

شناسایی مناطق مستعد مس - طلای پورفیری در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی با استفاده از روش‌های AHP و FAHP

زهرا خواجه‌میری^۱، محمدرضا شایسته‌فر^۲ و حسام‌الدین معین‌زاده^۳

^۱دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید با هنر کرمان، کرمان، ایران
^۲دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید با هنر کرمان، کرمان، ایران

^۳دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید با هنر کرمان، کرمان، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

چکیده

به دلیل پرهزینه و زمان‌بر بودن عملیات صحرایی و نیز احتمال خطر بالای آن در اکتشاف مواد معدنی، شناسایی مناطق مستعد کانه‌زایی مواد معدنی اهمیت به سزایی دارد. بنابراین تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی برای تلفیق همه فاکتورهای اکتشافی امری ضروری است. روش‌های مختلفی به منظور پتانسیل‌یابی مواد معدنی تاکنون گسترش یافته‌اند که یکی از مؤثرترین آنها با توجه به طبیعت پدیده‌های زمین‌شناسی و معدنی، روش سلسله مراتبی و سلسله مراتبی فازی است. در این پژوهش برای تهیه نقشه مناطق امیدبخش مس - طلای پورفیری در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی از روش‌های تصمیم‌گیری فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده شده است. لایه‌های شاهد در محدوده مورد مطالعه همچون لایه‌های زمین‌شناسی (سنگ منشأ گرما و سنگ میزبان)، دگرسانی، زمین‌ساخت و لایه ژئوشیمیایی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) بسته به نوع هدف (مس - طلا پورفیری) وزن‌دهی و سپس با یکدیگر تلفیق شدند. در نقشه تلفیق پایانی حاصل از این دو روش بخش‌های دارای بی‌هنجاری با استفاده از روش فرکتال تفکیک شدند. مقایسه نقشه پایانی مناطق امیدبخش مس - طلای پورفیری حاصل از این دو روش نشان می‌دهد که نتایج حاصل از روش تحلیل سلسله مراتب فازی به مراتب دقیق‌تر از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی بوده است. بی‌هنجاری‌های حاصل از این روش اعتبارسنجی شد؛ بی‌هنجاری شماره ۱ حاصل از روش تحلیل سلسله مراتب فازی به واسطه پژوهش‌های پیشین انجام شده، تأیید شد. نتایج تجزیه نمونه‌های سنگی برداشت شده از محل بی‌هنجاری شماره ۲ نشان می‌دهد که نمونه‌ها دارای غنی‌شدگی مس هستند و همچنین عناصر طلا و آرسنیک نیز غنی‌شدگی دارند. این نتایج به همراه کارهای پیشین انجام شده تأییدکننده نقشه پتانسیل‌یابی معدنی حاصل از روش فرایند تحلیل سلسله مراتب فازی است.

کلیدواژه‌ها: فرایند تحلیل سلسله مراتبی، فرایند تحلیل سلسله مراتب فازی، جنوب سه‌چنگی، مس - طلای پورفیری.

E-mail: shayeste@uk.ac.ir

*نویسنده مسئول: محمدرضا شایسته‌فر

۱- پیش‌نوشتار

می‌دهند. این وزن‌ها در ارتباط با مدل اکتشافی مخصوصی هستند که از آن استفاده شده است. از جمله روش‌های مدل‌سازی دانش‌محور، روش‌های منطبق بولین (Bonham-Carter, 1994)، همپوشانی شاخص، منطق فازی (Karimi et al., 2008)، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (An et al., 1991) هستند. در این پژوهش، وزن‌دهی لایه‌های شاهد شامل لایه‌های زمین‌شناسی (سنگ منشأ و سنگ میزبان)، زمین‌ساخت، ژئوشیمیایی و دگرسانی بر پایه دو روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی یا (AHP; Analytical hierarchy process) و تحلیل سلسله مراتب فازی (FAHP; Fuzzy analytical hierarchy process) خواهد بود و نتیجه پایانی این دو روش با یکدیگر مقایسه خواهد شد. در پایان برای اعتبارسنجی، از محل کانسارهای موجود در محدوده مطالعاتی با نقشه‌های پتانسیل‌یابی حاصل از این مورد بازدید صحرایی انجام شد.

۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شامل برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی است. این برکه از دید موقعیت جغرافیایی در خاور ایران، در بخش باختری استان خراسان جنوبی و در ۱۰۰ کیلومتری شهرستان بیرجند و میان طول‌های جغرافیایی ۳۲°۳۰'۰۰" تا ۵۸°۰۰'۰۰" و عرض‌های جغرافیایی ۳۲°۳۰'۰۰" تا ۳۲°۳۰'۰۰" قرار گرفته است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی این برکه در استان خراسان جنوبی نشان داده شده است.

۳- زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

در تقسیمات ساختاری ایران برکه مورد مطالعه در ایالت ساختاری لوت جای دارد.

اکتشاف مواد معدنی یک فرایند پیچیده و مشکل است که هدف اصلی آن اکتشاف نهشته‌های معدنی جدید در یک منطقه مشخص است. بدین منظور از نقشه مناطق امیدبخش به عنوان ابزاری مفید برای شناسایی مناطق مستعد نهشته‌های معدنی استفاده می‌شود (Carranza, 2008). برای تهیه نقشه مناطق معدنی مستعد (MPM; Mineral prospectively mapping) می‌توان از سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کرد و در طی این فرایند می‌توان داده‌های اکتشافی مختلف مانند تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات زمین‌شناسی مرتبط با توده‌های معدنی، داده‌های ژئوشیمیایی، داده‌های ژئوفیزیکی و ... را در یک محیط GIS گردآوری و مطالعه کرد و از آنها یک نتیجه واحد به دست آورد (شایسته‌فر و رسا، ۱۳۸۴؛ Pazand et al., 2012). به‌طور کلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی هر ناحیه در GIS شامل سه مرحله است (Harris et al., 2001): الف) ساختن پایگاه داده‌های فضایی؛ ب) پردازش داده‌ها؛ ج) تلفیق داده‌ها با یکدیگر. روش‌های زیادی برای تهیه نقشه پتانسیل با استفاده از GIS وجود دارد که به‌طور چیره شامل دو روش می‌شود (Whateley and Evans, 2006): ۱) روش‌های مدل‌سازی متکی بر داده؛ ۲) روش‌های مدل‌سازی متکی بر دانش. در روش‌های مدل‌سازی داده‌محور، ارتباط‌های فضایی میان داده‌های ورودی و موقعیت اندیس‌های معدنی، اهمیت و وزن هر کدام از نقشه‌های شاهد را تعیین می‌کنند. از جمله روش‌های مدل‌سازی داده‌محور، روش‌های رگرسیون منطقی (Agterberg and Bonham-Carter, 1999; Lu et al., 2009; Bonham-Carter et al., 1989)، وزن‌های نشانگر (Bonham-Carter, 1994; Porwal et al., 2003) و شبکه‌های عصبی (Porwal, 2006) هستند. روش‌های مدل‌سازی متکی بر دانش وابسته به وزن‌های ورودی هستند که توسط کارشناس تعیین می‌شوند و اهمیت هر نقشه شاهد را نشان

آمد. سپس با استفاده از روش بهنجار کردن همه مقادیر هم‌وزن شدند. در این پروژه وزن‌های به دست آمده برای هر یک از لایه‌ها میان ۱ تا ۱۰ بهنجار شد؛ به‌طوری که بهترین وزن در رده ۱۰ و کمترین وزن در رده ۱ جای گرفت و در انتها با جمع همه معیارها نواحی مستعد کانه‌زایی مس- طلای پورفیری مشخص شد.

۴-۲. روش فرکتال

جدایش بی‌هنجاری از زمینه یکی از مهم‌ترین و کلیدی‌ترین مراحل در اکتشافات ژئوشیمیایی است. بنابراین در ژئوشیمی اکتشافی پیش از انجام هر عملیات و پردازش روی داده‌ها، باید از روش‌های آماری برای شناخت جوامع متغیرها و درک نوع تغییرپذیری آنها استفاده کرد و با استفاده از آمار دید اولیه نسبت به داده‌ها گرفت. روش‌های مختلفی برای جداسازی و تشخیص مناطق بی‌هنجار از زمینه وجود دارد که از روش‌های آماری ساده (بر پایه متغیرهای آماری تابع توزیع (غیر ساختاری)) تا روش‌های پیچیده (بر پایه ساختار فضایی داده‌ها (ساختاری)) تغییر می‌کنند (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰). یکی از روش‌های ساختاری مهم در برآورد حد آستانه‌ای و جداسازی حد زمینه از بی‌هنجاری، روش فرکتال است (ظریفی و همکاران، ۱۳۸۶). در این پژوهش از روش فرکتالی عیار- مساحت در تفکیک بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است. برای این کار ابتدا نقشه کنتوری برای هر یک از عناصر منطقه اکتشافی با استفاده از نرم‌افزار GIS رسم شد تا بتوان مقادیر عیار و مساحت هر خط تراز را به دست آورد. برای داده‌های ژئوشیمیایی می‌توان از روش‌های درون‌یابی معمول مانند کریجینگ، عکس مجذور فاصله و یا روش‌های دیگر استفاده و نقشه کنتوری رسم کرد. پس از رسم نقشه کنتوری داده‌ها، برای هر سلول عیاری مشخص شده است و هر سلول مساحت مشخصی دارد. مقادیر عیارها به ترتیب افزایشی مرتب شده است و برای عیارهای تکراری تنها یکی از آنها به همراه مجموع مساحت سلول‌هایی که آن عیار را دارند؛ در جدول باقی است. سپس برای هر عیار معین مساحت‌ها به‌صورت تجمعی به دست آمد. پس از انجام این محاسبات نمودار تمام‌لگاریتم عیار- مساحت برای عناصر رسم شد.

۴-۳. ایجاد لایه‌های اکتشافی

لایه‌های اکتشافی از نقشه زمین‌شناسی، داده‌های ماهواره‌ای، داده‌های ژئوشیمی و مطالعات صحرایی تفکیک و استخراج شده است. این داده‌ها بر پایه ضرایب و ارزش‌های مناسب به روش AHP وزن‌دهی و به‌صورت لایه‌هایی برای تلفیق پایانی مدل ارائه شدند (جدول ۲). هر لایه اکتشافی پس از بررسی بر پایه اولویت به ۱ تا ۱۰ رده بهنجار شد. این لایه‌ها پس از پردازش‌های اولیه با استفاده از روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی تلفیق شدند و مناطق مستعد برای ادامه عملیات اکتشافی معرفی شد.

– **لایه ژئوشیمی:** در برگه جنوب سه‌چنگی حدود ۲۵۴ نمونه ژئوشیمیایی (شکل ۳) بررسی و برای ۱۸ عنصر شامل عناصر Au, W, Mo, Zn, Pb, Ag, Cr, Ni, Cu, As, Sb, Co, Ba, Sr, Hg, Mn, Ti, Fe به روش ICP تجزیه شد و سپس نقاط پرت حذف و داده‌ها به روش لگاریتم گیری بهنجار شدند. دقت تجزیه‌ها توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور مورد تأیید قرار گرفته است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۲). در این پژوهش از روش فرکتال عیار- مساحت برای جداسازی بی‌هنجاری از زمینه استفاده شد. در میان داده‌های ژئوشیمی مرتبط با این منطقه عناصر مس، طلا و مولیبدن مورد ارزیابی قرار گرفتند که عناصر اصلی مرتبط با اکتشاف مس- طلای پورفیری هستند. نمودارهای عیار- مساحت مرتبط با این عناصر در شکل ۴ مشخص شده است. سپس بر پایه شکست در نمودار عیار- مساحت هر عنصر جامعه‌های آماری تفکیک شدند. این جامعه‌های آماری شامل حد آستانه زمینه، بی‌هنجاری احتمالی و بی‌هنجاری قطعی خواهند بود (جدول ۱) که نواحی بی‌هنجاری احتمالی و قطعی عناصر مس، طلا و مولیبدن رسم شدند (شکل ۵) و بر پایه جدول‌های ۲ و ۳ پرسشنامه تهیه و ماتریس مقایسه وزن‌دهی ایجاد شد و سپس میان ۱ تا ۱۰ بهنجار شدند (شکل ۶- ب).

– **لایه زمین‌شناسی:** برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در این برگه واحدهای سنگی

بلوک لوت دارای طول ۹۰۰ کیلومتر شمالی- جنوبی و مرز شمالی آن گسل درونه و مرز جنوبی آن فرورفتگی جازموریان است. در خاور توسط گسل نهپندان از پهنه فیلیشی جدا شده و مرز باختری آن با ایران مرکزی گسل نایبندان و کوه‌های شتری است (Aghanabati, 2004). یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد بلوک لوت، فعالیت‌های ماگمایی آن بوده که از ژوراسیک آغاز شده و در ترشیاری به اوج خود رسیده است؛ به‌طوری که سنگ‌های آتشفشانی- نفوذی ترشیاری، به‌ویژه ائوسن، با سبترای حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از بلوک لوت را می‌پوشانند (Berberian et al., 1999; Camp and Griffis, 1982). انواع گوناگون کانی‌سازی در این بلوک به فرورانش زیر بلوک لوت نسبت داده شده است که سبب حجم زیادی فعالیت آتشفشانی می‌شود. این نهشته‌های معدنی شامل نهشته‌های IOCG قلعه‌زری (Karimpour et al., 2005; Richards et al., 2012)، مس- طلای پورفیری ماهرآباد (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2014)، نهشته‌های معدنی با سولفید زیاد شیخ‌آباد و نهشته‌های با سولفید پایین همیچ (Karimpour et al., 2007)، مسپورفیری ده‌سلم (Arjmandzadeh et al., 2011)، مس پورفیری کوه‌شاه (Abdi et al., 2010)، طلای اپی‌ترمال خونیک (Samiee et al., 2011; Karimpour et al., 2007)، و طلای هیرد (Karimpour et al., 2007) هستند. منطقه جنوب سه‌چنگی واحدهای سنگی مختلف از پرمین تا کواترنری را در بر می‌گیرد. کهن‌ترین واحدی که در منطقه رخنمون دارد واحد با ترکیب آهک و دولومیت (معادل جمال) به سن پرمین است که در بخش خاور و شمال خاور برگه دیده می‌شود. سنگ‌های اسیدی تا حدواسط همچون گرانودیوریت و میکرودیوریت بیشتر در بخش‌های خاوری و شمال تا شمال باختر منطقه مورد مطالعه پراکنده شده‌اند و شامل گرانودیوریت‌های منطقه سرخ‌کوه مربوط به کرتاسه (فاضل و همکاران، ۱۳۸۸) و گرانودیوریت‌های جنوب باختر سرخ‌کوه مربوط به پس از ائوسن (حسینخانی و همکاران، ۱۳۹۴) است. سطح پهنای از منطقه توسط آتشفشانی‌ها و نیمه‌آتشفشانی‌های اسیدی- حدواسط ائوسن- پالئوسن شامل داسیت، ریوداسیت و آندزیت پوشیده شده و بخش‌های شمال خاور و خاوری منطقه را سنگ‌های آهک، مارن و سنگ‌های دگرگونی پوشانده است (شکل ۲).

۴-مواد و روش‌ها

۴-۱. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از معروف‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند شاخصه است که توسط Saaty (1977) ابداع شد. این روش می‌تواند هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و شاخص تصمیم‌گیری روبروست، مفید باشد. شاخص‌ها می‌توانند کمی و یا کیفی باشند. اساس این روش بر مقایسات زوجی نهفته است. فرایند رتبه‌بندی و اولویت‌بندی گزینه‌ها در روش فرایند تحلیل سلسله مراتب دربر گیرنده مرحله‌ای به این شرح است (Carranza, 2009): الف) ساخت سلسله مراتبی: ساخت سلسله مراتبی شامل سه سطح است: سطح هدف (تهیه نقشه پتانسیل یابی مناطق امیدبخش برای اکتشاف مس- طلای پورفیری)، سطح معیارها (معیار زمین‌شناسی، معیار ژئوشیمی، معیار دگرسانی‌ها و معیار زمین‌ساخت)، سطح زیرمعیارها (سنگ منشأ، گزینه سنگ میزبان و دگرسانی (معیار زمین‌شناسی)، ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای (معیار ژئوشیمی) و گسل (معیار زمین‌ساخت)) است؛ ب) مقایسه‌های زوجی: در این مرحله مقایسه‌هایی میان معیارها و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری انجام می‌گیرد و امتیاز آنها نسبت به یکدیگر تعیین می‌شود (Saaty, 1977; Carranza, 2009).

– **مراحل اجرای مدل سلسله مراتبی:** در این روش به واحدهای هر لایه ارزش‌های مناسب بر پایه مطالعات و نتایج کارشناسی داده و سپس درخت سلسله مراتبی برای لایه‌های اکتشافی رسم شده است که سه سطح اصلی هدف، معیارها و زیرمعیارها را دارد (قدسی‌پور، ۱۳۸۸). پس از این مرحله معیارها و زیرمعیارها در یک ماتریس قرار گرفتند؛ دو به دو با هم مقایسه شدند و اهمیت (وزن) معیارها و زیرمعیارها به دست

می آید:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}, i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

که در آن $\otimes$ به معنی ضرب گسترده دو عدد فازی و هر یک از اعداد فازی به دست آمده، نشان دهنده وزن نسبی یک معیار (یا گزینه) نسبت به یک معیار دیگر است.

— **گام ۲:** چنانچه $\bar{M}_1$ و $\bar{M}_2$ دو عدد فازی مثلثی باشند؛ درجه بزرگی $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ با استفاده از رابطه ۳ تعریف می شود:

$$u(d) = \begin{cases} 1 & m_2 \geq m_1 \\ \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - m_1) - (m_2 - l_2)} & \text{otherwise} \\ 0 & l_1 \leq u_2 \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه بالا $\bar{M}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ ، $u(d) = V(\bar{M}_2 \geq \bar{M}_1)$ و $\bar{M}_1 = (l_1, m_1, u_1)$ است و همان طور که در شکل ۷ دیده می شود؛ d مختصات بالاترین نقطه تقاطع بین $u_{\bar{M}_1}$ و $u_{\bar{M}_2}$ است.

— **گام ۳:** درجه امکان یک عدد فازی محذب از درجه امکان K عدد فازی محذب $\bar{M}_i$ ($i = 1, 2, \dots, k$) بیشتر است. این مفهوم به صورت زیر قابل تعریف است:

$$V(M \geq \bar{M}_1, \bar{M}_2, \dots, \bar{M}_k) = V[(M \geq \bar{M}_1), (M \geq \bar{M}_2), \dots, (M \geq \bar{M}_k)] = \min V(M \geq \bar{M}_i), i=1, 2, \dots, k \quad (4)$$

چنانچه رابطه زیر مفروض شود:

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (5)$$

در این صورت برای $k=1, 2, \dots, k$ بردار وزن با استفاده از رابطه ۶ به دست می آید:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (6)$$

گفتمی است که سازگاری ماتریس های مقایس زوجی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی یکی از موضوعاتی است که باید همواره در فرایند تصمیم گیری در نظر گرفته شود. سازگاری قضاوت ها در فرایند یاد شده با محاسبه نسبت سازگاری (CR) ارزیابی می شود:

$$CR = CI / RI \quad (7)$$

در رابطه بالا، CI شاخص سازگاری و RI شاخص نسبت ماتریس تصادفی است که با استفاده از اطلاعات ارائه شده در جدول ۷ به دست می آید. در این مقاله برای بررسی سازگاری قضاوت ها، ابتدا از روش غیر فازی کردن مرکز ناحیه و سپس از روابط مورد استفاده در تعیین میزان سازگاری در روش سلسله مراتبی سنتی استفاده شده است. چنانچه نسبت سازگاری به دست آمده (CR) کمتر از ۰/۱ باشد؛ مقایسات زوجی و قضاوت های انجام گرفته مورد قبول است.

— **مراحل اجرای مدل سلسله مراتبی فازی:** در گام اول به وسیله رابطه ۲ و همچنین با استفاده از جدول ۴ اعداد به دست آمده مقایسه ای (جدول ۵) به مقیاس مثلثی فازی تبدیل شد (جدول ۶) و پس از اعمال روابط ۳ تا ۶ و همچنین رابطه ۷ به منظور تأیید سازگاری مقایسه های زوجی، وزن به دست آمد و وزن پایانی عنصر بررسی شد (Batuhan, 2013). این اوزان فازی است؛ بنابراین برای محاسبه وزن قطعی، وزن هر معیار با استفاده از تحلیل توسعه ای چانگ و به کمک نرم افزار Excel به دست آمد (جدول ۷). لازم به توضیح است که در همه مراحل انتخاب معیارها و زیرمعیارها از نظرات کارشناسان و یافته های دیگر پژوهشگران استفاده شد. سپس با استفاده از تابع Liner فازی (Porwal et al., 2003) ابتدا لایه ها میان ۰/۱ تا ۱ ارزش گذاری (شکل ۸) و سپس هر لایه در وزن به دست آمده از راه سلسله مراتبی فازی ضرب شد. در مرحله آخر با استفاده از تابع گامای فازی و با گامای ۰/۹۵ تلفیق صورت گرفت (شکل ۸).

نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰ جنوب سه چنگی به دو بخش اصلی تقسیم شدند: (۱) سنگ هایی که می توانند میزبان کانه زایی باشند؛ شامل سنگ های آتشفشانی اسیدی تا حد واسطه ترشیری، سنگ های دگرگونی، دیاباز و سنگ های رسوبی با سن کرتاسه؛ (۲) توده های نفوذی (منشأ گرما) در بر گه ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه چنگی شامل گرانودیوریت (گرانیت سرخ کوه) با سن ژوراسیک (نشانگر کهن ترین تکاپوی ماگمایی در لوت است) که در آهک های پرمین نفوذ کرده است. توده کوآرتز میکرودیوریتی در جنوب سرخ کوه و در شمال بر گه جنوب سه چنگی به درون سنگ های آتشفشانی تزریق و سبب دگرسانی در آنها شده است. در جدول شماره ۳ وزن هر کدام از واحدهای سنگی بر پایه اهمیت در نوع کانی سازی مس-طلائی پورفیری مشخص شده است. بر پایه این وزن ها نقشه فازی سنگ منشأ گرما و سنگ میزبان در محیط GIS تهیه شد (شکل ۶-الف).

— **لایه دگرسانی:** برای تهیه این لایه در بر گه زمین شناسی جنوب سه چنگی، از تصاویر سنجنده استر برای آشکارسازی دگرسانی های آرژلیک، پروپلیتیک و فلیک و از تصاویر لندست ۷ برای آشکارسازی دگرسانی اکسید آهن استفاده شد. برای آشکارسازی دگرسانی های منطقه از روش نسبت های باندی استفاده شده است. از نسبت باندی ۷/۵ سنجنده استر به منظور آشکارسازی دگرسانی های آرژلیک (کائولینیت)، از نسبت ۳/۱ تصویر لندست ۷ به منظور آشکارسازی اکسید آهن (هماتیت، لیمونیت و گوتیت)، از نسبت باندی ۸/(۹+۷) سنجنده استر به منظور آشکارسازی دگرسانی پروپلیتیک (کلریت و اپیدوت) و از نسبت باندی ۷/۶ سنجنده استر به منظور آشکارسازی دگرسانی فلیک استفاده (Beiranvand Pour and Hashemi, 2012) (شکل ۶-ج) و با توجه به اهمیت هر نوع دگرسانی در کانه زایی مورد نظر به آنها وزن داده شد (جدول ۳).

— **لایه زمین ساخت:** گسل ها نقش بنیادین در کانه زایی در منطقه دارند و محلی برای عبور محلول ها و سیال های گرمایی برای ته نشین شدن کانی ها و مواد معدنی به ویژه در کانی سازی نوع اپی ترمال و پورفیری هستند. برخی از گسل های یافت شده در نقشه جنوب سه چنگی از نوع امتداد لغز با مؤلفه شبیه هستند؛ که جابه جایی امتدادی آنها بیشتر از نوع عمودی است. برداشت نقشه گسل ها از نقشه زمین شناسی ۱۰۰,۰۰۰ جنوب سه چنگی صورت گرفت. سپس به فواصل ۱۰۰ متری تا شعاع ۷۰۰ متری بافر گذاری و سپس ارزش گذاری انجام شد (شکل ۶-د).

۴-۴. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی

فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی نخستین بار توسط دو پژوهشگر هلندی به نام لاروهوف و پدريک پیشنهاد شد (Laarhoven and Pedrycz, 1983). این روش با جایگزینی اعداد فازی مثلثی در ماتریس مقایسه های زوجی و بر پایه کمترین مجزورات لگاریتمی بنا نهاده شده است. پیچیدگی مراحل این روش سبب شده است این روش چندان مورد استفاده قرار نگیرد. پس از آن روش های بسیاری برای فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی پیشنهاد شد. تحلیل توسعه ای یکی از ساده ترین و متداول ترین روش های تحلیل چندمعیاره فازی است که مبتنی بر استفاده از اعداد فازی مثلثی و مقایسه زوجی بوده و توسط Chang (1996) توسعه یافته است. در این روش پس از تشکیل سلسله مراتب تصمیم گیری، با توجه به میزان اهمیت هر معیار یا گزینه یک عدد فازی به آن اختصاص می یابد و ماتریس های مقایسه زوجی برای هر سطح از سلسله مراتب ایجاد می شود (Ayag and Ozdemir, 2006). عدد فازی مثلثی نوع خاصی از اعداد فازی است که با استفاده از سه تایی مرتب (l, m, u) و رابطه ۱ تعریف می شود. در هر عدد فازی مثلثی l حد پایینی، u حد بالایی و m نیز مقدار میانه است (Zadeh, 1965).

$$u_{\bar{M}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & 1 \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

مراحل مختلف روش تحلیل توسعه ای چانگ (۶ و ۷) به صورت زیر است:

— **گام ۱:** مقدار ترکیبی فازی ($\bar{S}_i$) نسبت به معیار $\bar{M}$ با استفاده از رابطه ۲ به دست

حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای شامل دگرسانی‌های آرژلیک، اکسید آهن و دگرسانی‌های پروپلیتیک بازدید شد. نتایج بازدید در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است که تأیید کننده عملیات دورسنجی در محدوده مورد بررسی هستند.

۶-۲. بازدیدهای صحرایی از محدوده‌های بی‌هنجاری

در روش AHP فازای و روش AHP نقشه شکل ۹ دو محدوده دارای بی‌هنجاری با قطعیت بالا مشخص شده است؛ که از این دو محدوده، بی‌هنجاری شماره ۱ توسط حسینخانی و همکاران (۱۳۹۴) بررسی شده و کانی‌سازی احتمالی مس پورفیری در این محدوده معرفی شده است. بی‌هنجاری ۲ مورد بازدید صحرایی قرار گرفت؛ در این محدوده سنگ‌های آندزیتی، میزبان رگه‌های سیلیسی و رگه‌های سیلیسی دارای کانی‌سازی مس از نوع مالاکیت (در نمونه دستی شکل ۱۳)، پیریت و کالکوپیریت (در مطالعه مقاطع صیقلی شکل ۱۴ کانی‌های فلزی) هستند. این رگه‌های سیلیسی در برخی از بخش‌ها آغشتگی اکسیدهای آهن نیز دارند. از رگه‌های سیلیس نمونه سنگی برداشت شد که در نتایج تجزیه بیشتر نمونه‌ها عناصر مس، طلا و آرسنیک غنی‌شدگی نشان داده‌اند.

بررسی‌هایی صحرایی و بررسی پژوهش‌های انجام شده در محدوده‌های بی‌هنجار بیانگر درستی هر دو روش تحلیل سلسله مراتبی و فرایند تحلیل سلسله مراتب فازای در آشکارسازی نقاط مستعد کانه‌زایی است. در روش FAHP تقریباً ۰/۶۲ کیلومتر مربع معادل ۰/۲۴ درصد از مساحت کل برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ و در روش AHP ۲/۴۲ کیلومتر مربع معادل ۰/۹۴ درصد از مساحت کل به عنوان مناطق بی‌هنجار شناسایی شد؛ که بیانگر افزایش دقت روش تحلیل سلسله مراتب فازای نسبت به تحلیل سلسله مراتبی است.

۵- تهیه نقشه تلفیق پایانی به روش سلسله مراتبی (AHP) و سلسله مراتبی فازای (FAHP)

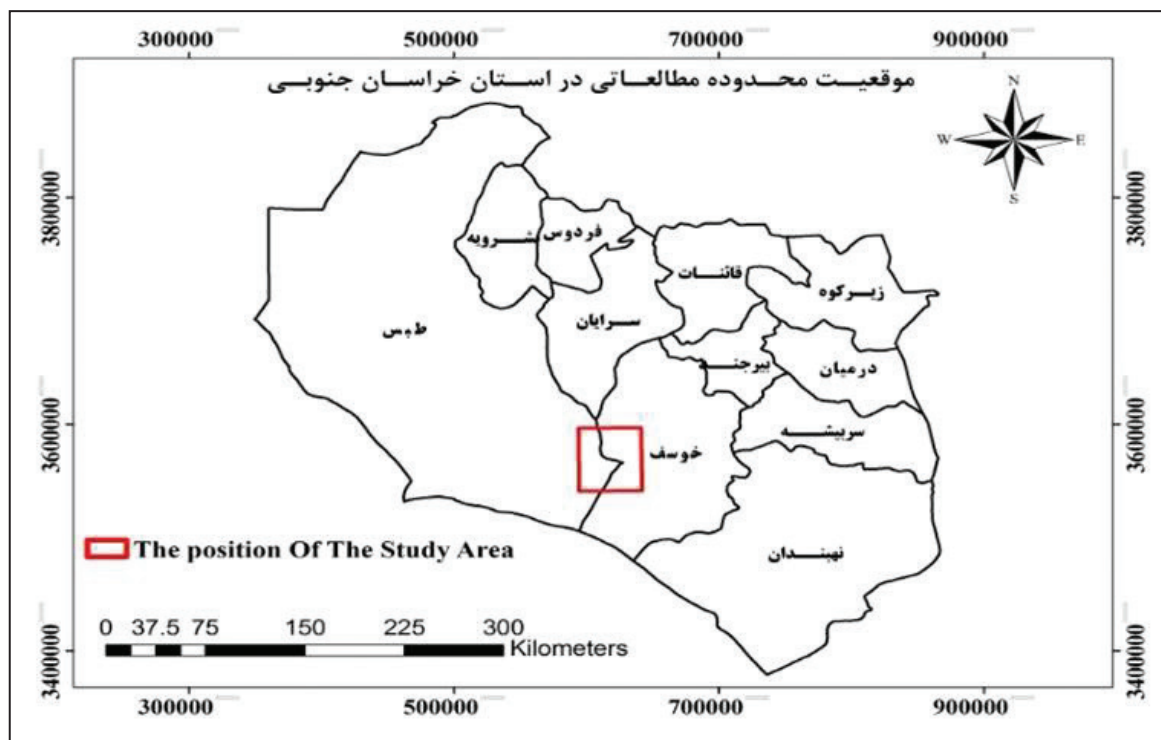
وزن‌های حاصل برای لایه‌های شاهد که به روش FAHP و AHP در جدول‌های ۳ و ۷ مشخص شدند؛ در لایه‌های شاهد تأثیر داده و سپس تلفیق شدند که نتایج آن در شکل‌های ۹ الف و ب و ۱۰ الف و ب نشان داده شده است. نتایج حاصل بیانگر افزایش دقت در نمایش نقاط مستعد کانه‌زایی در روش سلسله مراتبی فازای نسبت به روش سلسله مراتبی است که با توجه به منطقه، قابل قبول‌تر به نظر می‌رسد. افزون بر این، در جدول ۸ متغیرهای آماری برای نقشه‌های حاصل از دو روش مشخص شده است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

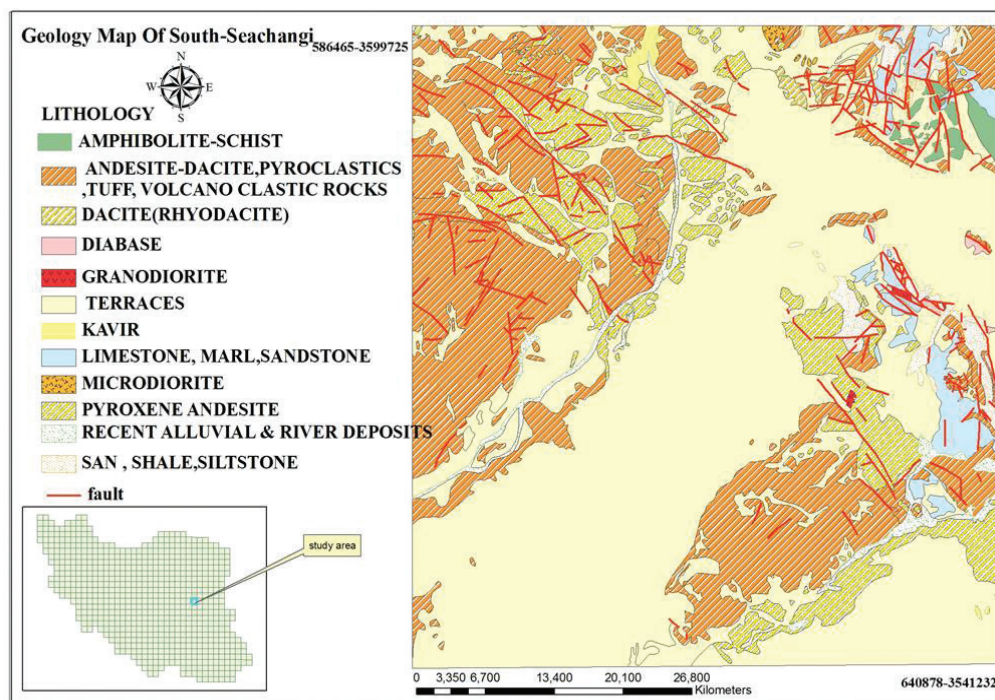
در این پژوهش با دو روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی و فرایند تحلیل سلسله مراتب فازای وزن لایه‌های شاهد مشخص و این وزن‌ها در لایه‌های شاهد تأثیر داده شد و سپس لایه‌های شاهد با یکدیگر با استفاده از روش فازای و عملگر گاما با مقدار ۰/۹۵ تلفیق شدند (شکل‌های ۹ و ۱۰). در ادامه با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت مناطق بی‌هنجار شناسایی شدند. به منظور بررسی نقاط مستعد کانی‌زایی مس- طلای پورفیری در برگه ۱۰۰/۰۰۰ جنوب سه‌چنگی ابتدا نقاط بی‌هنجاری روی برگه تلفیق سلسله مراتبی فازای مشخص شد و سپس به منظور درستی سنجی نقاط، برداشت‌های صحرایی و تهیه سطح مقطع از نمونه‌ها صورت گرفت.

۶-۱. بازدیدهای صحرایی برای بررسی دگرسانی‌ها

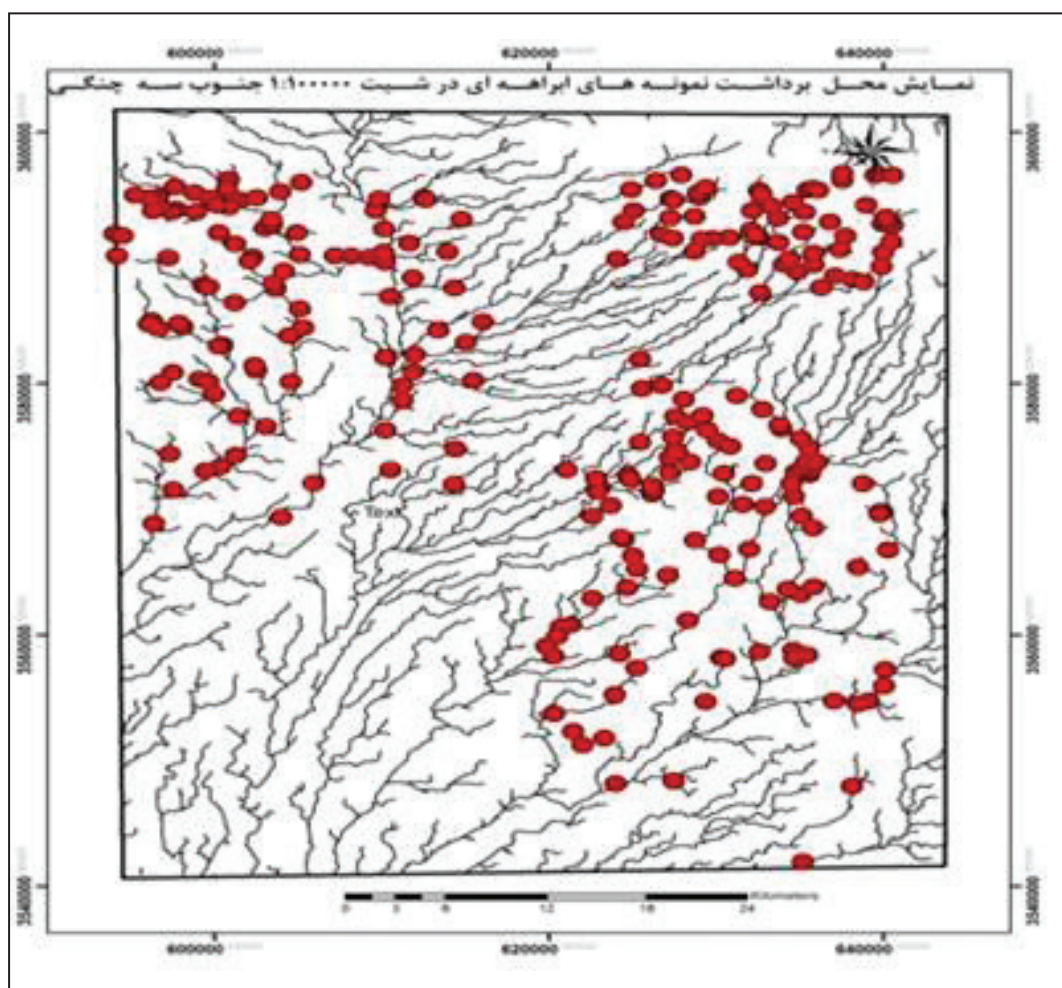
در این پژوهش برای اعتبارسنجی دورسنجی، از دگرسانی‌های محدوده مورد مطالعه



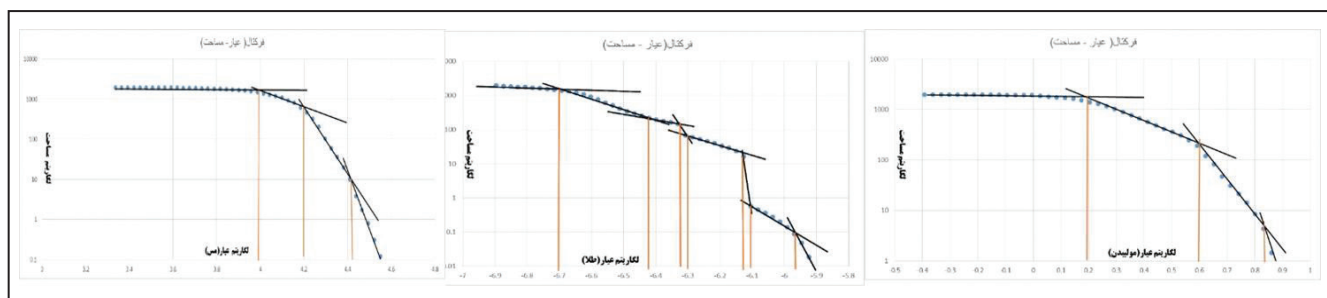
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی در استان خراسان جنوبی.



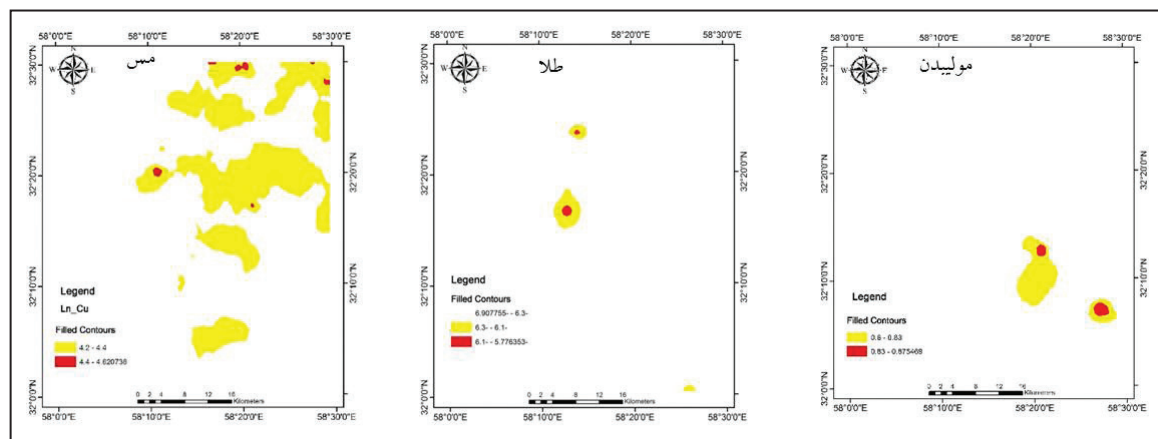
شکل ۲- نقشه زمین شناسی خلاصه شده ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه چنگی.



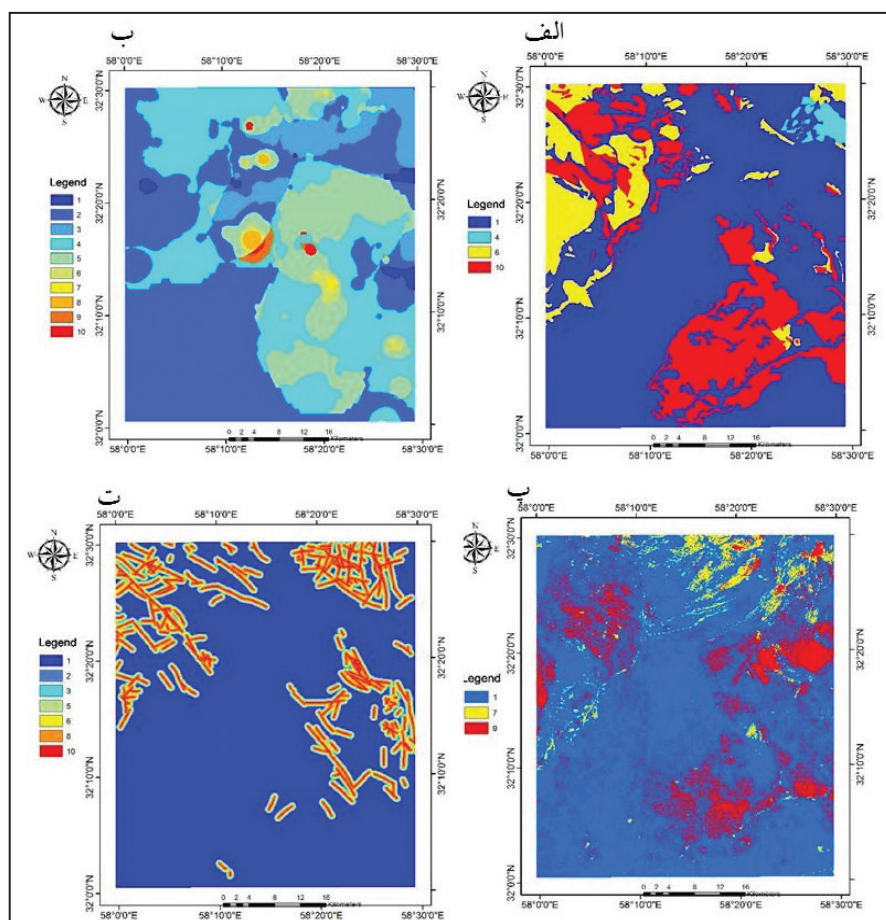
شکل ۳- نمایش محل برداشت نمونه های رسوبات آبراهه ای از جز ۸۰- مش رسوبات در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین شناسی جنوب سه چنگی.



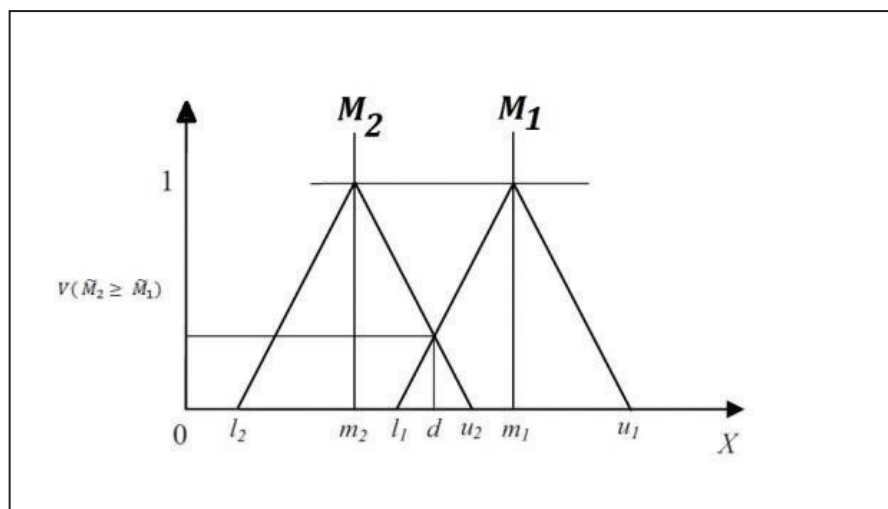
شکل ۴- نمودارهای لگاریتمی عبار- مساحت عناصر مولیبدن، طلا و مس.



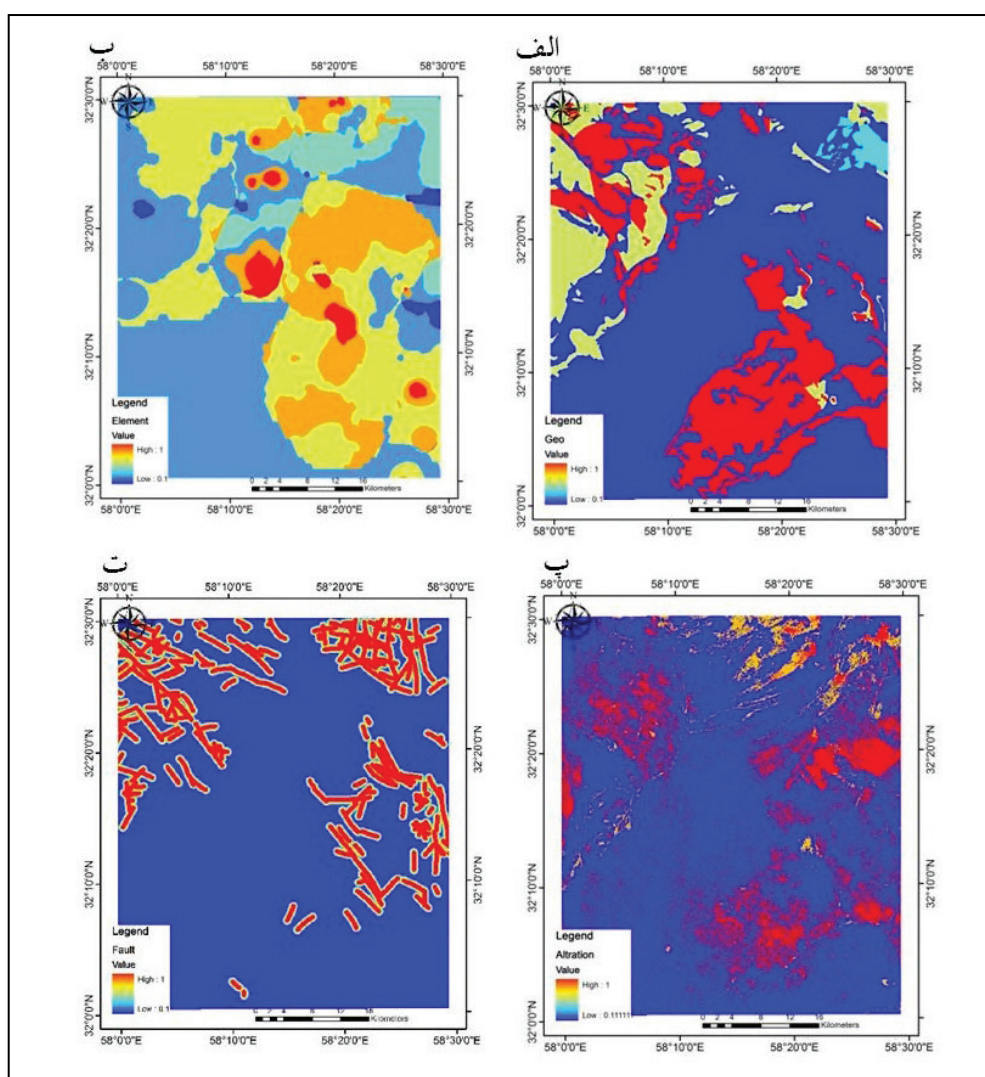
شکل ۵- نقشه بی‌هنجاری عناصر مولیبدن، طلا و مس.



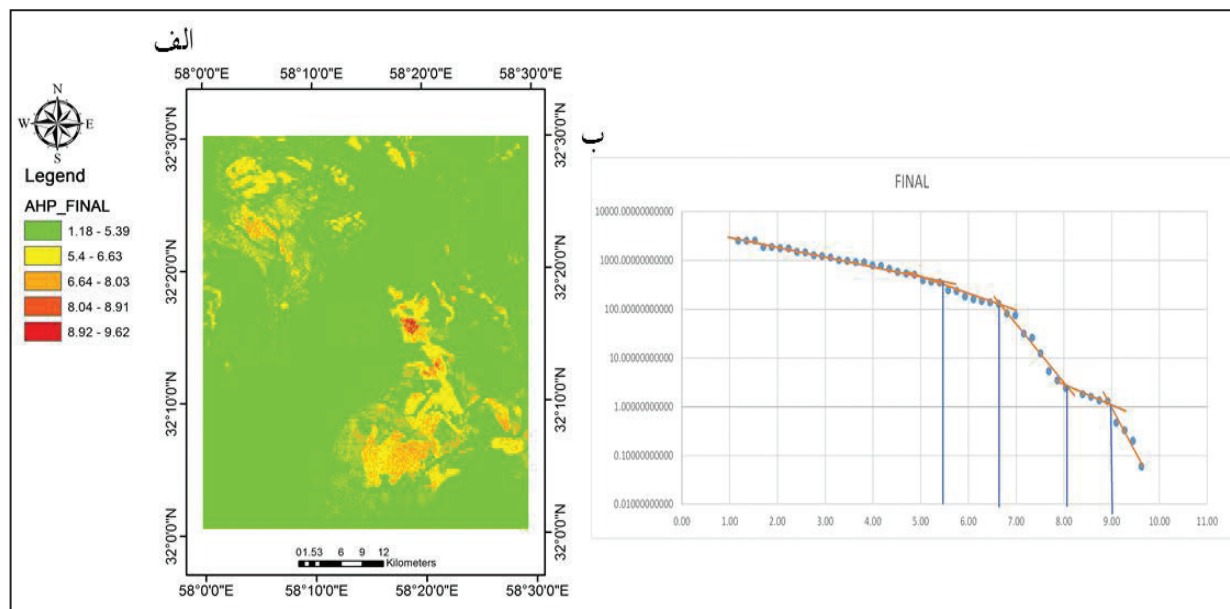
شکل ۶- الف) نقشه زمین‌شناسی منطقه؛ ب) نقشه ژئوشیمیایی عناصر طلا- مس و مولیبدن منطقه؛ پ) نقشه دگرسانی‌ها منطقه؛ ت) نقشه گسل‌های منطقه که تا فاصله ۷۰۰ متری از گسل ارزش‌گذاری شده‌اند. گفتنی است که همه لایه‌ها با توجه به وزن به دست آمده در مرحله سلسله مراتبی میان ارزش ۱ تا ۱۰ بهنجار شده‌اند.



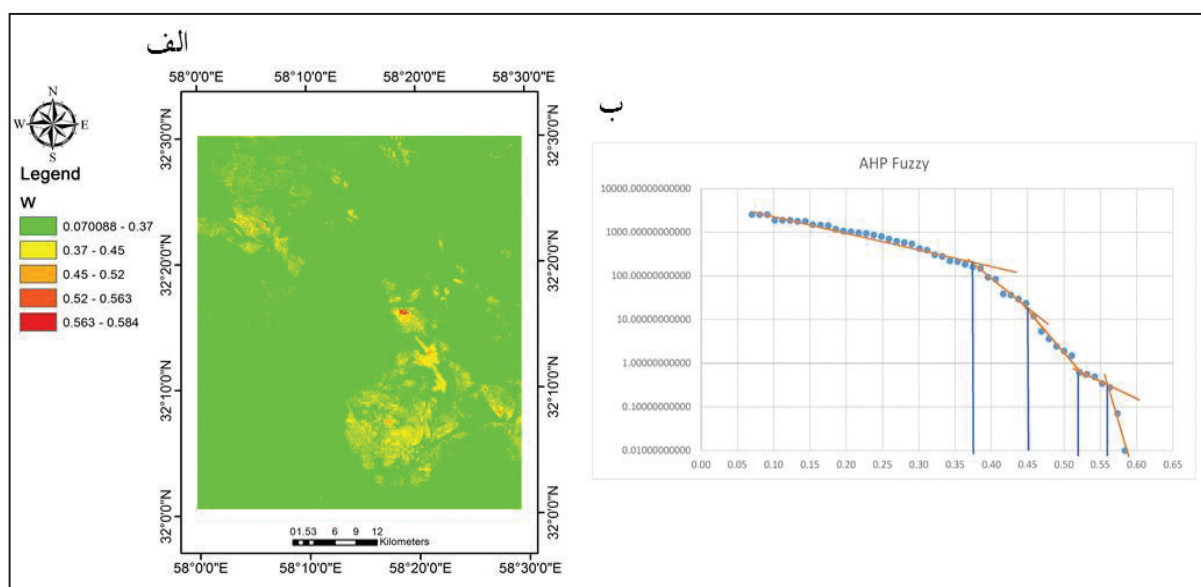
شکل ۷- درجه امکان $V(M_2 \geq M_1)$.



شکل ۸- الف) نقشه زمین‌شناسی فازی شده منطقه؛ ب) نقشه ژئوشیمیایی عناصر طلا- مس و مولیبدن فازی شده منطقه؛ پ) نقشه دگرسانی‌های فازی شده منطقه؛ ت) نقشه گسل‌های منطقه که تا فاصله ۷۰۰ متری از گسل به صورت فازی ارزش‌گذاری شده‌اند.



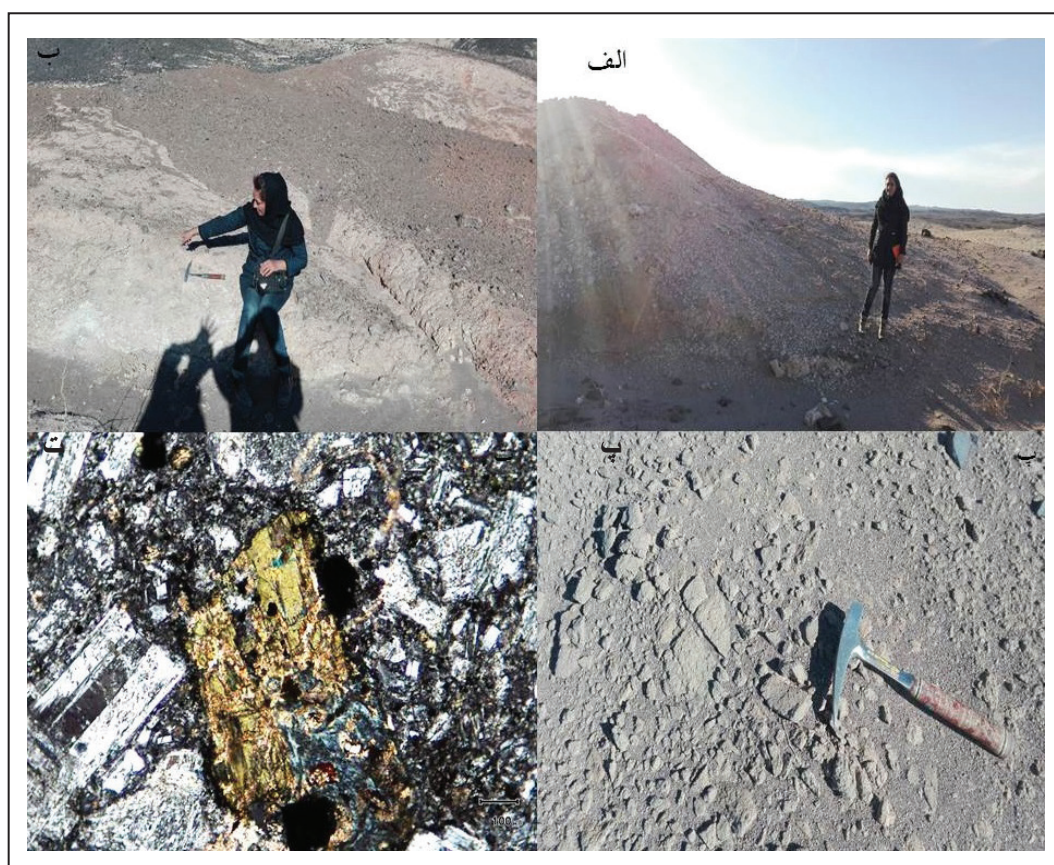
شکل ۹- الف) نقشه مناطق مستعد کانی‌زایی مس و طلای پورفیری به روش تلفیق سلسله مراتبی (AHP)؛ ب) نمودار فرکتالی برای شناسایی بی‌هنجاری‌های محدوده.



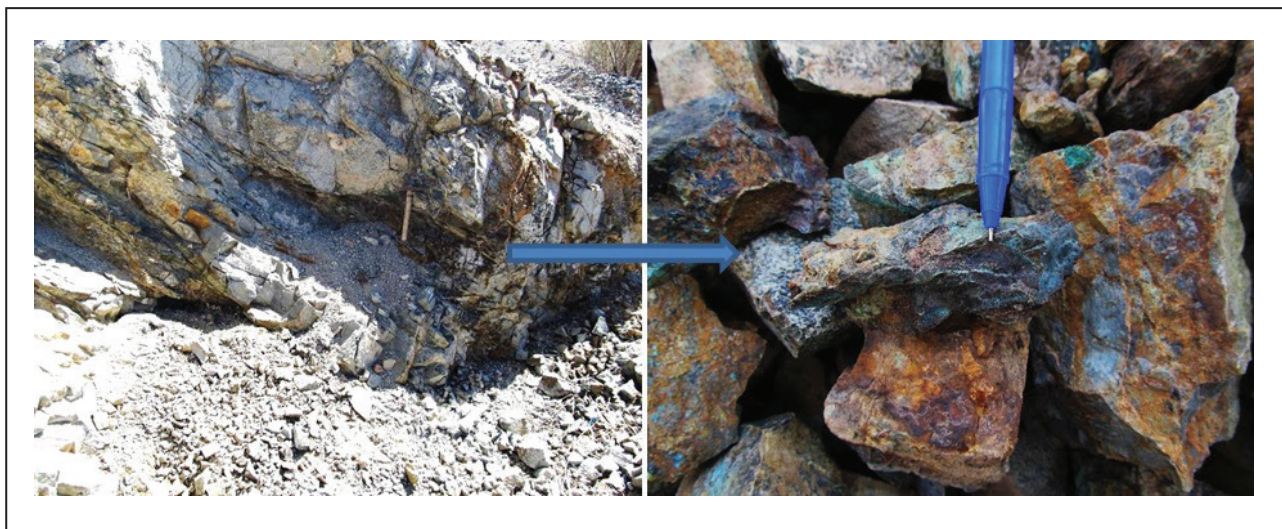
شکل ۱۰- الف) نقشه مناطق مستعد کانی‌زایی مس و طلای پورفیری به روش تلفیق سلسله مراتبی فازی (FAHP)؛ ب) نمودار فرکتالی برای شناسایی بی‌هنجاری‌های محدوده.



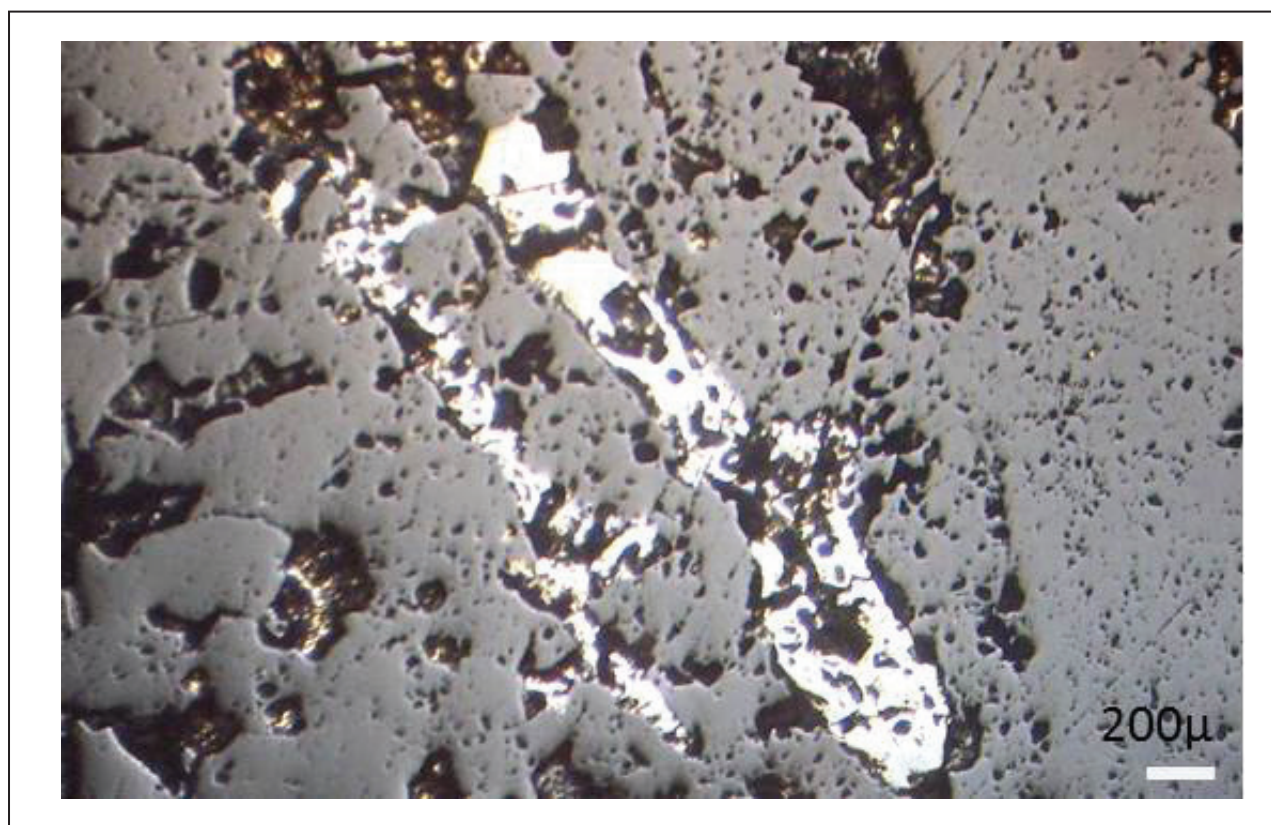
شکل ۱۱- الف) واحد توفی دارای رگه سیلیسی؛ ب) نمایی از محدوده دید به سوی جنوب؛ پ) رگه‌های سیلیسی به همراه اکسید آهن؛ ت) رگه سیلیسی دارای مالاکیت.



شکل ۱۲- الف و ب) دگرسانی آرژیلیک، پ) دگرسانی پروپلیتیک در نمونه صحرایی؛ ت) دگرسانی پروپلیتیک در مقطع نازک در سنگ آندزیتی؛ آمفیبول تبدیل به کلریت شده است.



شکل ۱۳- وجود رگه‌های سیلیس که در آن کانه‌زایی صورت گرفته است



شکل ۱۴- پیریت‌های رگچه‌ای. در انتهای رگچه کالکوپیریت دیده می‌شود. کالکوپیریت ریزدانه در متن رگچه سیلیس پراکنده است (نور عادی).

جدول ۱- مقادیر حد آستانه زمینه و بی‌هنجاری احتمالی و ممکن عناصر مس، طلا و مولیبدن.

بی‌هنجاری قطعی	بی‌هنجاری احتمالی	حد آستانه زمینه	نوع عنصر
۴/۴	۴,۲	۳,۹۲	مس
۶/۱	۶/۳	۶/۷	طلا
۰/۸۳	۰/۶	۰/۱۸	مولیبدن

جدول ۲- ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها به روش سلسله مراتبی.

وزن معیارها	زمین شناسی	زمین ساخت	دگرسانی‌ها	ژئوشیمی	
۰/۴۶۷	۲	۴	۳	۱	ژئوشیمی
۰/۱۶	۱/۲	۲	۱	۱/۳	دگرسانی‌ها
۰/۰۹۵	۱/۳	۱	۱/۲	۱/۴	زمین ساخت
۰/۲۷۷	۱	۳	۲	۱/۲	زمین شناسی

جدول ۳- ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها و زیر معیارها به روش سلسله مراتبی.

وزن زیر معیار	زیر معیارها	وزن معیار	معیارها
۰/۴۱۹	سنگ‌های آذرین	۰/۲۷۷	زمین شناسی
۰/۲۱۱	سنگ‌های دگرگونی		
۰/۲۷۸	سنگ‌های آذرآواری و گرمایی		
۰/۹۳	سنگ‌های رسوبی		
۰/۲۶۴	آرژلیک	۰/۱۶	دگرسانی
۰/۲۶۴	پروپلیتیک		
۰/۲۶۴	فلیک		
۰/۲۰۵	اکسید آهن		
۰/۳۵۷	بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عنصر طلا	۰/۴۶۷	ژئوشیمی
۰/۳۵۷	بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عنصر مس		
۰/۲۵۸	بی‌هنجاری ژئوشیمیایی عنصر مولیبدن		
۰/۲۴۸-۰/۰۳۶	گسل	۰/۰۹۵	زمین ساخت

جدول ۴- اعداد فازی متناسب با متغیر زبانی (Lu et al., 2009).

متغیر زبانی	اعداد فازی مثلثی مثبت	اعداد فازی مثبت وارون
اهمیت مساوی	(۱,۱,۱)	(۱,۱,۱)
دارای اهمیت بین (مساوی- معتدله)	(۱,۲,۳)	(۱/۳, ۱/۲, ۱)
دارای اهمیت معتدله	(۲,۳,۴)	(۱/۴, ۱/۳, ۱/۲)
دارای اهمیت بین (معتدله- قوی)	(۳,۴,۵)	(۱/۵, ۱/۴, ۱/۳)
دارای اهمیت قوی	(۴,۵,۶)	(۱/۶, ۱/۵, ۱/۴)
دارای اهمیت بین (قوی- خیلی قوی)	(۵,۶,۷)	(۱/۷, ۱/۶, ۱/۵)
دارای اهمیت خیلی قوی	(۶,۷,۸)	(۱/۸, ۱/۷, ۱/۶)
دارای اهمیت بین (خیلی قوی- به شدت قوی)	(۷,۸,۹)	(۱/۹, ۱/۸, ۱/۷)
دارای اهمیت به شدت قوی	(۹,۹,۹)	(۱/۹, ۱/۹, ۱/۹)

جدول ۵- ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها به روش سلسله مراتبی.

زمین ساخت	دگرسانی	زمین شناسی	ژئوشیمی	
۴	۳	۲	۱	ژئوشیمی
۳	۲	۱	۱/۲	زمین شناسی
۲	۱	۱/۲	۱/۳	دگرسانی
۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	زمین ساخت

جدول ۶- تبدیل ماتریس مقایسه‌ای زوجی معیارها به اعداد فازی مثلثی.

زمین ساخت	دگرسانی	زمین شناسی	ژئوشیمی	
(۳,۴,۵)	(۲,۳,۴)	(۱,۲,۳)	(۱,۱,۱)	ژئوشیمی
(۲,۳,۴)	(۱,۲,۳)	(۱,۱,۱)	(۱/۳,۱/۲,۱)	زمین شناسی
(۱,۲,۳)	(۱,۱,۱)	(۱/۳,۱/۲,۱)	(۱/۴,۱/۳,۱/۲)	دگرسانی
(۱,۱,۱)	(۱/۳,۱/۲,۱)	(۱/۴,۱/۳,۱/۲)	(۱/۵,۱/۴,۱/۳)	زمین ساخت

جدول ۷- تبدیل اعداد فازی مثلثی به میانگین هندسی فازی سطرها و ایجاد ماتریس وزن معیارها و به دست آوردن وزن فازی معیارها.

نرخ سازگاری: ۰/۰۶۵

معیارها	وزن نهایی معیارها			وزن فازی معیارها			میانگین هندسی فازی سطرها		
	BNP			W			r		
ژئوشیمی	۰/۵۱۲	۰/۸۲۷	۰/۴۶۶	۰/۲۴۴	۲/۷۸۳	۲/۲۱۳	۱/۵۶۵		
زمین شناسی	۰/۳۲۴	۰/۵۵۳	۰/۲۷۷	۰/۱۴۱	۱/۸۶۱	۱/۳۱۶	۰/۹۰۳		
دگرسانی	۰/۱۹۱	۰/۳۲۸	۰/۱۶	۰/۰۸	۱/۱۰۶	۰/۷۵۹	۰/۵۳۷		
زمین ساخت	۰/۱۱۳	۰/۱۸۹	۰/۰۹۵	۰/۰۵۶	۰/۶۳۸	۰/۴۵۱	۰/۳۵۹		

جدول ۸- متغیرهای آماری مرتبط با AHP و FAHP.

انحراف معیار	میانگین	کمترین مقدار	بیشترین مقدار	—
۰/۰۹۴۷	۰/۱۹۱	۰/۰۶	۰/۵۸۴	FAHP
۱/۶	۳/۱۱	۱	۹/۸	AHP

کتابنگاری

- حسینی پاک، ع. ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۰- تحلیل داده‌های اکتشافی (جدایش زمینه از آنومالی، آمار و احتمال مهندسی، تخمین ذخیره)، انتشارات دانشگاه تهران.
- حسینخانی، ا.، کریم‌پور، م. ح. و ملک‌زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۹۴- سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، منطقه‌های دگرسانی و پی‌جویی ژئوشیمیایی در منطقه جنوب باختری سرخ‌کوه، شرق ایران، مجله بلور شناسی و کانی‌شناسی ایران.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۲- گزارش اکتشافات سیستماتیک در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی.
- شایسته‌فر، م. و رسا، ا.، ۱۳۸۴- تحلیل داده‌های چندمتغیره‌ی کانسار سرب و روی قنات مروان کرمان، نشریه‌ی علوم زمین، شماره‌ی ۵۷، صص. ۱۳۴ تا ۱۴۵.
- ظریفی، ض.، صباغان، م. و درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۶- کاربرد تحلیل هندسه فرکتال در جداسازی ناهنجاری‌های عنصر اورانیوم با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوایی در اکتشاف ناحیه‌ای اورانیوم منطقه اولنلیق (آذربایجان شرقی)، مجله ریاضیات کاربردی واحد لاهیجان، سال چهارم، شماره ۱۲.
- فاضل، ا.، یداله‌ی، ر. و اقبالی، م. ع.، ۱۳۸۸- مطالعه کانی‌سازی پلی‌متال سرخ‌کوه (خوسف- بیرجند) به عنوان گرانتیت تیپ S، بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- قدسی‌پور، ح.، ۱۳۸۸- مباحثی در تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ هفتم، ۲۲۰ ص.

References

- Abdi, M., Karimpour, M. H. and Najafi, A., 2010- Geology, alteration and mineralization potential of Kuh-Shah region. South Khorasan. First Symposium of Iranian Society of Economic Geology, Mashhad, Iran, p. 1-7.
- Aghanabati, A., 2004- Geology of Iran. Ministry of Industry and Mines. Geological Survey of Iran, p.142.
- Agterberg, F. and Bonham-Carter, G., 1999- Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration. Proceedings of the 28th International Symposium on Applications of Computer in the Mineral Industry (APCOM), Golden, Colorado, p. 483-490.
- An, P., Moon, W. and Rencz, A., 1991-Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. Canadian Journal of Exploration Geophysics, V. 27, p. 1-11.
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M. H., Mazaheri, S. A., Santos, J. F., Medina, J. M. and Homam, S. M., 2011- Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the ChahShaljami granitoids (Lut Block, eastern Iran). J. Asian Earth Sci, V. 41, p. 283-296.
- Ayag, Z. and Ozdemir, R. G., 2006- A fuzzy AHP approach to evaluating machine tool alternatives. J. Intell Manuf.
- Batuhan, A., 2013- A Fuzzy AHP approach for supplier selection problem: a case study in a gearmotor company, International Journal of Managing Value and Supply Chains (IJMVSC), V.4, No. 3.
- Beiranvand Pour, A. and Hashim, A., 2012- Identifying areas of high economic-potential copper mineralization using ASTER data in the Urumieh-Dokhta Volcanic Belt, Iran. Advances in Space Research, 49, p. 753-769.
- Berberian, M., Jackson, J. A., Qorashi, M., Khatib, M. M., Priestley, K., Talebian, M. and Ghafuri-Ashtiani, M., 1999- The 1997 may 10 Zirkuh (Qaenat) earthquakes (Mw 7.2): faulting along the Sistan suture zone of eastern Iran. Geophys. J. Int, 136, p. 671-694.
- Bonham-Carter, G., 1994- Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Ontario, Canada. p. 98.
- Bonham-Carter, G., Agterberg, F. and Wright, D., 1989- Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, Statistical applications in the Earth Sciences. Geological Survey of Canada Paper, V. 89, p. 171-183.
- Camp, V. and Griffis, R., 1982- Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. Lithos, V. 15, p. 221-239.
- Carranza, E. J. M., 2009- Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. Ore Geol. Rev, V. 35, p. 383-400.
- Carranza, E. J. M., 2008- Geochemical anomaly and mineral prospectively mapping in GIS. In: Handb. Explor. Environ. Geochem. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, p. 368.
- Chang, D., 1996- Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. open journal of operational, p.649-655.
- Harris, J. R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M. A., Ayer, J. and Dahn, R., 2001- Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps, a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone belt, Ontario, Canada, Natural Resource Research V.10, p. 91-124.
- Karimi, M., Menhaj, M. and Mesgari, M., 2008- Mineral potential mapping of copper minerals using fuzzy logic in GIS environment, Beijing, China: ISPRS, p.170-181.
- Karimpour, M. H., Larg, R. R., Razmara, M. and Patrick, R. A. D., 2005- Bi sulfosalt mineral series paragenetic associations in specularite-rich Cu-Ag-Au deposit, QalehZari mine, Iran. Soc. Crystallography Mineral, V. 13 (2), P.417-432.
- Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., Mazaheri, S. A. and Haidarian Shahri, M. H., 2007- Magmatism and different types of mineralization in Lut Block. In 15th Symposium of Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

- Laarhoven, P. J. M. and Pedrycz, W., 1983- A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, V.11, P.229–241.
- Lu, L., Zhi-hua, Sh., Wei, Y., Dun, Zh., Sai, L. N., Chong-fa, C. and a-lin, L., 2009- A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area. China. *Eco logical modeling*, V. 220, P. 3439-3447.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H. and Stern, C. R., 2014- The Khopik porphyry copper prospect, Lut Block, Eastern Iran, geology, alteration and mineralization fluid inclusion, and oxygen isotope studies. *Ore Geol. Rev.*
- Malekzadeh, A., Karimpour, M. H. and Mazaheri, S. A., 2010- Rb–Sr and Sm–Nd isotopic compositions and Petrogenesis of ore-related intrusive rocks of gold-rich porphyry copper Maherabad prospect area (north of Hanich), east of Iran. *J.Crystallogr. Mineral.* V.18, P.15–32.
- Pazand, K., Hezarkhani, A., Ataei, M., 2012- Using TOPSIS approaches for predictiporphyry Cu potential mapping: a case study in Ahar-Arasbaran area (NW, IraComput). *Geosci*, P. 49, 62–71.
- Porwal, A., 2006- Mineral potential mapping with mathematical geological models, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, The Netherland, p. 289.
- Porwal, A., Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2003- Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, Springer, V.12, P. 1–25.
- Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Razique, A. and Fletcher, T., 2012- High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu $\pm$ Mo $\pm$ Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Geol*, V. 107, P.295–332.
- Saaty, T. L., 1977- A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J Math Psychol*, V. 15, P.234-281.
- Samiee, S., Karimpour, M. H., Ghaderi, M. and Haidarian Shahri, M. R., 2011- Geology, alteration and mineralization potential in Khonic area, south of Birjand, The second Congress of economic geology of Iran.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets. *Information and Control*. V. 8, P.338-353.

Identification of probable porphyritic Au-Cu mineralization zones in the South Seachangi using AHP and FAHP methods

Z. Khajehmiri¹, M. R. Shayestehfar^{2*} and H. Moeinzadeh³

¹Ph.D. Student, Department of Geology, College of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

²Associate Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³Associate Professor, Department of Geology, College of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 2015 October 31

Accepted: 2016 February 24

Abstract

Due to high cost, risk and time consuming nature of field operations and mineral explorations, the discovery of probable mineralization area is profoundly important. Thus, preparations of potential mineral map by means of GIS techniques for compilation all exploration factors is an essential matter. Various methods of mineral potential assessment have been developed. One of those most efficient techniques, based on nature of geology and mineral phenomena, is Analytical Hierarchy process (AHP) and Fuzzy Analytical Hierarchy process (FAHP). In this investigation, in order to prepare probable porphyritic gold copper zones map in 1:100000 sheet of south of Sechangi, AHP and FAHP have been implemented. In the study area, the witness layers including geology layers (thermal source rock and host rock), alteration, tectonic and geochemical layers depending on target (porphyritic gold- copper mineralization) are weighted and then compiled by aid of AHP and FAHP. In final compiled map resulted by two mentioned methods, the anomalous zones are separated by fractal method. The comparison of final maps of probable porphyritic gold - copper mineralization zones indicate that the results derived by FAHP is significantly more precise than AHP. Anomalous zones derived by this method (FAHP) are evaluated, anomalous zone 1 derived by FAHP is approved by previous analysis. The analysis results of mineralized samples of anomaly 2 indicate that samples have experienced copper enrichment and moreover, gold and arsenic elements are enriched as well. The results presented here and results of previous analyses approve mineral potential assessment derived by Fuzzy Analytical Hierarchy process (FAHP).

Keywords: AHP, FAHP, South of Sechangi, Porphyritic gold- copper mineralization.

For Persian Version see pages 217 to 230

*Corresponding author: M. R. Shayestehfar; E-mail: shayeste@uk.ac.ir