

مطالعات هیدروژئوشیمیایی و پرتوسنجی مواد رادیواکتیو در مناطق آیرکان و چشمه شتری (شمال شرق استان اصفهان)

مصطفی اسماعیلی وردنجانی^{۱*}، رضا شمسی پور دهکردی^۱، کاوه پازند^۲، داوود رهی^۳

۱- اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی

۲- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی معدن

۳- اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری های نوین، گروه مهندسی هسته ای

دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۸/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۰/۹/۲۰

چکیده

هیدروشیمی آبهای زیرزمینی مناطق آیرکان و چشمه شتری و ژئوشیمی عناصر نادر خاکی، آلکالی گرانیات آیرکان را به عنوان منشأ اورانیوم و سایر عناصر محلول در آبهای زیرزمینی این مناطق نشان می دهد. بررسیهای ژئوشیمیایی و هیدروژئوشیمیایی و روند انتقال و تحرک اورانیوم و توریم در محیطهای آبی این مناطق، اشاره به جذب سطحی اورانیوم توسط هیدروکسیدهای آهن (گوتیت) به عنوان عاملی بازدارنده در برابر انتقال و حمل اورانیوم از اعماق به سطح دارند. طیف سنجی پرتو گاما در رسوبات منطقه چشمه شتری توسط آشکار ساز HPGe، نشان دهنده حضور ^{226}Ra به میزان بسیار زیاد و به عنوان هسته پرتوزا می باشد که دلیل اکتیویته بسیار بالای این رسوبات نیز هست. تولید ^{226}Ra از واپاشی ^{238}U ، نیمه عمر کوتاه ^{226}Ra نسبت به ^{238}U ، انتقال رادیوم توسط آبهای زیرزمینی از اعماق به سطح و شواهد (هیدروژئوشیمیایی، همگی بیانگر احتمال حضور کانسار مخفی اورانیوم و کانه زایی اورانیوم در عمق و در حدفاصل گرانیات آیرکان و منطقه چشمه شتری است.

واژه های کلیدی: مناطق آیرکان و چشمه شتری، اورانیوم، توریم، جذب سطحی، طیف سنجی پرتو گاما، هسته پرتوزا.

مقدمه

مطالعات هیدروژئوشیمیایی آبهای زیرزمینی مناطق آیرکان و چشمه شتری می تواند بیان کننده منشأ و روندهای حاکم بر پراکندگی اورانیوم در محیطهای آبی این مناطق و تعیین محل کانه زایی احتمالی اورانیوم باشد.

زمین شناسی

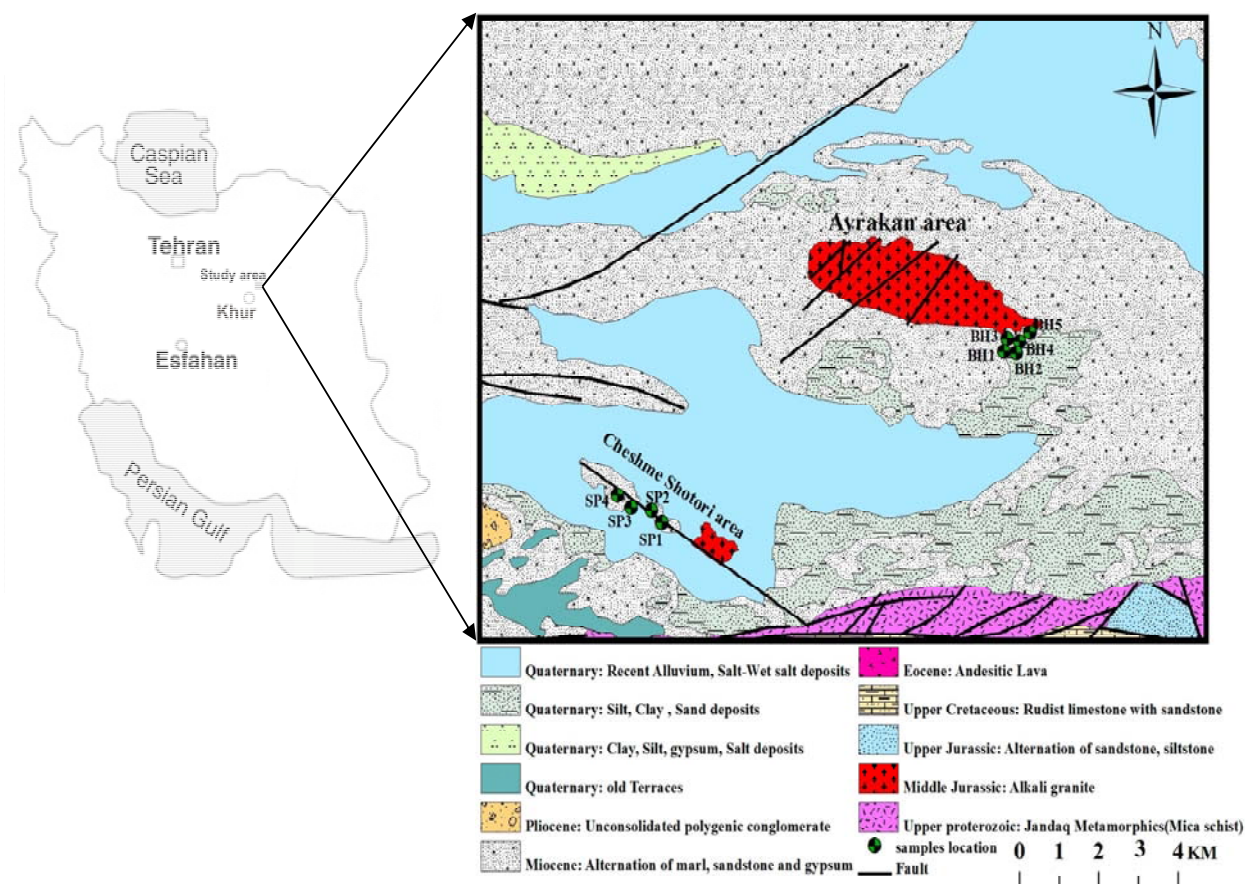
مناطق مورد مطالعه در بخش شمال غربی میکروپلیت مرکزی- شرقی ایران (CEIM) و در حاشیه جنوبی گسل کویر بزرگ واقع شده اند. قدیمی ترین سنگهای منطقه مربوط به متامورفهای کمپلکس جندق با ترکیب گارنت میکاشیست و سن پروتروزوئیک پسین می باشد [۲-۳]، که در بلوکهای تکتونیکی جهت دار شرقی- غربی در جنوب منطقه قرار دارند. ابتدا توده نفوذی آیرکان یک گرانیات گنیس با سن پروتروزوئیک فوقانی معرفی شد [۲-۴]، سپس باقری و استام

مناطق آیرکان و چشمه شتری در شمال شرق شهرستان خور و در ناحیه ای بیابانی با دمای سالیانه (°C) ۱۴-۴۷ و میزان بارندگی سالیانه کمتر از ۱۰۰ میلی متر که در زمستان حالت باتلاقی دارد، واقع شده اند (شکل ۱). پرتوزایی بسیار بالای نمونه های آب و رسوب موجود در منطقه چشمه شتری موجب شد تا کانه زایی احتمالی اورانیوم در این مناطق بررسی شود. مطالعات اولیه صحرائی جهت تشخیص میزان پرتوزایی مواد رادیواکتیو با کمک دستگاه دوزی متر گاما نشان دهنده دوز بسیار بالایی در منطقه چشمه شتری تا $23 \mu\text{Sv/h}$ می باشد. (سیورت = یکای دوز معادل تابشی)، این درحالی است که اگر میزان رادیوهسته ها به میزان مجاز محیطی باشد، دوز محیطی برابر با 55nSv/h خواهد بود [۱]. بررسیهای ژئوشیمیایی رسوبات منطقه چشمه شتری به منظور تعیین عنصر پرتوزا و

*^۱مسئول مکاتبات: mostafa_esmaily@yahoo.com

میانی معرفی کرد. سنگهای توده نفوذی آیرکان نیز شامل کانیهای اصلی فلدسپار پتاسیم (ارتو کلاز و میکروکلین) بیوتیت، مسکویت، کوارتز، پلاژیوکلاز (الیگوکلاز و آندزین) بوده و کانیهای فرعی آپاتیت، زیرکن و اکسیدهای آهن هستند [۶]. منطقه چشمه شتری نیز شامل چند برونزد کوچک از سازند قرمز بالایی با حالت تپه‌ای در امتداد گسلی با روند شمال غرب- جنوب شرق است. لیتولوژی این واحدها شامل ماسه، مارن، سیلت و رسهای گچ‌دار است. رسوبات کواترنری نیز در حد فاصل منطقه چشمه شتری و آلکالی گرانیته آیرکان قرار دارند (شکل ۱).

فلی [۵]، گرانیته آیرکان را شامل گرانیته گنیس دانه درشت، پرآلومین تا گرانیته میلونیتی، گرانیته پورفیری و آپلیته معرفی کردند که به وسیله یک گسل روئانده از کمپلکس دگرگونی جندق با سن پالئوزوئیک پسین جدا شده است. اما بهارزاده [۶، ۷]، نشان داد که گرانیته آیرکان برخلاف نظر دیگران، گرانیته گنیس نبوده بلکه یک گرانیته میلونیتی است که در طول یک زون برشی و تکتونیککی ظاهر شده و دایک‌های آپلیتی و آنکلاوهای آن دارای ماهیت پرآلومین از نوع S می‌باشد. وی سن این گرانیته را بر اساس مطالعات سن سنجی هوشمندزاده [۸]، با روش Rb-Sr، 168 ± 8 میلیون سال یعنی ژوراسیک



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی مناطق آیرکان و چشمه‌شتری (نقشه پایه از [۲]) و موقعیت نمونه‌برداری از گمانه‌ها و چشمه‌های این مناطق.

روش مطالعه

نمونه برداری رسوبات منطقه چشمه شتری از ۱۷ نقطه و جمع آوری نمونه های آب نیز از ۵ گمانه در حاشیه گرانیب آبرکان و ۴ چشمه واقع در منطقه چشمه شتری صورت گرفت. از هر یک از منابع آب دو نمونه برداشت گردید. این نمونه های آب در ظرفهای پلی اتیلن ۱۰۰ میلی لیتری جمع آوری و به دو گروه تقسیم شدند: (I) فیلتر شده بعد از عبور از فیلتر $0.45\mu\text{m}$ و اسیدی شده با اسید نیتریک 0.01 مولار، جهت آنالیز کاتیون ها. (II) فیلتر نشده و اسیدی نشده جهت آنالیز آنیون ها. Eh، pH، دما، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، کل املاح محلول (TDS)، شوری (salinity) و اکسیژن محلول (DO) نیز توسط دستگاه قابل حمل HACH multimeter در صحرا اندازه گیری شدند (جدول ۱). اندازه گیری غلظت آنیون های SO_4^{2-} ، Cl^- ، F^- ، NO_3^- ، PO_4^{3-} با روش کروماتوگرافی (Dionex DX-120 ion chromatography) using IonPac As14 column و HCO_3^- و CO_3^{2-} با روش رادیومتری (Radiometer Copenhagen PHM 82) در مرکز تحقیقات سازمان زمین شناسی کشور صورت گرفت. آنالیز کاتیون های K^+ ، Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، اورانیوم و توریم در نمونه های آب و عناصر اصلی، عناصر فرعی و نادر نمونه های رسوب نیز با روش ICP-MS در آزمایشگاه ACME کانادا انجام گردید (جداول ۲ و ۳). مطالعه XRD توسط دستگاه Bruker D8 Advance XRD machine و تعیین میزان هسته پرتوزا نیز توسط آشکارساز (Ortec, USA)HPGe در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان انجام شد. جهت تشخیص میزان پرتوزایی در مناطق مورد مطالعه از دستگاه دوزی متر

گاما استفاده شد. تجزیه و تحلیل داده ها نیز با آنالیز خوشه ای، روش خوشه بندی سلسله مراتبی پیوند کامل و با استفاده از نسخه ۱۸ نرم افزار PASW صورت گرفت که برای شاخص فاصله (شباهت ها) شاخص اقلیدسی در نظر گرفته شد و خروجی آن به صورت نمودار درختی (دندوگرام) مورد تفسیر قرار گرفت. جهت تعیین ضرایب همبستگی با توجه به این که داده ها پس از تبدیل لگاریتمی به توزیع نرمال نزدیک شدند، از روش پیرسون استفاده شد.

بحث و بررسی

هیدروشیمی آبهای زیرزمینی

در نمونه های آنالیز شده کاتیون های غالب به ترتیب $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ و آنیون های غالب $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ به دست آمد (جدول ۲). برای تعیین تیپ آب نمونه های موجود نمودار پای پر براساس میزان اشباع شدگی یون های اصلی ترسیم شد. بر این اساس تیپ آبها همگی در رده آبهای کلراته سدیک (Na-Cl) و رخساره توسعه یافته قرار دارند (شکل ۲). مهمترین عامل این موضوع با توجه به لیتولوژی منطقه و مسیر احتمالی جریان سطحی و زیرزمینی عبور جریان آب از بخشهای تبخیری و ارتباط هیدروژئولوژیکی با کف های نمکی موجود در دشت است. بررسی هیدروژئولوژیکی منطقه، توده گرانیب را به عنوان یکی از مهمترین زون های تغذیه نشان می دهد که آب ناشی از بارش پس از هوازگی آکالی گرانیب و انحلال کانپها در عمق کم، سرانجام به جریان عمومی آبهای زیرزمینی می پیوندد

جدول ۱. نتایج اندازه گیری های صحرائی نمونه های آب گمانه های منطقه آبرکان و چشمه های منطقه چشمه شتری (Over: خارج از محدوده

تشخیص).

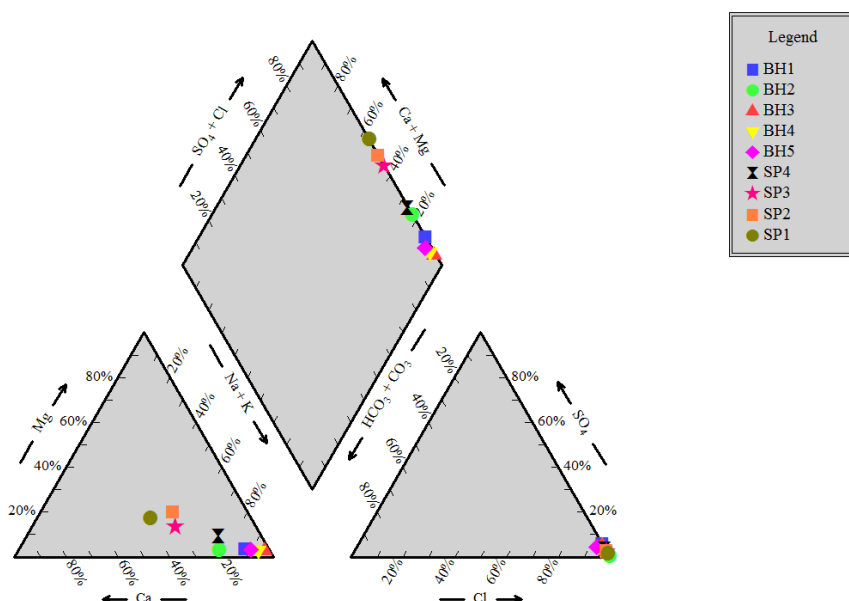
Sample No.	Type	DO(mg/l)	Salinity (mg/l)	pH	Eh(mV)	TDS(mg/l)	Ec(mS/cm)	T(°C)
BH1	borehole	۰	۱۰/۳۶	۷/۲۹	۳۹۴/۱	۱۰۳/۹	۱۱۵/۲	۲۵
BH2	borehole	۳/۷۸	۱۰/۳۶	۴/۸۹	۳۱۶/۶	۴۱۲/۶	۴۲۹/۱	۲۹
BH3	borehole	۲/۱۸	۱۰/۳۶	۷/۵۴	۲۳۵	۷۱/۱۱	۷۱/۶۳	۳۰
BH4	borehole	۵/۷۸	۱۰/۶۸	۷/۶۷	۷۶/۹	۹/۳۸	۱۰/۲۹	۲۵
BH5	borehole	۳/۴۴	۷/۵۹	۶/۸۵	۳۰۱	۷/۳۶	۷/۵۵	۲۷
SP4	spring	۰/۳۶	Over	۷/۰۸	۱۸۸	۱۷/۷۲	۴۰۰۰۰	۳۱/۳
SP3	spring	۰/۱۸	Over	۶/۸۳	۱۰۶	۲۷/۸	۶۳۲۰۰	۳۰/۸
SP2	spring	۰/۱۳	Over	۶/۷۵	۱۹۵	۳۳/۱	۷۴۷۰۰	۳۱/۵
SP1	spring	۰/۸۹	Over	۷/۳۷	۲۱۶	۵۱/۶	۱۱۸۸۰۰	۱۸/۵

جدول ۲. نتایج آنالیز کاتیون ها و آنیون ها (mg/l)، اورانیوم و توریم (µg/l) نمونه های آب گمانه های مناطق آیرکان و چشمه های منطقه چشمه شتری (Ld: زیر حد تشخیص و ND: اندازه گیری نشده).

Sample No.	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	PO ₄ ⁻³	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Th	U
BH1	۳/۱۶۸	۴۵۶۶۹/۵	۳۶۴۳	<./۰.۵	<Ld	۸۷/۸۳	۴۱۳۴۴/۸	۷۶/۰.۲	۳۵۸۸	۸۰۴/۵	./۰.۴	۴/۷۳
BH2	۲/۶۳۲	۲۳۴۲۵۱	۲۹۵/۵	<./۰.۵	<Ld	ND	۱۳۴۵۱۴	۱۵۷/۳	۲۳۴۶۵	۲۶۷۶	./۱	./۲۵
BH3	۱/۹۴۳	۲۰۸۸۴/۵	۱۴۲۷	<./۰.۵	<Ld	۱۸۹/۶	۲۲۰۵۷/۱	۳۲/۲۳	۴۴۳	۲۹۴/۳	./۰.۴	۲۵/۵
BH4	./۲۹۶	۲۶۴۵	۱۱۴/۹	<./۰.۵	<Ld	۸۱/۲۲	۲۸۸۸	۹/۳۸۴	۱۱۷/۱	۴۱/۷۱	./۰.۴	۵/۸۳
BH5	./۰.۸۵	۷۶۷/۲	۴۷/۰.۸	<./۰.۵	<Ld	ND	۷۸۶/۱	۱۵/۲۴	۵۵/۱	۱۲/۷۸	./۰.۴	./۵۵
SP4	ND	۲۰۵۷۶	۹۱۳	<./۰.۵	<Ld	۱۵۸/۶	۵۳۰.۷	۱۱۲/۷	۱۰۵۸	۳۴۷/۱	./۳۱	۵/۲۴
SP3	۳/۴۹	۲۴۶۴۷	۷۳۷	<./۰.۵	<Ld	۱۴۰/۳	۵۲۰.۸	۱۶۶/۷	۲۵۹۱	۶۷۵/۶	./۲۵	۳/۷۵

جدول ۳. نتایج آنالیز عناصر اصلی و فرعی رسوبات منطقه چشمه شتری (ppm).

Sample No.	Al	As	Ba	Cd	Ce	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Fe	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na
A-1	۱۱۹۰۰	۴۶/۱	۱۴۶	./۰.۴	۱۰/۰.۴	۲۰	۱/۰	۸/۸۹	۲/۳۷	./۳۰	۱۸۲۶۰۰	۴۳۰۰	۱۲/۴	۷۵۰۰	۲۴۲۸	۱۱/۰.۴	۶۰۹۹۰
A-2	۴۹۲۰۰	۱۳/۱	۵۱۴	./۱.۵	۲۷/۴۴	۹/۱	۲/۸	۱۸۰.۳	۸/۱۵	۱/۱۵	۱۹۹۰۰	۱۴۲۰۰	۲/۱۶	۸۱۰۰	۱۷۴۸	۲/۱۱	۲۳۲۳۰
A-3	۲۵۴۰۰	۲۶/۸	۸۹	./۰.۱۵	۱۶/۵۳	۱۴/۳	۲/۳	۱۰/۳۵	۴/۸۰	./۶۱	۱۹۶۰۰	۷۷۰۰	۲/۱۳	۵۵۰۰	۲۰۳۴۳	۶/۵۶	۱۸۱۱۰
A-4	۳۱۹۰۰	۴۹/۹	۴۶	./۰.۷	۱۸/۷۰	۸/۶	۲/۵	۱۱/۴۷	۵/۶۱	./۷۲	۲۹۸۰۰	۹۵۰۰	۲۰/۴	۶۴۰۰	۷۳۵۳	۵/۶۲	۲۸۰۳۰
A-5	۵۵۰۰	۴۱۱/۴	۸۴	./۰.۱۵	۲/۹۶	۶۷/۶	۱/۸	۱۱/۵۰	۶/۹۵	./۱۱	۲۲۴۳۰۰	۳۸۰۰	۱۵/۹	۶۶۰۰	۱۳۳۳۰	۱۷۶/۶۹	۲۷۷۴۰
A-6	۴۴۷۰۰	۲۲/۹	۴۱۸	./۱.۴	۲۷/۴۵	۹/۹	۲/۲	۳۳/۶۰	۷/۲۰	۱/۰.۴	۱۸۱۰۰	۱۲۰۰	۲۳/۴	۹۲۰۰	۷۰۱	۱/۶۸	۲۸۲۴۰
A-7	۴۲۵۰۰	۵۰۴/۷	۵۵۷	./۰.۷	۲۲/۸۹	۵/۵	۱/۸	۱۷/۴۷	۶/۸۷	./۹۰	۱۰۴۴۰۰	۱۲۵۰۰	۱۵/۳	۶۱۰۰	۵۱۹	۷/۲۷	۲۰۸۹۰
A-8	۴۱۳۰۰	۵۶/۷	۵۳۷	./۱.۶	۲۵/۱۱	۸/۰	۳/۱	۳۱/۸۹	۷/۰.۷	۱/۰.۴	۳۱۱۰۰	۱۲۰۰	۲۶/۷	۱۱۲۰۰	۲۲۳۸	۲/۶۹	۴۴۷۶۰
A-10	۲۸۳۰۰	۲۹/۳	۹۶۸	./۲.۱	۲۳/۷۱	۴۲/۲	۲/۲	۳۳/۰.۶	۶/۵۷	./۷۲	۶۵۲۰۰	۹۷۰۰	۲۹/۹	۶۷۰۰	۱۳۳۳۰	۷۳/۱۸	۳۰۹۸۰
CH-1	۱۲۰	۱۰۲/۸	۴۵۷/۹	./۱.۹	۱۵/۳	۱۰/۹	۲	۹/۴	۲/۸۷	./۲	۳۴۱۹۳	۳۶۷۳	۱۹/۴	۷۵۷۸	۲۲۸۰.۹	۳۰/۴	۷۸۵۵
Ar-1	۴۵۴۳	۱۷۴۱۳	۵۰۹/۴	./۲.۷	۱۰/۵	۱۸	۱/۲	۵/۲	۲/۳۵	./۱۳	۳۲۵۴۹۶	۱۶۰.۵	۸/۱	۴۱۷۷	۲۱۴۵۹	۸۵/۲	۳۱۰۲۸
Ar-2	۷۰.۵۳	۷۱۶/۷	۱۴۹۸	./۲.۹	۱۴/۹	۶۲/۵	۲/۶	۹/۱	۳/۸۹	./۱۵	۳۳۱۷۰۰	۲۳۷۰	۱۱/۸	۴۴۲۶	۴۶۸۵۸	۱۲/۱۵	۳۹۳۶۲
Ar-3	۱۶۷۷۶	۵۸۶/۷	۳۹۱/۶	./۱.۳	۲۴	۸/۴	۴/۶	۱۰/۶	۳/۷۲	./۳۳	۱۹۹۱۰.۹	۴۳۴۵	۱۳/۷	۵۷۲۳	۷۵۶	۴۳/۵	۴۱۲۶۲
CH-6	۴۰۹۳	۴۲/۳	۵۷/۸	./۰.۷	۵	۱/۷	۲/۸	۶/۱	./۸.۴	./۰.۷	۱۸۲۰.۵	۱۳۱۹	۸/۹	۵۷۱۵	۴۳۲	./۸	۱۷۵۲۶۵
CH-7	۹۴۲۷	۴۱/۴	۱۵۴/۵	./۱.۳	۹/۱	۵/۷	۲/۲	۱۱/۵	۲	./۱.۷	۵۵۵۰.۷	۲۴۸۵	۱۱۰.۸	۴۷۵۳	۴۵۲۰	۴/۸	۱۲۵۴۶
CH-2	۳۱۵۶	۵۱۸/۸	۱۱۴/۳	./۱.۲	۱۱/۱	۵/۷	./۸	۵/۱	۱/۱	./۰.۶	۲۹۴۳۱۹	۲۵۸۳	۷/۶	۷۱۱۳	۶۰.۹۸	۵۵/۳	۱۴۸۳۷۶
CH-5	۱۷۹۹	۱۷۸۸۲	۲۶/۸	./۵.۱	۶	./۷	۱/۳	۱/۹	./۱۶۹	./۰.۶	۵۴۳۸۰.۷	۷۵۴	۱۱	۳۶۸۵	۶۰.۵	۲۰.۸۳	۵۰۰.۶
Sample No.	Nb	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc	Sn	Rb	Sr	Th	Ti	U	V	Y	Zn	Zr
A-1	۱/۱۴	۸/۷	۱۴۰	۱۳/۴۳	۱۹۵۰۰	./۳.۷	۱/۸	./۳	۱۴/۴	۱۱۷۵	۱/۱	۵۲۰	۲/۴	۱۹	۱۱/۳	۴۹۰/۷	۱۳/۲
A-2	۴/۵۷	۲۲/۸	۴۰۰	۱۳/۶۳	۶۹۰۰	./۱۶.۴	۶/۴	./۸	۴۵/۲	۱۶۹۸	۳/۹	۱۹۴۰	۱/۲	۶۰	۹/۵	۸۲/۲	۳۷/۴
A-3	۳/۲۱	۱۸/۲	۲۴۰	۹/۱۰	۱۳۳۳۰۰	./۴۰	۳/۶	./۴	۲۹/۵	۱۵۶۰	۲/۱	۱۲۵۰	۱/۷	۲۴	۴/۶	۱۸۵/۱	۲۴/۹
A-4	۳/۲۱	۱۷/۱	۲۷۰	۱۲/۴۵	۷۵۸۰۰	./۵.۷	۴/۳	./۶	۳۱/۹	۱۹۰.۹	۲/۵	۱۳۳۰	۲/۹	۳۷	۶/۳	۱۳۴/۵	۲۶/۳
A-5	./۱۶۷	۱۹/۹	۶۰	۹/۷۹	۳۴۱۰۰	./۲.۰	./۸	./۲	۱۲/۱	۳۷۴۰	./۵	۲۵۰	۱۴/۵	۳۷	۶/۹	۱۳۱۳/۵	۵/۲
A-6	۴/۵۲	۲۳/۴	۳۸۰	۱۴/۵۴	۱۳۷۰۰	./۱۶.۳	۵/۹	./۷	۳۸/۲	۱۲۲۶	۳/۵	۱۹۰۰	۱/۲	۶۰	۸/۹	۳۸/۱	۳۵/۱
A-7	۳/۵۰	۱۳/۳	۳۳۰	۲۰/۸۲	۷۰۰	./۸.۹	۴/۴	./۶	۳۴/۷	۱۰۵۹	۳/۰	۱۸۹۰	۱/۶	۵۰	۱۲/۲	۲۱۲/۲	۳۰/۵
A-8	۴/۲۸	۲۲/۶	۳۸۰	۱۳/۳۴	۴۷۰۰	./۱۶.۶	۵/۸	./۶	۳۹/۸	۲۲۵۱	۳/۳	۱۹۵۰	۱/۳	۶۰	۸/۹	۱۱۴/۵	۳۸/۶
A-10	۳/۲۸	۴۴/۰	۳۲۰	۱۸/۳۲	۴۴۰۰	./۴۳	۴/۱	./۶	۲۹/۲	۱۱۱۱	۲/۶	۱۴۶۰	۵/۱	۱	۸/۵	۴۶۸/۸	۲۶/۰
CH-1	./۹	۲۲	۳۴۴	۶/۴	۳۵۶۵	./۳	۴	./۴	۱۵/۸	۹۹۱/۴	۱/۹	۷۰.۲	۱/۳۵	۳۵	۵/۷	۲۰.۵/۷	۶/۵
Ar-1	./۲	۱۱	۱۴۲	۲/۱	۳۶۱۶	۱/۲	./۷.۵	./۲	۶/۸	۱۱۷۳/۶	./۱۶۷	۱۹۲	۱/۳	۱۰	۱۸/۲۳	۱۴۶۶/۹	۲/۷
Ar-2	./۴	۱۳	۱۶۱	۴/۶	۹۸۱	./۷	۱	./۲	۱۰/۹	۱۲۹/۸	./۸۱	۳۵۸	۱۰/۸.۶	۱۶	۱۴/۰.۵	۱۲۲۸/۸	۴/۱
Ar-3	./۸	۱۷	۳۲۳	۸	۴۵۱۱	./۴	۵	./۵	۲۲/۴	۱۰۹۲۹/۵	۲/۲۸	۷۶۷	۴/۵۳	۵۰	۸/۳۴	۶۸۲/۱	۸/۵
CH-6	./۴	7	۱۲۹	۲/۸	۶۱۷۶۸	./۱	۱	./۲	۵/۳	۱۰۰۰/۷	./۷۸	۲۹۸	./۳.۱	۱۷	۱/۷	۳۵/۴	۲/۸
CH-7	./۹	۱۱	۲۲۴	۶/۶	۹۷۵۶۴	./۳	۳	./۴	۱۲	۳۲۲/۶	۱/۳۴	۶۶۰	۱/۳۲	۳۵	۳/۲۷	۲۱۲/۱	۵/۳
CH-2	./۴	۱۰	۱۷۲	۶/۹	۳۹۵۰	./۴	./۷.۵	./۲	۵/۲	۷۵۱/۴	./۷.۱	۲۲۹	۷/۸	۱۸	۷/۰.۹	۹۳۵/۵	۲/۱
CH-5	./۵	۳	۸۵	۵۸/۱	۳۴۰.۸	۲	./۷.۵	./۱.۵	۳/۳	۱۶۱۷/۱	./۲.۷	۱۰.۲	۱۵/۴۷	۱۲	۱۶/۹۹	۸۸/۵	۱/۱



شکل ۲. نمودار پای پر نمونه‌های آب گمانه‌های منطقه آیرکان و چشمه‌های منطقه چشمه‌شتری.

گرانیت آزاد، به آبهای زیرزمینی وارد شده و در نهایت در رسوبات منطقه چشمه‌شتری ته نشست یافته‌اند.

آنالیز خوشه‌ای

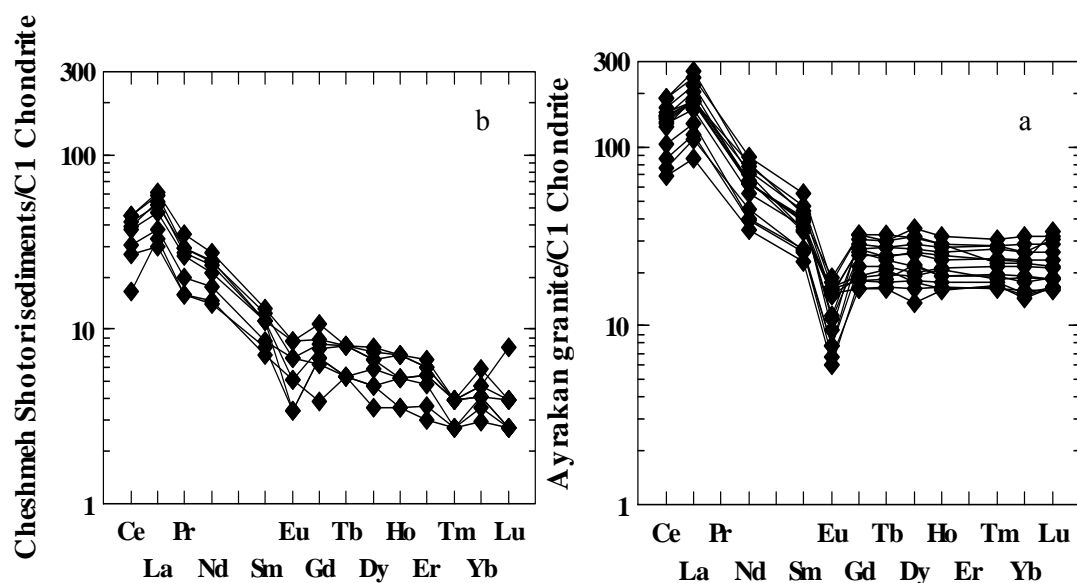
آنالیز خوشه‌ای عناصر اندازه‌گیری شده در رسوبات منطقه چشمه‌شتری بر اساس نمودار درختی (دندوگرام) نشان می‌دهد که اورانیوم، آهن، مولیبدن و روی تحت ضریب تشابه بالا به هم متصل شده‌اند (شکل ۴)، چند دلیل برای این ظریب تشابه بسیار بالا وجود دارد:

۱- عناصر مولیبدن و روی از عناصر ردیاب ذخایر اورانیوم و به خصوص در ذخایر رسوبی اورانیوم هستند که می‌تواند به عنوان عامل مناسبی در اکتشاف ذخایر اورانیوم در این مناطق به حساب آید.

۲- اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تمایل بسیار زیادی برای جذب سطحی اورانیوم (یون اورانیل) دارند که ضریب تشابه بالای اورانیوم و آهن احتمالاً نشان‌دهنده جذب سطحی اورانیوم توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است. مطالعه رسوبات موجود در منطقه چشمه‌شتری نیز نشان‌دهنده وجود توالی تکرار شونده از لایه‌های اکسیدی قرمز رنگ (A-1)، ته نشست یافته از چشمه‌های این منطقه است (شکل ۵).

ژئوشیمی عناصر نادر خاکی

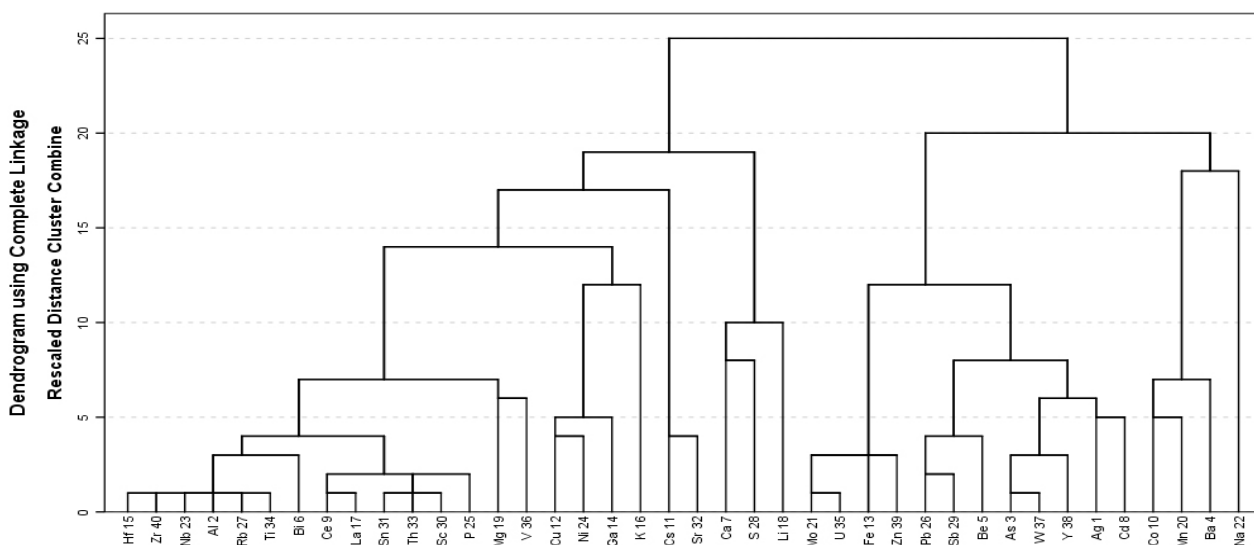
عناصر نادر خاکی به طور وسیعی جهت استنباط فرآیندهای ژئوشیمیایی گوناگون به کار می‌روند. شناخت رفتار این عناصر می‌تواند پاسخ‌گوی بسیاری از ابهامات و سوالات پیرامون نحوه کانه‌زایی‌های احتمالی و واکنشهای سنگ/آب در محیطهای ژئوشیمیایی و هیدروژئوشیمیایی باشد، زیرا REEها همچون ایزوتوپ‌های پایدار نقش اساسی در نمایش منشأ مواد معدنی و تکامل مایعات کانه‌دار دارند. آبهای زیرزمینی می‌توانند ماهیت REE خود را از سنگهایی که از بین آنها عبور کرده‌اند گرفته و بنابراین شناخت نحوه مهاجرت این عناصر در محیطهای طبیعی برای فهم فرآیندهای شیمیایی کنترل‌کننده تحرک آنها مناسب است [۹-۱۱]. بررسی خصوصیات عناصر نادر خاکی در رسوبات منطقه چشمه‌شتری و سنگهای گرانیت آیرکان (شکل ۳، جداول ۴ و ۵) بیان‌کننده شباهت الگوی توزیع REEها در گرانیت آیرکان و رسوبات منطقه چشمه‌شتری که از آب چشمه‌های این منطقه ته نشست یافته‌اند، می‌باشد. الگوی توزیع عناصر نادر خاکی نشان می‌دهد که REEهای موجود در این رسوبات، ویژگیهای خود را از گرانیت آیرکان گرفته‌اند. به گونه‌ای که با برهمکنش سنگ/آب (گرانیت/آب) در منطقه آیرکان و هوازدگی گرانیت آیرکان، REEها از این



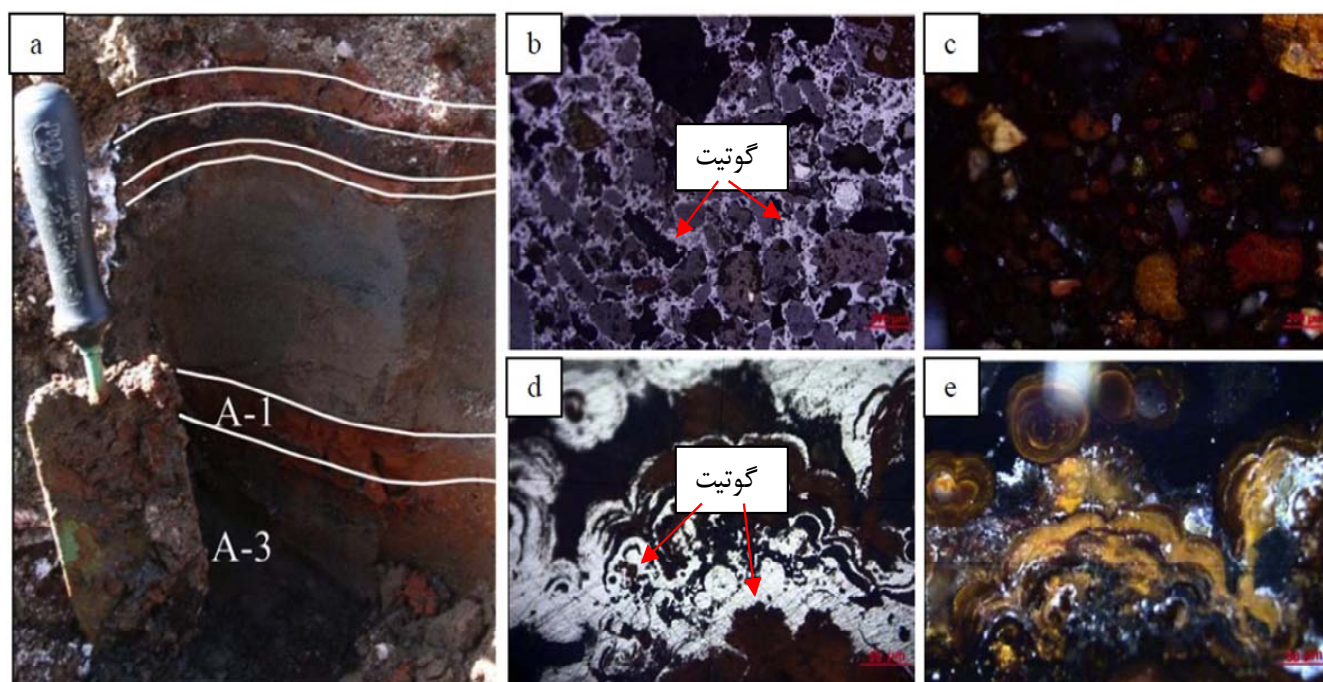
شکل ۳. الگوی به‌هنجار شده REE نسبت به کندریت (a) گرانیت آیرکان، (b) رسوبات منطقه چشمه‌شتری.

رسوبات با مقاومت مخصوص ظاهری کمتر از ۱ در سطح و اعماق است [۱۴]. محاسبه ضرایب همبستگی میان مؤلفه‌های مختلف اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که عناصری که ضریب تشابه بالایی در نمودار درختی با اورانیوم دارند، همبستگی بالایی نیز با این عنصر نشان می‌دهند. بیشترین همبستگی نیز بین U و Mo (۰/۹۶) و سپس روی و آهن وجود دارد. که همبستگی بالای اورانیوم و آهن نیز می‌تواند دلیل دیگری بر جذب سطحی اورانیوم توسط آهن باشد (شکل ۷، جدول ۷).

مطالعه XRD رسوب این لایه بیان‌کننده حضور بالای گوتیت در لایه‌های اکسیدی قرمز رنگ می‌باشد (شکل ۶، جدول ۶). گوتیت ($\alpha\text{-FeOOH}$) تمایل زیادی برای جذب سطحی یون اورانیل (UO_2^{2+}) دارد، در نتیجه جذب سطحی اورانیوم توسط گوتیت و هیدروکسیدهای آهن می‌تواند علت ضریب تشابه بالای بین اورانیوم و آهن باشد [۱۲-۱۳]. وجود چنین توالی تکرار شونده و حضور هیدروکسیدهای آهن (گوتیت) در اعماق بیشتر نیز متصور است چرا که مطالعات ژئوفیزیکی با روش مقاومت‌سنجی در مناطق مورد مطالعه نیز نشان‌دهنده حضور



شکل ۴. دندوگرام آنالیز خوشه‌های نمونه‌های رسوب منطقه چشمه‌شتری.



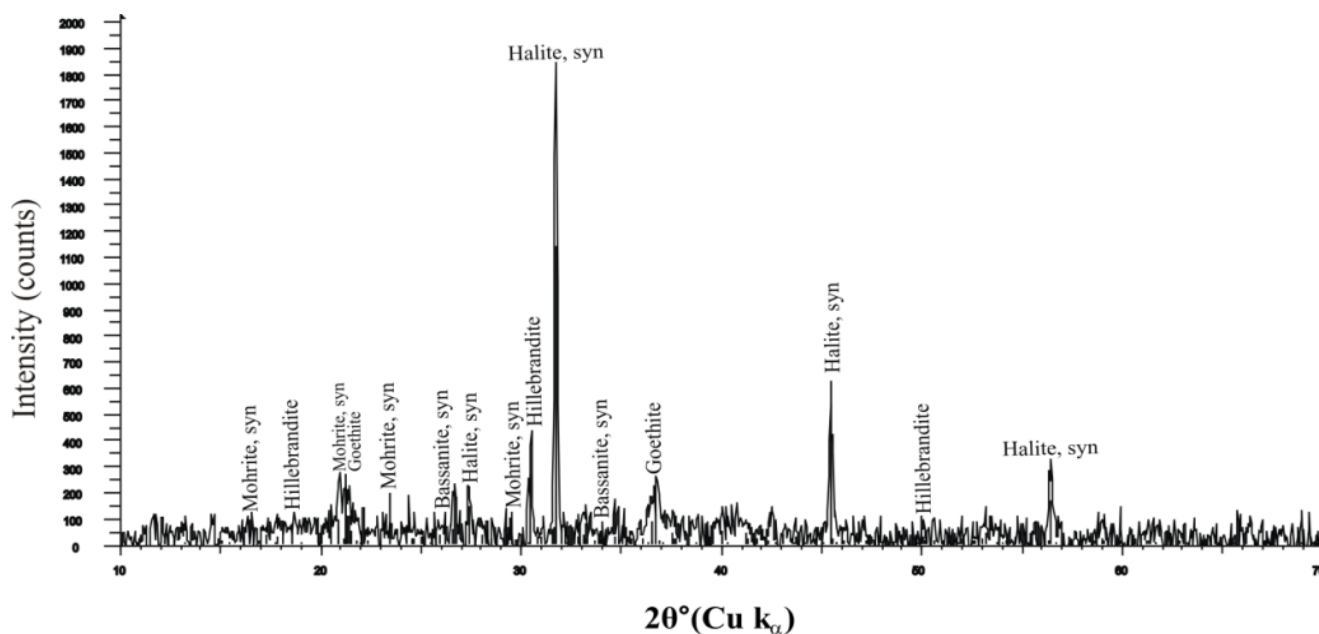
شکل ۵. (a) توالی تکرار شونده رسوبات قرمز رنگ (گویتیت) و تیره رنگ، (b) گویتیت به صورت بین دانه‌ای در نور RPPL، (c) شکل b در نور RXPL، (d) گویتیت با بافت بوتروئید در نور RPPL، (e) شکل d در نور RXPL.

جدول ۴. نتایج آنالیزهای شیمیایی عناصر نادر خاکی (ppm) گرانیت آیرکان (اقتباس از [۷]).

Type	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite	granite
Sample No.	A1	A2	A3	A4	A6	A10	A11	A12	A20	A21	A23	A24	A26	A27	A28	A30
La	۴۰/۰۴	۴۲/۷۵	۴۲/۸۲	۴۲/۴۴	۳۸/۴۷	۶۲/۹۷	۵۲/۴۱	۴۴/۶۷	۳۱/۷۸	۴۸/۴۲	۲۰/۶۲	۲۶/۰۴	۲۷/۹۶	۴۲/۵۴	۵۷/۶۴	۴۱/۵۷
Ce	۸۹/۰۲	۹۲/۱۷	۸۹/۷۲	۹۵/۱۶	۸۲/۸۶	۱۱۵/۱	۱۰۰/۵۷	۷۹	۶۳/۰۷	۹۱/۴۴	۴۲/۴۶	۴۶/۳۶	۵۲/۲۲	۸۴/۳۴	۱۱۵/۱۲	۸۷/۰۷
Nd	۴۲/۳۸	۳۷/۴۶	۲۸/۸۵	۳۴	۲۵/۶	۳۶/۱۱	۳۲/۶۳	۳۰/۳۳	۱۸/۳۷	۲۹/۱	۱۶/۱۱	۲۰/۸۲	۱۸/۱۷	۲۹/۳۷	۴۰/۹۵	۲۹/۲۷
Sm	۵/۹۷	۶/۵۱	۶/۰۹	۶/۷۳	۵/۵۳	۷/۰۹	۵/۲۳	۵/۱۹	۴/۱۱	۶/۱۶	۳/۴۸	۴	۳/۹۸	۵/۸۵	۸/۴۳	۶
Eu	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۶۶	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۴۵	۱/۰۹	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۸۸	۱/۰۲	۰/۶۴
Gd	۶/۶۴	۶/۲۷	۵/۸۳	۳/۷۹	۵/۴۸	۳/۹۲	۳/۶۴	۳/۳	۴/۴۵	۶/۵۹	۳/۶۷	۳/۳	۵/۳۴	۵/۴۹	۶/۶۱	۵/۱
Tb	۱/۱۹	۱/۱۱	۱/۰۲	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۷۷	۰/۶۶	۰/۶	۰/۸۱	۱/۲	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۸۷	۱/۰۳	۱/۱۲	۰/۹۲
Dy	۸/۱۹	۸/۸۶	۷/۲۶	۴/۷۹	۶/۶	۴/۴۸	۴/۵۶	۳/۴۳	۵/۰۸	۷/۹۱	۵/۵۳	۴/۱۲	۵/۴۹	۶/۸۸	۸/۱	۶/۴۵
Ho	۱/۴۸	۱/۷۹	۱/۵۶	۱/۱۷	۱/۳۹	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۸۹	۱/۱۸	۱/۶۱	۱/۰۷	۰/۹۳	۱/۰۷	۱/۴۷	۱/۶۲	۱/۳۱
Tm	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۷۱	۰/۴۷	۰/۵۹	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۴۳	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۶۸	۰/۷۲	۰/۶۱
Yb	۴/۱۵	۵/۳۴	۴/۸۲	۳/۱۶	۳/۹۱	۲/۵۴	۲/۶	۲/۴۳	۳/۶۲	۳/۸	۳/۲۱	۲/۶۸	۲/۹۶	۴/۳۷	۴/۴۱	۳/۹۴
Lu	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۴۶	۰/۸۵	۰/۴۱	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴	۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۶۶	۰/۵۹

جدول ۵. نتایج آنالیزهای شیمیایی عناصر نادر خاکی (ppm) رسوبات منطقه چشمه شتری.

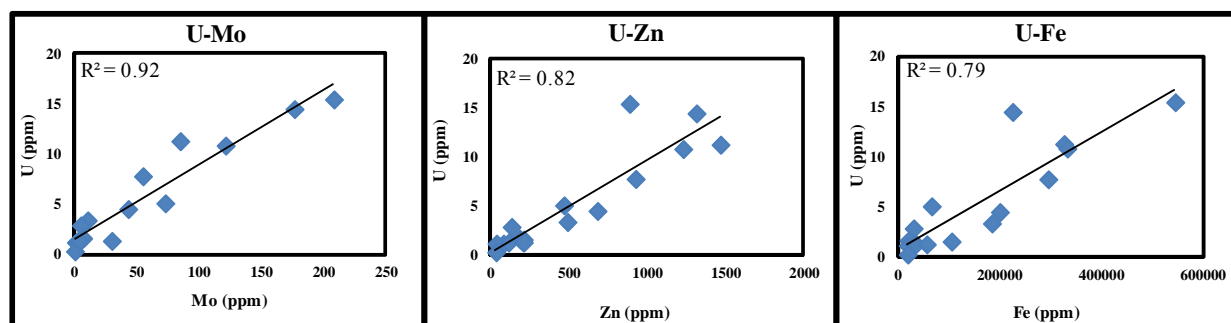
Type	sediment	sediment	sediment	sediment	sediment	sediment	sediment	sediment
Sample No	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-7	A-8	A-10
La	۷/۸	۱۴/۴	۷	۸/۹	۲/۲	۱۱/۱	۱۲/۳	۱۲/۸
Ce	۱۰/۰۴	۲۷/۴۴	۱۶/۵۳	۱۸/۷	۳/۹۶	۲۲/۸۹	۲۵/۱۱	۲۳/۷۱
Pr	۱/۵	۳/۳	۱/۵	۱/۹	۰/۴	۲/۵	۲/۸	۲/۶
Nd	۶/۵	۱۲/۹	۶/۸	۸/۱	۱/۹	۹/۹	۱۱/۴	۱۰/۹
Sm	۱/۲	۲	۱/۱	۱/۳	۰/۳	۱/۷	۱/۹	۱/۷
Eu	۰/۲	۰/۵	۰/۳	۰/۴	۰/۰۷	۰/۳	۰/۴	۰/۲
Gd	۱/۴	۲/۲	۰/۸	۱/۳	۰/۳	۱/۶	۱/۷	۱/۴
Tb	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۰۷	۰/۳	۰/۳	۰/۲
Dy	۱/۵	۱/۹	۰/۹	۱/۲	۰/۵	۲	۱/۷	۱/۲
Ho	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۲	۰/۰۷	۰/۴	۰/۳	۰/۳
Er	۰/۹	۱/۱	۰/۵	۰/۶	۰/۳	۱	۰/۹	۰/۸
Tm	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷
Yb	۰/۷	۱	۰/۵	۰/۶	۰/۲	۰/۸	۰/۷	۰/۷
Lu	۰/۰۷	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۲	۰/۱	۰/۰۷



شکل ۶. الگوی پراش اشعه X رسوب قرمز رنگ (نمونه A-1).

جدول ۶. نتایج مطالعه XRD لایه قرمز رنگ (نمونه A-1).

Compound Name	Formula	PDF Number	Concentration (%W/W)
Goethite	FeO(OH)	۲۲-۰۷۲۳	۱۸/۹
Halite, syn	NaCl	۰۵-۰۶۲۸	۲۱/۵
Hillebrandite	Ca ₂ (SiO ₃)(OH) ₂	۴۲-۰۵۳۸	۲۲
Mohrite, syn	(NH ₄) ₂ Fe(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	۳۵-۰۷۶۴	۲۲
Gismondine	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ ·4H ₂ O	۲۰-۰۴۵۲	۱۵/۲



شکل ۷. نمودارهای همبستگی اورانیوم با مولیبدن، روی و آهن.

جدول ۷. محاسبه ضرایب همبستگی عناصر مختلف نمونه‌های رسوب منطقه چشمه‌شتری.

Correlation range	Element	Positive correlation	Negative correlation
$\pm < 0/1$	U	Sr-Ba	
$\pm 0/1 - \pm 0/2$	U		Na
$\pm 0/2 - \pm 0/3$	U		Cs-Ni-Ga-Li
$\pm 0/3 - \pm 0/4$	U	Mn	K-S
$\pm 0/4 - \pm 0/5$	U		Cu-V
$\pm 0/5 - \pm 0/6$	U	Pb-Cd-Co-Sb	Al-Ce-La-Mg-Zr-Hf-Nb-Rb
$\pm 0/6 - \pm 0/7$	U	Y	Th-Ti- Ca-Sc-Sn
$\pm 0/7 - \pm 0/8$	U	As-W	P
$\pm 0/8 - \pm 0/9$	U	Fe	
$\pm 0/9 - 1$	U	Mo-Zn	

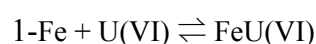
جذب سطحی

هیدروکسیدهای آهن مانند گوتیت ظرفیت بالایی در جذب یون اورانیل دارند [۱۶-۳۰]. کانه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن که نقش جذب را دارند بسته به گستره pH شارژ سطحی گوناگونی دارند [۳۱، ۳۲]. وقتی pH پایین است شارژ سطحی به شدت مثبت می‌باشد که در این شرایط تمرکز اورانیوم محلول به دلیل دفع یون اورانیل از سطح جاذبها بالا می‌باشد. اما وقتی میزان pH افزایش یابد جذب سطحی کاتیون‌ها افزایش می‌یابد [۲۲-۳۱]، به گونه‌ای که از pH=۴/۵-۵/۵ جذب سطحی به شدت افزایش یافته و سپس از pH=۵/۵-۷/۵ روند یکنواختی نشان می‌دهد. در این pH انتقال U(VI) به وسیله جذب سطحی هیدروکسیدهای آهن محدود شده و U(VI) شدیداً جذب می‌گردد [۱۶، ۲۶، ۲۷]. سپس در pH=۷/۵-۸/۵

اورانیوم (VI) در محیطهای زیر سطحی به شدت توسط واکنشهای جذب سطحی/دفع سطحی در ارتباطهای جامد/محلول تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۱۵-۲۱]. جذب سطحی یون اورانیل در حقیقت یک مرحله اضافی قبل از تمرکز و شکل گیری تعداد زیادی از کانه‌های اورانیوم احیا یا اکسید شده می‌باشد و مقدار زیادی از کانه‌های اورانیوم با جذب سطحی گونه‌های یون اورانیل از آب زیرزمینی توسط هیدروکسیدهای آهن شکل می‌گیرند [۲۲]. جذب سطحی یون اورانیل بر روی مواد آلی و غیر آلی از مهمترین فرآیندهای تمرکز اورانیوم در محیطهای آبی دمای پایین است. عناصر آهن به خوبی یون اورانیل را جذب و احیا می‌کنند [۲۳]. اکسیدها و

شمال‌غربی منطقه و در گمانه‌های مجاور گرانیت آیرکان و حداکثر میزان توریم محلول در منطقه چشمه‌شتری و در نمونه‌های آب چشمه‌های این منطقه وجود دارد. با توجه به مطالعه عناصر نادر خاکی رسوبات چشمه‌های منطقه چشمه‌شتری و هیدروشمیمی آبهای زیرزمینی، گرانیت آیرکان را به عنوان منشأ رسوبات محلول در آبهای زیرزمینی مناطق مورد مطالعه و مهمترین زون تغذیه آبهای زیرزمینی نشان می‌دهد، در نتیجه روندهای مشاهده شده منطقی نیست. زیرا اگرچه نسبت اورانیوم به توریم در نمونه‌های آب چشمه‌های منطقه چشمه‌شتری بالاست ولی به دلیل تحرک بسیار کمتر توریم نسبت به اورانیوم در محیطهای آبدار [۲۲، ۳۹]، روندهای موجود قابل تأمل می‌باشد. تمرکز توریم در آب طبیعی (۹- pH=۵) به ندرت از ۱ ppb اضافه‌تر می‌شود. این تمرکز ناچیز توریم ترکیبی از میزان پایین انحلال کانه‌های توریم‌دار و تحرک کم توریم می‌باشد [۳۶]. انحلال توریم با کمپلکس سازی این عنصر با عوامل کمپلکس‌ساز افزایش می‌یابد. پایدارترین کمپلکس‌های توریم در آبهای طبیعی شامل کمپلکس‌های سولفات و فلوریدی در pHهای اسیدی (۵/۴ < pH)، کمپلکس‌های فسفات در pHهای اسیدی تا نزدیک به خنثی (با حضور ۱ ppm فسفات محلول) و به خصوص کمپلکس‌های هیدروکسیدی توریم، $(Th(OH)_4)^0$ در pHهای آلكالین و نزدیک به خنثی می‌باشد که کمپلکس هیدروکسیدی مهمترین و فراوان ترین کمپلکس توریم است [۲۲، ۳۱، ۳۶، ۳۹].

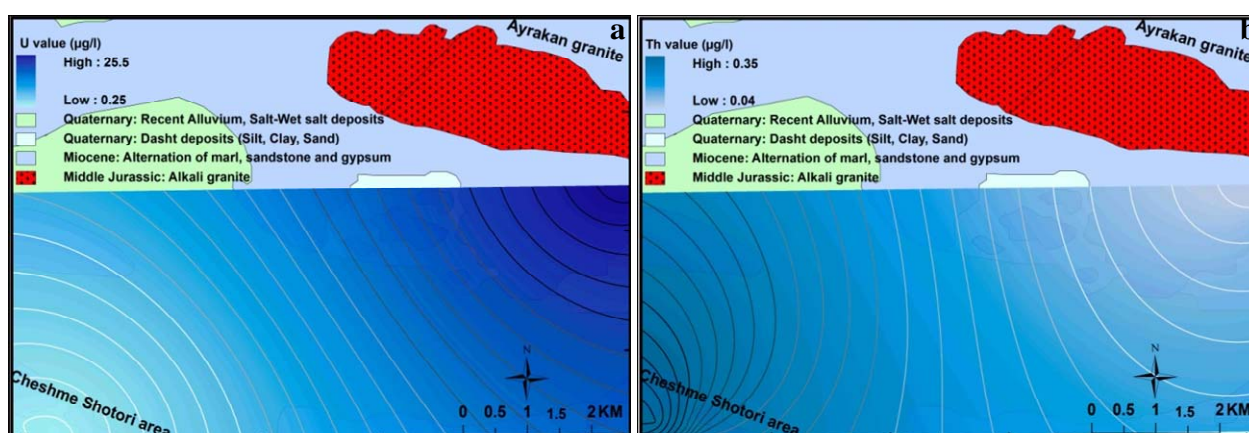
جذب سطحی به شدت کاهش می‌یابد [۳۳]. احیا ممکن است در ادامه جذب سطحی اورانیوم محلول در آب صورت پذیرد. احتمالاً مقدار زیادی از کانه‌های اورانیوم با جذب سطحی گونه‌های یون اورانیل از آب زیرزمینی توسط آهن و پیرو آن احیا شکل می‌گیرند [۲۲]. احیای UO_2^{2+} توسط آهن (احیای U (VI) به U (IV) ابتدا توسط کانترو و همکاران [۳۴]، ارائه گردید. جذب سطحی U (VI) و متعاقباً احیای آن به U (IV) توسط آهن به ترتیب طی معادله‌های زیر صورت می‌گیرد [۳۵]:



بیشترین درصد کل اورانیوم که در یک سیستم آب- رسوب جذب شده است در پایین ترین سطوح انحلال پذیری اورانیوم قرار دارد [۲۵، ۳۶، ۳۷]. دامنه pH آبهای زیرزمینی مناطق مورد مطالعه هم نشان می‌دهد که در این گستره pH جذب سطحی اورانیوم توسط هیدروکسیدهای آهن غالب می‌باشد.

نقشه‌های هم مقدار اورانیوم و توریم

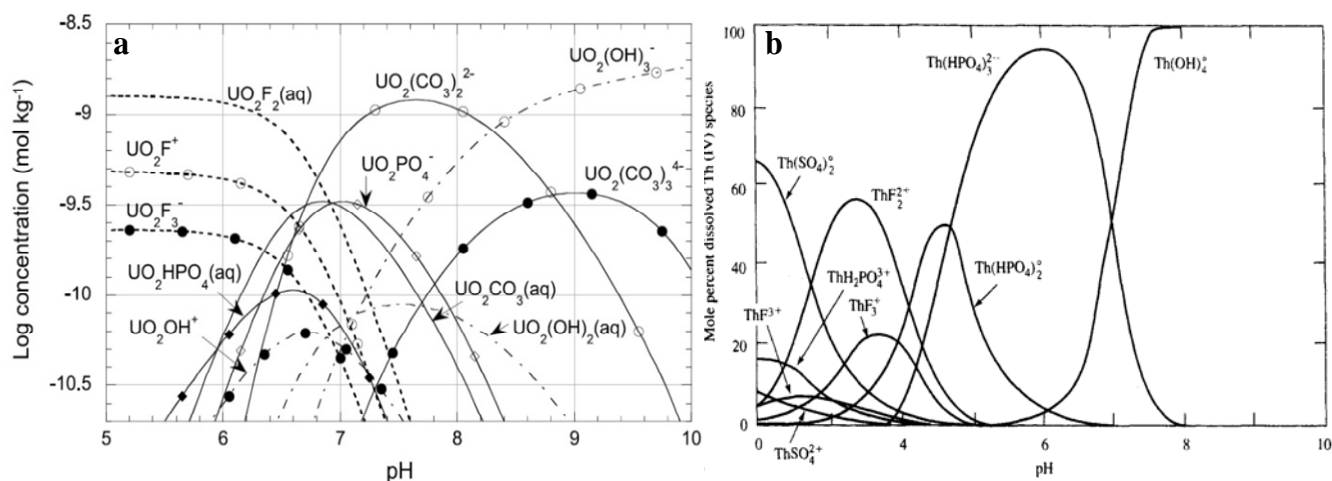
برای به دست آوردن تصوّر کلی از روند تغییرات اورانیوم و توریم در محیط هیدروژئوشیمیایی مناطق مور مطالعه، می‌توان از نقشه‌های هم مقدار این عناصر استفاده کرد. به دلیل پراکندگی ایستگاههای اندازه‌گیری برای ترسیم این نقشه‌ها از روش درون‌یابی کریجینگ که مناسب توزیع‌های ناهمگن است، استفاده شد [۳۸]. منحنیهای هم مقدار U و Th (شکل ۸) نشان می‌دهد که روندهای مربوط به این عناصر به هیچ وجه از هم تبعیت نکرده و حداکثر میزان اورانیوم محلول در بخش



شکل ۸. (a) نقشه هم مقدار اورانیوم (b) نقشه هم مقدار توریم.

کمپلکس‌های توریم به دلیل آبکافت این کمپلکس، یون Th^{4+} با H_3O^+ برای جذب سطحی رقابت کرده و در نتیجه جذب سطحی توریم کاهش یافته و توریم متحرک می‌ماند [۳۶]. در مقابل اورانیوم به شدت توسط هیدروکسیدهای آهن جذب می‌گردد. دلایل فوق بیان می‌کند که جذب سطحی اورانیوم و دفع توریم، دلیل حمل بیشتر توریم از گرانتیت آیرکان به سمت منطقه چشمه‌شتری علی‌رغم تحرک کمتر توریم در محیط‌های آبدار دما پایین می‌باشد. بنابراین تحرک و انتقال اورانیوم در آب‌های زیرزمینی به شدت با جذب سطحی توسط هیدروکسیدهای آهن (گوتیت) در عمق و در منطقه آیرکان (گرانتیت آیرکان) و منطقه چشمه‌شتری کنترل شده است.

در دامنه pH آب‌های زیرزمینی مناطق آیرکان و چشمه شتری (۴/۸۹-۷/۶۷) و به دلیل پایین بودن یون فسفات ($<0.05 \text{ mg/l}$) هیدروکسید توریم ($\text{Th}(\text{OH})_4^0$) عامل کمپلکس‌ساز با توریم در این آب‌ها می‌باشد (شکل ۹b). در pH نزدیک به خنثی و آلکان پایدارترین کمپلکس‌های اورانیوم کمپلکس‌های فسفات و کربناته می‌باشند [۲۲، ۴۰-۴۴]، که با توجه به دامنه pH آب‌های زیرزمینی مناطق مورد مطالعه و پایین بودن یون فسفات ($<0.05 \text{ mg/l}$) کمپلکس‌های کربناته عامل کمپلکس‌ساز با اورانیوم هستند (شکل ۹a). جذب سطحی توریم همچون اورانیوم توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن با افزایش pH (۵-۷/۵) افزایش می‌یابد. اما در مورد کمپلکس‌های هیدروکسیدی برخلاف سایر



شکل ۹. کمپلکس‌های (a) اورانیوم [۴۱]، (b) توریم [۳۱] در محیط‌های آبی دما پایین.

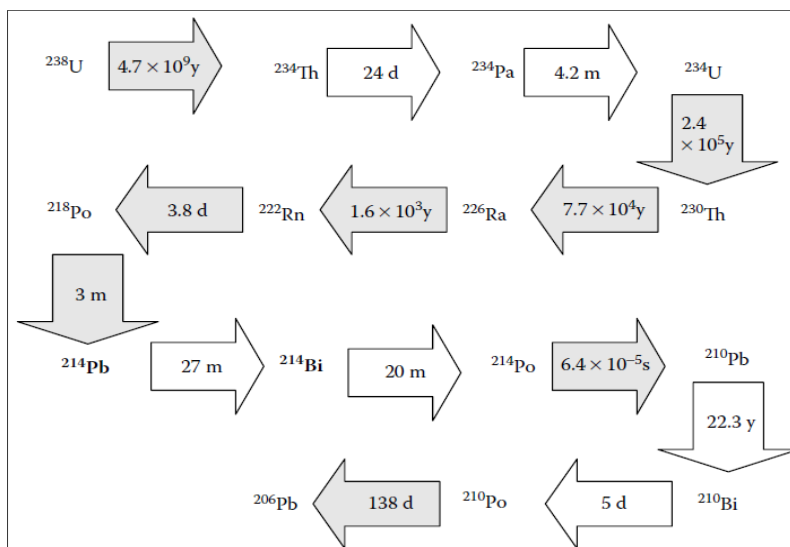
نیمه‌عمر از هسته دختر، فعالیت هسته مادر و دختر با هم یکی می‌شود که به اصطلاح گفته می‌شود نمونه به تعادل رسیده است [۴۶]. زنجیره واپاشی ^{238}U را در شکل (۱۰) مشاهده می‌کنید [۴۷]. به منظور به تعادل رسیدن فعالیت رادیواکتیو بین هسته‌های مادر و دختر نمونه رسوب مورد نظر مطابق با نمونه استاندارد (نمونه استاندارد دارای ویژگی‌ها و فعالیت معلوم است) از مش ۱۸۰، به میزان ۵۰۰ گرم عبور داده شد و درون ظرف مارینلی به خوبی ایزوله گردید تا ارتباط آن با فضای بیرون قطع شود و گاز رادون نتواند به بیرون فرار کند. (شکل ۱۱) سپس به مدت ۷ نیمه عمر (حداً ۳۵ روز) صبر شد تا دختر هسته‌های تولیدی به حالت تعادل با ^{226}Ra و ^{222}Rn برسند. ^{226}Ra با گسیل یک ذره آلفا، تبدیل به گاز ^{222}Rn با

تشخیص و تعیین میزان هسته پرتوزا

با توجه به میزان بسیار بالای پرتوزایی مواد رادیواکتیو در منطقه چشمه‌شتری، نمونه رسوب A-3 که حاصل ته نشست از یکی از چشمه‌های این منطقه است (شکل ۵) به منظور تعیین فعالیت هسته پرتوزا توسط دستگاه HPGe مورد آنالیز قرار گرفت. اساس کار در روش طیف‌سنجی گاما با استفاده از آشکارساز HPGe، برای نمونه‌های محیطی بر مبنای به تعادل رسیدن فعالیت رادیواکتیو بین هسته‌های مادر و دختر است [۴۵]. در واپاشی‌های زنجیره‌ای، هسته مادر به هسته دختر واپاشیده می‌شود و ممکن است هسته دختر هم به دیگر دختر هسته‌ها واپاشی کند. اگر نیمه عمر هسته مادر، بسیار بزرگتر از نیمه‌عمر هسته دختر باشد، بعد از گذشت زمان ۷

و پاشی در واحد زمان است)، باید تعداد شمارش انجام شده از نمونه مورد اندازه‌گیری را با تعداد شمارش شده از نمونه استاندارد مقایسه کرد و فعالیت نمونه مجهول را به دست آورد [۴۶، ۴۸]. بنابر این از هر ۲ نمونه مجهول و استاندارد توسط آشکارساز HPGe طیف گرفته شد (شکل ۱۲).

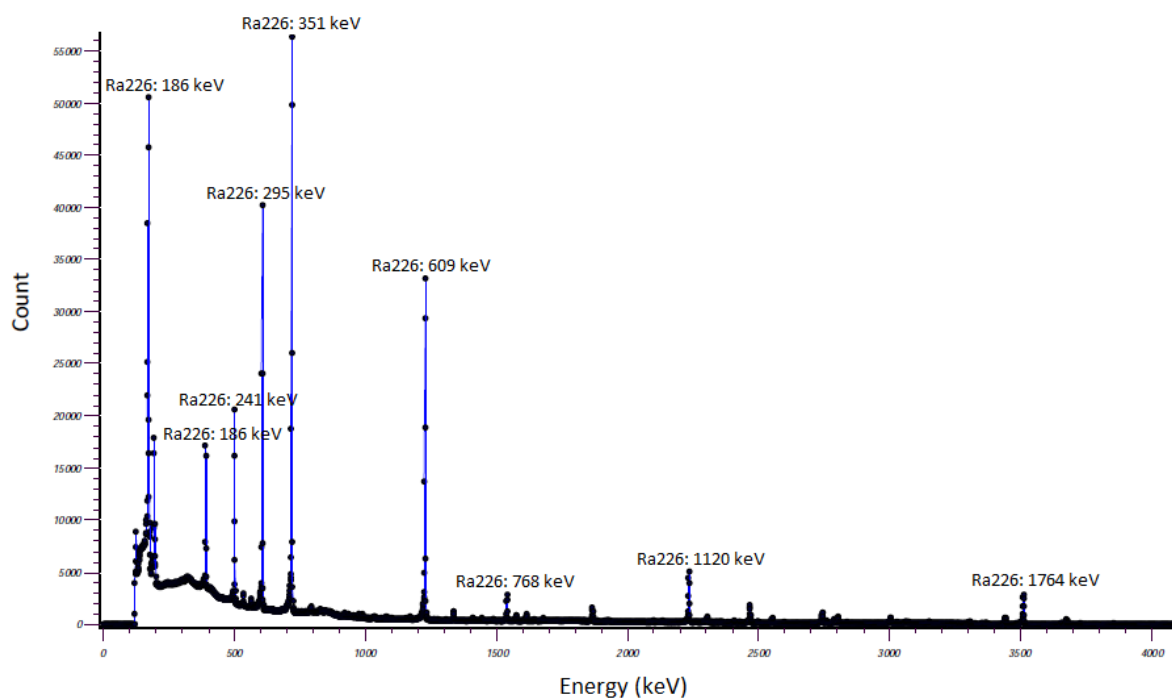
نیمه‌عمر ۳/۸ روز تبدیل می‌شود [۴۸]. جهت تعیین فعالیت ^{238}U باید فعالیت ^{226}Ra اندازه‌گیری گردد. فعالیت ^{226}Ra با اندازه‌گیری گاما‌های گسیلی از دخترهسته‌ها ^{214}Bi و ^{214}Pb ، تعیین می‌شود. این فعالیت تعیین شده برابر با فعالیت ^{238}U است. برای به دست آوردن فعالیت هسته پرتوزا در نمونه مورد آزمایش بر حسب بکرل بر کیلوگرم (Bq) ۱ برابر با یک



شکل ۱۰. زنجیره و پاشی ^{238}U [۴۷].



شکل ۱۱. نمایی از ظرف مارینلی مورد استفاده.



شکل ۱۲. نمودار طیف گرفته شده از رسوب (A-1)، محور قائم نشان‌دهنده شمارش در هر انرژی است.

در ذهن شکل بگیرد که یک ذخیره رادیوم در عمق وجود دارد که این فرضیه به سه دلیل رد می‌شود:

۱- نیمه‌عمر ^{226}Ra در حدود ۱۶۰۰ سال است و پس از گذشت ۷ نیمه‌عمر به اتمام می‌رسد. پس عمر کانسار احتمالی رادیوم حداکثر ۱۱۲۰۰ سال است. ولی می‌دانیم که تصور این سن در مقیاس زمین‌شناسی نادرست است.

۲- ^{226}Ra دختر هسته ^{238}U با نیمه‌عمر ۴/۵ میلیارد سال بوده و از واپاشی آن تولید می‌شود که به خوبی با فرضیه ذخیره اورانیوم سازگاری دارد (شکل ۱۰).

۳- نمونه رسوب برداشته شده در کنار یکی از چشمه‌های آب منطقه چشمه‌شتری با شوری بسیار زیاد است. از طرفی ^{226}Ra در آبهای شور بسیار محلول و متحرک می‌باشد و همبستگی بالایی بین رادیوم و شوری در آبهای زیرزمینی وجود دارد [۳۱، ۴۷، ۵۳-۵۹]، به همین دلیل انتقال تحرک و انتقال رادیوم توسط آبهای زیرزمینی به سطح افزایش یافته ولی جذب سطحی اورانیوم توسط هیدروکسیدهای آهن (گوتیت) مانع از انتقال اورانیوم به سطح شده است.

دامنه pH آبهای زیرزمینی مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد که در این گستره pH جذب سطحی غالب بوده و در نتیجه اورانیوم نتوانسته از جذب خارج شده و متحرک گردد. اگرچه توریم و

در مقایسه با نمونه استاندارد، فعالیت ^{226}Ra در نمونه مورد مطالعه 94883 Bq/kg به دست آمد. در نمونه‌های محیطی، معمولاً فعالیت ^{226}Ra را برابر با ^{238}U در نظر می‌گیرند زیرا ^{238}U دارای نیمه‌عمر ۴/۵ میلیارد سال است و ^{226}Ra دخترهسته ^{238}U ، نیمه‌عمر ۱۶۰۰ سال دارد. چون نیمه‌عمر هسته مادر بسیار بزرگتر از نیمه‌عمر هسته دختر است، فعالیت این هسته دختر و مادر در طبیعت یکسان است. ولی اگر به انرژی‌های گسیلی از دخترهسته‌هایی به غیر از ^{226}Ra ، مثل 63 keV گسیلی از ^{234}Th توجه شود، این انرژی در طیف مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۲) در حالی که این انرژی در نمونه‌های حاوی اورانیوم به خوبی مشهود است. پس پرتوایی مشاهده شده در خاک ناشی از اورانیوم نبوده و ناشی از ^{226}Ra است. البته میزان پایین اورانیوم در رسوبات منطقه چشمه‌شتری (جدول ۲) نیز دلیل دیگری بر این مطلب است. میزان رادیوم اندازه‌گیری شده در این نمونه رسوب بسیار بالاست زیرا تمرکز طبیعی ^{226}Ra در خاک بین $3/7 \text{ Bq/kg}$ تا $125/8 \text{ Bq/kg}$ می‌باشد که در کانسارهای اورانیوم بیشتر می‌شود [۴۹-۵۲]. از آنجا که این رادیوم توسط چشمه‌های آب از اعماق به سطح آورده شده است مقادیر بسیار زیاد رادیوم نشان‌دهنده یک کانسار اورانیوم در عمق و در مسیر جریان آب زیرزمینی می‌باشد. شاید این فرضیه

احتمالی بر این اساس ۱۱۲۰۰ سال خواهد بود. از طرف دیگر به دلیل همبستگی بسیار بالای رادیوم با شوری در آبهای با شوری بالا همانند آب چشمه‌های منطقه چشمه شتری و نقش این آبها در انحلال و انتقال رادیوم از جذب سطحی رادیوم توسط هیدروکسیدهای آهن جلوگیری شده است، در نتیجه احتمال کانه زایی و حضور کانسار مخفی اورانیوم در عمق و در حدفاصل گرانیات آیرکان و منطقه چشمه شتری به دلیل شواهد آزمایشگاهی و مطالعات هیدروژئوشیمیایی فوق تصور می‌شود.

منابع

- [1] Herman C., Thomas E. J., "Introduction to health physics", McGraw-Hill Medical New York (2009) 864.
- [2] Babakhani A. R., Susov M., Dvoryankin A., Selivanov E., Desyaterik N., "Geological Quadrangle map of Jandaq, 1:250,000", Geological Survey of Iran Tehran (1987).
- [3] Romanko E., Susov M., Dvoryankin A., Selivanov E., Tkachev E. G., Krivyakin B., Morozov L., Silaev V., Kiristaev V., Desyaterik N., "Geology and minerals of Jandaq area (central iran)", Technoexport Report TE/NO 4 (1979) 171.
- [4] Reyer D., Mohafez S., "Une premiere contribution des accords NiOC-ERAP a la connaissance geologique de l' Iran", Revue de l'Institut Francais du Petrole 25 (1970) 979-1014.
- [5] Bagheri S., Stampfli G. M., "The Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam metamorphic complexes in Central Iran: New geological data, relationships and tectonic implications", Tectonophysics 451 (2008) 123-155.
- [۶] بهارزاده ح.، "مطالعه پترولوژی گرانیات آیرکان (شمال شرق استان اصفهان)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۷) ۱۱۴.
- [۷] بهارزاده ح.، ترابی ق.، احمدیان ج.، ابراهیمیان ز.، "ژئوشیمی توده نفوذی آیرکان، دایکهای آپلیتی و آنکلاوهای موجود در آن (شمال شرق استان اصفهان)"، مجله پژوهشی دانشگاه اصفهان، شماره ۳ (۱۳۸۷) ۱۳-۳۲.
- [8] Hushmandzadeh A., "Metamorphisme et granitization du massif Chapedony (Iran Central)", Université Scientifique et Medicale de Grenoble Grenoble France (1969) 242.
- [9] Guoquan Z., Ruizhong H., Xianwu B., Haisheng F., Pengqiang S., Jianji T., "REE geochemical characteristics of the No. 302 uranium deposit in northern Guangdong, South

رادیوم نیز توسط هیدروکسیدهای آهن جذب می‌شوند [۳۱، ۳۶، ۵۹]، ولی رقابت توریم و یون هیدروکسیل در جذب سطحی [۳۶]، از یک سو و همبستگی بالای رادیوم و شوری و تمایل بسیار زیاد آبهای با شوری بالا در حمل و انتقال رادیوم از سوی دیگر [۴۷، ۵۳-۵۹]، از جذب سطحی توریم و رادیوم توسط گوتیت جلوگیری کرده است. در نتیجه علی‌رغم نسبت کم توریم/اورانیوم، از گرانیات آیرکان به سمت منطقه چشمه شتری شاهد تحرک بیشتر توریم در محیط آبی مناطق مورد مطالعه و همچنین انتقال میزان بسیار بالایی از رادیوم از سطح هستیم که موجب آنومالی بسیار بالایی از رادیوم در رسوبات منطقه چشمه شتری شده است. به دلیل انباشت رادیوم در سطح خاک از فرضیه برابر بودن فعالیت رادیوم و اورانیوم نمی‌توان برای تعیین میزان اورانیوم استفاده کرد و فقط می‌توان احتمال وجود یک کانسار اورانیوم را در عمق گزارش کرد.

برداشت

هیدروشیمی آبهای زیرزمینی و ژئوشیمی عناصر نادر خاکی رسوبات منطقه چشمه شتری و سنگهای گرانیات آیرکان، این گرانیات را به عنوان منشأ عناصر نادر خاکی و اورانیوم محلول در آبهای زیرزمینی نشان داده و بیان می‌کند که روند حمل عناصر محلول در این آبها از گرانیات آیرکان به سمت چشمه‌های منطقه چشمه شتری می‌باشد. با توجه به روند غیر معمول توریم و اورانیوم محلول در آبهای زیرزمینی بر اساس نقشه‌های هم مقدار آنها، حضور عاملی بازدارنده در برابر حمل و انتقال اورانیوم در اعماق و حدفاصل گرانیات آیرکان و منطقه چشمه شتری تصور می‌شود. حضور توالیهای تکرار شونده گوتیت تا اعماق زیاد که تمایل بسیار بالایی در جذب سطحی اورانیوم دارد، ضریب تشابه و همبستگی بالای اورانیوم و آهن نشان دهنده جذب سطحی اورانیوم توسط گوتیت می‌باشد. با توجه به تعیین ^{226}Ra به عنوان هسته پرتوزا در رسوبات منطقه چشمه شتری با محتوایی بسیار زیاد (94883Bq/kg) و حمل ^{226}Ra از طریق آبهای زیرزمینی به سطح، احتمال حضور کانه‌زایی مخفی اورانیوم در عمق وجود دارد. تصور حضور کانسار رادیوم در عمق با توجه به ^{226}Ra با نیمه عمر ۱۶۰۰ سال از واپاشی ^{238}U با نیمه عمر ۴/۵ میلیارد سال تشکیل می‌گردد در مقیاس زمین‌شناسی صحیح نیست زیرا عمر کانسار رادیوم

- C. S., Kitanidis P. K., "Modeling in-situ uranium(VI) bioreduction by sulfate-reducing bacteria", Journal of Contaminant Hydrology 92 (2007) 129–148.
- [21] Wazne M., Korfiatis G. P., Meng X. G., "Carbonate effects on hexavalent uranium adsorption by iron oxyhydroxide", Environmental Science Technology 37 (2003) 3619–3624.
- [22] Langmuir D., "Uranium solution–mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits", Geochimica et Cosmochimica Acta 42 (1978) 547–569.
- [23] Simon F. G., Biermann V., Segebade C., Hedrich M., "Behaviour of uranium in hydroxyapatite-bearing permeable reactive barriers: investigation using ^{237}U as a radioindicator", The Science of the Total Environment 326 (2004) 249–256.
- [24] Schwertmann U., Cornell R. M., "Iron Oxides in the Laboratory", Wiley-VCH Weinheim (2000) 188.
- [25] Hiemstra T., Hiemstra W. H. V., Rossberg A., Ulrich K-U., "A surface structural model for ferrihydrite II: Adsorption of uranyl and carbonate", Geochimica et Cosmochimica Acta 73 (2009) 4437–4451.
- [26] His C-K. D., Langmuir D., "Adsorption of uranyl onto ferric oxyhydroxides: application of the surface complexation site-binding model", Geochimica et Cosmochimica Acta 49 (1985) 1931–1941.
- [27] Duff M C., Amrhein C., "Uranium (VI) adsorption on goethite and soil in carbonate solutions", Soil Science Society of America Journal 60 (1996) 1393–1400.
- [28] Abdelouas A., Lutze W., Gong W., Nuttall E. H., Strietelmeier B. A., Travis B. J., "Biological reduction of uranium in groundwater and subsurface soil", Science of the Total Environment 250 (2000) 21-35.
- [29] Gavrilescu M., Pavel L. V., Cretescu I., "Characterization and remediation of soils contaminated with uranium", Journal of Hazardous Materials 163 (2009) 475–510.
- [30] Payne T. E., Waite T. D., "Surface complexation modeling of uranium sorption obtained by isotope exchange techniques", Radiochim. Acta 53 (1991) 487–493.
- [31] Langmuir D., "Aqueous Environmental Geochemistry", Prentice Hall New Jersey (1997) 600.
- China", Chinese Journal of Geochemistry 26(2007)425-433.
- [10] Takahashi Y., Yoshida H., Sato N., Hama K., Yusa Y., Shimizu H., "W- and M-type tetrad effects in REE patterns for water–rock systems in the Tono uranium deposit, central Japan", Chemical Geology 184 (2002) 311–335.
- [11] Johannesson K. H., Xiaoping Z., "Geochemistry of the rare earth elements in natural terrestrial waters: a review of what is currently known", Chinese Journal of Geochemistry 16 (1997) 20-42.
- [12] Iwatsuki T., Yoshida H., "Groundwater chemistry and fracture mineralogy in the basement granitic rock in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, Japan-groundwater composition, Eh evolution analysis by fracture filling minerals", Geochemistry: Exploration Environment Analysis 33 (1999) 19 – 32.
- [13] Noller B. N., "Watters RA, Woods PH. The role of biogeochemical processes in minimizing uranium dispersion from a mine site", Journal of Geochemical Exploration 58 (1997) 37 – 50.
- [۱۴] گروه ژئوفیزیک سازمان انرژی اتمی، "گزارش اکتشاف ژئوفیزیکی منطقه عروسان (کوه آیرکان-چشمه شتری)", گزارش داخلی سازمان انرژی اتمی، (۱۳۶۳) ۲۰.
- [15] Duff M. C., Coughlin J. U., Hunter D. B., "Uranium coprecipitation with iron oxide minerals", Geochimica et Cosmochimica Acta 66 (2002) 3533– 3547.
- [16] Waite T. D., Davis J. A., Payne T. E., Waychunas G. A., Xu N., "Uranium(VI) adsorption to ferrihydrite: application of a surface complexation model", Geochimica et Cosmochimica Acta 58 (1994) 5465–5478.
- [17] Murakami T., Sato T., Ohnuki T., Isobe H., "Field evidence for uranium nanocrystallization and its implications for uranium transport", Chemical Geology 221 (2005) 117–126.
- [18] Cheng T., Barnett M. O., Roden E. E., Zhuang J., "Reactive transport of uranium(VI) and phosphate in a goethite-coated sand column: An experimental study", Chemosphere 68 (2007) 1218–1223.
- [19] Brugger J., Long N., McPhail D. C., Plimer I., "An active amagmatic hydrothermal system: The Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia", Chemical Geology 222 (2005) 35– 64.
- [20] Luo G., Weber F-A., Cirpka O. A., Wu W. M., Nyman J. L., Carley J., Jardine P. M., Criddle

- [42] Gavriles M., Pavel L. V., Cretescu I., "Characterization and remediation of soils contaminated with uranium", *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 475–510.
- [43] Sarangi A. K., Krishnamurthy P., "Uranium metallogeny with special reference to Indian deposits", *Transactions of MGMI* 104 (2008) 19–54.
- [44] Simon F. G., Segebade C., Hedrich M., "Behaviour of uranium in iron-bearing permeable reactive barriers: investigation with ^{237}U as a radioindicator", *The Science of the Total Environment* 307 (2003) 231–238.
- [45] Tsoulfanidis N., "Measurement and detection of radiation", Taylor & Francis New York (1995) 614.
- [46] Abdi M. R., Faghihian H., Mostajabodavati M., Hasanzadeh A., Kamali M., "Distribution of natural radionuclides and hot points in coasts of Hormozgan, Persian Gulf, Iran", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 270 (2006) 319–324.
- [47] Poschl M., Nollet L. M. L., "Radionuclide Concentrations in Food and the Environment", Taylor & Francis New York (2007) 458.
- [48] Abdi M. R., Hassanzade S., Kamali M., Raji H. R., " ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations along the southern coast of the Caspian Sea, Iran", *Marine Pollution Bulletin* 58 (2009) 658–662.
- [49] Hameed P. S., Shaheed K., Somasundaram S. S. N., Iyengar M. A. R., "Radium-226 levels in the Cauvery river ecosystem, India", *Journal of Biosociety* 22 (1997) 225–231.
- [50] Mayneord W. V., Turner R. C., Radley J. M., "Alpha activity of certain botanical materials", *Nature London* 187 (1960) 208–211.
- [51] Pearson J. E., Jones G. E., "Soil concentration of emanating Radium-226 and the emanation of Radon-222 from soils and plants", *Tellus* 18 (1966) 655–66.
- [52] Iyengar M. A. R., "The environmental behaviour of Radium", *Technical Reports Series IAEA* 1 (1990) 59–128.
- [53] Lauria D. C., Godoy J. M. O., "Origin and transport of radium in the water column of Buena Coastal Lagoon", *Environmental Changes and Radioactive Tracers* (2002) 471–482.
- [54] Kraemer T. F., Reid D. F., "The Occurrence and Behavior of Radium in Saline Formation Water of the U.S. Gulf Coast Region", *Isotope Geoscience* 2 (1984) 153–174.
- [32] Appelo C. A. J., Postma D., "Geochemistry, Groundwater and Pollution", Brookfield Rotterdam (1999) 536.
- [33] Fredrickson J. K., Zachara J. M., Kennedy D. W., Duff M. C., Gorby Y. A., Li S. M. W., Krupka K. M., "Reduction of U(VI) in goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) suspensions by a dissimilatory metal-reducing bacterium", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2000) 3085–3098.
- [34] Simon F. G., Segebade C., Hedrich M., "Behaviour of uranium in iron-bearing permeable reactive barriers: investigation with ^{237}U as a radioindicator", *The Science of the Total Environment* 307 (2003) 231–238.
- [35] Yan S., Hua B., Bao Z., Yang J., Liu C., Dend B., "Uranium(VI) Removal by Nanoscale Zerovalent Iron in Anoxic Batch Systems", *Environmental Science Technology* 44 (2010) 7783–7789.
- [36] Langmuir D., Herman J. S., "The mobility of thorium in natural waters at low temperature", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44 (1980) 1753–1766.
- [37] Pirlo M. C., Giblin A. M., "Application of groundwater–mineral equilibrium calculations to geochemical exploration for sediment-hosted uranium: observations from the Frome Embayment, South Australia", *Geochemistry: Exploration Environment Analysis* (2004) 113–127.
- [38] Alaez C. F., Alaez M. F., Domínguez C. T., Santos B. L., "Hydrochemistry of orthwest Spain ponds and relationships to groundwaters", *Limnetica* 25 (2006) 433–452.
- [39] Putter Th. De., Andre L., Bernard A., Dupuis Ch., Jedwab J., Nicaise D., Perruchot A., "Trace element (Th, U, Pb, REE) behaviour in a cryptokarstic halloysite and kaolinite deposit from Southern Belgium: importance of "accessory" mineral formation for radioactive pollutant trapping", *Applied Geochemistry* 17 (2002) 1313–1328.
- [40] Sani R. K., Peyton B. M., Amonette J. E., Geesey G. G., "Reduction of uranium(VI) under sulfate-reducing conditions in the presence of Fe(III)-(hydr)oxides", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68 (2004) 2639–2648.
- [41] Arthur R. C., Iwatsuki T., Sasao E., Metcalfe R., Amano K., Ota K., "Geochemical constraints on the origin and stability of the Tono Uranium Deposit, Japan", *Geochemistry: Exploration Environment Analysis* 6 (2006) 33–48.

- [58] Baeza A., del Rio L. M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J. M., "Factors determining the radioactivity levels of waters in the Province of Caceres (Spain)", *Applied Radiation and Isotopes* 46 (1995) 1053–1059.
- [59] Almeida R. M. R., Lauria D. C., Ferreira A. C., Sracek O., "Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Regiao dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil", *Journal of Environmental Radioactivity* 73 (2004) 323–334.
- [55] Hancock G. J., Murray A. S., "Source and distribution of dissolved radium in the Bega river estuary, Southeastern Australia", *Earth and planetary science Letters* 138 (1996) 145-155.
- [56] Langmuir D., "The Thermodynamic Properties of Radium", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49 (1985) 1593-1601.
- [57] Moore W. S. E., Shaw T. J., "Chemical Signals from Submarine Fluid Advection onto the Continental Shelf", *Journal of Geophysical Research* 103 (1998) 21543-21552.

