



بررسی میزان رادیواکتیویته طبیعی گرانیت‌ها به عنوان مصالح ساختمانی به کار رفته در فضاهای مسکونی در راستای آلودگی

زیست‌محیطی و توسعه پایدار

ابوالفضل سلطانی¹ و امین مرادی²

تاریخ دریافت: 97/03/13

تاریخ پذیرش: 97/08/01

چکیده: هدف از این تحقیق، تعیین شدت رادیواکتیویته طبیعی و شاخص‌های خطر سنگ‌های گرانیتی ایران است که به عنوان مصالح ساختمانی به صورت نما و سنگ‌فرش کف و پلکان در فضاهای مسکونی استفاده می‌شود. به منظور تعیین کاربری سنگ‌های گرانیتی در راستای اهداف زیست‌محیطی و توسعه پایدار، مقدار دوز مؤثر تشعشع این گرانیت‌ها محاسبه شد. روش تحقیق براساس تعیین مقادیر ایزوتوپ‌های ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K توسط دستگاه اسپکترومتر جرم بر روی 62 نمونه از سنگ‌های گرانیتیویدی که از 13 منطقه ایران جمع‌آوری شده، صورت گرفته است. به‌منظور صحت سنجی اطلاعات ایزوتوپی، مطالعات پتروگرافی شامل بافت، رنگ، نوع کانی‌های اصلی و فرعی و تعیین نام دقیق گرانیت با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان بر روی نمونه‌های سنگی نیز انجام شد. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که مشاهدات میکروسکوپی و داده‌های ایزوتوپی با یکدیگر تطابق خوبی دارند. به عبارت دیگر هرچه نمونه‌های گرانیتی مورد مطالعه رنگ روشن‌تری دارند و از کانیهای فرعی (مانند زیرکن، آپاتیت و تیتانیت) غنی‌تر هستند، غلظت عناصر رادیواکتیو در آنها بالاتر است. بیشترین مقدار میانگین، فعالیت هسته‌های ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K به ترتیب عبارتند از $118/128,6$ و $1385/46 \text{ Bq kg}^{-1}$ برای گرانیت‌های کردستان، بیرجند و زنجان. میانگین غلظت سه ایزوتوپ فوق‌الذکر برای ایران به ترتیب عبارت از 78.47 ، 60.39 و $884.72 \text{ Bq kg}^{-1}$ است. ضمن اینکه هریک از این مقادیر از حد استاندارد جهانی تعیین شده برای گرانیت‌ها بالاتر است. با استفاده از نرم‌افزار Excel و فرمول‌های استاندارد، مهمترین شاخص‌های خطر برای 62 نمونه گرانیت محاسبه شد و میانگین اطلاعات تحت عناوین فعالیت معادل رادیوم ($240.72 \text{ Bq kg}^{-1}$)، میزان دوز پرتوگیری خارجی و داخلی در هوای باز ($0.0-32506.65012$)، دوز پرتوگیری داخلی (0.81334)، نرخ دوز مؤثر سالانه (0.13759 mSv/yr)، دوز احتمال ابتلا به خطر سرطان (0.48155 Sv/yr) و شاخص تشعشع گاما (0.88856) محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهند که میانگین شاخص‌های خطر در گرانیت‌های مورد مطالعه برای اماکن عمومی کمتر از حد مجاز است که توسط استاندارد UNSCEAR تعیین شده است، اما به دلیل احتمال خطر تشعشع زیاد، کاربرد این گرانیت‌ها در فضاهای داخلی ساختمان به ویژه برای فضاهای بسته مانند بیمارستان‌ها، فضاهای آموزشی، زندان‌ها، آسایشگاه‌ها، دکوراسیون و تجهیزات زینتی جایز نیست. همچنین به دلیل بالابودن شاخص‌های خطر به ترتیب اولویت در گرانیت‌های بیرجند، کردستان، زنجان، آذربایجان و تکاب، کاربری این نمونه‌ها در فضاهای بسته و اماکن خصوصی جایز نیست و رعایت احتیاط جدی‌تری لازم است. باتوجه به اینکه محیط زیست یکی از شاخص‌های اصلی توسعه پایدار است، رعایت استانداردهای این تحقیق در خصوص دوز پرتوگیری هریک از شاخص‌های خطر، سبب کاهش بیماری‌های ناشی از رادیواکتیویته طبیعی می‌شود و در جهت رسیدن به توسعه پایدار کمک قابل توجهی به ارکان توسعه (اقتصاد، جامعه و محیط زیست) خواهد بود.

واژگان کلیدی: سنگ گرانیت، رادیواکتیویته، شاخص خطر، مصالح ساختمانی.

1- مقدمه

مهمترین خطر رادیواکتیویته طبیعی در ساختمان‌ها اشعه گاما است که در اثر واپاشی هسته‌های ناپایدار عناصری مانند اورانیوم ^{238}U ، توریوم ^{232}Th و پتاسیم ^{40}K صورت می‌گیرد. محصولات واپاشی این هسته‌ها در اتمسفر به صورت ذرات کیهانی، در قسمت تحتانی تروپوسفر به صورت ریزگردها (سرخ، 1394)، در آب به صورت محلول، در خاک و سنگ به صورت کانی وجود دارد. بیشترین تراکم این عناصر در بسترهای زمین شناسی و مصالح ساختمانی به کار رفته در قسمت‌های زیرین، درونی و بیرونی سازه است. به ویژه در برخی از سنگ‌های ساختمانی (مانند گرانیت‌ها) کانی‌های فرعی وجود دارند که اکثر آنها غنی از عناصر سنگین رادیواکتیو هستند (مانند زیرکن، آپاتیت، تیتانیت، پیروکلر، آلانیت، زینوئیم، اورانینیت و توریت). اما حقیقت این است که تمام مصالح ساختمانی، از جمله خاک‌های زیر ساختمان‌ها نیز مقادیر متفاوتی از عناصر رادیواکتیو دارند (جهانگیری و اشرفی، 1389). بنابراین، آگاهی از توزیع هسته‌های پرتوزا و سطح تشعشعات آنها در محیط و برای ارزیابی تأثیرات آنها در منازل، مجتمع‌های مسکونی، انبارها، مراکز آموزشی، ادارات، فروشگاه‌ها، فضاهای بسته و زندگی موجودات زنده بسیار حائز اهمیت است.

در سال‌های اخیر افزایش انواع بیماری‌های سرطانی به ویژه در سنین پایین، باعث نگرانی پژوهشگران شده است به گونه‌ای که ارزیابی میزان تشعشعات رادیواکتیو در محیط ضرورت فراوانی یافته است. در این ارتباط استفاده بی‌رویه از سنگ‌های گرانیتی به صورت نما، پلکان، پی، کف، دیوارها و مصالح سنگی ساختمان بسیار مورد توجه است (Asgharizadeh et al., 2012, Amanjeet et al., 2017, Prakash et al., 2017). قرارگرفتن در معرض پرتوزایی ایزوتوپ‌ها به دو صورت پرتوگیری خارجی و پرتوگیری داخلی تقسیم می‌شود (EC, 1999). پرتوگیری خارجی نتیجه تابش مستقیم تشعشعات گاما است. پرتوگیری داخلی در اثر استنشاق ایزوتوپ‌های رادون به ویژه ^{222}Rn است. ^{222}Rn حاصل واپاشی گاز ^{226}Ra است که خود عمدتاً نتیجه واپاشی هسته‌های عناصر سنگین پرتوزای ^{238}U و ^{232}Th است. این عناصر سنگین درون

کانی‌های سازنده مصالح ساختمانی وجود دارد و رادون حاصل از واپاشی آنها به طور مستقیم و یا از طریق منافذ و درز و ترک‌ها وارد فضاهای خالی مانند ساختمان می‌شود. بنابراین، همه مصالح ساختمانی به ویژه سنگ‌های گرانیتی پیش از به کارگیری در ساختمان، به طور دقیق از نظر فعالیت رادیواکتیویته باید مورد آزمایش قرار گیرند (Al-Zahrani, 2017).

رادون یکی از عناصر شیمیایی در جدول تناوبی است که نماد آن Rn و عدد اتمی آن 86 است. این عنصر از گازهای پرتوزاست که توسط رادیوم پدید می‌آید. رادون یکی از سنگین‌ترین گازها و برای سلامتی زیانبار است. گاز رادون دارای 39 ایزوتوپ شناخته شده از ^{193}Rn تا ^{231}Rn است که پایدارترین آن‌ها ^{222}Rn با نیمه عمر 3.8235 روز است. رادون یک گاز پرتوزای بی‌رنگ، بی‌بو، بدون مزه و از نظر واکنش شیمیایی بی‌اثر، اما هسته آن از نظر رادیواکتیویته فعال است. رادون تولید شده نیز، ذرات پرتوزای دیگری تولید می‌کند که نسل جدید (دختران رادون) نامیده می‌شود. رادون موجود در هوا از طریق تنفس وارد ریه انسان می‌شود. سپس رادون در ریه واپاشی می‌کند و در نتیجه ذرات آلفا انتشار می‌دهد. ذرات آلفا دارای جرم سنگین و بار الکتریکی دو برابر الکترون با علامت مثبت دارند. ذرات آلفای انتشار یافته در هوا وارد ریه می‌شود. این ذرات دارای انرژی هستند و این انرژی باعث حرکت آنها در بافت‌های ریه می‌شود و به تدریج در مسیر حرکت و برخورد با سلول بافت‌های ریوی، یون‌سازی می‌کنند تا زمانی که انرژی خود را کاملاً از دست بدهند و متوقف شوند. انرژی ذره آلفا که توسط بافت‌ها جذب می‌شود و باعث آسیب به بافت یا مرگ آن‌ها می‌شود. بنابراین، در صورتی که هوای تنفسی حاوی رادون به مقدار زیاد باشد، بافت‌های ریه به تدریج آسیب می‌بیند به گونه‌ای که در دراز مدت می‌تواند باعث سرطانی شدن بافت‌های ریه شود.

2- روش تحقیق

در این تحقیق اطلاعات پتروگرافی، میکروسکوپی، فعالیت ایزوتوپی و شاخص‌های خطر رادیواکتیویته طبیعی برای 62 نمونه از سنگ‌های پلوتونیک ایران



شرکت Maestro II Gamma Version32 محصول E&G Ortec انجام شد. برای همه نمونه‌ها تصحیحات مربوط به هم فرودی فوتون‌های گاما لحاظ شده است. به منظور کاهش اثرات تابش زمینه، آشکارساز در مرکز یک حفاظ سربی به ضخامت 10 سانتیمتر با یک لایه درونی مسی به ضخامت 2 میلی‌متر قرار دارد به گونه‌ای که پرتوهای نرم کیهانی شامل فوتون‌های کم انرژی و الکترون‌ها با حفاظ سربی به سطح بسیار پایینی کاهش می‌یابند و لایه مسی فوتون‌های مربوط به سرب را با انرژی 79.3 کیلو الکترون ولت حذف می‌کند. تصحیح تابش زمینه با استفاده از طیف ثبت شده برای ظرف خالی در شرایط یکسان انجام شد. براساس طیف‌های ثبت شده، فعالیت ویژه هسته‌های ^{232}Th ، ^{226}Rn و ^{40}K بر حسب Bq/kg تعیین شد. بازدهی مطلق دتکتور (آشکارساز HPGe) طبق استاندارد جهانی (IAEA, 2003) از رابطه $\epsilon(\%) = 100 N_i / [Act \times P_n(E_i) \times t]$ محاسبه شده است که در آن، N_i شمارش خالص زیر قله فوتویک متناظر با انرژی Act، E_i فعالیت نمونه بر حسب Bq، $P_n(E_i)$ احتمال انتشار فوتون گاما با انرژی E_i از ای هر واپاشی و t زمان طیف‌گیری برای نمونه بر حسب ثانیه است.

به منظور تعیین و تفسیر محصولات ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Rn و ^{40}K مقدار میانگین دوز مؤثر و کلیه شاخص‌های خطر برای این ایزوتوپ‌ها براساس فرمول‌های استاندارد UNSCEAR توسط نرم‌افزار Excel محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت تعیین ارتباط ژنتیکی بین رنگ سنگ، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده آن، کانی‌های فرعی آن و شدت فعالیت رادیواکتیویته، مهمترین نمونه‌های سنگ‌های گرانیتوئیدی ایران توسط میکروسکوپ پلاریزان، ساخت آلمان مدل LeitzLaborlux 12 در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران به دقت مورد مطالعه قرار گرفت. به دلیل کاربرد زیاد سنگ‌های گرانیتوئیدی در بخش‌های داخلی و خارجی ساختمان‌ها، تعیین غلظت فعالیت تشعشعی آنها و رعایت استانداردهای مربوطه بسیار الزامی است. لذا در این مطالعه بر اساس محاسبه میزان رادیواکتیویته، ارزیابی میانگین دوز مؤثر و پارامترهای خطر تشعشع،

(عمدتا گرانیتوئید) که به طور گسترده در 13 منطقه از کشور بیرون زدگی دارند، مورد مطالعه و میزان فعالیت تشعشعی آنها مقایسه شده است. برخی از اطلاعات مبنا برای ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K با مجوز کتبی از منابع موجود (جهانگیری و اشرفی 1389، عباسی و میرافتخاری 2011، پورایمانی و دیگران 1395 و 2014) جمع آوری و در محاسبات این تحقیق مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. برای تعیین مقدار اکتیویته عناصر، ابتدا نمونه سنگ (فاقد آثار هوازدگی) در حد یک کیلوگرم از محل رخنمون گرانیت مورد نظر برداشت شده است. هریک از نمونه‌ها توسط آسیاب به پودری نرم تبدیل شدند (اندازه دانه کمتر از یک میلی‌متر). پودر حاصل توسط دستگاه همزن به صورت یکنواخت و همگن درآمد. نمونه پودر در دمای 110°C به مدت 6 ساعت قرار گرفت تا خشک شود. مقدار 293 گرم پودر خشک شده در استوانه پلاستیکی (پلی اتیلن) به حجم 300 میلی لیتر قرار گرفت و برای جلوگیری از فرار گاز رادون، در ظرف نمونه با چسب مخصوص بسته شد. این نمونه به مدت 50 روز در ظرف "مارینلی بکر" قرار گرفت تا تعادل ایزوتوپی بین ^{232}Th و ^{226}Ra و نیز محصولات ایزوتوپی کوتاه مدت (کم عمر) آنها یعنی ^{222}Rn و ^{220}Rn حاصل شود. پس از آن، شدت فعالیت ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Rn و ^{40}K توسط دستگاه گاما اسپکترومتر جرم در دانشگاه اراک (30 نمونه) و دانشگاه تبریز (32 نمونه) تعیین شد. این دستگاه دارای آشکارساز فوق خالص جرمینوم (HPGe) هم‌محور از نوع P مدل Baltic Scientific ساخت شرکت GCD30195BSI Instruments با بازدهی نسبی 30٪ و مجهز به نرم‌افزار Lsrmbi است. قدرت تفکیک انرژی آشکارساز 1.95 کیلو الکترون ولت برای خط گاما ^{60}Co با انرژی 1332.520 کیلو الکترون ولت است که در ولتاژ کاری 3000 ولت کار می‌کند. هریک از نمونه‌ها به مدت یک روز (86400 ثانیه) طیف نگاری شده‌اند. کالیبراسیون دارای رادیونوکلوئیدهای ^{241}Am ، ^{57}Co ، ^{60}Co ، ^{137}Cs ، ^{152}Eu و ^{133}Ba با فعالیت مشخص انجام شد. تجزیه و تحلیل طیف‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار

برحسب شاخص‌های استاندارد بین‌المللی کاربری سنگ-های گرانیتوئیدی با توجه به مخاطرات زیست‌محیطی در جهت اهداف توسعه پایدار تعیین می‌گردد.

1-2- سنگ‌های گرانیتوئیدی

گرانیتوئیدها، سنگ‌های آذرین درونی‌اند که عمدتاً شامل کانی‌های فلدسپار (تا 80%) و دامنه تغییرات کوارتز در آنها 20 تا 60% است. برحسب نوع و درصد فلدسپارهای Na-Ca و K، سری سنگ‌های گرانیتوئیدی (از رنگ تیره به روشن) به ترتیب شامل: *تونالیت*، *گرانودیوریت*، *مونزوگرانیت*، *سینوگرانیت* و *آلکالی فلدسپار گرانیت* است (Streckeisen, 1976). مذاب تشکیل دهنده گرانیت‌ها (ماگما) غنی از سیلیسیم (70-77%) و در اعماق زمین برای مدت طولانی به تدریج سرد و متبلور شده است، لذا کانی‌های آنها روشن و درشت بلورند. به دلیل داشتن رنگ و بافت مناسب، استحکام در برابر نیروها و مقاومت در برابر عوامل محیطی، گرانیت‌ها به طور گسترده در بخش‌های درونی و بیرونی ساختمان‌ها به کار می‌روند. از نظر منشأ، گرانیت‌ها یا از ذوب سنگ‌های آذرین واقع در قسمت‌های عمیق پوسته زمین (infracrystal) و یا در اثر ذوب سنگ‌های رسوبی ناشی از توسعه فرآیندهای دگرگونی در بخش‌های فوقانی‌تر پوسته زمین (supracrystal) پدید آمده‌اند، لذا Chappell & White (2001) از نظر ژنتیکی به ترتیب آنها را تحت عنوان I-type و S-type طبقه‌بندی کرده‌اند.

کانی‌های اصلی در هر دو نوع گرانیت شامل کوارتز و فلدسپار وجود دارد و این کانی‌ها دارای رنگ روشن هستند. تفاوت عمده دو نوع گرانیت در میزان آلومینیم آنهاست به گونه‌ای که درجه اشباع Al در گرانیت‌های نوع I کمتر از عدد 1 است و کانی‌های فرعی آنها عمدتاً آهن و منیزیم دارند (مانند مگنتیت، بیوتیت و آمفیبول). اما در گرانیت‌های نوع S درجه اشباع Al بیشتر از عدد 1 و کانی‌های فرعی آنها عمدتاً آلومینیم دارند (مانند مسکویت، کوردیریت، آندالوزیت و سیلیمانیت). به همین منظور گرانیت‌های نوع S رنگ روشن‌تر و گرانیت‌های نوع I عموماً رنگ تیره‌تری دارند. بیشترین عوامل مؤثر در شدت فعالیت رادیواکتیویته گرانیتوئیدها، به ترتیب

مربوط به نوع و میزان کانی‌های فرعی (مانند زیرکن و تیتانیت)، نوع کانی‌های اصلی (مخصوصاً فلدسپار پتاسیم) و رنگ سنگ (روشن بودن) است. البته رنگ گرانیت نشانه ترکیب شیمیایی آن است یعنی هرچه روشن‌تر باشد، نشانه بالابودن میزان اکسیدهای سیلیسیم، سدیم، پتاسیم، کلسیم، آلومینیم و پایین بودن میزان اکسیدهای آهن و منیزیم است. چنانچه رنگ گرانیت به سمت مشکی یا سبز میل کند، به گونه‌ای که درصد مودال کانی‌های آهن و منیزیم‌دار از درصد کانی‌های کوارتز و فلدسپاری بیشتر شود، در این حالت اطلاق نام "گرانیت" بر سنگ جایز نیست.

توکلی و همکاران (1391) شاخص رنگ در سنگ‌های گرانیت و میزان رادیواکتیویته طبیعی آنها را بر روی 13 نمونه از گرانیت‌های اصفهان به ترتیب با رنگ‌های سبز، مشکی، قرمز و سفید مورد مطالعه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها (جدول 1) نشان داد که با افزایش شاخص روشنی رنگ سنگ از سبز به سفید، میانگین اکتیویته ویژه ایزوتوپ‌های ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. ضمناً آنها هیچ گونه تحلیلی در خصوص ارتباط نوع کانی‌های تشکیل دهنده (ترکیب شیمیایی) در گرانیت‌های مورد آزمایش و رنگ سنگ ارائه نمودند.

جدول 1- متوسط غلظت پرتوایی در 13 نمونه از گرانیت‌های اصفهان، برحسب Bq.kg^{-1} (توکلی و همکاران، 1391).

Tab. 1- Average radioactivity concentration in 13 samples of granites from Isfahan in Bq.kg^{-1} (Tavakoli et al., 1391).

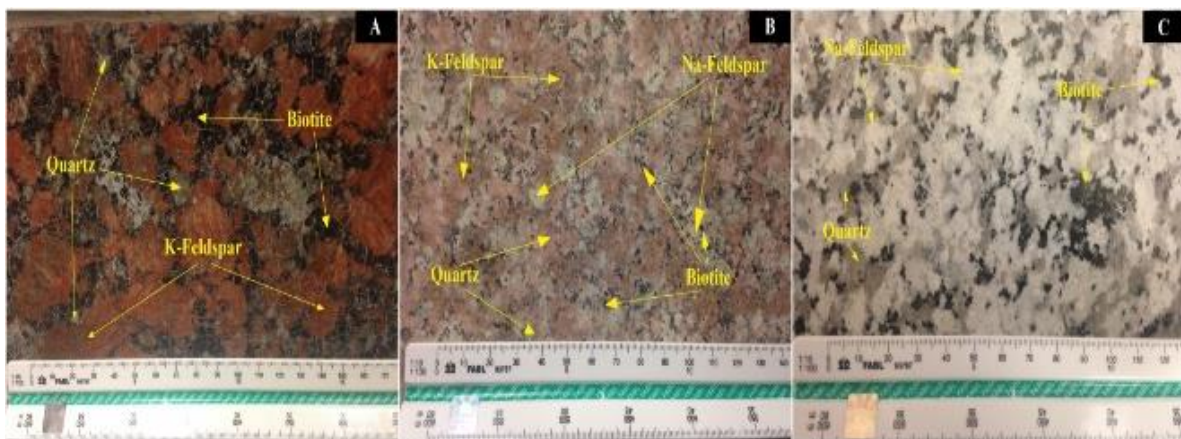
رنگ گرانیت و (تعداد نمونه)	Bq.kg^{-1}		
	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
سبز (1)	<MDA	<MDA	53.16
مشکی (2)	24.31	34.28	525.82
قرمز (4)	57.26	84.31	897.37
سفید (6)	65.72	113.36	1243.28

Note: MDA = minimum detectable absorption

لازم به توضیح است که گرانیت سبز که احتمالاً از کانی‌های منیزیم‌دار غنی بوده است (مانند سرپانتینیت)، کمترین مقدار متوسط اکتیویته پتاسیم را نشان می‌دهد و مقدار متوسط اکتیویته اورانیوم و توریم در آن کمتر از حداقل اکتیویته قابل جذب (<MDA) بوده است. در

را به خوبی در خود نگه می‌دارد و محصول نهایی مذاب، به سمت تشکیل کانی‌های کوارتز و فلدسپار پیش می‌رود، ولی فعالیت رادیواکتیویته سنگ صرفاً به میزان و نوع فلدسپار آن بستگی ندارد، بلکه نوع و میزان کانی‌های فرعی دارای عناصر رادیواکتیو که البته در گرانیتهای تفریق یافته بیشترند، مهم‌ترین عامل تشعشع است (غنی آبادی، 1392، پورایمانی و دیگران، 2018). شکل 1 همچنین، شدت فعالیت رادیواکتیویته گرانیتهای به چگالی سنگ بستگی ندارد. چگالی سنگ‌های گرانیتهایی در حالتی که سنگ فاقد آثار هوازدگی باشد، بیشترین مقدار خود را دارد و میانگین آن از 2.65 تا 2.75 گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر است. البته چگالی سنگ گرانیتهای با افزایش کانی‌های آهن و منیزیم‌دار در آن، افزایش می‌یابد و رنگ سنگ تیره می‌شود ولی تیره شدن رنگ سنگ هیچ ارتباطی با افزایش شدت فعالیت تشعشع آن ندارد. چنانچه به دلیل حضور کانی‌های آهن و منیزیم‌دار، رنگ سنگ تیره یا سیاه باشد، اگر چه در این حالت چگالی بیشتری را نشان خواهد داشت، ولی احتمال افزایش فعالیت تشعشعی آن بسیار کمتر است زیرا در این گونه سنگ‌ها، کانی‌های فرعی دارای مواد رادیواکتیو حضور ندارند.

نمونه‌های مشکی که احتمالاً از کانی‌های آهن‌دار (مانند اکسیدهای آهن، آمفیبول و بیوتیت) غنی بوده‌اند، میانگین اکتیویته ویژه هر سه ایزوتوپ فوق‌الذکر در آنها پایین‌تر از میانگین اکتیویته ویژه همین عناصر در نمونه‌های گرانیتهای قرمز بوده است. با توجه به اینکه مقادیر اکتیویته هر سه ایزوتوپ در نمونه‌های سبز و سیاه بسیار ناچیز بوده است، احتمال غنی بودن این سنگ‌ها از کانی‌های تیره (آهن + منیزیم) بسیار بالاست و اتلاق نام گرانیتهای بر آنها درست نیست. از سویی دیگر، در گرانیتهای قرمز که رنگ گوشتی آنها به دلیل میزان بالای فلدسپار پتاسیم است (شکل 1A و 1B)، شدت رادیواکتیویته بالاست. همچنین، در گرانیتهای سفید که رنگ روشن آن به دلیل مقادیر زیادی فلدسپار سدیم (آلبیت) و کلسیم (آنورتیت) است (شکل 1C)، اکتیویته ویژه ایزوتوپ‌های ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K بالاترین مقدار را نشان داده است. بنابراین، در گرانیتهای با افزایش میزان کانی‌های فلدسپاری، رنگ سنگ روشن‌تر و فعالیت پرتوزایی در آن بیشتر شده است. اگرچه روشنی رنگ در گرانیتهای نشانه شدت تفریق در مذاب تشکیل دهنده آن است، یعنی مقدار سیلیسیم در ماگما زیاد می‌شود و غلظت آن افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که عناصر سنگین



شکل 1- تغییرات رنگ گرانیتهای بر اثر تغییرات نوع کانی‌های فلدسپاری تشکیل دهنده آن. در شکل A بلورهای درشت فلدسپار پتاسیم به رنگ گوشتی، در شکل B مخلوطی از فلدسپارهای سدیم و پتاسیم به رنگ صورتی روشن و در شکل C فلدسپار سدیم به رنگ سفید بیشترین کانی‌های تشکیل دهنده گرانیتهای است.

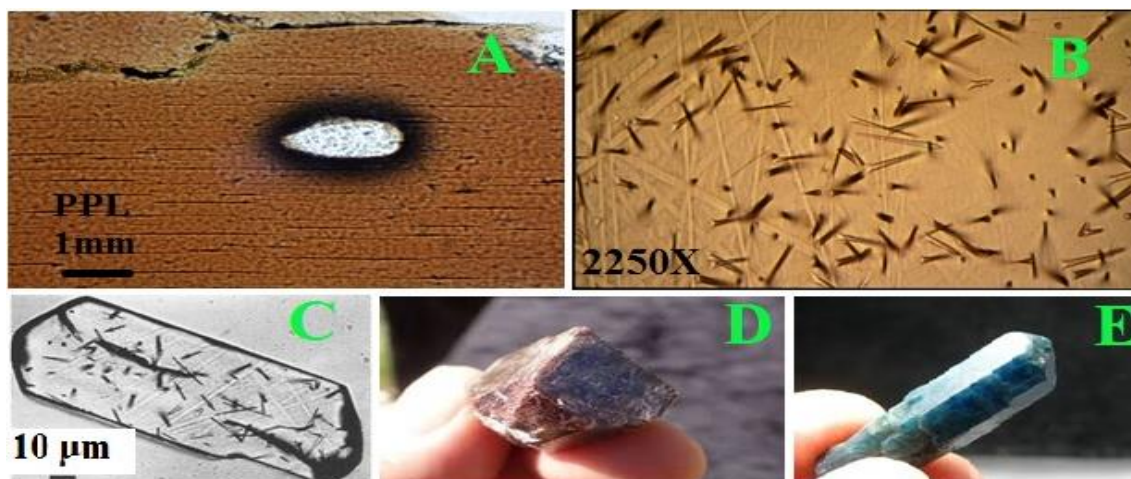
Fig. 1- Variation in color of granite rocks due to the type of feldspar contents. Coarse-grained K-feldspars display red-meat color (A); mixing of K-feldspar and Na-feldspar displaying light pink color (B) and only Na-feldspars display white color (C).

مایکروپروب (Sensitive High Resolution Ion Microprobe) SHRIMP بسیار حساس در دانشگاه ملی استرالیا توسط دانشمند زمین‌شناس معروف به نام B.W. Chappell با هدف تعیین سن ایزوتوپی سنگ‌ها انجام شد. به دلیل شدت بالای رادیواکتیویته و طولانی بودن سن کانی، تمرکز این شکاف‌ها گاهی در اطراف کانی به صورت هاله‌ای تیره تا سیاه‌رنگ شکل می‌گیرد که به آن هاله پلی کروئیک (Polychroic Hallow) می‌گویند. چنانچه تعداد هاله‌های پلی کروئیک در گرانیته زیاد باشد، میزان فعالیت تشعشعی آن سنگ بسیار بالاست. به همین منظور کانی‌های فرعی مشاهده شده در برخی گرانیته‌های ایران در این تحقیق به تفصیل مورد مطالعات میکروسکوپی قرار گرفت. براساس اطلاعات ایزوتوپی، نمونه‌هایی از گرانیته‌های ایران که دارای کانی‌های فرعی بیشتری هستند (به ویژه حضور کانی‌های زیرکن، تیتانیته و آپاتیت)، فعالیت تشعشعی بیشتری را نشان می‌دهند. در شکل 3 تصاویر میکروسکوپی 12 نمونه از گرانیته‌های ایران جهت مشاهده فعالیت ایزوتوپی کانی‌های فرعی با شرح مفصل قابل ملاحظه است.

به علاوه، اگر با افزایش آهن و منیزیم، با افزایش تیرگی رنگ سنگ و با افزایش چگالی آن شدت فعالیت رادیواکتیویته در آن بیشتر می‌شود، باید سنگ‌های پوسته اقیانوسی که از جنس بازالت با چگالی متوسط 3 gr/cm^3 است، بیشترین فعالیت تشعشعی را نشان می‌دادند. حال آنکه گرانیته‌ها بخشی مهمی از پوسته قاره‌ای زمین را تشکیل می‌دهند و با چگالی کمتر بیشترین فعالیت تشعشعی را نشان داده‌اند.

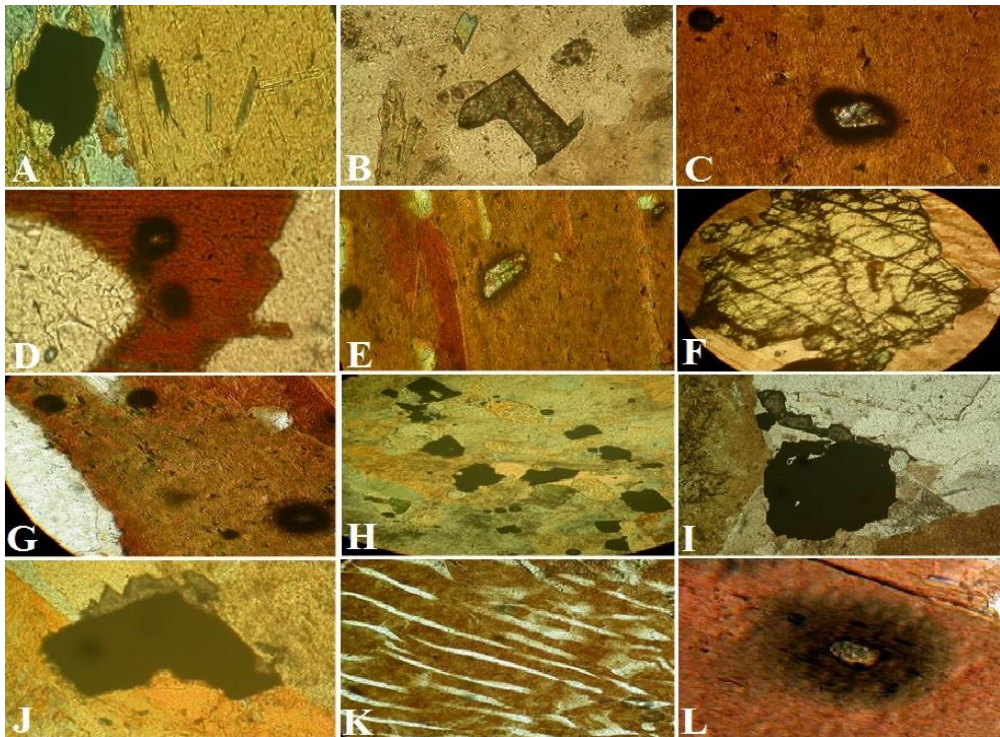
2-2- مطالعات میکروسکوپی

وقتی هسته عنصر رادیواکتیو واپاشی می‌کند، ذرات آلفا به اطراف ساطع می‌شوند. مسیر عبور ذرات آلفا در برخی کانی‌های فرعی مانند زیرکن و آپاتیت (شکل 2) به صورت ترک و شکاف برجای می‌ماند. این اثر دائمی است مگر اینکه سنگ‌های دربرگیرنده این کانی‌ها در اثر فرایندهای دگرگونی، تحت تأثیر حرارت بالا (حداقل 300 درجه سانتیگراد) قرار گیرند. برای اولین بار مطالعات ترک‌ها تحت عنوان "شکافت ترک‌ها" (Fission Tracks) توسط دستگاه الکترون



شکل 2- (A) تشکیل هاله پلی کروئیک به رنگ سیاه به صورت حلقه‌ای در اطراف بلور زیرکن که خود در داخل کانی بیوتیت جای گرفته است و نشانه فعالیت شدید تشعشعی زیرکن است (نور ساده، میکروسکوپ پلاریزان، درشت نمایی 60X)، (B) ترک‌های شکافتی ناشی از حرکت ذرات آلفا در بلور آپاتیت که توسط میکروسکوپ الکترونی SHRIMP گرفته شده است. (C) ترک‌های شکافتی ناشی از حرکت ذرات آلفا در بلور زیرکن که توسط میکروسکوپ الکترونی SHRIMP گرفته شده است، (D) نمونه دستی بلور زیرکن و (E) نمونه دستی بلور آپاتیت است.

Fig. 2- Formation of dark polychroic hallow around zircon crystal within the bitovite (A) indicates the intensity of radioactivity (PPL, 60X); Fission tracks due to the emission of alpha particles in apatite crystals (B) and zircon grains (C) taken by sensitive high resolution ion microprobe (SHRIMP); Zircon crystal specimen (D) and Apatite crystal specimen (E).



شکل 3- تصاویر میکروسکوپی حاکی از شدت رادیواکتیویته در نمونه‌هایی از گرانیتوئیدهای مهم ایران. توضیحات شکل 3 به

شرح زیر است:

- (A) گرانیت تاباد: فراوانی ادخالهایی از کانیه‌های آپاتیت (بلورهای باریک طولی شده، سمت راست) و مگنتیت (مربع ناقص سیاه رنگ، سمت چپ) بر روی کانی بیوتیت (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 25 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (B) گرانیت زاهدان: بلور اسفن و انکلزیون های هسته دار در مرکز تصویر، (تصویر با عدسی شیئی X 25 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (C) گرانیت مشهد: هاله پلی کروئیک سیاه رنگ اطراف بلور زیرکن نشانه فعالیت رادیواکتیویته در این گرانیت است. شدت رادیواکتیویته بر روی کانی بیوتیت با دایره‌های سیاه رنگ مشخص است که آثار عبور اشعه گاما است. واپاشی کامل اورانیوم در زیرکن با هاله‌های کاملاً تیره رنگ بر روی بیوتیت دیده می‌شود. (تصویر با عدسی شیئی X 25 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (D) گرانیت یزد: گسترش هاله‌های پلی کروئیک اطراف زیرکن بر روی کانی بیوتیت نشانه شدت رادیواکتیویته است. ضمناً در اثر این واپاشی، ناپدید شدن کامل بلور زیرکن مشخص است. (تصویر با عدسی شیئی X 40 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (E) گرانیت بیرجند: بلور زیرکن در مرکز شکل و بالا گوشه سمت راست، هاله پلی کروئیک کامل شده در منتهی‌الیه سمت چپ در گرانیت بیرجند، (تصویر با عدسی شیئی X 40 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (F) گرانیت همدان (منطقه بروجرد): تراکم بلورهای گوه‌ای شکل اسفن که بر روی کانی آل بیت تشکیل شده‌اند. شدت فعالیت رادیواکتیویته در مرکز بلورهای گوه‌ای شکل اسفن با رنگ سیاه مشخص است (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 10 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (G) گرانیت الوند: شدت و گسترش هاله پلی کروئیک بر روی کانی بیوتیت و محو کامل بلورهای زیرکن. (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 10 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (H) گرانیت نطنز: تراکمی از کانی‌های اوپاک (Fe-Ti oxides) بر روی فلدسپارهای آلکان غنی از پتاسیم (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 10 و در حالت PPPL گرفته شده است).
- (I) گرانیت آذربایجان: تبدیل اسفن (تیتانیت) به مگنتیت (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 10 و در حالت PPL گرفته شده است).
- (J) گرانیت تکاب: تبدیل اسفن به مگنتیت. (تصویر با بزرگنمایی شیئی X 10 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (K) گرانیت کردستان: رشد توام کوارتز و فلدسپار نشانه تشکیل گرانیت در دمای پایین و فراوانی فلدسپار پتاسیم در آن است. در این گرانیت زیرکن و دیگر کانی‌های رادیواکتیو مشاهده نشد (تصویر با عدسی شیئی X 25 و در حالت XPL گرفته شده است).
- (L) گرانیت زنجان: گسترش هاله پلی کروئیک سیاه رنگ در اطراف بلور زیرکن که بر روی کانی بیوتیت قرار دارد، نشانه آثار عبور اشعه گاما است. (تصویر با عدسی شیئی X 25 و در حالت XPL گرفته شده است).

- Fig. 3- Microscopic images (A to L) indicating intense radioactive decay in important Iranian granitoids as follow:
- (A) Tiebad Granite: the abundant inclusions of apatite crystals (right side, the slender crystals) and magnetite (black semi-rectangles in left side of the image); (XPL, X25).
- (B) Zahedan granite: Titanite crystal and nucleoid inclusions in the center of image, (XPL, X25).
- (C) Mashhad Granite: Dark polychroic hallow around the zircon crystal indicates radioactivity in the granite. The intensity of radioactive minerals caused a dark circle resulted from gamma emission paths. Some zircon crystals completely radiated by gamma thus the hallow is black in cores and rims, locted on biotite crystals. (XPL, X25).
- (D) Yazd Granite: Extended poly chroic hallow around zircon grains on biotite indicates strong radiation. Due to the intensity of radiation, zircon grains are completely disappeared. (XPL, X40).
- (E) Birjand Granite: Zircon grains are observed in the center of image and the top right corner of the image. Polychroic hallow is completed in the most left limit of the sample. (XPL, X40).
- (F) Hamedan granite (Boroujerd Area): Density of large vedge-shaped crystals of titanite formed above the albite crystals. The intensity of radioactive materials is observed by dark areas in the crystal borders of titanite. (XPL, X10).
- (G) Alvand Granite: The extended polychroic hallow on biotite mineral and complete disappearing of zircon crystals (XPL, X10).
- (H) Natanz Granite: Dense opaque minerals (Fe-Ti oxides) on alkali feldspars riched in K (PPL, X10).
- (I) Azarbayejan Granite: Changing titanite to magnetite (PPL, X10).
- (J) Takab Granite: changing titanite to magnetite (XPL, X10).
- (K) Kordestan Granite: Intergrowth of Quartz and K-feldspar crystals, representing low-temperature and high K-feldspar melt. In this sample, zircon and other radioactive minerals are not observed (XPL, X25).
- (L) Zanjan Granite: Extended black plyphroic around the zircon crystals grown on the biotite crystal indicating gamma ray path (XPL, X25).

^{226}Ra مطابق فرمول زیر غلظت معادل رادون (Ra_{eq}) تعریف می شود (Al-Zahrani, 2017). میزان فعالیت های ایزوتوپی هریک از عناصر پرتوزای موجود در نمونه ای معین (Ae_{eq}) و شاخص های ایزوتوپی موارد بحث با استفاده از معادلات زیر محاسبه گردید.

فعالیت معادل رادیوم = (Radium equivalent activity = Ra_{eq}) از رابطه 2 محاسبه شد (Uosif et al., 2015, Al-Zahrani, 2017)

$\text{Ra}_{\text{eq}} = \text{A}_{\text{Ra}} + 1.43\text{A}_{\text{Th}} + 0.077\text{A}_{\text{K}}$, [$\text{Ra}_{\text{eq}} \leq 370$ Bq/kg, UNSCEAR(2008)]	2
---	---

که در آن، A_{Ra} ، A_{Th} و A_{K} به ترتیب فعالیت ایزوتوپ های ^{226}Rn ، ^{232}Th و ^{40}K برحسب Bq/kg است. لازم به ذکر است که غلظت معادل رادیوم (Ra_{eq}) براساس 370 Bq/kg برای ^{226}Rn ، 259 Bq/kg برای ^{232}Th و 4810 Bq/kg برای ^{40}K محاسبه می شود به گونه ای که مجموع این مقادیر پرتوزایی معادل همان نرخ تولید دوز گاما باشد. به عبارتی دیگر، مقدار 370 Bq/kg رادیوم معادل در مصالح ساختمانی می تواند هر سال برای ساکنین مقدار $1.5 \text{ mSv} \cdot \text{y}^{-1}$ پرتوگیری گاما تولید کند (Onargan et al., 2012; Uosif et al., 2015)

شاخص خطر پرتوگیری خارجی (external hazard index = H_{ex}) برای اشعه ^{222}Rn توسط فرمول (3) مخصوص فضاهای بدون در و پنجره، و فرمول (4)

2-3- محاسبات میزان فعالیت پرتوزایی

محاسبات میزان فعالیت پرتوزایی بر اساس شدت فعالیت ایزوتوپ های عناصر توریم، پتاسیم و فعالیت معادل رادون انجام می شود. از آنجا که توریم و رادون محصولات واپاشی اورانیوم محسوب می شوند، در این محاسبات غلظت اورانیوم 238 اعمال نشده است. نتایج محاسبات فعالیت تشعشعی عناصر و شاخص های خطر برای 62 نمونه از سنگ های گرانیتوئیدی ایران در جدول 2 ضمیمه ارائه شده است.

فعالیت پرتوزایی (radioactivity) برای هر عنصر در نمونه های مورد مطالعه براساس فرمول (1) برحسب Bq/kg محاسبه و در جدول شماره 2 ارائه شده است.

$A = \frac{N}{e \times \eta \times m}$	1
--	---

در فرمول فوق، A مقدار فعالیت تشعشعی برحسب Bq/kg، N برابر است با نرخ شمارش گاما بر حسب ثانیه، e کارایی جذب انرژی معین، η احتمال قطعی واپاشی گاما و m جرم نمونه برحسب kg است (Uosif et al., 2015). نظر به اینکه محصول واپاشی هسته های ^{238}U ، ^{226}Ra و ^{232}Th منجر به تولید گاز رادون می شود و میزان سهم تولید هر ایزوتوپ در نمونه معین متفاوت است که به دلیل تفاوت تراکم عناصر، تفاوت نیمه عمر عناصر و تصادفی بودن فرایند واپاشی است، لذا برای



فرمول زیر محاسبه صورت گیرد (UNSCEAR, 2000, 2008):

$\text{AEDR (mSv/yr)} = \text{ADRA (nGyh}^{-1}) \times \text{DCF} \times \text{OF} \times \text{T} \times 10^{-6}$	7
برای فضاهای باز: $\text{AEDR (mSv/yr)} = \text{ADRA (nGyh}^{-1}) \times 0.7 \times 0.2 \times 8760 \times 10^{-6}$	
برای فضاهای بسته: $\text{AEDR (mSv/yr)} = \text{ADRA (nGyh}^{-1}) \times 0.7 \times 0.8 \times 8760 \times 10^{-6}$	

که در آن ADRA (absorbed dose rate in air) دوز مؤثر جذب در هوای آزاد برحسب nGyh^{-1} است. مقدار فاکتور تبدیل دوز (dose conversion factor = DCF) برابر 0.7 Sv/Gy ، فاکتور زمان عدم حضور ساکنان در محل سکونت (outdoor occupancy factor = OF) برابر با 0.2 برای فضاهای باز و 0.8 برای فضاهای بسته، و مقدار T برحسب زمان برابر با 8760 h/y است. مقدار استاندارد شاخص AEDR برای فضاهای باز کمتر از 1.1 mSv/yr و برای فضاهای بسته 0.48 در نظر گرفته می‌شود (UNSCEAR, 2008).

شاخص احتمال ابتلا به خطر سرطان که به آن میزان دوز مؤثر نیز می‌گویند، توسط رابطه زیر (فرمول 8) تعیین می‌شود (Alzaharani, 2017)، که در آن، D_{eff} مقدار دوز مؤثر سالانه در فضای بسته برای هر فرد برحسب mSv/y ، OF فاکتور زمان حضور در محل سکونت و DCF فاکتور تبدیل دوز است.

$D_{\text{eff}} (\text{mSv/y}) = \text{ADRA (nGy/h)} \times 8760 \text{ h/year} \times 0.8 (\text{OF}) \times 0.7 \text{Sv/Gy DCF} \times 10^{-6}$	8
--	---

روش دیگری برای تعیین شاخص احتمال ابتلا به سرطان براساس فرمول زیر (شماره 9) تخمین زده می‌شود و ELCR نام دارد که مخفف کلمات excess lifetime cancer risk است (Darwish et al., 2015). در این روش معادل دوز مؤثر سالانه، برحسب mSvy^{-1} تعیین می‌شود و در آن مقدار DL (Duration of life) به طور متوسط 70 سال در نظر گرفته می‌شود و مقدار فاکتور خطر یا RF (risk factor) طبق آیین‌نامه ICRP-106 برابر با 0.05 برای امکان عمومی است.

$\text{ELCR (mSvy}^{-1}) = \text{AEDR (mSvy}^{-1}) \times \text{DL} \times \text{RF}$	9
---	---

مخصوص فضاهای دارای در و پنجره به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$H_{\text{ex1}} = A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810, (H_{\text{ex1}} \leq 1)$	3
$H_{\text{ex2}} = A_{\text{Ra}}/740 + A_{\text{Th}}/518 + A_{\text{K}}/9620, (H_{\text{ex2}} \leq 1)$	4

که در آنها، A_{Ra} ، A_{Th} و A_{K} بترتیب فعالیت عناصر ^{226}Rn ، ^{232}Th و ^{40}K برحسب Bq/kg است. مقدار استاندارد $H_{\text{ex}} \leq 1$ باید در هر دو محیط فوق‌الذکر بصورت (Darwish et al., 2015).

شاخص خطر پرتوگیری داخلی (internal hazard index = H_{in}) برای اشعه ^{222}Rn توسط فرمول 5 محاسبه می‌شود:

$H_{\text{in}} = A_{\text{Ra}}/185 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810, (H_{\text{in}} \leq 1)$	5
---	---

که در آن، A_{Ra} ، A_{Th} و A_{K} به ترتیب فعالیت عناصر ^{226}Rn ، ^{232}Th و ^{40}K برحسب Bq/kg است. از نظر استاندارد برای رعایت ایمنی در داخل ساختمان‌ها باید مقدار این شاخص به صورت $H_{\text{in}} \leq 1$ باشد (Al-Zahrani, 2017).

شاخص دوز مؤثر جذب شده تشعشع گاما (absorbed dose rate in air = ADRA) در هوا و در فاصله یک متری از سطح زمین در حالت توزیع یک نواخت واپاشی طبیعی هسته‌های ^{226}Rn ، ^{232}Th و ^{40}K براساس فرمول 6 محاسبه می‌شود (UNSCEAR, 2000, 2008) که در آن غلظت ایزوتوپ‌های رادیوم، توریوم و پتاسیم برحسب Bq/kg است. مقدار این شاخص براساس استاندارد UNSCEAR باید کمتر از 59 nGy/h باشد.

$\text{ADRA (nGy/h)} = 0.462A_{\text{Ra}} + 0.604A_{\text{Th}} + 0.0417A_{\text{K}}$	6
(UNSCEAR, طبق استاندارد $\text{ADRA} < 59 \text{ nGy/h}$ 2000, 2008)	

شاخص دوز مؤثر جذب سالانه (annual effective dose rate = AEDR) بر اساس مقررات مربوط به مصالح ساختمانی مصوبات استاندارد جهانی (UNSCEAR, 2000, 2008) برای فضاهای باز و بسته مطابق رابطه 7 تعیین می‌شود. برای تخمین دوز مؤثر سالانه باید ضریب تبدیل از دوز هوای آزاد به دوز مؤثر و عامل سکونت در داخل ساختمان را در معادله 6 اعمال کرد و مطابق

3- نتایج و بحث

نتایج آنالیزهای ایزوتوپی 62 نمونه از سنگ‌های گرانیتوئیدی ایران برای عناصر ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K و شدت رادیواکتیویته آنها بر حسب Bq/kg در شکل 4 و جدول شماره 1 ضمیمه و نیز شاخص‌های خطر محاسبه شده برای هر نمونه در جدول شماره 2 ضمیمه نشان داده شده است. میانگین فعالیت تشعشعی این عناصر و شاخص‌های خطر محاسبه شده (برای هر منطقه) به ترتیب در جداول شماره 2 و 3 نشان داده شده است. همبستگی ایزوتوپی عناصر فوق‌الذکر و مقایسه میانگین شدت فعالیت آنها به ترتیب در اشکال 4 و 5 قابل مشاهده است. میانگین فعالیت تشعشعی گرانیتوئیدهای ایران به جز دو مورد (لرستان و تربت حیدریه)، بالاتر از مقادیر تعیین شده برای پوسته زمین و مصالح ساختمانی است که توسط UNSCEAR تعیین شده است (جدول 2).

شاخص اشعه گاما (I_γ) در مصالح ساختمانی براساس کمیسیون اروپا (EC) مطابق فرمول زیر (شماره 10) تعیین می‌شود. این کمیسیون پیشنهاد کرده است که اگر رادیواکتیویته مصالح ساختمانی موجبات نگرانی را فراهم کند، باید از هرگونه محدودیتی اجتناب شود. چنانچه تشعشع بیش از حد مجاز گامای ناشی از آنها موجب افزایش دوز مؤثر سالانه به مقدار بیش از 0.3 mSv (برای افراد عمومی) شود، باید محدودیت اعمال شود. برای مصالح ساختمانی با دوزهای مؤثر گاما که بالاتر از 1 mSv باشد، در شرایط خیلی استثنائی کاربرد آنها در نقاط موضعی (محلی) مجاز است. در فرمول زیر (شماره 10) مقادیر C_{Ra} ، C_{Th} و C_{K} به ترتیب شدت فعالیت ایزوتوپ‌های ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K بر حسب Bq/kg در مصالح ساختمانی است.

$$I_\gamma = C_{\text{Ra}}/300 + C_{\text{Th}}/200 + C_{\text{K}}/3000 \quad 10$$

جدول 2- میانگین (به جز موارد تک نمونه‌ای) فعالیت تشعشعی ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K برای 62 نمونه سنگ‌های پلوتونیک (عمدتاً گرانیتوئید) که از 13 منطقه ایران انتخاب شده است، را نشان می‌دهد. جزئیات اطلاعات نمونه‌ها در جدول شماره 1 (ضمیمه) قابل مشاهده است.

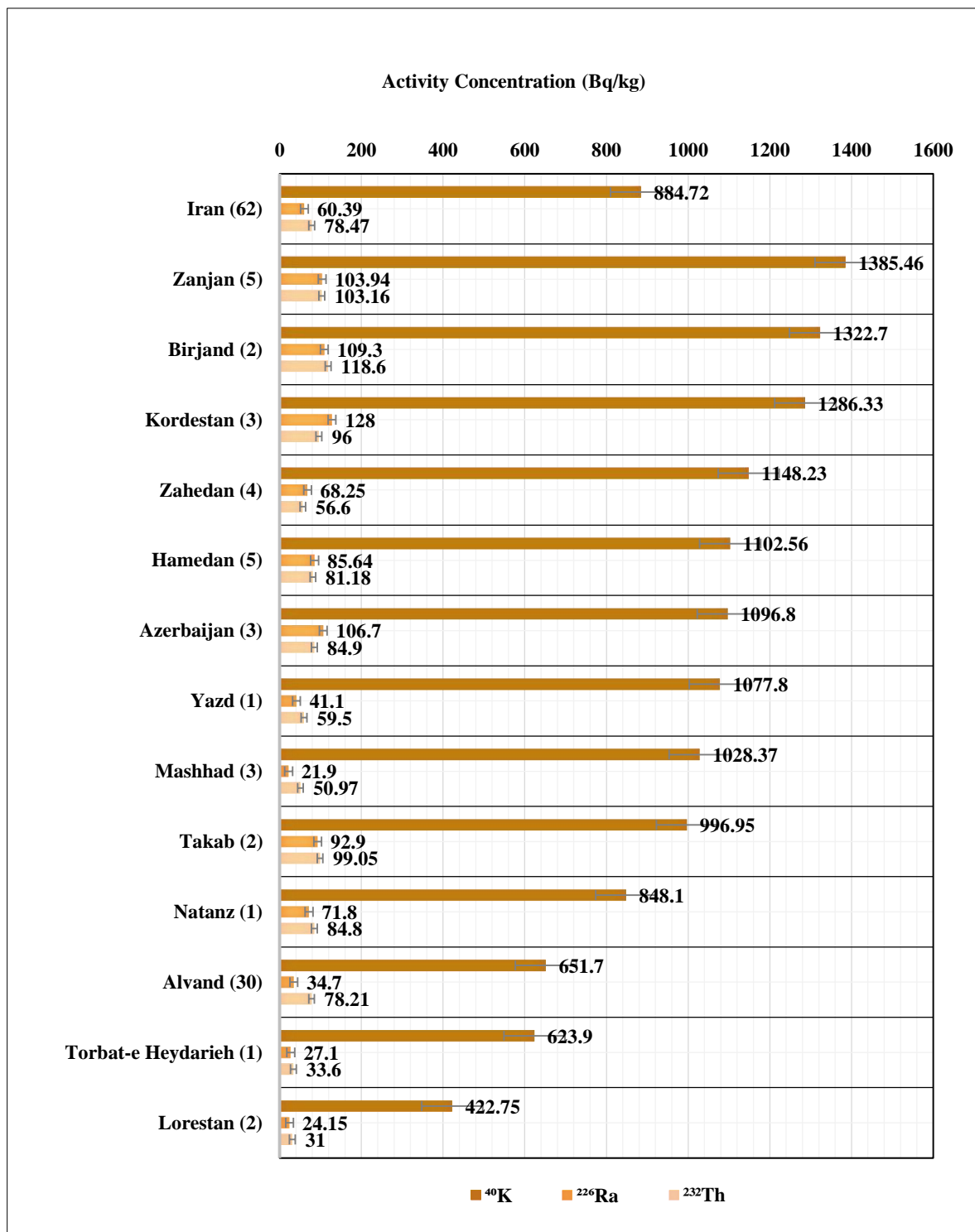
Tab. 2- Average (except those of one sample) radioactivity of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K isotopes obtained for 62 plutonic samples (mainly granitoid) taken from 13 outcrops in Iran. Detail information of samples are shown in Table 1 of appendix.

مناطق مورد مطالعه	تعداد نمونه	طول جغرافیایی (شرقی)			عرض جغرافیایی (شمالی)			فعالیت تشعشعی (Bq.kg^{-1})		
		درجه	دقیقه	ثانیه	درجه	دقیقه	ثانیه	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K
مشهد	3	59	43	09	36	43	14	50.97	21.9	1028.37
تربت حیدریه	1	59	13	16	35	16	56	33.6	27.1	623.9
بیرجند	2	59	48	10	32	34	36	118.6	109.3	1322.7
یزد	1	54	24	05	31	44	46	59.5	41.1	1077.8
زاهدان	4	60	56	57	29	07	56	56.6	98.25	1148.23
زنجان	5	48	28	47	36	20	40	103.16	103.94	1385.46
تکاب	2	47	06	44	36	24	02	99.05	92.9	996.95
آذربایجان	3	46	21	34	38	17	21	84.9	106.7	1096.8
کردستان	3	46	59	52	35	18	56	96	12	1286.33
لرستان	2	48	09	40	33	04	54	31	24.15	422.75
نطنز	1	51	55	02	33	30	35	84.8	71.8	848.1
همدان	5	48	30	54	34	47	55	81.18	85.64	1102.56
الوند	30	48	17	35	35	02	50	78.21	34.7	651.7
جمع کل (ایران)	62	-	-	-	-	-	-	78.47	60.39	884.72
*پوسته زمین	-	-	-	-	-	-	-	30	35	400
*سنگ‌های ساختمانی	-	-	-	-	-	-	-	60	60	640
* (UNSCEAR, 2008)	-	-	-	-	-	-	-	50	50	500

میکروسکوپی بلورهای زیرکن در داخل کانی بیوتیت قرار گرفته است و بیوتیت نقش به تله انداختن کانی‌های فرعی حاوی عناصر سنگین مخصوصاً برای زیرکن را ایفا می‌کند. بنابراین، قبل از استفاده از گرانیته‌ها به عنوان مصالح ساختمانی باید مطالعات میکروسکوپی جهت شناسایی کانی‌های فرعی آنها با دقت انجام شود و از نمونه‌های دارای بیوتیت، زیرکن و آپاتیت در فضاهای داخلی ساختمان استفاده نشود.

به طور کلی همبستگی مثبت بین فعالیت تشعشعی ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K برای همه نمونه‌های مورد مطالعه در حد بسیار خوبی دیده می‌شود (شکل 5). وابستگی فعالیت ایزوتوپی این سه عنصر با مقدار R^2 مشخص می‌شود که همواره بین 0.49 تا 0.61 تغییر می‌کند (شکل 5). علت پایین بودن R^2 در شکل 5 (مخصوصاً 5A و 5B) به دلیل تغییرات زیاد عنصر پتاسیم است که از منابع مختلف مانند کانی‌های فلدسپار و بیوتیت تأمین می‌شود و درصد حضور این کانی‌ها در انواع گرانیته متفاوت است. در اکثر موارد برای هریک از نمونه‌های گرانیته درجه فعالیت پتاسیم تقریباً 7 برابر مجموع توریم و رادون است و با کاهش مجموع توریم و رادون، درجه فعالیت پتاسیم کمتر می‌شود. بنابراین، تعادل خوبی بین فعالیت هسته‌های این سری از عناصر برقرار است. در شکل 5A فعالیت ویژه ایزوتوپ پتاسیم نسبت به توریم به طور منظم با ضریب 7.508 افزایش می‌یابد که بیانگر غنی‌تر شدن نمونه‌های گرانیته از سیلیس (SiO_2) است. با افزایش سیلیس در مذاب گرانیته غلظت مذاب افزایش می‌یابد و کانی‌های فرعی که دارای عناصر سنگین هستند در سیستم باقی می‌مانند و به همین خاطر گرانیته‌های تفریق یافته (مانند تیپ K) از کانیهای زیرکن، آپاتیت، مگنتیت، ایلمنیت غنی می‌شود (Breiter et al., 2014). آنچه باعث افزایش غلظت سیلیس در مذاب گرانیته می‌شود، درجه ذوب بخشی سنگ‌های اولیه (منشأ) و یا درجه تفریق مذاب است. بنابراین، هرچه گرانیته تفریق یافته‌تر باشد، احتمال حضور عناصر سنگین مانند (Hf, Th, U, Sc, Nb, Ta, W, F, As) در کانی‌های فرعی آن بیشتر است.

از میان 62 نمونه گرانیته مورد مطالعه در این تحقیق که در جدول 1 ضمیمه نشان داده شده است، فقط در 20 نمونه از آنها فعالیت ویژه ^{226}Ra پایین‌تر از استاندارد جهانی است (مانند گرانیته مشهد) ولی در بقیه نمونه‌ها (42 نمونه) فعالیت ویژه ^{226}Ra به شدت از استاندارد جهانی (32 Bq/kg) بالاتر است (مانند گرانیته‌های زنجان، بیرجند و همدان). دامنه تغییرات رادون از 8.4 تا 160 Bq/kg تغییر می‌کند و میانگین کل آن برای ایران 60.39 Bq/kg است که تقریباً دو برابر مقدار تعیین شده توسط استاندارد جهانی است. همچنین فعالیت ویژه عنصر ^{232}Th فقط در 18 مورد از مجموع 62 نمونه مطالعه شده پایین‌تر از مقدار استاندارد جهانی (45 Bq/kg) است. تغییرات میزان فعالیت این عنصر از صفر تا 268.4 Bq/kg است و میانگین آن برای 62 نمونه ایران برابر با 78.4 Bq/kg است که این مقدار نیز بیشتر از حد تعیین شده توسط استاندارد بین‌المللی است. بیشترین میزان فعالیت تشعشع برای عناصر ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K در گرانیته بیرجند مشاهده می‌شود و پس از آن گرانیته زنجان در مقام دوم پرتوزایی قرار می‌گیرد (جدول 2). شکل 5 براساس ترتیب میانگین فعالیت تشعشعی عنصر پتاسیم ترسیم گردید و نشان می‌دهد که گرانیته‌های زنجان، بیرجند و کردستان به ترتیب بیشترین مقدار تشعشعات پتاسیم را دارند. البته در یک روند عمومی، هرچه گرانیته دارای مقادیر توریم و رادون بیشتری باشد، مقادیر پتاسیم آن نیز بیشتر است و این روند در شکل 3 تحت عنوان همبستگی ایزوتوپی قابل ملاحظه است. بالا بودن اکتیویته پتاسیم به رنگ سنگ (روشن بودن) و حضور فلدسپار پتاسیم و مقدار کانی فرعی مانند بیوتیت بستگی دارد. مثلاً گرانیته‌های زنجان، بیرجند و کردستان همگی دارای فلدسپار پتاسیم و بیوتیت فراوانند و اکثر بیوتیت‌های آنها همراه با کانی‌های زیرکنند و همه بلورهای زیرکن در آنها هاله پلی کروئیک نشان می‌دهد (شکل 3، تصاویر E, L, K). بنابراین، فعالیت تشعشعی گرانیته‌ها به ترتیب تابعی از فراوانی حضور کانی‌های فرعی (مخصوصاً زیرکن)، حضور فلدسپارها (به ویژه فلدسپار پتاسیم) و میزان سیلیسیم بالا (روشن بودن رنگ سنگ) است. در بیشتر مقاطع



شکل 4- مقایسه متوسط شدت فعالیت تشعشعی ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K بر حسب Bq.kg^{-1} برای انواع سنگ‌های پلوتونیک (عمدتاً گرانیتوئید) از 13 منطقه ایران که به عنوان مصالح ساختمانی در قسمت‌های درونی و بیرونی ساختمان‌ها به کار رفته است. اعداد داخل پرانتز تعداد نمونه است.

Fig. 4- Comparison of the average activity of ^{232}Th , ^{226}Ra and ^{40}K isotopes in Bq.kg^{-1} for different plutonic rocks (mainly granitoid) from 13 areas of Iran, the rocks have been used for internal and external parts of buildings. (Numbers in the brackets indicate the number of samples).

میانگین دوز پرتوگیری خارجی برای فضاهای باز بدون درب و پنجره (H_{ex1}) و برای فضاهای باز دارای درب و پنجره (H_{ex2}) محاسبه و در جدول شماره 3 نشان داده شده است. میانگین مقدار دوز مؤثر محاسبه شده برای همه نمونه‌های این مطالعه در هر دو محیط فوق‌الذکر پایین‌تر از حداکثر مقدار تعیین شده توسط استاندارد جهانی است. حداکثر میانگین محاسبه شده شاخص H_{ex1} برابر با 1.02831 برای گرانیتهای بیرجند محاسبه شده است که با توجه به مقدار ماکزیمم استاندارد ($H_{ex1} \leq 1$)، نیز قابل قبول است. میانگین شاخص پرتوگیری داخلی برای فضاهای بسته (H_{in}) در بیشتر نمونه‌ها در حد استاندارد است ($H_{in} \leq 1$). میانگین این شاخص برای فضاهای بسته فقط در گرانیتهای بیرجند، زنجان، آذربایجان و کردستان اندکی بالاتر از 1 است. همچنین از میان 62 نمونه مورد مطالعه جمعاً 5 نمونه (جدول 2 ضمیمه) از گرانیتهای بیرجند، زنجان، آذربایجان و الوند شاخص پرتوگیری خارجی آنها اندکی بالاتر از حد مجاز است که از 1.1 تا 1.68 متغیر است. بنابراین، بهترین کاربرد این گرانیتهادر فضاهای باز ساختمان مانند فضاهای عمومی، نماهای خارجی، سنگفرش تراس‌ها، پشت‌بام‌ها، دیوارها، پلکان اضطراری و راهروهای باز است. ضمناً چنانچه نمونه‌های ذکر شده در داخل ساختمان‌ها استفاده شوند، استاندارد جهانی تأکید دارد که این گونه نمونه‌ها علاوه بر اینکه نباید ضخیم باشند، بلکه باید حداقل پوشش سطوح را نسبت به سایر نمونه‌های مجاز استفاده شده در همان محیط، داشته باشند.

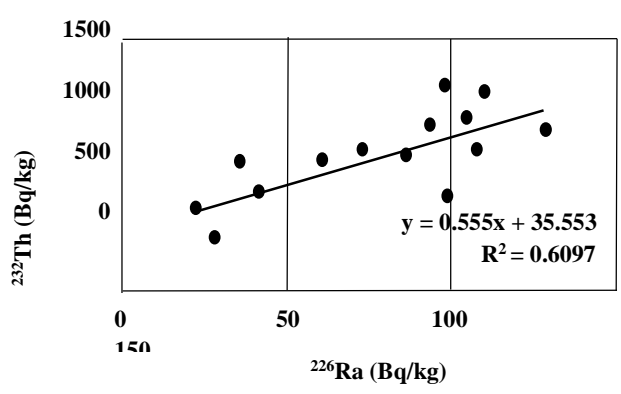
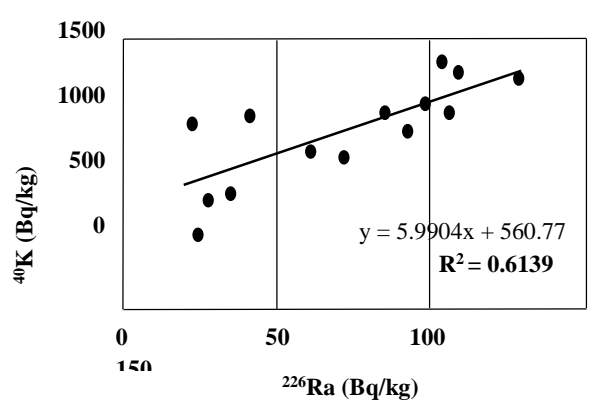
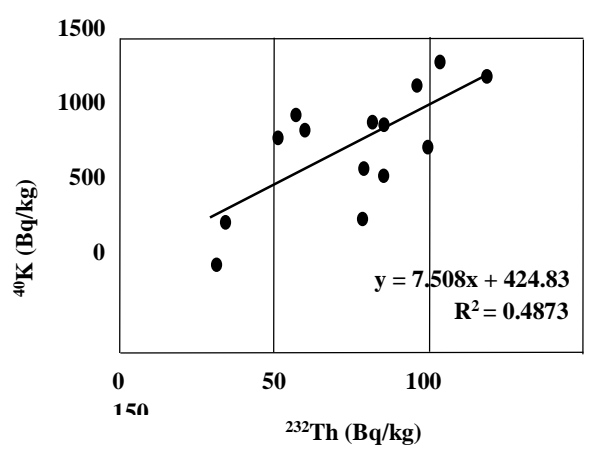
شاخص دوز مؤثر جذب شده اشعه گاما در هوای آزاد (ADRA) برحسب nGy/h برای نمونه‌های گرانیتهای مناطق مختلف در جدول 3 نشان می‌دهد که دامنه تغییرات آن از 47.5 nGy/h در گرانیتهای لرستان، تا 177.28 nGy/h در گرانیتهای بیرجند تغییر می‌کند و میانگین 62 نمونه ایران برابر 112.19 nGy/h است که از مقدار میانگین ارائه شده توسط استاندارد جهانی 59 (Gy/h) بالاتر است. به جز گرانیتهای تربت حیدریه که بسیار به حداکثر مقدار مجاز (استاندارد) نزدیک است، سایر نمونه‌ها شاخص دوز مؤثر بالایی را نشان می‌دهد.

در شکل 5B همبستگی مثبت بین ^{40}K و ^{226}Ra قابل ملاحظه است و نشان می‌دهد که هرچه میزان فلدسپار پتاسیم در گرانیتهای بیشتر باشد، احتمال پرتوزایی آن بیشتر می‌شود. بنابراین گرانیتهایی که دارای رنگ صورتی یا قرمز گوشتی دارند، (مانند تصاویر A و B در شکل 1) پرتوزایی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. در شکل 5C همبستگی مثبت بین ایزوتوپ‌های ^{226}Ra و ^{232}Th دیده می‌شود. از آنجا که توریم بیشترین محصول واپاشی اورانیوم است، بنابراین گرانیتهایی که دارای توریم بالا باشند، احتمال بالابودن غلظت اورانیوم در آنها بیشتر است.

این نوع گرانیتهای معمولاً از کانی‌های فرعی مانند زیرکن، بیوتیت و آپاتیت غنی هستند. در این نوع گرانیتهای بلورهای زیرکن در اطراف خود هاله تیره رنگ پلی کروئیک ایجاد می‌کنند که حاکی از شدت واپاشی است. همچنین بلورهای زیرکن موجود در آنها ترک خورده است که محل ترک نشانه مسیر ذرات آلفا است و شکافت ترک (Fission track) نام دارد. شکل 5

3-1- شاخص‌های خطر رادیواکتیویته

در این مطالعه شاخص‌های خطر رادیواکتیویته برای هر یک از نمونه‌های گرانیتهای (62 نمونه) محاسبه و در جدول شماره 2 ضمیمه ارائه شده است. به منظور جمع‌بندی و تسهیل در مقایسه اطلاعات، میانگین شاخص‌های محاسبه شده برای هر منطقه (13 مورد) در جدول شماره 3 نشان داده شده است. بیشترین فعالیت معادل رادون به ترتیب در گرانیتهای بیرجند 380.7 Bq/kg، کردستان 364.3 Bq/kg، زنجان 358.1 Bq/kg، آذربایجان 312.6 Bq/kg و تکاب 11.3 Bq/kg دیده می‌شود. این گرانیتهای دارای کانی‌های فراوان پتاسیم فلدسپار، بیوتیت، مسکویت، زیرکن و آپاتیت هستند که باعث افزایش شدت فعالیت تشعشعی آنها شده است. کمترین مقدار فعالیت معادل رادون به ترتیب در گرانیتهای تربت حیدریه و لرستان دیده می‌شود که به دلیل پایین بودن یا عدم حضور کانی‌های فرعی مانند بیوتیت، زیرکن و آپاتیت در آنهاست.



شکل 5- همبستگی مثبت بین میانگین شدت فعالیت تشعشعی ایزوتوپ‌های ^{232}Th و ^{40}K (تصویر A)، ایزوتوپ‌های ^{226}Ra و ^{40}K (تصویر B) و ایزوتوپ‌های ^{226}Ra و ^{232}Th (تصویر C) برای سنگ‌های پلوتونیک (عمدتاً گرانیتوئید) که در 13 منطقه از ایران رخنمون دارند.

Fig. 5- Positive correlation between the average of radioactivity decay for isotopes of ^{232}Th and ^{40}K (A); ^{226}Ra and ^{40}K (B) and ^{226}Ra and ^{232}Th (C) for plutonic rocks (mostly granitoids) cropped out in 13 areas of Iran.

به دلیل بالا بودن مقدار دوز مؤثر این شاخص، جلوگیری از تشعشع آنها ضروری است و تنها راه پیش‌گیری از خطرات آنها عدم استفاده در فضاهای بسته و اماکن اختصاصی است. به ویژه استفاده از این گرانیتهای برای اتاق خواب‌ها، بیمارستان‌ها، کودکانستان‌ها و سنگ‌فرش اماکن آموزشی بدون داشتن سیستم تهویه توصیه نمی‌شود.

برای دقت بیشتر در تعیین شاخص احتمال ابتلا به سرطان، معادل دوز مؤثر جذب سالانه (ELCR) برحسب mSv/yr برای هوای آزاد محاسبه گردید (جدول 3) که این مقدار از 0.2 تا 0.76 در این نمونه‌ها متغیر است.

با اعمال ضرایب تبدیل دوز از هوای آزاد به دوز مؤثر و عامل سکونت در داخل ساختمان، مقدار دوز مؤثر سالانه (AEDR) محاسبه شده (جدول 3) نشان می‌دهد که مقدار متوسط این دوز همواره کمتر از 1 mSv/yr است، لذا کاربرد این گرانیتهای در فضاهای آزاد و اماکن عمومی فاقد هرگونه اشکال است.

شاخص احتمال ابتلا به خطر سرطان (D_{eff}) در فضاهای بسته اماکن عمومی برای هر فرد مقدار 0.48 mSv/yr توسط استاندارد پیشنهاد شده است. مقادیر محاسبه شده این شاخص برای گرانیتهای ایران (به جز گرانیتهای مشهد، تربت حیدریه، یزد، لرستان و الوند) بالاتر از حد استاندارد است (جدول 3).

جدول 3- میانگین (به جز تک نمونه‌ها) شاخص‌های فعالیت پرتوزایی محاسبه شده برای 62 نمونه از گرانیتهای ایران. جزئیات اطلاعات نمونه‌ها در جداول شماره 1 و 2 ضمیمه نشان داده شده است. (شاخص‌های H_{ex1} , H_{ex2} , H_{in} و I_y دارای واحد نیستند).

Tab. 3- Average (except single samples) of radioactivity indices calculated for 62 samples of Iranian granitoids. Detail information of samples are shown in Tables 1 and 2 of Appendix. (The indices of H_{ex1} , H_{ex2} and I_y have not dimensions).

مناطق مورد مطالعه (تعداد نمونه)	$R_{a_{eq}}$ (Bq/kg)	H_{ex1}	H_{ex2}	H_{in}	ADRA (D) (nGy/h)	AEDR (mSv/yr)	D_{eff} (mSv/yr)	ELCR (mSv/yr)	I_y
مشهد (3)	173.9716	0.46987	0.234891	0.52897	83.78671	0.102756	0.41102	0.35965	0.67064
تربت حیدریه (1)	123.1883	0.32268	0.166341	0.40593	58.83123	0.072151	0.28860	0.25253	0.4663
بیرجند (2)	380.7459	1.02831	0.514155	1.32372	177.2876	0.21743	0.86970	0.76099	1.39823
یزد (1)	209.1756	0.56489	0.282443	0.67597	99.87046	0.12248	0.48992	0.42868	0.79377
زاهدان (4)	267.6017	0.72279	0.361395	0.98833	127.4591	0.15632	0.62526	0.54711	0.99324
نجان (5)	358.1392	0.96726	0.483629	1.24818	168.1026	0.20616	0.82464	0.72156	1.32409
تکاب (2)	311.3067	0.84078	0.42039	1.09186	144.3188	0.17699	0.70797	0.61948	1.13723
آذربایجان (3)	312.5606	0.84420	0.422101	1.13258	146.3116	0.17944	0.71775	0.62803	1.14577
کردستان (3)	364.3274	0.98403	0.492015	1.329977	170.76	0.20942	0.83768	0.73297	1.33544
لرستان (2)	101.0318	0.27285	0.136426	0.33812	47.50998	0.05827	0.23306	0.20393	0.37642
نطنز (1)	258.3677	0.69779	0.348894	0.89184	96.68525	0.11858	0.58748	0.41501	0.94603
همدان (5)	286.6245	0.77412	0.387059	0.00558	105.1119	0.12891	0.66017	0.45118	1.05889
الوند (30)	196.7212	0.53124	0.265621	0.62503	90.44613	0.11092	0.44369	0.38823	0.72395
62 نمونه ایران	240.7255	0.65012	0.325061	0.81334	112.1889	0.13759	0.55035	0.48155	0.88856
*پوسته زمین	108.7	0.29359	0.146792	0.38818	50.97	0.06251	0.25004	0.21879	0.4
سنگ‌های ساختمانی*	195.08	0.52688	0.263439	0.68904	90.648	0.11117	0.44468	0.38909	0.71333
*UNSCEAR (2000, 2008)	370	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 59	1.1	0.48	< 1.45	≤ 1

مقدار شاخص ELCR در اکثر نمونه‌های مورد مطالعه از 0.5 mSv/yr کمتر است. ضمناً معادل دوز مؤثر جذب سالانه این شاخص خطر در مجموع برای فضاهای باز و بسته نباید از 1.45 mSv/yr بیشتر باشد. محاسبه مجموع شاخص‌های ELCR و D_{eff} برای هر یک از نمونه‌ها نشان می‌دهد که فقط در گرانیتهای بیرجند، زنجان و کردستان مقدار این شاخص کمی بالاتر از حد استاندارد (mSv/yr) 1.45 است. بنابراین در کاربرد نمونه‌های گرانیتهای این سه منطقه دقت لازم باید به عمل آید و برای سایر گرانیتهای مورد مطالعه بهترین کاربرد آنها در فضاهای باز بدون محدودیت است.

برای حصول اطمینان از محاسبات و تحلیل داده‌های این تحقیق، شاخص اشعه گاما (I_{γ}) براساس کمیسیون اروپا (EC) محاسبه و در جدول 3 ارائه شده است. مقدار استاندارد این شاخص نباید از 1 بیشتر باشد. از میان تمام نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب گرانیتهای بیرجند، کردستان، زنجان، آذربایجان و تکاب مقادیر شاخص اشعه گامای آنها از 1.39823 تا 1.13723 متغیر است که این میزان بالاتر از حد مجاز است و کاربرد آنها در فضاهای بسته ممنوع است، اما کاربرد بقیه نمونه‌ها به عنوان مصالح ساختمانی تا حدودی فاقد اشکال است. باتوجه به اینکه در برخی نمونه‌های مورد تأیید مقدار شاخص اشعه گاما نسبت به استاندارد فاصله زیادی ندارد، لذا استفاده از آنها نیز مستلزم رعایت حداقل دوز مناسب، انتخاب روش صحیح به کارگیری، تعیین حداقل ضخامت ممکن برای سنگ و کاهش مقدار استفاده از آنها باید رعایت شود.

4- نتیجه گیری

براساس مشاهدات میکروسکوپی و محاسبات غلظت عناصر رادیواکتیو و شاخص‌های خطر تشعشعات طبیعی در 62 نمونه از سنگ‌های گرانیتهای ایران تهیه شده است، نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر ارائه می‌گردد:

1- ارتباط رنگ گرانیتهای و فعالیت تشعشعی آن بدین صورت است که هرچه رنگ گرانیتهای روشن‌تر باشد (متماایل به سفید)، حضور کانی‌های فرعی دارای عناصر

رادیواکتیو و احتمال فعالیت تشعشعی در آن گرانیتهای بیشتر است. عمده‌ترین رنگ‌ها در گرانیتهای روشن شامل سفید، صورتی و قرمز گوشتی است. در گرانیتهای سفید به دلیل میزان بالای غلظت (سیلیسیم بالا) در مذاب اولیه، احتمال حضور عناصر سنگین پرتوزا زیاد است. در گرانیتهای صورتی و قرمز گوشتی به دلیل حضور فلدسپار پتاسیم زیاد، میزان فعالیت ^{40}K بسیار بالاست. چنانچه بر اثر فراوانی حضور کانی‌های آهن و منیزیم رنگ گرانیتهای به سمت سبز یا سیاه میل کند، چگالی سنگ افزایش یافته، غلظت سیلیسیم در آن کم شده، احتمال حضور کانی‌های دارای عناصر سنگین کم می‌شود و پرتوزایی سنگ کاهش می‌یابد. علت حضور بیشتر عناصر پرتوزا در گرانیتهای روشن به دلیل غلظت بالای سیلیسیم در مذاب تشکیل دهنده آنهاست.

2- حضور کانی‌های فرعی به ویژه زیرکن، آپاتیت و تیتانیت (اسفن) با شدت رادیواکتیویته کل سنگ گرانیتهای رابطه مستقیم دارد. به ویژه اگر در مطالعات میکروسکوپی آثار تشعشع به صورت هاله پلی کروئیک در اطراف زیرکن یا به صورت ترک‌هایی بر روی کانی‌های زیرکن، آپاتیت و تیتانیت دیده شود، در چنین گرانیتهای شاخص‌های خطر رادیواکتیویته بالاست (مانند گرانیتهای بیرجند).

3- میانگین بیشترین مقدار غلظت فعالیت تشعشعی هسته‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K به ترتیب عبارتند از 118.6، 128 و 1385.46 Bq/kg برای گرانیتهای کردستان، بیرجند و زنجان. مقدار استاندارد غلظت تشعشعی برای سه ایزوتوپ فوق به ترتیب برابر با 50، 50 و 500 بکیورل بر کیلوگرم است. بنابراین میانگین 62 نمونه گرانیتهای در این مطالعه از مقدار استاندارد جهانی بالاتر است. در مقیاس محلی، فقط گرانیتهای تربت حیدریه و لرستان از نظر مقدار توریم و گرانیتهای مشهد، تربت حیدریه، یزد و الوند از نظر رادیوم پایین‌تر از حد استاندارد و میانگین این عناصر برای سایر مناطق مورد مطالعه بالاتر از حد استاندارد است.

4- به منظور تعیین مقدار دوز خطرات فعالیت تشعشعی ناشی از نمونه‌های گرانیتهای، فعالیت معادل رادیوم Bq.kg^{-1} (240.72)، میزان دوز پرتوگیری خارجی (0.32506) و داخلی (0.65012) در هوای باز، دوز پرتوگیری داخلی در



Breiter K., Lamarão C. N., Borges R. M. K. & Dall'Agnol R. (2014). Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. *Lithos*, 192–195 (2014) 208–225.

Chappell B. W. & White A. J. R. (2001). Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48, 489–499.

Darwish D. A. E., Abul-Nasr K. T. M & El-Khayatt A. M. (2015). The assessment of natural radioactivity and its associated radiological hazards and dose parameters in granite samples from South Sinai, Egypt. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8, 17-25.

European Commission (EC). (1999). Radiological protection principals concerning the natural radioactivity of building materials. *Radiation Protection*, 112, (Brussels: EC).

Ghani-Abadi T. (2013). Radioactivity major Iranian granitoid rocks and their environmental impacts, Iran. MSc Thesis, Faculty of Science, Shahid Rajaei Teacher Training University.

Jahangiri A. & Ashrafi S. (2011). Natural Radioactivity in granites used as building materials in Iran. *Journal of Environmental Studies*, 36 (56), 55-60.

Onargan T., Gür F., Kaya E. & Güneri S. (2012). Assessment of Natural radioactivity in commercial granites used in Turkey. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, Vol. 47, Issue 12, pp. 1825-1830.

Pourimani R., Ghahri R. & Zare M. R. (2014). Natural radioactivity concentrations in Alvand granitic rocks in Hamadan, Iran. *Radiation Protection and Environment*, Vol. 37, Issue 3, pp. 132-142.

Pourimani R., Zahedi M. & Mirzaei M. (2017). Estimation of heat rate generation of natural radioactivity of magma surrounding hot springs of Mahallat, Iran. *Quarterly Journal of Geosciences, Geological Survey of Iran*, 26 (103), 237-248.

Prakash M. M., Kaliprasad C. S. & Narayana Y. (2017). Studies on natural radioactivity in rocks of Coorg district, Karnataka state, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10, 128-134.

فضاهای بسته (0.81334)، نرخ دوز مؤثر سالانه برابر با (0.13759 mSv/yr)، دوز احتمال ابتلا به خطر سرطان (0.48155mSv/yr) و شاخص تشعشع گاما (0.88856) محاسبه شد. میانگین شاخص‌های خطر در گرانیتهای مورد مطالعه برای اماکن عمومی کمتر از حد مجاز است که توسط UNSCEAR تعیین شده است، البته به دلیل احتمال خطر تشعشع این گرانیتهای در فضاهای داخلی ساختمان و به عنوان دکوراسیون و تجهیزات زینتی، کاربرد آنها جایز نیست. به دلیل بیشتر بودن شاخص‌های خطر به ترتیب در گرانیتهای بیرجند، کردستان، زنجان، آذربایجان و تکاب، جهت کاربری این نمونه‌ها در اماکن خصوصی، بیمارستان‌ها، کودکانستان‌ها، زندان‌ها، آسایشگاه‌ها و مراکز آموزشی رعایت احتیاط جدی‌تری لازم است که صورت گیرد.

منابع

Abbasi A. (2013). Calculation of gamma radiation dose rate and radon concentration due to granites used as building materials in Iran. *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 155, Issue 3, pp. 335–342.

Abbasi A. & Mireftekhari F. (2011). Survey gamma radiation measurements in commercially-used natural tiling rocks in Iran. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, physical, Electrical and Computer Engineering*, Vol. 5, No. 4, 561-567.

Al-Zahrani J. H. (2017). Estimation of natural radioactivity in local and imported polished granite used as building materials in Saudi Arabia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10, 241-245.

Amanjeet P., Kumar A., Kumar S., Singh J., Singh P. & Bajwa B. S. (2017). Assessment of natural radioactivity levels and associated dose rates in soil samples from historical city Panipat, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10 (3), 283-288.

Asgharzadeh F., Abbasi A., Hochaghani O. & Gooya E. S. (2012). Natural radioactivity in granite stones used as building materials in Iran. *Journal of Radiation Protection Dosimetry*, 149 (3), 321-326.



Abbreviations and Notations

(in alphabetic order):

- ADRA = absorbed dose rate in air.
 AEDE = annual effective dose equivalent.
 AEDR = annual effective dose rate.
 Alibite = Na-plagioclase ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$).
 Anortite = Ca-plagioclase ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).
 A_{Ra} , A_{Th} , A_{K} = activity of Ra, Th and K (in Bq/kg), respectively.
 DCF = dose convection factor.
 D_{eff} = annual effective outdoor dose (human effective dose equivalent).
 DL = duration of life.
 EC = European Commission.
 ELCR = excess lifetime cancer risk.
 Exhalation = استنشاق
 External exposure = پرتوگیری خارجی
 Granite = سنگ آذرین درونی، روشن و درشت بلور که بیشترین کانی - های آن کوارتز (حداقل 20٪) و فلدسپار است
 Granitoids = انواع سنگ‌های گرانیتی شامل: تونالیت، گرانودیوریت، مونزوگرانیت، سینوگرانیت و آلکالی فلدسپار گرانیت
 H_{ex} = external hazard index.
 H_{in} = internal hazard index.
 HPGe = High purity Germanium detector
 IAEA = International Atomic Energy Agency
 Igneous source = منشأ آذرین
 Infracrustal = مادون پوسته‌ای
 Internal exposure = پرتوگیری داخلی
 MDA = minimum detectable absorption.
 Natural radioactivity = تشعشع طبیعی
 OF = outdoor occupancy factor.
 Orthoclase = K-feldspar (KAlSi_3O_8)
 Polychroic Hallow = هاله پلی کروئیک (شاخص ترک‌های ناشی از تشعشع کانی) =
 ppm = parts per million.
 R_{eq} = Radium equivalent activity.
 RF = risk factor.
 Sedimentary source = منشأ پوسته‌ای
 Sensitive High Resolution Ion Microprobe = SHRIMP
 Supracrustal = پوسته فوقانی
 UNSCEAR = United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Sorkhi A. (2015). Geochemical studies and environmental impact of areosoles in Khozestan Province, Iran. MSc Thesis, Faculty of Science, Shahid Rajaee Teacher Training University.

Streckeisen A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Review*, 12, 1-33.

Tavakoli M B., Abdi M R., Moghadam H N., Hajialiani G. & Mousavi S A. (2013). The effect of the color of granite on its natural radioactivity. *Journal of Isfahan Medical School, Year 30, Number 220, Second Week, Esfand 1391 (2013)*.

UNSCEAR United Nations, & Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation: Sources (Vol. 1)*, United Nation Publications.

UNSCEAR United Nations, & Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2008). *Report of the United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation: Fifty-sixth Session*. United Nations Publications (10-18 July 2008), No. 46.

جدول 1 (ضمیمه) - مشخصات و شدت رادیواکتیویته طبیعی تعداد 62 نمونه از گرانیتهای مهم ایران بر حسب $Bq.kg^{-1}$.
 Tab. 1- (Appendix). Characteristics and concentration of natural radioactivity for 62 samples of important Iranian granitoids ($Bq.kg^{-1}$).

شماره	نام منطقه	نام نمونه	رنگ	مکان نمونه	شدت و میانگین فعالیت رادیواکتیویته ($Bq.kg^{-1}$)			مرجع
					^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	
1	مشهد	گرانیت	تیره	وکیل آباد	71.6 ± 0.4	28.4 ± 0.7	1451.3 ± 0.9	A
2		گرانیت	قرمز	سنگ بست	38.6 ± 0.4	18.4 ± 0.9	259.4 ± 0.5	
3		گرانیت	سفید مرواریدی	خواجه مراد	42.7 ± 0.5	18.9 ± 0.1	1374.4 ± 0.5	
4	ترت حیدریه	گرانیت	نسبتاً روشن	ترت حیدریه	33.6 ± 0.4	27.1 ± 0.5	623.9 ± 0.8	
5	بیرجند	گرانیت	تیره	نهبندان	172.2 ± 0.5	91.6 ± 0.3	1385.4 ± 0.2	J
6		گرانیت	تیره	//	65	127	1260	
7	یزد	گرانیت	سفید	یزد	59.5 ± 0.1	41.1 ± 0.7	1077.8 ± 0.2	A
8	زاهدان	گرانیت	صورتی-سبز	زاهدان	72.7 ± 0.8	32.5 ± 0.4	1121.7 ± 0.5	J
9		گرانیت	تیره	پیرانشهر	62.7 ± 0.2	39.5 ± 0.7	1539.2 ± 0.4	
10		گرانیت	تیره	//	51	116	968	
11		گرانیت	سبز تیره	//	40	85	964	
12	زنجان	گرانیت	سفید	دوران	135.4 ± 0.8	67.8 ± 0.6	1239.7 ± 0.4	A
13		گرانیت	صورتی	خرمدره	131.6 ± 0.7	94.2 ± 0.2	1506.2 ± 0.7	
14		گرانیت	صورتی	//	88	152	1296	
15		گرانیت	کرم روشن	//	101	160	1500	
16		گرانیت	سفید	قزوین - الموت	59.8 ± 0.2	45.7 ± 0.3	1385.4 ± 0.3	A
17	تکاب	گرانیت	سفید-صورتی	تکاب	95.1 ± 0.4	51.8 ± 0.1	69.9 ± 0.2	J
18		گرانیت	روشن	//	103	134	1303	
19	آذربایجان	گرانیت	سفید	تبریز	43.7 ± 0.5	22.1 ± 0.7	1010.4 ± 0.7	A
20		گرانیت	صورتی	ارومیه - قوشچی	79	154	865	
21		گرانیت	صورتی	اهر	132	153	1415	
22	کردستان	گرانیت	تیره	مهاباد	101	113	1258	J
23		گرانیت	سفید مرواریدی	//	102	140	1328	
24		گرانیت	خاکستری	بوکان	85	131	1273	
25	لرستان	گرانیت	قهوه ای روشن	لرستان	38.6 ± 0.4	32.6 ± 0.8	288.6 ± 0.6	A
26		گرانیت	صورتی-گوشتی	چاپان	23.4 ± 0.1	15.7 ± 0.2	556.9 ± 0.5	
27	نطنز	گرانیت	صورتی-گوشتی	کرکس	84.8 ± 0.2	71.8 ± 0.3	484.1 ± 0.9	
28	همدان	گرانیت	تیره	هگمتانه	91.6 ± 0.2	40.9 ± 0.2	922.3 ± 0.2	J
29		گرانیت	گل پنبه ای	اکباتان	98.3 ± 0.4	24.3 ± 0.7	1319.5 ± 0.8	
30		گرانیت	سفید	همدان	108	134	1210	

ادامه جدول 1 (ضمیمه).

Continued Table 1 (Appendix):

31		گرانیت	روشن	بروجرد- جوکار	64	127	1399	
32		گرانیت	سبز	بروجرد	44	102	592	
33	الوند	سینوگرانیت	صورتی کمرنگ	دره مرادبیگ	48.1 ± 0.2	21.9 ± 0.9	1016.9 ± 18.9	P
34		لوکوگرانیت	روشن	//	61.9 ± 1.1	19.9 ± 0.5	89 ± 3.3	
35		بیوتیت گرانیت	نیمه روشن	//	75.7 ± 1.8	30.7 ± 0.8	995.5 ± 18.3	
36		گابرو دیوریت	تیره تا سبز	//	13.2 ± 1.3	11.1 ± 0.6	257.2 ± 6.3	
37		گازنت برینگ سینوگرانیت	روشن	//	10.5 ± 1.2	9.5 ± 0.9	1602.6 ± 28	
38		لوکوگرانیت	روشن	گنج نامه	87.8 ± 2	33.6 ± 0.9	181.6 ± 5.7	
39		لوکوگرانیت	روشن	//	27 ± 1.1	46.6 ± 1	105.9 ± 4.1	
40		پگماتیت	نیمه روشن	//	268.4 ± 3.3	119.3 ± 1.9	1572.3 ± 27.9	
41		مونزوگرانیت	شکلاتی	//	144.6 ± 1.5	33.3 ± 0.6	884.9 ± 15.3	
42		مونزوگرانیت	شکلاتی	//	98.1 ± 2.2	28.4 ± 0.7	503.2 ± 10.4	
43		گرانودیوریت	تیره	//	248.6 ± 2.9	35.6 ± 2.1	319.7 ± 17.2	
44		دیوریت	تیره	//	20 ± 1.6	39.7 ± 1	95.3 ± 5.2	
45		دیوریت	تیره	//	<MDA	34.4 ± 0.7	62.9 ± 4.1	
46		مونزودیوریت	تیره متوسط	//	26.1 ± 1.2	37.2 ± 0.9	235.4 ± 7	
47		تونالیت	تیره تا سیاه	//	80 ± 1.8	22.5 ± 0.9	775.4 ± 14.3	
48		پگماتیت	روشن	زمان آباد	<MDA	8.7 ± 0.7	473 ± 10.1	
49		نورمالین برینگ پگماتیت	روشن	//	4.5 ± 0.8	8.4 ± 0.6	271.9 ± 6.1	
50		نورمالین برینگ پگماتیت	روشن	امامزاده کوه	145 ± 1.7	71.1 ± 0.9	1109.5 ± 19.2	
51		لوکوگرانیت	سفید روشن	//	58 ± 1.4	31.7 ± 0.8	85.1 ± 4.2	
52		مونزوگرانیت	سفید	//	94.7 ± 1.3	36.5 ± 1.1	971.9 ± 17.2	
53		کوارتز دیوریت	تیره	//	44 ± 1.3	30.1 ± 0.8	709.9 ± 13.8	
54		تورمالین برینگ آپلیت	روشن تا آبی	تاریک دره	61.2 ± 1.3	41.4 ± 0.8	1154.3 ± 20.2	
55		لوکوگرانیت	روشن	//	62.1 ± 1.6	27.7 ± 0.9	390.1 ± 8.9	
56		لوکوگرانیت	روشن	//	240.7 ± 3.4	42.8 ± 1.3	95.5 ± 4.7	
57		گرانیت	صورتی کمرنگ	//	91.6 ± 1.7	40.4 ± 1.1	1039 ± 19.2	
58		گرانودیوریت	نسبتا تیره	//	72.9 ± 1.6	35.6 ± 0.9	806.3 ± 15.3	
59		گرانودیوریت	نسبتا تیره	//	97 ± 1.9	47.7 ± 1	531 ± 11.3	
60		کوارتز سینیت	صورتی	//	37.3 ± 1.4	21.3 ± 1	935 ± 17.2	
61		سینوگرانیت	صورتی	//	78.6 ± 1.8	39.5 ± 1	830 ± 15.5	
62		پگماتیت	روشن	//	49.3 ± 1.6	33.5 ± 1	874.8 ± 16.6	

A = Abbasi&Mirekhtari (2011); J = Jahangiri& Ashrafi (1389); P = Poureimani et al. (2014)



جدول 2 (ضمیمه) - شاخص‌های تشعشعی ایزوتوپ‌های ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K برای 62 نمونه از سنگ‌های پلوتونیک (عمدتاً گرانیتوئید) ایران. ترتیب شماره نمونه‌ها مطابق جدول 1 ضمیمه است. شاخص‌های $H_{\text{ex}1}$ ، $H_{\text{ex}2}$ ، H_{in} و I_{γ} دارای واحد نیستند.
Tab. 2-(Appendix). Radioactivity indices of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K isotopes for 62 samples of plutonic rocks (mainly granitoids) from Iran. (The sample numbers are arranged according to the Tab. 1- Appendix, the indices for $H_{\text{ex}1}$, $H_{\text{ex}2}$, H_{in} and I_{γ} are without dimensions).

Sample Number	R _{eq} (Bq/kg)	H _{ex 1}	H _{ex 2}	H _{in}	ADRA (D) (nGy/h)	AEDR (mSv/yr)	D _{eff} (mSv/yr)	ELCR (mSv/yr)
1	242.5381	0.65493	0.327465	0.731687	116.8864	0.143349	0.189895	0.50172323
2	93.5718	0.252694	0.126347	0.302424	42.63218	0.052284	0.459026	0.18299437
3	185.7898	0.501684	0.250842	0.552865	91.83508	0.112627	0.91141	0.3941929
4	123.1883	0.332682	0.166341	0.405925	58.83123	0.072151	0.604313	0.25252717
5	444.5218	1.200457	0.600229	1.448025	204.0992	0.250307	2.180646	0.87607532
6	316.97	0.856163	0.428081	1.199406	150.476	0.184544	1.554928	0.64590318
7	209.1756	0.564886	0.282443	0.675967	99.87046	0.122481	1.026132	0.42868396
8	222.8319	0.601734	0.300867	0.689572	105.707	0.129631	1.093124	0.45370964
9	247.6794	0.668842	0.334421	0.775598	120.3044	0.147541	1.215016	0.51639478
10	263.466	0.711672	0.355836	1.025186	124.7616	0.153008	0.292459	0.53552669
11	216.428	0.584586	0.292293	0.814315	103.6288	0.12709	1.061709	0.44481626
12	356.8789	0.963757	0.481879	1.147	164.8007	0.202112	1.750705	0.70739048
13	398.3645	1.075842	0.537921	1.330437	185.8153	0.227884	1.954221	0.79759377
14	377.632	1.020018	0.51009	1.430829	177.4192	0.217587	1.852512	0.76155417
15	419.93	1.134244	0.567122	1.566677	197.474	0.242182	2.060009	0.8476374
16	237.8897	0.642426	0.321213	0.76594	115.0038	0.141041	1.166992	0.49364223
17	240.9923	0.65082	0.32541	0.79082	110.1825	0.135128	1.182212	0.47294749
18	381.621	1.03074	0.51537	1.392902	178.4551	0.218857	1.87208	0.76600067
19	162.3918	0.438518	0.219259	0.498248	78.73868	0.096565	0.796629	0.33797791
20	324.575	0.876745	0.438372	0.268637	150.7765	0.184912	1.592235	0.64719305
21	450.715	1.217345	0.608672	1.630858	209.4195	0.256832	2.211028	0.89891226
22	354.296	0.956905	0.478453	1.262311	165.6686	0.203176	1.738034	0.7111159
23	388.116	1.048292	0.524146	1.426671	181.6656	0.222795	1.903942	0.77978142
24	350.571	0.946896	0.473448	1.30095	164.9461	0.20229	1.719761	0.70801464
25	110.0202	0.297143	0.148571	0.385251	50.41022	0.061823	0.539715	0.21638083
26	92.0466	0.24856	0.12428	0.290992	44.60973	0.54709	0.451528	0.19148281
27	258.3677	0.697787	0.348894	0.891841	119.7566	0.146869	1.267449	0.5140431
28	248.2951	0.670508	0.335254	0.781048	115.6011	0.141773	1.218036	0.4962062
29	266.4705	0.719537	0.359768	0.785212	125.623	0.154064	1.307198	0.53922395
30	61.381	1.03071	0.515355	1.392872	177.597	0.218705	1.872026	0.76231736
31	326.243	0.8812	0.4406	1.224443	155.6683	0.190912	1.600418	0.66819061
32	210.504	0.568637	0.284318	0.844312	98.3864	0.120661	1.032648	0.42231378
33	168.9843	0.456317	0.228159	0.515506	81.57493	0.100043	0.828969	0.35015223
34	115.27	0.311283	0.155642	0.365067	50.2927	0.061679	0.565469	0.21587639
35	215.6045	0.582216	0.291108	0.665189	101.4186	0.12438	1.057669	0.43532898

ادامہ جدول 2 (ضمیمہ).

Continued Tab. 2-(Appendix):

36	49.7804	0.134437	0.067219	0.164437	23.82624	0.029221	0.244203	0.10227175
37	147.9152	0.399397	0.199699	0.425073	77.55942	0.095119	0.725613	0.33291605
38	173.1372	0.467562	0.233781	0.558372	76.12712	0.093362	0.849342	0.32676805
39	93.3646	0.25221	0.126105	0.378156	42.25323	0.051819	0.458008	0.1836786
40	624.1791	1.685607	0.842804	2.00804	282.7951	0.34682	3.061973	1.21386973
41	308.2153	0.832272	0.416136	0.922272	139.6233	0.171234	1.511981	0.59931918
42	207.4294	0.560137	0.280068	0.636893	93.35664	0.114493	1.017566	0.40072404
43	462.3529	1.248453	0.624226	0.347101	205.1187	0.251558	2.268118	0.88045146
44	75.6381	0.20433	0.102165	0.311628	34.39541	0.042183	0.37105	0.14763886
45	39.2433	0.10605	0.053025	0.199023	18.51573	0.022708	0.192512	0.07947692
46	92.6488	0.250252	0.1251266	0.330793	42.76698	0.052449	0.454498	0.18357298
47	195.2198	0.527155	0.263577	0.587966	90.29858	0.110742	0.95768	0.38759762
48	45.121	0.12185	0.060925	0.145364	23.7435	0.029119	0.221346	0.1019166
49	35.7713	0.096605	0.048303	0.119308	17.93701	0.021998	0.17548	0.07699291
50	363.8815	0.982673	0.491337	1.174835	166.6944	0.204434	1.785057	0.71551873
51	121.1927	0.327306	0.163653	0.412982	53.22607	0.065276	0.594523	0.22846758
52	246.7573	0.666344	0.333172	0.764993	114.59	0.140533	1.210493	0.49186624
53	147.6823	0.398824	0.199412	0.480175	70.08503	0.085952	0.72447	0.30083298
54	217.7971	0.588165	0.294082	0.700056	104.2259	0.127823	1.068425	0.4473793
55	146.5407	0.395735	0.197868	0.4706	66.57297	0.081645	0.71887	0.28575782
56	394.3545	1.064874	0.532437	1.180549	169.1388	0.207432	0.934545	0.72601117
57	251.391	0.678865	0.339433	0.788055	117.3175	0.143878	1.233224	0.50357364
58	201.9321	0.545313	0.272657	0.64153	94.10151	0.115406	0.990598	0.40392132
59	227.297	0.613831	0.306916	0.74275	102.7681	0.126035	1.115028	0.44112179
60	146.634	0.39597	0.197985	0.453537	71.3593	0.087515	0.719328	0.30630266
61	215.808	0.582759	0.261394	0.689546	100.3344	0.12305	1.058668	0.43067538
62	171.3586	0.462759	0.23138	0.5553	81.7336	0.100238	0.840617	0.35083227