

ارزیابی آهنگ تولید گرمای حاصل از واپاشی هسته‌های پرتوزا در ماگماهای بستر چشمه‌های آب‌گرم محلات، ایران

رضا پورایمانی^۱، محمد زاهدی‌نژاد^۲ و محمود میرزایی^۱

^۱استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، ایران
^۲کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱

چکیده

در این پژوهش ماگماهای (سنگ‌های آذرین) دربرگیرنده منطقه آب‌گرم محلات در استان مرکزی با گسترش ۳۰۰ هکتار مطالعه شد. ۲۰ نمونه مغز سنگ از ماگماهای بیرون‌زده تهیه شد. برای تهیه نمونه‌های همگن و یکنواخت بخشی از نمونه‌ها به وسیله آسیاب‌های فکی و گلوله‌ای تبدیل به پودر ریزدانه شدند و پس از خشک کردن و عبور دادن از مش شماره ۴۰ در ظروف نئین بسته‌بندی و آب‌بندی شدند. از همه نمونه‌های سطحی مقطع نازک تهیه و در آزمایشگاه کانی‌شناسی، کانی‌های موجود در آنها تعیین شد. با استفاده از روش طیف‌نگاری گاما و آشکارساز فوق خالص ژرمانیومی (HPGe) و سامانه الکترونیکی مربوط، مقدار فعالیت ویژه‌هسته‌های پرتوزای ^{232}Th ، ^{226}Ra و ^{40}K در نمونه‌ها تعیین شد. فعالیت ویژه‌هسته‌های پرتوزای یاد شده در نمونه‌ها به ترتیب در محدوده $1.34 \pm 22/15$ تا $3.76 \pm 62/68$ ، $1.43 \pm 10/69$ تا $1.15 \pm 40/55$ و $0.7 \pm 59/99$ تا $3.0 \pm 17/48$ 146Wm^{-3} برحسب Bq/kg به دست آمد. همچنین آهنگ گرمای تولید شده در نتیجه واپاشی ویژه‌هسته‌های پرتوزا برای نمونه‌ها در محدوده 0.69 تا 1.86 برحسب μWm^{-3} به دست آمد. مقدار گرمای میانگین تولیدی در حجم ده کیلومتر مکعب ماگما $13/60$ کیلووات است و برای افزایش دمای آب چشمه با دبی $35/5$ لیتر بر ثانیه از 15 درجه به 100 درجه سانتی‌گراد $12/7$ کیلووات انرژی مورد نیاز است. بنابراین با توجه به سطح پرتوزایی ماگماهای این منطقه و گسترش آن در ژرفای زمین به صورت مخروطی و عمر به نسبت طولانی آنها به نظر می‌رسد تأمین گرمای چشمه‌های آب‌گرم، از راه واپاشی زنجیره‌های واپاشان ^{238}U ، ^{235}U و ^{232}Th و هسته ^{40}K صورت می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: چشمه‌های آب‌گرم، ماگما، هسته‌های پرتوزا، آشکارساز HPGe، آهنگ تولید گرمای.

نویسنده مسئول: رضا پورایمانی

E-mail: r-pourimani@araku.ac.ir

۱- پیش‌نویس

حرکت می‌کنند و موجب پیدایش مظاهر گرمایی مانند چشمه‌های آب‌گرم در نقاط مختلف زمین می‌شوند (رشتیان، ۱۳۸۶). در مناطقی که ماگماها دارای طول عمر به نسبت زیادی هستند، به نظر می‌رسد که در طول میلیون‌ها سال از زمان تشکیل، گرمای خود را به تدریج از دست داده‌اند. بنابراین می‌توان حدس زد که منشأ گرمایی زمین در این مناطق در نتیجه واپاشی عناصر پرتوزا مانند پتاسیم و زنجیره‌های واپاشی سری‌های واپاشان توریم، اورانیم و اکتینیم است که در ساختار ماگماها وجود دارند. در طول عمر زمین، این گرمای درونی به آرامی تولید می‌شود و درون ماگما به تعادل گرمایی می‌رسد. همین امر موجب شده است که منبع انرژی مهمی فراهم شود و امروزه به عنوان انرژی نامحدودی مورد توجه قرار گیرد. اگر چه گرمای حاصل از واپاشی‌های عناصر پرتوزا به تنهایی ناچیز به نظر می‌آید ولی به نظر می‌رسد انباشته شدن گرمای حاصل از این واپاشی‌ها یکی از عوامل اصلی منشأ گرمایی زمین است. تلاش‌های بسیاری برای محاسبه گرمای تولیدی در نتیجه واپاشی‌های هسته‌ای در مواد انجام شده است (Din, 2009). تعیین منشأ انرژی زمین‌گرمایی کار بسیار مهمی در زمینه مطالعات جاری به شمار می‌رود. برای مطالعه در این زمینه باید در منطقه مورد بررسی از ماگماهای بیرون‌زده شده از سطح زمین به صورت مغزسنگ نمونه‌برداری شود. چون در سنگ‌های سطحی در اثر هوازدگی و جریان‌های جوی از جمله باران، نمک‌های اورانیم و توریم در آب حل و از سطح سنگ جابه‌جا می‌شوند (Rogers and Ragland, 1961). این سنگ‌ها از نوع گرانیتی با گوناگونی زیاد هستند. سنگ‌های میزبان از جمله گرانیت، گرانودیوریت، توف و غیره در بحث انرژی زمین‌گرمایی نقش مهمی در واکنش آب گرم با سنگ میزبان دارند. آب‌های گرم در مقایسه با آب‌های سطحی که فرصت کوتاه‌تری برای تبادل شیمیایی با بستر خود دارند؛ می‌توانند مواد و عناصر مختلف همچنین مواد پرتوزای طبیعی را که در سنگ‌های مسیرشان قرار دارند با توجه به عملکرد شیمیایی عناصر در خود حل و حمل کنند. مواد حل شده طی واکنش‌های ژئوشیمیایی و همچنین طی مراحل مختلف تعقیب و تبخیر و اشباع شدگی دوباره رسوب داده می‌شوند و در پایان مناطق با پرتوزایی طبیعی بالا را به وجود می‌آورند. به‌طور کلی پرتوزایی آب‌های گرم و

یکی از مهم‌ترین منابع پرتوگیری خارجی، پرتوهای گامای حاصل از واپاشی سری‌های اورانیم، اکتینیم، توریم و ویژه هسته‌های منفرد مانند پتاسیم ۴۰ است. این ویژه‌هسته‌های پرتوزا و دختران آنها در خاک، سنگ، آب، مواد ساختمانی و غیره یافت می‌شوند. بیشترین مقدار آنها در مغز سنگ‌های آذرین بسته به نوع کانی‌های اصلی و فرعی تشکیل‌دهنده آنها دیده شده است (Kannana et al., 2002; El-Arabi, 2007; Jahangiri and Ashrafi, 2011). این ویژه‌هسته‌ها از بدو تشکیل کره زمین وجود داشته‌اند و بسته به نوع خاک، سنگ و یا منطقه جغرافیایی، مقدار آنها متفاوت است (Buket et al., 2010). مقدار میانگین ^{238}U در پوسته زمین به میزان $2/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برآورد شده است که ممکن است مقدار آن در سنگ‌های فسفاته به بالاتر از 120 میلی‌گرم بر کیلوگرم هم برسد؛ در حالی که مقدار میانگین ^{232}Th در حدود $9/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم برآورد شده است (Anjos et al., 2005). مقدار پتاسیم به عنوان هشتمین عنصر از دید فراوانی در پوسته زمین $2/8$ درصد برآورد شده است و مقدار آن بستگی به نوع کانی‌های موجود متغیر است (Wedepohl, 1995). پتاسیم یکی از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده بسیاری از سنگ‌های آذرین است و در جریان تشکیل ماگماها و تشکیل انواع سنگ‌های آذرین ممکن است مقدار کانی‌های پتاسیم‌دار تمرکز بیشتری داشته باشند و در سنگ‌هایی مانند بازالت فراوانی آن به 6 درصد می‌رسد. بیشترین مقدار پتاسیم در سه کانی فلدسپار (K-feldspar)، میکا (K-mica) و glauconite دیده شده است (Wedepohl, 1978). با توجه به نیاز روز افزون جوامع بشری به انرژی، انرژی گرمایی موجود در پوسته جامد زمین که انرژی زمین‌گرمایی نامیده می‌شود، اهمیت زیادی دارد. مرکز زمین منبع سترگی از انرژی گرمایی است که به شکل‌های گوناگون از جمله فوران‌های آتشفشانی، آب‌های گرم و یا به واسطه خاصیت رسانایی به سطح آن هدایت می‌شوند. آب‌های سطحی بر اثر نیروی جاذبه زمین و از راه خلل و فرج سنگ‌ها، پس از مجاورت با لایه‌های گرم زمین، گرمای آنها را جذب می‌کنند؛ سپس بر اثر افزایش دما، چگالی خود را از دست می‌دهند؛ نسبت به آب‌های سرد سبک‌تر می‌شوند؛ به‌صورت طبیعی از راه خلل و فرج سنگ‌ها دوباره به سطح زمین

مستولی بوده است (Theile, 1968). مقایسه این رویداد با رویدادهای زمین‌ساختی رایج در زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این رویداد را می‌توان هم‌ارز رویداد زمین‌ساختی کالدونین دانست. دیگر رویداد تأثیرگذار بر ناحیه رویداد زمین‌ساختی هم‌ارز هرسینین است که سبب چین‌خوردگی و ایجاد دگرگونی درجه پایین در سنگ‌های مربوط به کربنیفر زیرین شده است. حد زیرین این مجموعه پوشیده است و حد بالایی آن به سنگ‌های کربناته پرمین تبدیل می‌شود؛ نتیجه اینکه رسوبات کربنیفر تحت تأثیر رویداد معادل هرسینین دگرشکل و تا حدی دگرگون شده‌اند. پس از رویداد معادل هرسینین یک فاز کششی در زمان پرمین در ناحیه چیره شده که سبب تشکیل میان‌لایه‌هایی از سنگ‌های آذرین مافیک در بخش‌های ماسه‌سنگی، کوارتزی و کربناته واحد پرمین شده است (علوی نایینی، ۱۳۷۸).

۲-۲. ویژگی‌های چشمه‌های آب گرم

چشمه‌های منطقه محلات متعلق به دوران ژوراسیک است. شیب عمومی و کلی چینه‌ها به سوی شمال و به‌صورت طاقدیس بزرگی است که محور آن در امتداد رودخانه قمرود است. به‌نظر می‌رسد گسل بزرگی در سوی شمال خاوری- جنوب باختری در حد فاصل کوه و دشت وجود دارد که از محل همین گسل چشمه‌ها ظاهر شده‌اند. چشمه‌ها بیشتر ایجاد تراورتن کرده‌اند و بارها به علت مسدود شدن در مکانی دیگر از رسوبات تراورتن تغییر مظهر داده‌اند (زندى، ۱۳۵۲). چشمه معدنی محلات در جنوب باختری تهران و در ۳۰ کیلومتری باختر دلیجان در دامنه ارتفاعات این منطقه از زمین خارج می‌شود. در پیرامون این چشمه معادن بزرگ تراورتن دیده می‌شود که حاصل رسوب‌گذاری آب این چشمه‌ها در گذشته است. دما و دیب چشمه‌های آب گرم محلات در جدول ۱ ارائه شده است. چشمه‌های شفا (۱۴ لیتر بر ثانیه) و سودا (۱۰ لیتر بر ثانیه)، بیشترین دیب را دارند و مجموع دیب همه چشمه‌ها حدود ۳۵/۵ لیتر در ثانیه است. محدوده دمای سیال آنها میان ۱۸/۲ تا ۴۷/۳ درجه سانتی‌گراد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مخزن زمین‌گرمایی محلات حجم و نفوذپذیری قابل ملاحظه‌ای دارد. آب همه چشمه‌ها بدون بو و مزه است و در آب برخی از چشمه‌ها مانند چشمه شفا، حباب‌های گاز CO_2 وجود دارد؛ هر چند که حجم گازها زیاد نیست.

از دید شیمیایی، چشمه‌های آب گرم محلات تا حدودی اسیدی هستند. مقدار سیلیس و کلرید همه چشمه‌ها پایین اما مقدار یون سولفات آنها بسیار بالاست. بنابراین آنها در رده آب‌های اسید-سولفات رده‌بندی می‌شوند. به علت انحلال سنگ‌های کربناته موجود در منطقه توسط آب چشمه‌ها، میزان غلظت یون کلسیم چشمه‌ها بسیار زیاد است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۳. زمین‌دماسنجی منطقه محلات

در جدول ۲ دماهای به دست آمده مخزن زمین‌گرمایی محلات بر پایه زمین‌دماسنجی‌های مختلف ارائه شده است. زمین‌دماسنجی‌های $K-Mg$ ، SiO_2 و $Na-Ca$ دماهای متعارفی به دست نمی‌دهند. با این وجود به نظر می‌رسد زمین‌دماسنجی $K-Na$ ، دمای معقول‌تری ارائه می‌کند. پس از بررسی نتایج به دست آمده، دمای تقریبی مخزن زمین‌گرمایی محلات، ۱۶۵ درجه سانتی‌گراد برآورد شد (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳).

۳- روش مطالعه

۳-۱. نمونه‌برداری و نمونه‌سازی

در این پژوهش ۲۰ نمونه سنگ آذرین به‌صورت مغز سنگ از منطقه در برگیرنده ماکماهای پیرامون چشمه‌های آب گرم محلات با گسترش ۳۰۰ هکتار گردآوری شد. در شکل ۲ نقشه بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل در ناحیه آب گرم محلات نشان داده شده است (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۲) که جنس این توده نفوذی از جنس سنگ‌های آذرین گرانودیوریت است. طبق این تصویر توده نفوذی گرانودیوریتی (ماگما) این منطقه به شکل یک مخروط استوانه‌ای شکل است که با مطالعات ژئوفیزیکی انجام شده مختلف ژرفای تقریبی آن میان ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ متر برآورد شده

رسوبات به ساختار و تشکیلات زمین‌شناسی منطقه‌ای که آب‌ها در آن جریان دارند و یا منطقه‌ای که آب‌ها از آن سرچشمه می‌گیرند؛ بستگی دارد. پرتوزایی طبیعی در رسوبات در نتیجه شستشوی کانی‌های پرتوزا، پخش و توزیع رسوب آنها در اثر روند‌های تجمعی و رسوب‌گذاری شیمیایی ناشی از آب‌های زیرزمینی است. در سنگ‌های رسوبی که دارای تخلخل و قابلیت هدایت هیدرولیکی قابل ملاحظه‌ای هستند، جریان‌های زیرزمینی محلی ممکن است ناهنجاری‌های جریان-دمای مشخصی ایجاد کنند (حسین‌زاده و افشار، ۱۳۷۸). تعیین مقدار و نوع عناصر پرتوزای موجود در سنگ‌های گرانیتی در بستر چشمه‌های آب گرم و محاسبه آهنگ گرمای تولید شده ناشی از واپاشی‌های هسته‌ها در واحد حجم ماگما از اهداف اصلی این پژوهش است.

۲- موقعیت جغرافیایی

منطقه مورد مطالعه در شهر محلات با مختصات جغرافیایی ۳۳ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه طول خاوری جای گرفته است. ارتفاع میانگین آن ۱۷۴۷ متر از سطح دریاست. این شهرستان از جانب شمال به جنوب گسترده شده است که تصور می‌رود علت آن مسطح شدن زمین در این جهت باشد. شهرستان محلات در فاصله ۳۶۲ کیلومتری تهران جای گرفته است (رشیدنژاد، ۱۳۸۰).

۲-۱. زمین‌شناسی منطقه

نقشه زمین‌شناسی منطقه پیرامون چشمه‌های آب گرم محلات در شکل ۱ نشان داده شده است. در بخش‌های شمالی چشمه‌ها، توف‌های بازالتی-آندزیتی وجود دارد که به ائوسن تعلق دارند. وجود چشمه‌های آب گرم ثابت می‌کند که به احتمال زیاد این سنگ‌ها خیلی جوان‌تر از ائوسن هستند. در حقیقت، باور این موضوع بسیار سخت است که سنگ‌های ائوسن بتوانند گرمای کافی را برای پیدایش چشمه‌های آب گرم در منطقه تأمین کنند. در پیرامون و همچنین در فاصله ۲۰ کیلومتری شمال باختر چشمه‌ها، آثار رسوبات تراورتنی به چشم می‌خورد. افزون بر این در جنوب و جنوب باختری شهر محلات نیز رسوبات تراورتنی وجود دارند که در برخی بخش‌ها، گسترش رخنمون تراورتن‌ها بیش از چندین کیلومتر مربع می‌شود. سبزی آنها نیز متغیر است و در برخی نواحی از ۵۰ متر نیز فراتر می‌رود. اگر فرض شود که همه تراورتن‌های منطقه بر اثر فعالیت چشمه‌های آب گرم به وجود آمده باشند؛ بنابراین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که سامانه زمین‌گرمایی محلات، یک سامانه خیلی قدیمی است؛ توزیع رسوبات تراورتنی نشان‌دهنده وجود گسل‌ها در منطقه است؛ احتمالاً بر اثر رخداد یک پدیده طبیعی مانند زمین‌لرزه یا بروز تغییرات شیمیایی در آب چشمه‌ها و غیره، رسوب تراورتن متوقف شده است؛ گاز CO_2 وارد آب‌های گرم شده و PH آنها را به اسیدی تغییر داده است. آب‌های اسیدی نیز در خلال حرکت خود از ژرفا به سطح، سنگ‌های کربناته را در خود حل کرده و سپس بر اثر خروج گاز CO_2 ، ترکیب شیمیایی $CaCO_3$ را در سطح زمین به‌صورت رسوبات تراورتنی بر جای گذاشته‌اند (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳).

ناحیه مورد مطالعه از دید ویژگی‌های ساختاری و زمین‌ساختی پیچیده است و درک سیر تکامل زمین‌شناختی ناحیه مستلزم بررسی‌های دقیق از دیدگاه‌های ساختاری، ژئودینامیکی، سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی است. به هر حال با توجه به نتایجی که در راستای تهیه نقشه زمین‌شناسی از ناحیه مورد نظر صورت گرفته است؛ به نظر می‌رسد که رویداد زمین‌ساختی ناحیه به سن پالئوژویک مربوط می‌شود (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳). در ناحیه مورد بررسی رسوبات به سن پرمین با یک ناپیوستگی روی رسوبات کهن‌تر قرار می‌گیرند که سازندهای لالون-زاگون و یا دولومیت‌های سلطانی هستند. این همبندی ناپیوسته در بخش‌هایی دچار جابه‌جایی شده و رابطه ناپیوستگی اولیه را با جابه‌جایی‌های دینامیکی و شواهد مربوط به آن همراه ساخته است. نبود گستره چینه‌ای در ناحیه را می‌توان به یک فاز گسترده خشکی زایی نسبت داد که نه تنها بر منطقه مورد مطالعه بلکه بر دیگر بخش‌های ایران و خاورمیانه

درصد، B.R. نسبت انشعایی یا احتمال گسیل پرتو گاما با انرژی E_i به ازای هر واپاشی، زمان طیف‌گیری از نمونه بر حسب ثانیه و m جرم نمونه بر حسب کیلوگرم است (Theile, 1968). برای تعیین ویژه‌فعالیت ^{226}Ra در نمونه‌ها، از پرتو گامای ^{214}Pb با انرژی $351/93 \text{ keV}$ و پرتو گامای ^{214}Bi با انرژی $609/31 \text{ keV}$ استفاده شده است. برای تعیین ویژه‌فعالیت ^{232}Th از دو خط گامای ^{228}Ac ، یکی با انرژی $911/21 \text{ keV}$ و احتمال واپاشی $26/6$ درصد و دیگری با انرژی $968/97 \text{ keV}$ و احتمال واپاشی $17/4$ درصد استفاده شده است. ویژه‌فعالیت ^{40}K از خط گامای این هسته با انرژی $1460/70 \text{ keV}$ تعیین شد.

۳-۴. محاسبه جرم ویژه هسته‌های پرتوزا و آهنگ گرمای ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزا

برای به دست آوردن جرم ویژه هسته‌های پرتوزا موجود در نمونه‌ها با استفاده از ویژه‌فعالیت اندازه‌گیری شده، از رابطه ۳ استفاده شد.

$$m(\text{ppm}) = \left(\frac{\text{Act} \times A \times t_1}{N_{\text{Av}} \times \ln 2} \right) \times 10^3 \quad (3)$$

که در آن، Act فعالیت ویژه نمونه بر حسب Bq/kg، A عدد جرمی رادیونوکلید، $t_{1/2}$ نیمه‌عمر رادیونوکلید بر حسب ثانیه، N_{Av} عدد آوود گادرو برابر با $10^{23} \times 6/023$ ذره بر مول و m جرم ویژه هسته‌های پرتوزا بر حسب ppm (Parts Per Million) است (Ahmed et al., 2006). خطای جرم با استفاده از رابطه ۵ انتشار خطا و با فرض اینکه کمیت‌های عدد جرمی و نیمه‌عمر مقادیر ثابتی هستند و خطای آنها ناچیز است به دست می‌آید.

$$\sigma_m = \sqrt{\left(\frac{\partial m}{\partial \text{Act}} \right)^2 \times \sigma_{\text{Act}}^2} \rightarrow \sigma_m = m \times \left(\frac{\sigma_{\text{Act}}}{\text{Act}} \right) \quad (4)$$

به منظور محاسبه آهنگ گرمای تولید شده (RHP; Rate Heat Production) ناشی از واپاشی هسته‌های پرتوزا در سنگ‌های آذرین با در نظر گرفتن آهنگ ثابت تولید گرما (مقدار گرمای منتشر شده در هر گرم K، U، Th در هر ثانیه) و با توجه به غلظت عناصر موجود بر حسب ppm در سنگ‌ها از رابطه ۶ استفاده می‌شود.

$$\text{RHP} = p \times (9.52 C_{\text{U}} + 2.56 C_{\text{Th}} + 3.48 C_{\text{K}}) \times 10^5 \quad (5)$$

در این رابطه RHP بر حسب μWm^{-3} ، ρ چگالی سنگ بر حسب kgm^{-3} ، C_{U} و C_{Th} جرم ویژه اورانیم و توریم بر حسب ppm و C_{K} جرم ویژه پتاسیم بر حسب درصد وزنی است (Abbady et al., 2006).

۴-۴. نتایج

در جدول ۵ نتایج محاسبه ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزا و در جدول ۶ مقادیر جرم و نرخ تولید گرمای ناشی از واپاشی هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های مورد مطالعه درج شده است.

۵-۵. بحث و اظهار نظر

ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزای ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K بر حسب Bq/kg در نمونه‌های گرانیت به ترتیب از $22/15 \pm 1/34$ تا $61/82 \pm 3/71$ ، $6/99 \pm 1/43$ تا $10/69 \pm 1/15$ و $40/55 \pm 2/15$ تا $99/97 \pm 4/99$ تا $17/48 \pm 1/30$ تغییر می‌کند. مقادیر فعالیت این ویژه‌هسته‌ها برای نمونه‌های گرانودیوریتی به ترتیب از $25/45 \pm 0/83$ تا $62/68 \pm 3/76$ ، $24/26 \pm 2/67$ تا $38/38 \pm 4/22$ و $63/08 \pm 4/76$ تا $127/16 \pm 15/47$ بر حسب Bq/kg به دست آمد. این مقادیر برای نمونه‌های دیوریتی به ترتیب در محدوده $25/95 \pm 1/73$ تا $110/37 \pm 5/35$ ، $55/79 \pm 3/35$ تا $21/03 \pm 1/82$ و $27/23 \pm 2/99$ تا $91/08 \pm 5/76$ بر حسب Bq/kg قرار دارد. میانگین جهانی این ویژه‌هسته‌ها در خاک و سنگ به ترتیب ۳۵، ۴۰ و ۴۰۰ بر حسب Bq/kg است (UNSCEAR, 2008). نرخ تولید گرما در نمونه‌های گرانیت از $0/69$ تا $1/72$ ، در نمونه‌های گرانودیوریت از $0/83$ تا $1/68$ و برای سنگ‌های دیوریت از $0/90$ تا $1/86$ بر حسب μWm^{-3} به دست آمد. بالاترین و کمترین نرخ تولید گرما به ترتیب برای نمونه‌های Di2 و G1 به دست آمد. با توجه به نتایج کانی‌شناسی (جدول ۴) دیده می‌شود که آن دسته از گرانیت‌ها که دارای اکسید آهن از نوع هماتیت و لیمونیت هستند، پرتوزایی بیشتر و در نتیجه سهم بیشتری

است. برای برآورد حجم این توده نیاز به مدل‌سازی‌های سه‌بعدی ژئوفیزیکی است که بتوان از راه آن بتوان به حجم این توده بی‌هنجار مغناطیسی دست یافت که از نوع توده نفوذی از جنس گرانودیوریت است (محمدزاده مقدم و همکاران، ۱۳۹۴). در شکل ۳ محل‌های نمونه‌برداری در پیرامون ماگماهای منطقه آب گرم محلات نشان داده شده است. روش نمونه‌برداری در این پژوهش به صورت نمونه‌برداری تصادفی و تجربی صورت پذیرفت و به مقدار ۲ کیلوگرم از هر نمونه تهیه شد. مختصات جغرافیایی نمونه‌ها با کمک دستگاه GPS تعیین و نوع سنگ‌ها پس از حمل به آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشگاه صنعتی اراک با میکروسکوپ الکترونی پلاریزه تعیین شد. به منظور تهیه نمونه‌های همگن و مطابق با استانداردهای جهانی نمونه‌های سنگ پس از خردشدن با آسیاب فکی و پودر کردن با آسیاب گلوله‌ای، به مدت ۶ ساعت در دمای 120 درجه سانتی‌گراد قرار و سپس از مش 40 عبور داده شدند. به منظور برقراری تعادل در زنجیره واپاشی سری اورانیم ظروف نگین مورد استفاده کاملاً آب‌بندی و به مدت دست کم ۵۰ روز در آزمایشگاه نگهداری شدند. در جدول ۳ ویژگی‌های نمونه‌ها شامل نام علمی، کد نمونه‌ها و مختصات جغرافیایی مناطق مورد نمونه‌برداری در این پژوهش درج شده است. بخشی از همه نمونه‌های گرانیتی به منظور تعیین کانی‌های اصلی و فرعی آنها به آزمایشگاه کانی‌شناسی منتقل و در آنجا پس از تهیه برش سطح مقطع و تهیه عکس میکروسکوپی کاملاً بررسی شدند. در شکل ۴ چند نمونه از برش‌های تهیه شده نشان داده و در جدول ۴ نتایج کانی‌شناسی نمونه‌ها درج شده است.

۳-۲. طیف‌نگاری

طیف‌نگاری پرتوهای گاما با استفاده از آشکارساز فوق خالص ژرمانیوم HPGe هم‌محور از نوع P مدل GCD30195BSI ساخت شرکت Baltic Scientific Instruments (BSI) با بازدهی نسبی ۳۰ درصد و با استفاده از نرم‌افزار Lsrmbisi انجام شد. قدرت تفکیک انرژی آشکارساز $1/95$ کیلوکلوکترن ولت برای خط گاما ^{60}Co با انرژی $1332/520$ کیلوکلوکترن ولت است و در ولتاژ کاری 3000 ولت کار می‌کند. از هر یک از نمونه‌ها به مدت دقیقاً یک روز (86400) ثانیه طیف‌گیری شد. کالیبراسیون انرژی و بازدهی سامانه با استفاده از چشمه‌های استاندارد دارای رادیونوکلیدهای ^{137}Cs ، ^{60}Co ، ^{57}Co ، ^{241}Am ، ^{133}Ba و ^{152}Eu با فعالیت مشخص انجام شد. تجزیه و تحلیل طیف‌های ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار Maestro II Gamma Vision32 محصول شرکت E & G and Ortec انجام شد. برای همه نمونه‌ها تصحیحات مربوط به هم‌فرودی فوتون‌های گاما لحاظ شده است. به منظور کاهش اثرات تابش زمینه، آشکارساز در مرکز یک حفاظ سربی به سبزی ۱۰ سانتی‌متر با یک لایه درونی مسی به سبزی ۲ میلی‌متر قرار داده شد که پرتوهای نرم کیهانی شامل فوتون‌های کم‌انرژی و الکترون‌ها به وسیله حفاظ سربی به سطح بسیار پایینی کاهش می‌یابند و لایه مسی به گونه مؤثری فوتون‌های X مربوط به سرب را با انرژی $79/3$ کیلوکلوکترن ولت حذف می‌کند. تصحیح تابش زمینه با استفاده از طیف ثبت شده برای ظرف خالی در شرایط یکسان انجام شد. بر پایه طیف‌های ثبت شده ویژه‌فعالیت هسته‌های ^{226}Ra ، ^{232}Th و ^{40}K در نمونه‌ها تعیین شد. بازدهی مطلق آشکارساز با استفاده از رابطه ۱ به دست آمد (International Atomic Energy Agency, 2003)

$$\epsilon(\%) = \frac{N_i}{\text{Act} \times P_n(E_i) \times t} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه N_i شمارش خالص زیر قله فوتوپیک متناظر با انرژی E_i فعالیت نمونه‌ها بر حسب Bq، $P_n(E_i)$ احتمال انتشار فوتون گاما با انرژی E_i به ازای هر واپاشی و t زمان طیف‌گیری از نمونه بر حسب ثانیه است.

۳-۳. اندازه‌گیری ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزا در نمونه‌های مورد مطالعه

برای محاسبه ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزا در نمونه‌ها از رابطه ۲ استفاده شد:

$$\text{Act} = \frac{\text{Net Area}}{\epsilon \times \text{BR} \times t \times m} \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه Act ویژه‌فعالیت نمونه پرتوزا بر حسب Bq/kg، Net Area سطح زیر پیک متناظر با انرژی خاص، ϵ بازدهی آشکارساز در آن انرژی بر حسب

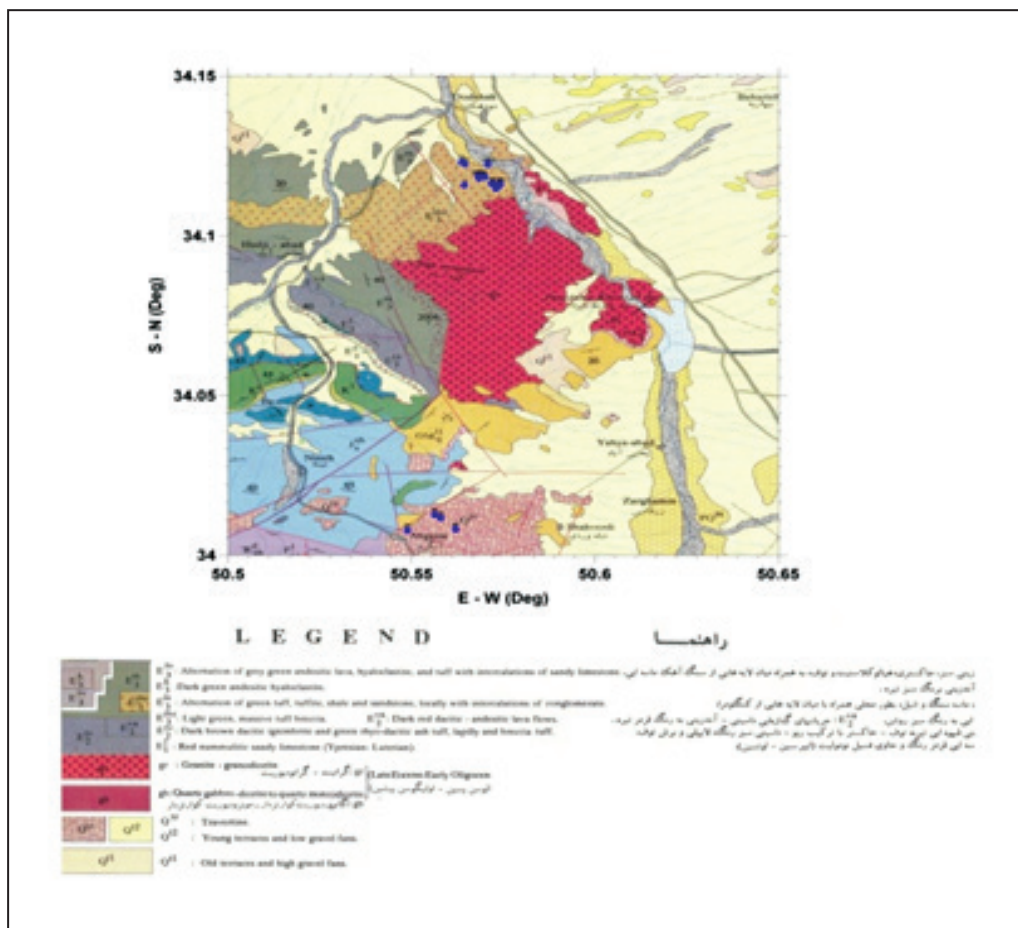
۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ماکماهای پیرامون چشمه‌های آب گرم منطقه محلات با گسترش ۳۰۰ هکتار مورد مطالعه قرار گرفت. مقدار ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزای طبیعی در ۲۰ نمونه مغز سنگ با استفاده از روش بیناب‌نگاری گاما تعیین شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ویژه هسته‌های پرتوزا در نمونه‌ها در سطح میانگین جهانی و نمونه‌های گرانبی دیگر کشورهاست. گسترده شدن ماکما به صورت مخروطی در بستر چشمه مانع تبادل حرارتی با اتمسفر زمین و سبب می‌شود تا گرمای تولید شده در آن ذخیره شود. آهنگ تولید گرما در هر کیلومتر مکعب با میانگین ۱/۳۶ کیلووات توانایی تأمین گرمای مورد نیاز چشمه‌های آب گرم را دارد.

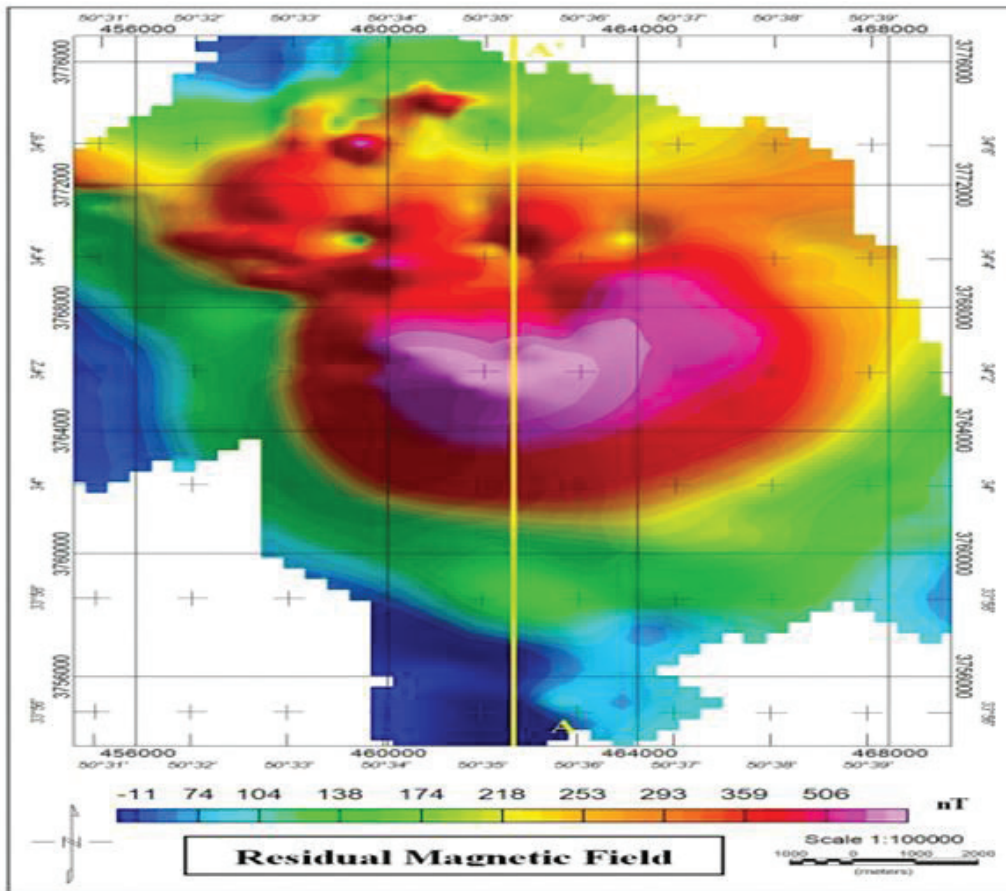
سپاسگزاری

از شرکت سهامی آب منطقه‌ای مرکزی که در انجام این پژوهش همکاری لازم را داشته است و همچنین از آقایان دکتر فریدون قدیمی و مهندس مجید مینا که در برداشت داده‌ها و انجام آزمایشات نقش به‌سزایی داشته‌اند؛ سپاسگزاری می‌شود. این پژوهش را بخش پژوهش دانشگاه اراک تأمین مالی کرده است.

در تولید گرما دارند. در برخی از سنگ‌ها مقدار این اکسیدها به حدی است که حتی جانشین کانی‌های اصلی شده‌اند. به‌طور کلی توان گرمایی تولید شده در هر کیلومتر مکعب بسته به نوع سنگ ۰/۶۹ تا ۱/۸۶ و به‌طور میانگین برای همه نمونه‌ها ۱/۳۶ برحسب کیلووات است. برای اینکه دمای ۳۵/۵ لیتر آب در ثانیه از ۱۵ به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش پیدا کند، به منبع تولید انرژی با توان ۱۲/۷ کیلووات نیاز است. بنابراین به نظر می‌رسد که توده ماکمایی موجود در بستر چشمه پتانسیل تأمین چنین انرژی را دارد. این توده ماکمایی به‌صورت مخروطی در بستر چشمه گسترده شده و لایه خاک روی آن به عنوان عایق رفتار می‌کند و سبب ذخیره شدن انرژی شده و لایه خاک روی آن به عنوان عایق رفتار می‌کند و سبب ذخیره شدن انرژی در آن می‌شود. به‌منظور مقایسه در جدول ۷ نتایج اندازه‌گیری نرخ تولید گرما و ویژه‌فعالیت هسته‌های پرتوزای طبیعی در این پژوهش و نتایج به دست آمده در کشورهای هند و مصر آورده شده است. نرخ تولید گرما در نمونه‌های محلات به‌طور میانگین از مقادیر اندازه‌گیری شده در کشورهای هند و مصر کمتر هستند ولی گسترده نشدن آن در سطح زمین مانع انتقال گرما به بیرون می‌شود. بنابراین این احتمال وجود دارد که یک علت مهم در پیدایش چشمه‌های آب گرم محلات وجود سنگ‌های دارای عناصر پرتوزا در ماکماهای بستر چشمه‌ها باشد.



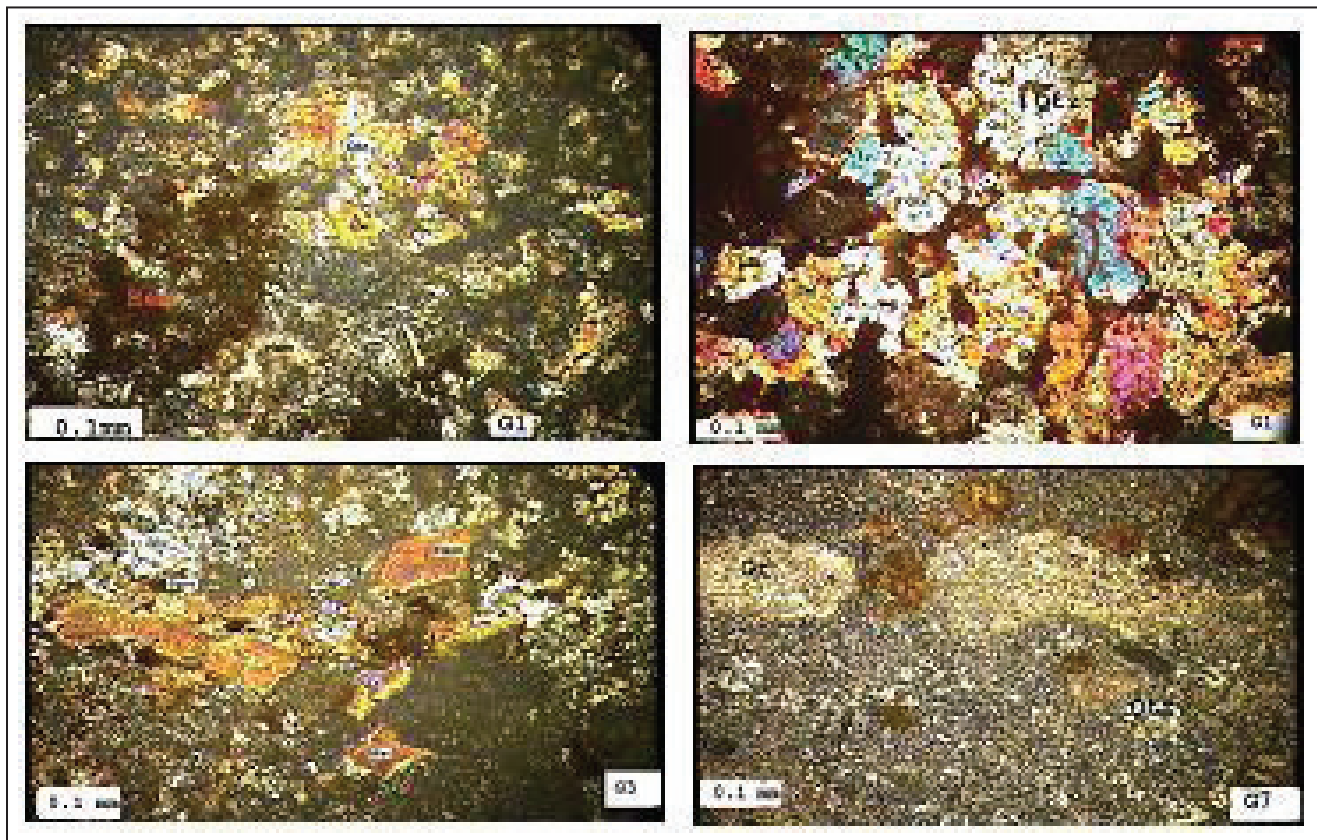
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه دربرگیرنده چشمه‌های آب گرم محلات.



شکل ۲- نقشه بی‌هنجاری میدان مغناطیسی کل در ناحیه آب گرم محلات.



شکل ۳- نقشه مناطق نمونه‌برداری شده از منطقه آب گرم محلات.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی نمونه‌های سنگ: الف) آپلیت با کد G1؛ ب) گرانیت با کد G1؛ پ) سنگ گرانیت با کد G3؛ ت) گرانیت با کد G7.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و ویژگی‌های فیزیکی چشمه‌های نمونه برداری شده.

هدایت الکتریکی (موهوس) (Mohs/cm)	PH	دبی (لیتر/دقیقه)	دما (سانتی‌گراد)	ارتفاع از سطح دریا	مختصات جغرافیایی		نام چشمه
					عرض	طول	
۲/۵۷	۶/۶۳	۲۴۰۰	۴۷/۳	۱۸۷۶	۳۴,۰۰۶۱	۵۰,۵۴۸۸	شفا
۲/۴۹	۶/۷۱	۳۶۰	۴۶	۱۸۶۲	۳۴,۰۱۰۸	۵۰,۵۵۶۳	دمبه
۲/۵۹	۶/۷۴	۳۰۰	۴۶	۱۸۴۵	۳۴,۰۰۹۷	۵۰,۵۵۸۰	سلیمانی
۲/۴۷	۶/۹۷	۸۰۰	۴۵/۱	۱۷۶۵	۳۴,۰۰۶۳	۵۰,۵۶۲۲	سودا

جدول ۲- دمای تقریبی سامانه زمین گرمایی محلات بر پایه محاسبات زمین دماسنجی (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۳).

میانگین	Na-K	K-Mg	Na-Ca	SiO ₂	وسایل اندازه‌گیری
۱۶۲	۱۹۷-۱۴۱	۴۶	۸۶	۵۴-۵۷	دمای برآورد شده (سانتی‌گراد)

جدول ۳- نام علمی، کد نمونه‌ها و مختصات مناطق نمونه‌برداری شده.

مختصات جغرافیایی منطقه نمونه‌برداری شده		نام علمی نمونه	نام نمونه	کد نمونه
عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	Diorite	سنگ دیوریت	Di1
۳۴/۱۱۴۸۲	۵۰/۵۷۲۹۳	Glosbe	سنگ آپلیت	G1
۳۴/۱۱۵۱۸	۵۰/۵۷۳۵۶	Granodiorite	سنگ گرانودیوریت	Grano1
۳۴/۱۱۵۸۹	۵۰/۵۷۳۴۸	Granite	سنگ گرانیت	G1
۳۴/۱۱۶۲۹	۵۰/۵۷۴۰۹	Diorite	سنگ دیوریت	Di2
۳۴/۱۱۶۱۷	۵۰/۵۷۴۲۴	Granite	سنگ گرانیت	G2
۳۴/۱۱۵۸۱	۵۰/۵۶۴۴۱	Pegmatite	سنگ پگماتیت	Peg
۳۴/۱۱۵۰۰	۵۰/۵۷۳۰۹	Granite	سنگ گرانیت	G3
۳۴/۱۱۶۳۶	۵۰/۵۷۱۸۱	Granite	سنگ گرانیت	G4
۳۴/۱۱۶۲۱	۵۰/۵۷۱۹۶	Granite	سنگ گرانیت (هوازده)	G5
۳۴/۱۱۶۲۰	۵۰/۵۷۱۹۵	Granite	سنگ گرانیت	G6
۳۴/۱۱۸۴۲	۵۰/۵۶۹۹۵	Granodiorite	سنگ گرانودیوریت	Grano2
۳۴/۱۱۸۱۸	۵۰/۵۶۸۵۵	Granite	سنگ گرانیت	G7
۳۴/۱۱۸۶۳	۵۰/۵۶۸۳۸	Granodiorite	سنگ گرانودیوریت	Grano3
۳۴/۱۱۸۶۲	۵۰/۵۶۸۲۳	Granite	سنگ گرانیت	G8
۳۴/۱۱۸۰۶	۵۰/۵۶۸۴۴	Granite	سنگ گرانیت	G9
۳۴/۱۲۲۴۶	۵۰/۵۷۰۷۴	Granodiorite	سنگ گرانودیوریت	Grano4
۳۴/۱۲۲۲۲	۵۰/۵۷۰۸۵	Granite	سنگ گرانیت	G10
۳۴/۱۲۳۱۵	۵۰/۵۶۳۶۴	Granite	سنگ گرانیت	G11
۳۴/۱۲۲۳۸	۵۰/۵۶۴۵۹	Granite	سنگ گرانیت	G12

جدول ۴- نتایج کانی‌شناسی نمونه‌های سنگ گرانیت.

کد نمونه	کانی اصلی	کانی فرعی	کانی تجزیه‌ای
Di1	کوارتز - فلدسپات (پلاژیوکلاز)	هماتیت - مگنتیت - زیرکن	
G1	کوارتز		اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت
Grano1	کوارتز - پلاژیوکلاز	اکسید آهن - لیمونیت	
G1	کوارتز - ارتوکلاز	اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت	
Di2	پلاژیوکلاز - پیروکسین	اکسید آهن - هماتیت - مگنتیت - زیرکن	کانی رسی
G2	ارتوکلاز - کوارتز	لیمونیت - هماتیت	
Peg	کوارتز - ارتوکلاز	زیرکن	اکسید آهن
G3	کوارتز - ارتوکلاز	آمفیبول (هورنبلند) - مسکوویت - زیرکن به همراه اسفن	کربنات (کلسیت) غنی از اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت
G4	کوارتز - ارتوکلاز	اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت	
G5	کوارتز - فلدسپارها مانند ارتوکلاز	مسکوویت	اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت
G6	کوارتز - فلدسپار ارتوکلاز	کانی معمولی میکا (مسکوویت) - زیرکن - اسفرن	اکسید آهن - هماتیت و لیمونیت
Grano2	کوارتز - پلاژیوکلاز	اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت	
G7	غنی از کوارتز - ارتوکلاز - پلاژیوکلاز		کلسیت - کانی کربناته - کانی میکا
Grano3	کوارتز - پلاژیوکلاز		کلسیت - کانی رزیت - اکسید آهن - هماتیت و لیمونیت
G8	کوارتز - ارتوکلاز	زیرکان	اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت
G9	کوارتز - ارتوکلاز		کلسیت - اکسید آهن - کانی رسی
Grano4	کوارتز - فلدسپار پلاژیوکلاز		اکسید آهن - هماتیت - لیمونیت - زیرکن
G10	کوارتز - ارتوکلاز		پلاژیوکلازها - کانی رسی - اکسید آهن
G11	کوارتز - ارتوکلاز - مسکوویت (میکای سفید)		اکسید آهن
G12	کوارتز		اکسید آهن

جدول ۵- ویژه فعالیت هسته های پرتوزا در نمونه های مورد مطالعه.

ویژه فعالیت هسته های پرتوزا (Bq/kg)			کد نمونه	نوع نمونه
⁴⁰ K	²³² Th	²²⁶ Ra		
۲۱۲/۶۰±۱۱/۷۹	۱۰/۶۹±۱/۴۳	۲۲/۱۵±۱/۳۴	G1	گرانیت
۱۱۳/۸۲±۳/۵۹	۴۰/۵۵±۲/۱۵	۴۳/۲۸±۱/۷۸	G2	گرانیت
۱۰۹/۱۴±۶/۴۸	۳۱/۲۹±۳/۴۴	۵۴/۸۷±۳/۳۰	G3	گرانیت
۵۹/۹۹±۵/۰۷	۲۶/۹۸±۱/۷۰	۳۸/۲۳±۱/۸۲	G4	گرانیت
۲۷۴/۵۶±۸/۲۹	۲۷/۳۲±۳/۰۱	۶۱/۸۲±۳/۷۱	G5	گرانیت
۶۲/۹۷±۴/۹۹	۲۸/۰۴±۱۸/۱۰	۵۸/۱۳±۱/۳۲	G6	گرانیت
۱۶۶/۳۳±۱۱/۲۹	۱۹/۲۸±۰/۹۷	۳۱/۲۸±۲/۰۱	G7	گرانیت
۱۲۳/۸۶±۶/۹۵	۳۶/۴۸±۲/۱۷	۴۶/۷۸±۲/۰۶	G8	گرانیت
۱۰۳/۵۴±۱۶/۳۲	۳۷/۴۹±۳/۷۱	۵۵/۶۲±۳/۳۴	G9	گرانیت
۷۶/۶۲±۴/۵۴	۳۲/۱۶±۳/۵۴	۴۶/۰۱±۲/۷۶	G10	گرانیت
۵۲/۰۱±۱۵/۸۶	۳۳/۷۹±۳/۶۱	۴۹/۰۵±۲/۹۴	G11	گرانیت
۱۴۶۷/۳۰±۱۷/۴۸	۳۴/۶۵±۳/۸۱	۵۰/۲۲±۳/۰۱	G12	گرانیت
۹۰/۴۳±۵/۳۷	۲۴/۲۶±۲/۶۷	۶۲/۶۸±۳/۷۶	Grano1	گرانودیوریت
۱۴۴/۷۶±۱۱/۰۳	۳۰/۳۰±۳/۰۷	۳۷/۲۹±۱/۸۸	Grano2	گرانودیوریت
۱۲۷۱/۶۰±۱۵/۴۷	۳۸/۳۸±۴/۲۲	۵۰/۳۶±۴/۴۲	Grano3	گرانودیوریت
۶۳/۰۸±۴/۷۶	۲۸/۶۲±۱/۲۳	۲۵/۴۵±۰/۸۳	Grano4	گرانودیوریت
۹۱/۰۸±۵/۷۶	۲۱/۰۳±۱/۸۲	۲۵/۹۵±۱/۷۳	Di1	دیوریت
۱۱۰۳/۵۰±۱۵/۴۹	۲۷/۲۳±۲/۹۹	۵۵/۷۹±۳/۳۵	Di2	دیوریت
۱۴۱/۶۳±۸/۴۱	۳۵/۹۲±۳/۹۶	۵۰/۸۱±۳/۵۰	G1	آپایت
۸۷/۸۹±۳/۰۵	۲۸/۵۰±۰/۷۵	۲۷/۴۵±۰/۴۹	Peg	پگماتیت

جدول ۶- مقادیر جرم ویژه هسته‌های پرتوزا و توان گرمایی تولیدی در نمونه‌های مورد مطالعه.

RHP (μwm^{-3})	مقادیر ویژه هسته‌ها بر حسب ppm و درصد			کد نمونه
	$^{40}\text{K} \%$	^{232}Th ppm	^{226}Ra ppm	
۰/۹۰	۰/۰۳±۰/۰۰	۵/۱۸±۰/۴۵	۲/۰۸±۰/۱۴	Di1
۱/۵۵	۰/۰۵±۰/۰۰	۸/۸۵±۰/۱۱	۴/۰۸±۱/۵۴	G1
۱/۵۹	۰/۰۳±۰/۰۰	۵/۹۷±۰/۳۹	۵/۰۴±۱/۴۴	Grano1
۰/۶۹	۰/۰۸±۰/۰۰	۲/۶۳±۰/۳۵	۱/۷۸±۰/۱۱	G1
۱/۸۶	۰/۴۱±۰/۰۱	۶/۶۶±۰/۴۳	۴/۴۸±۰/۱۵	Di2
۱/۶۰	۰/۰۴±۰/۰۰	۹/۹۹±۰/۵۳	۳/۴۸±۰/۱۴	G2
۱/۰۸	۰/۰۳±۰/۰۰	۷/۰۲±۰/۱۸	۲/۰۲±۰/۰۴	Peg
۱/۷۱	۰/۰۴±۰/۰۰	۷/۷۱±۰/۳۸	۴/۴۱±۰/۱۴	G3
۱/۰۲	۰/۰۲±۰/۰۰	۶/۶۴±۰/۴۲	۳/۰۷±۰/۱۵	G4
۱/۵۷	۰/۱۰±۰/۰۰	۶/۷۳±۰/۴۱	<۴/۹۷	G5
۱/۳۸	۰/۰۲±۰/۰۰	۶/۹۱±۰/۴۴	۴/۶۷±۰/۱۰	G6
۱/۱۴	۰/۰۵±۰/۰۰	۷/۴۶±۰/۷۵	۲/۹۹±۰/۱۵	Grano2
۰/۹۳	۰/۰۶±۰/۰۰	۴/۷۵±۰/۲۴	۲/۵۱±۰/۱۶	G7
۱/۶۸	۰/۴۸±۰/۰۱	۹/۴۵±۰/۳۷	۴/۰۵±۰/۰۹	Grano3
۱/۴۸	۰/۰۵±۰/۰۰	۸/۹۸±۰/۵۳	۳/۷۶±۰/۱۷	G8
۱/۵۹	۰/۳۹±۰/۰۱	۹/۲۳±۰/۴۸	۴/۴۷±۰/۱۰	G9
۰/۸۳	۰/۰۲±۰/۰۰	۷/۰۵±۰/۳۰	۲/۰۴±۰/۰۷	Grano4
۱/۵۳	۰/۰۳±۰/۰۰	۷/۹۲±۰/۳۹	۳/۷۰±۰/۱۶	G10
۱/۳۷	۰/۲۰±۰/۰۱	۸/۳۲±۰/۴۶	3/94±0/15	G11
۱/۷۷	۰/۵۵±۰/۰۱	۸/۵۳±۰/۴۴	۴/۰۳±۰/۱۸	G12

جدول ۷- مقایسه ویژه فعالیت هسته‌های پرتوزای طبیعی در سنگ‌های منطقه آب گرم محلات و برخی کشورها.

RHP μwm^{-3}	^{40}K %	^{232}Th ppm	^{226}Ra ppm	نمونه
۰/۶۹	۰/۰۸±۰/۰۰	۲/۶۳±۰/۳۵	۱/۷۸±۰/۱۱	گرانیت G1 (این پژوهش)
۱/۶۰	۰/۰۴±۰/۰۰	۹/۹۹±۰/۵۳	۳/۴۸±۰/۱۴	گرانیت G2 (این پژوهش)
۱/۷۱	۰/۰۴±۰/۰۰	۷/۷۱±۰/۳۸	۴/۴۱±۰/۱۴	گرانیت G3 (این پژوهش)
۱/۰۲	۰/۰۲±۰/۰۰	۶/۶۴±۰/۴۲	۳/۰۷±۰/۱۵	گرانیت G4 (این پژوهش)
۹/۵۳-۱/۹۳	۶-۳/۲۳	۱۱/۸-۲۳/۰	۳/۲-۳۰/۵	گرانیت مصر (Abbady et al., 2006)
۶/۷۴-۳/۵	۵/۲۱-۴/۶۱	۲۲/۶۹-۵۰/۴۰	۵/۲۵-۱۳/۱۰	گرانیت هند (Ahmed et al., 2006)
۱/۵۹	۰/۰۳±۰/۰۰	۵/۹۷±۰/۳۹	۵/۰۴±۱/۴۴	Grano 1 (این پژوهش)
۱/۱۴	۰/۰۵±۰/۰۰	۷/۴۶±۰/۷۵	۲/۹۹±۰/۱۵	Grano 2 (این پژوهش)
۱/۶۸	۰/۴۸±۰/۰۱	۹/۴۵±۰/۳۷	۴/۰۵±۰/۰۹	Grano 3 (این پژوهش)
۰/۸۲	۰/۰۲±۰/۰۰	۷/۰۵±۰/۳۰	۲/۰۴±۰/۰۶۶	Grano 4 (این پژوهش)
۱/۹۸	۳/۶	۱۰/۳	۳/۷	گرانودیوریت مصر (Abbady et al., 2006)
۵/۶۷	۵/۰۸	۳۷/۶۶	۹/۴۸	گرانودیوریت هند (Ahmed et al., 2006)

کتابنگاری

- حسین زاده، م. م. و افشار، ر.، ۱۳۷۸- انرژی زمین گرمایی، کاربردها و مزیت‌های آن در ایران، مجله رشد زمین‌شناسی، شماره ۴۵. رشتیان، س.، ۱۳۸۶- انرژی زمین گرمایی، نشریه پیام سانا، انتشارات سازمان انرژی‌های نو ایران، سال اول، شماره دوم.
- رشیدنژاد، ع.، ۱۳۸۰- پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های متاولکانوسدیمتری و پلوتونیک منطقه موته (جنوب دلیجان) با نگرشی ویژه به خاستگاه کانی‌سازی طلا، رساله دکتری زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس.
- زند، ع.، ۱۳۵۲- مطالعه سیستماتیک چشمه‌های معدنی ایران.
- علوی نایینی، م.، ر.، ۱۳۷۸- اکتشافات ژئوشیمیایی در ورقه محلات (۱:۱۰۰۰۰۰)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی کشور.
- محمدزاده مقدم، م.، میرزایی، س.، میرزایی، م.، اسکویی، ب. و حیدریان دهکردی، ن.، ۱۳۹۴- مدل‌سازی و تفسیر داده‌های مغناطیس‌زمینی مرتبط با انرژی زمین گرمایی، شمال غرب دلیجان، فصلنامه علوم زمین در دست انتشار.
- میرزایی، م.، محمدزاده مقدم، م.، اسکویی، ب.، قدیمی عروس محله، ف. و جزائری جوققانی، س.، ۱۳۹۲- پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌زمینی مرتبط با منابع زمین گرمایی با استفاده از دو روش اویلر و AN-EUL، شمال شرق محلات، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۹، صص. ۸۳ تا ۹۶.
- میرزایی، م.، قدیمی، ف. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۳- طرح پژوهشی منشا حوزه آب گرم محلات، شرکت آب منطقه استان مرکزی.

References

- Abbady, A. G. E., El-Arabi, A. M. and Abbady, A., 2006- Heat Production rate from radioactive element in igneous and metamorphic rocks in Eastern Desert, Egypt. *Applied Radiation and Isotopes*, V. 64, P. 131-137.
- Ahmed, N. K., Abbady, A., El-Arabi, A. M., Michel, R., El-Kamel, A. H. and Abbady, A. G., 2006- comparative study of the natural radioactivity of some selected rocks from Egypt and Germany. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, V. 44, P.209-215.
- Anjos, R. M., Veiga, R., Soares, T., Santos, A. M. A., Aguiar, J. G., Frascá, M. H. B. O., Brage, J. A. P., Uzêda, D., Mangia, L., Facure, A., Mosquera, B., Carvalho, C. and Gomes, P. R. S., 2005- Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. *Radiat, Meas*, V. 39, P. 245-253.
- Buket, C., Füsün Camlı, N., Günseli, Y. and Osman, C., 2010- Natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) and assessment of radiological hazard in the Kestanbolgranitoid, Turkey. *Radiat. Prot. Dosim*, V. 141, P. 192-198.
- Din, K. S., 2009- Estimation of heat generation by radioactive decay of some phosphate rocks in Egypt. *Applied Radiation and Isotopes*, V.67(11), P.2033-2036.
- El-Arabi A. M., 2007- ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. *Radiat. Meas*, V. 42, P. 94-100.

- International Atomic Energy Agency, 2003- Collection and Preparation of bottom sediment sample for analysis of radionuclides an trace element. IAEA- TECDOC-1360, IAEA, VIENNA.
- Jahangiri, A. and Ashrafi, S., 2011- Natural radioactivity in Iranian granites used as building materials. J. Environ. Stud, V. 36, P. 16-18.
- Kannana, V., Rajana, M. P., Iyengara, M. A. R. and Rameshb, R., 2002- Distribution of natural and anthropogenic radionuclides in soil and beach sand samples of Kalpakam (India) using hyper pure germanium (HPGe) gamma ray spectrometry. Appl. Radiat. Isot, V.57, P. 109-119.
- Rogers, J. J. W., Ragland, P. C., 1961- Variation of thorium and uranium in selected granitic rocks. Geochim.Cosmochim.Acta, V. 25, P. 99-109.
- Theile, O., 1968- Explanatory text of the Golpaygan Quadrangle Map, Geological survey pf Iran.
- UNSCEAR, 2008- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Exposure from naturalsources of radiation. United Nations publication sales No. 10.IX.3, United Nations, United NationsOffice at Vienna.
- Wedepohl, K. H., 1978- Handbook of Geochemistry. Berlin, Heidelberg, New York V.2.
- Wedepohl, K. H., 1995- The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, V. 59, P.217-239.

Estimation of heat rate generation of natural radioactivity of magma surrounding hot Springs of Mahallat, Iran

R. Pourimani^{1*}, M. Zahedi² and M. Mirzaei¹

¹Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran

²M.Sc., Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran

Received: 2016 July 16

Accepted: 2016 November 01

Abstract

In this research magmas (igneous rocks) of 300 hectares area covering of hot springs of Mahallat zone of Iran were studied. Twenty samples of outcrops of magmas were collected. In order to obtain homogeneous fine powder, part of all samples were crushed by jaw and ball milling and dried and passed through mesh number 40 and packed in Negin containers and sealed. Thin cross section were prepared for all samples and mineral components were determined in mineralogy laboratory. Specific activities of ²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K of all samples were determined using gamma ray spectrometry method employing high purity germanium (HPGe) detector with its electronic system. Specific activities of these radionuclides in samples obtained from 22.15 ± 1.34 to 62.68 ± 3.76 , from 10.69 ± 1.43 to 40.55 ± 2.15 and from 59.99 ± 5.07 to 1467.30 ± 17.48 in Bq/kg respectively. Heat rate generation due to radioactivity decay for samples calculated that varied from 0.69 to 1.82 in $\mu\text{W}/\text{m}^3$. The mean Heat production of magma with ten cubic kilometer volume obtained as 13.60 kW and the energy for increasing of water temperature with yields of 35.5 l/s from 15° C to 100° C is necessary 12.7 kW. Therefore consideration level of radioactivity and long life of magma of this region and expansion in conic form under hot springs seem to be the resource of heat due to radioactivity decay of ²³⁵U, ²³⁸U and ²³²Th series and ⁴⁰K.

Key words: Hot Springs, Magma, Radionuclides, HPGe detector, Heat Rate Production.

For Persian Version see pages 237 to 248

*Corresponding author: R. Pourimani; E-mail: r-pourimani@araku.ac.ir