

تعیین مناطق امیدبخش برای کانی‌سازی مس و طلا در چهارگوش تخت سلیمان با روش تحلیل سلسله مراتب فازی

فریبا سلطانی^۱؛ مجید محمدی اسکویی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز؛ faribasoltani90@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز؛ mohammady@sut.ac.ir

چکیده

در فرایند اکتشاف مواد معدنی تعریف یک مدل پتانسیل معدنی به عنوان یک راهنما می‌تواند در بحث صرفه‌جویی زمان و هزینه بسیار مؤثر باشد. با توجه به این که لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده از روش‌های مختلف اکتشافی به تنهایی نمی‌توانند برای شناسایی مناطق امیدبخش مفید واقع شوند بنابراین با در نظر گرفتن داده‌های موجود، از روش‌های مختلف تلفیق برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی استفاده می‌شود که در این صورت نتیجه، قابلیت اعتماد بیشتری خواهد داشت. در این مطالعه از داده‌های مربوط به لیتولوژی، آنومالی‌های ژئوشیمیایی، گسل و نقشه مکانی ۱۱ اندیس شناخته شده در منطقه تخت سلیمان برای تعیین مناطق امید بخش استفاده شده است. برای تلفیق داده‌ها، روش‌های فازی، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و AHP-Fuzzy در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شدند. نتایج روش AHP منجر به بررسی و ارائه یک معادله جدید برای فازی‌سازی داده‌ها شد. در نهایت برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف، رابطه فازی‌سازی جدیدی بر اساس وزن‌های محاسبه شده از روش AHP استفاده شده و ترکیب لایه‌ها با اولویت‌بندی معیارها انجام شد. نقشه حاصله از روش تلفیقی اخیر با نتایج دو روش AHP و فازی مقایسه شد که نشان از مزیت نسبی روش جدید داشت. به منظور بررسی صحت روش‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر از نسبت "تعداد اندیس‌های شاخص در محدوده بسیار مطلوب به درصد مساحت آن محدوده" برای نقشه‌های پتانسیل نهایی هر کدام از روش‌ها استفاده شد. نقشه پتانسیل حاصل از AHP-Fuzzy با نسبت ۰/۴ بیشترین مقدار را در بین روش‌های مورد بررسی به خود اختصاص داد که تطابق قابل قبولی با خصوصیات کانسارهای شناخته شده در منطقه از نظر زمین‌شناسی نیز دارد.

کلمات کلیدی

مدل پتانسیل معدنی، فازی، تحلیل سلسله مراتبی، AHP-Fuzzy، سیستم اطلاعات جغرافیایی

۱- مقدمه

انتخاب شدند که شامل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱، منطق فازی^۲ و AHP-Fuzzy است. در مرحله اول با استفاده از روش AHP و به وسیله نرم افزار Expert Choice وزن معیارها براساس اولویت بندی آن‌ها محاسبه شد و تلفیق آن‌ها بر اساس این وزن‌ها انجام شد. در مرحله دوم روش فازی دانش محور برای ترکیب لایه‌های فازی شده با استفاده از عملگرهای مختلف تلفیق به کار گرفته شد و در نهایت، رابطه جدیدی برای فازی سازی لایه‌ها با استفاده از وزن‌های حاصله از روش AHP ارائه گردید. در این رابطه اولویت بندی معیارها لحاظ شده است.

۱-۱- منطقه مورد مطالعه

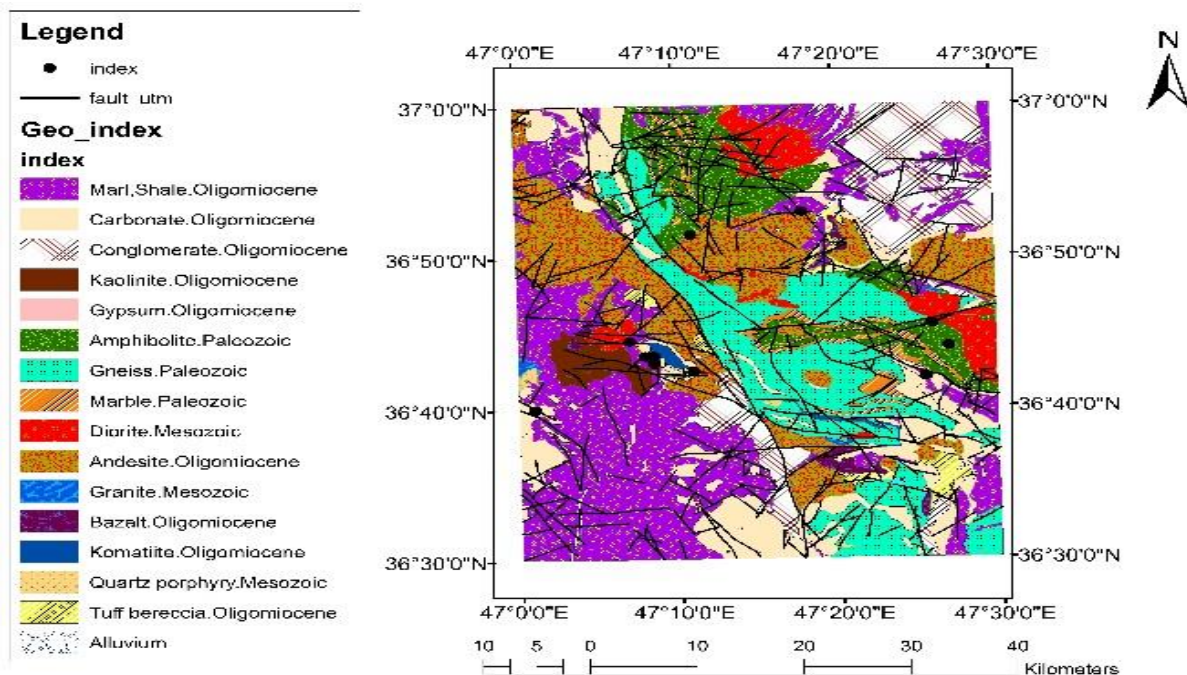
بخش شمالی منطقه تخت سلیمان شامل سنگ‌های دگرگونی (گنایس، مرمر، آمفیبولیت) و بخش جنوبی شامل رسوبهای مارنی و ماسه سنگی الیگومیوسنی است و از نظر ساختمانی در زون سندج-سیرجان و زون خوی-مهاباد قرار گرفته است و محل برخورد زون‌های البرز-آذربایجان، ایران مرکزی و سندج-سیرجان است. به طور کلی ردیف چینه‌ای سنگ‌ها از پایین به بالا شامل سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، سنگ‌های رسوبی پرکامبرین پسین - کامبرین پیشین و کامبرین - اردو پسین، سنگ‌های دگرگونی پالئوزویک، توده‌های نفوذی دیوریتی، گرانودیوریتی و گرانیتی، سنگ‌های رسوبی و آتشفشانی الیگومیوسن و نهشته‌های جوان پلیوسن و کواترنر است. با توجه به زمین‌شناسی اقتصادی، منطقه سه پهنه‌ی متفاوت قاره‌ای، دگرگونی و اقیانوسی دارد (شکل ۱). متالورژی منطقه به چهار نوع اصلی تقسیم می‌شود که در کمپلکس‌های افیولیتی، پوسته‌ی قاره‌ای، گرانیت‌های نوع برخوردی و هم‌چنین در راستای گسل‌های فعال شده در اثر فعالیت‌های ماگمایی دیده شده است، در کمپلکس‌های افیولیتی کانه‌زایی مس، سرب، روی، طلا، کرومیت، کبالت، تیتان و جیوه مشاهده شده و در راستای رویدادهای تکتونیکی ماگمایی ترشیری و هم‌چنین فعال شدن گسل‌های قدیمی نیز کانه‌زایی طلا، آنتیموان، آرسنیک، جیوه و کانی‌های چند فلزی رخ داده است [۱، ۵].

با توجه به اطلاعات موجود، اندیس‌های معدنی Au و As در سنگ‌های مارل، آهک و آندزیت و اندیس‌های معدنی Cu در سنگ‌های آمفیبولیت، آندزیت و کنگلومرا دیده شده‌اند، در بخش

تعریف یک مدل پتانسیل معدنی که بیان‌گر حضور شواهد و لایه‌های اطلاعاتی مختلف است در مراحل مختلف اکتشاف برای کشف ذخایر و اندیس‌های ناشناخته کمک فراوانی می‌کند از طرفی دیگر با توجه به این‌که روش‌های تلفیقی مختلفی برای تهیه‌ی یک مدل وجود دارد، انتخاب یک روش مناسب بسیار مهم است. به طور کلی دو روش داده محور و دانش محور برای تلفیق لایه‌ها وجود دارد که بسته به داده‌های موجود انتخاب می‌شوند، به عنوان مثال در صورتی که از یک منطقه لایه‌های اطلاعاتی کمی در اختیار باشد و اکتشافات وسیعی صورت نگرفته باشد، و نیز تعداد اندیس‌های شناخته شده کم باشد یا اصلاً وجود نداشته باشد، استفاده از روش‌های دانش محور مناسب‌تر خواهد بود و در صورتی که تنوع لایه‌های اطلاعاتی و تعداد اندیس‌های کشف شده برای یک منطقه زیاد باشد، روش‌های داده محور می‌توانند استفاده شوند [۲].

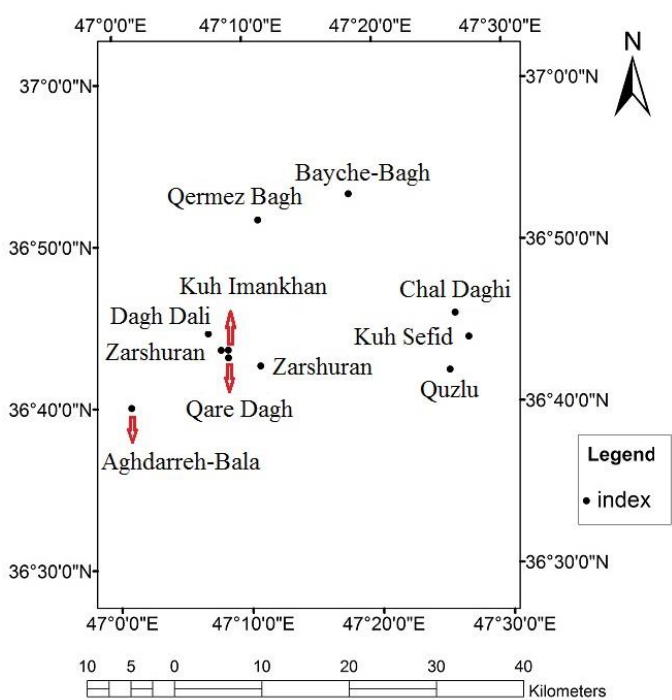
ارزش‌گذاری یا وزن‌دهی فاکتورها و معیارها از مراحل مهم در تجزیه و تحلیل لایه‌های اکتشافی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی است. شناخت هرچه بیشتر انواع روش‌های وزن‌دهی در نتیجه مدل‌سازی تاثیرگذار است. انواع روش‌های وزن‌دهی به دو دسته روش‌های دانش-محور و داده-محور تقسیم می‌شوند که در روش‌های دانش محور اهمیت نسبی داده‌ها به وسیله کارشناسان تعیین می‌شوند. این روش‌ها عبارتند از روش‌های رتبه‌بندی، درجه‌بندی، عددگذاری، تحلیل سلسله مراتبی و دلفی که مهم‌ترین آن‌ها روش تحلیل سلسله مراتبی است. روش‌های داده محور زمانی استفاده می‌شوند که به نوعی نمونه‌ای از پاسخ مسئله وجود داشته باشد (مانند حضور اندیس‌های شناخته شده). از انواع این روش‌ها می‌توان به روش‌های رگرسیون لجستیک، اوزان شاهد و شبکه عصبی اشاره کرد [۳، ۴].

در این مطالعه از داده‌های مربوط به لیتولوژی، آنومالی‌های ژئوشیمیایی، گسل و ۱۱ اندیس شناخته شده جهت تعیین مناطق امیدبخش مس و طلا در منطقه‌ی تخت سلیمان استفاده شد. روش‌های به کار گرفته شده از انواع روش‌های دانش محور



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه‌ی تخت سلیمان [۱]

شمال شرقی منطقه نیز یک اندیس از عناصر مس، طلا، آرسنیک، نقره، سرب، روی و کبالت به صورت پلی‌متال در سنگ‌های آتشفشانی و همچنین در واحد سنگی آهک، اندیس دیگری از عناصر طلا، آرسنیک، آنتیموان و جیوه تشخیص داده شده‌اند [۶]. در شکل ۲ نام و محل اندیس‌های مهم مرتبط با عناصر بالا نشان داده شده‌است.



شکل ۲: موقعیت اندیس‌های شناخته شده قبلی در منطقه مطالعاتی

۲- تئوری روش AHP

در صورتی که مقدار CR کمتر از ۰,۱ باشد، اختصاص امتیازها به درستی صورت گرفته و اگر بزرگتر از آن باشد، امتیازدهی دوباره باید انجام شود [۷, ۱۲].

۳- تئوری روش فازی

نظریه مجموعه‌های فازی توسط پروفیسور لطفی زاده برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ ارائه شد، امروزه این مجموعه‌ها برای مدل کردن عدم قطعیت و ابهامات، و همچنین برای مدل‌سازی داده‌هایی که به صورت زبانی تعریف شده‌اند به کار گرفته می‌شوند. به‌طور کلی منطق فازی راهکاری است که به وسیله آن می‌توان سیستم‌های پیچیده را که مدل‌سازی آن‌ها با استفاده از ریاضیات غیرممکن و یا مشکل است به آسانی و با انعطاف بیشتر، مدل‌سازی کرد [۱۳, ۱۴].

در منطق فازی ممکن است میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه همیشه کامل نبوده و دارای مقداری بین صفر (عدم عضویت کامل) و یک (عضویت کامل) باشد، در واقع مجموعه فازی، مجموعه‌ایست مانند A که به صورت جفت‌های مرتب شامل اعضا و میزان عضویتشان است:

$$A = \{(x, \mu_A(x) | x \in X)\} \quad (2)$$

X مجموعه‌ای از اعضا و $\mu(x)$ تابع عضویت هر عضو بوده که بازه‌ی این تابع بین صفر و یک [۰ و ۱] تعریف شده است [۱۵-۱۷]. برای تهیه‌ی نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تئوری منطق فازی سه مرحله اصلی فازی سازی داده‌های شاهد، ترکیب نقشه‌ی فازی‌سازی شده با استفاده از شبکه استنتاجی و عملگرهای تلفیقی مناسب انجام می‌شوند. قطعی سازی نتایج و خروج از حالت فازی^۵ برای تهیه نقشه پتانسیل مطلوب ضروری است [۱۸].

برای فازی‌سازی شواهد فضایی چندکلاسه به صورت دانش محور توابع عضویت فازی مختلفی تعریف شده‌اند که یکی از این تابع‌ها به صورت زیر است:

$$f_{sc} = \frac{1}{1 + e^{-m(s_c - \bar{s}_c)}} \quad (3)$$

$$s_c = \frac{1}{d_c} \quad (4)$$

یکی از روش‌های مهم در تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره^۳، روش AHP است که برای اولین بار توسط ساتی^۴ در سال ۱۹۷۰ ارائه شد، زمانی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه و معیار روبه‌رو است از این روش می‌توان بهره گرفت که معیارهای مطرح شده می‌توانند کمی یا کیفی باشند. برای انجام روش AHP مراحل ساخت درخت سلسله مراتب تصمیم، تشکیل ماتریس مقایسه‌ی جفتی، بررسی نرخ سازگاری و در نهایت تلفیق معیارها باید انجام شوند [۷].

در درخت تصمیم سطح اول بیانگر هدف تصمیم‌گیری است و سطوح میانی نمایانگر فاکتورهایی (معیارها) است که زیرمجموعه‌های آن‌ها در سطوح آخر قرار داده شده‌اند [۸]. بعد از ساخت درخت تصمیم، ماتریس مقایسه‌ای برای مقایسه دودبه‌دوی گزینه‌ها و معیارهای مختلف تهیه می‌شود که در پایه‌های آن نسبتی از این مقایسه‌هاست. این مقایسه با استفاده از مقیاس استاندارد^۱ که در جدول ۱ آمده است انجام می‌شود [۹].

جدول ۱: مقیاس استاندارد جهت تعیین امتیاز فاکتورها [۱۰, ۱۱]

| میزان اهمیت | امتیاز معیارها |
|-------------------------|----------------|
| برابر | ۱ |
| ضعیف | ۳ |
| متوسط | ۵ |
| قوی | ۷ |
| خیلی قوی | ۹ |
| ارزش متوسط بین مقیاس‌ها | ۲,۴,۶,۸ |

به‌طور کلی یک ماتریس مقایسه‌ی جفتی به صورت $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$) نمایش داده می‌شود که در این ماتریس، a_{ij} ترجیح معیار i ام نسبت به معیار j ام است و برعکس [۸].

از مزایای فرایند تحلیل سلسله مراتبی کنترل سازگاری ماتریس است، با توجه به این که میزان سازگاری یا ناسازگاری ماتریس، نشان‌دهنده مقدار صحت تصمیم کارشناس است، بنابراین در مرحله پایانی فرایند تحلیل سلسله مراتبی، به دست آوردن نرخ سازگاری (CR) ضرورت دارد:

$$CR = \frac{\overline{CI}}{RI} \quad (1)$$

۴-۱- آماده‌سازی داده‌ها

در تمامی روش‌های مدل‌سازی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصویر سازی داده‌های مختلف در یک سیستم مختصات واحد صورت می‌گیرد، بنابراین در این مطالعه نیز ابتدا تصویرسازی لایه‌های اطلاعاتی انجام شد، هم‌چنین داده‌های لازم با استفاده از فاصله‌ی اقلیدسی رقومی شدند و اندازه‌ی پیکسل‌ها براساس مقیاس نقشه به ابعاد صد متر تعیین شد.

تمامی واحدهای لیتولوژی به ده کلاس با فاصله‌ی ۱۰۰۰ متری تقسیم شده و از فاصله‌ی ۱۰۰۰۰ متر به بعد به دلیل دور شدن از عارضه و این‌که فاصله گرفتن زیاد از هدف مدنظر نیست به‌عنوان یک کلاس یکسان در نظر گرفته شدند. بعد از Reclassify کردن لایه‌های مختلف لیتولوژی عمل Reverse کردن برای اختصاص امتیازهای بالا به فاصله‌های نزدیک انجام شد. سپس ماتریس مقایسه جفتی برای زیرمجموعه‌های این لایه تشکیل شد که با در نظر گرفتن مقیاس استاندارد و اختصاص امتیاز به واحدهای مختلف در نهایت وزن نهایی برای هرکدام از گزینه‌ها با استفاده از نرم افزار Expert Choise به‌دست آمد (برای تمامی لایه‌ها تعیین وزن‌های نهایی با استفاده از همین نرم افزار صورت گرفت). در شکل ۳ دی‌گرامی از معیارها و گزینه‌های مربوطه نشان داده شده است.

در ماتریس مقایسه‌ای برای به‌دست آوردن نتیجه دقیق‌تر از واحدهای لیتولوژی متنوع با ارزش‌های متفاوت استفاده شد که در عین حال سعی بر آن بود تا نسبت امتیاز واحد با ارزش‌تر به واحد لیتولوژی با ارزش کم، قوی در نظر گرفته شود، با توجه به زمین‌شناسی منطقه و رخداد‌های تکنیکی آن به سنگ آهک بیشترین امتیاز اختصاص داده شد. در واقع این اولویت‌بندی با توجه به ماهیت سنگ و واکنش‌پذیری بالای آن و هم‌چنین حضور اندیس‌ها به ویژه طلا و آرسنیک در این واحد انجام شده است. از طرف دیگر، با در نظرگرفتن سنگ میزبان طلای زرشوران که کربناته است و ارتباط این دودخیره به هم مقایسه‌ی جفتی صورت گرفت که واحد مارل نیز در اولویت دوم و به دنبال آن سنگ‌های آذرین و دگرگونی در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. به این ترتیب ماتریس وزنی مربوط به گزینه‌های لیتولوژی تعیین و سپس وزن هریک از واحدها محاسبه شد. در جدول ۲ وزن واحدهای مختلف لیتولوژی آورده شده است.

ساختارهای گسل در جهات مختلف به ده کلاس با فاصله ۵۰۰ متری تقسیم و از فاصله ۵۰۰۰ متر به بعد یک کلاس در نظر

f_{sc} درجه عضویت کلاس‌های تعریف شده برای داده‌های مختلف و m یک مقدار ثابت کنترل‌کننده شیب تابع و برابر عددی است که بتواند مقدار f_{sc} را بین بیشترین و کمترین مقدار تغییر دهد. S_C امتیاز کلاس‌ها، $\overline{S_C}$ میانگین تمامی S_C های مربوط به هر واحد و $\overline{d_c}$ برابر وسط فاصله‌ای است که برای هر کلاس در نظر گرفته شده است [۲].

بعد از تبدیل شواهد فضایی به مجموعه‌های فازی، از عملگرهای متفاوتی برای تلفیق آن‌ها استفاده می‌شود. عملگر AND فازی عملکردی مشابه عملگر AND بولین (اشتراک منطقی) دارد. نقشه‌ایی که با استفاده از این عملگر تهیه می‌شود به وسیله‌ی کوچکترین مقدار کنترل می‌شود:

$$\mu_{FA} = \text{MIN}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (5)$$

استفاده از عملگر OR فازی بر عکس سبب می‌شود که نقشه حاصله با بیشترین مقدار کنترل گردد:

$$\mu_{FA} = \text{MAX}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (6)$$

در عملگر ضرب جبری فازی، μ_i تابع عضویت فازی برای i امین نقشه‌ی شاهد است و مقدار عضویت فازی ترکیب شده با این عملگر به مقدارهای کوچک میل می‌کند:

$$F_{FAP} = \prod_{i=1}^n (\mu_i) \quad (7)$$

عملگر جمع جبری فازی مکمل ضرب جبری فازی است. نتیجه‌ایی که به دست می‌آید بزرگتر یا مساوی بزرگترین مقدار عضویت فازی است و روند افزایشی دارد:

$$F_{FAS} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (8)$$

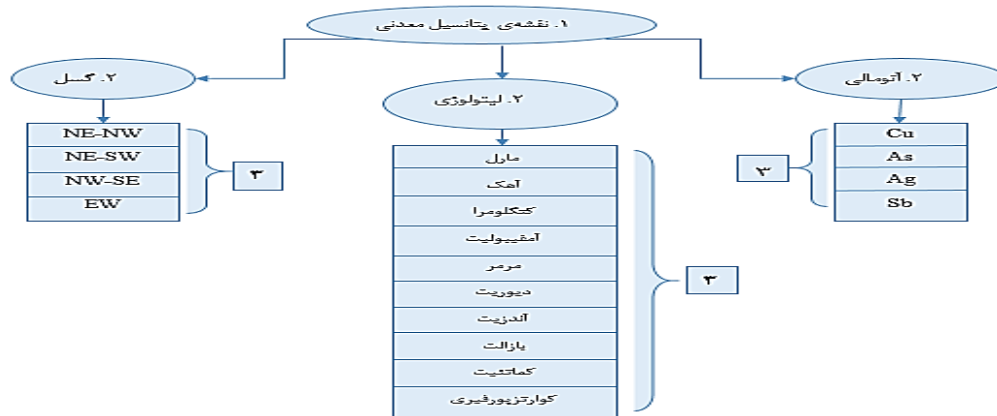
عملگر گاما نیز به‌صورت ترکیبی از ضرب جبری فازی و جمع جبری فازی است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{FG} = (F_{FAP})^{1-\gamma} (F_{FAS})^{\gamma} \quad (9)$$

خروجی این عملگر بسته به مقدار γ متفاوت است و می‌تواند تحت کنترل عملگر ضرب جبری یا جمع جبری فازی و یا تلفیقی از هر دو عملگر قرار گیرد [۱۹، ۲۰].

۴- کاربرد روش AHP

برای تعیین مناطق امیدبخش مس و طلا با استفاده از روش AHP از تمامی داده‌های موجود با وزن‌های مختلف در مراحل آماده‌سازی و تلفیق استفاده شد و اندیس‌های شناخته شده تنها در اعتبار سنجی روش به‌کار گرفته شدند.



شکل ۳: مدل سلسله مراتبی نقشه‌ی پتانسیل معدنی ۱. هدف ۲. معیارهای درخت تصمیم ۳. گزینه‌های سلسله مراتب.

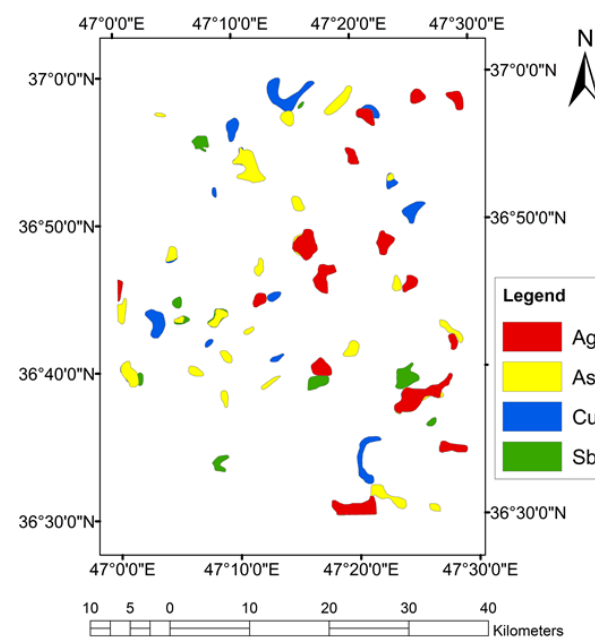
هم‌چنین با توجه به این که آنومالی مربوط به آرسنیک بیشترین میزان هم‌پوشانی را با اندیس طلا نسبت به آنومالی مس با اندیس مس دارد، بیشترین امتیاز به آنومالی آرسنیک اختصاص داده شد. در شکل ۴ محل آنومالی‌های به کار رفته در مرحله وزن دهی و همچنین در جدول ۴ وزن نهایی هر یک از آنومالی‌ها ارائه شده‌اند.

به‌طور کلی در ماتریس مقایسه وزنی، اختصاص امتیازها با توجه به میزان اهمیت و برتری یک لایه نسبت به لایه دیگر انجام گرفته است (مقادیر قرمز رنگ بیانگر حالت عکس یک امتیاز هستند). با توجه به این که برای هر سه ماتریس مقایسه وزنی، مقدار CR به دست آمده از ۰٫۱ کمتر است، بنابراین تخصیص امتیازها و اولویت بندی معیارها به درستی صورت گرفته است. وزن‌های به دست آمده برای تلفیق لایه‌ها براساس رابطه (۱۰) با هم ترکیب شدند (CR مربوط به ماتریس وزنی لیتولوژی برابر ۰٫۰۹ برای گسل برابر ۰٫۰۷ و مربوط به لایه‌ی آنومالی برابر ۰٫۰۶ است).

$$\text{نقشه‌ی تلفیقی} = \sum_{i=1}^{10} W_i \times a_i \quad (10)$$

پارامتر a_i بیانگر زیر مجموعه‌های مختلف و W_i وزن مربوط به هر کدام از آنهاست که از ماتریس مقایسه‌ای حاصل شده است. بر اساس رابطه‌ی بیان شده تلفیق درون لایه‌ها و هم‌چنین لایه‌های اصلی انجام شد. در شکل‌های ۵ تا ۷ نقشه‌های حاصل از تلفیق درون لایه‌های لیتولوژی، آنومالی و گسل آورده شده است.

گرفته شد. با توجه به الگوی مهاجرت سیالات گرمابی و محل قرارگیری منشأ آن‌ها و همچنین به خاطر اهمیت تقاطع گسل‌ها، به گسل‌های NW-NE بیشترین امتیاز اختصاص داده شد. در جدول ۳ ماتریس مربوط به زیرمجموعه‌های لایه گسل نیز ارائه شده است.



شکل ۴: نقشه پراکندگی آنومالی‌های عناصر مرتبط با کانی‌سازیهای مورد مطالعه.

طبقه بندی مناطق اطراف آنومالی‌های ژئوشیمیایی نیز همانند لایه لیتولوژی به ده کلاس انجام شد. با توجه به این که در مطالعه پیش رو، هدف تعیین مناطق امید بخش طلا و مس بود، بنابراین میزان اهمیت آنومالی مربوط به آن‌ها بیشتر از سایرین است.

جدول ۲: ماتریس وزنی و اهمیت نسبی لایه لیتولوژی

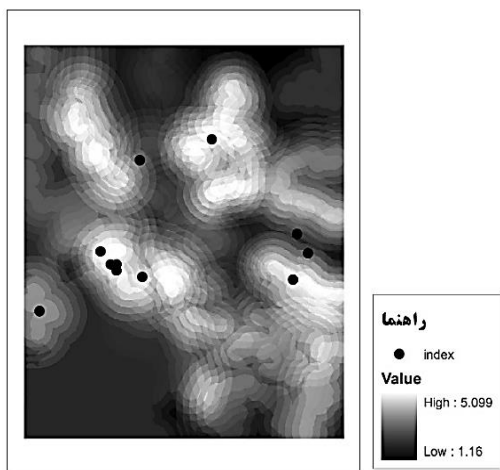
| W | کوارتزپورفیری | کماثتیت | بازالت | آندزیت | دیوریت | مرمر | آمفیبولیت | کنگومرا | آهک | مارل | کلاس‌ها |
|-------|---------------|---------|--------|--------|--------|------|-----------|---------|-----|------|---------------|
| ۰/۲۳۱ | ۴ | ۶ | ۷ | ۳ | ۴ | ۵ | ۴ | ۶ | ۱ | ۱ | مارل |
| ۰/۲۷۳ | ۸ | ۶ | ۸ | ۴ | ۵ | ۶ | ۵ | ۶ | ۱ | | آهک |
| ۰/۰۳۲ | ۳ | ۲ | ۴ | ۱:۶ | ۱:۵ | ۱:۴ | ۱:۵ | ۱ | | | کنگومرا |
| ۰/۰۹۸ | ۷ | ۶ | ۸ | ۱:۵ | ۲ | ۲ | ۱ | | | | آمفیبولیت |
| ۰/۰۶۸ | ۶ | ۵ | ۶ | ۱:۳ | ۱:۲ | ۱ | | | | | مرمر |
| ۰/۰۸۰ | ۶ | ۴ | ۶ | ۱:۳ | ۱ | | | | | | دیوریت |
| ۰/۱۶ | ۶ | ۶ | ۷ | ۱ | | | | | | | آندزیت |
| ۰/۰۱۶ | ۱:۲ | ۱ | ۱ | | | | | | | | بازالت |
| ۰/۰۲۳ | ۲ | ۱ | | | | | | | | | کماثتیت |
| ۰/۰۱۹ | ۱ | | | | | | | | | | کوارتزپورفیری |

جدول ۳: ماتریس وزنی و اهمیت نسبی لایه گسل

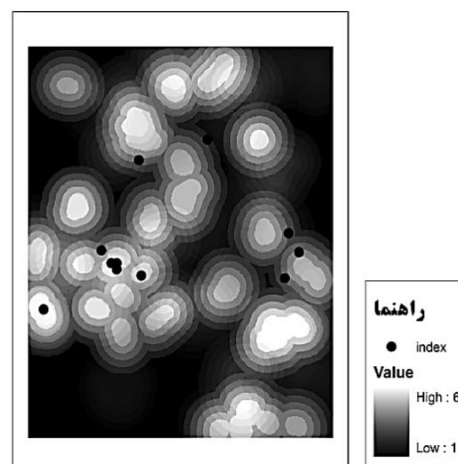
| W | EW | NW-SE | NE-SW | NE-NW | کلاس‌ها |
|-------|----|-------|-------|-------|---------|
| ۰/۶۳۵ | ۷ | ۶ | ۵ | ۱ | NE-NW |
| ۰/۲۱۵ | ۵ | ۳ | ۱ | | NE-SW |
| ۰/۰۹۲ | ۲ | ۱ | | | NW-SE |
| ۰/۰۵۷ | ۱ | | | | EW |

جدول ۴: ماتریس وزنی و اهمیت نسبی لایه آنومالی ژئوشیمیایی

| W | Ag | Sb | Cu | As | کلاس‌ها |
|-------|-----|----|----|----|---------|
| ۰/۶۴۰ | ۶ | ۷ | ۵ | ۱ | As |
| ۰/۲۰۶ | ۳ | ۴ | ۱ | | Cu |
| ۰/۰۶۰ | ۱:۲ | ۱ | | | Sb |
| ۰/۰۹۴ | ۱ | | | | Ag |



شکل ۶: نقشه تلفیقی لایه‌های آنومالی



شکل ۵: نقشه تلفیقی لایه‌های لیتولوژی

در شکل (۸ ب) مقدار واقعی و در نقشه‌ی سمت راست برای تفکیک منطقه به سه محدوده‌ی بسیار مطلوب، مطلوب و نامطلوب عمل خطی سازی انجام شده است (در بازه ۰/۰ تا ۱). مناطق بالای ۰/۸ به عنوان محدوده‌های بسیار مطلوب، ۰/۵ تا ۰/۸ مطلوب و زیر ۰/۵ به عنوان نامطلوب در نظر گرفته شدند.

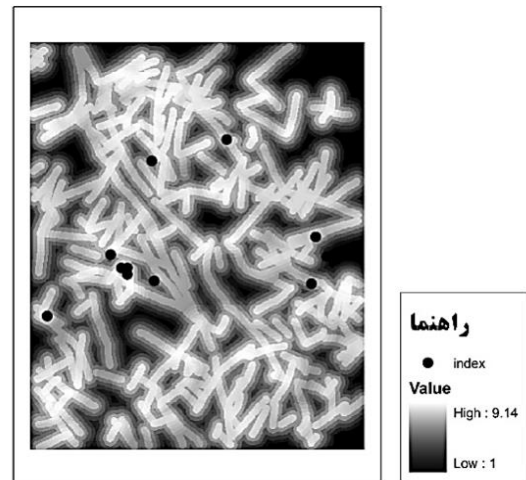
۵- کاربرد روش فازی

در این قسمت از مطالعه با استفاده از توابع لجستیک (رابطه ۳)، فازی سازی داده‌های مختلف انجام شد. پارامتر تأثیرگذار در این مرحله فاصله بخش‌های مختلف از عوارض موجود در لایه‌هاست. سپس با انتخاب عملگرهای مناسب لایه‌های فازی شده با هم ترکیب شدند و در مرحله‌ی آخر قطعی سازی نتایج انجام شد.

۵-۱- آماده‌سازی لایه‌های لیتولوژی، آنومالی و گسل

برای فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، رابطه ۳ با مقادیر حداکثر و حداقل درجه عضویت فازی به ترتیب ۱ و ۰/۰۰۲ استفاده شد و مقدار m با در نظر گرفتن این مقادیر تعیین شد. با توجه به رابطه تعریف شده، در فواصل نزدیک به عارضه مقدار درجه عضویت فازی بیشترین مقدار و در فواصل دورتر، کمترین مقدار را خواهد داشت.

در جداول زیر محاسبات مربوط به این تابع برای واحد لیتولوژی مارل، آنومالی ژئوشیمیایی آرسنیک و گسل به عنوان مثال آورده شده است.



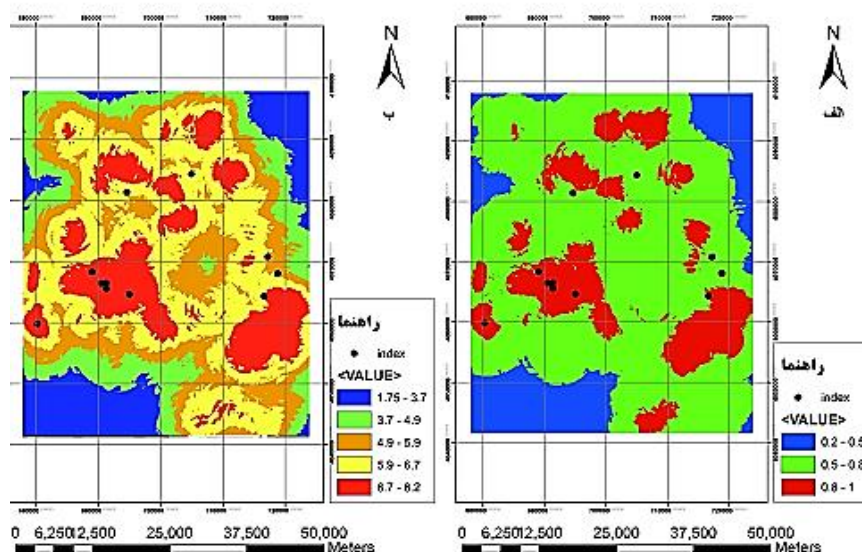
شکل ۷: نقشه تلفیقی لایه‌های گسل

۴-۲- تهیه نقشه پتانسیل معدنی

جهت تهیه نقشه پتانسیل کانی‌سازی مس و طلا، ماتریس مقایسه‌ای با فاکتورهای لیتولوژی، گسل و آنومالی‌های ژئوشیمیایی مطابق جدول ۵ تشکیل شد که مقدار CR آن برابر ۰/۰۲ محاسبه شد. در نهایت با استفاده از وزن‌های حاصله، تلفیق فاکتورهای مزبور انجام گرفت (شکل ۸).

جدول ۵: ماتریس وزنی معیارهای اصلی.

| W | گسل | لیتولوژی | آنومالی | کلاس‌ها |
|-------|-----|----------|---------|----------|
| ۰/۴۴۳ | ۳ | ۱ | ۱ | آنومالی |
| ۰/۳۸۷ | ۲ | ۱ | | لیتولوژی |
| ۰/۱۶۹ | ۱ | | | گسل |



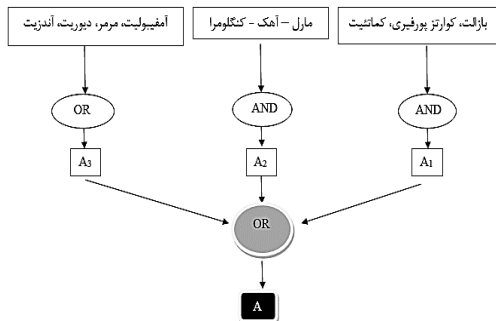
شکل ۸: نقشه پتانسیل مس و طلا با روش AHP در منطقه‌ی تخت سلیمان (الف) نقشه خطی سازی شده (ب) نقشه مقدار واقعی AHP

جدول ۶: محاسبات تابع لجستیک برای فاکتور لیتولوژی

| Fsc | M | Sc | \overline{dc} | فاصله از مارل (km) |
|----------|----------|----------|-----------------|--------------------|
| ۱/۰۰۰۰۰۰ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۲ | ۰/۵ | ۱-۰ |
| ۰/۹۹۹۹۹۷ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۶۶۶۶۶۷ | ۱/۵ | ۲-۱ |
| ۰/۸۵۹۲۵۲ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۴ | ۲/۵ | ۳-۲ |
| ۰/۰۵۱۴۵ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۲۸۵۷۱۴ | ۳/۵ | ۴-۳ |
| ۰/۰۰۳۹۱۷ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۲۲۲۲۲۲ | ۴/۵ | ۵-۴ |
| ۰/۰۰۰۷۴ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۱۸۱۸۱۸ | ۵/۵ | ۶-۵ |
| ۰/۰۰۰۲۳۳ | ۴۲/۰۸۴۱۵ | ۰/۱۵۳۸۴۶ | ۶/۵ | ۶< |

۵-۲- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

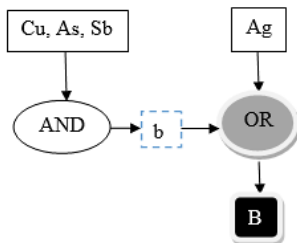
بعد از فازی‌سازی لایه‌ها، از عملگرهای مختلف تلفیق برای ترکیب لایه‌های مختلف با هم استفاده شد که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مراحل تلفیق درون فاکتورها نشان داده شده است.



شکل ۹: فلوچارت تلفیق داده‌های مربوط به لیتولوژی

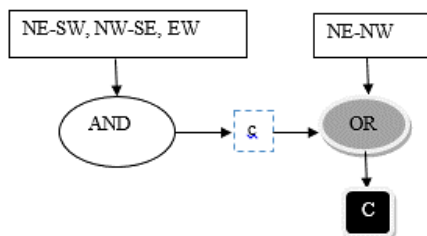
جدول ۷: محاسبات تابع لجستیک برای فاکتور گسل

| Fsc | M | Sc | \overline{dc} | فاصله از NE-NW (KM) |
|---------|-----------|----------|-----------------|---------------------|
| ۱/۰۰۰۰۰ | ۳۲/۷۶۵۲۱۵ | ۴ | ۰/۲۵ | ۰/۵-۰ |
| ۱/۰۰۰۰۰ | ۳۲/۷۶۵۲۱۵ | ۱/۳۳۳۳۳۳ | ۰/۷۵ | ۱-۵/۰ |
| ۰/۲۶۳۴۸ | ۳۲/۷۶۵۲۱۵ | ۰/۵۷۱۴۲۹ | ۱/۲۵ | ۱/۵-۱ |
| ۰/۰۰۰۲۳ | ۳۲/۷۶۵۲۱۵ | ۰/۸ | ۱/۷۵ | ۱/۵< |



شکل ۱۰: فلوچارت تلفیق داده‌های مربوط به آنومالی

جدول ۸: محاسبات تابع لجستیک برای فاکتور آنومالی

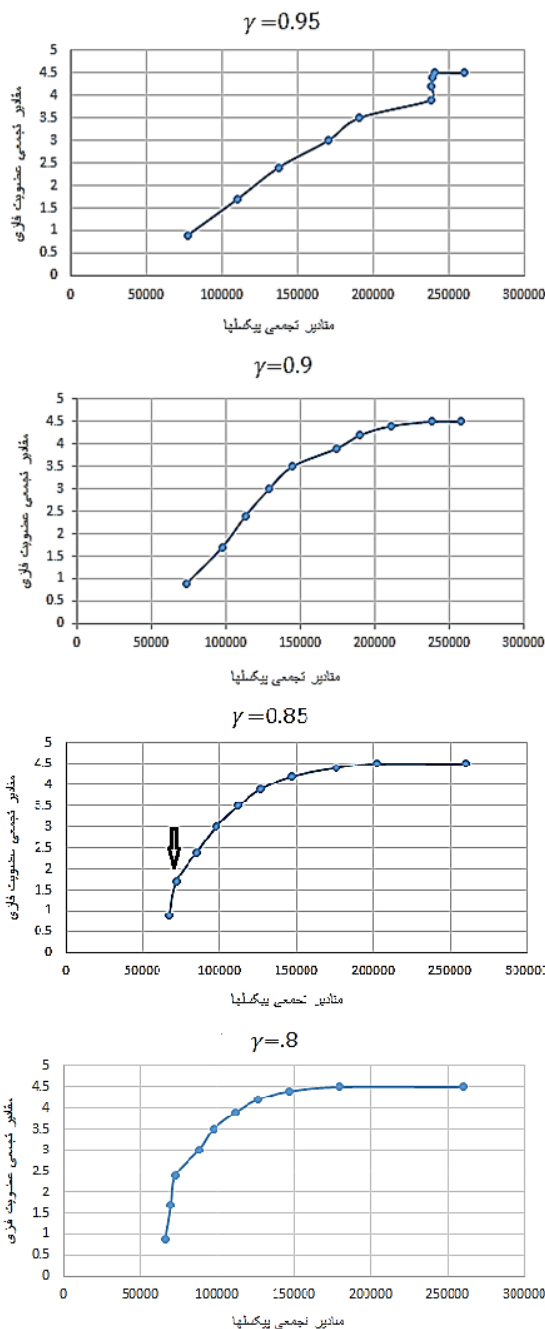


شکل ۱۱: فلوچارت تلفیق داده‌های مربوط به گسل

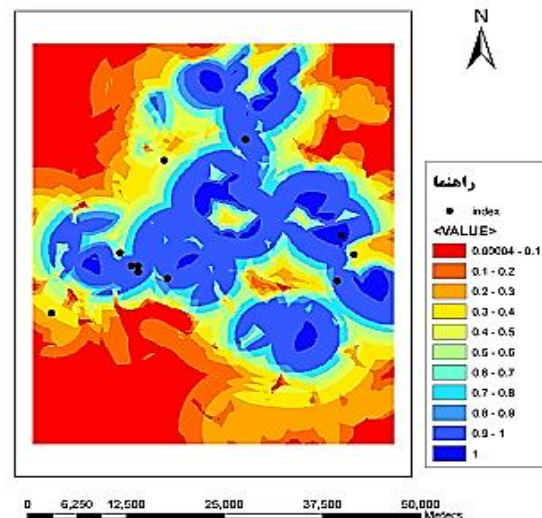
| Fsc | M | Sc | \overline{dc} | فاصله از (km) As |
|----------|----------|----------|-----------------|------------------|
| ۱/۰۰۰۰۰ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۲ | ۰/۵ | ۱-۰ |
| ۱/۰۰۰۰۰ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۶۶۶۶۶۷ | ۱/۵ | ۲-۱ |
| ۰/۹۸۱۸۲ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۴ | ۲/۵ | ۳-۲ |
| ۰/۱۴۸۵۰۵ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۲۸۵۷۱۴ | ۳/۵ | ۴-۳ |
| ۰/۰۰۷۱۵۵ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۲۲۲۲۲۲ | ۴/۵ | ۵-۴ |
| ۰/۰۰۰۹۴۸ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۱۸۱۸۱۸ | ۵/۵ | ۶-۵ |
| ۰/۰۰۰۲۳۳ | ۵۱/۱۰۰۹۲ | ۰/۱۵۳۸۴۶ | ۶/۵ | ۶< |

در نهایت فاکتورهای لیتولوژی (A)، آنومالی (B) و گسل (C) حاصل از تلفیق‌های لایه‌های درونی خود با عملگرهای AND یا OR فازی، با استفاده از عملگر گاما با مقادیر متفاوت γ با هم ترکیب شدند (شکل ۱۲).

در شکل ۱۳ نمودار قطعی سازی گاماهاى مختلف نشان داده شده است، باتوجه به این که در نمودار مربوط به $\gamma = 0.85$ مقدار حد آستانه ایی بیشترین مقدار (0/8) را دارد، بنابراین نقشه ی فازى مربوط به آن با در نظر گرفتن مقدار حد آستانه ایی مربوطه قطعی سازی شد. یعنی محدوده های با مقدار بیشتر از 0/8 به عنوان مناطق بسیار مطلوب، بین 0/5 تا 0/8 مناطق مطلوب و محدوده های کمتر از 0/5 به عنوان مناطق نامطلوب در نظر گرفته شدند (شکل ۱۴).



شکل ۱۳: نمودار قطعی سازی نتایج با مقدار مختلف گاما



شکل ۱۲: نقشه نهایی تلفیقی فازى با عملگر γ

۵-۳- قطعی سازی

برای خارج کردن نقشه به دست آمده از حالت فازى، عمل قطعی- سازی انجام می شود. بنابراین منحنی های مربوط به مقادیر مختلف گاما رسم (مقدار تجمعی پیکسلها در مقابل مقدار تجمعی مقادیر عضویت فازى) و با توجه به شیب منحنی، نقطه ایی که برای اولین بار تغییر شیب در آنجا رخ داده است به عنوان حد آستانه ایی انتخاب شد که البته برای مقادیر مختلف گاما، مقدار حد آستانه ایی حداکثر برای قطعی سازی در نظر گرفته شد. در جدول ۹ پارامترهای لازم برای رسم نمودار قطعی سازی $\gamma = 0.85$ آورده شده است.

جدول ۹: پارامترهای $\gamma = 0.85$ برای قطعی سازی نتایج

| مقدار تجمعی فازى | مقدار تجمعی پیکسلها | تعداد پیکسلها | مقدار تجمعی پیکسلها |
|------------------|---------------------|---------------|---------------------|
| 0/9 | 67435 | 67435 | 67435 |
| 0/8 | 4396 | 71831 | 71831 |
| 0/7 | 2/4 | 13621 | 85452 |
| 0/6 | 3 | 12213 | 97665 |
| 0/5 | 3/5 | 14520 | 112185 |
| 0/4 | 3/9 | 14781 | 126966 |
| 0/3 | 4/2 | 20279 | 147245 |
| 0/2 | 4/4 | 28465 | 175710 |
| 0/1 | 4/5 | 26568 | 202278 |
| 0/0002 | 4/5002 | 58082 | 260360 |

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \times x_i}{\sum_{i=1}^m (w_i - 1) + x_i} \quad (12)$$

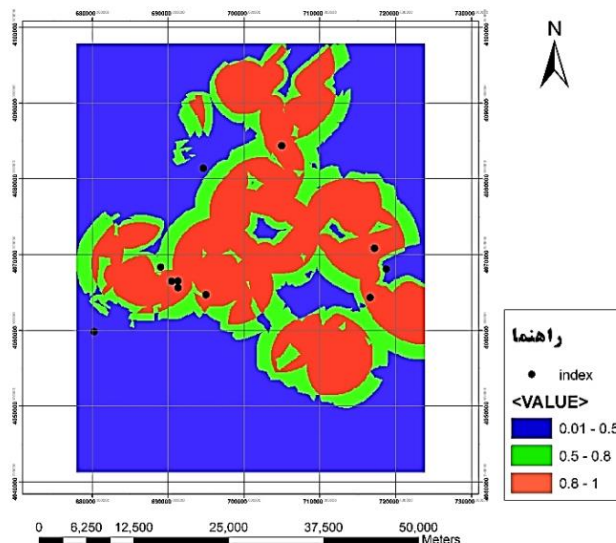
در این رابطه W_i برابر وزنی است که برای هر فاکتور در نظر گرفته شده و مقدار آن از ۲ تا ۱۰ متغیر است و نشان دهنده میزان برتری یک لایه نسبت به لایه‌های دیگر است. منظور از X_i نقشه‌ی فازی شده‌ی مربوط به لایه‌های مختلف است. با استفاده از این فرمول در مرحله‌ی تلفیق نیز اولویت‌بندی معیارها دوباره انجام شد (در این روش از اندیس‌ها برای اعتبارسنجی استفاده شد). در جدول‌های ۱۰ تا ۱۲، مقدار فازی لایه‌های لیتولوژی، آنومالی و گسل ارائه شده است.

جدول ۱۰: مقدار فازی لایه لیتولوژی روش AHP-Fuzzy

| $\mu_A(X_{ij})$ | W_i | a | فاصله از لیتولوژی (km) |
|-----------------|-------|----|------------------------|
| ۱ | ۰/۳۸۷ | ۱ | ۱-۰ |
| ۰/۹۲ | ۰/۳۸۷ | ۲ | ۲-۱ |
| ۰/۸۳ | ۰/۳۸۷ | ۳ | ۳-۲ |
| ۰/۷۳ | ۰/۳۸۷ | ۴ | ۴-۳ |
| ۰/۶۲ | ۰/۳۸۷ | ۵ | ۵-۴ |
| ۰/۵۱ | ۰/۳۸۷ | ۶ | ۶-۵ |
| ۰/۴۱ | ۰/۳۸۷ | ۷ | ۷-۶ |
| ۰/۳۲ | ۰/۳۸۷ | ۸ | ۸-۷ |
| ۰/۲۵ | ۰/۳۸۷ | ۹ | ۹-۸ |
| ۰/۱۸ | ۰/۳۸۷ | ۱۰ | ۱۰-۹ |
| ۰/۱۴ | ۰/۳۸۷ | ۱۱ | ۱۱-۱۰ |
| ۰/۰۱ | ۰/۳۸۷ | ۱۲ | ۱۱< |

جدول ۱۱: مقدار فازی لایه آنومالی ژئوشیمی روش AHP-Fuzzy

| $\mu_A(X_{ij})$ | W_i | A | فاصله از آنومالی (km) |
|-----------------|-------|---|-----------------------|
| ۱ | ۰/۴۴۳ | ۱ | ۱-۰ |
| ۰/۹۳ | ۰/۴۴۳ | ۲ | ۲-۱ |
| ۰/۸۴ | ۰/۴۴۳ | ۳ | ۳-۲ |
| ۰/۷۵ | ۰/۴۴۳ | ۴ | ۴-۳ |
| ۰/۶۴ | ۰/۴۴۳ | ۵ | ۵-۴ |
| ۰/۵۴ | ۰/۴۴۳ | ۶ | ۶-۵ |
| ۰/۴۴ | ۰/۴۴۳ | ۷ | ۷-۶ |
| ۰/۳۴ | ۰/۴۴۳ | ۸ | ۸-۷ |
| ۰/۲۷ | ۰/۴۴۳ | ۹ | ۹-۸ |



شکل ۱۴: نقشه‌ی قطعی‌سازی شده برای پتانسیل مس و طلا.

۶- روش AHP-Fuzzy

در این مطالعه تلفیق روش‌های فازی و AHP در تهیه نقشه پتانسیل مس و طلا در منطقه مورد نظر با عنوان AHP-Fuzzy استفاده شد و نتیجه آن با نتایج روش‌های AHP و فازی مقایسه شد. در مرحله‌ی اول وزن‌های نهایی حاصل از روش AHP برای فازی‌سازی لایه‌های اطلاعاتی در رابطه ۱۱ به کار گرفته شدند. تابع مورد نظر پس از بررسی ضرایب ممکن در آن به شکل زیر تعریف شده است:

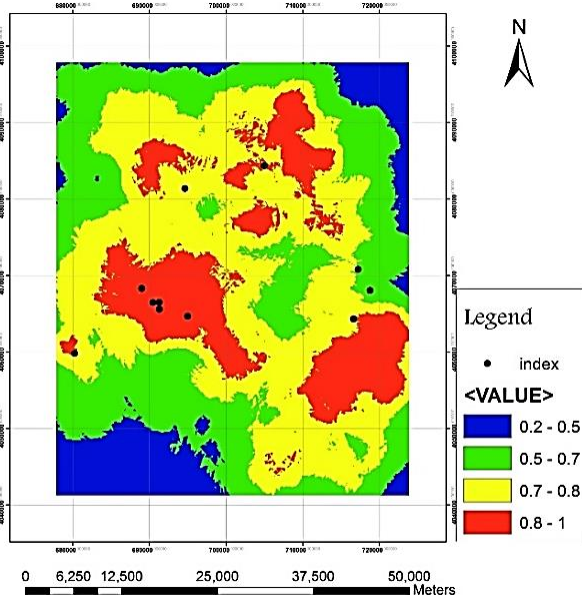
$$\mu_A(X_{ij}) = \frac{(W_i \times 10) + 1}{\sqrt{2^n/2} + (W_i \times 10)} \quad (11)$$

که $\mu_A(X_{ij})$ مقدار فازی برای هر الگوی ژاز نقشه‌ی شاهد i می‌باشد و W_i وزن‌های به دست آمده از روش AHP است که برای آنومالی‌های مختلف ژئوشیمیایی برابر ۰/۴۴۳، واحدهای لیتولوژی برابر ۰/۳۸۷ و گسل با جهت‌های مختلف برابر ۰/۱۶۹ است. مقدار a در فرمول بیان‌شده بیانگر شماره‌ی کلاس‌های مربوط به لایه‌های مختلف است که بسته به تعداد کلاس‌ها از ۱ تا n متغیر است (کلاس‌های تعریف شده در اینجا بر اساس فاصله است).

بعد از مشخص شدن مقدار فازی برای هر لایه، ترکیب کردن آن‌ها با استفاده از تابع زیر انجام گرفت:

با ترکیب درون لایه‌ها، نتایج بعد از تعیین اهمیت و وزن دهی دوباره، براساس رابطه زیر با هم ترکیب شدند که نقشه پتانسیل مربوط به آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

$$\mu = \frac{(10 \times \text{Anomaly}) + (9 \times \text{Lithology}) + (6 \times \text{Fault})}{(9 + \text{Anomaly}) + (8 + \text{Lithology}) + (5 + \text{Fault})}$$



شکل ۱۵: نقشه‌ی پتانسیل مس و طلا با استفاده از روش AHP-Fuzzy.

۷- بررسی نتایج

با در نظر گرفتن تعداد اندیس‌ها و میزان پراکندگی آن‌ها در محدوده‌های بسیار مطلوب به‌عنوان یک شاخص مهم، برای سنجیدن کارایی روش‌های انجام شده از نسبت تعداد "اندیس-های موجود در محدوده بسیار مطلوب به درصد مساحت آن محدوده" استفاده شد. به این معنی که احتمال موفقیت در حالتی که یک محدوده بسیار مطلوب، تعداد بیشتری اندیس را نسبت به مساحتش در برگردد، بیشتر است. در واقع نقشه‌ایی که دارای بیشترین مقدار نسبت مذکور باشد دارای بیشترین تعداد اندیس در محدوده‌ایی کوچک است که نسبت به نقشه‌های دیگر در اولویت قرار می‌گیرد. در روش AHP، محدوده با مطلوبیت بالا ۲۰/۳۹ درصد منطقه را تشکیل داد و ۷ اندیس در این محدوده قرار گرفتند. محدوده با مطلوبیت متوسط نیز ۶۳/۶ درصد منطقه با ۴ اندیس را شامل می‌شود. نسبت تعداد اندیس‌های شاخص در محدوده بسیار مطلوب به درصد مساحت آن محدوده برابر با $\frac{7}{20.39} = 0.34$ می‌باشد.

| | | | |
|------|-------|----|-------|
| ۰/۲ | ۰/۴۴۳ | ۱۰ | ۱۰-۹ |
| ۰/۱۵ | ۰/۴۴۳ | ۱۱ | ۱۱-۱۰ |
| ۰/۱۱ | ۰/۴۴۳ | ۱۲ | ۱۲-۱۱ |
| ۰/۰۱ | ۰/۴۴۳ | ۱۳ | ۱۳< |

جدول ۱۲: مقدار فازی لایه گسل روش AHP-Fuzzy

| $\mu_A(X_{ij})$ | W_i | A | فاصله از گسل (km) |
|-----------------|-------|----|-------------------|
| ۱ | ۰/۱۶۹ | ۱ | ۰/۵-۰ |
| ۰/۸۷ | ۰/۱۶۹ | ۲ | ۱-۰/۵ |
| ۰/۷۳ | ۰/۱۶۹ | ۳ | ۱/۵-۱ |
| ۰/۶ | ۰/۱۶۹ | ۴ | ۲-۱/۵ |
| ۰/۴۷ | ۰/۱۶۹ | ۵ | ۲/۵-۲ |
| ۰/۳۷ | ۰/۱۶۹ | ۶ | ۳-۲/۵ |
| ۰/۲۸ | ۰/۱۶۹ | ۷ | ۳/۵-۳ |
| ۰/۲۱ | ۰/۱۶۹ | ۸ | ۴-۳/۵ |
| ۰/۱۵ | ۰/۱۶۹ | ۹ | ۴/۵-۴ |
| ۰/۱۱ | ۰/۱۶۹ | ۱۰ | ۵-۴/۵ |
| ۰/۰۱ | ۰/۱۶۹ | ۱۱ | ۵< |

بدین ترتیب تمامی لایه‌ها با در نظر گرفتن وزن‌های به‌دست آمده از روش AHP، فازی‌سازی شده و سپس با استفاده از معادله ۱۲ ترکیب شدند. ترکیب درون لایه‌ای لیتولوژی:

$L =$ آهک، $M_1 =$ مارل، $A_1 =$ آندزیت، $A_2 =$ آمفیبولیت، $D =$ دیوریت، $Q =$ کماثیت، $K =$ کنگومرا، $C =$ مرمر، $M_2 =$ کوارتز پورفیری، $B =$ بازالت

$$\mu = \frac{(10 \times L) + (9 \times M_1) + (8 \times A_1) + (7 \times A_2) + (6 \times D) + (5 \times M_2) + (4 \times C) + (3 \times K) + (2 \times Q) + (2 \times B)}{(9 + L) + (8 + M_1) + (7 + A_1) + (6 + A_2) + (5 + D) + (4 + M_2) + (3 + C) + (2 + K) + (1 + Q) + (1 + B)}$$

ترکیب درون لایه‌ای گسل:

$$\mu = \frac{(10 \times \text{NE-NW}) + (9 \times \text{NE-SW}) + (8 \times \text{NW-SE}) + (7 \times \text{EW})}{(9 + \text{NE-NW}) + (8 + \text{NE-SW}) + (7 + \text{NW-SE}) + (6 + \text{EW})}$$

ترکیب درون لایه‌ای آنومالی ژئوشیمیایی:

$$\mu = \frac{(10 \times \text{As}) + (8 \times \text{Cu}) + (5 \times \text{Ag}) + (3 \times \text{Sb})}{(9 + \text{As}) + (7 + \text{Cu}) + (4 + \text{Ag}) + (2 + \text{Sb})}$$

صورت ضرورت از نقشه‌های دیگر که در صد بیشتری از مناطق امید بخش را نشان داده‌اند در مراحل بعدی اکتشاف استفاده کرد. ضمن این‌که در هر سه نقشه پتانسیل حاصل از روش‌های مطالعه شده، قسمت‌هایی به‌طور ثابت در محدوده بسیار مطلوب قرار گرفته‌اند که طبیعتاً این مناطق برای برر سی‌های اکتشافی نسبت به سایر محدوده‌ها در اولویت هستند. مناطق امید بخش طلا و مس به‌ویژه طلا منطبق بر واحدهای سنگی آهک، مارل، آندزیت، آمفیبولیت، گنایس و دیوریت هستند که این نتایج با کانه‌زایی طلا و آرسنیک زرشوران درون سنگ‌های میزبان کربناته و دگرگونی منطبق است و هم‌چنین با کانه‌زایی چندفلزی مس متمرکز در کانسار مس-کبالت بایچه باغ درون سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی مرتبط با محلول‌های گرمایی نیز هم‌پوشانی دارد. از طرفی دیگر مناطق امید بخش تعیین شده با آنومالی‌های ژئوشیمیایی به ویژه آنومالی آرسنیک انطباق خوبی دارد.

در روش فازی، ۲۷/۵۸ درصد منطقه به محدوده بسیار مطلوب اختصاص یافته است که ۷ اندیس در این بازه قرار گرفتند و بنابراین نسبت محاسبه شده برای آن برابر $\frac{7}{27.58} = 0.25$ خواهد بود.

در روش AHP-Fuzzy، محدوده‌ی بسیار مطلوب ۱۷۱۷،۷۷ درصد منطقه را شامل شد که با حضور ۷ اندیس در آن، نسبت بحث شده برابر $\frac{7}{17.7} = 0.4$ محاسبه شد.

۸- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن نتایج و نسبت محاسبه شده "تعداد اندیس‌های شناخته شده در محدوده بسیار مطلوب به در صد مساحت آن محدوده"، نقشه حاصل از روش تلفیقی AHP-Fuzzy، از مقدار نسبت بیشتری در مقایسه با نقشه‌های به‌دست آمده از روش AHP و فازی برخوردار است. هم‌چنین در این روش به دلیل این‌که هم در مرحله فازی‌سازی و هم در مرحله تلفیق، اولویت بندی لایه‌ها در نظر گرفته می‌شود، دارای صحت بیشتری بوده و قابلیت اطمینان بالاتری دارد. از طرفی دیگر با توجه به این‌که اکتشاف معدن یک فرایند چند مرحله‌ای است می‌توان در کنار نقشه به‌دست آمده از روش AHP-Fuzzy، در

مراجع

- [5]. قربانی، م. دیباچه ایی بر زمین شناسی اقتصادی ایران، فصل چهارم. ۱۳۸۱
- [6]. Available from: www.gsi.ir.
- [7]. Abedi, M., S. Torabi, and G. Norouzi, *Application of fuzzy AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: Seridune copper deposit*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2013. **54**(2): p. 145-164.
- [8]. Pazand, K. and A. Hezarkhani, *Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahroud area (NW, Iran)*. Earth Science Informatics, 2015. **8**(1): p. 207-220.
- [1]. با باخانی، ع. ر. قلمقاش، ج. نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰. منطقه تخت سلیمان، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران. ۱۳۷۰.
- [2]. Carranza, E.J.M., *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Vol. 11. 2008: Elsevier.
- [3]. Hosseinali, F. and A.A. Alesheikh, *Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration*. American Journal of Applied Sciences, 2008. **5**(9): p. 1187-1198.
- [4]. Bonham, C., *Geographic Information System for geoscientists*. 1994, Pergamon (modeling with GIS), Ontario.

- [16]. Porwal, A.K., *Mineral potential mapping with mathematical geological models*. Vol. 130. 2006: Utrecht University.
- [17]. Porwal, A., et al., *Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia*. *Ore Geology Reviews*, 2014.
- [18]. Porwal, A., E. Carranza, and M. Hale, *Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping*. *Natural Resources Research*, 2003. **12**(1): p. 1-25.
- [19]. Ford, A., J.M. Miller, and A.G. Mol, *A Comparative Analysis of Weights of Evidence, Evidential Belief Functions, and Fuzzy Logic for Mineral Potential Mapping Using Incomplete Data at the Scale of Investigation*. *Natural Resources Research*, 2015: p. 1-15.
- [20]. An, P., W. Moon, and A. Rencz, *Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data*. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 1991. **27**(1): p. 1-11.
- [9]. Saaty, T.L., *Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process*. *Management science*, 1986. **32**(7): p. 841-855.
- [10]. Pazand, K., et al., *Combining AHP with GIS for predictive Cu porphyry potential mapping: a case study in Ahar Area (NW, Iran)*. *Natural resources research*, 2011. **20**(4): p. 251-262.
- [11]. Dağdeviren, M., *Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE*. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2008. **19**(4): p. 397-406.
- [12]. Macharis, C., et al., *PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis.: Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP*. *European Journal of Operational Research*, 2004. **153**(2): p. 307-317.
- [13]. Zadeh, L.A., *Fuzzy sets*. *Information and control*, 1965. **8**(3): p. 338-353.
- [14]. Zadeh, L.A., *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I*. *Information sciences*, 1975. **8**(3): p. 199-249.
- [15]. Yousefi, M. and E.J.M. Carranza, *Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping*. *Computers & Geosciences*, 2015. **74**: p. 97-109.

† Saaty

‡ Defuzzification

‡ Analytical Hierarchy Process

‡ Fuzzy logic

‡ Multiple criteria decision making (MCDM)