استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در ورقه ورزقان، شمال باختر ایران

رضا قزلباش[1] و عباس مقصودی[2*]

[1]دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[2]استادیار، گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۲۶/ ۰۲/ ۱۳۹۶ تاریخ پذیرش: ۲۳/ ۰۸/ ۱۳۹۶

چکیده

ورقه ورزقان که در بخش شمال باختری کمربند ماگمایی ارسباران قرار گرفته است، یکی از مناطق امیدبخش کانی‌زایی مس پورفیری در کشور بوده و کانسارهای مس پورفیری در رده‌بندی جهانی نظیر کانسار مس- مولیبدن سونگون را در خود جای داده است. هدف اصلی این پژوهش، تلفیق لایه‌های اکتشافی شاهد مختلف شامل ژئوشیمی، آلتراسیون و زمین‌شناسی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) است. به همین منظور، در گام نخست، مقادیر پیوسته ۶ لایه اکتشافی شاهد به عنوان معیارهای اصلی (نقشه ژئوشیمیایی مربوط به مقادیر PC1، نقشه‌های فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمال آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن، نقشه فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن و نقشه چگالی گسل) با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت به کلاس‌های مناسب تقسیم شد و سپس لایه‌های گسسته، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS) برای تولید نقشه نهایی پتانسیل مس پورفیری در بخش مرکزی ورقه ورزقان با یکدیگر تلفیق شدند. در نهایت جهت ارزیابی توانایی روش به کار گرفته شده برای شناسایی نواحی امیدبخش در منطقه مورد مطالعه و با استفاده از رخدادهای کانی‌زایی شناخته شده، منحنی نرخ موفقیت ترسیم شد که این منحنی توانایی بالای روش ترکیبی AHP-TOPSIS را در مدل‌سازی نواحی امیدبخش مربوط به کانی‌زایی مس پورفیری اثبات می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مس پورفیری، مدل‌سازی پتانسیل معدنی، فرکتال عیار- مساحت، AHP-TOPSIS، منحنی نرخ موفقیت، ورزقان.

***نویسنده مسئول:** عباس مقصودی

E-mail: a.maghsoudi@aut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

در مطالعات اکتشافی، هدف اصلی یافتن کانسارهای معدنی جدید در محدوده مورد مطالعه است. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در اکتشاف کانسارهای معدنی، مشخص کردن مناطق دارای پتانسیل و به اصطلاح مناطق امیدبخش است. در همین راستا، لایه‌های اطلاعاتی مکانی مختلف نظیر لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و غیره از محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری و پس از پردازش، برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) جهت یافتن مناطق امیدبخش با یکدیگر تلفیق می‌شوند. بنابراین مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) می‌تواند یکی از مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) محسوب شود، زیرا هدف آن تولید نقشه‌های پیشگو بر اساس چندین معیار اکتشافی مختلف است (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008; Abedi et al., 2012, Ghezelbash and Maghsoudi, 2018a).

الگوریتم‌های متنوعی برای تلفیق داده‌های اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود، که به ۲ دسته کلی روش‌های دانش‌محور و داده‌محور تقسیم می‌شوند (Bonham-Carter, 1994, Carranza, 2008). روش‌های داده‌محور برای اکتشاف نواحی قهوه‌ای یا مناطقی که قبلاً در آنها کارهای اکتشافی فراوانی صورت گرفته است، کاربرد دارند. در این روش‌ها اندیس‌های شناخته شده معدنی در منطقه مورد مطالعه به عنوان نقاط آموزشی، برای ایجاد روابط فضایی بین کانسارهای شناخته شده و ویژگی‌های منحصربه‌فرد زمین‌شناختی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Carranza, 2008, Abedi et al., 2013). بر اساس روابط بین لایه‌های شاهد و نقاط آموزشی، مقدار اهمیت هر یک از لایه‌های شاهد به‌صورت کمی اندازه‌گیری (Carranza and Hale, 2003) و در نهایت تلفیق لایه‌های شاهد مختلف، منجر به تولید نقشه پتانسیل معدنی منحصربه‌فرد می‌شود (Nykänen and Salmirinne, 2007). انواع روش‌های داده‌محور شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (Porwal et al., 2003a and 2004; Abedi and Norouzi, 2012) وزن شواهد (Carranza and Hale, 2003)، رگرسیون لجستیکی (Agterberg and Bonham-Carter, 1999; Carranza and Hale, 2001)، ماشین بردار پشتیبان (Zuo and Carranza, 2011; Abedi et al., 2012) و طبقه‌بندی بیزین (Porwal et al., 2006) است. مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر اساس روش‌های دانش‌محور برای اکتشاف مناطقی مناسب است که در آنها کارهای اکتشافی کمتری (به اصطلاح نواحی سبز) صورت گرفته است (Carranza, 2011; Ghezelbash and Maghsoudi, 2018a). در این گونه روش‌ها، نقشه‌های پیشگوی تهیه شده بر اساس نظرات کارشناسان خبره وزن‌دهی و با یکدیگر ترکیب می‌شوند (Asadi et al., 2016). روش‌های متداول در این زمینه شامل شاخص همپوشانی (Carranza et al., 1999; Yousefi and Carranza, 2015)، منطق فازی (An et al., 1991; Porwal et al., 2004) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Hosseinali and Alesheikh, 2008)، تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS) (Ataei et al., 2008) و سایر روش‌های گسترش یافته هستند.

تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS) به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای اولین بار توسط Pazand et al. (2012) برای مدل‌سازی پتانسیل مس پورفیری به‌صورت دانش‌محور مورد استفاده قرار گرفته است. این تکنیک، برای تلفیق لایه‌های اکتشافی مختلف بر اساس نزدیکی به راه حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه حل ایده‌آل منفی استفاده می‌شود (Asadi et al., 2016). همچنین روش TOPSIS در کنار روش AHP به‌صورت ترکیبی توسط Pazand and Hezarkhani (2015) برای یافتن مناطق پرپتانسیل در شمال باختر ایران استفاده شده است. این الگوریتم که تحت عنوان روش AHP-TOPSIS معرفی شده، شامل دو گام اساسی است. در گام نخست، مقادیر وزنی هر یک از لایه‌های اکتشافی (معیارها) با استفاده از روش AHP محاسبه و در گام دوم، الگوریتم TOPSIS برای تلفیق لایه‌های اکتشافی مختلف به‌کار گرفته می‌شود (Asadi et al., 2016). از مزایای این روش استفاده آسان و عدم نیاز به دانش اکتشافی تصمیم‌گیرنده است.

برای وزن‌دهی به لایه‌های شاهد توسط روش AHP، در ابتدا لازم است تا نقشه‌های پیوسته، همگی به کلاس‌های مختلف تفکیک شوند. یکی از روش‌های

Archive of SID

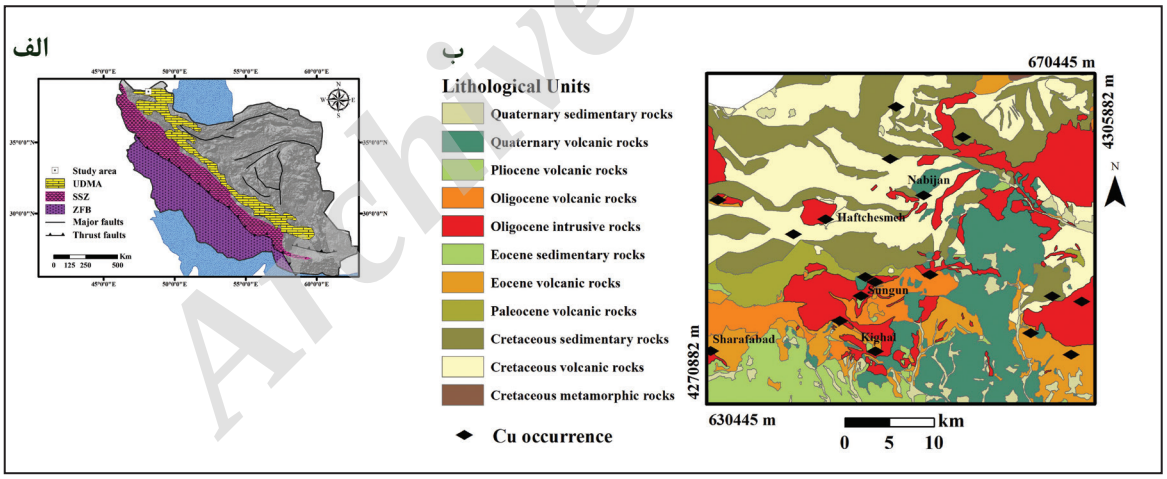
www.SID.ir

جداسازی آنومالی‌های مختلف از مقادیر زمینه، روش فرکتال عیار- مساحت است، که علاوه بر توزیع فراوانی داده‌ها، تغییرات مکانی آن‌ها را نیز در محاسبات لحاظ (Cheng et al., 1994) و با سطح اعتماد بالایی حدود آستانه را مشخص می‌کند. در این پژوهش، ۶ لایه اطلاعاتی شاهد مربوط به بخش مرکزی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان واقع در استان آذربایجان شرقی، شامل نقشه ژئوشیمیایی پیوسته حاصل از مؤلفه اول (PC1) مربوط به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Ghezelbash et al., 2018)، نقشه پیوسته فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمال آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن، نقشه پیوسته فاصله از توده‌های نفوذی و نقشه پیوسته چگالی گسل، مهیا و سپس با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت به جوامع مختلف تفکیک شده‌اند. سپس با استفاده از الگوریتم AHP تمامی لایه‌های اکتشافی (معیارها) و زیر مجموعه‌های کلاسی (زیر معیارها) وزن‌دهی شده‌اند. پس از آن ماتریس نهایی بر اساس مقدار اوزان معیارها و زیر معیارها تهیه شده و مدل نهایی پتانسیل مس پورفیری در بخش مرکزی ورقه ورزقان با استفاده از الگوریتم TOPSIS به‌دست آمده است. در نهایت برای ارزیابی کمی مدل حاصل شده از منحنی نرخ موفقیت (Carranza and Laborte, 2015; Parsa et al., 2016; Ghezelbash and Maghsoudi, 2018b) استفاده شده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان ، بخشی از زون ماگمایی ارومیه- دختر محسوب می‌شود که در نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی نوتتیس به زیر زون سنندج- سیرجان در مزوزوییک پسین تشکیل شده است (Alavi, 1994). فعالیت‌های ماگمایی کالک‌آلکالن و شوشونیتی در زون ماگمایی ارومیه- دختر در دوره ائوسن آغاز شده و تا کواترنری ادامه یافته است. فعالیت‌های آتشفشانی جوان‌تر در این کمربند به‌طور عمده سرشت آلکالن دارند و با فرایند تکتونو- ماگمایی مربوط به حوادث ریفتی پس از برخورد درون‌قاره‌ای همراه هستند (Jamali et al., 2010). زون ماگمایی ارومیه- دختر از لحاظ کانی‌زایی مس پورفیری به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود (Aghazadeh et al., 2015): ۱) کمربند مس پورفیری ارسباران که در بخش شمالی زون ارومیه- دختر قرار گرفته است؛ ۲) کمربند مس پورفیری ساوه- یزد که در بخش مرکزی این زون جای گرفته است؛ ۳) کمربند مس پورفیری کرمان که منبع اصلی کانی‌زایی مس در ایران محسوب می‌شود و در بخش جنوبی این زون قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه، بخش مرکزی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان است که با دارا بودن معادن، کانسارها و اندیس‌های فراوان مس- مولیبدن- طلا از جمله معدن سونگون، کانسارهای هفت‌چشمه، کیقال، نبی‌جان و شرف‌آباد، یکی از پرپتانسیل‌ترین مناطق ایران برای اکتشاف کانسارهای مس- مولیبدن و مس- طلای پورفیری است (قزلباش، ۱۳۹۵). ورقه ورزقان در شمال باختر کمربند ماگمایی ارسباران قرار گرفته است و از دیدگاه زمین‌شناسی، واحدهای سنگی موجود در این برگه شامل ۳ بخش کلی واحدهای رسوبی و آتشفشانی کواترنری در جنوب منطقه، سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی کرتاسه در شمال منطقه و سنگ‌های نفوذی و آتشفشانی الیگو- میوسن در قسمت مرکزی برگه هستند (Mehrpatou, 1993) (شکل ۱) که مهم‌ترین سنگ‌های ماگمایی در این کمربند، شامل گرانیتوییدها و مونزونیت‌هایی است که تشکیل آنها در نتیجه فعالیت شدید ماگمایی در دوره ائوسن آغاز شده و تا الیگوسن و حتی میوسن ادامه پیدا کرده و در نتیجه باعث جاگذاری توده‌های نفوذی عظیم و به تبع آن آلتراسیون‌ها و کانی‌زایی‌های گسترده در منطقه شده است (Jamali et al., 2010). به همین دلیل، توده‌های نفوذی الیگو- میوسن میزبان اصلی کانی‌سازی عمده پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال در این منطقه به‌شمار می‌روند (شکل ۱).



شکل ۱- الف) نقشه ساده شده زون‌های ساختاری در ایران (UMDA: کمان ماگمایی ارومیه- دختر، SSZ: زون سنندج- سیرجان، ZFB: کمربند چین خورده زاگرس) و موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده بخش مرکزی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان (Mehrpatou, 1993).

۳- روش‌شناسی

۳- ۱. تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل (TOPSIS)

روش TOPSIS (تکنیک اولویت‌بندی با شباهت به راه حل ایده‌آل) یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای اولین بار توسط Hwang and Yoon (1981) توسعه یافته است. بر مبنای این تکنیک، بهترین جایگزین انتخابی، می‌بایست کمترین فاصله اقلیدسی را از راه حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه حل ایده‌آل منفی دارا باشد (Samimi Namin et al., 2008; Pazand et al., 2012). راه حل ایده‌آل مثبت، میزان ویژگی‌های مثبت (سود) را بیشینه و میزان ویژگی های منفی (هزینه) را کمینه می‌کند. در حالی که راه حل ایده‌آل منفی میزان ویژگی‌های منفی (هزینه) را بیشینه و میزان ویژگی‌های مثبت (سود) را کمینه می‌کند.

در مسائل مربوط به تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، برای دست‌یابی به رتبه‌بندی مناسب، داده‌های اطلاعاتی مختلف با شرایط مخصوص با یکدیگر مقایسه و ارزیابی می‌شوند. به همین منظور یک ماتریس A*C در نظر گرفته می‌شود که A={a, b, c, ...} نشان‌دهنده جایگزین‌ها و C={c1, c2, c3,...} مربوط به معیارهاست، که هدف رتبه‌بندی جایگزین‌ها و انتخاب بهترین جایگزین بر مبنای مقایسه و ارزیابی معیارهای مختلف است. الگوریتم TOPSIS طبق مراحل زیر قابل اجرا است:

۱) تهیه ماتریس تصمیم بر اساس لایه‌های اطلاعاتی مختلف (زمین‌شناسی، ژئوشیمی، دورسنجی و غیره).

۲) محاسبه ماتریس تصمیم نرمال شده. مقدار نرمال شده r_{ij} طبق رابطه زیر محاسبه

Archive of SID
www.SID.ir

می‌شود:

$$r_{ij}=\frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} f_{ij}^{2}}}, i=1,2,...,n \text{ and } j=1,2...,m. \quad (1)$$

۳) محاسبه ماتریس تصمیم نرمال شده وزن‌دار طبق مقدار نرمال شده وزن‌دار V_{ij} با ضرب ماتریس تصمیم نرمال شده به وزن اختصاص یافته (w_j)به هریک از معیارها طبق معادله زیر:

$$V_{ij}=w_j r_{ij}, i=1,2,...,m. \quad (2)$$

۴) تعیین راه حل ایده‌آل مثبت و راه حل ایده‌آل منفی مطابق معادله‌های زیر:

$$A^{+}=\{v_1^{+},v_2^{+},...,v_i^{+}\}=\left\{(\max_j v_{ij} \mid i\in I'),(\min_j v_{ij} \mid i\in I'')\right\} \quad (3)$$

$$A^{-}=\{v_1^{-},v_2^{-},...,v_i^{-}\}=\left\{(\min_j v_{ij} \mid i\in I'),(\max_j v_{ij} \mid i\in I'')\right\} \quad (4)$$

که در رابطه‌های بالا، I' مربوط به مجموعه معیارهای سود و I'' مربوط به مجموعه معیارهای هزینه است.

۵) محاسبه مقادیر انفصال با استفاده از فواصل اقلیدسی n بعدی. تفکیک هر جایگزین از راه حل ایده‌آل مثبت (D_j^{+}) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_j^{+}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij}-v_i^{+})^2}\, j=1,2,...,J. \quad (5)$$

همچنین به طرز مشابه، تفکیک هر جایگزین از راه حل ایده‌آل منفی (D_j^{-}) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D_j^{-}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(v_{ij}-v_i^{-})^2}\, j=1,2,...,J. \quad (6)$$

۶) محاسبه نزدیکی نسبی به راه حل ایده‌آل. نزدیکی نسبی جایگزین Ai با توجه به A+ مطابق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$CC_j^{+}=\frac{D_j^{-}}{D_j^{+}+D_j^{-}}, j=1,2,...,J. \quad (7)$$

۷) رتبه‌بندی جایگزین‌ها بر اساس نزدیکی نسبی. هر جایگزینی که بیشترین مقدار CC_j^{+} را دارا باشد، بهترین جایگزین محسوب می‌شود. همچنین با مرتب کردن مقادیر نزدیکی نسبی محاسبه شده برای هر جایگزین، بهترین جایگزین‌ها از رتبه‌های بالاتر تا پایین‌تر مشخص می‌شوند.

۴- مدل‌سازی

۴- ۱. تولید نقشه‌های شاهد پیوسته

به دلیل شرایط زمین‌شناسی پیچیده کانسارهای مس پورفیری، انتخاب مناطق امیدبخش و پرپتانسیل بسیار مشکل است. مدل‌سازی پتانسیل معدنی که یکی از مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره محسوب می‌شود، می‌تواند در انتخاب و یافتن مناطق پرپتانسیل کمک کند. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی لایه‌های اطلاعاتی مختلف شامل داده‌های ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی، دورسنجی و زمین‌شناسی به عنوان معیارهای اکتشافی برای تهیه مدل پیش‌بینی نهایی به کار گرفته می‌شوند. در این پژوهش از مجموعه داده‌های اکتشافی موجود، شامل نقشه‌های پیوسته اثرات ژئوشیمیایی چندعنصری، فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن، فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمال مرتبط با کانی‌زایی مس پورفیری و چگالی گسل استفاده شده است.

- لایه ژئوشیمیایی چند عنصری: برای تهیه نقشه ژئوشیمیایی چندعنصری، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شده است. PCA یک ابزار مناسب برای تبدیل مقادیر عیار چند عنصر مختلف به یک مؤلفه اصلی منفرد و کاهش ابعاد داده‌ها به مؤلفه‌های اصلی غیر وابسته بر اساس ماتریس همبستگی متغیرهاست (Cheng, 2007; Ghezelbash et al., 2018). روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ماتریس همبستگی متغیرها را به دو ماتریس شامل لودینگ‌ها و امتیازات با استفاده از بردارهای ویژه و مقادیر ویژه تبدیل می‌کند. در مطالعه حاضر، روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی معمولی بر روی داده‌های ژئوشیمیایی نرمال شده مرتبط با کانی‌زایی مس پورفیری اعمال شده است (جدول ۱). بر اساس مقادیر به دست آمده از ماتریس همبستگی چرخشی ۱۰ عنصر انتخابی شامل Pb، Mo، Hg، Cu، Bi، Au، As، Ag، Sb و Zn سه مؤلفه اصلی PC1، PC2 و PC3 استخراج شدند. طبق جدول ۱، عناصر Cu، Au،Bi و MO دارای مقادیر لودینگ بالاتر از ۰/۵ (به ترتیب ۰/۶۸۷، ۰/۷۵۸، ۰/۸۲۹ و ۰/۸۳۹) هستند که نشان‌دهنده ارتباط فضایی مثبت ۴ عنصر مذکور در کانی‌زایی مس پورفیری در محدوده مورد مطالعه است. همچنین، مقدار واریانس محاسبه شده برای ۳ مؤلفه اصلی PC1، PC2 و PC3 به ترتیب ۳۱/۷۲۸ %، ۱۶/۸۲۵ % و ۱۶/۸۰۴ % از مجموع واریانس‌های محاسبه شده برای داده‌های چند متغیره است. بنابراین بیشترین تغییرات داده‌ها در مؤلفه اول رخ داده است. در نهایت، PC1 به عنوان مؤثرترین مؤلفه انتخاب شده و نقشه نهایی چند عنصری ژئوشیمیایی مربوط به آن، به عنوان لایه ژئوشیمیایی نهایی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲- الف).

- لایه‌های شاهد زمین‌شناسی و ساختاری: با استفاده از نقشه زمین‌شناسی مربوط به ورقه ورزقان که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده (Mehrpartou, 1993) و همچنین با به کارگیری نرم‌افزار Arc GIS 10.2، واحدهای مختلف زمین‌شناسی به‌صورت دستی دیجیت شده و به‌صورت فایل شیپ در دسترس قرار گرفته است. در بسیاری از کانسارهای مس پورفیری، کانسارهای موجود در منطقه به‌صورت ژنتیکی با ماگماهای کالک‌آلکالن حد واسط تا فلسیک در قوس‌های آتشفشانی- ماگمایی در بالای زون‌های فرورانش فعال تشکیل می‌شوند (John, 2010). توده‌های نفوذی الیگومیوسن میزبان کانسارهای بزرگ مس- مولیبدن و مس- طلای پورفیری موجود در منطقه هستند (Hezarkhani, 2006). بنابراین لایه اطلاعاتی شاهد مربوط به فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن می‌تواند به عنوان یک لایه ارزشمند برای تلفیق نهایی در مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲- ب). کانی‌زایی مس پورفیری به‌صورت ساختاری توسط گسل‌ها و شکستگی‌ها کنترل می‌شود و تعدادی از گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌توانند راهنماهای اکتشافی مناسبی باشند. یکی از فاکتورهای مهم هوازدگی و غنی‌شدگی در کانسارهای مس پورفیری، گسل‌ها و شکستگی‌ها هستند؛ به طوری‌که محلول‌های ماگمایی- هیدروترمال از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها بالا می‌آیند و باعث غنی‌شدگی کانی‌زایی مس پورفیری می‌شوند (John, 2010). نقشه پیوسته چگالی گسل نیز می‌تواند به عنوان یک لایه شاهد اطلاعاتی مناسب برای مدل‌سازی نهایی کانی‌زایی مس پورفیری مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲- پ).

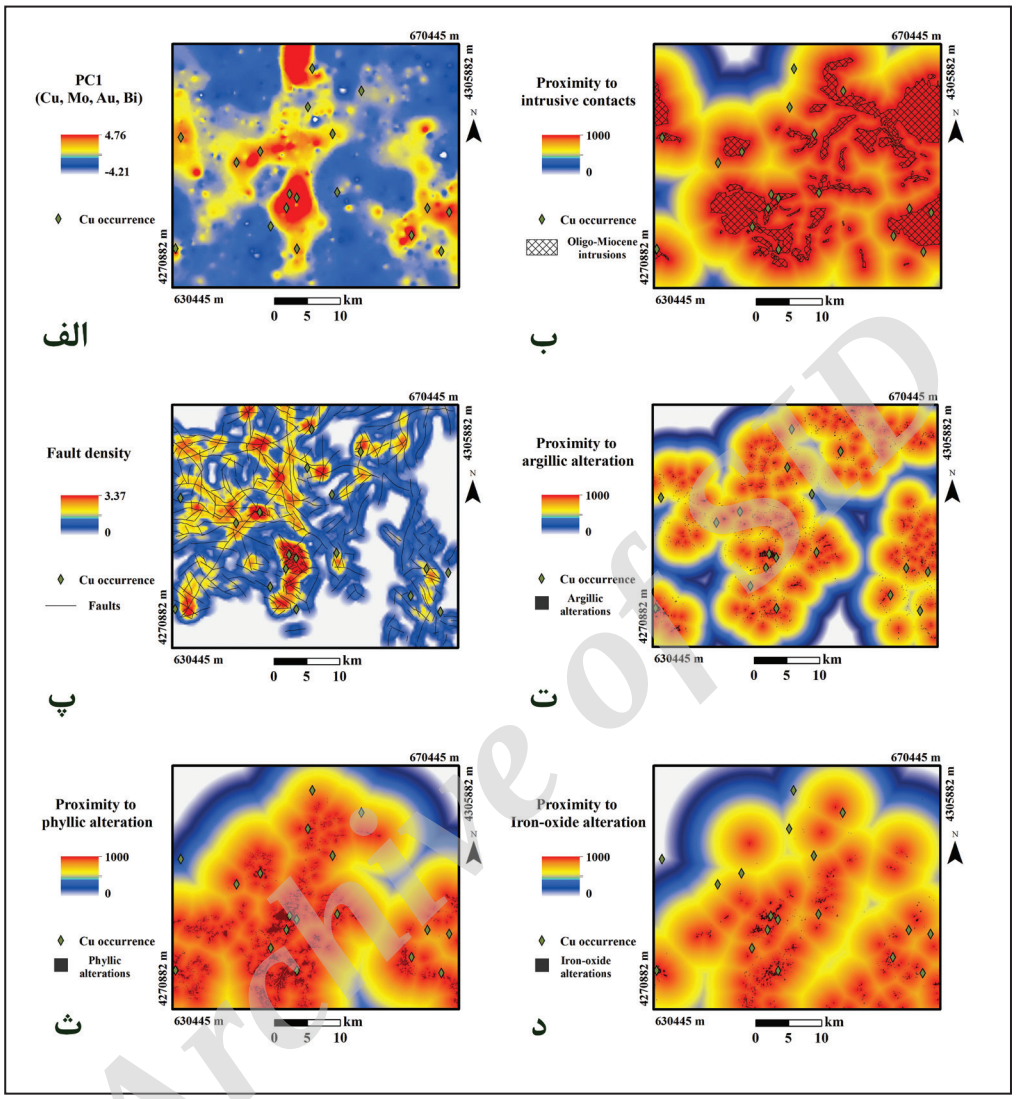
- لایه‌های مربوط به آلتراسیون‌های هیدروترمال: آلتراسیون‌های هیدروترمال به فرایندهای متاسوماتیکی اشاره دارد که باعث تغییر در ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ‌ها و منجر به تشکیل سیستم پورفیری می‌شوند (John, 2010). آلتراسیون‌های فیلیک، آرژیلیک و اکسید آهن از آلتراسیون‌های هیدروترمال متداول در کانسارهای پورفیری محسوب می‌شوند. سنجنده ASTER یک سیستم تصویربرداری ماهواره‌ای چند طیفی است، که با استفاده از تصاویر آن می‌توان آلتراسیون‌های هیدروترمال تشکیل شده در سیستم پورفیری را تشخیص داد (Pour and Hashim, 2012). در این پژوهش، از داده‌های سنجنده ASTER برای استخراج آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک بر مبنای روش برازش حداقل مربعات (Ls-fit) (Asadi Haroni and Lavafan, 2007) و از تصاویر ETM^{+} نیز برای استخراج آلتراسیون اکسید آهن در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. در نهایت ۳ نقشه پیوسته فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمال آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن تهیه شد (شکل‌های ۲- ت، ث و د).

۴- ۲. گسسته‌سازی نقشه‌های شاهد بر اساس روش فرکتال

یکی از بزرگ‌ترین مزیت‌های روش فرکتال عیار- مساحت (Cheng et al., 1994) این است که همزمان با فراوانی داده‌ها، میزان مساحت اشغال شده توسط آنها را نیز لحاظ می‌کند و به همین دلیل روش بسیار موفقی در جداسازی آنومالی از زمینه به شمار می‌رود (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018a). یکی از کاربردهای

Archive of SID
www.SID.ir

این روش، استفاده از شمارش جعبه‌ای برای شناسایی و جداسازی حدود آستانه است. در این روش، مساحت کل پیکسل‌های مربوط به یک عیار مشخص با یکدیگر جمع و داده‌های به دست آمده در قالب یک نمودار تمام‌لگاریتمی عیار در مقابل مساحت رسم می‌شوند. سپس خطوط مستقیمی بر اساس قانون کمترین فاصله از نقاط، به نمودار برازش می‌شود. پس از برازش خطوط به نمودار، در جاهایی که تغییر شیب رخ داده است و خطوط دچار شکستگی شده‌اند، جوامع مختلف آنومالی از هم جدا می‌شوند (Ghezelbash and Maghsoudi, 2018a; Yousefi and Carranza, 2015).



شکل ۲- نقشه‌های با مقادیر پیوسته برای لایه‌های اکتشافی: الف) ژئوشیمیایی چندعنصری (PC1)؛ ب) فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن؛ پ) چگالی گسل؛ ت) فاصله از آلتراسیون آرژیلیک؛ ث) فاصله از آلتراسیون فیلیک؛ د) فاصله از آلتراسیون اکسید آهن.

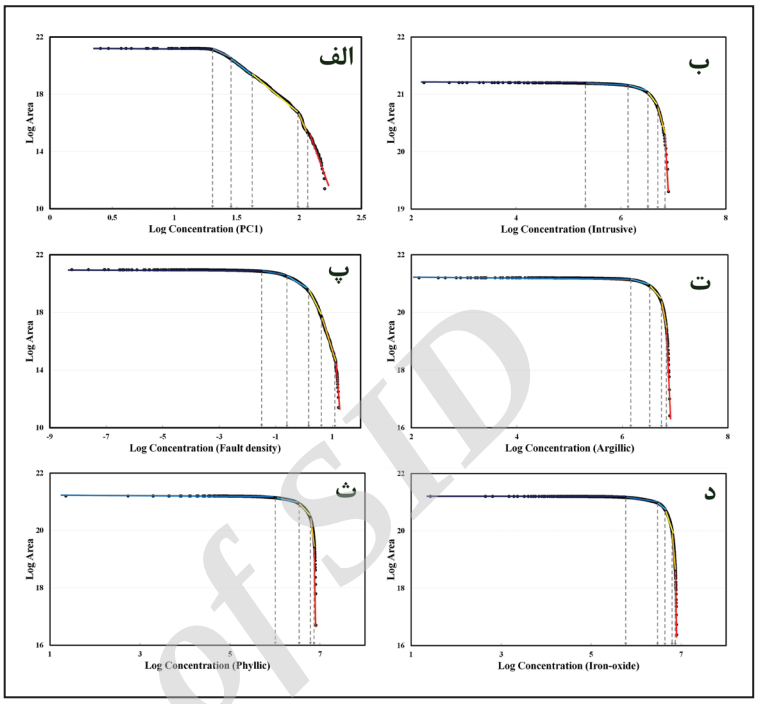
جدول ۱- مقادیر لودینگ مولفه‌های اصلی مربوط به ۱۰ عنصر انتخابی نرمال شده و مقدار ویژه، واریانس و واریانس تجمعی مربوط به هر یک از مولفه‌های اصلی.

Elements	PC1	PC2	PC3
Ag	0.425	0.154	0.685
As	0.406	0.752	0.077
Au	0.687	0.361	0.127
Bi	0.758	0.088	0.215
Cu	0.829	0.078	0.165
Hg	-0.211	0.608	0.1
Mo	0.839	0.027	0.209
Pb	0.389	0.078	0.604
Sb	0.441	0.749	0.145
Zn	0.013	0.11	0.887
Eigenvalue	3.173	1.683	1.68
Var.	31.728	16.825	16.804
Cum. Var.	31.728	48.553	65.357

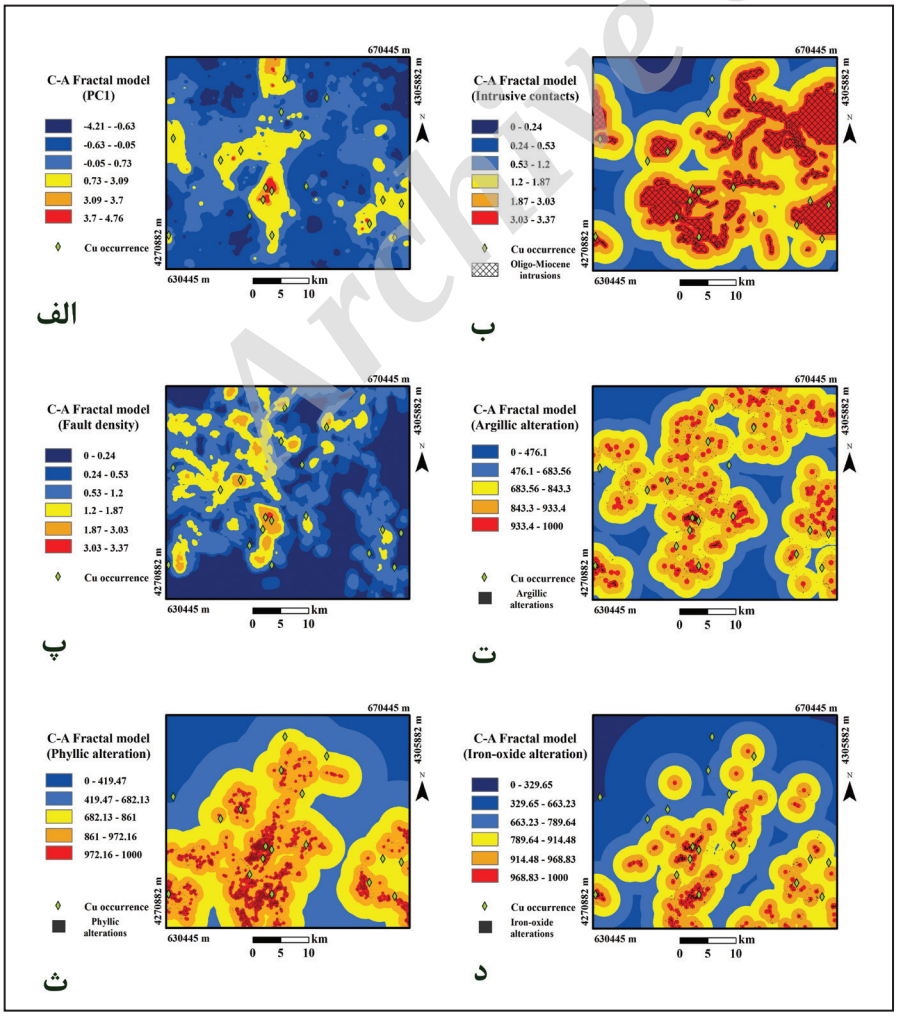
Archive of SID

www.SID.ir

در این پژوهش، ابتدا بر اساس روش شمارش جعبه‌ای، نمودارهای تمام‌لگاریتمی عیار- مساحت برای هر یک از ۶ لایه اطلاعاتی پیوسته شامل نقشه ژئوشیمیایی به دست آمده از فاکتور اول روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، نقشه چگالی گسل، نقشه فاصله از توده‌های نفوذی الیگومیوسن و نقشه‌های فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن ترسیم شدند (شکل ۳) و سپس مشخص شد که لایه‌های اطلاعاتی مربوط به ژئوشیمی، چگالی گسل و فاصله از توده‌های نفوذی و از آلتراسیون اکسید آهن ۵ حد آستانه و ۶ جامعه مختلف دارند و لایه‌های مربوط به فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک دارای ۴ حد آستانه و به تبع آن ۵ جامعه مختلف هستند (شکل ۴).



شکل ۳- نمودارهای تمام لگاریتمی عیار- مساحت برای لایه‌های اکتشافی: الف) ژئوشیمیایی چند عنصری (PC1)؛ ب) فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن، پ) چگالی گسل، ت) فاصله از آلتراسیون آرژیلیک، ث) فاصله از آلتراسیون فیلیک؛ د) فاصله از آلتراسیون اکسید آهن.



شکل ۴- نقشه‌های کلاسه‌بندی شده با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت برای لایه‌های اکتشافی: الف) ژئوشیمیایی چند عنصری (PC1)؛ ب) فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن، پ) چگالی گسل، ت) فاصله از آلتراسیون آرژیلیک، ث) فاصله از آلتراسیون فیلیک؛ د) فاصله از آلتراسیون اکسید آهن.

Archive of SID

www.SID.ir

۴- ۳. تلفیق لایه‌های اکتشافی با استفاده از روش AHP-TOPSIS

هدف اصلی این پژوهش ترکیب لایه‌های اطلاعاتی شاهد و شناسایی مناطق دارای پتانسیل مس پورفیری با استفاده از روش تلفیقی AHP-TOPSIS به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره ترکیبی است. این روش که ترکیبی از روش‌های AHP (Saaty, 1990) و TOPSIS است، ۳ گام اصلی دارد: ۱) تعیین معیارها برای استفاده در مدل‌سازی. ۲) تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش AHP. ۳) تلفیق نهایی و تعیین پتانسیل محدوده با استفاده از روش TOPSIS.

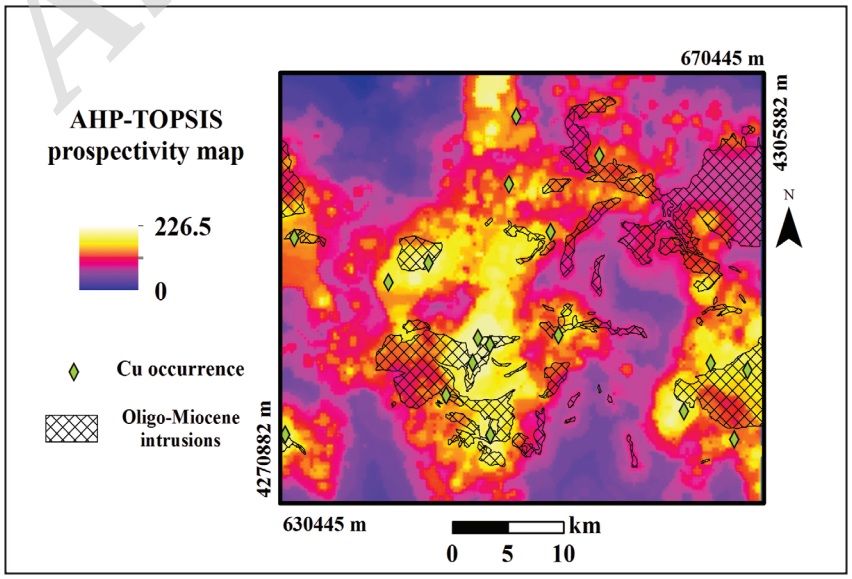
در مرحله نخست از گام اول، اطلاعات اکتشافی موجود از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری و یک ساختار سلسله مراتبی برای اکتشاف مس پورفیری بر اساس معیارهای اکتشافی در نظر گرفته می‌شود. در این ساختار سلسله مراتبی، هدف پژوهش که پتانسیل‌یابی کانی‌زایی مس پورفیری است، در رأس ساختار سلسله مراتبی، معیارهای اکتشافی در رده بعدی و جایگزین‌ها در رده سوم جای می‌گیرند. در مرحله دوم از گام اول، یک ماتریس تصمیم بر مبنای مقایسه زوجی تشکیل می‌شود و ۶ معیار اکتشافی بر اساس نظرات متخصصین با یکدیگر در این ماتریس قرار می‌گیرند. در گام دوم، پس از تشکیل ماتریس تصمیم، با استفاده از روش AHP، به هر یک از معیارها وزن مناسبی اختصاص داده می‌شود. سپس هر یک از زیرمعیارها نیز به‌صورت مقایسه زوجی با استفاده از روش AHP وزن‌دهی می‌شوند. در گام سوم، بر اساس مقادیر اوزان محاسبه شده برای معیارها و زیر معیارها، ماتریس تصمیم نهایی تشکیل و با استفاده از روش TOPSIS همه جایگزین‌ها رتبه بندی و وزن‌دهی می‌شوند و نقشه پتانسیل نهایی تولید می‌شود.

– **محاسبه اوزان معیارها و زیرمعیارها:** در این پژوهش پس از تعیین معیارهای اکتشافی اصلی شامل نقشه ژئوشیمیایی چندعنصری، نقشه فاصله از توده‌های نفوذی الیگو- میوسن، نقشه چگالی گسل و نقشه‌های فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمال آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن، ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شد. در این ماتریس، ۶ معیار اصلی بر اساس نظرات کارشناسان علوم زمین و با استفاده از جدول شاخص وزن‌دهی (Saaty, 1994) به‌صورت مقایسه زوجی وزن‌دهی شدند و در نهایت با استفاده از روش AHP مقدار اوزان هر یک از معیارها به دست آمد (جدول ۲). لایه ژئوشیمیایی چند عنصری با مقدار وزن ۰/۳۷ به عنوان مؤثرترین لایه انتخاب شد که در تلفیق نهایی بیشترین تأثیرگذاری را دارد. پس از لایه ژئوشیمیایی چندعنصری، لایه‌های فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک با مقدار وزن ۰/۱۹ در رده دوم قرار می‌گیرند. لایه فاصله از توده‌های نفوذی نیز با مقدار وزن ۰/۱۱ پس از لایه‌های آلتراسیون آرژیلیک و فیلیک، مؤثرترین لایه محسوب می‌شود و در نهایت لایه‌های مربوط به چگالی گسل و آلتراسیون اکسید آهن با مقدار وزن ۰/۰۶ در رده آخر قرار می‌گیرند.

برای وزن‌دهی به هر یک از زیرمعیارها با استفاده از روش AHP، ابتدا جوامع مختلف هر یک از ۶ معیار اصلی با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت شناسایی و تفکیک شدند. طبق این روش، لایه‌های ژئوشیمیایی چند عنصری، چگالی گسل، فاصله از توده‌های نفوذی و فاصله از آلتراسیون اکسید آهن دارای ۶ جامعه متنوع و لایه‌های فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک و فیلیک دارای ۵ جامعه گوناگون هستند. در این مرحله برای کلاس‌های مختلف هر یک از لایه‌های اکتشافی معیار، یک بار ماتریس تصمیم بر اساس مقایسه زوجی با استفاده از نظرات متخصصین، تشکیل شد و برای تمام کلاس‌های معیارهای مختلف، با استفاده از روش AHP وزن‌دهی صورت گرفت که نتایج حاصل در جدول ۳ آورده شده است.

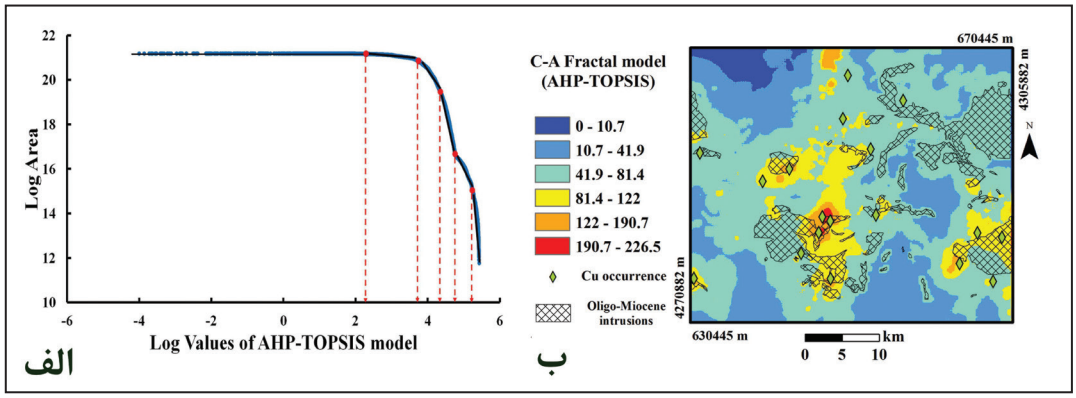
– **محاسبه اوزان جایگزین‌ها با استفاده از روش TOPSIS:** در بخش قبل، پس از شناسایی معیارهای مختلف و همین‌طور جداسازی جوامع مختلف هر یک از معیارها با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت، مطابق نظر کارشناسان متخصص در زمینه مس پورفیری، مقادیر وزن هر یک از ۶ معیار اصلی و زیرمعیارهای آنها با استفاده از روش AHP به دست آمد. در این مرحله همه وزن‌های محاسبه شده برای معیارها، زیرمعیارها (۶ معیار اکتشافی و کلاس‌های مختلف هر یک از معیارها) و جایگزین‌ها (سلول‌های نقشه‌ها) در قالب یک ماتریس تصمیم با ابعاد (تعداد معیارهای اکتشافی) ۶× (تعداد سلول‌های نقشه) ۱۶۰۲۱۰ قرار گرفتند. این ماتریس به‌عنوان یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره مطرح بوده و با استفاده از الگوریتم TOPSIS که در محیط نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شده است، تمامی جایگزین‌ها (سلول‌های نقشه‌ها) بر اساس نزدیکی به راه حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه حل ایده‌آل منفی وزن‌دهی می‌شوند و در نهایت وزن نهایی هر یک از جایگزین‌ها با در نظر گرفتن تمامی معیارهای اکتشافی محاسبه می‌شود.

با استفاده از این مقادیر، نقشه نهایی پتانسیل مس پورفیری با مقادیر پیوسته توسط روش AHP-TOPSIS در بخش مرکزی برگه ورزقان به دست آمد (شکل ۵). سپس با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت، نمودار تمام‌لگاریتمی عیار در مقابل مساحت ترسیم (شکل ۶- الف) و نقشه نهایی کلاسه‌بندی شده با ۶ جامعه گوناگون حاصل شد (شکل ۶- ب).



شکل ۵- نقشه پیوسته نواحی دارای پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در بخش مرکزی ورقه ورزقان با استفاده از روش AHP-TOPSIS.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶- الف) نمودار تمام لگاریتمی عیار- مساحت؛ ب) نقشه کلاسه بندی شده با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت در مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در بخش مرکزی ورقه ورزقان با استفاده از روش AHP-TOPSIS.

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی و اوزان محاسبه شده برای هر یک از معیارهای اکتشافی با استفاده از روش AHP.

Criteria	PC1	Argillic	Phyllic	Intrusive	Iron-oxide	Fault	Weights
PC1	1	2	2	3	5	5	0.37
Argillic	0.5	1	1	2	3	3	0.19
Phyllic	0.5	1	1	2	3	3	0.19
Intrusive	0.33	0.5	0.5	1	2	2	0.11
Iron-oxide	0.2	0.33	0.33	0.5	1	1	0.06
Fault	0.2	0.33	0.33	0.5	1	1	0.06

جدول ۳- اوزان محاسبه شده برای هر یک از کلاس‌های مختلف مربوط به معیارها با استفاده از روش AHP.

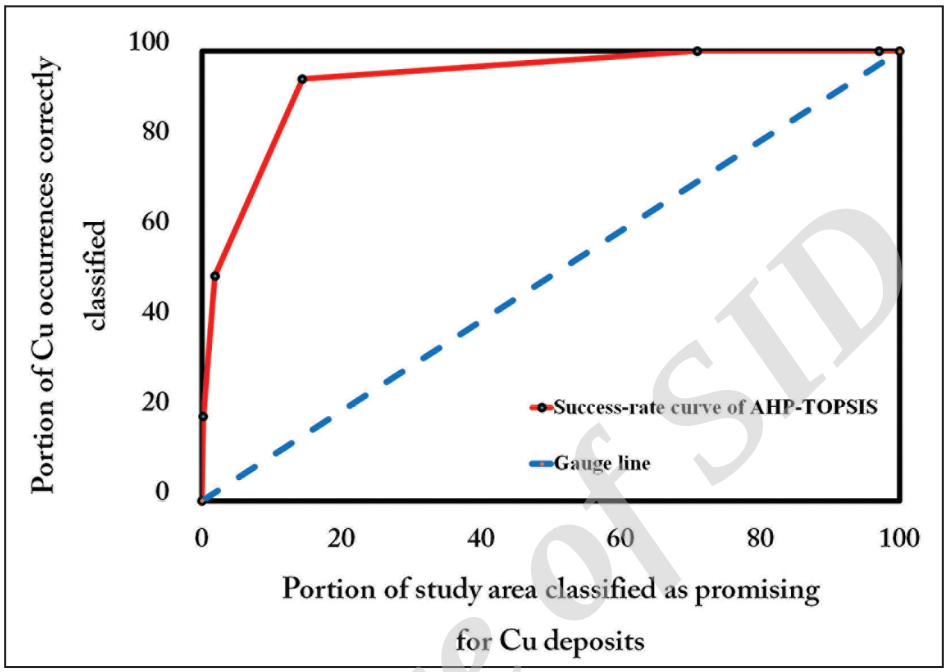
Criteria	Classes	Weights	Criteria	Classes	Weights
PC1	1	0.033	Intrusive	1	0.033
	2	0.046		2	0.046
	3	0.095		3	0.095
	4	0.158		4	0.158
	5	0.274		5	0.274
	6	0.391		6	0.391
Argillic	1	0.046	Phyllic	1	0.046
	2	0.09		2	0.095
	3	0.14		3	0.158
	4	0.27		4	0.274
	5	0.44		5	0.391
Iron-oxide	1	0.033	Fault density	1	0.033
	2	0.046		2	0.046
	3	0.095		3	0.095
	4	0.158		4	0.158
	5	0.274		5	0.274
	6	0.391		6	0.391

- ارزیابی کمی مدل حاصل شده با استفاده از منحنی نرخ موفقیت: برای ارزیابی عملکرد مدل‌های حاصل از پتانسیل‌یابی مواد معدنی باید از یک روش صحت‌سنجی دقیق ریاضی استفاده کرد. منحنی نرخ موفقیت، یکی از روش‌های صحت‌سنجی معتبر است که با در نظر گرفتن همزمان جوامع آنومالی حاصل و رخدادهای کانی‌زایی شناخته شده در منطقه مورد مطالعه، به‌طور کمی به ارزیابی صحت مدل‌سازی می‌پردازد (Carranza and Laborte, 2015; Parsa et al., 2016). برای تعیین میزان صحت مدل‌های حاصل از پتانسیل‌یابی معدنی و همچنین مقایسه کارآیی چند مدل به‌صورت همزمان، Parsa et al. (2016) منحنی نرخ موفقیت بهبود یافته را پیشنهاد دادند (Parsa et al. 2016; Ghezelbash and Maghsoudi, 2018b). در این نمودار از یک خط قطری (خط سنجش) برای تعیین میزان صحت و کارآیی

Archive of SID
www.SID.ir

مدل‌سازی بهره گرفته می‌شود. بدین صورت که اگر منحنی نرخ موفقیت ترسیم شده برای مدل نهایی بالاتر از خط سنجش قرار بگیرد، نشان‌دهنده ارتباط فضایی مثبت بین نواحی امیدبخش حاصل از مدل پیش‌بینی کننده و کانی‌زایی موجود در منطقه مورد مطالعه است و برعکس. در واقع با ترسیم این نمودار، می‌توان صحت مدل‌سازی را با کاهش میزان عدم قطعیت پیش‌بینی کرد و کارآیی روش مورد استفاده را افزایش داد.

در این مقاله از منحنی نرخ موفقیت برای ارزیابی کمی مدل کلاسه بندی شده AHP-TOPSIS استفاده شده است (شکل ۷). برای ترسیم این نمودار از حدود آستانه حاصل از روش فرکتال عیار- مساحت استفاده شده است که بر روی مدل پیوسته AHP-TOPSIS (شکل ۵) اعمال شد. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، منحنی نرخ موفقیت حاصل از مدل گسسته AHP-TOPSIS بسیار بالاتر از خط سنجش جای گرفته است. این امر نشان‌دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز مدل AHP-TOPSIS در به تصویر کشیدن نواحی امیدبخش حاصل از کانی‌زایی مس پورفیری است.



شکل ۷- منحنی نرخ موفقیت ترسیم شده برای مدل گسسته پیش‌بینی کننده AHP-TOPSIS.

۵- بحث

در این مقاله، یک روش نوآورانه تلفیق داده‌ها از ترکیب روش فرکتال عیار- مساحت و AHP-TOPSIS برای مدل‌سازی پتانسیل مس پورفیری ارائه شده است. در گام نخست با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت، ۶ لایه اکتشافی شامل نقشه ژئوشیمیایی حاصل از مؤلفه اول (PC1)، نقشه‌های فاصله از آلتراسیون‌های آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن، نقشه فاصله از توده‌های نفوذی و نقشه چگالی گسل با توجه به ابعاد فرکتالی حاصل از نمودارهای تمام لگاریتمی، به جوامع مختلف تقسیم شدند. سپس در گام دوم روش ترکیبی AHP-TOPSIS برای تلفیق نهایی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. روش AHP-TOPSIS که بر مبنای دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP و TOPSIS است، یک روش ترکیبی دانش- داده‌محور توأمان محسوب می‌شود. زیرا در بخش محاسبات مربوط به AHP برای محاسبه اوزان معیارها و زیرمعیارها، از نظرات متخصصین خبره در علم زمین‌شناسی و معدن برای تشکیل ماتریس مقایسات زوجی استفاده شد که در نهایت برای هر یک از معیارها و زیرمعیارها وزن‌های مناسب اختصاص داده شد. سپس وزن‌های محاسبه شده برای هر یک از زیرمعیارها در نقشه‌های آنومالی هر یک از لایه‌های اکتشافی اعمال، ماتریس تصمیم نهایی بر مبنای مقادیر اختصاص یافته به هر یک از سلول‌ها (جایگزین‌ها) تشکیل و الگوریتم TOPSIS بر روی این ماتریس اعمال شد. لازم به ذکر است که در این مرحله همه جایگزین‌ها (سلول‌ها) وزن مناسبی را فقط بر اساس فاصله از راه حل ایده‌آل مثبت و منفی و بدون در نظر گرفتن نظر کارشناسان دریافت می‌کنند. بنابراین روش AHP-TOPSIS یک روش ترکیبی دانش- داده‌محور توأمان است. در نهایت نقشه پیوسته پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری بر مبنای روش AHP-TOPSIS تولید شد. در ادامه نقشه پیوسته پتانسیل نهایی مس پورفیری با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت به ۶ جامعه مختلف آنومالی با مقادیر کم تا زیاد تفکیک شد. در گام نهایی با ترسیم منحنی نرخ موفقیت (شکل ۷) مشخص شد که آنومالی‌های به دست آمده با استفاده از روش AHP-TOPSIS، همبستگی فضایی مثبت بالایی با رخدادهای کانی‌زایی مس در بخش مرکزی ورزقان نشان می‌دهند که این امر نشانگر توانایی بالای این روش در شناسایی مناطق کانی‌زایی مس پورفیری است. همچنین با مقایسه ارتباط فضایی توده‌های نفوذی الیگو- میوسن با آنومالی‌های حاصل شده، صحت کار روش AHP-TOPSIS بیشتر نمایان می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر درباره کاربرد موفق روش ترکیبی دانش- داده‌محور AHP-TOPSIS به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در بخش مرکزی ورقه ورزقان در استان آذربایجان شرقی بحث می‌کند. در این پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی حاصل از داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و دورسنجی به عنوان معیارهای اکتشافی تفکیک شده به جوامع مختلف با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت، برای استفاده در تلفیق نهایی با روش AHP-TOPSIS به کار گرفته شده‌اند. به‌کارگیری همزمان سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و MATLAB، نقش بسیار مهمی در کمی‌سازی اطلاعات کیفی و تلفیق لایه‌های مختلف ایفا می‌کند. مقایسه آنومالی‌های حاصل شده از روش AHP-TOPSIS با رخدادهای کانی‌زایی مس موجود در منطقه، حاکی از ارتباط فضایی مثبت این رخدادها با آنومالی‌های به‌دست آمده است. مدل نهایی کانی‌زایی مس پورفیری حاصل شده، می‌تواند برای مطالعات اکتشافی دقیق‌تر در محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد.

Archive of SID

www.SID.ir

کتابنگاری

قزلباش، ر.، ۱۳۹۵- بررسی‌های ژئوشیمیایی و کانی‌زایی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

References

Abedi, M. and Norouzi, G. H., 2012- Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration. Journal of Applied Geophysics, 83, 35-45.

Abedi, M., Norouzi, G. H. and Bahroudi, A., 2012- Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas. Computers and Geosciences, 46, 272-283.

Abedi, M., Norouzi, G. H. and Fathianpour, N., 2013- Fuzzy outranking approach: a knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21, 556-567.

Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015- Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. Ore Geology Reviews, 70, 385-406.

Agterberg, F. P. and Bonham-Carter, G. F., 1999- Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration. In Proceedings of the 28th International Symposium on Applications of Computer in the Mineral Industry (APCOM), Golden, Colorado (Vol. 483, p. 490).

Alavi, M., 1994- Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics, 229(3), 211-238.

An, P., Moon, W. M. and Rencz, A., 1991- Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. Canadian Journal of Exploration Geophysics, 27(1), 1-11.

Asadi Haroni, H. A. and Lavafan, A., 2007- Integrated Analysis of ASTER and Landsat ETM Data to Map Exploration Targets in the Muteh Gold-Mining Area, IRAN. In 5th International Symposium on Spatial Data Quality, Enschede, pp. 13-15.

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, 1-13.

Ataei, M., Sereshki, F., Jamshidi, M. and Jalali, S. M. E., 2008- Suitable mining method for Golbini No. 8 deposit in Jajarm (Iran) using TOPSIS method. Mining Technology.

Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, 13, 398.

Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2001- Logistic regression for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. Exploration and Mining Geology, 10(3), 165-175.

Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2003- Evidential belief functions for data-driven geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. Ore Geology Reviews, 22(1), 117-132.

Carranza, E. J. M. and Laborte, A. G., 2015- Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines). Computers and Geosciences, 74, 60-70.

Carranza, E. J. M., 2008- Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS (Vol. 11). Elsevier.

Carranza, E. J. M., 2011- Editorial: Geocomputation of mineral exploration targets. Computers and Geosciences, 37(12), 1907-1916.

Carranza, E. J. M., Mangaoang, J. C. and Hale, M., 1999- Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines. Natural Resources Research, 8(2), 165-173.

Cheng, Q., 2007- Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. Ore Geology Reviews, 32(1), 314-324.

Cheng, Q., Agterberg, F. P. and Ballantyne, S. B., 1994- The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. Journal of Geochemical Exploration, 51(2), 109-130.

Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018a- A hybrid AHP-VIKOR approach for prospectivity modeling of porphyry Cu deposits in the Varzaghan District, NW Iran. Arabian Journal of Geosciences, 11(11), 275.

Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018b- Comparison of U-spatial statistics and C–A fractal models for delineating anomaly patterns of porphyry-type Cu geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. Comptes Rendus Geoscience, 350(4), 180-191.

Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Daviran, M., 2018- Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. Acta Geochimica, 1-14.

Hezarkhani, A., 2006- Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 27(3), 326-340.

Hosseinali, F. and Alesheikh, A. A., 2008- Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration. American Journal of Applied Sciences, 5(9), 1187-1198.

Archive of SID
www.SID.ir

Hwang, C. L. and Yoon, K., 1981- Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making (pp. 58-191). Springer, Berlin, Heidelberg.

Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010- Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar–Arasbaran volcanic belt, northern Iran. International Geology Review, 52(4-6), 608-630.

John, A. D., 2010- Porphyry Copper Deposit Model. The Book of USGS, Scientific Investigations Report 2010 – 5070 – B.

Mehrpartou, M., 1993- Contributions to the geology, geochemistry, ore genesis and fluid inclusion investigations on Sungun Cu-Mo porphyry deposit (North-West of Iran).

Nykänen, V. and Salmirinne, H., 2007- Prospectivity analysis of gold using regional geophysical and geochemical data from the Central Lapland Greenstone Belt, Finland. Geological Survey of Finland, 251-269.

Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M. and Sadeghi, M., 2016- Prospectivity modeling of porphyry-Cu deposits by identification and integration of efficient mono-elemental geochemical signatures. Journal of African Earth Sciences, 114, 228-241.

Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2015- Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahrud area (NW, Iran). Earth Science Informatics, 8(1), 207-220.

Pazand, K., Hezarkhani, A. and Ataei, M., 2012- Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran). Computers and Geosciences, 49, 62-71.

Porwal, A., Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2003a- Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. Natural Resources Research, 12(1), 1-25.

Porwal, A., Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2004- A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping. Mathematical Geology, 36(7), 803-826.

Porwal, A., Carranza, E. J. M. and Hale, M., 2006- Bayesian network classifiers for mineral potential mapping. Computers and Geosciences, 32(1), 1-16.

Pour, A. B. and Hashim, M., 2012- The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. Ore Geology Reviews, 44, 1-9.

Saaty, T. L., 1990- How to make a decision: the analytic hierarchy process. European journal of operational research, 48(1), 9-26.

Saaty, T. L., 1994- Fundamentals of decision making and priority theory with the AHP.

Samimi Namin, F., Shahriar, K., Ataee-Pour, M. and Dehghani, H., 2008- A new model for mining method selection of mineral deposit based on fuzzy decision making. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(7), 385-395.

Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015- Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping. Computers and Geosciences, 83, 72-79.

Zuo, R. and Carranza, E. J. M., 2011- Support vector machine: a tool for mapping mineral prospectivity. Computers and Geosciences, 37(12), 1967-1975.

Archive of SID

www.SID.ir

Application of hybrid AHP-TOPSIS method for prospectivity modeling of Cu porphyry in Varzaghan district, Iran

R. Ghezelbash[1] and A. Maghsoudi[2*]

[1]Ph.D. Student, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

[2]Assistant Professor, Faculty of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2017 May 16 Accepted: 2017 November 14

Abstract

Varzaghan district is located in NW of Arasbaran magmatic belt (AMB) which is one of the most highly mineralized region in Iran and host to a significant number of porphyry Cu deposits such as Sungun Cu-Mo porphyry deposit. The main goal of this study is synthesizing diverse raster-based evidence layers including geochemical, alteration and geological geo-data sets for mineral prospectivity modeling (MPM). For this purpose, firstly, continuous values of six favorable evidential maps as main criteria (geochemical signature of PC1 scores, values of proximity to argillic, phyllic and iron-oxide alterations, values of proximity to Oligo-Miocene intrusions and fault density) were divided into reasonable classes by applying concentration-area fractal model and then discretized layers were integrated using analytical hierarchy process (AHP) and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) to generate a final map of porphyry Cu potential within the central part of Varzaghan district. Finally, the success-rate curve of the AHP-TOPSIS model as a quantitative evaluation method according to the locations of known Cu occurrences was drawn. Results revealed the successful performance of AHP-TOPSIS model in portraying the prospective areas related to porphyry Cu mineralization.

Keywords: Porphyry Cu, Mineral potential modeling, Concentration-area fractal, AHP-TOPSIS, Success-rate curve, Varzaghan

For Persian Version see pages 33 to 42

*Corresponding author: A. Maghsoudi; E-mail: a.maghsoudi@aut.ac.ir

Archive of SID

Created with nitroPDF professional
www.SID.ir
download the free trial online at nitropdf.com/professional