

Investigation of Natural Radioactivity in Igneous Rocks and Estimation of Excess Lifetime Cancer Risk due to Gamma Radiation in Mahallat, Iran

Reza Pourimani^{1*}, Hosein Sadegi², Mohammad Zahedi Nejad³

1- Assistant Professor, Department of Physics, Arak University, Arak, Iran.

2- Associate Professor, Department of Physics, Arak University, Arak, Iran.

3- MSc, Department of Physics, Arak University, Arak, Iran

Received: 11 Jun 2016, Accepted: 9 Oct 2016

Abstract

Background: Amount of natural background ionizing radiations in environment depends on kind of soil, stones and geographical conditions. Hot springs of Mahallat facilities are annually visited by many tourists. Determination of environmental radioactivity and excess lifetime cancer risk is very important.

Materials and Methods: In this research, twenty four samples of igneous and travertine rocks from a region (300 hectares) and four water samples of Mahallat hot springs were collected. The specific activities of radionuclides were determined for all samples by using gamma ray spectrometry method and employing high purity germanium detector with 30% relative efficiency.

Results: External and internal hazard indices for igneous rocks, water and two travertine samples varied from 0.00 to 0.71 and for two another travertine samples obtained from 8.17 to 22.50. The average of annual gonadal dose equivalent (AGDE) was determined as 0.36 and 0.20 mSv/y and also the average of excess lifetime cancer risk (ELCR) was calculated as 0.23×10^{-3} and 0.12×10^{-3} for igneous and travertine rocks, respectively. Maximum acceptable value and world wide average of ELCR are 10^{-3} and 0.29×10^{-3} , respectively.

Conclusion: The results of this research show that the hazard indices and ELCR for magma region are less than unity and world wide average respectively. Therefore; there is no consequence for people health. So, the radioactivity only around the orifice of hot springs where radium compositions are deposited, is more than maximum acceptable value.

Keywords: Cancer risk, Hot spring, Igneous rock, Specific activity

*Corresponding Author:

Address: Department of Physics, Arak University, Arak, Iran.

Email: r-pourimani@araku.ac.ir

بررسی پرتوزایی طبیعی در سنگ‌های آذرین و برآورد خطر ابتلا به سرطان در طول عمر ناشی از پرتوهای گاما در محلات، ایران

رضا پورایمانی^{۱*}، حسین صادقی^۲، محمد زاهدی نژاد^۳

۱. استادیار، گروه فیزیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲. دانشیار، گروه فیزیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۳- کارشناس ارشد، گروه فیزیک، دانشگاه اراک، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۳۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۸

چکیده

زمینه و هدف: مقدار پرتوهای یون‌ساز طبیعی در محیط زیست بستگی به نوع خاک، سنگ و شرایط جغرافیایی دارد. منطقه آب گرم محلات هر ساله مورد بازدید بسیاری از گردش‌گران قرار می‌گیرد. از این رو، تعیین میزان پرتوزایی محیطی آن و خطر ابتلا به سرطان در طول عمر از اهمیت زیادی برخوردار است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، تعداد ۲۴ نمونه از سنگ‌های آذرین و تراورتن از محدوده‌ای به وسعت ۳۰۰ هکتار و چهار نمونه آب از منطقه چشمه‌های آب گرم محلات تهیه گردید. فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزا با استفاده از روش طیف‌نگاری پرتوهای گاما با به کارگیری آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe) با بازده نسبی ۳۰ درصد تعیین گردید.

یافته‌ها: شاخص‌های خطرپذیر داخلی و خارجی برای نمونه‌های آذرین، آب و دو نمونه تراورتن در محدوده صفر تا ۰/۷۱ تغییر کرد و برای دو نمونه تراورتن دیگر از ۸/۱۷ تا ۲۲/۵۰ به دست آمد. مقدار میانگین دوز دریافتی توسط غدد مهم بدن انسان برای سنگ‌های آذرین و تراورتن به ترتیب برابر ۰/۳۶ و ۰/۲۰ برحسب mSv/y به دست آمد. مقدار میانگین خطر ابتلا به سرطان در طول عمر برای نمونه‌های آذرین و تراورتن به استثنای دو نمونه به ترتیب برابر $۰/۲۳ \times ۱۰^{-۳}$ و $۰/۱۲ \times ۱۰^{-۳}$ محاسبه گردید. حداکثر مقدار مجاز و میانگین جهانی خطر ابتلا به سرطان در طول عمر به ترتیب $۱۰^{-۳}$ و $۰/۲۹ \times ۱۰^{-۳}$ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص‌های خطرپذیری و خطر ابتلا به سرطان برای نواحی در برگیرنده ماگماها کمتر از واحد و میانگین جهانی می‌باشند. بنابر این، خطری سلامتی افراد را تهدید نمی‌کند. تنها در اطراف دهانه چشمه‌ها، به دلیل رسوب نمک‌های رادیوم، مقدار پرتوزایی بیشتر از حد مجاز می‌باشد.

واژگان کلیدی: خطر ابتلا به سرطان، چشمه‌های آب گرم، سنگ آذرین، فعالیت ویژه

*نویسنده مسئول: ایران، اراک، دانشگاه اراک، گروه فیزیک

Email: r-pourimani@araku.ac.ir

مقدمه

تابش‌های زمینه یکی از منابع اصلی پرتوگیری انسان از محیط پیرامون زندگی می‌باشد. به طور کلی تمام مواد طبیعی موجود در طبیعت حاوی مقادیری از هسته‌های پرتوزا می‌باشند، اما چون مقادیر این عناصر بسیار کم است، آشکار کردن آن‌ها مستلزم استفاده از دستگاه‌های آنالیز با دقت بالا بوده و به دلیل تاثیر عناصر پرتوزای طبیعی موجود در محیط زیست بر انسان‌ها، حیوانات و گیاهان، تعیین مقادیر آن‌ها در سنگ، خاک و آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱). اساس تخمین دز موجود در محیط زیست وابسته به میزان رادیویزوتوپ‌ها و چشمه‌های تابش کننده آن‌هاست. یکی از اصلی‌ترین چشمه‌های خارجی تابش به بدن انسان، تابش‌های ناشی از پرتوهای گاما می‌باشد. رادیویزوتوپ‌های طبیعی موجود در محیط زیست نظیر سری‌های واپاشان ^{238}U ، ^{235}U و ^{232}Th و هسته‌های منفرد نظیر ^{40}K از مهم‌ترین منابع تابش هستند. مقدار میانگین اورانیوم در پوسته زمین $2/7 \text{ mg/kg}$ تخمین زده شده است و در سنگ‌های فسفاته ممکن است این مقدار به 120 mg/kg و بالاتر هم برسد (۲). در مورد توریم مقدار میانگین برآورد شده $9/6 \text{ mg/kg}$ است در حالی که مقدار پتاسیم به عنوان هشتمین عنصر از نظر فراوانی در پوسته زمین $2/8$ درصد برآورد شده است و مقدار آن بستگی به نوع کانی‌های موجود در سنگ متغیر است (۳). پتاسیم یکی از اجزای اصلی تشکیل دهنده بسیاری از سنگ‌های آذرین می‌باشد و در جریان تشکیل ماگماها و تشکیل انواع سنگ‌های آذرین ممکن است مقدار کانی‌های پتاسیم دار از تمرکز بیشتری برخوردار باشند و در سنگ‌هایی مانند بازالت فراوانی آن به ۶ درصد هم می‌رسد (۳-۴). مناطق چشمه‌های آب گرم از نقطه نظر گردشگری و انرژی زمین‌گرمایی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و اطلاعات مربوط به مقادیر عناصر پرتوزای موجود در خاک، سنگ و آب‌های آن‌ها در سطوح مختلف می‌تواند اطلاعات مهمی در رابطه با میزان دز جذبی، مطالعات اپیدمیولوژی، ناهنجاری‌های ژنتیکی، احتمال بروز سرطان و تغییرات محیطی ناشی از صنایع هسته‌ای و فعالیت‌های بشری را ارائه دهد. در

منطقه محلات در وسعت 300 هکتار از محیط پیرامونی و بستر چشمه‌های آب گرم ماگماهای مربوط به دوره زمین شناسی ژوراسیک گسترده شده و در بسیاری از نقاط از سطح زمین بیرون زده شده‌اند که جنس عمده این سنگ‌ها از نوع گرانیت می‌باشند. سنگ‌های گرانیت به علت تنوع رنگ و استحکام در ساختمان سازی به عنوان سنگ‌های تزئینی و هم‌چنین در بعضی از صنایع به عنوان ماده اولیه کاربرد دارند. در این پژوهش ۲۰ نمونه مغز سنگ از ماگماهای منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است، هم‌چنین در کنار توده‌های ماگمایی چشمه‌های آب گرم محلات تعداد ۴ نمونه سنگ تراورتن شناسایی و برداشت گردید. سنگ تراورتن نوعی سنگ آهکی با منشاء شیمیایی بوده و از ته‌نشین شدن کربنات کلسیم نزدیک چشمه‌ها، غارها و حوضچه‌های مردابی به وجود می‌آید. بافت این سنگ به صورت متخلخل و لایه‌لایه بوده و تشکیل آن‌ها عمدتاً ناشی از فعالیت چشمه‌های آب گرم می‌باشد (۵). کاربرد این سنگ‌ها در صنعت ساختمان‌سازی به عنوان سنگ‌نمای ساختمان و سنگ‌های تزئینی حائز اهمیت است. منطقه آب گرم محلات، از چندین چشمه مختلف تشکیل شده است. این چشمه‌ها جزء یکی از جاذبه‌های مهم گردشگری و توریستی در استان مرکزی بوده و دارای خواص درمانی نیز می‌باشند (۶). جریان آب گرم در هنگام عبور از لایه‌های داخلی به سمت بیرون نمک‌های رادیوم را در خود حل می‌کند و در دهانه چشمه رسوب می‌کند از این رو رسوبات مذکور دارای پرتوزایی بالایی می‌باشند. در این پژوهش برای کلیه نمونه‌های سنگ‌های جمع‌آوری شده از منطقه اطراف چشمه، پارامترهای پرتوشناختی شامل فعالیت معادل رادیوم، دز جذبی در هوا در ارتفاع یک متری، شاخص خطر پذیری داخلی و خارجی، دز جذبی موثر سالیانه داخلی و خارجی، دز معادل دریافتی توسط غدد مهم بدن انسان و خطر ابتلا به سرطان در طول عمر محاسبه گردید.

مواد و روش‌ها

۱-۲ نمونه برداری و نمونه سازی

در این پژوهش ۲۰ نمونه سنگ آذرین به صورت مغز سنگ از منطقه در برگیرنده ماگماهای اطراف چشمه‌های آب گرم محلات به وسعت ۳۰۰ هکتار و ۴ نمونه سنگ تراورتن از همین محدوده در نزدیکی دهانه‌های و ۴ نمونه آب از خروجی چشمه‌های آب گرم شهر محلات به نام‌های شفا، دنبه، سلیمانی و سودا جمع‌آوری گردید. نمونه‌برداری در این پژوهش به صورت تصادفی و تجربی انجام و به مقدار ۲ کیلوگرم از هر یک از نمونه‌ها تهیه شد. در شکل ۱ منطقه نمونه برداری در برگیرنده سنگ‌های گرانیت بار رنگ قرمز نشان داده شده است. نمونه‌های آب در ظروف پلی اتیلنی ۱/۵ لیتری جمع‌آوری گردید و به منظور عدم واکنش بین کاتیون‌های موجود در آب چشمه‌ها با دیواره‌های ظروف، PH نمونه‌ها با افزودن محلول سه مولار HNO₃ به عدد ۲ کاهش داده شد (۷). نمونه‌های سنگی، پس از خرد شدن توسط آسیاب فکی و آسیاب شدن توسط آسیاب گلوله‌ای، به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و به منظور تهیه نمونه‌های یکنواخت، پودرهای به دست آمده از مش ۵۰ عبور داده شدند. با توجه به این که گاز رادون همواره تمایل به فرار از سطح نمونه‌ها را دارد، نمونه‌های پودر گرانیت به جرم ۲۹۳ گرم درون ظروف استاندارد نئگین و نمونه‌های پودر سنگ تراورتن به جرم ۹۵۰ گرم و هم‌چنین نمونه‌های آب نیز به مقدار ۸۰۰ سی‌سی درون ظروف استاندارد ماریلنی بیکر بسته‌بندی و آب‌بندی گردیدند و به منظور برقراری تعادل بین هسته‌های ²²⁶Ra و ²²²Rn حداقل به مدت ۵۰ روز در آزمایشگاه نگهداری شدند (۸). در جدول شماره ۱ مشخصات نمونه‌ها شامل نام، نام علمی، کد نمونه‌ها و مختصات جغرافیایی مناطق نمونه‌برداری و هم‌چنین مقدار جرم و حجم نمونه‌ها در این پژوهش درج شده است. طیف‌گیری پرتوهای گاما با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی

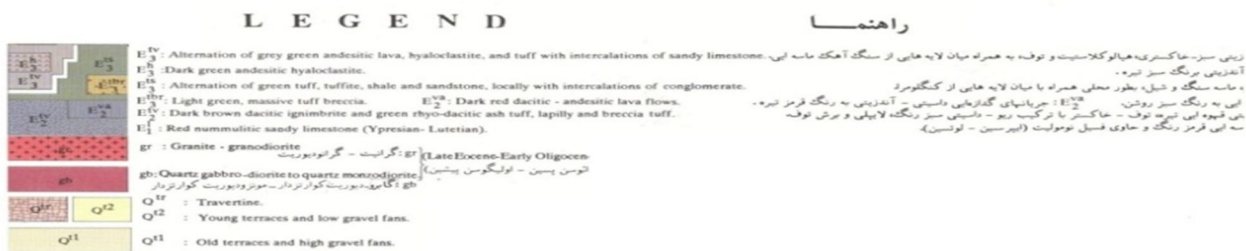
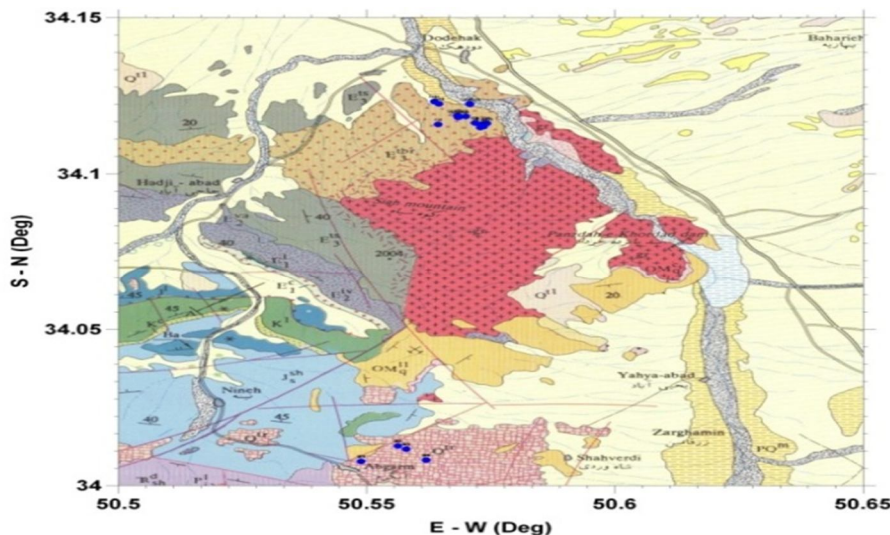
(HPGe) هم محور از نوع P مدل GCD30195BSI ساخت شرکت Baltic Scientific Instrument LTD (005- Latvia) با بازدهی نسبی ۳۰ درصد و با استفاده از نرم افزار Lsrmsbi انجام شد. قدرت تفکیک انرژی آشکارساز ۱/۹۵ کیلو الکترون ولت برای گاما مربوط به ⁶⁰Co با انرژی ۱۳۳۲/۵۲ کیلو الکترون ولت است و در ولتاژ کاری ۳۰۰۰ ولت کار می‌کند. از هر یک از نمونه‌ها به مدت دقیقاً یک روز طیف‌گیری به عمل آمد. کالیبراسیون انرژی و بازدهی سیستم با استفاده از چشمه‌های استاندارد حاوی هسته‌های پرتوزا ¹³³Ba، ⁵⁷Co، ⁶⁰Co و ²⁴¹Am صورت گرفت. تجزیه و تحلیل طیف‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار Maestro II Gamma Vision 32 شرکت EG&G Ortec انجام گردید. به منظور کاهش اثرات تابش زمینه، آشکارساز در مرکز یک حفاظ سربی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با یک لایه درونی مسی به ضخامت ۲ میلی‌متر قرار داده شد که پرتوهای نرم کیهانی شامل فوتون‌های کم انرژی و الکترون‌ها به وسیله حفاظ سربی به سطح بسیار پایینی کاهش می‌یابند (۹). تصحیح تابش زمینه با استفاده از طیف ثبت شده برای ظرف خالی در تحت شرایط یکسان صورت گرفت. بر مبنای طیف‌های ثبت شده ویژه فعالیت هسته‌های ²²⁶Ra، ²³²Th و ⁴⁰K در نمونه‌ها تعیین گردید. بازدهی مطلق آشکارساز با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد.

$$\varepsilon(\%) = \frac{N_i}{Act \times P_n(E_i) \times T} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه N_i شمارش خالص زیر قله فوتوپیک متناظر با انرژی E_i ، Act ، ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزای موجود در ظرف استاندارد برحسب Bq، $P_n(E_i)$ احتمال انتشار فوتون گاما با انرژی E_i به ازای هر واپاشی برحسب درصد و T زمان طیف‌گیری از نمونه بر حسب ثانیه است (۸).

جدول ۱. نام علمی، کد نمونه‌ها و مختصات مناطق نمونه برداری شده و مقدار جرم و حجم نمونه‌ها

کد نمونه	نام نمونه	نام علمی نمونه	مختصات جغرافیایی منطقه نمونه برداری شده		جرم یا حجم نمونه
			عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	
Di1	سنگ دیوریت	Diorite	34°, 11482'	50°, 57293'	۲۹۳ گرم
Gb	سنگ آپلیت	Glosbe	34°, 11518'	50°, 57356'	۲۹۳ گرم
Gd1	سنگ گرانودیوریت	Granodiorite	34°, 11589'	50°, 57348'	۲۹۳ گرم
G1	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11629'	50°, 57409'	۲۹۳ گرم
Di2	سنگ دیوریت	Diorite	34°, 11617'	50°, 57424'	۲۹۳ گرم
G2	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11581'	50°, 56441'	۲۹۳ گرم
Peg	سنگ پگماتیت	Pegmatite	34°, 11500'	50°, 57309'	۲۹۳ گرم
G3	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11636'	50°, 57181'	۲۹۳ گرم
G4	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11621'	50°, 57196'	۲۹۳ گرم
G5	سنگ گرانیت (هوازده)	Granite	34°, 11620'	50°, 57195'	۲۹۳ گرم
G6	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11842'	50°, 56995'	۲۹۳ گرم
Gd2	سنگ گرانودیوریت	Granodiorite	34°, 11818'	50°, 56855'	۲۹۳ گرم
G7	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11863'	50°, 56838'	۲۹۳ گرم
Gd3	سنگ گرانودیوریت	Granodiorite	34°, 11862'	50°, 56823'	۲۹۳ گرم
G8	سنگ گرانیت	Granite	34°, 11806'	50°, 56844'	۲۹۳ گرم
G9	سنگ گرانیت	Granite	34°, 12246'	50°, 57074'	۲۹۳ گرم
Gd4	سنگ گرانودیوریت	Granodiorite	34°, 12222'	50°, 57085'	۲۹۳ گرم
G10	سنگ گرانیت	Granite	34°, 12315'	50°, 56364'	۲۹۳ گرم
G11	سنگ گرانیت	Granite	34°, 12238'	50°, 56459'	۲۹۳ گرم
G12	سنگ گرانیت	Granite	34°, 12238'	50°, 56459'	۲۹۳ گرم
T1	سنگ تراورتن چشمه شفا	Travertin	34°, 007789'	50°, 548915'	۹۵۰ گرم
T2	سنگ تراورتن چشمه دنبه	Travertin	34°, 012705'	50°, 556329'	۹۵۰ گرم
T3	سنگ تراورتن چشمه سلیمانی	Travertin	34°, 011674'	50°, 557992'	۹۵۰ گرم
T4	سنگ تراورتن چشمه سودا	Travertin	34°, 008179'	50°, 561995'	۹۵۰ گرم
W1	آب چشمه آب گرم شفا	Hot spring water	34°, 007789'	50°, 548915'	۸۰۰ سی سی
W2	آب چشمه آب گرم دنبه	Hot spring water	34°, 012705'	50°, 556329'	۸۰۰ سی سی
W3	آب چشمه آب گرم سلیمانی	Hot spring water	34°, 011674'	50°, 557992'	۸۰۰ سی سی
W4	آب چشمه آب گرم سودا	Hot spring water	34°, 008179'	50°, 561995'	۸۰۰ سی سی



شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه دربرگیرنده چشمه‌های آب گرم محلات نقاط آبی رنگ بالای شکل محل چشمه‌های آب گرم و ناحیه قرمز رنگ محل نمونه برداری از ماگماها

۳-۲. اندازه گیری ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های مورد مطالعه برای محاسبه ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزا از رابطه ۲ استفاده گردید.

شکل ۱. نقشه زمین شناسی منطقه دربرگیرنده چشمه‌های آب گرم محلات نقاط آبی رنگ بالای شکل محل چشمه‌های آب گرم و ناحیه قرمز رنگ محل نمونه برداری از ماگماها

۴-۲. فعالیت معادل رادیوم (Ra_{eq})
 ۹۸/۵ درصد اثرات رادیولوژیکی زنجیره اورانیوم مربوط به رادیوم و دختران آن می‌باشد لذا به منظور بررسی اثرات پرتوزایی طبیعی کلی خاک و سنگ و مقایسه آن با حداکثر مقدار مجاز اعلام شده با لحاظ کردن مقادیر رادیوم، توریم و پتاسیم از کمیتی به نام فعالیت معادل رادیوم استفاده می‌گردد. این کمیت طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

که در این رابطه Act ویژه فعالیت نمونه پرتوزا بر حسب $Net\ Area\ Bq/kg$ سطح زیر پیک متناظر با انرژی خاص، ϵ ، بازدهی آشکارساز در آن انرژی بر حسب درصد، (BR) نسبت انشعابی یا احتمال گسیل اشعه گاما با انرژی E_i به ازای هر واپاشی، T زمان طیف گیری از نمونه بر حسب ثانیه و m یا v جرم یا حجم نمونه بر حسب کیلوگرم یا لیتر است (۱۰). برای تعیین ویژه فعالیت ^{226}Ra در نمونه‌ها، از پرتو گامای ^{214}Pb با انرژی $351/93\ keV$ و پرتو گامای ^{214}Bi با انرژی $609/31\ keV$ استفاده شده است. برای تعیین ویژه فعالیت ^{232}Th از دو خط گامای ^{228}Ac ، یکی با انرژی

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K$$

که در آن A_{Ra} ، A_{Th} و A_K به ترتیب ویژه فعالیت ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K بر حسب Bq/kg هستند. حداکثر مقدار مجاز

Ra_{eq} برای خاک و سنگ برابر ۳۷۰ بکرل بر کیلوگرم می‌باشد (۱۱).

۲-۵. شاخص‌های خطرپذیری خارجی (H_{ex}) و داخلی (H_{in})

برای تعیین میزان خطرات ناشی از پرتوگیری خارجی ناشی از تابش‌های گامای حاصل از واپاشی هسته‌های پرتوزا در خاک و سنگ و پرتوگیری داخلی در اثر استنشاق گاز رادن موجود در طبیعت از شاخص‌هایی به نام شاخص خطرپذیری خارجی و داخلی استفاده می‌شود که با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌گردد.

$$H_{ex} = A_{Ra}/370 + A_{Th}/259 + A_K/4810 < 1$$

$$H_{in} = A_{Ra}/185 + A_{Th}/259 + A_K/4810 < 1$$

که در این رابطه A_{Ra}، A_{Th} و A_K به ترتیب فعالیت ویژه ²²⁶Ra، ²³²Th و ⁴⁰K بر حسب Bq/kg هستند. به منظور ناچیز ماندن مخاطرات ناشی از پرتوزایی طبیعی این شاخص‌ها همواره باید کوچک‌تر از یک باشند (۱۲).

۲-۶. آهنگ دز جذبی (D)

آهنگ دز جذبی در هوا ناشی از پرتوهای گاما گسیل شده از ویژه هسته‌های پرتوزای موجود در طبیعت در ارتفاع یک متری بالاتر از سطح زمین با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد.

$$D(\text{nGy/h}) = 0.427A_{Ra} + 0.662A_{Th} + 0.0432A_K$$

در این رابطه، A_{Ra}، A_{Th} و A_K به ترتیب فعالیت ویژه ²²⁶Ra، ²³²Th و ⁴⁰K بر حسب Bq/kg هستند. مقدار میانگین جهانی آهنگ دز جذبی ناشی از مواد زمینی ۵۵nGy/h می‌باشد (۱۳).

۲-۷. آهنگ دز موثر سالیانه داخلی و خارجی در ارتفاع ۱ متری از سطح زمین

با محاسبه مقادیر مربوط به آهنگ دز جذبی در هوا، آهنگ دز موثر سالیانه داخلی محیط زندگی ناشی از تابش‌های هسته‌ای طبیعی در ارتفاع ۱ متری از سطح زمین برطبق رابطه ۷ محاسبه گردید (۱۳).

AED indoor (mSv/y) = Dose rate(nGy/h) × 8766(h/y) × 0.8 × 0.7(Sv/Gy) × 10⁻⁶
در این رابطه ۸۷۶۶ مدت زمان قرارگیری در معرض پرتو در طول یک سال، ۰/۸ فاکتور قرارگیری در معرض پرتو در

فضای داخلی محل زندگی و ۰/۷ فاکتور تبدیل دز جذبی به دز موثر است. واحد آهنگ دز موثر سالیانه میلی‌سیورت بر سال است. برطبق آیین‌نامه توصیه شده اتحادیه اروپا آیین‌نامه شماره ۱۱۲ حفاظت از تشعشعات طبیعی، مواد و مصالح ساختمانی باید طوری انتخاب شوند که در زمان یک سال آهنگ دز موثر سالیانه در فضای داخل محیط زندگی کوچکتر از یک mSv/y باشد تا خطرات ناشی از تابش هسته‌ای محیطی ناچیز بمانند (۱۴). هم‌چنین آهنگ دز موثر سالیانه در فضای خارجی محیط زندگی در ارتفاع ۱ متری سطح زمین نیز با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شد (۱۴).

$$\text{AED outdoor (mSv/y)} = \text{Dose rate(nGy/h)} \times 8766(\text{h/y}) \times 0.2 \times 0.7(\text{Sv/Gy}) \times 10^{-6}$$

که در این رابطه ۰/۲ فاکتور قرارگیری در معرض پرتو در فضای خارج از محیط زندگی می‌باشد. مقدار میانگین جهانی دز موثر جذبی سالیانه داخلی و خارجی به ترتیب برابر ۲۳۴/۹۳ و ۵۸/۷۳ بر حسب میکروسیورت می‌باشد (۱۵).

۲-۸. دز معادل سالیانه غدد (AGDE)

یک دسته از اعضای بدن شامل غدد تیروئید، ریه، مغز قرمز استخوان، سلول‌های سطح استخوان، بیضه‌ها و پستان خانم‌ها توسط کمیته علمی سازمان ملل متحد در مورد تاثیر تابش‌های هسته‌ای (UNSCEAR) مورد مطالعه قرار گرفته است که بر طبق نظر این کمیته مقدار دز معادل سالیانه غدد مذکور از رابطه ۹ محاسبه می‌گردد (۱۱).

$$\text{AGDE}(\text{mSv y}^{-1}) = (3.09A_{Ra} + 4.18A_{Th} + 0.314A_K) \times 10^{-3}$$

که در این رابطه A_{Ra}، A_{Th} و A_K به ترتیب فعالیت ویژه رادیوم، توریوم و پتاسیم می‌باشد.

۲-۹. خطر ابتلا به سرطان در طول عمر (ELCR)

برای محاسبه خطر ابتلا به سرطان در طول زندگی در اثر تابش‌های گامای محیطی از رابطه ۱۰ استفاده می‌گردد.

$$\text{ELCR} = \text{AEDE} \times \text{DL} \times \text{RF}$$

که در این رابطه AEDE، دز معادل موثر سالانه خارجی، DL طول عمر متوسط برابر ۷۰ سال و RF ضریب خطر می‌باشد (۱۶). برای آثار احتمالی پرتوها برای افراد جامعه، کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه (ICRP60) ضریب ⁻¹۰/۵SV را تعیین کرده است (۱۷).

(H_{ex})، شاخص خطرپذیری داخلی (H_{in})، آهنگ دز جذبی در هوا ارتفاع یک متری از سطح زمین، دز موثر سالیانه خارجی و داخلی، AGDE و ELCR برای کلیه نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ درج گردیده است.

یافته‌ها

با استفاده از طیف‌های ثبت شده ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در کلیه نمونه‌ها محاسبه گردید که این مقادیر برحسب Bq/kg در جدول ۲ مشاهده می‌شود. نتایج محاسبات شاخص خطرپذیری خارجی

جدول ۲. مقادیر ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های سنگ اطراف منطقه آب گرم محلات بر حسب (Bq/kg)

Bq/kg فعالیت ویژه بر حسب			کد نمونه
K^{40}	Th^{232}	Ra^{226}	
$91/08 \pm 5/76$	$21/03 \pm 1/82$	$25/95 \pm 1/73$	Di1
$141/63 \pm 8/41$	$35/92 \pm 3/96$	$05/350/81 \pm$	Gb
$90/43 \pm 5/37$	$24/26 \pm 2/67$	$62/68 \pm 3/76$	Gd1
$212/60 \pm 11/79$	$10/69 \pm 1/43$	$22/15 \pm 1/34$	G1
$1103/5 \pm 15/49$	$27/23 \pm 2/99$	$55/79 \pm 3/35$	Di2
$113/82 \pm 3/59$	$40/55 \pm 2/15$	$43/28 \pm 1/78$	G2
$87/89 \pm 3/05$	$28/50 \pm 0/75$	$27/45 \pm 0/49$	Peg
$109/14 \pm 6/48$	$31/29 \pm 3/44$	$54/87 \pm 3/30$	G3
$59/99 \pm 5/07$	$26/98 \pm 1/70$	$38/23 \pm 1/82$	G4
$274/56 \pm 8/29$	$27/32 \pm 3/01$	$61/82 \pm 3/71$	G5
$62/97 \pm 4/99$	$28/04 \pm 18/10$	$58/13 \pm 1/32$	G6
$144/76 \pm 11/03$	$30/30 \pm 3/07$	$37/29 \pm 1/88$	Gd2
$166/33 \pm 11/29$	$19/28 \pm 0/97$	$31/28 \pm 2/01$	G7
$1271/6 \pm 15/47$	$38/38 \pm 4/22$	$50/36 \pm 4/42$	Gd3
$123/86 \pm 6/95$	$36/48 \pm 2/17$	$46/78 \pm 2/06$	G8
$1030/54 \pm 16/32$	$37/49 \pm 3/71$	$55/62 \pm 3/34$	G9
$63/08 \pm 4/76$	$28/62 \pm 1/23$	$25/45 \pm 0/83$	Gd4
$76/62 \pm 4/54$	$32/16 \pm 3/54$	$46/01 \pm 2/76$	G10
$520/01 \pm 15/86$	$33/79 \pm 3/61$	$49/05 \pm 2/94$	G11
$1467/3 \pm 17/48$	$34/65 \pm 3/81$	$50/22 \pm 3/01$	G12
$172/55 \pm 0/52$	$21/25 \pm 2/98$	$4139/50 \pm 13/09$	T1
$17/43 \pm 2/52$	$9/24 \pm 0/68$	$45/15 \pm 0/81$	T2
$42/06 \pm 3/48$	$20/47 \pm 0/86$	$40/01 \pm 0/83$	T3
$137/10 \pm 10/11$	$16/69 \pm 2/56$	$2988/02 \pm 94/10$	T4
$<1/71$	$<0/27$	$1/90 \pm 0/21$	W1
$<1/71$	$<0/28$	$1/00 \pm 0/20$	W2
$<1/03$	$<0/15$	$1/12 \pm 0/13$	W3
$<1/66$	$<0/25$	$0/47 \pm 0/16$	W4

جدول ۳. شاخص خطر پذیری داخلی، شاخص خطر پذیری خارجی، آهنگ دوز جذبی پرتو گاما در هوا و آهنگ دوز موثر سالیانه داخلی و خارجی، دز معادل سالیانه غدد و شاخص خطر ابتلا به سرطان

ELCR (10^{-3})	AGED mSv/y	AED indoor (mSv/y)	AED outdoor (mSv/y)	D(nGy/h)	H _{ex}	H _{in}	کد نمونه
۰/۱۲	۰/۲۰	۰/۱۷	۰/۰۴	۲۸/۹۰	۰/۱۷	۰/۲۴	Di1
۰/۲۲	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۰۸	۵۱/۶۰	۰/۳۱	۰/۴۴	Gb
۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۰۷	۴۶/۷۰	۰/۲۸	۰/۴۵	Gd1
۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۰۴	۲۵/۷۰	۰/۱۴	۰/۲۱	G1
۰/۳۸	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۱۳	۸۹/۴۰	۰/۴۸	۰/۶۴	Di2
۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۰۷	۵۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۱	G2
۰/۱۵	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۰۵	۳۴/۴۰	۰/۲۰	۰/۲۸	Peg
۰/۲۱	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۰۷	۴۸/۹۰	۰/۲۹	۰/۴۴	G3
۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۲۲	۰/۰۵	۳۶/۸۰	۰/۲۲	۰/۳۲	G4
۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۳۴	۰/۰۸	۵۶/۳۰	۰/۳۳	۰/۴۸	G5
۰/۲۰	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۰۷	۴۶/۱۰	۰/۲۷	۰/۴۴	G6
۰/۱۸	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۰۶	۴۲/۲۰	۰/۲۵	۰/۳۵	Gd2
۰/۱۴	۰/۲۳	۰/۲۰	۰/۰۵	۳۳/۳۰	۰/۱۹	۰/۲۸	G7
۰/۴۴	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۱۵	۱۰۲/۰۰	۰/۵۵	۰/۶۸	Gd3
۰/۲۱	۰/۳۴	۰/۳۰	۰/۰۷	۴۹/۵۰	۰/۲۹	۰/۴۲	G8
۰/۴۰	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۱۴	۹۳/۱۰	۰/۵۱	۰/۶۶	G9
۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۰۵	۳۲/۵۰	۰/۱۹	۰/۲۶	Gd4
۰/۱۹	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۰۶	۴۴/۲۰	۰/۲۶	۰/۳۹	G10
۰/۲۸	۰/۴۶	۰/۴۰	۰/۱۰	۶۵/۸۰	۰/۳۷	۰/۵۰	G11
۰/۴۶	۰/۷۶	۰/۶۵	۰/۱۶	۱۰۸/۰۰	۰/۵۷	۰/۷۱	G12
۷/۶۸	۱۲/۹۰	۱۰/۸۰	۲/۶۹	۱۷۹/۰۰	۱۱/۳	۲۲/۵۰	T1
۰/۱۱	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۰۴	۲۶/۱۰	۰/۱۶	۰/۲۸	T2
۰/۱۴	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۰۵	۳۲/۵۰	۰/۱۹	۰/۳۰	T3
۵/۵۵	۹/۳۵	۷/۷۸	۱/۹۵	۱۲۹/۰۰	۸/۱۷	۱۶/۲	T4
۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۶	۰/۰۰	۰/۰۱	W1
۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۹	۰/۰۰	۰/۰۰	W2
۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	W3
۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	W4

بحث

۱۳/۰۹ ± ۴۱۳۹/۵۰، ۰/۶۸ ± ۹/۲۴ تا ۲/۹۸ ± ۲۱/۲۵ و ۲/۵۲ ± ۱۷/۴۳ تا ۰/۵۲ ± ۱۷۲/۵۵ برحسب Bq/kg تغییر می‌کند. برای نمونه‌های آب فعالیت ویژه ^{226}Ra در محدوده ۰/۱۶ ± ۰/۴۷ تا ۰/۲۱ ± ۱/۹۰ برحسب Bq/l به دست آمد و برای سایر هسته‌های پرتوزای مذکور، در اکثر موارد کمتر از حداقل قابلیت تشخیص دستگاه می‌باشد که در جدول ۲ با

مقدار فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در سنگ‌های آذرین به ترتیب در محدوده ۱/۳۴ ± ۲۲/۱۵ تا ۳/۷۶ ± ۶۲/۶۸، ۱/۴۳ ± ۱۰/۶۹ تا ۲/۱۵ ± ۴۰/۵۵ و ۴/۹۹ ± ۶۲/۹۷ تا ۱۷/۴۸ ± ۱۴۶۷/۳ و برای نمونه‌های تراورتن به ترتیب در محدوده ۰/۸۳ ± ۴۰/۰۱ تا

علامت < مشخص گردیده است اندازه‌گیری‌های انجام شده در مجموعه پلوتونیک الوند همدان برای سنگ‌های گرانیت نشان می‌دهد که حداکثر فعالیت ویژه ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K به ترتیب برابر $1/9 \pm 119/3$ ، $3/3 \pm 268/4$ و $28/0 \pm 1602/6$ بر حسب Bq/kg است که از مقادیر به دست آمده در این پژوهش بیشتر است (۱۸).

نتایج محاسبات شاخص‌های خطرپذیری خارجی (H_{ex}) و داخلی (H_{in}) در نمونه‌های سنگ‌های آذرین به ترتیب از $0/14$ تا $0/57$ و $0/21$ تا $0/71$ و برای نمونه‌های تراورتن به ترتیب از $0/16$ تا $11/3$ و $0/28$ تا $22/50$ به دست آمد که برای نمونه $T1$ و $T4$ از یک بیشتر است و استفاده از آن‌ها به عنوان مصالح ساختمانی از نقطه نظر سلامتی ساکنین مجاز نمی‌باشد و می‌بایست تحت مقررات و قواعد خاصی به کار برده شوند (۱۴). این سنگ‌ها در نزدیکی دهانه چشمه‌های آب گرم شفا و سودا قرار دارند و در اثر رسوب نمک‌های رادیوم دارای پرتوزایی بسیار بالایی می‌باشند و در حال حاضر از آن‌ها بهره برداری نمی‌شود. متأسفانه سنگ‌های تراورتن و گرانیت بدون مطالعات پرتوشناختی در منازل مسکونی و ساختمان‌های اداری در قسمت‌های داخلی و خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرند که بعضاً از نقطه نظر سلامتی استفاده کنندگان مضر می‌باشند. سنگ‌های تراورتن جزء سنگ‌های رسوبی بوده و رادیوم به علت محلول شدن نمک‌های آن در آب از منطقه خارج می‌گردد و به طور کلی این نوع سنگ‌ها دارای پرتوزایی خیلی کمی می‌باشند در این موارد به دلیل نزدیک بودن به دهانه چشمه‌ها مقدار رادیوم به Bq/kg $13/09 \pm 4139/50$ رسیده است (۱۹). مقدار دز جذبی در هوا در ارتفاع یک متری برای نمونه‌های گرانیتی از $25/70$ تا 108 و برای نمونه‌های تراورتن به ترتیب در محدوده $26/10$ تا $1790/00$ nGy/h تغییر می‌کند و مقدار میانگین برای نمونه‌های گرانیتی و تراورتن به استثنای $T1$ و $T4$ ترتیب برابر $29/30$ و $54/28$ بر حسب nGy/h به دست آمد که برای نمونه‌های گرانیت خیلی نزدیک به میانگین جهانی و برای نمونه‌های $T1$ و $T4$ خیلی بیشتر از آن می‌باشد. بنابر این منطقه اطراف دهانه‌های چشمه‌های آب گرم محلات از جمله

مناطق با پرتوزایی بالا محسوب می‌شود. که مقدار دز سالیانه برای دو چشمه شفا و سودا به ترتیب معادل $15/70$ و $11/30$ بر حسب mGy/y می‌باشد. نتایج دز موثر جذبی سالیانه خارجی و داخلی در جدول ۳ نشان داده شده است. مقادیر دز موثر سالیانه داخلی و خارجی برای نمونه سنگ‌های گرانیتی و نمونه‌های تراورتن $T2$ و $T3$ به ترتیب در محدوده $0/15$ تا $0/65$ و $0/04$ تا $0/16$ بر حسب mSv/y تغییر می‌کند، که برای تمام نمونه‌ها به استثنای $T1$ و $T4$ از یک میلی‌سیورت در سال کمتر است. بنابر این استفاده از آن‌ها به عنوان سنگ‌های تزئینی خطری برای سلامتی افراد ندارد. ولی در مورد سنگ‌های تراورتن $T1$ و $T4$ از یک mSv/y تجاوز می‌کند، بنابر این استفاده از این سنگ‌ها در فضای داخلی مجاز نمی‌باشد و در فضای خارجی نیز می‌بایست تحت مقررات خاص قرار گیرد (۱۴). مقادیر AGDE برای نمونه‌های گرانیت و تراورتن بدون احتساب $T1$ و $T4$ به ترتیب در محدوده $0/20$ تا $0/76$ و $0/18$ تا $0/22$ بر حسب mSv/y تغییر می‌کند. مقدار میانگین برای نمونه‌های مذکور به ترتیب برابر $0/36$ و $0/20$ به دست آمد. که در مقایسه با مطالعات انجام شده در شهر ریزه کشور ترکیه (۵۵/۰) و صحرای شرقی کشور مصر (۲/۳۴) نشان می‌دهد که در این منطقه کمتر می‌باشد ولی در مورد $T1$ و $T4$ به علت نشست نمک‌های رادیوم به ترتیب برابر $12/90$ و $9/35$ است که به مراتب در سطح بالاتری قرار دارند (۱۶). مقدار ELCR برای سنگ‌های آذرین در محدوده $10^{-3} \times 0/11$ تا $0/46$ و برای نمونه‌های تراورتن به استثنای $T1$ و $T4$ بین $10^{-3} \times 0/11$ تا $0/14$ متغیر است و برای نمونه‌های $T1$ و $T4$ به ترتیب مقادیر $10^{-3} \times 12/90$ و $9/35 \times 10^{-3}$ به دست آمد که به طور استثنایی خیلی بیشتر از حداکثر مقدار مجاز می‌باشند. مقدار میانگین ELCR برای بقیه نمونه‌های تراورتن و سنگ‌های آذرین به ترتیب برابر $10^{-3} \times 0/12$ و $10^{-3} \times 0/23$ که در حد مرتبه میانگین جهانی ($10^{-3} \times 0/29$) است. حد اکثر مقدار مجاز ELCR برابر 10^{-3} است که برای دو نمونه از سنگ‌های تراورتن از این مقدار تجاوز می‌کند (۱۸). مقدار ELCR در تأمیل کشور هندوستان و کیرکلاری کشور ترکیه به ترتیب با

from some Indian cities determined by fission track analysis. Radiation Measurements, 1996; 26(5):683-7.

3. Wedepohl KH. The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995; 59:1217-39.

4. Fireston BR, Shirley SV, Baglin MC, Frank Chu SY, and Zipkin J, The eighth Edition of Table of Isotopes. 1996; CD-ROM, John Wiley & Sons Inc.

5. Broekmans MATM, Godfrey-Smith DI. The origin, destruction and restoration of color in Egyptian travertine, Archaeometry, 2007; 49(3): 421-36.

6. Beitollahi M, Ghiassi-Nejad M, Esmali A, Dunker R. Radiological studies in the hot spring region of Mahallat, Central Iran. Radiat Prot Dosimetry. 2007; 123(4):505-8.

7. IAEA, Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1989; Technical Report No 295:22.

8. International Atomic Energy Agency, Collection and preparation of bottom sediment sample for analysis of radionuclides an trace element, IAEA-TECDOC-1360, IAEA, VIENNA, 2003.

9. Aziz A, International Atomic Energy Agency, Vienna. Methods of Low-Level Counting and Spectrometry Symposium. Berlin. 1981; 221

10. Gilmore GR. Practical Gamma-ray Spectrometry. 2nd Edition, Nuclear Training Services Ltd Warrington, UK, 2008; ISBN: 978-0-470-86196-7

11. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Exposure from natural sources of radiation, United Nations publication sales No. 10.IX.3. 2008.

12. Ahmed NK, Abbady A, El-arabi AM, Michel R, El-Kamel AH, E.abbady AG. Comparative study of the natural Radioactivity of some selected rocks from Egypt and Germany. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2006; 44: 209-215.

13. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of

میانگین 0.7×10^{-3} و 0.5×10^{-3} گزارش شده است که در مقایسه با نتایج این پژوهش بیشتر می‌باشد (۱۹-۲۰).

مقدار ELCR برای نمونه‌های آب از مرتبه 10^{-5} می‌باشد که بسیار ناچیز است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سنگ‌های گرانیت و تراورتن در منطقه‌ای به وسعت ۳۰۰ هکتار مورد بررسی قرار گرفتند. برای این سنگ‌ها با استفاده روش بیناب‌نگاری گاما که یکی از روش‌های آنالیز با دقت بالا می‌باشد مقدار پرتوزایی تعیین گردید. برای نمونه‌های گرانیتی و تراورتن به استثنای T1 و T4 مقدار شاخص‌های خطرپذیری خارجی و داخلی، ELCR و دز جذبی از مقدار مجاز تجاوز نمی‌کند. همین شاخص‌ها برای نمونه‌های آب در سطح خیلی کمی قرار دارند. خطر ابتلا به سرطان در طول عمر برای نمونه‌های گرانیتی در سطح میانگین جهانی است و تنها برای دو نمونه سنگ تراورتن که از نزدیکی دهانه چشمه‌ها برداشت شده است در حد خطرناکی است و در صورتی که این سنگ‌ها به عنوان مواد اولیه و یا سنگ‌های تزئینی مورد استفاده قرار گیرند می‌بایست قوانین و مقررات ویژه مربوط به آنها رعایت گردد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق توسط معاونت پژوهشی دانشگاه اراک تأمین مالی گردیده است بنابر این نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از معاونت مذکور و هم‌چنین کارکنان آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی اراک کمال سپاس‌گزاری را داشته باشند.

منابع

1. Diab HM, Nouh SA, Hamdy A, EL-Fiki SA. Evaluation of natural radioactivity in a cultivated area around a fertilizer factory. J. Nucl. and Radiation Phys, 2008; 3: 53-62.
2. Singh P, Rana N, Azam A, Naqvi A, Srivastava D. Levels of uranium in waters

- ionizing radiation. New York: United Nations; 2000.
14. EC. European Commission Report on Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112; 1999.
15. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. New York: United Nations; 1988.
16. Turhan S, Baykan UN, Sen K. Measurement of the natural radioactivity in building materials used in Ankara and assessment of external dose ,Journal of Radiological Protection. 2008; 28(1):83-91.
17. ICRP Publication 119. Compendium of dose coefficient based on ICRP Publication 60, 2012; 41(1).
18. Pourimani R, Ghahri R, Zare MR. Natural radioactivity concentrations in Alvand granitic rocks in Hamadan, Iran, Radiation Protection and Environment ,2014; 37(3): 132-42. |
19. Pourimani R, Ghorbani R, The relationship between the radioactivity of rocks and their formation. 16th Iranian Nuclear Conference, Gheshm, 18.Feb.2009; 509-13
20. Patra A, Mohapatra S, Sahoo S, Lenka P, Dubey J, Tripathi R, et al. Age-dependent dose and health risk due to intake of uranium in drinking water from Jaduguda, India. Radiation protection dosimetry. 2013; 155(2): 210-16.
21. Ravisankar R, Rajalakshmi A, Eswaran P, Gajendrian V, Meenakshisundram V. Radioactivity levels in soils of salt field area Kelambakkam, Tamil Nadu, India. Nucl Sci Tech 2007; 18: 372-5.
22. Taskin H, Karavus M, Ay P, Topuzoglu A, Hidiroglu S, Karahan G. Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to the gamma radioactivity in Kirklareli. Turkey. J Environ Radioact 2009;100: 49-53.