

تجزیه و تحلیل الگوی انتشار عناصر پرتوزای طبیعی و مصنوعی در حوضه آبریز رود قره‌سو در خلیج گرگان، شمال ایران

سید محسن مرتضوی شاهرودی و رضا پورایمانی*

دانشگاه اراک، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، اراک

پست الکترونیکی: r-pourimani@araku.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۸/۱۶)

چکیده

دانش الگوی توزیع و انتشار عناصر پرتوزای طبیعی و مصنوعی و سطح تابش آنها در محیط زیست برای ارزیابی تأثیرات آن بر سلامتی انسان‌ها و موجودات زنده بسیار مهم است. در این پژوهش، فعالیت ویژه عناصر پرتوزای طبیعی و مصنوعی برای ۳۰ نمونه جمع‌آوری شده از رسوبات بالادست و دهانه خروجی رود قره‌سو به خلیج گرگان و همچنین رسوبات قسمت شرقی خلیج گرگان با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی اندازه‌گیری و نقشه توزیع آنها با استفاده از نرم‌افزار سرفر و GIS ترسیم شد. فعالیت ویژه ^{226}Ra ، ^{232}Th ، ^{40}K و ^{137}Cs به ترتیب از ۸/۸۰ تا ۳۱/۹۲، از ۱۱/۱۶ تا ۴۳/۱۹، از ۱۸۳/۷۷ تا ۵۶۲/۸۸ و از ۰/۸۳ تا ۱۲/۷۲ بر حسب Bq/kg به دست آمد. در بالادست سرچشمه رود قره‌سو، میانگین غلظت ^{226}Ra ، ^{232}Th ، ^{40}K و ^{137}Cs در نمونه‌های خاک کنار رود قره‌سو بیشتر از رسوبات کف این رودخانه بود که نشان دهنده شستشوی رسوبات و حمل عناصر پرتوزا توسط جریان آب و انتقال این عناصر به نقاط پایین‌تر است. در دهانه رود قره‌سو و خلیج گرگان، الگوهای توزیع ^{232}Th و ^{40}K تقریباً مشابه یکدیگر هستند و بالاترین غلظت عناصر ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K مربوط به رسوبات دهانه رود قره‌سو است. غلظت ^{137}Cs در دهانه رود قره‌سو کمترین مقدار را دارد و با فاصله گرفتن از دهانه به سمت قسمت‌های میانی خلیج گرگان بر غلظت آن افزوده می‌شود که این الگوی انتشار نشان دهنده حرکت پذیری بالا و تمایل به رسوب‌گذاری در نقاط آرام‌تر برای ^{137}Cs است. مقادیر اندازه‌گیری شده برای کمیت‌های پرتوشناختی و شاخص‌های خطرپذیری ناشی از تابش‌های هسته‌ای در این پژوهش در محدوده مجاز هستند و میزان تابش‌های هسته‌ای موجود، سلامتی ساکنین منطقه را تهدید نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: پرتوزایی، الگوی انتشار، ^{137}Cs ، خلیج گرگان، رود قره‌سو

۱. مقدمه

است [۱]. حدود ۸۷٪ از کل دزهای دریافتی توسط اکثر مردم از ویژه هسته‌های پرتوزا با منشأ طبیعی است که می‌تواند منجر به سرطان یا ناهنجاری‌های ژنتیکی شود [۲]. تابش یونیزه کننده

آگاهی از نحوه توزیع هسته‌های پرتوزا و میزان تابش‌های هسته‌ای در محیط برای ارزیابی تأثیرات آن بر سلامت انسان بسیار مهم

محیطی می‌شود [۱۰]. آلودگی ناشی از انتشار مواد پرتوزا در خاک، سنگ‌ها و محیط‌های آبی امروزه مهم است؛ زیرا مقدار آنها تأثیر به سزایی بر وضعیت محیط زیست و موجودات زنده دارد. برخی از این آلاینده‌ها می‌توانند از نقاط بالادست کوهستانی توسط جریان آب به تالاب‌ها و نقاط پایین دست منتقل شده و تبدیل به رسوب شوند [۱۱]. رسوب نقش یک مرکز مهاجرت برای انتقال عناصر پرتوزا به سیستم‌های بیولوژیکی را بازی می‌کند که یک شاخص اساسی آلودگی پرتوشناختی در محیط است [۱۲]. برای کنترل اثرات احتمالی پرتوزایی طبیعی و مصنوعی بر سلامت انسان، اندازه‌گیری دقیق غلظت عناصر پرتوزا در محیط ضروری است. این مطالعه با هدف تعیین فعالیت ویژه عناصر پرتوزا در رسوبات سرچشمه رودخانه قره‌سو در منطقه درازنو در شمال ایران، در کوه‌های استان گلستان و همچنین رسوبات دهانه ورودی این رود به ضلع شرقی خلیج گرگان در روستای قره‌سو و رسوبات قسمت شرقی خلیج گرگان در مقابل مصب رودخانه قره‌سو با طیف سنجی پرتو گاما با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیمی (${}^7\text{HPGe}$) انجام شد. نقشه‌های توزیع عناصر پرتوزا با استفاده از نرم‌افزارهای GIS ۱۰/۳ و سرفر^۳ رسم شدند [۱۳] و [۱۴]. علاوه بر این، کمیت‌های پرتوشناختی مانند فعالیت معادل رادیوم (${}^4\text{Ra}_{\text{eq}}$)، میزان دز جذب شده در هوا در ارتفاع یک متری (${}^5\text{D}$)، دز مؤثر سالانه معادل (AEDE)، خطر ابتلا به سرطان در طول عمر (ELCR)، دز معادل سالانه دریافتی توسط غدد (AGDE)، شاخص‌های خطرپذیری خارجی و داخلی (${}^9\text{Hex}$ و ${}^1\text{Hin}$) و شاخص گاما (${}^{11}\text{I}\gamma$) محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت.

می‌تواند از هسته‌های پرتوزای طبیعی و مصنوعی ناشی شود [۳]. بسیاری از ویژه هسته‌های پرتوزای طبیعی در پوسته زمین یافت می‌شوند، درحالی‌که برخی دیگر از بهمکنش پرتوهای کیهانی با مواد موجود در پوسته زمین به وجود می‌آیند [۴]. سری اورانیوم و توریم و دختران پرتوزای آنها و همچنین ${}^4\text{K}$ رایج‌ترین ویژه هسته‌های پرتوزای طبیعی هستند. پرتوزایی طبیعی در خاک و سنگ در هر منطقه از جهان بسته به ویژگی‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی آن منطقه با مقادیر مختلف وجود دارد [۱]. ویژه هسته‌های پرتوزای طبیعی به عنوان عناصر کمیاب در شبکه بلوری مواد معدنی وجود دارند و در رسوبات یافت می‌شوند و فعالیت آنها بستگی به نوع ماده معدنی دارد. مواد پرتوزای طبیعی (NORMs) در خاک‌ها و رسوبات می‌تواند یک خطر بالقوه برای سلامتی باشد [۵]. بر اساس تحقیقات انجام شده، مقدار متوسط اورانیوم، توریم و پتاسیم در پوسته زمین به ترتیب ۲/۸، ۹/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲/۸ درصد برآورد شده است [۳]. انواع مختلف سنگ‌ها ممکن است تحت تأثیر فرایندهای هوازدگی و فرسایش قرار گیرند و این پدیده باعث انتقال عناصر پرتوزا از این سنگ‌ها توسط جریان آب به نقاط دیگر در پایین دست و محیط دریایی می‌شود. غلظت عناصر پرتوزای موجود در رسوبات می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد سطح آلودگی ژئوشیمیایی ارائه دهد [۶]. علاوه بر عناصر پرتوزای طبیعی، عناصر پرتوزای مصنوعی تولید شده توسط فرایندهای انسانی نیز سطح پرتوزایی را در محیط افزایش می‌دهند [۷]. عناصر پرتوزای طبیعی از سری اورانیوم و توریم و ${}^4\text{K}$ و عناصر پرتوزای مصنوعی مانند ${}^{137}\text{Cs}$ ، ${}^9\text{Sr}$ و ${}^{239+240}\text{Pu}$ اصلی‌ترین عناصر پرتوزای با نیمه‌عمر طولانی مدت هستند که در حال حاضر در محیط زیست وجود دارند و در دریاها منتشر شده‌اند [۸]. ویژه هسته‌های پرتوزای ${}^{137}\text{Cs}$ و ${}^9\text{Sr}$ به دلیل دارا بودن نیمه‌عمر طولانی اهمیت ویژه‌ای دارند [۹]. علاوه بر این، سایر فعالیت‌های دیگر انسانی مانند استخراج معادن، تولید و مصرف کودهای فسفاته، احتراق زغال‌سنگ، تولید سیمان، جاده‌سازی، دفع زباله‌های شهری و موارد دیگر باعث افزایش غلظت مواد پرتوزا در محیط شده که منجر به آلودگی زیست

۲ High Purity Germanium Detector

۳ Surfer

۴ Radium Equivalent activity

۵ Dose

۶ Annual Effective Dose Equivalent

۷ Excess Life Cancer Risk

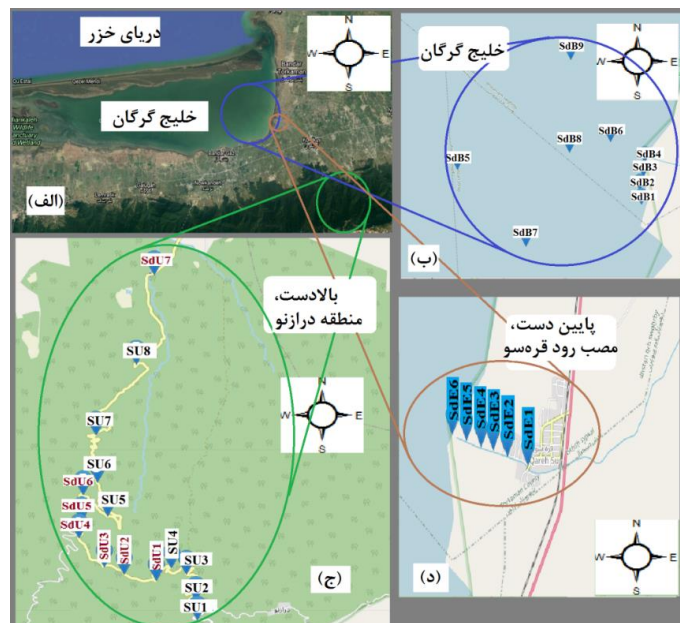
۸ Annual Gonadal Dose Equivalent

۹ External Hazard Index

۱۰ Internal Hazard Index

۱۱ Gamma index

۱ Naturally-Occurring Radioactive Materials



شکل ۱. (الف) نمای کلی منطقه مورد مطالعه، (ب) نقاط نمونه برداری در قسمت شرقی خلیج گرگان، (ج) منطقه درازنو در بالادست و (د) انتهای رودخانه قره‌سو واقع در روستای قره‌سو در ضلع شرقی خلیج گرگان.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل سه قسمت است. قسمت بالادستی مربوط به سرچشمه رود قره‌سو در منطقه درازنو واقع در ارتفاعات رشته کوه البرز در جنوب استان گلستان با مختصات جغرافیایی $36/68$ درجه شمالی و $54/77$ درجه شرقی است. قسمت‌های پایین‌دستی شامل انتهای رودخانه قره‌سو در قسمت ورودی آن به خلیج گرگان و همچنین قسمت شرقی این خلیج در مجاورت دهانه رود قره‌سو با مختصات جغرافیایی $36/83$ درجه شمالی و $54/03$ درجه شرقی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

رود قره‌سو منبع اصلی آب شیرین خلیج گرگان است. متوسط میزان جریان آب از رود قره‌سو به خلیج گرگان 53 میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است [۱۵]. حوضه آبریز قره‌سو شامل مجموعه‌ای از شاخه‌های کوچک موازی است که از ارتفاعات جنوبی گرگان و کردکوی سرچشمه می‌گیرند. خلیج گرگان در ساحل شرقی دریای خزر واقع شده است و مساحتی بالغ بر 1756 کیلومتر مربع دارد. طول رودخانه اصلی

قره‌سو در حدود 100 کیلومتر است. رود قره‌سو در محل روستای قره‌سو به خلیج گرگان می‌پیوندد و در ضلع شرقی این خلیج یک دلتای کوچک را تشکیل می‌دهد و ذرات معلق در آب ورودی از این رودخانه یکی از عوامل کاهش عمق خلیج گرگان است. با توجه به شرایط آب و هوایی این منطقه، مطالعات آب شناسی نشان داده است که حوضه آبریز قره‌سو رژیم بارانی-برفی دارد. عمده فعالیت مردم این منطقه کشاورزی، دامداری و ماهی‌گیری است که می‌تواند باعث آلودگی آب این رودخانه شود. رودخانه قره‌سو پساب‌های صنعتی دو شهرک صنعتی در شهرستان‌های کردکوی و بندرترکمن را به داخل خلیج هدایت می‌کند. پساب‌های صنعتی منطقه حاوی جامدات محلول و معلق هستند که با ورود به آب‌های سطحی وارد خلیج گرگان شده و باعث ایجاد آلودگی می‌شوند [۱۶].

۲.۲. نمونه‌برداری و مراحل نمونه‌سازی

در این پژوهش، 30 نمونه شامل 7 نمونه از رسوب رودخانه قره‌سو و 8 نمونه از خاک اطراف این رودخانه در منطقه

مرکز یک حفاظ سربی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر با یک لایه درونی مسی به ضخامت ۲ میلی‌متر قرار داده شد. پرتوهای نرم کیهانی شامل فوتون‌های کم‌انرژی و الکترون‌ها و پرتو ایکس تولیدی توسط سرب ۷۳/۹ keV به وسیله این حفاظ به سطح بسیار پایینی کاهش می‌یابند [۱۹]. تصحیح تابش زمینه با استفاده از طیف ثبت شده برای ظرف خالی تحت شرایط یکسان صورت گرفت [۲۰]. نمونه‌های استاندارد ۱-RGU، ۱-RGTh و ۱-RGK که به عنوان ماده مرجع توسط آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تهیه شده‌اند، برای درجه بندی انرژی و منحنی بازدهی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بازدهی مطلق آشکارساز (ε) بر حسب درصد با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد [۱۷].

$$\varepsilon(\%) = \frac{N_i}{Atc \times P_n(E_i) \times t} \times 100, \quad (1)$$

در این رابطه، N_i شمارش خالص زیر قله تمام انرژی متناظر با انرژی E_i ، ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزای موجود در ظرف استاندارد برحسب بکرل، $P_n(E_i)$ احتمال انتشار فوتون گاما با انرژی E_i به ازای هر واپاشی برحسب درصد و T زمان طیف‌گیری از نمونه برحسب ثانیه است. با اندازه‌گیری بازدهی آشکارساز برای انرژی‌های گامای مختلف، یک معادله ریاضی درجه بندی انرژی تعیین شد. بر اساس مقدار بازدهی، فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزا با استفاده از معادله (۲) تعیین شد [۲۱].

$$Act = \frac{Net Area}{\varepsilon(B.R\%) \cdot t \cdot m} \times 100, \quad (2)$$

در این معادله، Act فعالیت نمونه بر حسب بکرل بر کیلوگرم، $Net Area$ سطح زیر قله تمام انرژی متناظر با انرژی خاص، ε بازدهی آشکارساز در آن انرژی، $B.R$ نسبت انشعابی برحسب درصد، t زمان بیناب‌نگاری از نمونه برحسب ثانیه و m جرم نمونه برحسب کیلوگرم است. برای تعیین ویژه‌فعالیت ^{226}Ra در نمونه‌ها، از پرتو گامای ^{214}Pb با انرژی ۳۵۱/۹۳ keV و پرتو گامای ^{214}Bi با انرژی ۶۰۹/۳۱ keV استفاده شده است. همچنین برای تعیین ویژه‌فعالیت ^{232}Th از دو خط گامای ^{228}Ac ، یکی با انرژی ۹۱۱/۲۱ keV با احتمال واپاشی ۲۶/۶٪ و دیگری با انرژی ۹۶۸/۹۷ keV با احتمال واپاشی ۱۷/۴٪ استفاده

بالادست، ۶ نمونه از رسوبات انتهای رود قره‌سو در محل تلاقی این رود با خلیج گرگان و ۹ نمونه از رسوب کف خلیج گرگان در نزدیکی دهانه رودخانه قره‌سو جمع‌آوری شد. همه نمونه‌ها از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری گرفته شد. نمونه‌برداری از رسوب کف خلیج با غواصی صورت گرفت. نمونه‌گیری به شکل ترکیبی از مدل تصادفی و تجربی انجام شد. این نمونه‌ها با توجه به محل نمونه برداری کدگذاری شدند. مختصات جغرافیایی و کد نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده و در شکل ۱ نشان داده شده است.

تمام نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت به منظور ازدست دادن رطوبت احتمالی خشک شدند. برای به‌دست آوردن نمونه‌های همگن، نمونه‌های خشک‌شده به صورت پودر ریز آسیاب و از الک ۰/۵۰۸ میلی‌متری عبور داده شدند [۱۷]. سپس نمونه‌ها در ظروف پلی اتیلن و با وزن خالص ۲۵۵ گرم بسته‌بندی و به منظور برقراری تعادل بین هسته‌های ^{226}Ra و ^{222}Rn و ممانعت از خروج گاز رادن کاملاً آب‌بندی شدند. بعد از گذشت مدت ۵۰ روز از هر یک از نمونه‌ها به مدت یک شبانه روز (۸۶۴۰۰ ثانیه) طیف‌گیری به عمل آمد [۱۸].

۳.۲. بیناب‌نگاری گاما

طیف نمونه‌ها با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe) هم‌محور نوع P مدل BSI ۳۰۱۹۵-GCD ساخت شرکت بالتیک ساینیتیفیک اینسترومنت^۱ (Latvia-۰۰۵) BSI با قدرت تفکیک انرژی ۱/۹۵ کیلو الکترون‌ولت برای خط گامای ^{60}Co و ولتاژ کاری ۱۳۳۲/۵۲۰ کیلو الکترون‌ولت مربوط به ^{60}Co و ولتاژ کاری ۳۰۰۰ ولت ثبت شد. درجه بندی انرژی و بازدهی طیف‌سنجی گاما با استفاده از چشمه استاندارد مخلوط حاوی ویژه هسته‌های پرتوزای ^{241}Am ، ^{152}Eu و ^{137}Cs با فعالیت مشخص انجام شد. طیف‌گیری با استفاده از نرم‌افزار IsrmBSI به عمل آمد. تجزیه و تحلیل طیف‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار ۳۲ EG&G Ortec Maestro II Gamma Vision محصول شرکت انجام شد. به‌منظور کاهش اثرات تابش زمینه، آشکارساز در

۱. Baltic Scientific Instrument LTD

جدول ۱. کد و مختصات جغرافیایی نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش.

کد نمونه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نوع نمونه و منطقه نمونه برداری
SU1	۵۴/۱۲۶۶۷	۳۶/۶۶۶۱۱	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU2	۵۴/۱۲۶۳۹	۳۶/۶۷۰۲۸	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU3	۵۴/۱۲۳۸۹	۳۶/۶۷۶۱۱	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU4	۵۴/۱۲۰۲۸	۳۶/۶۷۷۵۰	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU5	۵۴/۰۹۸۰۶	۳۶/۶۹۳۶۱	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU6	۵۴/۱۰۱۶۷	۳۶/۶۹۶۳۹	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU7	۵۴/۱۰۱۳۹	۳۶/۷۰۶۶۷	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SU8	۵۴/۱۱۱۳۹	۳۶/۷۲۲۲۲	خاک-کنار رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU1	۵۴/۱۱۶۳۹	۳۶/۶۷۴۷۲	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU2	۵۴/۱۰۸۳۳	۳۶/۶۷۶۱۱	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU3	۵۴/۱۰۳۳۳	۳۶/۶۷۷۷۸	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU4	۵۴/۰۹۶۹۴	۳۶/۶۸۴۱۷	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU5	۵۴/۰۹۷۷۸	۳۶/۶۸۷۷۸	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdU6	۵۴/۱۰۴۱۷	۳۶/۶۸۸۸۹	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdUV	۵۴/۱۱۵۸۳	۳۶/۷۴۱۹۴	رسوب-کف رودخانه-بالادست(درازنو)
SdE1	۵۴/۰۴۸۳۳	۳۶/۸۲۶۱۱	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdE2	۵۴/۰۴۵۰۰	۳۶/۸۲۶۹۴	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdE3	۵۴/۰۴۲۷۸	۳۶/۸۲۷۵۰	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdE4	۵۴/۰۴۰۸۳	۳۶/۸۲۷۷۸	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdE5	۵۴/۰۳۷۵۰	۳۶/۸۲۸۰۶	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdE6	۵۴/۰۳۶۶۷	۳۶/۸۲۸۶۱	رسوب-کف رودخانه-پایین دست(مصب)
SdB1	۵۴/۰۳۴۱۷	۳۶/۸۲۵۲۸	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB2	۵۴/۰۳۴۴۴	۳۶/۸۲۶۳۹	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB.	۵۴/۰۳۵۵۶	۳۶/۸۲۶۹۴	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB4	۵۴/۰۳۵۸۳	۳۶/۸۲۷۷۸	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB5	۵۳/۹۹۷۷۸	۳۶/۸۲۶۶۷	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB6	۵۴/۰۲۸۸۹	۳۶/۸۳۱۱۱	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB7	۵۴/۰۱۱۶۷	۳۶/۸۱۴۱۷	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB8	۵۴/۰۲۰۵۶	۳۶/۸۲۹۴۴	رسوب-کف خلیج گرگان
SdB9	۵۴/۰۲۰۸۳	۳۶/۸۴۴۴۴	رسوب-کف خلیج گرگان

S: خاک(Soil)، Sd: رسوب(Sediment)، U: بالادست(Upstream)، E: مصب(Estuary)، B: خلیج(Bay).

شده است. ویژه‌فعالیت‌های ^{40}K و ^{137}Cs با استفاده از خطوط گامای این هسته‌ها به ترتیب با انرژی‌های $1460/70\text{ keV}$ و $661/66\text{ keV}$ تعیین شدند [۱۷]. طیف پرتو گامای ثبت شده برای تمامی نمونه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و

$$AEDE_{outdoor} (mSv y^{-1}) = Dose\ rate (nGy h^{-1}) \times 10^{-6} (Sv Gy^{-1}) \times 0.7 \times 0.2 \times 0.8766 (hy^{-1}) \quad (6)$$

در این روابط، عدد ۸۷۶۶ مدت زمان قرارگیری در معرض پرتو در طول یک سال، ۰/۸ و ۰/۲ به ترتیب ضریب قرارگیری در معرض پرتو در فضای داخلی و خارجی محل زندگی و عدد ۰/۷ ضریب تبدیل دز جذبی در هوا به دز مؤثر است. واحد آهنگ دز مؤثر سالیانه میلی سیورت بر سال است [۱].

۲.۴.۴. خطر ابتلا به سرطان در طول عمر (ELCR)

برای محاسبه خطر ابتلا به سرطان در طول زندگی در اثر تابش های گامای محیطی از رابطه (۷) استفاده می شود [۱].

$$ELCR_{in-out} (mSv / y) = AEDE_{in-out} (mSv / y) \times DL(y) \times RF(1 / Sv) \quad (7)$$

در این رابطه، AEDE دز معادل مؤثر سالانه (داخلی - خارجی)، DL طول عمر متوسط برابر ۷۰ سال و RF ضریب خطرپذیری برابر ۰/۵ است [۲۴].

۲.۴.۵. شاخص های خطرپذیری خارجی (H_{ex}) و

داخلی (H_{in})

برای تعیین میزان پرتوگیری داخلی و خارجی ناشی از پرتوهای گاما و استنشاق گاز رادن از معیاری به نام شاخص خطرپذیری خارجی (H_{ex}) و شاخص خطرپذیری داخلی (H_{in}) استفاده می شود. مقدار این شاخص ها برای ناچیز بودن مخاطرات و ایمن بودن محیط، باید کمتر از یک باشد. این شاخص ها طبق روابط (۸) و (۹) محاسبه می شود [۲۵].

$$H_{in} = (A_{Ra} / 185 + A_{Th} / 259 + A_K / 4810) \leq 1, \quad (8)$$

$$H_{ext} = (A_{Ra} / 370 + A_{Th} / 259 + A_K / 4810) \leq 1, \quad (9)$$

۲.۴.۶. شاخص گاما (I_γ)

از این شاخص برای برآورد خطر تابش گامای مربوط به ویژه هسته های پرتوزای طبیعی موجود در نمونه خاک های مورد مطالعه، استفاده می شود و مقدار آن از رابطه (۱۰) به دست

فعالیت ویژه هسته های پرتوزا در نمونه ها با استفاده از نرم افزار GammaVision ۳۲ EG&G Ortec محاسبه شد.

۲.۴.۲. محاسبه کمیت های پرتوشناختی و شاخص های

خطرپذیری

۲.۴.۱. فعالیت معادل رادیوم (Ra_{eq})

۹۸/۵ درصد از اثرات پرتوشناختی سری اورانیوم مربوط به ^{226}Ra و ویژه هسته های پرتوزای دختر آن است، بنابراین برای تعیین سطح پرتوزایی در محیط زیست و امکان مقایسه نمونه ها، کمیتی به نام فعالیت ویژه معادل رادیوم (Ra_{eq}) که بیانگر اثرات پرتوشناختی ^{226}Ra و ^{232}Th و دختران آنها و ^{40}K است تعریف می شود که این کمیت طبق رابطه (۳) محاسبه می شود [۱].

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1/43 A_{Th} + 0.017 A_K, \quad (3)$$

ضرایب معادله بر اساس این فرض است که فعالیت ^{370}Bq بکرل بر کیلوگرم برای ^{226}Ra ، $259 Bq$ بکرل بر کیلوگرم برای ^{232}Th و $4810 Bq$ بکرل بر کیلوگرم برای ^{40}K نرخ دز گامای یکسانی را ارائه می دهند [۲۲].

۲.۴.۲. آهنگ دز جذبی (D)

آهنگ دز جذبی در هوا ناشی از پرتوهای گامای گسیل شده از ویژه هسته های پرتوزای موجود در خاک، سنگ و آب در ارتفاع یک متر بالاتر از سطح زمین با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود [۲۳].

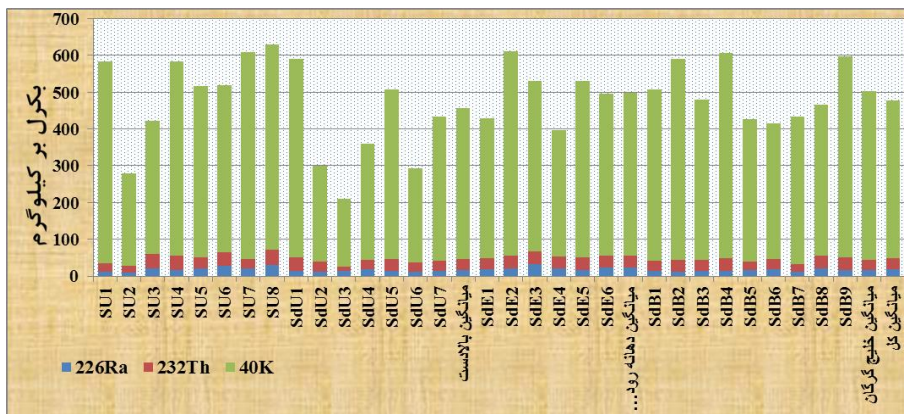
$$D (nGy h^{-1}) = 0.427 A_{Ra} + 0.662 A_{Th} + 0.0432 A_K, \quad (4)$$

۲.۴.۳. آهنگ دز معادل مؤثر سالیانه داخلی و خارجی

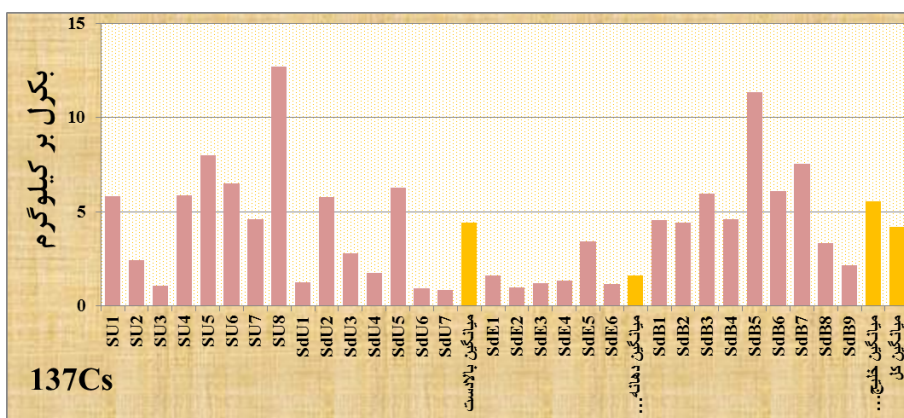
(AEDE)

با محاسبه مقادیر مربوط به آهنگ دز جذبی در هوا، آهنگ دز مؤثر سالیانه خارجی و داخلی دریافتی افراد ساکن در منطقه ناشی از پرتوهای گاما با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه شد [۱].

$$AEDE_{indoor} (mSv y^{-1}) = Dose\ rate (nGy h^{-1}) \times 10^{-6} (Sv Gy^{-1}) \times 0.7 \times 0.8 \times 0.8766 (hy^{-1}) \quad (5)$$



شکل ۲. نمودار فعالیت ویژه ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در نمونه‌های مورد مطالعه.



شکل ۳. نمودار فعالیت ویژه ^{137}Cs در نمونه‌های مورد مطالعه.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. فعالیت ویژه و کمیت‌های نتایج پرتوشناختی در

نمونه‌ها

نتایج اندازه‌گیری فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزا و فعالیت معادل رادیوم نمونه‌ها در شکل‌های ۲ تا ۴ و جدول ۲ و نتایج محاسبات کمیت‌های پرتوشناختی و شاخص‌های خطرپذیری در جدول ۳ درج شده‌اند.

فعالیت ویژه ^{226}Ra ، ^{232}Th ، ^{40}K و ^{137}Cs در همه نمونه‌ها به ترتیب از $8/80$ تا $31/92$ ، از $11/16$ تا $43/19$ ، از $183/77$ تا $562/88$ و از $0/83$ تا $12/72$ با میانگین به ترتیب $17/55$ ، $30/02$ ، $430/84$ و $4/21$ برحسب بکرل برکیلوگرم به دست آمد. مقادیر Ra_{eq} محاسبه شده برای نمونه‌های خاک و رسوب از $44/41$ ($SdU3$) تا $134/11$ ($SU8$) با میانگین $93/65$ بکرل برکیلوگرم محاسبه شد. میانگین

می‌آید. مقدار این کمیت نیز برای ایمن بودن محیط زیست باید کوچک‌تر از یک باشد [۲۲].

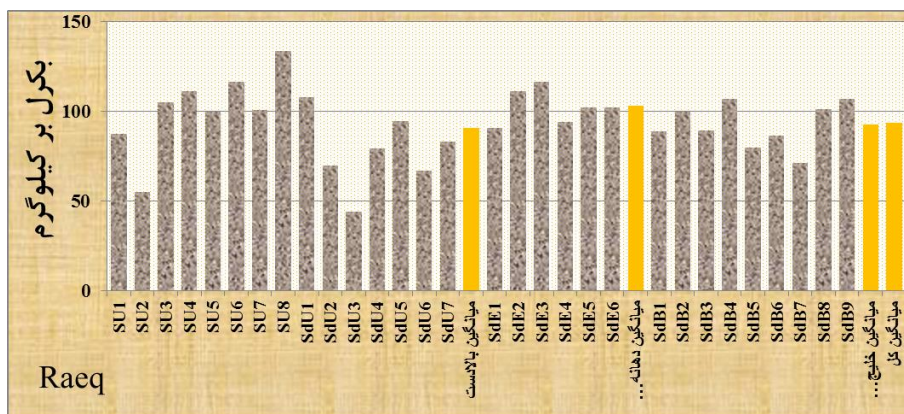
$$I\gamma = (0/00067A_{Ra} + 0/01A_{Th} + 0/00067A_K) \leq 1, \quad (10)$$

۲.۴.۷. دز معادل سالیانه غدد (AGDE)

یک دسته از اعضای بدن شامل غده تیروئید، ریه، مغز قرمز استخوان، سلول‌های سطح استخوان، بیضه‌ها و پستان توسط کمیته علمی سازمان ملل متحد در مورد تأثیر تابش‌های هسته‌ای (UNSCEAR) مورد مطالعه قرار گرفته است که بر طبق نظر این کمیته مقدار دز معادل سالیانه غدد مذکور از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱].

$$AGDE = 3/09A_{Ra} + 4/18A_{Th} + 0/314A_K \quad (11)$$

در روابط (۳) تا (۱۱) A_{Ra} ، A_{Th} و A_K به ترتیب فعالیت ویژه ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K برحسب بکرل برکیلوگرم هستند.



شکل ۴. نمودار فعالیت معادل رادیوم در نمونه‌های مورد مطالعه.

جدول ۲. نتایج اندازه‌گیری فعالیت ویژه هسته‌های پرتوزا و فعالیت معادل رادیوم بر حسب بکرل بر کیلوگرم.

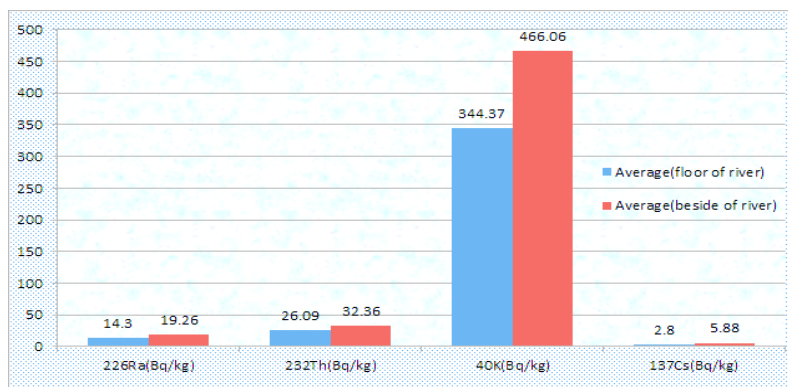
نام عنصر پرتوزا	منطقه نمونه مورد بررسی	میانگین	بیشترین	کمترین
رادیوم ۲۲۶	بالادست (درازنو)	۱۶/۹۵ ± ۱/۶۳	۲۹/۵۴ ± ۱/۷۷	۸/۸۰ ± ۱/۳۱
	پایین دست (دهانه رود قره سو)	۲۲/۲۹ ± ۱/۶۸	۳۱/۹۲ ± ۱/۷۰	۱۷/۰۵ ± ۱/۳۸
	خلیج گرگان	۱۵/۳۸ ± ۱/۴۶	۱۹/۸۰ ± ۲/۱۹	۱۱/۲۵ ± ۱/۲۲
	کل نمونه‌ها	۱۷/۵۵ ± ۱/۷۹	۳۱/۹۲ ± ۱/۷۰	۸/۸۰ ± ۱/۳۱
توریم ۲۳۲	بالادست (درازنو)	۲۹/۴۳ ± ۱/۹۰	۴۳/۱۹ ± ۱/۸۶	۱۱/۱۶ ± ۱/۶۷
	پایین دست (دهانه رود قره سو)	۳۲/۵۹ ± ۱/۶۰	۳۴/۲۵ ± ۱/۷۰	۲۹/۴۸ ± ۱/۴۲
	خلیج گرگان	۲۹/۲۸ ± ۱/۶۵	۳۵/۰۹ ± ۱/۶۱	۲۰/۵۹ ± ۱/۴۲
	کل نمونه‌ها	۳۰/۰۲ ± ۱/۷۷	۴۳/۱۹ ± ۱/۸۶	۱۱/۱۶ ± ۱/۶۷
پتاسیم ۴۰	بالادست (درازنو)	۴۰۹/۲۷ ± ۱۰/۸۹	۵۶۲/۸۸ ± ۱۳/۲۳	۱۸۳/۷۷ ± ۵/۶۶
	پایین دست (دهانه رود قره سو)	۴۴۴/۰۵ ± ۱۰/۹۴	۵۵۵/۷۰ ± ۱۲/۵۸	۳۴۲/۱۹ ± ۱۰/۴۱
	خلیج گرگان	۴۵۷/۹۷ ± ۱۱/۴۹	۵۵۸/۳۲ ± ۱۳/۳۳	۳۶۹/۰۰ ± ۸/۲۱
	کل نمونه‌ها	۴۳۰/۸۴ ± ۱۱/۰۸	۵۶۲/۸۸ ± ۱۳/۲۳	۱۸۳/۷۷ ± ۵/۶۶
سزیم ۱۳۷	بالادست (درازنو)	۴/۴۴ ± ۰/۳۱	۱۲/۷۲ ± ۰/۴۵	۰/۸۳ ± ۰/۲۴
	پایین دست (دهانه رود قره سو)	۱/۶۲ ± ۰/۲۶	۳/۴۴ ± ۰/۳۱	۰/۹۶ ± ۰/۲۴
	خلیج گرگان	۵/۵۵ ± ۰/۳۴	۱۱/۳۵ ± ۰/۴۱	۲/۱۵ ± ۰/۳۱
	کل نمونه‌ها	۴/۲۱ ± ۰/۳۱	۱۲/۷۲ ± ۰/۴۵	۰/۸۳ ± ۰/۲۴
فعالیت معادل رادیوم	بالادست (درازنو)	۹۰/۵۵	۱۳۴/۱۱	۴۴/۴۱
	پایین دست (دهانه رود قره سو)	۱۰۳/۰۸	۱۱۶/۷۳	۹۱/۱۰
	خلیج گرگان	۹۲/۵۳	۱۰۷/۰۵	۷۱/۵۹
	کل نمونه‌ها	۹۳/۶۵	۱۳۴/۱۱	۴۴/۴۱

ویژه برای ${}^{40}\text{K}$ اندکی بالاتر از مقدار میانگین جهانی مشاهده شد. مقدار میانگین جهانی برای ${}^{226}\text{Ra}$ ، ${}^{232}\text{Th}$ و ${}^{137}\text{Cs}$ به ترتیب ۳۵، ۴۰ و

فعالیت ویژه برای ${}^{226}\text{Ra}$ کمتر از مقدار متوسط جهانی و برای ${}^{232}\text{Th}$ تقریباً برابر مقدار متوسط جهانی به دست آمد، اما میانگین فعالیت

جدول ۳. نتایج محاسبات شاخص‌های خطرپذیری و کمیت‌های پرتوشناختی در نمونه‌های مورد مطالعه.

D (nGy/h)	AEDE _{out} (mSv/y)	AEDE _{in} (mSv/y)	ELCR _{out} ($\times 10^{-3}$)	ELCR _{in} ($\times 10^{-3}$)	AGDE (μ Sv/y)	I _γ	H _{ext}	H _{in}	کد نمونه
۴۲/۱۰	۰/۰۵۲	۰/۲۰۷	۰/۱۸۱	۰/۷۲۳	۳۰۶/۸۹	۰/۶۸۰	۰/۲۳۷	۰/۲۶۵	SU۱
۲۵/۵۷	۰/۰۳۱	۰/۱۲۶	۰/۱۱۰	۰/۴۳۹	۱۸۴/۶۳	۰/۴۱۴	۰/۱۴۹	۰/۱۷۲	SU۲
۴۷/۷۸	۰/۰۵۹	۰/۲۳۵	۰/۲۰۵	۰/۸۲۱	۳۴۲/۷۵	۰/۷۷۵	۰/۲۸۴	۰/۳۳۸	SU۳
۵۱/۹۹	۰/۰۶۴	۰/۲۵۵	۰/۲۲۳	۰/۸۹۳	۳۷۵/۸۰	۰/۸۴۲	۰/۳۰۱	۰/۳۴۷	SU۴
۴۶/۶۹	۰/۰۵۷	۰/۲۲۹	۰/۲۰۱	۰/۸۰۲	۳۳۷/۴۷	۰/۷۵۳	۰/۲۷۰	۰/۳۲۶	SU۵
۵۳/۷۱	۰/۰۶۶	۰/۲۶۴	۰/۲۳۱	۰/۹۲۳	۳۸۶/۵۷	۰/۸۶۷	۰/۳۱۶	۰/۳۸۹	SU۶
۴۷/۹۳	۰/۰۵۹	۰/۲۳۵	۰/۲۰۶	۰/۸۲۴	۳۴۸/۳۸	۰/۷۷۱	۰/۲۷۲	۰/۳۲۷	SU۷
۶۱/۹۳	۰/۰۷۶	۰/۳۰۴	۰/۲۶۶	۱/۰۶۴	۴۴۶/۳۷	۰/۹۹۹	۰/۳۶۲	۰/۴۴۲	SU۸
۵۰/۵۸	۰/۰۶۲	۰/۲۴۸	۰/۲۱۷	۰/۸۶۹	۳۶۶/۰۸	۰/۸۲۰	۰/۲۹۷	۰/۳۳۱	SdU۱
۳۲/۰۲	۰/۰۳۹	۰/۱۵۷	۰/۱۳۸	۰/۵۵۰	۲۳۰/۰۱	۰/۵۲۰	۰/۱۸۹	۰/۲۲۱	SdU۲
۲۰/۵۸	۰/۰۲۵	۰/۱۰۱	۰/۰۸۸	۰/۳۵۴	۱۴۸/۵۳	۰/۳۲۹	۰/۱۲۰	۰/۱۵۹	SdU۳
۳۶/۵۹	۰/۰۴۵	۰/۱۸۰	۰/۱۵۸	۰/۶۳۰	۲۶۴/۱۲	۰/۵۹۲	۰/۲۱۵	۰/۲۶۴	SdU۴
۴۴/۲۶	۰/۰۵۴	۰/۲۱۷	۰/۱۹۰	۰/۷۶۰	۳۲۰/۲۰	۰/۷۱۶	۰/۲۵۶	۰/۲۹۵	SdU۵
۳۰/۶۹	۰/۰۳۸	۰/۱۵۱	۰/۱۳۲	۰/۵۲۷	۲۲۰/۶۱	۰/۴۹۷	۰/۱۸۱	۰/۲۱۴	SdU۶
۳۸/۷۶	۰/۰۴۸	۰/۱۹۰	۰/۱۶۶	۰/۶۶۶	۲۸۰/۱۷	۰/۶۲۶	۰/۲۲۴	۰/۲۶۴	SdU۷
۴۲/۰۹	۰/۰۵۲	۰/۲۰۷	۰/۱۸۱	۰/۷۲۳	۳۰۳/۹۱	۰/۶۸۰	۰/۲۴۵	۰/۲۹۰	میانگین (بالادست)
۴۲/۰۹	۰/۰۵۲	۰/۲۰۷	۰/۱۸۱	۰/۷۲۳	۳۰۳/۴۰	۰/۶۷۹	۰/۲۴۶	۰/۲۹۹	SdE۱
۵۲/۲۴	۰/۰۶۴	۰/۲۵۶	۰/۲۲۴	۰/۸۹۸	۳۷۸/۳۷	۰/۸۴۲	۰/۳۰۱	۰/۳۶۰	SdE۲
۵۳/۸۴	۰/۰۶۶	۰/۲۶۴	۰/۲۳۱	۰/۹۲۵	۳۸۷/۹۱	۰/۸۶۶	۰/۳۱۵	۰/۴۰۲	SdE۳
۴۳/۰۵	۰/۰۵۳	۰/۲۱۱	۰/۱۸۵	۰/۷۴۰	۳۰۹/۲۵	۰/۶۹۶	۰/۲۵۴	۰/۳۱۰	SdE۴
۴۷/۷۹	۰/۰۵۹	۰/۲۳۵	۰/۲۰۵	۰/۸۲۱	۳۴۵/۳۳	۰/۷۷۳	۰/۲۷۷	۰/۳۲۳	SdE۵
۴۷/۵۳	۰/۰۵۸	۰/۲۳۳	۰/۲۰۴	۰/۸۱۷	۲۴۲/۸۹	۰/۷۶۷	۰/۲۷۷	۰/۳۳۸	SdE۶
۴۷/۷۶	۰/۰۵۹	۰/۲۳۴	۰/۲۰۵	۰/۸۲۱	۳۴۴/۵۳	۰/۷۷۱	۰/۲۷۸	۰/۳۳۹	میانگین (دهانه رود قره سو)
۴۱/۸۶	۰/۰۵۱	۰/۲۰۶	۰/۱۸۰	۰/۷۱۹	۳۰۳/۵۱	۰/۶۷۶	۰/۲۴۰	۰/۲۷۹	SdB۱
۴۷/۳۳	۰/۰۵۸	۰/۲۳۲	۰/۲۰۳	۰/۸۱۳	۳۴۳/۴۳	۰/۷۶۷	۰/۲۷۱	۰/۳۰۳	SdB۲
۴۱/۸۲	۰/۰۵۱	۰/۲۰۵	۰/۱۸۰	۰/۷۱۹	۳۰۲/۵۹	۰/۶۷۷	۰/۲۴۱	۰/۲۸۰	SdB۳
۵۰/۳۶	۰/۰۶۲	۰/۲۴۷	۰/۲۱۶	۰/۸۶۵	۳۶۴/۹۱	۰/۸۱۵	۰/۲۸۹	۰/۳۲۸	SdB۴
۳۷/۵۰	۰/۰۴۶	۰/۱۸۴	۰/۱۶۱	۰/۶۴۴	۲۷۱/۳۸	۰/۶۰۴	۰/۲۱۶	۰/۲۶۲	SdB۵
۴۰/۲۱	۰/۰۴۹	۰/۱۹۷	۰/۱۷۳	۰/۶۹۱	۲۹۰/۰۴	۰/۶۴۹	۰/۲۳۵	۰/۲۸۷	SdB۶
۳۳/۹۷	۰/۰۴۲	۰/۱۶۷	۰/۱۴۶	۰/۵۸۴	۲۴۶/۸۰	۰/۵۴۸	۰/۱۹۳	۰/۲۲۴	SdB۷
۴۶/۷۷	۰/۰۵۷	۰/۲۳۰	۰/۲۰۱	۰/۸۰۴	۳۳۶/۷۷	۰/۷۵۷	۰/۲۷۴	۰/۳۲۸	SdB۸
۵۰/۲۹	۰/۰۶۲	۰/۲۴۷	۰/۲۱۶	۰/۸۶۴	۳۶۴/۲۹	۰/۸۱۴	۰/۲۸۹	۰/۳۳۲	SdB۹
۴۳/۳۴	۰/۰۵۳	۰/۲۱۳	۰/۱۸۶	۰/۷۴۵	۳۱۳/۷۵	۰/۷۰۱	۰/۲۵۰	۰/۲۹۱	میانگین (خلیج گرگان)
۴۳/۶۰	۰/۰۵۴	۰/۲۱۴	۰/۱۸۷	۰/۷۴۹	۳۱۴/۹۸	۰/۷۰۴	۰/۲۵۳	۰/۳۰۰	میانگین کل



شکل ۵. مقایسه فعالیت عناصر پرتوزا بین نمونه‌های رسوبی کف و نمونه‌های خاک کنار آبراه در بالادست رودخانه قره‌سو.

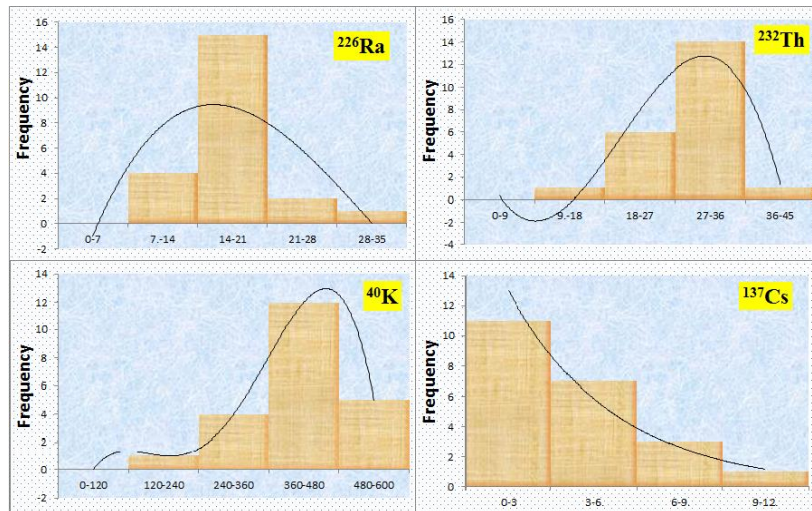
هم از نقاط بالادست از طریق جریان آب رودخانه قره‌سو به خلیج گرگان منتقل شده است و باعث افزایش غلظت این عنصر در رسوبات خلیج نسبت به مناطق بالادست شده است. شکل ۵ مقایسه میانگین فعالیت ویژه عناصر پرتوزا بین نمونه‌های خاک کنار مسیر آب (رنگ قرمز) و رسوبات کف رودخانه (رنگ آبی) را در نمونه‌های بالادست رود قره‌سو نشان می‌دهد. شکل ۵ نشان از بالاتر بودن غلظت عناصر پرتوزا در نمونه‌های خاک کنار مسیر رودخانه نسبت به نمونه‌های رسوبی کف رودخانه دارد، که شسته شدن رسوبات و انتقال برخی از عناصر پرتوزا توسط جریان آب رودخانه را تأیید می‌کند. تناوب توزیع فعالیت عناصر برای ۲۲ نمونه رسوبی در شکل ۶ نشان داده شده است.

منحنی‌های تناوب توزیع غلظت پرتوزایی برای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K تقریباً مشابه‌اند و در وسط منحنی قله دارند. بیشترین توزیع غلظت پرتوزایی برای هسته‌های مذکور به ترتیب در بازه‌های ۲۱-۱۴، ۳۶-۲۷ و ۴۸۰-۳۶۰ بکرل بر کیلوگرم است. اما مقدار بیشینه منحنی تناوب توزیع ^{137}Cs برخلاف سه عنصر دیگر، در نقطه ابتدایی است و سپس با افزایش غلظت پرتوزایی، فراوانی توزیع به شکل نمایی کاهش می‌یابد. فراوانی توزیع ^{137}Cs نشان دهنده فعالیت اغلب زیر ۶ بکرل بر کیلوگرم برای این عنصر است و در اکثر نمونه‌ها فعالیت ویژه این عنصر زیر ۳ بکرل بر کیلوگرم است. شکل ۷ نمودار سه‌بعدی توزیع عناصر پرتوزا در نقاط بالادستی منطقه مورد مطالعه در درازنو را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار

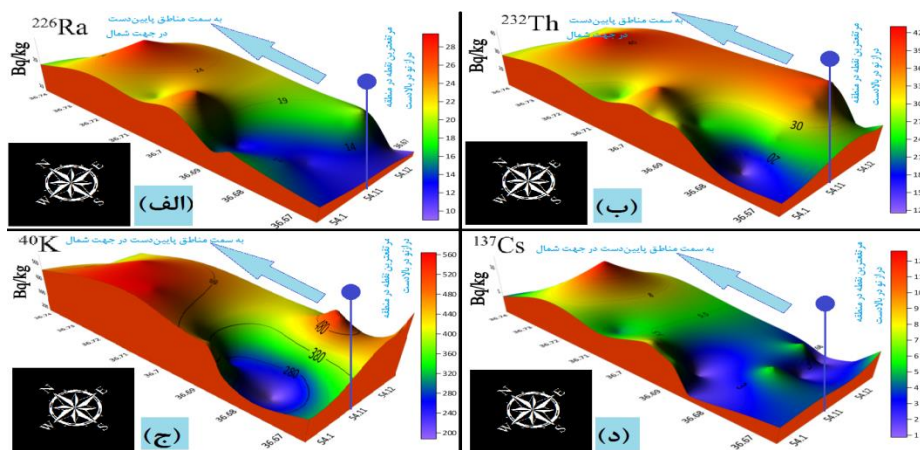
۴۰۰ بکرل بر کیلوگرم است [۱]. نتایج فعالیت ویژه برای ^{137}Cs در این پژوهش تقریباً مشابه نتایج مطالعات انجام شده در نزدیکی منطقه مورد پژوهش (گرگان) و همچنین استان مرکزی (اراک) در ایران است [۱۹ و ۲۵]. میانگین کمیت Ra_{eq} در نمونه‌های رسوبی دهانه رود قره‌سو بالاتر از نمونه‌های بالادست و نمونه‌های کف خلیج گرگان به دست آمد، اما مقدار این کمیت برای تمامی نمونه‌ها کمتر از مقدار میانگین جهانی ۱۳۱/۶۹ بکرل بر کیلوگرم و کمتر از حد مجاز آن یعنی ۳۷۰ بکرل بر کیلوگرم است [۱].

۲.۳. تجزیه و تحلیل آماری توزیع عناصر پرتوزا

به‌طور کلی، فعالیت ویژه ^{226}Ra و ^{232}Th در نمونه‌های رسوب دهانه رود قره‌سو بالاتر از نمونه‌های کف خلیج گرگان و نمونه‌های بالادست بود. برای ^{40}K ، فعالیت ویژه در نمونه‌های کف خلیج گرگان بالاتر از نمونه‌های دهانه و بالادست رود قره‌سو به دست آمد، این نتیجه می‌تواند از شستشوی سنگ‌های آذرین توسط باران و یا به دلیل استفاده از کودهای پتاسیمی برای مصارف کشاورزی توسط مردم این منطقه باشد، که باعث می‌شود پتاسیم توسط جریان آب رودخانه قره‌سو به خلیج گرگان منتقل شود و با رسوب‌گذاری در کف خلیج، باعث افزایش مقدار آن شود. برای ^{137}Cs ، میانگین فعالیت ویژه در رسوبات کف خلیج گرگان بیشتر از مناطق بالادست و دهانه رود قره‌سو است. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که ^{137}Cs هم به شکل مستقیم از اتمسفر توسط جریان‌های آب و هوایی و



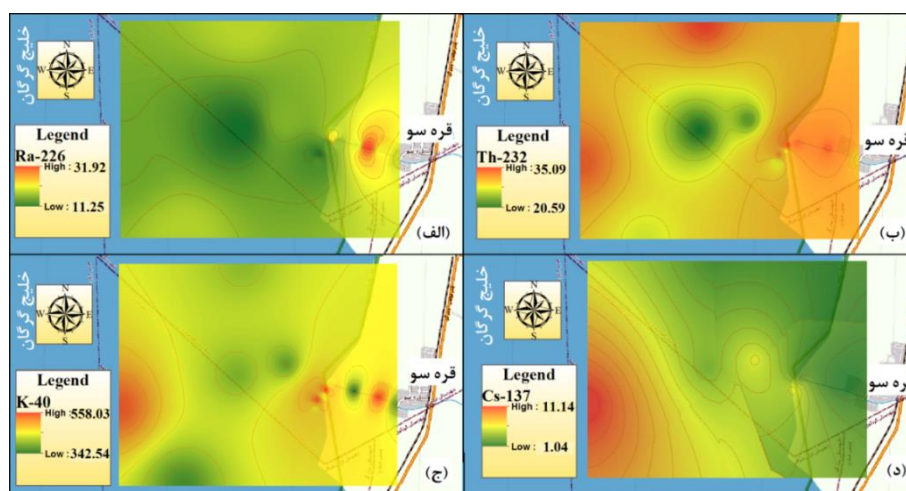
شکل ۶. تناوب توزیع عناصر پرتوزا در نمونه‌های رسوبی مورد مطالعه.



شکل ۷. توزیع سه بعدی (الف) ^{226}Ra ، (ب) ^{232}Th ، (ج) ^{40}K و (د) ^{137}Cs در سرچشمه رود قره‌سو در ارتفاعات رشته کوه البرز در منطقه درازنو با استفاده از نرم‌افزار سرفر.

داشته است. ویژه هسته ^{137}Cs در دهانه رود قره‌سو غلظت کمی دارد و به تدریج با فاصله گرفتن از دهانه این رود به سمت وسط خلیج گرگان، غلظت آن افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در مطالعات انجام شده در منطقه ورودی آب تصفیه خانه به تالاب بین‌المللی میقان در نزدیکی شهر اراک در ایران مشاهده شد که در آن میل رسوب‌گذاری ^{137}Cs در نقاطی دورتر از دهانه ورودی به محیط تالاب را نشان می‌دهد که بیانگر حرکت پذیری بالا و تمایل به رسوب‌گذاری در نقاط آرام‌تر برای این عنصر است [۲۷]. همچنین از تصاویر ۸ ب و ۸ ج می‌توان دریافت که الگوهای پراکندگی ^{232}Th و ^{40}K تقریباً مشابه

سرفر نسخه ۱۹/۱ رسم شده است [۱۴]. از شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که در بالادست توزیع ^{226}Ra و ^{232}Th تقریباً مشابه یکدیگر است. همچنین، هرچه از نقاط بالادستی به سمت پایین می‌رویم، بر غلظت عناصر پرتوزا افزوده می‌شود. شکل ۸ نقشه هم‌ترازی عناصر پرتوزا را که با استفاده از نرم‌افزار GIS نسخه ۱۰/۳ در ناحیه دهانه رود قره‌سو و قسمت شرقی خلیج گرگان رسم شده است نشان می‌دهد [۱۳]. شکل ۸ نشان می‌دهد که پرتوایی ^{226}Ra در دهانه رود قره‌سو افزایش پیدا کرده است. ولی در مورد ^{232}Th و ^{40}K علاوه بر دهانه رودخانه، در ناحیه میانی خلیج هم روند افزایشی



شکل ۸. نمودار هم‌ترازی ^{226}Ra (الف)، ^{232}Th (ب)، ^{40}K (ج) و ^{137}Cs (د) در ناحیه دهانه رود قره‌سو و قسمت شرقی خلیج گرگان با استفاده از نرم‌افزار GIS.

خطرناک است. دز جذب شده در هوا در ارتفاع یک متری از سطح زمین (D) برای کلیه نمونه‌ها محاسبه شد که بین ۲۰/۵۸ (SdU۳) تا ۶۱/۹۳ (SU۸) با مقدار متوسط $43/60 \text{ nGy}^{-1}$ بود. مقدار این کمیت برای همه نمونه‌ها به جز SU۸، کمتر از میانگین جهانی 55 nGy^{-1} است. شکل ۹ نقشه هم‌ترازی میزان دز جذبی در دهانه رود قره‌سو و خلیج گرگان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، الگوی انتشار ^{232}Th و توزیع دز (D) در خلیج گرگان مشابه یکدیگر هستند. این مسئله به علت همبستگی بالای دز با فعالیت ویژه ^{232}Th در رسوبات این منطقه است.

دز مؤثر سالانه در فضای باز و بسته (AEDE_{in} و AEDE_{out}) به ترتیب از ۰/۰۲۵ (SdU۳) تا ۰/۰۷۶ (SU۸) با میانگین $0/054 \text{ mSv/y}$ و از ۰/۱۰۱ (SdU۳) تا ۰/۳۰۴ (SU۸) با میانگین $0/214 \text{ mSv/y}$ متغیر بود. مقادیر AEDE_{in} و AEDE_{out} برای همه نمونه‌ها کمتر از میانگین جهانی $0/41 \text{ mSv/y}$ به دست آمد [۳۴]. فعالیت کم ویژه هسته‌های پرتوزا در این منطقه باعث شده که میزان AEDE در نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش به زیر مقدار متوسط جهانی برسد. خطر ابتلا به سرطان در طول عمر در محیط خارجی و داخلی (ELCR_{out} و ELCR_{in}) به ترتیب از $0/088 \times 10^{-3}$ (SdU۳) تا $0/266 \times 10^{-3}$ (SU۸) با

یکدیگر هستند. در جدول ۴ میانگین غلظت عناصر پرتوزای طبیعی در این پژوهش با مقادیر متوسط جهانی و همچنین نتایج گزارش شده در برخی از کشورها ارائه شده است.

جدول ۴ نشان می‌دهد میانگین فعالیت ویژه ^{226}Ra در نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش بالاتر از هند، ناحیه رود پالار است ولی از سایر مناطق کمتر است [۲۹]. میانگین فعالیت ویژه ^{232}Th در نمونه‌های جمع‌آوری شده از کویت [۲۷] و صربستان، رود دانوب [۳۰] بالاتر است. همچنین، میانگین فعالیت ویژه ^{40}K از عراق، کربلا [۱۸]، کویت [۲۷]، بنگلادش [۲۸]، صربستان، رود دانوب [۳۰] و میانگین جهانی [۱] بیشتر است.

۳.۳. ارزیابی کمیت‌های پرتوشناختی و شاخص‌های

خطرپذیری

سهم عناصر پرتوزا بر کمیت‌های پرتوشناختی در جدول ۵ نشان داده شده است.

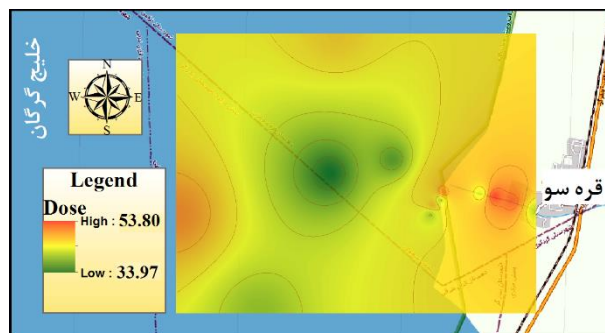
جدول ۵ نشان می‌دهد ^{232}Th و ^{40}K سهم بیشتری بر مقدار کمیت‌های پرتوشناختی در مقایسه با ^{226}Ra دارند. در مورد شاخص خطرپذیری داخلی، علیرغم میانگین پایین فعالیت ^{226}Ra ، مشاهده می‌شود که سهم آن افزایش پیدا کرده است. این مسئله به دلیل تمرکز گاز ^{222}Rn در محیط بسته است. گاز رادن در زنجیره واپاشی ^{238}U تولید می‌شود و برای سلامتی انسان

جدول ۴. مقایسه فعالیت ویژه عناصر پرتوزای طبیعی در نمونه‌های این مطالعه با برخی از مطالعات دیگر در نقاط مختلف جهان.

Ra _{eq} (Bq/kg)	^{۴۰} K (Bq/kg)	^{۲۳۲} Th (Bq/kg)	^{۲۲۶} Ra (Bq/kg)	منطقه مورد مطالعه
۶۲/۰۶	۲۲۷	۶	۳۶	کویت [۲۸]
۱۵۱/۳۲	۲۷۲	۶۶	۳۶	بنگلادش [۲۹]
۹۷/۸۲	۴۷۲	۳۶	۱۰	هند، رود پالار (Palar River) [۳۰]
۹۸/۵۹	۳۹۵	۲۶	۳۱	صربستان، رود دانوب (Danube River) [۳۱]
۲۱۹/۰۵	۵۲۴	۹۰	۵۰	چین [۳۲]
۱۶۵/۱۲	۶۵۰	۴۹	۴۵	نیجریه، رود اوگون (Ogun River) [۳۳]
۲۱۳/۷۱	۹۳۰	۷۰	۴۲	ایران، گرگان [۱۹]
۱۱۷/۵۳	۴۷۰	۳۸	۲۷	ایران، اراک [۳۴]
۱۲۰/۴۵	۴۳۰	۳۸	۳۳	عراق، کربلا [۱۸]
۹۳/۶۵	۴۳۰/۸۴	۳۰/۰۲	۱۷/۵۵	این پژوهش
۱۳۱/۶۹	۴۰۰	۴۰	۳۵	میانگین جهانی [۱]

جدول ۵. سهم عناصر پرتوزا بر کمیت‌های پرتوشناختی.

AGDE	I _γ	H _{ext}	H _{in}	D	Ra _{eq}	^{۲۲۶} Ra
٪۱۷/۲	٪۱۶/۷	٪۱۸/۸	٪۳۱/۶	٪۱۷/۵	٪۱۸/۷	^{۲۲۶} Ra
٪۳۹/۸	٪۴۲/۵	٪۴۵/۸	٪۳۸/۶	٪۴۱/۳	٪۴۵/۸	^{۲۳۲} Th
٪۴۲/۹	٪۴۰/۹	٪۳۵/۴	٪۲۹/۸	٪۴۱/۲	٪۳۵/۴	^{۴۰} K



شکل ۹. نقشه هم‌ترازی دز جذبی در دهانه رود قره سو و شرق خلیج گرگان با استفاده از نرم‌افزار GIS.

بالاتر از میانگین جهانی 300 mSv/y است [۳۵]. شاخص گاما (I_{γ}) از 0.329 (SdU^3) تا 0.499 ($\text{SU}8$) با میانگین 0.704 به دست آمد که مقدار این شاخص برای همه نمونه‌ها کمتر از حداکثر مجاز ۱ است [۳۵]. مقادیر شاخص‌های خطرپذیری خارجی (H_{ex}) و داخلی (H_{in}) در نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب از 0.120 (SdU^3) تا 0.362 ($\text{SU}8$)، با میانگین 0.253 و

متوسط 0.187×10^{-3} و از 0.354×10^{-3} (SdU^3) تا 1.064 ($\text{SU}8$) با متوسط 0.749×10^{-3} است. مقدار ELCR در فضای باز برای تمامی نمونه‌ها کمتر از مقدار میانگین جهانی 0.29×10^{-3} است [۳۵]. دز معادل سالانه دریافتی توسط غدد (AGDE) در نمونه‌های این منطقه از $148/53$ (SdU^3) تا $446/37$ ($\text{SU}8$) با میانگین $314/98 \text{ mSv/y}$ محاسبه شد که کمی

کیلوگرم است. در بالادست هر چه به جهت شمال (نقاط پایین تر) می‌رویم، غلظت ویژه هسته‌های پرتوزا به طور کلی افزایش می‌یابد. در محیط خلیج گرگان، ^{137}Cs بر خلاف ویژه هسته‌های پرتوزای دیگر، غلظت کمی در دهانه رود قره‌سو دارد و به تدریج با حرکت به سمت میانه‌های خلیج بر غلظت آن افزوده می‌شود. این پدیده نشان‌دهنده حرکت‌پذیری بالا و تمایل به رسوب‌گذاری برای عنصر ^{137}Cs در نقاط دورتر از دهانه ورودی رودخانه قره‌سو و در نقاط آرام‌تر میانه خلیج گرگان است. ویژه هسته‌های ^{232}Th و ^{230}Th بیشترین نرخ تأثیر را بر مقدار کمیت‌های پرتو شناختی دارند. نتایج محاسبه کمیت‌های پرتو شناختی و شاخص‌های خطرپذیری نشان می‌دهد که میزان تابش هسته‌ای ناشی از عناصر پرتوزای طبیعی در محدوده مجاز است و تهدیدی برای ساکنان منطقه مورد پژوهش ایجاد نمی‌کند.

از 0.159 (SdU 3) تا 0.442 (SU 8) با میانگین 0.3 هستند. خوشبختانه، برای همه نمونه‌ها، شاخص‌های خطرپذیری خارجی و داخلی کمتر از حد مجاز ۱ است [۳۵]. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میزان پرتوزایی ناشی از ویژه‌هسته‌های پرتوزا در منطقه مورد مطالعه خطرات پرتو شناختی را برای سلامتی ساکنین این منطقه ایجاد نمی‌کند.

۴. جمع‌بندی

فعالیت ویژه عناصر پرتوزای طبیعی ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در نمونه‌های مورد مطالعه کمتر یا در حد میانگین جهانی است. بالاتر بودن غلظت ^{137}Cs در رسوبات کف خلیج نسبت به نقاط دیگر و الگوی توزیع آن نشان می‌دهد که ^{137}Cs هم مستقیماً از جو و همچنین توسط جریان آب رود قره‌سو از بالادست به محیط خلیجی منتقل می‌شود. تناوب توزیع ^{137}Cs نشان می‌دهد که در اغلب نقاط، فعالیت ویژه برای این عنصر زیر ۳ بکرل به

مراجع

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, (UNSCEAR), *Sources, effects and risks of ionizing radiation*, New York: Report to the General Assembly with annexes, 2008.
2. S M El-Bahi, A Sroor, G Y Mohamed, and N S El-Gendy, *J Radiation and Isotopes* **123** (2017) 121.
3. P Singh, N Rana, A Azam, A Naqvi, and D Srivastava, *J Radiation Measurements* **26** (1996) 683.
4. N N Jibiri, and P E Biere, *Iranian J Radiation Research* **8** (2011) 201.
5. M J Willson, Anthropogenic and naturally occurring radioactive materials detected on radiological survey of properties in Monticello, Utah, Environmental Health Physics; 26th midyear topical meeting, 1993564.
6. M Fallah, S Jahangiri, H Jannadeleh, and M A Kameli, *J Microchemica* **146** (2019) 1090.
7. K M Miller, J L Kuiper, and I K Helfer, *J Environmental Radioactivity* **12** (1990) 23.
8. S U El-Kameesy, S Abd El-Ghany, S M El-Minyawi, Z Miligy, and E M El- Mabrouk, *Turk J Eng. Env. Sci.* **32** (2008) 245.
9. M J Frissel and R Pennders, "Blackwell", Oxford (1983).
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), *Sources and effects of ionizing radiation*, New York: Report to the General Assembly with annexes, 1993.
11. M A K Abdel Halim and A El-Taheer, *J Radioanal Nucl Chem* **299** (2014) 1949.
12. G Suresh, V Ramasamy, V Meenakshisundaram, R Venkatachalapathy, and V Ponnusamy, *J Environ. Radioact.* **102** (2011) 370.
13. Geographic information system version 10.3 (GIS10.3) [Computer software]. 2014. Retrieved from <https://www.esri.com>
14. Surfer version 19.1.189 (64-bit) [Computer software]. 2020. Retrieved from <http://www.goldensoftware.com>
15. Kankash Civil Consulting Engineers, "Miankaleh Peninsula Water Resource Identification Studies", Mazandaran Regional Water Company, 2008 (Persian).
16. L Parsai and A M Mofidi Khajeh, Gorgan Bay Watershed Management, Challenges, Goals and Prospects, *Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering*, Iran, Gorgan, 2009 (Persian). <https://civilica.com/doc/86966>
17. International Atomic Energy Agency, (IAEA), Collection and Preparation of bottom sediment sample for analysis of radionuclides and trace element (IAEA-TECDOC-1360, Vienna) 2003.

18. R Pourimani, and S M Mortazavi Shahroodi, *Iranian J Medical Physics* **15** (2018) 126.
19. R Pourimani and F Anoosheh, *Iranian J Medical Physics* **12** (2015) 189.
20. R Pourimani and M Mohebian, *Iranian journal of Science and Technology Transaction A: Science* **45** (2021)733.
21. R Pourimani, and S Rahimi, *Iranian J Medical Physics* **13** (2016) 269.
22. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Report by a Group of Experts, Nuclear Energy Agency Paris, France (1979).
23. European Commission (UC), Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building material, In EC radiation protection, 112, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection (1999).
24. International Commission on Radiological Protection Recommendations of the ICRP Publication 60, Oxford: Pergamum Publication (1990).
25. N K Ahmed, A Abbady, A M El-arabi, R Michel, A H El-Kamel, and A G E.abbady, *Indian J Pure & Applied Physics* **44** (2006) 209.
26. R Pourimani, and F Asadpour, *Arak J Medical University* **19** (2016) 9.
27. R Pourimani, R Fardad, and M Mirzaei, *J Enviromental Sciense and Technology* **23**, 6 (2022) 47 (Persian).
28. H R Saad, and D Al-Azmi, *Applied Radiation and Isotopes* **56** (2002) 991.
29. I C Mantazul, M N Alam, and S K S Hazari, *Radiation and Isotopes* **51** (1999) 747.
30. V Ramasamy, S Murugesan, and S Mullainathan, *The Indian Mineralogist* **40** (2006) 9.
31. M Krmar, J Slivka, E Varga, I Bikit, M Veskovic, *J Geochemical Exploration* **100** (2009) 20.
32. P Ziqiang, Y Yin and G Mingqiang, *Radiation Protection Dosimetry* **24** (1988) 29.
33. N N Jibiri, and I C Okeyode, *Radiation Protection Dosimetry* **147** (2011) 555.
34. R Pourimani and T Davoodmaghami, *Iranian J Medical Physics* **15** (2018) 192.
35. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (UNSCEAR), *Sources and effects of ionizing radiation*, New York: Report to the General Assembly with annexes (2000).