



بررسی زیست محیطی پرتوزایی بوکسیت و گل قرمز حاصل از فرآوری بوکسیت جاجرم و محاسبه‌ی نسبت اختلاط گل قرمز برای استفاده در مصالح ساختمانی

ناصر ناصری^{۱*}، محمدحسین محمودی قرائی^۱، صالح اشرفی^۲، محمدتقی بحرینی طوسی^۳، فرزین قائمی^۱،
اختای جهانبخش^۲

۱- گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

۳- گروه فیزیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۱/۳/۳۱، نسخه نهایی: ۹۱/۷/۱۰)

چکیده: مواد معدنی موجود در پوسته‌ی زمین بسته به ترکیب و خواستگاهی که دارند حاوی مقادیری از رادیونوکلوئیدهای پرتوزا هستند. حضور این رادیونوکلوئیدها پیوسته بر میزان دوز دریافتی انسان از محیط تأثیر گذاشته و می‌تواند در سطوح بالا خطر زا باشند. بوکسیت به‌عنوان ماده‌ی معدنی خام تولید آلومینیوم حاوی مقادیر نسبتاً بالایی از این رادیونوکلوئیدها است. فرآیند برداشت بوکسیت می‌تواند باعث تمرکز بیشتر این رادیونوکلوئیدها در باطله‌ی آن یعنی گل قرمز شود. برای کاهش مخاطرات زیست محیطی گل قرمز و نیز به خاطر دارا بودن مقادیر بالای اکسیدهای آهن، از گل قرمز در صنایع سیمان و آجر سازی استفاده می‌شود. به لحاظ بالا بودن سطح پرتوزایی گل قرمز، باید پیش از استفاده در صنایع، سطح پرتوزایی آن از نظر شاخص‌ها و استانداردهای وابسته مورد ارزیابی قرار گیرد. از این رو در این پژوهش پرتوزایی نمونه‌های بوکسیتی و گل قرمز معدن بوکسیت جاجرم را که بزرگ‌ترین ذخیره‌ی بوکسیت ایران است و سالانه حدود ۱۰۰۰۰۰۰ تن گل قرمز تولید می‌کند، از نظر شاخص‌های زیست محیطی مورد بررسی قرار داده‌ایم. در نهایت با توجه به میانگین سطح پرتوزایی اندازه‌گیری شده گل قرمز، نسبت اختلاط گل قرمز با خاک رس برای ساخت مصالح ساختمانی با سطح پرتوزایی پایین‌تر از حد مجاز مورد محاسبه قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: بوکسیت؛ گل قرمز؛ جاجرم؛ پرتوزایی؛ مصالح ساختمانی.

مقدمه

شده برای هر ماده‌ی معدنی برای ارزیابی مخاطرات احتمالی تهدید کننده‌ی بسیار ضروری است. اورانیوم و توریم به دلیل پتانسیل یونی که دارند در گروه عناصر هیدرولیزها قرار گرفته به‌همین دلیل می‌توانند در محصولات هوازدگی ناشی از هیدرولیز از قبیل بوکسیت تمرکز یابند [۱]. فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت حجم بسیار زیادی از مواد باطله تحت عنوان گل قرمز تولید می‌کند. این ماده قلیایی است و pH آن بین ۱۰ تا ۱۲ است. مقدار گل قرمز تولیدی

مواد معدنی به دلیل داشتن عناصر پرتوزا به‌عنوان یکی از منابع طبیعی پرتوگیری بشر از محیط محسوب می‌شوند. قرار گرفتن در معرض این منابع پرتوزا و ذرات یونیده کننده بر میزان دوز دریافتی انسان از محیط تأثیر می‌گذارد. بسته به تمرکز هسته‌های پرتوزای طبیعی موجود در مواد معدنی، چگونگی در معرض قرار گیری آن‌ها زبان‌هایی را برای افراد به دنبال دارد. لذا شناخت میزان پرتوزایی مواد معدنی و نوع کاربری تعریف

* نویسنده مسئول، تلفن-نمبر: ۸۷۹۷۲۷۵ (۰۵۱۱)، پست الکترونیکی: nassery@gmail.com

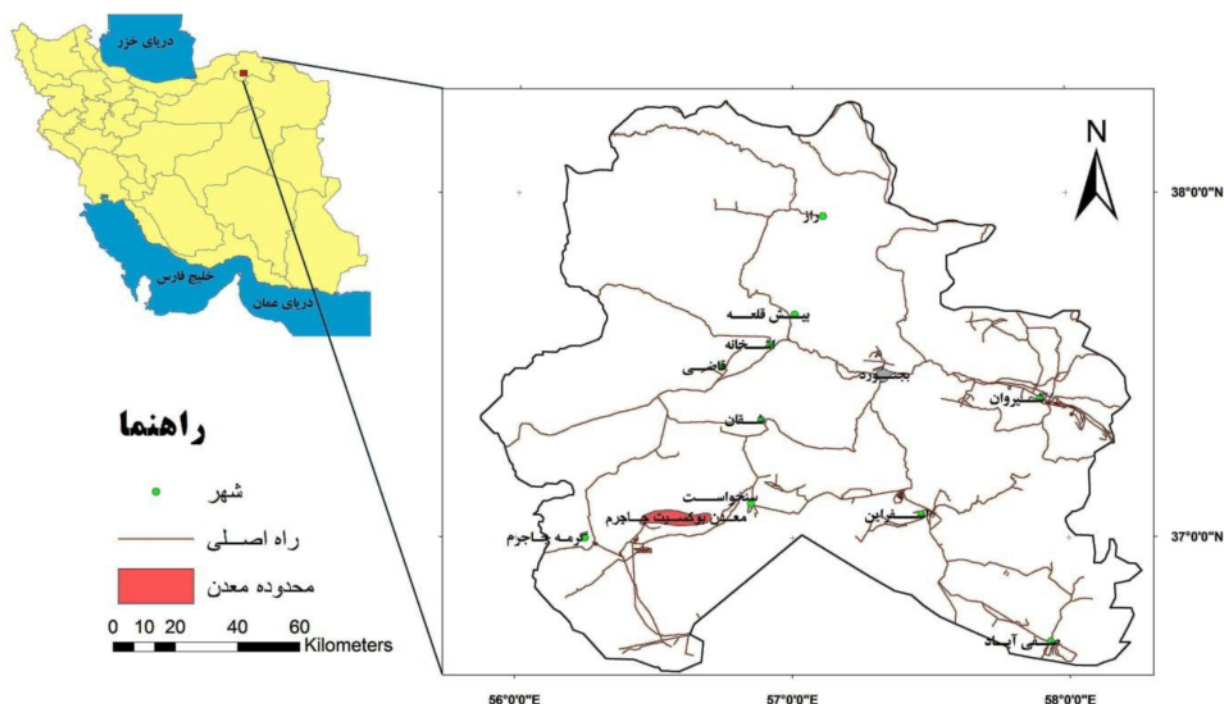
بهره برداری است و سالانه حدود یک میلیون تن گل قرمز تولید می کند [۵]، لازم است میزان پرتوزایی و شاخص های زیست محیطی مربوطه برای انواع بوکسیت و گل قرمز این معدن مورد بررسی قرار گیرد.

موقعیت و زمین شناسی گستره ی مورد بررسی

کانسار بوکسیت جاجرم در ۱۹ کیلومتری شمال شرق شهر جاجرم در کوه زو قرار دارد. وسعت منطقه ی معدنی ۱۲ کیلومتر مربع است (شکل ۱). این منطقه که در جنوبی ترین بخش زون ساختاری البرز شرقی و جنوب غربی کپه داغ قرار گرفته است از غرب و شمال با کوه های گدارگز، از شرق و جنوب شرقی با کوه های اسفراین و از شمال با کوه های آلاداغ محصور شده است [۴]. رخنمون های سنگی وابسته به پالئوزوئیک و مزوزوئیک در گستره ی کوه زو گسترش داشته و در منطقه ی جاجرم نهشته های سنوزوئیک به صورت نهشته های تخریبی، تبخیری و نیز آذرین در بخش جنوبی تر قابل مشاهده اند. آشکارترین واحدهای رسوبی گستره مورد بررسی را سازندهای مبارک و الیکا و شمشک تشکیل می دهند. افق های بوکسیتی مورد نظر در مرز سازندهای مبارک و الیکا و نیز الیکا و شمشک تشکیل شده است [۶].

بستگی به میزان آلومینای موجود در ترکیب بوکسیت و شرایط فرآیند کانه آرایی آن دارد [۲]. انباشتن گل قرمز در یک منطقه به دلیل اینکه به شدت قلیایی بوده و حاوی مقادیر بالای اکسیدهای آهن و فلزات سنگین است، عاری از مشکلات زیست محیطی نیست. لذا برای کاهش خطرهای زیست محیطی گل قرمز بررسی های زیادی برای باز چرخش و استفاده مجدد از آن صورت گرفته است که از آن جمله می توان به کارگیری گل قرمز در مصالح ساختمانی، مانند ساخت انواع آجرها، صنایع سیمان، سرامیک و بتن اشاره کرد [۳]. در فرآیند دریافت بوکسیت (بایر) رادیونوکلئیدها بیشتر در مواد باطله تمرکز یافته و باعث می شوند که گل قرمز همیشه سطح پرتوزایی بالاتری نسبت به بوکسیت خام داشته باشد. با توجه به بالا بودن طبیعی این رادیونوکلئیدها در بوکسیت خام انتظار می رود که پرتوزایی گل قرمز حاصل از آن به سطوح بیشتر از حد مجاز استاندارد برسد که در این صورت باید موارد استفاده از آن کنترل شده و با تدابیر ویژه صورت گیرد.

با توجه به اینکه کانسار بوکسیت جاجرم با میزان ذخیره ی ماده ی معدنی بیست و دو میلیون تن، به عنوان بزرگ ترین ذخیره ی بوکسیت شناخته شده ی ایران [۴] هم اکنون در حال



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی گستره ی مورد بررسی.

روش بررسی

برای بررسی پرتوزایی طبیعی بوکسیت جاجرم ۵ نمونه از انواع بوکسیت سخت قرمز (Bh1)، بوکسیت قرمز زیرین (Bh2)، بوکسیت شیلی (Bsh)، بوکسیت کائولینیتی (Bko) و بوکسیت شاموزیتی (Bch) موجود در معدن، و نیز ۵ نمونه گل قرمز (RM1, ..., RM5) از پنج نقطه و در محل‌های تخلیه گل سد باطله کارخانه تولید آلومینا برداشته شدند.

برای اندازه‌گیری فعالیت نمونه‌های بوکسیت از بیناب سنج β - γ مدل AT1315 دانشگاه تبریز استفاده شد. این بیناب سنج از ۲ آشکارساز سوسوزن پلاستیک و سوسوزن NaI(Tl) تشکیل شده است. سوسوزن پلاستیک بیناب β و سوسوزن NaI(Tl) بیناب پرتو گامای منتشر شده از نمونه‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند. این بیناب سنج قدرت آشکارسازی پرتو γ در گستره 50KeV تا 3000KeV و پرتو β را در گستره انرژی 150KeV تا 3500KeV دارد. برای پیشگیری از تداخل بیناب زمین، آشکارسازها به همراه نمونه در یک حفاظ سربی با ضخامت دیواره‌ی ۵ سانتی متر و به وزن ۱۲۰ کیلوگرم قرار داده می‌شوند. برای افزایش بازده آشکارسازی، نمونه‌ها را آسیاب کرده و از الک 1mm عبور دادیم، سپس نمونه‌ی الک شده را درون ظرف پلاستیکی خاصی به نام مارینلی (Marinelli) ریخته و ظرف‌ها را نسبت به خروج گاز رادون عایق بندی کردیم (شکل ۲). نمونه‌ها به مدت یک ماه به همین

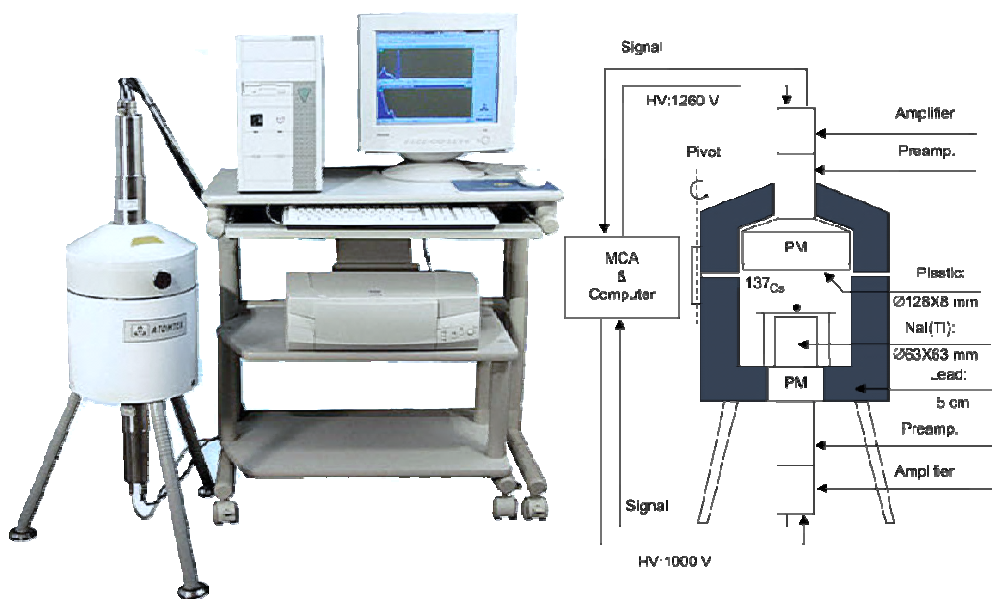
صورت نگهداری می‌شدند تا تعادل پایداری بین رادون و فرآورده‌های واپاشی آن که نیمه عمر کوتاهی دارند برقرار شود. پس از گذشت یک ماه هر نمونه به مدت ۳ ساعت در دستگاه شمارشگر قرار گرفت.

با استفاده از داده‌ای خام به‌دست آمده، سطح پرتوزایی نمونه‌ها از نظر شاخص‌های ریسک پذیری مورد ارزیابی قرار گرفتند. در پایان نمونه‌های گل قرمز را برای استفاده در مصالح ساختمانی از نقطه نظر استانداردهای زیست محیطی مربوط به پرتوزایی مصالح ساختمانی بررسی کرده و در صورت بالا بودن پرتوزایی گل قرمز، نسبت اختلاط گل قرمز با مواد دیگر برای کاهش خطرهای ناشی از پرتوزایی محاسبه کردیم.

بحث و بررسی

کانی شناسی بوکسیت و گل قرمز

بیشتر کانی‌های گزارش شده در ذخیره‌ی بوکسیت جاجرم از دیاسپور، شاموزیت، هماتیت، گوتیت، آناز، کائولینیت و ایلیت تشکیل شده، و اختلاف در فراوانی این کانی‌ها مهم‌ترین دلیل تنوع رنگ در بوکسیت‌ها به حساب می‌آید [۶]. حضور گوتیت باعث ایجاد رنگ زرد تا قهوه‌ای در بوکسیت شده [۷] و هماتیت رنگ‌های قرمز مایل به صورتی و گاهی بنفش را باعث می‌شود. مگنتیت رنگ قهوه‌ای و کلریت‌ها و شاموزیت نیز به رنگ سبزند. از کانی‌های اصلی گزارش شده در گل قرمز می‌توان به کانکرینیت، کاتوپیت، هماتیت و آمیست اشاره کرد [۵].



شکل ۲. نمایی از بیناب سنج β - γ مدل AT1315 همراه با برش شماتیک.

چشم پوشی شده و تنها به شاخص های ریسک پذیری وابسته به دوز جذبی خارجی که ناشی از گامای محیطی است می پردازیم. البته از آنجا که بخشی از هدف این پژوهش امکان بررسی استفاده از گل قرمز در مصالح ساختمانی است، شاخص های زیست محیطی وابسته به مصالح ساختمانی و دوز جذبی داخلی برای گل قرمز محاسبه می شود.

با استفاده از فعالیت ^{232}Th ، ^{238}U و ^{40}K هر نمونه، می توان سطح پرتوایی آن نمونه را برای ارزیابی شاخص های ریسک پذیری محاسبه کرد. مخاطرات ناشی از تابش گاما و استنشاق گاز رادون بیشتر به وسیله "شاخص معادل رادیوم (Ra_{eq})"، "آهنگ دوز جذب شده در هوا"، "شاخص خطر تابش های خارجی (H_{ex})" و "داخلی (H_{in})" مورد ارزیابی قرار می گیرند [۹].

محاسبه ی معادل رادیوم

از آنجا که ۹۸/۵ درصد از اثرهای بیولوژیکی تابش های سری های ^{238}U ، در اثر تابش های ^{226}Ra و دخترانش ایجاد می شود، بنابراین می توان اثر ^{238}U و فرآورده های دیگر محصولات دختر پیش از ^{226}Ra را در این سری واپاشی نادیده گرفت [۱۰]. معادل رادیوم عبارت است از مجموع فعالیت های سه رادیونوکلئید ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K بر پایه این فرض که آهنگ دوز گامای رادیوم با اکتیویته 370Bq.Kg^{-1} با نرخ دوز گامای توریم با اکتیویته 259Bq.Kg^{-1} و نرخ دوز گامای پتاسیم با فعالیت 4810Bq.Kg^{-1} برابر است [۱۰]. معادل رادیوم با معادله ی زیر محاسبه می شود [۱۱]:

$$(1-1) \quad Ra_{eq} = 37 \cdot Bq / Kg \times \left(\frac{A_{Ra}}{37 \cdot Bq / Kg} + \frac{A_{Th}}{259 \cdot Bq / Kg} + \frac{A_K}{4810 \cdot Bq / Kg} \right)$$

در این رابطه A_{Ra} ، A_{Th} ، A_K به ترتیب عبارتند از پرتوایی ^{226}Ra ، ^{232}Th ، ^{40}K بر حسب Bq.Kg^{-1} . مقادیر Ra_{eq} برای هر نمونه محاسبه شده و در جدول شماره (۱) نشان داده شده اند. حد قابل قبول برای معادل رادیوم کمتر یا مساوی 370Bq/Kg است [۱۲].

محاسبه ی آهنگ دوز جذب شده در هوا

مقدار انرژی ذخیره شده به وسیله تابش یونیده کننده واحد جرم ماده ای که در واحد زمان تابش از آن عبور کرده است، را آهنگ دوز جذب شده می گویند. آهنگ دوز جذب شده ناشی از تابش گاما در هوا و در فاصله یک متری بالای سطح زمین، از سوی $^1\text{UNSCEAR}$ به صورت زیر تعریف شده است [۸]:

به طور کلی رنگ می تواند در تعبیر و تفسیرهای ژئوشیمیایی اولیه یک کانسار بوکسیت بیانگر ویژگی های خاصی از محیط تشکیل و شرایط اکسایش و احیا بوده و همراه با تعیین کانی های رسی موجود در بوکسیت به عنوان ابزاری مفید در جدایش بوکسیت ها در محیط معدن مورد استفاده قرار گیرد. مثلاً رنگ های قرمز، صورتی، زرد، بنفش و زرد مایل به قهوه ای نشان دهنده ی شرایط اکسایش در طی مراحل تشکیل بوکسیت است. بوکسیت های این منطقه غالباً سخت و قرمز بوده و در صورت داشتن ایلیت زیاد که حالت شیلی به بوکسیت می دهد. بوکسیت شیلی قرمز نامیده می شود. رنگ سفید بوکسیت بیان کننده ی آبشویی شدید آهن در شرایط احیا و تولید کائولینیت است و به این گونه بوکسیت ها در کانی شناسی بوکسیت کائولینیتی گفته می شود. رنگ های سبز و قهوه ای تیره که در بوکسیت های فریک شاموزیتی دیده می شوند نشانی از محیط احیاکننده ی قوی تری است [۷].

چگونگی فعالیت گاما در نمونه های مورد بررسی

نتایج بدست آمده از بیناب سنجی گاما که حاصل واپاشی رادیونوکلئیدهای ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K در نمونه های بوکسیتی و گل قرمز حاصل از فراوری بوکسیت است در جدول (۱) ارائه شده اند. چنانکه مقادیر به دست آمده نشان می دهند میزان پرتوایی گاما در نمونه های گل قرمز بالاتر از نمونه های بوکسیتی است. بیشترین فعالیت به میزان 298Bq.Kg^{-1} حاصل از واپاشی ^{226}Ra و به نمونه ی گل قرمز RM2 وابسته است، در حالی که کمترین فعالیت اندازه گیری شده به میزان 18Bq.Kg^{-1} حاصل از واپاشی ^{232}Th و به نمونه ی Bsh از انواع بوکسیت وابستگی دارد. در مجموع بیشترین فعالیت حاصل از واپاشی هر سه نوکلئید در نمونه های اندازه گیری شده به نمونه ی گل قرمز RM1 و به میزان 718Bq.Kg^{-1} مربوط می شود.

محاسبه ی دوز و ارزیابی شاخص های زیست محیطی

پرتو گیری بشر از محیط می تواند ناشی از یک منبع تابش در خارج از بدن (پرتو گیری خارجی) و یا ناشی از واپاشی رادیونوکلئیدهای پرتوایی که در نتیجه بلعیدن و یا استنشاق وارد بدن شده اند، (پرتو گیری داخلی) [۸]. از آنجا که معدن کاری صورت گرفته در معدن بوکسیت جاجرم از نوع روباز است، احتمال انباشت گاز رادون در سطوح خطر زا در منطقه بسیار کم خواهد بود. به همین منظور در این پژوهش برای ماده ی معدنی بوکسیت از محاسبه ی شاخص های وابسته به دوز جذبی داخلی که بیشتر متأثر از استنشاق گاز رادون است،

مقادیر معادل رادیوم و هم ارز دوز سالانه نیز برای هر یک از نمونه‌های مورد بررسی محاسبه شده و در جدول شماره (۱) نشان داده شده‌اند.

شاخص خطر تابش‌های خارجی (Hex)

این شاخص بیان‌کننده اثرهای پرتو گامای خارجی ناشی از دریافت تابش گاما از محیط پیرامون به‌عنوان مصالح ساختمانی است و به صورت معادله‌ی زیر مشخص می‌شود:

$$H_{ex} = A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \quad (۴-۱)$$

دوز پرتو گامای خارجی قابل قبول محاسبه شده ۱/۵ خواهد بود [۱۵].

شاخص خطر تابش‌های داخلی (Hin)

میزان پرتو دهی داخلی ناشی از استنشاق گاز رادون و پرتوزایی عناصر دختر آن در بدن با شاخص خطر داخلی (H_{in}) مشخص و بر اساس معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{in} = A_{Ra}/185 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \quad (۵-۱)$$

برای کاربرد ایمن موادی که در داخل ساختمان‌ها به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده می‌شوند این شاخص باید کمتر از ۱ باشد [۱۲]. شاخص‌های خطر داخلی (H_{in}) و خارجی (H_{ex}) نیز برای هر نمونه محاسبه شده و در نمودار شماره ۱ نشان داده شده‌اند.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از بیناب سنجی گاما مشاهده می‌شود که میزان پرتوزایی در نمونه‌های گل قرمز بالاتر از بوکسیتی است که از آن فرآوری شده است. این افزایش غلظت در گل قرمز بیانگر این است که فرآیند بایر اورانیوم و توریوم موجود در بوکسیت را در باطله متمرکز می‌نماید. رخداد این پدیده را می‌توان به جدایش اکسیدهای آهن و تیتانیوم از بوکسیت و متمرکز شدن آن در گل قرمز طی فرآیند بایر، نسبت داد. گل قرمز تولید شده از مجموعه آلومینای جاجرم حاوی ۳۲ درصد اکسیدهای آهن و ۸ درصد اکسید تیتانیوم است [۱۶،۶]. اکسیدهای آهن بیشتر به‌صورت کانی‌هایی همچون هماتیت و گوتیت است، و مقادیر کمتری لیمونیت و مگنتیت نیز می‌تواند در گل قرمز وجود داشته باشد [۳].

اکسیدهای آهن و تیتانیوم قدرت جذب سطحی زیادی نسبت به یون‌های اورانیوم و توریوم دارد [۱۷،۱۸]. این خاصیت در کانی‌های آهن داری همچون هماتیت و گوتیت نیز وجود داشته [۱۹،۲۰] به طوری که از این کانی‌ها به صورت اقتصادی برای آبشویی اورانیوم استفاده می‌شود [۲۰].

$$D_a = \sum_x A_x \times C_x \quad (۲-۱)$$

به طوری که A_x فعالیت ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K بر مبنای Bq.Kg^{-1} و C_x فاکتور تبدیل متناظر میزان دوز برای هر یک از رادیونوکلوئیدهای یاد شده است این فاکتور بر پایه‌ی محاسبات ریاضی مونت کارلو با استفاده از داده‌های ICRP و نتایج حاصل از توموگرافی بیماران بزرگسال و جوان را UNSCEAR در سال ۱۹۹۳ محاسبه کرده است [۸]. به عبارت دیگر این فاکتور آهنگ دوز جذب شده در هوا بر واحد جرم جسم است که واحد آن $\frac{\text{nGy.h}^{-1}}{\text{Bq.Kg}^{-1}}$ است و مقدار آن برای ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K به ترتیب ۰،۰۴۱۴، ۰،۶۲۳ و ۰،۴۶۱ محاسبه شده است. بنابراین رابطه بالا به صورت زیر خواهد بود:

$$D_a (\text{nGy.h}^{-1}) = 0.461 A_{238\text{U}} + 0.623 A_{232\text{Th}} + 0.0414 A_{40\text{K}} \quad (۲-۲)$$

آهنگ دوز جذب شده از هوا در نمونه‌های مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است.

هم ارز دوز سالانه

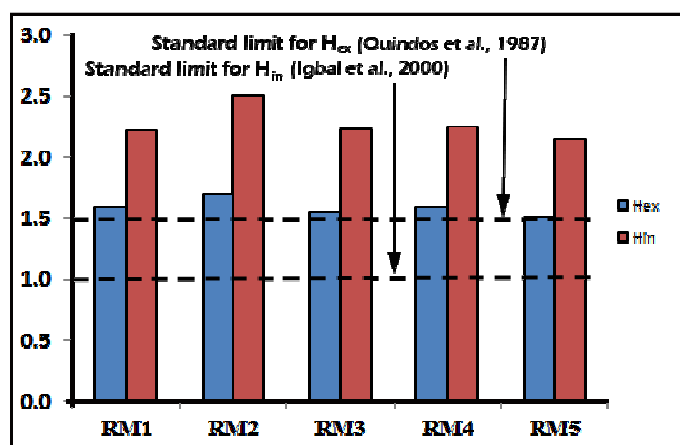
هم ارز دوز کمیته‌ی است که خطرهای و خسارت‌های ناشی از تابش را روی بافت‌های بدن توصیف می‌کند. حاصل ضرب دوز جذب شده در یک فاکتور مناسب، اثرهای بیولوژیکی نوع ویژه-ای از تابش را ارائه داده و کمیته‌ی به نام هم ارز دوز را موجب می‌شود. کمیته هم ارز دوز مؤثر سالانه که آسیب‌های ناشی از پرتو گاما به عموم را طی یک سال گزارش می‌کند به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$D_E (\text{nSv}) = D_a (\text{nGy.h}^{-1}) \times Q \times O_f \quad (۳-۱)$$

در این رابطه D_a آهنگ دوز جذب شده در هواست که با رابطه-ی (۲-۲) به‌دست می‌آید. T زمانی است که مقدار آن برابر است با ۸۶۷۰ ساعت در یک سال. Q ضریب تبدیل دوز جذب شده در هوا به دوز مؤثر است که این ضریب از سوی UNSCEAR در سال ۱۹۸۲ برای یک فرد بالغ $0.7 (\text{Sv.Gy}^{-1})$ (۱) گزارش شده است. O_f فاکتور اشتغال خوانده می‌شود و بستگی به این دارد که فرد معمولاً چند درصد از وقت خود را در بیرون از ساختمان می‌گذراند. با توجه به اینکه ساعت کاری برای معدن کاران در معدن ۱۰ ساعت است فاکتور اشتغال برابر است با ۰،۴ و برای گل قرمز که به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد بنابر گزارش ۰،۸ در نظر گرفته می‌شود [۱۳]. بنا بر آیین نامه کمیته‌ی بین‌المللی حفاظت در برابر پرتو، دوز سالانه نباید بیشتر از 1mSv/y باشد [۱۴].

جدول ۱ فعالیت هر نمونه‌ی بررسی شده به همراه مقادیر معادل رادیوم و هم ارز دوز سالانه.

Sample No	Sample Type	²²⁶ Ra Activity	²³² Th Activit	⁴⁰ K Activity	Ra _{eq} (Bq.Kg ⁻¹)	D _a	D _E
Bh1	Hard red bauxite	۱۴۲	۳۳	Nd	۱۸۹	۸۶,۰۶	۰,۲۱
Bh2	red bauxite	۱۶۳,۲۹	۲۱,۹۴	Nd	۱۹۵	۸۸,۹۹	۰,۲۲
Bsh	shaleBauxite	۱۴۲	۱۸	۴۲۳	۲۰۰	۷۶,۷۲	۰,۱۹
Bko	Kaolinitic	۱۰۹	۲۶	Nd	۱۴۶	۶۶,۴۹	۰,۱۷
Bch	Chamositic	۱۳۰,۵	۲۰,۲۳	Nd	۱۵۹	۷۲,۸۱	۰,۱۸
RM1	Red Mud	۲۳۰	۲۳۸	۲۵۰	۵۹۰	۲۵۴,۳۵	۱,۲۳
RM2	Red Mud	۲۹۸	۲۳۲	Nd	۶۳۰	۲۸۱,۹۶	۱,۳۷
RM3	Red Mud	۲۴۹	۲۲۷	Nd	۵۷۴	۲۵۶,۲۵	۱,۲۴
RM4	Red Mud	۲۴۳	۲۴۱	Nd	۵۸۸	۲۶۲,۲۱	۱,۲۷
RM5	Red Mud	۲۳۴	۲۱۶	۲۲۱	۵۶۰	۲۴۲,۴۸	۱,۱۸
C-1	Clay	۱۰	۲۰	۳۸۹	۶۸	۱۷	۰,۰۸

نمودار ۱ شاخص ارزیابی ریسک پرتو گیری خارجی (H_{ex}) و داخلی (H_{in}) برای نمونه‌های گل قرمز.

$$X + Y = Z \quad (۶-۱)$$

از آنجا که در این پژوهش، برای بوکسیت ۲/۲۶ و برای خاک رس مورد نظر ۰/۲۱ است و با توجه به این که حداکثر (H_{in}) برای مصالح ساختمانی باید برابر ۱ باشد [۱۳] معادله مربوطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$2.26X + 0.21Y = 1Z \quad (۶-۲)$$

با قرار دادن مقدار Z در معادله (۶-۲) با استفاده از معادله‌ی

(۶-۱) می‌توان نسبت X/Y را بدست آورد:

$$2.26X + 0.21Y = X + Y$$

$$1.26X = 0.79Y \quad X/Y = 3/5$$

با توجه به نتایج حاصل، اگر بخواهیم از گل قرمز برای ساخت مصالح ساختمانی استفاده کنیم باید به ازای هر ۳ واحد از گل قرمز، ۵ واحد از خاک رس استفاده شود تا میزان پرتو دهی به زیر حد استاندارد برسد.

با توجه به این که مقدار پرتوزایی ارزیابی شده گل قرمز بیش از حد استاندارد است لازم است تا گل قرمز پیش از باز چرخش و استفاده در مصالح ساختمانی با یک نسبت معین با دیگر موادی که پرتو زایی پایینی دارند مخلوط شود. بنابر این، لازم است نسبت اختلاط گل قرمز محاسبه شود. از آنجا که بحرانی‌ترین حالت پرتو گیری از مصالح ساختمانی، به پرتو گیری داخلی (H_{in}) وابسته است، پایه‌ی محاسبات نسبت اختلاط بر مبنای H_{in} است. لذا برای بدست آوردن نسبت اختلاط، نخست شاخص خطر داخلی (H_{in}) را برای گل قرمز و خاکی که قرار است با بوکسیت مخلوط شود، محاسبه می‌کنیم که در جدول (۲) نمایش داده شده است. در صورتی که X مقدار گل قرمز، Y مقدار رسی که می‌خواهیم با گل قرمز مخلوط کنیم و Z مقدار خاک ایجاد شده ناشی از اختلاط گل قرمز و رس باشد؛ معادله مورد نظر به صورت زیر خواهد بود:

جدول ۲ شاخص‌های خطر داخلی و خارجی محاسبه شده برای نمونه‌های گل قرمز و رس.

Sample	Hex	Hin
RM1	۱٫۵	۲٫۲
RM2	۱٫۷	۲٫۵
RM3	۱٫۵	۲٫۲
RM4	۱٫۵	۲٫۲
RM5	۱٫۵	۲٫۱
clay	۰٫۱	۰٫۲

برداشت

مقدار معادل رادیوم (Ra_{eq}) محاسبه شده برای تمامی نمونه‌های بوکسیتی زیر حد مجاز 370Bq/Kg و در گستره‌ی 146Bq/Kg - 200Bq/Kg است، ولی برخلاف بوکسیت‌ها تمامی نمونه‌های گل قرمز Ra_{eq} بیشتر از حد مجاز 370Bq/Kg و در گستره‌ی 560Bq/Kg - 630Bq/Kg قرار دارند. همانند معادل رادیوم، هم ارز دوز سالانه نیز برای نمونه‌های بوکسیتی زیر حد استاندارد 1mSv/y کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتو و در گستره‌ی 0.17mSv/y - 0.22mSv/y قرار دارند، ولی برخلاف بوکسیت تمامی نمونه‌های گل قرمز هم ارز دوز سالانه بیشتر از حد استاندارد داشته و در گستره‌ی 1.18mSv/y - 1.37mSv/y قرار دارند. برای ارزیابی پرتوزایی گل قرمز برای استفاده در مصالح ساختمانی شاخص، ارزیابی ریسک پرتوگیری خارجی (H_{ex}) و داخلی (H_{in}) برای نمونه‌های گل قرمز محاسبه شدند و نتایج به‌دست آمده بیانگر این است که تمامی نمونه‌های گل قرمز حدود ۲ برابر حد مجاز پرتودهی دارد. لذا از گل قرمز کارخانه آلومینای جاجرم به‌صورت خالص نمی‌توان به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده کرد و باید با مواد دیگری که سطح پرتوزایی پایینی داشته مخلوط شده و سپس مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت برای استفاده از گل قرمز در مصالح ساختمانی نسبت اختلاط گل قرمز با خاک رسی که پرتوزایی پایینی داشت محاسبه شد و نسبت اختلاط گل قرمز به رس ۳ به ۵ به‌دست آمد.

مراجع

[1] Mason M., Moore C.B., "Principles of Geochemistry (4th Edition)", John Wiley & Sons, New York (1982).

[2] Díaz B., Joiret S., Keddám M., Nóvoa X. R., Pérez M. C., Takenouti H., "Passivity of iron in red mud's water solutions", *Electrochemical Acta*, Vol: 49 (2004) PP. 3039-3048.

[3] Somlai J., Jobb'agy.V., Kov'acs.J., Tarj'an.S., Kov'acs.T., "Radiological aspects of the usability of red mud as building material additive", *Journal of Hazardous Materials* 150 (2008) 541-545.

[۴] رحیم پور بناب. ح.، اسماعیلی د.، "پتروگرافی و ژئز کانسار بوکسیت جاجرم"، *مجله علوم دانشگاه تهران*، جلد سی و سوم، شماره ۱، (۱۳۸۶) ص ۱۰۷-۱۲۳.

[۵] اسم خانی.ر.، قبادی.ب.، امیرخانی.الف.، امین خانی.ع.، ۱۳۸۷، "شناسایی گل قرمز کارخانه تولید آلومینای جاجرم و مطالعه روش‌های بازیابی تیتانیوم دی‌اکسید از آن، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران"، دوره ۲۷، شماره ۲، ص ۵۹-۶۶.

[۶] ناصری م.، "کانی‌شناسی و ژئوشیمی بوکسیت جاجرم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی (گرایش اقتصادی)، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۲) ص ۱۴۶.

[7] Schwertmann U., "Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In *Bingham*", *Soil Color* 31(1993) 51-69.

[8] UNSCEAR., "Sources and Effects of Ionizing Radiation", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993).

[9] Abbady A.G.E., "Estimation of radiation hazard indices from sedimentary rocks in Upper Egypt", *Applied Radiation and Isotopes* 60 (2004) 111-114.

[۱۰] اعلائی ش.، "بررسی کمی و کیفی رادیوایزوتوپ‌های موجود در آب و خاک منطقه مرند و زنوز"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرایش هسته‌ای)، دانشگاه تبریز، ص ۱۰۷ (۱۳۸۳).

- [۱۶] قربانی ی.، اولیازاده م.، شاهوردی ار.، پیرایه گرا.،
فروشوییشیمیایی آلومینا از گل قرمز با بررسی اثر مجزا و
ترکیبی اسیدهای آلی و معدنی، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۱،
شماره ۳ (۱۳۸۶) ص ۳۴۳-۳۵۳.
- [17] Jaffrezic-Renault N., Poirier-Andrade H., Trang., "Models for the adsorption of uranium on titanium dioxide", *Journal of Chromatography A* 201 (1980) 187-192.
- [18] Noubactep C., Schöner A., Meinrath G., "Mechanism of uranium removal from the aqueous solution by elemental iron", *Journal of Hazardous Materials B132* (2006) 202-212.
- [19] Sabriye Y., Erenturk S., "Sorption behaviors of uranium (VI) ions on α -FeOOH", *Desalination* 269 (2011) 58-66.
- [20] Giammar D.E., Hering J.G., "Time scales for sorption-desorption and surface precipitation of Uranyl on Goethite", *Environmental Sci Technol* 35 (2001) 3332-3337.
- [11] Tufail, M., "Natural radioactivity from building materials used in Islamabad and Rawalpindi", *Pakistan The Science of the total Environment*, 121 (1992) 283-291
- [12] Iqbal, M., Tufail, M., Mirza, S.M., "Measurement of natural radioactivity in marble found in Pakistan using a NaI(Tl) gamma-ray spectrometry", *J. Environ. Radioactivity* 51 (2000) 255.
- [13] UNSCEAR., "ANNEX B Exposures to natural radiation sources", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1982).
- [14] ICRP-60, "Radiation Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". Oxford Press (1990).
- [15] Quindos, L.S., Newton, G.J., Fernandez, P.L., Soto, J., "Natural radioactivity of some Spanish building materials", *Sci. Tot. Environ* 68 (1987) 181.