

بررسی تأثیر شرایط شیمیایی محیط (pH) و زمان بر ضریب جذب پرتو گاما سنگ‌ها

سهند گل محمدی^۱، مجید نوریان بیدگلی^{۱*} و احمد رضانی مقدم آرائی^۲

^۱ گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

^۲ گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

* اصفهان، کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: norian@kashanu.ac.ir

چکیده

سنگ‌ها به‌عنوان موانع طبیعی، نقش مهمی در کاهش گسترش تشعشعات در سازه‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو و همچنین داخل ساختمان‌های اداری و مسکونی دارند. بنابراین پایداری عملکرد حفاظتی آن‌ها در برابر شرایط شیمیایی متغیر محیط طی زمان، اهمیت بالایی دارد. در این پژوهش، تأثیر شرایط شیمیایی محیط شامل مقادیر مختلف pH (۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰) و زمان تماس محلول با نمونه تا ۲۴ ماه، بر ضریب جذب جرمی پرتو گاما چهار نوع سنگ طبیعی شامل گرانیت، تراورتن، مگنتیت و هورنبلند بررسی شده است. برای این منظور، از سه روش مکمل شامل؛ آزمایش تجربی با آشکارساز گایگر-مولر، شبیه‌سازی مونت کارلو با کد MCNPX و داده‌های پایگاه XCOM استفاده گردید. ابتدا ضریب جذب در شرایط خشک تعیین و سپس نمونه‌ها در محلول‌هایی با pH مختلف غوطه‌ور شدند. نتایج نشان داد مگنتیت با ضریب جذب حدود $0.62 \text{ cm}^2/\text{g}$ به دلیل چگالی بالا و محتوای آهن (۷۲٪)، عملکرد حفاظتی بالایی را دارد، اما در محیط اسیدی ($\text{pH}=3$) این ضریب تا ۲۰٪ کاهش می‌یابد. گرانیت با تغییرپذیری کمتر از ۱۰٪ در دامنه pH مورد بررسی، پایدارترین سنگ و گزینه‌ای مناسب برای سازه‌های دفن عمیق است. در مقابل، تراورتن در محیط اسیدی به دلیل انحلال کلسیت، کاهش ۳۰٪ و هورنبلند در محیط قلیایی ($\text{pH}=10$) به دلیل تخریب شبکه سیلیکاتی، کاهش ۱۵٪ در ضریب جذب را نشان دادند. همچنین، زمان تماس با محلول‌ها اثری غیرخطی و محسوس بر کاهش توان حفاظتی سنگ‌ها دارد. همخوانی مناسب نتایج حاصل از روش‌های مختلف (با اختلاف کمتر از ۵٪)، دقت و قابلیت اعتماد یافته‌ها را برای طراحی ایمن سامانه‌های دفن پسماندهای رادیواکتیو سطح بالا تأیید می‌کند.

کلیدواژگان: ضریب جذب جرمی، پرتو گاما، سنگ طبیعی، pH محیط، زمان.

۱. مقدمه

رادیواکتیو عمل کنند [۲، ۱]. بنابراین، ارزیابی پارامترهای توده سنگ برای سنجش توانایی آن‌ها در جذب تشعشعات ضروری است [۳]. در این مورد، نوع سنگ، پارامترهای اصلی

در برخی پروژه‌های مهندسی هسته‌ای مانند دفع پسماندهای رادیواکتیو و نیروگاه‌های اتمی، توده‌های سنگی می‌توانند به‌عنوان موانع طبیعی در برابر تشعشعات گاما و انتشار

ناپیوستگی و ویژگی‌های شیمیایی در تعیین رفتار توده سنگ در برابر تشعشعات نقش حیاتی دارند. بنابراین، ارزیابی پارامترهای مذکور برای پیش‌بینی واکنش مکانیکی و شیمیایی توده سنگ و بهبود طراحی‌های ایمنی ضروری است [۵،۴].

پارامترهای مکانیکی سنگ‌ها نقش حیاتی در ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی دارند. این ویژگی‌ها به عواملی چون فشار، دما و همچنین ترکیب شیمیایی محیط بستگی دارند. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که می‌تواند بر این ویژگی‌ها تأثیر بگذارد، pH محیط است. تحقیقات نشان داده‌اند که تغییرات pH می‌تواند باعث تغییر در رفتار مکانیکی سنگ‌ها شود، به‌ویژه هنگامی که سنگ‌ها تحت شرایط مختلف شیمیایی قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، در محیط‌های اسیدی، واکنش‌های شیمیایی ممکن است باعث کاهش استحکام و سختی سنگ‌ها شوند، در حالی که در محیط‌های بازی، این ویژگی‌ها ممکن است تغییرات متفاوتی را نشان دهند [۶].

مطالعات نشان داده‌اند که pH می‌تواند تأثیرات مختلفی بر ویژگی‌های سنگ‌ها از جمله فشردگی، انعطاف‌پذیری، و مقاومت به سایش داشته باشد. در این راستا، تحقیقاتی انجام گردید که نشان داد که سنگ‌های کلسیتی تحت شرایط اسیدی با کاهش مقاومت فشاری و کششی مواجه می‌شوند. در مقابل، سنگ‌های رسوبی با pH پایین‌تر به دلیل واکنش‌های شیمیایی بیشتر دچار تغییر در ساختار میکروسکوپی خود می‌شوند. بنابراین، آگاهی از تأثیر pH بر ویژگی‌های سنگ‌ها می‌تواند در تحلیل و پیش‌بینی رفتار آن‌ها در فرآیندهای مختلف مهندسی و معدنی مفید باشد [۷].

با توسعه پایدار نیروگاه‌های هسته‌ای در سطح جهانی، حجم عظیمی از پسماندهای پرتوزا در چند دهه اخیر تولید و انباشته شده است [۸].

امروزه تقریباً کلیه کشورهای بهره‌بردار از انرژی هسته‌ای، دفن عمیق زمین‌شناسی (Geological Disposal Deep) را

به‌عنوان راهبرد بلند مدت مدیریت پسماندهای پرتوزای سطح بالا (High-Level Waste, HLW) پذیرفته‌اند [۹]. برای تضمین ایمنی این روش، سیستم دفن متکی بر سدی چندسازه‌ای (Multibarrier System) شامل:

(۱) فرم شیمیایی پسماند.

(۲) ظرف نگهدارنده.

(۳) سدها و موانع مهندسی.

(۴) سد طبیعی متشکل از سنگ میزبان است [۱۰]. این سامانه از مهاجرت رادیونوکلیدها به سمت زیست کره جلوگیری می‌کند. هدف نهایی، رسیدن به وضعیتی است که در گذر زمان، فعالیت باقیمانده رادیونوکلیدها به سطحی کاهش یابد که اثرات زیان‌بار بر انسان نداشته باشد. بررسی نفوذ و انتشار مواد پرتوزا در مخازن دفن پسماندهای هسته‌ای و معادن تحت تابش پرتو به دلایل ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین پیش از بهره‌برداری از این سازه‌ها، مطالعه‌ای دقیق و کارشناسی‌شده درباره رفتار مواد پرتوزا در محیط‌های گوناگون ضروری است. میزان نفوذ و انتشار مواد پرتوزا در لایه‌های نزدیک به سطح مخازن دفن، یکی از پارامترهای ایمنی محوری در طراحی است. برای اطمینان از عملکرد بهینه این مخازن، روش‌های مدل‌سازی کمی به‌طور گسترده به کار گرفته می‌شوند. ضریب جذب خطی (μ) بیان‌گر احتمال برهم‌کنش فوتون‌های پرتو گاما در واحد طول مسیر طی شده است. ضریب جذب جرمی (μ/ρ) که از تقسیم μ بر چگالی ماده (ρ) به‌دست می‌آید، کمیتی مستقل از چگالی بوده و کاربردهای اساسی در محاسبه نفوذپذیری پرتوها در مواد، تعیین انرژی جذب‌شده در بافت‌های زیستی و طراحی سازه‌های حفاظ پرتویی دارد.

رابطه ریاضی کاهش شدت تابش بر اساس این ضریب در معادله (۱) ارائه شده است [۱۱]:

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

در این رابطه:

I : شدت تابش پس از عبور از ماده.

I_0 : شدت تابش اولیه، قبل از عبور از ماده.

μ : ضریب جذب خطی معمولاً بر حسب cm^{-1} یا m^{-1} .

t : ضخامت ماده (یا فاصله طی شده توسط تابش) است که

بر حسب سانتی‌متر یا متر اندازه‌گیری می‌شود.

ضریب جذب خطی (μ) بیان‌گر میزان تابش جذب شده در

ماده است. مقدار μ بسته به ویژگی‌های ماده مانند چگالی،

ترکیب شیمیایی و انرژی تابش تغییر کرده و این ضریب در

تشعشعات هسته‌ای (مانند تابش گاما و ایکس) نقش مهمی در

تعیین میزان جذب تابش در مواد مختلف دارد. برای تشعشعات

با انرژی‌های متفاوت، ضریب جذب خطی نیز متفاوت خواهد

بود.

ضریب جذب جرمی کلی برای یک ماده چند عنصری،

مجموع حاصلضرب مقادیر ضریب جرمی $(\mu/\rho)_i$ و کسر وزنی

هر عنصر w_i است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

(۲)

در این رابطه:

μ : ضریب جذب خطی معمولاً بر حسب cm^{-1} یا m^{-1} .

w_i : کسر وزنی هر عنصر.

ρ : چگالی ماده بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب.

اندازه‌گیری ضرایب جذب فوتون‌ها در مواد زیستی و سایر

مواد اهمیت زیادی در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت،

بیولوژی، کشاورزی و پزشکی دارد. علاوه بر این، مقادیر دقیق

ضرایب جذب جرمی فوتون برای تهیه و تأمین داده‌های

ضروری در زمینه‌هایی مانند مقطع‌نگاری، طیف‌سنجی،

رادیوگرافی، فیزیک اتمی، پزشکی تشخیصی، مطالعات

فلورسانس پرتوگاما، بلورنگاری و بیوفیزیک تابش مورد نیاز

است [۱۲، ۱۳]. به همین دلیل، از زمان‌های ابتدایی مطالعات پرتو

ایکس، اندازه‌گیری ضرایب جذب جرمی و مقایسه آن‌ها با

داده‌های نظری انجام شده است و تحقیقات برجسته‌ای در

زمینه اندازه‌گیری و محاسبه این ضرایب منتشر شده است.

ضرایب جذب برخی از اسیدهای چرب [۱۴]، مس، ایندیوم و

سلنیوم در حالت عنصری و نیمه‌رسانای CuInSe_2 [۱۵]

نمونه‌های بیولوژیکی مثل استخوان، ماهیچه، چربی و آب

[۱۶]، نمونه‌های بیولوژیکی حاوی هیدروژن، کربن، نیتروژن و

اکسیژن [۱۷]، بتن، باکلیت و سیمان [۱۸-۲۰]، آمینواسیدها

[۲۱]، بافت‌ها و اعضای بدن انسان [۲۲]، اکسیدهای فلزی

سنگین [۲۲]، نمونه‌های بیولوژیکی و زمین‌شناختی [۲۳]،

سرامیک بر پایه سرب [۲۴] و چند پلیمر [۲۵] در انرژی‌های

مختلف اندازه‌گیری یا از طریق شبیه‌سازی به دست آمده‌اند.

ضرایب جذب توسط دو الگوریتم منطق فازی و یک الگوریتم

شبکه عصبی با نسبت‌های مختلف مخلوط سرباره و نادیوم /

رزین اپوکسی / آنتیموان در محدوده انرژی 0.5 MeV الی

2 MeV آموزش و آزمایش شدند مدل‌های فازی عصبی سه

برابر سریع‌تر از مدل‌های شبکه عصبی آموزش داده می‌شوند،

در حالی که مدل‌های شبکه عصبی RMSE کم را نشان

می‌دهند. الگوریتم‌های منطق فازی در تقریب تابع پیچیده

نادیده گرفته می‌شوند، با این حال الگوریتم‌های فازی

تقسیم‌بندی‌شده شبکه‌ای راندمان محاسباتی عالی و هم‌گرایی

خوبی را در پیش‌بینی ضریب جذب جرم نشان دادند [۲۶].

دفع پسماندهای رادیواکتیو سطح بالا (HLW) از طریق

دفن در سازندهای زمین‌شناسی به عنوان ایمن‌ترین و

قابل‌اجرترین روش شناخته می‌شود. گرانیب به دلیل مقاومت

فشاری بالا، تخلخل کل کم، هدایت حرارتی خوب و پایداری

حرارتی به عنوان مانع طبیعی بالقوه برای مخزن HLW در نظر

گرفته شده یا انتخاب شده است [۲۷]. با این حال، سنگ

میزبان گرانیب دارای شکستگی‌های پراکنده گسترده است.

هنگامی که سیستم مانع چندگانه یک مخزن آسیب ببیند،

رادیونوکلیدها ممکن است از طریق این شکستگی‌ها به محیط

بیرون منتشر شوند. به عنوان مثال کشور چین سازند گرانیب

بیشان (استان گانسو، چین) را به‌عنوان مکان مخازن HLW در نظر می‌گیرد، ایجاد درک کامل از رفتار انتقال رادیونوکلئید در محیط‌های گرانیتی بیشان بسیار مهم است. ایزوتوپ‌های اورانیوم به‌دلیل نیمه عمر طولانی به‌عنوان مواد با تشعشع بالا و مواد شیمیایی سمی در مخزن زباله‌های هسته ای محسوب می‌گردند.

اورانیوم عمدتاً به‌شکل شش ظرفیتی به‌عنوان یون اورانیل در محیط وجود دارد [۲۹، ۲۸]. در طول دو دهه گذشته، مطالعات انجام شده آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهد که انتقال U (VI) به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر کلوئیدهای طبیعی در آب‌های زیرزمینی است، به‌عنوان مثال، مواد آلی طبیعی (NOM) و کلوئیدهای معدنی (مواد معدنی خاک رس، نانوذرات اکسید/Fe/Al/هیدروکسید). کلوئیدهای طبیعی به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند مساحت سطح بزرگ، ویژگی‌های بار منحصر به فرد و گروه‌های عاملی بسیار واکنش‌پذیر، میل ترکیبی قوی به رادیونوکلئیدها دارند و به‌عنوان یک ناقل بالقوه برای انتقال پرتوزا عمل می‌کنند [۳۰].

علاوه بر اکسی هیدروکسیدهای آهن کلوئیدی، اکسی هیدروکسیدهای آلومینیوم کلوئیدی با بار مثبت نیز به‌طور گسترده در سیستم‌های آب زیرزمینی وجود دارد، به‌عنوان مثال کلوئید گیبسایت (GC) Gibbsite به‌طور گسترده به‌عنوان یک مدل مورد مطالعه قرار می‌گیرد؛ زیرا نه تنها رایج‌ترین اکسی هیدروکسید آلومینیوم کریستالی است، بلکه یک محصول حاصل از هوازدگی مواد معدنی آلوموسیلیکات است [۳۱]. علاوه بر این، به‌دلیل اینکه نقطه ایزوالکتریک گیبسایت حدود ۱۰ است، GC می‌تواند پایداری ترمودینامیکی بالایی در محدوده PH تقریباً خنثی از خود نشان دهد [۳۲].

تأثیر شیمیایی محیط بر روی میزان ضریب جذب تشعشعات سنگ یکی از مسائل بسیار مهم در محیط‌های غیر خشک است. با توجه به اینکه سنگ‌های مختلف با ترکیب‌های

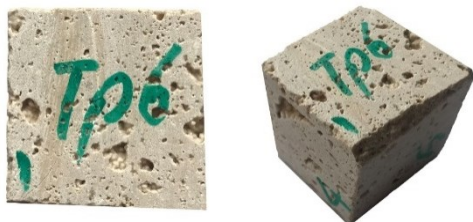
شیمیایی و فیزیکی گوناگون در برابر محیط‌های اسیدی و بازی واکنش‌های مختلفی نشان می‌دهند، بنابراین بررسی تأثیر زمان و مقدار pH محیط در آن‌ها امری ضروری است. در تحقیقات قبلی تأثیر شرایط محیطی pH و زمان در انواع نمونه‌های سنگی بررسی نشده بود و نوآوری این مقاله بررسی تأثیر پارامترهای میزان تغییرات pH محیط و زمان تماس آن در ضریب جذب جرمی نمونه‌های سنگی است. هدف از این تحقیق، بررسی دقیق ضریب جذب جرمی در نمونه‌های گرانیتی، تراورتن، مگنتیت و هورنبلندی با گذر زمان تحت محیط‌های شیمیایی با pH مختلف است. بدین منظور آزمایش‌های سیستماتیک برای سنجش ضریب جذب جرمی تشعشع گاما به‌عنوان تابعی از pH و زمان انجام شد. نتایج حاصل از این تحقیق دید کاملی را در مورد انتقال و جذب تشعشعات گاما در محیط‌های سنگی ارائه داده که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ارزیابی ایمنی مخازن در سازندهای مختلف سنگی داشته باشد.

۲. مواد و روش‌ها

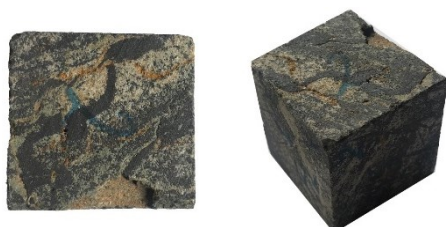
هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر pH محلول و مدت زمان تماس محلول با نمونه بر گذار فوتون‌های گاما در نمونه‌های سنگی است. بدین منظور، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، با به‌کارگیری آشکارساز گایگر-مولر و چشمه‌های پرتوزای (^{137}Cs)، ضریب جذب خطی گاما سنگ‌ها تعیین شده است. در این مطالعه، چهار نوع نمونه سنگ طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. این اندازه‌گیری‌ها به منظور تعیین توان عبوردهی و جذب پرتوی نمونه‌ها و ارزیابی پتانسیل آن‌ها به‌عنوان عایق پرتویی برای به‌کارگیری آن‌ها در پروژه‌های فیزیک مهندسی انجام شده است.



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱): نمونه‌های سنگی آماده‌سازی شده؛ الف) گرانیت،

ب) تراورتن، ج) مگنتیت، د) هورنبلند.

نتایج حاصل از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بر روی نمونه‌های سنگی مورد استفاده شده، در جدول ۱ ارائه شده است. بر این اساس، کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده گرانیت شامل؛ کوارتز، میکا، فلدسپات و سایر کانی‌ها است. نمونه تراورتن نیز شامل؛ دندریت‌ها، میکروسیت‌ها و اسپاریت‌ها است که کلسیت به‌عنوان کانی غالب است. کانی اصلی در نمونه مگنتیت مگنتیت بوده و کانی‌های فرعی شامل؛ هماتیت، اولیوین و کوارتز است. هورنبلند از گروه آمفیبول‌ها شامل دو نوع کانی اصلی فروهورنبلند و مگنزیوهورنبلند است.

در این تحقیق، علاوه بر استفاده از روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین ضریب جذب پرتو گاما در نمونه‌ها، از کد شبیه‌سازی MCNPX و پایگاه داده XCOM نیز برای حالت خشک سنگ استفاده شده است. این انتخاب به دلیل توانایی این روش‌ها در ارائه نتایج دقیق‌تر و جامع‌تر در مقایسه با آزمایش‌های عملی صورت گرفته است. شبیه‌سازی با MCNPX امکان مدل‌سازی دقیق‌تر شرایط پیچیده و پیش‌بینی رفتار پرتوها در محیط‌های مختلف را فراهم می‌آورد، در حالی که داده‌های XCOM به‌عنوان مرجع تجربی برای مقایسه و تأیید نتایج شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها استفاده می‌شوند. این رویکرد ترکیبی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و زمان آزمایش، به تصحیح و تأیید نتایج آزمایشگاهی کمک کرده و دقت و صحت یافته‌ها را افزایش می‌دهد.

در گام بعدی تأثیر تغییرات pH و زمان تماس نمونه‌های سنگ با محلولی شامل مواد شیمیایی، بر ضریب جذب پرتو گاما به صورت آزمایشگاهی و در یک بازه پیوسته دو ساله مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱.۲. تهیه نمونه

نمونه‌های مورد استفاده در این مقاله شامل چهار نوع سنگ طبیعی؛ گرانیت، تراورتن، مگنتیت و هورنبلند است. گرانیت از معدن گدار سیاوش نظنز، تراورتن از معدن تراورتن کاشان، و مگنتیت و هورنبلند نیز از محدوده معدن توت اردکان یزد نمونه‌برداری شده است. نمونه‌ها شامل بلوک‌هایی با ابعاد ۴×۴×۴ cm تهیه شده (شکل ۱) که با استفاده از دستگاه برش و صاب در آزمایشگاه مکانیک سنگ از روی بلوک‌های طبیعی سنگ تهیه شده‌اند. کلیه نمونه‌های مذکور در مرحله بعد، با آب دی‌یونیزه فوق خالص، شستشو داده شده‌اند تا ناخالصی‌های سطحی کاملاً حذف شود. در نهایت، نمونه‌ها توسط کوره در دمای ۶۰ °C خشک شدند.

جدول (۱): نتایج آزمایش XRF نمونه‌های سنگی.

تراورتن	هورنبلند	مگنتیت	گرانیت	اکسید
% ۴۷/۱۸	% ۴۷/۱۸	% ۱۴/۳۳	% ۴۹/۹۱	SiO _۲
% ۰/۶۹	% ۰/۶۹	% ۲/۰۲	% ۱۸/۶۶	Al _۲ O _۳
% ۱۸/۳۰	% ۱۸/۳۰	% ۲/۳۷	% ۱۰/۰۴	CaO
% ۷/۹۵	% ۷/۹۵	% ۰/۰۰	% ۰/۰۰	Fe _۲ O _۳
% ۰/۰۳	% ۰/۰۳	% ۰/۱۱	% ۰/۵۲	K _۲ O
% ۱۸/۸۴	% ۱۸/۸۴	% ۸/۸۲	% ۵/۶۸	MgO
% ۰/۰۰	% ۰/۱۱	% ۰/۰۳	% ۰/۰۰	MnO
% ۰/۱۱	% ۰/۱۶	% ۰/۰۰	% ۳/۹۵	Na _۲ O
% ۰/۰۰	% ۰/۰۹	% ۰/۰۰	% ۰/۰۰	P
% ۰/۰۹	% ۰/۱۰	% ۰/۱۱	% ۰/۵۱	TiO _۲
% ۰/۱۶	% ۰/۰۰	% ۰/۰۴	% ۰/۱۰	P _۲ O _۵
% ۰/۰۰	% ۰/۰۰	% ۰/۰۰	% ۰/۵۱	L.O.I
% ۰/۰۰	% ۰/۰۰	% ۷۱/۸۳	% ۸/۶۵	Fe _۲ O _۳
۲/۳۵	۲/۸	۴/۰۱	۳/۲۷	Specific gravity (g/cm ^۳)

ضخامت‌های مشخص در مسیر پرتو، نرخ شمارش کاهش یافته ثبت می‌شود و با استفاده از رابطه نمایی کاهش شدت تابش، صحت عملکرد آشکارساز و دقت آن در اندازه‌گیری ضریب جذب ارزیابی می‌گردد. این فرآیند تضمین می‌کند که داده‌های پرتویی به‌دست‌آمده دقیق، قابل‌اعتماد و قابل تکرار باشند. با توجه به تجارب پیشین، در این مطالعه از چشمه سزیوم به‌دلیل انرژی کمتر نسبت به چشمه کبالت استفاده شد. این انتخاب به این دلیل بود که در نمونه‌های سنگی فاقد فلزات سنگین، در حضور چشمه‌های با قدرت بالا، تأثیر سایر پارامترها قابل شناسایی ناست. بنابراین چشمه پرتو سزیم (^{۱۳۷}Cs) با انرژی ۰/۶۶ مگا الکترون‌ولت (MeV) انتخاب شده است.

سزیم به‌دلیل انرژی مشخص پرتو گاما، نیمه‌عمر طولانی، دسترسی آسان، و استفاده گسترده در استانداردسازی، یکی از محبوب‌ترین و معتبرترین چشمه‌ها در تحقیقات جذب پرتو گاما به شمار می‌آید. بنابراین در این تحقیق، بر اساس استاندارد مذکور و منبع انتخاب شده، فاصله چشمه پرتوزا تا پایین نمونه ۱ cm و فاصله بالای نمونه تا آشکارساز، ۸ cm انتخاب شده و تمام آزمایش‌ها بر این اساس انجام شده است.

شکل ۲، شرایط آزمایشگاهی به‌کاررفته در این تحقیق، تحت شرایط خشک، را نشان می‌دهد. آزمایش شمارش ذرات گاما بر روی نمونه‌های سنگی با هندسه مکعبی انجام شد. هر نمونه از سه وجه مکعبی مورد بررسی قرار گرفت. برای هر وجه، اندازه‌گیری‌ها در سه نوبت و هر نوبت به مدت ۱۸۰ s انجام شد. این فرآیند به‌منظور اطمینان از دقت و تکرارپذیری داده‌ها طراحی شده است.

لازم به ذکر است که در ابتدا، آزمایش اندازه‌گیری ضریب جذب جرمی نمونه‌ها در حالت خشک انجام شد و سپس این آزمایش در حالت غوطه‌ور در محلول‌های با pH مختلف و طی بازه‌های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

۲.۲. اندازه‌گیری‌های تجربی

در این مطالعه، از آشکارساز گایگر-مولر به‌عنوان یکی از پرکاربردترین آشکارسازهای گازی برای اندازه‌گیری ضرایب جذب پرتو استفاده شده است. مزایای کلیدی این سیستم شامل:

- بازده بالا در آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز.
 - تولید پالس‌های الکتریکی با دامنه قابل تشخیص است.
- این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM D ۷۲۸۳، آزمایش‌های تجربی تنظیم و انجام شده است. بر این اساس، بسته به توان پرتو چشمه و توان آشکارساز، فاصله چشمه تا نمونه، معمولاً بین ۱ cm الی ۲۰ cm و فاصله نمونه تا آشکارساز، بین ۲ cm الی ۱۰ cm انتخاب می‌شود. روش کالیبراسیون دستگاه گایگر-مولر شامل اندازه‌گیری شدت اولیه پرتو گاما بدون حضور نمونه (I_0)، اندازه‌گیری نرخ پس‌زمینه محیط، و تنظیم ولتاژ کاری در ناحیه پایدار پاسخ دستگاه (Plateau) است. سپس با قراردادن جاذب‌های استاندارد با

تحلیل‌های پرتو گاما و نوترون با استفاده از روش مونت کارلو، به کار می‌رود [۳۷-۳۵]. در این تحقیق از نسخه توسعه یافته این کد، یعنی MCNPX استفاده شده است.

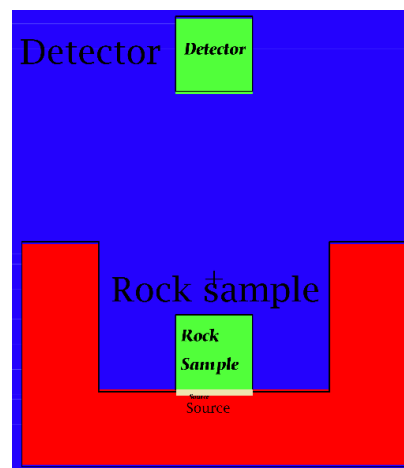
داده‌های ورودی به این نرم‌افزار شامل؛ هندسه سلولی، سطوح هندسی، مشخصات شیمیایی مواد مورد استفاده در شبیه سازی، مشخصات چشمه، نوع ذرات مورد نظر نوع خروجی تالی‌ها و پارامترهای فیزیکی است.

در شبیه‌سازی این آزمایش، نمونه به صورت مکعبی به اضلاع ۴ cm، معرفی شده است (شکل ۲). فواصل چشمه تا نمونه و نمونه تا آشکارساز، مشابه آزمایش عملی در نظر گرفته شده ضمن اینکه محافظ سربی به ضخامت ۴ cm نیز در مدل اعمال شده است (بخش قرمز رنگ شکل ۲).

به منظور شبیه‌سازی، از تالی F۸ در کد MCNPX برای محاسبه شار نوترون‌ها در نواحی مختلف سیستم استفاده شده است. این تالی برای اندازه‌گیری تعداد ذرات عبوری و محاسبه شار ذرات در حجم‌های مشخص به کار گرفته می‌شود.

در ادامه نمونه‌های سنگی بر اساس ترکیبات شیمیایی آن‌ها، بر حسب درصد وزنی عناصر جدول ۱، تعریف گردید. همچنین منبع، چشمه ^{137}Cs با قطر ۲ cm به صورت صفحه-ای و انرژی ۰/۶۶ MeV معرفی گردید. بر اساس شکل ۲، کره‌ای به قطر ۳۰ cm که به رنگ آبی نمایش داده شده است، به عنوان ناحیه خلا در مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. این محدوده می‌تواند به عنوان محیطی برای بررسی عبور یا تعاملات ذرات در فضای بدون ماده در مدل استفاده شود.

شکل ۴ نمایشی از شبیه‌سازی عبور اشعه گاما از یک نمونه سنگی با استفاده از نرم‌افزار MCNPX است. در این شبیه‌سازی، منبع اشعه گاما در مرکز تصویر قرار دارد و تابش‌های گاما به سمت نمونه سنگی هدایت می‌شوند. نمونه سنگ در این شبیه‌سازی به عنوان ماده‌ای برای بررسی تعاملات پرتوهای گاما با ساختار داخلی آن مدل‌سازی شده است.



شکل (۲): شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری ضریب جذب جرمی با استفاده از دستگاه گایگر مولر.

در مرحله دوم، نمونه‌های سنگی به طور مجزا در معرض محیط‌های محلول با pHهای ۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰ قرار گرفتند. این آزمایش‌ها به مدت دو سال انجام شده و نمونه‌ها در فواصل زمانی هفتگی و سپس ماهانه مورد بررسی و ضریب جذب جرمی آنها اندازه‌گیری گردید. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در ظروف با pHهای مختلف نگهداری شده و در طول مدت انجام آزمایش، pH محیط به دقت اندازه‌گیری و به کمک دستگاه pH متر به صورت پیوسته کنترل و ثابت نگه داشته شده‌اند.



شکل (۳): نمونه‌های سنگی نگهداری شده تحت pHهای مختلف.

۳.۲. مدل‌سازی با کد MCNPX

MCNP یک نرم‌افزار شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی، مانند انتقال پرتوها، جذب و پراکندگی ذرات است که به منظور

کار رود. بنابراین با استفاده از این داده‌ها، امکان تعیین و تحلیل بهتر تعاملات اشعه گاما با نمونه سنگ فراهم گردید.

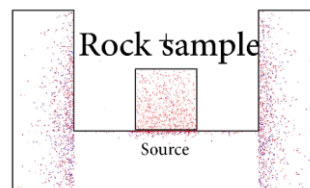
داده‌های موجود در پایگاه XCOM به ما این امکان را دادند تا مقادیر ضریب جذب و پراکندگی برای نمونه‌های مختلف سنگی را محاسبه کرده و نتایج شبیه‌سازی MCNPX را با دقت بیشتری تفسیر کنیم. این اطلاعات برای ارزیابی تأثیرات پرتوافشانی بر مواد و بررسی عمق و شدت جذب پرتو گاما در نمونه‌های مختلف بسیار مفید است.

برای استفاده از پایگاه داده XCOM، داده‌های ورودی شامل ترکیب شیمیایی نمونه سنگ، انرژی تابش گاما، و چگالی ماده است. ترکیب شیمیایی سنگ شامل درصد وزنی عناصر مختلف است که در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین، انرژی تابش گاما، مقادیر 0.1 MeV تا 10 MeV انتخاب گردیده است. خروجی XCOM معمولاً شامل جداولی است که ضریب جذب (μ) را برای انرژی‌های مشخص گاما و مواد مختلف به صورت عددی ارائه می‌دهد.

۳. بحث و نتایج

مقادیر ضریب جذب جرمی نمونه‌های سنگی (بر حسب سانتی‌متر مربع بر گرم) که از سه روش مختلف؛ آزمایشگاهی، شبیه‌سازی توسط کد MCNPX و پایگاه داده XCOM در حالت خشک به دست آمده، در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به داده‌های موجود و نتایج جدول، تفاوت‌های مشاهده شده بین مقادیر به دست آمده از هر روش، قابل قبول و در محدوده‌ای کمتر از $\pm 10\%$ قرار دارند. این امر نشان‌دهنده انطباق سیستماتیک قابل قبولی میان نتایج است که اعتبار سنجی موفق بین روش‌ها را تأیید می‌کند.

Detector



شکل (۴): ردیابی ذرات انتشار یافته در نمونه سنگی توسط نرم

افزار MCNPX.

در بالای شکل، آشکارساز قرار دارد که مسیر تابش‌های عبوری از نمونه سنگ را ثبت می‌کند. نقاط قرمز در تصویر نشان‌دهنده ذرات پرتوگاما هستند که پس از عبور از نمونه سنگ و تعامل با آن، به سمت آشکارساز حرکت می‌کنند. این شکل نشان‌دهنده فرآیند انتقال و تعامل پرتوهای گاما با نمونه سنگی است. به طور خاص، می‌توان مشاهده کرد که پرتوهای گاما پس از ساطع شدن از منبع، وارد ماده سنگی شده و در اثر برخورد با اتم‌های سنگ، پراکندگی و جذب می‌شوند. این تعاملات منجر به کاهش انرژی پرتوها و تغییر در مسیر آن‌ها می‌شود. در نهایت، تعدادی از این ذرات پس از تعاملات متعدد، به آشکارساز می‌رسند و داده‌های مربوط به ویژگی‌های این ذرات (مانند انرژی و نوع ذرات) ثبت می‌شود.

۴.۲. پایگاه داده XCOM

در ادامه این تحقیق، از پایگاه داده XCOM برای تعیین ضریب جذب پرتو گاما در نمونه‌های سنگ استفاده شده است. XCOM یک پایگاه داده معتبر است که ویژگی‌های فیزیکی مواد مختلف را در برابر تابش‌های الکترومغناطیسی، از جمله پرتوهای گاما، فراهم می‌آورد. این پایگاه داده شامل اطلاعات دقیقی درباره ضریب جذب، پراکندگی و انتقال تابش در مواد مختلف است و می‌تواند برای محاسبات دقیق‌تر در شبیه‌سازی‌های انتقال پرتوها و تعاملات آن‌ها با مواد مختلف به

جدول (۲): مقادیر ضریب جذب جرمی پرتو گاما نمونه‌های سنگی خشک بدست آمده در روش‌های مختلف برحسب cm^2/g .

هورنبلند	تراورتن	مگنتیت	گرانیت	روش
۰/۰۵۰	۰/۰۵۱	۰/۰۵۲	۰/۰۵۴	آزمایشگاهی
۰/۰۴۷	۰/۰۴۶	۰/۰۵۲	۰/۰۵۱	مدل‌سازی با MCNPX
۰/۰۵۱	۰/۰۵۶	۰/۰۵۷	۰/۰۵۸	پایگاه داده XCOM

بر اساس این جدول، بیشترین هم‌خوانی در ضریب جذب جرمی در نمونه مگنتیت به میزان $1/82\%$ و کمترین مقدار در نمونه تراورتن به میزان $9/14\%$ مشاهده شده است. این تفاوت‌ها ناشی از ماهیت متفاوت سنگ‌ها است، زیرا در پایگاه داده XCOM و مدل‌سازی با کد MCNPX، نمونه‌ها به‌عنوان مواد همگن، یکنواخت و بدون تخلخل در نظر گرفته شده‌اند؛ در حالی‌که در واقعیت، سنگ‌ها مواد کاملاً همگن و یکسانی نیستند و این اختلاف‌ها طبیعی به‌نظر می‌رسد.

بر این اساس، در نمونه‌های سنگی با ساختار نسبتاً همگن و متراکم مانند گرانیت و مگنتیت، اختلاف بین مقادیر آزمایشگاهی و مدل‌سازی کم است. در مقابل، در نمونه‌های با نفوذپذیری بالا و غیرهمگن مانند تراورتن، اختلاف بین این دو روش بیشتر مشاهده می‌شود. این مقادیر اختلافی در هر صورت قابل قبول هستند. گرانیت و مگنتیت به‌دلیل چگالی بالای خود (بیش از $4/9 \text{ g/cm}^3$) و درصد بالای آهن (حدود 70%)، به‌عنوان جاذب‌های مؤثر گاما شناخته می‌شوند، در حالی‌که هورنبلند با وجود عناصری همچون آهن، کلسیم و منیزیم در رتبه سوم و تراورتن به‌دلیل وجود کلسیت زیاد و چگالی پایین، کمترین کارایی را در جذب گاما نشان می‌دهند. اختلاف نتایج در نمونه هورنبلند، نشان‌دهنده حساسیت ضریب جذب به ناهمگنی‌های کانی‌شناسی (میزان Fe/Mg) است.

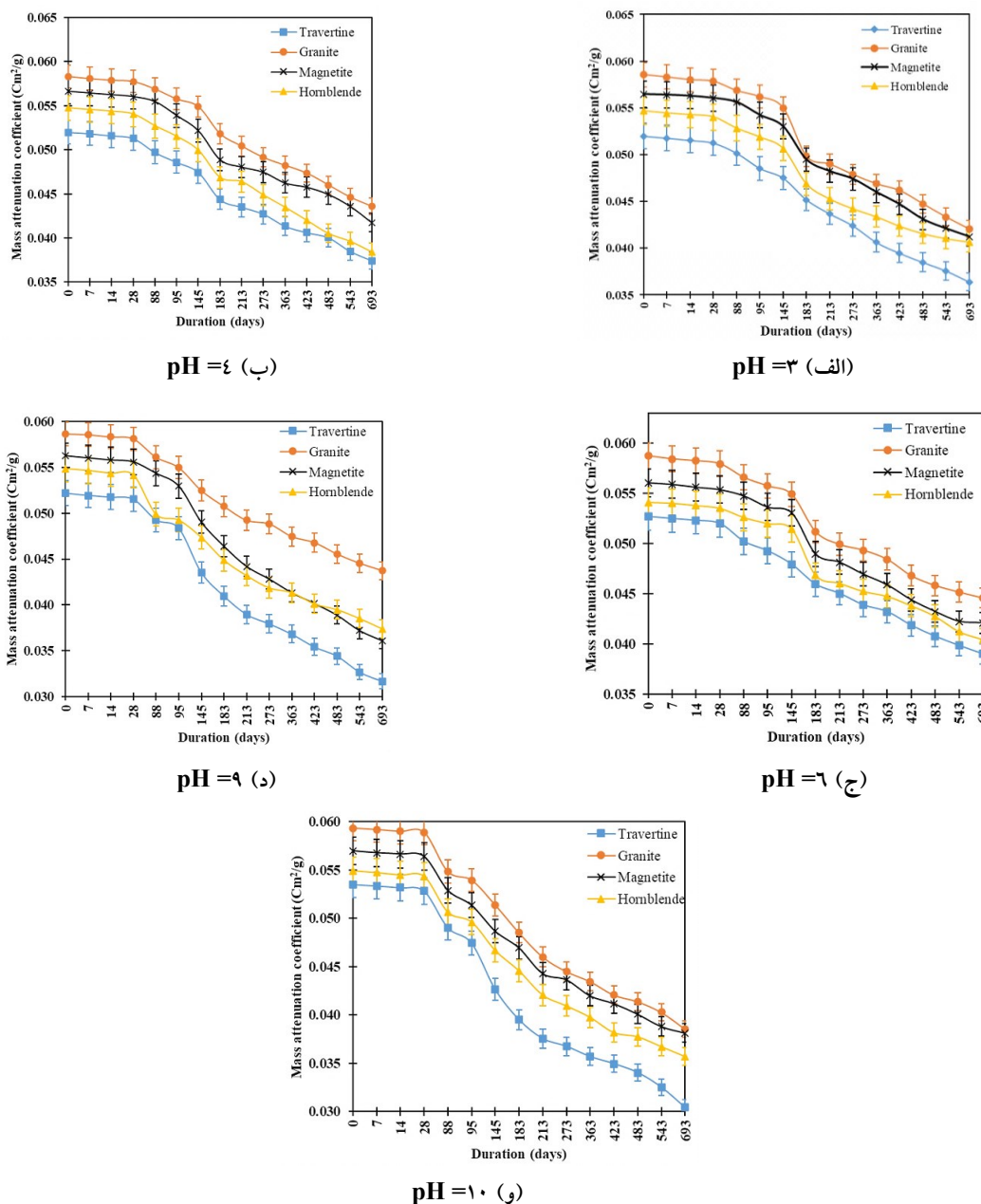
نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست‌آمده از روش XCOM در تمامی نمونه‌ها به مقادیر مدل‌سازی با کد

MCNPX نزدیک است، که صحت پارامترهای فیزیکی ورودی را تأیید می‌کند. اختلاف جزئی بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی (بین 2% الی 9%) عمدتاً ناشی از اثرات محیطی مانند رطوبت، دما و محدودیت‌های کالیبراسیون آشکارساز است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گرانیت و مگنتیت به‌عنوان بهینه‌ترین عایق‌ها به‌دلیل همگنی مناسب، چگالی بالا و حضور عناصر سنگین برای کاربردهای حفاظ پرتویی می‌باشند. تطابق قابل قبول سه روش محاسبه ضریب جذب جرمی، قابلیت اطمینان نتایج برای طراحی مخازن دفن پسماندهای پرتوزا را تأیید می‌کند.

شکل ۵، تغییرات ضریب جذب جرمی (بر حسب سانتی-متر مربع بر گرم) چهار نمونه سنگی شامل؛ مگنتیت، گرانیت، تراورتن و هورنبلند در مدت زمان‌های مختلف (۰ تا 693 روز) و تحت شرایط محیطی متفاوت (pH های ۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۰) نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده کاهش تدریجی ضریب جذب جرمی در تمامی نمونه‌ها است. این کاهش با گذشت زمان و در تمامی شرایط pH مشاهده می‌شود، که ممکن است ناشی از واکنش‌های شیمیایی و تغییرات ساختاری در سطح سنگ‌ها به‌واسطه تغییرات pH باشد.

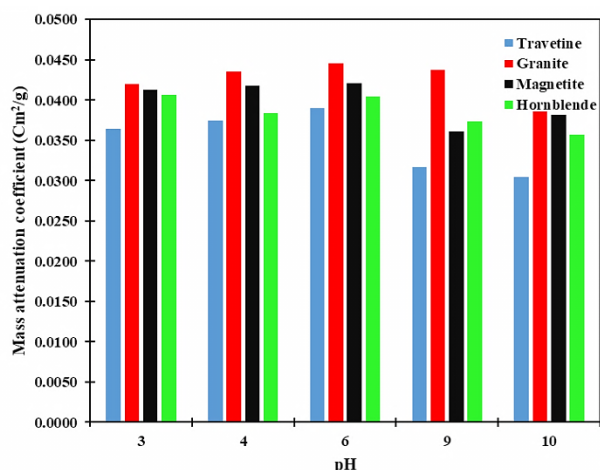
در روزهای ابتدایی آزمایش، تغییرات ضریب جذب جرمی در اکثر نمونه‌ها نسبتاً کم است. این ممکن است نشان‌دهنده این باشد که سنگ‌ها در ابتدا نسبت به شرایط محیطی پایداری بیشتری هستند. اما با گذشت زمان، این تغییرات به تدریج بیشتر شده و کاهش ضریب جذب جرمی شتاب بیشتری می‌گیرد. روزهای پایانی آزمایش، بیشترین تغییرات در ضریب جذب جرمی برای اکثر نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده واکنش نهایی و اثرات طولانی‌مدت شرایط محیطی است. به هر حال، تأثیر زمان نشان‌دهنده یک روند دینامیک و پیوسته در واکنش سنگ‌ها به شرایط محیطی است.



شکل (۵): تغییرات ضریب جذب جرمی پرتو گاما نمونه‌های سنگی طی زمان در pHهای (الف) ۳، (ب) ۴، (ج) ۶، (د) ۹ و (ه) ۱۰.

تغییرات کمتری نشان می‌دهند و به نظر می‌رسد که این سنگ‌ها به مدت زمان بیشتری برای تغییرات واضح نیاز دارند. نتایج نشان می‌دهد در pHهای پایین (۳ و ۴)، به‌ویژه تراورتن تغییرات بیشتری در ضریب جذب جرمی نشان می‌دهد. این تغییرات در تراورتن بیشتر از سایر سنگ‌ها است، که ممکن است به دلیل واکنش شدیدتر این سنگ به شرایط اسیدی باشد.

هرچه مدت زمان آزمایش بیشتر می‌شود، تغییرات ضریب جذب جرمی در سنگ‌ها بیشتر می‌شود، که نشان‌دهنده حساسیت و واکنش تدریجی این سنگ‌ها به محیط‌های مختلف است. این روند به‌ویژه در سنگ‌هایی با ترکیب و ساختار خاص (مانند تراورتن) بارزتر است. تراورتن در برابر تغییرات pH حساس‌تر بوده و این حساسیت با گذشت زمان بیشتر می‌شود. در حالی که سنگ‌هایی مانند گرانیت و مگنتیت



شکل (۶): مقایسه ضریب جذب جرمی نمونه سنگ‌ها بعد از ۶۹۳ روز قرارگیری در محلول با pH های متفاوت.

با توجه به نتایج، نمونه گرانیت به عنوان پایدارترین نمونه، تغییرات کمتری از ۱۰٪ در تمامی مقادیر pH نشان داد. این ویژگی به دلیل ساختار مقاوم آن است، زیرا کانی‌های کوارتز و فلدسپات در دامنه pH ۳ تا ۱۰ پایدار باقی می‌مانند.

در مورد نمونه تراورتن، در pH برابر با ۳ کاهش ضریب جذب تا ۳۰٪ است. این کاهش در pH برابر با ۴، حدود ۴٪ بود و در pH برابر با ۶ تغییرات جزئی نشان داده و به وضعیت پایداری می‌رسد. همچنین، در pH برابر با ۹، ضریب جذب حدود ۱۲٪ کاهش یافته و در pH برابر با ۱۰، کاهش آن به حدود ۱۸٪ رسید. به هر حال، بیشترین حساسیت شیمیایی در نمونه تراورتن در پایین‌ترین pH مشاهده بوده، که دلیل آن می‌تواند انحلال کامل لایه‌های سطحی و تخلخل بالای آن نسبت به دیگر نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق باشد.

همچنین نمونه مگنتیت بعد از گذشت ۶۹۳ روز در محیط شیمیایی با pH برابر با ۳ ضریب جذب آن در حدود ۲۰٪ کاهش، در pH برابر با ۴ حدود ۱۲٪، و در pH برابر با ۶ به مقدار پایدار رسیده است. نمونه هورنبلند در محیط‌های اسیدی به دلیل حضور SiO_2 نسبت به تغییرات شیمیایی پایدار است. با این حال، این نمونه حساسیت زیادی به شرایط قلیایی نشان داد. کاهش تدریجی ضریب جذب آن در pH برابر با ۱۰

در pH های متوسط (۶)، کاهش ضریب جذب جرمی برای تراورتن و گرانیت کاهش کمتری داشته و روند تغییرات آهسته‌تر است. این نشان‌دهنده مقاومت بیشتر سنگ‌ها در برابر تغییرات محیطی در این pH است.

در pH های بالا (۹ و ۱۰)، روند کاهش ضریب جذب جرمی در تمام سنگ‌ها همچنان ادامه دارد، اما به‌ویژه در تراورتن، تغییرات به وضوح بیشتر و سریع‌تر است. این نشان‌دهنده حساسیت بالاتر تراورتن به محیط‌های قلیایی است. به هر حال، تراورتن در تمامی شرایط pH سریع‌ترین کاهش ضریب جذب جرمی را نشان می‌دهد. این سنگ به‌نظر می‌رسد که بیشترین حساسیت را به شرایط محیطی (چه اسیدی و چه قلیایی) دارد. گرانیت و مگنتیت نسبت به تغییرات pH مقاوم‌تر هستند و کاهش ضریب جذب جرمی آن‌ها در تمامی شرایط pH کمتر و تدریجی‌تر است. هورنبلند نیز در مقایسه با تراورتن و گرانیت تغییرات مشابهی نشان می‌دهد، ولی سرعت کاهش آن، به‌ویژه در pH های پایین و بالا، بیشتر شبیه به مگنتیت است.

به طور کلی، تطابق ضریب جذب جرمی در تمامی نمونه‌ها با تغییرات pH، اهمیت بررسی دقیق شرایط محیطی در طراحی سیستم‌های حفاظتی از جمله مخازن دفن پسماندهای پرتوزا را برجسته می‌کند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده حساسیت متفاوت سنگ‌ها به شرایط محیطی مختلف است و می‌تواند به عنوان مبنای طراحی مصالح مقاوم در برابر تغییرات محیطی و پرتوی استفاده شود.

در شکل ۶، ضریب جذب جرمی نمونه سنگ‌ها بعد از ۶۹۳ روز قرارگیری در محلول‌هایی با pH های متفاوت با هم مقایسه شده است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که رفتار جذب جرمی نمونه‌ها نه تنها وابسته به نوع سنگ و pH محیط، بلکه به شدت تحت تأثیر مدت زمان قرارگیری در آن محیط نیز است.

می‌تواند به دلیل از دست دادن یون‌های داخلی از شبکه ساختاری آن باشد.

به هر حال، اثر غالب pH به گونه‌ای است که کاهش ضریب جذب نمونه در محیط‌های اسیدی در نتیجه انحلال و افزایش تخلخل و در محیط‌های قلیایی در نتیجه مکانیزم تخریب شبکه سیلیکانی است. بر این اساس، گرانتیت که در تمام مقادیر pH با تغییرات ضریب جذب کمتر از ۱۰٪ پایدار بوده و هورنبلند در بازه pH برابر با ۶ با تغییرات ضریب جذب کمتر از ۲٪ گزینه مناسبی برای مخازن دفن زباله‌های رادیواکتیو هستند. در این موارد از تراورتن در محیط‌های اسیدی نباید استفاده شده و مگنتیت در pH کمتر از ۵، نیاز به پوشش محافظتی است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر هم‌زمان شرایط شیمیایی محیط و زمان تماس بر ضریب جذب جرمی پرتو گاما در سنگ‌های طبیعی انجام شد. نمونه‌های مورد بررسی شامل گرانتیت، مگنتیت، تراورتن و هورنبلند بوده و آزمون‌ها در بازه زمانی ۶۹۳ روز و در pH های مختلف از ۳ تا ۱۰ انجام گرفت. برای افزایش دقت و اعتبار نتایج، از سه روش مکمل شامل آزمایش تجربی با آشکارساز گایگر-مولر، شبیه‌سازی عددی با کد MCNPX و تحلیل داده‌های پایگاه معتبر XCOM استفاده شد. انطباق مناسب بین نتایج حاصل از این سه روش (با اختلاف کمتر از ۱۰٪) نشان داد که رویکرد ترکیبی حاضر از کارایی بالایی در تحلیل رفتار پرتوی سنگ‌ها برخوردار است و می‌تواند به عنوان مبنایی معتبر برای طراحی سامانه‌های دفن پسماندهای پرتوزا به کار گرفته شود.

نتایج حاصل از بررسی تجربی نشان داد که نوع سنگ، عامل تعیین‌کننده‌ای در عملکرد جذب پرتو گاما محسوب می‌شود. گرانتیت و مگنتیت به دلیل دارا بودن چگالی بالا، بافت

متراکم و حضور عناصر سنگین مانند آهن، عملکرد حفاظتی بهتری را نسبت به سایر نمونه‌ها نشان دادند. در مقابل، تراورتن به عنوان سنگی با تخلخل بالا و ترکیب غالب کلسیت، بیشترین حساسیت را به تغییرات محیطی از خود بروز داد. هورنبلند نیز در شرایط اسیدی رفتاری نسبتاً پایدار داشت، اما در محیط‌های قلیایی، به‌ویژه در pH=۱۰، کاهش محسوسی در ضریب جذب جرمی آن مشاهده شد که احتمالاً ناشی از تخریب ساختار سیلیکاتی آن است.

تأثیر pH محیط بر عملکرد جذب گاما کاملاً وابسته به نوع سنگ و ساختار شیمیایی آن بود. در pH های اسیدی (۳ و ۴)، کاهش ضریب جذب جرمی در سنگ‌هایی مانند تراورتن و مگنتیت به‌طور محسوسی بیشتر از سایر شرایط ثبت شد. در pH خنثی (۶)، اکثر نمونه‌ها به پایداری نسبی رسیدند و تغییرات در ضریب جذب بسیار محدود بود. در محیط‌های قلیایی (۹ و ۱۰)، افت عملکرد در برخی نمونه‌ها مانند هورنبلند و تراورتن مجدداً افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تخریب شیمیایی سنگ‌ها در محیط‌های اسیدی از طریق انحلال کانی‌ها و در محیط‌های قلیایی از طریق فروپاشی شبکه‌های سیلیکاتی صورت می‌گیرد.

از طرف دیگر، عامل زمان نیز به‌طور چشمگیری بر کاهش تدریجی ضریب جذب جرمی تأثیرگذار بود. در روزهای ابتدایی آزمایش، میزان کاهش ناچیز بود اما با گذشت زمان، به‌ویژه در بازه‌های بلندمدت، نرخ کاهش شدت بیشتری یافت. این روند به‌ویژه در سنگ‌هایی با ساختار ضعیف‌تر یا حساس‌تر مانند تراورتن بارزتر بود و نشان داد که پایداری در بلندمدت باید به عنوان یکی از معیارهای اصلی در انتخاب مصالح طبیعی حفاظتی در نظر گرفته شود.

در جمع‌بندی نهایی، گرانتیت به عنوان پایدارترین نمونه در برابر تغییرات pH و زمان، مناسب‌ترین گزینه برای استفاده در طراحی سدهای طبیعی سامانه‌های دفن زباله‌های رادیواکتیو

شرایط شیمیایی، می‌تواند در درک بهتر مکانیزم‌های تخریب و انحلال مفید واقع شود. بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های هوشمند بر پایه الگوریتم‌های فازی یا یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار پرتویی سنگ‌ها در شرایط پیچیده نیز چشم‌انداز مناسبی برای توسعه این حوزه فراهم می‌کند. در نهایت، بررسی رفتار بلندمدت نمونه‌ها در چرخه‌های تر و خشک متناوب و در دوره‌های زمانی بیشتر از دو سال می‌تواند در جهت طراحی مصالح ایمن و پایدار در پروژه‌های دفن پسماند پرتوزا، بسیار مؤثر واقع گردد.

است. مگنتیت نیز عملکرد مناسبی داشت، اما در محیط‌های اسیدی نیازمند اعمال لایه‌های حفاظتی است. استفاده از تراورتن به دلیل افت شدید ضریب جذب در محیط‌های اسیدی و قلیایی توصیه نمی‌شود. هورنبلند در محیط‌های خنثی پایداری بالایی دارد ولی در محیط‌های قلیایی دچار کاهش عملکرد می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، اثرات توأمان pH، دما، فشار و حضور کلئیدها مورد بررسی دقیق‌تری قرار گیرد. همچنین، تحلیل میکروسکوپی ساختار سنگ‌ها پیش و پس از قرارگیری در

۵. مراجع

1. X. Zhang, F. Ma, Z. Dai, J. Wang, L. Chen, H. Ling, M.R. Soltanian. Radionuclide transport in multi-scale fractured rocks: a review. *J. Hazard. Mater.* 424 (2022) 127550.
2. K.B. Krauskopf. Radioactive Waste Disposal and Geology. vol. 1, Springer Science & Business Media, 2013.
3. M. Tzortzis, H. Tsertos, S. Christofides, G. Christodoulides. Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive samples from Cyprus characteristic geological rocks. *Radiat. Meas.* 37 (3) (2003) 221–229.
4. R. Battulwar, M. Zare-Naghadehi, E. Emami, J. Sattarvand. A state-of-the-art review of automated extraction of rock mass discontinuity characteristics using three-dimensional surface models. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 13 (4) (2021) 920–936.
5. F. Ugolini, G. Corti, A. Agnelli, F. Piccardi. Mineralogical, physical, and chemical properties of rock fragments in soil. *Soil Sci.* 161 (8) (1996) 521–542.
6. J. H. Schön. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. *Dev. Petrol. Sci.* 65, Elsevier, 2015.
7. S. Yagiz. The effect of pH of the testing liquid on the degradability of carbonate rocks. *Geotech. Geol. Eng.* 36 (4) (2018) 2351–2363.
8. R. C. Ewing. Less geology in the geological disposal of nuclear waste. *Science* 284 (5414) (1999) 415–417.
9. M. J. Apted, J. Ahn. Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste, Woodhead Publ., 2017.
10. H. Tekin, E. Kavaz, M. Sayyed, O. Agar, M. Kamislioglu, E. Altunsoy Guclu, C. Eke. An extensive study on nuclear shielding performance and mass stopping power (MSP)/projected ranges (PR) of some selected granite samples. *Radiat. Eff. Defects Solids* 176 (3-4) (2021) 320–340.
11. S. Gowda, S. Krishnaveni, T. Yashoda, T. Umesh, R. Gowda. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds. *Pramana* 63 (3) (2004) 529–541.
12. N. Ekinici, N. Astam. Measurement of mass attenuation coefficients of biological materials by energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry. *Radiat. Meas.* 42 (3) (2007) 428–430.
13. G. Bhandal, K. Singh, R. Rani, V. Kumar. Energy absorption coefficients for 662 and 1115 keV gamma rays in some fatty acids. *Appl. Radiat. Isot.* 45 (3) (1994) 379–381.
14. U. Çevik, H. Baltaş, A. Çelik, E. Bacaksız. Determination of attenuation coefficients, thicknesses and effective atomic numbers for CuInSe₂ semiconductor. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 247 (2) (2006) 173–179.
15. A. Akar, H. Baltaş, U. Çevik, F. Korkmaz, N. Okumuşoğlu. Measurement of attenuation coefficients for bone, muscle, fat and water at 140, 364 and 662 keV γ -ray energies. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 102 (2) (2006) 203–211.
16. V. Manjunathaguru, T. Umesh. Simple parametrization of photon mass energy absorption coefficients of H-, C-, N- and O-based samples of biological interest in the energy range 200–1500 keV. *Pramana* 72 (2) (2009) 375–387.

17. O. Gurler, U. Akar Tarim. An investigation on determination of attenuation coefficients for gamma-rays by Monte Carlo method. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 293 (1) (2012) 397–401.
18. N. Demir, U.A. Tarim, M.-A. Popovici, Z.N. Demirci, O. Gurler, I. Akkurt. Investigation of mass attenuation coefficients of water, concrete and bakelite at different energies using the FLUKA Monte Carlo code. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 298 (2) (2013) 1303–1307.
19. S. Sharifi, R. Bagheri, S. Shirmardi. Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. *Ann. Nucl. Energy* 53 (2013) 529–534.
20. P.S. Kore, P.P. Pawar, Measurements of mass attenuation coefficient, effective atomic number and electron density of some amino acids. *Radiat. Phys. Chem.* 98 (2014) 86–91.
21. V. Singh, N. Badiger, N. Kucuk. Assessment of methods for estimation of effective atomic numbers of common human organ and tissue substitutes: waxes, plastics and polymers. *Radioprotection* 49 (2) (2014) 115–121.
22. V. Trunova, A. Sidorina, V. Kriventsov. Measurement of X-ray mass attenuation coefficients in biological and geological samples in the energy range of 7–12 keV. *Appl. Radiat. Isot.* 95 (2015) 48–52.
23. A. Vejdani-Noghreiyani, E. Aliakbari, A. Ebrahimi-Khankook, M. Ghasemifard. Theoretical and experimental determination of mass attenuation coefficients of lead-based ceramics and their comparison with simulation. *Nucl. Technol. Radiat. Prot.* 31 (2) (2016) 142–149.
24. S.M. Vahabi, M. Bahreinipour, M.S. Zafarghandi. Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: A comparison study. *Vacuum* 136 (2017) 73–76.
25. B. Bilmez, O. Toker, S. Alp, E. Öz, O. İçelli. A comparative study on applicability and efficiency of machine learning algorithms for modeling gamma-ray shielding behaviors. *Nucl. Eng. Technol.* 54 (1) (2022) 310–317.
26. Q. Jin, L. Su, G. Montavon, Y. Sun, Z. Chen, Z. Guo, W. Wu. Surface complexation modeling of U (VI) adsorption on granite at ambient/elevated temperature: experimental and XPS study. *Chem. Geol.* 433 (2016) 81–91.
27. Q. Fan, L. Hao, C. Wang, Z. Zheng, C. Liu, W. Wu. The adsorption behavior of U (VI) on granite, *Environ. Sci. Process. Impacts* 16 (3) (2014) 534–541.
28. S. Yu, X. Wang, Y. Liu, Z. Chen, Y. Wu, Y. Liu, H. Pang, G. Song, J. Chen, X. Wang. Efficient removal of uranium (VI) by layered double hydroxides supported nanoscale zero-valent iron: A combined experimental and spectroscopic studies. *Chem. Eng. J.* 365 (2019) 51–59.
29. K. Zhao, C. Chen, T. Cheng, J. Shang. Graphene oxide-facilitated uranium transport and release in saturated medium: effect of ionic strength and medium structure. *Environmental Pollution* 2019. 247: p. 668–677.
30. K. Gückel, A. Rossberg, V. Brendler, H. Foerstendorf. Binary and ternary surface complexes of U (VI) on the gibbsite/water interface studied by vibrational and EXAFS spectroscopy. *Chem. Geol.* 326 (2012) 27–35.
31. F. Adekola, M. Fédoroff, H. Geckeis, T. Kupcik, G. Lefèvre, J. Lützenkirchen, M. Plaschke, T. Preocanin, T. Rabung, D. Schild. Characterization of acid–base properties of two gibbsite samples in the context of literature results. *J. Colloid Interface Sci.* 354 (1) (2011) 306–317.
32. SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB), Long-Term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark, SKB Report, 2011.
33. R. Forster, T. Godfrey, MCNP – a general Monte Carlo code for neutron and photon transport, in: *Monte-Carlo Methods and Applications in Neutronics, Photonics and Statistical Physics*, Springer, 1985, pp. 33–55.
34. J. Ródenas, A. Martinavarro, V. Rius, Validation of the MCNP code for the simulation of Ge-detector calibration. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 450 (1) (2000) 88–97.
35. S.A. Pozzi, E. Padovani, M. Marseguerra. MCNP-PoliMi: a Monte-Carlo code for correlation measurements. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 513 (3) (2003) 550–558.
36. M. Berger. J. Hubbell, Photon cross section on a personal computer (XCOM). Center for Radiation Research, NIST, MD 20899, USA, 1987.