

اندازه‌گیری غلظت گاز رادن محلول در آب‌های زیرزمینی شهرستان شهربابک و برآورد دز جذبی مؤثر سالیانه

احمد اسدی محمدآبادی^{۱*}، مجتبی رحیمی^۲ و لیلا جباری کوپایی^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، کدپستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷، تهران، ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، کرمان، ایران.

^۳ گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، کرمان، ایران.

* تهران، دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم، گروه فیزیک، کدپستی: ۱۹۳۹۵-۳۶۹۷

پست الکترونیکی: asady_esf@yahoo.com

چکیده

یکی از مهم‌ترین منابع پرتوزای طبیعی گاز رادن ^{222}Rn است که با نیمه‌عمر $3/83$ روز از واپاشی رادیوم ^{226}Ra در زنجیره واپاشی اورانیوم ^{238}U در پوسته زمین تولید می‌شود. بخشی از گاز رادن در آب‌های زیرزمینی حل می‌شود و از طریق آشامیدن آب و بخشی دیگر از طریق استنشاق گاز رادن موجود در هوا، وارد بدن می‌گردد. از مهم‌ترین خطرات غلظت بالای رادن در بدن، می‌توان به سرطان ریه و معده اشاره نمود. در این تحقیق، غلظت رادن محلول در ۴۴ نمونه آب زیرزمینی در محدوده گسل شهربابک با استفاده از آشکارساز RAD7 اندازه‌گیری و دز جذبی مؤثر سالیانه برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان محاسبه شد و از آزمون آماری t تک نمونه‌ای برای تحلیل داده‌ها استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که غلظت گاز رادن در $29/54$ درصد از نمونه‌ها بالاتر از 11 بکرل بر لیتر می‌باشد. هم‌چنین کمینه و بیشینه دز جذبی مؤثر سالیانه برای نوزادان به‌ترتیب $76/01 \pm 46/00$ و $747/52 \pm 128/18$ ، کودکان $33/08 \pm 22/05$ و $357/77 \pm 61/46$ و بزرگسالان $24/10 \pm 16/07$ و $260/68 \pm 44/78$ میکروسیورت بر سال به‌دست آمد. با توجه به نتایج، می‌توان گفت که در برخی از مناطق، پرتوگیری طبیعی افراد ناشی از گاز رادن از حد پیشنهادی تعیین شده بالاتر می‌باشد که از طریق اطلاع‌رسانی و آگاهی بخشی ساکنین این مناطق نسبت به خطرات گاز رادن، می‌توان دز جذبی مؤثر سالیانه را کاهش داد.

کلیدواژگان: گاز رادن، دز جذبی مؤثر سالیانه، شهربابک، آب زیرزمینی، آشکارساز RAD7 .

۱. مقدمه

خطراتی ایجاد می‌کند، نگران‌کننده است. این گاز در اعماق زمین، در خاک‌ها و سنگ‌ها تولید می‌شود و قابلیت انحلال آن در آب زیاد است. در نواحی زلزله‌خیز، به‌دلیل جابه‌جایی گسل‌ها و شکستگی‌ها، انتقال گاز رادن به آب‌های زیرزمینی

یکی از محصولات جانبی در زنجیره واپاشی اورانیوم ^{238}U ، ایزوتوپ رادن ^{222}Rn است که به‌طور پیوسته از واپاشی رادیوم ^{226}Ra به‌وجود می‌آید. رادن با نیمه‌عمر $3/83$ روز، یک گاز گسیلنده ذره آلفاست که رنگ، بو و مزه ندارد، اما به‌دلیل آن‌که

سریع تر و آسان تر اتفاق می افتد. این امر باعث افزایش قابل ملاحظه غلظت گاز رادن می شود [۵-۱]. در مناطق زیادی از ایران خصوصاً نواحی جنوبی، برای تأمین آب آشامیدنی از آب های زیرزمینی استفاده می گردد. انسان می تواند از دو طریق استنشاق و بلع در معرض تابش های هسته ای ناشی از گاز پرتوزای رادن و دختران آن قرار بگیرد. گاز رادن می تواند از طریق آب و استنشاق هوای آلوده وارد بدن گردد. معمولاً غلظت گاز رادن در فضاها بسته و فاقد تهویه بیشتر است. استفاده از دوش آب در موقع استحمام باعث آزاد شدن و تجمع گاز رادن در حمام می گردد [۶-۱۰]. اگرچه خطر بلعیده شدن گاز رادن از طریق آب در مقایسه با خطر استنشاق گاز رادن به مراتب کمتر است، اما خطر ایجاد شده توسط این مورد را نمی توان نادیده گرفت. این گاز از طریق تنفس و آشامیدن وارد ریه و معده می شود. البته به میزان کمتری می تواند از طریق کیسه های هوایی در خون حل شود و به دیگر ارگان های بدن منتقل شود. بخشی از گاز رادن در ریه، با گسیل ذرات آلفای پرنرژی (۵/۴۸ MeV) به دخترانش واپاشیده می شود. به دلیل برد بسیار کوتاه (چند نانومتر) و انرژی زیاد ذرات آلفا، آن ها می توانند سبب تخریب رشته های DNA در بافت های حساس داخلی از جمله ریه شوند [۱۱-۱۴]. هم چنین ورود گاز رادن به معده از طریق آشامیدن آب، باعث تجمع این گاز در معده می شود و تخریب بافت های این ناحیه از طریق گسیل ذرات آلفا را به همراه دارد [۱۵-۱۸].

بنابر گزارش سازمان بهداشت جهانی^۱، گاز رادن دومین عامل سرطان ریه پس از سیگار است که از عمده مشکلات سلامتی در کشورهای توسعه یافته می باشد [۱۹]. گزارش ها نشان می دهند که مرگومیر ناشی از سرطان ریه در زنان دو برابر مرگومیر ناشی از سرطان پستان است. از جمله عارضه های دیگر ناشی از پرتوگیری بیش از حد گاز رادن

می توان به سرفه مداوم، تنفس سخت، درد قفسه سینه، سرفه خونی، خشونت صدا و عفونت های تنفسی مزمن از جمله ذات الریه یا برونشیت اشاره نمود [۲۰-۲۱].

حد مجاز تعیین شده برای غلظت گاز رادن محلول در آب توسط آژانس حفاظت از محیط زیست آمریکا^۲، ۱۱ بکرل بر لیتر می باشد [۲۲]. هم چنین براساس نظر سازمان بهداشت جهانی و کمیسیون اتحادیه اروپا در مورد الزامات کیفیت آب مصرفی انسان، حد پیشنهادی دز مؤثر سالانه آب مصرفی ناشی از وجود رادیویزوتوپ های ^3H ، ^{40}K و ^{222}Rn ، ۱۰۰ میکروسیورت بر سال می باشد. [۲۳-۲۴].

در مطالعات انجام شده در نیجریه، جوزف^۳ و همکارانش، غلظت گاز رادن ۱۵ نمونه آب زیرزمینی در مکان های مختلف شهر داستین ما^۴ را اندازه گیری نمودند. آن ها دریافتند که بیش از ۸۶ درصد از نمونه ها غلظت بالاتر از حد پیشنهادی (۱۱ بکرل بر لیتر) دارند و در حدود ۲۰ درصد از نمونه ها دارای غلظت بالاتر از ۱۰۰ بکرل بر لیتر می باشند. هم چنین آن ها دز جذبی مؤثر سالانه ناشی از استنشاق گاز رادن را برای سه گروه سنی مختلف (بزرگسالان، کودکان و نوزادان) محاسبه نمودند و نتیجه گرفتند که تقریباً دز دریافتی از تمام نمونه ها از حد پیشنهادی بالاتر است [۲۵]. در سال ۲۰۱۸ دوگال^۵ و همکارانش، ۸۲ نمونه آب چاه های منطقه از ناحیه بهیوانی^۶ را با استفاده از دستگاه RAD7 اندازه گیری کردند. مقادیر به دست آمده برای غلظت گاز رادن از ۱/۳ تا ۱۳/۴ بکرل بر لیتر متغیر بود. هم چنین در دو ناحیه مورد مطالعه، میانگین رادن از حد پیشنهادی بالاتر بود [۲۶]. در ایران رحیمی و همکارانش، غلظت گاز رادن ۴۸ نمونه چاه کشاورزی منطقه زرنند را با استفاده از دستگاه RAD7

² Environmental Protection Agency

³ Joseph

⁴ Dustin Ma

⁵ Duggal

⁶ Bhiwani

¹ World Health Organization

۵۵ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی واقع است و مرکز آن ۱۸۳۴ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. بنابر اطلاعات موجود در اداره آب این شهرستان، در حال حاضر تعداد ۱۷۲ حلقه چاه عمیق، ۵۹۰ چاه نیمه‌عمیق، ۳۹۹ رشته قنات و ۸ چشمه در این منطقه وجود دارد. آب آشامیدنی این شهر، از چاه‌های محلی موجود در منطقه تأمین می‌گردد. گسل شهربابک با طول تقریبی ۲۷۰ کیلومتر، به‌عنوان یکی از گسل‌های مهم تلقی می‌شود. لازم به ذکر است که در سال‌های اخیر زلزله‌ای در آن به‌وقوع نپیوسته است.

در این پژوهش جامعه آماری، تمام چاه‌های آب موجود در شهرستان شهربابک و نواحی اطراف آن می‌باشد. برای تعیین حجم نمونه از معادله ۱ استفاده شده است [۳۰].

$$n = \frac{n_0}{1 + \frac{n_0}{N}} \quad (1)$$

در معادله فوق، N حجم جامعه و $n_0 = \left[\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot s}{d} \right]^2$ است که

در آن S انحراف معیار نمونه، d حداکثر خطای نسبی و Z_{α} مقداری از توزیع نرمال استاندارد است که مساحت قبل از آن برابر با α می‌باشد. هم‌چنین در یک بررسی اجمالی، انحراف معیار $5/31$ به‌دست آمد و با در نظر گرفتن حداکثر خطای نسبی $(d=1/5)$ حجم نمونه ۴۴ به‌دست آمد. بنابراین ۴۴ نمونه به روش تصادفی طبقه‌ای از چاه‌های منطقه انتخاب شد.

در این تحقیق، برای اندازه‌گیری غلظت گاز رادن از دستگاه الکترونیکی RAD7 ساخت شرکت DURRIGE استفاده شد. این دستگاه در زمره آشکارسازهای فعال می‌باشد و براساس میزان انرژی ذرات آلفای گسیل شده از رادن و تورن، غلظت را اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از بطری شیشه‌ای استاندارد ۲۵۰ میلی‌لیتری مخصوص دستگاه، برداشت نمونه از چاه مورد نظر، به‌طوری که هیچ‌گونه حبابی داخل بطری نگردد، انجام می‌شود. دستگاه RAD7، براساس دستورالعمل تعریف شده توسط

اندازه‌گیری و دز جذبی مؤثر سالیانه برای بزرگسالان و کودکان ناشی از استنشاق و بلع رادن را محاسبه نمودند. با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده، حداقل و حداکثر دز جذبی برای بزرگسالان به‌ترتیب $45/73 \pm 20/35$ و $309/19 \pm 48/13$ میکروسیورت بر سال و برای کودکان $62/77 \pm 27/93$ و $424/34 \pm 66/06$ میکروسیورت بر سال به‌دست آمد [۲۷]. در سال ۱۳۹۰، محمدی و همکارانش غلظت رادن و رادیوم موجود در ۲۲ رود و ۲۰ نمونه آب آشامیدنی در منطقه رامسر را با استفاده از دستگاه PRASSI اندازه‌گیری نمودند و میانگین غلظت رادن و رادیوم در کل نمونه‌ها را به‌ترتیب $3/03 \pm 1/12$ و $0/185 \pm 0/055$ بکرل بر لیتر به‌دست آوردند [۲۸]. در تحقیقات انجام شده توسط ملکوتیان و همکارانش، غلظت گاز رادن ۳۸ نمونه آب آشامیدنی شهرستان مهریز، با استفاده از دستگاه RAD7 اندازه‌گیری و دز جذبی مؤثر سالیانه ساکنین منطقه ناشی از استنشاق و بلع رادن محاسبه شد. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، کمینه و بیشینه دز مؤثر جذبی سالیانه به‌ترتیب $0/0005$ و $0/04$ میلی‌سیورت بر سال به‌دست آمد [۲۹].

با توجه به مطالعات انجام گرفته در سطح استان کرمان و هم‌چنین پیش‌بینی غلظت بالای گاز رادن به‌علت وجود گسل‌های فعال در سطح استان، این پژوهش با عنوان اندازه‌گیری غلظت گاز رادن محلول در آب‌های زیرزمینی شهرستان شهربابک، محاسبه دز جذبی مؤثر سالیانه گاز رادن و ارائه پیشنهادی در راستای کاهش پرتوگیری از گاز رادن پیشنهاد و اجرا شد.

۲. مواد و روش‌ها

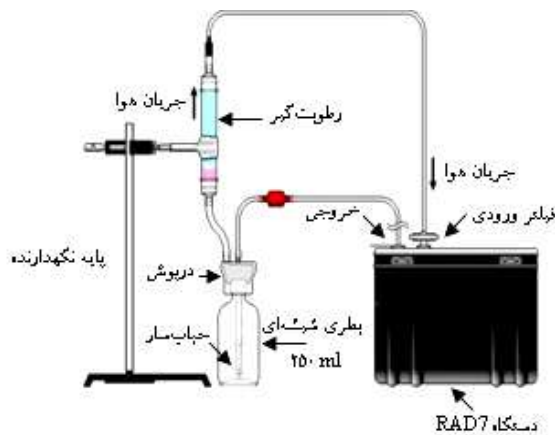
شهربابک با جمعیت تقریبی ۱۰۴ هزار نفر، یکی از غربی‌ترین شهرهای استان کرمان می‌باشد که دارای مساحتی در حدود ۱۳۵۷۰ کیلومتر مربع است. این شهر از لحاظ جغرافیایی در

ب- نسبت گاز رادن در هوا به گاز رادن حل شده در آب (تقریباً ۴ به ۱۰ است).

ج- ضریب تعادل بین گاز رادن و دختران آن (۰/۴)

د- ضریب تبدیل در معرض قرار گرفتن رادن (۹ نانوسیورت بر بکرل مترمکعب بر ساعت) با توجه به موارد گفته شده، مقدار دز جذبی به ازای غلظت ۱ بکرل بر لیتر حدود ۲/۵ میکروسیورت بر سال به دست می آید [۳۳].

برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نسخه ۱۹ نرم‌افزار SPSS استفاده شد و داده‌های موجود با استفاده از آزمون t تک نمونه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل (۱): شماتیک سیکل اندازه‌گیری گاز رادن محلول در آب.

۳. نتایج

نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت گاز رادن نمونه‌ها برحسب بکرل بر لیتر و هم‌چنین مقادیر دز جذبی مؤثر سالیانه گاز رادن برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان ناشی از استفاده از این منابع آبی برحسب میکروسیورت بر سال در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۲، نمودار کلوجه‌ای غلظت گاز رادن نمونه‌ها نشان داده شده است.

شرکت سازنده، ابتدا به مدت ۵ دقیقه درون بطری حاوی آب، حباب‌سازی نموده و سپس در ۴ مرحله ۵ دقیقه‌ای، غلظت گاز رادن محلول در آب اندازه‌گیری می‌شود. در حقیقت، در بازه زمانی اندازه‌گیری، ذرات آلفا در نتیجه واپاشی هسته‌ای پرتوزای ^{222}Rn تولید می‌شوند. سیستم آشکارسازی با توجه به تعداد ذرات آلفای ثبت شده و انرژی آن‌ها، غلظت گاز رادن را محاسبه می‌کند [۳۱].

میزان دز جذبی مؤثر سالیانه ناشی از آشامیدن آب توسط ساکنین منطقه مورد مطالعه برای سه گروه سنی نوزادان، کودکان و بزرگسالان، توسط معادله ۱ محاسبه شد.

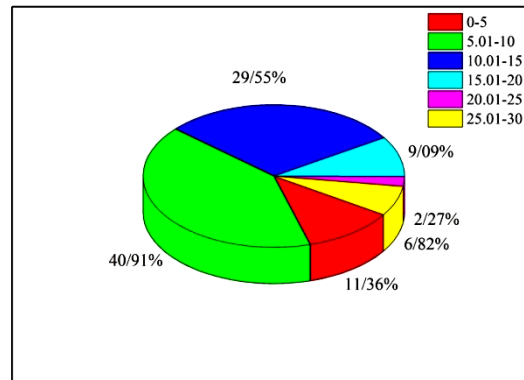
$$E=K.C.KM.t \quad (1)$$

در این معادله، K فاکتور تبدیل دز ^{222}Rn ناشی از آشامیدن آب است که مقدار آن برای بزرگسالان (افراد بیش از ۱۶ سال) 10^{-8} ، برای کودکان (افراد ۶ تا ۱۵ سال) 2×10^{-8} و برای نوزادان (افراد تا سن ۵ سال) 7×10^{-8} سیورت بر سال می‌باشد. هم‌چنین کمیت C، غلظت گاز رادن برحسب بکرل بر لیتر، KM میزان مصرف روزانه آب آشامیدنی که برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان به ترتیب ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر در نظر گرفته شده است. در این رابطه، t مدت زمان مصرف در کل سال (۳۶۵ روز) می‌باشد. هم‌چنین دز مؤثر سالیانه ناشی از استنشاق گاز رادن ساطع شده از آب مصرفی، با فرض این‌که ساکنین مناطق مورد نظر به‌طور مداوم از آب چاه‌ها جهت آشامیدن و دیگر مصارف استفاده نمایند را می‌توان براساس گزارش UNSCEAR و با در نظر گرفتن ملاحظات زیر محاسبه نمود [۲۵، ۳۲]:

الف- زمان حضور هر فرد در خانه (تقریباً ۷۰۰۰ ساعت در سال)

جدول (۱): مقدار غلظت گاز رادن محلول در نمونه‌های آب و مقدار متوسط دز جذبی مؤثر سالیانه ناشی از آشامیدن و استنشاق گاز رادن در نوزادان، کودکان و بزرگسالان.

شماره نمونه‌ها	غلظت (Bq/l)	مقدار متوسط سالانه دوز جذبی ناشی از آشامیدن و استنشاق $\mu\text{Sv/y}$		
		نوزادان	کودکان	بزرگسالان
۱	۱۰/۰۳±۲/۹۳	۲۸۱/۳۳±۸۲/۱۸	۱۳۴/۸۹±۳۹/۴۶	۹۸/۲۹±۲۸/۷۶
۲	۴/۵۷±۲/۰۸	۱۲۸/۱۸±۵۸/۳۴	۶۱/۴۶±۲۷/۹۷	۴۴/۷۸±۲۰/۳۸
۳	۶/۸۹±۲/۴۸	۱۹۳/۲۵±۶۹/۵۶	۹۲/۶۶±۳۳/۳۵	۶۷/۵۲±۲۴/۳۰
۴	۱۰/۲۰±۲/۹۳	۲۸۶/۱۱±۸۲/۱۸	۱۳۷/۲۵±۳۹/۴۶	۱۰۰/۰۱±۲۸/۷۱
۵	۷/۰۵±۲/۵۰	۱۹۷/۷۴±۷۰/۱۲	۹۴/۸۱±۳۳/۶۲	۶۹/۰۹±۲۴/۵۰
۶	۶/۵۶±۲/۴۳	۱۸۴/۰۱±۶۸/۱۵	۸۸/۲۳±۳۲/۶۷	۶۴/۲۸±۲۳/۸۱
۷	۵/۹۰±۲/۳۲	۱۶۵/۴۹±۶۵/۰۷	۷۹/۳۵±۳۱/۲۰	۵۷/۸۲±۲۲/۸۳
۸	۳/۵۷±۱/۸۸	۱۰۰/۱۳±۵۲/۷۳	۴۸/۰۱±۲۵/۲۸	۳۴/۹۸±۱۸/۴۲
۹	۵/۵۴±۲/۲۶	۱۵۵/۳۹±۶۳/۳۹	۷۴/۵۱±۳۰/۳۹	۵۴/۲۹±۲۲/۱۴
۱۰	۷/۱۷±۲/۵۱	۲۰۱/۱۱±۷۰/۴۰	۹۶/۴۳±۳۳/۷۵	۷۰/۲۶±۲۴/۵۹
۱۱	۹/۱۹±۲/۸۱	۲۵۷/۷۷±۷۸/۸۱	۱۲۳/۶۰±۳۷/۷۸	۹۰/۰۶±۲۷/۵۳
۱۲	۵/۳۲±۲/۲۰	۱۴۹/۲۲±۶۱/۷۱	۷۱/۵۵±۲۹/۵۹	۵۲/۱۳±۲۱/۵۶
۱۳	۴/۵۹±۲/۰۶	۱۲۸/۷۴±۵۷/۷۸	۶۱/۷۳±۲۷/۷۰	۴۴/۹۸±۲۰/۱۸
۱۴	۱۰/۳۰±۲/۹۵	۲۸۸/۹۱±۸۲/۷۴	۱۳۸/۵۳±۳۹/۶۷	۱۰۰/۹۴±۲۸/۹۱
۱۵	۱۹/۳۰±۳/۹۲	۵۴۱/۹۲±۱۰۹/۹۵	۲۵۹/۵۸±۵۲/۸۲	۱۸۹/۱۴±۳۸/۴۱
۱۶	۲۴/۲۰±۴/۳۸	۶۷۹/۳۷±۱۲۲/۸۵	۳۲۵/۴۹±۵۸/۹۱	۲۳۷/۱۶±۴۲/۹۲
۱۷	۹/۶۴±۲/۷۳	۲۶۹/۸۴±۷۶/۵۷	۱۲۹/۶۵±۳۶/۷۱	۹۴/۴۷±۲۶/۷۵
۱۸	۱۵/۴۰±۳/۵۶	۴۳۲/۸۰±۹۹/۸۵	۲۰۷/۱۳±۴۷/۸۸	۱۵۰/۹۲±۳۴/۸۸
۱۹	۲۵/۹۰±۴/۵۶	۷۲۶/۷۷±۱۲۷/۹۰	۳۴۸/۳۵±۶۱/۳۳	۲۵۳/۸۲±۴۴/۶۸
۲۰	۱۰/۸۰±۳/۰۳	۳۰۳/۲۱±۸۴/۹۸	۱۴۵/۲۶±۴۰/۷۴	۱۰۵/۸۴±۲۹/۶۹
۲۱	۱۶/۸۰±۳/۷۱	۴۷۱/۸۰±۱۰۴/۰۶	۲۲۵/۹۶±۴۹/۸۹	۱۶۴/۶۴±۳۶/۳۵
۲۲	۹/۸۵±۲/۹۲	۲۷۷/۲۸±۸۱/۹۰	۱۳۲/۴۷±۳۹/۲۷	۹۶/۵۳±۲۸/۶۱
۲۳	۶/۲۹±۲/۲۹	۱۷۶/۴۲±۶۴/۲۲	۸۴/۵۹±۳۰/۷۹	۶۱/۶۴±۲۲/۴۴
۲۴	۱۱/۹۰±۲/۹۳	۳۳۳/۷۹±۸۲/۱۸	۱۶۰/۰۵±۳۹/۴۰	۱۱۶/۶۲±۲۸/۷۱
۲۵	۱۴/۳۰±۳/۴۳	۴۰۲/۲۳±۹۶/۲۰	۱۹۲/۳۳±۴۶/۱۴	۱۴۰/۱۴±۳۳/۶۱
۲۶	۱۰/۱۰±۲/۹۲	۲۸۳/۳۰±۸۱/۹۰	۱۳۵/۸۴±۳۹/۲۷	۹۸/۹۸±۲۸/۶۱
۲۷	۲/۶۰±۴/۵۷	۷۴۷/۵۲±۱۲۸/۱۸	۳۵۷/۷۷±۶۱/۴۶	۲۶۰/۶۸±۴۴/۷۸
۲۸	۲۵/۷۰±۴/۵۲	۷۲۱/۴۴±۱۲۶/۷۸	۳۴۵/۶۶±۶۰/۷۹	۲۵۱/۸۶±۴۴/۲۹
۲۹	۹/۹۸±۲/۷۵	۲۷۹/۹۳±۷۷/۱۳	۱۳۴/۲۳±۳۶/۹۸	۹۷/۸۰±۲۶/۹۵
۳۰	۱۲/۹۰±۲/۹۵	۲۸۸/۹۱±۸۲/۷۴	۱۷۳/۵۰±۳۹/۶۷	۱۲۶/۴۲±۲۸/۹۱
۳۱	۱۹/۸۰±۳/۹۱	۵۵۶/۵۱±۱۰۹/۶۷	۲۶۶/۳۱±۵۲/۵۸	۱۹۴/۰۴±۳۸/۳۱
۳۲	۹/۴۶±۲/۸۳	۲۶۵/۳۵±۷۹/۳۷	۱۲۷/۲۳±۳۸/۰۵	۹۲/۷۰±۲۷/۸۳
۳۳	۱۱/۱۰±۳/۰۳	۳۱۵/۵۵±۸۴/۹۸	۱۴۹/۲۹±۴۰/۷۴	۱۰۸/۷۸±۲۹/۶۹
۳۴	۱۰/۳۰±۲/۹۵	۲۸۸/۹۱±۸۲/۷۴	۱۳۸/۵۳±۳۹/۶۷	۱۰۰/۹۴±۲۸/۹۱
۳۵	۱۳/۲۰±۳/۲۸	۳۶۸/۰۱±۹۲/۰۰	۱۷۷/۵۴±۴۴/۱۱	۱۲۹/۳۶±۳۲/۱۴
۳۶	۲/۴۶±۱/۶۴	۶۹/۰۱±۴۶/۰۰	۳۳/۰۸±۲۲/۰۵	۲۴/۱۰±۱۶/۰۷
۳۷	۸/۵۳±۲/۷۴	۲۳۹/۲۶±۷۶/۸۵	۱۱۴/۷۲±۳۶/۸۵	۸۳/۵۹±۲۶/۸۵
۳۸	۵/۵۱±۲/۱۳	۱۵۴/۵۵±۵۹/۷۴	۷۴/۱۰±۲۸/۶۴	۵۳/۹۹±۲۰/۸۷
۳۹	۵/۵۸±۲/۲۷	۱۵۷/۵۱±۶۳/۶۶	۷۵/۰۵±۳۰/۵۲	۵۴/۶۸±۲۲/۲۴
۴۰	۱۰/۷۰±۲/۹۹	۳۰۰/۱۹±۸۳/۸۶	۱۴۳/۹۱±۴۰/۲۱	۱۰۴/۸۶±۲۹/۳۰
۴۱	۱۰/۸۰±۲/۸۹	۳۰۳/۴۶±۸۱/۰۵	۱۴۵/۲۶±۳۸/۸۶	۱۰۵/۸۴±۲۸/۳۲
۴۲	۴/۲۴±۲/۰۲	۱۱۸/۹۳±۵۶/۶۶	۵۷/۰۲±۲۷/۱۶	۴۱/۵۵±۱۹/۷۹
۴۳	۶/۲۳±۲/۳۸	۱۷۴/۷۴±۶۶/۷۵	۸۳/۸۷±۳۲/۰۱	۶۱/۰۵±۲۳/۳۲
۴۴	۶/۵۵±۲/۳۰	۱۸۳/۷۲±۶۴/۵۱	۸۷/۰۹±۳۰/۹۳	۶۴/۱۹±۲۲/۵۴

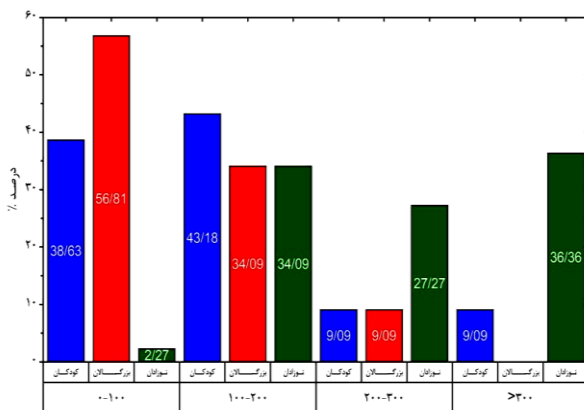


شکل (۲): نمودار کلوچه‌ای غلظت گاز رادن نمونه‌ها.

به منظور بررسی دقیق‌تر، آزمون t تک نمونه‌ای به‌طور جداگانه برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به مقادیر آماری موجود در جدول ۲، می‌توان گفت که مقدار دز جذبی مؤثر سالیانه نوزادان و کودکان به‌طور معنی‌داری از حد استاندارد بالاتر می‌باشد ($p < 0.05$)، در صورتی که مقدار دز جذبی مؤثر سالیانه بزرگسالان به‌طور معنی‌داری از حد استاندارد بالاتر نمی‌باشد ($p > 0.05$).

جدول (۲): نتایج آماری آزمون t تک نمونه‌ای

بزرگسالان	کودکان	نوزادان	میانگین
۱۰۴/۹۰	۱۴۳/۹۷	۳۰۰/۴۹	
۰/۲۹۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۵	معنی‌داری (p)
۰/۵۴۰	۳/۵۲۶	۷/۶۹۸	آماره آزمون



شکل (۳): نمودار درصد فراوانی نمونه‌های اندازه‌گیری شده برحسب مقادیر دز جذبی مؤثر سالیانه برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان.

با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که در مجموع، ۲۹/۵۴ درصد از نمونه‌ها دارای غلظتی بالاتر از حد پیشنهادی (۱۱ Bq/l) تعیین شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده می‌باشند. با توجه به این‌که مقادیر حداقل و حداکثر غلظت گاز رادن نمونه‌های اندازه‌گیری شده به ترتیب حداکثر مقادیر دز جذبی مؤثر سالیانه برای نوزادان به ترتیب $۶۹/۰۱ \pm ۴۶/۰۰$ و $۷۴۷/۵۲ \pm ۱۲۸/۱۸$ برای کودکان به ترتیب $۳۳/۰۸ \pm ۲۲/۰۵$ و $۳۵۷/۷۷ \pm ۶۱/۴۶$ و برای بزرگسالان به ترتیب $۲۶۰/۶۸ \pm ۴۴/۷۸$ و $۲۴/۱۰ \pm ۱۶/۰۷$ میکروسیورت بر سال می‌باشند. در شکل ۳ منحنی درصد فراوانی نمونه‌ها برحسب مقادیر دز جذبی مؤثر سالیانه برای نوزادان، کودکان و بزرگسالان ناشی از استفاده مداوم از آب‌های زیرزمینی منطقه نشان داده شده است. با توجه به نمودار مذکور می‌توان گفت، در حدود ۹۷/۲۸، ۶۱/۳۶ و ۴۳/۱۸ درصد از نمونه‌ها به ترتیب نوزادان، کودکان و بزرگسالان در معرض پرتوگیری بیش از حد مجاز (۱۰۰ میکروسیورت بر سال) قرار دارند. البته این نکته نیز باید مدنظر قرار گیرد که استعمال مستقیم آب‌های زیرزمینی در مزارع و باغات کشاورزی توسط افراد بزرگسال بیشتر از کودکان و نوزادان است، چرا که افراد شاغل در زمین‌های کشاورزی عمدتاً بزرگسال هستند و مستقیماً از این آب‌ها می‌نوشند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

اگرچه داده‌های عملی مربوط به اندازه‌گیری غلظت رادن در منطقه شهربابک تاکنون گزارش نشده است، اما اندازه‌گیری غلظت گاز رادن و محاسبه دز جذبی مؤثر سالیانه در دیگر شهرهای استان کرمان و استان‌های مجاور انجام شده است. در سال ۱۳۹۲، ملکوتیان و همکارانش با اندازه‌گیری غلظت گاز رادن ۶۲ نمونه از انواع آب‌های آشامیدنی (چشمه، چاه، قنات و رودخانه) در روستاهای مجاور گسل رفسنجان، نتیجه گرفتند که در ۱۰ نمونه برای بزرگسالان و در ۲۱ نمونه برای کودکان، میزان دز جذبی مؤثر سالیانه ناشی از گاز رادن از حد پیشنهادی بالاتر می‌باشد. هم‌چنین آن‌ها بیش‌ترین دز جذبی مؤثر سالیانه برای بزرگسالان و کودکان را به ترتیب ۱۸۵/۰۳ و ۲۵۳/۷۱ میکروسیورت بر سال به‌دست آوردند [۳۴]. نگارستانی و همکارانش غلظت گاز رادن ۴۰ منبع آبی مهم شهرستان بافت را با استفاده از دستگاه RAD7 اندازه‌گیری نمودند و دریافتند که غلظت گاز رادن ۸ منبع مهم از حد پیشنهادی بالاتر است. هم‌چنین با محاسبه دز جذبی مؤثر سالیانه نتیجه گرفتند که مقادیر به‌دست آمده مربوط به ۸ منبع مذکور از مقدار پیشنهادی بالاتر است [۳۵].

در مطالعه حاضر، برای اولین بار غلظت گاز رادن محلول در آب‌های زیرزمینی شهرستان شهربابک اندازه‌گیری و با توجه به مقادیر به‌دست آمده، میزان دز جذبی مؤثر سالیانه نوزادان، کودکان و بزرگسالان ناشی از مصرف آب‌های زیرزمینی محاسبه شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشان دادند که در حدود ۲۹/۵۴ درصد از نمونه‌ها دارای غلظت بالاتر از حد پیشنهادی (۱۱ Bq/l) تعیین شده توسط آژانس حفاظت از محیط زیست می‌باشد. لازم به ذکر است که به‌دلیل شیرین و گوارا بودن آب‌های زیرزمینی منطقه و هم‌چنین به‌دلیل مشکلات عمده در شبکه آبرسانی و قطعی آب آشامیدنی تصفیه شده در محدوده‌های اطراف این شهرستان، ساکنین این مناطق از آب‌های زیرزمینی به‌طور مستمر استفاده می‌نمایند. این دلایل باعث می‌شوند که میزان دز جذبی مؤثر سالیانه ساکنین منطقه، با فرض مصرف دائمی آب از چاه‌های موردنظر، بالاتر از حد پیشنهادی ۱۰۰ میکروسیورت بر سال شود. بنابراین به‌واسطه میزان پرتوگیری بالای ساکنین، خطر ابتلا به سرطان افزایش می‌یابد.

۵. مراجع

- [1] H. Ouabi. Modeling of radon and its short-lived decay products emanating from tap water used inside a house: Dose to adult members of the public. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(1) (2009) 115-121.
- [2] S. Sukanya, J. Noble and S. Joseph. Factors controlling the distribution of radon (^{222}Rn) in groundwater of a tropical mountainous river basin in southwest India. *Chemosphere*, 263 (2021) 128096.
- [3] L. Xinwei. Analysis of radon concentration in drinking water in Bagi (China) and associated Health effects. *Radiation Protection Dosimetry*, 121(2) (2006) 158-167.
- [4] N. Ahmad, MS. Jaafar and MS. Alsaffar. Study of radon concentration and toxic elements in drinking and irrigated water and its implications in Sungai Petani, Kedah, Malaysia. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(3) (2015) 294-299.
- [5] R. Botha, R. Lindsay, RT. Newman, PP. Maleka and G. Chimba. Radon in groundwater baseline study prior to unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the Karoo Basin (South Africa). *Applied Radiation and Isotopes*, 147(1) (2019) 7-13.
- [6] E. Taber and H. Yakut. Radon measurement in water samples from the thermal springs of Yalova basin, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(1) (2014) 311-319.
- [7] A.K. Mahur, R. Kumar, R.G. Sonkawade, D. Sengupta and R. Prasad. Measurement of natural radioactivity and radon exhalation rate from rock samples of Jaduguda uranium mines and its radiological implications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(8) (2008) 1591-1597.
- [8] F. Telahigue, B. Agoubi, F. Souid and A. Kharroubi. Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba Island, Tunisia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 182(1) (2018) 74-84.
- [9] SMJ. Mortazavi, M. Ghiassi-Nejad and PA. Karam. Cancer incidence in areas with elevated levels of natural radiation. *International Journal of Low Radiation*, 2(1) (2006) 20-27.

- [10] KH. Cheng, X. Luo and JJ. Jiao. Two-decade variations of fresh submarine groundwater discharge to Tolo Harbour and their ecological significance by coupled remote sensing and radon-222 model. *Water Research*, 1(178) (2020) 115866.
- [11] KZ. Seminsky and AK. Seminsky. Radon concentration in groundwater sources of the Baikal region (East Siberia, Russia). *Applied Geochemistry*, 1(111) (2019) 104446.
- [12] PS. Miklyaev, TB. Petrova, DV. Shchitov, PA. Sidiyakin, MA. Murzabekov, AM. Marennyy, NA. Nefedov and YA. Sapozhnikov. The results of long-term simultaneous measurements of radon exhalation rate, radon concentrations in soil gas and groundwater in the fault zone. *Applied Radiation and Isotopes*, 167(1) (2021) 109460.
- [13] U. Yun, TS. Kim, HK. Kim, MS. Kim, SY. Cho, CO. Choo and BW. Cho. Natural radon reduction rate of the community groundwater system in South Korea. *Applied Radiation and Isotopes*, 126(1) (2017) 23-25.
- [14] J. Pearce and P. Boyle. Examining the relationship between lung cancer and radon in small areas across Scotland. *Health and place*, 11(3) (2005) 275-282.
- [15] MY. Shoeib and KM. Thabayneh. Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation rate in various samples of Egyptian building materials. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2) (2014) 174-181.
- [16] A. Mohamed, M. Abd El-hady, M. Moustafa and M. Yuness. Deposition pattern of inhaled radon progeny size distribution in human lung. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(3) (2014) 333-337.
- [17] S. Mittal, A. Rani and R. Mehra. Estimation of radon concentration in soil and groundwater samples of Northern Rajasthan, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(2) (2016) 125-130.
- [18] CA. Stidley and JM. Samet. A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon. *Health Physics*, 65(3) (1993) 234-251.
- [19] WHO (World Health Organization) Guidelines for drinking water quality, vol 1, 2nd edn. Who, Geneva (1993).
- [20] A. Asadi, M. Rahimi and L. Jabbari. An Estimation of Annual Effective Absorbed Dose of Radon Gas for Adults and Children in Anar and Rafsanjan Cities through Measuring Dissolved Radon Gas in Water by the RAD7 Detector. *The Persian Gulf Biomedical Research Institute*, 18(5) (2015) 960-969.
- [21] V. Chauhan, M. Howland, A. Mendenhall, S. O'Hara, TJ. Stocki and JP. McNamee. Effects of alpha particle radiation on gene expression in human pulmonary epithelial cells. *International Journal of Hygiene Environmental Health*, 215(5) (2012) 522-535.
- [22] EPA, U.S. Environmental Protection Agency, (1991).
- [23] WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO), Guidelines for drinking water quality, Second Edition, Geneva (2004).
- [24] EUROPEAN COMMISSION, Commission directive of defining requirements for the parameters for radioactivity for monitoring the quality of water for the Council Directive 98/83 of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption, Draft V3.0 (2005).
- [25] E. Joseph, T. Atsue and S. Adams. Assessment of Radon-222 in Selected Water Sources at Dutsin-Ma Town, Dutsin-Ma Local Government Area, Katsina State. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(5) (2018) 49-59.
- [26] V. Duggal, S. Sharma, AK. Srivastava and R. Mehra. Measurement of radon concentration in drinking water in Bhiwani district of Haryana. *Journal of the Geological Society of India*, 91(6) (2018) 700-703.
- [27] M. Rahimi, A. Asadi and L. Jabbari. The measurement of radon gas dissolved in groundwater and determination of annual effective absorbed dose of radon gas in Zarand city in 2016. *Journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 16 (12) (2018) 1127-1138.
- [28] Z. Poorhabib, A.R. Binesh and S. Mohammadi. Investigation of heavy radioactive materials of radon and radium in rivers and drinking water of Ramsar region using a PRASSI device. *Iranian Journal of Physics Research*, 11(4) (2012) 397-403.
- [29] M. Malakootian and H. Salmani Marvast. Determination of radon level in drinking water in Mehriz villages and evaluation the annual effective absorbed dose. *Journal of Community Health Research*, 3(4) (2015) 253-260.
- [30] A. Amidi. Sampling theory and its applications. Tehran, University Publication Center, 223 (2009).
- [31] Durrige Company Inc. RAD7 RADH₂O Radon in water Accessory. Owner's Manual (2011).
- [32] UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, The general assembly with scientific annex, United Nation, New York (2000).
- [33] MU. Khandaker, A. Baballe, S. Tata and MA. Adamu. Determination of radon concentration in groundwater of Gadau, Bauchi State, Nigeria and estimation of effective dose. *Radiation Physics and Chemistry*, 178(1) (2021) 108934.
- [34] M. Malakootian, Z. Khashi, F. Iranmanesh and M. Rahimi. Radon concentration in drinking water in villages nearby Rafsanjan fault and evaluation the annual effective dose. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 302(3) (2014) 1167-1176.
- [35] S. Jahandari, A. Negarestani and F. Nejadkooaki. Determination of radon gas concentration in Baft city drinking water and calculation of resulting adsorption dose. *Third National Conference on Health, Environment and Sustainable Development*, (2014) 1-10.