

امکان‌سنجی ساخت حفاظ برای چشمه نوترونی امرسیوم-برلیوم با به کارگیری پسماندهای صنعتی به روش تجربی و الگوریتم ژنتیک

علیرضا تاجری نوش آبادی، سعیدپورعجم بافرانی، خدیجه رضایی ابراهیم سرایی* و ایرج جباری

گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

*اصفهان، دانشگاه اصفهان، گروه مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱

پست الکترونیکی: kh.rezaee@ast.ui.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، ترکیبی از خاک پسماند معدن سرب نخلک و سیمان با درصدهای متفاوت اسید بوریک به منظور ساخت حفاظ مناسب برای تابش‌های نوترون و گامای گسیل شده از چشمه نوترونی Am-Be استفاده شده است. به وسیله سیستم پرتوهدی نوترون حرارتی موجود در دانشگاه اصفهان و TLDهای نوع GR-206 و GR-207، میزان کاهش آهنگ دز نوترون توسط نمونه‌های ساخته شده بررسی شد. تغییرات آهنگ دز نوترون، مقاومت فشاری و میزان فعال شدن نمونه‌ها در اثر تابش نوترون اندازه‌گیری شد. تأثیر مقدار اسید بوریک در ترکیب حفاظ ساخته شده بر روی ضریب میرایی جرمی کل تابش گاما، توسط نرم‌افزار WINXCOM بررسی شد. با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مقدار بهینه اسید بوریک و میزان کاهش دز نوترون به ترتیب ۵۳/۱۵ درصد و ۹۰/۱ درصد به دست آمد. همچنین برای حفاظ با مقدار بهینه اسید بوریک، ضریب میرایی جرمی کل برای تابش گاما با انرژی ۴/۴۳۸ MeV و مقاومت فشاری به ترتیب $0.03262 \text{ cm}^2/\text{g}$ و 120.36 Kg/cm^2 به دست آمد.

کلیدواژگان: حفاظ نوترون و گاما، اسید بوریک، چشمه امرسیوم-برلیوم.

۱. مقدمه

یک حفاظ خوب باید سطح مقطع جذب بالا برای تابش داشته و در عین حال تابش فرودی بر روی خواص مکانیکی و اپتیکی آن تأثیر چندانی نداشته باشد [۳].

بتن یکی از مناسب‌ترین و پرکاربردترین مصالح برای ساخت حفاظ تابش‌های هسته‌ای نوترون و گاما است، زیرا علاوه بر دارا بودن خواص سازه‌ای مناسب، انتخاب‌های متنوعی در استفاده از مواد برای ساخت آن وجود دارد که منجر به ساخت بتن‌هایی با چگالی‌های مختلف و با ترکیبات متفاوت می‌شود. سهولت در ساخت، هزینه کم جهت ساخت، تعمیر و نگهداری، از دیگر مزایای بتن است [۴-۶]. بتن شامل عناصری همچون هیدروژن و آهن بوده که می‌تواند در کند کردن

امروزه حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای یکی از موضوعات مهم در تحقیقات مرتبط با علوم هسته‌ای است [۱]. برای کنترل شدت تابش دریافت شده از چشمه‌های رادیواکتیو روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها حفاظ‌سازی تابش به منظور کاهش شدت تابش خارجی تا حد قابل قبول است [۲]. از این رو مطالعات بسیاری بر روی ویژگی‌های مواد مختلف برای ساخت حفاظ انجام شده است. نوع و حفاظ مورد نیاز وابسته به نوع تابش، فعالیت چشمه تابش و آهنگ دز مجاز در خارج از حفاظ است. یک حفاظ مناسب افت انرژی زیادی از تابش را در یک مسافت نفوذ کوتاه در ماده باعث می‌شود، بدون اینکه تابش خطرناک‌تری را گسیل کند. به علاوه

که خاک پسماند شامل ۱۶/۱۶ درصد عنصر سرب است. همچنین نمونه آنالیز شده شامل عناصر دیگری است که در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی نمونه خاک پسماند و نمونه سیمان (آنالیز شده توسط XRF)

ترکیب مواد	سیمان (درصد)	خاک پسماند (درصد)
SiO ₂	۲۳/۴۰	۳۱/۴۰
CaO	۶۵/۳۰	۱۸/۱۱
PbO	-	۱۶/۱۶
BaO	-	۴/۰۱
MgO	۱/۲۰	۳/۰۷
Al ₂ O ₃	۴/۶۵	۳/۰۵
SO ₃	۲/۱۰	۲/۶۶
Fe ₂ O ₃	۰/۴۴	۱/۴۳
ZnO	-	۰/۶۳۲
K ₂ O	۰/۴۲	۰/۲۵۶
SrO	-	۰/۲۱۵
Na ₂ O	۰/۱۵	۰/۱۲۰
TiO ₂	-	۰/۱۳۷
CeO ₂	-	۰/۱۰۰
Cl	-	۰/۰۹۱
MnO	-	۰/۰۷۹
Cr ₂ O ₃	-	۰/۰۴۰
P ₂ O ₅	-	۰/۰۳۷
CuO	-	۰/۰۳۲
ZrO ₂	-	۰/۰۲۱
LOI*	<۲/۸	۱۸/۳۶
Total		۱۰۰/۰۱

* Loss on Ignition (1000 °C, 2 h)

با مخلوط کردن سیمان، خاک پسماند و اسید بوریک به همراه آب نمونه‌های مورد نظر ساخته شد. در تهیه نمونه‌ها، ابتدا مقادیر متفاوتی از اسید بوریک (۵، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۷۰ درصد از جرم کل ترکیب) که در حالت عادی به شکل گرد سفید رنگ است، به طور مجزا توزین شده و در مقدار کافی آب با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حل شد و پس از سرد

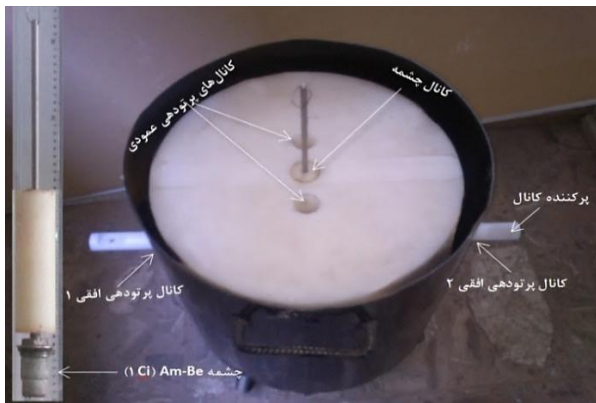
نوترون‌های سریع که قدرت نفوذ بالایی دارند، تأثیرگذار باشد [۷].

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری درخصوص بهبود ویژگی‌های حفاظت تابشی بتن با افزودن کانی‌های گوناگونی انجام شده است. اثر مخلوطی از سیمان پرتلند و سرب استخراج شده از پسماند (به عنوان یک نوع حفاظ بتنی) در تضعیف تابش‌های گامای یک چشمه سزیم، در تحقیقی توسط هوسینی و فاراموی بررسی شد [۳]. همچنین رضایی و عظیم‌خانی درصدهای مختلفی از سرب را با بتن ترکیب کرده و میزان تضعیف تابش‌های گامای گسیل شده از چشمه‌های کبالت و سزیم را بررسی کردند [۶].

در این پژوهش، ترکیبی از سیمان پرتلند نوع دو، سرب و نیز اسید بوریک با درصدهای مختلف برای بهینه‌سازی حفاظ پلی‌اتیلنی در تضعیف تابش‌های گاما و نوترون‌های حرارتی شده یک چشمه نوترونی Am-Be استفاده شد. هدف از این تحقیق استفاده بهینه از پسماندهای صنعتی در ساخت حفاظ‌های تابشی است، زیرا در دهه‌های اخیر تولید مواد پسماند و ضایعات به دلایل توسعه صنعت و تکنولوژی، رشد نمایی جمعیت و رشد مصرف، افزایش چشم‌گیری داشته است. از طرفی به دلیل مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی ناشی از برجای ماندن این مواد و همچنین هزینه‌های بالای دفع و پسمانداری، استفاده بهینه از آنها می‌تواند راه‌کار مناسبی برای رفع این مشکلات باشد.

۲. روش انجام کار

به منظور آماده‌سازی حفاظ تابش‌های نوترون و گاما، سیمان پرتلند نوع دو، خاک پسماند حاوی سرب و پودر اسید بوریک به کار برده شد. پسماند حاوی سرب، از معدن سرب نخلک در حوالی شهر انارک نایین استحصال شد. پسماند معدن سرب نخلک که همراه آب است به اندازه کافی تهیه و پس از خشک شدن در فضای بسته در دمای اتاق و در بازه زمانی ۱۸ روز، غربال شد. شناسایی نوع و میزان عناصر نمونه‌های خاک پسماند و سیمان توسط طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مدل Philips PW-2404 تعیین شد. نتایج نشان داد



شکل (۲): سیستم پرتودهی نوترون حرارتی دانشگاه اصفهان

برای تعیین دز نوترون در میدان‌های مختلط تابش‌های نوترون و گاما از TLDهای نوع GR-206A و GR-207A به قطر ۴/۵ mm، ضخامت ۰/۸۰ mm (ساخت چین) استفاده شد. ماده سازنده این آشکارسازها یکسان (LiF: Mg,Cu,P) ولی به ترتیب درصد ^6Li و ^7Li در آن‌ها بسیار متفاوت است. این TLDها هر دو پاسخ یکسانی به تابش‌های گاما و بتا دارند، ولی نوع GR-207A به دلیل سطح مقطع جذب بالاتر ^6Li در واکنش با نوترون‌های حرارتی (حدود ۹۴۰ بارن) به نوترون نیز حساس است. بنابراین می‌توان با استفاده هم‌زمان از این دو نوع TLD مقدار دز جذب شده گاما و نوترون را به‌طور مجزا محاسبه کرد [۹].

در ابتدا کالیبراسیون TLDهای مذکور در دزیمتری محیطی نوترون در میدان‌های مختلط تابش‌های نوترون و گاما انجام شد. به این منظور، پاسخ TLDها نسبت به زمان پرتودهی بررسی شد. سپس مطابق شکل (۳)، دو نوع TLD هر یک در پنج گروه سه‌تایی در قطعه پلی‌اتیلنی گذاشته شده و در مکانی که از قبل شار و آهنگ دز نوترون‌های حرارتی مشخص شده بود ($7/634 \mu\text{Sv/h}$)، قرار داده شدند. TLDهای مذکور در مدت زمان‌های مشخص نیم ساعت، یک ساعت، دو ساعت، ۸/۵ ساعت و ۲۰ ساعت پرتودهی شدند. همچنین سه عدد از هر نوع TLD برای شمارش تابش زمینه استفاده شد. پس از پرتودهی، TLDها با استفاده از قرائت‌گر PCL3 مرکز انرژی اتمی اصفهان قرائت شدند. سپس نمودار خروجی قرائت‌گر (پالس) برحسب دز (mSv) رسم و از این طریق کالیبراسیون دزیمترهای مذکور انجام شد.

شدنیه مخلوط بهینه‌شده ابتدایی (شامل ۴۹/۵ درصد خاک پسماند و ۵۰/۵ درصد سیمان) افزوده شد تا یک نمونه کاملاً یکنواخت و همگن حاصل شود. سپس ملات به دست آمده در ظروف پلی‌اتیلنی استوانه‌ای با ارتفاع ۴ cm و قطر ۱ cm ریخته و فشرده شد (شکل ۱). نمونه‌ها پس از مدت هفت روز، برای مطالعه میزان تضعیف تابش‌های نوترون و گاما به کار برده شدند. با توجه به تأثیر مولکول‌های آب در کندکنندگی نوترون‌ها، نمونه‌های ساخته‌شده تا خشک شدن کامل در دمای اتاق نگهداری شدند.



شکل (۱): اسید بوریک، خاک پسماند، سیمان و نمونه‌های آماده شده برای پرتودهی

همچنین به منظور بررسی مقاومت نمونه‌های ساخته شده با درصد‌های وزنی اسید بوریک ذکرشده، طبق استاندارد ASTM-1988C برای اندازه‌گیری مقاومت بتن، نمونه‌های استوانه شکل به ارتفاع ۱۲ cm و قطر ۶ cm تهیه شد و پس از هفت روز آزمایش‌های لازم بر روی نمونه‌ها توسط دستگاه پرس انجام گرفت. برای تهیه نمونه‌ها همان‌طور که در آیین‌نامه ACI بیان شده است، باید دما و رطوبت محیط نگهداری نمونه‌ها به ترتیب ۲۲ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ درصد باشد [۸].

برای بررسی میزان جذب نوترون‌های کندشده توسط نمونه‌های ساخته‌شده، از سیستم پرتودهی نوترون حرارتی با کندکننده پلی‌اتیلنی موجود در دانشگاه اصفهان که در شکل (۲) نشان داده شده است، استفاده شد.

ژنتیک و بهینه‌سازی چند پارامتری، درصد بهینه‌ اسید بوریک در ترکیب مشخص شد. در این درصد توازن میان قدرت تضعیف نوترون، ضریب میرایی جرمی و مقاومت فشاری وجود دارد.

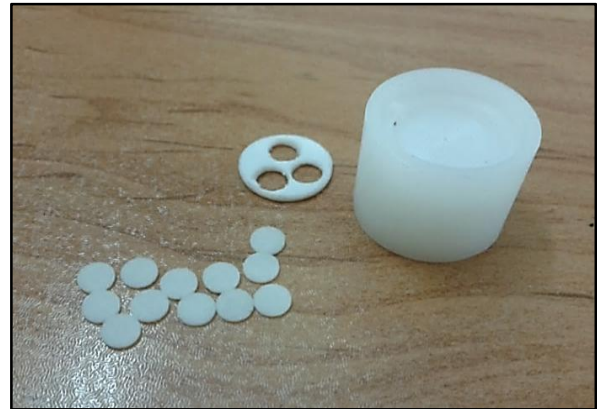
۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) تکنیک جست‌وجویی در علم رایانه برای یافتن راه‌حل تقریبی برای بهینه‌سازی و مسائل جست‌وجوست. یک الگوریتم ژنتیک مسئله را به صورت مجموعه‌ای از رشته‌ها که شامل ذرات ریز هستند، کدگذاری می‌کند، سپس برای تحریک فرایند تکامل تدریجی، تغییراتی را بر روی رشته‌ها اعمال می‌دارد. در این کار، بهینه‌سازی براساس روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب یا NGSA که یکی از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی چند هدفه است، انجام شده است. پس از ارائه نسخه اول این الگوریتم در سال ۱۹۹۵، معرفی‌کنندگان این الگوریتم نسخه دوم آن را در سال ۲۰۰۲ با نام اختصاری NGSA-II ارائه نمودند [۱۱].

برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چند منظوره استفاده شده است که بعد از ۲۴۵ تکرار به نتیجه مطلوب می‌رسد. بهینه‌سازی چند هدفه با استفاده از دستور `optim_nsga2` اجرا خواهد شد. شبکه عصبی طراحی شده برای این الگوریتم، یک شبکه دو لایه مخفی با ۵ پرسپترون در هر لایه، با یک ورودی و دو خروجی است (۲-۵-۱). تابع فعال‌سازی برای هر لایه `Tangent Sigmoid` در نظر گرفته شده است.

۴. نتایج

منحنی‌های پاسخ GR-206، GR-207 و تفاوت شمارش این دو نوع TLD برحسب مدت زمان پرتودهی در شکل (۴) آمده است. مشاهده می‌شود که پاسخ در هر سه مورد به صورت کاملاً خطی است. همچنین نمودار کالیبراسیون این دو نوع TLD در دزیمتری محیطی نوترون به صورت شکل (۵) حاصل شد. عکس شیب این نمودار معرف ضریب کالیبراسیون CF و برابر با $10^{-6} \times 4/71$ است که با ضرب آن در خروجی



شکل (۳): نحوه آماده کردن TLDها برای پرتودهی

با ایجاد حفره‌هایی به عمق ۱ cm در نمونه‌های آزمایشگاهی، TLDها را درون آنها قرار داده و سپس حفره‌ها با همان درصد ترکیب پر شدند. در این پژوهش برای هر نمونه از دو آشکارساز GR-206 و دو آشکارساز GR-207 استفاده شد. پنج نمونه شامل درصدهای مختلف از اسید بوریک، به همراه دو GR-206 و دو GR-207 با شرایط هندسی یکسان روی وجه بالایی سیستم پرتودهی قرار داده شد. بدین منظور نمونه‌ها روی محیط دایره به مرکز چشمه قرار داده شدند تا در فاصله کاملاً یکسان از چشمه باشند. پس از گذشت مدت زمان ۶۶/۵ ساعت مقدار دزهای دریافتی محاسبه شد.

یکی از ویژگی‌های حفاظ مناسب این است که خود حفاظ هیچ تابشی از خود نداشته باشد. درباره حفاظ‌های نوترون با توجه به قدرت فعال کردن هسته‌های عناصر تشکیل‌دهنده حفاظ توسط نوترون‌های فرودی، حفاظ‌هایی مناسب‌ترند که نسبت به تابش مستقیم نوترون دارای تابش ثانویه کمتری باشند. برای محاسبه فعالیت حفاظ، نمونه‌های ساخته شده و پرتودهی شده در مقابل آشکارساز NaI قرار داده و از این طریق، میزان فعالیت آن‌ها نسبت به حالت اولیه بررسی شد. همچنین برای اندازه‌گیری ضریب میرایی جرمی کل تابش‌های گاما برای انرژی $MeV 4/438$ چشمه مذکور، از برنامه کامپیوتری WINXCOM [۱۰] استفاده شد.

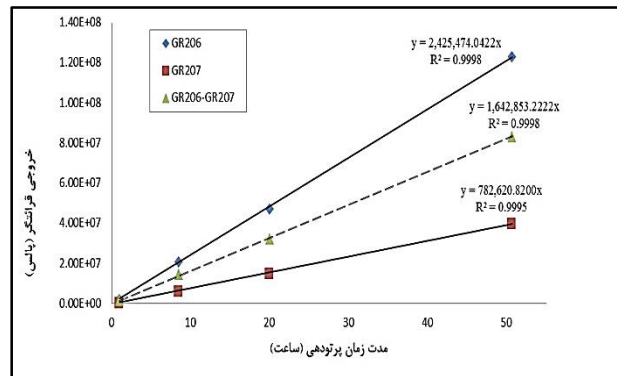
در نهایت با مشخص بودن ویژگی‌های حفاظ از جمله مقدار تضعیف نوترون، ضریب میرایی جرمی کل برای تابش‌های گاما و نیز مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها، با استفاده از الگوریتم

جدول (۲): نتایج به دست آمده به ازای درصدهای متفاوت اسید

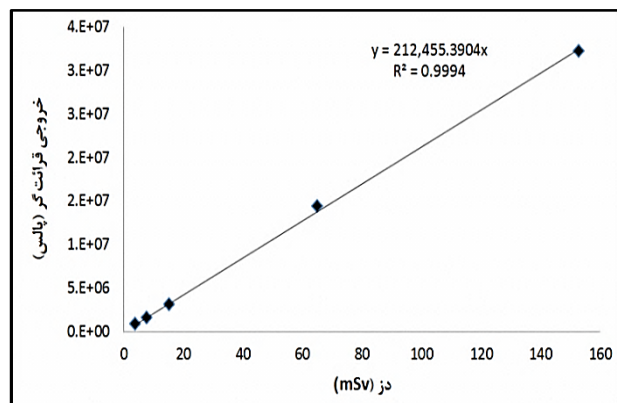
بوریکی در نمونه‌ها				
درصد	آهنگ دز	ضریب	مقاومت	فعالیت
اسید	نوترون ثبت شده توسط	میرایی	فشاری	نمونه‌ها
بوریکی در	دزیمترهای گرمالیانی	جرمی کل	(Kg/cm ²)	(Bq)
ترکیب	(μSv/h)	(cm ² /g)		
۵	۲۵/۱۲	۰/۰۳۱۱	۱۸۵	۷
۲۰	۱۰/۴۱	۰/۰۳۲۰	۱۷۰	۱۲
۴۰	۶/۳۹	۰/۰۳۲۵	۱۸۰	۹
۶۰	۳/۶۳	۰/۰۳۲۷	۱۲۵	۴
۷۰	۲/۶۹	۰/۰۳۳۱	۷۵	۱۴

با افزایش درصد اسید بوریکی موجود در نمونه، میزان تضعیف نوترون و گاما افزایش می‌یابد. ولی این افزایش با کاهش مقدار مقاومت نمونه‌ها در برابر فشار همراه است. بنابراین مؤلفه محدود کننده در بیشینه شدن ضریب تضعیف نوترون و گاما مقاومت فشاری است. درصدی از اسید بوریکی و خاک پسماند که بیشترین سهم را در تضعیف تابش‌های نوترون و گاما دارد، با در نظر گرفتن محدودیت مقاومت فشاری و استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک مشخص می‌شود. با توجه به رابطه مستقیم ضریب میرایی جرمی کل تابش‌های گاما و نیز تضعیف نوترون، استفاده از یکی از این دو مؤلفه به همراه مقاومت فشاری برای بهینه‌سازی کافی است. برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک چند منظوره استفاده شده است که بعد از ۲۴۵ تکرار به نتیجه مطلوب می‌رسد. مقدار بهینه اسید بوریکی در حفاظ ساخته شده، ۵۳/۱۵ درصد و میزان تضعیف تابش نوترون ۹۰/۱ درصد به دست آمد، یعنی آهنگ دز نوترون در این حالت به $4/79 \mu\text{Sv/h}$ کاهش یافت. همچنین در این مقدار بهینه، ضریب میرایی جرمی کل برای تابش گاما با انرژی $4/438 \text{ MeV}$ و مقاومت فشاری به ترتیب برابر با $0/03262 \text{ cm}^2/\text{g}$ و $120/36 \text{ Kg/cm}^2$ به دست آمد.

قرائت‌گر (برحسب پالس) مقدار دز برحسب mSv به دست می‌آید. بر اساس محاسبات انجام شده مقدار شمارش نوترون روی وجه بالایی این حفاظ پلی اتیلنی برابر 681930 یا mSv $3/21$ است. از آنجایی که پرتو دمی نمونه‌ها $66/5$ ساعت انجام شد، آهنگ دز در این حالت $48/30 \mu\text{Sv/h}$ به دست آمد.



شکل (۴): منحنی‌های پاسخ GR-207، GR-206



شکل (۵): نمودار کالیبراسیون TLDهای GR-207، GR-206

در جدول (۲) تغییرات آهنگ دز نوترون با در نظر گرفتن حفاظ ساخته شده آورده شده است. مقادیر نشان می‌دهد که با افزایش درصد اسید بوریکی جذب نوترون‌ها افزایش پیدا کرده و در نتیجه، دز یا آهنگ دز کاهش می‌یابد. در جدول مذکور، مقادیر ضریب میرایی جرمی نمونه‌های ساخته شده، مقادیر مقاومت فشاری و فعالیت نمونه‌های ساخته شده برای درصدهای مختلف اسید بوریکی در ترکیب آورده شده است. شایان ذکر است در حالتی که در ترکیب نمونه ساخته شده از اسید بوریکی استفاده نشود، ضریب میرایی جرمی کل $0/0309 \text{ cm}^2/\text{g}$ است.

۵. بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش، با ترکیب خاک پسماند حاوی سرب، سیمان پرتلند نوع دو و درصد‌های متفاوتی از اسید بوریک نمونه‌های استوانه‌ای شکل به‌عنوان حفاظ ساخته شد تا میزان تضعیف تابش‌های نوترون و گاما توسط آن‌ها، ضریب میرایی جرمی کل برای تابش‌های گاما، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها و نیز میزان فعالیت نمونه‌ها در اثر تابش نوترون، با درصد‌های متفاوت اسید بوریک بررسی شود. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده، بیانگر کاهش آهنگ دز نوترون با افزایش مقدار اسید بوریک در ترکیب حفاظ است. درصدی از اسید بوریک و خاک پسماند که بیشترین سهم را در تضعیف

تابش‌های نوترون و گاما دارد، با در نظر گرفتن محدودیت مقاومت فشاری و استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برابر با مقدار ۵۳/۱۵ درصد به‌دست آمد. در این مقدار بهینه، میزان تضعیف تابش نوترون، ضریب میرایی جرمی کل برای تابش گاما با انرژی $4/438 \text{ MeV}$ و مقاومت فشاری به‌ترتیب برابر با $90/1$ درصد، $0/03262 \text{ cm}^2/\text{g}$ و $120/36 \text{ Kg/cm}^2$ به‌دست آمد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اظهار داشت که با استفاده از خاک پسماند موجود و صرف هزینه‌های پایین در کنار ساخت حفاظ مناسب برای تابش‌های نوترون، می‌توان به پالایش محیط زیست از آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای صنعتی کمک کرد.

۶. مراجع

- containing different percentages of lead. *Appl Radiat Isotopes*. 70 (2012) 2282-2286.
- [1] A. B. Azeez, K. S. Mohammed, M. M. Al Bakri Abdullah, K. Hussin, A. V. Sandu, R. A. Razak. The Effect of Various Waste Materials' Contents on the Attenuation Level of Anti-Radiation Shielding Concrete. *Maters*. 6 (2013) 4836-4846.
- [2] B. Oto, A. Gür. Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. *Int J Phys Sci*. 8 (2013) 310-314.
- [3] M. Erdem, O. Baykara, M. Dogru, F. Kuluozturk. A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for gamma ray. *Radiat Phys Chem*. 79 (2010) 917-922.
- [4] D.B. Tefelski, T. Piotrowski, A. Polański, J. Skubalski, V. Blideanu. Monte-Carlo aided design of neutron shielding concretes. *B Pol Acad Sci-Tech*, 61 (2013) 161-171.
- [5] O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, M. Filiz, An investigation on the concrete properties containing colemanite, *Int J Phys Sci*. 5 (2010) 216-225.
- [6] D. Rezaei-Ochbelagh, S. Azimkhani, Investigation of gamma-ray shielding properties of concrete
- [7] S. Orak, D. Y. Baysoy, Neutron Shielding Properties of Concrete With Boron and Boron Containing Mineral. *APJES*. 1 (2013) 15-19.
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM International, ASTM C39/C39M-12a-Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [9] C. Cheresteş. Calibration of Personal Albedo Neutron Dosimeter in mixed gamma-neutrons fields. *Optoelectron Adv Mat*. 5 (2011) 802-805.
- [10] L. Gerward, N. Guilbert, K. B. Jensen, H. Levring. WinXCom -a program for calculating X-ray attenuation coefficients. *Radiat phys chem*. 71 (2004) 653-654.
- [11] J. P. Dueholm. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms, University of Aarhus, Department of Computer Science, Denmark, (2009).