساعت ادامه یافت. شکل (۱) محلول آماده شده بعد از حل شدن پلیمر و بعد از اضافه نمودن رنگ‌ها را نشان می‌دهد. با آماده سازی محلول، آن را در داخل پتری دیش ریخته و در فضای اتاق به مدت ۴۸ ساعت قرار داده تا کاملاً خشک گردد و فیلم نازکی بدست آید.



شکل (۱) نمونه بعد از حل شدن پلیمر (راست)، نمونه بعد از حل شدن رنگ (چپ)

۳-۲- اهمیت رنگ آزو

بسیاری از شناساگرهای بازی-اسیدی حاوی یک گروه آزو، مشتقات آزوبنزن (دو حلقه فنیل که متصل به پیوند دوگانه $N=N$) بوده با یک گروه آمینو می‌باشند. علاوه بر این، وجود گروه‌های قطبی، مانند گروه کربوکسیل یا سولفونیک اسید باعث افزایش حلالیت ترکیبات می‌شود. رنگ‌های آزو پایه شناساگرها هستند. در طی پروتونه شدن یک کاتیون تشکیل می‌شود و بار مثبت بین حلقه آروماتیک و ساختار کینوئیدی رزونانس انجام می‌دهد و باعث تغییر رنگ از زرد به قرمز (یا بنفش قرمز) می‌گردد [۱۲]. به همین دلیل رنگ آزو برای تولید شناساگر مورد استفاده قرار گرفت.

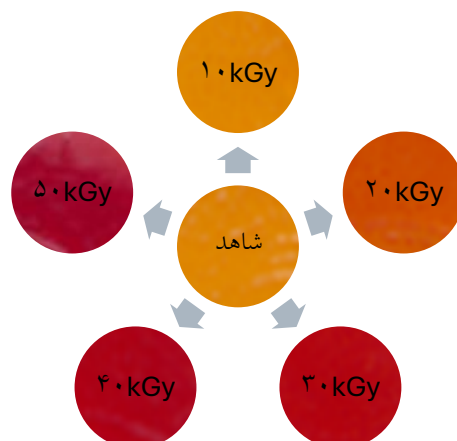


شکل (۲) توصیف شماتیک از تغییرات ساختاری رنگ‌های آزو در پروتونه شدن / دی پروتونه شدن (تنها یک ساختار رزونانسی برای حالت بازی و دو حالت برای حالت اسیدی داده شده است)

۳- نتایج

۳-۱- مقایسه تغییرات ظاهری شناساگر

شناساگرهای ساخته شده در شرایط یکسان، در دزهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ kGy پرتودهی شدند. نتایج پرتودهی نمونه‌ها نشان داد در اثر پرتودهی رنگ نمونه تغییر داشته و از زرد به قرمز تبدیل می‌شود (شکل ۳). تغییر رنگ ایجاد شده در نمونه‌ها متناسب با افزایش دز پرتودهی است و با افزایش دز پرتودهی شدت رنگ افزایش می‌یابد.

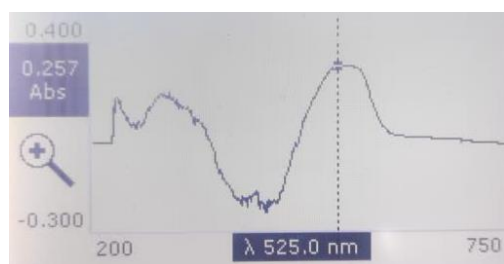


شکل (۳) تغییر رنگ شناساگر در دز پرتودهی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ kGy

۳-۲- آنالیز طیف UV-vis (مطالعه طیف جذبی)

شکل (۴) طیف پهنی را در محدوده ۵۲۵ nm تا ۵۵۳ nm را نشان می‌دهد. نمودارها در این شکل نمونه‌های پرتودهی شده در دزهای مختلف ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ kGy را نشان می‌دهد. باند پهن اصلی مشاهده شده در این شکل بیانگر حضور گروه کروموفور در رنگ است که با افزایش دز پرتودهی مقدار شدت جذب افزایش می‌یابد به طوری که شدت جذب که در ۱۰ kGy در طول موج ۵۲۵ nm برابر ۰/۲۵۷ است در ۵۰ kGy کیلوگری به ۱/۵ نزدیک می‌شود. تغییر در افزایش پیک جذب و افزایش آن بیانگر افزایش شدت رنگ تولید شده می‌باشد که متناسب با افزایش دز پرتودهی الکترون می‌باشد (شکل ۵). طبیعت کروموفور رنگ‌های آزو بکار رفته در ساخت شناساگر و ساختار الکترونی ناپایدار آن باعث می‌شود تا شناساگر پتانسیل دریافت الکترون را داشته باشد [۱۳].

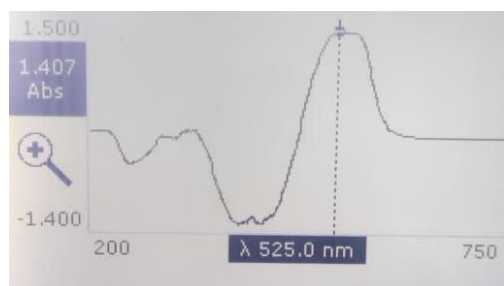
تغییر در ساختار رنگ آزو بر اساس موقعیت الکترون در مولکول است زمانی که یون هیدروژن از مولکول جدا شده و یا به آن متصل می‌گردد. همچنین حضور گروه آزو در مولکول دلیل دیگری برای کاهش رنگ می‌باشد [۱۴]. از طرفی پلی وینیل کلراید نیز در اثر پرتودهی یون کلر خود را از دست داده و باعث تغییر در رنگ می‌شود. تغییر در ساختار رنگ بدلیل الکترون‌گاتیویته و جذب بالای آن است که تمایل به جذب مولکول‌های باند دوگانه آزو و تشکیل گروه‌های کروموفور فرمازان و دی فرمازان می‌گردد [۱۵-۱۶].



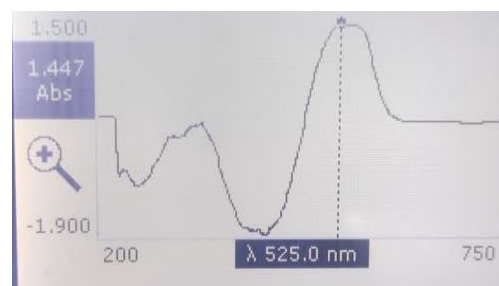
۱۰ kGy



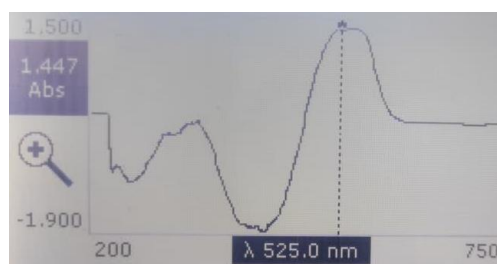
۲۰ kGy



۳۰ kGy

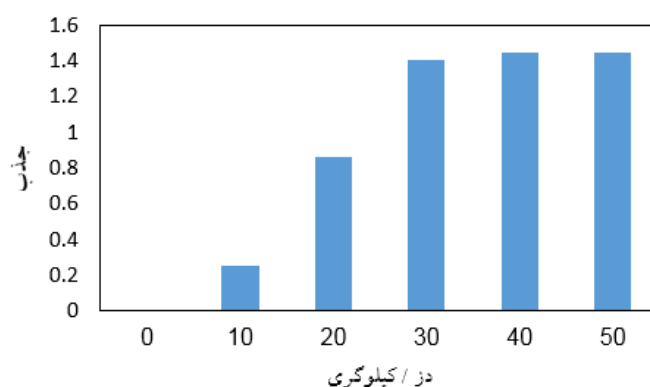


۴۰ kGy



۵۰ kGy

شکل (۴) طیف جذبی شناساگر در دز پرتودهی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ kGy



شکل (۵) نمودار جذب بر حسب دز پرتودهی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ kGy در طول موج ۵۲۵ nm

۳-۳- بررسی پایداری قبل از پرتودهی در شرایط محیطی

برای بررسی پایداری نمونه‌ها قبل از پرتودهی در شرایط محیطی، یک محلول تهیه شد و در داخل تعدادی پتری دیش ریخته شد. نمونه‌ها در دما، رطوبت و نور اتاق خشک گردید. سپس هر یک از نمونه‌ها در فواصل زمانی مختلف در دز ۴۰ kGy پرتودهی شد. نتایج بصری و نمودار جذب بر حسب زمان در طول موج ۵۲۵ nm نشان داد تمامی نمونه‌ها در اثر پرتودهی در زمان‌های متفاوت بالا فاصله بعد از خشک شدن، بعد از یک هفته، دو هفته و یک ماه از زرد به قرمز تغییر رنگ می‌دهند و افزایش جذب دارند (شکل ۶ و ۷) بنابراین می‌توان نتیجه گرفت نمونه‌ها پایداری خوبی در برابر نور و رطوبت محیط دارند و می‌توان آن‌ها را برای مدت زمان حداقل یک ماه قبل از پرتودهی در شرایط محیط نگهداری نمود و برای متمایز ساختن کالای پرتودهی شده از پرتودهی نشده استفاده نمود.



بعد از یک ماه



بعد از دو هفته



بعد از یک هفته

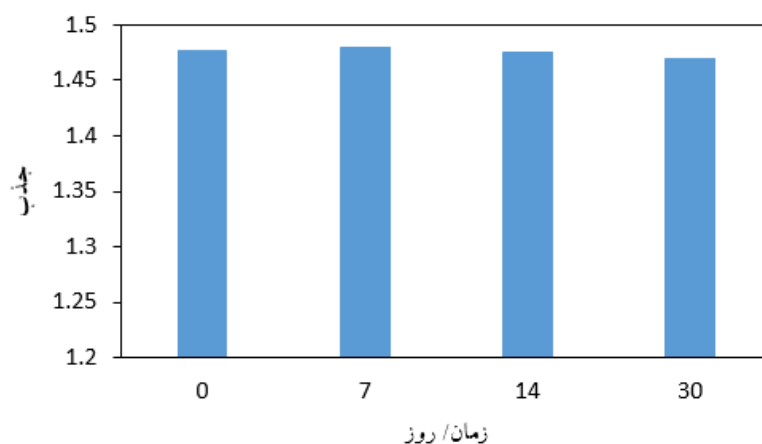


بلافاصله بعد از پرتودهی



نمونه شاهد

شکل (۶) پرتودهی نمونه‌های در دز ۴۰ kGy، بلافاصله بعد از پرتودهی، بعد از یک هفته، بعد از دو هفته و بعد از یک ماه نسبت به نمونه پرتودهی نشده (شاهد)



شکل (۷) نمودار جذب نمونه‌های پرتودهی شده در دز ۴۰ kGy بر حسب زمان در طول موج ۵۲۵nm، بلافاصله بعد از پرتودهی، بعد از یک هفته، بعد از دو هفته و بعد از یک ماه نسبت به نمونه پرتودهی نشده (شاهد)

۴- نتیجه گیری

دز دریافتی توسط مواد در اثر پرتودهی، مربوط به برهمکنش پرتو با ماده می باشد. در پرتودهی الکترون با شناساگر پلی وینیل کلراید، برهمکنش با شکست پیوند در پلی وینیل کلراید همراه است. تابش پرتو و برخورد آن به ماده منجر به تولید الکترون، شکست پیوند و همچنین تولید رادیکال می گردد. در اثر برخورد یون کلر از پلی وینیل کلراید آزاد شده و با برهمکنش با رنگ های آزو بکار گرفته شده باعث تغییر در ساختار آن ها می شود و تغییر رنگ اتفاق می افتد. در بررسی های انجام شده می توان نتایج مهم و مشخص حاصل شده را به صورت زیر بیان نمود:

- پلیمر پلی وینیل کلراید، پلیمری مفید برای ساخت شناساگر می باشد.
- تغییر در رنگ شناساگر با افزایش دز پرتودهی مشاهده می گردد.
- شناساگر می تواند در محدوده مورد بررسی، دز ۰ تا ۵۰ کیلوگری بکار برده شود.
- تغییرات در شدت باند جذبی با افزایش دز پرتودهی مشاهده می گردد.
- شناساگر قبل از پرتودهی دارای پایداری در شرایط محیطی است.
- شناساگر می تواند کالای پرتودهی شده را از کالای پرتودهی نشده متمایز سازد.

۵- مراجع

- [۱] Ebraheem, S.; El-Kelany, M.; Journal of Polymer Chemistry, ۲۰۱۳, ۳, ۱-۵.
[۲] El-Kelany, M.; Gafar, S.M.; Optik ۲۰۱۶, ۱۲۷, ۶۷۴۶-۶۷۵۳.



- [۳] Raouafi, A.; Daoudi, M.; Jouini, K.; Charradi, K.; Hamzaoui, A.H.; Blaise, P.; Farah, K.; Hosni, F.; Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At ۲۰۱۸, ۴۲۵, ۴-۱۰.
- [۴] Galante, A.M.S.; Campos, L.L.; Appl. Radiat. Isot ۲۰۱۲, ۷۰, ۱۲۶۴-۱۲۶۶.
- [۵] Kattan, M.; Daher, Y.; IJRR ۲۰۱۶, ۱۴, ۲۶۳-۲۶۷.
- [۶] Ebraheem, S.; Eid, S.; Kovacs, A.; Radiat. Phys. Chem. ۲۰۰۲, ۶۳, ۸۰۷-۸۱۱.
- [۷] Emi-Reynolds, G.; Kovacs, A.; Fletcher, J.J.; Radiat. Phys. Chem. ۲۰۰۷, ۷۶, ۱۵۱۹-۱۵۲۲.
- [۸] Abdel-Fattah, A.A.; El-Kelany, M.; Abdel-Rehim, F.; Radiat. Phys. Chem. ۱۹۹۶, ۴۸, ۴۹۷-۵۰۳.
- [۹] Abdel-Fattah, A.A.; El-Kelany, M.; Abdel-Rehim, F.; El Miligy, A.A.; J. Photochem. Photobiol. A Chem. ۱۹۹۷, ۱۱۰, ۲۹۱-۲۹۷.
- [۱۰] Doyan, A.; Susilawati, S.; Prayogi, S.; Roil Bilad, M.; Fatikul Arif, M.; Maizura Ismail, N.; Polymers ۲۰۲۱, ۱۳, ۱۸۶۶.
- [۱۱] بنائی، م. انوری تفتی، ف. برشان، س. بررسی اثر پرتودهی الکترون بر روی محلول پلیمری حاوی رنگ دی متیل یلو، بیست و نهمین کنفرانس ملی هسته‌ای ایران، ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، ۷ اسفند ماه ۱۴۰۱
- [۱۲] Kahlert, H.; Meyer, G.; Albrecht, A.; ChemTexts ۲۰۱۶, ۲-۷.
- [۱۳] Dos Santos, A.B.; Traverse, J.; Cervantes, F.J.; Van Lier, J.B.; Biotechnol. Bioeng. ۲۰۰۵, ۸۹, ۴۲-۵۲.
- [۱۴] Jamal, F.; Qidwai, T.; Pandey, P.K.; Singh, R.; Singh, S.; Catal. Commun. ۲۰۱۱, ۱۲, ۱۲۱۸-۱۲۲۳.
- [۱۵] Kovacs, A.; Wojnarovits, L.; Mclaughlin, W.L.; Ebrahim, E.S.E.; Miller, A.; Radiat. Phys. Chem. ۱۹۹۶, ۴۷, ۴۸۳-۴۸۶.
- [۱۶] Lin, Y.; Yang, C.; Xiu, R.; Wang, J.; Wei, Y.; Sun, Y.; Water Sci. Technol. ۲۰۱۴, ۶۹, ۳۷۱-۳۷۷.



شبیه سازی عددی فرایند ترموگرافی نوری در کامپوزیت های لایه ای زمینه رزین تقویت شده

با فیبر کربنی (کد مقاله : ۱۲۱۸)

نکویی^{۱*} - عراقچی^۲ - عابدی^۳ - وحید دستجردی^۴

۱. دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده مهندسی مواد و متالورژی
۲. استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - مهندسی مواد و متالورژی
۳. دانشگاه یزد - دانشکده مهندسی معدن و متالورژی
۴. دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی مواد

چکیده :

با توجه به پیچیدگی پاسخ قطعات کامپوزیتی در برابر بارگذاری‌های دینامیکی و ضربه ای، نیاز است اطلاعات لازم درباره عیوب ایجاد شده و نحوه ی رشد آن‌ها بدست آید. در این مقاله، شبیه سازی کامپوزیت لایه‌ای زمینه رزین تقویت شده با فیبر کربنی در برابر منبع ترموگرافی به روش عددی اجزا محدود FEM در نرم افزار Multiphysic Comsol با فیزیک‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با وجود حفره در مرکز، تجمع تنش در همان نقطه بیشتر است و با اعمال فلاکس حرارتی به صفحه کامپوزیتی لایه‌ای در مدت زمان مشخص، دما افزایش می‌یابد و به دلیل سرد شدن کامپوزیت طی فرایند همرفت، دما با آهنگ خاصی تا دمای محیط کاهش می‌یابد. تغییر زوایای فیبر بر نحوه انتقال حرارت صفحه و لوله کامپوزیتی بی تاثیر بوده است.

کلمات کلیدی: ترموگرافی نوری، کامپوزیت لایه‌ای، شبیه سازی عددی اجزا محدود، رزین تقویت شده با

فیبر کربنی

Numerical simulation of optical thermography process in layered composites of resin matrix reinforced with carbon fiber

Nekui^{۱*} - Araghi^۲ - Abedi^۳ - Vahid Dastjerdi^۴

۱. Amir Kabir University of Technology, Department of Materials and Metallurgical Engineering

۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Materials and Metallurgical Engineering

۳. Yazd University, Department of mining and metallurgical engineering

۴. Isfahan University of Technology, Department of Material Engineering

Abstract :

Considering the complexity of the response of composite parts against dynamic and impact loads, it is necessary to obtain necessary information about the defects created and how they grow. In this article, the simulation of layered composite of carbon fiber-reinforced resin against a thermographic source using Finite Element



Method in Comsol Multiphysics software with different physics has been investigated.

The results show that by applying thermal flux to the layered composite plate for a certain period of time, the temperature increases. Due to the cooling of the composite during the convection process, the temperature decreases to the ambient temperature.

Keywords: Optical Thermography – Layered Composite – Numerical Simulation of Finite Elements – Reinforcement Resin Made With Carbon Fiber

۱- مقدمه :

اساس علم ترموگرافی، بر روی فیزیک حرارت و فیزیک امواج الکترومغناطیسی بنا نهاده شده است. تغییر دما در یک ماده موجب تغییر شکل و کرنش حرارتی می‌شود و اگر از تغییر شکل در اثر افزایش دما جلوگیری شود تنش‌های حرارتی در ماده ایجاد می‌شود. بنابراین میدان تغییر شکل مکانیکی و میدان درجه حرارت به یکدیگر وابسته هستند. برای حل همزمان روابط کوپل میدان جابه‌جایی و درجه حرارت در مواد ناهمسانگرد متشکل از چند لایه با زوایای مختلف الیاف از روش عددی اجزا محدود FEM استفاده می‌شود. خواص مکانیکی و حرارتی ناهمسانگرد مواد مرکب را می‌توان با تحلیل میکرومکانیک و بر اساس خواص الیاف و زمینه تعیین کرد [۷، ۸]. تشعشعات منتشر شده سطح بیرونی اجسام را می‌توان از طریق دوربین‌های ترموگرافی مشاهده نمود. از مزایای این فرایند، افزایش قابلیت اطمینان در بازرسی فنی و تجهیزات و امکان بازرسی در حین کار می‌باشد. مثلاً^{۸۸} و همکاران [۱]، در مطالعه آزمایشگاهی با ترموگرافی نوری متناوب، عیوب با قطره‌های مختلف در ماده مرکب با الیاف کربن در فرکانس‌های مختلف را شناسایی کردند. در مطالعه ایجه^{۸۹} و همکاران [۲] به رفتار ترموالاستیک کامپوزیت زمینه پلیمر تقویت شده با فیبر کربنی پرداخته شده است. چوی^{۹۰} و همکاران [۳]، عیوب مختلف صفحه فولادی را در مطالعه عددی و آزمایشگاهی با ترموگرافی نوری متناوب در فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. وو^{۹۱} و همکاران [۴]، عیوب موجود در کامپوزیت کربن - اپوکسی با استفاده از ترموگرافی متناوب در فرکانس‌های مختلف شناسایی نمودند و نتیجه گرفتند که عیوب در فرکانس کمتر، بهتر قابل شناسایی هستند. آودلیدیس^{۹۲} و همکاران [۵]، از ترموگرافی برای عیب‌یابی وصله متصل به کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن یا برم استفاده کرده‌اند. لهیری^{۹۳} و همکاران [۶]، با تعیین فرکانس بهینه در ترموگرافی برای نمونه‌های مختلف، عمق عیب را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله به بررسی و شبیه‌سازی فرایند ترموگرافی در کامپوزیت‌های لایه‌ای با هدف تشخیص عیوب پرداخته شده است. شبیه‌سازی‌ها به روش عددی اجزا محدود FEM^{۹۴} تحلیل ترموالاستیک صفحه کامپوزیت‌های لایه‌ای انجام شده است. اعمال عیب مصنوعی و اعمال حرارت پالسی در طول زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

^{۸۸} Meola

^{۸۹} Ejeh

^{۹۰} Choi

^{۹۱} WuD

^{۹۲} Avdelidis

^{۹۳} Lahiri

^{۹۴} Finite Element Model



پس از آن شبیه سازی حرارتی کامپوزیت‌های لایه‌ای به شکل صفحه و لوله و تاثیر زاویه فیبر کربن بر نتایج بررسی شده است.

۲- روش کار:

در این شبیه سازی ضریب انبساط حرارتی زمینه و فیبر کربنی با روش^{۹۵} ROM به دست آورده شده است. در حال حاضر راحت ترین روش برای پیش بینی خصوصیات مواد کامپوزیت می‌باشد که در معادله ۱ آورده شده است.

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (1)$$

ρ_c , ρ_f و ρ_m به ترتیب چگالی کامپوزیت، فیبر و زمینه می‌باشد. مدول الاستیه کامپوزیت در جهت طولی مطابق با معادله ۲ تخمین زده می‌شود. همچنین مدول الاستیه در جهت عرضی در معادله ۳ آورده شده است.

$$E_{cL} = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_{cT}} = \frac{1}{E_m} V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3)$$

ساده ترین روش استفاده شده برای به دست آوردن هدایت حرارتی (معادله ۴) کامپوزیت روش ROM می‌باشد. K_f , K_m و K_c به ترتیب هدایت حرارتی فیبر، زمینه و درون صفحه‌ای کامپوزیت می‌باشند. در معادله ۵ هدایت حرارتی عرضی آورده شده است.

$$K_c = V_f K_f + (1 - V_f) K_m \quad (4)$$

$$\frac{1}{K_c} = \frac{1}{K_f} V_f + \frac{1}{K_m} (1 - V_f) \quad (5)$$

در فرایند ترموگرافی، شار حرارتی که در لحظه اولیه گرمایش وارد ورق کامپوزیت می‌شود موجب گرادیان حرارتی در جسم می‌گردد، می‌توان ارتباط بین شار حرارتی و گرادیان حرارتی را با معادله ۶ بیان کرد.

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T \quad (6)$$

که q بردار شار حرارتی (W/m^2)، K تانسور ضریب هدایت حرارتی ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) و ∇T بردار گرادیان دمایی است.

شبیه سازی کامپوزیت‌های لایه‌ای با زاویه فیبرکربنی مشخص، در نرم افزار Comsol Multiphysics انجام شده است. از دو فیزیک انتقال حرارت^{۹۶} Layered Shells و Solid^{۹۷} در شبیه سازی‌ها به کار گرفته شده است.

^{۹۵} Rule of Matrix

^{۹۶} Heat Transfer in Layered Shells

^{۹۷} Heat Transfer in Solid



۲-۱ شبیه سازی ترموالاستیک صفحه کامپوزیت لایه‌ای

در شبیه سازی ترموالاستیک، یک صفحه مربعی شکل از کامپوزیت لایه‌ای زمینه رزین تقویت شده با فیبر کربنی (درصد حجمی فیبر ۰/۶) با ضلع ۳۰ و ضخامت ۰/۱۳۲ سانتی متر به صورت ۶ لایه با ۴ نوع مختلف زوایای فیبر در نظر گرفته شده است. توان پرتو از ۱۰ تا ۲۰۰ وات متغیر می‌باشد. فلاکس گرمایی پرتو به صورت Convective با ضریب انتقال حرارت $30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ به اولین لایه کامپوزیت اعمال شده است.

۲-۲ شبیه سازی حرارتی صفحه کامپوزیت لایه‌ای

شبیه سازی حرارتی صفحه کامپوزیت لایه‌ای بر اساس پارامترهای متریال و پارامترهای عمومی و حرارتی کامپوزیت در جدول ۱ انجام شده است [۷]. زوایای فیبر صفر درجه است. شرایط مرزی به صورتی در نظر گرفته شده است که لایه بالایی صفحه کامپوزیت به مدت ۱۲۰ ثانیه تحت فلاکس حرارتی قرار می‌گیرد. همچنین از ۱۲۰ ثانیه تا ۳۶۰ ثانیه، شرایط مرزی همرفت به تمام صفحات بیرونی کامپوزیت اعمال می‌شود. دمای اولیه اطراف صفحه ۳۰۰ کلوین می‌باشد.

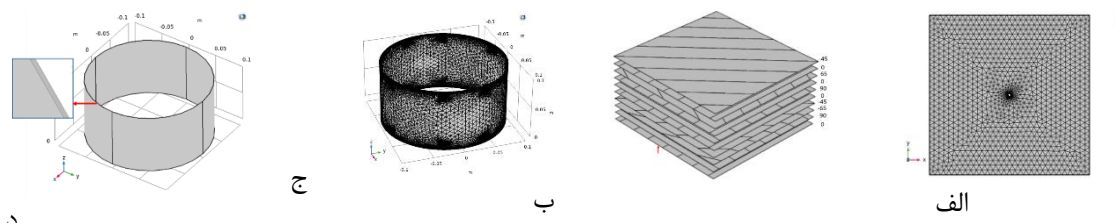
جدول ۱ - پارامترهای متریال و پارامترهای عمومی و حرارتی کامپوزیت

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ضریب انتقال حرارت در راستای x (W/mk)	۱/۵	عرض نمونه (m)	۰/۱
ضریب انتقال حرارت در راستای y (W/mk)	۱	ضخامت نمونه (mm)	۲
ضریب انتقال حرارت در راستای z (W/mk)	۱	کل زمان حل مسئله (s)	۳۶۰
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg.k)	۸۴۰	ضخامت هر لایه (mm)	۰/۲
چگالی (kg/m^3)	۱۹۶۰	درصد حجمی	۰/۶
تعداد لایه	۱۰	حرارت ورودی (W/m^2)	۱۰۰۰۰۰
طول نمونه (m)	۰/۲		

۲-۳ شبیه سازی حرارتی لوله کامپوزیت لایه‌ای

شبیه سازی حرارتی لوله کامپوزیت ۴ لایه‌ای با زوایای فیبر ۰، ۶۵، ۶۵- و ۰ درجه و با قطر $m/2$ ، ارتفاع $m/1$ و ضخامت $mm/8$ نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بقیه پارامترها مشابه با شبیه سازی حرارتی صفحه کامپوزیت می‌باشد. با هدف تحلیل دقیق تر به ویژه در نواحی حفره و تطبیق بهتر با مرزها از شبکه بندی بی سازمان مثلثی استفاده شده است.

در شکل ۱ به ترتیب نحوه شبکه بندی صفحه کامپوزیت، هندسه کامپوزیت ۱۰ لایه صفحه‌ای، شبکه بندی لوله کامپوزیتی و هندسه لوله کامپوزیتی به صورت جسم صلب نشان داده شده است.

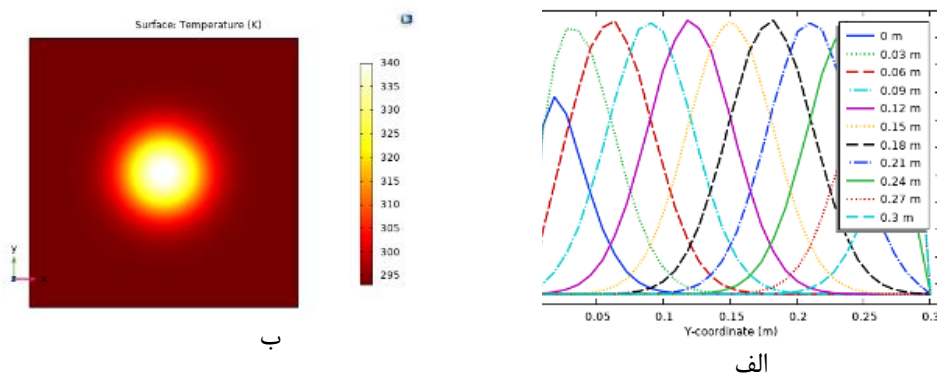


شکل ۱ - (الف) نحوه شبکه بندی صفحه کامپوزیت، (ب) هندسه کامپوزیت ۱۰ لایه صفحه‌ای، (ج) شبکه بندی لوله

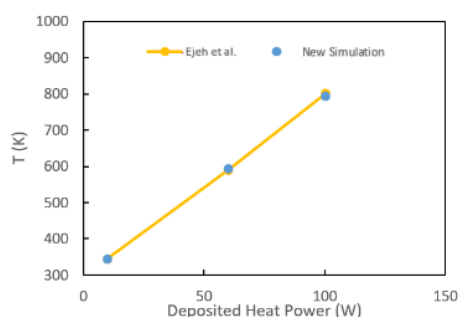
کامپوزیتی و (د) هندسه لوله کامپوزیتی به صورت جسم صلب در فیزیک Solid

۳- نتایج و بحث :

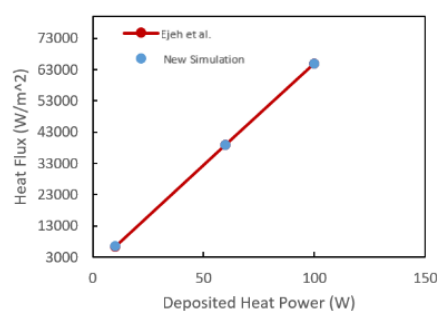
نتایج شبیه سازی ترموالاستیک صفحه کامپوزیت لایه‌ای انجام شده در شکل ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود تمامی نتایج تغییرات دما و تغییرات فلاکس حرارتی و توزیع تنش حرارتی مشابه با مطالعه ایجه و همکاران [۲] می‌باشد.



شکل ۲- (الف) تغییرات دما در راستای Y و (ب) کانتور توزیع دما در مرکز لایه کامپوزیت



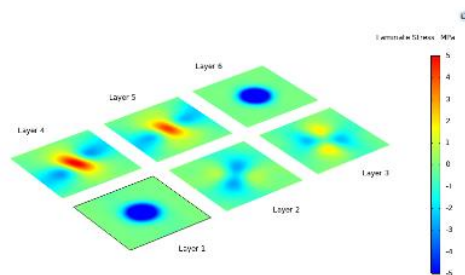
ب



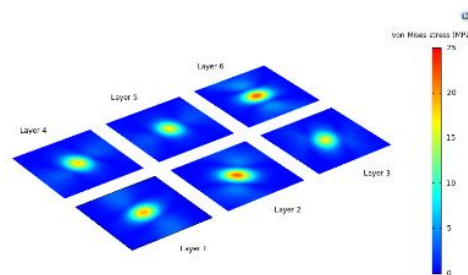
الف

شکل ۳ - (الف) تغییرات فلاکس حرارتی بر حسب افزایش توان پرتو و (ب) تغییرات دما بر حسب افزایش توان

پرتو



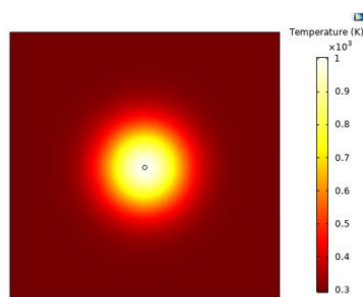
ب



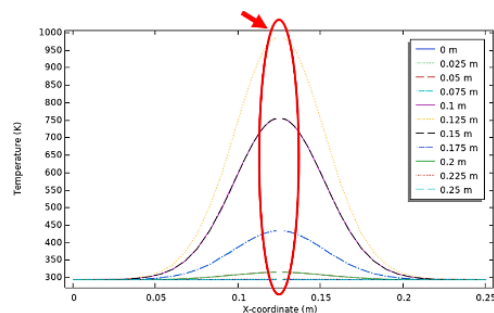
الف

شکل ۴ - توزیع تنش حرارتی Von Mises در صفحه میانی لایه‌ها و (ب) توزیع مولفه تنش حرارتی در جهت فیبر کربنی

جهت مشاهده تاثیر عیب بر توزیع دما و تنش حرارتی کامپوزیت، حفره ای در مرکز لایه میانی کامپوزیت لایه‌ای با شعاع 0.02 m در مدل حل شده قبلی در نظر گرفته شد. نتایج تغییر دما در راستای X و کانتور توزیع دما در مرکز لایه کامپوزیت به ترتیب در شکل ۵ الف و ب آورده شده است.



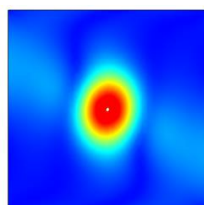
ب



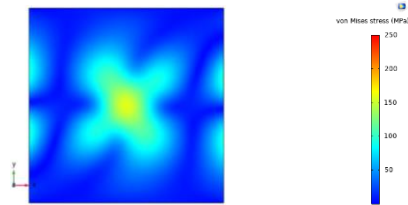
الف

شکل ۵ - الف) تغییرات دما در راستای X و (ب) کانتور توزیع دما در مرکز لایه کامپوزیت

با مقایسه توزیع تنش‌های قبل و بعد از وجود حفره (شکل ۶) مشاهده می‌شود که با وجود حفره، تجمع تنش در مرکز بیشتر است و جایی که دقیقاً حفره وجود دارد توزیع تنش تغییر کرده است.



ب

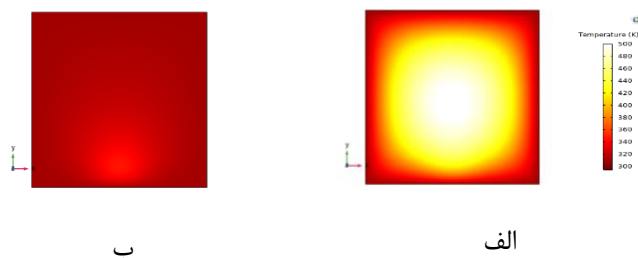


الف

شکل ۶- کانتور توزیع تنش الف) قبل از حفره و (ب) بعد از حفره



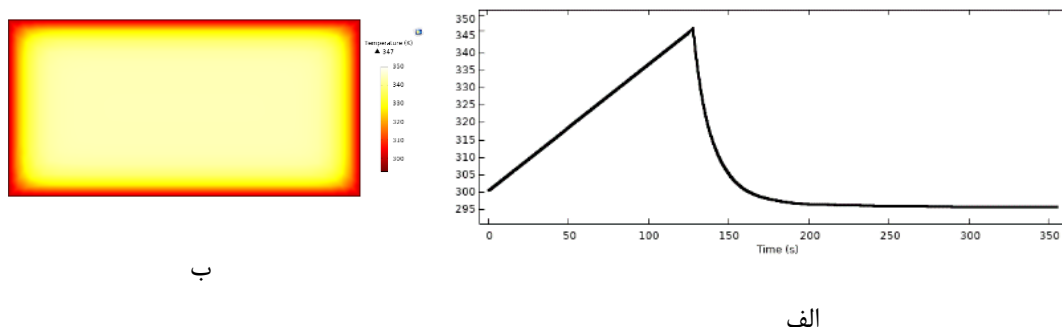
در ادامه به اعمال حرارت پالسی در طول زمان پرداخته شده است که در ۴ ثانیه اول، فلاکس گرمایی پرتو به لایه بیرونی کامپوزیت اعمال شده است و در ۴ ثانیه دوم فلاکس گرمایی صفر می‌شود. در شکل ۷ الف و ب به ترتیب کانتور توزیع دما در مرکز کامپوزیت برای دو زمان ۲ و ۶ ثانیه نشان داده شده است.



شکل ۷- کانتور توزیع دما در مرکز کامپوزیت (الف) ۲ ثانیه و (ب) ۶ ثانیه

۳-۱ شبیه سازی حرارتی صفحه کامپوزیت لایه‌ای

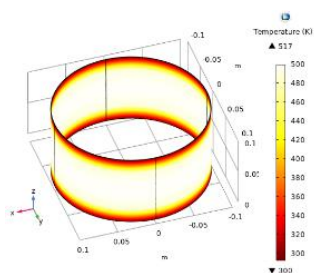
نتایج شبیه سازی با فیزیک انتقال حرارت Layered Shells و Solid (شکل ۸) نشان می‌دهد، دما تا زمان ۱۲۰ ثانیه به حداکثر خود ۳۴۷ کلوین می‌رسد و پس از اعمال همرفت، دما تا دمای محیط کاهش می‌یابد. شبیه سازی انجام شده با شرایط بالا مجدداً برای زوایای فیبر ۰، ۹۰، ۶۵، ۴۵، ۰، ۹۰، ۶۵، ۴۵ و ۰ درجه تکرار شده است و اختلاف زاویه فیبر، تغییری در نحوه انتقال حرارت ایجاد نکرده است.



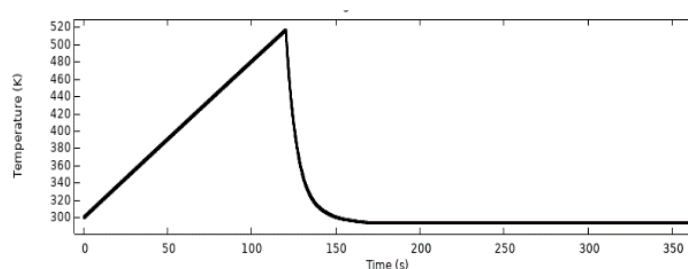
شکل ۸ - (الف) نمودار دما زمان در مرکز صفحه کامپوزیت و (ب) کانتور تغییرات دما در زمان ۱۲۰ ثانیه

۳-۲ شبیه سازی حرارتی لوله کامپوزیتی

در ادامه، شبیه سازی حرارتی لوله کامپوزیتی با دو فیزیک انتقال حرارت Layered Shells و Solid انجام شده است. در شکل ۹ الف و ب به ترتیب نمودار دما - زمان در مرکز سطح لوله کامپوزیت و کانتور تغییرات دما در زمان ۱۲۰ ثانیه نشان داده شده است. تغییر زاویه فیبر بر نتایج بی تأثیر بوده است.

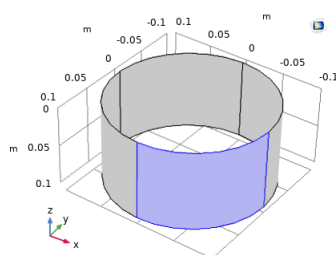


ب

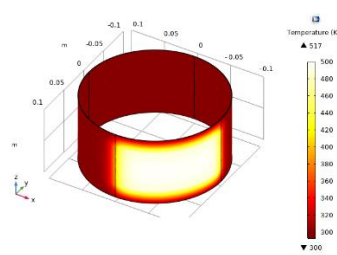


الف

شکل ۹ - الف) نمودار دما در مرکز صفحه کامپوزیت و ب) کانتور تغییرات دما در زمان ۱۲۰ ثانیه با توجه به اینکه در تست ترموگرافی، کل بخش سطح خارجی لوله کامپوزیتی تحت فلاکس حرارتی قرار نمی‌گیرد، با ثابت قرار دادن تمام شرایط، فلاکس حرارتی به بخشی از سطح لوله اعمال شده که در شکل ۱۰ کانتور تغییرات دمای آن نشان داده شده است.



ب



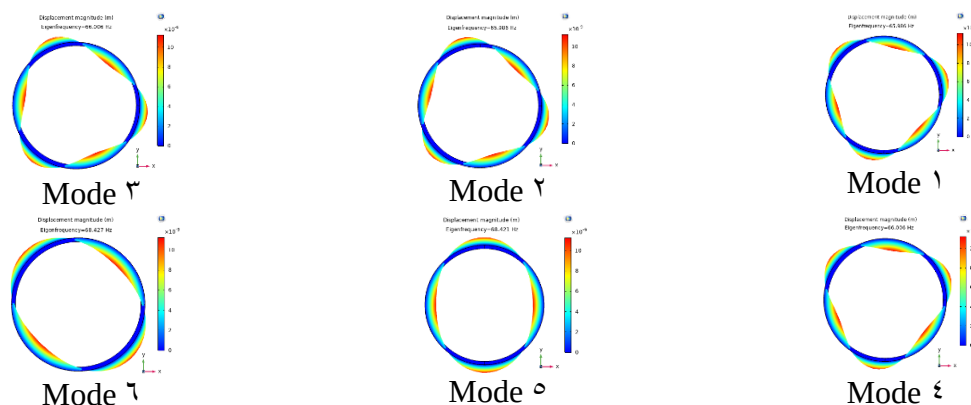
الف

شکل ۱۰ - الف) کانتور تغییرات دما در زمان ۱۲۰ ثانیه و ب) شرایط مرزی اعمال فلاکس حرارتی

در حل مسئله با فیزیک انتقال حرارت Solid جهت گیری الیاف کربنی در جسم صلب با جهت گیری محور مختصات از طریق Coordinate system اعمال شده است به صورتی که زاویه صفر فیبر کربنی در راستای محور X در نظر گرفته شده است. آنالیز مدال با هدف صحت‌گذاری جهت گیری از طریق Coordinate system برای لوله‌های کامپوزیتی انجام شده است. در شرایط مرزی، لبه ابتدا و انتهای لوله ثابت و بقیه سطوح، آزاد در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۱ کانتور جابه‌جایی برای ۶ فرکانس طبیعی اولیه لوله کامپوزیتی با زوایای فیبر ۰، ۴۵، ۶۵ و ۰ درجه و زوایای فیبر ۰، ۹۰، ۴۵ و ۰ درجه نشان داده شده است.

با توجه به تغییرات نتایج آنالیز مدال دو مسئله، می‌توان نتیجه گرفت تغییر زوایای فیبر، بر فرکانس‌های طبیعی بی‌تاثیر بوده است. بنابراین تغییر زاویه فیبر، پارامتری بی‌تاثیری بر نحوه انتقال حرارت و آنالیز مدال لوله کامپوزیتی ۴ لایه می‌باشد. در نتیجه تغییر جهت گیری محور مختصات از طریق Coordinate system بر نتایج لوله کامپوزیتی ۴ لایه تفاوتی ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۱ - کانتور جابه‌جایی برای ۶ فرکانس طبیعی اولیه لوله کامپوزیتی با زوایای فیبر ۰، ۶۵، ۹۰، -۴۵، ۰ درجه و زوایای فیبر ۰، ۴۵، ۹۰، -۴۵، ۰ درجه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش در تحلیل ترمو الاستیک صفحه کامپوزیت‌های لایه‌ای، اعمال عیب مصنوعی و اعمال حرارت پالسی در طول زمان نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با وجود حفره در مرکز، تجمع تنش در همان نقطه بیشتر است و توزیع تنش تغییر کرده است. نتایج خروجی شبیه سازی حرارتی نشان می‌دهد با اعمال فلاکس حرارتی به صفحه کامپوزیتی ۱۰ لایه، در زمان ۱۲۰ ثانیه، دما تا ۳۴۷ کلوین افزایش می‌یابد و بعد از همرفت به دلیل سرد شدن کامپوزیت طی فرایند همرفت، دما با آهنگ خاصی تا دمای محیط کاهش می‌یابد. دو فیزیک " انتقال حرارت Layered Shells " و " انتقال حرارت Solid " در شبیه سازی صفحه و لوله کامپوزیتی استفاده شده است که تنها تفاوت دو فیزیک در قابلیت آن‌ها برای نحوه پیاده سازی شرایط شبیه سازی است. تغییر زوایای فیبر بر نحوه انتقال حرارت صفحه و لوله کامپوزیتی بی تاثیر بوده است. نتایج آنالیز مدال نشان می‌دهد که تغییر زوایای فیبر، بر فرکانس‌های طبیعی بی تاثیر بوده است.

۵- مراجع

- [۱] Meola C, Carlomagno GM, Squillace A, Vitiello A (۲۰۰۶) Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. Eng Fail Anal ۱۳(۳): ۳۸۰-۳۸۸.
- [۲] Ejeh, Ch J & Barsoum I, "Thermo-elastic behaviour of carbon-fiber reinforced polymer and the effect of adding nanoparticles at elevated heat intensity", Heliyon journal, ۲۰۲۰.
- [۳] Choi M, Kang K, Park J, Kim W, Kim K (۲۰۰۸) Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography. NDT&E Int ۴۱: ۱۱۹-۱۲۴.



[۴] WuD, Zweschper Th., Salerno A., and Busse G. "Inspection of aerospace structures with ultrasound lock-in-Thermography", Proceedings of the ۱۵th World Conference on Nondestructive Testing, Roma, Italy, ۲۰۰۰

[۵] Avdelidis, N., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X., Marioli-Riga, Z. and Almond, D. P., "A Thermographic Comparison Study for the Assessment of Composite Patches" Infrared Physics & Technology, Vol. ۴۵, No. ۴, pp. ۲۹۱-۲۹۹, ۲۰۰۴.

[۶] Lahiri BB, Bagavathiappan S, ReshmiPR, Philip J, Jayakumar T, Raj B (۲۰۱۲) Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. Infrared Phys&Techn ۵۵(۲-۳):۱۹۱-۱۹۹

[۷] صفری چایکندی، جعفر. شبیه سازی آزمایش ترموگرافی نوری برای شناسایی جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب. پایان نامه کارشناسی ارشد پژوهشگاه فضایی ایران. مرداد ماه ۱۳۹۳

[۸] Rolfes, R & Rohwer, K, "Integrated thermal ad mechanical analysis of composite plates and shells", composites science and technology, ۲۰۰۰.

[۹] J. Argyris, L. Tenek, F. Oberg, " A multilayer composite triangular element for steady-state A multilayer composite triangular element for steady-state conduction/convection/radiation heat transfer in complex shells", Computer Melhods in Applied Mechanics and Engineering, ۱۹۹۴. April t۹۹۴



عنوان سنتز هیدروژل مبتنی بر (۲-هیدروکسی اتیل) متاکریلات/پلی وینیل پیرولیدون توسط تابش گاما (کد مقاله : ۱۲۲۲)

زهره رفیعی سرمزده*^۱، نسرين شيخ^۲، سيد مرتضى زاهدى ديزجى^۳، يحيى خيرخواه^۲

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران
۳. پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران- ایران

چکیده:

در این مطالعه، هیدروژل‌های شبکه‌ای نیم‌درهم‌رونده (*semi-IPN*) مبتنی بر پلی (۲-هیدروکسی اتیل متاکریلات) (*PHEMA*) و پلی وینیل پیرولیدون (*PVP*) با استفاده از تابش گاما سنتز شدند. هدف، بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی هیدروژل‌ها از طریق بهینه‌سازی فرمولاسیون و بررسی تأثیر پارامترهایی مانند نسبت مونومر به پلیمر، محتوای آب و دز تابش بود. نتایج نشان داد که فرمولاسیون بهینه با نسبت وزنی ۵۰:۵۰ از *HEMA* به *PVP*، محتوای آب ۶۰٪ وزنی و دز تابش ۲۰ *kGy*، بالاترین محتوای ژل و آب تعادلی را داراست. طیف‌سنجی *FTIR* تأیید کرد که *PVP* به‌طور موفقیت‌آمیزی در شبکه هیدروژل گنجانده شده و ساختار متخلخلی با توزیع یکنواخت منافذ ایجاد شده است. آزمون فشاری نیز نشان داد که هیدروژل سنتز شده بهینه از الاستیسیته و استحکام فشاری مناسبی برخوردار است.

کلمات کلیدی: هیدروژل، شبکه‌ای نیم‌درهم‌رونده، سنتز، پرتوافزایی، مشخصه‌یابی

Synthesis of (۲-hydroxyethyl) methacrylate/polyvinylpyrrolidone-based hydrogel by gamma irradiation

Rafiei-Sarmazdeh. Z^{۱*}, Nasrin Sheikh^۲, Zahedi-Dizaji. S. M^۳, Kheyrkhah. Y^۲

۱. Nuclear Fuel Cycle School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
۲. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
۳. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract:

In this study, semi-interpenetrating network (*semi-IPN*) hydrogels based on poly(۲-hydroxyethyl methacrylate) (*PHEMA*) and polyvinylpyrrolidone (*PVP*) were synthesized using gamma radiation. The primary objective was to enhance the mechanical and physical properties of the hydrogels by optimizing the formulation and examining the effects of



parameters such as the monomer-to-polymer ratio, water content, and radiation dose. The results indicated that the optimal formulation, with a weight ratio of ۵۰:۵۰ of HEMA to PVP, water content of ۶۰٪ by weight, and a radiation dose of ۲۰ kGy, exhibited the highest gel and equilibrium water content. FTIR spectroscopy confirmed that PVP was successfully incorporated into the hydrogel network, resulting in a porous structure with uniformly distributed pores. Compression tests also demonstrated that the optimized synthesized hydrogel possesses adequate elasticity and compressive strength.

Key words: Hydrogel, Semi-Interpenetrating Network, Synthesis, Gamma Irradiation, Characterization

۱ - مقدمه:

هیدروژل‌های پلی (۲-هیدروکسی اتیل متاکریلات) (PHEMA) برای کاربردهای مختلف همچون دارویی، زیست پزشکی و تمیز سازی آثار هنری استفاده می‌شوند. ویکترله و لیم^{۹۸} اولین کسانی بودند که پیشنهاد کردند هیدروژلی مبتنی بر پلی (۲-هیدروکسی اتیل متاکریلات) می‌تواند ماده‌ای زیست سازگار باشد [۱، ۲]. مزایای دیگر هیدروژل‌ها شامل غیرسمی بودن، عدم ایجاد واکنش آنتی‌ژنی^{۹۹}، عدم تحریک‌پذیری و پایداری شیمیایی آن‌ها است. تورم بالای هیدروژل‌ها و قابلیت این مواد در نگهداری حلال، آن‌ها را به مواد ایده‌آلی برای دارورسانی و تمیز سازی آثار هنری تبدیل کرده است [۱]. با این وجود هیدروژل‌های پلیمری به دلیل ساختار خود، معمولاً دارای خواص مکانیکی ضعیف هستند. یکی از راه‌حل‌های مؤثر برای بهبود این خواص، استفاده از هیدروژل‌های شبکه‌ای درهم رونده (IPN) و شبکه‌ای نیم در هم رونده (semi-IPN) است که با ترکیب دو یا چند شبکه پلیمری، به افزایش خواص مکانیکی کمک می‌کنند و در نتیجه عملکرد بهتری در کاربردهای مختلف ارائه می‌دهند [۳، ۴].

هیدروژل‌های IPN و semi-IPN ترکیبی از دو یا چند شبکه پلیمری هستند که به صورت همزمان و درهم‌تنیده شده‌اند. این ساختار خاص به هیدروژل‌ها اجازه می‌دهد تا خواص مکانیکی و شیمیایی بهتری نسبت به هیدروژل‌های تک شبکه‌ای داشته باشند [۳، ۴]. به عنوان مثال، Tamburini [۵] و Domingues [۶] سنتز هیدروژل‌های بر پایه پلی هیدروکسی اتیل متاکریلات، p(HEMA)، شبکه نیمه نفوذ شده با پلی‌وینیل پیرولیدون خطی (PVP) را با استفاده از سنتز شیمیایی حرارتی به منظور استفاده در پاک سازی آثار هنری بهینه‌سازی نمودند. در پژوهش دیگری، هیدروژل‌های (HEMA-PVP) با پلیمریزاسیون رادیکال و به دنبال آن عملیات حرارتی به منظور پاسخ دهی به ید بازگذاری شده تهیه شدند [۷]. با این وجود به دلیل کاربرد خاص این نوع هیدروژل‌ها نیاز است که هیدروژل از خلوص بالایی برخوردار باشد و بتوان با کنترل شرایط ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هیدروژل‌ها را تغییر داد.

سنتز هیدروژل‌ها به روش پرتویی، یک تکنیک نوین و کارآمد برای تولید هیدروژل‌های با خواص بهینه است که در آن از پرتوفاوری برای ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیره‌های پلیمری استفاده می‌شود [۸، ۹]. کار حاضر به مطالعه سنتز پرتویی و

^{۹۸} Wichterle and Lim

^{۹۹} Non-antigenicity



بهینه سازی فرمولاسیون هیدروژل شبکه ای نیم در هم رونده مبتنی بر ۲-هیدروکسی اتیل متاکریلات و پلی وینیل پیرولیدون (PVP) با استفاده از تابش گاما و بررسی خواص آن می‌پردازد.

۲- روش کار:

۲-۱- مواد

۲-هیدروکسی اتیل متاکریلات (HEMA) با خلوص ۹۷٪ و متیلن بیس آکریل آمید (MBA) به عنوان عامل اتصال عرضی از شرکت مرک خریداری شدند. PVP با وزن مولکولی ۱۰,۰۰۰ از آلدیچ تأمین گردید. تمام مواد بدون هر گونه خالص سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- سنتز پرتویی هیدروژل IPN

با ترکیب مقادیر مختلفی از اجزا (مونومر PVP، HEMA، آب و MBA) در حضور تابش گاما، شبکه‌های نیم‌درهم‌نفوذی ایجاد شدند. برای این منظور فرمول‌های مختلف هیدروژل برای ایجاد محلول‌هایی با سه نسبت مختلف مونومر به پلیمر (۵۰:۵۰، ۴۰:۶۰ و ۳۰:۷۰) و مقادیر متفاوت آب ترکیب شدند. در تمامی فرمول‌ها، محتوای MBA به میزان ۰/۵ درصد مولی مونومر در نظر گرفته شد. محلول‌ها به مدت ۱۰ دقیقه اکسیژن زدایی شده و سپس با دزهای مختلف ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تابش دهی شدند. سپس هر نمونه به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شد تا مونومرهای واکنش‌نشد از هیدروژل جدا شوند و سپس با استفاده از خشک‌کن انجمادی خشک گردیدند.

۲-۳- مشخصه‌یابی

برای پرتودهی نمونه‌ها از گاماسل مستقر در پژوهشکده کاربرد پرتوها-سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شد. تابش در دستگاه ۲۲۰ Gamma cell با نرخ دز ۱/۲۴ Gy/s انجام شد. طیف FTIR با استفاده از مدل Bruker Tensor ۲۷ در بازه ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm⁻¹ ثبت گردید. برای تعیین ساختار، ابعاد، مورفولوژی و شکل هیدروژل‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان (FE-SEM) مدل TESCAN MIRA ۳ استفاده شد. محتوای ژل هر نمونه به عنوان وزن ژل خشک تقسیم بر وزن کل مونومر و پلیمر محاسبه گردید. برای هر نمونه هیدروژل، مقدار آبی که در ساختار جذب می‌شود پس از غوطه‌وری در آب به یک مقدار ثابت و اشباع می‌رسد. معادله ۱ برای محاسبه محتوای آب تعادلی (EWC) که نمایانگر آب دوستی هیدروژل می‌باشد، استفاده می‌شود.

$$EWC (\%) = \frac{(W_w - W_d)}{W_w} \times 100 \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن Wd وزن ژل خشک و Ww وزن ژل اشباع شده است.

به منظور بررسی خواص مقاومت فشاری، نمونه‌های دیسک‌شکل از هیدروژل با قطر ۲/۳ cm تهیه شدند. نیروی اعمال شده به سطح برابر با ۲g/cm^۲ ۵۰ است. بر این اساس، نیروی معادل با وزن ۴۰۰ g به سطح نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه اعمال شد. پس از این مدت، نیروی اعمال شده برداشته شده و ارتفاع دیسک‌ها در چهار نقطه بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری، ثبت و میان‌گیری شد.



۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی فرمولاسیون بهینه

در مرحله اول، برای بررسی تأثیر دز مورد نیاز هیدروژل‌ها با سه نسبت مختلف مونومر به پلیمر (۵۰:۵۰، ۴۰:۶۰، ۳۰:۷۰) و دو محتوای آبی متفاوت (۸۷/۵ و ۷۵) در دزهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سنتز شدند. جدول ۱ محتوای ژل نمونه‌های هیدروژل تهیه شده با نسبت‌های مختلف مونومر به پلیمر، محتوای آب و دزهای جذب شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: محتوای ژل فرمولاسیون‌های مختلف از هیدروژل‌های شبکه‌ای نیم در هم رونده

محتوای ژل (%)	دز جذبی (kGy)	محتوای آب (% وزنی)	HEMA/PVP (نسبت وزنی)
۵۰.۹۷			۵۰:۵۰
۳۳.۸۹	۱۰	۸۷.۵	۴۰:۶۰
۱۸.۵			۳۰:۷۰
۵۱			۵۰:۵۰
۳۶	۲۰	۸۷.۵	۴۰:۶۰
۱۸			۳۰:۷۰
۵۰.۹۷			۵۰:۵۰
۳۷	۳۰	۸۷.۵	۴۰:۶۰
۱۸.۷۲			۳۰:۷۰
۵۳.۷۲			۵۰:۵۰
۴۲.۲۹	۱۰	۷۵	۴۰:۶۰
۳۱.۷۹			۳۰:۷۰
۵۵.۶۱	۲۰	۷۵	۵۰:۵۰



۴۰:۶۰	۴۴.۴۶
۳۰:۷۰	۳۵.۷۵
۵۰:۵۰	۵۵.۴۸
۴۰:۶۰	۴۳.۳۳
۳۰:۷۰	۳۵.۷۳

بررسی نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که محتوای آب ۸۷/۵٪، در نسبت وزنی ۵۰:۵۰ محتوای ژل در دزهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب برابر با ۵۰/۹۷٪، ۵۱٪ و ۵۰/۹۷٪ می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده پایداری محتوای ژل در این شرایط است. در نسبت وزنی ۴۰:۶۰، محتوای ژل در دز ۱۰ kGy به ۳۳/۸۹٪ و در دز ۲۰ kGy و ۳۰ به ۳۶ و ۳۷٪ افزایش یافت، که نشان‌دهنده تأثیر مثبت افزایش دز تابش بر تشکیل ساختار ژل است. با این حال، در نسبت وزنی ۳۰:۷۰، محتوای ژل در دزهای مختلف (به عنوان مثال ۱۸/۵٪ در ۱۰ kGy و ۱۸٪ در ۲۰ kGy) به طور قابل توجهی پایین تر از سایر نتایج است که ممکن است به دلیل کاهش نسبت مونومر به پلیمر و عدم ایجاد پیوندهای عرضی کافی باشد.

علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که کاهش محتوای آب از ۸۷/۵٪ به ۷۵٪ منجر به افزایش محتوای ژل در برخی از نمونه‌ها می‌شود. به عنوان مثال، در نسبت وزنی ۵۰:۵۰ با محتوای آب ۷۵٪، محتوای ژل در دزهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به ترتیب برابر با ۵۳/۷۲٪، ۵۵/۶۱٪ و ۵۵/۴۸٪ است. از آنجایی که هیدروژل‌ها با محتوای آب متفاوت در نسبت وزنی ۵۰:۵۰ از مونومر به پلیمر که تحت تابش گاما با دز ۲۰ kGy قرار گرفته بودند، منجر به تولید هیدروژل با محتوای ژل بالا شدند، این نسبت وزنی و دز تابش برای ادامه کار انتخاب شد.

به منظور بهینه سازی فرمولاسیون هیدروژل‌ها اثر محتوای آب نیز بر عملکرد هیدروژل بررسی شد. جدول ۲ نتایج مربوط به محتوای ژل و مقدار آب تعادلی هیدروژل‌های تهیه شده با محتوای آب مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲: محتوای ژل و آب تعادلی هیدروژل با نسبت مونومر به پلیمر ۵۰:۵۰، دز جذبی ۲۰ kGy و در محتوای آب متفاوت

HEMA:PVP (نسبت وزنی)	دز جذبی (kGy)	محتوای آب (wt.%)	محتوای ژل (%)	آب تعادلی (%)
		۸۷.۵	۵۱	۵۳.۶۶
۵۰:۵۰	۲۰	۷۵	۵۶.۸۲	۵۵.۶۵
		۶۰	۷۳	۶۶.۴۴

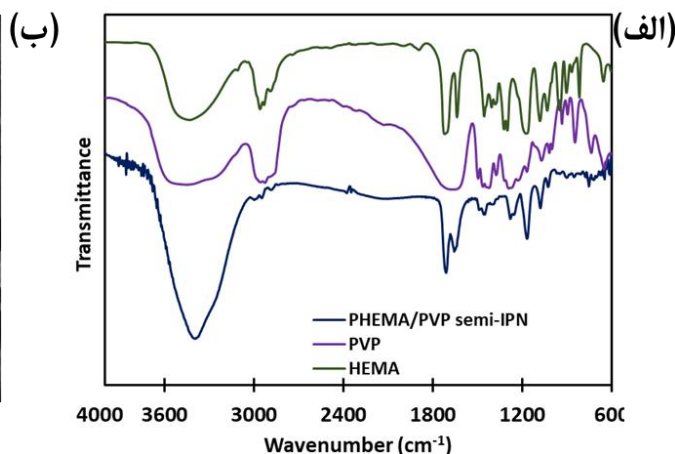
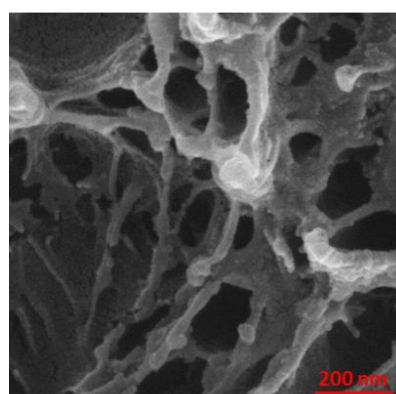


۵۰	۸۵.۰۵	۵۴.۵۲
۴۰	۸۶.۸۸	۵۲.۶۵

هیدروژل‌ها برای کاربرد در حوزه‌های مختلف باید دارای انعطاف‌پذیری، چسبندگی و استحکام مناسب، همچنین محتوای آب تعادلی بالایی باشد. نتایج نشان می‌دهد هیدروژل با ۶۰ درصد وزنی آب بالاترین EWC را دارد. بررسی ظاهری نشان داد که این نمونه نرم و انعطاف‌پذیر بوده و دارای چسبندگی و پیوستگی ساختاری کافی می‌باشد، از این رو بررسی خواص برای این هیدروژل انجام شد.

۲-۳- بررسی مشخصات

طیف‌سنجی FTIR برای مشخصه‌یابی ساختار هیدروژل IPN استفاده شد. طیف IR نمونه‌های PHEMA/PVP در شکل ۱ الف ارائه شده است. پیک مشخصه گروه هیدروکسیل موجود در فاصله ۱-۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰، پیک ۱۷۲۰ مشخصه پیوند کربونیل، ۱۶۳۷ مشخصه پیوند دوگانه کربن-کربن، در HEMA است [۱۰]. پیک موجود در ۳۰۰۰-۳۵۰۰ مشخصه پیوند N-H، ۲۹۵۱ مشخصه C-H، پیک ۱۶۷۰ مشخصه C=O، و ۱۴۶۷ و ۱۲۹۶ مدهای ارتعاشی C-N در PVP است [۱۱]. در طیف FTIR هیدروژل‌های نیم‌درهم‌نفوذی PHEMA/PVP، قله مربوط به PVP به سمت عدد موج پایین‌تر (۱-۱۶۴۹) جابجا می‌شود، در مقایسه با قله PVP در ۱-۱۶۵۶، که نشان‌دهنده وجود پیوند هیدروژنی بین گروه کربونیل PVP و گروه کربوکسیل PHEMA است. باند در ۱-۲۹۰۰ مربوط به ارتعاش کششی CH آلیفاتیک است. باندهای اصلی مشخصه برای اجزای HEMA شامل گروه C=O در ۱-۱۷۲۲ و ارتعاش O-H در ۱-۳۵۰۰ هستند [۲].



شکل (۱) (الف) طیف FTIR از هیدروژل شبکه‌ای نیم‌درهم‌رونده PHEMA/PVP و (ب) میکروگراف FESEM از هیدروژل PHEMA/PVP

مورفولوژی سطح هیدروژل حاصل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. شکل ۱ ب میکروگراف الکترونی ثبت شده از سطح مقطع شکست هیدروژل منتخب را نشان می‌دهد. ژل خشک دارای ساختار متخلخل بارزی است که توزیع نسبتاً



یکنواختی از منافذ به شکل بیضوی دارد. ماهیت مرتبط منافذ به وضوح در تصاویر SEM قابل مشاهده است. همچنین ساختار لایه‌ای با بافتی شبیه به لانه زنبور مشاهده می‌شود.

تست استحکام فشاری یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی خواص مکانیکی هیدروژل‌ها است که با اندازه‌گیری مقاومت نمونه در برابر نیروی فشاری انجام می‌شود. در این روش، نسبت ارتفاع ثانویه به ارتفاع اولیه (که معمولاً به عنوان کرنش فشاری شناخته می‌شود) به عنوان معیاری برای تعیین میزان تغییر شکل نمونه تحت فشار استفاده می‌شود. این نسبت می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد الاستیسیته، سفتی و رفتار مکانیکی هیدروژل در شرایط مختلف بارگذاری ارائه دهد. با تحلیل این داده‌ها، می‌توان به درک بهتری از ساختار شبکه‌ای هیدروژل، توزیع پیوندهای شیمیایی و فیزیکی و همچنین تأثیر پارامترهایی مانند غلظت پلیمر، میزان اتصالات عرضی و شرایط محیطی بر خواص مکانیکی هیدروژل دست یافت. الاستیسیته ژل از طریق آزمون مقاومت فشاری ارزیابی شد. نسبت $0.1/L$ برای ژل برابر با 0.03 ± 0.06 می‌باشد. این عدد نشان می‌دهد که هیدروژل از خواص الاستیسیته مناسبی برخوردار می‌باشد و بعد از حذف نیرو فشاری می‌تواند به حالت اولیه برگردد.

۴- نتیجه‌گیری:

در این مطالعه، هیدروژل‌های شبکه‌ای نیم‌درهم رونده جدید از طریق پلیمریزاسیون رادیکالی/پیونددهی HEMA با PVP به عنوان یک ماده درهم‌نفوذی به روش پرتوافراوری تهیه شدند. بررسی محتوای ژل و آب تعادلی فرمولاسیون بهینه حاوی ۶٪ وزنی آب، نسبت وزنی مونومر به پلیمر ۵۰:۵۰، مقدار ۰/۵٪ مولی نسبه به مونومر از اتصال دهنده عرضی MBA و در دز ۲۰ kGy را مشخص نمود. اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی FTIR تأیید کرد که PVP در هیدروژل‌های نیم‌درهم رونده گنجانده شده است. ساختار متخلخل نمونه‌های PHEMA/PVP با استفاده از SEM مشاهده شد. در این تحقیق، سنتز هیدروژل به روش پرتویی نشان داد که ساختار و استحکام فشاری مطلوب آن با نتایج حاصل از روش‌های شیمیایی حرارتی مشابه است. استفاده از روش پرتویی می‌تواند مزایای خاصی همچون کاهش زمان واکنش و بهبود یکنواختی ساختار در مقایسه با روش‌های سنتی داشته باشد. با این حال، برخی محدودیت‌ها در این تحقیق وجود دارد. به عنوان مثال، تأثیرات طولانی مدت دما و pH بر روی خواص هیدروژل‌ها به طور کامل بررسی نشده است و نیاز به تحقیقات بیشتری در این زمینه احساس می‌شود.

۵- مراجع:

- [۱] S. Tomic, M. Micic, J. Filipovic, and E. Suljovrujic, "Hydrogels Based on ۲-Hydroxyethyl Methacrylate Obtained by Gamma Irradiation," Materials Science Forum, vol. ۴۹۴, ۰۹/۱۵ ۲۰۰۵.
- [۲] B. D. Krezović, S. I. Dimitrijević, J. M. Filipović, R. R. Nikolić, and S. L. Tomić, "Antimicrobial P(HEMA/IA)/PVP semi-interpenetrating network hydrogels," Polymer Bulletin, vol. ۷۰, no. ۳, pp. ۸۰۹-۸۱۹, ۲۰۱۳/۰۳/۰۱ ۲۰۱۳.
- [۳] N. Zoratto and P. Matricardi, "Semi-IPN- and IPN-Based Hydrogels," in Osteochondral Tissue Engineering: Challenges, Current Strategies, and Technological Advances, J. M. Oliveira, S. Pina, R. L. Reis, and J. San Roman, Eds. Cham: Springer International Publishing, ۲۰۱۸, pp. ۱۵۵-۱۸۸.



- [۴] A. I. Gugoasa, S. Racovita, S. Vasiliu, and M. Popa, "Semi-Interpenetrating Polymer Networks Based on Hydroxy-Ethyl Methacrylate and Poly(ϵ -vinylpyridine)/Polybetaines, as Supports for Sorption and Release of Tetracycline," *Polymers*, vol. ۱۵, no. ۳. doi: ۱۰.۳۳۹۰/polym۱۵۰۳۰۴۹۰.
- [۵] G. Tamburini, C. Canevali, S. Ferrario, A. Bianchi, A. Sansonetti, and R. Simonutti, "Optimized Semi-Interpenetrated p(HEMA)/PVP Hydrogels for Artistic Surface Cleaning," *Materials*, vol. ۱۵, no. ۱۹. doi: ۱۰.۳۳۹۰/ma۱۵۱۹۱۷۳۹.
- [۶] J. A. L. Domingues, N. Bonelli, R. Giorgi, E. Fratini, F. Gorel, and P. Baglioni, "Innovative Hydrogels Based on Semi-Interpenetrating p(HEMA)/PVP Networks for the Cleaning of Water-Sensitive Cultural Heritage Artifacts," *Langmuir*, vol. ۲۹, no. ۸, pp. ۲۷۴۶-۲۷۵۵, ۲۰۱۳/۰۲/۲۶ ۲۰۱۳.
- [۷] J. Xu, P. Zhao, and Y. Zhang, "Iodine-responsive poly (HEMA-PVP) hydrogel for self-regulating burst-free extended release," *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, vol. ۲۸, no. ۵, pp. ۴۷۰-۴۸۵, ۲۰۱۷/۰۳/۲۴ ۲۰۱۷.
- [۸] J. M. Rosiak and P. Ulański, "Synthesis of hydrogels by irradiation of polymers in aqueous solution," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. ۵۵, no. ۲, pp. ۱۳۹-۱۵۱, ۱۹۹۹/۰۶/۱۱/ ۱۹۹۹.
- [۹] A. M. Elbarbary, M. M. Ghobashy, G. K. El Khalafawy, M. A. Salem, and A. S. Kodous, "Radiation cross-linking of pH-sensitive acrylic acid hydrogel based polyvinylpyrrolidone/ ۲-dimethylamino ethyl methacrylate loaded with betamethasone dipropionate drug and in vitro anti-inflammatory assessment," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, vol. ۸۹, p. ۱۰۵۰۲۴, ۲۰۲۳/۱۱/۰۱/ ۲۰۲۳.
- [۱۰] W.-H. Ting, S. A. Dai, H.-T. Lee, F. M. C. Chen, W.-C. Su, and R.-J. Jeng, "Facile Synthetic Route Toward High Conversion Primary Aliphatic Poly(vinyl benzyl isocyanate) via Iodination," *Polymer Journal*, vol. ۴۱, no. ۱۱, pp. ۱۰۱۱-۱۰۱۷, ۲۰۰۹/۱۱/۰۱ ۲۰۰۹.
- [۱۱] S.-W. Huang, Y.-F. Lin, Y.-X. Li, C.-C. Hu, and T.-C. Chiu, "Synthesis of Fluorescent Carbon Dots as Selective and Sensitive Probes for Cupric Ions and Cell Imaging," *Molecules*, vol. ۲۴, no. ۹. doi: ۱۰.۳۳۹۰/molecules۲۴۰۹۱۷۸۵



تعیین مدت زمان تاخیر جهت ورود به اتاق پرتودهی در تاسیسات پرتودهی سیم و کابل توسط شتاب‌دهنده ELV-8 بر اساس محاسبات نرخ تولید ازن در هوا (کد مقاله : ۱۲۴۰)

شالی بیک، معین - مرادی، حمیدرضا

سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوهای ایران، تهران، ایران

چکیده:

اصلاح ساختار پلیمری مواد را می‌توان با استفاده از روش‌های شیمیایی مرسوم، یا با قراردادن مواد در معرض تابش یون‌ساز همانند الکترون‌های پُرانرژی ناشی از شتاب‌دهنده‌های الکترونی انجام داد. پرتوهای یون‌ساز هوای اطراف خود را یونیزه کرده و مولکول‌هایی مانند ازن و اکسیدهای نیتروژن تولید می‌کنند. در این پژوهش میزان ازن تولیدشده در تاسیسات پرتودهی سیم و کابل توسط شتاب‌دهنده ELV-8 در حالت‌های مختلف جریان باریکه و بر اساس روش‌های نظری و محاسباتی گوناگون بررسی و مقایسه شده و در نهایت میزان زمان لازم جهت تاخیر در ورود به اتاق پرتودهی پس از خاموش شدن دستگاه به‌دست آمده است.

کلمات کلیدی: پرتوهای یون‌ساز، محاسبات ازن، زمان تاخیر، تاسیسات پرتودهی سیم و کابل، ELV-8، شبیه‌سازی با کد

MCNP

Determination of the delay time for entering the irradiation room in cable and wire irradiation facilities using the ELV-8 accelerator based on ozone generation rate calculations in the air

Shalibayk, Moein*, Moradi, Hamidreza

Atomic Energy Organization of Iran, Iran Radiation Application Development Company
(IRAD Co.), Tehran, Iran

Abstract:

This study investigates the modification of polymeric materials using ionizing radiation from high-energy electron beams produced by an ELV-8 accelerator. Ionizing radiation leads to the formation of ozone and nitrogen oxides in the surrounding air. The research analyzes and compares the amount of ozone generated under different beam current conditions using theoretical and computational methods. Finally, it determines the required delay time before safely entering the irradiation room after the accelerator is turned off.

Key words: Ionizing radiation, Ozone calculations, Delay time, Wire and cable irradiation facilities, ELV-8, MCNP Simulation

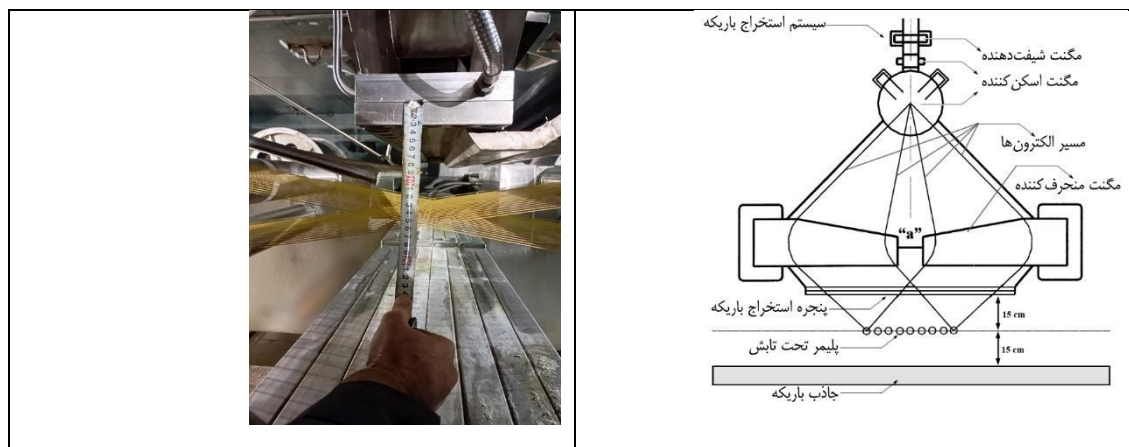


۱ - مقدمه:

پرتوافروری با استفاده از باریکه الکترونی در سیم‌ها و کابل‌ها به بهبود خواص حرارتی، شیمیایی، استحکام (نفوذناپذیری)، سایش ضربه‌ای و سایر خواص مکانیکی کمک می‌کند. یکی از انواع شتاب‌دهنده‌های الکترونی که برای پرتوافروری سیم و کابل از آن استفاده می‌شود، شتاب‌دهنده ELV-۸ ساخت موسسه فیزیک هسته‌ای بودکر می‌باشد. این نوع شتاب‌دهنده توانایی تولید باریکه الکترونی با انرژی ۱ MeV تا ۲.۵ MeV با بیشینه جریان ۵۰ mA و بیشینه توان ۹۰ kW را دارا می‌باشد [۱].

شتاب‌دهنده‌های نوع ELV به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با استفاده از سیستم‌های کنترلی این امکان را فراهم می‌سازد تا با پارامترهای اصلی مانند محدوده انرژی، جریان باریکه، مقدار دز و غیره با نیازهای خاص مشتری سازگار شوند [۳]. ساختمان حفاظ بیولوژیک اصلی‌ترین بنای تاسیسات پرتودهی می‌باشد و در سه طبقه در مرکز پرتو فرایند نوین (قزوین) احداث شده که شامل طبقه اول (اتاق پرتودهی)، طبقه دوم (اتاق شتاب‌دهنده ELV-۸) و طبقه سوم می‌باشد. اتاق پرتودهی اتاقی است به ابعاد $11 \times 6/5 \times 2/1$ m که محصولات توسط سیستم انتقال و جابجایی کالا وارد این فضا شده و پس از پرتودهی از آن خارج می‌گردند.

در نمونه مورد بحث این پژوهش، همان گونه که در شکل (۱) ارایه شده است [۱۵]، سیم و کابل از جنس پلی‌اتیلن در فاصله ۱۵ cm از زیر پنجره سیستم استخراج باریکه و جاذب پرتو از جنس فولاد ضدزنگ در فاصله ۳۰ cm از زیر پنجره سیستم استخراج باریکه قرار دارد. همچنین نرخ تهویه هوا برابر با $\frac{m^3}{h} 10580$ می‌باشد.



شکل (۱) نحوه قرارگیری سیم و کابل و جاذب باریکه نسبت به سیستم استخراج باریکه

تابش پرتوهای یون ساز در اتاق پرتودهی با رادیولیز کردن مولکول‌های تشکیل دهنده هوا باعث تشکیل گازهای سمی می‌گردند که مهم‌ترین آن‌ها، ازن است. در فرایند پرتودهی توسط باریکه الکترونی، نرخ تولید ازن متناسب با توان باریکه فرودی و کسری از انرژی جذب شده در هوای تحت تابش می‌باشد. ازن (O_3) می‌تواند با قرارگرفتن گاز اکسیژن معمولی (O_2) در معرض الکترون‌های پرانرژی، اشعه ایکس، پرتوهای گاما، پرتوهای فرابنفش (UV-C) و تخلیه‌های الکتریکی تولید شود. ازن گازی سمی



است و مطابق ^{۱۰۰}ACGIH (۱۹۷۹)، برای آزن میزان حد آستانه TLV-TWA^{۱۰۱} برابر ۰.۱ ppm و میزان حد آستانه TLV-STEL^{۱۰۲} برابر ۰.۳ ppm است [۲]. در این پژوهش میزان آزن تولیدشده در تاسیسات پرتودهی سیم و کابل واقع در مرکز پرتوفايند نوین (قزوین) توسط شتاب‌دهنده ELV-۸ در حالت‌های مختلف انرژی و جریان باریکه و بر اساس روش‌های نظری و محاسباتی گوناگون بررسی و مقایسه شده و در نهایت میزان زمان لازم جهت تاخیر در ورود به اتاق پرتودهی پس از خاموش شدن دستگاه (زمان تاخیر) به دست آمده است.

۲ - محاسبه زمان تاخیر بر اساس روش‌های نظری و محاسباتی:

در طول کارکرد عادی و طولانی مدت دستگاه شتاب‌دهنده، غلظت آزن به میزان اشباع می‌رسد. این غلظت معمولاً بسیار بالاتر از حد مجاز استاندارد بوده و لذا بلافاصله پس از خاموش شدن دستگاه نمی‌توان وارد اتاق پرتودهی شد. برای جلوگیری از مواجهه بیش از حد مجاز کارکنان با این گازها نیاز به سیستم تهویه است. در صورت تولید حجم زیادی از گاز آزن باید از سیستم تهویه مداومی استفاده شود تا دقایق کمی بعد از پایان یافتن پرتودهی (زمان تاخیر) بتوان وارد اتاق پرتودهی شد. از چند روش این زمان محاسبه شده که در ادامه به توضیح هر روش پرداخته شده است و در نهایت با اندازه‌گیری مقدار آزن تولیدشده توسط آزن‌سنج پس از گذشت زمان تاخیر، مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده با هم مقایسه شده است و زمان لازم جهت تاخیر بدست آمده است.

تمامی محاسبات برای انرژی ۱.۵ MeV (جریان ۵۰ mA) و انرژی ۲.۵ MeV (جریان ۳۶ mA) و با فرض انباشت انرژی در هوای میان پنجره خروجی باریکه و ماده تحت تابش (فاصله ۱۵ cm) با سهم ۷۵ درصد و هوای میان پنجره خروجی باریکه و جاذب پرتو (فاصله ۳۰ cm) با سهم ۲۵ درصد انجام شده است [۱۲]. کمیت‌های مشترک مورد استفاده در محاسبات شامل موارد زیر می‌باشد:

t: زمان حذف مورد نیاز جهت کاهش غلظت آزن از C_s به C_o (h)

$$t_e: \text{زمان حذف موثر آزن} = \frac{t_v t_d}{t_v + t_d} = 0.01396h$$

$$C_o: \text{حداکثر غلظت مجاز آزن (۰.۱ ppm معادل } \frac{mg}{m^3} \text{)} = 0.1205$$

C_s : غلظت اشباع آزن (ppm)

I: شدت جریان باریکه الکترونی (mA)

d: مسیر الکترون‌ها در هوا (cm)

^{۱۰۰} American Conference of Governmental Industrial Hygienists

^{۱۰۱} غلظت TWA برای یک روز کاری ۸ ساعته و یک هفته کاری ۴۰ ساعته می‌باشد.

^{۱۰۲} قرار گرفتن در غلظت STEL در هیچ زمانی در طول کار نباید از ۱۵ دقیقه بیشتر شود.



G: بازده رادیولیز ازن^{۱۰۳}

V: حجم اتاق پرتو دهی (m^3) (۱، ۱۵۰)

Q: نرخ تهویه هوا ($\frac{m^3}{h}$) (۱۰۵۸۰)

t_V : زمان لازم برای یک بار تهویه اتاق تابش (h)، $t_V = \frac{V}{Q} = 0.0142h$

t_d : زمان تجزیه شیمیایی موثر ازن (h)، حدود ۵۰ دقیقه (h)، $t_d = 0.833h$

۱-۲- محاسبه زمان تاخیر بر اساس استاندارد سازنده دستگاه شتاب‌دهنده مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن از غلظت C_S به غلظت C_0 را می‌توان با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نمود [۴]:

$$(1) \quad t = -t_e \ln \ln \frac{C_0}{C_S} \quad (C_S = \frac{Pt_e}{V}, \quad M = 45dIG)$$

در این رابطه:

M: جرم ازن تولید شده توسط باریکه الکترونی در واحد زمان ($\frac{mg}{h}$)

$$E = 1.5MeV: M = 210.937.5 \frac{mg}{h} \rightarrow C_S = 19.61 \frac{mg}{m^3} \rightarrow t = 4.26min$$

$$E = 2.5MeV: M = 151875 \frac{mg}{h} \rightarrow C_S = 14.12 \frac{mg}{m^3} \rightarrow t = 3.96min$$

۲-۱- محاسبه زمان تاخیر بر اساس ثابت فروپاشی ازن در این روش، زمان تاخیر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۱].

$$(2) \quad t = \frac{Ln \frac{C_S}{C_0}}{\alpha + \beta}$$

در این رابطه:

α : ثابت فروپاشی شیمیایی ازن (s^{-1}) (3×10^{-4})

β : نرخ تهویه در واحد حجم، $\beta = \frac{Q}{V} = 196 \times 10^{-4} s^{-1}$

$$E = 1.5MeV: C_S = 19.61 \frac{mg}{m^3} = 16.27ppm \rightarrow t = 4.26min$$

$$E = 2.5MeV: C_S = 14.12 \frac{mg}{m^3} = 11.71ppm \rightarrow t = 3.98min$$

^{۱۰۳} در این پژوهش بازده رادیولیز ازن برای باریکه الکترونی در هوا ۵ در نظر گرفته شده است [۵ الی ۱۰].



۲-۲- محاسبه زمان تاخیر بر اساس میزان انرژی انباشت شده

مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن از غلظت C_S به غلظت C_0 را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه نمود [۱۲]:

$$(۳) \quad t = -t_e \ln \ln \frac{C_0}{C_S} \quad (C_S = \frac{M}{\rho_{air} \times Q}, \quad M = Y \times P_{air}, \quad P_{air} = P_{beam} \times \frac{AED}{E})$$

در این رابطه:

M : جرم ازن تولید شده توسط باریکه الکترونی در واحد زمان $(\frac{Kg}{h})$

Y : بازده تولید ازن ناشی از باریکه الکترونی

$$(Y = \frac{G}{1.0 \times 10^6} = \frac{5}{1.0 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 6.0 \times 10^{23}} = 5.185E - 7 \frac{mol}{J})$$

P_{air} : توان جذب شده باریکه الکترونی فرودی در هوا (KW)

P_{beam} : توان باریکه الکترونی دستگاه شتاب دهنده (KW)

f : میزان انرژی انباشت شده در هوای میان پنجره خروجی باریکه و ماده تحت تابش بر اساس انرژی الکترون فرودی، $f =$

$$\frac{AED}{E} \propto \frac{\rho_{air} \times Q \times t}{M}$$

$$\rho_{air} = 1.205 \frac{Kg}{m^3} \quad \text{چگالی هوا}$$

کسر f را از سه روش می‌توان محاسبه نمود.

- روش اول: محاسبه f بر اساس برد بیشینه الکترون^{۱۰۴} مطابق معادله تجربی فیدر^{۱۰۵}

مطابق قانون فیدر [۱۲ و ۱۳]، حداکثر برد ذرات بتا از رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$(۴) \quad R_{max} = \frac{R}{\rho_{air}}, \quad R(\frac{g}{cm^2}) = \{0.407E^{1.38}, \quad 0.15 < E < 0.8 \text{ MeV} \\ 0.8 \text{ MeV} < E < 3 \text{ MeV} \}$$

$$E = 1.5 \text{ MeV}: R = 0.68 \frac{g}{cm^2} \rightarrow R_{max} = 564.31 \text{ cm} \rightarrow M = 0.223 \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = 17.49 \text{ ppm} \rightarrow t = 4.32 \text{ min}$$

$$E = 2.5 \text{ MeV}: R = 1.222 \frac{g}{cm^2} \rightarrow R_{max} = 1014.10 \text{ cm} \rightarrow M = 0.149 \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = 11.68 \text{ ppm} \rightarrow t = 3.98 \text{ min}$$

^{۱۰۴} Rmax

^{۱۰۵} Feather



- روش دوم: محاسبه f بر اساس برد بیشینه الکترون مطابق معادله تجربی شولتز^{۱۰۶}

محاسبه زمان تاخیر بر اساس مطابق فرمول ارائه شده توسط شولتز و فاو [۱۴]، حداکثر برد ذرات باردار از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$R_{max} = \frac{R}{\rho_{air}}, \quad y = a + bx + cx^2, \quad \{y = \log_{\sqrt{\cdot}} \left(\frac{g}{cm^2} \right) x = \log_{\sqrt{\cdot}}^{E(MeV)} x = \quad (5)$$

مقادیر b و a برای الکترون‌ها در هوا مطابق جدول (۱) می‌باشد:

جدول ۱: مقادیر b و a برای الکترون‌ها در فرمول تجربی $y = a + bx + cx^2$

ماده	a	b	c
هوا	-۰.۳۳۵۴۵	۱.۲۶۱۵	-۰.۱۸۱۲۴

$$E = ۱.۵ MeV: R = ۰.۷۶۰۵ \frac{g}{cm^2} \rightarrow R_{max} = ۶۳۱.۱۲ cm \rightarrow M = ۰.۱۹۹ \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = ۱۵.۶۱ ppm \rightarrow t = ۴.۲۳ min$$

$$E = ۲.۵ MeV: R = ۱.۳۷۳۴ \frac{g}{cm^2} \rightarrow R_{max} = ۱۱۳۹.۷۵ cm \rightarrow M = ۰.۱۳۲ \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = ۱۰.۳۵ ppm \rightarrow t = ۳.۸۸ min$$

- روش سوم: محاسبه f بر اساس محاسبات کامپیوتری

در این روش با استفاده از کد MCNP [۱۶] کسری از توان باریکه الکترونی که در پنجره باریکه، فضای هوای بین پنجره و مواد تحت تابش، و جاذب پرتو جذب می‌شود، محاسبه شده است [۱۲].

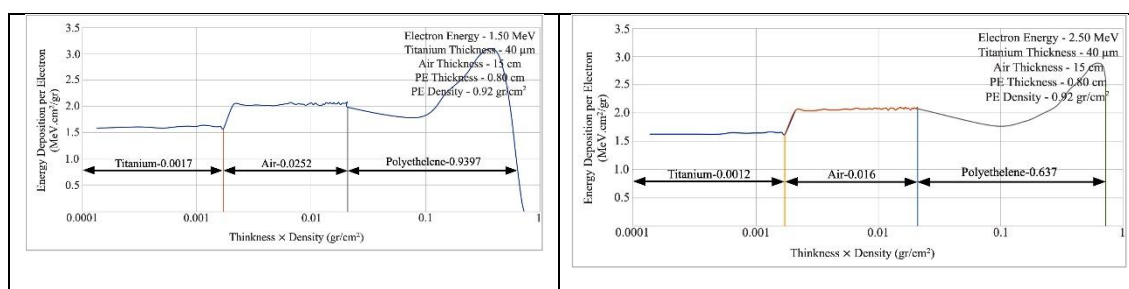
در تمامی محاسبات، چشمه الکترون به صورت خطی و پنجره خروجی باریکه از جنس تیتانیوم با ضخامت $۴۰ \mu m$ و چگالی $۴.۵۱ \frac{g}{cm^3}$ در نظر گرفته شده است. همچنین چشمه خطی الکترون دقیقاً در روی سطح تیتانیوم، که مرز خروجی ذره می‌باشد، اعمال شده است.

مساحت زیر نمودار انرژی انباشت شده-ضخامت چگالشی، بیان گر سهم انباشت انرژی در هر ماده بر حسب MeV می‌باشد.



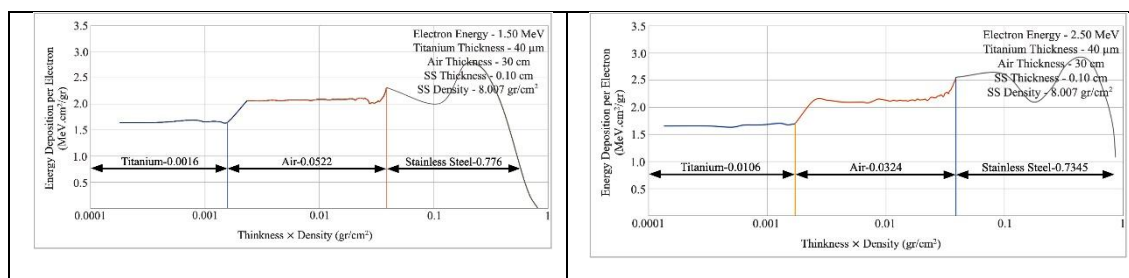
حالات مختلف پرتودهی شامل پرتودهی پلی اتیلن با ضخامت ۸/۰ cm و چگالی $0.92 \frac{g}{cm^3}$ که در فاصله ۱۵ cm از چشمه قرار گرفته و پرتودهی جاذب پرتو از جنس فولاد ضدزنگ با ضخامت ۰.۱ cm و چگالی $8.007 \frac{g}{cm^3}$ که در فاصله ۳۰ cm از چشمه قرار گرفته می‌باشد.

با تعریف مش تالی برای قسمت‌های مختلف تیتانیوم، هوا و پلی اتیلن، نمودار انباشت دز حاصل از شبیه‌سازی به صورت شکل (۲) می‌باشد.



شکل (۲) توزیع دز عمقی الکترون در تیتانیوم، هوا و پلی اتیلن

با تعریف مش تالی برای قسمت‌های مختلف تیتانیوم، هوا و جاذب پرتو، نمودار انباشت دز حاصل از شبیه‌سازی به صورت شکل (۳) می‌باشد.



شکل (۳) توزیع دز عمقی الکترون در تیتانیوم، هوا و استیل

$$E = 1.5 \text{ MeV}: M = 0.214 \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = 16.82 \text{ ppm} \rightarrow t = 4.29 \text{ min}$$

$$E = 2.5 \text{ MeV}: M = 0.162 \frac{Kg}{h} \rightarrow C_S = 12.69 \text{ ppm} \rightarrow t = 4.05 \text{ min}$$

۳- نتایج:

در این پژوهش بر اساس روش‌های مختلف نرخ تولید آزن، غلظت تعادلی آزن و زمان تاخیر مورد نیاز برای کاهش غلظت آزن به سطح استاندارد باتوجه به نرخ تهویه اتاق پرتودهی برای انرژی‌های ۱.۵ MeV و ۲.۵ MeV و با در نظر گرفتن عبور باریکه از پنجره تیتانیومی هورن، هوا، سیم و کابل و جاذب پرتو محاسبه و بر اساس آن زمان تاخیر مورد نیاز تعیین شد. نتایج حاصله جهت مقایسه در جدول (۲) آورده شده است. همچنین در نهایت میزان آزن موجود در اتاق پرتودهی پس از گذشت زمان تاخیر برای تاسیسات پرتودهی ELV-۸ مرکز پرتو فرایند نوین (قزوین) به وسیله آزن سنج اندازه‌گیری شد و همان گونه که در شکل (۴)



نشان داده شده است، میزان آزن پس از گذشت زمان تاخیر تاسیسات (5 min) برابر 0.036 ppm است که کمتر از میزان حد آستانه TLV-TWA می‌باشد.

جدول ۲: زمان تاخیر، نرخ تولید آزن و غلظت تعادلی محاسبه‌شده بر اساس روش‌های مختلف

E = 2,0 MeV			E = 1,0 MeV			روش
t (min)	CS (ppm)	P (Kg/h)	T (min)	CS (ppm)	P (Kg/h)	
۳.۹۶	۱۴.۱۲	۰.۱۵۱۸	۴.۲۶	۱۶.۲۷	۰.۲۱۱۹	استاندارد سازنده دستگاه
۳.۹۸	۱۴.۱۲	۰.۱۵۱۸	۴.۲	۱۶.۲۷	۰.۲۵۳۱	ثابت فروپاشی آزن
۳.۹۸	۱۱.۶۸	۰.۱۴۹	۴.۳۲	۱۷.۴۹	۰.۲۲۳	معادله فیدر
۳.۸۸	۱۰.۳۵	۰.۱۳۲	۴.۲۳	۱۵.۶۱	۰.۱۹۹	معادله شولتیز
۴.۰۵	۱۲.۶۹	۰.۱۶۲	۴.۲۹	۱۶.۸۲	۰.۲۱۴	کد MCNP



شکل (۴) مقدار آزن اندازه‌گیری‌شده پس از زمان تاخیر

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این مقاله اطلاعات اساسی در مورد تولید آزن در تاسیسات پرتودهی سیم و کابل توسط شتاب‌دهنده ELV-8 مرکز پرتو فرایند نوین (قزوین) با توان 90 kW و برای انرژی‌های 1.5 MeV و 2.5 MeV ارائه شده است. این اطلاعات شامل نرخ تولید آزن و غلظت تعادلی آزن بوده که با در نظر گرفتن عبور باریکه از هوا، سیم و کابل و جاذب پرتو محاسبه شده‌اند و سپس زمان مورد نیاز برای کاهش غلظت آزن به سطح استاندارد پس از خاموش شدن دستگاه (زمان تاخیر) با توجه به نرخ تهویه اتاق پرتودهی محاسبه شد. با توجه به این که در فرایند پرتودهی، باریکه الکترونی به کابل (پلی اتیلن) و جاذب باریکه (فولاد ضد زنگ) برخورد می‌کند، جهت مقایسه، نتایج نهایی به دست آمده برای حالت‌های ترکیبی در جدول (۲) ارائه شد. بنابراین همان گونه که مشاهده می‌شود زمان مورد نیاز جهت ورود به اتاق پرتودهی پس از خاموش شدن دستگاه (زمان تاخیر) همواره کمتر از ۵ دقیقه می‌باشد. لذا برای



اطمینان می‌توان زمان تاخیر برای تاسیسات پرتودهی ELV-۸ را ۵ دقیقه تنظیم نمود، به‌طوری‌که اندازه‌گیری عملی نیز این موضوع را تایید می‌کند.

۵- مراجع:

- [۱] Yu.I. Golubenko, et al., ۲۰۰۷, "Electron Accelerator of ELV-Type and Their Worldwide Application", APAC ۲۰۰۷, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), Indore, India.
- [۲] "Emergency and Continuous Exposure Limits for Selected Airborne Contaminants, Volume ۱"; Committee on Toxicology, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, Commission on Life Sciences, National Research Council.
- [۳] N.K. Kuksanov, et al., ۲۰۰۸. "Automated Complex for E-B Treatment of Cable and Wire Insulation", Zvenigorod, Russia.
- [۴] Ministry of Ecology and Environment of China, HJ۹۷۹-۲۰۱۸, "Radiation Safety and Protection on Electron Accelerator Irradiation Facilities", National Environmental Protection Standard of the People's Republic of China.
- [۵] Spinks, J.W.T., Woods, R.J., ۱۹۶۴. "An Introduction to Radiation Chemistry", John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapter ۷, pp. ۲۰۳-۲۰۵.
- [۶] Brynjolfsson, A., Martin, T.G., ۱۹۶۷. "Radiation Protection Problems Associated with Electron Accelerators", Radiation Protection Symposium, U.S. Army, Edgewood Arsenal, Maryland.
- [۷] Steinberg, M., Beller, M., Powell, J.R., ۱۹۷۵. "Large Scale Ozone Production in Chemonuclear Reactors for Water Treatment, Proceedings of the First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment", International Ozone Institute, Waterbury, Connecticut, pp. ۱۰-۳۹.
- [۸] National Council on Radiation Protection and Measurements, ۱۹۷۷. NCRP Report No. ۵۱, "Radiation Protection Design Guidelines for ۰.۱ – ۱۰۰ MeV Particle Accelerator Facilities", Washington, D.C., Appendix I, pp. ۱۳۳-۱۳۴.
- [۹] Martin, T.G. III, ۱۹۸۲. "Preservation of Food by Ionizing Radiation, Vol. ۱", Eds. E.S. Josephson and M.S. Peterson, Radiation Protection and Health Physics in Food Irradiation Facilities, CRC Press, Boca Raton, Florida, Chapter ۹, pp. ۲۶۸-۲۷۰.
- [۱۰] Tabata, Y., Ito, Y., Tagawa, S., ۱۹۹۱. "Handbook of Radiation Chemistry", CRC Press, Boca Raton, Florida, Chapter XIII, pp. ۶۱۰.
- [۱۱] Weilandies, C., N. Rohrig and N.F. Gmur. ۱۹۸۸. "Ozone Production Due to Synchrotron Radiation". Nucl. Instru. and Meth. in Physics Research, A۲۶۶: ۶۹۱-۶۹۸.

[۱۲] Marshall R. Cleland, Richard A. Galloway, ۲۰۱۴. “Ozone Generation in Air during Electron Beam Processing”, C ۲۳rd Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, CAARI ۲۰۱۴.

[۱۳] Emilio Segre, W. A. Benjamin, “Nuclei and Particles: An Introduction to Nuclear and Subnuclear Physics”, INC., ۱۹۶۵.

[۱۴] N. Tsoulfanidis and S. Landsberger, “Measurement and Detection of Radiation”, CRC Press, ۳rd edition, ۲۰۱۱.

[۱۵] P.V. Axamirsky and N.K. Kuksanov, ۲۰۰۱. “۴-Sided irradiation systems for electron treatment of cable and pipe-like products”, Vacuum ۶۲ (۲۰۰۱) ۲۵۷-۲۶۲.

[۱۶] LA-UR-۲۲-۳۰۰۰۶, Rev. ۱, MCNP Code Version ۲,۳,۰



تشخیص رسوب در لوله های نفتی به روش GCT: بررسی الگوهای مختلف رسوب و

الگوریتم های بازسازی تصویر (کد مقاله : ۱۲۵۰)

زینب متولی باشی نائینی - دکتر محمدرضا محمدیان بهبهانی - دکتر فرشاد فقیهی - دکتر رسول صفری - دکتر

عطاءاله ربیعی

بخش مهندسی هسته‌ای - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه شیراز - ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸ - شیراز - ایران

چکیده:

انباشت رسوب در لوله های نفتی میتواند کارایی سیستم انتقال را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین تشخیص به موقع محل و شدت رسوب در این سیستمها حایز اهمیت است. در پژوهش حاضر، عملکرد یک سیستم توموگرافی رایانه ای با پرتوهای گاما (*GCT*) برای تشخیص الگوهای مختلف رسوبات بررسی شده است. به این منظور، سیستم *GCT* در کد هسته ای *GATE* شبیه سازی شده و الگوریتم های بازسازی تصویر شامل الگوریتم *SART* و الگوریتم *MLEM* برای بازسازی تصویر رسوبات و کس پیاده سازی و مقایسه شدند. سناریوهای مختلف گرفتگی شامل گرفتگی کامل، هلالی، نیم قرص و حلقوی نامتقارن مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که الگوریتم *MLEM* در کاهش آرتیفکت تصاویر عملکرد بهتری داشته و الگوریتم *SART* نیز تصاویر با کنتراست بالاتری ایجاد می کند.

کلمات کلیدی: توموگرافی رایانه ای با پرتو گاما (*GCT*)، الگوریتم *MLEM*، الگوریتم *SART*، رسوب و کس، شبیه سازی *GATE*

Identification of Scale Deposition in Oil Pipelines by GCT: Study of Different Scale Patterns and Image Reconstruction Algorithms

Zeinab Motevalli Bashi Naini - Mohammad Reza Mohammadian Behbahani - Farshad Faghihi- Rasool Safari - Ataollah Rabiei

Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University

Abstract:

Scale deposition in oil pipelines can severely affect the efficiency of the oil transmission process. Therefore, timely detection of the location and severity of scale is important. In the present study, the performance of a gamma-ray computed tomography (GCT) system for detecting different scale patterns is investigated. For this purpose, the GCT system was simulated in the GATE code and image reconstruction algorithms including SART and MLEM algorithms were implemented and compared for wax scale scenarios. Various scale deposition scenarios were examined, including whole-filled, crescent, semi-circular, and asymmetric annular patterns. The results showed that the MLEM algorithm performs better in reducing image artifacts and the SART algorithm produces images of higher contrast.

Key words: Gamma ray computed tomography (GCT), MLEM algorithm, SART algorithm, Wax deposits, *GATE simulation*



۱ - مقدمه:

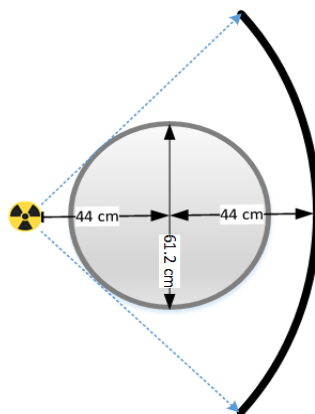
ته‌نشینی رسوبات در لوله‌های انتقال، یکی از مشکلات اساسی در صنعت نفت است که تشخیص به موقع آن از جهت حفظ بازده تولید و کاهش هزینه‌های توقف و تعمیر خط لوله، اهمیت دارد. یکی از روشهای تشخیص رسوب، تصویربرداری توموگرافی با پرتو گاما (یا ایکس) از لوله است که در آن الگوی رسوبات هم قابل تشخیص خواهد بود. البته کیفیت تشخیص به جنس و الگوی رسوب و الگوریتم بازسازی تصویر هم بستگی دارد. پژوهش حاضر به بررسی تاثیر این عوامل می‌پردازد.

در سال ۲۰۲۱ Wibisono و همکاران در یک کار تجربی، یک سیستم توموگرافی رایانه‌ای متشکل از ۳۱ آشکارساز NaI و یک چشمه سزیم-۱۳۷ با پرتوایی ۳۰ mCi برای تشخیص رسوبات کلسیم‌کربنات با الگوی حلقوی متقارن طراحی کردند. در این پژوهش از الگوریتم پسنگاشت فیلترشده (FBP) جهت بازسازی تصاویر استفاده شد [۱]. در سال ۲۰۱۱، Kim و همکاران در یک کار شبیه‌سازی مونتکارلو با کد MCNP۵، یک سیستم توموگرافی رایانه‌ای با ۶۴ آشکارساز NaI و یک چشمه سزیم-۱۳۷ با پرتوایی ۲۰ mCi برای تشخیص رسوبات وکس با الگوی تخم‌مرغی طراحی کردند. سپس سیستم شبیه‌سازی شده را به صورت عملی نیز اجرا کردند. تصاویر توسط الگوریتمهای بازسازی ART، DSGA و MLEM تولید شدند [۲]. در سال ۲۰۱۲ همان گروه در یک کار شبیه‌سازی با کد مونتکارلو MCNPX، یک سیستم توموگرافی رایانه‌ای متشکل از ۷۲ آشکارساز NaI و یک چشمه سزیم-۱۳۷ برای تشخیص رسوبات از جنسهای SiO_2 و Al_2O_3 با الگوی حلقوی متقارن شبیه‌سازی و در نهایت توسط الگوریتمهای ART، TV و MLEM تصاویر را بازسازی و مقایسه کردند [۳]. سپس در یک کار تجربی سیستم را بررسی کردند، با این تفاوت که از ۳۶ آشکارساز NaI کانال‌بندی شده برای تصویربرداری از یک لوله خالی از جنس استیل ضدزنگ استفاده کرده و در نهایت تصویر را با الگوریتم MLEM ایجاد کردند [۴].

پژوهش حاضر بخشی از پروژه شبیه‌سازی و طراحی یک سیستم توموگرافی رایانه‌ای نسل سوم با امکانات موجود در بخش مهندسی هسته‌ای است. برای این منظور، علاوه بر طراحی سیستم چشمه و آشکارساز، نیاز به بررسی سناریوهای تشخیص الگوهای مختلف رسوب با الگوریتمهای بازسازی تصویر مختلف است که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ - روش کار:

هندسه کلی سیستم GCT طراحی‌شده در GATE مطابق شکل ۱ می‌باشد. جزییات شبیه‌سازی در جدول ۱ آورده شده‌اند.



شکل ۱- هندسه سیستم GCT طراحی شده که در آن چشمه در سمت چپ، کمان آشکارسازها در سمت راست، و لوله در وسط قرار گرفته است.



جدول ۱ - خلاصه اطلاعات شبیهسازی فانتوم، چشمه و آشکارساز در کد هسته‌ای GATE.

فاصله چشمه از فانتوم	۴۲ سانتیمتر
فاصله آشکارساز از مرکز فانتوم	۴۲ سانتیمتر
تعداد آشکارسازها	۳۷ عدد
زاویه بین اولین آشکارساز و آخرین آشکارساز نسبت به چشمه	۹۳/۶ درجه
ابعاد لوله انتقال نفت شبیهسازی شده به عنوان فانتوم	استوانه‌ای با شعاع ۳۰ سانتیمتر با ارتفاع ۲۰ سانتیمتر
جنس رسوب ته‌نشین شده در لوله	وکس
جنس لوله انتقال نفت شبیهسازی شده به عنوان فانتوم	آهن
چشمه	چشمه نقطه‌ای سزیم-۱۳۷
ابعاد کریستال آشکارساز سدیمیدید	۲ اینچ در ۱ اینچ
لایه‌ی چسب کاغذی (روی پنجره ورودی آشکارساز)	یک دایره با شعاع ۲ سانتیمتر و ضخامت ۰/۱ میلی‌متر
ابعاد قوطی آشکارساز از جنس استیل	یک استوانه توخالی با شعاع ۲ سانتیمتر و ارتفاع ۲۱ سانتیمتر و ضخامت ۱ میلی‌متر
ابعاد رفلکتور آشکارساز از جنس پلاستیک	تمام فضای خالی بین کریستال آشکارساز و قوطی فلزی

پس از بدست آوردن شمارش آشکارسازها از شبیه سازی GATE، ابتدا پروجکشنها در هر زاویه ساخته میشوند. ۳۶۰ پروجکشن حول یک دایره کامل گرفته شده است. برای الگوریتم $MLEM^{107}$ تصاویر با پیادهسازی فرمول (۱) و برای الگوریتم $SART^{108}$ تصاویر با پیادهسازی فرمول (۲) بازسازی شدند [۵].

$$n_i^{[k+1]} = \frac{n_i^{[k]}}{\sum_l w_{lj}} \cdot \sum_j w_{ij} \frac{p_j}{\sum_l w_{lj} n_l^{[k]}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} n_i^{[k+1]} &= n_i^{[k]} \\ &+ \frac{1}{\sum_j w_{ij}} \left[\sum_j w_{ij} \frac{(p_j - \sum_l w_{lj} \cdot n_l)}{\sum_j w_{lj}} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

¹⁰⁷ Maximum Likelihood Expectation Maximization

¹⁰⁸ Simultaneous Arithmetic Reconstruction Technique

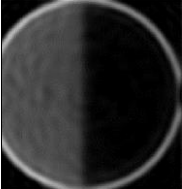
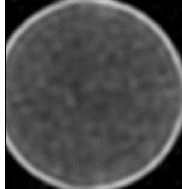
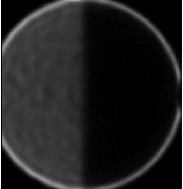
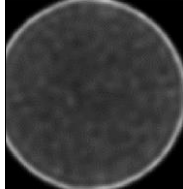
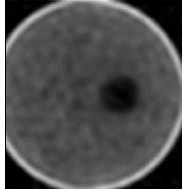
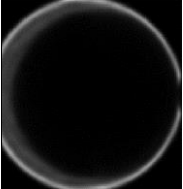
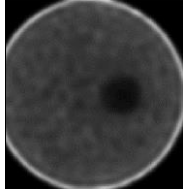


در فرمولهای فوق، هدف تعیین مقدار پیکسلها (n_i) است. در اینجا تصاویر خروجی ۱۲۸ در ۱۲۸ پیکسل هستند. مقادیر p_j مؤلفه‌های بردار پروجکشن W_{ij} ماتریس سیستم بوده و مقادیر آن از نسبت ناحیه هاشور خورده هر پیکسل به کل مساحت همان پیکسل به دست می‌آید [۵].

الگوهای رسوب شبیه سازی شده نیز شامل گرفتگی کامل، رسوب نیم قرص، رسوب هلالی نازک، و رسوب حلقوی نامتقارن هستند.

۳ - نتایج و بحث:

تصاویر بازسازی شده با دو الگوریتم MLEM و SART مربوط به انواع الگوی رسوب و کس به همراه دو مورد از معیارهای ارزیابی تصاویر ($SSIM^{109}$ و $RMSE^{110}$) در شکل ۲ آورده شده‌اند.

الگوریتم SART با ۳۰ تکرار		الگوریتم MLEM با ۳۳ تکرار	
			
d	c	b	a
SSIM=۰,۵۶	SSIM=۰,۵۷	SSIM=۰,۵۶	SSIM=۰,۵۶
RMSE=۰,۱۵	RMSE=۰,۱۶	RMSE=۰,۲	RMSE=۰,۲۲
			
h	g	f	e
SSIM=۰,۴۷	SSIM=۰,۵۶	SSIM=۰,۵	SSIM=۰,۵۶
RMSE=۰,۱۱	RMSE=۰,۱۵	RMSE=۰,۱۳	RMSE=۰,۲

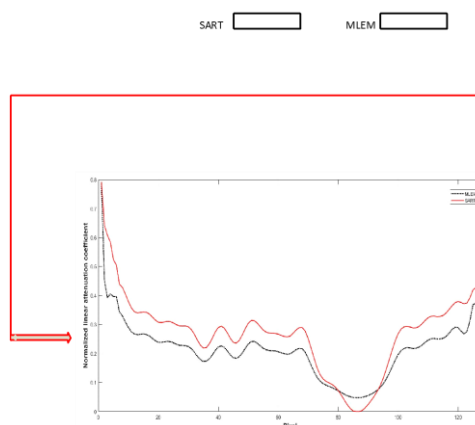
شکل ۲- تصاویر بازسازی شده با الگوریتمهای SART (چپ) و MLEM (راست) برای رسوب و کس در الگوهای رسوب گرفتگی کامل، رسوب نیم قرص، رسوب هلالی نازک، و رسوب حلقوی نامتقارن.

^{۱۰۹} The Structural Similarity Index Measure

^{۱۱۰} Root Mean Square Error



در شکل ۲ دیده می‌شود که به طور کلی هر دو الگوریتم در بازسازی الگوهای مختلف رسوب موفق عمل کرده‌اند. تصاویر الگوریتم SART از کنتراست بالاتری برخوردار بوده ولی در تمامی تصاویر بازسازیشده آن، ضخامت لوله پهنتر است که بیانگر رزولوشن پایینتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم MLEM می‌باشد. جهت بررسی بیشتر، برای نمونه در شکل ۳، نمودار سطر ۱۶۴ام برای الگوی رسوب حلقوی نامتقارن، رسم شده است. میتوان دید که نمودار الگوریتم MLEM نسبت به الگوریتم SART پایینتر افتاده است که بیانگر کنتراست پایینتر این الگوریتم است. از طرفی میتوان دید در ناحیه ضخامت لوله، الگوریتم MLEM از رزولوشن بهتری (پهنای کمتری) برخوردار است. همچنین MLEM در کاهش آرتیفکت تصاویر موفقتر عمل کرده است.



شکل ۳- نمودارهای سطر ۱۶۴ تصاویر بازسازیشده از الگوریتمهای SART و MLEM.

۴ - نتیجه گیری:

در پژوهش حاضر الگوهای مختلف رسوب وکس در لوله انتقال نفت شبیه سازی شده و دو مورد از الگوریتمهای بازسازی تصویر شناخته شده (SART و MLEM) نیز برای بازسازی تصویر مورد مقایسه قرار گرفتند. مشخص شد که به طور کلی عملکرد هر دو الگوریتم در بازسازی الگوهای مختلف رسوب مناسب است. الگوریتم SART اگرچه کنتراست بهتری دارد اما در بازسازی ضخامت لوله، ماتشدگی بیشتری نشان می دهد. درمقابل الگوریتم MLEM در کاهش آرتیفکت تصاویر عملکرد بهتری نشان داده است و در در بازسازی ضخامت لوله آهنی، رزولوشن بهتری داشته است. نتایج این تحقیق جهت طراحی نرم افزار بازسازی و تحلیل تصاویر در سیستم GCT در حال طراحی در دانشگاه شیراز مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۵ - مراجع:

- [1] W. Wibisono, B. P. Hadi, P. Sidauruk, P. Prawito, and S. K. Wijaya, "Application of fan-beam computed tomography for the analysis of scaling distribution in geothermal pipeline," in AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, ۲۰۲۱.
- [۲] J. Kim, S. Jung, J. Moon, and G. Cho, "Industrial gamma-ray tomographic scan method for large scale industrial plants," Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. ۶۴۰, no. ۱, pp. ۱۳۹-۱۵۰, ۲۰۱۱.



- [۳] J. Kim, S. Jung, J. Moon, and G. Cho, "A feasibility study on gamma-ray tomography by Monte Carlo simulation for development of portable tomographic system," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. ۷۰, no. ۲, pp. ۴۰۴–۴۱۴, ۲۰۱۲.
- [۴] J. Kim, S. Jung, J. Moon, J. G. Park, J. Jin, and G. Cho, "Development of transportable gamma-ray tomographic system for industrial application," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. ۶۹۳, pp. ۲۰۳–۲۰۸, ۲۰۱۲.
- [۵] M. A. Haidekker, "Medical imaging technology." Springer, 2013.



بررسی تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه آسیب دز یونیزان کل (TID) در ترانزیستورهای ماسفت با فناوری میکرونی و نانومتری به کمک شبیه سازی با نرم افزار Silvaco TACD (کد مقاله : (۱۲۶۱)

رحیمی، محمدحسن^۱ - سلیمانینیا، معصومه^{۲*} - مسیبی، آرمین^۲ - مصلحی، امیر^۲

۱. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشگاه کاربرد پرتوها

چکیده:

آسیب دز یونیزان کل (TID)، آسیب پرتویی رایج در ترانزیستورهای ماسفت است که منجر به تغییر ولتاژ آستانه در آنها می‌شود. ضخامت ناحیه حساس این ترانزیستورها یعنی اکسید گیت، در فناوریهای میکرونی $50-20\text{ nm}$ و در فناوریهای نانومتری کمتر از 2 nm است. در این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی، مقایسه‌ای میان تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه دز تا 1 Mrad در دو ترانزیستور با فناوریهای $1/5\text{ }\mu\text{m}$ و 65 nm پرداخته شد. نتایج نشان دادند، نازکتر بودن ضخامت لایه اکسید گیت در فناوری 65 nm ، منجر به تغییرات جزئی ولتاژ آستانه شده و در نتیجه، فناوریهای نانومتری مقاومت پرتویی بالاتری نسبت به دز تجمعی دارند.

کلمات کلیدی: ترانزیستور ماسفت، دز یونیزان کل (TID)، ولتاژ آستانه، نرم‌افزار Silvaco TACD

A simulation study of the changes in threshold voltage of MOSFET due to Total Ionizing Dose (TID) in micron and nanometer technologies using Silvaco TACD tool

Rahimi, MohamadHasan^۱, Soleimaninia, masume^{۲*}, mosayebi, Armin^۲, Moslehi, Amir^۲

۱. Shahid Beheshti University, Faculty of Nuclear Engineering, Department of Radiation Application

۲. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Applications Research School

Abstract:

Total Ionizing Dose (TID) is the common radiation effects in MOSFETs, which leads to a change in their threshold voltage. The sensitive region (e.g. the gate oxide), is $50-20\text{ nm}$ in micron and less than 2 nm in nanometer technologies. In this research, through a simulation study, a comparison was made between the threshold voltage changes as a result of cumulative doses up to 1 Mrad in the mentioned technologies. The results indicated that the thinner oxide



layer in nanometer technologies has led to the smaller changes in the threshold voltage. Therefore, these technologies are more radiation-hardened devices.

Key words: MOSFET, Total Ionizing Dose (TID), Threshold voltage, Silvaco TCAD tool

۱ - مقدمه:

امروزه استفاده از قطعات میکروالکترونیک به دلیل کاهش وزن، حجم و هزینه در انواع کاربردها جایگاه ویژه‌ای دارند. این قطعات، در محیط‌های پرتویی از جمله صنایع هسته‌ای (مانند راکتورهای هسته‌ای و شتابدهنده‌ها) و صنایع هوافضا (مانند فضاپیماها و ایستگاه‌های فضایی) نیز به وفور استفاده می‌شوند. محیط‌های پرتویی، مخاطرات بالقوه‌ای برای عملکرد صحیح سیستم‌های الکترونیک دارند که ممکن است موجب ایجاد آسیب و اختلال در عملکرد آنها شوند. اثرات پرتو بر قطعات الکترونیک به دو گروه اثرات تجمعی و اثرات تکحادثه‌ای تقسیم می‌شوند. اثرات تجمعی به دو دسته دز یونیزان کل (TID) و آسیب جابهجایی تقسیم می‌شوند و به تدریج پارامترهای عملکردی قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، در حالیکه اثرات تکحادثه‌ای موجب بروز تغییرات ناگهانی و یا رفتارهای گذرا در مدار می‌شوند [۱]. یکی از رایجترین آسیب‌های پرتو بر قطعات نیمه‌رسانا آسیب دز یونیزان کل می‌باشد. این آسیب، بیشتر در بخش عایق (دیالکتریک) قطعات الکترونیک که در معرض پرتو قرار گرفته، روی می‌دهد و سبب تغییر در عملکرد قطعه می‌شود. ترانزیستورهای ماسفت یکی از حساسترین قطعات الکترونیک در برابر این آسیب می‌باشند که سه پایه سورس^{۱۱۱}، درین^{۱۱۲} و گیت^{۱۱۳} داشته و در دو نوع N و P ساخته می‌شوند. در ترانزیستور ماسفت، گیت بر روی لایه‌ای عایق قرار می‌گیرد که در بیشتر فناوریهای تجاری از جنس دی اکسید سیلیکون (SiO_2) می‌باشد. شماتیکی از یک ترانزیستور ماسفت در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. با افزایش تدریجی بایاس گیت، مسیری رسانا بین سورس و درین ایجاد می‌شود که کانال ترانزیستور نام دارد. کمترین مقدار بایاس که به ازای آن کانال تشکیل می‌شود، ولتاژ آستانه^{۱۱۴} نامیده می‌شود. ماسفت‌های قدیم با فناوریهای میکرونی ساخته می‌شدند که طول گیت در آنها از مرتبه چند میکرومتر بود. این فناوریها سرعت پایینتر، مصرف انرژی بیشتر و فرایند تولید ساخت ساده‌تری دارند که هنوز هم برای برخی کاربردها در تراشه‌های قدیمیتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه، با پیشرفته‌تر شدن ابزار و تجهیزات، شاهد ساخت ترانزیستورهایی با طول گیت کمتر از ۹۰ نانومتر هستیم که به فناوریهای نانومتری مشهورند. مهمترین ویژگی در این فناوریها، مصرف پایینتر توان و سرعت بالاتر است و از این رو، در انواع پردازنده‌های کامپیوتری، حافظه‌های سریع، گوشیهای هوشمند و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. تاکنون، مطالعات متعددی پیرامون بررسی آسیب دز یونیزان کل بر روی ترانزیستور ماسفت با فناوری میکرونی انجام شده که نتایجی همچون ایجاد تغییر در پارامترهای کلیدی از جمله جابهجایی ولتاژ آستانه، تغییر در میزان رسانایی و نیز افزایش جریان نشتی گزارش شده است [۳-۶]. در این میان، ولتاژ آستانه کمیتی است که مستقیماً از برخورد پرتو متأثر شده و بدین جهت، در غالب مراجع از جابهجایی ولتاژ آستانه به عنوان مهم‌ترین عامل از کار افتادن ترانزیستورهای ماسفت یاد شده است [۷]. حساسترین بخش از

^{۱۱۱} Source

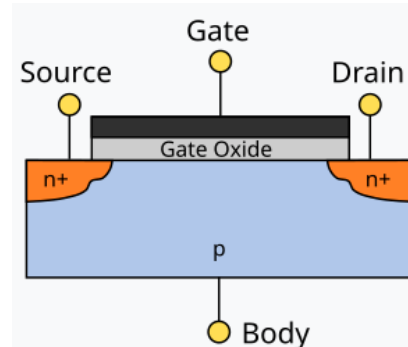
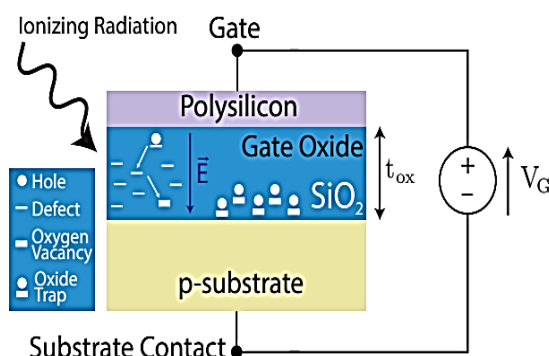
^{۱۱۲} Drain

^{۱۱۳} Gate

^{۱۱۴} Threshold Voltage (Vth)



ترانزیستور ماسفت نسبت به دز تجمعی، لایه اکسید گیت (SiO_2) میباید که ضخامت آن نقش قابل توجهی در میزان آسیبپذیری ترانزیستور در برابر پرتو ایفا میکند. ضخامت لایه اکسید در فناوریهای میکرونی بین ۲۰ تا ۵۰ نانومتر و در فناوریهای نانومتری کمتر از ۲ نانومتر است [۸]. با عبور پرتو یونساز از درون این لایه، جفت الکترون-حفرههایی ایجاد میشود که میزان تحریکپذیری آنها در SiO_2 متفاوت است. حفرهها برخلاف الکترونهايي که ظرف پیکو ثانیه از اکسید خارج میشوند، به آرامی در جهت میدان اعمال شده شروع به حرکت کرده و در مسیر حرکت خود در نقایص موجود در لایه اکسید و واسط Si/SiO_2 ، به دام افتاده و همانند یک بار مثبت رفتار می کنند. بارهای به دام افتاده در نواحی مذکور به تدریج انباشته میشود. در این شرایط، تجمع بارهای مثبت به دام افتاده در اکسید گیت، کانال را وارونه میکند، حتی اگر ولتاژی به گیت اعمال نشود ($V_G = 0$). شکل (۱-ب) شماتیکی از باند انرژی بین SiO_2 و Si با بایاس مثبت اعمال شده بر روی گیت و کل فرآیند انباشت بار در اکسید گیت را نشان میدهد.



شکل (۱-الف) شماتیکی از یک ترانزیستور ماسفت به همراه الکترودهای آن. شکل (۱-ب) شماتیکی از گیراندازی حفرههای ایجاد شده از پرتو در نقایص موجود در لایه اکسید و واسط Si/SiO_2 .

با توجه به اهمیت لایه اکسید در انباشت بارهای حاصل از تابش فرودی، در این پژوهش، اثر TID بر روی دو ترانزیستور ماسفت با فناوریهای میکرونی و نانومتری به کمک شبیهسازی با نرمافزار Silvaco TACD بررسی شد و تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه مقادیر مختلف دز تا دز ۱ Mrad مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- روش کار:

در این مقاله، از ماژول Victory نرمافزار Silvaco TACD برای شبیهسازی دو ترانزیستور ماسفت با فناوریهای ۱/۵ میکرون و ۶۵ نانومتر استفاده و منحنی مشخصه Id-Vgs آنها به دست آورده شد.

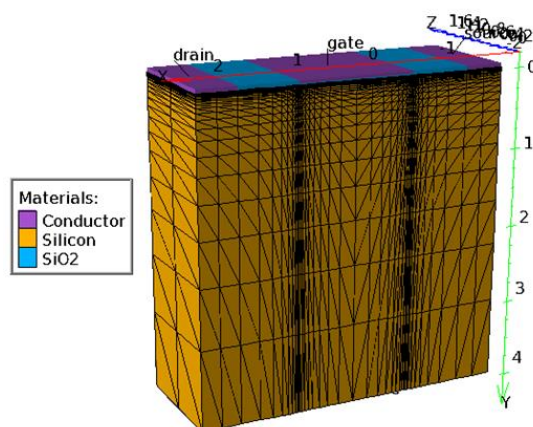
شبیهسازی ترانزیستور ماسفت با فناوری میکرونی با طول گیت $1/5 \mu\text{m}$ با در نظر گرفتن زیرلایه با ابعاد $4 \times 4 \times 1/5 \mu\text{m}^3$ از جنس سیلیکون مطابق با مرجع [۹] و با کاشت آلایند بور به عنوان ناخالصی نوع P آغاز شد و در دو راستای آن مش بندی به صورت غیریکنواخت انجام گرفت. سپس، لایه اکسید از جنس SiO_2 به ضخامت ۵۰ نانومتر بر روی زیرلایه سیلیکونی قرار داده شد. پس از این مرحله، الکترودهای گیت بر روی لایه اکسید، قرار داده شد. به منظور ایجاد نواحی سورس و درین در دو سمت گیت، از ناخالصی نوع N به عنوان ناخالصی دهنده استفاده گردید. در شبیهسازی ترانزیستور ماسفت با فناوری ۶۵ نانومتر نیز، از



زیرلایه با جنس سیلیکون و با کاشت آلاینده بور به عنوان ناخالصی نوع p استفاده شد. ابعاد زیرلایه مطابق با مرجع [۱۰] به صورت $1 \times 0.2 \times 0.325 \mu\text{m}^3$ در نظر گرفته شد. در ادامه، لایه‌های نازک به ضخامت $1/8$ نانومتر از جنس SiO_2 به عنوان عایق بر روی زیرلایه سیلیکونی نشانداده شد. سپس، پلیسیلیکون به عنوان ماده سازنده گیت بر روی لایه عایق نشانداده شد. پس از آن، نواحی سورس و درین در دو سمت گیت ایجاد شدند که در آنها یونهای آرسنیک به عنوان ناخالصی نوع N کاشته شدند. در ادامه کار، ولتاژ آستانه ترانزیستورها با توجه به منحنی مشخصه Id-Vgs پیش از فرایند پرتودهی به دست آورده شد. پس از آن، پرتودهی با ازای مقادیر مختلف دز گاما تا 1 Mrad انجام شد و مقادیر ولتاژ آستانه برای هر حالت استخراج گردید. در نهایت، تغییرات ولتاژ آستانه در هر دو فناوری مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج، به تفصیل در بخش بعد آورده شده است.

۳- نتایج:

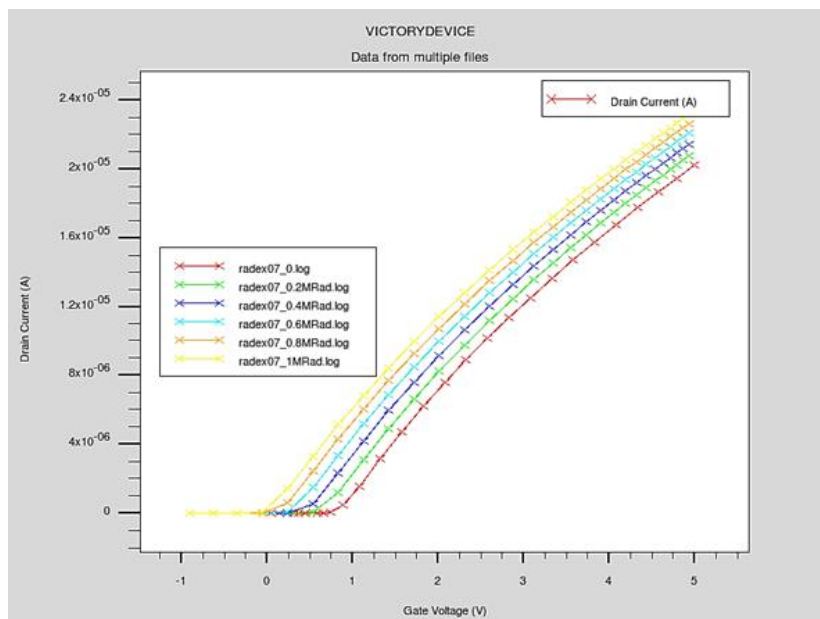
نتایج حاصل از شبیهسازی ترانزیستور $1/5 \mu\text{m}$ به همراه مشبندیهای انجام شده به عنوان نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. شایان ذکر است که شبیهسازی ترانزیستور ماسفت 65 nm نیز با روندی مشابه انجام گرفت.



شکل (۲) ترانزیستور ماسفت شبیهسازی شده با نرم افزار Silvaco TACD با فناوری $1/5 \mu\text{m}$ به همراه مشبندی در نواحی مختلف.

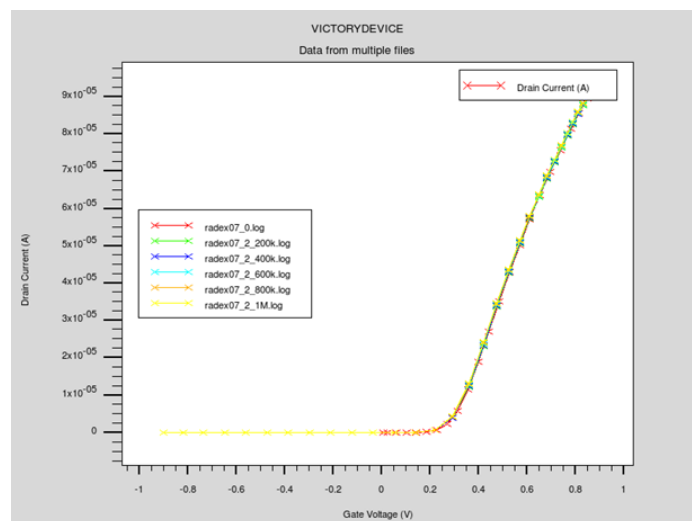
چنانچه پیشتر نیز اشاره گردید، ولتاژ آستانه در ترانزیستورهای ماسفت، کمیتی است که به طور مستقیم متأثر از برخورد پرتو میشود. از این رو، میزان تغییرات این پارامتر قبل و بعد از اعمال دز مورد بررسی قرار گرفت.

منحنی شکل (۳) تغییرات جریان درین را در بایاس 0.5 V درین، به ازای ولتاژهای مختلف گیت (0 تا 5 ولت) در شرایط قبل و بعد از پرتودهی تا دز 1 Mrad برای ترانزیستور ماسفت $1/5 \mu\text{m}$ نشان میدهد. با توجه به این منحنی، ولتاژ آستانه قبل از پرتودهی، 982 mV به دست آمد. پس از اعمال دز به ترانزیستور، همانطور که از منحنی مشاهده میشود، به ازای مقادیر بالاتر دز، ولتاژ آستانه به سمت مقادیر پایینتر کاهش مییابد. این روند، با نتایج گزارش شده در مراجع مطابقت دارد [۹ و ۵].



شکل (۳) روند تغییرات منحنی مشخصه I_d - V_{gs} قبل و پس از پرتودهی تا دز ۱ Mrad برای ماسفت با فناوری $1/5 \mu m$.

شبیهسازی‌های مشابهی برای ترانزیستور ماسفت با فناوری ۶۵ nm در شرایط قبل و بعد از اعمال دز تا ۱ Mrad انجام گرفت که نتایج آن در شکل (۴) نشان داده شده است. در این ترانزیستور، ولتاژ آستانه پیش از پرتودهی، ۱۸۰ میلی‌ولت است که برخلاف فناوری میکرونی با افزایش مقدار دز تا ۱ Mrad تغییرات چندانی در آن مشاهده نشد.

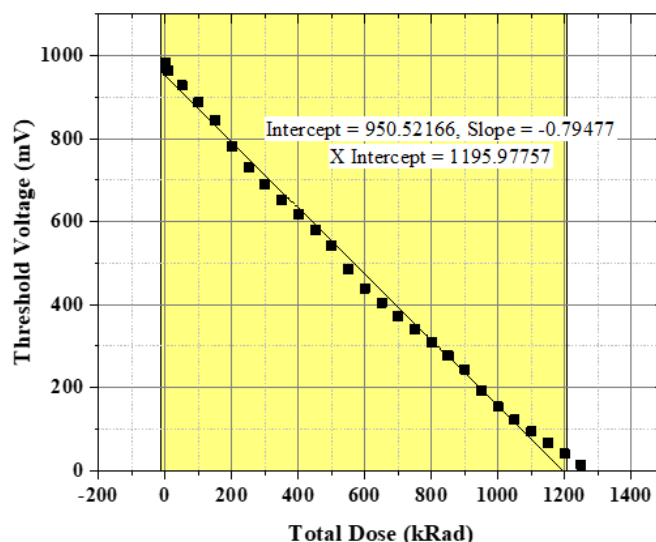


شکل (۴) منحنی مشخصه I_d - V_{gs} برای ماسفت با فناوری ۶۵ nm به ازای مقادیر مختلف دز تا ۱ Mrad

تغییرات ولتاژ آستانه به ازای مقادیر مختلف دز فرودی برای دو ماسفت مورد بررسی $1/5 \mu m$ و ۶۵ nm، در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. چنانچه در شکل (۵) مشاهده میشود، کاهش ولتاژ آستانه در فناوری $1/5 \mu m$ تا آنجا ادامه مییابد که به ازای مقادیر بیش از ۱/۲۵ Mrad، به واسطه تغییر میدان موجود درون کانال در نتیجه حامل‌های ایجاد شده ناشی از پرتو، ماسفت

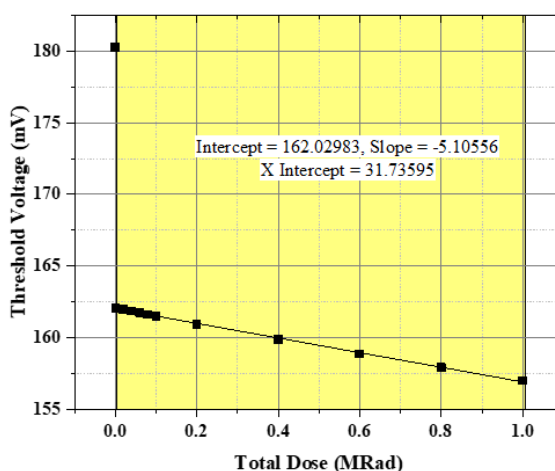


عملاً حالت خاموش نداشته و همواره جریان درون کانال برقرار میشود. در این شرایط گفته میشود ترانزیستور ماسفت از کار افتاده و دیگر عملکرد قبلی خود را نخواهد داشت.



شکل (۵) تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه اعمال دز تا مقدار ۱ Mrad به ماسفت با فناوری $1/5 \mu\text{m}$.

این در حالی است که در فناوری ۶۵ nm که نتایج آن در شکل (۶) نشان داده شده است، به دلیل ضخامت کمتر و در نتیجه وجود نقایص و دامهای کمتر لایه اکسید، تعداد حفرهای گیراندازی شده نسبت به حالت قبل کمتر بوده و در نتیجه، ولتاژ آستانه با تغییرات به مراتب ناچیزتری همراه خواهد بود. این مسئله به طور کلی، بیانگر آن است که ماسفت‌های ساخته شده با فناوریهای نانومتری، تغییرات کمتری را نسبت به دز تجمعی تجربه کرده و در نتیجه مقاومت پرتویی بالاتری دارند. شکل (۶)



تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه اعمال دز تا مقدار ۱ Mrad به ماسفت با فناوری ۶۵ nm.



۴ - بحث و نتیجه گیری:

لایه اکسید گیت (عایق) در ترانزیستورهای ماسفت، ناحیه حساس نسبت به آسیب دز جمعی است. به دلیل انباشت بارهای مثبت ناشی از پرتو در نقایص موجود در لایه 2SiO و اینترفیس (واسط) $2\text{Si}/\text{SiO}$ ، به مرور توزیع پتانسیل در این نواحی تغییر کرده که نتیجه آن، تغییر در ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت خواهد بود. در این پژوهش، به کمک شبیهسازی با نرمافزار Silvaco TACD، مقایسه‌های میان تغییرات ولتاژ آستانه در نتیجه دز جمعی تا مقدار 1 Mrad در دو ترانزیستور ماسفت با فناوریهای میکرونی (نسل قدیم) و نانومتری (نسل جدید) پرداخته شد. بدین منظور، دو ترانزیستور با فناوریهای $1/5\text{ }\mu\text{m}$ و 65 nm انتخاب شده و تحت پرتودهی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند، هر اندازه ضخامت لایه اکسید گیت بیشتر باشد، با افزایش دز فرودی، تعداد بارهای مثبت (حفرههایی) به دام افتاده در نقایص ساختار بیشتر خواهد بود، که متعاقب آن، تغییرات بیشتری در ولتاژ آستانه دیده میشود. این موضوع برای فناوری $1/5\text{ }\mu\text{m}$ که ضخامت لایه اکسید در آن 50 nm بود، به وضوح مشاهده گردید. در این ترانزیستور، تغییرات ولتاژ آستانه به حدی بود که با اعمال مقادیر بیش از 1 Mrad ترانزیستور به تدریج عملکرد صحیح خود را از دست داد و ولتاژ آستانه مورد نیاز برای تشکیل کانال به حد صفر رسید. در مقابل، برای فناوری 65 nm که ضخامت لایه اکسید در آن، $1/8\text{ nm}$ در نظر گرفته شده بود، تغییرات بسیار محدودتری در ولتاژ آستانه مشاهده گردید. به عنوان یک نتیجه کلی از بررسیهای انجام شده در این پژوهش میتوان گفت، ترانزیستورهای ماسفت با فناوری نانومتری مقاومت پرتویی بالاتری نسبت به فناوری میکرونی داشته و در مقابل TID، آسیب کمتری را متحمل می‌شوند.

۵ - مراجع:

- [۱] P. V Ma, TP and Dressendorfer, "Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits," (۱۹۸۹).
- [۲] Bhat, Navakanta. "Nanoelectronics Era: Novel Device Technologies Enabling Systems on Chips." Journal of the Indian Institute of Science ۸۷, no. ۱ (۲۰۰۷): ۶۱.
- [۳] Zhang, Chun-Min, Farzan Jazaeri, Giulio Borghello, Federico Faccio, Serena Mattiazzo, Andrea Baschirotto, and Christian Enz. "Characterization and modeling of gigarad-TID-induced drain leakage current of 28-nm bulk MOSFETs." IEEE Transactions on Nuclear Science ۶۶, no. ۱ (۲۰۱۸): ۳۸-۴۷.
- [۴] Wang, Shiping, Xiaojing Li, Xiaowu Cai, Duoli Li, Meichen Jin, Peng Lu, Huiping Zhu et al. "TID effect of MOSFETs in SOI BCD process and its hardening technique." IEEE Transactions on Nuclear Science ۷۰, no. ۸ (۲۰۲۳): ۱۹۹۵-۲۰۰۱.
- [۵] Wang, Yuan, Tao Liu, Zhijiang Dai, Jingyu Tao, Lingli Qian, Hao Wu, and Shengdong Hu. "Analysis of TID Effects on the Threshold Voltage and Breakdown Voltage of 100-V Split-Gate Trench VDMOS." IEEE Transactions on Electron Devices (۲۰۲۴).
- [۶] Ma, Teng, Stefano Bonaldo, Serena Mattiazzo, Andrea Baschirotto, Christian Enz, Alessandro Paccagnella, and Simone Gerardin. "TID degradation mechanisms in 16-nm bulk FinFETs irradiated to ultrahigh doses." IEEE Transactions on Nuclear Science ۶۸, no. ۸ (۲۰۲۱): ۱۵۷۱-۱۵۷۸.



[۷] Clark, Lawrence T., Clifford S. Young-Sciortino, Steven M. Guertin, William E. Brown, Keith E. Holbert, Phaneendra Bikkina, Sumukh Bhanushali, Andrew Levy, Marek Turowski, and Jim D. Butler. "Extracting total ionizing dose threshold voltage shifts from ring oscillator circuit response." IEEE Transactions on Device and Materials Reliability ۲۳, no. ۱ (۲۰۲۳): ۱۶۲-۱۷۱.

[۸] Bonaldo, Stefano, Serena Mattiazzo, Marta Bagatin, Alessandro Paccagnella, Giovanni Margutti, and Simone Gerardin. "Influence of Bulk Doping and Halos on the TID Response of I/O and Core ۱۵۰ nm nMOSFETs." Electronics ۱۲, no. ۳ (۲۰۲۳): ۵۴۳.

[۹] Lin, Zhang, Ma Lin-Dong, Du Lin, Li Yan-Bo, Xu Xian-Feng, and Huang Xin-Rong. "Transient characteristics simulation of total ionizing dose effect on Si n-metal-oxide-semiconductor field effect transistor under different gate voltage." ACTA PHYSICA SINICA ۷۲, ۱۳ (۲۰۲۳).

[۱۰] P. Kumar, M. Vashishath, PK bANSAL. "An Investigation into NMOS at ۶۵ nm using Silvaco TCAD," Int. J. Manag. Technol. Eng. ۸ (۲۰۱۸).



شبیه‌سازی مونت کارلو بر اثر چیدمان لایه‌ها در یک پناهگاه در برابر پروتون‌های رویداد ذرات خورشیدی برای حفاظت فضانوردان در ماموریت‌های فضایی عمیق (کد مقاله : ۱۲۶۴)

وفاپور، حسن* - رفیعی پور، پیمان^۲ - سجاد برزویی سیله^۳، مرادقلی، جواد^۱ - سیدمحمدجواد مرتضوی^۱

۱. گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، ایران

۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳. مرکز تحقیقات سلولی و مولکولی، دانشگاه علوم پزشکی یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده:

در این مطالعه، یک پناهگاه محافظ پرتوی چندلایه برای کاربردهای فضایی طراحی شده است. پایه این پناهگاه از مواد سبک‌وزن و بادوام تشکیل شده که برای ماموریت‌های فضایی ایده‌آل است. در کنار لایه کامپوزیت، یک لایه آب و همچنین مواد جایگزین موجود در فضاپیما، مانند زباله‌های فضایی، متان مایع و هیدروژن مایع در چیدمان مختلفی چیده شده است. از ابزار Geant^۴ برای ارزیابی اثربخشی پناهگاه و اثر پیکربندی‌های مختلف لایه‌ها استفاده شد. در پیکربندی‌هایی که آب قبل از کامپوزیت قرار داشت یا در اطراف آن ساندویچ می‌شد، دز تشعشع در مقایسه با زمانی که کامپوزیت قبل از آب بود کاهش می‌یافت. استفاده از هیدروژن مایع، متان مایع و زباله در یک پیکربندی ساندویچی در اطراف کامپوزیت مناسب نیست.

کلمات کلیدی: رویداد ذرات خورشیدی، پرتوهای کیهانی کهکشانی، حفاظت از فضانوردان، مونت کارلو

A Monte Carlo simulation on the effect of layer arrangement in a shelter against protons in solar particle events for astronaut protection in deep space missions

Vafapour, Hassan^{۱*}, Rafiepour, Payman^۲, Sajad Borzouei-Sileh^۳, Moradgholi, Javad^۱,
Seyed Mohammad Javad Mortazavi^۱

۱. Department of Medical Physics and Engineering, School of Medicine, Shiraz

University of Medical Sciences, Shiraz, Iran

۲. Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz

University, Shiraz, Iran.

۳. Cellular and Molecular Research Center, Yasuj University of Medical Sciences, Yasuj,
Iran

Abstract:

In this study, a multilayered radiation shielding shelter was designed for space applications. The base of the shelter is composed of lightweight, durable materials that are ideally suited for space missions. Next to this composite base, a layer of water as well as considered alternative materials available on a spacecraft, such as space trash, liquid methane, and liquid hydrogen were incorporated. The water was arranged in separate layers of varying thicknesses. The Geant^۴ Monte Carlo toolkit was used to evaluate the shelter's effectiveness and the effect of layer arrangements of water and other materials against protons in solar particle events. In configurations where water was placed before the composite or sandwiched around it, the



radiation dose was reduced compared to when the composite preceded the water. Using liquid hydrogen, liquid methane, and space trash in a sandwich configuration around the composite is not suitable.

Keywords: Solar Particle Event, Galactic Cosmic Rays, Astronaut Protection, Monte Carlo

۱- مقدمه:

قرار گرفتن در معرض تشعشعات کیهانی در طول ماموریت‌های اعماق فضا، خطرات سلامتی قابل توجهی را برای فضانوردان به همراه دارد [۱]. یافتن راه‌های مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای کاهش این خطرات ممکن است یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها برای قادر ساختن انسان به اکتشاف فضای عمیق فراتر از مدار پایین زمین باشد. در حالی که رویکردهای مختلف برای محافظت از فضانوردان، مانند مداخلات دارویی، استفاده از میدان‌های مغناطیسی و... برای افزایش انعطاف‌پذیری بدن در برابر تشعشعات توسعه یافته است، حفاظت فیزیکی مؤثرترین و قابل اعتمادترین روش باقی مانده است [۲]. فضانوردان با چندین منبع اولیه پرتوهای یونیزان، از جمله پرتوهای کیهانی کهکشانی^{۱۱۵} (GCR)، رویدادهای ذرات خورشیدی^{۱۱۶} (SPE) و ذرات ثانویه تولیدشده از طریق اندرکنش بین یون‌های باردار و مواد محافظ اطراف آن‌ها مواجه می‌شوند. با این حال، حفاظت در برابر SPE به دلیل وجود پروتون‌های از ۰ تا ۲۵۰۰ MeV بسیار چالش برانگیز است [۳]. پروژه RadWorks ناسا چند سالی است که در حال بررسی طراحی پناهگاهی است که برای مقاومت در برابر طوفان‌های خورشیدی طراحی شده است. هدف آن عبارت است از ایجاد یک پناهگاه طوفان تشعشعی که از طراحی ساختارهای زیستگاه چندمنظوره و تدارکات برای به حداقل رساندن جرم محافظ تشعشع در هنگام پرتاب استفاده می‌کند [۴]. هرچند مطالعاتی بر روی محافظت از فضانوردان در برابر SPE ارائه شده است، تاکنون مطالعه بسیار کمی مبنی بر بررسی چیدمان لایه‌های یک پناهگاه در سفینه‌های فضایی انجام شده است [۵]. [۶]. با توجه به شار قابل توجه پروتون‌ها در طول طوفان‌های خورشیدی، ابداع استراتژی‌های موثر برای استفاده کامل از تمام منابع موجود در زیستگاه و اطمینان از چیدمان بهینه آن‌ها برای حداکثر کارایی ضروری است. بنابراین، تمرکز این تحقیق شناسایی رویکرد مناسب‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر برای استفاده مؤثر از مواد قابل دسترس و ارزان در زیستگاه‌های فضایی برای حفاظت است.

۲- روش کار:

۲-۱- هندسه فانتوم و پناهگاه

با استفاده از جعبه ابزار Geant^۴ (نسخه ۱۱) [۷]، یک مدل فانتوم مرد MIRD [۸]، در پناهگاه پیشنهادی قرار داده شد (شکل ۱-الف). پناهگاه پیشنهادی دارای چندین لایه از مواد و ضخامت‌های مختلف است. تمام لایه‌ها به صورت پوسته‌های استوانه‌ای تعریف شده‌اند. پلی‌استر با خواص حرارتی برتر و همچنین مقاومت مکانیکی مناسب به عنوان ماده پایه کامپوزیت در پناهگاه استفاده شد. برای افزایش ظرفیت جذب نوترون، کاربید بور (B_۴C) و لیتیوم برومید (LiBr) در ماتریس پلی‌استر گنجانده شدند [۹]. علت آن است که با برخورد پروتون‌های اولیه با بدنه سفینه فضایی (که معمولاً از جنس آلومینیوم است) و همچنین دیگر ادوات و تجهیزاتی که قبل از پناهگاه وجود دارد، ذرات ثانویه به ویژه نوترون تولید می‌شود که می‌تواند اثرات مخربی بر سلامت فضانوردان داشته باشد [۱۰]. انتخاب ترکیبات لیتیوم و B_۴C برای ساخت پوسته‌ها عمدتاً تحت تأثیر خواص محافظ مؤثر آن‌ها در برابر پرتوهای کیهانی کهکشانی و همچنین خواص جرمی مطلوب آن‌ها برای کاربردهای فضایی بود. بر این اساس، کامپوزیت چندلایه در این مطالعه شامل پلی‌استر (۸۰٪)، LiBr (۱۰٪) و B_۴C (۱۰٪) است [۹]. در تمام موارد در نظر گرفته شده در این تحقیق، ضخامت کامپوزیت استفاده شده، ثابت و برابر با ۲/۵ cm است [۱۱]. فاصله ۱ متر از فانتوم تا

^{۱۱۵} Galactic cosmic ray

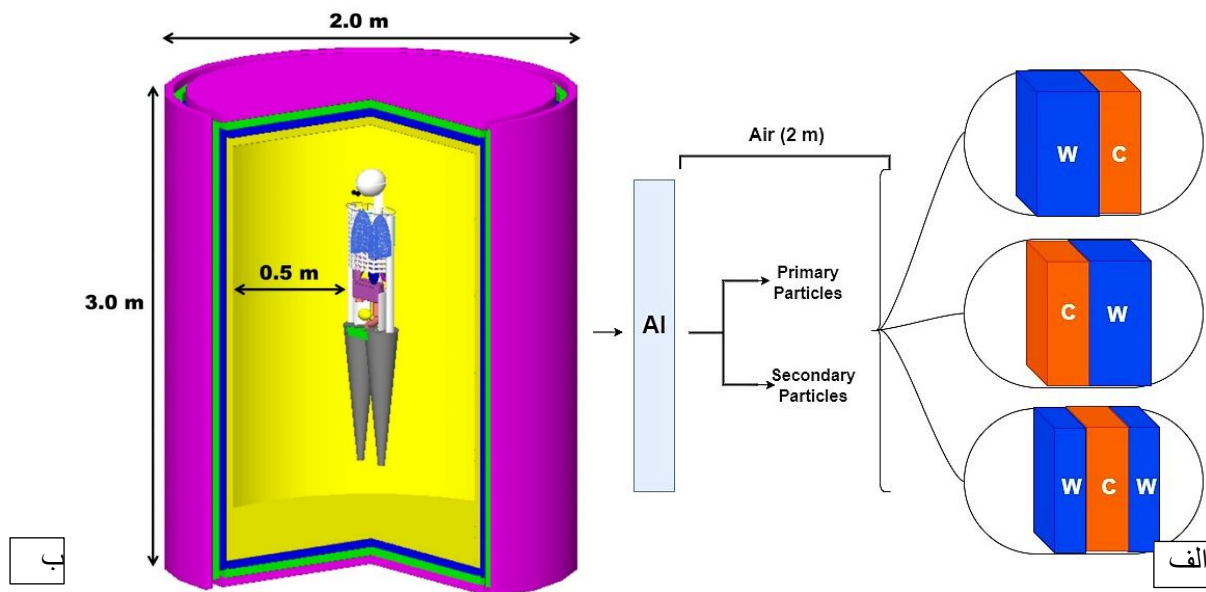
^{۱۱۶} Solar particle event



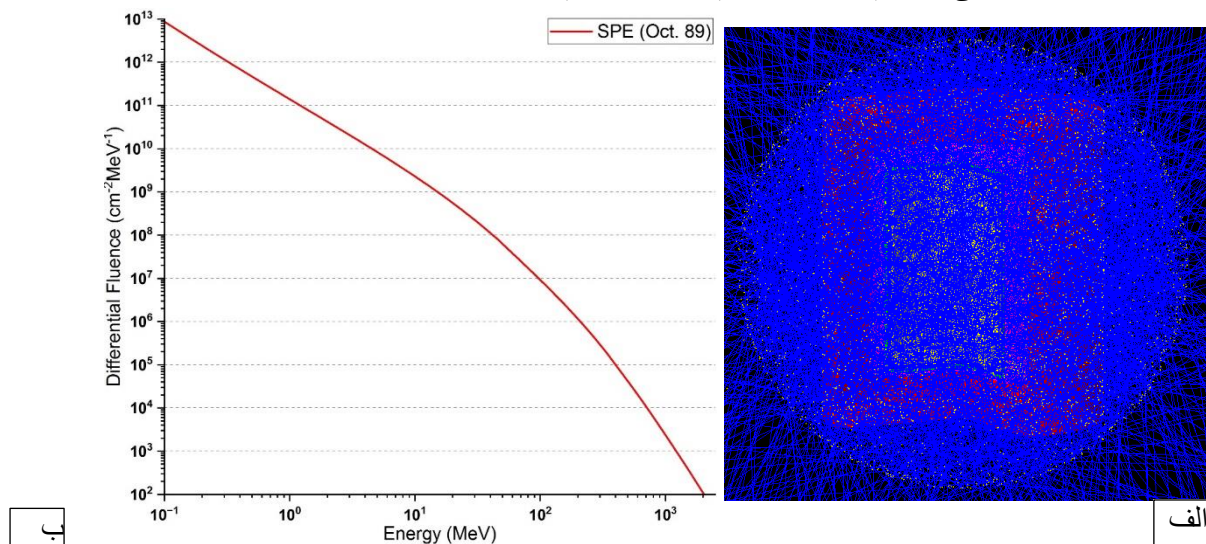
درونی‌ترین لایه پناهگاه چندلایه و همچنین فاصله ۲ متر از آخرین لایه پناهگاه تا جداره آلومینیومی ۲/۵ cm تعیین شد. تمام فضاهای هندسه (فاصله بین پناهگاه و فانتوم و بین پناهگاه و دیوار) از هوا است. شکل ۱-ب پیکربندی‌های مختلف پناهگاه چندلایه را نشان می‌دهد. سه ضخامت ۵، ۷ و ۱۰ سانتی‌متر برای لایه‌های آب (W)، متان مایع (LM)، هیدروژن مایع (LH) و زباله فضایی (T) در نظر گرفته شد. اولین پیکربندی با برجسب WC، آب را قبل از کامپوزیت قرار می‌دهد. پیکربندی دوم، با برجسب CW، آب را در پشت کامپوزیت قرار می‌دهد. در پیکربندی سوم، کامپوزیت بین دو لایه آب قرار می‌گیرد، به طوری که هر لایه آب نیمی از ضخامت کل آب را در شرایط مشابه تشکیل می‌دهد. این با نماد WCW برجسب‌گذاری شده است. ناگفته نماند، وقتی هر ماده دیگر جای آب را بگیرد برجسب آن نیز با توجه به نماد آن ماده عوض می‌شود. بر اساس مراجع [۱۲، ۱۳]، LH با چگالی 0.071 g/cm^3 دمای ۲۰ کلوین و فشار ۱۳۳۰۰۰ پاسکال، LM با چگالی 0.43 g/cm^3 دمای ۹۱ کلوین و فشار ۶۴۰۰۰۰ پاسکال و زباله فضایی شامل یک ماده پلاستیکی با چگالی 0.395 g/cm^3 تعریف گردید. ذکر این نکته ضروری است که برای مقایسه منطقی‌تر اثرات تضعیف هر نوع ماده، باید میزان کاهش شار ذرات اولیه را با ضخامت جرمی یکسان از مواد مورد مطالعه، مقایسه کرد. اما اگرچه برای مقایسه بهتر اثر حفاظتی بین مواد مختلف بهتر است از ضخامت جرم یکسان استفاده شود، اما به دلیل محدودیت حجمی در فضاپیماها نمی‌توان از این نکته در این موارد خاص استفاده کرد. هر چند در وهله اول به نظر برسد که با ثابت شدن ضخامت‌ها، هر چقدر چگالی ماده بیشتر باشد، پس اثر بخشی حفاظتی بیشتر خواهد بود ولی در مورد ذرات اولیه و ثانویه این باید مورد بررسی قرار گیرد. ناگفته نماند، بر اساس مرجع [۱۴] از سازنده فیزیکی QBBC برای تعریف فیزیک مسأله استفاده شده است. این سازنده فیزیکی شامل داده‌های سطح مقطعی و مدل‌های فیزیکی کامل برای برهمکنش‌های هادرونی، الکترومغناطیس استاندارد، نوترونی و همچنین واپاشی است [۱۷].

۲-۲- منبع تابش فضایی

طیف‌های انرژی مختلفی برای SPEها ارائه شده است. بر اساس مرجع [۱۵]، ما از مدل اکتبر ۱۹۸۹ به عنوان یکی از شدیدترین طیف‌های انرژی اندازه‌گیری‌شده SPE تاکنون استفاده کردیم. شکل ۲ طیف بهنجار شده SPE مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. پروتون‌ها از سطح کره‌ای که دیواره آلومینیومی فضاپیما را احاطه کرده است، با تابع توزیع کسینوسی ساطع می‌شوند. با توجه به اینکه فاصله بدنه آلومینیومی فضاپیما تا پناهگاه ثابت است، با تغییر ضخامت لایه‌ها در سپر چندلایه، شعاع منبع تشعشع به گونه‌ای تغییر می‌کند که همواره بر دیواره آلومینیومی مماس باشد. با ۲ میلیارد ذره اولیه، تمام خطاهای آماری کمتر از ۲ درصد شد. شکل ۲-الف نمایی از گسیل پروتون‌های اولیه در Geant⁴ را به نمایش گذاشته است. شکل ۲-ب نیز طیف انرژی پروتون‌های SPE را نشان می‌دهد.



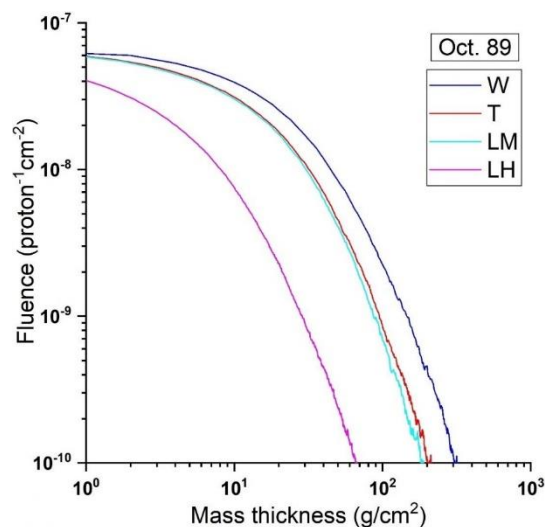
شکل (۱) نمایی از سه چیدمان مختلف پناهگاه (الف) و پناهگاه شبیه‌سازی شده در ابزار Geant^۴ (ب).



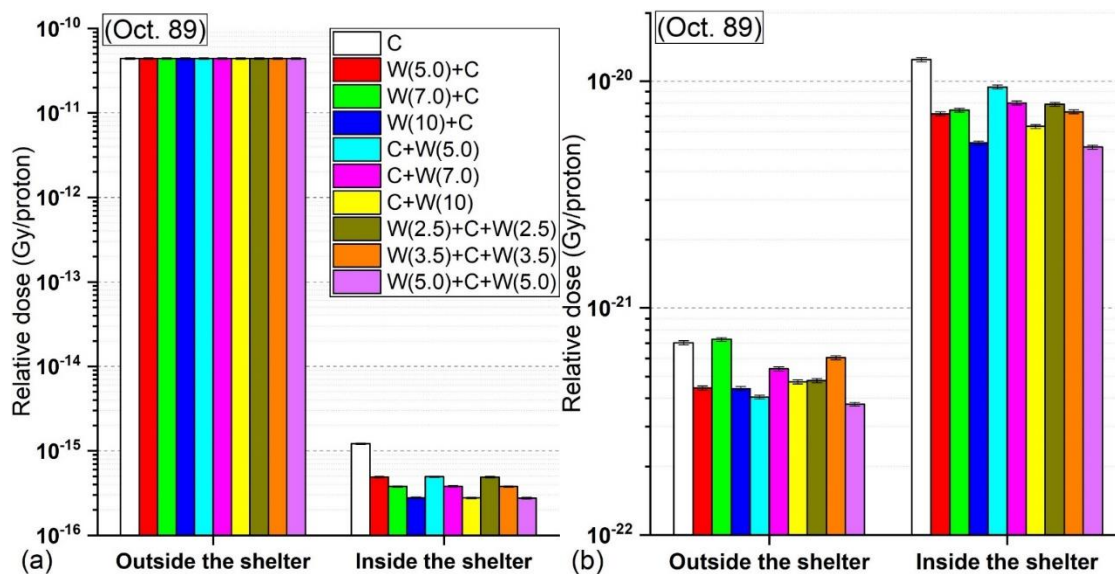
شکل (۲) نمایی از گسیل تابش SPE در Geant^۴ (الف). طیف پروتون‌های SPE در مدل اکتبر ۱۹۸۹ میلادی [۱۳].

۳- نتایج:

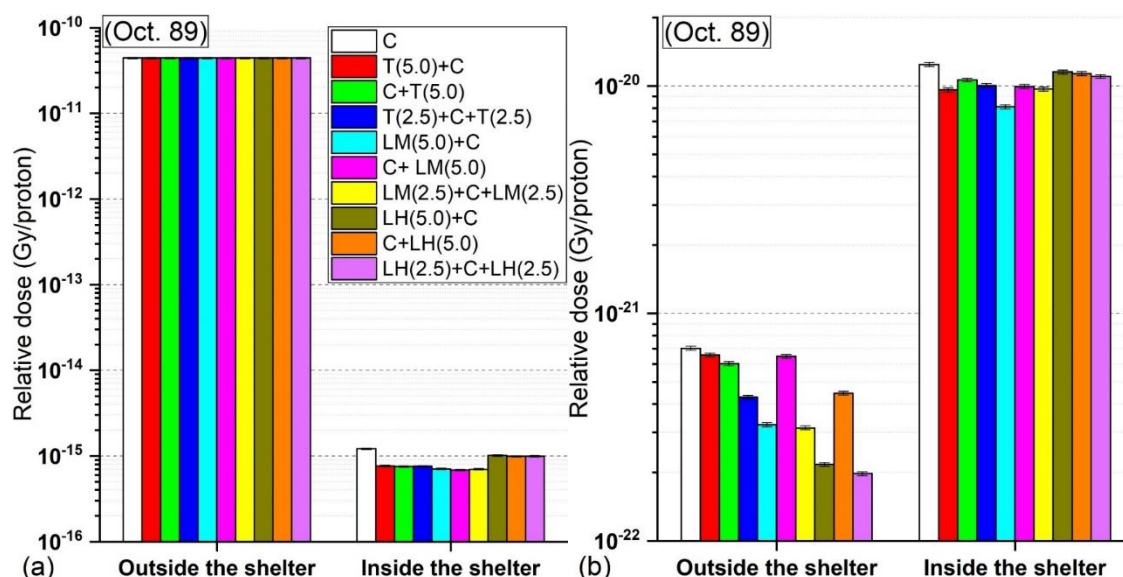
شکل ۳ میزان تضعیف پروتون‌های SPE را در مواد مورد مطالعه با ضخامت جرمی یکسان از ۰ تا 1000 g/cm^2 مورد مقایسه قرار داده است. شکل ۴ دز نسبی جذب شده (Gy به ازای یک پروتون اولیه) در فانتوم انسان توسط ذرات اولیه (۴-ا) و ثانویه (۴-ب) را به ترتیب در داخل و خارج از پناهگاه نشان می‌دهد. این نتایج برای لایه‌های آب و کامپوزیت در سه چیدمان مختلف (WC و CW و WCW) و همچنین سه ضخامت مختلف ۵، ۷ و ۱۰ سانتی‌متر ارائه شده است. شکل ۵ همین نمودارها را برای لایه‌های مواد سبک LH، LM و زباله ارائه کرده است. ناگفته نماند در این موارد تنها ضخامت ۵ cm در نظر گرفته شده است.



شکل (۳) نمایه عمقی شارش ذرات در یک لایه بزرگ از آب (W)، زباله (T)، متان مایع (LM) و هیدروژن مایع (LH) که تحت تابش طیف SPE مدل اکتبر ۱۹۸۹ میلادی قرار گرفته است.



شکل (۴) دز جذب شده به ازای یک پروتون اولیه در فانتوم توسط ذرات اولیه (الف) و ذرات ثانویه (ب) ناشی از SPE مدل اکتبر ۱۹۸۹ میلادی. سه چیدمان مختلف برای لایه آب و کامپوزیت (WC و CW و WCW) و سه ضخامت ۵، ۷ و ۱۰ سانتی متر با هم مقایسه شده‌اند.



شکل (۵) دز جذب شده به ازای یک پروتون اولیه در فانتوم توسط ذرات اولیه (الف) و ذرات ثانویه (ب) ناشی از SPE مدل اکتبر ۱۹۸۹ میلادی. سه چیدمان مختلف برای لایه متان مایع، هیدروژن مایع و زباله فضایی با کامپوزیت و سه ضخامت مختلف ۵، ۷ و ۱۰ سانتی متر با هم مقایسه شده‌اند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

شکل ۴ تفاوت قابل توجهی را در دز جذب شده با تغییر موقعیت لایه‌های آب برای SPE مدل اکتبر ۱۹۸۹ نشان می‌دهد. با توجه به ضخامت آب یکسان، هنگامی که آب بعد از کامپوزیت قرار می‌گیرد، دز فانتوم از ثانویه‌ها بیشتر از دو موردی است که آب قبل از کامپوزیت و حالت ساندویچ است. همچنین، پیکربندی W-C برای یک لایه آب با ضخامت ۱۰ سانتی متر، در مقایسه با حالتی که فقط یک لایه ۲.۵ سانتی متری به عنوان پناهگاه وجود دارد، دز کل داخل پناهگاه را ۶۷/۱٪ کاهش می‌دهد. این مقدار برای پیکربندی‌های W-C-W و C-W به ترتیب ۶۸/۱٪ و ۶۳/۲٪ است. از طرفی، آرایش‌های W-C و W-C-W ثانویه کمتری به ازای هر پروتون اولیه در داخل پناهگاه نسبت به آرایش C-W تولید می‌کنند. دز ثانویه کل به ترتیب ۲۱-۵/۳۴۲e و ۲۱-۶/۳۳۳e و ۲۱-۵/۱۲۷e برای آرایش‌های W-C C-W و W-C-W با لایه آب ۱۰ سانتی متری حاصل شده است. لازم به ذکر است که ذرات ثانویه شامل فوتون‌ها و نوترون‌ها به عنوان دو تابش مهم با عمق نفوذ بالا و دیگر ذرات تولیدی مانند الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، ذرات آلفا و یون‌های سنگین می‌باشد. نکته‌ای که از شکل‌های ۴ و ۵ در مورد ثانویه می‌توان برداشت کرد آن است که هرچند دز ذرات ثانویه در داخل پناهگاه با حضور پناهگاه افزایش می‌یابد اما از آنجایی که دز ثانویه‌ها نسبت به دز کل چندین مرتبه بزرگی کمتر است بنابراین، می‌توان از دید شبیه‌سازی از آن چشم‌پوشی کرد، هرچند مطالعات آزمایشگاهی با فانتوم برای ارزیابی دقیق‌تر دز ثانویه‌ها ضرورت دارد. همانطور که در شکل ۵ مشخص است، با توجه به محدودیت مکانی در فضای پیمان ظرفیت‌های حفاظتی سایر مواد چند منظوره موجود در یک فضای کمتر از آب است. این مواد شامل آجرهای ساخته شده از زباله‌های فضایی و سوخت‌های موجود مانند LH و LM می‌شود. پس از بررسی، مشخص شد که اثر حفاظتی پناهگاه تغییرات ناچیزی در دز هنگام استفاده از سه سری مواد، هم قبل و هم بعد از معرفی کامپوزیت نشان می‌دهد. جالب توجه است، هنگامی که LM، LH، یا زباله‌های فضایی در یک پیکربندی ساندویچ مانند در اطراف کامپوزیت به کار می‌روند، به سطوح حفاظتی نامطلوبی می‌رسند. این در تضاد با نتایج به دست آمده از لایه‌های آب است. این تفاوت را می‌توان به چگالی کم این مواد نسبت به آب نسبت داد. به عنوان نتیجه‌گیری، پیکربندی لایه با آب ۱۰ سانتی متری قبل از کامپوزیت و همچنین پیکربندی ساندویچ شده ۵ سانتی متر آب + کامپوزیت + آب ۵ سانتی متر بهترین محافظت را در برابر SPE نشان داد. در کل، پیکربندی لایه‌های مختلف سطوح مختلفی از حفاظت را نشان می‌دهد که نیاز به استراتژی‌های محافظ مناسب برای



انواع مختلف تشعشع و سطوح انرژی را برجسته می‌کند. در پایان، تاکید بر این امر ضروری است که تحقیقات بیشتر برای ایجاد یک مکانیسم حفاظتی جامع در برابر منابع پرتوهای متنوع فراتر از طوفان‌های خورشیدی ضروری است.

۵- مراجع:

- [۱] Ly, V. et al. (۲۰۲۲). Cardiovascular, Lymphatic, and Ocular Health in Space. Life (Basel, Switzerland), ۱۲(۲), ۲۶۸.
- [۲] Durante, M., & Cucinotta, F. A. (۲۰۱۱). Physical basis of radiation protection in space travel. Reviews of modern physics, ۸۳(۴), ۱۲۴۵.
- [۳] Cloudsley, M., et al. (۲۰۰۶). Calculation of radiation protection quantities and analysis of astronaut orientation dependence. In Space (p. ۷۴۴۱).
- [۴] Simon, M. A., et al. (۲۰۱۳b). Radworks storm shelter design for solar particle event shielding. In AIAA SPACE ۲۰۱۳ Conference and Exposition, ۵۴۳۵.
- [۵] Bahadori, A. A. (۲۰۲۴). Space radiation protection in the modern era: New approaches to familiar challenges. Radiation Physics and Chemistry, ۲۲۱, ۱۱۱۷۶۴.
- [۶] Mortazavi, S. M. J. et al. (۲۰۲۴). Lead-free, multilayered, and nanosized radiation shields in medical applications, industrial, and space research. In Advanced Radiation Shielding Materials (pp. ۳۰۵-۳۲۲). Elsevier.
- [۷] Agostinelli, S., et al. (۲۰۰۳). Geant^۴ simulation toolkit. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A ۵۰۶, ۲۵۰-۳۰۳.
- [۸] Snyder, et al. (۱۹۶۹). Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. Journal of nuclear medicine, ۷-۵۲.
- [۹] Schuy, C., et al. (۲۰۱۹). Experimental Assessment of Lithium Hydride's Space Radiation Shielding Performance and Monte Carlo Benchmarking. Radiation research, ۱۹۱(۲), ۱۵۴-۱۶۱.
- [۱۰] Pavlenko, V. I., et al. (۲۰۲۴). A simulation study on neutron radiation shielding in space conditions. Radiation Physics and Chemistry, ۲۱۵, ۱۱۱۳۵۷.
- [۱۱] NASA, ۲۰۲۲. NASA space flight human-system standard: volume ۱: crew health. In: Health (San Francisco).
- [۱۲] Ewert, M., et al. (۲۰۱۷). Comparing trash disposal to use as radiation shielding for a Mars transit vehicle. ۴۷th International Conference on Environmental Systems.
- [۱۳] Marandola, E., et al. (۲۰۱۹). Using plants and trash to mitigate radiation dose. ۴۹th International Conference on Environmental Systems.
- [۱۴] Ivantchenko, A. V. et al. (۲۰۱۲). Geant^۴ hadronic physics for space radiation environment. International journal of radiation biology, ۸۸(۱-۲), ۱۷۱-۱۷۵.
- [۱۵] Atwell, W., et al. (۲۰۱۱). Spectral analyses and radiation exposures from several ground-level Enhancement (GLE) Solar proton events: a comparison of methodologies. In ۴۱st International Conference on Environmental Systems.



ارزیابی عملکرد نانوالیاف پلیمری پرتویوندی حاصل از الکتروریسی همزمان پلی آکریلونیتریل و نانوزئولیت NaA در جذب دی‌اکسید کربن (کد مقاله: ۱۲۸۰)

اسدالله‌زاده، مهدی - ترکمان، رضوان - تراب مستعدی، میثم

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

چکیده:

کوپلیمریزاسیون پیوندی ناشی از پرتودهی یک روش کارآمد و مناسب از لحاظ اقتصادی در اصلاح سطح جاذب است. در این مطالعه، روش پرتودهی پیوندی تحت گاما به منظور تهیه جاذب مطلوب در جذب دی‌اکسید کربن استفاده گردید. روش الکتروریسی همزمان پلی‌اکریلونیتریل و نانوزئولیت NaA جهت تولید الیاف پایه قبل از پرتودهی انجام گردید. آنالیز پراش اشعه ایکس زئولیت NaA نشان داد که نانوذرات زئولیتی با متوسط ذرات ۱۵۰ نانومتر تحت شرایط هیدروترمال سنتز شده‌اند. منحنی شکست جذب دی‌اکسید کربن از مخلوط گازی CH_4/CO_2 شامل ۵٪ دی‌اکسید کربن و ۹۵٪ متان در شرایط متفاوت ارزیابی گردید. نتایج پرتودهی پلیمری حاوی نانوذرات NaA نشان داد که جاذب سنتز شده از ظرفیت جذب بالا برخوردار است و میزان جذب آن در حدود 3.62 mmol/g بیشتر از نانوالیاف پرتودهی شده تحت همان شرایط و بدون زئولیت با ظرفیت جذب برابر با 3.17 mmol/g است. نتایج بازیابی جاذب در چهار سیکل متوالی نشان داد که جاذب سنتز شده با کاهش ۸.۳۰٪ در ظرفیت جذب از عملکرد مناسب برخوردار است.

کلمات کلیدی: پرتودهی پیوندی، زئولیت، الکتروریسی، ظرفیت جاذب، منحنی شکست

Assessment of the Performance of Radiated Grafting Polymeric Nanofibers Created through Simultaneous Electrospinning of Polyacrylonitrile and NaA Nanozeolite for Carbon Dioxide Adsorption

Asadollahzadeh Mehdi *, Torkaman Rezvan, Torab-Mostaedi Meisam

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶, Tehran, Iran

Abstract:

Radiation-induced graft copolymerization is a cost-effective and efficient method for modifying the surface of the adsorbent. In this study, gamma radiation grafting method was utilized to create the desired adsorbent for capturing carbon dioxide. Before radiation, simultaneous electrospinning of polyacrylonitrile and NaA nanozeolite was conducted to generate the base fibers. Analysis using X-ray diffraction of NaA zeolite revealed the synthesis of zeolite nanoparticles with an average size of ۱۵۰ nm under hydrothermal conditions. The breakthrough curve of carbon dioxide was analyzed using a gas mixture of ۵% carbon dioxide and ۹۵% methane under varying conditions. The radiation of the polymer embedded with NaA nanoparticles indicated that the resulting adsorbent exhibited a high adsorption capacity, measuring approximately 3.62 mmol/g , which was higher than nanofibers radiated under similar conditions without zeolite, featuring an adsorption capacity of 3.17 mmol/g . The recovery results from four consecutive cycles illustrated that the synthesized adsorbent displayed satisfactory performance, with a modest ۸.۳۰% reduction in adsorption capacity.

Keywords: Radiation Grafting, Zeolite, Electrospinning, Adsorption Capacity, Breakthrough Curve



۱- مقدمه:

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های مناسب به منظور جذب و جداسازی دی‌اکسید کربن مورد توجه واقع شده است. جذب گاز دی‌اکسید کربن با استفاده از حلال‌های آمین یکی از کاربردی‌ترین فناوری‌ها در مقیاس صنعتی است. از معایب این روش می‌توان به انرژی بالا برای احیای آمین‌های تخریب شده، خوردگی تجهیزات و مسائل زیست محیطی اشاره کرد [۱]. فرآیند جذب دی‌اکسید کربن روی جاذب‌های جامد با مزایا و معایب متعدد گسترش یافته است. سنتز یک جاذب با ظرفیت و گزینش پذیری بالا، سینتیک سریع، شرایط آسان در بازیابی و تحمل رطوبت با حداقل هزینه مورد توجه در تحقیقات اخیر قرار گرفته است [۲]. الیاف‌های پلیمری برخلاف جاذب‌های دانه‌ای، از ویژگی‌های برتر مانند سطح ویژه بالا، حداقل افت فشار و انعطاف پذیری بالا برخوردار بوده و به عنوان یک بستر جاذب جهت استفاده در کاربردهای زیست محیطی شناخته شده‌اند. رویکرد تغییر ابعاد الیاف از مقیاس میکرو به نانو برای افزایش ظرفیت عملکرد جاذب‌های فیبری بسیار مهم است و فرآیند الکتروریسی یک تکنیک اساسی در تولید نانوالیاف‌های فیبری است [۳]. ترکیب نانوالیاف با ژئولیت، کربن فعال و سایر جاذب‌ها موجب افزایش ظرفیت جاذب در جذب انتخابی عنصر هدف می‌گردد [۴]. علاوه بر روش ساخت کامپوزیت پلیمری حاصل از ترکیب پلیمرها با سایر جاذب‌ها، پلیمریزاسیون پیوند یک روش آسان و کارآمد برای بهبود عملکرد پلیمرها است که در بالا بردن خواص ساختاری پلیمر و زنجیره‌های پیوندی اثر می‌گذارد. پیوند می‌تواند با سیستم اکسیداسیون، احیا و یا پرتودهی انجام شود. استفاده از روش پرتودهی یک فرآیند با بازدهی بالا است که در بهبود خواص پلیمرهای طبیعی و سنتزی بسیار تأثیر می‌گذارد [۵]. عباسی و همکارانش، پرتودهی نانوفیبرهای پلی‌الفین را با عامل‌دار کردن به وسیله گلسیدیل متاکریلات (GMA) و آمین‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد که ظرفیت جذب جاذب ۷۵٪ افزایش یافته است [۶]. یک نوع جدید از جاذب‌های فیبری از پیش‌پرتودهی پیوندی با آلکیل آمین‌ها بر روی فیبرهای پلی‌آکریلونیتریل تهیه گردیدند. برای انجام فرآیند از واکنش ردوکس حاوی آغازگر $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8/\text{NaHSO}_3$ استفاده شد. ظرفیت جذب دی‌اکسید کربن با این جاذب حاوی ۶۰٪ درجه پیوندی برابر با ۶/۲۲ میلی مول به ازای هر گرم جاذب بود [۷]. ناسف^{۱۱۷} و همکارانش، روش آسان پرتودهی پیوندی را برای پیوند زدن N-پلی‌وینیل آمید روی ساختار متخلخل پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا و در ادامه هیدرولیز برای تهیه جاذب پلی‌وینیل آمین برای جذب دی‌اکسید کربن بررسی کردند. پارامترهای پرتودهی پیوندی مانند نوع حلال، غلظت مونومر، مقدار دوز، زمان واکنش برای بررسی درجه پیوندزنی بررسی شدند. جذب استاتیکی دی‌اکسید کربن در دمای محیط و فشار یک بار برابر با ۴۸/۶ میلی گرم بر گرم جاذب با ۱۰۸٪ درجه پیوندی گزارش گردید [۸]. در مطالعات وانگ^{۱۱۸} و همکارانش، پلی‌آکریلونیتریل با وزن مولکولی ۹۰۰۰۰ و پلی‌وینیل پیرولیدین با وزن مولکولی ۱۳۰۰۰۰ برای تولید نانوفیبرهای پلیمری تحت شرایط الکتروریسی استفاده شدند و در نهایت با روش پیوندزنی شیمیایی، پلی‌اتیلن ایمین به عنوان سطح عامل‌دار در سطح نانوفیبرها پیوندزده شد و ظرفیت بالا در جذب دی‌اکسید کربن حاصل گردید [۹]. در این مطالعه، الکتروریسی همزمان نانوزئولیت‌های NaA و پلی‌آکریلونیتریل انجام گردید و با روش پرتودهی پیوندی تحت گاما، جاذب پرتوپیوندی جهت جذب دی‌اکسید کربن سنتز و مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- روش کار:

مراحل سنتز و آماده‌سازی جاذب CO_2 در پنج مرحله انجام گردید. در مرحله اول نانوزئولیت NaA به روش هیدروترمال سنتز گردید. در مرحله دوم نانوالیاف پلیمری ترکیبی از پلی‌آکریلونیتریل و نانوزئولیت NaA با دستگاه الکتروریسی تهیه گردید. پلیمر PAN در حلال DMF به مدت ۱۲ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا محلولی یکنواخت حاصل گردد. سپس نانوزئولیت NaA به محلول اضافه گردید و به مدت دو ساعت تحت شرایط اولتراسونیک قرار گرفت تا محلول هموژن تهیه گردد.

^{۱۱۷} Nasef et al.

^{۱۱۸} Wang et al.

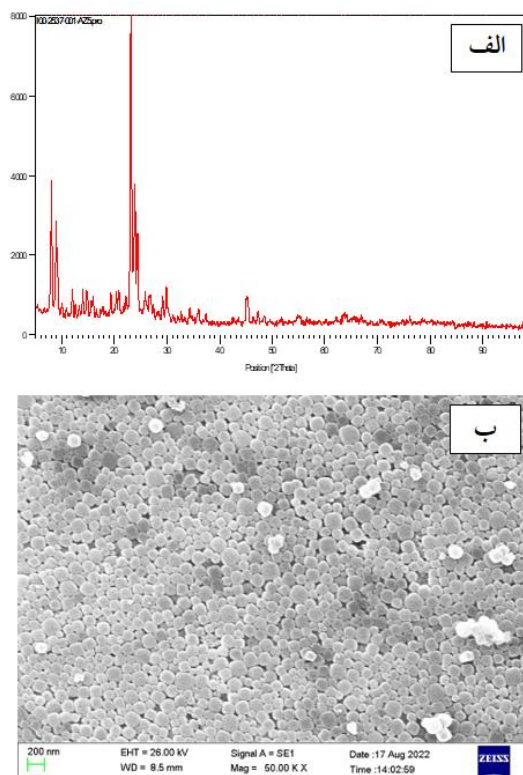


نانوالیاف تولید شده در دستگاه الکتروریسی از روی صفحه جمع‌کننده فلزی جمع‌آوری گردید و به مدت ۳ ساعت در آون با دمای 45°C قرار داده شد تا حلال‌های باقی‌مانده به‌خوبی تبخیر شوند. در مرحله سوم به‌منظور پلیمریزاسیون بستر تهیه شده، نانوالیاف پلیمری داخل محلول مونومر گلسیدیل متاکریلات ۱۵٪ و ۸۵٪ متانول، قرار داده شد. سپس پلیمریزاسیون پیوندی ناشی از تشعشع با پرتودهی گاما و دوز ۲۰ کیلوگری برای ایجاد سایت‌های فعال با مونومر GMA انجام گردید. در مرحله چهارم برای عملکردی کردن جاذب پرتوپیوندی واکنش عامل‌دار کردن بستر با روش آمیناسیون و مخلوط اتانول آمین (غلظت ۶۵٪) در آب انجام گردید. در نهایت پس از خشک شدن کامل جاذب، ظرفیت جذب جاذب سنتز شده با آزمایش‌های تجربی جذب CO_2 از مخلوط گازهای CO_2/CH_4 مورد بررسی قرار گرفت. ستون جذب از پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و قطر ۸/۰ میلی‌متر تهیه گردید و ابتدا و انتهای آن با پشم‌شیشه برای ثابت نگه‌داشتن جاذب پر گردید. مخلوطی از گاز CO_2 و CH_4 با سرعت جریان ۱۰۰ mL/min با محدوده غلظت CO_2 ۵٪ در فشار اتمسفر در دمای محیط استفاده گردید. آنالیزور مادون قرمز با سنسور NIDR و سرعت پاسخ ۲ ثانیه‌ای برای آنالیز دی‌اکسید کربن در بازه ۰ تا ۳۰ درصد حجمی استفاده گردید. ظرفیت جذب نمونه‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

$$Q = \frac{F \times C \times t_q}{W} \quad (1)$$

$$t_q = \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad (2)$$

در معادله فوق، C ، C_0 ، F و W به ترتیب دبی کل (mmol/s)، غلظت اولیه، غلظت خروجی از ستون جذب و وزن جاذب بر حسب گرم هستند.



شکل (۱). (الف) الگو پراش پرتو ایکس و (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذولیت NaA سنتز شده؛



۳- نتایج و بحث:

۳-۱- سنتز نانوزئولیت NaA

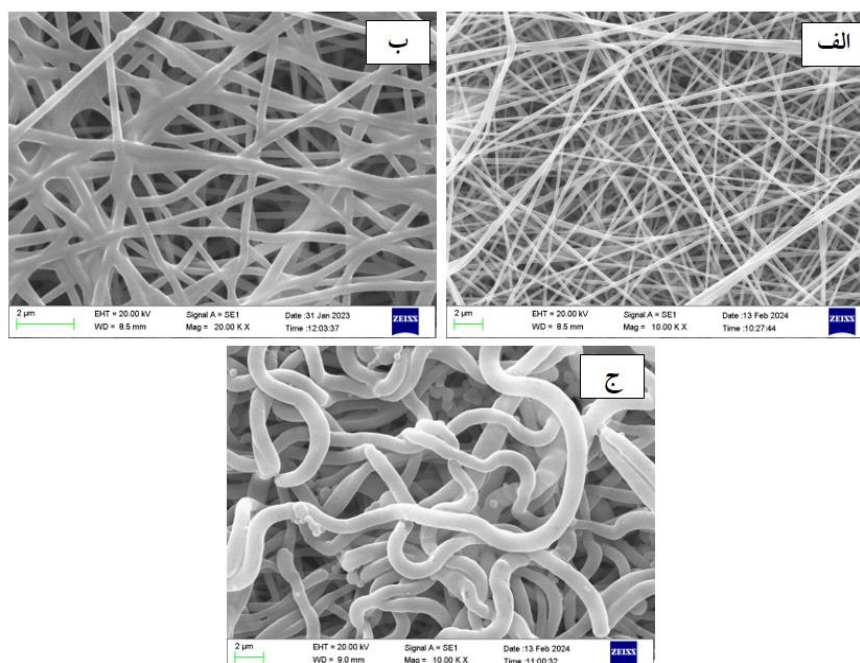
سنتز نانوزئولیت با فرمولاسیون $\text{EtOH } ۵۹/۰$; $\text{H}_2\text{O } ۱۱/۱$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot ۰۳/۰$; $\text{SiO}_2 \cdot ۱۰/۰$; $\text{TMAOH } ۱۵/۰$; NaOH ۰۰۲۶٪ با منابع تترا اتیل اورتو سیلیکات و آلومینیوم ایزو پروپوکساید تحت شرایط هیدروترمال در دمای ۱۰۰°C به مدت ۴۸ ساعت انجام گردید. الگو پراش پرتو ایکس نمونه سنتز شده و تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوزئولیت سنتز شده در شکل (۱) آورده شده است. قله‌های شاخص در زوایای $2\theta = ۱۸/۷$ ، $۱۷/۱۰$ ، $۴۶/۱۲$ ، $۳/۲۱$ ، $۷/۲۳$ ، $۲/۲$ درجه تایید کننده تشکیل فاز زئولیت NaA می‌باشند و ذرات نانوزئولیتی با ساختار کروی و متوسط اندازه ذرات ۱۵۰ نانومتر سنتز گردیده‌اند.

۳-۲- سنتز نانوالیاف پلیمری حاوی نانوزئولیت NaA

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوالیاف پلیمری سنتز شده حاصل از ترکیب نانوزئولیت NaA و پلی اکریلونیتریل قبل از پرتو دهی، بعد از پرتو دهی و بعد از آمیناسیون با اتانول در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد قطر نانوالیاف تهیه شده بعد از پرتو دهی افزایش چشمگیری داشته است و دلالت بر موفقیت در پیوند گلسیدیل متاکریلات با نانوالیاف‌های تهیه شده است. قطر الیاف پیوند شده با GMA پس از واکنش آمیناسیون با اتانول آمین نیز افزایش یافته است، که نشان‌دهنده عملکرد مناسب واکنش آمیناسیون و تشکیل لایه‌های گروه آمینه روی نانوالیاف پس از واکنش است.

۳-۳- ارزیابی عملکرد نانوالیاف پلیمری حاوی نانوزئولیت NaA

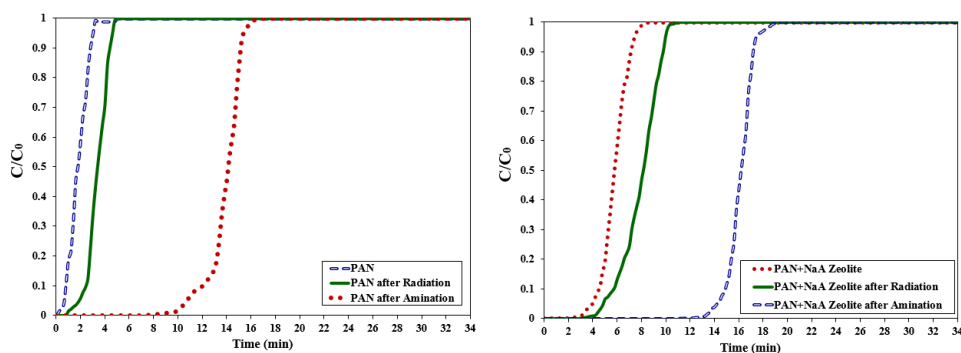
منحنی شکست^{۱۱۹} جذب دی‌اکسید کربن از مخلوط گازی CH_4/CO_2 شامل ۵٪ دی‌اکسید کربن و ۹۵٪ متان در شرایط متفاوت ارزیابی گردید. نتایج حاصل از تست جذب دی‌اکسید کربن توسط نانوالیاف پلیمری حاوی نانوزئولیت NaA و بدون زئولیت در شرایط قبل از پرتو دهی، بعد از پرتو دهی و بعد از آمیناسیون در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوالیاف سنتز شده حاوی پلی‌آکریلونیتریل و نانوزئولیت NaA؛ (الف) قبل از پرتو دهی؛ (ب) بعد از پرتو دهی؛ (ج) بعد از آمیناسیون



ظرفیت جذب با توجه به منحنی شکست ۸۳۰/۲۹۵ و ۳/۶۱۶ میلی مول بر گرم جاذب به ترتیب برای نانوالیاف پلیمری حاوی نانوزئولیت NaA بدون پرتو دهی، بعد از پرتو دهی و بعد از آمیناسیون حاصل گردید. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش ظرفیت جذب با انجام فرآیند آمیناسیون و تشکیل پیوند در سطح نانوالیاف می باشد. ظرفیت جذب نانوالیاف پلی آکریلونیتریل به تنهایی ۴۰۲/ mmol/g است که با استفاده از نانو ذرات به مقدار ۲۹۵/ mmol/g افزایش یافته است. ظرفیت جذب نانوالیاف پلی آکریلونیتریل بدون زئولیت بعد از پرتو دهی نیز ۷۵۹/ mmol/g بوده، که با آمیناسیون به مقدار ۳/۱۶۹ میلی مول بر گرم جاذب می رسد، نتایج نشان می دهد که ترکیب نانوزئولیت در ساختار نانوالیاف پلی آکریلونیتریل با افزایش ظرفیت جاذب همراه است. در مطالعات ناسف^{۱۲۰} و همکارانش، افزایش ظرفیت جذب نانوفیبرهای پلی الفین تحت شرایط پرتو دهی از مقدار ۱/۰۳ به ۱/۴۳ میلی مول بر گرم مشاهده گردید [۱۰].



شکل (۳). منحنی شکست نانوالیاف پلی آکریلونیتریل با و بدون زئولیت NaA قبل از پرتو دهی، بعد از پرتو دهی و بعد از آمیناسیون (مخلوط گاز CO₂ و CH₄ با سرعت جریان ۱۰۰ mL/min، محدوده غلظت CO₂ ۵٪ در فشار اتمسفر و دمای محیط)

مدل توماس مطابق معادله (۳) عمومی ترین و پرکاربردترین مدل برای توصیف فرآیند جذب بستر ثابت است. این مدل رفتار جریان پیوسته بستر را در نظر می گیرد و از ایزوترم لانگمویر برای تعادل و سینتیک یک واکنش مرتبه دوم برگشت پذیر استفاده می کند. در این مدل k_{th} (mL min⁻¹ mg⁻¹) ثابت سینتیکی توماس است، C_t (mg L⁻¹) غلظت خروجی در زمان t ، C_0 (mg L⁻¹) غلظت ورودی، q_0 (mg g⁻¹) حداکثر ظرفیت جذب بستر، Q (mL min⁻¹) نرخ تغذیه، m (g) جرم جاذب و t (min) زمان است.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + e^{\frac{k_{th}q_0m}{Q} - k_{th}t}} \quad (3)$$

داده های ستون برای تعیین ثابت سرعت توماس K_{Th} و حداکثر ظرفیت جذب q_e به مدل توماس برازش شدند. مقدار k_{th} برابر با ۱/۷۹۴ و برای ارزیابی مدل توماس از تحلیل رگرسیون غیرخطی معادله مدل توماس استفاده گردید. مقادیر ضریب همبستگی $R^{۲۱۲}$ ، برابر با ۰/۹۹۹۷، که تطابق خوب بین داده های تجربی و داده های ستون تولید شده با استفاده از معادله مدل توماس است.



احیای جاذب برای استفاده آن در کاربردهای عملی ضروری می‌باشد. جاذبی که توانایی احیا در شرایط محیطی ساده را داشته باشد از نظر اقتصادی بسیار مهم است. عملیات احیا جاذب بهینه سنتز شده در دمای 70°C به مدت ۱۵ دقیقه توسط یک کوئل حرارتی پیچیده شده در ستون جذب انجام گردید. جدول (۱) ظرفیت‌های جذب CO_2 را در نمونه‌های تازه و احیا شده را در سیکل‌های احیا برای جاذب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب نمونه‌های تازه و احیا شده تقریباً یکسان است که نشان‌دهنده پایداری خوب جاذب در برابر فرآیند احیا است. کاهش ظرفیت جذب جاذب تازه تا چرخه چهارم بازسازی تنها منجر به کاهش ۸/۳۰٪ درصدی ظرفیت جذب از ۳/۶۲ به ۳/۳۲ میلی مول بر گرم شده است.

جدول (۱). سیکل‌های احیای نانوالیاف پلی آکریلونیتریل همراه با زئولیت NaA بعد از پرتودهی و فرآیند آمیناسیون

شرایط	جاذب تازه	سیکل اول	سیکل دوم	سیکل سوم	سیکل چهارم
ظرفیت جاذب (میلی مول بر گرم)	۶۲/۳	۵۷/۳	۵۳/۳	۴۵/۳	۳۲/۳

۴- نتیجه‌گیری:

در این پژوهش سنتز نانوزئولیت NaA تحت شرایط هیدروترمال با متوسط اندازه ذرات ۱۵۰ nm انجام گردید. سپس نانوالیاف‌های پلی آکریلونیتریل ترکیب شده با نانوذرات زئولیت NaA به روش الکتروریسی تهیه گردیدند. جذب دی‌اکسید کربن در دمای 25°C در یک سیستم جذب ستونی با بستر ثابت انجام گردید. ظرفیت جذب به صورت آنالین توسط آنالایزر مادون قرمز اندازه‌گیری گردید. ظرفیت جاذب برابر با ۳/۶۲ میلی مول بر گرم حاصل گردید که شرایط احیای آسان و انرژی پایین جهت بازیابی از مزایای جاذب سنتز شده است. نتایج مطالعه نشان داد که پرتودهی پیوندی تحت گاما یک روش مناسب جهت ایجاد رادیکال آزاد و پیوند واکنشی در بستر جاذب به منظور افزایش ظرفیت جذب است.

۵- مراجع:

- [۱] X. Y. D. Soo, C. Lee, W. Wu, L. Tao, C. Wang, Q. Zhu, J. Bu (۲۰۲۴) Advancements in CO_2 capture by absorption and adsorption: A comprehensive review, Journal of CO_2 Utilization, ۸۱: ۱۰۲۷۲۷.
- [۲] Q. Wang, J. Luo, Z. Zhong, A. Borgna (۲۰۱۱) CO_2 capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends, Energy Environmental Science, ۴: ۴۲-۵۵.
- [۳] M. Varghese, G.N. Karanikolos, (۲۰۲۰) CO_2 capture adsorbents functionalized by amine – bearing polymers: A review, International Journal of Greenhouse Gas Control, ۹۶: ۱۰۳۰۰۵.
- [۴] S. Kumar, R. Srivastava, J. Koh (۲۰۲۰) Utilization of zeolites as CO_2 capturing agents: Advances and future perspectives, Journal of CO_2 Utilization, ۴۱: ۱۰۱۲۵۱.
- [۵] O. Güven, B. Han (۲۰۲۲) The prospects for radiation technology in mitigating carbon footprint, Radiation Physics and Chemistry, ۱۹۸: ۱۱۰۲۸۲.
- [۶] A. Abbasi, M.M. Nasef, R. Faridi-Majidid, M. Etesami, M. Takeshi, E. Abouzari-Lotf (۲۰۱۸) Highly flexible method for fabrication of poly (Glycidyl Methacrylate) grafted polyolefin nanofiber, Radiation Physics and Chemistry, ۱۵۳: ۲۸۳-۲۹۱.
- [۷] M.M. Nasef, A. Abbasi, T.M. Ting (۲۰۱۴) New CO_2 adsorbent containing aminated poly(glycidyl methacrylate) grafted onto irradiated PE-PP nonwoven sheet, Radiation Physics and Chemistry, ۱۰۳: ۷۲-۷۴.
- [۸] T. Rojek, L. Gubler, M. M. Nasef, E. Abouzari-Lotf (۲۰۱۷) Polyvinylamine containing adsorbent by radiation induced grafting of N-vinylformamide onto UHMWPE films and hydrolysis for CO_2 capture, Industrial Engineering Chemistry Research, ۵۶: ۵۹۲۵-۵۹۳۴.



- [۹] Y. Wang, Y. Chen, C. Wang, J. Sun, Zh. Zhao, W. Liu (۲۰۱۸) Polyethyleneimine Modified Membranes for CO₂ Capture and in-situ Hydrogenation, ACS Application Material Interfaces ۳۴: ۲۹۰۰۳-۲۹۰۰۹.
- [۱۰] N. A. Mohamad, N. A. Zubair, M. M. Nasef (۲۰۲۳) Converting polyolefin fibres into CO₂ adsorbent by radiation induced grafting, Journal of Innovative Engineering and Natural Science, ۳, ۲: ۷۵-۸۸.



بررسی امکان ارزیابی خوردگی دیواره خط لوله فلزی با استفاده از روش هیبریدی

عبور/پس‌پراکندگی پرتوی گاما (کد مقاله: ۱۳۱۲)

کبیر، مصطفی^۱ - آفریده، حسین^{۱*} - قرقره‌چی، میترا^۲ - چای، جانگ-سئو^۲

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

۲. دانشکده مهندسی برق و فناوری اطلاعات، دانشگاه Skku، سوون، کره جنوبی

چکیده:

خطوط لوله در صنایع انتقال سیالات در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی همواره در معرض انواع خوردگی‌ها از جمله خوردگی‌های اتمسفری در بخش خارجی لوله و سایر خوردگی‌ها در درون لوله هستند. کاهش ضخامت دیواره خط لوله که معیاری از خوردگی است، شاخصی برای ارزیابی خوردگی در فلزات است. روش‌های غیرمخرب متعددی برای این منظور تاکنون توسعه داده شده است. در این پژوهش با استفاده از روش هیبریدی پرتوهای گامای عبوری/پس‌پراکندگی به ارزیابی خوردگی روی دیواره خارجی و تا حد امکان نفوذ پرتو برای جداره داخلی خط لوله پرداخته شده است. با استفاده از چشمه‌های گسیلنده پرتوی گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ و دو پیکربندی آشکارساز سایز بزرگ NaI(Tl) و چهار آشکارساز برای ثبت پرتوهای پس‌پراکندگی استفاده شده است. طیف انرژی پرتوهای بازگشتی از خط لوله برای هر دو حالت پیکربندی های تک آشکارساز و چند آشکارساز اندازه گیری و ثبت شد. میزان پرتوهای عبوری به طور همزمان با پرتوهای پس‌پراکندگی برای هر دو چشمه کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ روی آشکارساز 2×2 اینچ NaI(Tl) اندازه گیری شد. نتایج امکان استفاده از این روش برای ارزیابی خوردگی دیواره‌های خط لوله با ضخامت‌های زیر ۲۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، پرتوی گاما، خطوط لوله، پس‌پراکندگی، آشکارساز NaI(Tl)

Investigation of the Feasibility of Evaluating Corrosion in Metallic Pipeline Walls Using a Hybrid Transmission/Backscattering Gamma-Ray Method

Kabir, Mostafa^{۱*}, Afarideh, Hossein^۱, Ghergherehchi, Mitra^۲, Chai, Jong-Seo^۲

۱. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)

۲. College of Information and Communication Engineering - Electronic and Electrical
Engineering, SKKU University, Sowun, South Korea

Abstract:

Pipelines in the fluid transportation industries, such as oil, gas, and petrochemicals, are consistently exposed to various forms of corrosion, including atmospheric corrosion on the external surfaces of the pipes and other types of corrosion within the internal surfaces. The reduction in pipeline wall thickness, which serves as a measure of corrosion, is a key indicator for assessing corrosion in metals. Numerous non-destructive methods have been developed for this purpose. In this study, a hybrid method utilizing transmitted/backscattered gamma rays has been employed to evaluate corrosion on the external wall and, to the extent possible, to penetrate the internal wall of the pipeline. Cobalt-^{۶۰} and cesium-^{۱۳۷} gamma-ray sources were



used, along with two large-sized NaI(Tl) detector configurations and four detectors for recording backscattered radiation. The energy spectra of the returned radiation from the pipeline were measured and recorded for both single-detector and multi-detector configurations. The transmitted radiation was simultaneously measured with the backscattered radiation for both cobalt- ^{60} and cesium- ^{137} sources using a 2×2 inch NaI(Tl) detector. The results demonstrate the feasibility of this method for assessing corrosion in pipeline walls with thicknesses below 20 mm

Key words: Non-destructive testing, Gamma rays, Pipelines, Backscattering, NaI(Tl) detector

۱- مقدمه:

خطوط لوله به عنوان شریان‌های حیاتی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، نقش اساسی در انتقال سیالات ایفا می‌کنند. با این حال، این سازه‌های فلزی به دلیل قرار گرفتن در معرض شرایط محیطی نامساعد و تماس مداوم با مواد شیمیایی خورنده، همواره در معرض انواع خوردگی‌ها قرار دارند [۱]، [۲]. یکی از معضلات عمده در خطوط انتقال سیالات بخصوص مایعات ترش خوردگی از درون خط لوله است. همچنین از آنجایی که بیشتر مجتمع‌های نفتی و پالایشگاهی در کنار دریاها واقع شده‌اند، بسیار در معرض انواع خوردگی‌های اتمسفری/محیطی هستند. خوردگی نه تنها باعث کاهش ضخامت دیواره لوله‌ها می‌شود، بلکه می‌تواند منجر به نشت مواد، کاهش کارایی سیستم و در نهایت وقوع حوادث جدی با پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی گردد. بنابراین، پایش و ارزیابی دقیق وضعیت خوردگی در دیواره خطوط لوله از اهمیت بالایی برخوردار است.

روش‌های غیرمخرب (NDT) که بعنوان روش‌های تعمیرنگهداری پیشگویانه (PdM) به عنوان ابزارهایی کارآمد برای تشخیص و ارزیابی خوردگی بدون نیاز به تخریب یا توقف عملیات خطوط لوله، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]، [۴]، [۵]. در میان این روش‌ها، روش‌های مبتنی بر پرتوهای گاما به دلیل توانایی نفوذ بالا و دقت قابل توجه، جایگاه ویژه‌ای دارند. روش‌های عبور و پس‌پراکندگی پرتوهای گاما به طور جداگانه در مطالعات متعددی برای ارزیابی خوردگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]، [۷]، [۸]، [۹]. اما ترکیب این دو روش در قالب یک رویکرد هیبریدی می‌تواند مزایای هر دو روش را همزمان فراهم کرده و دقت و قابلیت اطمینان نتایج را افزایش دهد. از طرق مختلف می‌توان خوردگی در دیواره خط لوله را مورد ارزیابی قرار داد. خوردگی همواره با از دست رفتن جرم فلز یا استحاله آن همراه است که موجب کم شدن ضخامت موثر فلز دیواره خط لوله می‌شود. بنابراین با اندازه‌گیری ضخامت دیواره خط لوله می‌توان به معیاری از خوردگی دیواره خط لوله دست یافت. با افزایش شدت میزان پرتوهای رسیده به آشکارساز بر اساس فیزیک تضعیف پرتو می‌توان خوردگی را اندازه‌گیری نمود.

در این پژوهش، امکان‌سنجی استفاده از روش هیبریدی عبور/پس‌پراکندگی پرتوهای گاما برای ارزیابی خوردگی دیواره خطوط لوله فلزی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، از چشمه‌های پرتوی گامای کبالت-۶۰ (^{60}Co) و سزیم-۱۳۷ (^{137}Cs) به همراه آشکارسازهای NaI(Tl) با اندازه بزرگ برای ثبت پرتوهای عبوری و پس‌پراکنده استفاده شده است. هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک روش غیرمخرب دقیق و کارآمد برای تشخیص و ارزیابی خوردگی در دیواره لوله‌هایی با ضخامت کمتر از ۲۰ میلی‌متر است. نتایج این پژوهش می‌تواند به توسعه روش‌های نوین در حوزه پایش خطوط لوله و افزایش ایمنی و طول عمر این سازه‌های حیاتی کمک شایانی نماید.

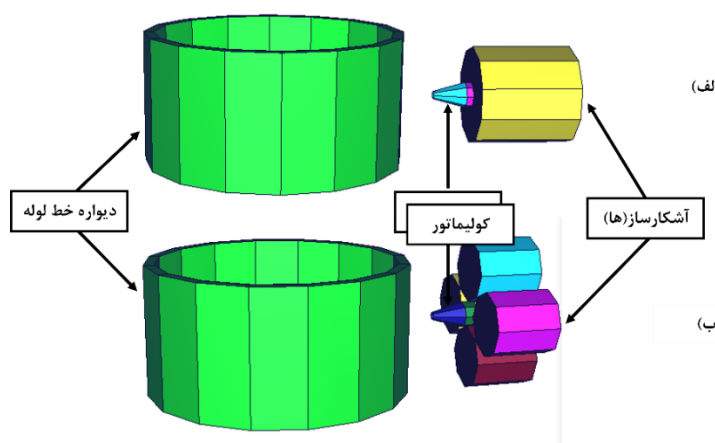


۲- روش کار:

یکی از روش‌هایی که اخیراً برای ارزیابی خوردگی دیواره خط لوله یا دیواره مخازن نگهداری میعانات نفتی مورد توجه قرار گرفته است، روش ارزیابی دیواره خط لوله با استفاده از پرتوهای گامای پس‌پراکندگی است. در این پژوهش با استفاده از دو پیکربندی به بررسی این موضوع پرداخته شده است.

۱. پیکربندی (۱): استفاده از یک آشکارساز بزرگ و چشمه پرتویی که درون یک کولیماتور قرار گرفته است و به سطح بیرونی آشکارساز چسبانده شده است (شکل ۱ الف).

۲. پیکربندی (۲): استفاده از یک کولیماتور که چشمه درون آن است و ۴ آشکارساز در زاویه ۱۸۰ درجه حول آشکارسازها (شکل ۱ ب).



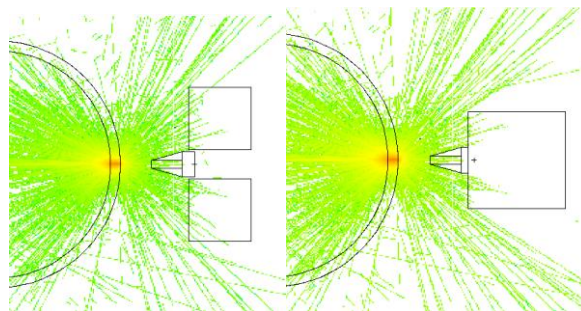
شکل ۱. چینش ارزیابی خوردگی با پرتوی گامای پس‌پراکندگی، الف) پیکربندی (۱) با یک آشکارساز بزرگ و ب) پیکربندی (۲) با ۴ آشکارساز.

در این پژوهش با استفاده از کد مونت‌کارلو MCNPX [۱۰] به محاسبات مربوط به پرتوهای پس‌پراکندگی پرداخته شد است. چشمه مورد استفاده از نوع کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ در نظر گرفته شد و در محل انتهای کولیماتور قرار گرفت. در ناحیه پایه کولیماتور یک قطعه ضخیم سربی و یک ورق نازک مسی به منظور جذب پرتوهای ایکس ترمزی سرب قرار داده شد.

نوع چشمه یدور سدیم NaI(Tl) بوده که حول آن یک لایه نازک آلومینیوم بعنوان هوزینگ قرار گرفته است. برای پیکربندی شماره ۱ یک آشکارساز ۳ اینچ و برای پیکربندی ۲ از ۴ آشکارساز ۲ اینچی استفاده شده است. دیواره خط لوله از جنس متعارف فولاد کربنی (۰.۷٪C) در نظر گرفته شده است.

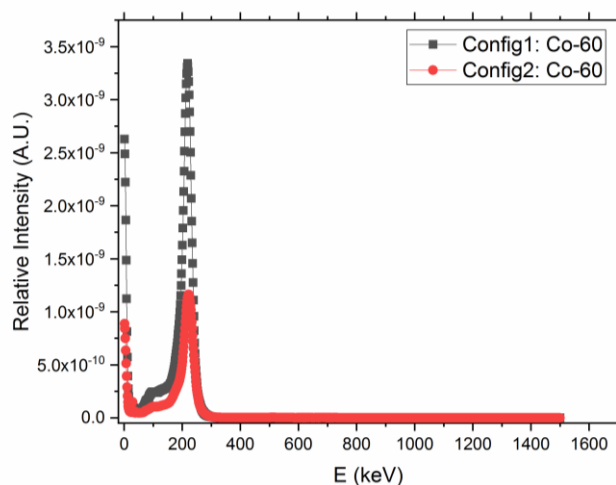
۳- نتایج:

ترابرد پرتوها برای ۲۰۰۰۰ فوتون گسیل شده از چشمه در شکل ۲ نشان داده شده است.

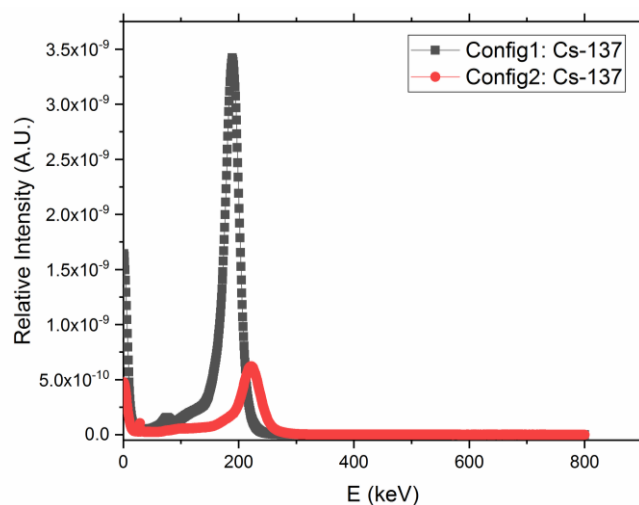


شکل ۲. ترابرد پرتوهای گاما برای ارزیابی میزان پرتوهای پس‌پراکندگی در هر دو پیکربندی تک‌آشکارساز و ۴ آشکارساز پس‌پراکندگی.

پرتوهای بازگشتی از جسم پس از برخورد به آشکارساز کل یا بخشی از انرژی خود را در آن انباشت می‌کنند. طیف انرژی این فوتون‌ها برای پیکربندی‌های ۱ و ۲ برای دو چشمه کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.



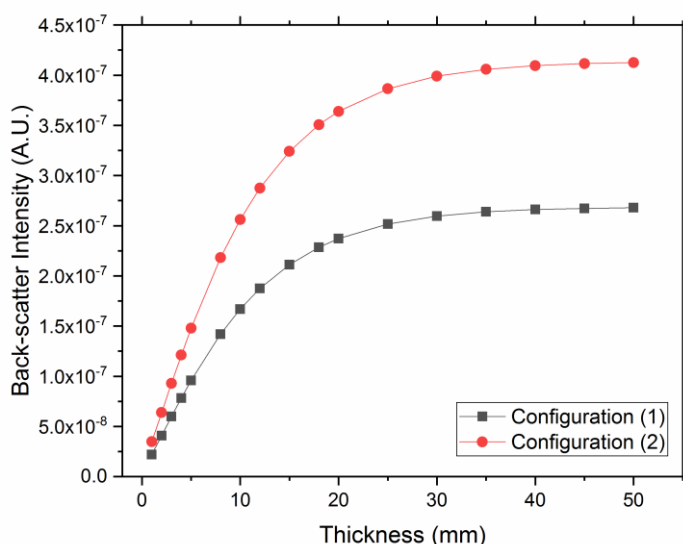
شکل ۳. طیف انرژی پرتوهای گامای پس‌پراکنده گسیل شده از چشمه کبالت-۶۰.



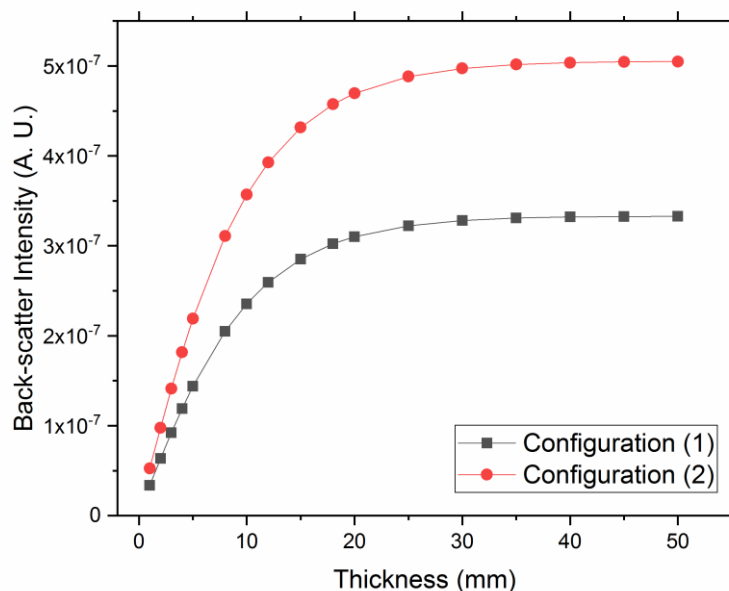
شکل ۴. طیف انرژی پرتوهای گامای پس‌پراکنده گسیل شده از چشمه سزیم-۱۳۷.



بازه انرژی فوتون‌های پرتوی ایکس بازگشتی از هر دو چشمه گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ بین ۱۵۰ keV تا ۲۵۰ keV است. میزان شار بازگشتی از دیواره خط لوله برای هر دو پیکربندی ۱ و ۲ بر حسب میزان ضخامت دیواره خط لوله برای دو چشمه کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ در نمودار شکل ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. شار نسبی فوتون‌های پرتوی گامای ^{60}Co پس پراکنده شده از دیواره خط لوله.



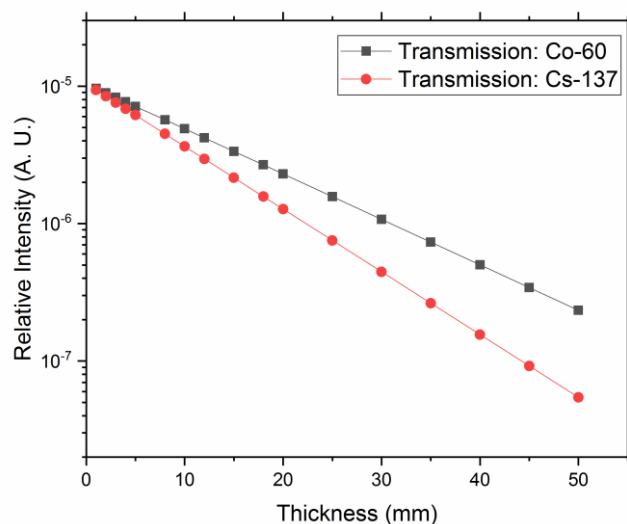
شکل ۶. شار نسبی فوتون‌های پرتوی گامای ^{137}Cs پس پراکنده شده از دیواره خط لوله.

همانگونه که از نمودارهای فوق استنباط می‌شود میزان پرتوهای پس پراکنده ثبت شد در آشکارساز از ضخامت حدود ۲۰ mm برای چشمه کبالت-۶۰ و ضخامت حدود ۱۵ mm برای سزیم-۱۳۷ به مقدار نسبتاً ثابتی میل می‌کند. بنا براین نمی‌توان از این

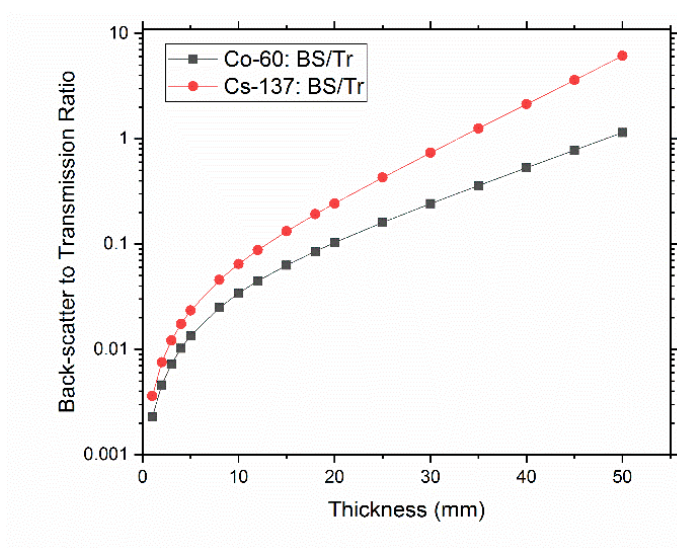


ضخامت‌ها به بیشتر تفکیکی روی ضخامت انجام داد و عملاً امکان ثبت رفتار متغیر پرتوهای ثبت شده با ضخامت دیواره خط لوله که معیاری از خوردگی می‌باشد، نیست و ارزیابی خوردگی غیرممکن است. همچنین میزان پرتوهای پس‌پراکنده شده کم است. حدود ۱ پرتو از یک میلیون فوتون. به همین منظور معمولاً این روش در ترکیب با پرتوای عبوری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پرتوهای عبوری از دیوار خط لوله که عموماً در پروفایل‌گیرهای خطی استفاده می‌شود. این روش دارای برخی ضعف‌ها است از جمله عدم توانایی تفکیک میزان خوردگی با گرفتگی دیواره خط لوله و حساسیت به محل قطری قرارگیری آشکارساز و چشمه. در نمودار شکل ۷ میزان عبور پرتوهای گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ برحسب ضخامت دیواره خط لوله نشان داده شده است.



شکل ۷. شار نسبی فوتون‌های پرتوی گامای عبوری از دیواره خط لوله. نسبت پرتوهای پس‌پراکنده به عبوری می‌تواند معیار مستقلی از میزان خوردگی دیواره خط لوله باشد.



شکل ۸. نسبت پرتوهای پس‌پراکنده به عبوری پرتوهای گاما.



همانگونه که از نمودار شکل ۸ برمی‌آید نسبت پرتوهای گامای پس‌پراکنده به عبوری برای چشمه سزیم-۱۳۷ از کبالت-۶۰ بیشتر بوده است. این به دلیل بالاتر بودن سطح مقطع اندرکنش پراکندگی در زوایای نزدیک ۱۸۰ درجه برای انرژی‌های پایین‌تر است.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش به بررسی امکان استفاده از روش اندازه‌گیری میزان پرتوهای پس‌پراکندگی و به طور همزمان به صورت هیبریدی پرتوهای عبوری برای ارزیابی خوردگی دیواره خط لوله پرداخته شده است. در ابتدا طیف انرژی پرتوهای بازگشتی برای چشمه‌های گامای کبالت-۶۰ و سزیم-۱۳۷ اندازه‌گیری شد. میزان پرتوهای پس‌پراکنده برای خطوط لوله به ضخامت‌ها مختلف از ۱ میلی‌متر تا ۴۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. دو پیکربندی استفاده از آشکارسازهای بزرگ و تعداد ۴ آشکارساز در زاویه ۱۸۰ درجه برای این منظور استفاده شد. میزان بازدهی آشکارسازی برای حالت ۴ آشکارساز بیشتر بوده اما رزولوشن انرژی برای حالت تک آشکارساز بیشتر است. نتایج نشان داد برای ضخامت‌های بیشتر از ۲۰ میلی‌متر برای چشمه کبالت-۶۰ و بیشتر از ۱۵ میلی‌متر برای پرتوهای گسیل شد از چشمه سزیم-۱۳۷ تقریباً به یک ناحیه فلت رسیده و بیشتر از آن به دلیل جذب بالا در مسیر بازگشت پرتو عملاً امکان بازرسی غیرمخرب وجود نخواهد داشت. نسبت پرتوهای عبوری به پس‌پراکنده شده نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت که می‌تواند معیار مستقل مناسبی از ارزیابی خوردگی به دست دهد.

۵- مراجع:

- [۱] K. Liao, M. Qin, M. Wang, S. Zhang, L. Wu, and N. Yang, "Probing pipe flow impact corrosion monitoring effectiveness under corrosion monitor coupons conditions," *Fuel*, vol. ۳۵۳, p. ۱۲۹۲۸۸, Dec. ۲۰۲۳, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.fuel.۲۰۲۳.۱۲۹۲۸۸.
- [۲] S. Ritter, Anders. Molander, European Federation of Corrosion., and M. Institute of Materials, *Corrosion monitoring in nuclear systems : research and applications*. Maney Pub, ۲۰۱۰.
- [۳] N. Fabris and R. D. Lopez, *Materials and Processes for NDT Technology*, ۲nd ed. American Society of Non-destructive Testing (ASNT), ۲۰۱۶.
- [۴] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier, ۲۰۰۲.
- [۵] S. Selcuk, "Predictive maintenance, its implementation and latest trends," *Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf*, vol. ۲۳۱, no. ۹, pp. ۱۶۷۰-۱۶۷۹, Jul. ۲۰۱۷, doi: ۱۰.۱۱۷۷/۰۹۵۴۴۰۵۴۱۵۶۰۱۶۴۰.
- [۶] A. A. E. ElHoushy, M. H. Hassan, A. Y. Soliman, and M. A. Abou Mandour, "Use of Gamma Ray Back Scattering Method for Corrosion Assessment in Insulated Pipes," *Key Eng Mater*, vol. ۷۸۶, pp. ۱۶۵-۱۷۳, Oct. ۲۰۱۸, doi: ۱۰.۴۰۲۸/www.scientific.net/KEM.۷۸۶.۱۶۵.
- [۷] S. Abdul-Majid and Z. Tayyeb, "Use of Gamma Ray Back Scattering Method for Inspection of Corrosion under Insulation," Jan. ۲۰۰۵.
- [۸] S. Kolkoori, N. Wrobel, U. Zscherpel, and U. Ewert, "A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials," *NDT & E International*, vol. ۷۰, pp. ۴۱-۵۲, Mar. ۲۰۱۵, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.ndteint.۲۰۱۴.۰۹.۰۰۸.
- [۹] M. Licata *et al.*, "Depicting corrosion-born defects in pipelines with combined neutron/ γ ray backscatter: a biomimetic approach," *Sci Rep*, vol. ۱۰, no. ۱, Dec. ۲۰۲۰, doi: ۱۰.۱۰۳۸/s۴۱۵۹۸-۰۲۰-۵۸۱۲۲-۳.
- [۱۰] L. S. Waters *et al.*, "The MCNPX Monte Carlo Radiation Transport Code," in *AIP Conference Proceedings*, AIP, ۲۰۰۷, pp. ۸۱-۹۰. doi: ۱۰.۱۰۶۳/۱,۲۷۲۰۴۵۹.



حذف رنگ مالاشیت گرین از پساب‌های آبی با استفاده از جاذبهای هیدروژلی بر پایه کیتوسان-کورکامین اصلاح سطحی شده با پروسیانیدین ب^۱ به کمک روش پرتودهی گاما (کد مقاله : ۱۴۰۰)

رضا حافظی مقدم^{*۱۲۲}، سعیده دهشیری^۲
۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها

چکیده

جاذب‌های هیدروژلی کیتوسان-کورکامین (Chit-Cur) و اصلاح شده با پروسیانیدین ب^۱ (Chit-Cur/PCB^۱) ساخته شد و پتانسیل آن‌ها در حذف رنگ مالاشیت گرین (MG) در نمونه‌های آبی بررسی گردید. هیدروژل Chit-Cur از طریق اتصال بخش فنولی کورکامین به کیتوسان با استفاده از یک واکنش شیمیایی هتروژن و قرار گرفتن در معرض تابش گاما تهیه شد و سپس سطح هیدروژل از طریق یک واکنش شیمیایی هتروژن دیگر با پروسیانیدین ب^۱ اصلاح شد. ساختار شیمیایی جاذبهای هیدروژلی از طریق آنالیزهای طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD) و ترموگراویمتری (TGA) مورد ارزیابی قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: حذف رنگ، پرتودهی گاما، کیتوسان، پروسیانیدین ب^۱، هیدروژل، مالاشیت گرین.

Removal of Malachite Green Dye from Aqueous Wastewater Using a Chitosan-Curcamine-Based Hydrogel Adsorbent Surface-Modified with Procyanidin B¹ Using Gamma Irradiation

Reza Hafezi Moghadam^۱, Saeideh Dehshiri^۲

Abstract:

Chitosan-curcamine (Chit-Cur) and modified with procyanidin B¹ (Chit-Cur/PCB¹) hydrogel adsorbents were prepared and their potential in removing cationic dye methylene green (MG) from aqueous samples was investigated. Chit-Cur hydrogel was prepared by attaching a phenolic part of curcamine to chitosan using a heterogeneous chemical reaction and exposure to gamma radiation, and then the hydrogel surface was modified by another heterogeneous chemical reaction with procyanidin B¹. The chemical structure of the hydrogel adsorbents was evaluated by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction spectroscopy (XRD), and thermogravimetry (TGA) analyses.

Key words: Dye Removal, Gamma Irradiation, Chitosan, Procyanidin B¹, Hydrogel, Methylene Green.

^{*۱۲۲} ایمیل نویسنده مسئول: rhafezimoghadam@aeoi.org.ir



۱- مقدمه:

فعالیت‌های مراکز صنعتی مختلف کشاورزی، نساجی، پزشکی، پتروشیمی و فاضلاب‌های خروجی آنها یکی از مهمترین عوامل آلودگی منابع آبهای طبیعی در جهان می‌باشد. این پساب‌ها اغلب شامل فلزات سنگین و ترکیبات آلی سمی (مانند رنگ‌ها، آفت کش‌ها، سموم، کودهای کشاورزی و...) می‌باشد. در نتیجه توسعه روش‌های جدید و کارآمد برای حذف این آلاینده‌ها در محیط آبی امری ضروری می‌باشد. در میان آلاینده‌ها، رنگ‌های آلی به علت کاربرد فراوان در صنعت، سرطانزا بودن، مقاومت در برابر نور خورشید و میکروارگانیسم‌ها و همچنین نامطبوع نمودن طعم و رنگ آب می‌تواند اثرات مخرب بیشتری برای سلامتی انسان و طبیعت داشته باشد [۱]. در میان روش‌های حذف آلاینده‌ها، روش جذب سطحی با استفاده از جاذب‌های پلیمری به خاطر کم هزینه بودن، اپراتوری ساده و انتخابگری بالاتر، روش مناسب و موثرتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد [۲]. یکی از این جاذب‌های پلیمری موثر در فرآیندهای حذف و تصفیه، هیدروژل‌ها می‌باشد. هیدروژل‌ها پلیمرهای سه بعدی آب‌دوستی می‌باشد که از ایجاد اتصالات عرضی شیمیایی یا فیزیکی بین زنجیره‌های ماکرومولکول خطی پلیمرها شبکه‌ای و تهیه می‌شود. این پلیمرهای آب‌دوست به دلیل داشتن خواص تورمی سریع و ظرفیت جذب بالای آب برای حذف آلاینده‌ها موجود در نمونه‌های آبی مناسب تشخیص داده شده‌اند.

کیتوسان یکی از مشتقات بیوپلیمر کیتین بوده که از پوست آبزبان سخت پوست (مانند میگو و خرچنگ) استخراج می‌شود. علاوه بر کاربردهای تجاری در صنایع مختلف پزشکی و داروسازی، بعلاوه حضور گروه‌های عاملی آمینی و هیدروکسیل در ساختارشان، توانایی خوبی برای حذف فلزات سنگین و آلاینده‌های رنگی دارد. یکی از بهترین تکنیک‌ها برای ساخت جاذب‌های هیدروژل، روش پرتودهی گاما می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های شیمیایی به علت عدم استفاده از معرف‌های شیمیایی آغازگر و شبکه‌ساز و امکان سنتز و استریل نمودن هیدروژل در یک مرحله به صورت همزمان، یک محصول پاک و خالص ایجاد می‌نماید. تهیه هیدروژل بر پایه بیوپلیمرهای طبیعی خالص با استفاده از روش پرتودهی گاما منجر به شکسته شدن زنجیره‌های مولکولی پلیمر و عدم تشکیل ساختار ماکرومولکول کراسلینک شده می‌گردد. جدیدترین روش برطرف نمودن این مشکل، اتصال بیوپلیمر با معرف‌های فنولی یا پلی فنولی می‌باشد [۳]. پس از پرتودهی این بیوپلیمر متصل شده با فنولها/پلی فنولها، ماکرورادیکال‌های آزاد فنوکسی تشکیل شده بر روی زنجیره پلیمری نقش اصلی را در ایجاد اتصالات عرضی و ایجاد ساختار شبکه‌ای ایفا می‌کند. کورکامین یکی از ترکیبات آنتی اکسیدان پلی فنولی گیاهی می‌باشد که در صنعت غذایی بعنوان طعم دهنده و رنگ خوراکی کاربرد فراوانی دارد. در این مطالعه برای اولین بار از این معرف برای ساخت جاذب هیدروژلی بر پایه کیتوسان به کمک روش پرتودهی گاما استفاده گردید. در یک مطالعه پیغمبر دوست و همکاران یک نانکامپوزیت هیدروژلی برپایه کربوکسی متیل سلولزگرافت شده با پلی آکریل آمید/مونت موریلونیت با روش شیمیایی با ظرفیت جذب 172 mg/g برای حذف مالاشیت گرین از نمونه‌های آبی تهیه نمودند [۴]. در یک مطالعه دیگر ورما و همکاران یک هیدروژل بر پایه سدیم آلژینات-آکرلیک اسید اصلاح شده با گرافیت سنتز نموده و از آن بعنوان جاذب رنگ مالاشیت گرین در محیط‌های آبی استفاده نمودند [۵]. حضور گرافیت در ساختار جاذب هیدروژلی موجب افزایش ظرفیت جذب جاذب گردید.

پلی فنولها تمایل زیادی به جذب آلاینده‌های کاتیونی معدنی و آلی به خاطر حضور فراوان حلقه‌های بنزنی و گروه‌های هیدروکسیل در ساختارشان دارند. PCB ۱ یک ماده پلی فنولی طبیعی است که به وفور در ریشه و برگ دارچین، انگور و هلو یافت می‌شود. بهمین منظور در مرحله آخر این مطالعه برای افزایش ظرفیت جذب رنگ جاذب هیدروژلی معرفی شده، سطح آن با PCB ۱ اصلاح گردید.

۲- مواد و روش‌ها

کیتوسان با جرم مولکولی بالا، کورکامین و PCB ۱ از شرکت سیگما آلدردیج آمریکا خریداری گردید. تمامی مواد شیمیایی دیگر مورد استفاده در این مطالعه دارای خلوص تجزیه‌ای بوده و از شرکت مرک آلمان خریداری شده است برای پرتودهی گاما نمونه‌ها از سامانه پرتودهی گاما (واقع در شرکت توسعه کاربرد پرتوها، تهران) با نرخ دز پرتودهی 1 kGy/h استفاده گردید.



۱-۲- سنتز کیتوسان متصل شده با کورکامین (Chit-Cur)

۲ g از پودر کیتوسان همراه با ۱ g از کورکامین به ۵۰ mL اتانول اضافه گردید و مخلوط به شدت توسط همزن مکانیکی در دمای اتاق به مدت ۷۲ ساعت هم زده شد. سپس مخلوط به مدت ۵ دقیقه و با سرعت چرخش ۳۰۰۰ rpm سانتریفیوژ و پس از سرریز کردن محلول بالایی، رسوبات باقی مانده دو مرتبه با اتانول جهت حذف کورکامین اضافی شستشو گردید. در نهایت محصول شسته شده، در آن در دمای ۵۰ °C خشک و برای استفاده‌های بعدی درون ظرف‌های پلی اتیلنی نگهداری شد. برای تعیین مقدار اتصال کورکامین با کیتوسان از روش اسپکتروفتومتری استفاده شد. برای این منظور، ۰/۱ g از Chit-Cur در ۱۰۰ mL مخلوط اسید استیک ۱٪ v/v و اتانول (۱:۲) حل شد و سپس جذب آن در ۴۲۷ nm اندازه‌گیری شد. مقدار Cur مزدوج شده با Chit با استفاده از نمودار معیارگیری محلول‌های استاندارد Cur در مخلوط اسید استیک و اتانول تعیین گردید.

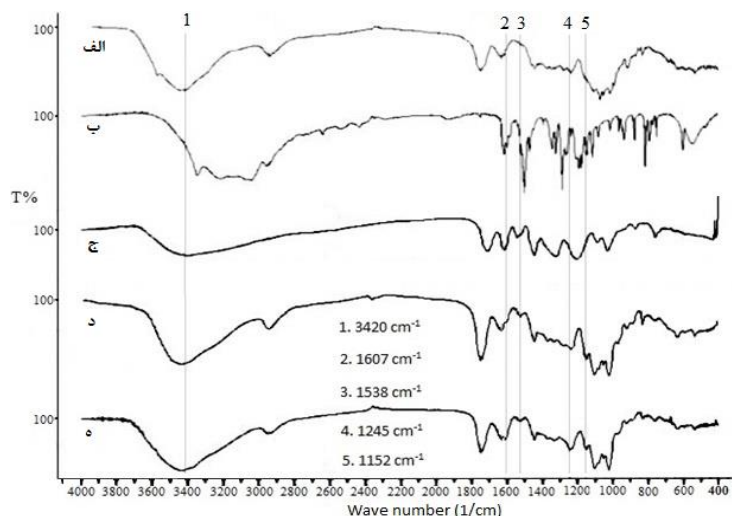
۲-۲- سنتز هیدروژل‌ها

۲ گرم از Chit-Cur تهیه شده به ۵۰ mL اسید استیک ۱٪ v/v اضافه گردید و مخلوط به مدت ۱ ساعت در دمای اتاق توسط همزن مکانیکی هم زده شد. سپس محلول ژل به دست آمده به درون پتری دیش ریخته و روی آن با پلاستیک بمنظور جلوگیری از تبخیر رطوبت ژل پوشانده شد. پتری دیش‌های حاوی ژل تحت تابش دزهای مختلف پرتو گاما در گستره ۱۰-۴۰ kGy قرار داده شد. هیدروژل الاستیک به دست آمده پس از پرتو دهی سه مرتبه با آب مقطر شسته شد تا Chit-Cur واکنش نداده یا شکسته شده حذف گردد. سپس هیدروژل حاصله در دمای اتاق به مدت ۳ روز خشک گردید. هیدروژل‌های خشک شده با استفاده از آسیاب چکشی به ذرات ریز (در ابعاد ۳۰۰-۸۰۰ میکرون) تبدیل شد. برای سنتز هیدروژل اصلاح شده ۲ گرم از هیدروژل Chit-Cur به ۱۰۰/۰ mL مخلوط قلیایی آب/اتانول (۱:۱ v/v) اضافه شد و به صورت سوسپانسیون در آمد. سپس ۱۰/۰ mL اپی کلروهیدرین (ECH) به مخلوط سوسپانسیون اضافه و به مدت ۴ ساعت رفلاکس شد. در این مرحله ECH به سطح هیدروژل Chit-Cur متصل شد. در مرحله بعد، هیدروژل‌ها با کاغذ صافی جداسازی و با آب مقطر و اتانول شسته شد تا معرف‌های ECH واکنش نداده حذف گردد. سپس، هیدروژل شسته شده به ۵۰/۰ mL آب/اتانول (۱:۱ v/v) حاوی ۲٪ (PCB) (۱w/v) اضافه گردید. pH مخلوط با استفاده از سود غلیظ روی ۱۰/۰ تنظیم و سپس در دمای ۶۵ °C به مدت ۸ ساعت رفلاکس شد. پس از اتمام واکنش هیدروژل‌ها روی کاغذ صافی جمع‌آوری و ۲ مرتبه با آب مقطر شسته شد و در دمای اتاق بمدت ۳ روز خشک گردید. تغییر رنگ هیدروژل به کرم متمایل به قهوه‌ای نشان دهنده اتصال موفقیت‌آمیز PCB بر سطح هیدروژل Chit-Cur است.

۳- نتایج

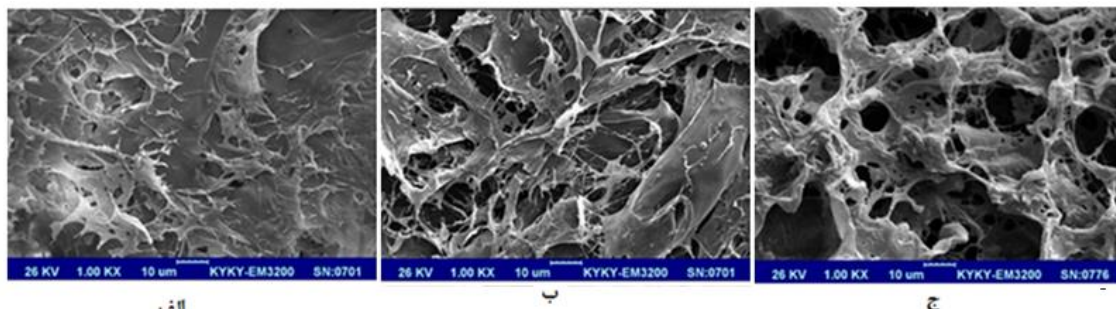
۱-۳- مشخصه یابی نمونه‌های هیدروژل

برای تایید اتصال یک بخش فنولی Chit با Cur و هم‌چنین تشکیل هیدروژل‌های Chit-Cur و Chit-Cur/PCB، طیف‌های FTIR اجزای هیدروژل‌ها ثبت گردید (شکل ۱). کاهش و جابه‌جایی پیک N-H خمشی نوع اول کیتوسان از ۱۵۹۲ به ۱۵۳۶ cm⁻¹، حضور پیک‌های ویژه C=C کششی آروماتیک حلقه بنزنی Cur در ۱۵۲۰ cm⁻¹ و هم‌چنین افزایش شدت پیک در ۱۶۷۰ cm⁻¹ ناشی از هم‌پوشانی گروه وینیلی Cur و گروه‌های C=O آمیدی نوع دوم تازه تشکیل شده در طیف هیدروژل Chit-Cur نسبت به طیف کیتوسان خالص دلالت بر اتصال موفقیت‌آمیز یک بخش فنولی از Cur بر روی Chit می‌باشد. افزایش نسبی شدت پیک C=C کششی آروماتیک در عدد موجی ۱۶۰۷ cm⁻¹ در طیف هیدروژل Chit-Cur/PCB نسبت به طیف هیدروژل Chit-Cur نشانه تثبیت PCB بر سطح هیدروژل Chit-Cur می‌باشد. به‌علاوه پهن‌تر شدن نوار O-H کششی (در ۳۴۲۰ cm⁻¹) در طیف هیدروژل Chit-Cur/PCB (نسبت به طیف Chit و هیدروژل Chit-Cur) تایید کننده تشکیل پیوند C-O-C بین ECH (به عنوان اتصال‌دهنده PCB بر ساختار هیدروژل) و گروه هیدروکسیل Chit می‌باشد.



شکل (۱) طیف‌های FTIR (الف Chit ، ب Cur ، ج PCB ، د هیدروژل Chit-Cur و ه هیدروژل Chit-Cur/PCB).

متفاوت بودن مورفولوژی سطح Chit-Cur قبل (شکل‌های ۲ الف) و بعد (شکل‌های ۲ ب) از تابش گاما در عکس‌های SEM از نظر ناصافی و ساختار شبکه‌ای سه بعدی متخلخل نشان دهنده تشکیل ساختار هیدروژلی می‌باشد. ساختار باز و متخلخل مرتبط به هم شبکه‌های هیدروژل باعث افزایش نفوذپذیری و انتقال راحت‌تر مولکول‌های رنگ به عمق ساختار هیدروژل و در نتیجه باعث افزایش ظرفیت جذب و کارایی آن‌ها به عنوان جاذب می‌شود. ساختار متخلخل هیدروژل‌ها می‌تواند ناشی از جابجایی مولکول‌های آب در حین فرآیند شبکه‌سازی زنجیره‌های بیوپلیمری باشد. ظهور یک لایه سفید رنگ بکنواخت و همگن (بدون تجمع) بر سطح هیدروژل (شکل ۲ ج) نشانه تثبیت موفقیت‌آمیز PCB بر هیدروژل می‌باشد. علاوه بر این شکل ۲ ج نشان دهنده حفظ تخلخل در ساختار هیدروژل پس از انجام واکنش ثانویه اصلاح سطح می‌باشد.

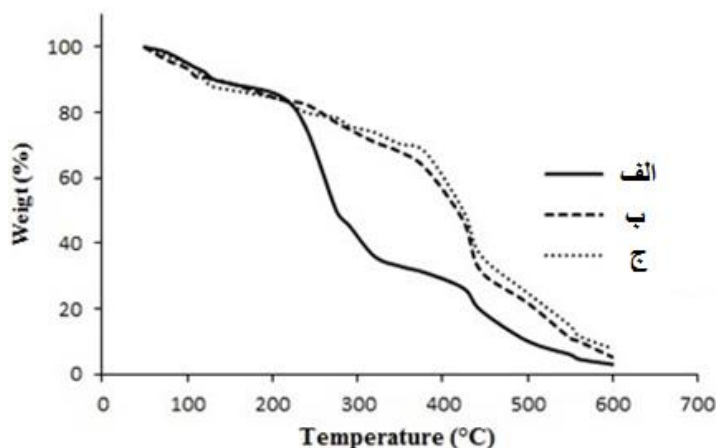


شکل (۲) تصاویر SEM بیوپلیمر Chit-Cur قبل (الف) و بعد (ب) از تابش گاما، هیدروژل Chit-Cur/PCB بعد از پرتودهی الکترون (ج).

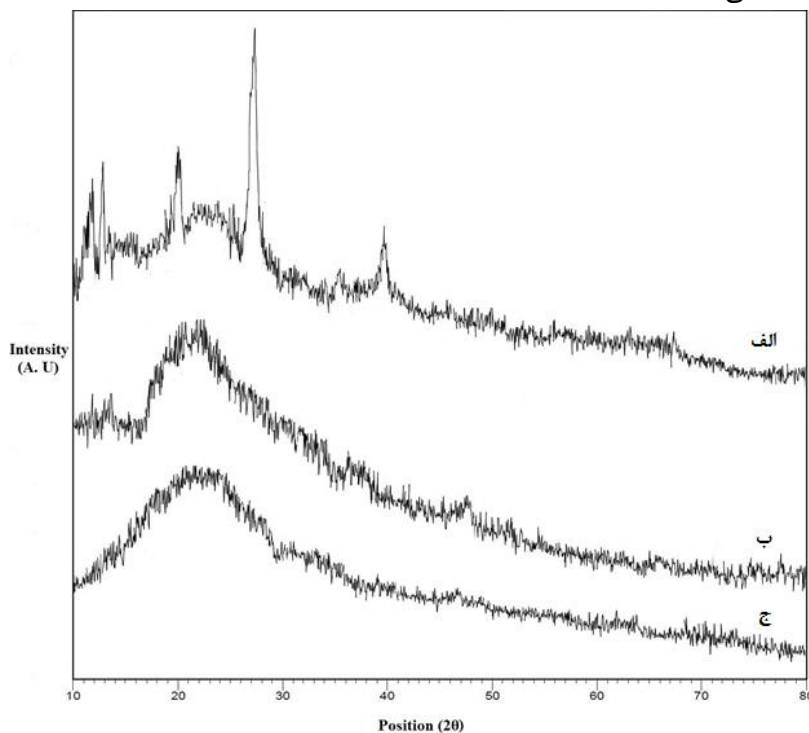
پایداری حرارتی کیتوسان خالص (به‌عنوان ماده خام) و هیدروژل‌های تهیه شده بوسیله تجزیه وزنسنجی حرارتی (TGA) بررسی شد. نتایج این بررسی به صورت ترموگرام در شکل ۳ گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پایداری حرارتی هیدروژل‌ها نسبت به کیتوسان خالص به‌طور واضح بهبود یافته است. به‌عنوان مثال، وزن باقی‌مانده (بازده زغال) کیتوسان خالص در دمای ۵۰۰ °C برابر با ۱۲/۱٪ است که نسبت به وزن باقی‌مانده هیدروژل‌های Chit-Cur (۲۱/۸٪) و Chit-Cur/PCB (۲۱/۸٪) در همین دما کمتر می‌باشد. در مورد کیتوسان، در ابتدا کاهش وزن ناچیز اولیه به‌خاطر تبخیر رطوبت در دمای ۱۱۰ °C می‌باشد و کاهش وزن دوم مربوط به تخریب ساختاری اولیه کیتوسان و شکست پیوندهای C-C و C-O در واحدهای حلقوی کیتوسان و کاهش وزن سوم ناشی از تخریب نهایی ساختار اصلی کیتوسان و تشکیل باقی‌مانده‌ی کربن گرافیتی می‌باشد.



در حالی که گرما نگاشت‌های هیدروژل‌ها نشان دهنده یک کاهش وزن تدریجی بدون هیچ گونه افت شدید وزنی در دماهای مختلف می‌باشد. این بهبود در پایداری حرارتی می‌تواند ناشی از فرآیند شبکه‌سازی زنجیره‌های بیوپلیمری از طریق تابش گاما باشد.



شکل (۳) گراف‌های TGA کیتوسان خالص (الف)، هیدروژل‌های Chit-Cur (ب) و Chit-Cur/PCB (ج). الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) کیتوسان خالص و جاذبه‌های هیدروژلی سنتز شده در گستره 2θ ۱۰-۸۰° در شکل ۴ نشان داده شده است. در الگوی XRD کیتوسان خالص، وجود پیک‌های پراش تیز در 2θ ۱۱/۵۶، ۱۲/۹۰، ۲۰/۲۵، ۲۶/۹۲ و ۳۹/۸۷° نشان دهنده ماهیت کریستالی کیتوسان خالص می‌باشد. ناپدید شدن این پیک‌های کریستالی و ظهور پیک جدید پهن در 2θ ۲۲/۴۹ و ۲۰/۴۲° به ترتیب در الگوهای XRD هیدروژل‌های Chit-Cur و Chit-Cur/PCB تأیید کننده تشکیل ساختار آمورف در جاذبه‌های هیدروژلی می‌باشد که ناشی از فرآیند کراس‌لینک شدن تصادفی بین زنجیره‌های بیوپلیمری اصلاح شده کیتوسان توسط تابش گاما می‌باشد.

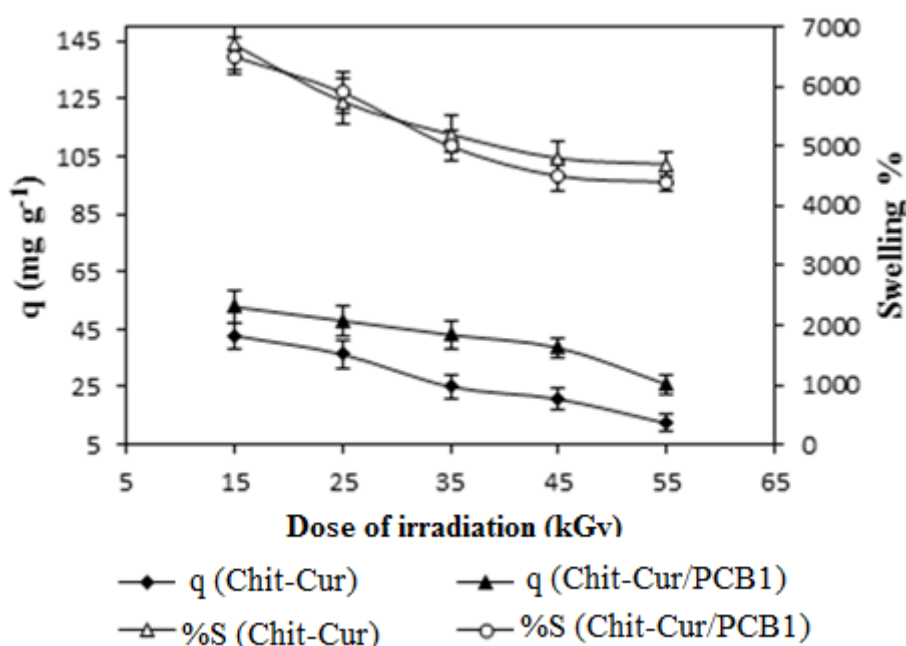


شکل (۴) الگوهای XRD کیتوسان خالص (الف)، هیدروژل‌های Chit-Cur (ب) و Chit-Cur/PCB (ج).



۳-۲- اثر دز تابش پرتو گاما

دز پرتو دهی یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر خواص تورمی و ظرفیت جذب جاذبهای هیدروژل می‌باشد. خواص تورمی و ظرفیت جذب رنگ توسط جاذبهای هیدروژلی Chit-Cur و Chit-Cur/PCB ۱ ساخته شده با دزهای پرتو دهی در گستره ۵۵-۱۵ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این بررسی (شکل ۵) نشان می‌دهد که با افزایش دز تابش گاما درصد تورم و ظرفیت جذب هر دو جاذب هیدروژلی کاهش می‌یابد. علت مشاهده این پدیده را می‌توان به تشکیل بیشتر ماکرورادیکال‌های آزاد فنوکسی و در نتیجه افزایش تراکم کراسلینک شدن در دزهای تابش بیشتر ربط داد که موجب تنگ‌تر شدن تخلخل‌های هیدروژل و کاهش نفوذ مولکول‌های رنگ و آب به عمق شبکه‌ی داخلی جاذبهای هیدروژلی و نهایتاً باعث کاهش تورم و ظرفیت جذب آن‌ها می‌شود. اثر پرتو دهی در مقادیر کمتر از ۱۰ kGy به علت عدم استحکام و ماندگاری و در نتیجه ناکارآمد بودن جاذب هیدروژلی تهیه شده بررسی نشد.



شکل (۵) اثر دز تابش پرتو گاما بر تورم و ظرفیت جذب هیدروژل‌ها. غلظت اولیه رنگ ۲۵ ppm، حجم نمونه ۵۰/۰ mL، مقدار جاذب ۲۰/۰ mg، سرعت هم‌زدن pH ۲۰۰۰ rpm محلول ۷/۰، زمان تماس ۷ ساعت.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جاذب‌های هیدروژلی جدید و زیست‌سازگار با استفاده از مواد طبیعی کیتوسان، کورکامین و پروسیانیدین ب ۱ با استفاده از روش پرتو دهی گاما با موفقیت ساخته شد. این جاذبها با ساختاری متخلخل و گروه‌های هیدروکسیل فنولی فراوان به‌عنوان جاذب عملکرد رضایتبخشی در حذف رنگ MG از محیط‌های آبی از خود نشان داد. طیف‌های FTIR تایید کننده اتصال Cur با Chit و تثبیت PCB ۱ بر سطح هیدروژل Chit-Cur می‌باشد. تصاویر SEM ساختار شبکه‌های سه‌بعدی متخلخل جاذبها را با سطحی ناصاف و نامنظم به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین مطالعات XRD و TGA ساختار کراسلینک شده جاذبها ناشی از تابش گاما را تایید می‌نماید. حداکثر ظرفیت جذب رنگ MG تجربی توسط جاذبهای هیدروژلی Chit-Cur و Cur و Chit-Cur/PCB ۱ به ترتیب ۱۱۱/۱ و ۱۸۶/۷ mg g⁻¹ به دست آمد.



۵- مراجع:

- [۱] R Hafezi Moghaddam, AMH Shabani, S Dadfarnia. (۲۰۱۹) Journal of Environmental Chemical Engineering ۷ (۱), ۱۰۲۹۱۹.
- [۲] R Hafezi Moghaddam, S Dadfarnia, AMH Shabani, M Tavakol. (۲۰۱۹) Carbohydrate polymers ۲۰۶, ۳۵۲-۳۶۱.
- [۳] MR Parsaeian, AM Haji Shabani, S Dadfarnia, R Hafezi Moghaddam. (۲۰۲۴) Polymer Bulletin ۸۱ (۴), ۳۳۱۵-۳۳۳۱.
- [۴] SJ Peighambaroust, O Aghamohammadi-Bavil, R Foroutan, N Arsalani. (۲۰۲۰) International Journal of Biological Macromolecules ۱۵۹ (۱) ۱۱۲۲-۱۱۳۱.
- [۵] A Verma, S Thakur, G Mamba, RK Gupta, P Thakur, VK Thakur. (۲۰۲۰) International Journal of Biological Macromolecules ۱۴۸ (۱) ۱۱۳۰-۱۱۳۹.



بررسی تاثیر زاویه پرتو دهی تابش پروتون بر جریان گذرای ناشی از آسیب پرتویی تک رخدادی در ترانزیستورهای ماسفت (کد مقاله : ۱۴۰۳)

حسین زاده، نفیسه^۱ - جعفری، حمید^۱ - امجدی فرد، رضا^۲ - شوریان، سارا
۱. دانشگاه شهید بهشتی تهران، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها
۲. پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده سامانه‌های ماهواره

چکیده:

استفاده از ترانزیستورهای ماسفت در محیط‌های دارای تابش یونیزان مانند فضا، تاسیسات هسته‌ای و کاربردهای پزشکی، بطور چشمگیری رو به افزایش است. با این حال، عملکرد این قطعات به دلیل تغییر در ویژگی‌های الکتریکی آن‌ها، به شدت تحت تاثیر تابش یونیزان قرار می‌گیرد. یکی از عوامل مهم در این تغییرات، زاویه تابش پرتوها نسبت به ساختار ماسفت است. در این مقاله به بررسی تاثیر زاویه‌های مختلف پرتو دهی تابش پروتون ۳ MeV بر پارامترهای الکتریکی ترانزیستور ماسفت نوع N، از جمله جریان گذرا پرداخته شده است. نتایج نشان داد که بیشترین جریان گذرای ایجاد شده، که مقدار آن ۵/۰۹ میلی‌آمپر است، مربوط به تابش عمودی باریکه پروتونی به پایه درین است.

کلمات کلیدی: آسیب تک‌رخدادی - ماسفت - SILVACO - جریان گذرا

Investigation of Proton Irradiation Direction Effect on Single Event Transient Current in MOSFET Transistors

Hosseinzadeh, Nafise^{۱*}, Jafari, Hamid^۱, Amjadifard, Reza^۲, Shoorian, Sara

۱. Shahid Beheshti University, Department of Nuclear Engineering,

۲. Iran Space Research Institute, Satellite Systems Research Institute

Abstract:

The use of MOSFET transistors in ionizing radiation environments, such as space, nuclear facilities, and medical applications, is increasing significantly. However, the performance of these devices is severely affected by ionizing radiation due to changes in their electrical characteristics. ^۱ One of the important factors in these changes is the angle of radiation with respect to the MOSFET structure. In this article, the effect of different irradiation angles of ۳ MeV proton radiation on the electrical parameters of an N-type MOSFET transistor, including transient current, is investigated. The results showed that the maximum transient current generated, which is ۵.۰۹ mA, corresponds to the vertical irradiation of the proton beam to the drain base.

Key words: Single Event Effect Damage, MOSFET, SILVACO, Transient Current



۱- مقدمه:

در دنیای مدرن امروز، مدارهای الکترونیکی و سیستم‌های مبتنی بر نیمه‌رساناها، نقشی حیاتی در فناوری‌های گوناگون از جمله هوافضا، پزشکی هسته‌ای، تجهیزات نظامی و صنایع هسته‌ای ایفا می‌کنند. در این میان، ترانزیستورهای اثر میدانی نیمه‌رسانای اکسید-فلز (MOSFET)^{۱۲۳} به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی همچون امپدانس ورودی بالا^{۱۲۴}، سرعت سوئیچینگ^{۱۲۵} مناسب و مصرف توان پایین، به طور گسترده‌ای در طراحی مدارهای مجتمع (IC)^{۱۲۶} مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با این حال، عملکرد این قطعات در محیط‌های پرتویی که در معرض تابش‌های یونیزان قرار دارند، با چالش‌های جدی روبرو می‌شود [۲].

تابش‌های یونیزان، از جمله پرتوهای گاما، ایکس، نوترون و ذرات باردار، با برهمکنش با ساختار ترانزیستور ماسفت، می‌توانند منجر به تغییر پارامترهای الکتریکی قطعه از جمله ولتاژ آستانه، جریان نشتی، تحرک حامل‌ها و جریان گذرا شوند [۳]. این تغییرات می‌توانند عملکرد مدار را مختل کرده و حتی منجر به خرابی دائمی قطعه شوند. جریان گذرا^{۱۲۷}، که به عنوان پاسخ قطعه به پالس‌های تابشی تعریف می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا می‌تواند باعث ایجاد خطا در عملکرد مدارهای دیجیتال و آنالوگ شود [۴]. مقدار و رفتار جریان گذرا به عوامل مختلفی از جمله نوع و انرژی تابش، دز تابش، مشخصات ساختاری ترانزیستور ماسفت و همچنین زاویه پرتودهی تابش بستگی دارد [۵].

در تحقیقات پیشین، تأثیر عوامل مختلف بر عملکرد ماسفت‌ها تحت تابش مورد بررسی قرار گرفته است، اما تأثیر زاویه پرتودهی، به ویژه برای پرتوهای با انرژی کم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۶].

در حالی که پرتوهای با انرژی بالا می‌توانند با جابجا کردن اتم‌ها از جایگاه خود به طور مستقیم باعث ایجاد آسیب در ساختار قطعه شوند، پرتوهای با انرژی کم عمدتاً از طریق ایجاد یونیزاسیون در لایه‌های مختلف ترانزیستور ماسفت، بر عملکرد الکتریکی قطعه تأثیر می‌گذارند [۷]. زاویه پرتودهی می‌تواند مقدار و توزیع این یونیزاسیون را تغییر داده و در نتیجه، بر مقدار تغییر پارامترهای الکتریکی و به خصوص جریان گذرا تأثیرگذار باشد [۸]. بررسی تأثیر زاویه‌های مختلف پرتودهی با انرژی کم، به ویژه در کاربردهایی که قطعات در معرض این نوع تابش قرار دارند، مانند سیستم‌های تصویربرداری پزشکی و برخی کاربردهای فضایی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۹].

در این مقاله به بررسی جامع تأثیر زاویه‌های مختلف پرتودهی پروتون با انرژی 3 MeV بر روی ترانزیستورهای ماسفت نوع ^{128}n پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق، تعیین زاویه پرتودهی‌ای است که منجر به بیشترین مقدار جریان گذرا در قطعه می‌شود. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی مدارهای مقاوم در برابر تابش، بهینه‌سازی عملکرد ترانزیستورهای ماسفت در محیط‌های پرتوزا و همچنین درک بهتر مکانیزم‌های آسیب ناشی از تابش در قطعات نیمه‌رسانا مفید باشد. در نهایت، با بررسی دقیق جریان گذرا در زاویه‌های مختلف پرتودهی، می‌توان به درک عمیق‌تری از رفتار ترانزیستورهای ماسفت در محیط‌های تابش یونیزان دست یافت و راهکارهایی برای کاهش اثرات مخرب تابش ارائه داد.

^{۱۲۳} MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor)

^{۱۲۴} High Input Impedance

^{۱۲۵} Switching

^{۱۲۶} Integrated Circuit

^{۱۲۷} Transient Current

^{۱۲۸} N-type MOSFET

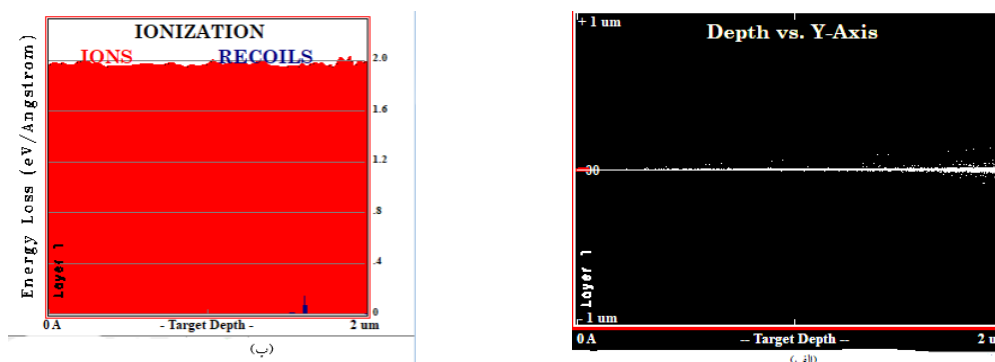


۲- روش کار:

در این مقاله از نرم افزارهای ^{۱۲۹}SRIM2013 و SILVACO به ترتیب برای محاسبه برد پروتون ها در سیلیکون و شبیه سازی رفتار الکترونیکی ترانزیستور استفاده شده است، که در ادامه به تفصیل درمورد روش کار هرکدام توضیح داده شده است.

۲-۱- محاسبه برد پروتون ها در سیلیکون

از آنجایی که ساختار اکثر ترانزیستور های ساخته شده و مورد استفاده در مدارهای الکترونیکی معمول از جنس سیلیکون است بنابراین در وهله اول لازم است برد تابش پروتونی در این ماده تعیین شود. در شکل (۱) عمق نفوذ پروتون های ۳MeV در سیلیکون به ضخامت ۲μm و همچنین نمودار توان توقف ^{۱۳۰} بر حسب عمق نشان داده شده است [۱۰].



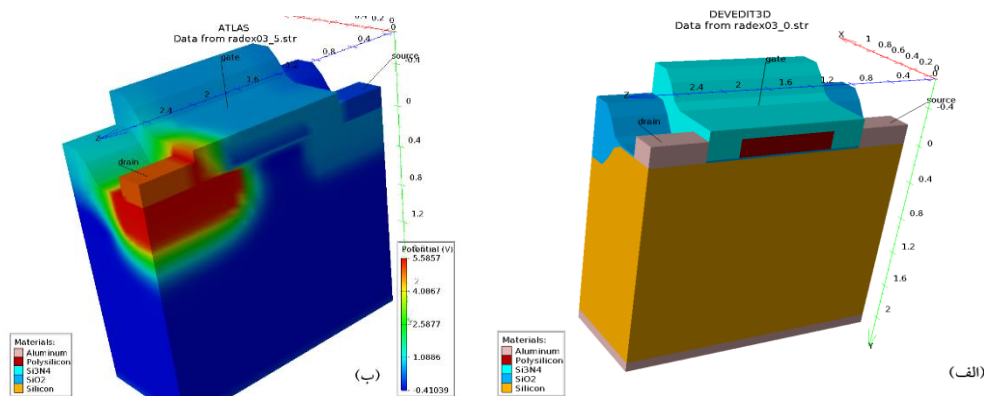
شکل ۱- (الف): برد پروتون ۳MeV در سیلیکون با ضخامت ۲μm - (ب) : نمودار توان توقف بر حسب عمق هدف

۲-۱- محاسبه پارامترهای الکترونیکی ترانزیستور

ساختار یک ترانزیستور ماسفت نوعی با استفاده از نرم افزار TCAD (SILVACO) شده است. در **Error! Reference source not found.** ساختار شبیه سازی شده ترانزیستور نوع n و توزیع پتانسیل الکتریکی آن نشان داده شده است. بستر ماسفت از ماده سیلیکون تشکیل شده که در آن بور با چگالی ناخالصی 2×10^{16} در بستر دوپت شده است و از آنجایی که بور یک ناخالصی پذیرنده است پس بستر از نوع p می باشد. سورس و درین هم از فسفر با چگالی ناخالصی 1×10^{20} که یک ناخالصی دهنده است در بستر دوپت شده است. گیت از پلی سیلیکون تشکیل شده است. هیچ ولتاژی بر روی گیت و سورس نیست ولتاژ درین هم بین ۰/۲۵ تا ۵ ولت متغییر است. با استفاده از داده های ^{۱۳۰}SRIM و انجام یک سری محاسبات، چگالی بار الکتریکی که پرتو پروتونی داخل ترانزیستور برجای می گذارد محاسبه شد. از دستور single برای تعریف مسیر و مشخصات تک پرتو (ذره پرنده) که به ترانزیستور برخورد می کند، استفاده می شود. فرم کلی این دستور به این صورت است که باید مختصات نقطه ورود و خروج پرتو، شعاع پرتو، چگالی یونیزاسیون پرتو که نشان دهنده تولید تعداد جفت های الکترون-حفره ای در واحد حجم توسط پرتو است و پارامترهای زمانی شکل پالس پرتو تعیین شود. [۱۱].

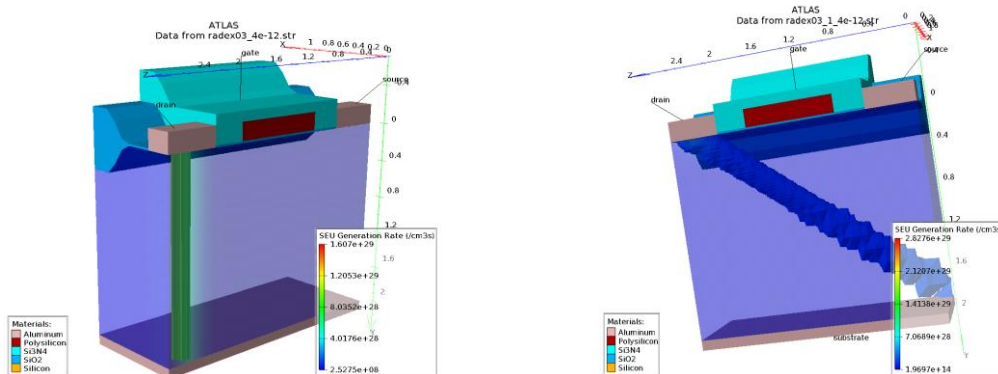
^{۱۲۹} Stopping and Range of Ions in Matter

^{۱۳۰} Stopping power



شکل ۲- (الف): ساختار ترانزیستور نوع n شبیه سازی شده (ب): توزیع پتانسیل الکتریکی

همانطور که در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است، ترانزیستور ماسفت به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است، که محور Z ، محور طولی ترانزیستور است مقدار آن از $Z=0$ تا $Z=2.5$ میکرومتر تعریف شده، محور Y ، محور عرضی است که مقدار آن از $Y=0$ تا $Y=2$ میکرومتر است و محور X ، محوری است که ضخامت ترانزیستور را نشان می‌دهد و از $X=0$ تا $X=1$ میکرومتر است، که کل این ناحیه از جنس سیلیکون تعریف شده است. پایه سورس^{۱۳۱} ترانزیستور از نقطه $Z=0$ تا $Z=2.5$ میکرومتر تعریف شده و پایه درین^{۱۳۲} از نقطه $Z=2$ تا $Z=2.5$ میکرومتر تعریف شده است. همانطور که در **Error! Reference source not found.** پس انتظار می‌رود بیشترین جریان گذرای ایجاد شده پس از برخورد پرتو پروتونی زمانی اتفاق بیوفتد که پرتو از سمت پایه درین وارد ترانزیستور شود. نرم افزار SILVACO دارای یک ماژول محاسباتی برای تعریف تک پرتوی فرودی به قطعات الکترونیکی می‌باشد. در این پژوهش، ابتدا پرتو پروتونی را به صورت عمودی یعنی در راستای محور Y ، از پایه سورس تا پایه درین در فاصله‌های مختلف به ترانزیستور برخورد داده‌ایم، همچنین پرتو را به صورت افقی یعنی در راستای محور Z ، بدنه ترانزیستور^{۱۳۳} که شامل قسمت زیرین پایه سورس و درین تا پایه کاتد بدنه یعنی از $Y=0$ تا $Y=2$ را به چندین قسمت تقسیم کرده و میزان جریان گذرای ایجاد شده، اندازه‌گیری شده است. در آخر، پرتو مورب به صورت مجزا از پایه‌های درین و سورس عبور داده و میزان جریان گذرای ایجاد شده اندازه‌گیری شده است. در **Error! Reference source not found.** برخورد پرتو پروتونی به صورت عمودی، مورب و افقی از پایه درین نشان داده شده است.



^{۱۳۱} Source base

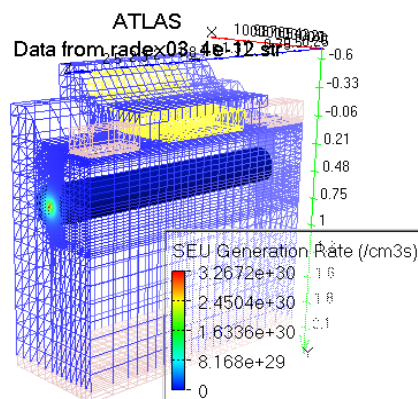
^{۱۳۲} Drain base

^{۱۳۳} Substrate base



(ب)

(الف)

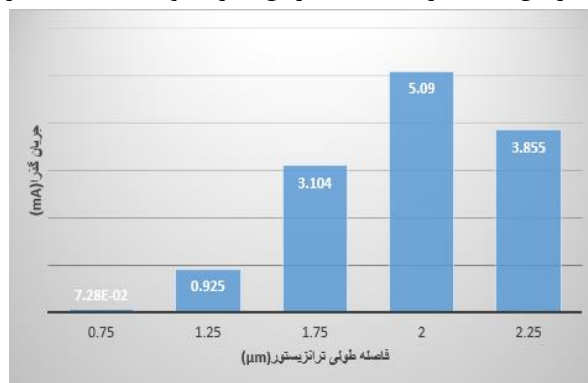


(ج)

شکل ۳: برخورد پرتو پروتونی الف) به صورت مورب ب) به صورت عمودی ج) به صورت افقی از پایه درین ترانزیستور

۳- نتایج:

شکل ۴ مربوط به جریان گذرای ایجاد شده توسط پروتون در حالتی است که پرتو به صورت عمودی یعنی در راستای محور Y، به یک ترانزیستور برخورد می‌کند. از آنجایی که پتانسیل الکتریکی در اطراف پایه درین بیشتر است گام‌های اندازه‌گیری در این قسمت با فاصله کمتری در نظر گرفته شده است. پایه درین در حد فاصل $Z=2$ تا $Z=2.5$ تعریف شده است و همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین جریان گذرای ایجاد شده مربوط به پایه درین است که مقدار آن $5/09$ میلی‌آمپر می‌باشد. با این حال، با نزدیک شدن به پایه سورس، مقدار جریان به تدریج کاهش یافته و به $0/078$ میلی‌آمپر می‌رسد. این کاهش نشان دهنده کاهش $98/57$ درصدی جریان گذرا در این ناحیه در مقایسه با جریان گذرای اولیه ایجاد شده در پایه درین ترانزیستور است.

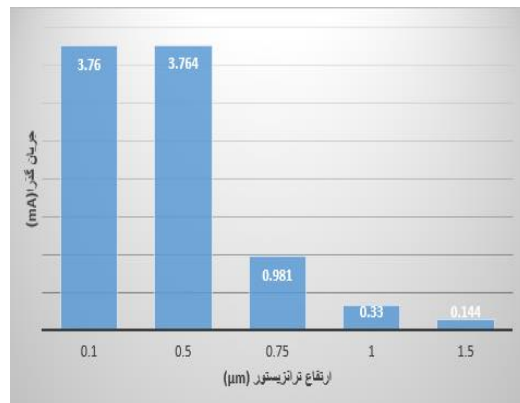


شکل ۴: میزان جریان گذرا به ازای برخورد عمودی پرتو

شکل ۵، مربوط به جریان گذرای ایجاد شده توسط پروتون در حالتی است که پرتو به صورت افقی یعنی در راستای محور Z، به بدنه ترانزیستور برخورد می‌کند. از آنجایی که در نواحی نزدیک به محور Z یعنی در نقاطی با Y کم و نزدیک به صفر که شامل قسمت زیرین پایه های سورس و درین ترانزیستور است چون پتانسیل الکتریکی در این ناحیه بیشتر است، گام‌های اندازه‌گیری در این قسمت با فاصله کمتری در نظر گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین جریان گذرای ایجاد شده $3/76$ میلی‌آمپر است که در نواحی نزدیک به پایه درین و سورس ایجاد شده با این حال، با نزدیک شدن به پایه بدنه، مقدار جریان به تدریج کاهش یافته و به $0/144$ میلی‌آمپر می‌رسد. این کاهش نشان دهنده کاهش $96/17$ درصدی جریان گذرا در این



ناحیه در مقایسه با جریان گذرای ایجاد شده در نواحی نزدیک به پایه درین و سورس است. نتایج این قسمت نشان می‌دهد که بیشترین جریان گذرای ایجاد شده در حالت عمودی نسبت به حالت افقی ۲۶/۱۲ درصد کاهش یافته است.



شکل ۵ - میزان جریان گذرا به ازای برخورد افقی پرتو

جدول ۱ مربوط به جریان گذرای ایجاد شده توسط پرتو در حالت مورب است یعنی یکبار پرتو به صورت مورب از پایه درین وارد شده و بار دیگر از پایه سورس وارد ترانزیستور شده است. در این حالت تنها جریان گذرای کل ایجاد شده در ترانزیستور اندازه گیری شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان گذرای ایجاد شده توسط پرتو هنگامی که به صورت موربی از پایه درین وارد ترانزیستور وارد می‌شود تقریباً ۱۹/۲۱ برابر بیشتر از برخورد مورب پرتو از پایه سورس است. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین جریان گذرای ایجاد شده توسط پرتو هنگامی است که پرتو به صورت عمودی و از پایه درین وارد ترانزیستور شود، و بیشترین جریان ایجاد شده به صورت افقی حدوداً با ورود پرتو از پایه درین به صورت موربی به یک اندازه است.

جدول ۱ - میزان جریان گذرا به ازای برخورد مورب پرتو

ورود پرتو از پایه سورس	ورود پرتو از پایه درین
۰/۲۰۳mA	۳/۰۹ mA

۴- بحث و نتیجه گیری:

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر زاویه پرتو دهی پروتون بر جریان گذرای ناشی از آسیب پرتویی در ترانزیستورهای ماسفت بود. نتایج بدست آمده نشان داد که زاویه پرتو دهی پروتون تأثیر قابل توجهی بر میزان جریان گذرا دارد. بیشترین جریان گذرای ایجاد شده که مقدار آن ۵/۰۹ میلی آمپر است، مربوط به تابش عمودی باریکه پرتونی به پایه درین است که حدود ۷۰ برابر بزرگتر از کمترین جریان گذرای ایجاد شده با مقدار ۰/۰۷۲۸ میلی آمپر است، که این نتیجه هم مربوط به تابش عمودی نزدیک به پایه سورس است. همچنین از بیشترین جریان ایجاد شده در حالت برخورد افقی با مقدار ۳/۷۶ میلی آمپر و حالت موربی با مقدار ۳/۹۰ میلی آمپر که تقریباً باهم برابراند هم در حدود ۱/۵ برابر بیشتر است. این پژوهش می‌تواند با توسعه به انواع ماسفت ها و استفاده از دامنه انرژی وسیع تر در طراحی مدارهای الکترونیکی مقاوم در برابر تابش، به ویژه در کاربردهای فضایی و هسته‌ای، مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع:

۱. Fleetwood, D.M., P.S. Winokur, and P.E. Dodd, An overview of radiation effects on electronics in the space telecommunications environment. Microelectronics Reliability, ۲۰۰۰. ۴۰(۱): p. ۱۷-۲۶.
۲. Srour, J.R., Basic mechanism of radiation effects on electronic material devices, and integrated circuits. Tutorial Short Course, IEEE NSREC, ۱۹۸۳.



۳. Ma, T.-P. and P.V. Dressendorfer, Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. ۱۹۸۹.
۴. Messenger, G.C., et al., Single event phenomena I. ۱۹۹۷: Springer.
۵. Holmes-Siedle, A., Handbook of Radiation Effects. ۲۰۰۲, Oxford University Press.
۶. Flament, O., et al., Ionizing dose hardness assurance methodology for qualification of a BiCMOS technology dedicated to high dose level applications. IEEE Transactions on Nuclear Science, ۱۹۹۸. ۴۵(۳): p. ۱۴۲۰-۱۴۲۴.
۷. Oldham, T.R., Ionizing radiation effects in MOS oxides. Vol. ۳. ۱۹۹۹: World Scientific.
۸. Mozumder, A., Fundamentals of radiation chemistry. ۱۹۹۹: Elsevier.
۹. Durrani, S. and E. Benton, International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part D. ۱۹۹۰.
۱۰. James F. Ziegler. (۲۰۱۳). Overview of SRIM software. SRIM. <http://www.srim.org/>
۱۱. International, S. ATLAS User's Manual. ۲۰۰۴; Available from: https://www.eng.buffalo.edu/~wie/silvaco/atlas_user_manual.pdf



شبیه‌سازی شکل‌دهنده طیف برای رادیوگرافی نوترونی با استفاده از MCNP6 (کد مقاله :

(۱۴۲۶)

فاطمه تدریسی^{۱*}، ناصر وثوقی^۱، شاهین صنایع حجری^۲

^۱ دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران

چکیده:

رادیوگرافی نوترونی روشی غیرمخرب و مؤثر برای بازرسی اجسامی است که در روش‌های مرسوم مانند اشعه X و امواج فراصوتی به‌سختی قابل تشخیص هستند. این روش به دلیل اندرکنش نوترون‌ها با هسته اتم‌ها، حساسیت بالایی به عناصر سبک مانند هیدروژن و جذب در موادی مانند بور و کادمیوم دارد. در این پژوهش، یک شکل‌دهنده طیف نوترونی با استفاده از کد MCNP6 طراحی و شبیه‌سازی شده است. کریستال سفایر و بیسموت به‌عنوان فیلترهای طیفی مدل‌سازی شدند و عملکرد آن‌ها بر اساس داده‌های کتابخانه کد بررسی گردید. همچنین مشخص شد سرب که عمدتاً برای جذب پرتوهای گاما استفاده می‌شود، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش نوترون‌های سریع ندارد. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب بهینه مواد و هندسه شکل‌دهنده طیف باعث افزایش کنتراست، کاهش نویز و بهبود وضوح تصاویر نوترونی می‌شود.

کلمات کلیدی : رادیوگرافی نوترونی، کد MCNP6، چشمه نوترونی، تصویربرداری نوترونی

Simulation of a Spectrum Shaper for Neutron Radiography Using the MCNP⁶ Code

Fatemeh Tadrissi^{۱*}, Naser Vosoughi^۱, Shahin Sanaie Hajari^۲

^۱. Energy Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

^۲. Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.

Abstract:

Neutron radiography is a non-destructive and efficient method for inspecting objects that are difficult to detect using conventional techniques like X-rays and ultrasound. This method, due to the interaction of neutrons with atomic nuclei, has high sensitivity to light elements such as hydrogen and is absorbed by materials like boron and cadmium. In this study, a neutron spectrum shaper was designed and simulated using the MCNP⁶ code. Sapphire crystal and bismuth were modeled as spectral filters, and their performance was evaluated based on data from the code's library. It was also determined that lead, mainly used for gamma-ray absorption, has minimal impact on reducing fast neutrons. The results indicate that the optimal selection of materials and the geometry of the spectrum shaper improves contrast, reduces noise, and enhances the clarity of neutron images.

Keywords: Neutron radiography, MCNP⁶ code, neutron source, neutron imaging



۱- مقدمه:

رادیوگرافی نوترونی یکی از روش‌های تصویربرداری غیرمخرب است که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نوترون‌ها در اندرکنش با ماده، در بازرسی مواد و تشخیص ساختارهای درونی اجسام کاربرد گسترده‌ای دارد [۱]. برخلاف روش‌هایی مانند تصویربرداری با اشعه X که مبتنی بر اندرکنش با الکترون‌ها است، نوترون‌ها بیشتر با هسته اتم‌ها برهم‌کنش می‌کنند. این ویژگی امکان تشخیص دقیق موادی با عدد اتمی پایین مانند هیدروژن، بور و کادمیوم را فراهم می‌آورد که در تصویربرداری با اشعه X به سختی قابل شناسایی هستند [۲]. رادیوگرافی نوترونی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، انرژی، خودروسازی و حتی باستان‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. با این حال، کیفیت تصاویر نوترونی به عواملی مانند انرژی و طیف نوترون‌های مورد استفاده بستگی دارد. طیف انرژی گسترده نوترون‌ها و نویزهای ناشی از پراکندگی می‌تواند وضوح تصاویر را کاهش دهد [۴]. یکی از راهکارهای مؤثر برای بهبود کیفیت تصویربرداری، طراحی و استفاده از شکل‌دهنده‌های طیف است که قادر به تنظیم انرژی نوترون‌های عبوری و کاهش نویزهای ناخواسته هستند [۵]. شبیه‌سازی دقیق این فرایند نیازمند ابزارهای محاسباتی قدرتمند است. کد MCNP^۶ به عنوان یکی از دقیق‌ترین کدهای مبتنی بر روش مونت کارلو، امکان مدل‌سازی انتقال نوترون و بهینه‌سازی پارامترهای فیزیکی سیستم را فراهم می‌آورد [۶]. در این پژوهش، یک شکل‌دهنده طیف برای بهینه‌سازی کیفیت تصویربرداری نوترونی طراحی و با استفاده از کد MCNP^۶ شبیه‌سازی شده است. در طراحی این سیستم، کولیماتور به عنوان یکی از اجزای کلیدی برای کنترل جهت و کیفیت باریکه نوترونی نقش اساسی داشته است. ابعاد کولیماتور به گونه‌ای انتخاب شده است که توازن مناسبی بین شدت باریکه نوترونی و وضوح تصویر فراهم کند. طول کولیماتور ۱۰۰ سانتی‌متر و قطر ورودی ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا امکان دستیابی به نسبت کنتراست بالا و کاهش پراکندگی نوترون‌ها فراهم شود. قطر خروجی نیز به ۳ سانتی‌متر کاهش یافته تا باریکه‌ای همگن و متمرکز ایجاد کند. نسبت طول به قطر (L/D) در این طراحی حدود ۳۳.۳ در نظر گرفته شده است که بر اساس مطالعات پیشین، به عنوان یکی از مقادیر مناسب برای دستیابی به تصاویر با وضوح بالا پیشنهاد شده است. انتخاب این ابعاد بر اساس الزامات عملکردی سیستم و نتایج شبیه‌سازی‌های اولیه انجام شده است که نشان می‌دهد این طراحی باعث بهبود یکنواختی شار نوترون در خروجی کولیماتور شده و در عین حال از کاهش بیش از حد شدت باریکه جلوگیری می‌کند. همچنین این طراحی به کاهش نویزهای ناشی از پراکندگی کمک کرده و نسبت سیگنال به نویز (SNR) را بهبود می‌بخشد. دلایل انتخاب کولیماتور همگرا به جای کولیماتور واگرا نیز در این پژوهش بررسی شده است. گرچه کولیماتور واگرا می‌تواند میدان دید (FOV) بزرگ‌تری ایجاد کند، اما باعث کاهش وضوح تصویر و افزایش پراکندگی می‌شود که در تصویربرداری دقیق نوترونی نامطلوب است. علاوه بر این، توزیع مکانی شار نوترون در دهانه خروجی کولیماتور مورد بررسی قرار گرفته و نحوه تغییرات شار در طول مسیر تحلیل شده است. در شبیه‌سازی از کریستال سفایر و بیسموت به عنوان فیلترهای طیفی استفاده شده و نحوه عملکرد آن‌ها بر اساس داده‌های موجود در کتابخانه کد بررسی شده است. همچنین توضیح داده شده که سرب، که عمدتاً برای جذب پرتوهای گاما به کار می‌رود، تأثیر قابل توجهی در کاهش نوترون‌های سریع ندارد و برای این منظور آهن به عنوان ماده مؤثرتری شناخته می‌شود.

۲- روش کار:

این بخش به توضیح مراحل طراحی، شبیه‌سازی و اجرای سیستم تصویربرداری نوترونی با استفاده از کد MCNP^۶ می‌پردازد. در این مطالعه، کولیماتوری با فیلترهای مختلف برای بهینه‌سازی طیف نوترونی شبیه‌سازی شده است.

۱-۲- مدل‌سازی سیستم تصویربرداری نوترونی

در این پژوهش، یک شکل‌دهنده طیف نوترونی برای بهینه‌سازی کیفیت تصویربرداری شبیه‌سازی شده است. کولیماتور مورد استفاده شامل دو استوانه با مواد جاذب و کندکننده است که نقش مهمی در تنظیم انرژی نوترون‌های ورودی دارند. استوانه اول، از جنس اکسید آلومینیوم است که برای کاهش انتشار نوترون‌های حرارتی به کار گرفته شده است.



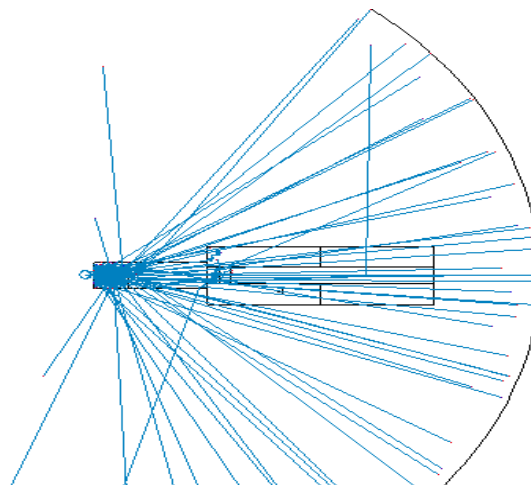
- استوانه دوم نیز به عنوان کندکننده برای کنترل انرژی نوترون‌های سریع عمل می‌کند. ترکیبی از مواد جاذب و کندکننده برای بهینه‌سازی طیف نوترونی مورد استفاده قرار گرفت:
- پلی اتیلن بور (50 سانتی‌متر): جذب و کاهش نوترون‌های حرارتی.
 - سرب (50 سانتی‌متر): حذف تابش گامای ثانویه ناشی از جذب نوترون توسط بور.
 - کریستال سفایر (Al_2O_3) (5.3 سانتی‌متر): فیلتر کردن نوترون‌های فوق حرارتی و سریع. این کریستال به دلیل خواص اپتیکی خاص خود، در کاهش نوترون‌های با انرژی متوسط مؤثر است.
 - بیسموت (Bi) (3.5 سانتی‌متر): کاهش نوترون‌های سریع باقی‌مانده پس از کند شدن. بیسموت به دلیل سطح مقطع پراکندگی مناسب و جذب کم گاما برای این کاربرد انتخاب شده است.
 - چشمه نوترونی ($Am-Be$ ($Am^{241}-Be$)) به عنوان منبع نوترون در این سیستم مورد استفاده قرار گرفته است که طیفی از نوترون‌های سریع تولید می‌کند. این نوترون‌ها پس از عبور از کندکننده‌ها و فیلترها، به طیف مناسب برای تصویربرداری نوترونی تبدیل می‌شوند.



شکل ۱: ساختار یک کولیماتور نوترون با فیلترهای مربوط، شبیه‌سازی با کد MCNP^۶.

۲-۲- تعریف چشمه نوترونی و تنظیمات کد MCNP^۶

- در این شبیه‌سازی از چشمه نوترونی آمرسیوم-برلیم ($Am-^{241}Be$) استفاده شده است که از واکنش آلفای ساطع شده از آمرسیوم- ^{241} با برلیم، نوترون‌های سریع تولید می‌کند. طیف انرژی این چشمه در بازه 0.01 تا 11 MeV قرار دارد و پیک انرژی آن حدود $3-5$ MeV است. درصد کمی از نوترون‌ها پس از پراکندگی به انرژی‌های حرارتی می‌رسند.
- چشمه با کارت $SDEF$ تعریف شد که موقعیت (POS)، انرژی (ERG)، جهت تابش (VEC و DIR) و نوع ذره ($PAR=1$ برای نوترون) را مشخص می‌کند.
 - طیف انرژی نوترون‌ها با کارت‌های SIN و SPN تعریف شد که محور انرژی (0 تا 11 MeV) و توزیع احتمال تولید نوترون‌ها را تعیین می‌کنند.
 - برای افزایش دقت شبیه‌سازی، از روش‌های کاهش واریانس مانند $Weight Windows$ و $Source Biasing$ جهت بهینه‌سازی محاسبه شار نوترونی در نواحی مهم (مانند دهانه کولیماتور) استفاده شد.



شکل ۲: نمای شبیه‌سازی شده از مسیر حرکت نوترون‌ها در کولیماتور، شبیه‌سازی با کد MCNP^۶.

۳-۲- شبیه‌سازی انتقال نوترون و محاسبه شار نوترونی

پس از تعریف چشمه نوترونی، مدل در کد MCNP6 شبیه‌سازی شد تا توزیع شار نوترونی در سیستم بررسی شود. برای محاسبه شار:

از تالی F_4 جهت محاسبه شار حجمی نوترون‌ها و از مش تالی (Mesh Tally) برای نمایش توزیع مکانی شار نوترونی به صورت سه بعدی استفاده شد.

نتایج در فایل mdata ذخیره و با نرم‌افزار gridconv به فرمت متنی جهت تحلیل‌های بیشتر تبدیل شدند. برای افزایش دقت و کاهش خطای آماری، از روش‌های کاهش واریانس مانند Source Biasing و Weight Windows استفاده شد. تنظیمات آماری به گونه‌ای تنظیم شد که خطای نسبی نتایج زیر ۵٪ باقی بماند.

۳- نتایج

در این بخش، داده‌های عددی و تصویری حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده و میزان تأثیر کولیماتور و فیلترهای طیفی بر کیفیت تصویربرداری بررسی شده است. نتایج شامل تغییرات شدت شار نوترونی در مسیر عبور از کولیماتور، تأثیر آن بر طیف نوترونی، و تحلیل کیفیت تصویربرداری نوترونی است.

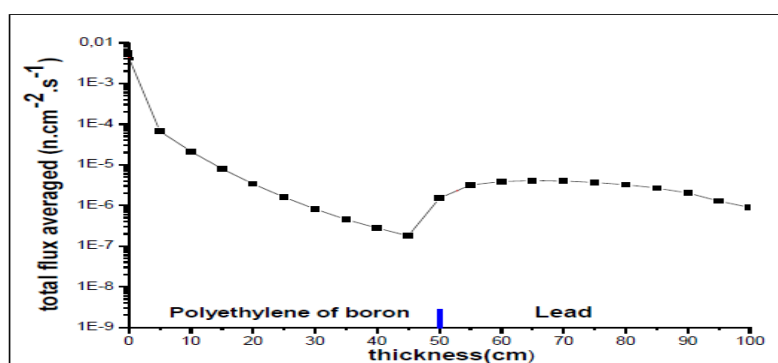
۳-۱- تغییرات میانگین شار نوترون‌ها در طول مسیر عبور از کولیماتور

بررسی تغییرات شار نوترونی در طول مسیر عبور از کولیماتور نشان می‌دهد که شدت شار نوترونی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در نمودار ارائه شده، تغییرات شار نوترونی بر اساس ضخامت مواد جاذب و کندکننده به نمایش درآمده است.

- **ابتدای مسیر** (۰-۵۰ سانتی‌متر، پلی اتیلن بور): در ابتدای مسیر، شدت شار نوترونی در سطح بالایی قرار دارد (حدود ۰.۰۱ نوترون بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه) که شامل ترکیبی از نوترون‌های سریع و حرارتی است. عبور نوترون‌ها از لایه پلی اتیلن بور (ضخامت ۵۰ سانتی‌متر) باعث کاهش تدریجی شار نوترونی می‌شود. پلی اتیلن بور به دلیل داشتن هیدروژن و ایزوتوپ بور-۱۰، توانایی بالایی در جذب نوترون‌های حرارتی دارد. در این ناحیه، شار نوترونی به حدود ۰.۰۰۰۰۰۱ نوترون بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه کاهش می‌یابد، که نشان‌دهنده کارایی بالای پلی اتیلن بور در جذب نوترون‌های کم انرژی است.



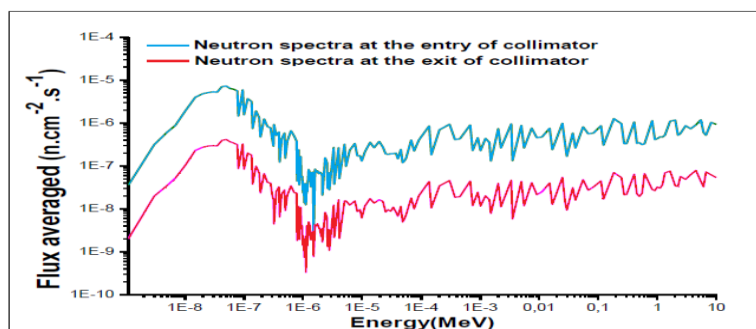
- **نقطه انتقال** (در ضخامت ۵۰ سانتی‌متر): در مرز میان پلی‌اتیلن بور و سرب، که در ضخامت ۵۰ سانتی‌متر مشخص است، تغییرات در شار مشاهده می‌شود. نمودار نشان می‌دهد که در این نقطه، اندکی افزایش در شدت شار رخ می‌دهد که احتمالاً به پراکندگی نوترون‌ها در مرز مواد مختلف مرتبط است.
- **بخش دوم مسیر** (۵۰-۱۰۰ سانتی‌متر - سرب): پس از عبور از پلی‌اتیلن، نوترون‌ها وارد لایه سربی (ضخامت ۵۰ سانتی‌متر) می‌شوند. برخلاف پلی‌اتیلن بور که کاهش تدریجی شار را ایجاد می‌کرد، در لایه سربی افت شدیدی در شار مشاهده نمی‌شود. این امر به این دلیل است که سرب عمدتاً پرتوهای گامای ثانویه را جذب می‌کند و تأثیر قابل توجهی در کاهش نوترون‌های سریع ندارد. با این حال، سرب در حذف تابش‌های گامای ثانویه ناشی از واکنش‌های نوترونی مؤثر است و به پاک‌سازی باریکه نوترونی کمک می‌کند.



نمودار ۱-۳: تغییرات میانگین شار نوترون‌ها در بلوک‌های پلی‌اتیلن (۵۰ سانتی‌متر) و بلوک‌های سربی (۵۰ سانتی‌متر).

۳-۲- بررسی تأثیر کولیماتور بر طیف نوترونی در مسیر یک‌متری

نتایج شبیه‌سازی طیف نوترونی در مسیر یک‌متری از ورودی تا خروجی کولیماتور نشان می‌دهد که شدت نوترون‌ها تا ۱۰ برابر کاهش می‌یابد. این کاهش عمدتاً به دلیل حذف نوترون‌های با مسیر غیرموازی توسط کولیماتور است. همان‌طور که در نمودار ۳-۲ مشاهده می‌شود، طیف نوترونی در ورودی کولیماتور (منحنی آبی) دارای شدت بالاتری است، درحالی‌که پس از عبور از کولیماتور (منحنی قرمز) شدت شار نوترونی کاهش یافته و توزیع آن یکنواخت‌تر شده است. این نشان می‌دهد که کولیماتور با فیلتر کردن نوترون‌های پراکنده و غیرموازی، یک باریکه نوترونی یکنواخت و همگن در خروجی ایجاد می‌کند. این بهینه‌سازی منجر به کاهش پراکندگی، بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR) و افزایش وضوح تصاویر نوترونی می‌شود. بدون استفاده از کولیماتور، طیف حاوی نوترون‌هایی با انرژی‌های متنوع و مسیرهای پراکنده است که باعث افزایش نویز در تصاویر می‌شود، اما



نمودار ۳-۲: تأثیر کولیماتور بر طیف نوترونی بدون فیلتر در طول مسیر یک متری از ورودی کولیماتور تا خروجی آن.

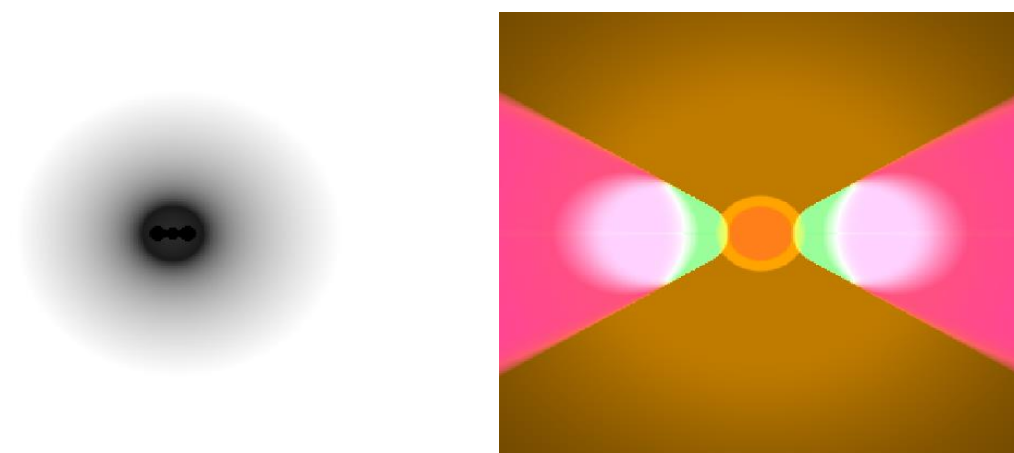


عبور از کولیماتور باعث حذف نوترون‌های ناخواسته و اصلاح طیف انرژی می‌شود که در نهایت کیفیت تصویربرداری را بهبود می‌بخشد.

۳-۳- نتایج تصویربرداری نوترونی و تحلیل نمودارهای رادیوگرافی در MCNP^۶

برای ارزیابی کیفیت تصویربرداری نوترونی، دو نمودار رادیوگرافی حاصل از شبیه‌سازی در MCNP^۶ مورد بررسی قرار گرفت. تصویر سیاه‌وسفید، توزیع شدت شار نوترونی را در یک مقطع خاص از سیستم تصویربرداری نمایش می‌دهد. در این تصویر، نواحی تیره‌تر نشان‌دهنده مناطقی با چگالی بالاتر شار نوترونی هستند، در حالی که نواحی روشن‌تر بیانگر کاهش چگالی شار به دلیل جذب یا پراکندگی نوترون‌ها هستند. این توزیع نشان می‌دهد که نحوه انتشار نوترون‌ها در سیستم متغیر بوده و در برخی نقاط، تراکم نوترونی بیشتری به دلیل تجمع یا مسیرهای مستقیم وجود دارد.

تصویر رنگی، توزیع طیفی نوترون‌ها را پس از عبور از شکل‌دهنده طیف نشان می‌دهد. در این تصویر، رنگ‌های مختلف مانند صورتی و سبز تفاوت انرژی نوترون‌های عبوری را مشخص می‌کنند. این تغییرات طیفی بیانگر تأثیر فیلترهای انرژی بر نوترون‌ها است که توسط شکل‌دهنده طیف اعمال شده است. نواحی با انرژی بالاتر و پایین‌تر در تصویر به وضوح قابل مشاهده هستند و نشان می‌دهند که بخش‌هایی از طیف انرژی نوترونی فیلتر یا تقویت شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از شکل‌دهنده طیف و کولیماتور علاوه بر بهبود یکنواختی توزیع شار نوترونی، باعث تنظیم توزیع انرژی نوترون‌ها نیز می‌شود. این تنظیم طیفی منجر به بهینه‌سازی انرژی نوترون‌های عبوری، کاهش نویز، افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) و در نهایت ارتقاء کیفیت تصویربرداری نوترونی می‌شود.



شکل ۳: توزیع شدت شار نوترونی، توزیع طیفی نوترون‌ها را پس از عبور از شکل‌دهنده طیف

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طراحی بهینه کولیماتور و استفاده از مواد جاذب نوترونی تأثیر چشمگیری بر بهبود طیف نوترونی و کاهش نویز در تصویربرداری نوترونی دارد. نمودار ۴-۵ کاهش تدریجی شار نوترونی در بلوک‌های پلی‌اتیلن بور و سرب را نشان می‌دهد که نقش مؤثر پلی‌اتیلن بور در جذب نوترون‌های حرارتی و عملکرد سرب در حذف پرتوهای گامای ثانویه را تأیید می‌کند. همچنین، نمودار ۴-۶ بیانگر کاهش تا ۱۰ برابری شدت نوترون‌های عبوری در طول مسیر یک‌متری کولیماتور است. این کاهش عمدتاً به دلیل حذف نوترون‌های غیرموازی و ایجاد باریکه‌ای یکنواخت و همگن است که منجر به کاهش پراکندگی، بهبود نسبت سیگنال به نویز (SNR) و افزایش تفکیک‌پذیری تصاویر نوترونی می‌شود. استفاده از فیلترهای انرژی مناسب مانند کریستال



سفایر (یا قوت کبود) و بیسموت نیز موجب تنظیم مؤثر طیف نوترونی شده و امکان حذف انرژی‌های نامطلوب را فراهم کرده است. این فیلترها با بهینه‌سازی طیف انرژی نوترون‌ها، دقت اندازه‌گیری را افزایش داده و کیفیت تصاویر را بهبود بخشیده‌اند. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب طراحی بهینه کولیماتور با مواد جاذب نوترونی و فیلترهای انرژی می‌تواند بهبود قابل توجهی در کیفیت تصویربرداری نوترونی ایجاد کند. این بهبودها می‌تواند در کاربردهای پیشرفته‌ای مانند کنترل کیفی مواد، بررسی ساختارهای داخلی اجسام و تشخیص عیوب پنهان نقش مؤثری ایفا کند.

۵- مراجع:

- [۱] K. Lefmann, *Neutron Scattering: Theory, Instrumentation, and Simulation*, ۱st ed. Springer, ۲۰۱۲.
- [۲] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Advances in Neutron Imaging*, IAEA Publications, ۲۰۱۸.
- [۳] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Neutron Imaging for Materials Research*, NIST, ۲۰۱۹.
- [۴] "Recent Developments in Neutron Radiography," *Journal of Applied Physics*.
- [۵] G. C. McClellan and D. M. Tow, "Neutron tomography of damaged reactor fuel assemblies," *Springer*, ۱۹۸۷.
- [۶] Los Alamos National Laboratory, *MCNP6 User Manual*, LANL, ۲۰۲۰.



بررسی تاثیر پرتو الکترونی بر روی خواص مکانیکی پلیمر پلی اتیلن با استفاده از سامانه شتاب

دهنده CELV-8 (کد مقاله : ۱۴۲۹)

محمدی، مهسا - موسوی، سید محمد جواد - مرادی، حمیدرضا - آزاد، سهیل
سازمان انرژی اتمی تهران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مرکز پرتو فرآیند نوین قزوین

چکیده:

با توجه به استفاده روز افزون از پرتوهای الکترونی در صنایع مختلف پلیمری به منظور تولید سیم و کابل و استریل کردن محصولات پزشکی، اثر پرتو الکترونی بر روی پلیمر پلی اتیلن مورد بررسی قرار گرفت. از پلیمر پلی اتیلن به عنوان روکش و عایق در ساخت کابل های سولار استفاده می شود. در این تحقیق اثر پرتو الکترونی با دز های متفاوت از ۱۹۰۰۰۰ تا ۲۳۵۰۰ گری بر روی پلیمر پلی اتیلن بررسی شد. به منظور ارزیابی اثر پرتو الکترونی آزمون های گرما سختی، آزمون محتوای ژل و آزمون کششی از نمونه ها تهیه شد. بر طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید با افزایش دز پرتو الکترونی، چگالی پیوندهای عرضی در نمونه ها افزایش می یابد و تغییرات زیادی در خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ها ایجاد می شود. بررسی نتایج آزمون ها نسبت به نمونه پرتو دهی نشده مشخص گردید دز پرتو ۲۲۵۰۰ گری مناسب می باشد.

کلمات کلیدی: پرتو الکترونی، پلی اتیلن، گرما سختی، آزمون محتوای ژل، آزمون کشش

Investigation the effect of electron beam on the mechanical properties of polyethylene polymer using the CELV-^۸

Mahsa Mohammadi*, Seyyed Mohammad Javad Mousavi, Hamidreza Moradi, Soheil Azad

Atomic Energy Organization of Iran, Iran Radiation Application Development Company (IRAC Co.), Tehran. Iran

Abstract:

Due to the increasing use of electron beams in various polymer industries for the production of wires and cables, and sterilization of medical products, the effect of electron beams on polyethylene polymer was investigated. Polyethylene polymer is used as a coating and insulation in the manufacture of solar cables. In this study, the effect of electron beams with different electron beam doses from ۱۹۰۰۰۰ to ۲۳۵۰۰ (Gy) on polyethylene polymer was investigated. In order to evaluate the effect of electron beams, Hot-Set, Gel Fraction, and tensile strength tests were performed on samples. According to the results that obtained, it was determined that with increasing electron beam dose, the density of crosslinks in the samples increases and many changes are created in the physical and mechanical properties of the samples. Examining the test results compared to the unirradiated sample, it was determined that a radiation dose of ۲۲۵۰۰ (Gy) megarads is appropriate.

Key words: Electron beam, polyethylene, Hot-Set, Gel Fraction Test, Tensile Test



۱- مقدمه:

امروزه دستیابی به دانش و فناوری سامانه‌های پرتودهی مواد با توجه به رشد جمعیت و افزایش نیاز به تولیدات دامی و کشاورزی، بهبود عملکرد کشاورزی و کاهش ضایعات کشاورزی و دامی، نیاز روزافزون به تجهیزات پزشکی استریل و کاهش وابستگی به واردات، حفظ امنیت غذایی و کاهش ضایعات، ارتقاء کیفیت محصولات پلیمری و افزایش کارایی در صنایع و همچنین کاهش آلودگی شیمیایی و مدیریت پسماند و... یک ضرورت استراتژیک و غیرقابل انکار برای توسعه پایدار کشورها محسوب می‌شود [۱].

پرتودهی مواد پلیمری می‌تواند فرآیندهایی مانند پخت^{۱۳۴}، پیوند عرضی^{۱۳۵}، تخریب^{۱۳۶} و دیگر تغییرات ساختاری را با مزایای قابل توجه نسبت به فرآیندهای گرمایی معادل ایجاد کند. این مزایا شامل کاهش زمان فرآیند، کاهش هزینه‌های انرژی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی است. این فناوری علاوه بر این، کیفیت محصولات نهایی را نیز بهبود می‌بخشد. دستیابی و گسترش این فناوری، برای صنایع مدرن یک نیاز استراتژیک و ضروری محسوب می‌شود [۲-۳].

پرتودهی سیم و کابل یکی از روش‌های رایج برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی پلیمرهای استفاده شده در عایق و روکش آن‌ها است. این فرآیند به‌خصوص برای کراسلینک کردن پلیمرها اهمیت دارد. افزایش مقاومت حرارتی، بهبود مقاومت مکانیکی، مقاومت در برابر مواد شیمیایی، کاهش جاری شدن از تأثیرات مثبت فرآیند کراسلینک شدن می‌باشد. در فرآیند کراسلینک شدن، زنجیره‌های مولکولی پلیمر با یکدیگر پیوندهای شیمیایی جدیدی تشکیل می‌دهند. پرتودهی با اشعه‌های الکترون^{۱۳۷} می‌تواند انرژی کافی برای شکستن پیوندهای مولکولی ضعیف و ایجاد پیوندهای عرضی فراهم کند. این پیوندهای عرضی باعث بهبود ساختار شبکه‌ای پلیمر می‌شود و مواد را از حالت ترموپلاستیک به ترموست تغییر می‌دهد. از مزایای پرتودهی سیم و کابل می‌توان به مقاومت بهتر در برابر دمای بالای عملیاتی، مناسب برای استفاده در صنایع قدرت و ارتباطات، بهبود عمر کاری کابل به دلیل کاهش فرسودگی و اکسیداسیون، قابلیت استفاده در شرایط سخت محیطی مانند دمای بالا، رطوبت، و اشعه فرابنفش اشاره نمود.

انواع کابل‌هایی که می‌توان پرتودهی کرد:

الف) کابل‌های قدرت^{۱۳۸}:

- استفاده در شبکه‌های انتقال و توزیع برق
- پرتودهی باعث می‌شود این کابل‌ها دمای بالاتری (۹۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) را تحمل کنند و مقاومت بهتری در برابر خزش و شکستگی داشته باشند.
- ب) کابل‌های ارتباطی و مخابراتی^{۱۳۹}:
- پرتودهی این کابل‌ها مقاومت آن‌ها را در برابر سایش و حرارت افزایش می‌دهد و برای محیط‌های صنعتی و دمای بالا مناسب می‌کند.

ج) کابل‌های خاص^{۱۴۰}:

- کابل‌های مقاوم در برابر شعله: پرتودهی به آن‌ها مقاومت بالایی در برابر آتش می‌دهد.
- کابل‌های هوانوردی یا دریایی: که نیاز به مقاومت بالا در برابر رطوبت، مواد شیمیایی و دمای زیاد دارند.

^{۱۳۴} Curing

^{۱۳۵} Crosslinking

^{۱۳۶} Degradation

^{۱۳۷} Electron Beam

^{۱۳۸} Power Cables

^{۱۳۹} Telecommunication Cables

^{۱۴۰} Specialty Cables



(د) کابل‌های انعطاف‌پذیر^{۱۴۱}:

• برای دستگاه‌های متحرک یا کاربردهای دینامیک. پرتودهی باعث بهبود انعطاف‌پذیری بدون کاهش مقاومت مکانیکی می‌شود.

از ویژگی‌های مواد اولیه کابل‌ها برای پرتودهی قابلیت تشکیل پیوندهای عرضی می‌باشد، رایج‌ترین مواد که قابلیت کاربرد دارند، پلی‌اتیلن^{۱۴۲}، پلی‌وینیل کلراید^{۱۴۳}، لاستیک‌های سیلیکونی و الاستومرها و پلی‌پروپیلن^{۱۴۴}. همچنین مواد اولیه باید قبل از پرتودهی در برابر حرارت و شرایط شیمیایی پایداری مناسبی داشته باشند تا در حین فرآیند تخریب نشوند. از مزایای فرآیند پرتودهی می‌توان به مواردی مانند پایداری بیشتر در دمای بالا که باعث کاهش خطر ذوب یا نرم شدن در دماهای عملیاتی می‌شود، عمر طولانی‌تر مواد به دلیل مقاومت بهتر در برابر عوامل محیطی، مقاومت شیمیایی بهتر که باعث محافظت در برابر روغن‌ها، مواد شیمیایی و گازها می‌شود، بهبود خواص مکانیکی که سبب افزایش استحکام کششی و مقاومت به خزش می‌شود و افزایش ایمنی موارد در جهت بهبود مقاومت در برابر آتش و کاهش انتشار گازهای سمی اشاره کرد [۶-۴].

۲- شتاب دهنده CELV-8

شتاب دهنده ELV یک نوع شتابدهنده الکترواستاتیک است. اصول کلی شتابدهنده‌های الکترواستاتیک ایجاد یک ولتاژ بالای DC و در نتیجه ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت بوسیله تقسیم مقاومتی ولتاژ بالا روی صفحات تیوب شتابدهی می‌باشد. معمولاً مقدار انرژی این نوع شتابدهنده‌ها معادل ولتاژ بالای آنها می‌باشد. نحوه ایجاد ولتاژ بالای جریان مستقیم بدین صورت است که ابتدا ولتاژ ۳۸۰ ولت ۵۰ هرتز به وسیله یکسوساز، یکسو شده و پس از عبور از مبدل DC به AC، شکل موج خروجی فرکانس آن به حدود ۴۰۰ هرتز افزایش یافته و ولتاژ آن قابل تنظیم در بازه حدود ۱۷۸ تا ۵۸۰ ولت می‌باشد این ولتاژ به اولیه ترانسفورماتور افزایش‌دهنده اعمال می‌شود و در ثانویه ولتاژ حدود ۲۰ کیلو ولت AC بدست می‌آید. در هر طبقه ولتاژ AC به ولتاژ DC تبدیل می‌شود که مقدار آن حدود ۴۰ کیلو ولت می‌باشد. این شتابدهنده دارای ۶۵ سیم پیچ ثانویه و ۶۵ طبقه یکسوسازی می‌باشد که ولتاژ یکسوشده در هر طبقه با هم سری و در نهایت ولتاژ خروجی ۲.۵ مگا ولت بدست می‌آید. البته این ولتاژ خروجی قابل تنظیم می‌باشد

۳- روش کار:

در این تحقیق از آمیزه‌ای بر پایه پلیمر پلی اتیلن PE در عدم حضور هالوژن به همراه افزودنی‌هایی در ساخت عایق و روکش برای کابل‌های سولار استفاده شد. به منظور ایجاد مقاومت مکانیکی و حرارتی در روکش‌های سیم و کابل باید از پلیمر که دارای اتصالات عرضی می‌باشد، استفاده کرد. به طور رایج از روش‌های شیمیایی جهت ایجاد اتصالات عرضی در پلیمرها استفاده می‌شود. در این مقاله از روش پرتودهی الکترون با استفاده از سامانه شتاب دهنده CELV-8 در مرکز پرتو فرایند نوین قزوین استفاده شد. کابل‌های سولار با میزان دز ۱۹۰۰۰ تا ۲۳۵۰۰ گری و انرژی ۲.۵ مگا الکترون ولت پرتودهی شدند. به منظور ارزیابی تاثیر پرتودهی کابل‌های سولار، نتایج آزمون‌های گرما سختی^{۱۴۵}، آزمون محتوای ژل و آزمون کشش استفاده شد.

^{۱۴۱} Flexible Cables

^{۱۴۲} Poly Ethylene (PE)

^{۱۴۳} Poly Vinyl Chloride (PVC)

^{۱۴۴} Poly Propylene (PP)

^{۱۴۵} Hot-Set Test



۴- نتایج:

۴-۱- آزمون گرما سختی

پرتو دهی الکترونی، یکی از روش‌های پیشرفته برای اصلاح ساختار پلیمری عایق و روکش سیم و کابل است. این فرآیند باعث ایجاد پیوندهای عرضی (Crosslinking) بین زنجیره‌های پلیمری شده و ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و شیمیایی مواد را بهبود می‌بخشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تأثیرپذیر از این فرآیند، کشیدگی (Elongation) یا درصد افزایش طول ماده قبل از شکست است. هنگامی که کابل یا سیم دارای روکش پلیمری در معرض پرتوهای الکترونی با انرژی بالا قرار می‌گیرد ایجاد رادیکال‌های آزاد در ساختار پلیمری آغاز می‌شود و تشکیل پیوندهای عرضی (Crosslinks) بین زنجیره‌های پلیمری رخ می‌دهد که در نتیجه آن ساختار شبکه‌ای درون پلیمر تقویت می‌شود و منجر به تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی می‌گردد.

پلیمرهای خام و فرآوری نشده دارای زنجیره‌های بلند و انعطاف‌پذیر هستند. این ساختار اجازه می‌دهد که ماده تحت کشش، بیشتر افزایش طول دهد. اما پس از کراسلینک شدن، شبکه‌ای از پیوندهای عرضی ایجاد شده که حرکت زنجیره‌های پلیمری را محدود می‌کند. این امر منجر به کاهش میزان Elongation در مقایسه با ماده خام می‌شود. نتایج آزمون گرما سختی در مقادیر دز پرتو الکترونی (۱۹۰۰۰۰ - ۲۰۰۰۰۰ - ۲۰۵۰۰۰ - ۲۱۰۰۰۰ - ۲۲۵۰۰۰ - ۲۳۵۰۰۰) گری و انرژی ۲.۵ مگا الکترون ولت در جدول ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش دز پرتو الکترونی، مقادیر ازدیاد طول در نمونه‌های روکش و عایق کاهش می‌یابد. پرتو دهی الکترونی باعث کاهش میزان کشیدگی نسبت به پلیمر خام می‌شود، اما این کاهش در حدی است که تعادل بین استحکام و انعطاف‌پذیری حفظ شود. بهینه‌سازی دوز پرتو دهی، کلید اصلی تنظیم ویژگی‌های مکانیکی، از جمله کشیدگی، برای کاربردهای صنعتی مختلف است.

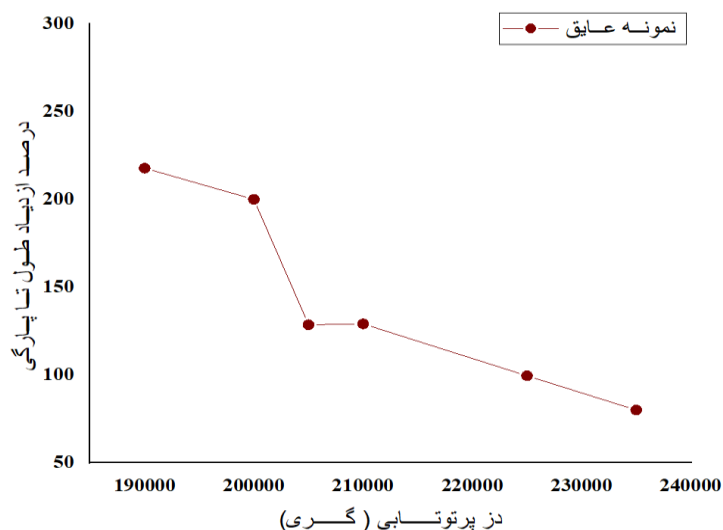
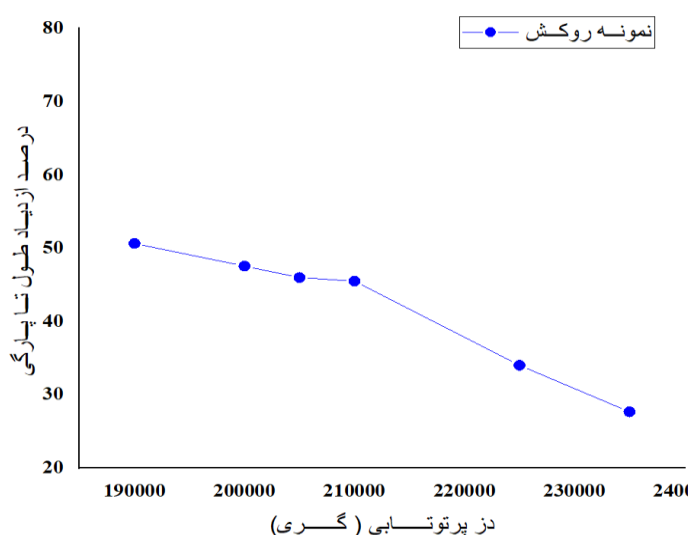
جدول ۱: نتایج آزمون گرما سختی نمونه پلی اتیلن

نمونه	انرژی (مگا الکترون ولت)	دز پرتو تابانی (گری)	ازدیاد طول (%)
روکش	۲.۵	۱۹۰۰۰۰	۵۰.۶۵
		۲۰۰۰۰۰	۴۷.۵۵
		۲۰۵۰۰۰	۴۶
		۲۱۰۰۰۰	۴۵.۵
		۲۲۵۰۰۰	۳۴
		۲۳۵۰۰۰	۲۷.۶۵

نمونه	انرژی (مگا الکترون ولت)	دز پرتو تابانی (گری)	ازدیاد طول (%)
عایق	۲.۵	۱۹۰۰۰۰	۲۱۷.۸۷
		۲۰۰۰۰۰	۲۰۰.۱۲
		۲۰۵۰۰۰	۱۲۸.۵۸



۱۲۹.۱	۲۱۰۰۰۰		
۹۹.۵	۲۲۵۰۰۰		
۸۰	۲۳۵۰۰۰		



شکل ۱. ازدیاد طول تا پارگی نمونه‌ها در دمای 200°C بر حسب دز پرتوتابی (گری)

۲-۴-۲-۴ آزمون محتوای ژل

هدف از انجام آزمون، تعیین مقدار ژل در پلیمرهای شبکه‌ای شده توسط استخراج با حلال‌هایی نظیر زایلن می‌باشد. همچنین میزان تورم و درصد استخراج توسط استخراج با حلال تعیین می‌گردد. این روش برای پلاستیک‌های اتیلنی شبکه‌ای شده با دانسیته مختلف و پلاستیک‌های حاوی فیلر به کار می‌رود. میزان ژل شدن نمونه‌ها توسط استاندارد ASTM D۲۷۶۵ انجام شدند. نمونه پلاستیک اتیلنی شبکه‌ای شده با پرتو الکترونی، وزن کرده سپس در حلال مناسب، در دمای معین و برای مدت زمان مشخصی غوطه‌ور می‌کنند. پس از استخراج، نمونه را خشک کرده و توزین می‌کنند. در نهایت درصد استخراج $E\%$ و نسبت تورم Gel مطابق فرمول ۱ و ۲ به ترتیب محاسبه می‌شود. در فرمول محاسبه درصد استخراج W_0 وزن اولیه نمونه، W_1 وزن توری، W_2 مجموع وزن W_0 و W_1 ، W_3 شامل وزن اولیه نمونه به همراه توری که کاملاً سر آن بسته باشد، در نهایت W_4 مقدار باقیمانده نمونه که شامل وزن نمونه خشک شده در آن خلا بعد از استخراج می‌باشد. نتایج آزمون ژل برای نمونه بر پایه پلی اتیلن برای روکش و عایق کابل سولار در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۲ محتوا ژل نمونه‌ها بر اساس



میزان دز پرتو تابشی شده برای نمونه روکش و عایق نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود با افزایش دز پرتو الکترونی، محتوا ژل افزایش می یابد، که این امر حاکی از افزایش چگالی پیوند های عرضی در ساختار پلیمر پلی اتیلن می باشد.

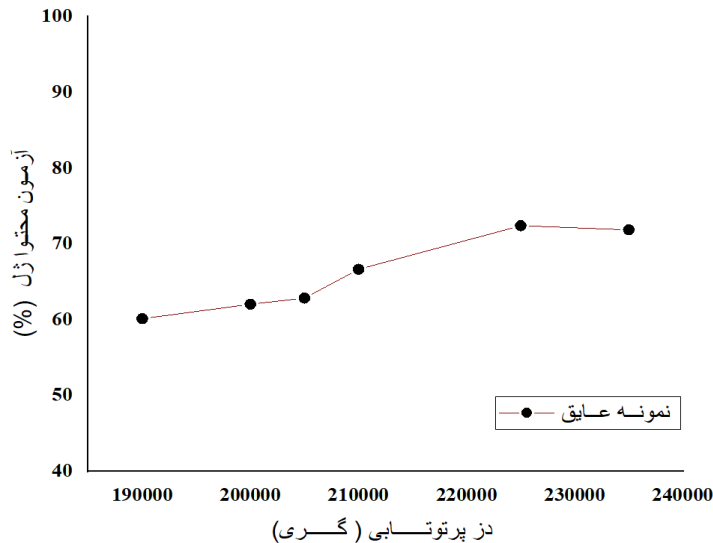
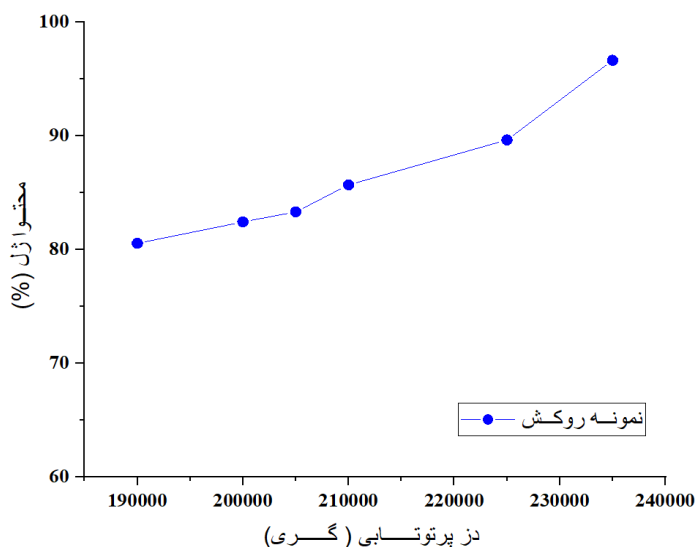
$$\text{Extraction} = E \% = [(W^3 - W^4) / (W^2 - W^1)] * 100 \% \quad (1)$$

$$\text{Gel} = 100 - E \% \quad (2)$$

جدول ۲: نتایج آزمون محتوای ژل نمونه پلی اتیلن برای روکش و عایق کابل سولار

نمونه	انرژی (مگا الکترون ولت)	دز پرتو تابشی (گری)	محتوا ژل (%)	محتوا استخراج شده (%)
روکش	۲.۵	۱۹۰۰۰۰	۸۰.۵۶	۱۹.۴۴
		۲۰۰۰۰۰	۸۲.۴۵	۱۷.۵۵
		۲۰۵۰۰۰	۸۳.۳۳	۱۶.۶۶
		۲۱۰۰۰۰	۸۵.۷۱	۱۴.۲۸
		۲۲۵۰۰۰	۸۹.۶۵	۱۰.۳۴
		۲۳۵۰۰۰	۹۶.۶۶	۳.۳۳

نمونه	انرژی (مگا الکترون ولت)	دز پرتو تابشی (گری)	محتوا ژل (%)	محتوا استخراج شده (%)
عایق	۲.۵	۱۹۰۰۰۰	۶۰.۱۴	۳۹.۸۶
		۲۰۰۰۰۰	۶۲.۰۶	۳۷.۹۳
		۲۰۵۰۰۰	۶۲.۸۵	۳۷.۱۵
		۲۱۰۰۰۰	۶۶.۶۶	۳۳.۳۳
		۲۲۵۰۰۰	۷۲.۴۱	۲۷.۵۸
		۲۳۵۰۰۰	۷۱.۸۷	۲۸.۱۲



شکل ۲. نمودار آزمون محتوای ژل بر حسب وزن پرتوتایی (گری)

۴-۳- آزمون کشش

بر طبق نتایج حاصل از آزمون کششی بر روی نمونه روکش و عایق پرتوده‌ای شده با دز ۲۲۵۰۰۰ گری مشخص گردید پرتوده‌ای با دز بالا، موید افزایش میزان پیوندهای عرضی در ساختار کلی مولکول و افزایش مقاومت در برابر تغییر کشش می باشد. کابل پرتوده‌ای شده با دز بهینه در برابر دمای بالا دچار تغییر شکل شدید نمی‌شود. ساختار کابل کراسلینک شده با پرتو الکترونی باعث بهبود مقاومت در برابر تغییر شکل، دما و مقاومت شیمیایی می شود. استقامت کششی قبل پرتوده‌ای برای کابل سولار نمونه عایق و روکش که در این تحقیق مورد بررسی گرفت به ترتیب برابر با ۱۸.۷ و ۱۴.۴ (N/mm) می باشد. نتایج استقامت کششی از نمونه پرتوده‌ای شده با دز ۲۲۵۰۰۰ گری برای عایق و روکش به ترتیب برابر با ۱۹.۵ و ۱۶.۵ (N/mm) بدست آمد که قابل قبول می باشد.

۵- بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، پلیمر پلی اتیلن که به عنوان روکش در کابل های سولار استفاده می شود، توسط سامانه شتاب دهنده الکترونی CELV-۸ در دز های مختلف پرتوده‌ای شد، سپس از نظر خواص فیزیکی و مکانیکی بررسی شد تا بهترین دز پرتو مشخص شود. پرتو الکترون باعث ایجاد اتصالات عرضی در ساختار پلیمر می شود که این اتصالات عرضی موجب افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی کابل، افزایش مقاومت در برابر دما و همچنین باعث بهبود مقاومت شیمیایی در ساختار کابل در برابر روغن، مواد شیمیایی و سایش می‌شود. نمونه روکش بر پایه پلیمر پلی اتیلن در شرایط دز های متفاوت پرتوده‌ای شد و بر طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید با توجه به نتایج آزمون گرما سختی، محتوا ژل و آزمون کشش دز پرتو ۲۲.۵ مگا راد بهینه می باشد. آمیزه های بر پایه پلیمر پلی اتیلن در دماهای بالا ازدیاد طول تا پارگی زیاده‌تری دارند که این امر به علت سازگاری مولکولی بهتر این آمیزه ها می باشد.



۶- مراجع:

- [۱] Khan M.I, Huat H.Y, Dun M.H.M, Sutanto M.H, Jarghouyeh E.N, Zoorob S.E. Effect of Irradiated and Non-Irradiated Waste PET Based Cementitious Grouts on Flexural Strength of Semi-Flexible Pavement. Materials (Basel). ۲۰۱۹, ۱۲:۴۱۳۳.
- [۲] Ng H.M, Bee S.T, Ratnam C.T, Sin L.T, Phang Y.Y, Tee T.T, Rahmat A.R. Effectiveness of trimethylopropane trimethacrylate for the electronbeam-irradiation-induced cross-linking of polylactic acid. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B Nucl Instrum Meth B. ۲۰۱۴;۳۱۹:۶۲.
- [۳] Abramyan E.A., Industrial Electron, Washington D.C., USA, ۱۹۸۸.
- [۴] Geetha R., and Torikai A., Radiation-induced Degradation of Polyethylene: Effect of Processing and Density on the Chemical Changes and Mechanical Properties, Polym. Deg. Stab., ۲۳, ۹۱-۹۸, ۱۹۸۸.
- [۵] Chaki T.K., Despande Majali A.B., Tikku V.K. and Bhowmick A.K., Electron Beam Initiated Grafting of Methymethacrylate onto Polyethylene: Structure and Properties, Die Angew. Makromol. Chem., ۲۱۷, ۶۱-۶۹, ۱۹۹۴.
- [۶] Zoepfl F.J., Markovic V., and Silverman J., Differential Scanning Calorimetry Studies of Irradiated Polyethylene: I. Melting Temperatures and Fusion Endotherms, J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., ۲۲, ۲۰۱۷-۲۰۳۲, ۱۹۸۴.



مروری بر گوگردزدایی از محصولات پتروشیمی با استفاده از پرتو یونیزه کننده (کد مقاله :

(۱۴۳۲)

آموخت، سکینه - اخوان، اعظم*

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران

چکیده:

ترکیبات گوگردی موجود در نفت خام موجب کیفیت پایین فرآورده‌های نفتی و خسارت به محیط زیست و تجهیزات پالایشگاهی میشوند. با توجه به معایب روشهای مرسوم گوگردزدایی از نفت خام و فرآورده‌های آن، نیاز به یک روش موثر به صورت یک فرآیند واحد و یا مکمل روشهای موجود دارای اهمیت است. اخیراً، استفاده از پرتوهای یونیزه‌کننده‌ی پرتو برای گوگردزدایی از نفت مورد توجه محققان است. نتایج تحقیقات موجود نشان داده است که در حداقل زمان و سادگی فرآیند، پرتوهای یونیزه‌کننده به عنوان عامل ایجاد اکسیداسیون قوی برای افزایش بازدهی حذف ترکیبات گوگرددار مضر از فرآورده‌های نفتی استفاده میشود. در این مقاله، به برخی از پژوهشهای انجام شده در این زمینه اشاره شده است.

کلمات کلیدی: پرتو یونیزه کننده، گوگردزدایی، گوگرد، نفت خام، پرتو گاما

Desulfurization of Petroleum Products Using Ionizing Irradiation

Amookht, Sakineh, Akhavan, Azam*

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute,
Tehran, Iran

Abstract:

Sulfur compounds in crude oil cause low quality of petroleum products and damage to the environment and refinery equipment. Considering the disadvantages of the conventional methods of desulfurization of the oil and its products, the necessity of an effective method as a single process or complementary to the existing ones is significant. Recently, the use of high energy ionizing irradiation for desulfurization of oil has attracted the researchers. The results of the researches have shown that ionizing irradiation are used as a strong oxidation agent to increase the efficiency of removing harmful sulfur compounds from petroleum products in minimal time and simplicity of the process. In this article, some of the researches in this field are mentioned.

Key words: Ionizing radiation, Desulfurization, Sulfur, Crude oil, Gamma radiation



۱- مقدمه:

۱-۱- گوگرد در محصولات پتروشیمی

اکثر ساختارهای شناخته شده هیدروکربنهای نفتی حاوی گروههای عاملی گوگرددار هستند. تیوفنها^{۱۴۶} و سولفیدها^{۱۴۷} ترکیبات گوگردی غالب در نفت خام هستند. این ترکیبات دارای ساختارهای مختلفی هستند که میتوان آنها را به سه گروه ترکیبات دارای اسکلت کربنی ایزوپروپونوئیدی، ترکیبات دارای اسکلت کربنی استروئیدی و ترکیبات دارای اسکلت های کربنی خطی تقسیم کرد. سالانه مقادیر زیادی گاز گوگرد دیاکسید بر اثر احتراق سوختههای هیدروکربنی تولید میشود که بارانهای اسیدی حاصل از آن آثار مخربی روی محیط زیست و اقتصاد دارد. علاوهبراین، ترکیبات حاوی گوگرد در سوختهها موجب خوردگی در تجهیزات پالایشگاهها میشوند. بنابراین، برای کاهش این خسارتهای، تولید سوخت با مقدار گوگرد پایین با روشهای جداسازی گوگرد مقرون به صرفه اهمیت زیادی یافته است. روشهای مختلفی برای گوگردزدایی از سوختههای هیدروکربنی وجود دارد که هر یک مزایا و معایبی دارند [۱و۲].

۱-۲- روشهای گوگردزدایی از محصولات پتروشیمی

فرآیند گوگردزدایی هیدروژنی، مرسومترین روش صنعتی برای حذف گوگرد از ترکیبات نفتی است. در این روش، ابتدا در حضور گاز هیدروژن و کاتالیزورهای مختلف، ترکیبات گوگرددار تبدیل به هیدروژن سولفید میشوند. در مرحلهی بعد، هیدروژن سولفید تولید شده به عنصر گوگرد تبدیل میشود. در این فرآیند، شرایط عملیاتی شامل فشار جزئی هیدروژن ۲۰۰-۱۵۰ psi و دمای ۲۰۰-۴۰۰ °C است. [۲].

علاوه بر روش هیدروژنی، روشهای غیرهیدروژنی دیگری نیز برای گوگردزدایی از نفت و فرآوردههای آن وجود دارد که عبارتند از:

۱- گوگردزدایی اکسایشی: این فرآیند یک واکنش شیمیایی بین مادهی اکسیدکننده و گوگرد است که در دماهای پایین و فشار اتمسفری انجام میشود و شامل دو مرحلهی اکسایش گوگرد، که در آن ماهیت ترکیبات گوگردی تغییر میکند، و حذف گوگرد است.

۲- جذب سطحی ترکیبات گوگرددار: بر اساس توانایی یک مادهی جامد در جذب انتخابی ترکیبات آلی گوگرددار، از فرآیند جذب برای جداسازی ترکیبات آلی گوگرددار از فرآوردههای نفتی استفاده میشود. کارایی این روش به ظرفیت بالای مادهی جاذب، پایداری و قابل بازیافت بودن مادهی جاذب و انتخابی بودن آن برای ترکیبات آلی گوگرددار نسبت به هیدروکربنها بستگی دارد. این فرآیند شامل دو دستهی جذب فیزیکی و جذب شیمیایی است.

۳- گوگردزدایی زیستی: در فرآیند زیستی، تحت شرایط دمای محیط و فشار اتمسفر و بدون کاهش ارزش حرارتی سوخت هیدروکربنی، گوگرد از ترکیبات آلی حذف میشود. در این فرآیند هزینهی عملیاتی و تولید گازهای گلخانههای پایین بوده و محصولات جانبی باارزشی تولید میشود.

۴- استخراج حلالی ترکیبات گوگرد: بر اساس حلالیت ترکیبات آلی گوگرددار در حلالهای مناسب آلی، گوگردزدایی به روش استخراج، که آن را استخراج مایع-مایع مینامند، نیز انجام میشود. در این روش باید دو فاز مایع غیرقابل امتزاج باشند. به دلیل شرایط فرآیندی مناسب، عدم نیاز به گاز هیدروژن و هزینهی پایین، گوگردزدایی استخراجی مورد توجه واقع شده است.

۵- گوگردزدایی با آب فوق بحرانی: استفاده از آب فوق بحرانی یکی دیگر از روشهای گوگردزدایی از سوختههای هیدروکربنی است. مخلوط آب و نفت در بالای نقطهی بحرانی به یک فاز تبدیل میشود و میتواند گوگرد را بدون افزودن عامل خارجی هیدروژن و کاتالیزور حذف کند [۴-۲].

^{۱۴۶} Thiophene

^{۱۴۷} Sulfide



۳-۱- معایب روشهای مرسوم گوگردزدایی

شرایط دشوار عملیاتی مانند دما و فشار بالا، استفاده از کاتالیزورهای بسیار فعال، نیاز به گاز هیدروژن و عدم توانایی در حذف بنزوتیوفن^{۱۴۸}، دینزوتیوفن^{۱۴۹} و مشتقات آلکیل‌های آنها از محدودیتهای فرآیند هیدروژنی برای گوگردزدایی است. در فرآیند گوگردزدایی اکسایشی بعضی اکسندها باعث ایجاد واکنشهای جانبی و تولید محصولات ناخواسته میشوند. علاوه بر این، استفاده از حلال نامناسب ممکن است موجب جدا شدن ترکیبات آروماتیک و الفینی مطلوب از نفت شود یا فرآیند استخراج ترکیبات گوگردی به خوبی انجام نشود. در فرآیند جذب، بازیابی جاذبها به سختی انجام میشود و ظرفیت جذب بسیاری از آنها پایین است. در فرآیند زیستی، کند بودن حذف ترکیبات گوگرد نسبت به واکنشهای شیمیایی و عدم امکان تفکیک و بازیابی سالم سلولها، از مشکلات صنعتی شدن است. محدودیت‌های فرآیند استخراجی شامل انتخاب حلال مناسب و استخراج مشترک ترکیبات آروماتیک و ترکیبات آلی گوگرددار میشود. روش گوگردزدایی با آب فوق بحرانی نمیتواند به تنهایی بازدهی بالایی داشته باشد و شیمی واکنشها در این فرآیند مشخص نیست [۲].

۴-۱- گوگردزدایی از محصولات پتروشیمی با استفاده از پرتو یونیزه‌کننده

با توجه به معایبی که برای روشهای گوگردزدایی در بخش ۳-۱ بیان شد، یک روش موثر به عنوان یک فرآیند واحد و یا مکمل روشهای موجود برای گوگردزدایی از نفت و فرآورده‌های نفتی مورد توجه واقع شده است. امروزه، پرتوهای یونیزه‌کننده، که به عنوان یک ابزار کارآمد شناخته میشوند، واسطه‌های فرآیندهای اکسیداسیون به منظور افزایش حذف گوگرد از نفت هستند. در ادامه، به چند مورد از مطالعات در رابطه با استفاده از پرتو برای گوگردزدایی از محصولات نفتی اشاره شده است.

در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ شرکت ايسو^{۱۵۰} یک نوآوری در رابطه با گوگردزدایی نفت با استفاده از روش پرتو دهی را به ثبت رساند. در این پژوهش، نفت خام و برشهای آن با ۰/۸ تا ۱/۰۹ درصد وزنی گوگرد در حضور کاتالیزورهای اکسید فلزی مانند سیلیکا-آلومینا^{۱۵۱} با تابش گاما پرتو دهی شدند. دزهای پرتو دهی در محدوده‌ی 10^7 R تا $6^9 \times 10$ با تابش گاما انجام شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که تابش نفت حاوی گوگرد با پرتو یونیزه‌کننده‌ی پرتو دهی، گوگرد موجود در نفت را از حالت شیمیایی نسبتاً پایدار به حالت شیمیایی نسبتاً ناپایدار یا ضعیف تبدیل میکند. بعد از پرتو دهی، گونه‌های گوگردی با استفاده از روشهای مرسوم حذف شدند. با استفاده از این روش، غلظت گوگرد کل در نفت ۶۰٪ تا ۷۵٪ کاهش یافت [۵].

یک گروه تحقیقاتی از قزاقستان روشی را برای استخراج و اکسیداسیون ترکیبات گوگردی آلی مضر از مواد اولیه‌ی هیدروکربنی توسعه دادند. مجموعهای از آزمایشات آنها روی استخراج گوگرد و متعاقب آن اکسیداسیون تشعشعی، به فناوری تولید سولفوکسیدها^{۱۵۲}، سولفونها^{۱۵۳} و اسیدهای سولفونیک^{۱۵۴} منجر شد. در این مطالعات، ترکیبات گوگرددار آلی به روش استخراج مایع با استفاده از حلالهای آلی، مانند استیل استون، که برای استخراج طیف وسیعی از ترکیبات آلی گوگردی مناسب است، جداسازی شد. ترکیبات گوگرد استخراج شده توسط پرتو گاما با دز ۷۰ تا ۲۲۰ کیلوگری و نرخ دز ۱/۳ گری بر ثانیه پرتو دهی شدند. پس از پرتو دهی، محصولات اکسیداسیون نفت جدا شده با روش کروماتوگرافی، با استفاده از روش طیفسنجی IR مورد مطالعه قرار گرفت. تا دز ۱۵۰ کیلوگری نوارهای جذب مرتبط با سولفوکسیدها و در دزهای بالاتر، نوارهای جذب مرتبط

^{۱۴۸} Benzothiophene

^{۱۴۹} Dibenzothiophene

^{۱۵۰} Esso

^{۱۵۱} Silica-alumina

^{۱۵۲} Sulfoxides

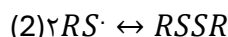
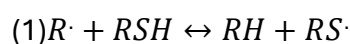
^{۱۵۳} Sulfone

^{۱۵۴} Sulphonic acid

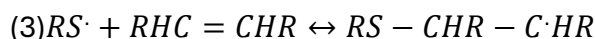


با سولفونها، دیبنزو و بنزوتیوفنهای نفتالین در طیف IR مشاهده شد. در دز ۲۰۰ کیلوگری بازده سولفوکسید کاهش یافت و اکسیداسیون مقدار زیادی از ترکیبات گوگردی که منجر به تولید سولفونها و اسیدهای سولفونیک بود، مشاهده شد. در این تحقیق، اکسیداسیون تحت هوادهی مداوم با فشار اتمسفر انجام شد. مقایسه ی نتایج این تحقیق با روش استفاده از پراکسید هیدروژن نشان داد که بازده اکسیداسیون ترکیبات گوگردی آلی با استفاده از پرتو گاما بیشتر از بازده آن با استفاده از پراکسید هیدروژن بدون حضور پرتو گاما است [۶].

مطابق با تحقیقات وودز^{۱۵۵} و همکاران، فرآیند پرتودهی میتواند تیولها را حذف و ترکیبات گوگردی با وزن مولکولی بالا تولید کند. در این فرآیند، مطابق با واکنش (۱)، یک گروه تیول SH مولکول هیدروکربن RH را از رادیکال R• که در اثر پرتودهی ایجاد شده است، بازسازی میکند و مطابق با واکنش (۲)، ترکیب مجدد رادیکالهای RS• منجر به تشکیل محصولات با وزن مولکولی بالا و فراریت کم میشود [۷]:



مطابق با واکنشهای (۳) و (۴)، رادیکالهای RS• که به آلکنها اضافه میشوند، میتوانند توسط یک سیستم زنجیرهای در دمای اتاق سولفید تولید کنند [۷]. همچنین، این فرآیند توسط نوبت^{۱۵۶} و همکاران به عنوان راهی برای حذف ترکیبات گوگردی مضر تیولها از نفت و تبدیل آنها به سولفیدهای با فراریت کم با استفاده از پرتو، پیشنهاد شده است [۸]:



این واکنشها و حذف ترکیبات گوگردی مضر میتواند تحت تاثیر هوای برانگیخته با بازدهی بالاتری انجام شود. زکینا^{۱۵۷} و همکاران فرآیند پرتودهی در حضور هوا را برای حذف ترکیبات گوگردی تیول انجام دادند. آنها روشی دو مرحلهای با استفاده از پرتو را برای تبدیل ترکیبات گوگردی مضر مرکاپتان به ترکیبات بیضر و راحت برای استخراج پیشنهاد کردند. در مرحلهی اول اکسیداسیون قوی ترکیبات گوگردار رخ میدهد که موجب از بین رفتن یک ترکیب با ویژگی تهاجمی شیمیایی میشود و در مرحلهی بعد حذف با روش استخراج انجام میشود. اکسیداسیون قوی گوگرد به دلیل فعالسازی مضاعف فرآیندهای اکسیداسیون ناشی از فعالسازی مواد اولیه با تابش و فعالسازی با هوای برانگیخته رخ میدهد. بنابراین، در روش پرتودهی، هوای حاوی ازن که توسط بمباران الکترونی پراثری برانگیخته میشود، به عنوان یک اکسیدکننده ظاهر میشود [۹].

در این فناوری، هوای برانگیخته یک محصول جانبی ارزان قیمت از عملکرد شتابدهنده است که شامل اکسیژن تک اتمی، مولکولهای اکسیژن برانگیخته، کمپلکسهای مختلف حاوی اکسیژن، همراه با ازن است. بسیاری از اجزای این مخلوط اکسیدکنندههای قوی و حتی بعضی از آنها اکسیدکنندههای قویتر از ازن هستند. به عنوان یک نتیجه از تبدیل ناشی از پرتو، گوگرد در برشهای نفتی سنگین به صورت ترکیبات اکسید شده با وزن مولکولی بالا مانند سولفونها، سولفوکسیدها و اسیدهای سولفونیک یافت میشود. این ترکیبات میتوانند به راحتی با روشهای شناخته شده با استفاده از حلالهای مناسب مانند محلولهای آبی اسید سولفوریک، استون، اتیلن گلیکول و مونواتیل الکل استخراج شوند [۹].

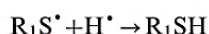
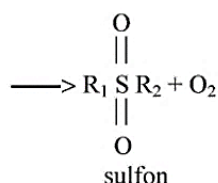
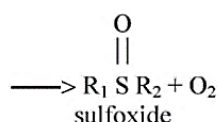
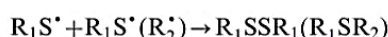
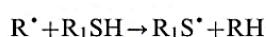
^{۱۵۵} Woods

^{۱۵۶} Nevitt

^{۱۵۷} Zaykina



از محصولات جانبی این واکنشها که سولفونها و سولفوکسیدهای نفتی هستند، در حلالهای انتخابی پالایش نفت برای تصفیه پیرافین از ترکیبات گوگردی آلی و اشباع نشده استفاده میشود. همچنین، ترکیبات سولفوریک با وزن مولکولی بالا محصولات ارزشمندی هستند که به عنوان عوامل استخراج در فرآیندهای استخراج و جداسازی مواد رادیواکتیو و فلزات کمیاب مانند اورانیوم، توریوم، زیکونیوم، هافنیوم، نوبیوم و تانتالیوم، و عناصر کمیاب خاکی مانند تلوریم، رنیم، طلا و پالادیم، در معدن و متالورژی استفاده میشوند. برای مثال، یکی از مکانیزمها برای واکنش اکسیداسیون و تبدیل مرکپتان به ترکیبات شیمیایی بی ضرر سولفوکسید و سولفون در شکل (۱) نمایش داده شده است [۹].



شکل (۱). اکسیداسیون و تبدیل مرکپتان به سولفوکسید و سولفون با پرتودهی [۹]

همچنین، در برخی پژوهشها تاثیر سایر عوامل شیمیایی مانند آب میلی-کیو^{۱۵۸} و هیدروژن پراکسید به منظور افزایش بازدهی فناوری پرتودهی نیز بررسی شد. اسکپین^{۱۵۹} و همکاران فناوری گوگردزدایی با پرتو گاما را برای حذف گوگرد از فرآوردهی نفتی روان کنندهی مورد استفاده در خودرو به کار بردند. نمونهها در دزهای ۱۰ تا ۵۰۰ کیلوگری با منبع تابشی کبالت ۶۰ پرتودهی شدند. در این پژوهش برای افزایش بازدهی رادیولیز نفت، پرتودهی نمونهها در حضور ۵۰ تا ۷۰ درصد حجمی آب میلی-کیو و ۳۰ درصد حجمی هیدروژن پراکسید انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش حذف ۶۸ درصدی گوگرد در دز جذبی ۵۰۰ کیلوگری را با افزودن ۷۰ درصد حجمی از آب میلی-کیو نشان داد [۱۰].

۲- نتیجه گیری کلی:

تولید گاز گوگرد دیاکسید از فرآوردههای نفتی و بارانهای اسیدی حاصل از آن خسارتهای زیادی ایجاد میکند. به منظور کاهش این خسارتهای، تولید سوخت با مقدار گوگرد پایین با روشهای گوگردزدایی مورد اهمیت واقع شده است. روشهای مختلف



صنعتی و غیرصنعتی برای گوگردزدایی از نفت و فرآورده‌های نفتی وجود دارند که به دلیل شرایط عملیاتی دشوار، محدودیتها و معایب آنها، اخیراً روشهای مبتنی بر پرتوهای یونیزه‌کننده مورد توجه محققان است. امکان دستیابی به هر درجه از اکسیداسیون گوگرد در حداقل زمان فرآیندی و سادگی فرآیندی از مزیت‌های این فناوری است. نتایج تحقیقات در این زمینه نشان داده است که پرتودهی نفت حاوی ترکیبات گوگرد با تشعشعات یونیزه‌کننده پیرانرژی، گوگرد موجود در نفت را از حالت شیمیایی نسبتاً پایدار به حالت شیمیایی نسبتاً ناپایدار یا ضعیف تبدیل میکند. در این فناوری، ترکیبات گوگرددار مضر مانند تیولها و تیوفنها بر اثر پرتودهی تبدیل به ترکیبات گوگرددار با ویژگی تهاجمی شیمیایی کمتر میشوند. بعد از پرتودهی، ترکیبات گوگردی تغییر یافته با استفاده از روشهای مرسوم مانند استخراج مایع-مایع توسط حلالهای مناسب حذف میشوند. همچنین، پرتودهی نفت خام و برشهای آن در حضور هوا، کاتالیزورها و سایر عوامل مانند هیدروژن پراکسید میتواند باعث کاهش میزان دز تابشی موردنیاز برای افزایش بازدهی حذف ترکیبات گوگردی مضر شود.

۴- مراجع:

1. Shi. Q., Wu. J., Review on Sulfur Compounds in Petroleum and Its Products: State of the Art and Perspectives, Energy Fuels, ۳۵, ۱۴۴۴۵-۱۴۴۶۱, ۲۰۲۱.
2. Javadli. R., Klerk. A. D., Desulfurization of heavy oil, Appl Petrochem Res. ۱:۳-۱۹, ۲۰۱۲.
3. بسحاق فاطمه، مختارانی بابک، مرتضی حمیدرضا، روشهای گوگردزدایی از سوختهای مایع، نشریهی مهندسی شیمی ایران- سال پانزدهم-شمارهی هشتاد و ششم-۱۳۹۵.
4. شاهشوند اکبر، انفرادی امیر، شیوههای نوین بازیابی گوگرد در صنایع نفت و گاز، نشریهی مهندسی شیمی ایران- سال هشتم-شمارهی سی و نهم-۱۳۸۸.
5. Esso Research and Engineering Co. Desulfurization of petroleum oils. US Patent ۸۲۶,۶۹۳, ۱۹۶۰.
6. Nadirov, N.K., Rudenko, N.V., Bchkova. L.V. The method for sulfoxide production. Patent Application ۴۸۹۹۳۲۷,۰۴, ۱۹۹۱.
7. Woods, R. J., Pikaey, A. K. Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. New York: Wiley-Inter science, ۱۹۹۴.
8. Nevitt, T. D. Wilson. W. A. Seeling. H. S. Radiation-induced reaction of hydrocarbons with n-butyl mercaptan. Hnd. Eng. Chem., ۵۱: ۳۱۱-۳۱۲, ۱۹۵۹.
9. Zaykina, R.F., Zaykin Yu.A., Mamonova. T.B., Nadirov. N.K. Radiation methods for demercaptanization and desulfurization of oil products, Radiation Physics and Chemistry ۶۳. ۶۲۱-۶۲۴, ۲۰۰۲.
10. Scapin, M.A., Duarte, C.L., Sato, I.M. Sulphur removal from used automotive lubricating oil by ionizing irradiation. Atom Peace, ۳(۱): ۵۰-۵۵. ۲۰۱۰.



مقایسه و بررسی نتایج تجربی ویژگی های دزیمتری نانوکامپوزیت های پلیمری و

ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر با استفاده از پرتوهای گاما (کد مقاله : ۱۴۵۳)

مسیبی، آرمین^{۱*} - جعفری، حمید^۲ - ملکی، شهریار^۱ - شیرمردی، سید پژمان^۱ - معصومه، سلیمانی نیا^۱ - دانشور، حمیده^۱

۱. گروه پژوهشی پرتوآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران.

۲. گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

چکیده:

اخیراً نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر و برای اندازه‌گیری مقدار دز پرتوهای یونساز، کاربردهای وسیعی دارند. در این کار تجربی نتایج برخی از ویژگی‌های دزیمتری نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر با استفاده از پرتوهای گاما مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج بدست آمده نشان داده شد که پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات زاویه تابش پرتو بر حجم حساس نمونه‌ها در محدوده $\pm 60^\circ$ درجه به ترتیب با خطای ۳/۳۱ و ۰/۵ در صد اندازه‌گیری شد. همچنین تغییرات اندازه میدان چشمه بر پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت با خطای ۵۷/۳ و ۳/۵۳ در صد اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: ترانزیستور ماسفت، نانوکامپوزیت‌های پلیمری، وابستگی زاویه و وابستگی میدان.

Experimental investigation of BJT transistors and electrolytic and polyester capacitors as dosimeters using electron beams

Mosayebi, Armin^{۱*}, Jafari, Hamid^۲, Maleki, Shahryar^۱, Shirmardi, Seyed Pezhman^۱, Soleimaninia, Masoume^۱, Hamide, Daneshvar^۱

۱. Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

۲. Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, IRAN.

Abstract:

Recently, polymer nanocomposites and MOSFET transistors have been widely used as dosimeters for measuring the dose of ionizing radiation. In this experimental work, the results of some dosimetric properties of polymer nanocomposites and MOSFET transistors as dosimeters using gamma radiation were compared and investigated. According to the results of the experiments, it was shown that the The output response of polymer nanocomposites and MOSFET transistors to variations in the radiation angle affecting the samples sensitive regions was measured in the range of $\pm 60^\circ$ degrees with error ۳,۳۱% and ۰,۵%, respectively. Also, the changes in the size of the source field and on the output response of polymer nanocomposites and MOSFET transistors were measured with an error of ۵۷,۳ and ۳,۵۳ percent.

Key words: MOSFET transistor, polymer nanocomposites, angle dependence and field dependence.



۱- مقدمه:

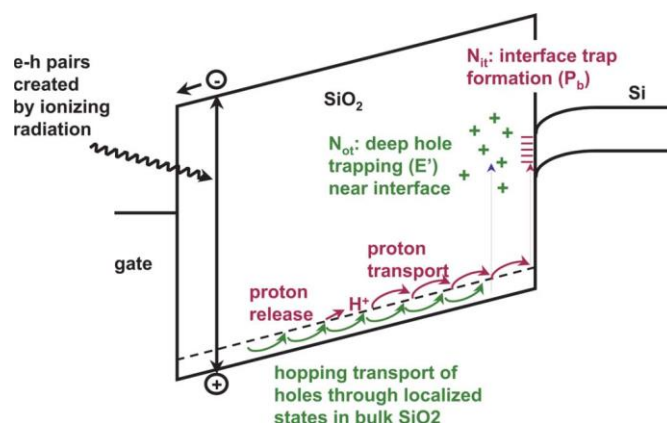
در طول دو دهه گذشته، مواد پلیمری تقویت شده برای مثال توسط نانولوله های کربنی (CNTs) از دو دیدگاه علمی و جوامع صنعتی به عنوان یک نتیجه موثر در افزایش بازدهی پلیمرها، مورد استقبال قرار گرفته است [۱]. نانو کامپوزیت های پلیمری قابلیت کاربرد در زمینه های مختلفی از قبیل الکترونیک های انعطاف پذیر، سلول های خورشیدی، دستگاه های آنتی استاتیک، حفاظ جهت تداخل های الکترومغناطیس، حفاظ در مقابل پرتو، سنسورهای پیزوالکتریک، سنسورهای تابش و دزیمتری می باشند [۲-۵]. نانو لوله های کربنی تقویت کننده های ایده آلی برای پلیمرها به شمار می روند چون ویژگی های خاصی از قبیل ابعاد نانو، نسبت طول به قطر بالا و از همه مهمتر مقاومت مکانیکی و الکتریکی بسیار بالایی و همچنین هدایت دمایی بسیار خوبی دارند [۱]. به صورت کلی نانولوله های کربنی به دو دسته نانولوله های کربنی تک جداره و نانولوله های کربنی چند جداره تقسیم بندی می شوند. نانولوله های کربنی چند جداره دارای قطری در حدود $2-100\text{ nm}$ و طولی در حدود ده ها میکرون و همچنین هدایت الکتریکی در حدود 10^7-10^5 S/m دارند [۶]. از آنجایی که نانولوله های کربنی بر اثر واکنش های واندروالسی به حالت کلوخگی شدن تمایل دارند لذا بحث حل شدن یکنواخت نانولوله های کربنی درون پلیمر یک موضوع اساسی است [۶]. بنابراین ۳ روش برای ساخت نانوکامپوزیت های پلیمری بکار گرفته می شود: مخلوط کردن محلول، مخلوط کردن از طریق ذوب شدن و پلیمریزاسیون در محل [۱۶]. معمولاً مخلوط کردن محلولی شامل سه مرحله اساسی از قبیل: ۱- حل شدن نانولوله های کربنی داخل حلال مناسب ۲- مخلوط کردن با محلول پلیمری ۳- ساخت فیلم [۶]. نانوکامپوزیت های پلیمری رفتارهای گذردهی را در حضور اتصال شبکه های نانولوله نشان می دهند که در نتیجه منجر به افزایش هدایت الکتریکی نانوکامپوزیت می شود [۷]. در سیستم های گذردهی یک کسر حجمی بحرانی وجود دارد که پایین تر از این مرحله خواص الکتریکی غالب توسط مولفه های عایق می باشد و بالاتر از این مرحله مولفه های رسانا غالب می شوند [۸]. عوامل مختلفی از قبیل: نوع، سایز، شکل، مشخصه های سطحی نانولوله و توزیع یکنواخت نانولوله ها در آستانه گذردهی نانولوله های کربنی موثرند [۹]. از آنجایی که نانولوله های کربنی نسبت طول به قطر خیلی بالایی دارند لذا با احتمال خیلی بالا این نانولوله ها با هم برخورد پیدا می کنند و فقط چند نانولوله نیاز است تا یک مسیر هدایت داخل نانوکامپوزیت ایجاد کند [۱۰]. تحقیقات انجام شده در این زمینه نتایجی را ارائه کرده اند که نشان می دهد هدایت و آستانه گذردهی در نانوکامپوزیت ها به نوع روش فرآیند، نوع پلیمر و نوع نانولوله کاملاً وابسته می باشد [۱۰].

یکی از این موارد استفاده از قطعات نیمه رسانا ترانزیستور های ماسفت به عنوان دزیمتر است. استفاده از ترانزیستور ماسفت به عنوان یک ابزار سنجش ذرات یونیزان سال ها پیش مطرح شد [۱۱]. دزیمترهای ماسفت بازخوانی سریع دز را فراهم می کنند. علاوه بر این، اطلاعات به طور دائم در ماسفت ذخیره می شود [۱۱]. بنابراین، اندازه گیری کل دز انباشته شده در طول دوره درمان را می توان به دست آورد. اندازه کوچک آنها باعث می شود که برای اندازه گیری در مناطق با شیب دز بالا (به عنوان مثال، در براکی ترابی) بسیار مفید باشند. همچنین به آنها اجازه می دهد تا به راحتی داخل حفره های بدن، بدون ایجاد ناراحتی بیش از حد برای بیمار وارد شوند [۱۱]. آنها در طول زمان تابش نیازی به اتصال به قرائت گر ندارند، بنابراین نیاز به کابل هایی که در سراسر اتاق درمان عبور می کنند را از بین می برد. در سال های اخیر استفاده از دزیمترهای ماسفت به شدت در پرتو درمانی رو به افزایش است و از اهمیت بالایی در جراحی ها و براکی ترابی دارد. این قطعات دارای امکان بازخوانی زمان واقعی، ابزار دقیق ساده و استحکام بالایی هستند. علاوه بر این، دزیمترهای ولتاژ دوگانه ماسفت مستقل از دما هستند که در دزیمتری بالینی



یک مزیت می‌باشد [۳]. این دزیمترها به دلیل سادگی و سرعت بالا در قرائت در مواردی که مقدار دز در بیرون بدن مورد نیاز است، دارای عملکرد بهتری نسبت به دزیمترهای دیگر می‌باشند [۱۱].

در شکل (۱۲)، فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ترانزیستور، ایجاد بارها و ترابرد بارها ارائه شده است که هنگام برخورد پرتوهای یونساز با لایه اکسید ترانزیستور، زوج‌های الکترون-حفره در این لایه ایجاد می‌شوند. بعد از ایجاد بارها، مقداری از آنها با یکدیگر ترکیب می‌شوند که تعداد بارهای ترکیب شده به نوع ذره فرودی، میدان الکتریکی، دما و ... بستگی دارد. تحت تأثیر میدان الکتریکی، بارهای باقی مانده شروع به حرکت می‌کنند. همچنین قابلیت تحرک الکترون‌ها در لایه اکسید هزاران مرتبه از قابلیت تحرک حفره‌ها بیشتر می‌باشد. بنابراین در مدت زمان چند پیکو ثانیه الکترون‌ها از لایه اکسید خارج می‌شوند ولی حفره‌ها در تله‌های موجود در لایه اکسید برای مدت بسیار طولانی باقی می‌مانند. علاوه بر این احتمال آزاد سازی اتم هیدروژن و ایجاد یک پروتون هنگام برخورد ذرات با لایه اکسید وجود دارد. حرکت این پروتون‌ها در راستای میدان الکتریکی می‌تواند باعث تخریب و جابجایی ترازهای انرژی در سطح مشترک لایه اکسید و سیلیکون شود [۱۳].



شکل ۱: فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ماسفت، ایجاد بارها و ترابرد بارها [۱۴].

عامل جابجایی توزیع پتانسیل در این لایه تجمع بارهای مثبت در لایه اکسید می‌باشد و از طرفی مطابق رابطه (۱) مقدار بارهای جمع شده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور را جابجا می‌کند.

$$V_{fb} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ϕ_{ms} ، Q_{ss} و C_{ox} به ترتیب اختلاف تابع کار بین فلز گیت و نیمه‌هادی بستر ترانزیستور، مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید و ظرفیت خازن لایه اکسید می‌باشند. همانطور که در این رابطه ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور بیشتر تغییر می‌کند [۱۴]. این پارامتر ولتاژ نوار تخت بطور مستقیم با مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور رابطه دارد.



کمیت مهم در دزیمتری توسط ماسفت‌ها، مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور می‌باشد. در آزمایش‌های متنوعی نشان داده شده است که تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت با مقدار تابش وارد بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد. در ساده‌ترین شکل این رابطه را می‌توان توسط معادله (۲) بیان کرد [۱۴].

$$\Delta V_T = A \times D^n \quad (2)$$

در معادله (۲)، ΔV_T ، D ، n و A به ترتیب تغییرات ولتاژ آستانه، مقدار دز در لایه عایق گیت ترانزیستور، درجه خطی بودن و ضریب ثابت می‌باشند. عواملی مانند کیفیت ساخت ماسفت، ضخامت لایه اکسید، میدان الکتریکی و تا حدودی دز کل بر درجه خطی بودن رابطه تاثیر گذار هستند. بصورت ایده‌آل این عوامل خطی می‌باشد و مقدار پارامتر n باید نزدیک به یک باشد.

۲- روش کار:

پلی‌استایرن (PS) گرید ۱۵۴۰ و چگالی 1.05 g/cm^3 از پتروشیمی تبریز به صورت پودر تهیه گردید. نانولوله‌های کربنی MWCNT با درصد خلوص بیش از ۹۹ wt% از شرکت US-Nano خریداری شد. مشخصات فیزیکی نانولوله‌های کربنی چندجداره تهیه شده عبارتند از: قطر خارجی $5-15 \text{ nm}$ ، قطر داخلی $3-5 \text{ nm}$ ، طول $50 \mu\text{m}$ ، چگالی 1.2 g/cm^3 ، SSA بزرگتر از $233 \text{ m}^2/\text{g}$ و رسانندگی الکتریکی $10^7 - 10^5 \text{ S/m}$ می‌باشد و در نهایت دو حلال مناسب toluene dichloromethane (DCM)، برای این آزمایش با خلوص بالا از شرکت مرک (Merc) تهیه گردید.

برای آماده سازی مواد ابتدا یک محلول مادر با چگالی مشخص تهیه شد. این محلول مادر شامل مقداری نانولوله کربنی چند جداره داخل حلال دی کلرومتان (DCM) ترکیب گردید. برای پخش شدن مناسب نانولوله‌ها داخل حلال دی کلرومتان از دستگاه آلتراسونیک ردیاب دار استفاده گردید. این دستگاه به مدت یک ساعت این دو مواد را داخل هم ترکیب کرده و به صورت یکسان نانولوله‌ها را داخل حلال پخش کرده بود. پس از آماده سازی محلول مادر برای ساخت نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی مشخص یک غلظت معین از این محلول مادر برداشته شد. پس از تعیین شدن درصد وزنی‌های معین، ابتدا مقداری پلی استایرن در داخل ۱۰ میلی لیتر حلال تولوئن بر روی دستگاه مگنت استیر به مدت دو ساعت در دمای 135°C قرار گرفت. روی آن با فویل آلومینیوم پوشانده شد تا از تبخیر حلال در دمای بالا جلوگیری شود که این عمل باعث حل شدن پلیمر داخل حلال می‌شود. پس از حل شدن کامل پلیمر و بالا رفتن ویسکوزیته برای ساخت نانوکامپوزیت با درصد وزنی معین مقداری از محلول مادر داخل این محلول (پلیمر و تولوئن) اضافه گردید. با توجه به اختلاف نقطه جوش دو حلال دی کلرو متان (نقطه جوش 39.6°C) و تولوئن (نقطه جوش 111°C) مشاهده شد که هنگام اضافه شدن محلول مادر در دمای 95°C دی کلرومتان داخل محلول مادر شروع به بخار شدن کرده که باعث ایجاد کواک‌ها یا حباب‌هایی در محلول ترکیبی شده و این عمل باعث شکستن کلوخه‌های نانولوله‌های کربنی و در نهایت پخش بهتر و یکنواخت‌تر این ذرات درون بستر پلیمری می‌گردد. در نهایت محلول بدست آمده درون قالب آلومینیوم طراحی شده مطابق با شکل ۱ ریخته شد، سپس در 90°C به مدت یک شبانه روز قرار گرفت تا حلال کاملاً خارج گردید.



شکل ۱: قالب‌های استفاده شده.

در این کار، یک مدل ترانزیستور ماسفت CD4007 با ساختار SMD نوع P بود که به عنوان دزیتر انتخاب و مورد بررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری منحنی ولتاژ-جریان در ناحیه کاری اشباع ترانزیستور صورت گرفت. برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت به منظور اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما از دستگاه رسام منحنی جریان-ولتاژ ساخته شده در دانشکده مهندسی هسته‌ای شهید بهشتی استفاده شده است. نمای ظاهری دستگاه موجود در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمای ظاهری دستگاه رسام منحنی جریان-ولتاژ ترانزیستورهای ماسفت ساخته شده در دانشگاه شهید بهشتی.

پرتودهی ماسفت‌ها در این کار نیز در آزمایشگاه دزیتری استاندارد ثانویه کرج انجام گرفت. به منظور آزمایش پایداری و تعیین دقت، ۳ عدد از نوع CD4007 مورد پرتودهی قرار گرفته و قرائت منحنی I-V هر کدام از آنها نیز سه مرتبه صورت گرفته است. میانگین تمامی این داده‌ها به همراه انحراف از معیار مشاهده شده در هر دز محاسبه گردید. در شکل (۳) سیستم پرتودهی آزمایشگاه دزیتری استاندارد ثانویه کرج به همراه نحوه قرارگیری نمونه‌های مختلف (برد شامل ماسفت) در هر مرحله از پرتوگیری نشان داده شده است. پرتودهی قطعات، بدون بایاس انجام شده است.



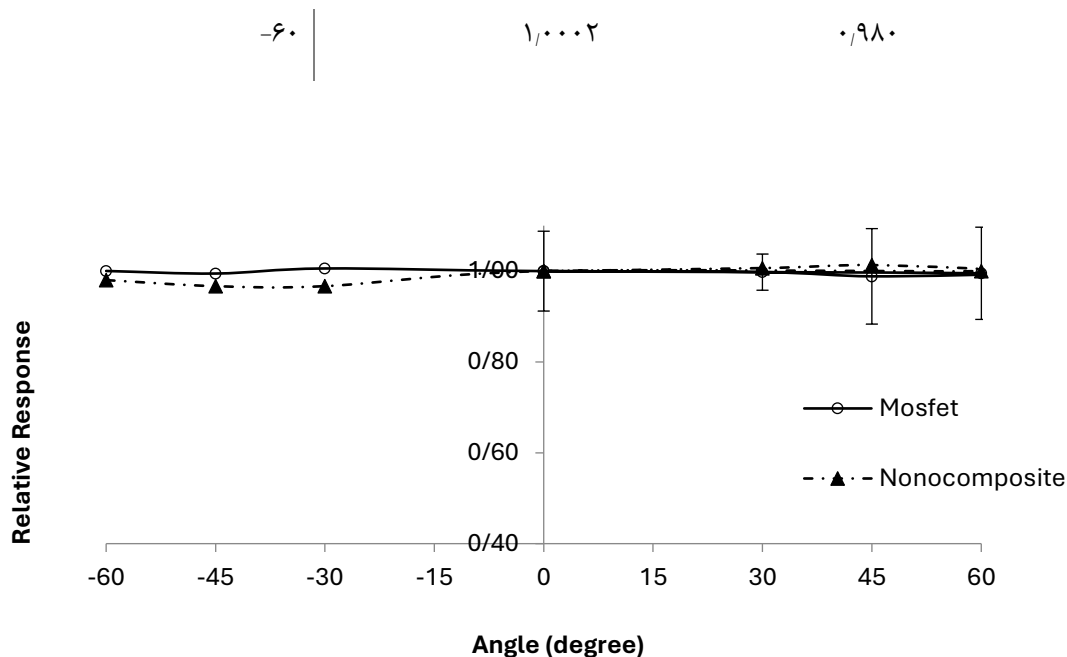
شکل ۳: سیستم پرتودهی آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کرج و برد قرارگیری قطعات ماسفت.

۳- نتایج:

در این پژوهش مقدار دز پرتودهی نمونه‌ها برابر با ۵ Gy می‌باشد. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلی‌میری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات زاویه تابش پرتو بر حجم حساس نمونه‌ها در محدوده $\pm 60^\circ$ درجه به ترتیب با خطای ۳/۳۱ و ۰/۵ درصد نشان داده شده است.

جدول ۱: مقدار خروجی نانوکامپوزیت‌های پلی‌میری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات زاویه تابش پرتو بر حجم حساس نمونه‌ها.

Degree	Relative Response	Relative Response
	Mosfet	Nonocomposit
۰	۱	۱
۳۰	۰/۹۹۷	۱/۰۰۶
۴۵	۰/۹۹۸	۱/۰۱۳
۶۰	۰/۹۹۵	۱
-۳۰	۱/۰۰۵	۰/۹۶۶
-۴۵	۰/۹۹۴	۰/۹۶۶

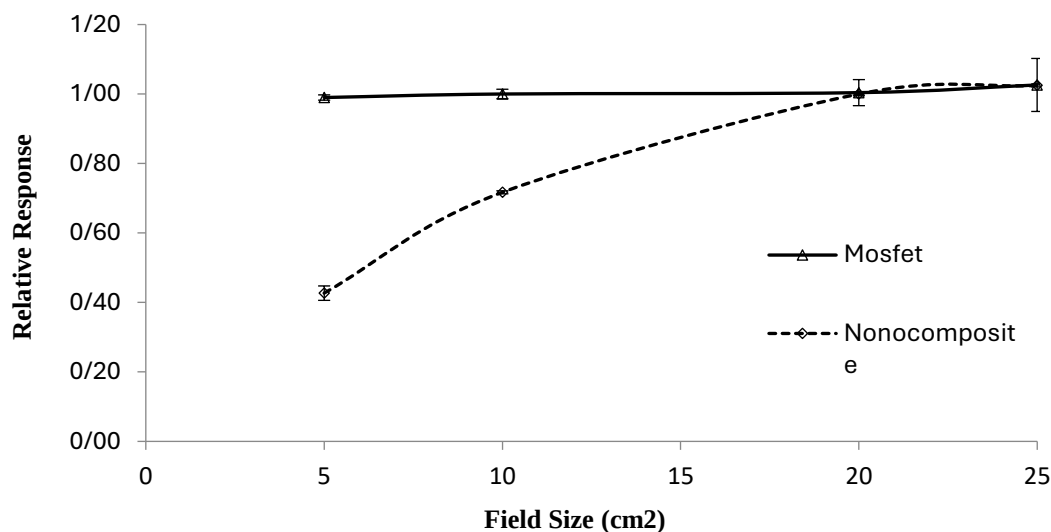


شکل ۴: پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلی‌میری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات زاویه تابش پرتو بر حجم حساس نمونه‌ها.

در شکل ۵ تغییرات اندازه میدان چشمه بر پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلی‌میری و ترانزیستورهای ماسفت با خطای ۳/۵۷ و ۳/۵۳ در صد نشان داده شده است.

جدول ۲: مقدار خروجی نانوکامپوزیت‌های پلی‌میری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات اندازه میدان چشمه.

Field Size (cm ^۲)	Relative Response	Relative Response
	Mosfet	Nonocomposit
۵	۰/۹۸۹	۰/۴۲۶
۱۰	۱	۰/۷۱۶
۲۰	۱/۰۰۳	۱
۲۵	۱/۰۲۶	۱/۰۲۴



شکل ۵: پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات اندازه میدان چشمه.

۴- بحث و نتیجه‌گیری:

در این کار تجربی نتایج برخی از ویژگی‌های دزیمتری نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر با استفاده از پرتوهای گاما مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند. طبق نتایج بدست آمده نشان داده شد که پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت نسبت به تغییرات زاویه تابش پرتو بر حجم حساس نمونه‌ها در محدوده ± 60 درجه به ترتیب با خطای ۳/۳۱ و ۰/۵ در صد اندازه‌گیری شد. همچنین تغییرات اندازه میدان چشمه بر پاسخ خروجی نانوکامپوزیت‌های پلیمری و ترانزیستورهای ماسفت با خطای ۵۷/۳ و ۳/۵۳ در صد اندازه‌گیری شد.

۵- مراجع:

- [۱] Mittal, V., ed. Optimization of Polymer Nanocomposite Properties. ۲۰۱۰, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Germany.
- [۲] Yamamoto, N., R. Guzman de Villoria, and B.L. Wardle, Electrical and thermal property enhancement of fiber-reinforced polymer laminate composites through controlled implementation of multi-walled carbon nanotubes. Composites Science and Technology, ۲۰۱۲. ۷۲(۱۶): p. ۲۰۰۹-۲۰۱۵.
- [۳] Puch, F. and C. Hopmann, Morphology and tensile properties of unreinforced and short carbon fibre reinforced Nylon ۶/multiwalled carbon nanotube-composites. Polymer, ۲۰۱۴. ۵۵(۱۳): p. ۳۰۱۵-۳۰۲۵.
- [۴] Vennerberg, D., R. Hall, and M.R. Kessler, Supercritical carbon dioxide-assisted silanization of multi-walled carbon nanotubes and their effect on the thermo-mechanical properties of epoxy nanocomposites. Polymer, ۲۰۱۴. ۵۵(۱۶): p. ۴۱۵۶-۴۱۶۳.
- [۵] Gong, S., Z.H. Zhu, and S.A. Meguid, Anisotropic electrical conductivity of polymer composites with aligned carbon nanotubes. Polymer, ۲۰۱۵. ۵۶(۰): p. ۴۹۸-۵۰۶.
- [۶] Malekie, S. and F. Ziaie, Study on a novel dosimeter based on polyethylene-carbon nanotube composite. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۵. ۷۹۱: p. ۱-۵.



[۷] Malekie, S., F. Ziaie, and A. Esmaeli, Study on dosimetry characteristics of polymer-CNT nanocomposites: Effect of polymer matrix. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۶. ۸۱۶: p. ۱۰۱-۱۰۵.

[۸] Malekie, S., et al., Dosimetry characteristics of HDPE-SWCNT nanocomposite for real time application. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۱۶. ۸۳۳: p. ۱۲۷-۱۳۳.

[۹] Malekie, S., F. Ziaie, and M.A. Naeini, Simulation of polycarbonate-CNT nanocomposite dosimeter based on electrical characteristics. Kerntechnik, ۲۰۱۶. ۸۱(۶): p. ۶۴۷-۶۵۰.

[۱۰] Malekie, S. and F. Ziaie, A two-dimensional simulation to predict the electrical behavior of carbon nanotube/polymer composites. Journal of Polymer Engineering, ۲۰۱۷. ۳۷(۲): p. ۲۰۵-۲۱۰.

[۱۱] Mosayebi, A., S. Malekie, and F. Ziaie, A feasibility study of polystyrene/CNT nanocomposite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes. Journal of Instrumentation, ۲۰۱۷. ۱۲(۰۵): p. P۰۵۰۱۲.

[۱۲] Chuang, C. F., Verhey, L. J., & Xia, P. (۲۰۰۲). Investigation of the use of MOSFET for clinical IMRT dosimetric verification. Medical physics, ۲۹(۶), ۱۱۰۹-۱۱۱۵.

[۱۳] T. R. Oldham and F. B. McLean, "Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices," Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol. ۵۰, pp. ۴۸۳-۴۹۹, ۲۰۰۳.

[۱۴] بوربور و جعفری. "طراحی و ساخت دستگاه اندازه گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت بر اساس جابجایی ولتاژ آستانه." مجله سنجش و ایمنی پرتو ۹.۱ (۲۰۲۱).



بررسی تأثیر فیلتر مغناطیسی بر جریان یون خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ (کد مقاله :

(۱۴۷۱)

بهاری ایلخچی، حسین^۱ - ابراهیمی بسابی، احسان^{*} - ساداتی، سید مصطفی^۲

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای

۱. دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای

۲. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش، بهینه‌سازی چینش آهنرباها و تأثیر فیلتر مغناطیسی بر جریان یون خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ طراحی شده با اتاقک یونش استوانه‌ای و آرایش مکعبی آهنرباها بررسی شده است. تأثیر تغییر تعداد آهنرباها بر میدان مغناطیسی و محصورسازی الکترون‌ها بررسی شده است. همچنین، تغییر در فاصله ی بین آهنرباها در آرایش مکعبی آهنرباها بررسی و نشان داده شد کاهش فاصله ی بین آهنرباها باعث افزایش میدان مغناطیسی شعاعی چشمه یونی مولتی کاسپ و در نتیجه بهبود محصورسازی ذرات باردار و الکترون‌ها می‌گردد. بهینه‌ترین حالت برای این چشمه یونی مولتی کاسپ، چینش هشت آهنربا با فاصله ی چهار میلی‌متر به دست آمد که بیشترین جریان خروجی از چشمه یونی را داشته و محصورسازی الکترون‌ها را بهبود بخشیده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از فیلتر مغناطیسی با دو آهنربای حلقه‌ای و در موقعیت ۴۵ و ۵۵ میلی‌متری از چشمه یونی مولتی کاسپ باعث افزایش جریان یون خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ می‌شود. یافته‌های این مطالعه می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی چشمه‌های یونی مولتی کاسپ مؤثر باشند.

کلمات کلیدی: چشمه یونی مولتی کاسپ، میدان مغناطیسی، فیلتر مغناطیسی، محصورسازی الکترون، CST Studio Suite

Investigating the effect of magnetic filter on the ion current from multi-cusp ion source

Bahari ilkhechi, Hossein¹, Ebrahimibasabi, Ehsan^{*}, Sadati, Seyed Mostafa²

۱. Shahrood university of technology, Faculty of Physics and Nuclear Engineering

۲. Shahid Beheshti University, Faculty of Nuclear Engineering

Abstract:

In this study, the optimization of magnet arrangement and the effect of a magnetic filter on the ion current from a multi-cusp ion source designed with a cylindrical ionization chamber and a cubic magnet arrangement were investigated. The impact of changing the number of magnets on the magnetic field and electron confinement was examined. Additionally, the effect of varying the distance between magnets in the cubic arrangement was analyzed, showing that reducing the spacing between magnets enhances the radial magnetic field of the multi-cusp ion source, thereby improving the confinement of charged particles and electrons. The optimal configuration for this multi-cusp ion source was found to be an eight-magnet arrangement with a four-millimeter spacing, which resulted in the highest ion current output and improved electron confinement. Simulation results indicate that using a magnetic filter with two ring magnets positioned at 45 mm and 55 mm from the multi-cusp ion source increases the extracted



ion current. The findings of this study can contribute to optimizing the design of multi-cusp ion sources.

Key words: Multicusp Ion Source, Magnetic Field, Magnetic Filter, Electron Confinement, CST Studio Suite.

۱- مقدمه:

منابع یونی مولتی کاسپ به عنوان یکی از ابزارهای اساسی در طیف وسیعی از کاربردهای علمی و صنعتی شناخته شده‌اند. این منابع معمولاً از آهنرباهای دائمی، الکترودها تشکیل شده‌اند که چپش این اجزا بر کیفیت پرتو تولیدشده تأثیر می‌گذارد. منابع یونی مولتی کاسپ به دلیل توانایی آن‌ها در تولید پرتوهای یونی با چگالی جریان بالا و پخش انرژی کم که در حوزه‌هایی نظیر لیتوگرافی^{۱۶۰}، کندوپاش^{۱۶۱} و پزشکی هسته‌ای کاربرد دارند [۳-۱]. عملکرد منابع یونی مولتی کاسپ را می‌توان از طریق تغییر در قسمت‌های منبع بهینه کرد. قطعه کاتد که با تغییر در نوع آن، شکل و اندازه می‌توان بهینه و جریان را افزایش داد [۴]. تغییرات و بهینه‌سازی در ابعاد طول و شعاع آند در منابع یونی مولتی کاسپ نیز باعث افزایش جریان یون خروجی از منبع می‌شود [۵]. شکل، ضخامت، زاویه نوک روزنه و پتانسیل آنتی کاتد نیز بر میزان و نوع جریان یون خروجی از منبع یونی تأثیر گذار است [۶]. [۷]. مهم‌ترین قسمت منابع یونی مولتی کاسپ آهن‌رباعی دائمی می‌باشد. آهنرباهای دائمی نقش مهمی در منابع یونی مولتی کاسپ ایفا می‌کنند و با ایجاد ناحیه کمترین میدان در مرکز چشمه و میدان مغناطیسی در سطح به محصورشدن ذرات باردار پلاسما و کیفیت پرتو یونی کمک می‌کنند. تحقیقات نشان داده‌است که عواملی مانند تعداد، نوع آرایش آهن‌رباهای دائمی به طور قابل توجهی بر میدان مغناطیسی داخل منبع یونی، مسیر الکترون‌ها و چگالی پلاسما تأثیر می‌گذارد [۸، ۹]. قسمت کلیدی در بسیاری از منابع یونی مولتی کاسپ فیلتر مغناطیسی می‌باشد که نقش مهمی در بهبود ویژگی‌های پرتو خروجی از منبع یونی و کنترل خواص پلاسما ایفا می‌کند. فیلترهای مغناطیسی در منابع یونی مولتی کاسپ به طور گسترده برای تولید یون مثبت و منفی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای منابع یونی مولتی کاسپ با جریان یونی منفی، فیلتر به کاهش تعداد الکترون‌های پرنرزی که می‌توانند جریان حامل یون‌های منفی را کاهش دهند، کمک می‌کند و در نتیجه استخراج یون‌های منفی را افزایش می‌دهد [۱۰]. فیلترهای مغناطیسی با استفاده از میدان‌های مغناطیسی قوی، قادر به جداسازی ذرات با انرژی و جرم‌های مختلف می‌باشند، که این فرآیند منجر به افزایش خلوص پرتوی یونی و کاهش میزان یون‌های ناخواسته می‌شود. در منابع یونی مولتی کاسپ با خروجی جریان یون مثبت، فیلتر می‌تواند برای کنترل ترکیب گونه‌های یونی و چگالی جریان استفاده شود [۱۱].

این مقاله، به بهینه‌سازی ساختار آهنرباها در منبع یونی مولتی کاسپ و بررسی تأثیر فیلترهای مغناطیسی بر جریان یون خروجی از منبع یونی مولتی کاسپ خواهد پرداخت. شبیه‌سازی‌ها توسط نرم افزار CST Studio Suite انجام شده‌است. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌ها، می‌توان به درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های عملکرد فیلترهای مغناطیسی و تأثیرشان بر ذرات باردار دست یافت و راهکارهای نوینی برای بهبود کیفیت و کارایی این منابع یونی ارائه داد.

۲- معرفی ساختار اتاقک یونش:

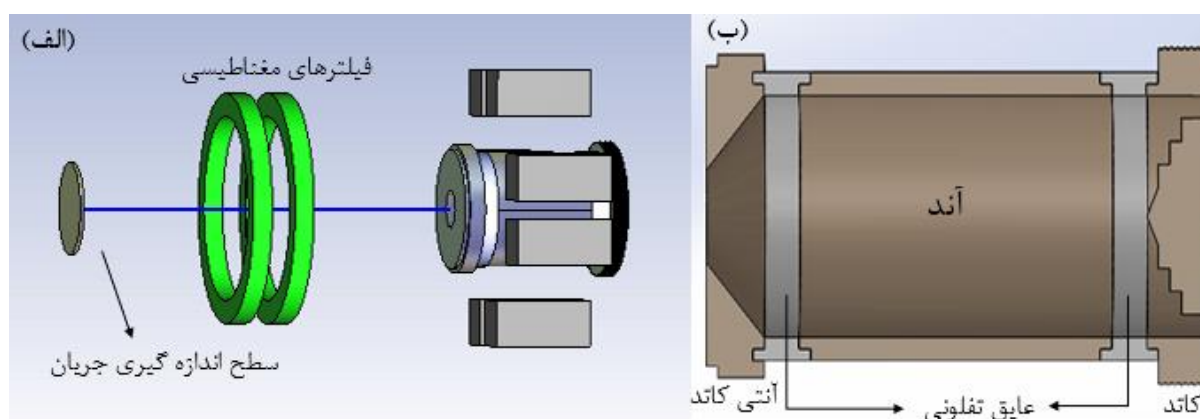
. اتاقک یونش شامل کاتد، آند و الکتروده پلاسما از استیل ضد زنگ و عایق‌های پلی‌اتیلنی بین الکترودها تشکیل شده‌است. آند به طول ۲۷ میلی متر و قطر خارجی ۲۵ میلی متر با ضخامت ۲ میلی متر تشکیل شده‌است که یک انتهای آند توسط یک الکتروده پلاسما به طول ۵ میلی متر محصور شده‌است و یک سیستم استخراج استاندارد را شبیه‌سازی می‌کند. طرف دیگر یک

^{۱۶۰} lithography

^{۱۶۱} sputtering



کاتد سرد پله‌ای به طول ۵ میلی متر می‌باشد. کاتد سرد و الکتروود پلاسما با عایق پلی تترا فلوئورواتیلن^{۱۶۲} از محفظه یونیزاسیون جدا می‌شوند [۱۲]. قسمت مهم منابع یونی میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط آهنرباها می‌باشد. برای ایجاد میدان مغناطیسی سطحی از آهنرباهای مکعبی نتودیمیومی با ابعاد $10 \times 10 \times 25$ و در فاصله ۹.۵ میلی متری از اتاقک یونش استفاده شده‌است. آهنرباهای مکعبی یک میدان مغناطیسی سطحی بزرگ‌تر از ۴۱۰۰ گاوس ایجاد می‌کنند. از دو آهنربای حلقه‌ای با شعاع داخلی ۲۰ میلی‌متر که میدان مغناطیسی طولی ۶۰۰۰ گاوس ایجاد می‌کند، به عنوان فیلتر مغناطیسی استفاده شده‌است. شکل (الف) نمای سه بعدی از چشمه یونی مولتی کاسپ و شکل (ب) نمای دو بعدی از داخل اتاقک یونش چشمه یونی مولتی کاسپ را نشان می‌دهد.



شکل (۱) ساختار کلی منبع یونی مولتی کاسپ طراحی شده (الف) و اتاقک یونش چشمه یونی (ب)

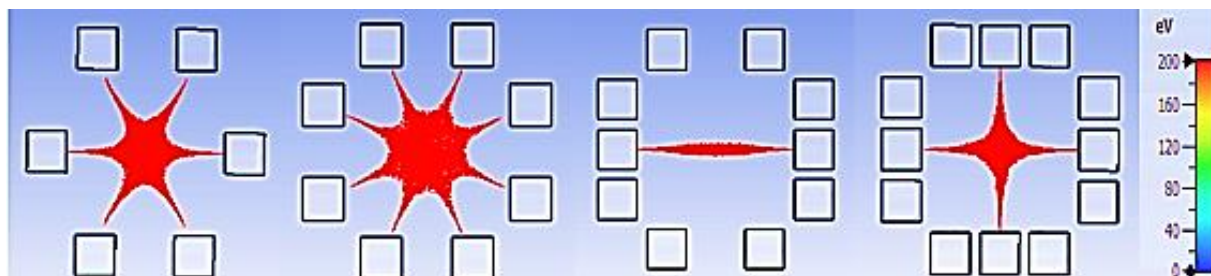
۳- بهینه‌سازی میدان مغناطیسی آرایش مکعبی در منبع یونی مولتی کاسپ

میدان‌های مغناطیسی نقش مهمی در عملکرد و کارایی منابع یونی مولتی کاسپ ایفا می‌کنند. در این منابع، ذرات باردار پلاسما با میدان مغناطیسی مولتی کاسپ ایجاد شده توسط آهنرباها محدود می‌شود که یکنواختی شعاعی و محوری را فراهم می‌کند [۱۳]. در این پژوهش از آرایش آهنربای مکعبی برای منبع یونی مولتی کاسپ با اتاقک یونش استوانه‌ای استفاده شده‌است. آهنرباها در منابع یونی مولتی کاسپ، میدان‌های مغناطیسی چند قطبی ایجاد می‌کنند که با وارد کردن نیروی لورنتس، مانع از برخورد ذرات باردار به سطح اتاقک یونش منبع یونی مولتی کاسپ، افزایش دمای الکترون‌ها (انرژی الکترون‌ها) و در نتیجه افزایش جریان خروجی از منبع یونی مولتی کاسپ می‌شود. هلال‌های مغناطیسی ایجاد شده توسط چینش مکعبی آهنرباها با وارد کردن نیروی مغناطیسی به ذرات باردار مخصوصاً الکترون‌ها، مانع از برخورد الکترون‌ها به سطح دیواره اتاقک یونش و محصورسازی این ذرات در مرکز منبع یونی مولتی کاسپ می‌شود که باعث افزایش جریان یونی خروجی از چشمه می‌شود. شکل (۲) محصورسازی ۱۰۰۰ الکترون با انرژی نوعی ۲۰۰ الکترون ولت را نمایش می‌دهد. در آرایش مکعبی چینش هشت آهنربا محصورسازی با چگالی یکنواخت‌تری نسبت به چینش شش آهنربا ایجاد کرده‌است. در چینش ده و دوازده آهنربا بدلیل ایجاد یک میدان مغناطیسی

^{۱۶۲} Polytetrafluoroethylene

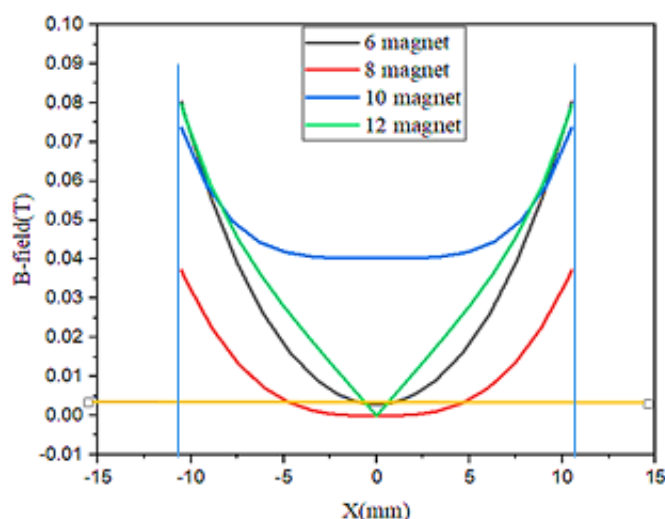


قوی در داخل اتاقک یونش باعث محصورسازی غیر یکنواخت در چشمه شده که حرکت الکترون‌ها را بیش از حد محدود کرده و منجر به افزایش ناپایداری‌های پلاسما یا کاهش نرخ یونیزاسیون می‌شود.



شکل (۲) محصورسازی ۱۰۰۰ الکترون با انرژی نوعی ۲۰۰ الکترون ولت توسط آهنرباهای دائمی در آرایش مکعبی

بدلیل این‌که آهنرباها در فاصله ۹.۵ میلی‌متری از اتاقک یونش قرار گرفته شده‌است، دو عامل میدان مغناطیسی در نزدیکی دیواره آند و ناحیه کم‌ترین میدان بررسی شده‌است. در شکل (۳) میدان مغناطیسی شعاعی و ناحیه کم‌ترین مقدار با توجه به طول داخلی آند که ۲۱ میلی‌متر نشان داده شده‌است که خطوط آبی دیواره آند و نارنجی ناحیه کم‌ترین میدان می‌باشد.

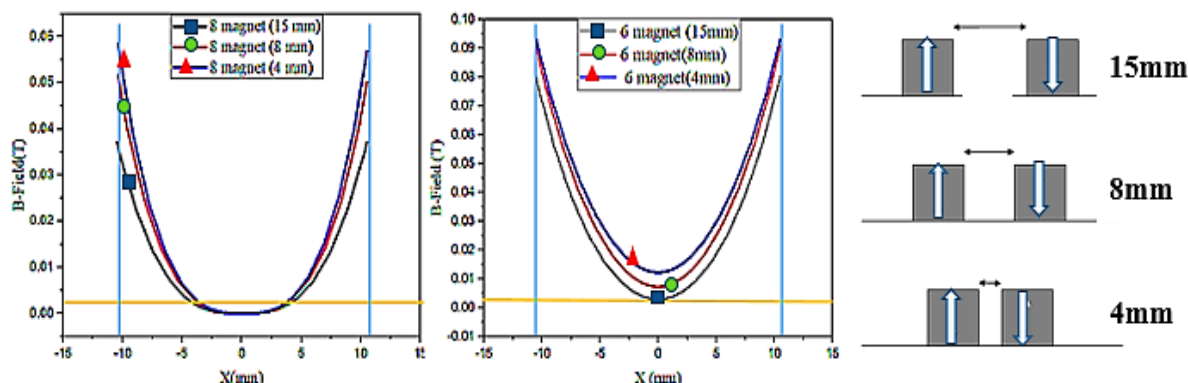


شکل (۳) میدان مغناطیسی شعاعی در راستای شعاع آند در آرایش مکعبی

چینش ۱۰ آهنربا بدلیل میدان مغناطیسی قوی در مرکز و چینش ۱۲ آهنربا بدلیل قرار گرفتن آهنرباها در فاصله کم از هم دیگر ناحیه کم‌ترین میدان ضعیف‌تری دارد. چینش شش آهنربا میدان مغناطیسی قوی‌تری در نزدیک اتاقک ایجاد کرده و ناحیه حداقل کوچک‌تری دارد ولی چینش هشت آهنربا با اینکه ناحیه کم‌ترین میدان بزرگ‌تری دارد، میدان مغناطیسی در نزدیک دیواره ضعیف‌تر از چینش شش آهنربا است. شکل (۴) تاثیر تغییر فاصله بین آهنرباها بر شدت میدان مغناطیسی در آرایش مکعبی و در چینش‌های هشت و شش آهنربا نشان داده شده‌است. با تغییر فاصله بین آهنرباها در چینش هشت آهنربا از فاصله ۱۵ میلی‌متر به ۴ میلی‌متر باعث افزایش میدان مغناطیسی نزدیک دیواره اتاقک یونش شده که باعث محصورسازی بهتری

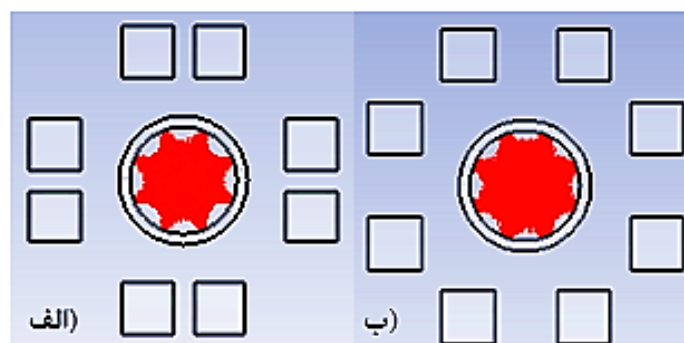


می‌شود. در چینش شش آهنربا ولی با کاهش فاصله بین آهنرباها، علاوه بر افزایش میدان نزدیک دیواره اتاقک یونش، ناحیه کم‌ترین میدان نیز کاهش می‌یابد که مورد نظر نیست.



شکل (۴) تاثیر تغییر فاصله آهنرباها در چینش ۸ و ۶ آهنربا بر میدان مغناطیسی

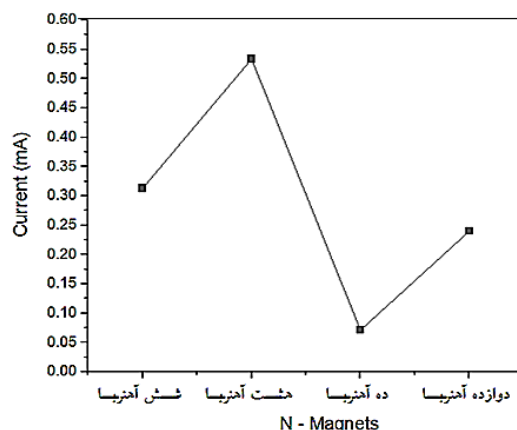
شکل (۵) محصورسازی ۱۰۰۰ الکترون با انرژی نوعی ۲۰۰ الکترون ولت را با تغییر فاصله آهنرباها در چینش هشت آهنربا و در حضور اتاقک یونش با اعمال پتانسیل ۵۰۰ ولت به آند و صفر ولت به کاتد و آند را نشان می‌دهد که با کوچک کردن فاصله بین آهنرباها در چینش ۸ آهنربا محصورسازی بهتری انجام شده و باعث کاهش برخورد الکترون‌ها به سطح آند شده‌است.



شکل (۵) محصورسازی الکترون‌ها در چینش ۸ آهنربا با فاصله بین آهنرباها (الف) ۱۵ میلی‌متر و (ب) ۴ میلی‌متر در حضور اتاقک یونش در چشمه یونی مولتی کاسپ

۴- تاثیر تعداد آهنرباها بر جریان خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ با آرایش مکعبی

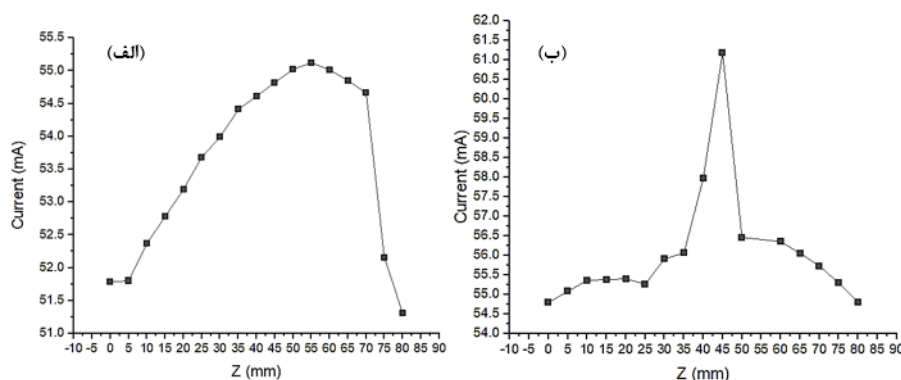
در ادامه تاثیر تعداد آهنرباها بر جریان خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ با آرایش مکعبی در چینش‌های مختلف از چشمه بررسی شد. در این کار آند به پتانسیل ۵۰۰ ولت و کاتد و آنتی کاتد به پتانسیل صفر وصل شد و چون در برنامه شبیه‌سازی CST پلاسما وجود ندارد از یک سطح تابنده صفحه‌ای با گسیل ۱۰۰۰۰ ذرات پروتون و یک صفحه اندازه‌گیری جریان با شعاع ۵ میلی‌متر در فاصله ۱۵۰ میلی‌متر قرار داده شد. جریان یونی اندازه گرفته شده روی سطح در شکل (۶) نشان داده شده‌است. افزایش تعداد آهنرباها در چینش ده و دوازده آهنربا با افزایش میدان مغناطیسی در داخل اتاقک یونش باعث کاهش جریان یونی اندازه گرفته شده در سطح با وارد کردن نیرو به یون‌ها شده‌است. در کل چینش هشت آهنربا با فاصله ۴ میلی‌متر بالاترین جریان یون اندازه گرفته شده را داشت.



شکل (۷) اندازه‌گیری جریان یونی برای تعداد آهنرباهای مغناطیسی مختلف

۵- تأثیر فیلتر مغناطیسی بر جریان یونی خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ

در این بخش تأثیر فیلتر مغناطیسی بر باریکه یونی خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ با چینش هشت آهنربا بررسی شد. در این شبیه‌سازی از دو آهنربای حلقه‌ای استفاده شد که میدان مغناطیسی طولی ۶۰۰۰ گاوس ایجاد و هم جهت با باریکه یونی خروجی از چشمه بود. در این شبیه‌سازی ابتدا مکان بهینه آهنربای اول بین چشمه تا سطح اندازه‌گیری با تغییر ۵ میلی‌متر و اندازه‌گیری جریان بدست آمد. جریان یونی اندازه‌گرفته شده در فواصل بین چشمه و سطح اندازه‌گیری در شکل (۸) الف) نشان داده شده است که در فاصله ۵۵ میلی‌متر بین فیلتر مغناطیسی اول و چشمه، جریان پروتون اندازه‌گرفته شده بیشترین مقدار را دارد که با وارد کردن نیروی مغناطیسی مانع از انحراف پروتون از مسیر باریکه شده است. از فاصله ۸۰ میلی‌متر به بعد با برخورد ذرات به فیلتر جریان یونی اندازه‌گرفته شده کاهش یافت. در شکل (۸) ب) نیز با ثابت نگهداشتن آهنربای اول در بهینه حالت و تغییر فاصله آهنربای دوم از چشمه نیز نشان داده شد که بهینه فاصله آهنربای دوم از چشمه ۴۵ میلی‌متر و دو فیلتر مغناطیسی با فاصله ۱۰ میلی‌متر بیشترین جریان رسیده به هدف را نشان می‌دهد.



شکل (۸) اندازه‌گیری جریان یونی (ب) تغییر فاصله یک فیلتر مغناطیسی (ب) تغییر فاصله آهنربای دوم با ثابت نگهداشتن آهنربای اول در فاصله ۵۵ میلی‌متر بین سطح خروجی چشمه و سطح اندازه‌گیری جریان

۶- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر فیلتر مغناطیسی بر جریان یون خروجی از چشمه یونی مولتی کاسپ شبیه‌سازی و بررسی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در آرایش مکعبی برای اتاقک یونش استوانه‌ای، افزایش تعداد آهنرباها تأثیر مستقیمی بر میزان



محصولسازی الکترون‌ها و در نتیجه، جریان یونی خروجی داشته‌است. همچنین تغییر در فاصله بین آهنرباها باعث تغییر در کارایی چشمه می‌شود. چپ‌نش بهینه هشت آهنربا با فاصله ۴ میلی‌متر، بهترین عملکرد را در افزایش جریان یونی داشت. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان داد که استفاده از فیلتر مغناطیسی متشکل از دو آهنربای حلقه‌ای با میدان مغناطیسی طولی ۶۰۰۰ گاوس، باعث افزایش جریان یونی پروتون می‌شود. بهینه‌سازی محل قرارگرفتن این فیلترها نشان داد که فاصله ۵۵ میلی‌متری برای آهنربای اول و ۴۵ میلی‌متری برای آهنربای دوم، در کنار فاصله ۱۰ میلی‌متری بین آهنرباها، بیشترین جریان یونی را به هدف انتقال می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کنند که فیلترهای مغناطیسی نقش مهمی در بهبود خواص پرتو خروجی از چشمه، کاهش ناپایداری‌های باریکه و افزایش خلوص پرتوی یونی دارند. یافته‌های این مطالعه می‌توانند در طراحی بهینه‌تر چشمه‌های یونی مولتی کاسپ برای کاربردهای علمی و صنعتی، از جمله لیتوگرافی، کندوپاش و پزشکی هسته‌ای، مؤثر قرار گیرد.



بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن سنگین تانک تأخیری راکتور تحقیقاتی ده مگاوات (کد مقاله :

(۱۴۹۳)

برجیسی، هما^۱ - میروکیلی^۲، سیدمحمد - سازگار^۳ - امجد - عابدی^۲، ابراهیم

۱. سازمان انرژی اتمی، شرکت توسعه و احداث راکتورهای اتمی (تارا)

۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای هسته‌ای

۳. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای

چکیده:

در این تحقیق پس از شبیه‌سازی تانک تأخیری (HUT) یک راکتور تحقیقاتی ده مگاوات استخری از نوع MTR با کد MCNP به منظور حصول ضخامت بهینه مطابق با معیار ایمنی طراحی، به عنوان حفاظ تابش‌های گامای پرانرژی ناشی از رادیونوکلئید ^{16}N ، سه نمونه طرح اختلاط بتن سنگین بر پایه باریت از معادن مهاباد، یزد، کرمانشاه با چگالی خشک میانگین 3.2 g/cm^3 و آنالیز عنصری بدست آمده از آزمون XRF مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین بتن سنگین بر پایه آهن با آنالیز عنصری و چگالی ارائه شده در استاندارد ANSI/ANS ۶-۲۰۰۶-۶.۴ نیز در مدل شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. از بین طرح اختلاط‌های تهیه شده از معادن مختلف ذکر شده، بیشترین تضعیف تابش‌های گاما برای نمونه طرح اختلاط ناشی از معدن مهاباد بدست آمد. همچنین مشاهده شد در بتن سنگین بر پایه باریت با افزایش چگالی نمونه میزان تضعیف تابش گاما نسبت به افزایش چگالی در بتن‌های سنگین بر پایه آهن مانند انواع بتن‌های مگنتیتی، هماتیتی کمتر است.

کلمات کلیدی: بتن سنگین، چگالی، MCNP، تانک تأخیری (HUT)، XRF

Optimization of heavy concrete mixing design of delay tank of a ۱۰ MW research reactor

Berjisi^۱, Homa, Mirvakili^۲, S. Mohammad, Sazgar^۳, Amjad, Abedi^۲, Ebrahim

Abstract:

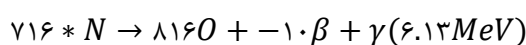
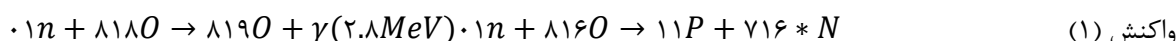
In this study, after simulating the delay tank (HUT) of a ۱۰ MW, MTR type research reactor with MCNP code to achieve the optimal thickness according to design safety criteria for shielding against high energy gamma radiation from ^{16}N radionuclide, three samples of heavy concrete mix designs from the mines of Mahabad, Yazd, Kermanshah with an average dry density of 3.2 g/cm^3 element analysis reached from XRF test were evaluated. Additionally, iron based heavy concrete with elemental analysis and density specified in ANSI/ANS ۶-۲۰۰۶-۶.۴-۲۰۰۶ was also examined in simulation model. Among the mix designs prepared from different mines the highest attenuation was observed in the mix design sample from the Mahabad mine. Furthermore, in barite-based heavy concrete, the increase in gamma radiation attenuation with increasing density is less compared to the increase in density in iron-based heavy concrete like Magnetite and Hematite.

Key words: Heavy concrete, density, MCNP, Delay tank



۱- مقدمه:

شبیه سازی تانک تأخیری در یک راکتور تحقیقاتی ده مگاوات استخری آب سبک از نوع MTR با توان نامی MW۱۰ انجام شده است. خنک کننده و کند کننده این راکتور آب سبک است. تانک تأخیری^{۱۶۳} این راکتور، به منظور ذخیره سازی سیال (آب) حاوی مواد رادیواکتیو بویژه رادیونوکلئید نیتروژن-۱۶^{۱۶۴} طراحی شده است. هنگام عبور سیال خنک کننده از قلب راکتور در اثر واکنش نوترون با اکسیژن $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ (مطابق واکنش ۱)، مقدار قابل توجهی نیتروژن-۱۶ در لوله خروجی قلب منتهی به تانک تأخیری تولید می‌شود.



رادیونوکلئید N-16 با تابش گاما با انرژی 6.13MeV و نیمه عمر ۷.۲s به عنصر پایدار اکسیژن-۱۶ واپاشی می‌کند. محاسبات مربوط به شبیه سازی و طراحی حفاظ این تانک تأخیری با در نظر گرفتن انرژی و نیمه عمر این رادیونوکلئید انجام شده است. بطور معمول بتن سنگین بدلیل چگالی زیاد و صرفه اقتصادی در مقایسه با سرب در طراحی حفاظ مورد توجه است. بهینه سازی بتن سنگین برای تانک تأخیری مستلزم بالانس بین پارامترهای چگالی، آنالیز عنصری، استحکام مکانیکی و کارایی بتن سنگین است. در این تحقیق هدف بر آن است که ترکیبات بتن سنگین به همراه در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده و انطباق الزامات طراحی حفاظ در این راکتور بهینه شود. به این منظور طرح‌های اختلاط بتن سنگین از معادن مهاباد، یزد و کرمانشاه با چگالی‌های مختلف تهیه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی دیگر بتن‌های سنگین بر پایه همتایت و مگنتیت نیز به عنوان جایگزین در استانداردهایی مانند ANSI/ANS6.4-2006 و PNNL-۱۵۸۷۰، معرفی شده‌اند. با توجه به اینکه امکان رسیدن به بتن سنگین با چگالی‌های زیاد بر پایه آهن سهل تر از بتن سنگین بر پایه باریت است، و از طرفی هزینه تأمین و ساخت آن در مقایسه با بتن باریت کمتر است. شبیه سازی تانک تأخیری علاوه بر طرح اختلاط‌های بر پایه باریت برای طرح اختلاط‌های بر پایه آهن با آنالیز عنصری ذکر شده در استاندارد ANSI/ANS6.4-2006 نیز انجام شده است.

۲- روش کار:

۲-۱- داده‌های اولیه :

بهینه سازی بتن سنگین برای تانک تأخیری با تغییر ویژگی‌های سنگدانه‌های سنگین شامل (باریت، همتایت، مگنتیت) و مواد سیمانی (Portland cement and fly ash)، انجام می‌شود. نمونه‌های بتن سنگین برای تانک تأخیری در سه سری، از منابع قرضه مختلف در سراسر کشور شامل (یزد، مهاباد، کرمانشاه) تهیه شده است. پس از تهیه نمونه‌ها آزمون XRF با هدف بدست آمدن نتایج آنالیز عنصری هر کدام از نمونه‌ها در محاسبات شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

^{۱۶۳} Hold up tank

^{۱۶۴} N-۱۶



در شبیه‌سازی نمونه‌های بتن سنگین از کد MCNP استفاده شده است. V&V این کد علاوه بر استفاده از مثال‌های ذکر شده در Manual با مدل GODIVA، راکتور TRR و راکتور MNSR انجام شده است.

تانک تأخیری توسط MCNP با ابعاد ۱۱۸۸۰ mm × 6480 mm × 6690 mm با نرم افزار Solid Work مدل شده است (شکل ۱). از این شکل به منظور تخمین زمان حضور سیال در سطح‌های مختلف تانک استفاده شده است. به منظور اعمال ضرایب محافظه‌کارانه در مدل شبیه‌سازی شده با کد MCNP، میزهای^{۱۶۵} داخلی این تانک در مدل لحاظ نشده است. سوریس ترم ناشی از N-16 در با اعمال ضرایب محافظه‌کارانه در شار و زمان از رابطه (۱) محاسبه شده است.

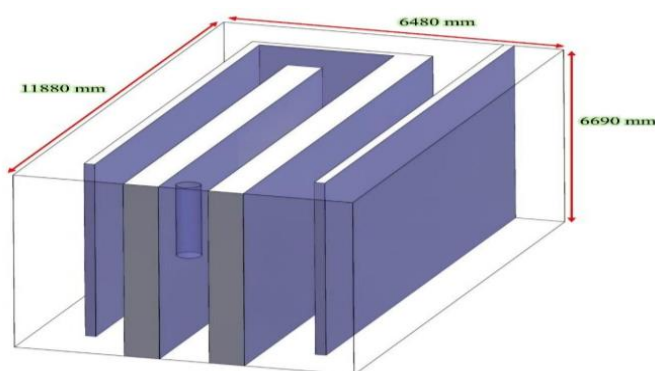
$$R = R_0 e^{-\lambda t} \quad R_0 = \left(\frac{RR}{\lambda} \right) * (1 - \exp(-\lambda t)) \quad \text{رابطه (۱)}$$

t: مدت زمان ماند سیال در تانک تأخیری، RR: نرخ واکنش، λ : ثابت واپاشی

R: اکتیویته سیال ناشی از N-16 پس از طی زمان مشخص در تانک تأخیری

R₀: اکتیویته اولیه ناشی از N-16 پس از عبور سیال از قلب

معیار ایمنی طراحی حفاظ در راکتورها براساس استانداردهای داخلی یا بین‌المللی تخمین زده می‌شود. معمولاً این معیار بین ۲ تا ۳ میکروسوریت است و ضخامت محاسبه شده باید این معیار طراحی را برآورده کند.



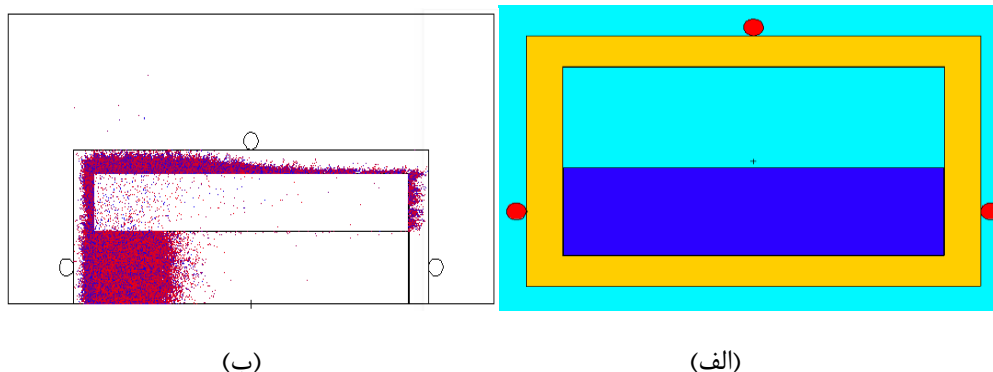
شکل (۱) ابعاد داخلی تانک تأخیری

۲-۲- ابزار و روش انجام محاسبات:

مدل تانک تأخیری مطابق شکل (۲) با کد MCNP شبیه‌سازی شده است. داده‌های مربوط به طرح اختلاط‌های تهیه شده در این مدل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین داده‌های طرح اختلاط بتن سنگین بر پایه آهن ارائه شده در استاندارد ANSI/ANS6.4-2006 در مدل ارزیابی شده‌اند. در این مدل سه آشکارساز معادل بافت با قطر ۰.۳ سانتی متر در ۴ سمت تانک تأخیری در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تنها خروجی آشکارساز نزدیک به لوله خروجی از قلب به دلیل حضور



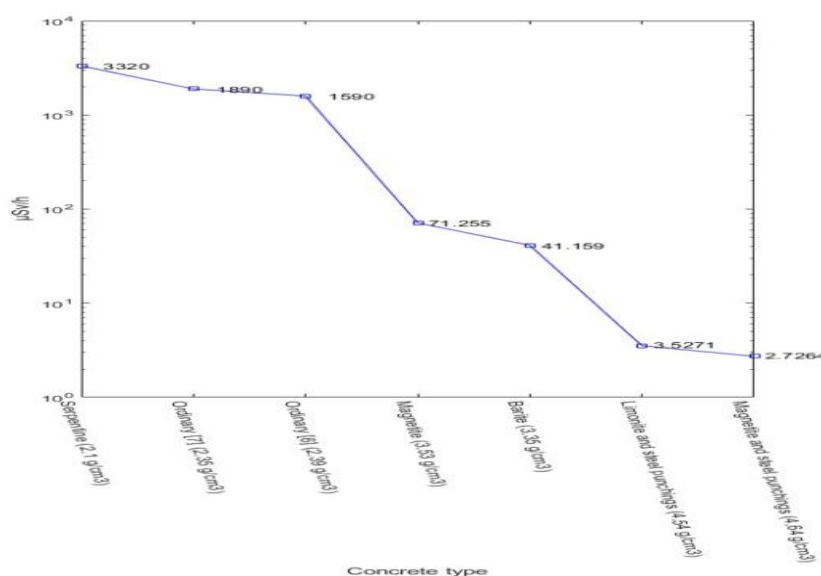
بیشترین مقدار اکتیویته N-16 در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۲) (ب) مشاهده می شود آشکارساز سمت چپ دارای بیشترین مقدار دوز خواهد بود. ضخامت تانک تأخیری بر اساس این مقدار سورس ترم محاسبه شده است.



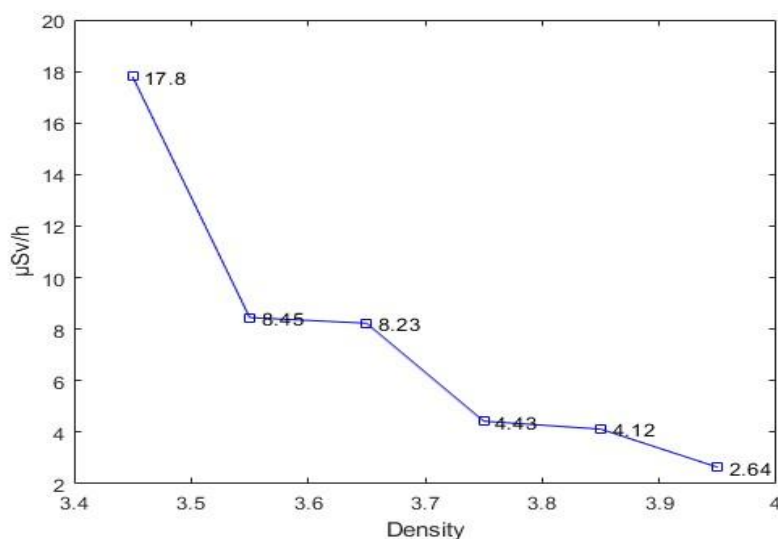
شکل (۲) مدل شبیه‌سازی شده تانک تأخیری (الف) با حضور ۴ آشکارساز (یکی از آشکارسازها در پشت تانک تأخیری واقع شده است) (ب) تابش ذرات ناشی از حضور چشمه N-16 در تانک تأخیری

۳- نتایج:

همانطور که در نمودار ارائه شده در شکل (۳) مشاهده می شود بتن سنگین بر پایه باریت با چگالی 3.35 g/cm^3 نسبت به بتن سنگین بر پایه آهن (مگنتیت) با چگالی 3.53 g/cm^3 میزان تضعیف بیشتری را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این نمودار (شکل ۳ و ۴) این است که این رفتار بازای چگالی بتن مگنتیت در بازه $3.9-3.53 \text{ g/cm}^3$ اتفاق می افتد و با افزایش چگالی بتن سنگین بر پایه آهن به میزان $4-4.5 \text{ g/cm}^3$ ضریب تضعیف این نوع بتن به مراتب بیشتر از باریت است. به منظور بررسی بیشتر این موضوع انواع بتن‌های سنگین مگنتیتی ارائه شده در استاندارد PNNL-15870 نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در نمودار ارائه شده در شکل (۴) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳) مقایسه میزان دوز جذبی در انواع مختلف بتن شامل (بتن معمولی، سنگین بر پایه آهن و باریت)



شکل (۴) میزان دوز جذبی ناشی از بتن سنگین مگنتیتی با چگالی‌های مختلف در مدل شبیه‌سازی شده

از آنجایی که افزایش دانسیته بتن سنگین تنها با عنصر باریت به لحاظ ویژگی‌های مورد نیاز در اجرای بتن سنگین امکانپذیر نیست یا دست کم بسیار سخت است. از طرفی جایگزین کردن باریت با طرح اختلاطهایی بر اساس بتن سنگین آهنی منجر به کاهش قابل توجه در هزینه‌های بتن سنگین می‌شود. طرح اختلاطها با چگالی‌های و آنالیز عنصری مختلف بتن سنگین بر پایه باریت و آهن در مدل شبیه‌سازی شده و نتایج آنها به شرح زیر در این تحقیق ارائه شده است.

۳-۱- مشخصات نمونه‌های بتن تهیه شده:

مشخصات نمونه بتن سنگین : A1 نمونه ۱A حاوی سنگدانه ۱۰۰ درصد از معدن باریت مهاباد با چگالی بتن سخت شده 3350 kg/m^3 است. آنالیز عنصری (XRF) این نمونه در جدول (۱) ارائه شده است.

مشخصات نمونه بتن سنگین : A2 نمونه ۲A حاوی سنگدانه باریت از معدن یزد با چگالی بتن سخت شده 3220 kg/m^3 است. آنالیز عنصری (XRF) این نمونه در جدول (۱) ارائه شده است.

مشخصات نمونه بتن سنگین : A3 نمونه ۳A حاوی سنگدانه باریت از معدن کرمانشاه با چگالی بتن سخت شده 3280 kg/m^3 است. آنالیز عنصری (XRF) این نمونه در جدول (۱) ارائه شده است.

سنگدانه باریت معدن یزد	
Element	Weight Fraction
C	۰.۰۳۹۵
O	۰.۲۴۵۸۳۴
F	۰.۰۵۸۸
Al	۰.۰۰۱۹۵۸



Si	۰.۰۳۳۲۳۵
S	۰.۱۱۹۱۷۵
K	۰.۰۰۴۴۸۳
Ca	۰.۰۸۹۱۲۲
Ti	۰.۰۰۰۷۷۹
Fe	۰.۰۰۶۲۹۵
Sr	۰.۰۱۳۳۶
Ba	۰.۳۸۷۴۵۹

سنگدانه باریت معدن کرمانشاه

Element	Weight Fraction
O	۰.۲۵۷۵۲۱
F	۰.۰۰۶۴۵۹
Al	۰.۰۰۲۳۶۷
Si	۰.۰۲۱۰۸۹
S	۰.۱۵۹۹۱۱
K	۰.۰۰۳۸۷۷
Ca	۰.۰۰۵۷۵۳
Ti	۰.۰۰۱۰۱۳
Fe	۰.۰۱۵۶۳۹
Ba	۰.۵۲۶۳۷۲

سنگدانه باریت معدن مهاباد

Element	Weight Fraction
C	۰.۰۰۴
O	۰.۲۴۴۵۹۴
Si	۰.۰۰۵۲۳۵
S	۰.۱۶۸۱۷۶
Ca	۰.۰۰۳۷۱۶
Fe	۰.۰۰۵۱۷۶
Sr	۰.۰۱۲۰۰۷
Ba	۰.۵۵۷۰۹۵

جدول (۱) آنالیز عنصری نمونه‌های بتن سنگین A1, A2, A3 (نتایج XRF ارائه شده توسط آزمایشگاه رازی)



۲-۳- مقایسه بتن‌های سنگین بر پایه باریت و آهن با چگالی‌های متفاوت:

- به منظور بررسی بتن‌های سنگین بر پایه باریت، نمونه طرح اختلاط تهیه شده از معدن مهاباد در مدل شبیه‌سازی شده با اعمال چگالی‌های مختلف بازای یک آنالیز عنصری ثابت مربوط به این نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از این نتایج میزان اثرگذاری چگالی در طرح اختلاط بتن سنگین با کاربرد حفاظ هسته‌ای قابل مشاهده می‌باشد.
- از طرفی مقایسه ای بین بتن‌های برپایه باریت تهیه شده در مدل شبیه‌سازی یکسان بازای چگالی‌های متفاوت و یکسان که امکان مقایسه فراهم باشد انجام شده است.
- در نهایت مقایسه ای بین بتن‌های سنگین بر پایه باریت تهیه شده و بتن سنگین بر پایه آهن استخراج شده از استاندارد انجام شده است.

نتایج خروجی تالی F4 کد MCNP برای این نمونه‌های ذکر شده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲) نتایج خروجی تالی F4 کد MCNP

خطا	تالی ۴۰۰ در ورودی HUT (uSv/h)	چگالی خشک (kg/m ³)	درصد آهن	درصد باریت	معدن	نوع بتن
۰.۰۴	۶.۵۸۱۴E+۰۰	۳۲۲۰		۳۸	یزد	بتن سنگین تهیه شده بر پایه باریت (A2)
۰.۰۶۰	۲.۴۶۶۱E+۰۰	۳۳۵۰		۵۵	مهاباد	بتن سنگین تهیه شده بر پایه باریت (A1)
۰.۱۰	۳.۳۷۵۰E+۰۰	۳۲۲۰		۵۵	مهاباد	بتن سنگین با تغییر چگالی
۰.۱۱	۳.۴۱۵۲E+۰۰	۳۲۵۰		۵۵	مهاباد	بتن سنگین با تغییر چگالی
۰.۱۲	۳.۲۱۱۱E+۰۰	۳۲۸۰		۵۵	مهاباد	بتن سنگین با تغییر چگالی
۰.۰۳۴	۳.۲۳۱۱E+۰۰	۳۲۸۰		۵۲	کرمانشاه	بتن سنگین تهیه شده بر پایه باریت (A3)
۰.۰۵۶	۷.۳۶۵۸E+۰۰	۳۵۳۰	۷۵		طبق استاندارد (ANSI/ANS))	Magnetite Concrete
۰.۱۰	۱.۰۷۰۷E-۰۱	۴۶۴۰	۷۵		طبق استاندارد (ANSI/ANS))	Magnetite and steel punching (MS2) Concrete
۰.۱۰	۱.۳۹۴۶E-۰۱	۴۵۴۰	۷۵		طبق استاندارد (ANSI/ANS))	Limonite and steel punching (LS) Concrete

۴- بحث و نتیجه گیری:

همانطور که در بخش نتایج ارائه شد، مدل شبیه‌سازی شده برای تانک تأخیری بازای سه نمونه طرح اختلاط تهیه شده از معادن مهاباد، یزد و کرمانشاه بر پایه باریت با درصد‌های ۵۲، ۳۸، ۵۵ و با چگالی‌های ۳۲۲۰، ۳۲۸۰، ۳۳۵۰ g/cm³، مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان دوز بازای ضخامت ۱۱۰ سانتی متر بتن سنگین برای هرکدام از نمونه‌ها به ترتیب ۲.۲۳۱۱E+00، ۲.۴۶۶۱E+00، ۲.۵۸۱۴E+00 میکرو سیورت بر ساعت محاسبه شد. با توجه به درصد باریت ۵۵٪ و چگالی خشک ۳۳۵۰ g/cm³



۳۳۵۰ نتایج بسیار نزدیک به معیار طراحی حفاظ برای تانک تأخیری راکتور تحقیقاتی را یعنی ۲ میکروسیورت است. از طرفی با توجه به اینکه امکان تهیه نمونه باریت با چگالی بالاتر به لحاظ استحکام بتن و رئولوژی مشکلاتی را به همراه دارد. در این تحقیق داده‌های مربوط به آنالیز عنصری و چگالی مربوط به سه طرح اختلاط بر پایه آهن نیز در مدل شبیه سازی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج ارائه شده با مقدار ۷۵ در صد آهن در این نوع بتن سنگین‌ها (Magnetite and steel punching)، 1.3946E-01، 7.3658E+00، 1.0707E-، Magnetite Concrete, Limonite and steel punching).
۰۱ میکروسیورت بر ساعت محاسبه شد. که از معیار طراحی با مقدار قابل ملاحظه‌ای کمتر هستند. در نمونه طرح اختلاط مهاباد مشاهده شد با افزایش چگالی بازای مقدار باریت ثابت کاهش در میزان دوز خروجی در مقایسه با بتن سنگین بر پایه آهن در حالت مشابه کمتر است. به عبارت دیگر به ازای چگالی‌های زیاد ۴-۴.۵ g/cm³ در طرح اختلاط‌های بر پایه آهن کاهش قابل توجهی در میزان دوز مشاهده شد.

۵- مراجع:

[۱] ANSI/ANS^{۶,۴-۲۰۰۶}, "Nuclear analysis and design of concrete radiation shielding for nuclear power plants"

[۲] PNNL-۱۵۸۷۰, "Compendium of material composition data for radiation transport modeling"

[۳] MCNP^۶-user manual, "Mont Carlo N-Particle transport code-۶"



بررسی پایداری عملکرد ترانزیستور ماسفت BS170 به عنوان دزیمتر فعال در محدوده دز کل

۱ تا ۱۰۰ گری (کد مقاله : ۱۵۰۰)

فرحناز حسینی^{۱*}، حمید جعفری^۱، آرمین مسیبی^۲، سید امیر حسین فقهی^۱ و سعید بوربور^۱

۱- گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۲- گروه پژوهشی پرتوآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.

چکیده:

این پژوهش به بررسی کاربرد ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر در اندازه‌گیری دز پرتوهای یونساز می‌پردازد. دزیمتری این پرتوها در صنایع هسته‌ای و پزشکی اهمیت ویژه‌ای دارد و دزیمترهای ماسفت به دلیل ویژگی‌هایی مانند حساسیت بالا و اندازه کوچک، ابزار مؤثری محسوب می‌شوند. در این مطالعه، از ترانزیستور ماسفت مدل BS170 برای اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ آستانه در پاسخ به تابش گاما استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده ارتباط تقریباً خطی بین تغییرات ولتاژ آستانه و مقدار دز تابش است. همچنین، پایداری خوانش‌ها در دزهای مختلف بررسی و مشخص شد که این نوع ماسفت در دزهای بالاتر از ۱۰ گری عملکرد بهتری به عنوان دزیمتر دارد. این تحقیق بر بهبود دقت و کنترل در درمان‌های رادیوتراپی و نظارت بر محیط‌های پرتوزا با استفاده از دزیمترهای ماسفت، تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی: ترانزیستور ماسفت، BS۱۷۰، دزیمتری، ولتاژ آستانه

Stability Assessment of BS۱۷۰ MOSFET Transistors as Active Dosimeters in the Dose Range of ۱ to ۱۰۰ Gy

Farahnaz Hosseini^{۱*}, Hamid Jafari^۱, Armin Mosayebi^۲, Seyed Amir Hossein Feghhi^۱, and Saeed Boorboor^۱

۱. Radiation Applications Group, Shahid Beheshti University, Tehran.

۲. Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Applications Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran.

Abstract:

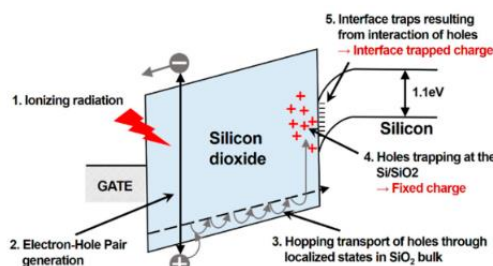
This research investigates the application of MOSFET transistors as dosimeters for measuring doses of ionizing radiation. Dosimetry of these radiations is particularly important in nuclear and medical industries, and MOSFET dosimeters are considered effective tools due to their high sensitivity and small size. In this study, the BS۱۷۰ MOSFET model was utilized to measure threshold voltage variations in response to gamma radiation. The results indicate an approximately linear relationship between threshold voltage changes and the amount of radiation dose. Additionally, the stability of readings at different doses was examined, revealing that this type of MOSFET performs better as a dosimeter at doses above ۱۰ Gy. This research emphasizes the improvement of accuracy and control in radiotherapy treatments and monitoring of radioactive environments using MOSFET dosimeters.

Key words: MOSFET Transistor, BS۱۷۰, Dosimetry, Threshold Voltage



۱- مقدمه:

تعیین دز پرتویی در محیط‌های کاری مانند پزشکی هسته‌ای، تاسیسات پرتودهی و مأموریت‌های فضایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دزیمتری پرتوهای یونساز است [۱]. برای مثال در دزیمتری شخصی، یک فرد ممکن است با موقعیت‌های رادیولوژیکی مانند انفجارهای هسته‌ای یا مأموریت‌ها در مناطق آلوده مواجه شود. بنابراین، اندازه‌گیری میزان قرار گرفتن در معرض دز تجمعی پرتوهای گاما و به تبع آن نظارت بر آن برای یک فرد در فواصل منظم مورد نیاز است [۲]. دزیمترهای ماسفت از جمله ابزارهای اندازه‌گیری دز به روش فعال در این محیط‌ها هستند که علاوه بر حساسیت بسیار بالا نسبت به پرتو، قابلیت تحمل شار بالایی از پرتوها را نیز دارند [۳]. از سوی دیگر، سنسورهای ماسفت از نظر اندازه کوچک، فشردگی، کم هزینه، بازخوانی غیر مخرب، خواندن مستقیم بدون تاخیر یا تاخیری هستند و به همین سبب به راحتی با سایر رابط‌های الکترونیکی سازگار هستند و نیازی به ولتاژ کاری بالا ندارند [۲]. ماسفت‌ها نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری مزایایی دارند. آن‌ها را می‌توان سریع‌تر و راحت‌تر از دزیمترهای ترمولومینسانس (TLD) خواند. با سیستم‌های تجاری ماسفت می‌توان همزمان از چند دزیمتر استفاده کرد. آشکارسازهای ماسفت نیز اندازه کوچکی دارند که این امر به ویژه برای اندازه‌گیری دزهای نقطه‌ای در مناطق کوچکی که دز یکنواخت پرتو دریافت می‌کنند و برای اندازه‌گیری در مناطق با شیب دز بالا (به عنوان مثال، در براکی تراپی) مفید هستند [۴]. استفاده از ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر و برای اندازه‌گیری مقدار دز پرتوهای یونساز، کاربردهای وسیعی دارد. مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت توسط پرتودهی، یکی از پارامترهای مهم در اندازه‌گیری دز پرتویی می‌باشد [۵]. پرتوهای یونساز می‌توانند بار قابل توجهی را در اکسیدها و عایق‌های ماسفت‌ها (ترانزیستورهای اثر میدان نیمه هادی اکسید فلز) ایجاد کنند که منجر به تغییراتی در پاسخ الکتریکی آن‌ها می‌شود [۶]. همانطور که در **Error! Reference source not found.** ۱ مشاهده می‌شود، مسیر برخورد ذرات یونساز با لایه اکسید ترانزیستور موجب ایجاد زوج‌های الکترون-حفره در این لایه می‌شود. پس از ایجاد بارها، مقداری از آن‌ها با یکدیگر ترکیب می‌شوند. تعداد بارهای ترکیب شده به عوامل مختلفی مانند نوع ذره فرودی، میدان الکتریکی و دما بستگی دارد. تحت تأثیر میدان الکتریکی، بارهای باقیمانده شروع به حرکت می‌کنند. در این میان، قابلیت تحرک الکترون‌ها در لایه اکسید بسیار بالاتر از قابلیت تحرک حفره‌ها است. در نتیجه، الکترون‌ها در مدت زمان چند پیکو ثانیه از لایه اکسید خارج می‌شوند، اما حفره‌ها برای مدت طولانی در تله‌های موجود در لایه اکسید باقی می‌مانند. همچنین، احتمال آزادسازی اتم هیدروژن و ایجاد یک پروتون هنگام برخورد ذرات با لایه اکسید وجود دارد. حرکت این پروتون‌ها در راستای میدان الکتریکی می‌تواند باعث تخریب و جابجایی ترازهای انرژی در سطح مشترک لایه اکسید



و سیلیکون شود [۷].

شکل (۱) بارهای ثابت ناشی از تشعشع در n-MOSFET ناشی از اثر دز یونیزه کل (TID) [۸]

با افزایش مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور بیشتر تغییر می‌کند. این پارامتر ولتاژ نوار تخت به طور مستقیم با مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور رابطه دارد. کمیت مهم در دزیمتری توسط ماسفت‌ها، مقدار تغییرات ولتاژ



آستانه ترانزیستور می‌باشد. در آزمایش‌های متنوعی نشان داده شده است که تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت با مقدار تابش وارد بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد. در ساده‌ترین شکل این رابطه را می‌توان توسط معادله (۱) بیان کرد.

$$\Delta V_T = A \times D^n \quad (1)$$

که ΔV_T ، D ، n و A به ترتیب تغییرات ولتاژ آستانه، مقدار دز در لایه عایق گیت ترانزیستور، درجه خطی بودن و ضریب ثابت می‌باشند. عواملی مانند کیفیت ساخت ماسفت، ضخامت لایه اکسید، میدان الکتریکی و تا حدودی دز کل بر درجه خطی بودن رابطه تأثیرگذار هستند. به صورت ایده‌آل این عوامل خطی می‌باشد و مقدار پارامتر n باید نزدیک به یک باشد. روش‌های متعددی برای استخراج مقدار ولتاژ آستانه وجود دارد و همچنین مدارهای استخراج‌گر مختلفی برای اندازه‌گیری خودکار این پارامتر ارائه شده است. بخش بزرگی از روش‌های موجود برای تعیین ولتاژ آستانه شامل اندازه‌گیری استاتیک جریان درین انتقالی برحسب ولتاژ گیت (مشخصه I_D-V_g) یک ترانزیستور می‌باشند [۷].

در سال ۱۳۹۹ در داخل کشور پژوهشی تحت عنوان "طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت بر اساس جابه‌جایی ولتاژ آستانه" توسط آقایان بوربور و جعفری در دانشگاه شهید بهشتی انجام شد. در این طرح هدف طراحی و ساخت یک سامانه دزیتر پرتویی ماسفت بر اساس تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور بود. کالیبراسیون پرتویی این سامانه با پرتودهی ماسفت‌های مشخص شده ای از نوع n و p در دزهای مختلف ($5-100 \text{ Gy}$) انجام شد. وابستگی دمایی این ترانزیستورها نیز با توجه به ضریب تغییرات دمایی در تمامی این اندازه‌گیری‌ها لحاظ گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ آن ماسفت‌های مورد استفاده به دز پرتویی مختلف تقریباً به صورت خطی بوده و دارای حساسیتی در حدود ۱ تا 6 mV/Gy دارد که می‌توان بسته به محیط پرتو و ابعاد مورد نیاز این ماسفت‌ها از انواع مختلف آن استفاده کرد [۳].

هدف از این پژوهش بررسی پایداری عملکرد ترانزیستور ماسفت BS170 به عنوان دزیتر فعال در محدوده دز کل ۱ تا ۱۰۰ گری است. بعد از پرتودهی ترانزیستورها با استفاده از دستگاه رسام منحنی جریان- ولتاژ ترانزیستورهای ماسفت، خوانش شدند و نتایج آن‌ها بررسی شد.

۲- روش کار:

در این پژوهش، عملکرد ترانزیستور ماسفت مدل BS۱۷۰ (نوع n) به عنوان دزیتر در محدوده دز مشخصی مورد بررسی قرار گرفت. این نوع ترانزیستورها به علت توانایی عملکرد در شرایط محیطی مختلف (دما، رطوبت) که برای کاربردهای دزیتری بسیار مهم است مناسب می‌باشد. از طرفی اندازه کوچک ماسفت‌ها امکان ادغام در سیستم‌های دزیتری فشرده را فراهم می‌کند که برای دزیترهای قابل حمل و شخصی سودمند است. حساسیت این قطعات الکترونیکی که در اکثر مدارهای الکترونیکی مورد استفاده است، به تابش پرتوها و مقرون به صرفه بودن آن‌ها در مقایسه با سایر فناوری‌ها آن‌ها را به گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان دزیتر معرفی می‌کند. لازم به ذکر است که در تحقیقات و مطالعات پیشین انجام شده ویژگی‌ها و کاربردهای این قطعه به عنوان دزیتر بررسی شد [۷].

برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت و اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما، از دستگاه رسام منحنی جریان-ولتاژ استفاده شد. این دستگاه دارای کانکتورهایی برای اتصال قطعه تحت آزمایش است و قبلاً در آزمایشگاه دزیتری استاندارد ثانویه (SSDL) کرج کالیبره شده بود. برای اتصال قطعه تحت آزمایش به دستگاه، کانکتورهایی بر روی دستگاه تعبیه شده است. با استفاده از این کانکتورها، حفاظ، سیگنال اصلی و سیگنال پسخورد برای پایانه‌های گیت، درین و سورس، به پراب آزمایش متصل می‌شود. همچنین کانکتور جداگانه‌ای بر روی دستگاه برای اتصال به حسگر دمای موجود در محفظه پراب فراهم شده است. دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه، دستگاه استخراج کننده مشخصات ماسفت در ناحیه کاری خطی است. این

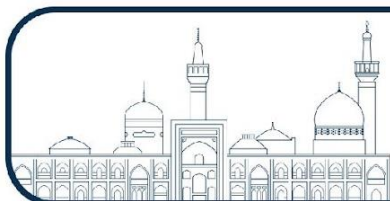


دستگاه ابزار تشخیصی است که برای تعیین پارامترهای الکتریکی قطعات الکترونیکی ماسفت به کار می‌رود. این دستگاه از چهار بخش تشکیل شده است: منابع تغذیه کنترل شونده، مدارهای اندازه‌گیری جریان، ولتاژ و دما، پردازنده مرکزی و نرم‌افزار تحلیل داده‌ها. این دستگاه در ناحیه کاری خطی عمل می‌کند که این ویژگی آن را برای خوانش ولتاژ آستانه ترانزیستورها مناسب کرده است. کاربرد این دستگاه در فیزیک الکترونیک و فیزیک هسته‌ای است و می‌تواند مشکل قرائت دزیمترهای ماسفت و مطالعات آسیب پرتویی بر روی ترانزیستور ماسفت را مرتفع کند. نمای ظاهری دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲) نمای ظاهری دستگاه رسام منحنی جریان- ولتاژ ترانزیستورهای ماسفت

در این پژوهش، ۴۲ عدد از ترانزیستورهای BS170 مورد بررسی قرار گرفتند. ولتاژ آستانه این ترانزیستورها قبل و بعد از پرتودهی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌های بعد از پرتودهی در بازه‌های زمانی مشخص و در دمای محیط ثابت انجام شد. پرتودهی ترانزیستورها در پژوهشکده کاربرد پرتوها در سازمان انرژی اتمی تهران صورت گرفت و دزهای ۱ تا ۱۰۰ گری مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی پایداری و تعیین دقت، هر بار سه عدد ترانزیستور BS170 مورد پرتودهی قرار گرفتند و منحنی جریان-ولتاژ هر یک سه بار اندازه‌گیری شد. میانگین و انحراف معیار این داده‌ها در هر دز محاسبه شد. پایداری خوانش ترانزیستورها بعد از گذشت ۷ روز پس از پرتودهی در روزهای متوالی ۴ بار اندازه‌گیری شد. در شکل ۳ هم نمونه‌های ترانزیستوری آماده شده برای پرتودهی نشان داده شده است. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری دزهای پایین از تضعیف‌کننده استفاده شد که مقدار آهنگ دز را به یک سوم مقدار اولیه کاهش داد. در واقع ما پرتودهی را با استفاده از GC200 انجام دادیم. با توجه به اینکه نرخ دز $\frac{Gr}{sec}$ ۰.۷ است، برای پرتودهی در دزهای پایین که در اینجا دزهای Gy ۱-۱۰۰ است نیاز



بود که از تضعیف کننده برای کاهش نرخ دز استفاده کنیم. شکل ۴ نشان دهنده قرارگیری نمونه‌های ترانزیستوری تحت پرتودهی تابش گاما و آماده‌سازی آن‌ها برای پرتودهی است.



شکل (۳) آماده‌سازی نمونه‌های ترانزیستور ماسفت BS170 جهت پرتودهی

مشخصات اندازه‌گیری از جمله بازه جاروب ولتاژ گیت، اندازه گام حرکت در جاروب ولتاژ گیت و ولتاژ درین، توسط کاربر از طریق نرم افزار نوشته‌شده در محیط MATLAB دریافت می‌شود. این نرم افزار امکان انجام آزمایش و ثبت داده‌های مورد نیاز برای ترسیم منحنی جریان-ولتاژ ماسفت را فراهم می‌کند.

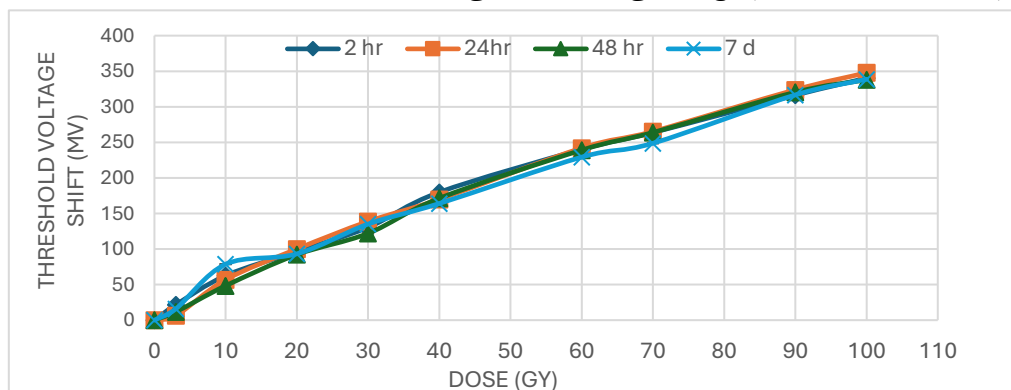


شکل (۴) قرارگیری نمونه‌ها تحت پرتودهی تابش گاما و استفاده از تضعیف کننده‌ها

۳- نتایج:

مطابق جدول ۱ مقدار تغییرات ولتاژ آستانه برحسب دز در چند ساعت و چند روز پس از پرتودهی نشان داده شده است. با توجه به جدول ۱ در شکل ۵، نتایج پاسخ اندازه‌گیری شده ترانزیستورهای ماسفت BS170 بعد از گذشت ۲ و ۲۴ و ۴۸ ساعت و ۷ روز پس از پرتودهی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است پس از گذشت ۷ روز پس از پرتودهی بیشترین تغییرات و کاهش پاسخ خروجی نسبت به خوانش بعد از پرتودهی (۲ ساعت) در دزهای ۱۰ گری و پایین‌تر اتفاق افتاده است و در دز ۱۰ گری ۲۶/۴۹ درصد کاهش پاسخ در خروجی مشاهده شده است. اما در دزهای بالاتر از ۱۰ گری نتایج خروجی به پایداری رسیده و تغییرات محسوسی در خروجی مشاهده نشده است و در دز ۱۰۰ گری پس از گذشت ۷ روز از پرتودهی فقط ۰/۴۹ درصد کاهش پاسخ خروجی نسبت به خوانش بعد از

پرتودهی (۲ ساعت) مشاهده شده است. طبق نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که دزیمترهای ماسفت در دزهای بالاتر پایداری بهتری نسبت به دزهای پایین تر دارند و تغییرات پاسخ خروجی زیر ۱ درصد می باشد.

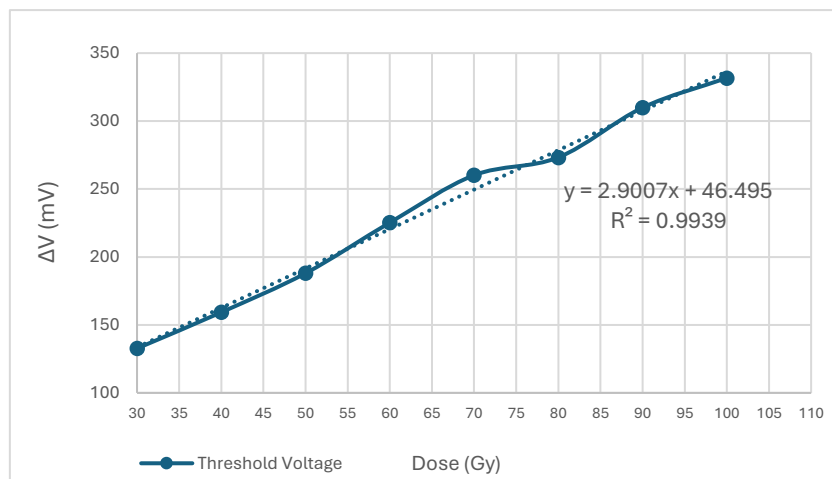


شکل (۵) بررسی پاسخ پایداری ترانزیستورهای ماسفت BS۱۷۰ بعد از گذشت مدت زمان های مختلف در دزهای ۱ تا ۱۰۰ گری

جدول (۱) قرارگیری نمونه‌ها تحت پرتودهی تابش گاما و استفاده از تضعیف کننده‌ها

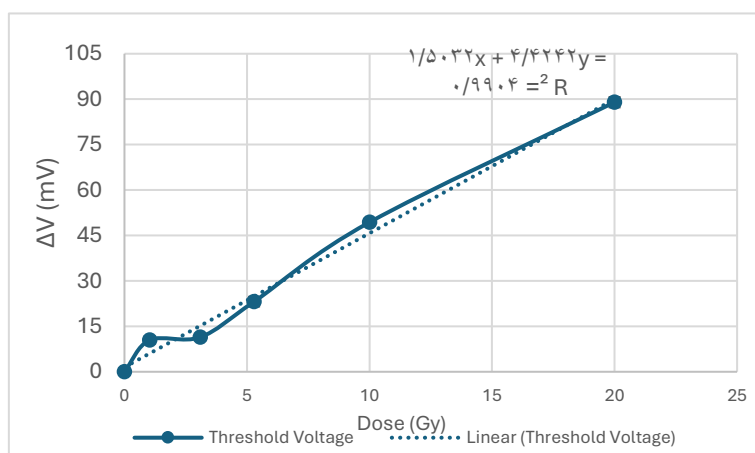
تغییر ولتاژ آستانه (mV)				
دز (Gy)	۲ ساعت	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷ روز
۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲۱/۵۵	۶/۲۲	۱۱/۶۴	۱۵/۸۴
۱۰	۶۲/۶۱	۵۶/۸۳	۴۸/۳۷	۷۸/۷۲
۲۰	۹۶/۴۶	۱۰۰/۰۲	۹۲/۱۶	۹۳/۲۳
۳۰	۱۳۰/۴۴	۱۳۸/۷۵	۱۲۲/۰۳	۱۳۵/۰۵
۴۰	۱۷۹/۸۴	۱۶۹/۸۸	۱۷۱/۳۶	۱۶۳/۹۸
۶۰	۲۴۰/۰۵	۲۴۲/۰۱	۲۳۹/۱۴	۲۲۹/۲۲
۷۰	۲۶۳/۸۱	۲۶۵/۳۱	۲۶۳/۸۶	۲۴۸/۷۲
۹۰	۳۱۶/۳۶	۳۲۳/۹۲	۳۲۰/۴۱	۳۱۶/۶۸
۱۰۰	۳۴۰/۳۳	۳۴۷/۸۵	۳۳۸/۰۴	۳۳۸/۶۳

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده‌است در محدوده دز ۰ تا ۲۰ گری حساسیت پاسخ خروجی ولتاژ آستانه برابر است با ۴/۴۲ mV/Gy می‌باشد.



شکل (۶) پاسخ خروجی ولتاژ آستانه (Threshold Voltage) تا دز ۲۰ گری.

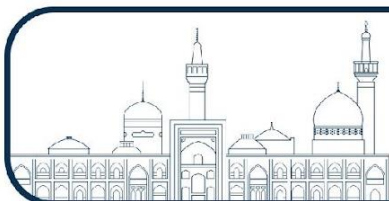
با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که در محدوده دز ۳۰-۱۰۰ گری حساسیت پاسخ خروجی خوانش ولتاژ آستانه برابر با ۲/۹۰ mV/Gy می‌باشد. طبق روند نمودار مشخص است که ترانزیستورهای ماسفت BS170 نوع n برای دزهای بالاتر از ۱۰۰ گری نیز می‌توانند پاسخ خروجی مناسب داشته باشند.



شکل (۷) و پاسخ خروجی ولتاژ آستانه (Threshold Voltage) در محدوده دز ۱۰۰-۳۰ گری

۴- بحث و نتیجه گیری:

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که دزیمترهای ماسفت به عنوان ابزاری مؤثر در اندازه‌گیری دز پرتوهای یونساز، دارای ویژگی‌های پایداری و حساسیت متفاوتی در دزهای مختلف هستند. پایداری خوانش ترانزیستورها پس از پرتودهی در دزهای پایین‌تر (۱۰ گری و کمتر) به طور قابل توجهی کاهش یافته و تا ۲۶/۴۹ درصد افت در پاسخ خروجی مشاهده شده است. در مقابل، در دزهای بالاتر از ۱۰ گری، دزیمترها به پایداری بهتری دست یافته و تغییرات پاسخ خروجی زیر ۱ درصد باقی مانده است.

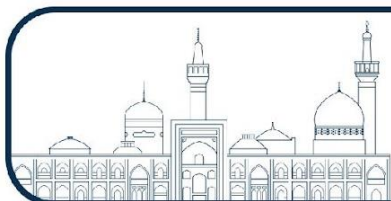


علاوه بر این، حساسیت پاسخ خروجی ولتاژ آستانه برابر با $4/42 \text{ mV/Gy}$ است، همچنین، در محدوده دز ۳۰-۱۰۰ گری، حساسیت پاسخ خروجی ولتاژ آستانه کاهش یافته. و این نشان‌دهنده عملکرد بهتر ولتاژ آستانه در دزهای پایین است.

بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دزیمترهای ماسفت، به‌ویژه مدل BS۱۷۰، گزینه‌ای مناسب برای اندازه‌گیری دز پرتوهای یونساز در دزهای بالا می‌باشند و می‌توانند به بهبود دقت در نظارت بر محیط‌های پرتوزا و درمان‌های رادیوتراپی کمک کنند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که دزیمترهای ماسفت BS۱۷۰ پس از پرتودهی، در دزهای پایین‌تر (۱۰ گری و کمتر) تغییرات قابل توجهی در پاسخ خروجی دارند، به‌طوری‌که پس از ۷ روز، کاهش $26/49\%$ درصدی در پاسخ خروجی مشاهده می‌شود. در مقابل، در دزهای بالاتر از ۱۰ گری، پاسخ خروجی به پایداری رسیده و تغییرات محسوسی در آن مشاهده نمی‌شود، به‌طوری‌که در دز ۱۰۰ گری تنها $0/49\%$ درصد کاهش پاسخ خروجی ثبت شده است. این نتایج نشان‌دهنده پایداری بهتر دزیمترهای ماسفت در دزهای بالاتر نسبت به دزهای پایین‌تر است، به‌ویژه با تغییرات پاسخ خروجی زیر ۱ درصد.

۵- مراجع:

۱. Mosayebi, A., et al., *Experimental study on polystyrene-MWCNT nanocomposite as a radiation dosimeter*. Radiation Physics and Chemistry, ۲۰۱۹. ۱۶۴: p. ۱۰۸۳۶۲
۲. Jingar, N., A. Khandelwal, and A. Pandya, *Design of programmable current source for MOSFET based gamma dosimetry system*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, ۲۰۲۱. ۹۹۰: p. ۱۶۴۹۴۴
۳. بوربور and جعفری، طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت براساس جابه‌جایی ولتاژ آستانه. سنجش و ایمنی پرتو، ۲۰۲۲. ۹(۱): ۵۵-۶۴.
۴. Chuang, C.F., L.J. Verhey, and P. Xia, *Investigation of the use of MOSFET for clinical IMRT dosimetric verification*. Medical physics, ۲۰۰۲. ۲۹(۶): p. ۱۱۱۵-۱۱۰۹
۵. Makiso, M.U., et al., *Bioactive compounds in coffee and their role in lowering the risk of major public health consequences: A review*. Food Science & Nutrition, ۲۰۲۴. ۱۲(۲): p. ۷۶۴-۷۳۴
۶. Mendonça, E.G., et al., *Experimental method for determining the supply current of a PMOS power transistor for use as a RADFET dosimeter*. Brazilian Journal of Radiation Sciences, ۲۰۲۳. ۱۱(۱ A (Supl.)): p. ۱۲-۰۱
۷. بوربور ۳، پ.ج.ج.آ.م.س.، et al.، بررسی و مقایسه پاسخ ترانزیستورهای ماسفت DIP و SMD به عنوان دزیمتر پرتوهای گاما. کنفرانس ملی هسته‌ای ایران، ۲۰۲۲.
۸. Lee, M., et al., *Modeling and simulation-based layout optimization for tolerance to TID effect on n-MOSFET*. Electronics, ۲۰۲۱. ۱۰(۸): p. ۸۸۷



امکان سنجی و شبیه‌سازی حفاظ گاما فوق سبک با فناوری فوم فلزی به کمک شبیه‌ساز مونت

کارلو گیت (کد مقاله : ۱۵۰۱)

سطوت، یاسمن^۱ - بابایی قانع، محمد^۱ - صدرممتاز، علیرضا^۲

۱. دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

حفاظت در برابر پرتوها در تأسیسات هسته‌ای اهمیت بالایی دارد، اما وزن زیاد حفاظ‌های سنتی کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. این پژوهش به امکان‌سنجی به‌کارگیری فوم فلزی به‌عنوان حفاظ تابش گاما با هدف کاهش وزن و حفظ کارایی حفاظتی پرداخته است. در این پژوهش، فوم‌های فلزی سلول باز از جنس سرب با تخلخل ۳۰٪ و ۷۶٪ هوا و اندازه حفره‌ها ۰/۳ mm و ۰/۶ mm به کمک شبیه‌سازی مونت کارلو گیت بررسی شدند. نتایج نشان داد که ساختار متخلخل فوم فلزی به کاهش قابل‌توجه فوتون‌های عبوری منجر شده و عملکرد حفاظتی مطلوبی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها موید پتانسیل بالای فوم‌های فلزی برای طراحی حفاظ سبک است.

کلمات کلیدی: فوم فلزی، گیت، مونت کارلو، حفاظت در برابر پرتو

Feasibility and Simulation of Ultra-Light Gamma Shielding Using Metal Foam Technology with the GATE Monte Carlo Simulator

Yasaman, Satvat^{۱*}, Babaei Ghane, Mohammad^۱, Alireza, Sadremomtaz^۲

۱. University Of Guilan, Faculty of Basic Sciences, Department of Physics

Abstract:

In nuclear facilities, radiation shielding plays a critical role, but the heavy weight of traditional shields limits their applications. This research investigates the feasibility of using metal foam as a gamma radiation shield with the aim of reducing weight while maintaining protective efficiency. In this study, open-cell lead metal foams with ۳۰٪ and ۷۶٪ porosity and hole sizes of ۰/۳ mm and ۰/۶ mm were examined using the GATE Monte Carlo simulation. The results showed that the porous structure of metal foam leads to a significant reduction in transmitted photons, providing optimal shielding performance. These findings highlight the great potential of metal foams for designing lightweight shields.

Key words: Metal Foam, GATE, Monte Carlo, Radiation Shielding



۱ - مقدمه:

مواد حفاظتی در برابر پرتو یکی از اجزای کلیدی در زیرساخت‌های تأسیسات هسته‌ای، از جمله راکتورهای هسته‌ای و شتاب‌دهنده‌های ذرات، محسوب می‌شوند [۱، ۲]. این مواد به‌ویژه در تجهیزات هسته‌ای متحرک، از جمله زیردریایی‌های مجهز به پیشران هسته‌ای [۳]، ربات‌ها و پهپادهای مدیریت سوانح هسته‌ای [۴]، فضاپیماهای سرنشین‌دار [۵]، دوربین‌های گاما صنعتی [۶] و... از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در چنین کاربردهایی، به دلیل محدودیت‌های فضایی و الزامات وزنی، انتخاب مواد حفاظتی باید به‌گونه‌ای انجام شود که ضمن تأمین اثربخشی حفاظتی مطلوب، حداقل وزن و حجم ممکن را داشته باشند.

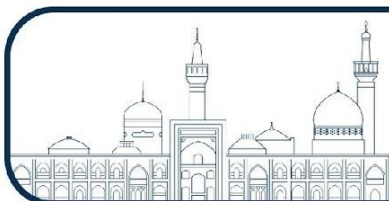
علاوه بر این، افزایش استفاده از پرتوهای یونیزان در کاربردهای تشخیصی و درمانی، به‌ویژه در روش‌هایی با دوز تابشی بالا مانند توموگرافی کامپیوتری (CT) و رادیولوژی مداخله‌ای، نگرانی‌های جدی در زمینه ایمنی و سلامت بیماران و کارکنان پزشکی ایجاد کرده است. بنابراین، توسعه و به‌کارگیری مواد حفاظتی با کارایی بالا برای کاهش مواجهه با پرتوهای مضر، به یک ضرورت علمی و فناوری تبدیل شده است [۷].

سرب، به دلیل چگالی بالا، عدد اتمی زیاد، و ضرایب تضعیف خطی و جرمی بالا، یکی از رایج‌ترین مواد حفاظتی در برابر پرتوهای گاما و ایکس محسوب می‌شود [۸]. این ماده در کاربردهای متعددی از جمله تصویربرداری تشخیصی، پرتودرمانی، و حفاظت هسته‌ای و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، به دلیل معایبی همچون وزن زیاد و مشکلات زیست‌محیطی، استفاده از آن در بسیاری از کاربردها با محدودیت‌هایی مواجه است [۹]. این چالش‌ها ضرورت توسعه مواد حفاظتی نوین و کارآمدتر را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد [۱۰].

فوم‌های فلزی، که در سال‌های اخیر توجه محققان را به خود جلب کرده‌اند، به‌عنوان گزینه‌ای نوین برای حفاظت در برابر تابش‌های یونیزان مطرح شده‌اند. فوم فلزی، ماده‌ای سبک و متخلخل است که از یک ماتریس فلزی با حجم زیادی از حفره‌های پر از گاز تشکیل شده است [۱۱]. این حفره‌ها می‌توانند دارای ساختار باز یا بسته باشند. فوم‌های سلول باز دارای حفره‌هایی به‌هم‌پیوسته‌اند، در حالی که در فوم‌های سلول بسته، بین حفره‌ها اتصال وجود ندارد [۱۲، ۱۳].

فوم‌های فلزی، که معمولاً از فلزاتی مانند آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد ساخته می‌شوند، به‌واسطه ساختار سلولی خاص خود، خواص فیزیکی و مکانیکی منحصربه‌فردی دارند. چگالی کم، استحکام بالا و قابلیت جذب انرژی زیاد از جمله ویژگی‌هایی هستند که فوم‌های فلزی را به گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی مواد سنتی در طراحی حفاظت تبدیل می‌کنند [۱۵]. این ویژگی‌ها به‌ویژه در کاربردهایی که کاهش وزن اهمیت زیادی دارد، بسیار حائز اهمیت‌اند. علاوه بر این، به نظر می‌رسد ترکیب فوم‌های فلزی با موادی با چگالی بالای هیدروژن مانند آب یا پارافین، به‌ویژه برای حفاظت در برابر تابش‌های نوترونی و انتقال حرارت در محیط‌هایی مانند نیروگاه‌های هسته‌ای، پتانسیل بالایی داشته باشد.

هدف این پژوهش، شبیه‌سازی و بررسی حفاظ گاما برای انرژی ۱۴۰ کیلو الکترون‌ولت با استفاده از فوم فلزی سلول باز سرب و تنگستن به کمک شبیه‌ساز مونت کارلو GATE است. این پژوهش به ارزیابی خواص فیزیکی فوم‌های فلزی و شبیه‌سازی عملکرد آن‌ها در محیط‌های تابشی می‌پردازد. تمرکز اصلی بر ویژگی‌هایی مانند چگالی کم، استحکام بالا، قابلیت جذب انرژی زیاد و پراکندگی تابش در فوم فلزی برای ایجاد حفاظ‌های کارآمد و سبک خواهد بود.

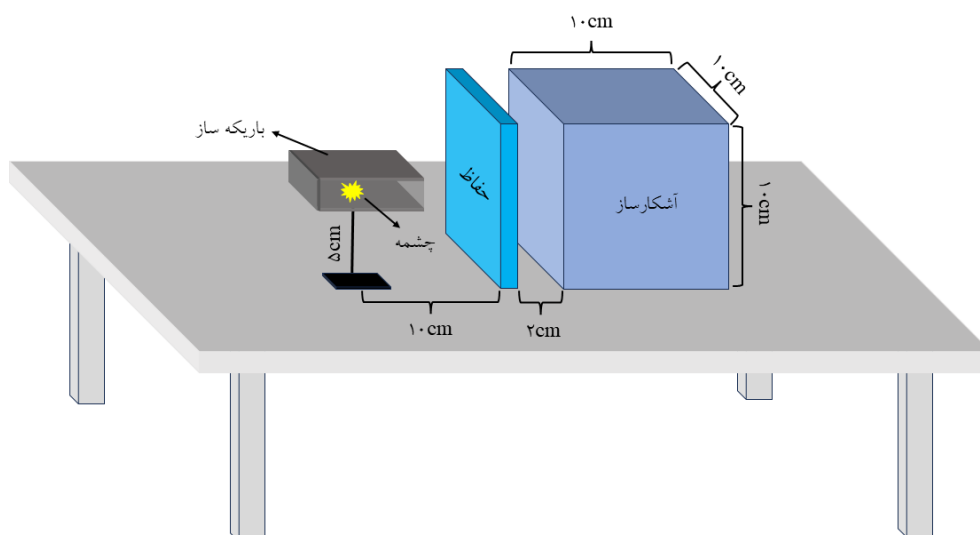


۲ - مواد و روش:

۲-۱- شبیه سازی

در این پژوهش، ارزیابی حفاظ‌های طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار GATE نسخه ۸/۲ انجام پذیرفت. GATE یک نرم‌افزار پیشرفته و متن‌باز بر پایه چارچوب Geant^۴ است که برای شبیه‌سازی سیستم‌های تصویربرداری قطع نگاری، پرتودرمانی، دزیمتری و ... طراحی شده است [۱۴].

جهت ارزیابی کارایی حفاظ مطابق شکل ۱ از یک پیکر بندی ساده شده استفاده گردید. یک آشکارساز مستطیلی ایده‌آل با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ cm از جنس سدیم یدید برای شمارش فوتون‌های عبوری از حفاظ که در فاصله ۲ cm از آن قرار گرفته است استفاده شد. برای اعتبار سنجی از یک چشمه مدادی با انرژی فوتون ۱۴۰ keV در فاصله ۱۰ cm از حفاظ استفاده گردید. داده‌های حاصل با ضرایب تضعیف استخراج‌شده از دیتاست NIST XCOM مقایسه شدند. برای ارزیابی شار فوتون‌های عبوری، از Fluence Actor استفاده گردید.



شکل (۱) پیکربندی هندسه شبیه‌سازی شده در GATE

۲-۲- مشخصات حفاظ طراحی شده

برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، در گام نخست، سرب و تنگستن جامد با مشخصاتی که در جدول ۱ به آنها اشاره شده است و ضخامت‌های مختلف از ۰ mm ۵ تا ۳ mm با گام‌های ۱ mm ۰، مطابق با رابطه زیر، شبیه‌سازی شدند.

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

که در رابطه بالا I تعداد رویداد آشکار شده، I_0 تعداد پرتوهای اولیه، μ ضریب تضعیف خطی و x ضخامت ماده جاذب است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی مواد جاذب [۱۵]

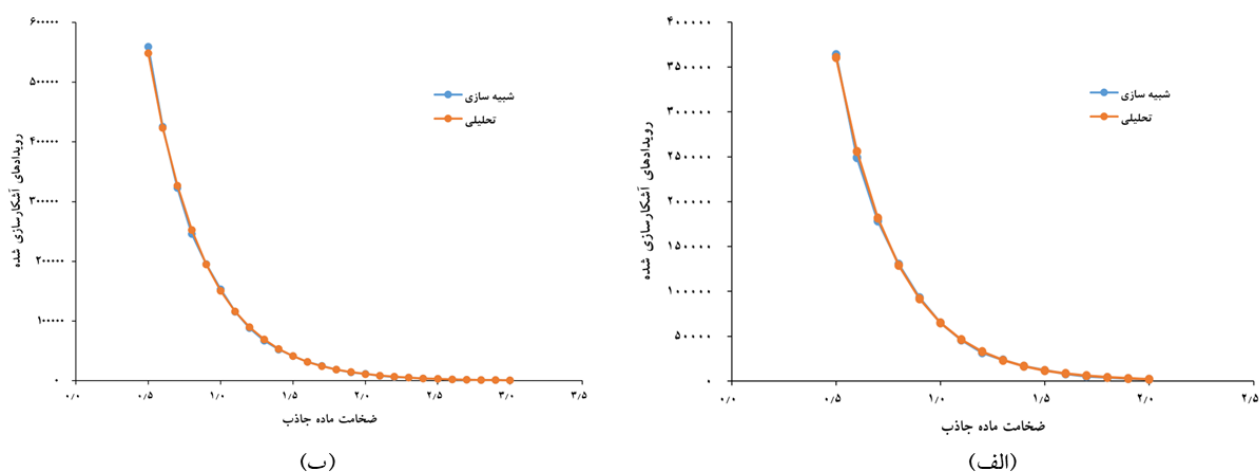
جنس	نماد شیمیایی	عدد اتمی	چگالی $\frac{g}{cm^3}$	ضریب تضعیف حجمی $\frac{cm^2}{g}$	ضریب تضعیف خطی $\frac{1}{cm}$
سرب	Pb	۸۲	۴/۱۱	۲۷۱/۲	۸۸/۲۵
تنگستن	W	۷۴	۳/۱۹	۷۸۱/۱	۳۷/۳۴

حفاظ‌های فوم فلزی در این مطالعه در قالب بلوک‌هایی با ابعاد $100 \times 100 \times 3 \text{ cm}$ از جنس سرب طراحی شدند. این فوم‌ها دارای ساختار سلول باز با درصد تخلخل ۳۰٪ و ۷۶٪ بوده و حفره‌هایی به شعاع ۶/۰ mm و ۳/۰ mm دارند. ضریب تضعیف خطی این حفاظ‌ها مطابق با رابطه (۱) محاسبه شده است.

۳- نتایج:

نتایج بررسی تأثیر ضخامت مواد جاذب بر کاهش شدت پرتوهای گاما به‌دست آمد و با داده‌های استاندارد NIST XCOM مقایسه شد که نمودار این مقایسه در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین شدت فوتون‌های عبوری از حفاظ با استفاده از Fluence Actor ثبت و کاهش شدت تابش بر اساس ضخامت مواد به‌دقت تجزیه و تحلیل گردید.

این نتایج به عنوان مبنایی برای ارزیابی عملکرد حفاظ‌های طراحی‌شده با فوم فلزی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، میانگین درصد خطای بین شبیه‌سازی و رابطه تحلیلی، برای سرب ۳۸٪/۲ و برای تنگستن ۲۹٪/۲ محاسبه شد که نشان‌دهنده دقت و صحت قابل قبول شبیه‌سازی‌ها است.



شکل (۲) نمودار شدت بر حسب ضخامت ماده جاذب (الف) برای تنگستن (ب) برای سرب



برای شبیه‌سازی فوم فلزی سربی در حضور چشمه نقطه‌ای همسانگرد، بلوکی با ابعاد $100 \times 100 \times 10^3 \text{ cm}$ و قطر حفره‌های 6 mm و 3 mm طراحی و و نتایج برای هر دو قطر حفره به صورت جداگانه بررسی و مقایسه شد.

در فوم فلزی طراحی شده با قطر حفره 6 mm ، تعداد 58830 رویداد در آشکارساز ثبت شد که در این حالت، حدود 30% از حجم حفاظ را هوا تشکیل می‌دهد. به منظور ارزیابی عملکرد این ساختار در کاهش شدت پرتوهای گاما، یک حفاظ سربی بدون حفره با ضخامتی معادل 70% ضخامت حفاظ فومی (معادل 7 mm سرب جامد) شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که 50780 رویداد در آشکارساز ثبت گردید که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در تعداد رویدادهای ثبت شده نسبت به فوم فلزی است. این مقایسه حاکی از آن است که اگرچه سرب جامد به دلیل چگالی بالاتر، توانایی بیشتری در کاهش شدت پرتوهای گاما دارد، اما فوم فلزی با وجود داشتن ساختاری متخلخل و وزن کمتر، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

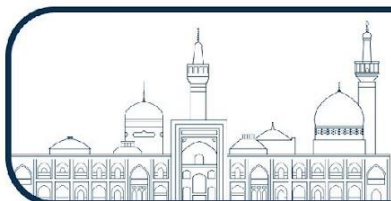
در فوم فلزی طراحی شده با قطر حفره 3 mm ، تعداد 129000 رویداد در آشکارساز ثبت شد که در این ساختار، نسبت هوا به سرب 76% است. جهت ارزیابی، حفاظ سربی بدون حفره‌ای با ضخامتی معادل 24% ضخامت حفاظ فومی (برابر با 24 mm سرب جامد) شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که 167300 رویداد در آشکارساز ثبت شده است که نشان‌دهنده افزایش تعداد رویدادهای ثبت شده نسبت به فوم فلزی است. این نتایج بیانگر آن است که علی‌رغم چگالی بالاتر سرب جامد، ضخامت کمتر آن به میزان قابل توجهی توانایی جذب پرتوهای گاما را کاهش داده است. از طرف دیگر، فوم فلزی با وجود نسبت بالای تخلخل (76% هوا)، به دلیل ساختار پیچیده حفره‌ای و پراکندگی چندگانه پرتوها در میان حفره‌ها، عملکرد بهتری در کاهش شدت پرتوها نشان داده است.

۴- بحث و نتیجه گیری:

عملکرد حفاظ‌های فوم فلزی سربی با ساختار سلول باز و درصد تخلخل متفاوت (30% و 76%) در کاهش شدت پرتوهای گاما مورد ارزیابی قرار گرفت. فوم‌ها در قالب بلوک‌هایی با ابعاد $100 \times 100 \times 10^3 \text{ cm}$ طراحی شدند و قطر حفره‌ها به ترتیب 6 mm و 3 mm در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که ساختار و درصد تخلخل فوم فلزی تأثیر قابل توجهی بر میزان جذب پرتوهای گاما دارد.

در نمونه‌ای با قطر حفره 6 mm و تخلخل 30% ، تعداد 58830 رویداد در آشکارساز ثبت شد. در مقایسه، یک حفاظ سرب جامد با ضخامتی معادل 70% ضخامت فوم فلزی (7 mm)، تعداد 50780 رویداد را ثبت کرد که نشان‌دهنده جذب بیشتر پرتوها توسط سرب جامد است. با این حال، فوم فلزی به دلیل وزن کمتر و ساختار متخلخل، عملکرد مناسبی در کاهش شدت تابش ارائه داد.

در نمونه‌ای دیگر با قطر حفره 3 mm و تخلخل 76% ، تعداد 129000 رویداد در آشکارساز ثبت شد. برای مقایسه، حفاظ سرب جامد با ضخامتی معادل 24% ضخامت فوم فلزی (24 mm) شبیه‌سازی شد و 167300 رویداد ثبت گردید. این نتایج نشان می‌دهد که با وجود چگالی بالاتر سرب، ضخامت کمتر آن کارایی حفاظتی را کاهش داده است. در مقابل، فوم فلزی با ساختار پیچیده و پراکنش چندگانه پرتوها در میان حفره‌ها، توانسته شدت تابش را به‌طور موثری کاهش دهد.



این نتایج بیانگر آن است که فوم‌های فلزی می‌توانند به عنوان جایگزین‌های سبک‌تر و کارآمدتر برای حفاظ‌های سنتی در کاربردهای متنوعی مانند صنایع پزشکی، هوافضا و هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

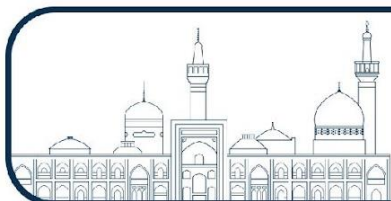
همچنین، بهینه‌سازی اندازه حفره‌ها در فوم‌های فلزی نقش مهمی در افزایش بازده حفاظتی این ساختارها دارد. همان‌طور که در این پژوهش مشاهده شد، کاهش اندازه حفره‌ها، منجر به افزایش میزان پرتوهای گاما و در نتیجه کاهش میزان فوتون‌های عبوری از حفاظ می‌شود. این ویژگی می‌تواند در طراحی حفاظ‌هایی که در عین سبکی، قدرت جذب پرتو بالایی دارند، بسیار مفید باشد. به همین دلیل، فوم‌های فلزی می‌توانند به عنوان جایگزین مناسبی برای حفاظ‌های سنتی در حوزه‌هایی مانند تصویربرداری پزشکی (مانند SPECT و PET)، راکتورهای هسته‌ای، و سامانه‌های فضایی مورد استفاده قرار گیرند.

افزون بر این، قابلیت ترکیب فوم‌های فلزی با سایر مواد مانند پلیمرهای جاذب نوترون یا کامپوزیت‌های پیشرفته، امکان بهبود بیشتر عملکرد حفاظتی و افزایش کارایی آن‌ها را فراهم می‌کند. این امر می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از حفاظ‌های تابشی سبک، مقاوم و کارآمد برای کاربردهای پزشکی، صنعتی و فضایی منجر شود.

۵- مراجع:

- [۱] Komarovskii, A.N., Design of nuclear plants. ۱۹۶۸: Israel Program for Scientific Translations.
- [۲] Singleterry Jr, R.C. and S.A. Thibeault, Materials for low-energy neutron radiation shielding. ۲۰۰۰.
- [۳] Mian, Z., M. Ramana, and A. Nayyar, Nuclear submarines in South Asia: New risks and dangers. Journal for Peace and Nuclear Disarmament, ۲۰۱۹. ۲(۱): p. ۱۸۴-۲۰۲.
- [۴] Hussain, M., et al., Drones application scenarios in a nuclear or radiological emergency. Kerntechnik, ۲۰۲۲. ۸۷(۳): p. ۲۶۰-۲۷۰.
- [۵] Chen, S., M. Bourham, and A. Rabiei, Novel light-weight materials for shielding gamma ray. Radiation physics and chemistry, ۲۰۱۴. ۹۶: p. ۲۷-۳۷.
- [۶] Banerjee, A.K. Radiation Protection & Personnel safety in Industrial Radiography. in Proceedings of the twenty-fifth national seminar and international exhibition on non destructive evaluation-NDE for make in India: abstracts. ۲۰۱۵.
- [۷] Ploussi, A. and E.P. Efstathopoulos, Importance of establishing radiation protection culture in radiology department. World journal of radiology, ۲۰۱۶. ۸(۲): p. ۱۴۲.
- [۸] Obaid, S.S., D.K. Gaikwad, and P.P. Pawar, Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete. Radiation physics and chemistry, ۲۰۱۸. ۱۴۴: p. ۳۵۶-۳۶۰.
- [۹] Kaur, T., J. Sharma, and T. Singh, Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing. Progress in Nuclear Energy, ۲۰۱۹. ۱۱۳: p. ۹۵-۱۱۳.
- [۱۰] Azman, M.N., et al., Feasibility of nanomaterial tungsten carbide as lead-free nanomaterial-based radiation shielding. Radiation Physics and Chemistry, ۲۰۲۳. ۲۰۲: p. ۱۱۰۴۹۲.

- [۱۱] Banhart, J., Metal foams: production and stability. Advanced engineering materials, ۲۰۰۶. ۸(۹): p. ۷۸۱-۷۹۴.
- [۱۲] Azzi, W.E., A systematic study on the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications. ۲۰۰۴.
- [۱۳] Gibson, L.J., Cellular solids. Mrs Bulletin, ۲۰۰۳. ۲۸(۴): p. ۲۷۰-۲۷۴.
- [۱۴] Collaboration, O. Available from: <http://www.opengatecollaboration.org/>.
- [۱۵] Amako, K., et al., Comparison of Geant^۴ electromagnetic physics models against the NIST reference data. IEEE Trans. Nucl., ۲۰۰۵. ۵۲(۴): p. ۹۱۰-۹۱۸.



بررسی و توسعه تجهیزات مورد استفاده جهت بکارگیری به عنوان دزیمتر: پژوهش‌های صورت

گرفته مبتنی بر دزیمترهای نیمه رسانا (کد مقاله: ۱۵۰۳)

اسدی، محمد^۳ - شیرمردی، سید پژمان^۲ - مسیعی، آرمین^۱

۱. دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای.

۲. گروه پژوهشی پرتوآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

۳. پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

چکیده:

این پژوهش مرتبط با تجهیزات پرتوهای یونساز نیمه‌رسانا برای اندازه‌گیری دز تجمعی و تشخیص نوع برخورد پرتوهای یونساز با ماده و نحوه سنجش و اندازه‌گیری این پرتوها توسط تجهیزات مختلف با روش‌های نوین، می‌باشد. اندازه‌گیری پرتوهای یونساز با حداقل خطا در چندین کاربرد حیاتی همانند صنعت، پزشکی و مأموریت‌های فضایی ضروری است. در چند دهه اخیر، تکنیک‌های متعددی مبتنی بر دستگاه‌های نیمه‌رسانا مانند دیودها، ترانزیستورهای ماسفت و تکثیرکننده‌های حالت جامد، برای گزارش شده‌اند. بسته به انرژی ذرات، شار MGy تا μGy تخمین دز جذب شده پرتوها با حساسیت متفاوت و مرتبه بزرگی از و نیازهای کاربردی، تجهیزات متفاوتی از قبیل دیودها، حافظه دسترسی تصادفی استاتیک و غیره در مقالات گزارش شده‌اند. این مقاله به سیر تکامل دزیمترهای پرتو و آشکارسازهای ذرات پیاده‌سازی شده با استفاده از فناوری‌های نیمه‌رسانا می‌پردازد.

کلمات کلیدی: آشکارساز پرتو - دزیمتر - دز یونیزان کل - اثر تک رویدادی - آسیب پرتویی

Investigation and development of equipment used as dosimeters: Research based on semiconductor dosimeters

Asadi, Mohammad^{۱*}, Shirmardi, Seyed Pezhman^۲, Mosayebi, Armin^۳

۱. Sharif University of Technology, Faculty of Energy Engineering, Nuclear Engineering Department.

۲. Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

۳. Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

Abstract:

This research is related to semiconductor ionizing radiation equipment for measuring cumulative dose and detecting the type of ionizing radiation collision with matter and how to measure and measure these rays by different equipment with modern methods. Measuring ionizing radiation with minimal error is essential in several critical applications such as industry, medicine and space missions. In the last few decades, several techniques based on semiconductor devices such as diodes, MOSFET transistors and solid-state multipliers have been reported for estimating absorbed dose of radiation with different sensitivities and orders



of magnitude from μGy to MGy . Depending on the particle energy, flux and application needs, different equipment such as diodes, static random access memory etc. have been reported in the literature. This article discusses the evolution of radiation dosimeters and particle detectors implemented using semiconductor technologies.

Key words: Radiation detector - Dosimeter - Total ionising dose - Single-event effects - Radiation damage

۱- مقدمه:

پرتوهای یونساز بر مدارهای الکترونیکی و همچنین موجودات زنده تأثیر می‌گذارند و یکی از نگرانی‌های اصلی برای کاربردهای حیاتی مختلف مانند مراقبت‌های بهداشتی، معدن، هواپیما، هسته‌ای، فیزیک انرژی بالا و کاربردهای فضایی بوده است. دزیمترهای پرتو، ابزاری ضروری برای تخمین، اندازه‌گیری و توصیف اطلاعات مربوط به پرتو برای ارزیابی عملکرد سیستم و متعاقباً جستجوی اقدامات اصلاحی هستند. این مقاله مروری، مروری مفید بر روش‌ها و دستگاه‌های مدرن توسعه‌یافته مبتنی بر فناوری‌های نیمه‌رسانا، برای اندازه‌گیری سطح پرتو و اثرات آن بر ابزارهای الکترونیکی را در چند دهه اخیر ارائه می‌کند. همچنین به دستگاه‌های نوظهور که امکان بکارگیری و پیاده‌سازی در آینده را دارند، اشاره می‌کند. این کار به تفصیل تکنیک‌های مختلف مورد استفاده در دستگاه‌های دزیمتر مبتنی بر نیمه‌رسانا را مورد بحث قرار می‌دهد و همچنین زمینه‌های کاربردی مربوطه را بیان می‌کند [۱].

اخیراً با توجه به پیشرفت سامانه‌های پرتودهی و دستگاه‌های شتاب‌دهنده در حوزه صنعت و پزشکی، نیاز است که بر روی تجزیه و تحلیل اثرات پرتوهای یونساز جهت سنجش و اندازه‌گیری این پرتوها کار شود. در طول چند دهه گذشته، مطالعات گوناگون در مورد منابع پرتو و فیزیک پایه سازوکارهای اثرات پرتو [۱-۴]، توسعه دزیمترهای پرتویی متعدد را تسهیل کرده‌اند. در اوایل دهه ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ [۵]، اولین مجموعه از دزیمترهای پرتو بر اساس مواد فروالکتریک زیرکونیوم تیتانات سرب [۶]، کرنش‌سنج‌ها [۷]، دزیمترهای شبتاب حرارتی CaF_2 [۸]، کالریمترهای سیلیکون [۹] و غیره توسعه یافتند. این دزیمترها عمدتاً برای اندازه‌گیری دز جذبی و اطلاعات مربوط به میزان دز، مورد استفاده قرار گرفتند. ترانزیستورهای ماسفت (MOSFET^{166}) برای اولین بار برای ثبت دز جذب شده شناسایی شدند و به عنوان دزیمترهای پرتو در محیط فضا مورد استفاده قرار گرفتند [۱۰]. پدیده اثرات تک رویدادی (SEEs^{167}) که شامل اثر "قیف شدن" در سطح سیلیکون است، کشف و به صورت تجربی نشان داده شد [۱۱]. به دنبال آن، تلاش برای اکتشافات فضایی و توسعه ماهواره‌ها بر اجرای نوع دیگری از دزیمتر پرتویی، یعنی آشکارساز ذرات برای شناسایی خطاهای ناشی از پرتو در سیستم‌های الکترونیکی تمرکز نمود. در طول زمان، افزایش درک سازوکارهای پرتو [۱۲، ۱۳] و فرآیندهای ذخیره انرژی به گسترش دزیمترها با پاسخ بهبود یافته همراه با تکنیک‌های طراحی جدید کمک کرده است [۱۴-۱۷]. از اوایل دهه ۱۹۸۰، نظریه میکرو دزیمتری [۱۸، ۱۹]، به ویژه با اثرات سطح دز بسیار پایین بر میکروالکترونیک، با تأکید بر کاربردهای سرطان‌شناسی پرتو، بررسی و مطالعه شد [۲۰]. با تکامل فناوری سیلیکون، کاهش مقیاس فناوری‌های مدرن نیمه‌رسانا فلز اکسید مکمل (CMOS^{168}) باعث شده است که دستگاه‌های ماسفت نسبت به اثرات

¹⁶⁶ Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors

¹⁶⁷ Single Event Effects

¹⁶⁸ Complementary MOSFET



دز پرتو جمعیتی حساسیت کمتری داشته باشند [۲۱]. با کاهش ضخامت اکسید-گیت، میزان به دام افتادن حفره ناشی از پرتو کاهش یافته است. علاوه بر این، تولید بارهای گیرافتاده به ویژه به دلیل تونل‌زنی الکترونی [۲۲] و خنثی‌سازی متوالی حفره‌ها [۲۳] کاهش یافته است. در نهایت، اجرای دزیمترهای پرتویی یکپارچه در اندازه‌های کوچک به شدت از کاهش حساسیت رنج می‌برند. این امر باعث توسعه آشکارسازهای ذرات یکپارچه با حساسیت افزایش یافته شده است. این مقاله مروری، مروری کوتاه بر پیشرفت‌ها در زمینه دزیمترهای پرتویی مبتنی بر نیمه‌رسانا ارائه می‌کند [۲۴، ۲۵].

۲- منابع پرتوزا:

مواد نیمه‌رسانای درون دستگاه‌ها و ابزارهای الکترونیکی که در فضای هوایی، زمین و فضای بیرونی مستقر می‌شوند، هر چند وقت یکبار با پرتوهای یونساز مواجه می‌شوند. منبع اصلی پرتو در محیط فضای فرازمینی [۲۶، ۲۷] پرتوهای کیهانی (پروتون‌های پرانرژی و یون‌های سنگین)، انتشار متناوب خورشید (پروتون‌های کم انرژی، پلاسما و شار مغناطیسی) و کمربندهای پرتویی شامل ذرات باردار انباشته شده در اطراف اجسام سیاره‌ای هستند. علیرغم محافظت ارائه شده، سطوح دزی که توسط میکروالکترونیک داخل دستگاه‌ها تجربه می‌شود، بالا بوده و خطرات قابل توجهی را در طول مأموریت‌های فضایی ایجاد می‌کند. در مقایسه، محیط زمین [۲۷، ۲۸] به طور کلی توسط میدان مغناطیسی و جو زمین محافظت می‌شود. اثرات پرتوهای ناشی از منابع فرازمینی به دلیل تعامل با جو زمین تا حد زیادی کاهش می‌یابند. بنابراین، عمدتاً با پرتوهای ناشی از شار پر انرژی نوترون‌های پرتو کیهانی که در فرآیند برهمکنش‌های هسته‌ای بین پروتون‌ها و عناصر جوی ایجاد می‌شوند، مواجه هستند. منبع اصلی دیگر، ذرات آلفا ساطع شده از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو طبیعی و ناخالصی‌های محلی موجود در دستگاه‌های الکترونیکی (مانند بسته‌های تراشه) در نظر گرفته می‌شود. این منابع پرتو عمدتاً وقفه‌های عملکردی و نقص قابلیت اطمینان در محصولات الکترونیکی را به وجود می‌آورند. در مقابل، سطوح دز برای الکترونیک در محیط‌های پرتو مصنوعی که در کاربردهای دست‌ساز متعدد مانند نیروگاه‌های انرژی هسته‌ای [۲۹]، پزشکی [۲۹] و آزمایش‌های فیزیک با انرژی بالا وجود دارند، بسیار بالا است [۳۰، ۳۱].

۳- محدوده اندازه‌گیری دز پرتو:

امروزه بسیاری از متخصصان و دستیاران مراقبت‌های بهداشتی به دلیل اهداف مختلف تشخیصی و درمانی در طول دوران کاری خود در معرض پرتو ایکس قرار می‌گیرند. چنین مواجهه‌هایی نه تنها به پرسنل پزشکی بلکه به بیماران نیز مربوط می‌شود. اکثر روش‌های رادیودرمانی در سرطان‌شناسی، کنترل دقیق بر دزهای تابشی (پرتو ایکس، بتا و پرتوهای پروتون) تجویز شده به بیماران را توصیه می‌کنند. در نهایت، نیاز به دزیمتری درون‌تنی^{۱۶۹} برای اطمینان از صحت و دقت بر دز تحویلی که منجر به درمان‌های مؤثر می‌شود، دارد [۳۲، ۳۳].

در طول مأموریت‌ها به سمت مدار پایین زمین (LEO^{۱۷۰})، مدار استوایی ژئوسنکرون (GEO^{۱۷۱}) و ایستگاه فضایی بین‌المللی (ISS^{۱۷۲}) در نزدیکی کمر بند پرتویی ون آلن، منابع مختلف پرتو فضایی (عمدتاً پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین با انرژی

^{۱۶۹} In vivo

^{۱۷۰} Low Earth orbit

^{۱۷۱} Geosynchronous equatorial orbit

^{۱۷۲} International Space Station



بالا) به عنوان یک تهدید بالقوه برای عملکرد قابل اعتماد ابزار دقیق پیچیده پرواز ظاهر می‌شوند [۳۴]. دزیمترها در تأسیسات آزمایش زمینی نیز مورد نیاز هستند تا بتوانند دز جذب شده را در طول مشخصه‌یابی به دقت ثبت کنند و متعاقباً به مدل‌سازی، شناسایی و پیش‌بینی اثرات ناشی از پرتو در دستگاه‌ها کمک کنند [۳۵،۳۶]. در طول مأموریت‌های فضایی، تجهیزات پروازی به تجهیزات الکترونیکی نیاز دارند که از نظر قدرت بهینه شوند و همچنین بسیار قوی و مقاوم در برابر خطا باشند. در صورت افزایش پرتوهای خاص (بادهای خورشیدی و شعله‌های آتش)، آشکارسازهای ذرات احتمالاً می‌توانند تهدید ناشی از افزایش شار ذرات یونساز را شناسایی کرده و متعاقباً یک هشدار ایجاد کنند [۳۷]. ذرات باردار شدید و پرتو ایکس که از شراره‌های خورشیدی منشأ می‌گیرند، پتانسیل تعامل با تجهیزات الکترونیکی را دارند که منجر به اختلالات، وقفه‌ها و متعاقب آن خرابی عملکردی می‌شوند. در زمان‌های اخیر، گزارش‌های متعددی وقوع خطاهای نرم در عملیات پرواز [۳۸]، مراکز داده [۳۹،۴۰] و سیستم‌های الکترونیکی [۴۱،۴۲] را گزارش کرده‌اند. در چنین کاربردهایی که ایمنی در درجه اول اهمیت قرار دارد، آشکارسازهای ذرات برای اطمینان از پایداری عملیاتی و قابلیت اطمینان وسایل الکترونیکی روی برد بسیار حیاتی هستند.

۴- تکنیک‌های اندازه‌گیری پرتو:

رویدادهای پرتویی مورد مطالعه، در اینجا در نظر گرفته می‌شوند که به طور تصادفی در طول زمان پرتودهی به دنبال آمار پواسون توزیع شده‌اند. بسته به برهمکنش مواد نیمه‌رسانا با پرتو، دزیمترها در حالت فعال ممکن است به یک تک کوانتوم پرتو (تشخیص ذرات) یا برهمکنش جمعی با کوانتوم‌های متعدد پرتو در یک دوره زمانی (اندازه‌گیری دز) پاسخ دهند. با این حال در حالت غیرفعال، انرژی ذخیره شده بر روی دستگاه‌ها در اثر برخورد ذرات منفرد در طول زمان انباشته می‌شود. بعداً، هنگامی که مدارها بایاس می‌شوند و دزیمترها اندازه‌گیری می‌شوند، انرژی ذخیره شده تنها تخمینی از دز پرتو را ارائه می‌دهد [۳۹،۴۰]. در حالت فعال، دزیمترهای پرتو و مدارهای مرتبط با استفاده از یک منبع انرژی خارجی بایاس می‌شوند و از تشخیص ذرات مجزا و همچنین اندازه‌گیری دز پشتیبانی می‌کنند. در این حالت، دزیمترها می‌توانند در روش شمارش پالس یا روش انتگرال کار کنند. در مورد آشکارسازهای مبتنی بر دیود سیلیکونی یا فوتودیود سیلیکونی، انفجار جریان ناشی از پرتو توسط بازخوانی الکترونیکی کنترل می‌شود. بار جمع‌آوری شده که انتگرال زمانی جریان در طول مدت زمان آشکارسازی است (روش انتگرال) معیاری برای انرژی ذخیره شده ارائه می‌دهد. در حالت شمارش پالس، بار جمع‌آوری شده با یک آستانه از پیش تعریف شده مقایسه شده و باعث ایجاد یک رویداد در شمارنده می‌شود تا به ذرات آشکار شده اضافه گردد. در مورد دزیمترهای مبتنی بر حافظه مانند حافظه با دسترسی تصادفی ایستا ($SRAM^{۱۳}$)، بار بحرانی مورد نیاز برای یک چرخش بیت در عناصر حافظه به عنوان آستانه برای تشخیص ذرات عمل می‌کند. روش بازخوانی مورد استفاده در حافظه‌های فلش مبتنی بر NAND سه بعدی گزینه‌های متعددی را برای مقایسه آستانه ارائه می‌کند و بنابراین امکان تخمین طیف انرژی همراه با تشخیص ذرات را نیز فراهم می‌کند. در مورد حسگرهای منفرد مبتنی بر ماسفت، جمع‌آوری آنی بار تولید شده از تابش راحت نیست و بنابراین استفاده از آن‌ها به عنوان آشکارساز ذرات بسیار محدود است [۴۱،۴۲]. این عناصر خود به عنوان دستگاه‌های یکپارچه عمل می‌کنند و از تکنیک‌های غیر مستقیم برای تخمین اطلاعات دز کل استفاده می‌کنند. حسگرها، زمانی که در حالت انتگرال کار می‌کنند، معمولاً به عنوان دزیمتر پرتو نامیده می‌شوند که به ارزیابی (مستقیم یا غیر مستقیم) یا اندازه‌گیری مقادیر تجمعی پرتو ($TID^{۱۴}$ ، $kerma$ ،

^{۱۳} Static Random Access Memory

^{۱۴} Total Ionising Dose

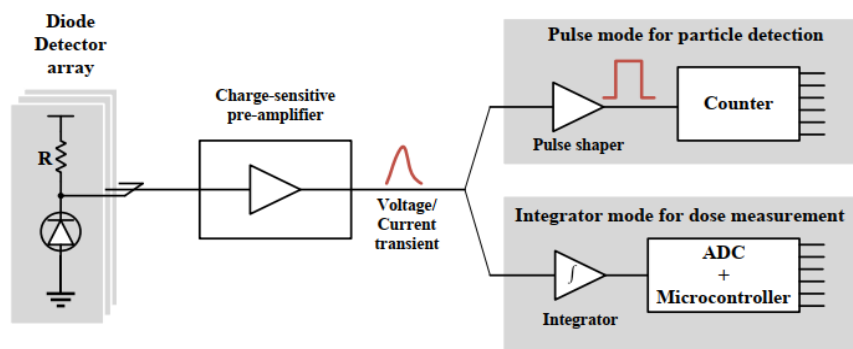


آهنگ دز و زمان پرتوگیری) کمک می‌کنند [۴۳]. ادغام اطلاعات می‌تواند توسط الکترونیک بازخوانی (دیودهای سیلیکونی) یا توسط خود دستگاه سنجش (حسگرهای مبتنی بر ماسفت) انجام شود. روش بازخوانی از تکنیک‌های مختلفی مانند اندازه‌گیری V_{TH} ولتاژ آستانه، سنجش مرجع جریان یا ولتاژ و خروجی حوزه زمان (فرکانس) پیروی می‌کند و می‌تواند بر اساس دستگاه سنجش مورد استفاده مانند دیودهای سیلیکونی، تکثیرکننده‌های حالت جامد ($SSPM^{175}$)، وارکتورهای سیلیکون روی عایق ($FDSOI^{176}$) و دستگاه‌های ماسفت از قبیل ترانزیستورهای اثر میدانی حساس به پرتو ($RADFETs^{177}$)، ترانزیستورهای اثر میدانی اکسید-میدان ($FOXFET^{178}$)، ماسفت گیت شناور ($FGMOS^{179}$) دسته‌بندی شود.

۴-۱- دزیمرهای پرتویی مبتنی بر دیود سیلیکونی:

در این روش از بایاس معکوس اتصال p-n یک دیود برای دزیمری استفاده می‌شود. بارهای اضافی (حامل‌های اقلیت) که به دلیل برهم‌کنش با پرتوهای یونساز در نزدیکی منطقه تخلیه شده ایجاد می‌شوند، در حضور میدان الکتریکی روی محل اتصال از طریق رانش دور می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است.

در اینجا، دیودها در حالت بایاس معکوس پیکربندی می‌شوند که به نوبه خود منجر به یک لایه تخلیه گسترده با جریان نشی کاهش یافته می‌شوند و بنابراین کارایی بالاتری در سنجش پرتو با یک رابطه خطی بین بار ذخیره‌شده و دز تجمعی را فراهم می‌کنند. دزیمرهای مبتنی بر دیود سیلیکونی مانند آشکارسازهای نوار سیلیکونی یک طرفه [۴۴] و آشکارسازهای پیکسل فعال [۴۵،۴۶] نسبتاً حساس هستند و برای اندازه‌گیری پرتو با دز بالا مانند میدان‌های پرتویی پالسی (پرتو ایکس، شتاب‌دهنده‌های خطی الکترونی) مناسب هستند. [۴۳].



شکل (۱) تصاویری از روش‌های مختلف (حالت پالس و حالت انتگرال) تشخیص پرتو مبتنی بر دیود سیلیکونی [۲].

¹⁷⁵ Solid-State Photomultiplier

¹⁷⁶ Fully-Depleted Silicon-on-Insulator

¹⁷⁷ Radiation-Sensitive Field-Effect Transistor

¹⁷⁸ Field-Oxide Field-Effect Transistor

¹⁷⁹ Floating-Gate MOSFET

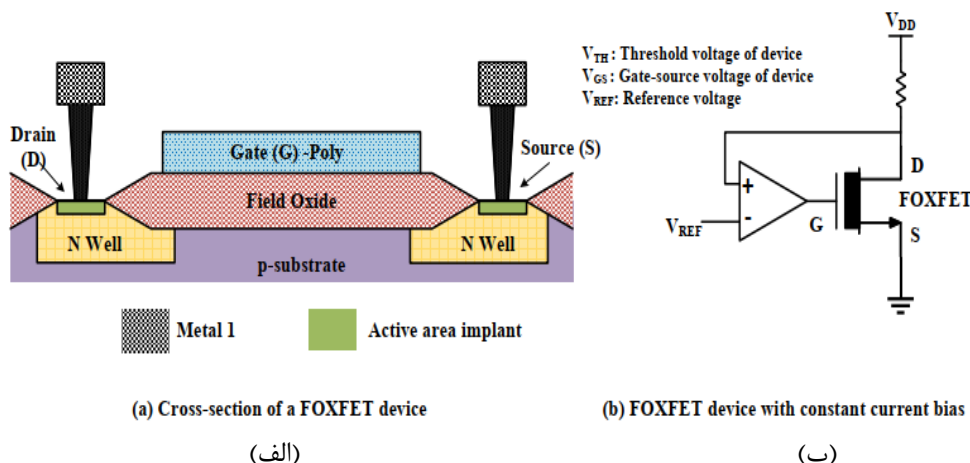


۲-۴- دزیترهای پرتویی مبتنی بر فوتودیود سیلیکونی:

این نوع دزیتر پرتو از فوتودیود سیلیکونی به عنوان عنصر حسگر استفاده می‌کند. چهار نوع فوتودیود را می‌توان برای اندازه‌گیری تابش استفاده کرد [۴۷]: فوتودیود پیوندی p-n [۴۸]، فوتودیود پین (نوع p، ذاتی، نوع n) [۴۹]، فوتودیود بهمنی [۵۰] و فوتودیود شاتکی [۵۱].

۳-۴- دستگاه‌های ماسفت حساس به پرتو:

در این دستگاه‌ها ضخامت اکسید میدان معمولاً در محدوده ۴۰۰-۶۰۰ نانومتر است که به نوبه خود، افزایش میزان تولید بار به دام افتاده در هنگام قرار گرفتن در معرض پرتو را تسهیل می‌کند [۵۱-۵۳]. نمایی از سطح مقطع دستگاه FOXFET در شکل ۲ الف ارائه شده است. در مقایسه با دستگاه‌های RADFET، تعداد بیشتر بارهای به دام افتاده در اکسید-گیت FOXFET باعث تغییر بسیار بزرگتر در V_{TH} می‌شود. همانطور که در شکل ۲ ب نشان داده شده است، V_{TH} دستگاه FOXFET با وارد کردن یک جریان ثابت از طریق دستگاه، اندازه‌گیری می‌شود و تغییر V_{TH} تخمینی از دز انباشته را ارائه می‌دهد. با این حال، مشابه RADFET ها [۵۲]، وابستگی پارامترهای الکتریکی به دما هنوز برای FOXFET ها مشکل‌ساز است که منجر به قرائت دز اشتباه می‌شود. برای کاهش مسائل مربوط به تغییرات دمایی، از معماری‌های دیفرانسیل استفاده می‌شود که در آن جریان‌های بایاس با ضرایب دمایی کاهش یافته طراحی شده‌اند [۵۳].

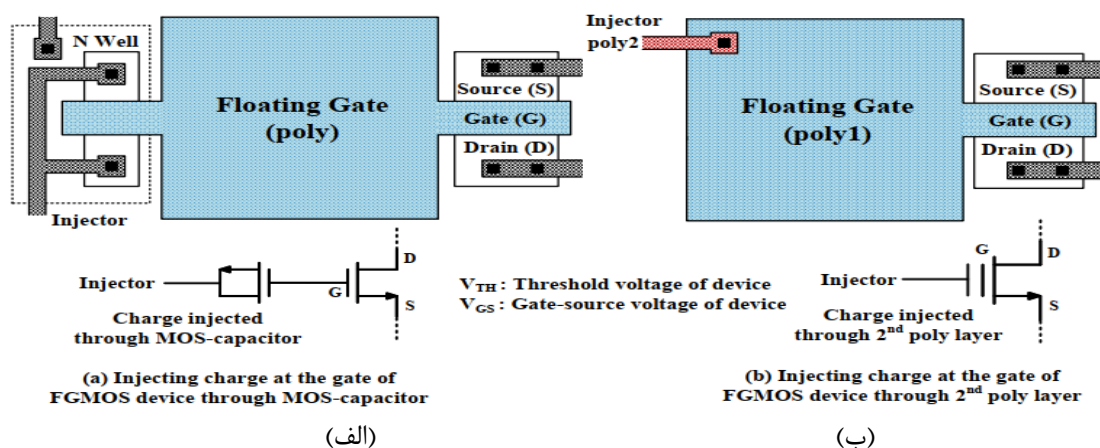


شکل (۲) (الف) سطح مقطع یک دستگاه ترانزیستور اثر میدانی اکسید میدان (FOXFET) مورد استفاده در دزیتر، (ب) مدار بازخوانی برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه یک دزیتر مبتنی بر FOXFET [۲].

دستگاه‌های FGMOS نیز برای کاربردهای مختلف دزیتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۵۰]. ساختارهای گیت شناور (FG^{180}) را می‌توان با اتصال گیت پلی سیلیکونی یک خازن MOS به گیت دستگاه دزیتر ماسفت در فناوری استاندارد CMOS همانطور که در شکل ۳ الف نشان داده شده است، پیاده‌سازی نمود. در غیر این صورت، می‌توان آن را با استفاده از یک گیت پلی سیلیکونی عایق‌بندی شده اضافی، در یک فرآیند CMOS دو پلی سفارشی همانطور که در شکل ۳ ب نشان داده شده است، پیاده‌سازی کرد. بدین ترتیب، در این فرآیند یک ظرفیت خازنی نیز در کنار گیت دستگاه FGMOS تشکیل می‌شود [۵۳]. به منظور جبران وابستگی دمایی تغییر V_{TH} ، یک ماسفت معمولی با ابعاد مشابه به عنوان مرجع برای نظارت بر



تغییرات پارامترهای ناشی از دما استفاده می‌شود. حسگر FGMOS و ماسفت معمولی در یک پیکربندی دیفرانسیلی استفاده می‌شوند و بنابراین تغییرات ناشی از دما را که در هر دو دستگاه اتفاق می‌افتد، همانطور که در [۵۱] گزارش شده است، لغو می‌کند. در روش دیگر، دستگاه‌های FGMOS برای پیاده‌سازی اینورترهای مختلف و ارائه یک خروجی فرکانس، که تغییر آن متناسب با کل دز انباشته‌شده است، استفاده می‌شود [۵۲، ۵۳]. دزیمترهای FGMOS همچنین برای پایش سطح دز بالا در محیط‌های شتاب‌دهنده با استفاده از تکنیک اندازه‌گیری مکرر همانطور که در [۵۴] گزارش شده است، بررسی می‌شوند.



شکل (۳) (الف) نمای بالای دستگاه MOSFET با گیت شناور (FGMOS) یکپارچه با خازن MOS برای تزریق بار به اکسید-گیت، (ب) نمای بالای دستگاه FGMOS با یک لایه پلی اضافی که برای تزریق شارژ استفاده می‌شود [۲].

۴-۴- نمایشگر پرتو مبتنی SRAM:

اصل آشکارسازهای ذرات مبتنی بر SRAM صرفاً جستجوی حافظه برای تغییرات بیتی است که می‌تواند اختلالات تک سلولی (SCU^{181}) یا اختلالات چند سلولی ($MCUs^{182}$) باشند، که در شکل ۴ نشان داده شده است. با کاهش مقیاس ابعاد فیزیکی فناوری‌ها، برخوردهای تک ذره، بسته به انرژی ذره می‌تواند سلول‌های متعدد را به طور همزمان برهم بزنند. همانطور که در [۵۴] نشان داده شده است، می‌توان از نسبت MCU و SCU برای تخمین انرژی ذرات استفاده کرد. آشکارسازهای پرتو مورد استفاده در CERN، ESA، و مأموریت‌های ماهواره‌ای چندین SRAM تجاری خارج از قفسه ($COTS^{183}$) را برای نظارت SEU تعبیه کرده‌اند [۵۴]. برای دستیابی به حساسیت و وضوح بالاتر SEU، می‌توان از SRAM‌های ساخته شده در گره‌های فناوری کوچکتر (۶۵ نانومتر و کمتر) استفاده کرد. در کار اخیر [۵۵]، طیف گسترده‌ای از تراشه‌های COTS SRAM و FPGA^{۱۸۴} مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که SRAM ۱۶ تا ۶۵ نانومتری دارای سطح مقطع SEU بالایی است. از طرف دیگر، کاهش ولتاژ تغذیه می‌تواند حساسیت SEU را افزایش دهد و هر نوع ذره با تغییر منبع ولتاژ، محدوده حساس متفاوتی را نشان می‌دهد. این امر امکان کالیبراسیون کافی را برای نمایشگر پرتو فراهم می‌کند تا شدت و نوع منبع پرتو را با

^{۱۸۱} Single-Cell Upset

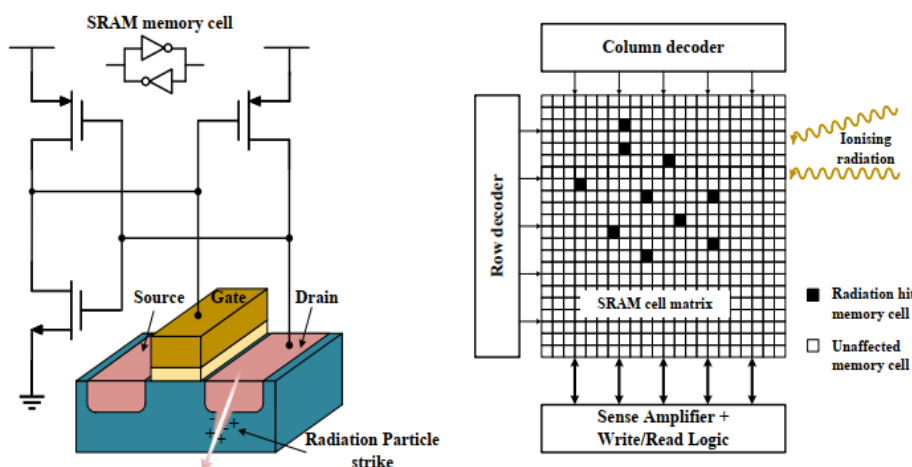
^{۱۸۲} Multi-Cell Upset

^{۱۸۳} Commercial off-the-shelf

^{۱۸۴} Field Programmable Gate Arrays



جاروب کردن ولتاژ تغذیه، تجزیه و تحلیل کند. در نهایت، اکثر COTS SRAM ها دارای یک ویژگی کد تصحیح خطای تعبیه شده هستند که می‌تواند برخی از SEU ها را تصحیح کند که استفاده از آن را به عنوان نمایشگر پرتو، پیچیده می‌کند [۵۵].

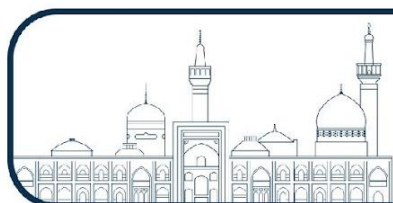


شکل (۴) سازوکار برخورد پرتو و تغییر بیت حافظه بر روی گره‌های حافظه دسترسی تصادفی استاتیک (SRAM) [۲].

۵- عملکرد حسگر:

حسگرهای پرتو، یعنی هم دزیمترها و هم آشکارسازهای ذرات، ابزار بسیار موثری برای اندازه‌گیری، ارزیابی یا مشخص کردن پارامترهای مختلف پرتو (طیف انرژی، فلوئنس، LET، و غیره) و اثرات ناشی از آن (دز جذب شده، تغییرات بیت و غیره) هستند. یک مطالعه مقایسه‌ای از دزیمترهای پرتو مبتنی بر نیمه‌هادی بر اساس ویژگی‌ها، روش‌ها و فناوری‌های مختلف آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ماسفت‌های حساس به پرتو مانند RADFET ها و FOXFET ها عمدتاً از تکنیک‌های اندازه‌گیری DC، یعنی اندازه‌گیری V_{TH} استفاده می‌کنند و به معماری‌های بازخوانی ساده نیاز دارند. مدار الکترونیک اولیه در مورد آشکارسازهای مبتنی بر دیود که در حالت پالس یا حالت یکپارچه کار می‌کنند، پیچیده‌تر است. همانطور که در جدول ۱ ذکر شد، پیچیده‌ترین تکنیک‌های پردازش سیگنال و الگوریتم‌های بازخوانی در حسگرهای پرتویی مبتنی بر حافظه NAND سه بعدی و ^{۱۸۵}ReRAM استفاده شده است. در میان حسگرهای مبتنی بر نیمه‌هادی، دستگاه‌های FGMOS، وارکتورهای ReRAM و FDSOI، بالاترین حساسیت را نسبت به دز پرتو از خود نشان می‌دهند. با این وجود، اندازه‌گیری‌ها و پارامترها نسبت به دز انباشته شده رفتار غیرخطی نشان می‌دهند و محدوده مؤثر دزی که آن‌ها می‌توانند برای آن استفاده شوند، به طور قابل توجهی کمتر است. این حسگرها اساساً برای استفاده در کاربردهای با دز بسیار پایین مانند دزیمتری شغلی یا رویه‌های درمانی، در نظر گرفته شده‌اند.

^{۱۸۵} Resistive Random-Access-Memory



جدول ۱: مقایسه دزیمترهای پرتویی مبتنی بر نیمه‌هادی [۲].

فناوری	حالت عملکردی (SEE/TID)	زاویه برخوردی / تخمین LET	حساسیت به دز	توان مصرفی	پیچیدگی خوانش	عنصر حسگر
CMOS استاندارد	هر دو	بله	متوسط	کم / متوسط	متوسط	دیود سیلیکونی
CMOS استاندارد	هر دو	بله	متوسط	متوسط	متوسط	فوتودیود سیلیکونی
CMOS سفارشی	TID	خیر	متوسط	متوسط	کم	RADFET
CMOS سفارشی	TID	خیر	متوسط	متوسط	کم	FOXFET
CMOS استاندارد	TID	خیر	زیاد	کم / متوسط	متوسط	FGMOS
CMOS استاندارد	SEE	بله	-	متوسط	متوسط	SRAM
CMOS استاندارد	SEE	خیر	-	کم	متوسط	مدار BICS
۳-D CMOS سفارشی	SEE	بله	-	زیاد	زیاد	فلش NAND سه بعدی
ترکیبی	TID	خیر	زیاد	کم / متوسط	زیاد	میمریستور (ReRAM)
CMOS استاندارد	TID	خیر	متوسط	کم	متوسط	MOS وارکتور
FDSOI CMOS	TID	خیر	زیاد	کم	متوسط	FDSOI وارکتور

۶- بحث و نتیجه‌گیری:

این مقاله مروری، حسگرهای پرتویی مبتنی بر نیمه‌رسانا (دزیمتر و آشکارسازهای ذرات) را که در چند دهه گذشته برای اندازه‌گیری پرتو (TID و SEEs) توسعه یافته‌اند، خلاصه می‌کند. پرتوهای یونساز یک نگرانی جدی برای عملکرد قابل اعتماد سیستم‌های الکترونیکی، به ویژه در مراکز داده، سیستم‌های کنترل پرواز، محموله‌های ماهواره‌ای و ابزارهای علمی مورد استفاده در کاربردهای مختلف می‌باشند. تحت تأثیر پرتوها، عملکرد سیستم‌های الکترونیکی در طول دوره کارکرد، کاهش می‌یابد و در نهایت سیستم در شرایط سخت از کار می‌افتد. آشکارسازهای ذرات اصولاً خطاهای منطقی ناشی از پرتو، اختلالات حافظه و وقفه‌های سیستم‌های الکترونیکی را شناسایی می‌کنند و متعاقباً به تصحیح خطا کمک می‌کنند تا از قابلیت اطمینان و



انعطاف‌پذیری در برابر پرتوهای آمیخته، اطمینان حاصل شود. علاوه، کاربردهایی که شامل خطرات پرتویی مرتبط با کار و پزشکی می‌شوند، به دزیمترها نیاز دارند تا اطمینان حاصل شود که دز جذب شده برای متخصصان و بیماران در محدوده‌های توصیه شده حفظ می‌شود. در این مقاله، روش‌های مختلف دزیمتری پرتو و همچنین آشکارسازی ذرات، مورد بررسی قرار گرفته و حالت‌های عملیاتی با محاسن و معایب‌شان، مورد بحث قرار گرفته‌اند. در مقایسه با تکنیک‌های مختلف دزیمتری سطح دز پایین، حسگرهای مبتنی بر FGMOS به طور فزاینده‌ای با توجه به کاربردهای یکپارچه‌ای مانند پرتودرمانی درون‌تنی و دزیمتری پرتوهای شغلی، در حال بررسی و بهبود هستند، در حالی که دیودهای سیلیکونی و تکثیرکننده‌های نوری هنوز هم انتخاب ارجح برای اندازه‌گیری سطح دز بالا می‌باشند. در مورد آشکارسازهای ذرات، نمایشگرهای پرتو مبتنی بر SRAM با توجه به سهولت ادغام CMOS و ذخیره‌سازی حافظه، نسبت به بقیه ارجحیت دارند. با این حال، در آینده، هنگامی که روش‌هایی برای ادغام سه بعدی روی تراشه توسعه یابد، حافظه‌های فلش سه بعدی می‌توانند گزینه مناسبی باشند. علاوه بر این، در زمان‌های اخیر شاهد ظهور دستگاه‌های نیمه‌رسانای جدید و فناوری‌های حافظه، در نتیجه تلاش‌های علمی مستمر بوده‌ایم [۵۶]. اخیراً دستگاه‌های فوتونیک سیلیکونی نیز برای پی بردن به اثرات تابش آزمایش شده‌اند [۵۷]. دزیمترهای پرتو مبتنی بر دستگاه‌های دیود سیلیکونی، فوتودیود سیلیکونی و ماسفت با ساختارهای مسطح (FGMOS, FOXFET, RADFET) و SRAM در حال حاضر به خوبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما همچنان عملکرد آن‌ها را می‌توان در آینده با بازخوانی الکترونیکی بهتر، بهبود بخشید. با این حال، این امر به بررسی بیشتر، برای کشف پتانسیل و محدودیت‌های احتمالی این دستگاه‌ها نیاز دارد.

۷ - مراجع:

- [۱] Matsumoto T, Yamaguchi K, Yanagisawa R, Kubodera K, Arai Y, Makino T, Ohshima T, Sakai M, Matsumura A, Kada W. Development of a SiC semiconductor-based dosimeter for evaluating clinical dose distribution in carbon ion cancer therapy fields. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. ۲۰۲۳ Sep ۱;۵۴۲:۱۵۱.
- [۲] Karmakar A, Wang J, Prinzie J, De Smedt V, Leroux P. A review of semiconductor based ionising radiation sensors used in Harsh radiation environments and their applications. *Radiation*. ۲۰۲۱ Aug ۲۰;۱(۳):۱۹۴-۲۱۷.
- [۳] Rossin, A.D. Dosimetry for Radiation Damage Studies. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۶۴, 11, ۱۳۰-۱۳۶. doi:۱۰.۱۱۰۹/TNS۲,۱۹۶۴,۴۳۱۵۴۸۳.
- [۴] Kloepper, R.M. Neutron and Gamma-Ray Rate Sensitivities of Several Dynamic Detectors Used in Radiation Effects. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۶۴, 11, ۱۳۷-۱۴۴.
- [۵] Beezhold, W.; Beutler, D.; Garth, J.; Griffin, P. A review of the ۴۰-year history of the NSREC'S dosimetry and facilities session (۱۹۶۳-۲۰۰۳). *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۳, 50, ۶۳۵-۶۵۲.
- [۶] Hester, D.L.; Glower, D.D.; Overton, L.J. Use of Ferroelectrics for Gamma-Ray Dosimetry. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۶۴, 11, ۱۴۵-۱۵۴.
- [۷] Birdsall, R.L.; Binder, D.; Peffley, W.M. A Strain Gage Dosimeter for Pulsed Radiation Environment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۶۸, ۱۵, ۳۴۶-۳۴۹.
- [۸] Sukis, D.R. Thermoluminescent Properties of CaF₂: Dy TLD'S. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۷۱, 18, ۱۸۵-۱۸۹.
- [۹] Wrobel, T.F.; Berger, R.A. Silicon Calorimeter System for Gamma and Electron-Beam Radiation Dosimetry. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۷۵, ۲۲, ۲۳۱۴-۲۳۱۸.



- [۱۰] Adams, L.; Holmes-Siedle, A. The Development of an MOS Dosimetry Unit for Use in Space. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۷۸, ۲۵, ۱۶۰۷-۱۶۱۲.
- [۱۱] Zoutendyk, J.A.; Malone, C.J. Field Funneling and Range Straggling in Partially Depleted Silicon Surface-Barrier Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۴, 31, ۱۱۰۱-۱۱۰۵.
- [۱۲] Brucker, G.J.; Stassinopoulos, E.G.; Van Gunten, O.; August, L.S.; Jordan, T.M. The Damage Equivalence of Electrons, Protons, and Gamma Rays in MOS Devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۲, 29, ۱۹۶۶-۱۹۶۹.
- [۱۳] Stapor, W.J.; August, L.S.; Wilson, D.H.; Oldham, T.R.; Murray, K.M. Proton and Heavy-Ion Radiation Damage Studies in MOS Transistors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۵, 32, ۴۳۹۹-۴۴۰۴.
- [۱۴] Rosenfeld, A.; Carolan, M.; Kaplan, G.; Allen, B.; Khivrich, V. MOSFET dosimeters: the role of encapsulation on dosimetric characteristics in mixed gamma-neutron and megavoltage X-ray fields. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۹۵, 42, ۱۸۷۰-۱۸۷۷.
- [۱۵] O'Connell, B.; Conneely, C.; McCarthy, C.; Doyle, J.; Lane, W.; Adams, L. Electrical performance and radiation sensitivity of stacked PMOS dosimeters under bulkbias control. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۹۸, 45, ۲۶۸۹-۲۶۹۴.
- [۱۶] Scheick, L.; McNulty, P.; Roth, D. Dosimetry based on the erasure of floating gates in the natural radiation environments in space. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۹۸, 45, ۲۶۸۱-۲۶۸۸.
- [۱۷] Martin, M.; Roth, D.; Garrison-Darrin, A.; McNulty, P.; Andreou, A. FGMOS dosimetry: Design and implementation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۱, 48, ۲۰۵۰-۲۰۵۵.
- [۱۸] Zoutendyk, J.A.; Malone, C.J.; Smith, L.S. Experimental Determination of Single-Event Upset (SEU) as a Function of Collected Charge in Bipolar Integrated Circuits. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۴, 31, ۱۱۶۷-۱۱۷۴.
- [۱۹] Farrell, G.E.; McNulty, P.J. Microdosimetric Aspects of Proton-Induced Nuclear Reactions in Thin Layers of Silicon. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۲, 29, ۲۰۱۲-۲۰۱۶.
- [۲۰] Rosenfeld, A. MOSFET Dosimetry on Modern Radiation Oncology Modalities. *Radiat. Prot. Dosim.* ۲۰۰۲, 101, ۳۹۳-۳۹۸. *Radiation* ۲۰۲۱, 1 ۲۱۳
- [۲۱] Fleetwood, D.M. Radiation Effects in a Post-Moore World. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۲۱, 78, ۵۰۹-۵۴۵.
- [۲۲] Benedetto, J.M.; Boesch, H.E.; McLean, F.B.; Mize, J.P. Hole Removal in Thin-Gate MOSFETs by Tunneling. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۵, 32, ۳۹۱۶-۳۹۲۰.
- [۲۳] Saks, N.S.; Ancona, M.G.; Modolo, J.A. Generation of Interface States by Ionizing Radiation in Very Thin MOS Oxides. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۸۶, 33, ۱۱۸۵-۱۱۹۰.
- [۲۴] Dodd, P.E.; Shaneyfelt, M.R.; Schwank, J.R.; Felix, J.A. Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۰, 57, ۱۷۴۷-۱۷۶۳.
- [۲۵] Dodd, P.; Shaneyfelt, M.; Felix, J.; Schwank, J. Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۴, 51, ۳۲۷۸-۳۲۸۴.
- [۲۶] Stassinopoulos, E.; Raymond, J. The space radiation environment for electronics. *Proc. IEEE* ۱۹۸۸, 76, ۱۴۲۳-۱۴۴۲.
- [۲۷] Barth, J.; Dyer, C.; Stassinopoulos, E. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۳, 50, ۴۶۶-۴۸۲.
- [۲۸] Normand, E. Single-event effects in avionics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۹۶, 43, ۴۶۱-۴۷۴.
- [۲۹] Dunn, T.S.; Williams, J.L. Comparison of Cobalt-۶۰ and Electron Accelerators for Radiation Sterilization. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۷۹, 26, ۱۷۷۶-۱۷۸۳.
- [۳۰] Piroué, P.A. Radiation Detectors in High Energy Physics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۶۶, 13, ۵۴-۵۹. doi:۱۰.۱۱۰۹/TNS.۱۹۶۶.۴۳۲۴۳۳۰.



- [۳۱] Bruzzi, M. Radiation damage in silicon detectors for high-energy physics experiments. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۱, 48, ۹۶۰-۹۷۱.
- [۳۲] Oldham, T.; McLean, F. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۳, 50, ۴۸۳-۴۹۹.
- [۳۳] Meisenheimer, T.; Fleetwood, D. Effect of radiation-induced charge on $1/f$ noise in MOS devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۱۹۹۰, 37, ۱۶۹۶-۱۷۰۲.
- [۳۴] Fleetwood, D.; Meisenheimer, T.; Scofield, J. $1/f$ noise and radiation effects in MOS devices. *IEEE Trans. Electron Devices* ۱۹۹۴, 41, ۱۹۵۳-۱۹۶۴.
- [۳۵] Baumann, R. Radiation-induced soft errors in advanced semiconductor technologies. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* ۲۰۰۵, 5, ۳۰۵-۳۱۶.
- [۳۶] Moll, M. Displacement Damage in Silicon Detectors for High Energy Physics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۸, 65, ۱۵۶۱-۱۵۸۲.
- [۳۷] Rizzolo, S.; Le Roch, A.; Marcelot, O.; Corbière, F.; Paillet, P.; Gaillardin, M.; Magnan, P.; Goiffon, V. High Displacement Damage Dose Effects in Radiation Hardened CMOS Image Sensors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۲۰, 67, ۱۲۵۶-۱۲۶۲.
- [۳۸] Neutron-Induced Single Event Upset (SEU) FAQ. Microsemi Corporation.
- [۳۹] Cisco ۱۲,۰۰۰ Single Event Upset Failures Overview and Work Around Summary. Cisco Systems.
- [۴۰] Ziegler, J.; Puchner, H. *SER-History, Trends and Challenges: A Guide for Designing with Memory ICs*; Cypress: San Jose, CA, USA, ۲۰۰۴.
- [۴۱] Frost, C. When the Chips Are down. Neutron Detection with Micro-Pattern Gaseous Detectors, CERN.
- [۴۲] Microsoft Finds Underwater Datacenters are Reliable, Practical and Use Energy Sustainably. Microsoft Corporation.
- [۴۳] Ravotti, F. Dosimetry Techniques and Radiation Test Facilities for Total Ionizing Dose Testing. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۸, 65, ۱۴۴۰-۱۴۶۴.
- [۴۴] Kasahara, S.; Mitani, T.; Ogasawara, K.; Takashima, T.; Hirahara, M.; Asamura, K. Application of single-sided silicon strip detector to energy and charge state measurements of medium energy ions in space. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.* ۲۰۰۹, 603, ۳۵۵-۳۶۰.
- [۴۵] Havranek, M.; Benka, T.; Hejtmanek, M.; Janoska, Z.; Kafka, V.; Kopecek, J.; Kuklova, M.; Marcisovska, M.; Marcisovsky, M.; Neue, G.; et al. MAPS sensor for radiation imaging designed in ۱۸۰ nm SOI CMOS technology. *J. Instrum.* ۲۰۱۸, 13, C۰۶۰۰۴.
- [۴۶] Wong, W.; Aloyz, J.; Ballabriga, R.; Campbell, M.; Kremastiotis, I.; Llopart, X.; Poikela, T.; Sriskaran, V.; Tlustos, L.; Turecek, D. Introducing Timepix^۲, a frame-based pixel detector readout ASIC measuring energy deposition and arrival time. *Radiat. Meas.* ۲۰۲۰, 131, ۱۰۶۲۳۰.
- [۴۷] Damulira, E.; Yusoff, M.N.S.; Omar, A.F.; Mohd Taib, N.H. A review: Photonic devices used for dosimetry in medical radiation. *Sensors* ۲۰۱۹, 19, ۲۲۲۶.
- [۴۸] Zhang, L.H.; Platt, S.P.; Edwards, R.; Allabush, C. In-situ neutron dosimetry for single-event effect accelerated testing. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۹, 56, ۲۰۷۰-۲۰۷۶.
- [۴۹] Duan, Y.; Yao, Y.; Li, Z.; Zhou, J.; Huang, P.; Gao, W. SENSROC^{۱۲}: A Four-Channel Binary-Output Front-End Readout ASIC for Si-PIN-Based Personal Dosimeters. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۹, 66, ۱۹۷۶-۱۹۸۳. *Radiation* ۲۰۲۱, 1 ۲۱۴
- [۵۰] Becker, H.N.; Farr, W.H.; Zhu, D.Q. Radiation Response of Emerging High Gain, Low Noise Detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۰۷, 54, ۱۱۲۹-۱۱۳۵.
- [۵۱] Bertuccio, G.; Puglisi, D.; Macera, D.; Di Liberto, R.; Lamborizio, M.; Mantovani, L. Silicon carbide detectors for in vivo dosimetry. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۴, 61, ۹۶۱-۹۶۶.



- [۵۲] Chen, X.J.; Johnson, E.B.; Staples, C.J.; Chapman, E.; Alberghini, G.; Benton, E.; Christian, J.F. Space Dosimeters Based on CMOS SSPM Technology. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۰, 57, ۳۴۵۰-۳۴۵۵.
- [۵۳] Chen, X.J.; Johnson, E.B.; Staples, C.J.; Fernandez, D.; Podolsky, M.; Vogel, S.; Christian, J.F. Effects of Proton Radiation on Noise Performance in Solid-State Photomultipliers. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۶, ۶۳, ۱۱۰۹-۱۱۱۶.
- [۵۴] Yuan, F.; Zhang, Z.; Wang, J.C.; Pan, L.; Xu, J.; Lai, C.S. Total ionizing dose (TID) effects of g ray radiation on switching behaviors of Ag/AlOx/Pt RRAM device. *Nanoscale Res. Lett.* ۲۰۱۴, ۹, ۴۵۲.
- [۵۵] Abunahla, H.; Mohammad, B.; Mahmoud, L.; Darweesh, M.; Alhawari, M.; Jaoude, M.A.; Hitt, G.W. MemSens: Memristor-Based Radiation Sensor. *IEEE Sens. J.* ۲۰۱۸, 18, ۳۱۹۸-۳۲۰۵.
- [۵۶] Li, Y.; Porter, W.M.; Ma, R.; Reynolds, M.A.; Gerbi, B.J.; Koester, S.J. Capacitance-Based Dosimetry of Co-۶۰ Radiation Using Fully-Depleted Silicon-on-Insulator Devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۵, 62, ۳۰۱۲-۳۰۱۹.
- [۵۷] Li, Y.; Chaganti, V.R.S.K.; Reynolds, M.A.; Gerbi, B.J.; Koester, S.J. Demonstration of a Passive Wireless Radiation Detector Using Fully-Depleted Silicon-on-Insulator Variable Capacitors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* ۲۰۱۷, 64, ۵۴۴-۵۴۹.

شبیه سازی لامپ پرتو ایکس صنعتی و دزیمتر کامپوزیت با استفاده از Geant4 (کد مقاله :

(۱۵۰۵)

کیوانی، فریده^۱ - غلامزاده، لیلا^۱ - ملکی، شهریار^۲ - کاشیان، صدیقه^۲

۱. دانشگاه یزد، دانشکده فیزیک، هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

تحقیق و توسعه در زمینه آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای ایکس با کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانو ذرات اکسید فلزی سنگین مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش، شبیه‌سازی اندرکنش پرتوهای ایکس با کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانو ذرات بیسموت اکسید (Bi_2O_3) با نرم‌افزار Geant4 انجام شد. مدل‌سازی شامل ساختار سیلندری ۳ میلی‌متری بود. تأثیر ولتاژ لامپ پرتو ایکس و درصد وزنی نانو ذرات بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات بیسموت اکسید میزان جذب فوتون‌ها را افزایش داده و عملکرد دزیمتری را بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: لامپ پرتو ایکس، دزیمتر، کامپوزیت‌های پلیمری، Geant4

Simulation of industrial X-ray tube and composite dosimeter using Geant4.

Keyvani, Farideh^{۱*}, Gholamzadeh, Leila^۱, Malekie Shahryar^۲, Kashian, Sedigheh^۲

۱. University of Yazd, Faculty of Physics, Department of Physics

۲. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School

Abstract:

Research and development in X-ray detection and dosimetry using polymer composites containing heavy metal oxide nanoparticles have gained significant attention. In this study, the interaction of X-rays with polymer composites containing bismuth oxide nanoparticles (Bi_2O_3) was simulated using Geant4. The model consisted of a 3 mm cylindrical structure. The effects of X-ray tube voltage and different weight percentages of nanoparticles were examined. The results showed that adding bismuth oxide nanoparticles increased photon absorption and improved dosimetric performance.

Key words: X-ray tube, Dosimeter, Polymer composites, Geant4.



۱ - مقدمه:

پیشرفت فناوری در زمینه آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای یون‌ساز، نیازمند توسعه مواد جدید با حساسیت و دقت بالا است. در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات اکسید فلزی سنگین، به دلیل خواص منحصربه‌فرد از جمله قابلیت پردازش آسان، انعطاف‌پذیری و هزینه پایین، به گزینه‌ای مطلوب در حوزه دزیمتری و آشکارسازی پرتوهای ایکس تبدیل شده‌اند. این مواد علاوه بر فراهم کردن امکان خوانش لحظه‌ای، در کاربردهای پزشکی و صنعتی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این کامپوزیت‌ها، سطح مقطع جذب فوتونی پایین آن‌ها است که حساسیت محدودی در برابر پرتوهای ایکس ایجاد می‌کند [۱].

برای رفع این مشکل، استفاده از نانوذرات فلزی سنگین مانند بیسموت اکسید (Bi_2O_3) در ساختار کامپوزیت‌های پلیمری مثل سیلیکون پیشنهاد شده است. این نانوذرات با افزایش سطح مقطع جذب فوتونی و بهبود اندرکنش‌های تابشی، دقت و حساسیت دزیمتری را افزایش می‌دهند [۲].

از سوی دیگر، شبیه‌سازی محاسباتی یک سیستم رادیوگرافی و رادیولوژی تشخیصی پرتو ایکس، نقش مهمی در کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند. این روش امکان بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر دزیمتری، از جمله ولتاژ لامپ، فاصله شیء تا منبع، نوع و ضخامت دزیمتر پرتو ایکس و سایر عوامل، را بدون محدودیت‌های مرتبط با روش‌های آزمایشی فراهم می‌سازد. در این زمینه، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو $4Geant$ به عنوان یکی از قدرتمندترین ابزارهای شبیه‌سازی انتقال پرتوهای تابشی شناخته می‌شود.

پژوهشهای متعددی در زمینه شبیه‌سازی لامپ پرتو ایکس صنعتی انجام شده، ناظمی و همکارانش روشی نوین برای شبیه‌سازی کامل یک سیستم دیجیتال رادیوگرافی صنعتی شامل لامپ پرتو ایکس و صفحه تصویربرداری فسفر ذخیره‌ای (CR) با استفاده از کد MCNPX ارائه کرده است. لامپ صنعتی با ولتاژ ۳۰۰ کیلوولت و جریان ۵ میلی‌آمپر، و صفحه تصویربرداری به صورت یک ساختار سه‌لایه مدل‌سازی کرده است. دز جذب‌شده در لایه فسفری صفحه CR محاسبه و برحسب گری محاسبه کرده و کارایی روش پیشنهادی را در شبیه‌سازی سیستم‌های تصویربرداری پرتو ایکس تأیید کرد [۳]. در پژوهشی دیگر تأثیر تغییر ولتاژ لامپ پرتو ایکس با آند تنگستنی بر دز یونیزان کل (TID) در فیبرهای اپتیکی آلاییده با فسفر را بررسی کرده‌اند. نتایج شبیه‌سازی، با استفاده از $4Geant$ ، نشان داده است که افزایش ولتاژ از ۳۰ به ۲۲۵ کیلوولت با جریان ثابت ۲۰ میلی‌آمپر، دز به جای گذاشته شده را ۴/۵ برابر افزایش می‌دهد. همچنین، نشان داد که ۹۰٪ انرژی به جای گذاشته شده ناشی از فوتون‌هایی با انرژی کمتر از ۳۰ کیلوالکترون‌ولت است. این یافته‌ها کارایی فیبرهای فسفوسیلیکاتی را برای دزیمتری پرتو ایکس در ولتاژهای مختلف تأیید می‌کنند [۴]. در این مطالعه فرآیند شبیه‌سازی یک سیستم پرتو ایکس را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم کرد: شبیه‌سازی لامپ پرتو ایکس و شبیه‌سازی دزیمتر پرتو ایکس بر پایه ماتریس پلیمری سیلیکون $2RTV$ و تأثیر ترکیب نانوذرات اکسید فلزی در دزیمتر پرتو ایکس مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است.

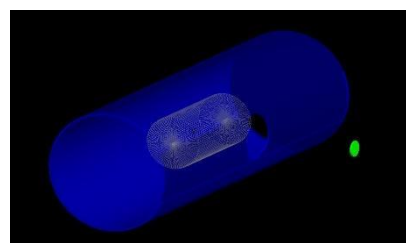
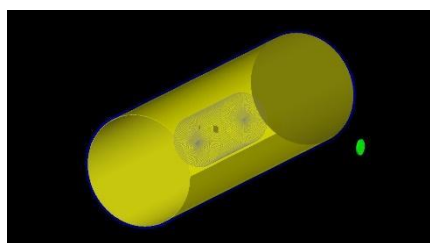
۲ - روش کار:

۲-۱- طراحی و شبیه‌سازی تیوب پرتو ایکس

در این مطالعه، از نرم‌افزار $4Geant$ برای شبیه‌سازی برهمکنش پرتوهای ایکس با کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانو ذرات اکسید فلزی استفاده شده است. طراحی هندسه تیوب پرتو ایکس بر اساس داده‌های معتبر موجود در منابع علمی انجام شده است [۳].



در این طراحی، یک صفحه تنگستنی با چگالی 3 g/cm^3 در زاویه $19/3^\circ$ درجه نسبت به محور Y به عنوان آند تیوب در نظر گرفته شد. کاتد تیوب که بعنوان منبع الکترونی در نظر گرفته شد، دارای یک سطح مستطیلی به ابعاد $6/87 \text{ mm} \times 2/5$ بوده مطابق با استاندارد IEC ۶۰۳۳۶، نقطه کانونی مؤثر را ایجاد می‌کند. لامپ پرتو ایکس به صورت یک استوانه خلا با شعاع 5 cm و ارتفاع 10 cm و با چگالی 3 g/cm^3 در $1/25 \times 10^{-5}$ در نظر گرفته شد تا برهمکنش فوتون‌های تولیدی درون محفظه به حداقل برسد. کاتد و آند درون این استوانه خلا قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، محفظه‌ی خلا درون استوانه‌های از جنس بریلیوم با ضخامت 1 mm در نظر گرفته شد که معادل فیلتراسیون ذاتی لامپ است. یک استوانه فولادی با شعاع $11/5 \text{ cm}$ و طول 70 cm به عنوان محافظ خارجی لامپ مورد استفاده قرار گرفت. پنجره خروجی نیز به صورت یک دایره‌ای با شعاع $4/5 \text{ cm}$ بر روی محافظ خارجی لامپ در نظر گرفته شد تا فوتونهای تولیدی بدون برهمکنش با استوانه‌ی فولادی خارج شوند. نمایی از هندسه آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح شماتیک از هندسه‌ی چشمه پرتوی ایکس

در این شبیه‌سازی، منبع پرتو ایکس بر اساس شتاب‌دهی الکترون‌ها به سمت یک هدف فلزی مدل‌سازی شده است. جریان لامپ برابر با $0/5$ میلی آمپر در نظر گرفته شده است. به منظور شبیه‌سازی واقعیت عملکرد لامپ پرتو ایکس، اثر ریپل ولتاژ در نظر گرفته شد. مقدار ریپل، که بیانگر نوسانات ولتاژ در منبع تغذیه لامپ است، با مقدار 5 درصد تنظیم شده و به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$(1) \quad (\% \text{ فاکتور ریپل}) = 100 \times \frac{kV_{\max} - kV_{\min}}{kV_{\max}}$$

بر این اساس، توزیع انرژی الکترون‌ها در بازه‌ای مشخص و با گام‌های 1 کیلو الکترون‌ولت تغییر می‌کند. حداقل انرژی این الکترون‌ها از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$(2) \quad E_{\max} = E_{\min} + \left(\frac{(\% \text{ فاکتور ریپل})}{100} \right) \times E_{\max}$$

الکترون‌های اولیه به طور تصادفی در سطح چشمه و با توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود. جهت حرکت الکترون‌ها موازی با محور X در نظر گرفته شده است. انرژی الکترون‌ها به طور تصادفی و با لحاظ اثر ریپل از طیف انرژی مشخص شده انتخاب می‌شود.

فوتون‌های حاصل از برخورد الکترون‌ها به هدف، بر اساس یک توزیع احتمالاتی مناسب تولید می‌شوند.



۲-۲- طراحی و ساخت نانوکامپوزیت‌ها

برای طراحی کامپوزیت‌ها، نمونه‌های سیلندری شکل با قطر ۳ cm و ضخامت ۳mm ساخته شدند. این نمونه‌ها از یک ماتریس پلیمری سیلیکون ۲RTV با چگالی ۱/۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و نانو ذرات بیسموت اکسید با چگالی $39/8 \text{ g/cm}^3$ و اندازه ذرات ۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند. برای محاسبه چگالی کامپوزیت‌ها ابتدا چگالی تئوری با استفاده از میانگین وزنی محاسبه می‌شود:

$$(3) \quad \rho_{th} = \frac{1}{(w_{BiO}/\rho_{BiO}) + \left(\frac{1-w_{BiO}}{\rho_{RTV2}}\right)}$$

که w_{BiO} ، ρ_{BiO} ، ρ_{RTV2} به ترتیب برابر با چگالی پلیمر سیلیکون ۲RTV، چگالی بیسموت اکسید و درصد وزنی بیسموت اکسید است. سپس، با اعمال فاکتور اصلاحی ساختاری، چگالی مؤثر به دست می‌آید:

$$(4) \quad \rho_{eff} = \rho_{th} \times f_{\text{تخلخل}} \times f_{\text{آگلومراسیون}} \times f_{\text{سطح مشترک}} \times f_{\text{اثر اندازه نانو ذرات}}$$

این فاکتورها به ترتیب حفره‌های میکروسکوپی، کلوخه شدن نانو ذرات، برهم‌کنش سطحی و اثر اندازه نانو ذرات با ماتریس پلیمری را مدل‌سازی می‌کنند.

نمونه‌ها با درصدهای وزنی متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد از نانو ذرات بیسموت اکسید ساخته شدند و در فاصله ۳۰ cm از مبدأ مختصات و در راستای محور X مقابل پنجره خروجی محافظ فولادی قرار گرفتند.

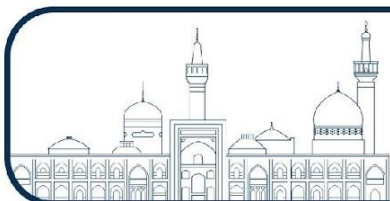
۲-۳- فیزیک مورد استفاده در شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی دقیق اندرکنش‌های پرتو-ماده، از فیزیک‌لیست استاندارد ۴Geant با استفاده از مدل Livermore استفاده شده است. این مدل به‌طور ویژه برای شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های فوتون و الکترون در انرژی‌های پایین بهینه شده‌اند و به همین دلیل برای شبیه‌سازی لامپ پرتو ایکس بسیار مناسب می‌باشند. برای الکترون‌های آزاد شده در طول تعامل، فرآیندهای پراکندگی چندگانه الکترون، یونیزاسیون، تابش ترمزی لحاظ شده‌است. برای فوتون‌های تولید شده توسط لامپ پرتو ایکس، فرآیندهای فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، تولید زوج الکترون-پوزیترون، پراکندگی ریلی (الاستیک) در نظر گرفته شده‌است. همچنین، برای پوزیترون‌های تولید شده، علاوه بر فرآیندهای مشابه الکترون‌ها، فرآیند نابودی زوج نیز در نظر گرفته شده است. جهت ارتقای دقت شبیه‌سازی، فرآیندهای ثانویه فلوئورسانس پرتو ایکس، انتشار الکترون‌های اوژه، یونیزاسیون ناشی از ذرات سنگین (PIXE) که برای بررسی رفتار تابش پرتو ایکس در کامپوزیت‌ها می‌تواند مفید باشد نیز فعال شده‌اند.

به‌منظور بهینه‌سازی زمان محاسبات در کنار حفظ دقت مناسب، آستانه انرژی برای تولید ذرات ثانویه ناحیه کامپوزیت پلیمری به دلیل حساسیت بالای آن برای فوتون‌ها، الکترون‌ها و پوزیترون‌ها ۰/۰۰۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ناحیه خلأ داخل لوله دارای آستانه تولید ذرات ثانویه برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها ۰/۰۱ میلی‌متر به منظور تسریع شبیه‌سازی تنظیم شده‌اند. و در ناحیه شیلد فولادی ۰/۰۵ میلی‌متر به‌منظور ایجاد تعادل بین دقت و سرعت در ناحیه حفاظتی لحاظ شده است.

۳- نتایج:

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی لامپ پرتو ایکس و اندرکنش آن با کامپوزیت‌های پلیمری ارائه و مورد تحلیل قرار می‌گیرد.



در این مطالعه، شبکه‌ای سه‌بعدی برای توزیع دز طراحی شد که در آن مقدار دز در هر سلول مش (voxel) به‌وسیله کتابخانه جینت G⁴PSDoseDeposit ذخیره می‌شود که شامل ۳۰×۳۰ سلول در صفحه XY و ۱۰ سلول در راستای Z است. هر پیکسل دارای ابعاد ۱×۱×۰/۳ mm است که امکان بررسی توزیع موضعی دز در حجم آشکارساز را فراهم می‌کند و دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد.

واحد دز جذب شده در شبیه‌سازی بر حسب 3MeV/cm می‌باشد. این واحد با استفاده از رابطه ۵ به دز بر حسب گری (Gy)، تبدیل می‌شود [۳]. همچنین، تعداد الکترونهای گسیل شده از منبع لامپ پرتو ایکس برای محاسبه فاکتور مقیاس نیز از رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$(5) \quad Dose(Gy) = \left(\frac{MeV/cm^3}{\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) \times 6.24 \times 10^{19}} \right)$$

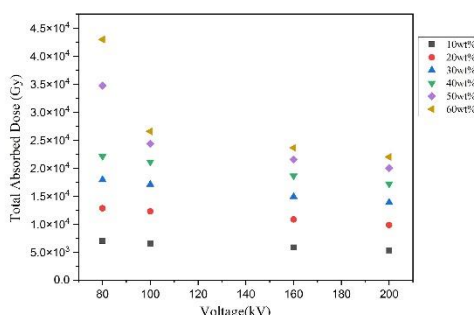
$$(6) \quad \text{تعداد الکترونها} = \left(\frac{\text{زمان پرتو دهی} \times \text{جریان} \times 10^{19}}{1.6} \right)$$

این کامپوزیت‌ها تحت تابش پرتو ایکس در ولتاژهای ۸۰، ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوولت قرار گرفتند و عملکرد دزیمتری آن‌ها در درصدهای وزنی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. شکلهای ۲ و ۳ مقادیر دز کل جذب شده در حجم کامپوزیت را ارائه می‌کند.

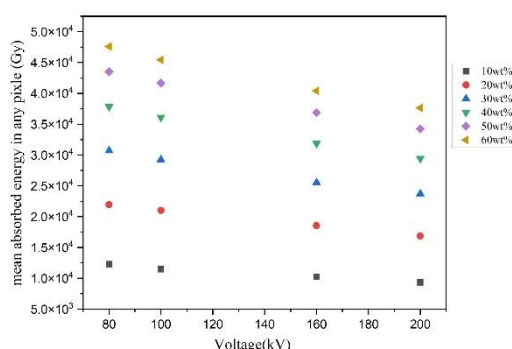
شکل ۲ نشان می‌دهد که رابطه معکوسی بین پتانسیل الکتریکی اعمال شده (kV) و میزان دز جذبی (Gy) در تمامی نمونه‌های کامپوزیتی وجود دارد. با افزایش پتانسیل الکتریکی از ۸۰ کیلوولت به ۲۰۰ کیلوولت، کاهش قابل ملاحظه‌ای در میزان دز جذب شده مشاهده می‌گردد.

علاوه بر این، در هر پتانسیل الکتریکی، با افزایش درصد نانوذرات، میزان دز جذبی افزایش یافته است.

شکل ۳ نشان‌دهنده میانگین انرژی جذب شده در هر پیکسل (Gy) برحسب ولتاژ (kV) برای کامپوزیت‌های با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات است. مشابه نمودار قبلی، با افزایش ولتاژ از ۸۰ به ۲۰۰ کیلوولت، میانگین انرژی جذب شده در هر پیکسل برای تمام درصدهای وزنی نانوذرات کاهش می‌یابد. در هر ولتاژ مشخص، با افزایش درصد وزنی نانوذرات از ۱۰٪ به ۶۰٪، میزان انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. شیب کاهش انرژی جذب شده با افزایش ولتاژ در نمونه‌های با درصد وزنی بالاتر، بیشتر است. به عبارت دیگر، تأثیر افزایش ولتاژ بر کاهش انرژی جذب شده در نمونه‌های با درصد بالاتر نانوذرات، محسوس‌تر است.



شکل ۲: دز جذبی کل در حجم کامپوزیت برحسب واحد گری در ولتاژ ۸۰، ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوولت کامپوزیت‌های پلیمر سیلیکون و درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ از نانوذرات بیسموت اکسید.



شکل ۳: میانگین دز جذب شده در هر سلول از حجم کامپوزیت بر حسب (Gy) در ولتاژ ۸۰، ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ کیلوولت کامپوزیت های پلیمر سیلیکون و درصد های وزنی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ از نانوذرات بیسموت اکسید.

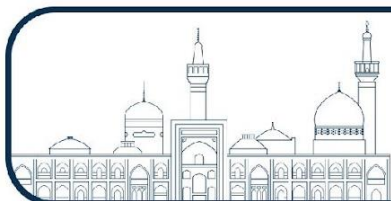
۴- بحث و نتیجه گیری:

نتایج این پژوهش بیانگر آن است که افزایش درصد وزنی نانوذرات در ساختار کامپوزیت به طور مستقیم موجب افزایش جذب انرژی پرتوهای یونیزان می گردد. این رابطه معنادار نشان می دهد که کنترل ترکیب نانوساختار کامپوزیت ها می تواند به عنوان رویکردی مؤثر در بهینه سازی عملکرد حفاظتی این مواد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، کاهش میزان جذب انرژی در ولتاژهای بالاتر پرتو ایکس به خوبی با تغییر در برهمکنش های غالب برهمکنش فوتون-ماده قابل توجیه است؛ به طوری که در انرژی های پایین، برهمکنش فوتوالکتریک غالب بوده و منجر به جذب بیشتر فوتون ها می شود، در حالی که با افزایش انرژی، پراکندگی کامپتون به عنوان برهمکنش غالب ظاهر شده و باعث کاهش جذب می گردد.

این یافته ها چشم انداز روشنی برای طراحی و توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته با خواص حفاظتی بهبود یافته ارائه می دهد. به ویژه در کاربردهایی نظیر سامانه های حفاظتی در برابر تابش های یونیزان، دزیمتری و تصویربرداری پزشکی با کنتراست بالا، و رادیوتراپی هدفمند، بهره گیری از چنین نانوساختارهایی می تواند منجر به ارتقاء کارایی و ایمنی گردد.

۵- مراجع:

- [۱] Al-Sulaiti, L. A., Salah, B., & Ayesh, A. I. (۲۰۱۹). Investigation of flexible polymer-TiO₂/nanocomposites for x-ray detector applications. *Applied Surface Science*, ۴۸۹, ۳۵۱-۳۵۷.
- [۲] Demirel, İbrahim Yücel, Haluk (۲۰۲۴). Development of a flexible composite based on vulcanized silicon casting with bismuth oxide and characterization of its radiation shielding effectiveness in diagnostic X-ray energy range and medium gamma-ray energies. *Nuclear Engineering and Technology*, ۲۳(۲۳), ۲۵۷۰-۲۵۷۵.
- [۳] Nazemi, E., Movafeghi, A., Rokrok, B., & Dastjerdi, M. H. C. (۲۰۱۸). A Novel Method for Predicting Pixel Value Distribution Non-Uniformity Due to Heel Effect of X-ray Tube in Industrial Digital Radiography Using Artificial Neural Network. *Journal of Nondestructive Evaluation*, ۳۸(۱), ۳.
- [۴] Meyer, A., Lambert, D., Morana, A., Paillet, P., Boukenter, A., & Girard, S. (۲۰۲۳). Simulation and Optimization of Optical Fiber Irradiation with X-rays at Different Energies. *Radiation*, ۳(۱), ۵۸-۷۴.



کاربرد ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس در اندازه گیری جریان چندفازی (کد مقاله :

(۱۵۰۸

شریف‌زاده، محسن - عسکری، مجتبی

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

تصویربرداری با اشعه ایکس کاربرد روزافزونی را در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت تجربه می‌کند. مسئله اندازه‌گیری جریان چندفازی به عنوان یکی از چالش‌های مهم به‌خصوص در صنایع نفت و گاز همچنان مطرح است. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت مولفه‌های مختلف جریان چندفازی از گستره‌ای از تکنیک‌های هسته‌ای و غیرهسته‌ای استفاده می‌شود. در این بین بکارگیری اشعه ایکس به‌منظور ردگیری ذرات توزیع‌شده در سیال به‌عنوان گزینه‌ای نوظهور مطرح است. در این مقاله به بررسی اصول بکارگیری روش مذکور، کاربردهای فعلی آن، چالش‌های پیش‌رو در اجرای آن و جهت‌گیری‌های بالقوه تحقیقات آینده می‌پردازد.

کلمات کلیدی: ردگیری، اشعه ایکس، ذرات، جریان چندفازی، اندازه‌گیری.

Application of X-ray particle tracking in multiphase flow measurement

Sharifzadeh, Mohsen^{*}, Askari, Mojtaba¹

Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute,
Radiation Application Research School.

Abstract:

X-ray imaging is increasingly being applied in various fields, including the industry. Measuring multiphase flow poses a significant challenge, particularly in the oil and gas industries. Various nuclear and non-nuclear techniques are employed to measure the velocity of different components of multiphase flow. Meantime, the use of X-rays to track particles distributed in fluids is emerging as an option. This article reviews the principles of using the method, its current applications, the challenges ahead in its implementation, and potential directions for future research.

Key words: Tracking, X-ray, Particle, Multiphase flow, Measurement.



۱- مقدمه:

جریان‌سنجی سیالات چند فازی نقش مهمی در صنایعی مانند نفت و گاز دارد. در میان تکنیک‌های مختلف مورد استفاده در این حوزه، سرعت سنجی ذرات توزیع‌شده درون سیال با استفاده از اشعه ایکس به عنوان یک روش پیشرفته مطرح است. تصویربرداری اشعه ایکس با هدف ردگیری ذرات شاخص درون سیال چندفازی به عنوان یک روش جایگزین برای رادیویدیاب‌ها مورد استقبال ویژه قرار گرفته است. یکی از مشکلات اساسی در تصویربرداری دوبعدی اشعه ایکس از جریان سیال عبوری مات شدن تصویر است که با استفاده از آشکارسازهای سریع قابل رفع است [۱].

استفاده از باریکه پهن اشعه ایکس جهت تعیین کسر ذرات جامد معلق درون سیال توسط منل و همکاران انجام شد [۲]. از جمله نتایج مهم این تحقیق آن بود که برای کاستن از میزان عدم دقت اندازه‌گیری باید فاصله چشمه و آشکارساز کمینه شود، کمینه ولتاژ و یا بیشینه فاصله شیء از چشمه جهت کاستن از سهم پرتوهای پراکنده مورد استفاده قرار گیرد، از آشکارسازهای با توان نمونه‌برداری سریع استفاده شود، تیوب اشعه ایکس با کمترین اندازه لکه کانونی مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت، اثرات سخت‌شدگی باریکه باید در نظر گرفته شوند. رولز و کارملیت از تصویربرداری رادیوگرافی با اشعه ایکس به منظور اندازه‌گیری رطوبت در مواد متخلخل استفاده کردند [۳]. آنها نشان دادند که با استفاده از تصویربرداری دوبعدی می‌توان با رزولوشن خوب فضایی، زمانی و رطوبت سیال مرطوب در جریان را مورد بررسی قرار داد.

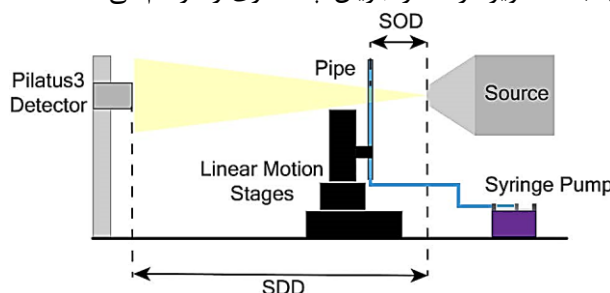
در مطالعه‌ای که توسط سیگر و همکاران صورت پذیرفت مزایا و معایب تصویربرداری دیجیتالی اشعه ایکس در ردگیری ذرات مورد بررسی قرار گرفته است [۴]. در تحقیقاتی دیگر این پژوهشگر و همکارانش نشان دادند با استفاده از ذرات شناور سبک می‌توان سرعت فاز مایع را درون یک ستون حباب‌دار در سه بعد اندازه‌گیری کرد [۵-۷]. با استفاده از تصویربرداری دیجیتالی اشعه ایکس نه تنها مشکلات هزینه بالا و ایمنی پرتوی رفع می‌گردد بلکه این امکان وجود دارد تا با بکارگیری ذرات شاخص با ویژگی‌های ساختاری مناسب نظیر جرم و اندازه اندک در کنار میزان تضعیف مناسب کنتراست حداقلی برای تشخیص این ذرات در تصاویر اخذشده توسط الگوریتم‌های پردازش تصویر فراهم آید. در ردیابی ذرات با استفاده از اشعه ایکس از قدرت نفوذ اشعه ایکس برای تصویربرداری و ردیابی ذرات در رژیم‌های جریان پیچیده استفاده می‌شود که بینش‌هایی را در مورد دینامیک و تعامل فازها در یک سیستم جریان ارائه می‌دهد. در این مقاله و با هدف معرفی روش مذکور بویژه در جریان‌سنجی سیالات چندفازی و مزایا و معایب آن به بررسی اصول بکارگیری روش مذکور، کاربردهای فعلی آن، چالش‌های پیش‌رو در اجرای آن و جهت‌گیری‌های بالقوه تحقیقات آینده می‌پردازد.

۲- اصول عملکردی ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس

اساس عملکرد این روش مبتنی بر استفاده از تصویربرداری اشعه ایکس برای ثبت حرکت ذرات ردیاب معلق در یک سیال است. این تکنیک شامل مراحل زیر است:

تولید و تشخیص اشعه ایکس:

اشعه ایکس با انرژی بالا با استفاده از یک لوله پرتو ایکس یا منبع سنکروترون تولید می‌شود. این اشعه ایکس به سیال مورد بررسی نفوذ می‌کند و امکان ثبت تصاویر ذرات در جریان چند فازی را فراهم می‌کند.



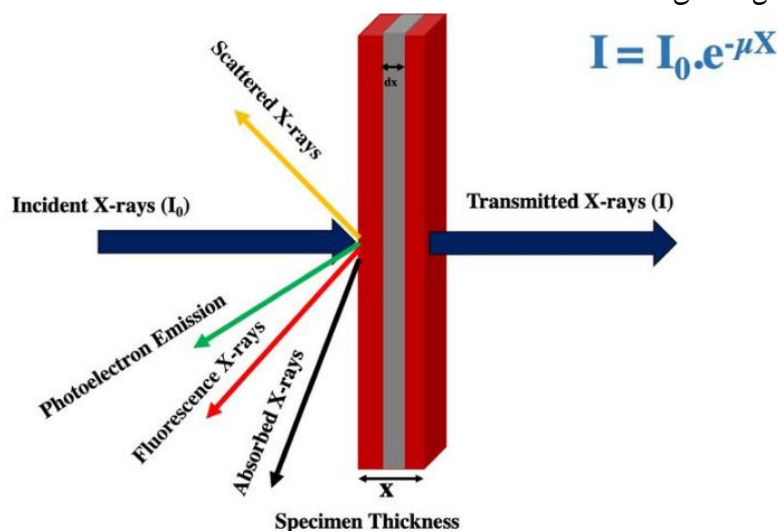
شکل (۱) چیدمان آزمایشگاهی در تصویربرداری ذرات شاخص متحرک با استفاده از اشعه ایکس [۸].



طیف انرژی ایکس تابعی از اختلاف پتانسیل، جنس و زاویه آند، زاویه خروجی تابش اشعه ایکس مورد شمارش و جنس پنجره تیوب است. قانون تضعیف بیر-لمبرت بر عبور تابش ایکس با انرژی مشخص حاکم بوده و به قرار زیر می‌باشد:

$$I = I_0 \exp \left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho l \right] \quad (1)$$

که I شدت پرتو شمارشی توسط آشکارساز است. $\frac{\mu}{\rho}$ ، ρ و l نیز به ترتیب برابر با ضریب تضعیف جرمی، چگالی و طول ماده جاذب است [۹]. ضریب تضعیف جرمی تابعی از انرژی اشعه ایکس و عدد اتمی ماده جاذب است. شماتیکی از برخورد اشعه ایکس با ماده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲) شماتیک برهمکنش اشعه ایکس با ماده جاذب.

۲-۱- داده‌برداری:

آشکارسازهای پر سرعت اشعه ایکس تصاویر ذرات را در فواصل زمانی متوالی می‌گیرند. وضوح فضایی و نرخ فریم پارامترهای مهمی هستند که بر دقت اندازه‌گیری‌ها تأثیر می‌گذارند. الگوریتم‌های ردیابی ذرات:

تکنیک‌های پیشرفته پردازش تصویر، از جمله الگوریتم‌های همبستگی و شناسایی ذرات، برای ردیابی حرکت ذرات در طول زمان استفاده می‌شوند. این ردیابی محاسبه میدان‌های سرعت و ویژگی‌های جریان را تسهیل می‌کند. تحقیق Ou و همکاران (۲۰۲۱) و Booi و همکاران (۲۰۲۰) پیشرفت‌های فنی در تصویربرداری اشعه ایکس و توسعه الگوریتم را روشن می‌کند و دقت و کاربرد این روش را در سیستم‌های چند فازی مختلف افزایش می‌دهد [۱۰ و ۱۱].

۳- کاربردهای ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس

این روش تصویربرداری کاربردهایی را در چندین حوزه به ویژه در مطالعه سیستم‌های سیالاتی پیچیده پیدا کرده است. برخی از زمینه‌های اصلی کاربرد عبارتند از:

۳-۱- مهندسی شیمی:

تکنیک مذکور برای نظارت بر فرآیندهای اختلاط در راکتورها (Kingston و همکاران (۲۰۱۵)، Nadeem و همکاران (۲۰۱۸))، و ارائه بینش در مورد توزیع و سرعت واکنش دهنده‌ها و محصولات (Wu و همکاران (۲۰۲۳)) استفاده می‌شود [۱۲-۱۴].

۳-۲- مهندسی نفت:



این تکنیک برای ارزیابی رفتار مخلوط های نفت-آب-گاز در خطوط لوله (Hu و همکاران (۲۰۱۴)، Yang و همکاران (۲۰۱۵)، کمک به بهینه سازی فرآیندهای استخراج و حمل و نقل (Romanowski و همکاران (۲۰۱۹)، Singh و همکاران (۲۰۱۶)) استفاده می شود/۱۵-۱۸).

۳-۳- مهندسی زیست پزشکی:

روش تصویربرداری با اشعه ایکس برای ردیابی حرکت ذرات دارورسانی در مایعات بیولوژیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Antoine و همکاران (۲۰۱۳) که امکان درک بهتر پراکندگی دارو را در بدن فراهم می کند /۱۹). این کاربردها بر تطبیق پذیری تصویربرداری با استفاده از اشعه ایکس در پرداختن به پدیده های جریان پیچیده در صنایع مختلف تاکید می کنند.

۴- چالش های ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس

علیرغم مزایای تکنیک تصویربرداری با استفاده از اشعه ایکس، این روش با چندین چالش مواجه است که می تواند اثربخشی و پذیرش گسترده آن را محدود کند:

۴-۱- ایمنی و دز پرتوی:

استفاده از اشعه ایکس نگرانی هایی را در مورد قرار گرفتن در معرض تابش هم برای اپراتورها و هم برای افراد ایجاد می کند. تضمین ایمنی در عین حفظ تصویربرداری موثر، مستلزم مدیریت دقیق دز اشعه ایکس است (Chaouki و همکاران (۱۹۹۷)، Vliegenthart و همکاران (۲۰۲۲)، و Van der Sande و همکاران (۲۰۲۳) /۲۰-۲۲).

۴-۲- هزینه های بالای دسترسی:

زیرساخت های مورد نیاز برای تکنیک فوق، از جمله منابع اشعه ایکس و سیستم های تصویربرداری پیشرفته، می تواند بسیار گران باشد و دسترسی موسسات تحقیقاتی کوچکتر را محدود کند.

۴-۳- تحلیل داده پیچیده:

پردازش و تفسیر داده های تصویربرداری با استفاده از اشعه ایکس می تواند محاسباتی فشرده باشد و ممکن است به دانش تخصصی در تجزیه و تحلیل تصویر و دینامیک جریان نیاز داشته باشد و مانعی برای افراد غیر متخصص ایجاد کند. (Kingston و همکاران (۲۰۱۴)، Chen و همکاران (۲۰۱۹) که امکان درک بهتر پراکندگی دارو را در بدن فراهم می کند /۲۳ و ۲۴). پرداختن به این چالش ها برای پذیرش گسترده تر تصویربرداری با استفاده از اشعه ایکس در اندازه گیری جریان چند فازی بسیار مهم است.

۵- مزایا و معایب تصویربرداری اشعه ایکس با روش های مبتنی بر پرتوهای گاما

اشعه ایکس دارای طیف انرژی پیوسته بوده و اغلب به سبب مشکلات عملیاتی با مقادیر انرژی پایین تر از پرتوهای گامای صنعتی و تک انرژی عرضه و در دسترس هستند. در تیوب های اشعه ایکس پرتوهای یونیزان از یک سطح کوچک آند تابش می شوند که در قیاس با چشمه های گامای نقطه ای می توانند منجر به کاهش کیفیت تصاویر شوند. البته این مشکل با کاهش ابعاد این لکه داغ تا حدود زیادی قابل رفع است که قاعدتا به پرداخت هزینه بالاتر نیازمند است. در یک نگاه کلی و پس از مقایسه بن این دو روش می توان مزایا و معایب آنها را در قالب جدول ۱ لیست کرد.



جدول ۱- چکیده مقایسه مزایا و معایب پرتوهای گاما و ایکس در تصویربرداری.

تکنیک گاما	ردگیری ذرات با اشعه ایکس	پارامتر مقایسه
متوسط به پایین	بالا	رزولوشن فضایی
بالا	متوسط	عمق نفوذ
پایین تر	بالا	هزینه
بالا، همراه با پروتکل‌های ایمنی	متوسط، همراه با ملاحظات ایمنی	ایمنی پرتو
سختگیرانه تر		
خوب، اما کندتر در برخی موارد	عالی	ردگیری زمان واقعی
ابعاد بزرگ، سیستم‌های صنعتی	دینامیک سیالات پیچیده	کاربردهای مناسب

در واقع این نوع کاربرد است که پرتو مناسب را مشخص خواهد کرد. درحالی‌که اشعه ایکس به دلیل رزولوشن بهتر جزئیات بیشتری را در ردگیری مسیرهای پیچیده ذرات کوچک نشان می‌دهد اما پرتوهای گاما گزینه بهتری برای سیستم‌های با ابعاد بزرگ در شرایطی است که به رزولوشن‌های آنچنان بالا نیاز نباشد.

۶- مسیرهای آینده در ردگیری ذرات با استفاده از اشعه ایکس

با نگاهی به آینده، چندین حوزه مستلزم کاوش بیشتر برای افزایش قابلیت‌ها و کاربردهای این روش تصویربرداری هستند:
۶-۱- تجمیع با یادگیری ماشین:

استفاده از این فناوری در ادغام با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تجزیه و تحلیل داده‌ها می‌تواند فرآیند ردیابی را ساده کرده و دقت اندازه‌گیری جریان را بهبود بخشد. نگرانی‌هایی را در مورد قرار گرفتن در معرض تابش هم برای اپراتورها و هم برای افراد ایجاد می‌کند. تضمین ایمنی در عین حفظ تصویربرداری موثر، مستلزم مدیریت دقیق دز اشعه ایکس است (Vliegenthart و همکاران (۲۰۲۲)، Cheng و همکاران (۲۰۲۲)، و Cheng و همکاران (۲۰۲۲) [۲۵-۲۷].

۶-۲- توسعه سیستم‌های پرتابل:

پیشرفت‌های فناوری می‌تواند ایجاد سیستم‌های تصویربرداری اشعه ایکس قابل حمل را تسهیل کند و این تکنیک را برای کاربردهای میدانی و آزمایشگاه‌های کوچک‌تر در دسترس‌تر کند (Philip و همکاران (۲۰۰۸)، Strüder و همکاران (۱۹۹۸)، و Zhu و همکاران (۲۰۱۱) [۲۸-۳۰].

۶-۳- تلفیق با دیگر تکنیک‌های اندازه‌گیری:

تحقیقات آینده می‌تواند بر کاربردهای همزمان چند فناوری متمرکز شود، جایی که تصویربرداری اشعه ایکس در تلفیق با سایر تکنیک‌های اندازه‌گیری می‌تواند درک جامعی از دینامیک جریان در مقیاس‌های مختلف ارائه کند. (Biaosheng و همکاران (۲۰۲۴)، Zhaochen و همکاران (۲۰۲۰) [۳۱ و ۳۲].

۷- بحث و نتیجه‌گیری:

ردیابی ذرات شاخص درون سیال چندفازی با استفاده از اشعه ایکس به عنوان ابزاری قدرتمند با کاربردهای متنوع در زمینه‌های مهندسی تثبیت شده است. در حالی که اصول عملکردی این سیستم‌ها به خوبی استخراج شده‌اند، چالش‌هایی مانند ایمنی، هزینه و پیچیدگی داده‌ها همچنان مطرح هستند. هدف در تحقیقات آینده باید کاهش این چالش‌ها از یک سو و ارائه روش‌های نوآورانه برای افزایش کاربرد تکنیک مذکور در محیط‌های دانشگاهی و صنعتی از سوی دیگر باشد. با پیشرفت در این زمینه و همزمان ادغام آن با دیگر فناوری‌های پیشرفته و رویکردهای بین رشته‌ای احتمالاً راه برای پیشرفت‌های قابل توجهی در تکنیک‌های اندازه‌گیری جریان هموار می‌گردد.



- [۱] HEINDEL TJ, GRAY JN, JENSEN TC. AN X-RAY SYSTEM FOR VISUALIZING FLUID FLOWS. *FLOW MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION*. ۲۰۰۸ APR ۱; ۱۹(۲): ۶۷-۷۸.
- [۲] MENNELL J, BYRNE B, YAN Y. APPRAISAL OF RADIOMETRIC TECHNIQUES TO DETERMINE ABSOLUTE SOLIDS FRACTION IN PNEUMATIC SUSPENSIONS OF PARTICULATE SOLIDS. *FLOW MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION*. ۲۰۰۰ SEP ۱; ۱۱(۳): ۲۱۳-۲۱.
- [۳] ROELS S, CARMELIET J. ANALYSIS OF MOISTURE FLOW IN POROUS MATERIALS USING MICROFOCUS X-RAY RADIOGRAPHY. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER*. ۲۰۰۶ DEC ۱; ۴۹(۲۵-۲۶): ۴۷۶۲-۷۲.
- [۴] SEEGER A, AFFELD K, KERTZSCHER U, GOUBERGRITS L, WELLNHOFFER E. ASSESSMENT OF FLOW STRUCTURES IN BUBBLE COLUMNS BY X-RAY BASED PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY. IN 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, GOTTINGEN, GERMANY ۲۰۰۱ SEP ۱۷.
- [۵] SEEGER A, AFFELD K, GOUBERGRITS L, KERTZSCHER U, WELLNHOFFER E. X-RAY-BASED ASSESSMENT OF THE THREE-DIMENSIONAL VELOCITY OF THE LIQUID PHASE IN A BUBBLE COLUMN. *EXPERIMENTS IN FLUIDS*. ۲۰۰۱ AUG; ۳۱(۲): ۱۹۳-۲۰۱.
- [۶] SEEGER A, KERTZSCHER U, AFFELD K, WELLNHOFFER E. MEASUREMENT OF THE LOCAL VELOCITY OF THE SOLID PHASE AND THE LOCAL SOLID HOLD-UP IN A THREE-PHASE FLOW BY X-RAY BASED PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY (XPTV). *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*. ۲۰۰۳ MAY ۱; ۵۸(۹): ۱۷۲۱-۹.
- [۷] KERTZSCHER U, SEEGER A, AFFELD K, GOUBERGRITS L, WELLNHOFFER E. X-RAY BASED PARTICLE TRACKING VELOCIMETRY—A MEASUREMENT TECHNIQUE FOR MULTI-PHASE FLOWS AND FLOWS WITHOUT OPTICAL ACCESS. *FLOW MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION*. ۲۰۰۴ AUG ۱; ۱۵(۴): ۱۹۹-۲۰۶.
- [۸] Parker, Jason T., Jessica DeBerardinis, and Simo A. Mäkiharju. "Enhanced laboratory x-ray particle tracking velocimetry with newly developed tungsten-coated O (۵۰ μm) tracers." *Experiments in Fluids* ۶۳, ۱۲ (۲۰۲۲): ۱۸۴.
- [۹] SWINEHART, DONALD F. "THE BEER-LAMBERT LAW." *JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION* ۳۹, ۷ (۱۹۶۲): ۳۳۳.
- [۱۰] Ou, Xiangyu, et al. "Recent development in x-ray imaging technology: Future and challenges." *Research* (۲۰۲۱).
- [۱۱] Booij, Ronald, et al. "Technological developments of X-ray computed tomography over half a century: User's influence on protocol optimization." *European journal of radiology* ۱۳۱ (۲۰۲۰): ۱۰۹۲۶۱.
- [۱۲] Kingston, Todd A., et al. "Characterizing 3D granular flow structures in a double screw mixer using X-ray particle tracking velocimetry." *Powder technology* ۲۷۸ (۲۰۱۵): ۲۱۱-۲۲۲.
- [۱۳] Nadeem, Humair, and Theodore J. Heindel. "Review of noninvasive methods to characterize granular mixing." *Powder Technology* ۳۳۲ (۲۰۱۸): ۳۳۱-۳۵۰.
- [۱۴] Wu, Wanqiang, et al. "Movement behavior of char particles in a bubbling fluidized bed at high temperature—The influence of particle shape." *Powder Technology* ۴۳۰ (۲۰۲۳): ۱۱۹۰۳۴.
- [۱۵] Hu, Bin, et al. "Flow structure and phase distribution in stratified and slug flows measured by X-ray tomography." *International journal of multiphase flow* ۶۷ (۲۰۱۴): ۱۶۲-۱۷۹.



[۱۶] Yang, Z., et al. "Experimental studies on void fraction in slug of three-phase viscous oil flows in a near horizontal pipe." BHR International Conference on Multiphase Production Technology. BHR, ۲۰۱۵.

[۱۷] Romanowski, Andrzej, Piotr Łuczak, and Krzysztof Grudzień. "X-ray imaging analysis of silo flow parameters based on trace particles using targeted crowdsourcing." Sensors ۱۹,۱۵ (۲۰۱۹): ۳۳۱۷.

[۱۸] Singh, Piyush. "Improving Spatial Resolution of Tomo-PIV using Particle Tracks with Vortex-in-Cell." (۲۰۱۶).

[۱۹] Antoine, Elizabeth, et al. "Flow measurements in a blood-perfused collagen vessel using x-ray micro-particle image velocimetry." PloS one ۸,۱۱ (۲۰۱۳): e۸۱۱۹۸.

[۲۰] Chaouki, Jamal, Faical Larachi, and Milorad P. Duduković. "Noninvasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows." Industrial & engineering chemistry research ۳۶,۱۱ (۱۹۹۷): ۴۴۷۶-۴۵۰۳.

[۲۱] Vliegenthart, Rozemarijn, et al. "Innovations in thoracic imaging: CT, radiomics, AI and x-ray velocimetry." Respirology ۲۷,۱۰ (۲۰۲۲): ۸۱۸-۸۳۳.

[۲۲] van der Sande, P. Christian, et al. "Single-photon emission radioactive particle tracking method for hydrodynamic evaluation of multi-phase flows." Particuology (۲۰۲۳).

[۲۳] Kingston, Todd A., et al. "A cone-beam compensated back-projection algorithm for X-ray particle tracking velocimetry." Flow Measurement and Instrumentation ۳۹ (۲۰۱۴): ۶۴-۷۵.

[۲۴] Chen, Xi, Wenqi Zhong, and Theodore J. Heindel. "Using stereo XPTV to determine cylindrical particle distribution and velocity in a binary fluidized bed." AIChE Journal ۶۵,۲ (۲۰۱۹): ۵۲۰-۵۳۵.

[۲۵] Vliegenthart, Rozemarijn, et al. "Innovations in thoracic imaging: CT, radiomics, AI and x-ray velocimetry." Respirology ۲۷,۱۰ (۲۰۲۲): ۸۱۸-۸۳۳.

[۲۶] Li, Cheng, et al. "Measuring binary fluidization of nonspherical and spherical particles using machine learning aided image processing." AIChE Journal ۶۸,۷ (۲۰۲۲): e۱۷۶۹۳.

[۲۷] Cheng, Hui-Jun, et al. "A review for cell and particle tracking on microscopy images using algorithms and deep learning technologies." biomedical journal ۴۵,۳ (۲۰۲۲): ۴۶۵-۴۷۱.

[۲۸] Potts, Philip J., and Margaret West, eds. Portable X-ray fluorescence spectrometry: Capabilities for in situ analysis. Royal Society of Chemistry, ۲۰۰۸.

[۲۹] Strüder, L., et al. "High-resolution X-ray spectroscopy close to room temperature." Microscopy and Microanalysis ۴,۶ (۱۹۹۸): ۶۲۲-۶۳۱.

[۳۰] Zhu, Yuanda, David C. Weindorf, and Wentai Zhang. "Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: ۱. Soil texture." Geoderma ۱۶۷ (۲۰۱۱): ۱۶۷-۱۷۷.

[۳۱] Luo, Biaosheng, et al. "Dynamic in situ measurement of axial segregation of E-CAT particles in a bubbling fluidized bed." Chemical Engineering Journal ۴۸۵ (۲۰۲۴): ۱۴۹۸۶۱.

[۳۲] Jiang, Zhaochen. Experimental and simulation studies of mesoscale phenomena in gas-solid fluidized beds PTV and CFD-DEM. Diss. ۲۰۲۰.



ترکیب تکنیک گاما و پیش شرط ساز با پره های مارپیچی در اندازه گیری کسر گاز تر (کد مقاله ۱۵۱۱):

شریف‌زاده، محسن^۱ - ربیعی، عطاءالله^۲ - ایزدی، مهدی^۲

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

۲. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

مسئله اندازه‌گیری جریان گاز تر به‌عنوان یکی از موارد مهم در صنعت مطرح است. در این میان استفاده از تکنیک گاما به‌منظور اندازه‌گیری کسر فازی به‌دلیل رژیم جریانی غباری مایعات هیدروکربنی در گاز خروجی از چاه با عدم قطعیت زیادی همراه است. آنچه در این کار پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفت بررسی امکان بکارگیری یک پیش‌شرط‌ساز با پره مارپیچ به‌منظور تبدیل رژیم جریان به حلقوی و در ادامه اندازه‌گیری ضخامت مایع چسبیده به دیواره درونی لوله و برقراری ارتباط بین این اندازه‌گیری و کسر فازی جریان گاز تر ورودی به لوله بود. نتایج گویای توانایی تفکیک مقادیر بسیار اندک ۰.۱٪، ۰.۳٪ و ۰.۵٪ مایع توسط سیستم پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: تکنیک گاما، پیش‌شرط‌ساز، پره مارپیچ، گاز تر، اندازه‌گیری.

Combination of gamma technique and preconditioner with helical blades in wet gas measurement

Sharifzadeh, Mohsen^{۱*}, Rabiei, Ataollah^۲, and Izadi, Mehdi^۲

۱. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School.

۲. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Nuclear Engineering Department.

Abstract:

The issue of wet gas flow measurement is significant in the industry. Currently, using the gamma technique to measure the phase fraction in hydrocarbon liquids within gas exiting a well is associated with a high level of uncertainty. This research aimed to explore the potential of using a flow preconditioner to convert the flow regime to annular allowing for the measurement of liquid thickness on the inner pipe wall. The goal was to establish a relationship between this measurement and the phase fraction of wet gas flow entering the pipe. The results demonstrate the system's capability to detect small amounts of liquids such as ۰.۱%, ۰.۳% and ۰.۵%.

Key words: Gamma technique, Static mixer, Helical blade, Wet gas, Measurement.



۱- مقدمه:

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری جریان دوفازی گاز تر خروجی از چاه‌های گازی و به دلیل رژیم جریانی مغشوش و غباری موجود در این موقعیت عملاً اندازه‌گیری کسرفازی این جریان با خطای زیاد ناشی از توزیع کسر اندک مایع (کوچکتر از ۵٪) در سطح مقطع بزرگی از لوله و در نتیجه عدم نمایندگی صحیح دوفازی در مسیرهای اندازه‌گیری مواجه است. تحقیقاتی زیادی در این حوزه صورت پذیرفته که از جمله آنها می‌توان به پژوهشهای هویت و همکاران و نیز زیوبینسکی و همکاران اشاره کرد [۲۱ و ۲]. عمده روشهای موجود پیرامون دو محور جداسازی مولفه‌های جریان دوفازی پیش از اندازه‌گیری و یا همگن‌سازی می‌گردند که به تفصیل در دو مرجع معتبر بین‌المللی شامل American Petroleum Institute و Norwegian Society for Oil and Gas Measurement بیان شده اند [۳ و ۴]. در ادامه نیز با بکارگیری سیستمهای اندازه‌گیری تک‌فازی نظیر سنجه اختلاف فشار، امپدانس الکتریکی و نیز پرتوهای گاما پارامترهایی نظیر کسر فازی و سرعت مولفه قابل اندازه‌گیری می‌شوند [۵-۹].

در این کار تحقیقاتی بر معرفی یک پیش‌شرط‌ساز مکانیکی تاکید شده است که امکان تبدیل رژیم جریان غباری دوفازی را به شبه حلقوی خواهد داد. در ادامه و با نصب چشمه گاما در مرکز لوله و چرخش لوله در یک دور کامل امکان ثبت شمارش گامای عبوری برای سه کسرفازی مایع ۱٪، ۳٪ و ۵٪ و مقایسه نمودار تغییرات شمارش به منظور اندازه‌گیری و تفکیک این مقادیر اندک درصدی فراهم گردید.

۱-۱ اصول اندازه‌گیری تکنیک گاما

در این بررسی با تکیه بر شدت گامای عبوری از لوله و قانون حاکم بر این تضعیف که همان قانون معروف بیر-لمبرت است سعی در برقراری ارتباط بین مقادیر ضخامت مایع چسبیده به دیواره درونی لوله و شدت گامای خوانش شده توسط آشکارساز سوسوزن گردید:

$$I = I_0 \exp\left(-d \sum_i \alpha_i \mu_i\right) \quad (1)$$

که α_i و μ_i کسرفازی و ضریب تضعیف خطی مولفه i ام، d قطر درونی موثر لوله، B ضریب جبران‌سازی سهم گامای پراکنده در خوانش است [۱۰].

$$\varepsilon_l(\%) = \frac{I_l \times (D - l)}{D^2} \times 100 \quad (2)$$

که ε_l کسرفازی مایع و D و l قطر درونی لوله و ضخامت فیلم نازک چسبیده به درون لوله هستند.

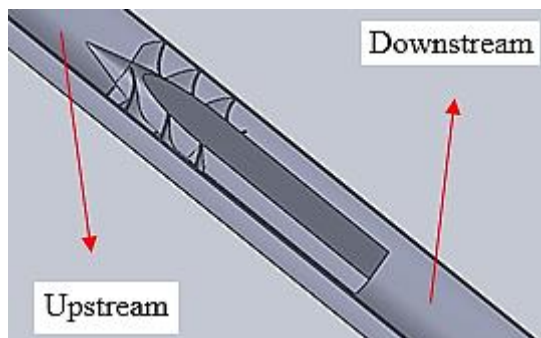
$$\varepsilon_l(\%) = \left[\frac{\ln(I_{mix}/I_g)}{\ln(I_l/I_g)} \right] \times \left[2 - \frac{\ln(I_{mix}/I_g)}{\ln(I_l/I_g)} \right] \times 100 \quad (3)$$

که I_l و I_g به ترتیب شدت گامای خوانش شده در مرحله کالیبراسیون و در دو موقعیت با حضور کامل گاز و مایع را نشان می‌دهد. و I_{mix} نیز شدت گاما در مورد رژیم شبه حلقوی خواهد بود.

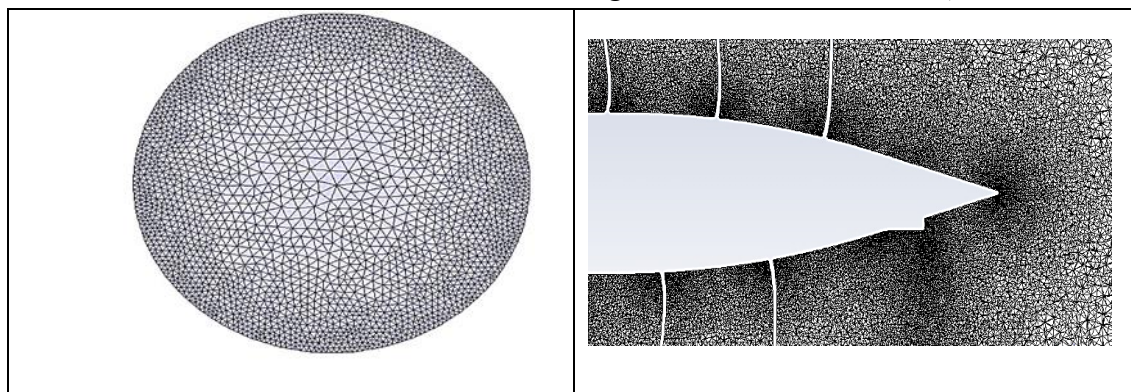
۲- مواد و روشها

۲-۱- شبیه‌سازی سیالاتی

در مرحله نخست با استفاده از شبیه‌سازی سیالاتی در محیط نرم‌افزار ANSYS FLUENT امکان تبدیل رژیم دوفازی غباری به شبه حلقوی مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. شکل ۱ هندسه پیش‌شرط‌ساز و نحوه قرارگیری آن درون لوله و در مسیر جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۱- هندسه لوله و پیش‌شرط‌ساز نصب‌شده به منظور تبدیل جریان دوفازی غباری به حلقوی در ادامه و با استفاده از مش‌بندی مدل به ۱۵ میلیون شبکه، مدل به بخش محاسباتی سیالاتی نرم‌افزار داده شد و شرایط مرزی و ورودی اولیه تعیین گردید. معادلات حاکم بر سیال شامل معادله پیوستگی و معادله تکانه در سه بعد برای هر مولفه جریان بود. روش حل معادلات نیز روش کنترل حجم است. پیش‌شرط‌ساز با قطر ۱۶ اینچ در مرکز یک لوله ۳۲ اینچی قرار داده شد و اندازه‌گیری در قسمت پایین دست پس از تبدیل رژیم به شبه حلقوی صورت خواهد گرفت. محاسبات توسط یک رایانه با پردازشگر ۱۶ هسته و حافظه ۶۴ گیگابایتی برای ۴۸ ساعت جهت رسیدن به همگرایی انجام گرفت. در شکل ۲ شمایی از مش‌بندی سه بعدی پیش‌شرط‌ساز درون لوله از دو مقطع موازی و عمود بر راستای جریان نشان داده شده است.

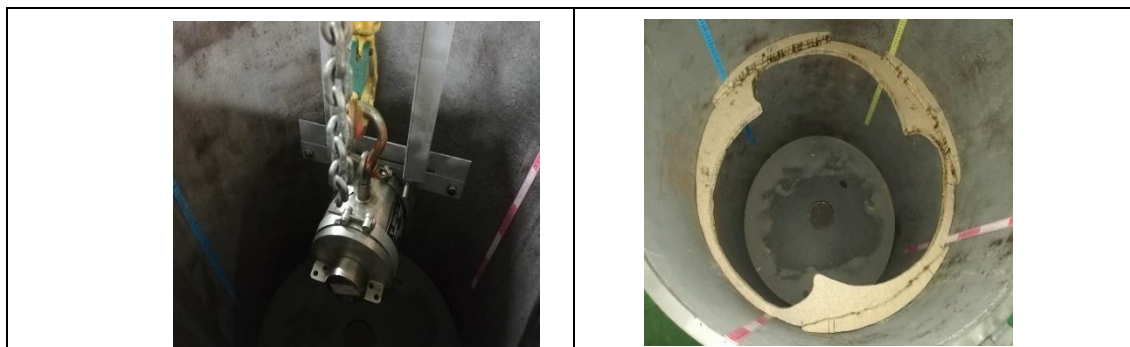


شکل ۲- شماتیک مش‌بندی سه بعدی درون لوله

۲-۲- داده‌گیری تجربی

فرایند داده‌گیری تجربی با نصب معادله‌های شبه حلقوی فاز مایع درون لوله جریان و در ادامه تثبیت چشمه سزیم-۱۳۷ با اکتیویته ۴۳ میلی کوری در مرکز لوله و ثبت داده‌های ناشی از تضعیف پرتوی در یک دور کامل چرخش لوله برای سه کسرفازی مورد نظر صورت پذیرفت. چیدمانی از داده‌گیری تجربی شامل لوله جریان، کولیماتور حاوی چشمه گاما، آشکارساز سوسوزن دو اینچی یدور سدیم و نیز نمونه چوبی معادل با مقادیر درصدی مایع در شکل ۳ نشان داده شده است.



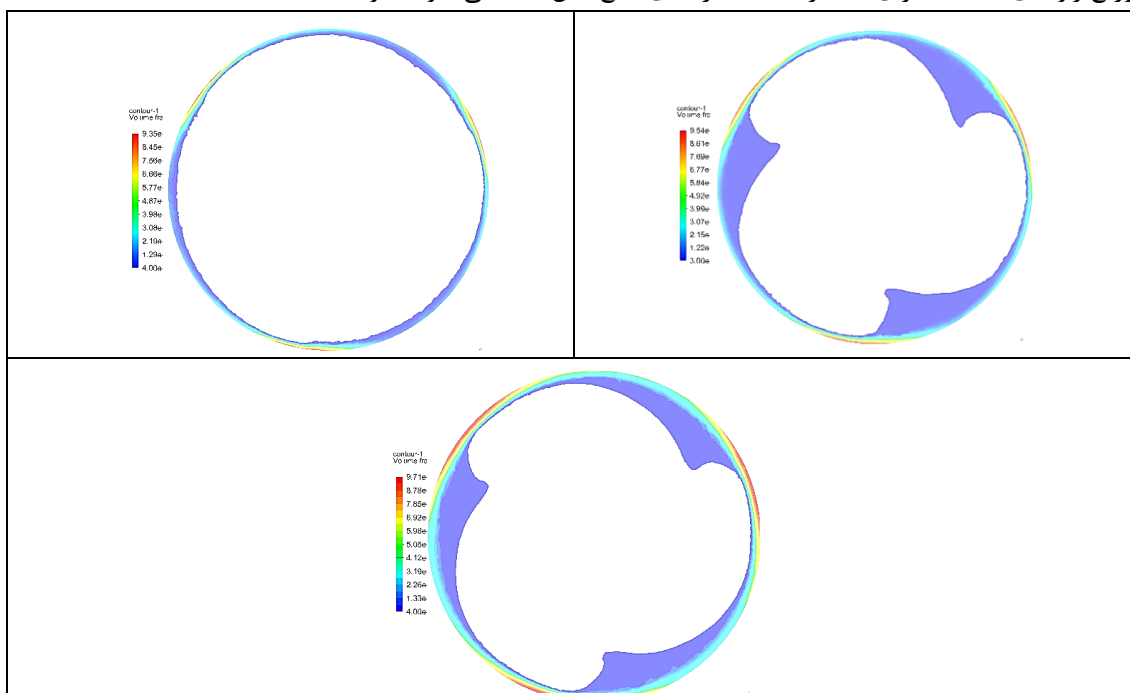


شکل ۳- چیدمان داده‌گیری تجربی

۳- نتایج

۱-۳- شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی گویای موفقیت پیش‌شرط‌ساز در تبدیل جریان غباری به جریان شبه حلقوی برای هر سه مقدار کسrfازی بوده است. همانگونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است خروجی شبیه‌سازی فیلم نازکی از مایع را نشان می‌دهد که با تفاوت در توزیع زاویه‌ای ضخامت برای مقادیر مختلف درصدی مایع قابل دستیابی خواهد بود.



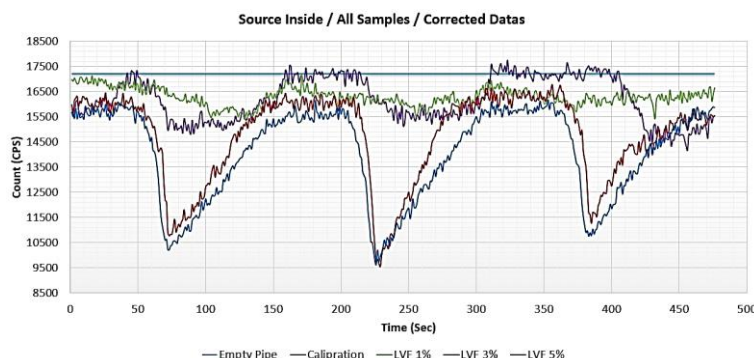
شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی مقادیر مختلف درصدی ۱٪ (بالا-چپ)، ۳٪ (بالا-راست) و ۵٪ (پایین) مایع.

همانگونه که از نتایج مشهود است در قسمت پایین دست جریان سه رژیم جریانی شبه حلقوی متناظر با مقادیر مختلف درصدی مایع قابل دستیابی است. بنابراین، کافیت با ساخت نمونه‌های با چگالی معادل مایع و قرار دادن درون لوله امکان تفکیک آنها با استفاده از مقایسه داده‌های تجربی حاصل از تضعیف پرتوهای گامای عبوری مورد بررسی قرار بگیرد.



۲-۳- تجربی

نتایج مربوط به اندازه‌گیری شمارش گامای عبوری به‌ازای یک دور چرخش کامل لوله و برای هر سه مقدار درصدی در یک نمودار به شرح زیر بدست آمد.



شکل ۵- نتایج اندازه‌گیری تجربی مقادیر مختلف درصدی ۱٪ (سیاه با کمترین افت شمارش در دره‌ها)، ۳٪ (قرمز با افت شمارش میانی در دره‌ها) و ۵٪ (آبی با بیشترین افت شمارش در دره‌ها) مایع، کالیبراسیون (سبز) و لوله خالی (قهوه‌ای با کمترین افت شمارش).

نمودار فوق‌گویی این مهم است که با اعتماد به نتایج محسبات سیالاتی در مرحله شبیه‌سازی و قرار دادن نمونه‌های معادل با مقادیر مختلف درصدی ۱٪، ۳٪ و ۵٪ درون لوله، قابلیت تفکیک داده‌های شمارشی مربوط به این مقادیر پس از مقایسه پروفایل شمارشی در یک دور کامل لوله میسر است. با این حساب می‌توان اذعان داشت که سیستم پیشنهادی قادر به اندازه‌گیری گاز تر با حداکثر خطای $\pm 2\%$ خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

بکارگیری تکنیک گاما برای اندازه‌گیری گاز تر خروجی از چاه به سبب شرایط عملیاتی نظیر جنس و ضخامت دیواره لوله‌های جریان همچنان از بهترین گزینه‌های در دسترس است که البته به سبب کسر مایع اندک همراه با گاز خشک و رژیم جریانی غباری موجود عملاً با عدم قطعیت بالا در اندازه‌گیری مواجه است.

نتایج شبیه‌سازی گویای موفقیت پیش‌شرط‌ساز در تبدیل جریان غباری به جریان شبه حلقوی برای هر سه مقدار کسرفازی بوده است. خروجی شبیه‌سازی فیلم نازکی از مایع را پس از عبور از پیش‌شرط‌ساز نشان می‌دهد که با ایجاد اختلاف در توزیع زاویه‌ای ضخامت مایع متناظر با مقادیر مختلف درصدی مایع امکان تغییر رژیم و فرار از مشکلات عملیاتی ناشی از وابستگی اندازه‌گیری به رژیم جریان فراهم است.

در این مطالعه در ابتدای امر نشان داده شد که با طراحی خلافتانه یک پیش‌شرط‌ساز می‌توان این رژیم جزین را به رژیم حلقوی تبدیل کرد و در ادامه با نصب چشمه گاما در مرکز لوله به ثبت مقادیر شمارشی ناشی از تضعیف پرتو گاما و مقایسه نتایج مقادیر درصدی پرداخت. این کار با ساخت نمونه‌های با چگالی معادل مایع و قرار دادن درون لوله امکان تفکیک آنها با استفاده از مقایسه داده‌های تجربی حاصل از تضعیف پرتوهای گامای عبوری قابل انجام است.

نقطه قوت نهایی در این مطالعه دستیابی به نتایجی است که گویای امکان تفکیک نمودار شمارشی مربوط به یک دور کامل اسکن لوله برای مقادیر درصدی اندک ۱٪، ۳٪ و ۵٪ است و در واقع نشان می‌دهد که برخلاف روشهای مرسوم پیشین که بدون ترکیب تکنیک گاما با سایر تکنیک‌های غیرهسته‌ای فاقد توان تفکیک این مقادیر درصدی هستند، روش مورد اشاره در این مطالعه می‌تواند با عدم قطعیت $\pm 2\%$ به اندازه‌گیری کسرفازی مایع در جریان دوفازی گاز تر خروجی از چاه بیانجامد. لازم به ذکر است که در سیستم‌های مرسوم این میزان عدم قطعیت برای گاز تر در محدوده $\pm 10\%$ است که نشان از مزیت روش خلافتانه پیشنهادی از حیث دقت اندازه‌گیری در قیاس با روشهای مرسوم دارد.



۵- مسیرهای آینده

ایده بکارگیری این تکنیک هیبریدی که حاصل تلفیق پیش‌شرط‌ساز به عنوان بخش مکانیکی و سیستم شمارشی گامای عبوری به عنوان بخش هسته‌ای جهت اندازه‌گیری کسرفازی جریان چند فاز می‌تواند در ادامه و با بکارگیری جریان سه‌فازی مورد بررسی قرار گیرد. البته ضروری است در این کار که یکی از مسیرهای آینده پژوهش توسط نویسندگان مقاله است به جای چشمه گامای تک انرژی از گامای دوانرژی بهره برده شود. در ادامه نیز می‌توان با هدف افزایش سرعت در فرایند جمع‌آوری داده‌ها در یک دور کامل از افزایش تعداد آشکارسازها پیرامون لوله و بالتبع تغییر در کولیماسیون چشمه به منظور برقراری گسیل پرتو در لحظه واحد برای تمامی سوسوزنها استفاده کرد.

۶- مراجع

[۱] Hewitt, Geoffrey Frederick, and D. N. Roberts. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and fast photography. No. AERE-M-۲۱۵۹. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England (United Kingdom), ۱۹۶۹.

[۲] Dziubinski, Marek, Henryk Fidos, and Marek Sosno. "The flow pattern map of a two-phase non-Newtonian liquid-gas flow in the vertical pipe." *International journal of multiphase flow* ۳۰,۶ (۲۰۰۴): ۵۵۱-۵۶۳.

[۳] American Petroleum Institute ۲۰۰۴ State of the Art Multiphase Flow Metering API Publication ۲۵۶۶ (Washington, USA: API).

[۴] Corneliussen, S., et al. "Handbook of multiphase flow metering, rev. ۲." Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (www. nfogm. no) /Tekna (۲۰۰۵).

[5] Bahrami, Siamak, et al. "Application of artificial neural network to multiphase flow metering: A review." *Flow Measurement and Instrumentation* (2024): 102601.

[6] Yaqub, Muhammad Waqas, et al. "Flow pattern identification and measurement techniques in gas-liquid-liquid three-phase flow: A review." *Flow Measurement and Instrumentation* 76 (2020): 101834.

[7] Warsito, W., and L. S. Fan. "Neural network based multi-criterion optimization image reconstruction technique for imaging two-and three-phase flow systems using electrical capacitance tomography." *Measurement Science and Technology* 12.12 (2001): 2198.

[8] Yu, Hao, et al. "Multiscale voltage reconstruction with attention-based network for volume fraction prediction of industrial oil-water two-phase flow by EIT." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 71 (2022): 1-9.

[9] Pradeep, Chaminda. "Tomographic approach to automatic and non-invasive flow regime identification." (2015).

[۱۰] Swinehart, Donald F. "The beer-lambert law." *Journal of chemical education* ۳۹,۷ (۱۹۶۲): ۳۳۳.

[۱۱] Manual, User. "ANSYS FLUENT ۱۲.۰." Theory Guide ۶۷ (۲۰۰۹)



ترکیب تکنیک گاما و شبکه عصبی مصنوعی در تشخیص الگوی انباشت و ضخامت رسوب (کد

مقاله : ۱۵۱۳)

ربیعی، عطاءالله^۱ - شریف‌زاده، محسن^{۲*} - زینوی میان‌آبی، رسمیه^۱

۱. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده:

انباشت رسوب درون خطوط لوله به‌عنوان یکی از مشکلات اساسی در صنعت نفت مطرح است. این رسوبات با تعلیق درون سیال عبوری و حرکت در مسیر جریان به سطوح درونی لوله چسبیده و منجر به بروز خسارت شدید به تجهیزات و کاهش بازده انتقال فراورده می‌شوند. در این مطالعه به معرفی استفاده از تکنیک گاما در کنار بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی به منظور تشخیص الگوی انباشت و ضخامت رسوب درون خطوط لوله پرداخته شد. نتایج گویای موفقیت این روش در تشخیص الگوی انباشت و نیز ضخامت‌های کمینه و بیشینه رسوب آلی با خطای میانگین مربعات به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷۴ و ۰/۰۰۴۷ و ۰/۰۰۴۹ است. **کلیدواژه:** تکنیک گاما، شبکه عصبی مصنوعی، تشخیص الگوی انباشت، ضخامت رسوب.

Combination of gamma technique and artificial neural network for sediment accumulation pattern and thickness Identification

Rabiei, Ataollah^{۱*}, Sharifzadeh, Mohsen^۲, and Zeinavi Mayanabi, Rasmieh^۱

۱. Shiraz University, Faculty of Mechanical Engineering, Nuclear Engineering Department.

۲. Atomic Energy Organization of Iran, Nuclear Science and Technology Research Institute, Radiation Application Research School.

Abstract:

The sediment deposition in pipelines has been known as an important issue in the petroleum industry. The deposits either remain suspended in the fluid and move along with it, or stick to the surface of the pipe if not controlled, cause great damage to the equipment and reduce production efficiency. In this study, use of the gamma technique along with an artificial neural network is introduced for sediment accumulation pattern and thickness Identification. The results indicate that the organic sediment neural network is able to determine the sediment accumulation pattern and minimum and maximum thickness with a Mean Square Error (MSE) of ۰,۰۰۷۴, ۰,۰۰۴۷, and ۰,۰۰۴۹, respectively.

Keywords: Gamma technique, Artificial Neural Networks, Accumulation pattern identification, Sediment thickness.



۱- مقدمه:

خسارات زیادی که به سبب عدم کنترل رسوبات درون خطوط لوله جریان گزارش شده است نیاز اساسی به مانیتورینگ این فرایند و ارائه راهکار عملیاتی به منظور حذف و جلوگیری از رشد رسوبات درون خطوط لوله را نشان می‌دهند [۱]. بدین منظور بسیاری از تحقیقات بر روی تشخیص الگوی انباشت و ضخامت این رسوبات متمرکز شده است که شامل دسته گسترده‌ای از تکنیکها شامل اولتراسونیک، سنسورهای الکتروشیمیایی، رادیوگرافی و توموگرافی می‌شود [۲-۶]. در این کار تحقیقاتی سعی شد با استفاده از تلفیق تکنیک گاما و شبکه عصبی مصنوعی در یک چیدمان بهینه حول لوله که براساس یافته‌های زینوی و همکاران [۷] حاصل شد، امکان عملیاتی کردن یک سیستم هوشمند جهت تشخیص الگوی انباشت رسوبات آلی درون خط لوله و همزمان اندازه‌گیری مقادیر کمینه و بیشینه ضخامت رسوب مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۱ اصول اندازه‌گیری تکنیک گاما

در این بررسی با تکیه بر شدت گامای عبوری از لوله که از قانون معروف بیر-لمبرت پیروی می‌کند سعی در برقراری ارتباط بین مقادیر ضخامت مایع چسبیده به دیواره درونی لوله و این شدت خوانش شده توسط آشکارساز سوسوزن گردید:

$$I = I_0 \exp(-d \sum_i \alpha_i \mu_i) \quad (1)$$

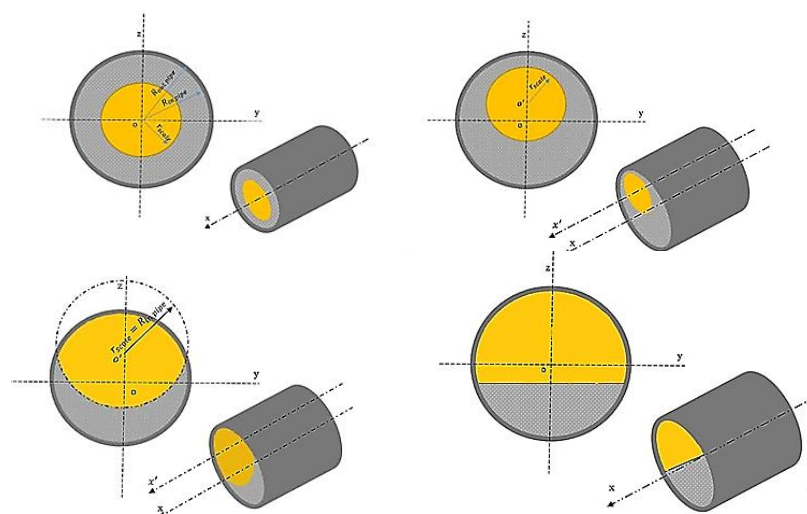
که μ_i و α_i کسر فازی و ضریب تضعیف خطی مولفه i ام، d قطر درونی موثر لوله و B ضریب جبران‌سازی سهم گامای پراکنده در خوانش است [۸].

شدت گامای عبوری برای موقعیت‌های مختلف که سطح مقطع لوله با رژیم‌های انباشت متفاوتی از رسوب پر شده باشد تغییر خواهد کرد که به سبب پیچیدگی موجود در این پژوهش سعی بر استخراج رابطه مورد نظر با استفاده از تلفیق تکنیک گاما با شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها:

۲-۱ انواع الگوی انباشت رسوب

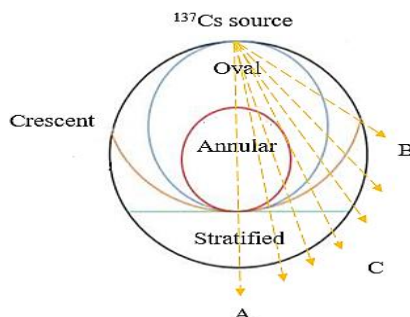
در این مرحله ۴ الگوی انباشت حلقوی، بیضوی، هلالی و لایه‌ای مطابق با شکل ۱ آماده و به لوله خورانده شد.



شکل ۱- انواع الگوی انباشت رسوب درون خط لوله شامل رژیم حلقوی (بالا-چپ)، رژیم بیضوی (بالا-راست)، رژیم هلالی (پایین-چپ) و رژیم لایه‌ای (پایین-راست)



۲-۲ چیدمان کلی چشمه، آشکارسازها و رسوبات درون لوله
در این مرحله ۴ الگوی انباشت حلقوی، بیضوی، هلالی و لایه‌ای همزمان با محل قرارگیری چشمه گاما و نیز موقعیت‌های مختلف آشکارسازهای سوسوزن حول لوله مطابق با شکل ۲ به نمایش درآمده است.

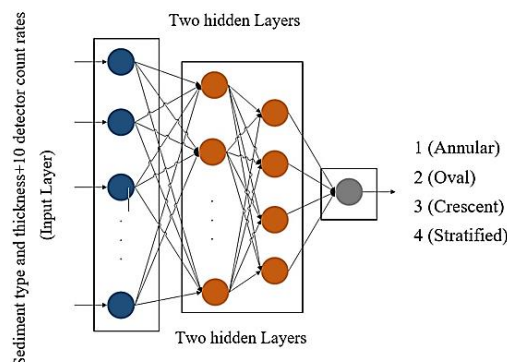


شکل ۲- انواع الگوی انباشت رسوب درون خط لوله همزمان با محل قرارگیری چشمه گاما و نیز موقعیت‌های مختلف آشکارسازهای سوسوزن حول لوله

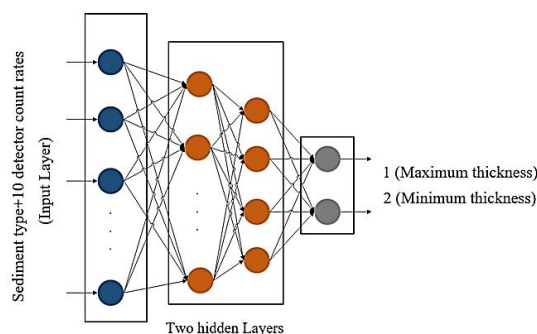
در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNPX فابل‌های ورودی برای رسوب آلی از جنس کروزمین و در ۴ رژیم انباشت حلقوی، بیضوی، هلالی و لایه‌ای و ۵ ضخامت ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سانتیمتر جهت قرارگیری درون لوله استیل با قطر ۳۲ اینچ و ضخامت دیواره ۲ سانتیمتر آماده شدند. چشمه رادیواکتیو مورد استفاده سزیم-۱۳۷ با اکتیویته ۴۳ میلی‌کوری در بالای لوله و در موقعیت ساعت ۱۲ به گونه‌ای ثابت شده است که با قابلیت چرخش کولیماتور حاوی آن بتواند باریکه قلمی را در امتداد وترهای مشخص با خط‌چین زرد رنگ در شکل به آشکارسازهای واقع در زوایای مختلف حول لوله بتاباند. فرایند ثبت داده‌های شمارشی با استفاده از تالی $F/8$ و به‌ازای ۱ میلیارد تاریخچه برای آشکارساز سوسوزن دو اینچ در ۱۰ موقعیت زاویه‌ای حول لوله و در زوایای ۱۸۰ تا ۱۴۱ درجه با گام زاویه‌ای $4/33$ درجه مطابق با شکل ۲ صورت پذیرفت و در هر بار اندازه‌گیری مسیر پرتو گاما با کولیماسیون قلمی به گونه‌ای تنظیم شد که از وتر واصل چشمه و آشکارساز در موقعیت زاویه‌ای مورد نظر عبور کند.

۳-۲ طراحی شبکه عصبی

در این تحقیق از دو شبکه MLP برای تشخیص الگوی انباشت و ضخامت رسوب استفاده شد. با توجه به رژیم و ضخامت‌های رسوب مورد استفاده ۲۰ چینش مختلف وجود داشت که با استفاده از کروزمین به عنوان معادل رسوب آلی تهیه و فرایند شمارشی در ۱۰ موقعیت زاویه‌ای انجام گردید. در ادامه از ۲۰۰ داده شمارشی موجود ۷۰٪ جهت آموزش شبکه، ۱۵٪ جهت اعتبارسنجی و ۱۵٪ جهت تست مورد استفاده قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است در مرحله اول از شبکه MLP با دو لایه مخفی به منظور تشخیص رژیم انباشت رسوب استفاده شد. داده ورودی شامل مقادیر شدت شمارشی گامای عبوری، و خروجی این شبکه نیز اعداد ۱ تا ۴ به نمایندگی از رژیم‌های انباشت حلقوی، بیضوی، هلالی و لایه‌ای است. توابع فعالسازی لایه مخفی نخست با ۶ نورون و لایه دوم با ۴ نورون به ترتیب Logsig و Tansig انتخاب شدند.



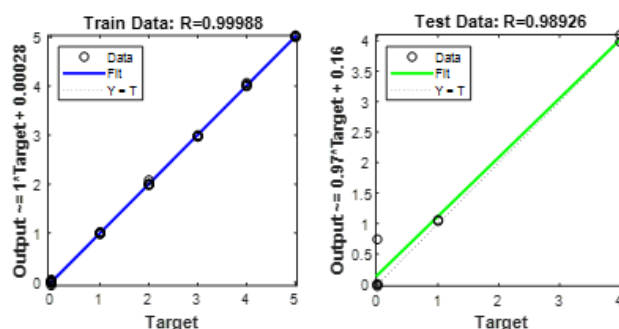
شکل ۳- معماری شبکه MLP با دو لایه مخفی شامل اولی با ۶ و دومی با ۴ نورون جهت تشخیص الگوی انباشت در نهایت و با مشخص شدن رژیم انباشت، از ۵۰ داده شمارشی مربوط به هر رژیم ۷۰٪ جهت آموزش شبکه، ۱۵٪ جهت اعتبارسنجی و ۱۵٪ جهت تست شبکه دوم استفاده شد. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است در مرحله دوم از شبکه MLP با دو لایه مخفی به منظور محاسبه مقادیر بیشینه و کمینه ضخامت رسوب استفاده شد. داده ورودی شامل مقادیر شدت شمارشی گامای عبوری مربوط به رژیم خاص، و خروجی این شبکه نیز ضخامت رسوب است. توابع فعالسازی لایه مخفی نخست با ۶ نورون و لایه دوم با ۴ نورون یکسان و از نوع Logsig انتخاب شدند.



شکل ۴- معماری شبکه MLP با دو لایه مخفی شامل اولی با ۶ و دومی با ۴ نورون جهت تشخیص ضخامت رسوب

۳- نتایج

خطا و رگرسیون شبکه مسئول در اندازه‌گیری ضخامت رسوب آلی پس از آموزش در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- خطا و رگرسیون شبکه مسئول در اندازه‌گیری ضخامت رسوب

در ادامه خطای اندازه‌گیری ضخامت رسوب آلی برای داده تست در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- خطای اندازه‌گیری ضخامت رسوب برای داده تست

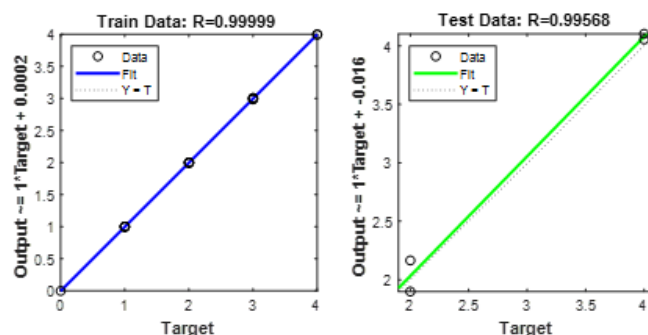
Organic sediment		
MSE test Data	Lower thickness of sediment	۰.۰۰۴۷



RMSE test Data	Upper thickness of sediment	۰.۰۰۴۹
	Lower thickness of sediment	۰.۰۶۸۳
	Upper thickness of sediment	۰.۰۶۹۹
MAE test Data	Lower thickness of sediment	۰.۰۵۴۵
	Upper thickness of sediment	۰.۰۴۴۸
	Upper thickness of sediment	۰.۰۱۸۶

همانگونه که از داده‌های مربوط به اندازه‌گیری ضخامت رسوب مشخص است خطای میانگین مربعات در اندازه‌گیری ضخامتهای کمینه و بیشینه به ترتیب ۰/۰۰۴۷ و ۰/۰۰۴۹ می‌باشد. مقدار نسبی این خطا نیز برای ضخامت کمینه و بیشینه به ترتیب برابر با ۰/۰۶۸۳ و ۰/۰۶۹۹ است. خطای میانگین مطلق نیز برای ضخامت کمینه و بیشینه به ترتیب برابر با ۰/۰۵۴۵ و ۰/۰۴۴۸ است.

در نهایت خطا و رگرسیون شبکه مسئول در تشخیص الگوی انباشت رسوب آلی پس از آموزش در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- خطا و رگرسیون شبکه مسئول در تشخیص الگوی انباشت رسوب
خطای تشخیص الگوی انباشت رسوب آلی برای داده تست نیز در جدول ۲ ذکر شده است.
جدول ۲- خطای تشخیص الگوی انباشت رسوب برای داده تست

Organic sediment	
MSE test Data	۰.۰۰۷۴
RMSE test Data	۰.۰۸۵۹
MAE test Data	۰.۰۶۰۵

آنگونه که از داده‌های مربوط به تشخیص الگوی انباشت رسوب مشخص است خطای میانگین مربعات، مقدار نسبی این خطا و نیز خطای میانگین مطلق به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷۴، ۰/۰۸۵۹ و ۰/۰۶۰۵ خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه شبکه عصبی با خطای جذر میانگین مربعات ۰/۰۰۴۷ و ۰/۰۰۴۹ به ترتیب برای اندازه‌گیری ضخامت کمینه و بیشینه رسوب آلی و جذر میانگین مربعات ۰/۰۰۷۴ برای تشخیص الگوی انباشت رسوب آموزش داده شد.



هر دو شبکه موفق به تشخیص الگوی انباشت و اندازه‌گیری ضخامت رسوب با خطای پایین شدند که تاییدی بر امکان استفاده از ایده مطرح در این کار پژوهشی به منظور اندازه‌گیری همزمان الگوی انباشت و ضخامت رسوب با استفاده از چیدمان معرفی شده در این تحقیق است.

یکی از محدودیت‌های روش پیشنهادی به مانند عمده روش‌های هوشمند مبتنی بر آموزش شبکه می‌تواند در اختلاف بین داده شماری شبیه‌سازی با داده واقعی باشد که بالتبع نیاز به بکارگیری داده واقعی برای ارائه سیستم تجاری را برجسته می‌سازد. همچنین با توجه به تغییرات زیاد در جنس و نوع رسوبات درون خطوط لوله جریان در شرایط متفاوت عملیاتی امکان ارائه سیستم منفرد با توانایی عملکرد دقیق برای عمده این شرایط کمی دور از واقعیت است.

دیگر پارامترهای تاثیرگذار نظیر قطر خط لوله، فعالیت پرتوایی چشمه، نوع و ابعاد آشکارساز مورد استفاده و نیز دما و فشار نیز همواره می‌توانند منجر به دور شدن نتایج حاصل از آموزش شبکه حتی با استفاده از داده تجربی در تست لویپها از داده واقعی میدان شوند. با تغییر در قطر خط لوله و بالتبع ضخامت آن و البته با فرض ثابت نگه‌داشتن محل چشمه و آشکارسازهای پیرامون لوله، نه تنها شدت شمارش تغییر خواهد کرد بلکه به سبب تغییرات غیرخطی نسبت به حالت مورد اشاره در این مقاله که ناشی از تغییرات در ضخامت رسوب برای رژیم‌های مختلف جریانی است اساساً نیاز به آموزش مجدد شبکه برای اندازه‌گیری دقیق وجود خواهد داشت. در مورد فعالیت پرتوایی چشمه با فرض اینکه میزان فعالیت آنقدر کاهش نیابد که منجر به خطای آماری زیاد و روی هم افتادگی طیف شماری آنها شود احتمالاً شبکه فعلی همچنان قابل استفاده است. استدلال مشابه با فعالیت پرتوایی در ارتباط با نوع آشکارساز مورد نیاز احتمالاً صادق است. در ارتباط با تغییرات فشار و دما امکان انباشت رسوبات در الگوهای پیچیده و خارج از چارچوب استاندارد تعریف‌شده در این مطالعه وجود دارد که خود به عنوان یکی خطای سیستماتیک می‌تواند به نتایج با دقت پایین سیستم پیشنهادی بیانجامد. در هر صورت تمامی این تغییرات بایستی مورد بررسی قرار گیرد تا با اطمینان بتواند در سیستم پیشنهادی اضافه و برای کاربرد عملیاتی توصیه گردد.

به عنوان زمینه‌ای برای فعالیتهای پژوهشی آینده می‌توان تحقیقات فوق را بر روی رسوبات معدنی نیز انجام داد و در ادامه به مقایسه دقت سیستم پیشنهادی در تشخیص الگوی انباشت و همچنین ضخامت رسوبات آلی و معدنی پرداخت. همچنین با تغییر در تعداد موقعیت‌های زاویه‌ای قرارگیری آشکارسازها حول لوله می‌توان وابستگی بین این پارامتر و دقت اندازه‌گیری شبکه را بررسی کرد و یا اینکه کمترین تعداد موقعیت زاویه‌ای و بالتبع داده‌گیری برای رسیدن به دقت‌های مورد قبول را جهت ارائه یک سیستم هوشمند و تا حد امکان سریع محاسبه کرد.

۵- مراجع

[۱] Bertrand, Bertrand, Gerard Ségéral, and Paul Ove Moksnes. "Detection and identification of scales using dual energy/venturi subsea or topside multiphase flow meters." Offshore Technology Conference. OTC, ۲۰۰۱.

[۲] Rostron, Paul. "Critical review of pipeline scale measurement technologies." Indian Journal of Science and Technology ۱۱,۱۷ (۲۰۱۸): ۱-۱۸.

[۳] Salgado, Cesar Marques, et al. "Calculation of scales in oil pipeline using gamma-ray scattering and artificial intelligence." Measurement ۱۷۹ (۲۰۲۱): ۱۰۹۴۵۵.

[۴] Alamoudi, Mohammed, et al. "Application of gamma attenuation technique and artificial intelligence to detect scale thickness in pipelines in which two-phase flows with different flow regimes and void fractions exist." Symmetry ۱۳,۷ (۲۰۲۱): ۱۱۹۸.



[۵] Taylan, Osman, et al. "Proposing an intelligent dual-energy radiation-based system for metering scale layer thickness in oil pipelines containing an annular regime of three-phase flow." *Mathematics* ۹,۱۹ (۲۰۲۱): ۲۳۹۱.

[۶] Askari, Mojtaba, et al. "An intelligent gamma-ray technique for determining wax thickness in pipelines." *Applied Radiation and Isotopes* ۱۷۲ (۲۰۲۱): ۱۰۹۶۶۷.

[۷] Rasmieh Zeinavi Mianabi; Ataollah rabiee; Mohsen Sharifzadeh. "Optimum geometric position of detectors around thick hydrocarbon pipes for deposition pattern detection and scale thickness measurement". *Journal of Modeling in Engineering*, ۲۰۲۳. doi: ۱۰,۲۲۰۷۵/jme.۲۰۲۳,۳۰۷۳۶,۲۴۶۶.

[۸] Swinehart, Donald F. "The beer-lambert law." *Journal of chemical education* ۳۹,۷ (۱۹۶۲): ۳۳۳.



تهیه آمیزه پلیمری به منظور تولید کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم به کمک پرتو دهی الکترون (کد مقاله : ۱۵۱۸)

انوری تفتی، فاطمه^{۱*} - ضیافتی، سید امین^۱ - دهشیری، سعیده^۱ - بنائی، مریم -

احمدیان، ونوس^۱ - پارسائیان، محمدرضا^۱

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت توسعه کاربرد پرتوها، مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد)

چکیده:

کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم بسته به دمای سطح کابل و یا جسم، به طور خودکار میزان مصرف انرژی و انتقال گرما را تغییر می دهد. مقاومت الکتریکی این کابل با افزایش دما به تدریج افزایش یافته و در نزدیکی دمای ذوب ماتریس پلیمری، افزایش شدید و ناگهانی دارد. در این تحقیق سعی شده تا با مهندسی معکوس نمونه کابل هیت تریس خارجی، نمونه‌ای مشابه با استفاده از مواد داخلی تولید شود. آمیزه‌های مختلفی بر پایه پلی اتیلن سنگین با درصدهای مختلف فیلر رسانا و فیلر معدنی تهیه شد و پس از پرتو دهی با باریکه الکترون، مقاومت الکتریکی کامپوزیت‌های رسانا اندازه گیری و تاثیر پرتو دهی بر تکرار پذیری رفتار الکتریکی کامپوزیت‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که پرتو دهی با باریکه الکترونی منجر به بهبود تکرار پذیری رفتار کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم شد که این امر ناشی از کاهش حرکت آزاد ذرات دوده در دمای بالای ذوب کریستالی پلیمر در اثر ایجاد اتصالات عرضی است.

کلمات کلیدی: کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم، کامپوزیت‌های پلیمری هادی، پرتو دهی الکترون

Preparation of polymer blend for production of self-regulating heat tracing cable by electron beam irradiation

Anvari Tafti, Fatemeh^{۱*}, Ziyafati, Seid Amin^۱, Dehshiri, Saeideh^۱, Banaei, Maryam^۱, Ahmadian, Venus^۱, Parsaeian, Mohammad Reza^۱

۱. Atomic Energy Organization of Iran, Radiation Application Development Co.,
Radiation Processing Complex of Central Iran (Yazd)

Abstract:

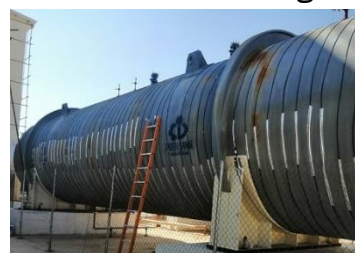
Self-regulating heat tracing cables are designed to adjust their heat output automatically based on the surface temperature of where they are applied. The electrical resistance of this cable increases gradually with increasing temperature and has a sharp increase near the melting temperature of the polymer matrix. In this research, an attempt has been made to produce a similar sample using internal materials by reverse engineering of the sample of heat trace cable. The effect of electron irradiation on the electrical behavior of HDPE composites filled with carbon black and mineral filler was investigated. The results show that the electron beam irradiation led to an improvement in the reproducibility of the cable behavior, which was due to the reduction of free movement of carbon black particles at above the melting temperature of polymer crystalline regions, resulting from increasing the crosslinking of polymer.

Keywords: Self Regulating Heat Tracing Cable, Conductive polymer composites, Electron beam irradiation



۱- مقدمه:

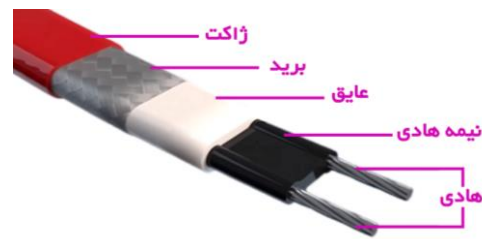
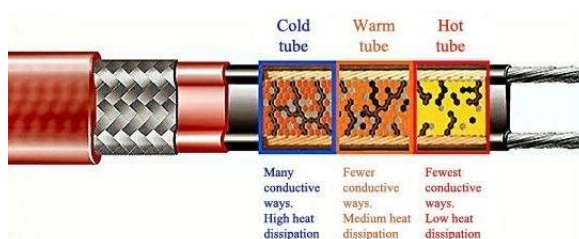
کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم (هیت تریس)^{۱۸۶} به گونه‌ای طراحی شده که حرارت خروجی خود را به طور خودکار بر اساس دمای سطح محل اعمال تنظیم نماید. این کابل از دو سیم مسی احاطه شده با ماتریس پلیمری کربنی تشکیل گردیده است. در صورت افزایش دما به علت انبساط ملکولی، اتم‌های کربن از هم فاصله گرفته و باعث افزایش مقاومت الکتریکی می‌شود. زمانی که دما کاهش یابد این فرایند معکوس شده و مقاومت الکتریکی کاهش می‌یابد. با افزایش و کاهش مقاومت الکتریکی، توان خروجی کابل نیز تغییر می‌کند [۳-۱]. ساختار کابل گرمایشی خود تنظیم به نحوی است که افزایش توان خود را به صورت اتلاف حرارتی بروز می‌دهد. این کار موجب افزایش حرارت اطراف کابل حرارتی و در نتیجه افزایش دمای سطوح و تجهیزات مورد نظری است که کابل هیت تریس آن‌ها را احاطه کرده است. هنگامی که در یک فرآیند صنعتی و یا مسکونی به منظور جلوگیری از یخ زدگی و یا کاهش دما در خطوط و مخازن، لازم است دمای فرآیند در حدی خاص نگه داشته شود از سیستم ردیاب حرارتی استفاده می‌شود. این سیستم به وسیله کابل‌های حرارتی دمای لوله‌ها، تانک‌ها، کف منازل، رمپ پارکینگ‌ها و سایر ادوات بکار رفته در خطوط انتقال سیال و ساختمان‌های مسکونی- اداری را بر روی دمایی مشخص تثبیت می‌کند. مهمترین کاربرد کابل‌های حرارتی خود تنظیم و سیستم ردیاب حرارتی در صنایع یخچال سازی و فریزر، گلخانه‌ها، صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی، صنعت گاز شامل مخازن و لوله‌ها، صنعت نفت و پتروشیمی، صنایع دریایی و کشتیرانی، صنایع ساختمان و راه سازی و ... می‌باشد [۴-۷].



شکل ۱: نمونه‌هایی از کاربرد کابل‌های ردیاب حرارتی خود تنظیم [۷]

کابل حرارتی خود تنظیم رفتار متفاوتی را در دماهای مختلف محیطی نشان داده و توان متغیری را در دماهای مختلف ارائه می‌نماید بگونه‌ای که در دماهای پایین جهت افزایش دما، توان بالاتری را تولید نموده و با افزایش دما توان خود را کاهش می‌دهد [۸]. ساختار کابل هیت تریس و نحوه عملکرد آن در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است [۹]. کابل هیت تریس متشکل از دو رشته هادی است که در تمام طول کابل کشیده شده و تنها راه اتصال این دو رشته و عبور جریان برق، پلیمر نیمه هادی سیاه رنگی است که این دو رشته را احاطه کرده است. لایه نیمه هادی، مهمترین بخش کابل ردیاب حرارتی خود تنظیم است و از پلیمرهای بلورینه نظیر پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، کوپلیمر اتیلن‌وینیل استات و ... و افزودنی‌های رسانا تهیه شده است. در این میان، پلی‌اتیلن (PE) با توجه به سهولت فرآیندپذیری، خواص فیزیکی- مکانیکی مطلوب و قیمت نسبتاً مناسب، کاربرد وسیعی در صنایع سیم و کابل، از جمله در ساخت کابل هیت تریس دارد. در میان افزودنی‌های رسانای مختلف نیز دوده^{۱۸۷} به دلیل قیمت نسبتاً پایین، تنوع و دسترسی آسان، از اهمیت قابل توجه و کاربری بالایی برخوردار است. برای دستیابی به مقاومت الکتریکی بالا طی گرمایش کابل‌های هیت تریس، لازم است یک شبکه‌ی رسانا با قابلیت نفوذ در سرتاسر ماتریس پلیمر توسط مقدار مشخصی از پرکننده‌های رسانا در کامپوزیت تشکیل شود. اساساً، رسانایی کامپوزیت به محتوای حجمی پرکننده هادی بستگی دارد [۷-۱۰].

^{۱۸۶} - Self Regulating Heat Tracing Cable
^{۱۸۷} - Carbon Black (CB)



شکل ۲: اجزاء کابل حرارتی خود تنظیم [۷ و ۶] شکل ۳: نحوه عملکرد کابل هیت تریس خود تنظیم [۱۱]

مطالعات نشان می‌دهد که شبکه‌ای کردن ساختار پلیمر باعث کاهش تحرک نامطلوب پرکننده رسانا شده و با افزایش دما از رشد انبوه‌های پرکننده در ماتریس پلیمری جلوگیری کرده و به تکرارپذیری رفتار حرارتی کامپوزیت کمک می‌نماید [۱۲-۱۳]. هدف از انجام این تحقیق دستیابی به تکنولوژی ساخت کامپوزیت مناسب برای تولید کابل حرارتی خود تنظیم بر پایه‌ی پلی‌اتیلن/ دوده با بکارگیری روش پرتودهی الکترونی بمنظور شبکه‌ای کردن ساختار کامپوزیت است. بر اساس مطالعات انجام شده و بررسی منابع مطالعاتی، مبنای کار یک کابل حرارتی خود تنظیم ساخت شرکت Raychem قرار گرفت که به عنوان نمونه شاهد انتخاب و آنالیز معکوس آن با آزمون‌های مختلف انجام شد.

۲- روش کار

۲-۱- مواد

از پلی‌اتیلن سنگین X^3 با شاخص جریان مذاب $0.45 \text{ g}/10 \text{ min}$ و دانسیته‌ی $0.94 \text{ g}/\text{cm}^3$ محصول پتروشیمی بندر امام به عنوان پلیمر زمینه، دوده $N-326$ از شرکت کربن سیمرغ به عنوان پرکننده‌ی هادی و روی اکساید به عنوان فیلر معدنی استفاده شد.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

آمیزه‌ها با استفاده از دستگاه مخلوط کن غلتکی مدل $PM3000$ ساخت شرکت Brabender آلمان در دمای 180°C و زمان اختلاط ۱۵ دقیقه تهیه شد. برای مشابه سازی نمونه‌ها با نمونه شاهد، قالب مستطیلی به ابعاد $2 \times 12 \times 50$ میلیمتر با تعبیه دو شیار برای عبور سیم مسی، طراحی و ساخته شد. پس از ثابت کردن دو رشته سیم مسی در شیارها، با استفاده از دستگاه پرس آزمایشگاهی (GRASEBY SPECAC Press) فرآیند قالبگیری آمیزه انجام شد و نهایتاً نمونه‌هایی مطابق شکل ۴ برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تهیه شد. نمونه‌ها با دستگاه شتابدهنده الکترون مدل رودترون $TT200$ با انرژی 10 MeV مستقر در مجتمع پرتو فرآیند ایران مرکزی (یزد) پرتودهی شد.

۲-۳- آزمون‌ها

۲-۳-۱- آزمون طیف سنجی تبدیل فوریه‌ی مادون قرمز (FTIR)

این آزمون هم بر روی نمونه شاهد و هم بر روی خاکستر حاصل از پیرولیز و سوزاندن نمونه شاهد در کوره الکتریکی انجام شد.

۲-۳-۲- آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC)

دمای ذوب و میزان بلورینگی ماتریس پلیمر به کمک دستگاه گرماسنج روبشی تفاضلی با سرعت حرارت‌دهی $10^\circ\text{C}/\text{min}$ در محیط نیتروژن اندازه‌گیری شد و مقدار بلورینگی از معادله (۱) محاسبه گردید [۱۴]:

$$Xc (\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m(100)}} \times 100 \quad \text{معادله (۱)}$$



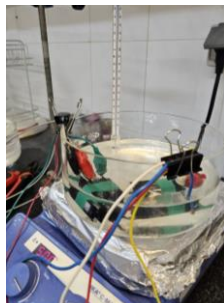
ΔH_m آنتالپی ذوب نمونه و $\Delta H_m(100)$ آنتالپی ذوب برای پلی‌اتیلن ۱۰۰٪ بلورین بر اساس مراجع = ۲۹۰ J/g (۱۵).

۳-۳-۲- آزمون وزن‌سنجی حرارتی (TGA)

آزمون وزن‌سنجی حرارتی با دستگاه TGA، مدل SDT Q600 در محدوده حرارتی ۲۵ تا ۱۰۰۰°C و با سرعت گرمایش ۱۰ °C/min انجام شد.

۳-۳-۲- آزمون مقاومت الکتریکی

پس از برقراری اتصالات، نمونه‌ها به همراه دماسنج در داخل حمام روغن سیلیکون بر روی دستگاه هیتر قرار گرفت و با استفاده از دستگاه اهم‌متر (FLUKE ۱۸۷ TRUE RMS Multimeter) میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌ها بر حسب دما اندازه‌گیری شد (شکل ۵).

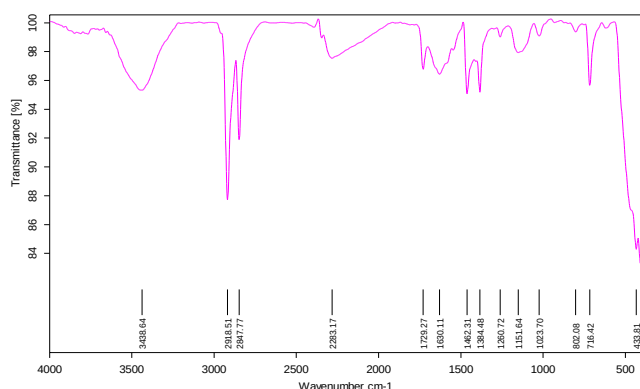


شکل ۴: قالب و نمونه آزمون مقاومت الکتریکی

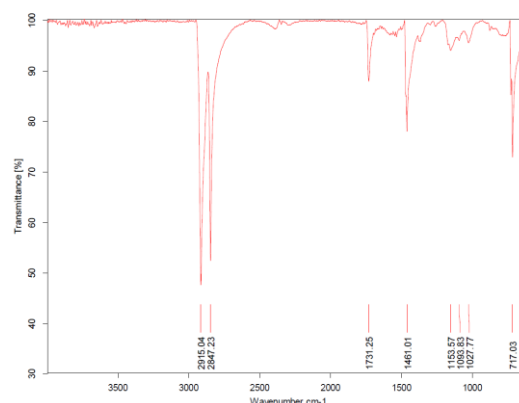
شکل ۵: ستاپ آزمایشگاهی اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۳- نتایج

نتیجه آزمون FTIR نمونه شاهد و خاکستر آن در شکل‌های ۶ و ۷ آمده است. طیف نمونه شاهد، باندهای جذبی در محدوده‌ی ۷۱۶، ۱۳۸۴، ۱۴۶۲، ۲۸۴۷ و 2918 cm^{-1} را نشان می‌دهد که با طیف پلی‌اتیلن سنگین منطبق است. با توجه به باندهای جذبی موجود در طیف استاندارد روی اکساید در محدوده‌های ۴۳۳، ۱۶۳۰ و 3430 cm^{-1} و مقایسه آن با باندهای جذبی طیف خاکستر شاهد در ۴۳۳، ۱۶۳۰ و 3438 cm^{-1} ، ملاحظه می‌گردد که این باندها انطباق خوبی با یکدیگر دارند و بنابراین می‌توان حضور روی اکساید را در نمونه شاهد تایید نمود [۱۶].



شکل ۷: طیف FTIR خاکستر نمونه شاهد

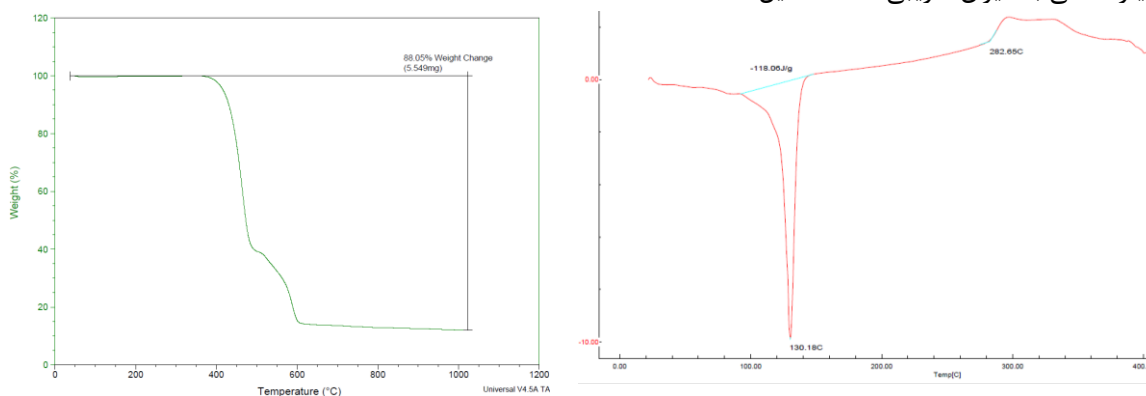


شکل ۶: طیف FTIR- ATR نمونه شاهد

ترموگرام گرمایش آنالیز DSC نمونه شاهد در شکل ۸ و داده‌های استخراج شده از آن در جدول ۱ آمده است. سطح زیر پیک ذوب نشان دهنده آنتالپی ذوب نمونه است و با استفاده از معادله (۱) می‌توان مقدار بلورینگی پلیمر را به دست آورد. با توجه به



نتایج آزمون، پایه پلیمری نمونه شاهد پلی اتیلن سنگین با میزان بلورینگی ۴۰٪ است. در گراف وزن سنجی نمونه شاهد دو مرحله افت وزنی دیده می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت که نمونه از سه جزء پلیمر به میزان تقریبی ۶۱٪، دوده به میزان تقریبی ۲۷٪ و فیلر معدنی به میزان تقریبی ۱۲٪ تشکیل شده است.



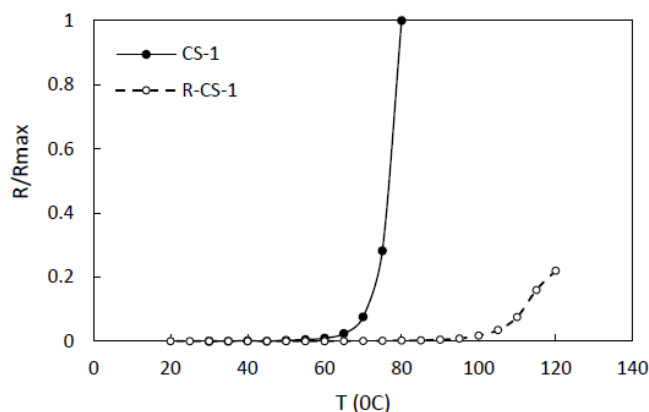
شکل ۹: نمودار وزن سنجی حرارتی نمونه شاهد

شکل ۸: ترموگرام گرمایش نمونه شاهد

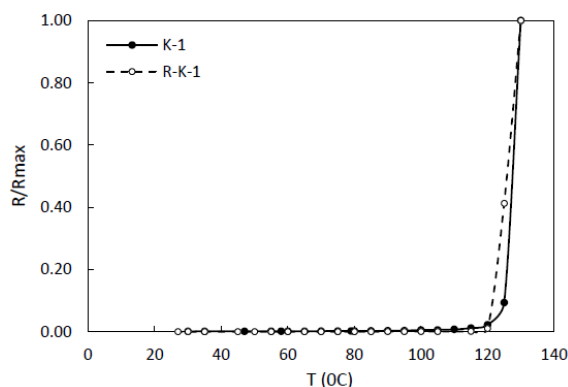
جدول ۱: نتایج رفتار گرماسنجی نمونه شاهد

نمونه	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
شاهد	۱۳۰/۱۸	-۱۱۸/۰۶	۴۰/۷

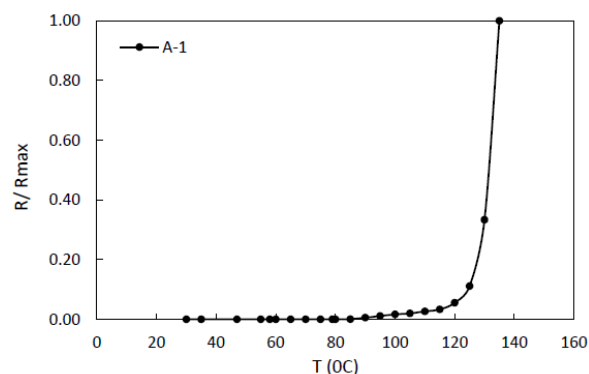
نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نرمالایز بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش و سرمایش برای نمونه شاهد و نمونه A حاوی ۲۰٪ دوده (پرتودهی شده در دز ۱۳۰ kGy) و نمونه بهینه K حاوی ۲۶٪ دوده و ۱۲٪ روی اکساید (پرتودهی شده در دز ۱۳۰ kGy) در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ آمده است. با مقایسه نتایج مشخص می‌شود که نمونه‌های A و K افزایش مقاومت الکتریکی را در دماهای بالاتری نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهند.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه شاهد نرمالایز شده بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش و سرمایش



شکل ۱۲: نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه K نرمالایز شده بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش و سرمایش



شکل ۱۱: نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی نمونه A نرمالایز شده بر حسب دما طی چرخه‌ی گرمایش

۴- نتیجه‌گیری

جمع‌بندی کلی نتایج نشان می‌دهد که:

- هر دو نمونه K و A روند افزایش مقاومت الکتریکی با افزایش دما را نشان می‌دهند، اگرچه با افزایش میزان دوده، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در کلیه‌ی دماها کاهش یافته و نارسا شدن در دماهای بالاتری ظاهر می‌شود.
- به علت تفاوت نوع دوده استفاده شده با دوده موجود در نمونه شاهد، لازم است میزان دوده در کنار فیلر معدنی بهینه شود تا دمای نارسا شدن کنترل گردد.

۵- مراجع

[۱] United States Patent, No.: ۲۰۰۶۰۲۸۹۴۷۶A1: SELF-REGULATING ELECTRICAL HEATING CABLE, Inventor: Jason Daniel Harold O'Connor, Glossop, Pub. Date: Dec. ۲۸, ۲۰۰۶.

[۲] United States Patent, No.: ۴,۲۰۰,۹۷۳: METHOD OF MAKING SELF-TEMPERATURE REGULATING ELECTRICAL HEATING CABLE, Inventor: Richard W. Farkas, Stow, Ohio Assignee, Samuel Moore and Company, Aurora, Ohio May ۶, ۱۹۸۰.

[۳] United States Patent, No.: US ۱۰,۴۷۰,۲۵۱ B۲, VOLTAGE-LEVELING MONOLITHIC SELF-REGULATING HEATER CABLE, Inventors: Mohammad Kazemi, San Jose, Peter Martin, San Ramon, Linda D. B. Kiss, San Mateo, Edward H. Park, Santa Clara, Jennifer Robison, Date of Patent: Nov. ۵, ۲۰۱۹.

[۴] ۳M™ Self-Regulating Heat Tracing Cables, Application Guide, ۳M Electrical Markets Division, ۳M Canada.

[۵] Design Guide and Installation Details for Self-Regulating Heating Cable, Heat Trace Products LLC, ISO ۹۰۰۱ REGISTERED, www.rsc-heattrace.com.

[۶] Self-regulating Parallel Heating Cables, eltherm innovations in heat tracing, THORNE & DERRICK INTERNATIONAL, www.heatingprocess.com.

[۷] <https://mobinsanatrastin.com>



- [۸] Safety Considerations for Electrical Heat Tracing, P. Baen; R. Jones; D. Mohla; N.R. Rafferty; L. Robicheaux; C. Sandberg, IEEE Industry Applications Magazine, Volume: ۲, Issue: ۲, March-April ۱۹۹۶, Pages: ۴۹ – ۵۹, DOI: ۱۰,۱۱۰۹/۲۹۴۳,۴۸۵۷۶۳.
- [۹] United States Patent, No.: US ۷,۵۶۶,۸۴۹ B۲, SELF-REGULATING ELECTRICAL HEATING CABLE, Inventor: Jason Daniel Harold O'Connor, Glossop, Date of Patent: Jul. ۲۸, ۲۰۰۹.
- [۱۰] Particle size induced tunable positive temperature coefficient characteristics in electrically conductive carbon nanotubes/polypropylene composites, Li, G., et al., Materials Letters, ۲۰۱۶, ۱۸۲: p. ۳۱۴-۳۱۷.
- [۱۱] Conductive Polymer Self-Regulating Heat Tracing Cable, ۱۹۷۲, IEEE Self-Regulating Paper by Oakes and Sandberg describing Technology.
- [۱۲] Positive/Negative Temperature Coefficient Behaviors of Electron Beam- Irradiated Carbon Blacks-Loaded Polyethylene Nanocomposites, Choong-Hee Kim, Seul-Yi Lee and Soo-Jin Park, ACS Omega ۲۰۲۲, ۷, ۴۷۹۳۳-۴۷۹۴۰.
- [۱۳] Effect of the Carbon Black Structure on the Stability and Efficiency of the Conductive Network in Polyethylene Composites, Danqi Ren, Shaodi Zheng, Shilin Huang, Zhengying Liu, Mingbo Yang, Journal of Applied Polymer Science, ۲۰۱۳, DOI: ۱۰,۱۰۰۲/APP.۳۸۶۰۶, DOI: ۱۰,۱۰۰۲/app.۳۸۶۰۶.
- [۱۴] ASTM D ۳۴۱۷- ۹۹, Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry (DSC).
- [۱۵] Effect of Initial Crystallinity on the Response of High- Density Polyethylene to High-Energy radiation, M.D. Failla, E.M. Valles, B.J. Lyons, Journal of Applied Polymer Science, Vol. ۷۱, PP. ۱۳۷۵-۱۳۸۴, ۱۹۹۹.
- [۱۶] The SADTLER Infrared Spectra Handbook of Minerals and Clays, Edited by: John R.Ferraro, ۱۹۸۲.



یکی از ما شوید!
انجمن هسته ای ایران

انجمن برتر کشور در سال ۱۴۰۲

🌐 NSI.IR ✉ INFO@NSI.IR

سی و یکمین کنفرانس هسته‌های ایران



۲۳-۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ | مشهد

I N C 3 1 . N S I . I R



پژوهشگاه علوم و فنون
هسته ای ایران



سازمان انرژی اتمی ایران



انجمن هسته ای ایران