

کاربرد روش‌های شاخص سینگولاریتی (SI)، فازی-گاما و AHP برای پتانسیل‌یابی سرب و روی در ورقه خنداب، منطقه فلززایی ملایر - اصفهان، ایران

محمدامین جعفری^۱، احد نظریور^۲ و قدرت اله رستمی پایدار^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش‌های فازی-گاما، تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و بر اساس وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی توسط نظر کارشناسان علوم زمین، مدل‌سازی پتانسیل معدنی عناصر سرب و روی در محدوده ورقه خنداب (بخشی از پهنه متالورژی ملایر - اصفهان) صورت گرفت. لایه زمین‌شیمی مربوط به عناصر سرب و روی با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (SI) که در شناسایی بی‌هنجاری ضعیف و پنهان دقت بالایی دارد تهیه شد. تمام لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی شامل سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، چگالی کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی، چگالی گسل‌ها و دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته با استفاده از روش فازی-گاما وزن‌دهی و در دامنه ۰ تا ۱ قرار گرفتند و لایه‌های فازی‌سازی با مقدار گامای (۷/۹۵) با یکدیگر تلفیق و نقشه‌های پتانسیل‌یابی عناصر سرب و روی در منطقه مورد مطالعه حاصل شد. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با تشکیل دادن ماتریس مناسب برای لایه‌های اکتشافی، لایه‌ها وزن‌دهی شدند و نقشه پتانسیل‌یابی عناصر مورد نظر به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در مقایسه با روش فازی-گاما بی‌هنجاری‌های بیشتری را مشخص کرده و بی‌هنجاری‌های به دست آمده از این روش انطباق بیشتری با ذخایر سرب و روی موجود در منطقه نشان می‌دهند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۰/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

پتانسیل‌یابی سرب و روی

شاخص سینگولاریتی (SI)

فازی-گاما

تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

ورقه خنداب

۱- پیش‌نوشتار

اکتشاف منابع معدنی فرایند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده‌های مکانی مختلف (زمین‌شیمی، زمین‌فیزیک، زمین‌شناسی و ...) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که هدف نهایی آن، اکتشاف نوع خاصی از کانه‌زایی می‌باشد. جهت رسیدن به این هدف، می‌بایست داده‌های مکانی مختلف برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) جمع‌آوری، آنالیز و تلفیق شوند (Ghezelbash et al., 2019). اکتشاف مواد معدنی، معمولاً از یک مقیاس کوچک (نواحی بزرگ) شروع شده و تا مقیاس‌های بزرگ‌تر (نواحی کوچک) جهت تشخیص و جدا نمودن مناطق دارای پتانسیل، ادامه می‌یابد (Najafi et al., 2014; Nazarpour et al., 2015). مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) در حقیقت نوعی تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) در نظر گرفته می‌شود، زیرا به تصمیم‌گیرنده این اجازه را می‌دهد که یک درک کلی از هدف نهایی را داشته باشد (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018). تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، فرایند انتخاب مناسب‌ترین جایگزین‌ها در حضور معیارهای چندگانه می‌باشد. مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر اساس روش‌های دانش محور در شروع عملیات اکتشافی در مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی مناسب بوده ولی در آن کار اکتشافی کم صورت گرفته، مناسب هستند. در این روش‌ها، مدل‌های مفهومی به عنوان ملاکی برای انتخاب و شناسایی معیارهای اکتشافی و الگوهای شاهد، تولید

نقشه‌های پیش‌گو، تخصیص وزن به نقشه‌ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه‌های شاهد به منظور معرفی مناطق امیدبخش برای ذخیره مورد جستجو استفاده می‌شود (Satty, 2016). برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در محیط ArcGIS دو دسته کلی وجود دارد. دسته اول با عنوان روش‌های متکی بر داده‌ها شناخته می‌شوند که متغیرهای این مدل با در نظر گرفتن شواهد موجود و مدل‌های ذخیره اکتشاف شده در منطقه مطالعاتی تعیین می‌شوند که در این دسته می‌توان به روش‌هایی چون تحلیل تصمیم‌گیری درختی و رگرسیون لجستیک اشاره کرد (Ghezelbash et al., 2019). در دسته دوم که به روش‌های متکی بر دانش موسوم هستند، متغیرهای مدل با توجه به هدف اکتشافی منطقه مورد مطالعه و عوامل تأثیرگذار دیگر توسط کارشناس برآورد می‌شوند. روش‌هایی چون منطق فازی و همپوشانی چند کلاسه و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) جزو این دسته‌اند (Zhang et al., 2017). استان مرکزی به عنوان بخشی از نوار ماگمایی ارومیه-بزمان و پهنه سهندج-سیرجان، توان معدنی (فلزی و غیرفلزی) در خور توجهی دارد. از همین‌رو، معدنکاری در این استان سابقه دیرینه دارد، به‌طوری که در حال حاضر در ۳۵ معدن غیرفلزی و ۹ معدن فلزی، بهره‌برداری صورت می‌گیرد (جمالیان، ۱۳۸۱). در ایران منطقه فلززایی ملایر-اصفهان با طولی افزون بر ۴۰۰ کیلومتر و عرض ۹۰ کیلومتر بزرگ‌ترین

برای جداسازی بی‌هنجاری از زمینه و برای تهیه لایه زمین‌شیمی مربوط به عناصر سرب و روی استفاده گردید. بدین منظور برای استفاده از روش‌های نام برده از پنج لایه اصلی سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، چگالی موقعیت کانسارهای سرب و روی، چگالی گسل‌های منطقه و دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی استفاده و روش‌های یاد شده در پتانسیل یابی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

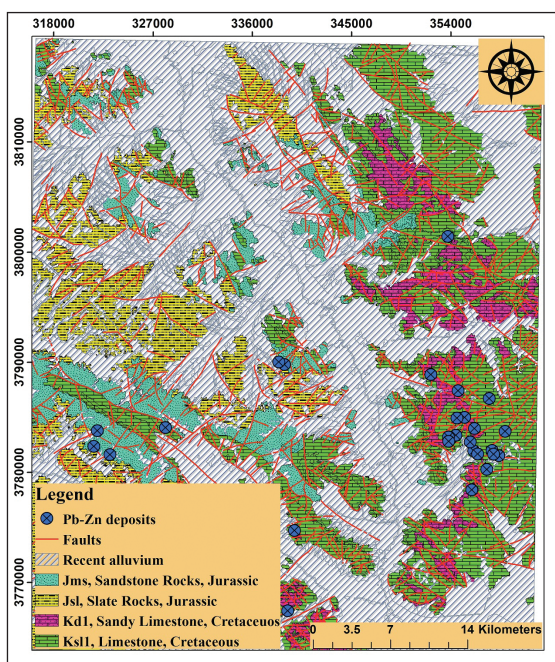
۳- زمین‌شناسی

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب در شمال باختر شهرستان اراک جای دارد (شکل ۱، رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲). رخنمون‌های سنگی در ورقه خُنداب با روند عمومی شمال‌باختر-جنوب‌خاور به گونه‌ای یکنواخت در سراسر آن گسترش یافته است. با این وجود گستردگی آنها به گونه‌ای است که سنگ‌های رسوبی کرتاسه بیشتر در نیمه خاوری محدوده و سنگ‌های رسوبی ژوراسیک در نیمه باختری آن دیده می‌شوند. بروزند سنگ‌های نفوذی در بخش میانی از نیمه خاوری جای دارند. سایر نقاط از رسوب‌های کواترنر تشکیل شده است (رحیم‌پور، ۱۳۷۰). بر پایه تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختمانی توسط Stöckline (1968)، منطقه مورد مطالعه در پهنه پرتکاپوی سندج-سیرجان واقع شده است. پهنه سندج-سیرجان یک زون پرتحرک در حاشیه ایران مرکزی و در مجاورت راندگی زاگرس است که فازهای کوهزایی، دگرگونی و ماگماتیسم مهمی را تحمل نموده که مهم‌ترین آنها فاز کوهزایی، دگرگونی و ماگماتیسم لارامید است (Alavi, 1994). در ورقه مورد مطالعه شکستگی‌ها در چهره گسل‌های فشاری، کششی و راستالغز شکل گرفته است. گسل‌های فشاری با روند اصلی شمال‌باختری-جنوب‌خاوری نسبت به سایر گسل‌های منطقه مهم‌تر بوده و بیشترین اثر را بر حالت ریخت‌شناسی منطقه داشته‌اند. همچنین محور چین‌های منطقه با روند گسله‌های فشاری نزدیک است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲) ترکیب سنگ‌شناسی موجود در ورقه خُنداب از سنگ‌آهک‌های کرتاسه و آهک‌های ماسه‌ای کرتاسه، اسلیت‌ها و ماسه سنگ‌های ژوراسیک است. با بررسی نقشه زمین‌شناسی ورقه خُنداب می‌توان چنین نتیجه گرفت که واحدهای آهکی کرتاسه و پس از آن ماسه سنگ‌های ژوراسیک، سنگ‌شناسی چیره در منطقه به‌شمار می‌آیند.

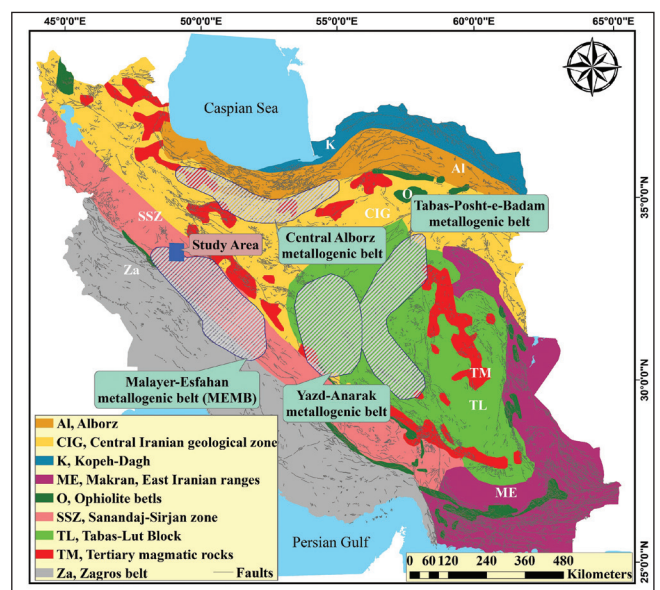
کمربند فلززایی سرب و روی در ایران است که بیش از ۱۷۰ کانسار با پتانسیل معدنی بسیار بالا در آن شناسایی شده است (Ehya et al., 2010). کانی‌سازی سرب و روی در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان در گوشه باختری استان مرکزی، به‌عنوان بخشی از پهنه سندج-سیرجان، در پایه سنگ آهک‌های کرتاسه‌زیرین انباشته‌هایی از سرب و روی وجود دارد که به‌عنوان یک نوار کانه‌دار از جنوب اصفهان آغاز و تا استان مرکزی ادامه می‌یابد (کریم‌پور و سعادت، ۱۳۸۱). کانسارهای سرب و روی عمارت-اراک، کانسار سرب خوگان و کانسار سرب لکان از جمله کانسارهای قابل توجه در این استان است (رحیم‌پور، ۱۳۷۰). ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب با قرار گرفتن بخش جنوبی آن به عنوان شمال کمربند ملایر-اصفهان (شکل ۱) میزبان کانسارهای سرب و روی زیادی با سنگ میزبان کربناته است (واحد آهک کرتاسه) را در خود جای داده است (قربانی، ۱۳۸۱). کانسارهای سرب و روی بر مبنای سنگ‌شناسی (سنگ میزبان) تیپ‌های متفاوتی دارند که از جمله آنها می‌توان به کانسارهای با سنگ میزبان کربناته نوع دره می‌سی‌پی (MVT)، آلی، ایرلندی، سولفید توده‌ای آتشفشان‌زاد (VMS)، اسکارنی، رگه‌ای و کانسارهای با سنگ میزبان شیل و ماسه سنگی (Sedex) اشاره کرد. کانسارهای MVT و Sedex جزو کانسارهای با سنگ میزبان رسوبی هستند که اغلب درون واحدهای کربناته، شیلی و ماسه سنگی تشکیل می‌شوند (Rajabi et al., 2012). این ذخایر در این مطالعه مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

۲- روش پژوهش

با توجه به اینکه ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ خُنداب در بخش شمالی منطقه فلززایی ملایر-اصفهان قرار دارد (شکل ۱) و از طرفی این ورقه یکی از باپتانسیل‌ترین ورقه‌ها برای تشکیل کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در ایران به‌شمار می‌رود، هدف اصلی این پژوهش مدل‌سازی پتانسیل معدنی سرب و روی در این منطقه می‌باشد. در این پژوهش از روش‌های فازی-گاما و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که از روش‌های متداول تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) هستند، برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی سرب و روی در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ خُنداب استفاده شده است. همچنین در مطالعه حاضر از روش نوین شاخص سینگولاریتی



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و مناطق فلززایی سرب و روی در ایران (Rajabi et al., 2012).

ذخایر با سنگ میزبان رسوبی هستند که کانسارهای زیادی از جمله کانسار آهوان گردل کوه با پتانسیل معدنی سرب و مس، کانسار بصری با پتانسیل معدنی سرب، نقره و آهن به عنوان عنصر فرعی (قربانی، ۱۳۸۱)، کانسار کله‌بید با پتانسیل معدنی سرب، روی و طلا و سایر کانسارهای دیگر است (رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲).

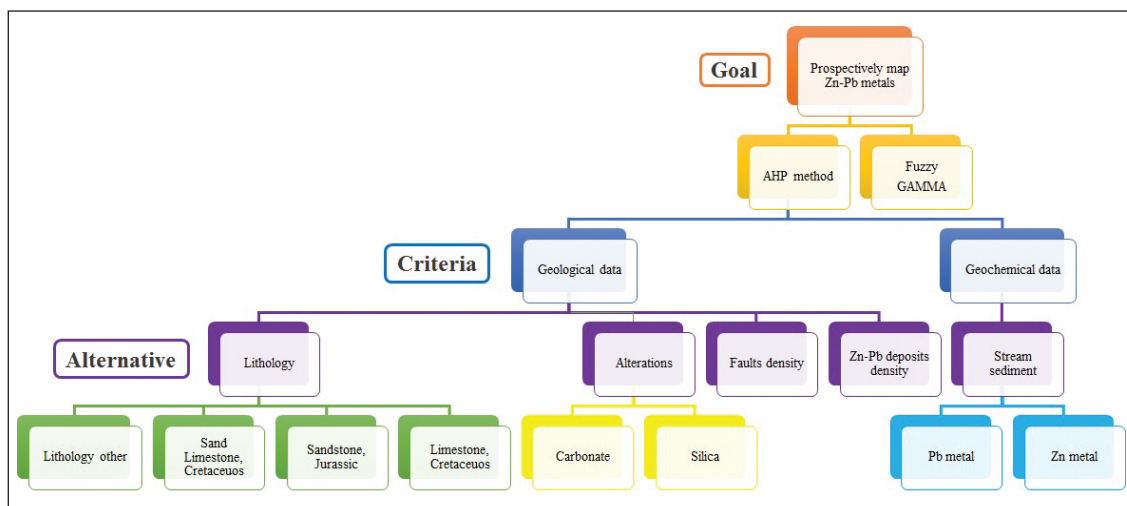
۴- لایه‌های اکتشافی

لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده در این پژوهش بر اساس معیارهای اکتشافی مربوط به کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی (تپ‌های MVT و Sedex) انتخاب شده‌اند. پس از بررسی‌های فراوان و استفاده از نظرات متخصصان علوم زمین، در نهایت ۵ معیار اصلی در قالب لایه‌های اطلاعاتی شامل: سنگ‌شناسی (لیتولوژی)، چگالی گسل‌ها، چگالی کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی، لایه زمین‌شیمی سرب و روی به‌دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی و دگرسانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه در مدل‌سازی نهایی با هم تلفیق شدند (شکل ۳).

ورقه خُنداب از نظر دارا بودن کانه‌های فلزی و غیرفلزی شرایط بسیار خوبی را دارا می‌باشد. کانه‌زایی‌های فلزی در این منطقه شامل سرب، روی، طلا، آهن، مس و نقره و کانی‌های غیرفلزی شامل سیلیس و سنگ‌های ساختمانی است (قربانی، ۱۳۸۱). مطالعات صورت گرفته در کانسارهای سرب و روی موجود در این منطقه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی منطقه و همچنین ویژگی‌های کانسارهای سرب و روی موجود در ورقه خُنداب می‌توان چنین نتیجه گرفت که واحدهای آهک کرتاسه به علت دارا بودن پتانسیل فراوان در تشکیل عناصر سرب و روی در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. به این علت که نخست، وجود رژیم زمین‌ساختی کششی کرتاسه زیرین سبب تشکیل حوضه‌های فزاینده و فروزمین در کمربند فلززایی ملایر-اصفهان شده است و در نتیجه بسیاری از کانسارهای سرب و روی با میزبان کربناته در حوضه‌های فروزمینی نهشته شده‌اند (Rajabi et al., 2012) و دوم این که (Ehya et al., 2010) معتقدند که برخورد صفحه عربی با پهنه سندج-سیرجان و بسته شدن اقیانوس نئوتتیس باعث تشکیل کانسارهای سرب و روی زیادی با میزبان کربناته در این منطقه شده است. بر اساس جدول ۱، کانسارهای موجود در ورقه خُنداب عمدتاً از نوع

جدول ۱- ویژگی‌های کانسارهای شاخص ورقه خُنداب.

Deposits Feature	Ahvan gerdel kuh	Nabi dar	Basari	Kolahbid	Baneh	Darreh melki
Host rock	Limestone, Marn	Sandstone	Limestone	Philite, Slate, Sandstone	Limestone	Dolomite
Host rock age	Cretaceous	Cretaceous	Cretaceous	Jurassic	Cretaceous	Cretaceous
Alteration	Dolomite, Silica	Calcite, Dolomite	Dolomite, Silica, Calcite	Silica, Dolomite	Silica, Calcite	Calcite, Dolomite
Metal elements	Ba, Zn, Ag	Pb, Fe, Cu, Au	Pb, Ag, Fe	Pb, Zn, Au, Ag	Pb, Zn, Cu	Pb, Zn, Fe
Mineralization style	Stratiform	Stratiband	(Stratiform) Epigenetics, in faults	Stratiband	Stratiform	Stratiform
References	(یعقوب پور، ۱۳۸۱)	(رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲)	(قربانی، ۱۳۸۱)	(یعقوب پور، ۱۳۸۱)	(رحیم پور، ۱۳۷۰)	(رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲)

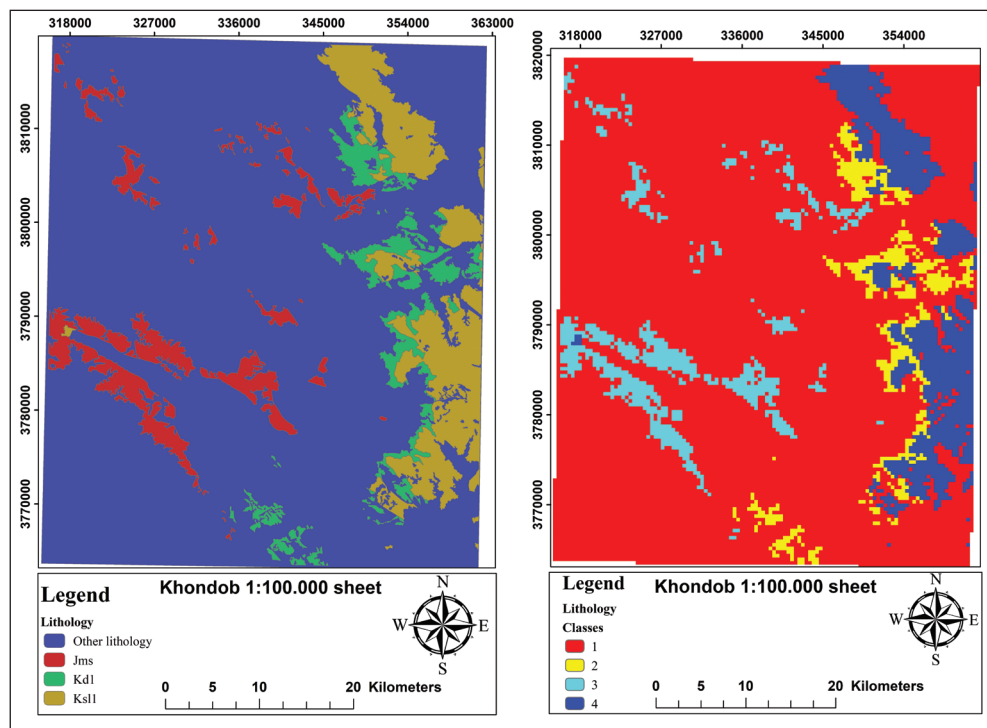


شکل ۳- نمای شماتیک درخت سلسله مراتبی برای تولید نقشه‌های پتانسیل‌یابی عناصر سرب و روی در ورقه خُنداب.

۴-۱. لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی)

Sedex منطقه مورد مطالعه می‌باشد (Rajabi et al., 2012). ورقه زمین‌شناسی خُنداب با تشکیل دادن بخشی از شمال منطقه ملایر-اصفهان کانسارهای سرب و روی زیادی را با سنگ میزبان کربناته (سنگ آهک‌های کرتاسه) در خود جای داده است. به همین دلیل برای جداسازی این واحدهای سنگی از نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب استفاده شده است. با توجه به اهمیت سنگ آهک‌های کرتاسه به عنوان سنگ میزبان کانه‌زایی‌های سرب و روی در منطقه مورد مطالعه، بیشترین امتیاز به این واحد سنگی تعلق گرفت (۴) پس از آن واحدهای ماسه سنگ ژوراسیک (۳)، سنگ آهک ماسه‌ای (۲) و سایر لیتولوژی‌ها (۱) به ترتیب به علت مؤثر بودن در تشکیل کانسارهای سرب و روی منطقه، بیشترین امتیازها را به خود اختصاص داده‌اند و لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی) به این ترتیب تقسیم‌بندی شد (شکل ۴).

یکی از عوامل مهم در تشکیل ذخایر معدنی نوع سنگ میزبان می‌باشد. در منطقه مورد مطالعه با توجه به اینکه تمام کانسارهای سرب و روی شناخته شده با سنگ میزبان رسوبی هستند، از این رو، سنگ‌های رسوبی مانند کربناته، شیل و ماسه سنگ منطقه از اهمیت بالایی برخوردار هستند. ذخایر منطقه مورد مطالعه اغلب از نوع MVT (ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان کربناته) هستند، پس از آن ذخایر Sedex (ذخایر سرب و روی با سنگ میزبان شیلی و ماسه سنگی) دارای فراوانی می‌باشند؛ به این ترتیب کلاس‌های سنگ‌شناسی طبق اولویت‌های سنگ میزبان رده‌بندی شدند. منطقه فلزایی ملایر-اصفهان میزبان ذخایر سرب و روی زیادی با سنگ میزبان رسوبی (اغلب MVT) است که عمدتاً واحد آهک کرتاسه زیرین سنگ میزبان کانسارهای سرب و روی تیپ MVT و شیل و ماسه سنگ تریاس تا ژوراسیک سنگ میزبان کانسارهای



شکل ۴- لایه سنگ‌شناسی (لیتولوژی) و نقشه وزن‌دار شده آن در منطقه مورد مطالعه.

۴-۲. لایه ژئوشیمی

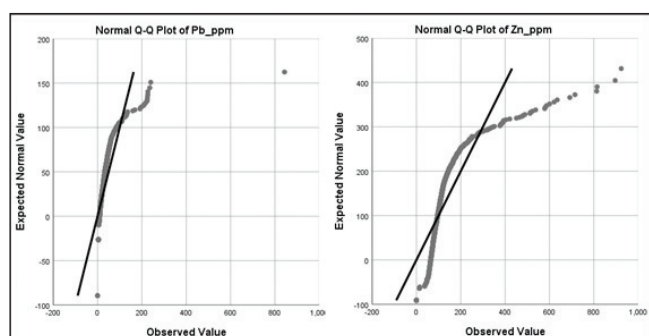
در این مطالعه برای بهره‌گیری از لایه زمین‌شیمی در مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی سرب و روی، از مقادیر غلظت عناصر سرب و روی در ۲۰۰۶ نمونه رسوبات آبراهه‌ای عناصر که در چارچوب اکتشافات زمین‌شیمیایی سیستماتیک در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور به روش ICP-OES تجزیه شده است، استفاده شد (رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲). موقعیت نمونه‌های برداشت شده در شکل ۵ ارائه شده است. سپس داده‌های خارج از رده حذف و داده‌ها به روش لگاریتم‌گیری بهنجار شدند. پارامترهای آماری مهم برای داده‌های ژئوشیمیایی عناصر سرب و روی در جدول ۲ ارائه شده است در این مطالعه از روش نوین شاخص سینگولاریتی (SI) که در شناسایی بی‌هنجاری پنهان و ضعیف از دقت بالایی برخوردار است برای اکتشافات ژئوشیمیایی و تهیه لایه زمین‌شیمی عناصر سرب و روی برای مدل‌سازی پتانسیل کانه‌زایی سرب و روی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب استفاده شد.

۴-۳. بهنجار کردن داده‌های ژئوشیمیایی

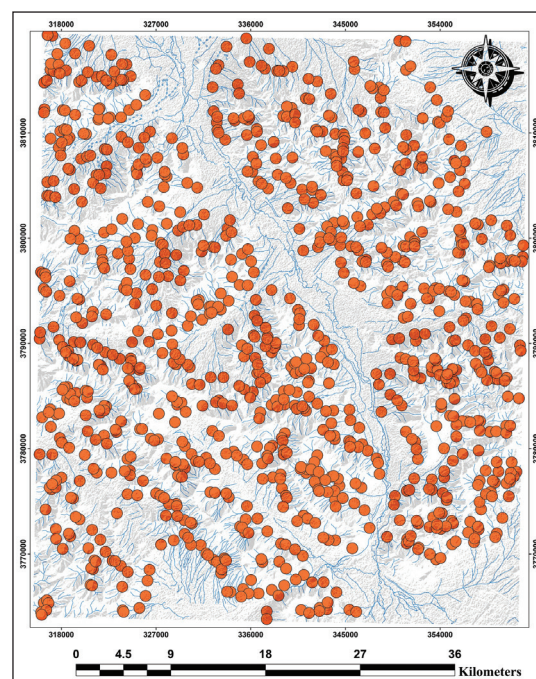
استفاده از برخی روش‌های آماری، منوط بر بهنجار بودن تابع توزیع متغیرهای مورد استفاده است. به همین سبب، پیش از استفاده از روش‌ها، آزمون بهنجار بودن داده‌های خام باید انجام شوند. رایج‌ترین این روش‌ها، آزمون Shapiro and Wilk (1965) و نمودارهای Q-Q هستند، که در این پژوهش از نمودارهای Q-Q استفاده شده است. نمودارهای Q-Q تک عنصری که از رسوبات آبراهه‌ای ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب برای عناصر سرب و روی به دست آمده‌اند، می‌توانند در مشخص کردن نقاط شکست جمعیت‌های ژئوشیمیایی و ثابت کردن دقت روش‌های انجام داده شده مفید واقع شوند (Cheng et al., 1994). بدین صورت که اگر پس از رسم نمودار تمام داده‌ها روی خط مماس شوند، نشان دهنده بهنجار بودن داده‌ها است (Liu et al., 2019)، که در این حالت برای اکتشافات زمین‌شیمیایی استفاده از روش

زمین‌شیمیایی می‌باشد. بنابراین با توجه به بهنجار نبودن داده‌ها و بر اساس آنچه گفته شد، استفاده از روش‌های مولتی‌فرکتالی و شاخص سینگولاریتی (که در این پژوهش این روش مورد استفاده قرار گرفت) برای جدایش بی‌هنجاری‌های زمین‌شیمیایی و تهیه لایه زمین‌شیمی جهت مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی، دقت نتایج پژوهش حاضر را نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش آمار کلاسیک و انحراف مطلق از میانه افزایش می‌دهد (Zuo et al., 2013).

آمار کلاسیک مثل (Mean+nSTEV) و انحراف مطلق از میانه (MAD) از دقت بالاتری برخوردار بوده و بی‌هنجاری کاذب کم‌تری از خود نشان می‌دهد. در صورتی که داده‌ها روی خط مماس نباشند، گواه بر این است که داده‌ها بهنجار نیستند. در این مطالعه، نمودارهای Q-Q توسط نرم افزار SPSS برای عناصر سرب و روی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. بر اساس شکل ۶، عناصر سرب و روی چندین جمعیت زمین‌شیمیایی را نشان می‌دهند که گواه بر فرایندهای مختلف زمین‌شناختی و



شکل ۶- نمودار Q-Q داده‌های خام زمین‌شیمیایی عناصر سرب و روی در ورقه خنداب که نشان دهنده چندین جمعیت زمین‌شیمیایی می‌باشند.



شکل ۵- موقعیت نمونه‌های رسوبات آبراه‌ای برداشت شده در ورقه ۱:۱۰۰۰۰ خنداب (رادفر و کهنسال، ۱۳۸۲).

جدول ۲- محاسبه پارامترهای آماری برای داده‌های زمین‌شیمیایی سرب و روی در ورقه خنداب.

Metal	Min	Max	Ave	Stdev	Mean	Var	Kurt	Skew
Pb (ppm)	3.75	843.40	30.75	40.80	22.83	1665.36	160.26	9.36
Zn (ppm)	13.61	923.81	129.22	93.43	106.33	8729.31	22.96	4.14

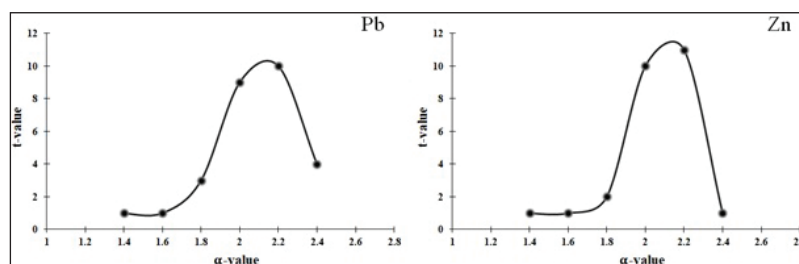
۴-۴. روش شاخص سینگولاریتی (SI)

جداسازی بی‌هنجاری از زمینه و تهیه لایه زمین‌شیمی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (Singularity Index) به دست آمدند. تکنیک شاخص سینگولاریتی (SI) قادر به تخمین زدن غلظت عناصر از طریق مشاهده پنجره‌های کوچک مجاور هم است (Wang and Zuo, 2018). جهت تخمین سینگولاریتی، از تعدادی پنجره‌ها (به شکل مربع) برای اندازه‌گیری تراکم غلظت حول یک موقعیت خاص استفاده می‌شود (Xiao et al., 2018). این روش بی‌هنجاری‌هایی که بین زمینه پنهان می‌شوند و به اصطلاح Weak anomaly نامیده می‌شوند و همچنین از طریق وزن‌دهی به شیوه معکوس فاصله (IDW) مشخص

نمی‌شوند را می‌تواند شناسایی کند. مقدار سینگولاریتی برای پنجره‌های کوچک مجاور هم بر اساس رابطه (۱) به‌دست می‌آید (Zuo et al., 2015):

$$X = c \cdot \varepsilon^{(a-E)}$$
 رابطه (۱)
 در این رابطه، X نشان دهنده غلظت (عیار) عنصر، c مقدار ثابت، a مقدار سینگولاریتی، ε اندازه فاصله بهنجار شده و E بُعد اقلیدسی می‌باشد (Wang and Zuo, 2019). شاخص سینگولاریتی از شیب خط مستقیم برازش شده با جفت داده‌های c و ε در نمودار لگاریتمی تخمین زده می‌شود (Cheng, 2007). در این روش دو نوع بی‌هنجاری ضعیف و قوی مشخص می‌شود که بر اساس داده‌های

ژئوشیمیایی این است که در این روش بر خلاف روش‌های مولتی‌فرکتال و کلاسیک، آثار سنگ‌شناسی (لیتولوژی) بالا دست و پایین دست منطقه در نظر گرفته می‌شوند، همچنین این روش در بارزسازی بی‌هنجاریهای پنهان و دقیق که سایر روش‌ها قادر به شناسایی آنها نیستند عملکرد خوبی نشان می‌دهد (جعفری و همکاران، ۱۳۹۹b). بر اساس گفته Cheng (2007) حد آستانه معمول در روش سینگولاریتی $\alpha = 1/96$ می‌باشد. نمودار شواهد وزنی، مقدار سینگولاریتی (α) را در برابر مقدار t که در ارتباط با رخنمون‌های معدنی است، را نشان می‌دهد (شکل ۷). مقدار t از رابطه $C(SIC)$ با استفاده از روش شواهد وزنی (Weight of Evidence) به دست آمده است. جایی که $C = W^+ - W^-$ و $S(C)$ انحراف معیار $C(SDEV)$ باشد. W^+ و W^- زمانی که مدل‌های اثبات شده‌ای باشند (به عنوان مثال بی‌هنجاری‌ها) مقادیر وزن‌هایی هستند که از W^+ زمانی که رخنمون معدنی موجود باشد و از W^- زمانی که رخنمون معدنی وجود نداشته باشد استفاده می‌شود (Zuo et al., 2013). t تعداد معادن و کانسارها را نمایش می‌دهد و (α) مقدار سینگولاریتی به دست آمده مربوط به هر عنصر می‌باشد. این نمودار بیان کننده این موضوع می‌باشد که در کدام مقدار از بی‌هنجاری‌های به دست آمده از روش سینگولاریتی (α)، همپوشانی بیشتری با کانسارهای سرب و روی مس موجود در منطقه وجود دارد. همانطور که از نمودار پیداست برای هر دو عنصر سرب و روی مقدار α (شاخص سینگولاریتی) $2/1$ به دست آمده است که این مقدار بیانگر بیشترین میزان انطباق کانسارهای سرب و روی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب است (شکل ۷). علت تشابه این نمودار برای هر دو عنصر این است که کانسارهای سرب و روی عمدتاً با یکدیگر تشکیل می‌شوند و شرایط تشکیل مشابهی دارند.



شکل ۷- نمودار T-Value عناصر سرب و روی برای بی‌هنجاریهای به دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی (SI) در منطقه مورد مطالعه.

در پی جویی و پتانسیل‌یابی راهنمای مناسبی باشند، به همین سبب از این لایه به عنوان یکی از لایه‌های اکتشافی استفاده شده است. با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورقه خنداب توانستیم موقعیت رخنمون‌ها و کانسارهای سرب و روی را جدا کرده، چگالی آنها را بر اساس کیلومتر مربع به دست آورده و از آن به عنوان یک لایه اکتشافی مهم استفاده نماییم. همچنین کلاس بندی این لایه از کم‌ترین به بیشترین تراکم (یک تا چهار) صورت گرفت (شکل ۹).

۴-۶. لایه چگالی گسل‌ها

شکستگی‌ها به ویژه گسل‌ها می‌توانند به عنوان یکی از عوامل مهم و اساسی در تشکیل و تمرکز ذخایر معدنی باشند. شناخت عناصر ساختاری مانند گسل‌ها، شکستگی‌ها، چین خوردگی‌ها و همچنین محل تلاقی گسل‌های اصلی با گسل‌های دیگر که می‌تواند محل مناسبی برای نفوذ ماگما و سپس کانه‌زایی باشد، می‌تواند راهنمای شناخت و اکتشاف ذخایر معدنی باشند (Leach et al., 2010). به‌خاطر اهمیت گسل‌ها و ارتباط نزدیک آنها با کانه‌زایی و محلول‌های گرمایی، یکی از لایه‌های اطلاعاتی به گسل‌ها اختصاص داده شد. با توجه به وجود کانسارهای

زمین‌شیمیایی برداشت شده و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB باید مطابق مراحل زیر عمل کرد (Agterberg, 2012): ۱- موقعیتی روی نقشه با تعدادی از پنجره‌های متغیر $A(r)$ (مربع شکل) $r_{min} = r_1 < r_2 < \dots < r_n = r_{max}$ در نظر گرفته می‌شود و میانگین غلظت $C[A(r_i)]$ برای هر اندازه پنجره روی نقشه محاسبه می‌شود. ۲- برای پیاده کردن داده‌های $C[A(r_i)]$ ($i=1, \dots, n$) در یک نمودار لگاریتمی از رابطه (۲) استفاده می‌شود (Wang and Zuo, 2018):

$$\log(r)\alpha + (2 - \log C[A(r_i)]) = C \quad \text{رابطه (۲)}$$

مقدار α را می‌توان از شیب خط راست به دست آورد. ۳- تکرار کردن روش‌های نام برده برای تمام قسمت‌های نقشه زمین‌شیمیایی (Xiao et al., 2018). برای یک نقشه زمین‌شیمیایی، مقدار α (شاخص سینگولاریتی) نزدیک به ۲ یک توزیع عادی را نشان می‌دهد. در حالی که مناطقی با سینگولاریتی مثبت ($\alpha > 2$) تهی‌شدگی و سینگولاریتی منفی ($\alpha < 2$) غنی‌شدگی غلظت عناصر در منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد (Liu et al., 2019). در این روش، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، سینگولاریتی یک ماتریس سطر با ستون برابر را ایجاد می‌کند و منطقه مورد مطالعه را به یک سری مربع‌های کوچک تقسیم‌بندی می‌کند سپس غلظت میانگین مربع‌ها را به عنوان غلظت تخمینی در نظر می‌گیرد (کنعانیان و همکاران، ۱۳۹۷؛ جعفری و همکاران، ۱۳۹۹a). تولید این مربع‌های کوچک آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا به مربع بهینه برسد، زمانی به این امر دست پیدا می‌کند که بی‌هنجاری‌های به دست آمده با اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی منطقه همپوشانی بالایی نشان دهد (Sun et al., 2010). دو برتری آشکار روش شاخص سینگولاریتی نسبت به سایر روش‌ها برای اکتشافات

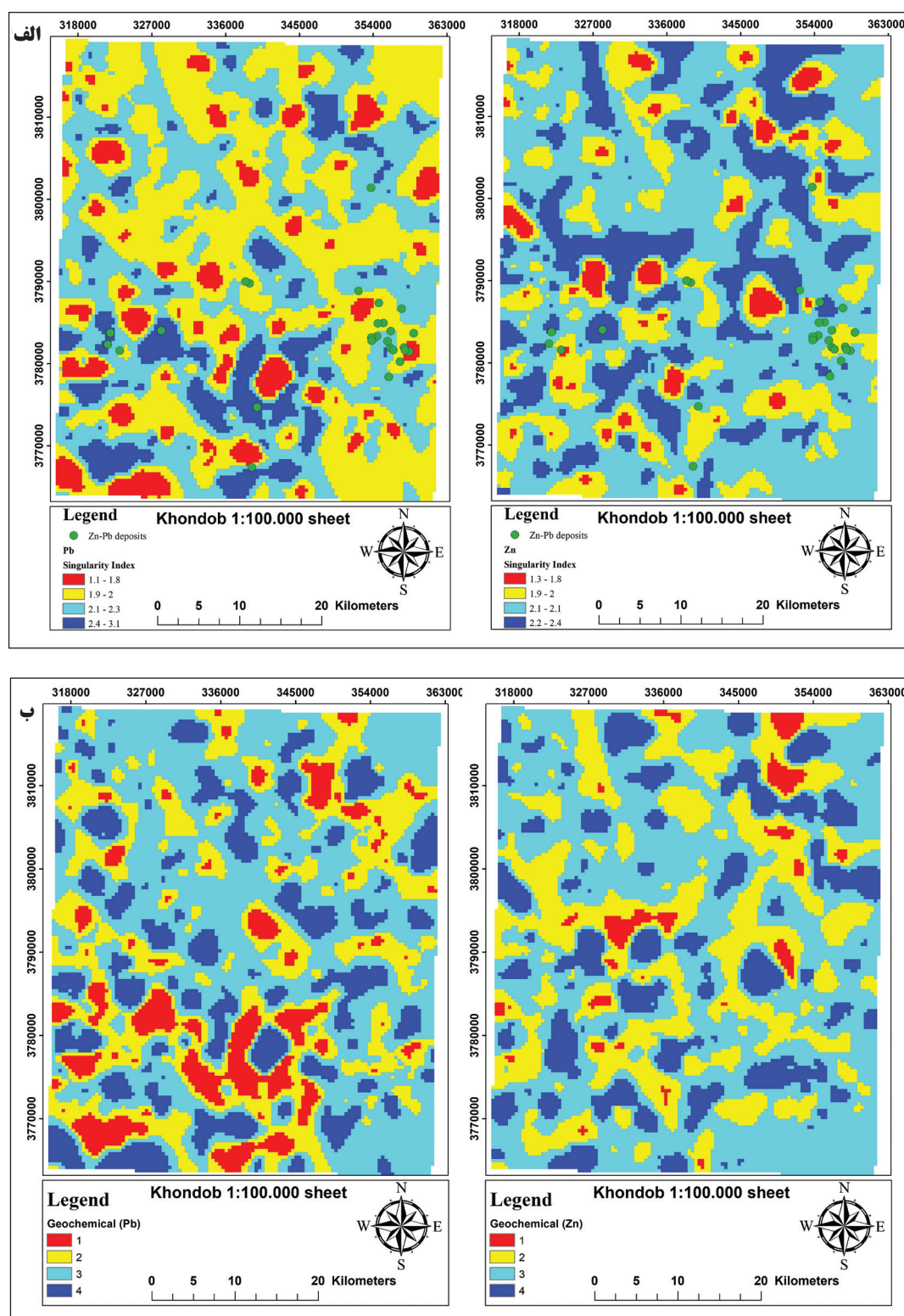
در این پژوهش حد آستانه به دست آمده از روش شاخص سینگولاریتی (α) مطابق نمودار T-Value برای عناصر سرب و روی $2/1$ می‌باشد که این مقدار تمام کانسارهای سرب و روی موجود در منطقه مورد نظر را پوشش می‌دهد. لایه زمین‌شیمیایی با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (SI) برای عناصر سرب و روی به دست آمد (شکل ۸-الف) و کلاس بندی این لایه به ترتیب از کم به زیاد (۱ تا ۴) برای لایه زمین‌شیمی سرب و روی در نظر گرفته شده است (شکل ۸-ب). در نقشه‌های به دست آمده از مدل سینگولاریتی، همان گونه که توضیح داده شد، معمولاً مقدار سینگولاریتی بزرگ‌تر از ۲ تهی‌شدگی و کوچک‌تر از ۲ غنی‌شدگی فلز یا عنصر مورد نظر را نشان می‌دهد. به همین دلیل بازه $1/11$ تا $1/9$ برای لایه زمین‌شیمی سرب و بازه $1/3$ تا $1/9$ برای لایه زمین‌شیمی روی به عنوان بالاترین کلاس (کلاس ۴) در نظر گرفته شد و سایر کلاس‌ها به ترتیب در جدول ۳ مشخص شده‌اند. به این ترتیب کلاس بندی لایه‌های زمین‌شیمی سرب و روی برای پتانسیل‌یابی به دست آمد.

۴-۵. لایه چگالی کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی

با توجه به اینکه جایگاه کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی منطقه می‌تواند

برای این لایه تهیه شد و لایه چگالی گسل‌ها به ترتیب از تراکم کم به زیاد (یک تا چهار) وزندهی و از این لایه به عنوان یکی از لایه‌های اکتشافی استفاده شد (شکل ۱۰).

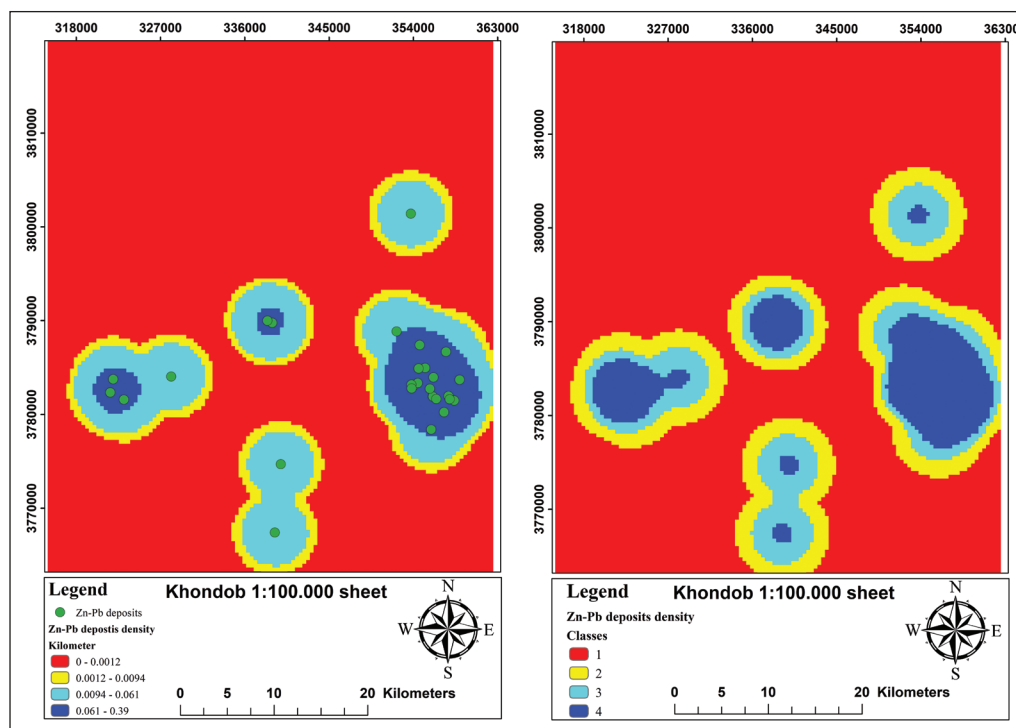
سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی در منطقه مورد مطالعه، ممکن است کانه‌زایی سرب و روی در امتداد گسل‌ها تشکیل شده باشد. بر همین اساس، گسل‌های موجود ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS



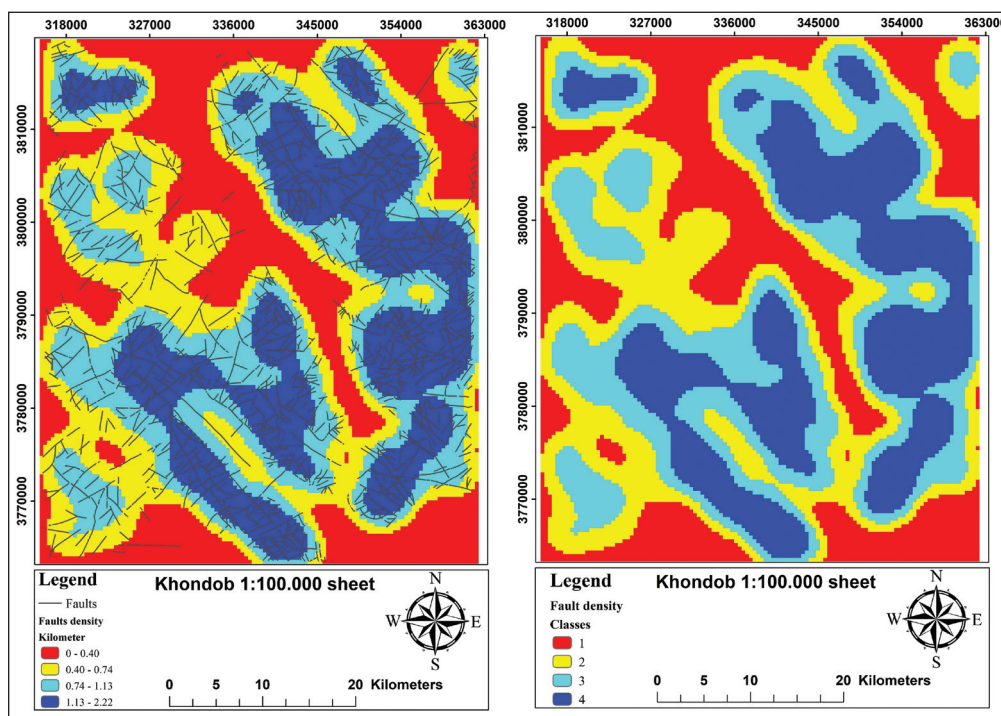
شکل ۸- الف) لایه زمین‌شیمی عناصر سرب و روی بر اساس روش شاخص سینگولاریتی (SI)، ب) نقشه وزن‌دار شده لایه زمین‌شیمیایی سرب و روی.

جدول ۳- کلاس‌بندی زیرلایه‌های اکتشافی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی سرب و روی ورقه خنداب.

Layers	Substrates		Classes
Lithology	Other Lithologies		1
	Sand limestone, Cretaceous		2
	Sandstone, Jurassic		3
	Limestone, Cretaceous		4
Geochemical (SI method)	Pb	1.11-1.9	4
		1.9-2.1	3
		2.1-2.3	2
		2.3-3.08	1
	Zn	1.3-1.9	4
		1.9-2.1	3
		2.1-2.2	2
		2.1-2.4	1
Zn-Pb deposits density (Square kilometer)	0-0.0012		1
	0.0012-0.0094		2
	0.0094-0.061		3
	0.061-0.39		4
Faults density (Square kilometer)	0-0.4		1
	0.4-0.74		2
	0.74-1.13		3
	1.13-2.22		4
Alteration (Carbonate & Silica)	Low		1
	Medium		2
	High		3
	Strong		4



شکل ۹- لایه چگالی کانسارهای سرب و روی و نقشه وزن‌دار آن در منطقه مورد مطالعه.



شکل ۴-۱۰- لایه چگالی گسل‌ها و نقشه وزن‌دار شده آن در منطقه مورد مطالعه.

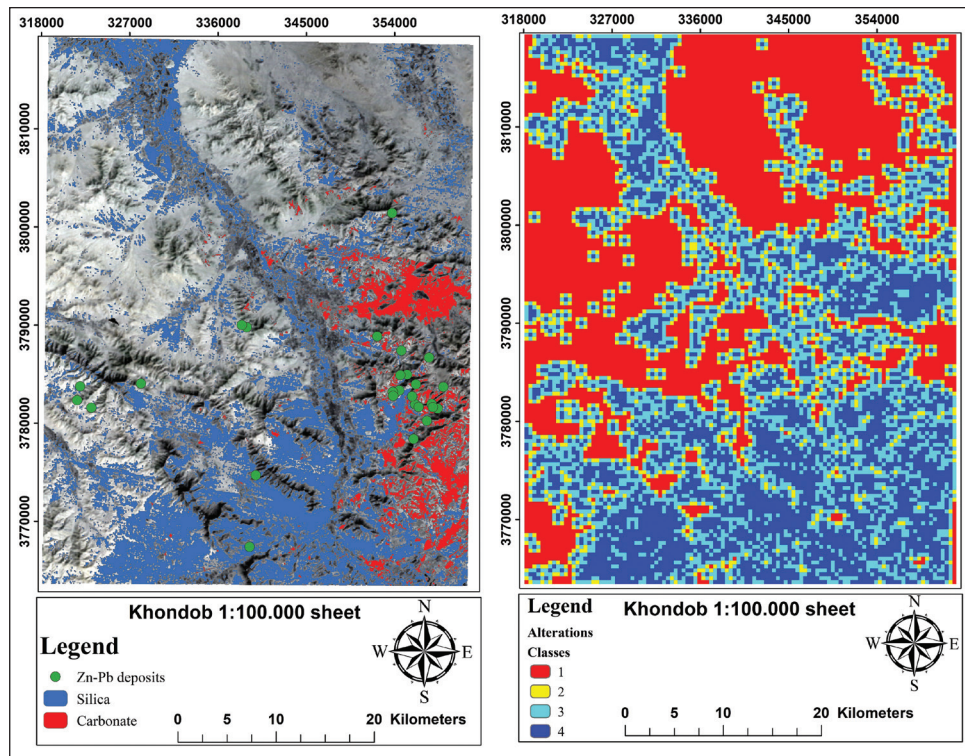
۴-۷. لایه دگرسانی

کار می‌رود (Rouskov et al., 2005). تصویر استفاده شده در این پژوهش متعلق به سنجد Aster ماهواره Terra می‌باشد که با ادغام باند (VNIR+SWIR) بهره‌گیری از نرم افزار ENVI پردازش گردید. برای بارزسازی دگرسانی سیلیسی از نسبت باندی (B12)/(B13) و دگرسانی کربناته (B7)/(B8+B9) استفاده شده است (Rouskov et al., 2005). همان‌گونه که در شکل ۱۱ و نقشه زمین‌شناسی منطقه مشخص است در تمامی مناطق (به‌ویژه قسمت جنوب‌خاور) ورقه خُنداب دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته کاملاً با کانسارهای سرب و روی و سنگ آهک‌های کرتاسه منطقه همپوشانی داشته که این خود نشان‌دهنده نقش دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته در کانه‌سازی سرب و روی می‌باشد. همچنین مشخص شد دگرسانی چیره منطقه از نوع سیلیسی و پس از آن کربناتی است. با بررسی دگرسانی‌های کربناتی و سیلیسی موجود در منطقه، لایه اکتشافی مربوط به دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی تهیه شده است و کلاس‌بندی آن به ترتیب از مقدار دگرسانی کم تا شدید (۱ تا ۴) انجام گردیده است.

۵- روش‌های تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

در این پژوهش پس از تعیین معیارهای اکتشافی اصلی شامل سنگ‌شناسی (لیتولوژی) (سنگ میزبان)، لایه زمین‌شیمیایی عناصر سرب و روی به‌دست آمده با استفاده از روش شاخص سینگولاریتی (SI)، لایه چگالی کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی، چگالی اثرات معدنی و لایه دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی، به هریک از زیرلایه‌های اکتشافی طبق جدول ۳ از ۱ (کم‌ترین) تا ۴ (بیشترین) وزنی اختصاص داده شد. پس از ایجاد لایه‌های اطلاعاتی مختلف بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، زمین‌شیمی و مشخص کردن وزن هر لایه در هر زیرلایه، با استفاده از روش‌های فازی-گاما و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، پتانسیل‌یابی برای عناصر سرب و روی انجام شد. در نهایت پنج معیار اصلی سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، چگالی کانسارها و نشانه‌های معدنی سرب و روی، چگالی گسل‌ها و دگرسانی‌های چیره منطقه (کربناته و سیلیسی) با استفاده از روش‌های یاد شده تلفیق شد.

در تشکیل نهشته‌های سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی معمولاً دگرسانی‌های کربناته (دولومیتی شدن) و سیلیسی (ژاسپروئیدی) نقش اساسی دارند (Rajabi et al., 2012). دگرسانی دولومیتی در کانسارهای سرب و روی تیپ MVT دیده می‌شود. در این فرایند، سنگ میزبان (سنگ آهک) به دولومیت تبدیل می‌شود که سنگی کاملاً مناسب برای واکنش با محلول‌های کانه‌ساز و تشکیل کانسار است، زیرا دولومیت‌ها به علت ترکیب شیمیایی خاص خود قابلیت واکنش با محلول‌های کانه‌ساز را به خوبی دارند. از طرفی، پدیده دولومیتی شدن سنگ آهک با افزایش تخلخل همراه است که خود عامل تسهیل‌کننده‌ای برای گردش محلول‌ها است و اینکه کانی‌سازی در ابعاد اقتصادی در سنگ‌های آهکی، هیچگاه بدون دولومیتی شدن پیشین امکان‌پذیر نیست (رستمی پایدار، ۱۳۹۷). سیلیسی شدن از دگرسانی‌های اصلی و مهم در تشکیل کانسارهای سرب و روی تیپ Sedex و MVT به‌شمار می‌آید که ارتباط تنگاتنگی با کانی‌سازی سرب و روی دارد (Rajabi et al., 2012). دگرسانی سیلیسی، به طور عمده بستگی به ترکیب سنگ دارد و چنانچه سنگ درونگیر، سنگ‌شناسی (لیتولوژی) مناسبی مانند سنگ آهک و به‌ویژه دولومیت داشته باشد، این دگرسانی گسترش بیشتری خواهد داشت. سیلیسی شدن سنگ‌های آهکی می‌تواند نتیجه انحلال کربنات و ته‌نشست همزمان سیلیس در بطن سنگ و یا پرشدگی حفره‌ها و شکستگی‌ها با سیلیس یا تلفیقی از هر دو رویداد باشد (Lovering, 1972). در منطقه مورد نظر سیلیکای مورد نیاز برای این دگرسانی را می‌توان به ماسه‌سنگ‌های ژوراسیک نسبت داد. در این مطالعه از روش نسبت باندی که یکی از رایج‌ترین پردازش تصاویر ماهواره‌ای است برای بارزسازی دگرسانی‌ها استفاده شده است (Sabins, 1999). این روش تقسیم کردن دو باند بر همدیگر است. باندی که میزان تابش از هدف مورد بررسی در آن بیشتر است، در صورت و باند دیگر که پدیده جذب برای همان هدف در آن بالاتر است، در مخرج قرار می‌گیرد (El Janati, 2019). با به‌کارگیری این روش، می‌توان اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را در تصویر کاهش داد و نیز اختلاف بین درجات روشنایی را آشکار کرد و نیز برای جدا کردن مرز واحدهای سنگی و تشخیص سنگ‌ها به



شکل ۱۱- شناسایی دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته با استفاده از تصویر ASTER و نقشه وزن دار شده آن در ورقه خنداب.

۵-۱. روش منطق فازی

تئوری منطق فازی به عنوان یک روش دانش محور برای اولین بار توسط Zadeh (1965) پیشنهاد شده است. این روش بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد که در آن وزندهی به لایه‌های اکتشافی بر مبنای اهمیت هریک از لایه‌ها بر اساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد (Behera et al., 2019). مبنای این روش به صورت تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های بهنجار شده با محاسبه اوزان برای عضوهای فازی بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد (Zhang et al., 2017). به علاوه، مقادیر عضو فازی برای یک از پیکسل‌های لایه‌های اکتشافی به صورت مقادیر پیوسته در دامنه صفر تا یک می‌باشند (Tan et al., 2014). در تئوری منطق فازی عضوهای فازی بر اساس فواصل معنادار از ویژگی‌های مختلف وزندهی می‌شوند که برای هر پیکسل یا موقعیت فضایی، یک وزن به خصوص بین ۰ تا ۱ اختصاص داده می‌شود (Najafi et al., 2014). در مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از تئوری منطق فازی، پنج عملگر کاربرد فراوانی برای ترکیب لایه‌های اکتشافی مختلف فازی سازی شده دارند که شامل عملگرهای AND فازی، OR فازی، PRODUCT جبری فازی، SUM جبری فازی و GAMMA فازی می‌باشند (Ghezelbash et al., 2019). در این پژوهش از عملگر فازی-گاما (GAMMA) که مطابق رابطه (۳) بیان می‌شود برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی سرب و روی مورد استفاده قرار گرفته است:

رابطه (۳)
$$F_{\text{Combination}} = (\gamma \times (\text{فازی PRODUCT})^{\gamma} \times (\text{فازی SUM}))^{\gamma}$$
 عملگر فازی-گاما (GAMMA)، ترکیبی از عملگر فازی حاصل ضرب جبری (PRODUCT) و عملگر فازی حاصل جمع جبری (SUM) می‌باشد در آن پارامتر γ (گاما) در محدوده ۰ تا ۱ انتخاب می‌شود. به طوری که اگر $\gamma=1$ باشد، ترکیب همان حاصل جمع جبری (SUM) خواهد بود و اگر $\gamma=0$ باشد، ترکیب مساوی حاصل ضرب جبری (PRODUCT) است. انتخاب صحیح و آگاهانه γ ، مقدارهایی در خروجی به وجود می‌آورد که نقش فزاینده جمع جبری فازی و نقش کاهنده ضرب جبری فازی در آن عمل می‌کند و کل مجموعه را به حالت تعادل می‌رساند

۵-۲. روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از روش‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) می‌باشد که طی آن به لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی براساس قضاوت کارشناسان و به صورت مقایسات زوجی، اوزان مناسب اختصاص می‌یابد (Saaty, 2016). بر مبنای این روش، تمامی لایه‌های اکتشافی بر اساس میزان اهمیت آنها نسبت به سایر لایه‌ها در نوع خاصی از کانه‌زایی، وزندهی و در نهایت تلفیق نهایی لایه‌ها صورت می‌گیرد (Behera et al., 2019). تحلیل سلسله مراتبی (AHP) بر اساس مقایسه زوجی اهمیت لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Pazand and Hezarkhani, 2015). این فرایند شامل سه گام اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای لایه‌ها و زیرلایه‌ها و تلفیق نهایی بر اساس وزن‌های

که در آن W بردار وزنی و بالاترین مقدار ویژه ماتریس می‌باشد.

$$A_w = \lambda_{\max, W} \quad \text{رابطه (۵)}$$

گفتنی است که سازگاری ماتریس مقایسه‌های زوجی در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از موضوعاتی است که باید همواره در فرایند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شود. سازگاری قضاوت‌ها در فرایند یاد شده با محاسبه نسبت سازگاری CR مطابق رابطه (۶) ارزیابی می‌شود.

$$CR = CI/RI \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه بالا CI شاخص سازگاری و شاخص نسبت ماتریس تصادفی است که با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول (۵) به دست می‌آید. در این پژوهش برای بررسی سازگاری قضاوت‌ها، از روابط مورد استفاده در تعیین میزان سازگاری در روش سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است. چنانچه نسبت سازگاری CR به دست آمده کمتر از ۰/۱ باشد؛ مقایسات زوجی و قضاوت‌های انجام گرفته مورد قبول است.

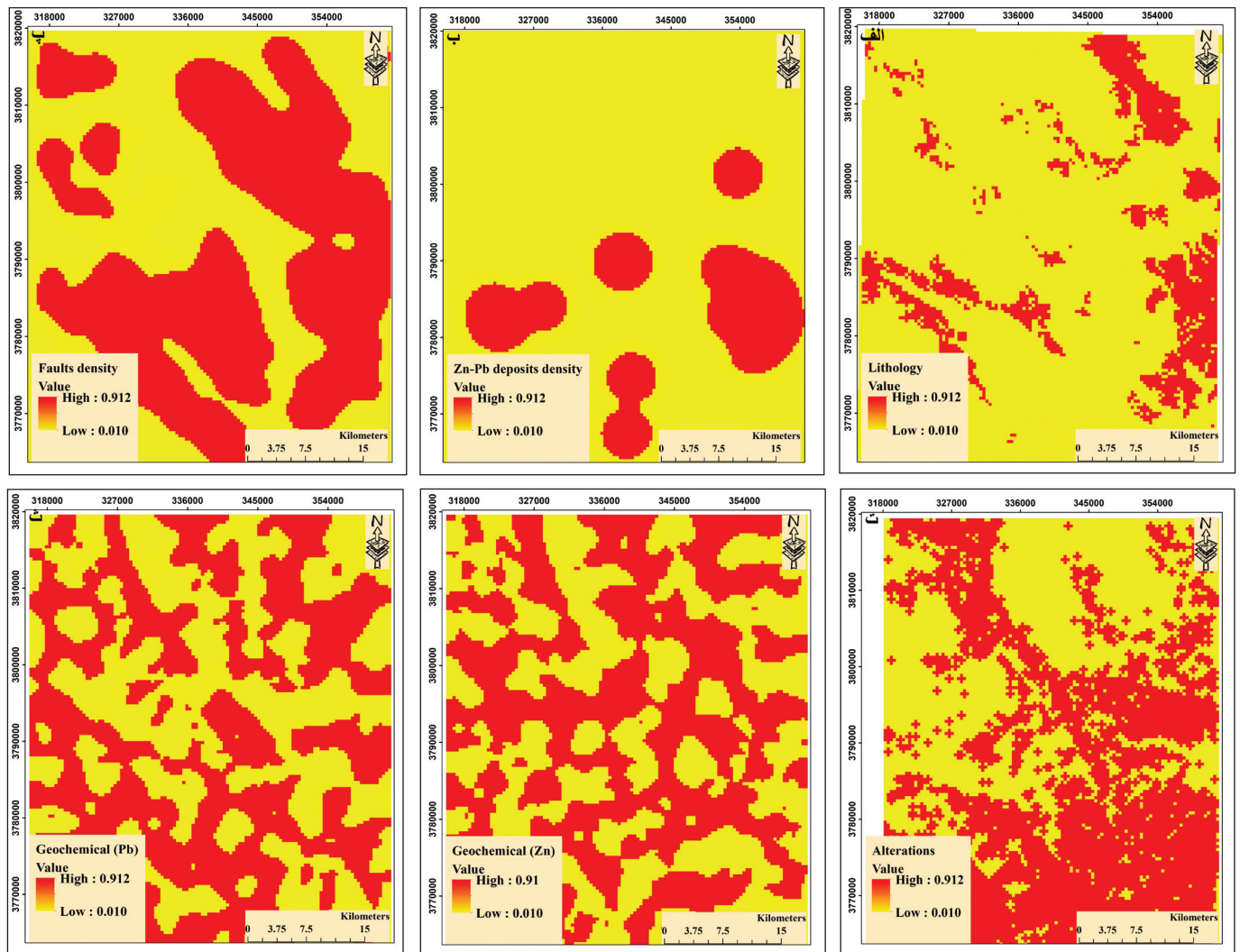
رتبه‌ای اختصاص داده شده می‌باشد (Asadi et al., 2016). یک ساختار سلسله مراتبی به صورت کلی دارای سه سطح مختلف می‌باشد که سطح نخست مربوط به هدف مطالعه، سطح میانی مربوط به لایه‌ها و زیرلایه‌ها و سطح نهایی مربوط به پارامترهای مورد نظر می‌باشد. با استفاده از روش AHP، پارامترهای مربوط به سطح میانی (لایه‌ها و زیرلایه‌ها) به صورت مقایسه زوجی و با استفاده از جدول استاندارد پیشنهاد داده شده توسط Saaty (2016) (جدول ۴) از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و با توجه به نوع هدف اکتشافی رتبه‌بندی می‌شوند (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018). ماتریس مقایسه زوجی برای n لایه مختلف به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad a_{ij} > 0; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ji} = 1 \forall i. \quad \text{رابطه (۴)}$$

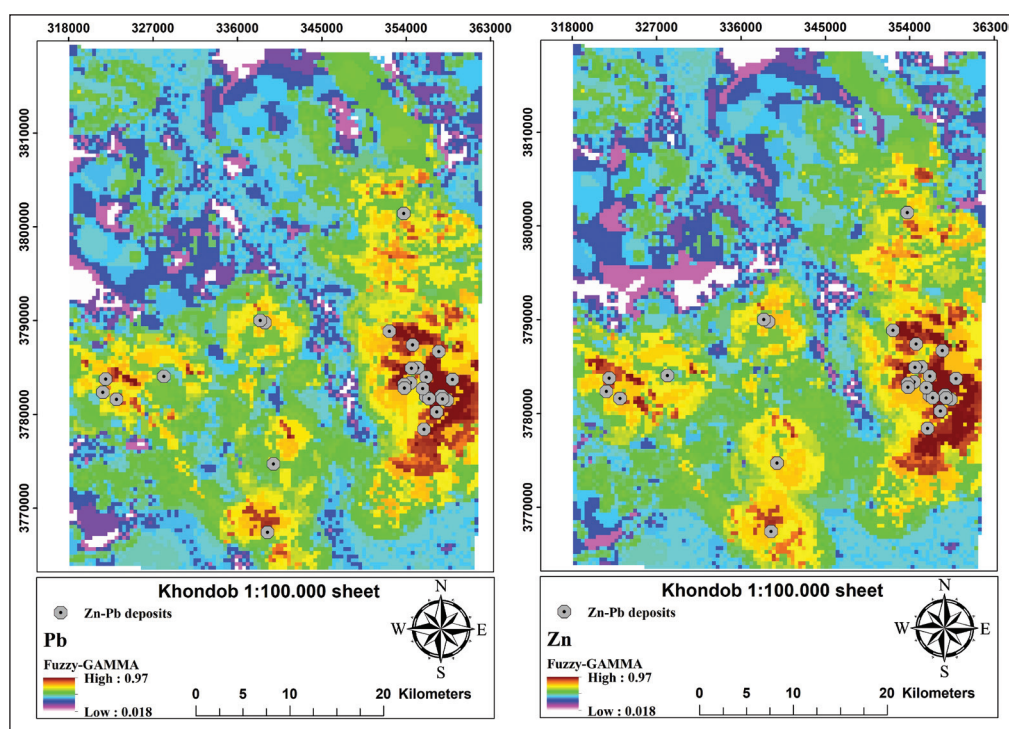
و در نهایت، مقادیر وزنی مناسب لایه‌ها و زیرلایه‌ها طبق رابطه (۵) محاسبه می‌گردد

جدول ۴- تعیین لایه‌ها، زیرلایه‌ها و وزندهی بر اساس روش فازی-گاما در ورقه خنداب.

Layers	Substrates		Classes(Fuzzy-GAMMA)
Lithology	Other lithologies		0.1
	Sandy limestone, Cretaceous		0.5
	Sandstone, Jurassic		0.7
	Limestone, Cretaceous		0.9
Geochemical (SI method)	Pb	1.11-1.9	0.9
		1.9-2.1	0.7
		2.1-2.3	0.5
		2.3-3.08	0.1
	Zn	1.3-1.9	0.9
		1.9-2.1	0.7
		2.1-2.2	0.5
		2.1-2.4	0.1
Zn-Pb deposits density (Square kilometer)	0-0.0012		0.1
	0.0012-0.0094		0.5
	0.0094-0.061		0.7
	0.061-0.39		0.9
Faults density (Square kilometer)	0-0.4		0.1
	0.4-0.74		0.5
	0.74-1.13		0.7
	1.13-2.22		0.9
Alteration (Carbonate & Silica)	Low		0.1
	Medium		0.5
	High		0.7
	Strong		0.9



شکل ۱۲- نقشه‌های کلاس‌بندی شده لایه‌های اکتشافی با استفاده از روش فازی-گاما در منطقه مورد مطالعه. (الف) لایه لیتولوژی، (ب) چگالی نشانه‌ها و کانسارهای سرب و روی، (پ) چگالی گسل‌ها، (د) دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی، (ث) لایه زمین‌شیمی سرب و روی به‌دست آمده از شاخص سینگولاریتی (SI).



شکل ۱۳- نقشه پتانسیل یابی عناصر سرب و روی با استفاده از روش فازی-گاما در ورقه خنداب.

جدول ۵ - مقیاس پایه‌ای برای مقایسات زوجی با استفاده از روش AHP (Satty, 1990).

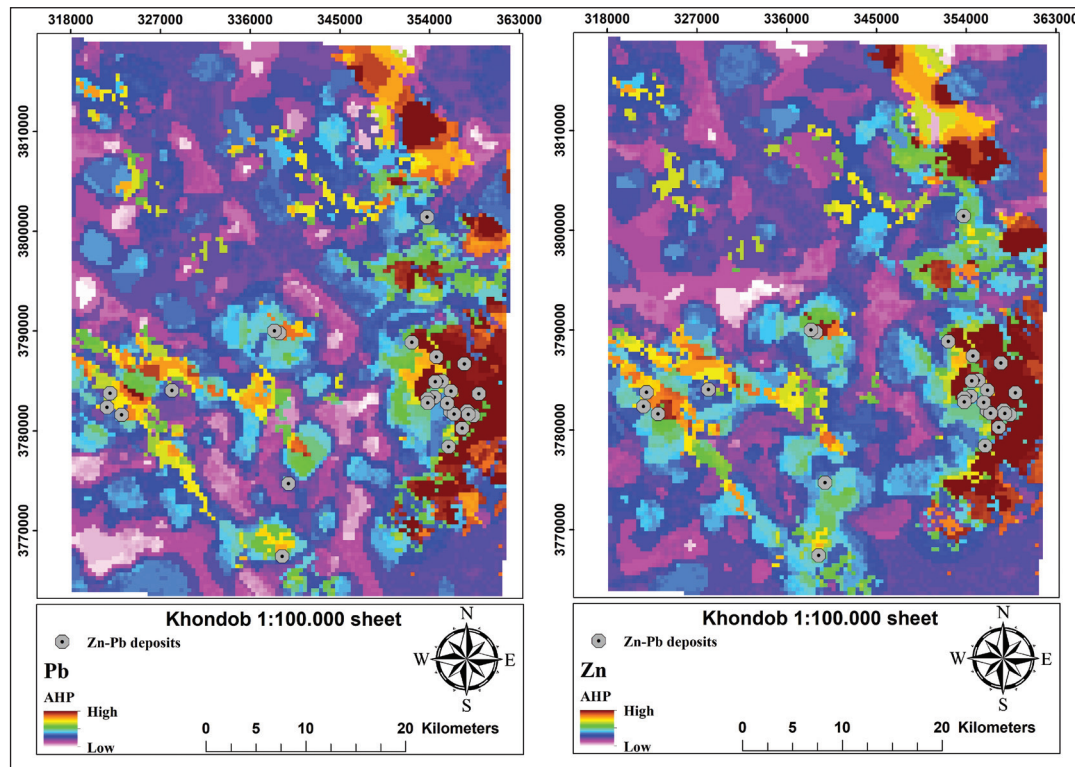
Intensity of importance	Definition
9	Extreme importance
8	Very strong to stream
7	Very strong importance
6	Strongly to very strong
5	Strong importance
4	Moderately to strong
3	Moderate importance
2	Equally to moderately
1	Equal importance

و چگالی گسل‌ها با ۰/۰۶ و در نهایت لایه دگرسانی‌های سیلیسی و کربناته به عنوان کم اهمیت‌ترین معیار در این روش انتخاب شد. در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ضریب ناسازگاری به‌دست آمده برای ماتریس لایه‌های اکتشافی $CR = 0.34$ به‌دست آمد. نرخ ناسازگاری در روش AHP نشان دهنده این است که مقایسات از ثبات و پایداری برخوردار هستند یا خیر. اگر این ضریب از ۰/۱ کم‌تر باشد نشان دهنده سازگاری ماتریس است و اگر این ضریب از ۰/۱ بیشتر باشد باید در مقایسات زوجی تجدید نظر نمود (Saaty, 2016). ضریب ناسازگاری به‌دست آمده ($CR = 0.34$) برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی سرب و روی در ورقه خُنداب نشان می‌دهد که لایه‌های انتخاب شده و کلاس‌بندی شده بر اساس نظر متخصصان علوم زمین، توانسته به‌خوبی و با ضریب ناسازگاری بسیار پایین مدل‌سازی نهایی را انجام دهد و مدل نقشه‌های پتانسیل‌یابی سرب و روی از دقت بالایی برخوردار است. در این روش، لایه‌های اطلاعاتی مختلف با یکدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل نهایی کانه‌زایی سرب و روی در ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خُنداب مطابق شکل ۱۴ تهیه شد.

این روش دارای سه بخش اصلی می‌باشد (Saaty, 2016): ۱) تعیین لایه‌ها برای استفاده در مدل‌سازی، ۲) تعیین وزن لایه‌ها و زیرلایه‌ها با استفاده از روش AHP، ۳) تلفیق نهایی لایه‌ها با استفاده از اوزان محاسبه شده توسط روش AHP. پس از تعیین معیارهای اکتشافی مختلف، که شامل لایه‌های سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی (سرب و روی)، چگالی کانسارهای سرب و روی، چگالی گسل‌ها و دگرسانی سیلیسی و کربناته منطقه می‌باشد، در ابتدا یک ماتریس مقایسه زوجی برای ۵ لایه اصلی نام برده شده تشکیل شد. در این ماتریس، ۵ معیار اصلی بر اساس نظرات متخصصان علوم زمین و با استفاده از جدول شاخص وزن‌دهی (جدول ۵) به‌صورت مقایسه زوجی وزن‌دهی شدند و در نهایت با استفاده از روش AHP، مقدار اوزان مناسب برای هریک از معیارها طبق جدول ۶ محاسبه شد. طبق این روش، بیشترین وزن با مقدار ۰/۵۲ به لایه سنگ‌شناسی اختصاص داده شده است. لایه زمین‌شیمی مربوط به فلزت سرب و روی با اختصاص یافتن وزن ۰/۲۶ به عنوان معیار مهم پس از سنگ‌شناسی انتخاب شد. پس از آن لایه چگالی کانسارهای سرب و روی و چگالی گسل‌ها به ترتیب با ۰/۱۲

جدول ۶ - ماتریس مقایسه زوجی لایه‌های اکتشافی و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

Layers	Lithology	Geochemical	Zn-Pb deposits density	Faults density	Alteration	Weights
Lithology	1	3	5	7	9	0.52
Geochemical	0.333	1	3	5	7	0.26
Zn-Pb deposits density	0.2	0.333	1	3	5	0.12
Faults density	0.143	0.2	0.333	1	3	0.06
Alteration	0.111	0.143	0.2	0.333	1	0.04



شکل ۱۴- نقشه پتانسیل یابی عناصر سرب و روی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در ورقه خنداب.

۶- نتیجه گیری

بی‌هنجاری‌های حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با ضریب ناسازگاری $CR = 0.34$ با کانسارها و نشانه‌های معدنی موجود در منطقه همبستگی فضایی مثبت بالاتری دارند. با وجود اینکه بی‌هنجاری‌های حاصل از روش فازی-گاما نیز همبستگی خوبی با کانسارهای سرب و روی دارند، اما این روش نتوانسته تمام کانسارها و اندیس‌های سرب و روی موجود در منطقه را پیش‌بینی نماید در حالی که بی‌هنجاری‌های حاصل از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با دقت بالاتری توانسته‌اند نواحی بی‌هنجاری سرب و روی را شناسایی کنند. روش فازی-گاما حدود ۴۲۳ کیلومتر مربع از مساحت منطقه مورد مطالعه را به عنوان بی‌هنجاری مشخص کرد ولی بی‌هنجاری‌های به دست آمده از روش AHP حدود ۴۶۱ کیلومتر مربع را به عنوان بی‌هنجاری قطعی معرفی کرد؛ دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که روش‌های مبتنی بر منطق فازی معمولاً کلاس‌های حد واسط را در نظر نمی‌گیرند و تمام کلاس‌های یک لایه اکتشافی را بین ۰ (کم‌ترین کلاس) و ۱ (بیشترین کلاس) ارزش‌گذاری می‌کنند به همین سبب نمی‌توانند کلاس‌های حد واسط را که در این مطالعه این کلاس‌ها ۲ و ۳ می‌باشند در مدل‌سازی دخالت داده و از آنها به عنوان کلاس با ارزش استفاده نماید. در نهایت، نتیجه می‌شود که در این پژوهش روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که بر مبنای وزن‌دهی دانش‌محور به لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی می‌باشد، عملکرد دقیق‌تر و صحیح‌تری را نسبت به روش فازی-گاما دارا بوده و بی‌هنجاری‌های حاصل از آن، همبستگی مکانی بالاتری با رخدادهای کانی‌زایی و کانسارهای سرب و روی موجود در منطقه نشان می‌دهند و از این روش می‌توان برای مطالعات اکتشافی تفصیلی‌تر در نواحی امیدبخش شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

شناسایی و تفکیک بی‌هنجاری‌های حاصل از داده‌های رسوبات آبراه‌های، به علت فرایندهای فرسایشی، اثر رقیق‌شدگی، اثر سنگ‌بستر و پیچیدگی و تنوع فرایندهای زمین‌شناسی یک مسأله چالش‌برانگیز است. به منظور تفکیک مؤثر این بی‌هنجاری‌ها، کلیه ویژگی‌های الگوهای بی‌هنجاری زمین‌شیمیایی، یعنی توزیع آماری، توزیع فضایی، شکل هندسی، خودتشابهی و پیچیدگی الگوهای بی‌هنجاری باید در نظر گرفته شوند. به‌طور کلی، روش شاخص سینگولاریتی (SI) یکی از قوی‌ترین روش‌ها برای شناسایی بی‌هنجاری‌های ضعیف، پنهان و موجود در زمینه پیچیده زمین‌شیمیایی می‌باشد که کلیه موارد یاد شده را در نظر می‌گیرد اما روش‌هایی نظیر مولتی‌فرکتال عیار-تعداد و عیار-مساحت قادر به شناسایی این بی‌هنجاری‌ها نمی‌باشند. در این مطالعه با استفاده از یک روش نوآورانه با به کارگیری مدل شاخص سینگولاریتی (SI)، لایه‌های زمین‌شیمیایی مربوط به عناصر سرب و روی تهیه و از آن در مدل‌سازی نهایی استفاده شد. در این پژوهش، از روش‌های فازی-گاما و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی سرب و روی با میزان رسوبی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ خنداب که در بخش شمالی منطقه فلززایی ملایر-اصفهان واقع شده، استفاده شده است. برای مدل‌سازی توسط روش‌های یاد شده، ۵ معیار اکتشافی اصلی شامل سنگ‌شناسی، زمین‌شیمی، چگالی کانسارها و نشانه‌های سرب و روی، چگالی گسل‌های منطقه و دگرسانی‌های کربناته و سیلیسی استفاده شد. با مقایسه نتایج حاصل از دو روش فازی-گاما و AHP با کانسارها و اندیس‌های سرب و روی در منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که هر دو روش از کارایی مناسبی برخوردار بوده و نتوانسته‌اند که بیشتر رخدادهای کانه‌زایی سرب و روی را به خوبی پیش‌بینی نمایند. با مقایسه دو روش یاد شده، مشخص شد که

کتابنگاری

- جعفری، م. ا.، کنعانیان، ع. و نظریور، ا.، ۱۳۹۹a- مقایسه روش فرکتال عیار- مساحت (C-A) و شاخص سینگولاریتی در جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی عنصر مس در زون فلزایی ملایر- الیگودرز- اصفهان، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۱ (۴۳)، ص ۲۱-۳۴.
- جعفری، م. ا.، کنعانیان، ع. و نظریور، ا.، ۱۳۹۹b- مقایسه دقت دو روش فازی گاما (Fuzzy-GAMMA) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با هدف پتانسیل یابی فلز مس در زون فلزایی ملایر- الیگودرز- اصفهان، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۰ (۳)، ۳۱۴-۳۲۷. doi:10.22055/aag.2020.30222.2011
- جمالیان، م.، ۱۳۸۱- نقش سنگ میزبان کربناته در کانسارهای سرب و روی ناحیه رباط (خمین- اراک)، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ص ۱۹۰.
- رادفر، ج. و کهنسال، ر.، ۱۳۸۲- شرح نقشه زمین شناسی اراک به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، وزارت صنایع و معادن.
- رحیم پور، ب.، ۱۳۷۰- بررسی کانسارهای سرب و روی ناحیه جنوب اراک (عمارت)، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۸۷ ص.
- رستمی پایدار، ق.، ۱۳۹۷- مطالعه دگرسانی، کانه‌زایی و سیالات در گبر در کانسار روی - سرب حوض سفید (ایران مرکزی)، فصلنامه زمین شناسی ایران، سال ۱۲، شماره ۴۷، ص ۱۹-۳۶.
- قربانی، م.، ۱۳۸۱- دیباچه‌ای بر زمین شناسی اقتصادی ایران: انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۴۶۹ ص.
- کریم پور، م. ح. و سعادت، س.، ۱۳۸۱- زمین شناسی اقتصادی کاربردی، نشر مشهد، ۵۳۵ ص.
- کنعانیان، ع.، جعفری، م. ا. و نظریور، ا.، ۱۳۹۷- جداسازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی سرب و روی با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک، مولتی فرکتال عیار- تعداد، عیار- مساحت و شاخص سینگولاریتی در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ اراک، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۸ (۲۹)، ص ۷۴-۶۳. doi:10.22055/aag.2019.26910.1887
- یعقوب پور، ع.، ۱۳۸۱- زمین شناسی اقتصادی، انتشارات دانشگاه تربیت معلم، ۱۱۴ ص.

References

- Agterberg, F.P., 2012- Multifractals and Geostatistics. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 122, p.113- 122. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09513-5>.
- Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics*, v. 229(3-4), p. 211- 238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Asadi, H.H., Sansoleimani, A., Fatehi, M. and Carranza, E.J.M., 2016- An AHP-TOPSIS predictive model for district-scale mapping of porphyry Cu-Au potential: a case study from Salafchegan area (central Iran). *Natural Resources Research*, v. 25(4), p. 417- 429. <https://doi.org/10.1007/s11053-016-9290-7>.
- Behera, S., Panigrahi, M.K. and Pradhan, A., 2019- Identification of geochemical anomaly and gold potential mapping in the Sonakhan Greenstone belt, Central India: An integrated concentration-area fractal and fuzzy AHP approach. *Applied Geochemistry*, v. 107, p. 45- 57. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.05.015>.
- Cheng, Q., 2007- Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, v. 32(1-2), p. 314- 324. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.10.002>.
- Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994- The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 51, p. 109- 130. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2).
- Ehya, F., Lotfi, M., and Rasa, I. 2010- Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 37(2), p. 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.007>.
- El Janati, M., 2019- Application of remotely sensed ASTER data in detecting alteration hosting Cu, Ag and Au bearing mineralized zones in Taghdout area, Central Anti-Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, v. 151, p. 95- 106. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.12.002>.
- Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018- A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 11(11), p. 275. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3624-1>.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Daviran, M., 2019- Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Acta Geochimica*, v. 38(1), p.131- 144. <https://doi.org/10.1007/s11631-018-0289-0>.
- Leach, D.L., Bradley, D.C., Huston, D., Pisarevsky, S.A., Taylor, R.D. and Gardoll, S.J., 2010- Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, v. 105(3), p. 593- 625. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.593>.
- Liu, Y., Xia, Q., and Carranza, E.J.M., 2019- Integrating sequential indicator simulation and singularity analysis to analyze uncertainty of geochemical anomaly for exploration targeting of tungsten polymetallic mineralization, Nanling belt, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 197, p.143- 158. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.012>.

- Lovering, T. G., 1972- Jasperoid in the United States; its characteristics, origin, and economic significance, US Govt. Print, 710 p.<https://doi.org/10.3133/pp710>.
- Najafi, A., Karimpour, M.H. and Ghaderi, M., 2014- Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, v. 33, p. 142- 154.<https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.003>.
- Nazarpour, A., Sadeghi, B., and Sadeghi, M., 2015- Application of fractal models to characterization and evaluation of vertical distribution of geochemical data in Zarshuran gold deposit, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 148, p. 60-70.<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.08.007>.
- Pazand, K., and Hezarkhani, A., 2015- Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahroud area (NW, Iran). *Earth Science Informatics*, v. 8(1), p. 207- 220.<https://doi.org/10.1007/s12145-014-0153-7>.
- Rajabi, A., Rastad, E., and Canet, C., 2012- Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration. *International Geology Review*, v. 54(14), p.1649- 1672.<https://doi.org/10.1080/00206814.2012.659110>.
- Rouskov, K., Popov, K., Stoykov, S., and Yamaguchi, Y., 2005- Some applications of the remote sensing in geology by using of ASTER images. In Scientific Conf. "SPACE, ECOLOGY, SAFETY" with Int. Participation, p. 167- 173.
- Saaty, T. L. 1990- Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS publications.
- Saaty, T.L., 2016- The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. In *Multiple criteria decision analysis*, Springer, New York, NY, p. 363- 419.<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4-10>.
- Sabins, F.F., 1999- Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, v. 14(3-4), p. 157- 183.[https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4).
- Sadeghi, B., and Khalajmasoumi, M., 2015- A futuristic review for evaluation of geothermal potentials using fuzzy logic and binary index overlay in GIS environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 818- 831.<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.079>.
- Shapiro, S. S., and Wilk, M. B. 1965- An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v. 52(3/4), p. 591-611.<https://doi.org/10.2307/2333709>.
- Stoecklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG bulletin*, v. 52(7), p.1229- 1258.<https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- Sun, X., Gong, Q., Wang, Q., Yang, L., Wang, C., and Wang, Z., 2010- Application of local singularity model to delineate geochemical anomalies in Xiong'ershan gold and molybdenum ore district, Western Henan province, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 107(1), p. 21- 29.<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.06.001>.
- Tan, R.R., Aviso, K.B., Huelgas, A.P., and Pomentilla, M.A.B., 2014- Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 92(5), p. 467- 475.<https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.11.005>.
- Wang, J., and Zuo, R., 2018- Identification of geochemical anomalies through combined sequential Gaussian simulation and grid-based local singularity analysis. *Computers & Geosciences*, v. 118, p. 52- 64.<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.05.010>.
- Wang, J., and Zuo, R., 2019- Recognizing geochemical anomalies via stochastic simulation-based local singularity analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 198, p. 29- 40.<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.12.012>.
- Xiao, F., Chen, J., Hou, W., Wang, Z., Zhou, Y., and Erten, O., 2018- A spatially weighted singularity mapping method applied to identify epithermal Ag and Pb-Zn polymetallic mineralization associated geochemical anomaly in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 189, p.122- 137.<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.017>.
- Zadeh, L.A., 1965- Fuzzy sets. *Information and control*, v. 8(3), p. 338- 353.[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- Zhang, N., Zhou, K., and Du, X., 2017- Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *Journal of African Earth Sciences*, v. 128, p. 84- 96.<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.011>.
- Zuo, R., Wang, J., Chen, G., and Yang, M., 2015- Identification of weak anomalies: A multifractal perspective. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 148, p.12- 24.<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.05.005>.

Zuo, R., Xia, Q., and 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*, v. 33, p.165- 172.<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.02.009>.

Original Research Paper

Application of Singularity Index (SI), Fuzzy-Gamma and AHP methods for Pb-Zn prospecting in the Khondab sheet, Malayer-Esfahan metallogenic Zone, Iran

Mohammad Amin Jafari¹, Ahad Nazarpour² and Ghodratollah Rostami Paydar^{2*}

¹ M.Sc. Graduate, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2020 October 06

Accepted: 2021 April 12

Available online: 2021 December 22

Keywords:

Pb-Zn potential detection

Singularity Index (SI)

Fuzzy-Gamma

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Khondab sheet

ABSTRACT

In this research, using fuzzy logic (gamma) methods, analytic hierarchical analysis (AHP), and based on the weighting of exploratory layers by the opinion of geoscientists, modeling of mineral potential for Pb-Zn metals in the Khondab sheet. The geochemical layer related to Pb-Zn metals has been prepared using the singularity index (SI) method, which has high accuracy in detecting weak and hidden anomalies. All exploratory layers and substrates including lithology, geochemistry, the density of lead and zinc deposits and mineral signs, the density of faults and silica and carbonate alterations were weighted using the fuzzy logic (gamma) method and ranged from 0 to 1 and fuzzy layers with gamma value (γ) of 0.95 were combined with each other and prepared the potential maps for Pb-Zn metals in the study area. Then, using the AHP method and forming a suitable matrix for the exploratory layers, the layers were weighed and a potential map of the desired metals was obtained. The results showed that the AHP method identified more anomalies compared to the fuzzy logic (gamma) method and the anomalies obtained from this method show more compliance with the Pb-Zn deposits in these regions.

* Corresponding author: Ghodratollah Rostami Paydar; E-mail: rostamigsi2006@gmail.com

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/GSJ.2021.250481.1848

 dor: 20.1001.1.10237429.1400.31.4.5.4

