

به کارگیری روش‌های ترکیبی Fuzzy-AHP و Fuzzy-GAMMA جهت یافتن نواحی امیدبخش طلا در منطقه تخت سلیمان

رضا قزلباش^۱، عباس مقصودی^{۲*}، مهرداد دویران^۳

۱- دانشجوی دکتری اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار گروه اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۳/۲۴

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۸

چکیده

روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (Fuzzy-AHP) برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در منطقه تخت سلیمان به‌عنوان یک روش دانش‌محور براساس وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی شاهد طبق نظر کارشناس متخصص، مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، ابتدا تمامی معیارها و زیر معیارهای حاصل از مجموعه داده‌های اکتشافی ژئوشیمیایی، دورسنجی، زمین‌شناسی و ساختاری با استفاده از روش AHP، وزن‌دهی شده و سپس براساس منطق فازی، در دامنه ۰ تا ۱ قرار گرفتند. سپس، تمامی لایه‌های فازی‌سازی شده مطابق اوزان اختصاص یافته، با یکدیگر تلفیق شدند و مدل نهایی پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه براساس روش Fuzzy-AHP حاصل شد. هم‌چنین، در این پژوهش از یک روش فازی دیگری بر اساس عملگرهای فازی OR و GAMMA به نام روش Fuzzy-GAMMA با مقدار $g=0.9$ برای تولید نقشه نواحی امید بخش کانی‌زایی طلا در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. در نهایت، مکان رخدادهای کانی‌زایی طلا برای مقایسه میزان صحت نتایج مورد استفاده قرار گرفتند که نتایج حاصل نشان دهنده دقت بالاتر روش Fuzzy-AHP نسبت به روش دیگر در مدل‌سازی نواحی امیدبخش می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی پتانسیل معدنی، Fuzzy-AHP، Fuzzy-GAMMA، تلفیق، کانی‌زایی طلا، تخت سلیمان.

مقدمه

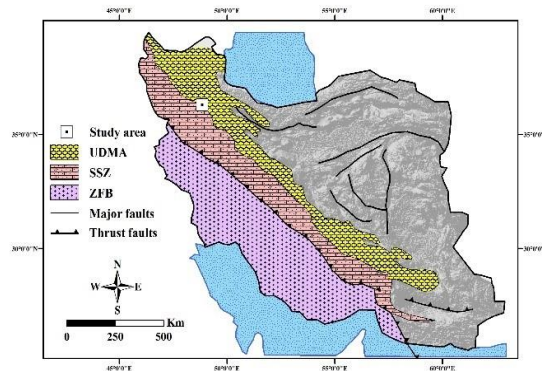
اکتشاف منابع معدنی فرآیند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده‌های مکانی مختلف (ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دورسنجی، زمین‌شناسی و غیره) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که هدف نهایی آن، اکتشاف نوع خاصی از کانی‌زایی می‌باشد. جهت نیل به این هدف، می‌بایست داده‌های مکانی مختلف برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) جمع‌آوری، آنالیز و تلفیق شوند (کارانزا، ۲۰۰۸؛ بنهام کارتر، ۱۹۹۴؛ نجفی و همکاران، ۲۰۱۴؛ قزلباش و مقصودی، ۲۰۱۸a, b, c). روش‌های دانش‌محور و داده‌محور دو نوع روش اصلی مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) برای تلفیق لایه‌های وزن‌دار مختلف جهت شناسایی نواحی امید بخش نوع خاصی از کانی‌زایی می‌باشند (بنهام کارتر، ۱۹۹۴؛ کارانزا، ۲۰۰۸؛ یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵؛ قزلباش و همکاران، a, b, c). روش‌های داده‌محور برای مناطقی که کارهای اکتشافی در آن‌ها به خوبی صورت گرفته است (Brown fields)، مناسب هستند که در آن‌ها، کانسارها و اندیس‌های شناخته شده از منطقه مورد مطالعه که احتمال کانی‌زایی در آن‌ها بسیار بالا می‌باشد، برای تعیین روابط مکانی داده‌ها به عنوان نقاط آموزشی در نظر گرفته می‌شوند (عابدی و همکاران، ۲۰۱۳). انواع روش‌های داده‌محور شامل رگرسیون لجستیکی (چانگ و اگتربگ، ۱۹۸۰)، وزن‌های نشانگر (بنهام کارتر، ۱۹۹۴) تحلیل درخت تصمیم‌گیری (ردی و بنهام کارتر، ۱۹۹۱) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (هریس و پن، ۱۹۹۹؛ قزلباش و همکاران، ۲۰۱۸c) می‌باشند. روش‌های دیگر مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر مبنای دانش کارشناسان متخصص می‌باشد که بیشتر برای

مناطق که در آن‌ها کارهای اکتشافی کمتری صورت گرفته است (Green fields)، مناسب هستند. در این روش‌ها که به روش‌های دانش‌محور معروف هستند، وزن‌دهی به لایه‌های شاهد براساس نظرات کارشناسان متخصص صورت می‌گیرد (بنهام کارتر، ۱۹۹۴؛ کارانزا، ۲۰۰۸). انواع این روش‌ها شامل منطق بولی، همپوشانی شاخص (بنهام کارتر و همکاران، ۱۹۸۹)، منطق فازی (پوروال و همکاران، ۲۰۰۳) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (هریس و همکاران، ۱۹۹۵؛ قزلباش و مقصودی ۲۰۱۸b) می‌باشند. فرآیند 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، جایگزین‌های ممکن، خروجی‌های مختلف، معیارهای متفاوت و میزان عدم قطعیت داشته باشد (مرگیاس و همکاران، ۲۰۰۷؛ نجفی و همکاران، ۲۰۱۴). تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)، فرآیند انتخاب مناسب‌ترین جایگزین‌ها در حضور معیارهای چندگانه می‌باشد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) یکی از روش‌های معروف تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) می‌باشد که طی آن به معیارها و زیر معیارهای مختلف براساس قضاوت کارشناسانه و به صورت مقایسات زوجی، اوزان مناسب اختصاص می‌یابد (ساتی، ۱۹۹۰، ۲۰۰۵). بر مبنای این روش، تمامی لایه‌های اکتشافی شاهد براساس میزان اهمیتشان نسبت به لایه‌های دیگر در نوع خاصی از کانی‌زایی مورد نظر، وزن‌دهی می‌شوند و در نهایت اوزان محاسبه شده برای تلفیق نهایی لایه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب روش Fuzzy-AHP با منطق فازی تحت عنوان روش Fuzzy-AHP، یکی دیگر از روش‌های تصمیم‌گیری چند

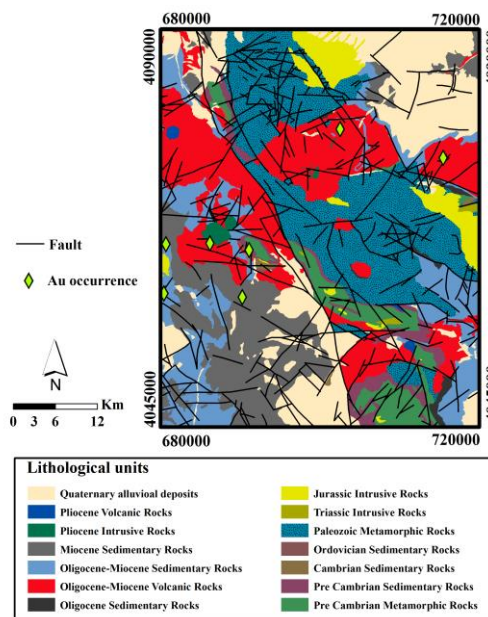
محدوده مورد مطالعه

ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان بخشی از چهارگوش ۱:۲۵۰۰۰۰ تکاب می‌باشد که بین طول شرقی ۴۷°۰۰' تا ۴۷°۳۰' و عرض شمالی ۳۶°۳۰' تا ۳۷°۰۰' قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه در بخش مرزی قوس ماگمایی ارومیه-دختر (UDMA) و زون سنندج-سیرجان (SSZ) جای گرفته است (شکل ۱). قوس ماگمایی ارومیه-دختر در طی پدیده فرورانش نئوتتیس به زیر زون سنندج سیرجان شکل گرفته است (علوی، ۱۹۹۴). تناوبی از فعالیت‌های کوهزایی نظیر ماگماتیسم، رسوبی شدن و متامورفیسم در این محدوده قابل مشاهده است (اسدی و هیل، ۲۰۰۱). ساختارهای زمین‌شناسی در این منطقه به طور کلی شامل واحدهای دگرگونی پرکامبرین، ولکانیک‌های ترشیری و رسوبات کواترنری می‌باشد (اسدی و هیل، ۲۰۰۱) (شکل ۲). از لحاظ سنگ‌شناسی، این منطقه بیشتر از سنگ‌های دگرگونی شیست، مرمر، گنایس و آمفیبولیت تشکیل شده است که با روند شمال غربی - جنوب شرقی در بخش میانی محدوده مورد نظر بلندترین ارتفاعات (کوه بلقیس و کوه قبله داغ) را تشکیل می‌دهند که توسط سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی الیگو-میوسن پوشیده شده‌اند. ردیف چینه‌ای این سنگ‌ها در منطقه مورد بررسی به ترتیب از پایین به بالا شامل سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، سنگ‌های رسوبی پرکامبرین پسین-کامبرین پیشین و کامبرین-اردویسین، سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک، توده‌های نفوذی دیوریتی، گرانودیوریتی و گرانیتی، سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی الیگو-میوسن و نهشته‌های جوان پلیوسن و کواترنری می‌باشد (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۵) (شکل ۲).

معیاره برای حل مسائل تصمیم‌گیری می‌باشد که در علوم مختلف به‌طور گسترده استفاده شده است (لی، ۲۰۱۳؛ هوشیار، ۲۰۱۴؛ کوبلر، ۲۰۱۴؛ تان، ۲۰۱۴). تئوری فازی (زاده، ۱۹۶۵)، به‌صورت دانش‌محور برای وزن‌دهی به لایه‌های شاهد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (کارانزا و هیل، ۲۰۰۱؛ یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵؛ پوروال و همکاران، ۲۰۰۳). گام اصلی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر مبنای تئوری فازی، اختصاص دادن مقادیر عضویت فازی به ویژگی‌های مکانی در دامنه ۰ تا ۱ می‌باشد، که به آن فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی شاهد گفته می‌شود (کارانزا، ۲۰۰۸؛ یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵). در روش Fuzzy-AHP، لایه‌های با مقادیر عضویت فازی تحت یک ساختار سلسله مراتبی با یکدیگر ترکیب شده و مدل نهایی پتانسیل کانی‌زایی مورد نظر در منطقه مورد مطالعه حاصل می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، به نقشه درآوردن پتانسیل کانی‌زایی طلا در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان می‌باشد. در این پژوهش از روش ترکیبی Fuzzy-AHP برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. بدین منظور از روش AHP برای وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی گوناگون مربوط به ۴ معیار اصلی ژئوشیمی، دورسنجی، زمین‌شناسی و ساختاری و همچنین از تئوری فازی برای فازی‌سازی هر یک از لایه‌های اکتشافی بهره گرفته شده است. همچنین، برای مقایسه نتایج حاصل شده از این روش، در نوع دیگری از مدل‌سازی کانی‌زایی طلا در محدوده مطالعاتی، از روش Fuzzy-GAMMA براساس عملگرهای OR و GAMMA بهره گرفته شده است که در نهایت، نتایج حاصل از دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۱: نقشه ساده‌شده زون‌های ساختاری در ایران (کمان ماگمایی ارومیه-دختر (UMDA)، زون سنندج-سیرجان (SSZ)، کمر بند چین خورده زاگرس (ZFB)) و موقعیت منطقه مورد مطالعه (علوی، ۱۹۹۴).



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان (باباخانی، ۱۳۸۰).

کارلین درون محدوده مطالعاتی هستند (باباخانی، ۱۳۸۰). مهم‌ترین کنسارها و اندیس‌های طلائی موجود در این منطقه شامل آق‌دره، زرشوران، بایچه باغ و توزلار می‌باشد (شکل ۲).

مواد و روش‌ها

تئوری منطق فازی

تئوری منطق فازی به عنوان یک روش دانش محور برای اولین بار توسط زاده (زاده، ۱۹۶۵)

کانی‌زایی طلا در این منطقه، به طور کلی با فرایندهای هیدروترمال مرتبط با توده‌های آذرین ترشیری در ارتباط است که از نقطه نظر کانی‌زایی طلا، توده‌های اسیدی وارد شیب‌های پرکامبرین شده‌اند (قربانی، ۲۰۱۳؛ مقصودی و همکاران، ۲۰۰۵). بخش وسیعی از منطقه را سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی الیگو-میوسن پوشانده‌اند که بر روی سنگ‌های دگرگونی کهن قرار گرفته‌اند و میزبان‌های اصلی کانی‌زایی طلائی اپی‌ترمال و

موقعیت فضایی، یک وزن به خصوص بین ۰ تا ۱ اختصاص داده می‌شود. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از تئوری منطق فازی، ۵ عملگر کاربرد فراوانی برای ترکیب لایه‌های اکتشافی مختلف فازی‌سازی شده دارند که شامل عملگرهای AND فازی، OR فازی، PRODUCT جبری فازی، SUM جبری فازی و GAMMA فازی می‌باشند (بنهام کارتر، ۱۹۹۴). شرح مختصر هر یک از عملگرهای فوق در زیر آورده شده است: عملگر فازی AND: این عملگر معادل عملگر AND بولی در مقادیر عضویت تولید شده می‌باشد که با مقادیر کمینه کنترل می‌شود. این عملگر طبق فرمول رابطه ۱ مشخص می‌شود:

این عملگر مشابه عملگر OR بولی در مقادیر عضویت تولید شده می‌باشد که با مقادیر بیشینه کنترل شده و بیشتر در مواقعی که شواهد زیادی وجود نداشته باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این عملگر مطابق فرمول رابطه ۲ قابل بیان است:

در هر موقعیت از نقشه‌های ورودی فازی سازی شده می‌باشد؛ بنابراین عملگر Product دارای اثر کاهندگی می‌باشد، یعنی این عملگر باعث حضور مقادیر فازی خیلی پایین غیر صفر در مدل‌سازی می‌شود. این عملگر با استفاده از فرمول رابطه ۳ قابل بیان است:

عملگر فازی SUM: این عملگر، مکمل عملگر PRODUCT می‌باشد. خروجی جمع جبری عملگر SUM، بزرگتر یا مساوی بیشترین امتیاز

پیشنهاد شده است. این روش براساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد که در آن وزن دهی به لایه‌های شاهد اکتشافی بر مبنای اهمیت هر یک از لایه‌ها براساس قضاوت کارشناسان متخصص صورت می‌پذیرد. مبنای این روش به صورت تبدیل مقادیر داده‌های ورودی به خروجی‌های نرمال شده با محاسبه اوزان برای عضوهای فازی بر اساس تئوری مجموعه فازی می‌باشد. به علاوه، مقادیر عضو فازی برای هر یک از پیکسل‌های لایه‌های شاهد اکتشافی به صورت مقادیر پیوسته در دامنه ۰ تا ۱ می‌باشند. در تئوری منطق فازی، عضوهای فازی براساس فواصل معنادار از ویژگی‌های مختلف وزن دهی می‌شوند که برای هر پیکسل یا رابطه (۱)

$$F_{Combination} = \text{Min}(F_A, F_B, F_C, \dots)$$

که در این فرمول، FA، FB، FC و ... مقادیر فازی سازی شده مربوط به هر یک از نقشه‌های شاهد اکتشافی می‌باشد. این عملگر برای مواقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که حتماً می‌بایست دو یا چند شاهد برای بیان یک فرضیه موجود باشد تا بتوان آن فرضیه را قبول نمود. عملگر فازی OR:

رابطه (۲)

$$F_{Combination} = \text{Max}(F_A, F_B, F_C, \dots)$$

که در این فرمول، FA، FB، FC و ... مقادیر فازی سازی شده مربوط به هر یک از نقشه‌های شاهد اکتشافی می‌باشد.

عملگر فازی PRODUCT: با استفاده از این عملگر، مقادیر عضویت فازی ترکیب شده، همواره کوچکتر یا مساوی کمترین مقدار عضویت فازی

رابطه (۳)

$$F_{Combination} = \prod_{i=1}^n F_i$$

که در فرمول بالا، Fi مقادیر عضویت فازی برای هر یک از نقشه‌هایی می‌باشد که قرار است در تلفیق شرکت نمایند (i=1, 2, ..., n).

می‌شود. فرمول رابطه ۴ مربوط به محاسبات این عملگر می‌باشد.
 -عملگر فازی GAMMA: این عملگر ترکیبی از عملگرهای فازی SUM و PRODUCT را در خود دارد که به صورت رابطه ۵ قابل تعریف است:

رابطه ۵

$$F_{Combination} = (FAS)^\gamma \times (FAS)^{1-\gamma}$$

رتبه‌ای اختصاص داده شده می‌باشد (پازند و همکاران، ۲۰۱۵؛ قزلباش و مقصودی، ۲۰۱۸b).
 یک ساختار سلسله مراتبی به صورت کلی دارای سه سطح مختلف می‌باشد که سطح نخست مربوط به هدف مطالعه، سطح میانی مربوط به معیارها و زیرمعیارها و سطح نهایی مربوط به جایگزین‌ها می‌باشد. با استفاده از روش AHP، عناصر مربوط به سطح میانی (معیارها و زیرمعیارها) به صورت مقایسه زوجی و با استفاده از جدول استاندارد پیشنهاد داده شده توسط ساتی (۲۰۰۵) (جدول ۱) از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و با توجه به هدف تصمیم‌گیری رتبه‌بندی می‌شوند. ماتریس مقایسه زوجی برای n معیار مختلف به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود.
 و در نهایت مقادیر وزنی مناسب برای معیارها و زیر معیارها طبق رابطه ۷ محاسبه می‌گردد که در آن W بردار وزنی و بالاترین مقدار ویژه ماتریس می‌باشد.

فازی در هر موقعیت از نقشه‌های ورودی فازی سازی شده می‌باشد. بنابراین این عملگر دارای اثر افزایشی می‌باشد، یعنی باعث حضور مقادیر فازی خیلی بالای کمتر از ۱ در مدل‌سازی

رابطه ۴

$$F_{Combination} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - F_i) \right)$$

γ پارامتری است که مقدار آن بین ۰ و ۱ می‌تواند متغیر باشد (زیمرمن و زیسمو، ۱۹۸۰). عملگر GAMMA به طور همزمان حاوی جمع جبری عملگر SUM و PRODUCT در یک نقشه می‌باشد که با انتخاب مقدار مناسب اثرات افزایشی و کاهش‌دهی آن‌ها را تعدیل بخشیده و به عنوان بهترین عملگر برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی قابل استفاده می‌باشد.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای اولین بار توسط ساتی (۱۹۹۰) پیشنهاد شده و به صورت یک فرآیند سلسله مراتبی، براساس مقایسه زوجی اهمیت معیارها و زیر معیارهای اکتشافی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (زنگ و هواهنگ، ۲۰۱۱؛ ساتی، ۲۰۰۵). این فرآیند شامل سه گام اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای معیارها و زیرمعیارها و تلفیق نهایی براساس وزن‌های

رابطه ۶

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix}, a_{ij} > 0; a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}; a_{ii} = 1 \forall i.$$

رابطه ۷

$$AW = \lambda_{\max} W$$

جدول ۱: مقیاس پایه‌ای برای مقایسات زوجی با استفاده از روش (AHP) (ساتی، ۱۹۹۰).

| 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 |

مدل‌سازی

تولید لایه‌های اکتشافی

براساس شواهد و داده‌های اکتشافی موجود از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تخت سلیمان، ۴ فاکتور اصلی برای مدل‌سازی احتمال کانی‌زایی طلا در منطقه مطالعاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که شامل: (۱) معیار ژئوشیمیایی (داده‌های ژئوشیمیایی رسوب آبراه‌ای تک عنصری برای عناصر ردیاب طلا)، (۲) معیار دورسنجی (نقشه‌های دگرسانی‌های گرمابی فراهم شده از پردازش و آماده‌سازی تصاویر ASTER و ETM+، (۳) معیار زمین‌شناسی (واحد‌های سنگ‌شناسی مرتبط با کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه) و (۴) معیار ساختاری (نقشه گسل‌ها و خطواره‌های موجود در منطقه مورد مطالعه) می‌باشند که ترکیب این معیارهای اکتشافی، می‌تواند منجر به شناسایی نواحی امیدبخش کانی‌زایی طلا در ورقه تخت سلیمان گردد.

نقشه‌های تک عنصری ژئوشیمیایی

با استفاده از معیارهای ژئوشیمیایی، الگوهای رفتاری عناصر مرتبط با کانی‌زایی موجود در محدوده مورد مطالعه قابل شناسایی می‌باشند (پارسا و همکاران، ۲۰۱۶؛ قزلباش و مقصودی، ۲۰۱۸b). در این پژوهش از تعداد ۸۶۸ نمونه رسوبات آبراه‌ای که توسط سازمان زمین‌شناسی

و اکتشافات معدنی کشور (GSI) (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۵)، از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تخت سلیمان برداشت شده است، جهت مطالعات ژئوشیمیایی تک عنصری ردیاب‌های کانی‌زایی طلا استفاده شده است. در این راستا با توجه به کانی‌زایی طلای موجود در منطقه، عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان، بیسموت، تنگستن و مولیبدن به‌عنوان ردیاب‌های اصلی برای شناسایی این نوع کانسارها انتخاب شدند. در مرحله آماده‌سازی داده‌ها، با بررسی نحوه توزیع هر یک از عناصر، با استفاده از تابع تبدیل Ln، نرمال‌سازی داده‌ها انجام گرفت. برای نمایش توزیع عیار هر یک از عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان، تنگستن و مولیبدن از مقادیر نرمال شده آن‌ها استفاده شد و با استفاده از روش وزن‌دهی براساس معکوس فاصله (IDW)، در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 به صورت پیوسته درون یابی شدند.

نقشه‌های فاصله از دگرسانی گرمابی

با توجه به اهمیت تشخیص دگرسانی‌ها به عنوان شاخص اکتشافی کانی‌زایی، آشکارسازی این دگرسانی‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف نظیر تصاویر سنجنده ETM⁺ و ASTER صورت می‌گیرد (کروستا و همکاران، ۱۹۹۸). در این تصاویر با استفاده از باندهای مختلف و ترکیب

تهیه شده است. در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 به صورت دستی رقومی شده و به صورت فایل شیپ در دسترس قرار گرفتند و در نهایت نقشه فاصله از توده‌های آتشفشانی و رسوبی مربوط به دوره الیگو-میوسن برای استفاده در تلفیق نهایی و مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه، تهیه شدند.

نقشه چگالی گسل

اساساً کانی‌زایی کانسارهای فلزی از جمله طلا، توسط گسل‌ها و شکستگی‌ها که عامل اصلی بالا آمدن محلول‌های گرمابی هستند، کنترل می‌شوند. از نقطه نظر ساختاری، گسل‌های با روند شمال-شرقی جنوب غربی و شرقی-غربی در محدوده مورد مطالعه، یکی از کنترل‌کننده‌های اصلی کانی‌زایی طلای اپی‌ترمال و کارلین بوده (نظرپور، ۲۰۱۵) و شناسایی آن‌ها می‌تواند در پتانسیل‌یابی کانی‌زایی طلا کمک شایانی نماید. از این رو، خطواره‌ها و گسل‌های موجود در منطقه، ابتدا با استفاده از تصاویر ETM^+ شناسایی و تفکیک شده و سپس با گسل‌های ثبت شده در نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (باباخانی، ۱۳۸۰) که به صورت دستی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 رقومی‌سازی شده‌اند، مطابقت داده شدند. در نهایت نقشه چگالی گسل به عنوان یک معیار اصلی برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در تلفیق نهایی مورد استفاده قرار گرفته است.

فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی

یکی از مراحل مهم همسان‌سازی مقادیر لایه‌های اطلاعاتی شاهد، استفاده از روش‌های مبتنی بر منطق فازی می‌باشد که طی آن مقادیر تمامی لایه‌های اطلاعاتی در دامنه ۰ تا ۱ قرار می‌گیرند. در این پژوهش، برای فازی‌سازی تمامی لایه‌های اطلاعاتی شاهد، از تابع عضویت فازی $MSLarge$ استفاده شده است. طبق این تابع، مقادیر عضویت فازی براساس میانگین و انحراف داده‌های

آن‌ها با یکدیگر از طریق روش‌های پردازش تصویر، می‌توان کانی‌های مختلف با ویژگی‌های مشخص را آشکار نمود (پور و هاشم، ۲۰۱۱). در این پژوهش، تصاویر سنجنده ETM^+ برای استخراج دگرسانی اکسید آهن براساس روش نسبت بانندی به کار گرفته شده است و همچنین تصاویر سنجنده ASTER براساس شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های هیدروترمال فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و دگرسانی سیلیسی براساس روش‌های نسبت بانندی و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) در این محدوده استفاده شده است. در نهایت دگرسانی‌های شناسایی شده در نرم‌افزار ENVI، به صورت فایل شیپ ذخیره شده و نقشه‌های نهایی پیوسته فاصله از دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک، اکسید آهن و سیلیسی در محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.2 تولید شدند.

نقشه‌های فاصله از واحدهای زمین‌شناسی

ورقه تخت سلیمان به دلیل قرار گرفتن در ناحیه مرز میان زون‌های ارومیه-دختر و سنجندج سیرجان، میزبان دو نوع مختلف کانی‌زایی طلا شامل کانی‌زایی طلا از نوع اپی‌ترمال و کارلین می‌باشد (شهرستانی و مختاری، ۲۰۱۶). کانی‌زایی طلای اپی‌ترمال بیشتر در نواحی شرقی محدوده تشکیل شده‌اند در حالی که کانی‌زایی طلای کارلین بیشتر در غرب محدوده مطالعاتی دیده می‌شوند. میزبان اصلی کانسارهای اپی‌ترمال منطقه توده‌های آتشفشانی الیگو-میوسن می‌باشند (حیدری و همکاران، ۲۰۱۵) و کانسارهای کارلین بیشتر دارای میزبان‌های رسوبی مربوط به دوره الیگو-میوسن هستند (نظرپور، ۲۰۱۵). به دلیل اهمیت واحدهای لیتولوژیکی مذکور، این واحدها از نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (GSI) (باباخانی، ۱۳۸۰)

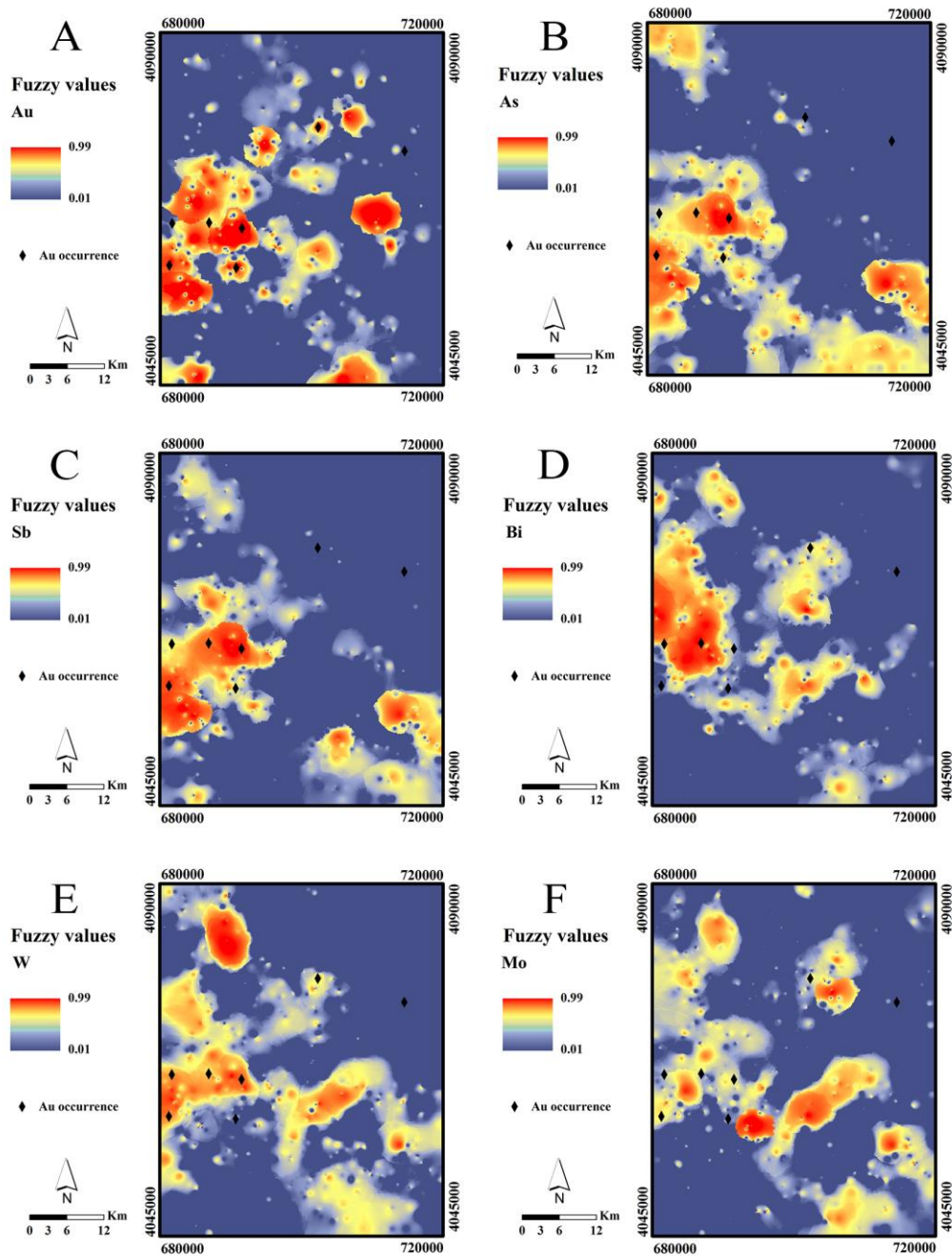
روش Fuzzy-GAMMA

در این تحقیق، براساس مجموعه داده‌های فضایی موجود از منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های فازسازی شده ۱۴ لایه اطلاعاتی پیوسته برای پتانسیل‌یابی کانی‌زایی طلا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لایه‌های اطلاعاتی پیوسته شاهد، می‌توانند بدون در نظر گرفتن رخداد‌های معدنی در منطقه و بدون گسسته‌سازی و کلاسه‌بندی مقادیر آن‌ها، با استفاده از یک تابع تبدیل مناسب، تولید شوند که در این مطالعه از روش فازسازی مقادیر سلول‌های هر یک از نقشه‌ها با استفاده از منطق فازی به صورت پیوسته استفاده شد. سپس در گام بعد، تمامی نقشه‌های اکتشافی شاهد فازی سازی شده، با استفاده از عملگرهای منطق فازی، بر مبنای فلوجارت مفهومی (شکل ۷) برای پتانسیل‌یابی کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه، با یکدیگر ترکیب شدند. طبق این فلوجارت (شکل ۷)، تلفیق لایه‌های شاهد در یک فرآیند دو مرحله‌ای و با استفاده از دو عملگر فازی اصلی انجام گرفته است. در گام نخست، تمامی لایه‌های اکتشافی شاهد پیوسته با ویژگی‌های مشابه توسط عملگر OR با یکدیگر تلفیق شدند (شکل ۷). با استفاده از این عملگر، ۶ لایه ژئوشیمیایی مربوط به عناصر Au, As, Bi, Sb, W و Mo با یکدیگر، ۵ لایه آلتراسیونی مربوط به دگرسانی‌های گرمایی فیلیک، آرژیلیک، اکسید آهن، سیلیسی و پروپیلیتیک با یکدیگر و دو لایه زمین‌شناسی مربوط به توده‌های آتشفشانی و رسوبی الیگو-میوسن نیز با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت یک لایه ژئوشیمیایی، یک لایه دگرسانی و یک لایه زمین‌شناسی بر مبنای عملگر OR حاصل شد (شکل‌های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷).

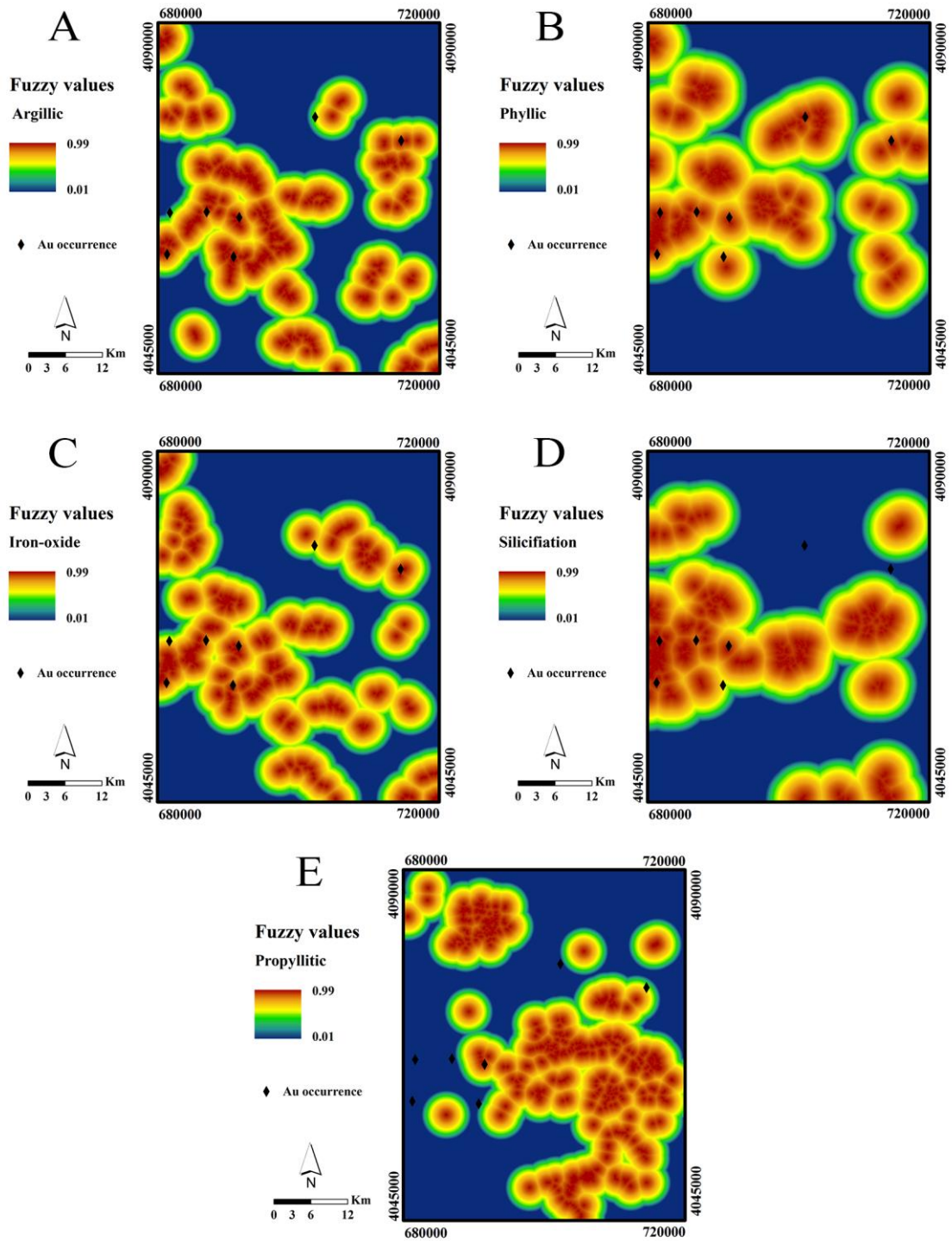
اولیه محاسبه می‌گردند که در آن مقادیر اولیه بیشتر، از امتیازات فازی بالاتری نیز برخوردار خواهند شد. با به کارگیری روش MSLarge در مرحله فازسازی لایه‌ها، مقادیر مربوط به تمامی لایه‌های اطلاعاتی شاهد در دامنه (۰-۱) قرار گرفتند که طبق آن ۶ لایه ژئوشیمیایی مربوط به عناصر طلا، آرسنیک، بیسموت، آنتیموان، تنگستن و مولیبدن (شکل ۳)، ۵ لایه دگرسانی مربوط به دگرسانی‌های هیدروترمال آرژیلیک، فیلیک، اکسید آهن، سیلیسی و پروپیلیتیک (شکل ۴)، دو لایه زمین‌شناختی مربوط به واحدهای آتشفشانی و رسوبی الیگو-میوسن (شکل ۵) و یک لایه چگالی گسل (شکل ۶) فازی سازی شده و مقادیر تمامی لایه‌ها همسان شدند.

تلفیق لایه‌های اکتشافی

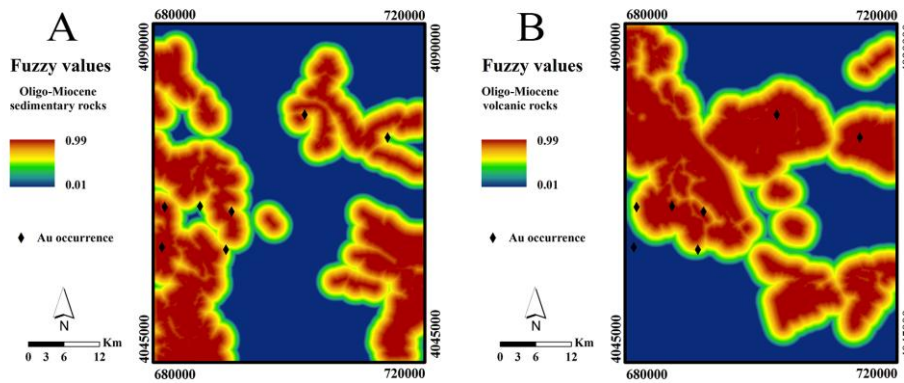
پس از آماده‌سازی اولیه ۱۴ لایه اکتشافی شامل ۶ لایه مربوط به داده‌های تک عنصری ژئوشیمیایی حاصل از نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای، ۵ لایه فاصله از دگرسانی‌ها، ۲ لایه فاصله از واحدهای زمین‌شناختی و ۱ لایه چگالی گسل، و فازی سازی هر یک از لایه‌ها با استفاده از روش MSLarge مبتنی بر منطق فازی و قرار گرفتن تمامی مقادیر لایه‌ها در دامنه ۰ تا ۱، در این مرحله سعی شده است که با استفاده از دو روش منطق فازی مبتنی بر عملگرهای OR و GAMMA موسوم به روش Fuzzy-GAMMA و روش ترکیبی Fuzzy-AHP، تمامی لایه‌های اکتشافی شاهد را با یکدیگر تلفیق نموده و در نهایت خروجی‌های حاصل که به صورت نقشه‌های پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده تخت سلیمان هستند، با یکدیگر مقایسه شوند. مراحل انجام هر یک از روش‌های مذکور به تفصیل در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.



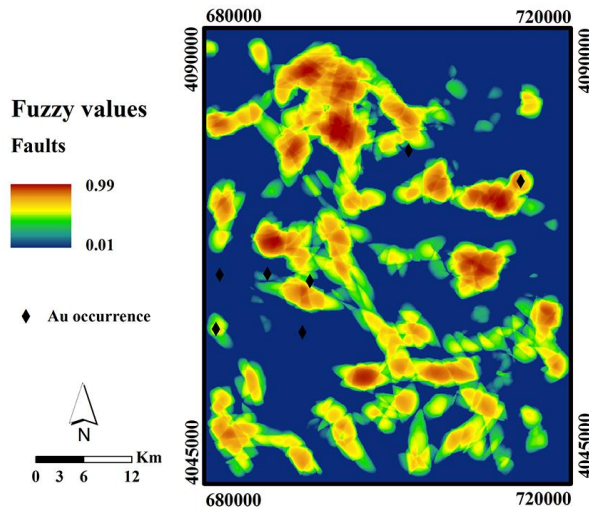
شکل ۳: نقشه‌های آنومالی ژئوشیمیایی فازی سازی شده (A طلا، B آرسنیک، C آنتیموان، D بیسموت، E تنگستن، F مولیبدن).



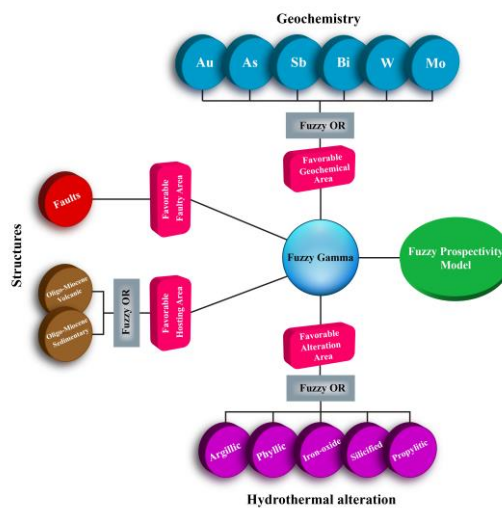
شکل ۴: نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های گرمایی فازی سازی شده. (A) آرژیلیک، (B) فیلیک، (C) اکسید آهن، (D) سیلیسی، (E) پروپیلیتیک.



شکل ۵: نقشه‌های فاصله از واحدهای زمین‌شناسی فازی سازی شده. (A) واحدهای رسوبی الیگو-میوسن، (B) واحدهای آتشفشانی الیگو-میوسن.



شکل ۶: نقشه فازی سازی شده چگالی گسل.



شکل ۷: فلوچارت مراحل تولید نقشه‌های فازی مناطق امیدبخش براساس عملگرهای OR و GAMMA.

تولید شود. این روش دارای ۴ بخش اصلی می‌باشد: (۱) تعیین معیارها برای استفاده در مدل‌سازی، (۲) تعیین وزن معیارها و زیر معیارها با استفاده از روش AHP، (۳) فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی مختلف با استفاده از منطق فازی و (۴) تلفیق نهایی لایه‌ها با استفاده از اوزان محاسبه شده توسط روش AHP. چارت مربوط به ساختار سلسله مراتبی روش Fuzzy-AHP در شکل ۸ قابل مشاهده است. در مرحله نخست، اطلاعات اکتشافی موجود از منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شده و یک ساختار سلسله مراتبی برای شناسایی نواحی امید بخش کانی‌زایی طلا ترسیم شده است (شکل ۸). در این ساختار، هدف مطالعه که شناسایی نواحی امیدبخش کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه است، در راس ساختار قرار می‌گیرد. و معیارها و زیر معیارهای اکتشافی در رده بعدی قرار می‌گیرند. رده سوم مربوط به معیارها و زیر معیارهای اکتشافی با مقادیر عضویت فازی می‌باشد و رده نهایی مربوط به جایگزین‌ها (مقادیر سلول‌های نقشه‌های شاهد) می‌باشد. طبق روش Fuzzy-AHP، پس از تعیین معیارهای اکتشافی مختلف، که شامل ۶ لایه آنومالی ژئوشیمیایی حاصل از نتایج نمونه‌های رسوب آبراه‌ای، ۵ لایه فاصله از دگرسانی‌های گرمابی حاصل از تصاویر ASTER و ETM⁺، دو لایه فاصله از واحدهای زمین‌شناختی مربوط به میزبان‌های ولکانیکی و رسوبی دوره الیگو-میوسن و یک لایه چگالی گسل می‌باشد، در ابتدا یک ماتریس مقایسه زوجی برای ۴ معیار اصلی ژئوشیمیایی، دورسنجی، زمین‌شناسی و ساختاری تشکیل شد. در این ماتریس، ۴ معیار اصلی بر اساس نظرات متخصصین علوم زمین و با استفاده از جدول شاخص وزن دهی (ساتی، ۱۹۹۴)، به صورت مقایسه زوجی وزن‌دهی شدند و در نهایت

در مرحله بعد، می‌بایست از یک عملگر فازی مناسب برای تلفیق لایه‌های تولید شده توسط عملگر OR و همچنین نقشه چگالی گسل فازی سازی شده، استفاده شود (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۵؛ قزلباش، ۱۳۹۵). در این پژوهش، عملگر GAMMA ($g=0.9$) به عنوان یک عملگر مناسب، برای تلفیق لایه‌های ژئوشیمی، دگرسانی و زمین‌شناسی تولید شده توسط عملگر OR و همچنین نقشه چگالی گسل فازی سازی شده، استفاده شد؛ زیرا این عملگر، به‌طور هم‌زمان حاوی جمع جبری عملگر Sum و جمع جبری عملگر Product در یک نقشه می‌باشد. خروجی جمع جبری عملگر Product، کوچک‌تر یا مساوی کمترین امتیاز فازی در هر موقعیت از نقشه‌های ورودی فازی‌سازی شده می‌باشد. بنابراین عملگر Product، دارای اثر «کاهندگی» می‌باشد، یعنی این عملگر باعث حضور مقادیر فازی خیلی پایین غیر صفر در مدل‌سازی می‌شود. همچنین خروجی جمع جبری عملگر Sum، بزرگ‌تر یا مساوی بیشترین امتیاز فازی در هر موقعیت از نقشه‌های ورودی فازی‌سازی شده می‌باشد. بنابراین عملگر Sum دارای اثر «افزاینده» می‌باشد، یعنی این عملگر باعث حضور مقادیر فازی خیلی بالای کمتر از ۱ در مدل‌سازی می‌شود (یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵). در نهایت مدل پتانسیل کانی‌زایی طلا با استفاده از عملگر GAMMA در محدوده تخت سلیمان تولید شد (شکل ۹ A).

روش Fuzzy-AHP

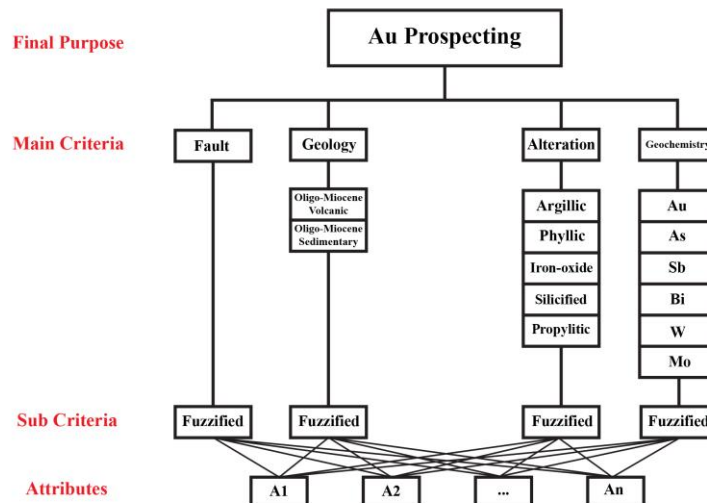
در این بخش از پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش ترکیبی Fuzzy-AHP که یک روش دانش محور براساس نظر کارشناسان خبره در علوم زمین می‌باشد، لایه‌های اطلاعاتی شاهد مختلف با یکدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل نهایی کانی‌زایی طلا در محدوده تخت سلیمان

با مقدار ۰.۲۲ به عنوان معیارهای مهم پس از ژئوشیمی انتخاب شده و در نهایت معیار ساختاری با گرفتن وزن با مقدار ۰.۱۲ به عنوان کم اهمیت‌ترین معیار در این بخش انتخاب شد (جدول ۲) (شکل ۸).

با استفاده از روش AHP، مقدار اوزان مناسب برای هر یک از معیارها محاسبه گردید (جدول ۲). طبق این روش، بیشترین وزن با مقدار ۰.۴۳ به معیار ژئوشیمیایی اختصاص داده شده است. معیارهای دگرسانی و زمین‌شناسی با اختصاص یافتن وزن

جدول ۲: ماتریس مقایسه زوجی معیارهای اکتشافی و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

| | Geochemistry | Alteration | Geology | Fault | Weights |
|--------------|--------------|------------|---------|-------|---------|
| Geochemistry | 1 | 2 | 2 | 3 | 0.42 |
| Alteration | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 0.22 |
| Geology | 0.5 | 1 | 1 | 2 | 0.22 |
| Fault | 0.33 | 0.5 | 0.5 | 1 | 0.12 |



شکل ۸: ساختار سلسله مراتبی برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه. A1 تا An مقادیر سلولی نقشه پتانسیل کانی‌زایی طلا می‌باشند.

نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است، که عنصر طلا با اختصاص وزن ۰.۳ به عنوان موثرترین زیر معیار ژئوشیمیایی انتخاب شد و عناصر آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و تنگستن با مقادیر وزنی ۰.۱۵ و عنصر مولیبدن با مقدار وزنی ۰.۰۸ در رده‌های بعدی قرار گرفتند. هم‌چنین زیر مجموعه‌های دگرسانی شامل لایه‌های فاصله از دگرسانی‌های فیلیک، آرژلیک، اکسید آهن، سیلیسی و پروپیلیتیک به ترتیب با مقادیر وزنی

در مرحله بعدی می‌بایست هر یک از زیر مجموعه‌های مختلف معیارهای اکتشافی وزن‌دهی شوند. همان‌گونه که در مراحل قبلی نیز ذکر گردید، ۶ لایه ژئوشیمیایی مربوط به عناصر Au، As، Sb، Bi، W و Mo به عنوان زیر مجموعه‌های معیار ژئوشیمی در نظر گرفته شدند. در این مرحله با استفاده از روش AHP، هر یک از ۶ زیر معیار ژئوشیمیایی در قالب یک ماتریس مقایسه زوجی توسط متخصصین وزن‌دهی شده و اوزان مناسب برای هر یک از آن‌ها محاسبه گردید که

۰.۲، ۰.۲، ۰.۱۳، ۰.۰۸ نیز توسط روش AHP وزن دهی شدند (جدول ۴).

جدول ۳: ماتریس مقایسه زوجی عناصر ژئوشیمیایی و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

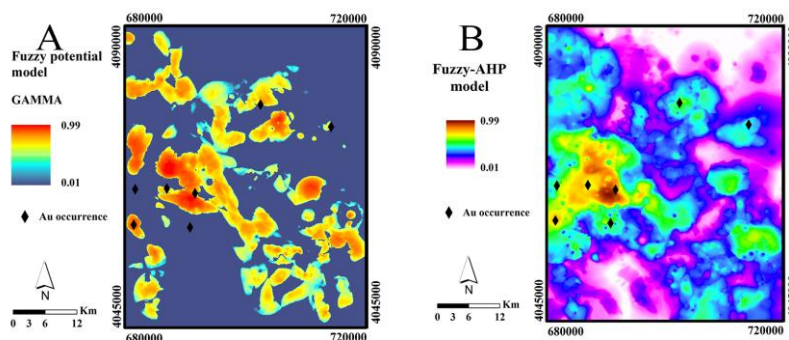
| | Au | As | Sb | Bi | Mo | W | Weights |
|----|------|-----|-----|-----|----|-----|---------|
| Au | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 0.30 |
| As | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.15 |
| Sb | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.15 |
| Bi | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.15 |
| Mo | 0.33 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0.15 |
| W | 0.5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0.08 |

جدول ۴: ماتریس مقایسه زوجی آلتراسیون‌های هیدروترمال و اوزان محاسبه شده توسط روش AHP.

| | Argillic | Phyllic | Iron-oxide | Silicified | Propylitic | Weights |
|------------|----------|---------|------------|------------|------------|---------|
| Argillic | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0.26 |
| Phyllic | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0.26 |
| Iron-oxide | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0.26 |
| Silicified | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 | 1.5 | 0.13 |
| Propylitic | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.66 | 1 | 0.08 |

است که نحوه انجام آن به تفصیل در بخش ۳.۴. ۱ توضیح داده شد. پس از فازی‌سازی هر یک از معیارها و زیر معیارهای مختلف و از آنجا که مقادیر وزنی هر یک از آنها نیز با استفاده از روش AHP محاسبه شده است، در نهایت ۱۴ لایه اکتشافی شاهد پیوسته با مقادیر عضویت فازی ۰ تا ۱ و با اعمال اوزان مناسب هر یک از آنها، با یکدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده تخت سلیمان با استفاده از روش Fuzzy-AHP حاصل شد (شکل ۹ B).

از آنجا که لایه‌های زمین‌شناسی مربوط به فاصله از توده‌های آتشفشانی و رسوبی الیگو-میوسن که به ترتیب میزبان کانی‌زایی اپی ترمال و کارلین در محدوده تخت سلیمان هستند، با اهمیت یکسان در نظر گرفته شده و مقادیر وزنی ۰.۵ در معیار زمین‌شناسی به هر یک از آنها اختصاص یافت. پس از محاسبه اوزان معیارها و زیر معیارهای مختلف، می‌بایست مقادیر پیوسته هر یک از آنها در دامنه ۰ تا ۱ قرار بگیرد. برای این کار از روش‌های مبتنی بر منطق فازی بهره گرفته شده



شکل ۹: نقشه‌های نهایی مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا توسط (A) روش Fuzzy-GAMMA و (B) روش Fuzzy-AHP.

نتایج

توانسته‌اند که اکثر رخدادهای کانی‌زایی طلا را به خوبی پیش‌بینی نمایند. اما با مقایسه دو روش مذکور، مشخص می‌شود که آنومالی‌های حاصل از روش Fuzzy-AHP با رخدادهای کانی‌زایی طلا در محدوده همبستگی فضایی مثبت بالاتری دارند، با وجود اینکه آنومالی‌های حاصل از روش Fuzzy-GAMMA نیز همبستگی خوبی با رخدادهای کانی‌زایی طلا دارند اما در بخش غربی محدوده که بخش اصلی کانی‌زایی طلای کارلین می‌باشد (نظرپور، ۲۰۱۵)، این روش نتوانسته تمام اندیس‌های طلا را پیش‌بینی نماید در حالی که آنومالی‌های حاصل از روش Fuzzy-AHP با دقت بالاتری توانسته‌اند نواحی آنومالی طلا را شناسایی کنند و در نهایت نتیجه می‌شود که در این پژوهش روش Fuzzy-AHP که بر مبنای وزن‌دهی دانش‌محور به معیارها و زیرمعیارهای اکتشافی می‌باشد، عملکرد دقیق‌تر و صحیح‌تری را نسبت به روش Fuzzy-GAMMA دارا بوده و آنومالی‌های حاصل از آن، همبستگی مکانی بالاتری با رخدادهای کانی‌زایی و معادن طلای موجود در منطقه نشان می‌دهند و از این روش می‌توان برای مطالعات اکتشافی تفضیلی‌تر در نواحی امید بخش شناسایی شده استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از دو روش مختلف مبتنی بر منطق فازی برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در ورقه تخت سلیمان با استفاده از معیارها و زیرمعیارهای ژئوشیمیایی، دگرسانی، زمین‌شناختی و ساختاری استفاده شده است. در هر دو روش لایه‌های اطلاعاتی شاهد پیوسته با استفاده از تئوری فازی در دامنه ۰ تا ۱ قرار گرفتند که این امر، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در شرایط یکسان را ممکن می‌سازد. در روش

در این پژوهش از روش Fuzzy-GAMMA براساس عملگرهای OR و GAMMA و روش ترکیبی Fuzzy-AHP برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی طلا در ورقه تخت سلیمان استفاده شده است. برای مدل‌سازی توسط روش‌های مذکور، از ۴ معیار اکتشافی اصلی شامل ژئوشیمی، دورسنجی، زمین‌شناسی و ساختاری که سه معیار اول به ترتیب حاوی ۶، ۵ و ۲ زیر معیار می‌باشند، استفاده شده است. در بخش اول با استفاده از روش Fuzzy-GAMMA، ابتدا مقادیر سلولی ۱۴ زیر معیار اکتشافی با مقادیر پیوسته بر مبنای منطق فازی در دامنه ۰ تا ۱ قرار گرفته و سپس لایه‌های با ویژگی‌های مشابه (ژئوشیمیایی، آلتراسیونی و زمین‌شناختی) به وسیله عملگر OR با یکدیگر ترکیب شدند و در نهایت لایه‌های ایجاد شده به اضافه لایه چگالی گسل فازی سازی شده، توسط عملگر گاما با مقدار $g=0.9$ با یکدیگر تلفیق شدند و مدل نهایی نواحی امید بخش طلا در محدوده مورد مطالعه حاصل شد (شکل ۹ A). در بخش دوم، از روش Fuzzy-AHP برای مدل‌سازی استفاده شده است که پس از ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی (شکل ۸) ۴ معیار اصلی به همراه زیرمعیارهایشان، توسط روش AHP وزن‌دهی شده و پس از اعمال مقادیر عضویت فازی به هر یک از زیرمعیارها، در نهایت با استفاده از اوزان محاسبه شده توسط روش AHP، لایه‌های شاهد مختلف با مقادیر پیوسته با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه پتانسیل کانی‌زایی طلا در محدوده مورد مطالعه توسط روش Fuzzy-AHP حاصل شد (شکل ۹ B). با مقایسه نتایج حاصل از دو روش Fuzzy-GAMMA و Fuzzy-AHP با رخدادهای کانی‌زایی طلا در منطقه، مشخص شد که هر دو روش از کارایی مناسبی برخوردار بوده و

استفاده از روش AHP، مقادیر لایه‌های اطلاعاتی شاهد پیوسته فازی سازی شده و بر مبنای اوزان اختصاص، یافته با یکدیگر ترکیب شدند و در نهایت نقشه نواحی امید بخش کانی‌زایی طلا در این منطقه تولید شد که با مقایسه آنومالی‌های حاصل از دو روش مذکور، مشاهده می‌شود که روش Fuzzy-AHP از عملکرد مناسب‌تری نسبت به روش دیگر برخوردار بوده و رخدادهای کانی‌زایی طلا در منطقه با آنومالی‌های حاصل از این روش همبستگی فضایی بیشتری نشان می‌دهند و همچنین نواحی امیدبخش دارای پتانسیل، می‌توانند برای اکتشافات دقیق‌تر در این منطقه مورد استفاده قرار گیرند.

Fuzzy-GAMMA، استفاده از عملگرهای فازی، کارشناس متخصص را قادر می‌سازد تا بتواند لایه‌های فازی سازی شده را با توجه به ویژگی‌های لایه‌های اطلاعاتی مختلف، ترکیب نموده و نقشه پتانسیل کانی‌زایی مورد نظر را تولید نماید. عملگر گاما با مقدار $g=0.9$ به عنوان بهترین عملگر در این پژوهش برای تلفیق نهایی لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد و مدل تولید شده با رخدادهای کانی‌زایی طلا در منطقه همبستگی خوبی نشان می‌دهد. در روش Fuzzy-AHP که یکی از روش‌های دانش‌محور ترکیبی تصمیم‌گیری چند معیاره براساس نظر کارشناس می‌باشد، پس از وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارهای مختلف با

منابع

در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران. -قزلباش، ر.، ۱۳۹۵. بررسی‌های ژئوشیمیایی و کانی‌زایی در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

-باباخانی، ع. و قلمقاش، ج.، ۱۳۸۰. برگه شماره ۵۳۹۴ تخت سلیمان، از سری نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران. -حسین‌زاده، ر.، ابراهیمی، ن.، همتیان، ح. و براتی، ب.، ۱۳۹۵. گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی

-Abedi, M., Torabi, S.A. and Norouzi, G.H., 2013. Application of fuzzy-AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: seridune copper deposit, *Boll Geofis Teor Appl*, v. 54(2), p. 145-164.

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

-Asadi, H.H. and Hale, M., 2001. A predictive GIS model for mapping potential gold and base metal mineralization in Takab area, Iran, *Computers & Geosciences*, v. 27(8), p. 901-912.

-Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for*

geoscientists-modeling with GIS, Computer methods in the geoscientists, v. 13, 398 p.

-Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia, *Digital Geologic and Geographic Information Systems*, p. 15-23.

-Carranza, E.J.M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS (Vol. 11), Elsevier, 365 p.

-Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2001. Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines,

- Natural Resources Research, v. 10(2), p. 125-136.
- Chung, C.F. and Agterberg, F.P., 1980. Regression models for estimating mineral resources from geological map data, *Mathematical Geology*, v. 12(5), p. 473-488.
- Crosta, A.P., Sabine, C. and Taranik, J.V., 1998. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using AVIRIS hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, v. 65(3), p. 309-319.
- Ghorbani, M., 2013. The economic geology of Iran: mineral deposits and natural resources, Springer Science & Business Media, 581 p.
- Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018a. 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*, v. 350(4), p. 180-191.
- Ghezelbash, R. and Maghsoudi, A., 2018b. 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. 1-16.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Daviran, M., 2018a. Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran. *Acta Geochimica*, p. 1-14.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Carranza, E.J.M., 2018b. An improved data-driven multiple criteria decision-making procedure for spatial modeling of mineral prospectivity: adaptation of prediction-area plot and logistic functions, *Natural Resources Research*, DOI: 10.1007/s11053-018-9448-6.
- Ghezelbash, R., Maghsoudi, A. and Carranza, E.J.M., 2018c. Performance evaluation of RBF- and SVM-based machine learning algorithms for predictive mineral prospectivity modeling: Integration of S-A multifractal model and mineralization controls. *Earth Science Informatics*, DOI: 10.1007/s12145-018-00377-6.
- Harris, D. and Pan, G., 1999. Mineral favorability mapping: a comparison of artificial neural networks, logistic regression, and discriminant analysis, *Natural Resources Research*, v. 8(2), p. 93-109.
- Harris, J.R., Wilkinson, L. and Broome, J., 1995. Mineral exploration using GIS-based favourability analysis, Swayze Greenstone Belt, northern Ontario, In *Proceedings of the Canadian Geomatics Conference*, National Defense [CD-ROM].
- Heidari, S.M., Daliran, F., Paquette, J.L. and Gasquet, D., 2015. Geology, timing and genesis of the high sulfidation Au (-Cu) deposit of Touzlar, NW Iran, *Ore Geology Reviews*, v. 65, p. 460-486.
- Houshyar, E., SheikhDavoodi, M.J., Almassi, M., Bahrami, H., Azadi, H., Omid, M. and Witlox, F., 2014. Silage corn production in conventional and conservation tillage systems, Part I: sustainability analysis using combination of GIS/AHP and multi-fuzzy modeling, *Ecological Indicators*, v. 39, p. 102-114.
- Kubler, S., Voisin, A., Derigent, W., Thomas, A., Rondeau, E. and Främling, K., 2014. Group fuzzy AHP approach to embed relevant data on "communicating material", *Computers in Industry*, v. 65(4), p. 675-692.
- Lee, S.K., Mogi, G. and Hui, K.S., 2013. A fuzzy analytic hierarchy process (AHP)/data envelopment analysis (DEA) hybrid model for efficiently allocating energy R&D resources: In the case of energy technologies against high oil prices.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 21, p. 347-355.
- Maghsoudi, A., Rahmani, M. and Rashidi, B., 2005. Gold deposits and indications of Iran, 348 p.
- Mergias, I., Moustakas, K., Papadopoulos, A. and Loizidou, M., 2007. Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for ELVs: The case of Cyprus. *Journal of Hazardous Materials*, v. 147(3), p. 706-717.
- 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.
- 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.
- Parsa, M., Maghsoudi, A. and Ghezelbash, R., 2016. Decomposition of anomaly patterns of multi-element geochemical signatures in Ahar area, NW Iran: a comparison of U-spatial statistics and fractal models, *Arabian Journal of Geosciences*, v. 9(4), p. 1-19.
- 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.
- 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*, v. 12(1), p. 1-25.
- Pour, A.B. and Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 42(6), p. 1309-1323.
- Reddy, R.K.T. and Bonham-Carter, G.F. 1991. A decision-tree approach to mineral potential mapping in Snow Lake area, Manitoba, *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 17(2), p. 191-200.
- Saaty, T.L., 1990. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world, RWS publications.
- Saaty, T.L., 1994. How to make a decision: the analytic hierarchy process, *Interfaces*, v. 24(6), p. 19-43.
- Saaty, T.L., 2005. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making, In *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (pp. 345-405), Springer New York.
- Shahrestani, S. and Mokhtari, A.R., 2016. Dilution correction equation revisited: The impact of stream slope, relief ratio and area size of basin on geochemical anomalies, *Journal of African Earth Sciences*.
- Tan, R.R., Aviso, K.B., Huelgas, A.P. and Promentilla, 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.
- Tzeng, G.H. and Huang, J.J., 2011. Multiple attribute decision making, *Methods and applications*.
- Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015. Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping, *Computers & Geosciences*, v. 74, p. 97-109.

- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. Information and control, v. 8(3), p. 338-353.
- Ziaii, M., Abedi, A., Ziaei, M., Kamkar Rouhani, A. and Zendahdel, A., 2010. GIS modelling for Au-Pb-Zn potential mapping in Torud-Chah Shirin area-Iran, Journal of Mining and Environment, International Journal of Mining & Environmental Issues, v. 1(1), p. 17-27.
- Zimmermann, H.J. and Zysno, P., 1980. Latent connectives in human decision making, Fuzzy sets and systems, v. 4(1), p. 37-51.