

تعیین بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای معدن سرب و روی سنگل شمال خمین با استفاده از روش شاخص سینگلاریتی

زهرا قدیمی^۱، فریدون قدیمی*^۲ و محمد قمی^۳

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* نویسنده مسئول: ghadimi@Arakut.ac.ir

دریافت: ۹۵/۸/۱۰ پذیرش: ۹۶/۷/۲۴

چکیده

منطقه چنار از شهرستان خمین واقع در زون تکتونیکی سندج-سیرجان و در کمربند متالوژنیکی ملایر-اصفهان دارای کانی‌زایی Pb, Zn, Ba, Ag بوده که مجموعه‌ای از کانی‌های ثانویه نظیر کوارتز، هماتیت، لیمونیت، کلسیت و ملاکیت را نیز به همراه دارد. در بررسی ژئوشیمیایی از رسوبات آبراهه‌ای، با برداشت ۱۲۷ نمونه و تعیین ۱۴ عنصر نظیر $W, Zn, U, Th, Ce, K, Mn, Pb, S, Sr, Ca, Ba, As$ و Zr بی‌هنجاری‌ها به دو روش لپیلیته و شاخص سینگلاریتی تعیین گردید. با توجه به نقشه‌های بی‌هنجاری تهیه شده، عیار اکثر عناصر به روش لپیلیته در حد زمینه بوده و مناطق بی‌هنجاری تنها در مناطق محدودی از منطقه دیده می‌شوند. در نقشه‌های حاصل از روش سینگلاریتی، بی‌هنجاری‌های پنهان بهتر شناسایی شده و انطباق خوبی بین بی‌هنجاری‌های موجود و موقعیت فعلی معدن سرب و روی سنگل در منطقه وجود دارد. غنی‌شدگی عناصری چون $Zn, W, U, Th, Sr, S, Pb, Mn, Ce, K, Ca, As, Ba$ و Zr به روش شاخص سینگلاریتی در منطقه دیده می‌شود. همچنین در این بررسی، دو منطقه دارای بی‌هنجاری به عنوان هدف اکتشافی آتی شناسایی گردید.

واژه‌های کلیدی: شاخص سینگلاریتی، روش لپیلیته، رسوبات آبراهه‌ای، خمین

۱- مقدمه

استان مرکزی که در نوار ماگمایی ارومیه - بزمان و پهنه ساختاری سندج - سیرجان واقع شده دارای توان معدنی فلزی و غیرفلزی بالایی است. مواد معدنی فلزی استان شامل $W, Sn, Mo, Au, Cu, Zn, Pb, Ag$ ، کانی‌های صنعتی و نیمه‌قیمتی نظیر آندالوزیت، باریت، ژاسپر، آزوریت، ملاکیت، عقیق و کلسیت است [۲]. جهت شناسایی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌هایی که امروزه مورد توجه قرار گرفته، روش شاخص سینگلاریتی^۱ می‌باشد [۲]. بارز کردن بی‌هنجاری‌های پنهان که ممکن است روش‌های دیگر آن را در زمینه قرار دهند از ویژگی‌های این شاخص است. محققین مختلفی سعی کرده‌اند با استفاده از شاخص سینگلاریتی به همراه روش‌های دیگر به صورت ترکیبی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی را نشان دهند. به عنوان مثال: $Cheng$ برای طبقه‌بندی فرآیندهای کانی‌زایی گرمایی در سال ۲۰۰۷ مفهوم سینگلاریتی را ارائه داد و بیان نمود کانی‌زایی می‌تواند فرآیندی سینگلار باشد، لذا

شاخص سینگلاریتی و تکنیک ترسیم نقشه توسط این روش را برای پیش‌بینی مکانی ذخایر معدنی مناسب دانست [۴]. Zuo و همکارانش در سال ۲۰۰۹ مطرح نمودند، بی‌هنجاری‌های ضعیف در بین زمینه پنهان شده و به وسیله وزن‌دهی معکوس فاصله شناخته نمی‌شوند، ولی روش ترسیم نقشه سینگلاریتی به خوبی این بی‌هنجاری‌ها را نشان می‌دهد [۹]. $Cheng$ و $Agterberg$ در سال ۲۰۰۵ نشان دادند رسوبات آبراهه‌ای در همسایگی ذخایر کانسنگ می‌توانند خواص سینگلار داشته باشند، بنابراین، سینگلاریتی را برای تعیین محیط‌های بی‌هنجار پیشنهاد دادند که اغلب در بررسی‌های معمولی ژئوشیمیایی و ترسیم نقشه‌ها دیده نمی‌شوند [۵]. $Cheng$ و $Zhao$ در سال ۲۰۱۱ نشان دادند که بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی بر اساس تئوری سینگلاریتی می‌تواند برای توصیف و پیش‌بینی فرآیندهای کانی‌زایی غیر خطی نیز مورد استفاده قرار گیرد [۶]. Zuo و همکارانش در سال ۲۰۱۴ روش‌های فرکتالی/مولتی فرکتالی غلظت-مساحت ($C-A$)، طیف-مساحت ($S-A$) و شاخص سینگلاریتی را برای شناسایی

¹ Index Singularity

کوارتزآرنایتی، ماسه‌سنگ‌های آهکی، سنگ‌آهک‌های دولومیتی، ماسه‌سنگ‌های قرمز رنگ، کنگلومرا، شیل و دولومیت تشکیل شده است. این واحد را می‌توان قاعده پیش رونده رسوبات کرتاسه دانست. این واحد به صورت تدریجی به سنگ‌آهک‌های ضخیم لایه واحد بعدی تبدیل می‌شود [۱]. بر روی واحد فوق واحدی از سنگ‌های آهکی ماسه‌ای فسیل‌دار ضخیم لایه قرار دارد. در ادامه، واحد فوق به سنگ‌آهک‌های دولومیتی و سنگ‌آهک‌های نازک لایه زرد رنگ تبدیل می‌شود. به علاوه، تناوب سنگ‌هایی چون شیل‌های سیلتی و ماسه‌سنگ ورقه‌ای خاکستری و سپس مارن و شیل‌های آهکی با سن کرتاسه بر روی آن قرار دارد. کانی‌زایی اولیه در معدن سنگل شامل Pb, Zn, Ba, Ag بوده که مجموعه‌ای از کانی‌های ثانویه نظیر رگه‌های سیلیسی، هماتیتی، لیمونیتی، کلسیتی و مالاکیت را نیز به همراه دارد. تونل‌ها و چاهک‌های اکتشافی زیادی جهت بهره‌برداری نقره در این معدن حفر شده است. فعلاً فقط باریت استخراج می‌گردد [۲].

۳- مواد و روش‌ها

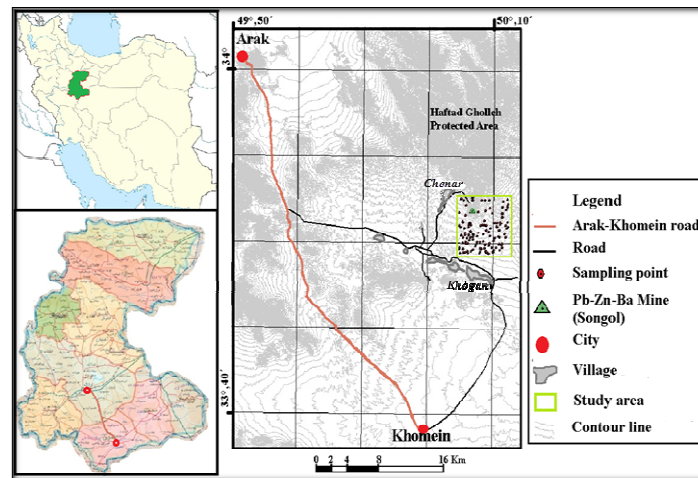
۳-۱- نمونه‌برداری و تجزیه شیمیایی

در شبکه نمونه‌برداری، مسیر تمام آبراهه‌های اصلی به فواصل هر کیلومتر ۲ تا ۳ نمونه و همچنین در محل تلاقی شاخه‌های فرعی قبل از ورود آن‌ها به شاخه اصلی نیز نمونه رسوب برداشت شد. برای برداشت رسوب، ۱۰ تا ۲۰ سانت متر از خاک رویی حاوی مواد آلی و واریزه کنار زده شد و حدود ۵۰ گرم از رسوب در وسط بستر آبراهه با ابعاد کمتر از ۸۰ مش توسط الک تفکیک گردید [۱]. تعداد ۱۲۷ نمونه رسوب آبراهه‌ای از منطقه چنار در شمال شهرستان خمین برداشت و پس از آماده‌سازی‌های لازم ۴۴ عنصر نظیر $Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Eu, Fe, Gd, Hf, K, La, Mg, Mn, Ni, Nb, Nd, P, Pb, Pr, S, Sc, Sm, Sr, Ta, Ti, U, V, W, Y, Yb, Zn$ به روش ICP-MS تجزیه شده‌اند (شکل ۳). با حذف داده‌های خارج از رده، داده‌هایی از عناصر که دارای غلظت یکسان بوده و همچنین عناصر نادر خاکی، عناصر $K, Ce, Ca, As, Ba, Mn, Pb, S, Sr, Th, U, W, Zn$ برای مطالعه انتخاب شدند. کلیه برنامه‌های شاخص سینگلاریتی در برنامه نرم‌افزاری مطلب (Matlab) اجرا گردید.

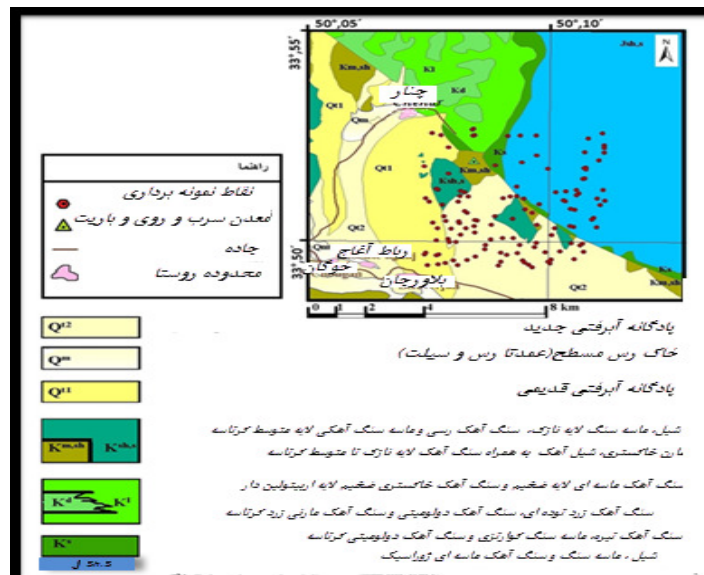
بی‌هنجاری‌های ضعیف در ناحیه پلی‌متالیک آهن کائوبولنگ چین بکار گرفتند و نشان دادند که مدل غلظت-مساحت (C-A) و طیف-مساحت (S-A) برای شناسایی به هنجاری‌های ضعیف محدودیت داشته، اما شاخص سینگلاریتی ابزاری مفید برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف می‌باشد [۸]. Zhao و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بر روی داده‌های حاصل از نمونه‌برداری سنگی مناطق گسل‌خورده تحقیق نموده و نتایج تحلیل را با روش‌های تحلیل فاکتوری و شاخص سینگلاریتی مقایسه نمودند [۱۱]. در این تحقیق نیز سینگلاریتی به عنوان ابزاری مفید برای تعیین غنی‌شدگی و تهی‌شدگی در منطقه مورد توجه قرار گرفت. Liu و همکارانش در سال ۲۰۱۴ روش سینگلاریتی را برای تعیین کانی‌زایی عناصر نادر خاکی (REE) پنهان در زمینه ژئوشیمیایی و روش فرکتالی غلظت-مساحت را برای جداسازی جامعه بی‌هنجاری از زمینه بکار گرفتند [۷]. Zuo و همکارانش در سال ۲۰۱۴ شاخص سینگلاریتی اصلاح یافته را برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف مورد استفاده قرار دادند [۱۰]. در این تحقیق با بکارگیری روش شاخص سینگلاریتی و مقایسه آن با روش لیلیته، بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی منطقه چنار از شهرستان خمین شناسایی گردید. توصیف نقاط تهی‌شده، غنی‌شده و زمینه و همچنین تشخیص ارتباط بین مقدار سینگلاریتی، سنگ‌شناسی و تکتونیک و پیش‌بینی نواحی امید بخش از اهداف دیگر این تحقیق است.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

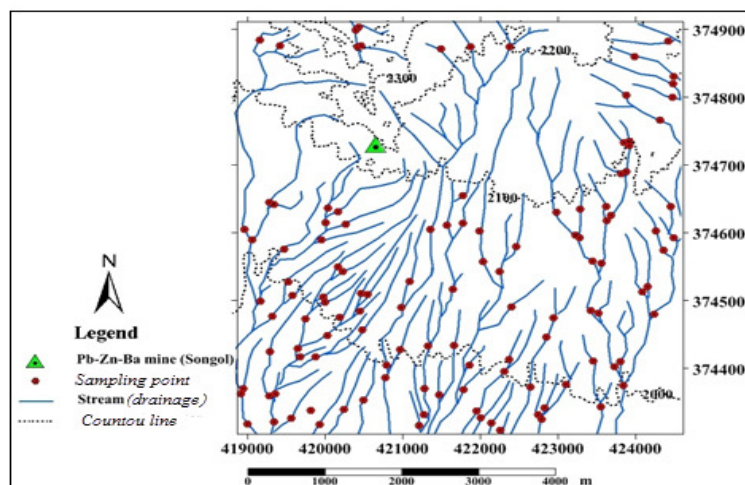
منطقه مورد مطالعه در اطراف روستای چنار از شهرستان خمین و در نزدیکی معدن Pb, Zn, Ba, Ag سنگل و در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۲ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۵ دقیقه واقع می‌باشد. معدن سنگل قبلاً معدن متروکه بوده و اخیراً در آن فعالیت‌های استخراجی و اکتشافی شروع شده است (شکل ۱) [۲]. قدیمی‌ترین واحد منطقه مربوط به ژوراسیک از جنس ماسه‌سنگ‌های کوارتزیتی ضخیم لایه است که به طور تدریجی به شیل‌های سیلتی با میان لایه‌هایی از ماسه‌سنگ‌های آهکی تا آهک ماسه‌ای متوسط تا ضخیم لایه تبدیل شده است (شکل ۲). واحدهای کرتاسه از ماسه‌سنگ‌های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (شمال خمین - استان مرکزی)



شکل ۲. واحدهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شمال خمین (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی خمین)



شکل ۳. نقشه نقاط نمونه‌برداری رسوبات آبراهه‌ای منطقه مورد مطالعه در شمال شهرستان خمین

۳-۲- روش‌های تعیین بی‌هنجاری

روش لپیلیته

روش لپیلیته یکی از متداول‌ترین روش‌های تخمین مقادیر زمینه، حد آستانه و ناهنجاری می‌باشد. در این روش در ابتداء منحنی فراوانی تجمعی داده‌ها تهیه و سپس مقدار میانه توزیع مشخص گردید (باید توجه داشت در توزیع نرمال میانه برابر میانگین حسابی و در توزیع لگاریتمی برابر میانگین هندسی می‌باشد). پس از میانه، مقادیر متناظر با $\bar{x} + S$ و $\bar{x} + 2S$ از این نمودار قرائت می‌شود که $\bar{x}$ میانگین و S انحراف استاندارد جامعه می‌باشد [۳] (جدول ۱).

پس از به دست آوردن مقادیر متناظر با درصد تجمعی ۸۴٪، ۹۷٪، ۹۹٪ با توجه به جدول ۱ مقادیر آستانه‌های محلی انتخاب می‌شوند. ولی مهم‌ترین مقدار، مقدار متناظر با درصد تجمعی ۹۷ درصد می‌باشد که بیانگر حد آستانه بین زمینه و بی‌هنجاری است. مقادیر بالاتر از این مقدار به عنوان بی‌هنجاری شناخته می‌شود.

شاخص سینگولاریتی

جهت تخمین سینگولاریتی، از یک سری پنجره‌ها (r_i) (با شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت (C) حول یک موقعیت خاص (Z_i) استفاده شد. شاخص سینگولاریتی در یک همسایگی کوچک طبق رابطه ۱ تخمین زده می‌شود:

$$C = \frac{C_i}{n} \quad (1)$$

که C نمایانگر مقدار میانگین غلظت عنصر؛ c مقداری ثابت؛ α شاخص سینگولاریتی؛ ε میزان فاصله نرمال شده و E بعد هندسه اقلیدسی می‌باشد [۱۰]. شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های C و ε در نمودار تمام لگاریتمی تخمین زده می‌شود. این روش دو نوع بی‌هنجاری قوی و ضعیف را نشان می‌دهد.

برای تخمین سینگولاریتی محلی از نقشه ژئوشیمیایی می‌توان از روش پنجره مبنا استفاده کرد؛ به طوریکه موقعیتی روی نقشه با دسته‌ای از پنجره‌های متغیر $A(r)$ (مربع شکل) با اندازه‌های پنجره‌های مختلف هر اندازه پنجره، مقدار میانگین غلظت $C[A(r_i)]$ محاسبه می‌شود. این مقدار $C[A(r_i)]$ ($i=1, \dots, n$) تمایل خطی بر روی نمودار تمام لگاریتمی نشان می‌دهد (رابطه ۲):

$$\log C[A(r)] = c + (\alpha - 2) \log \varepsilon \quad (2)$$

شیب تخمین‌زده شده از رابطه خطی ۲ به صورت $2-\alpha$ معرفی می‌شود. رفتار مشابهی توسط پنجره‌های متغیر در تمام موقعیت‌های روی نقشه ژئوشیمیایی می‌تواند ایجاد شود [۴]. مقدار شاخص سینگولاریتی محاسبه شده از نقشه‌های دو بعدی معمولاً حدود ۲ است. برای حالت دوبعدی سینگولاریتی مثبت ($\alpha < 2$) با غنی‌شدگی و سینگولاریتی منفی ($\alpha > 2$) با تهی‌شدگی رابطه دارد.

جدول ۱. تقسیم‌بندی مناطق بر حسب مقدار میانگین و انحراف استاندارد [۳].

ردیف	مقادیر داده‌ها	درصد تجمعی	رده بندی ژئوشیمیایی
۱	$\bar{x} + 2S - \bar{x} + S$	۹۷-۸۴٪	زمینه
۲	$\bar{x} + 2S$	۹۷٪	حد آستانه
۳	$> \bar{x} + 2S$	۹۷٪ <	بی‌هنجاری
۴	$\bar{x} + 3S - \bar{x} + 3S$	۹۷-۹۹٪	بی‌هنجاری ممکن
۵	$\bar{x} + 4S - \bar{x} + 3S$	۹۹-۹۹.۷٪	بی‌هنجاری احتمالی
۶	$\bar{x} + 4S <$	۹۹.۷٪ <	بی‌هنجاری قطعی

۴- نتایج و بحث

برای تعیین بی‌هنجاری‌های منطقه، نقشه‌های پراکندگی غلظت عناصر، نقشه‌های تفکیک بی‌هنجاری از زمینه با حد آستانه‌ای لپیلیته و نقشه‌های شاخص سینگولاریتی با یکدیگر مقایسه شدند.

۴-۱- بررسی پراکندگی عناصر به روش لپیلیته

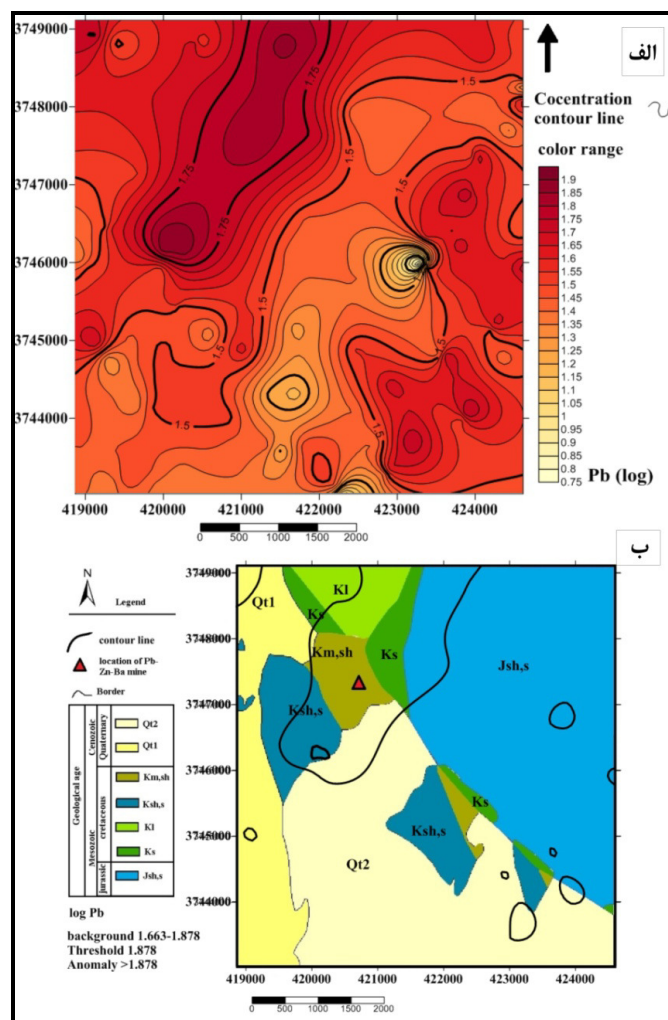
برای ترسیم نقشه‌های پراکندگی غلظت و نقشه‌های تفکیک بی‌هنجاری از زمینه با حد آستانه‌ای (روش لپیلیته) می‌بایست نوع توزیع داده‌ها مشخص شود. از چهار روش شاخص‌های مرکزی، چولگی و کشیدگی،

شکل نمودار فراوانی و آزمون $K-S$ ، برای تایید اینکه داده‌ها نرمال و یا لاگ نرمال است استفاده شد. نتایج نشان داد عناصر K, Th, U, W و Zr از توزیع نرمال و عناصر $As, Ba, Ca, Ce, Mn, Pb, S, Sr$ از توزیع لاگ-نرمال تبعیت می‌کنند (جدول ۲).

در بررسی پراکندگی غلظت عناصر از دو نوع نقشه خطوط هم غلظت و نقشه تفکیک بی‌هنجاری از زمینه به روش لپلیته استفاده شد. در روش لپلیته مقادیر متناظر با درصد فراوانی تجمعی ۸۴% تا ۹۷% به عنوان زمینه و ۹۷% به بالا به عنوان مناطق بی‌هنجاری معرفی شدند. مقادیر متناظر با درصد فراوانی تجمعی ۹۷% همان حد آستانه‌ای برای تفکیک زمینه از بی‌هنجاری در نظر گرفته شد. این مقادیر برای عناصر K, Mn, Ce, Ca, Ba, As

شکل نمودار فراوانی و آزمون $K-S$ ، برای تایید اینکه داده‌ها نرمال و یا لاگ نرمال است استفاده شد. نتایج نشان داد عناصر K, Th, U, W و Zr از توزیع نرمال و عناصر $As, Ba, Ca, Ce, Mn, Pb, S, Sr$ از توزیع لاگ-نرمال تبعیت می‌کنند (جدول ۲).

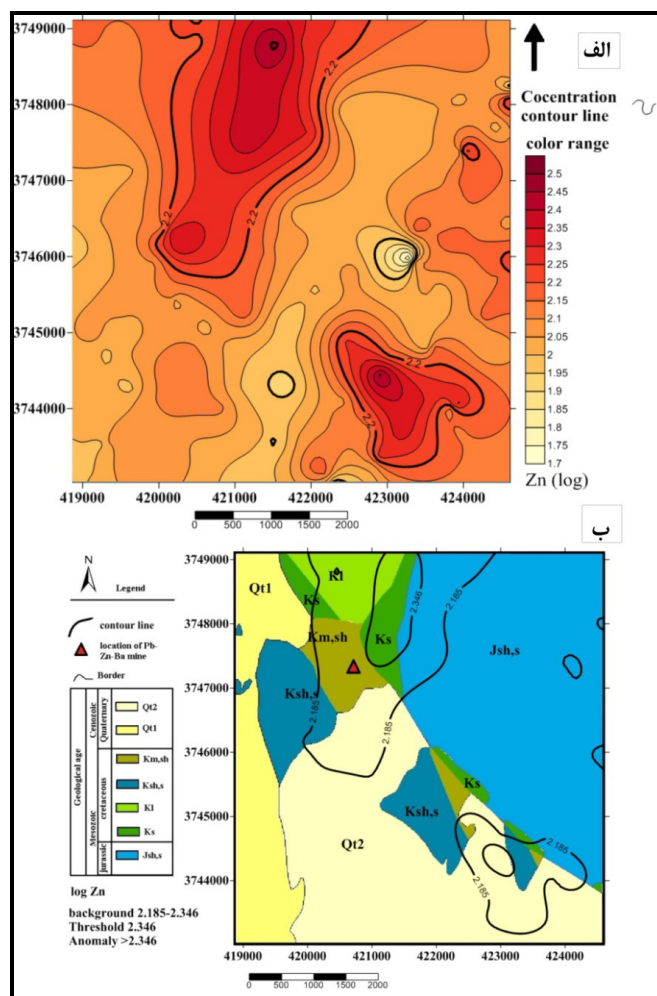
در بررسی پراکندگی غلظت عناصر از دو نوع نقشه خطوط هم غلظت و نقشه تفکیک بی‌هنجاری از زمینه به روش لپلیته استفاده شد. در روش لپلیته مقادیر متناظر با درصد فراوانی تجمعی ۸۴% تا ۹۷% به عنوان زمینه و ۹۷% به بالا به عنوان مناطق بی‌هنجاری معرفی شدند. مقادیر متناظر با درصد فراوانی تجمعی ۹۷% همان حد آستانه‌ای برای تفکیک زمینه از بی‌هنجاری در نظر گرفته شد. این مقادیر برای عناصر K, Mn, Ce, Ca, Ba, As



شکل ۴. الف: نقشه خطوط هم غلظت Pb ، ب: نقشه تطابق واحدهای زمین‌شناسی با مناطق بی‌هنجاری (جهت توصیف واحدهای زمین‌شناسی به شکل ۲ مراجعه شود).

جدول ۲. تعیین توزیع داده‌ها براساس مقادیر چولگی و کشیدگی

عنصر	برای داده های دست نخورده			عنصر	برای داده های دست نخورده		
	چولگی	کشیدگی	نوع توزیع		چولگی	کشیدگی	نوع توزیع
As	۱/۲۴	۱/۳۲	لاگ نرمال	S	۲/۱۰	۴/۷۵	لاگ نرمال
Ba	۱/۹۸	۲/۶۲	لاگ نرمال	Sr	۱/۵۱	۲/۲۷	لاگ نرمال
Ca	۱/۹۶	۲/۶۲	لاگ نرمال	Th	۰/۲۳	۰/۳۵	نرمال
Ce	۱/۳۲	۱/۵۹	لاگ نرمال	U	۰/۰۸	-۰/۷۷	نرمال
K	-۰/۲۰	۰/۱۱	نرمال	W	۰/۷۴	۰/۸۷	نرمال
Mn	۱/۷۹	۲/۶۱	لاگ نرمال	Zn	۱/۷۲	۴/۵۱	لاگ نرمال
Pb	۱/۲۷	۱/۹۵	لاگ نرمال	Zr	-۰/۱۱	-۰/۶۴	نرمال



شکل ۵. الف: نقشه خطوط هم غلظت Zn، ب: نقشه تطابق واحدهای زمین‌شناسی با مناطق بی‌هنجاری Zn

زمین‌شناسی مشخص شد، واحدهای زمین‌شناسی سازند ژوراسیک ($J^{sh,s}$) و دو واحد از سازند کرتاسه ($K^{sh,s}$ و K^l) دارای بیش‌ترین تعداد بی‌هنجاری و واحد دیگری از سازند کرتاسه ($K^{m,sh}$) دارای کمترین تعداد بی‌هنجاری است.

با انطباق نقشه‌های واحدهای زمین‌شناسی بر مناطق بی‌هنجاری به روش لپلیته، نواحی بی‌هنجاری یا زمینه در واحدهای زمین‌شناسی مشخص گردید (شکل ۴). لازم به توضیح است عناصر K و Ce دارای بی‌هنجاری ممکن و دو عنصر As و U بی‌هنجاری نشان نمی‌دهند (جدول ۳). با انطباق نقشه بی‌هنجاری‌های عناصر بر روی واحدهای

جدول ۳. تقسیم‌بندی بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عناصر براساس انطباق آن‌ها با واحدهای زمین‌شناسی (* نشانه وجود بی‌هنجاری) (جهت توصیف واحدهای زمین‌شناسی به شکل ۲ مراجعه شود).

عناصر	منطقه	واحدهای زمین‌شناسی					
		Q^2	Q^{I1}	$K^{m,sh}$	$K^{sh,s}$	Kl	Ks
Ba	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	-	-	-
Ca	بی‌هنجاری احتمالی	-	*	-	*	-	-
Ce	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	-	-	*
	بی‌هنجاری ممکن	-	-	-	-	-	*
K	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	-	-	*	*
	بی‌هنجاری ممکن	*	-	-	-	-	*
Mn	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	-	-	*
Pb	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	*	-	-
S	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	*	-	-
Sr	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	-	*	-	-
Th	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	*	-	-	*
U	بی‌هنجاری احتمالی	-	-	-	-	-	-
W	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	-	-	*	*
Zn	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	-	*	*	*
Zr	بی‌هنجاری احتمالی	*	-	-	-	-	*
تعداد	بی‌هنجاری احتمالی	۶	۱	۱	۵	۳	۴
دفعات وجود عناصر در مناطق	بی‌هنجاری ممکن	۱	۰	۰	۰	۰	۲

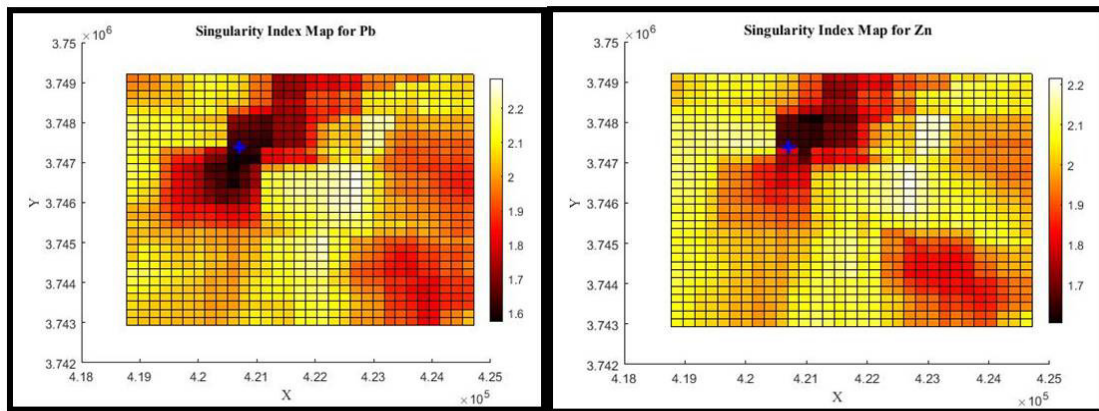
دو منطقه بی‌هنجاری، یکی در حوالی معدن سنگل با روند شمال‌شرق-جنوب‌غربی و دیگری در جنوب‌شرق معدن واقع شده و سایر مناطق تهی از عناصر فوق هستند. در نقشه خطوط هم‌غلظت، ترکیب سه عنصر *Ba, Pb* و *Zn* نیز روند افزایشی مشابه شاخص سینگولاریتی دارند (شکل ۷ب).

جهت تایید مدل سینگولاریتی، انطباق نقشه مورد نظر با نقشه لپتیلیته صورت گرفت (شکل ۸). شاخص سینگولاریتی عناصر *Th, U, Sr, Mn, K, Ca, Ce, Ba, As* و *W* در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. مناطق دارای بی‌هنجاری *As, Mn, Zn, Pb* و *K* دارای مناطق سینگولاریتی مثبت شبیه به هم و *Ba* و *Sr* نیز بی‌هنجاری‌های شبیه به هم ایجاد نموده‌اند. تقسیم‌بندی مناطق بر اساس مقدار سینگولاریتی مثبت و غنی‌شدگی در شکل ۱۱ ارائه شده است.

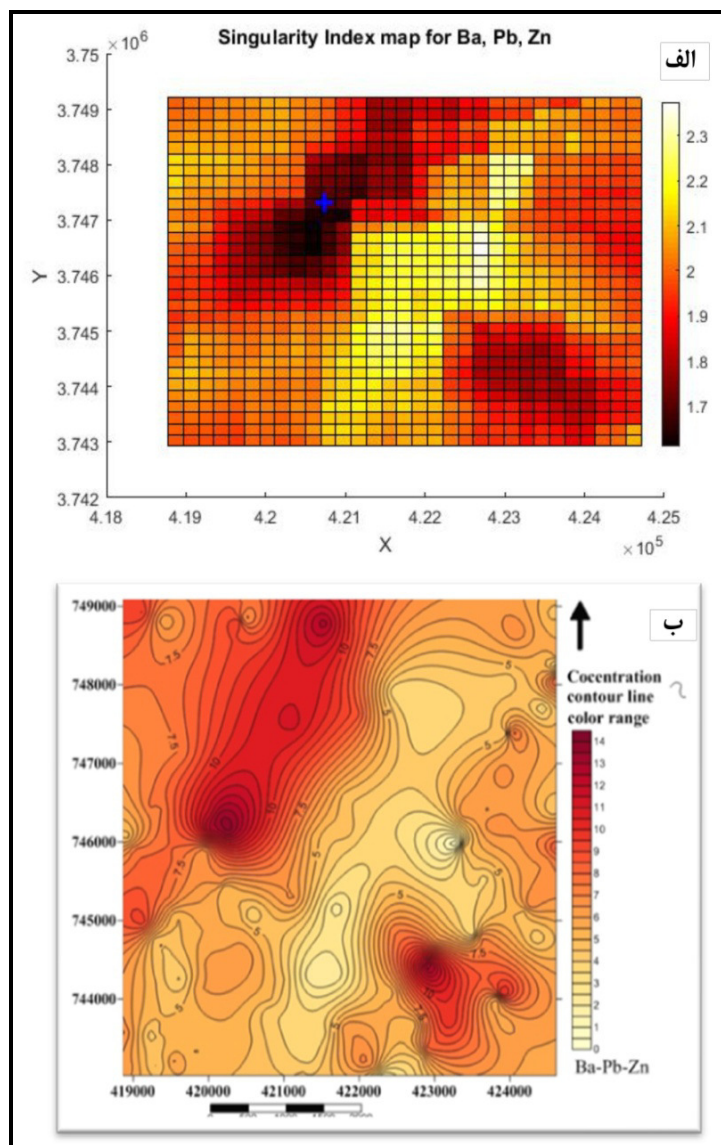
۴-۲- بررسی پراکندگی عناصر به روش شاخص سینگولاریتی

شاخص سینگولاریتی برای عناصر *K, Ce, Ca, As, Ba* و *Zr, W, U, Th, Sr, S, Mn, Pb* تهیه گردید. شاخص سینگولاریتی کمتر از ۲ نمایان‌گر مناطق غنی شده و سلول‌های با شاخص سینگولاریتی در حدود ۲ نمایان‌گر مناطق زمینه می‌باشد. شاخص سینگولاریتی *Pb* حاکی است که *Pb* در حوالی معدن *Zn* و *Pb* سنگل بیش‌ترین غنی‌شدگی را دارد (شکل ۶). در جنوب‌شرقی منطقه *Pb* نزدیک به زمینه ژئوشیمیایی و در قسمت‌های مرکزی تهی‌شدگی نشان می‌دهد. بر اساس شاخص سینگولاریتی، *Zn* در شمال‌شرقی معدن *Pb* و *Zn* سنگل دارای غنی‌شدگی است (شکل ۶).

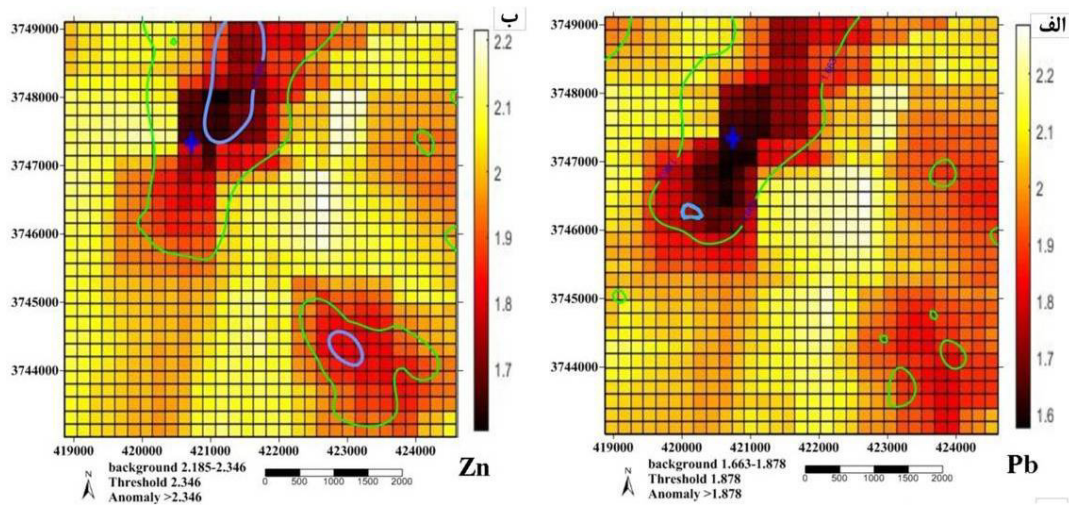
جهت بررسی دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها، از نقشه ترکیبی عناصر استفاده شد. نقشه شاخص سینگولاریتی برای سه عنصر *Ba, Pb* و *Zn* در شکل ۷ الف نشان داده شده است.



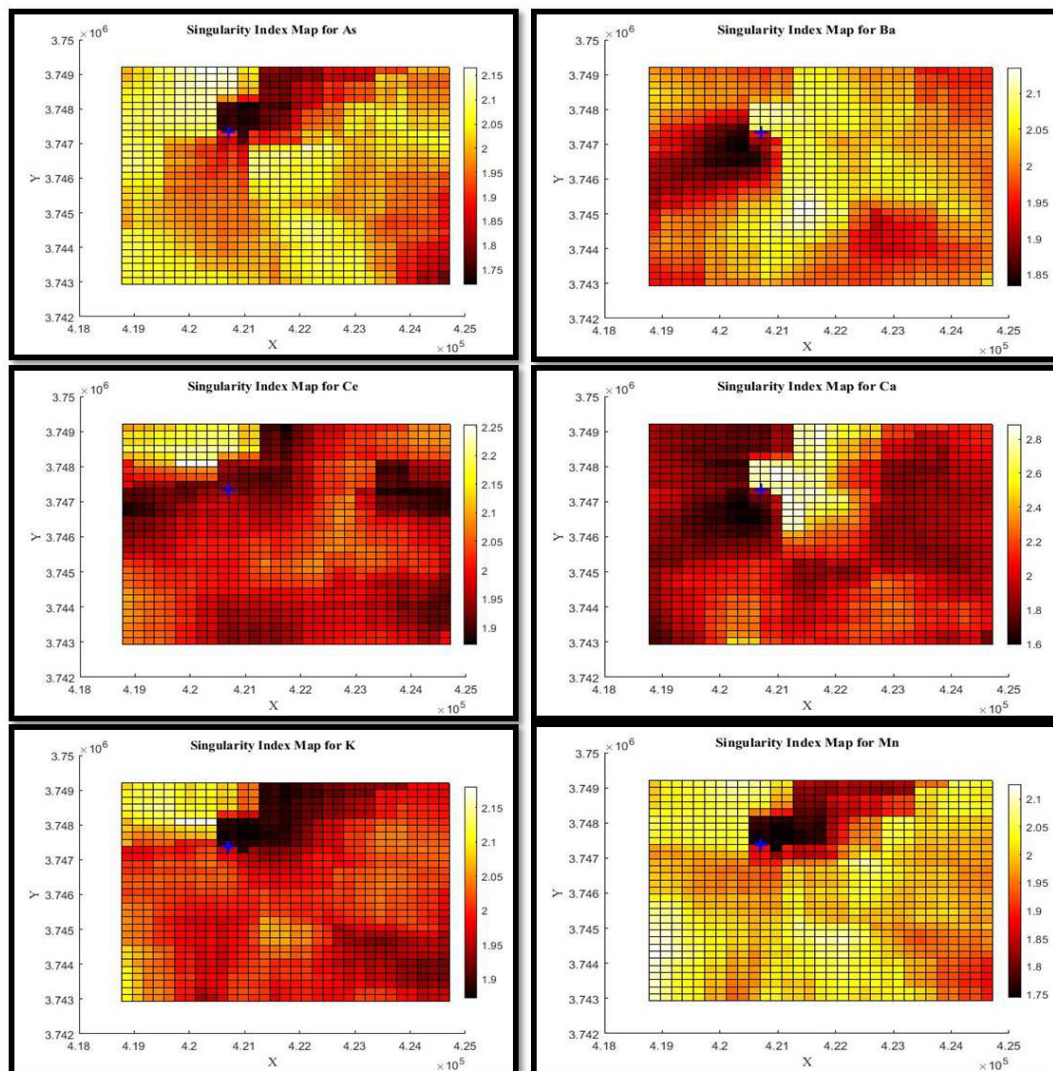
شکل ۶. شاخص سینگولاریتی Pb و Zn (موقعیت معدن سنگل)



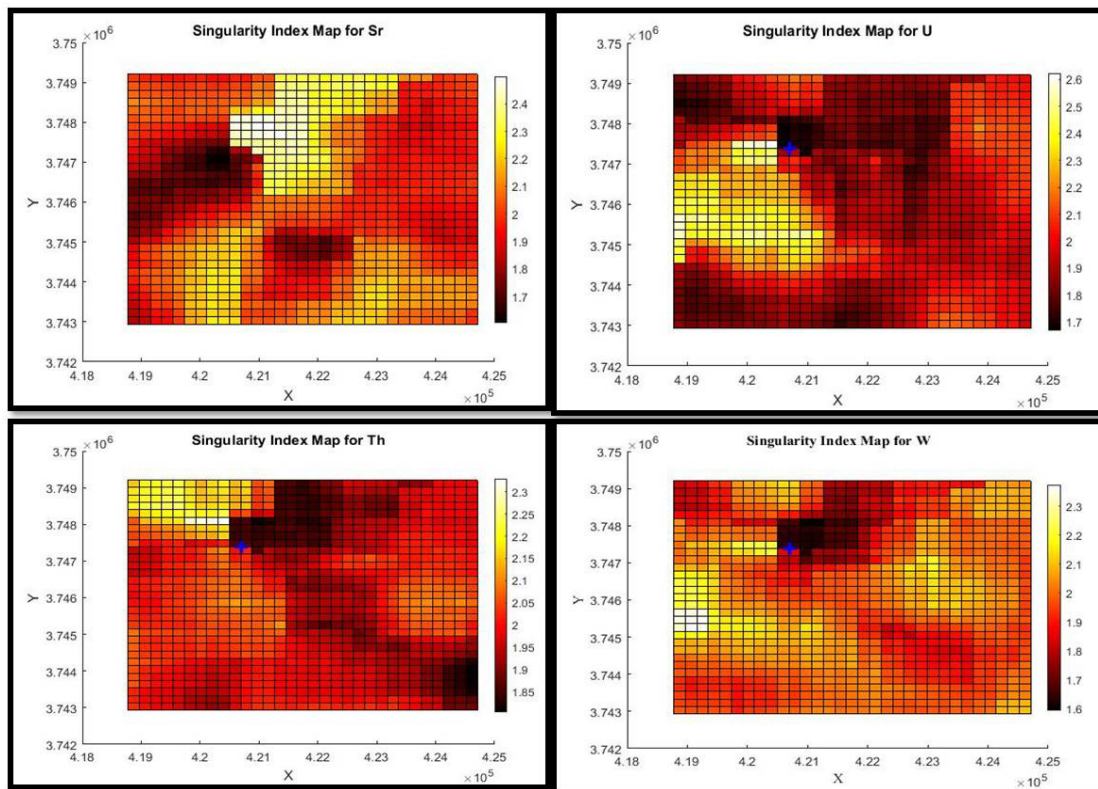
شکل ۷. الف: نقشه شاخص سینگولاریتی ترکیبی Ba, Pb, Zn ، ب: نقشه خطوط هم غلظت آن‌ها



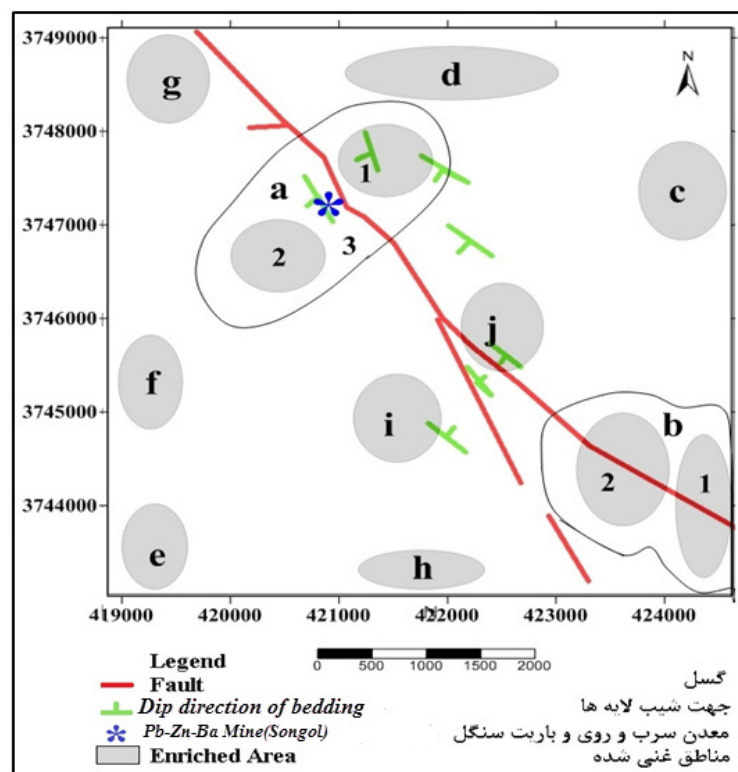
شکل ۸. تطابق نقشه‌های بی‌هنجاری و زمینه حاصل از روش لپلیته و نقشه‌های شاخص سینگولاریتی برای Zn و Pb



شکل ۹. نقشه شاخص سینگولاریتی عناصر Mn و K , Ca , Ce , Ba , As



شکل ۱۰. نقشه شاخص سینگولاریتی عناصر W , Th , U , Sr



شکل ۱۱. موقعیت بی‌هنجاری‌های حاصل از شاخص سینگولاریتی و تطابق آن‌ها با ساختارهای زمین‌شناسی

(۶) غنی‌شدگی حاشیه غربی شامل: Ba, Ca, Ce و Sr (f)

(۷) غنی‌شدگی شمال غربی شامل: W و Ca, U (g)

(۸) غنی‌شدگی حاشیه جنوبی شامل: Zr و U (h)

(۹) غنی‌شدگی برای Sr و Ca, S (i)

(۱۰) غنی‌شدگی برای Zr و Th (j)

منطقه حائز اهمیت در جنوب شرق معدن سنگل واقع شده است (b در شکل ۱۱) که غنی از عناصر Zr, Ba, Mn, k, Pb, W, Zn است. این منطقه می‌تواند برای اهداف اکتشافی مدنظر قرار گیرد. این منطقه نیز مانند منطقه a بر روی گسل واقع شده است (شکل ۱۱). با توجه به شکل ۱۲ خصوصیات سنگ‌شناسی منطقه بی‌هنجاری b همانند منطقه بی‌هنجاری a می‌باشد؛ به طوریکه هر دو منطقه شامل واحدهای سنگی $K^s, J^{sh,s}$ و $K^{m,sh}$ هستند. منطقه بی‌هنجاری d نیز نسبت به عناصر $Zr, As, Ce, K, Mn, Pb, Th, U, W, Zn$ غنی‌شدگی نشان می‌دهد. این منطقه بین سنگ‌های سازند ژوراسیک و کرتاسه قرار گرفته است. منطقه بی‌هنجاری d از نظر نوع عناصر غنی شده و واحدهای زمین‌شناسی شبیه به منطقه بی‌هنجاری a است.

با توجه به شکل ۱۱ مناطق بی‌هنجاری در منطقه چنار خمین به شرح ذیل است:

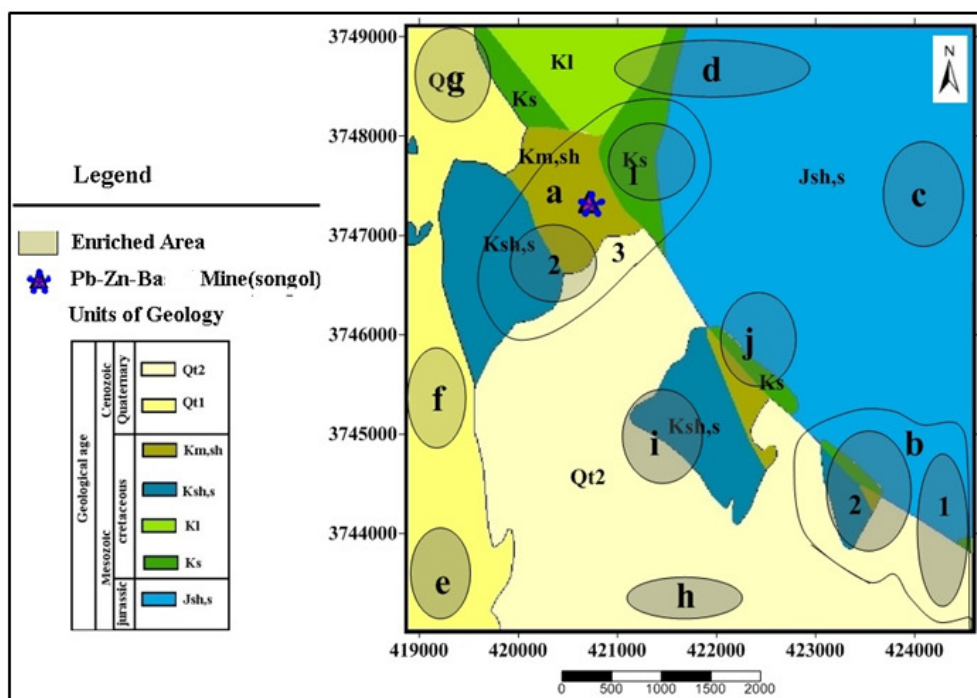
(۱) اطراف معدن سنگل سه سری مدل غنی‌شدگی برای عناصر دیده می‌شود (a): (۱) غنی‌شدگی در شمال معدن که شامل عناصر $Zr, U, W, Zn, As, K, Mn, Th$ ؛ (۲) غنی‌شدگی در قسمت جنوبی معدن که شامل عناصر Sr, Ba, Ca ؛ (۳) غنی‌شدگی عنصر Pb و Ce با روند شمالی-جنوبی در پیرامون معدن

(۲) قسمت جنوب شرقی منطقه نیز دارای دو سری مدل غنی‌شدگی عناصر است (b): (۱) بی‌هنجاری در حاشیه جنوب شرقی شامل: Zr, As, Ce, K, Mn, Th ؛ (۲) غنی‌شدگی از عناصر Zr, Ba, K, Pb, Th, W, Zn در حاشیه آنومالی‌های $b1$

(۳) غنی‌شدگی شمال شرقی منطقه شامل: Ce و Ca (c). این بخش برای عنصر Mn تهی‌شدگی و برای عنصر Pb و Zn زمینه نشان می‌دهد.

(۴) غنی‌شدگی حاشیه شمالی شامل: $Zr, As, Ce, K, Mn, Pb, Th, U, W, Zn$ ؛ (۵) تهی‌شدگی برای Ca, Ba, Sr (d)

(۵) غنی‌شدگی جنوب غربی شامل: W, Ca, Sr, U (e)



شکل ۱۲. موقعیت بی‌هنجاری‌های حاصل از شاخص سینگلاریتی و تطابق آن‌ها با واحدهای زمین‌شناسی

۵- نتیجه‌گیری

در تفکیک بی‌هنجاری از زمینه، روش لپلیته روش مناسبی برای تعیین بی‌هنجاری در منطقه نمی‌باشد. در نقشه‌های حاصل از روش شاخص سینگولاریتی غنی شدگی ۱۴ عنصر $Th, Sr, S, Pb, Ce, K, Mn, Ca, Ba, As$ و Zr, W, U در اطراف معدن سنگل مشاهده شد. همچنین در این نقشه‌ها مناطق غنی‌شده، زمینه و تهی شده به صورت واضح قابل تشخیص‌اند. نتایج نقشه‌های حاصل از روش شاخص سینگولاریتی نشان داد که این نقشه‌ها در بررسی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی ضعیف نسبت به روش لپلیته مناسب‌تر هستند. نقشه‌های سینگولاریتی غنی‌شدگی را در چند منطقه از جمله شمال معدن سنگل (عناصر U, W, Zn, As, K, Mn, Th و Zr)، جنوب معدن سنگل (عناصر Ba, Ca, Sr و Pb) و Ce با روند شمالی-جنوبی در پیرامون معدن را نشان داد.

منابع

- [1] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۶) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات.
- [2] قدیمی، ز (۱۳۹۴) استفاده از روش سینگولاریتی در تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی منطقه خمین به کمک داده‌های رسوبات آبراهه‌ای، پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد، مهندسی معدن گرایش اکتشاف.
- [3] مدنی، ح (۱۳۹۰) مبانی اکتشاف مواد معدنی (جلد اول)، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر.
- [4] Cheng, Q (2007) Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China, *Ore Geology Reviews*, no. 32, pp. 314 – 324.
- [5] Cheng, Q., Agterberg, F. P (2009) Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments, *Computers & Geosciences*, No. 35, pp. 234–244.
- [6] Cheng, Q., Zhao, P (2011) Singularity theories and methods for characterizing mineralization processes and mapping geo-anomalies for mineral deposit prediction, *GEOSCIENCE FRONTIERS (China University of Geosciences (Beijing))*, No 2(1), pp 67 – 79.
- [7] Liu, Y., Cheng, Q., Xia, Q. & Wang, X (2014) Identification of REE mineralization-related geochemical anomalies using fractal/multifractal methods in the Nanling belt, South China, *Environment Earth Science* 72(12), 5159-5169.
- [8] Zhao, J., Zuo, R., Chen, S., Kreuzer, O. P (2014) Application of the tectono-geochemistry method to mineral prospectivity mapping: a case study of the Gaosong tin-polymetallic deposit, Gejiu district, SW China, *Ore Geology Reviews* 71, 719-734.
- [9] Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F. P., Xia, Q (2009) Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China, *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 101, pp. 225–235.
- [10] Zuo, R., Wang, J., Chen, G., Yang, M (2014) Identification of weak anomalies: A multifractal perspective, *Journal of Geochemical Exploration* 148, 12-24.
- [11] Zuo, R., Xia, Q. & Zhang, D (2013) A comparison study of the C-A and S-A models with singularity analysis to identify geochemical anomalies in covered areas, *Applied Geochemistry*, N. 33, PP. 165–172.

Determination of geochemical anomalies of stream sediments in Pb-Zn Songol mine of north Khomein by using Singularity index mapping

Z. Ghadimi¹, F. Ghadimi^{2*} and M. Ghomi³

1, 2, 3- Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak

** ghadimi@Arakut.ac.ir*

Recieved: 2016/10/31 Accepted: 2017/10/15

Abstract

The Chenar area of Khomein is located in the Sanandaj-Sirjan tectonic zone and in the Malayer-Isfahan metallogenic belt. This region has the mineralization of Pb, Zn, Ba, Ag and secondary mineralization such as quartz, hematite, limonite, calcite and malachite. In a geochemical study of drainage sediments, we were taken 127 samples and were analyzed 14 elements such as As, Ba, Ca, Ce, K, Mn, Pb, S, Sr, Th, U, W, Zn, and Zr and anomaly was determined by Lopiliteh and the singularity index method. The majority of elements are in the background according to anomalous maps by Lopiliteh method and the anomalies are seen only in limited areas of the region. The hidden anomalies are better identified in the maps of singularity index method and there is a good relationship between the derived anomalies and the position of the Sangol Pb-Zn mine in the region. The enrichment of elements such as As, Ba, Ca, Ce, K, Mn, Pb, S, Sr, Th, U, W, Zn, and Zr is shown by the singularity index method in the region. In this study, two districts with anomaly were identified as the future exploratory target.

Keywords: Singularity Index Mapping, Lopiliteh method, Stream sediment, Khomein