



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

(مقاله پژوهشی)

مدل سازی پتانسیل کانسارهای مس پورفیری با استفاده از سامانه استنتاج فازی در کمر بند فلز زایی کرمان

چکیده

اجرای عملیات اکتشاف مواد معدنی بسیار پرهزینه و زمانبر است. مدل سازی پتانسیل معدنی از جمله راهکارهای مورد استفاده به منظور کاهش هزینه های اکتشاف مواد معدنی است. مدل سازی پتانسیل معدنی را می توان یکی از مسائل مبتنی بر تلفیق اطلاعات دانست که هدف آن تولید نقشه های پیش بینی بر اساس معیارهای اکتشافی مختلف از جمله اطلاعات زمین شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، دورسنجی، دگرسانی و غیره است که هر کدام حاوی حجم بالایی از اطلاعات هستند. در این مقاله یک رویکرد فازی مینا با استفاده از داده های اکتشافی همچون اطلاعات ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، زمین شناسی و تصاویر سنجش از دور به منظور مدل سازی پتانسیل معدنی جهت اکتشاف کانسارهای تپ مس پورفیری ارائه می شود. بدین منظور، پس از فازی سازی نقشه های زمین شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی با استفاده از متغیرهای زبانی و توابع عضویت دوزنقه ای، این نقشه ها با کمک سامانه استنتاج فازی نوع ممدانی با یکدیگر ترکیب شدند و نقشه پتانسیل معدنی تهیه شد. به منظور مقایسه رویکرد ارائه شده و ارزیابی نتایج، نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده نیز تهیه شد. از روش های نمودار پیش بینی - مساحت و چگالی نرمال شده جهت ارزیابی نقشه پتانسیل معدنی استفاده شد. چگالی نرمال برای روش تاپسیس اصلاح شده برابر با ۴ و برای رویکرد پیشنهادی برابر با ۶/۱۴ است که نشان دهنده برتری رویکرد پیشنهادی بر سایر روش های مرسوم مدل سازی پتانسیل معدنی دارد. عملکرد بهتر و قابلیت بکارگیری در قالب سناریوهای مختلف از جمله مزایای رویکرد پیشنهادی می باشند.

کلمات کلیدی

نقشه پتانسیل معدنی، سامانه استنتاج فازی، مس پورفیری، عدم قطعیت، نمودار پیش بینی - مساحت.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نهشته‌های معدنی با ردپای ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی قوی به‌طور گسترده‌ای مورد اکتشاف و استخراج قرار گرفته‌اند و بسیاری از آن‌ها در آستانه پایان عمر خود قرار دارند. همزمان با این روند، رشد چشمگیر صنایع و فناوری‌های نوین، منجر به افزایش قابل‌توجه تقاضا برای منابع معدنی گردیده است. در این راستا، بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته، دقیق و کارآمد جهت شناسایی نواحی مستعد کانه‌زایی با ردپای حداقلی در داده‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی، از اهمیت فزاینده‌ای برخوردار شده است. همچنین، اتکای صرف به یک نوع داده اکتشافی می‌تواند به دلیل محدودیت‌های مکانی یا ناقص بودن داده‌ها، موجب عدم شناسایی برخی اهداف اکتشافی بالقوه شود؛ از این رو، استفاده از رویکردهای تلفیقی و چندمنظوره برای افزایش دقت و کارایی در مراحل مختلف اکتشاف ضروری به نظر می‌رسد [۱].

مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) یک چارچوب مهم در اکتشاف مواد معدنی است که به منظور کاهش هزینه‌های اکتشافی، به حداقل رساندن ریسک، کاهش عدم قطعیت در مراحل مختلف اکتشاف و در نهایت شناسایی نواحی معدنی بالقوه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]. این روش فرایند تجزیه و تحلیل، استخراج الگوهای پیش‌گو و همچنین ترکیب و تلفیق مجموعه داده‌های مکانی از منابع مختلف است که به‌منظور شناسایی مناطق هدف و رتبه‌بندی این مناطق در اکتشاف کانی‌سازی‌های ناشناخته صورت می‌گیرد [۳، ۴].

این مراحل در قالب سه دسته روش‌های داده‌مبنا، روش‌های دانش‌مبنا و ترکیبی از هر دو روش انجام می‌گیرد [۴]. روش‌های داده‌مبنا [۵-۲۰] به‌طور عمده برای مناطقی به‌کار می‌روند که کارهای اکتشافی لازم و کافی صورت گرفته (مناطق قهوه‌ای) و دارای تعداد قابل توجهی نقاط دارای پتانسیل معدنی و یا کانسار هستند و از آن‌ها به‌عنوان نقاط آموزشی جهت برقراری روابط مکانی با عوارض زمین‌شناسی و داده‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی خاص استفاده می‌شود [۲۱]. در مقابل، روش‌های دانش‌مبنا [۲۲-۲۹] بر مبنای نظرات کارشناسی در مورد اهمیت نقشه‌های فاکتور

در تهیه نقشه پتانسیل معدنی استوارند و بیشتر در مدل‌سازی برای مناطقی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن‌ها مطالعات اکتشافی کمی صورت گرفته است (مناطق سبز) [۳۰]. علاوه بر روش‌های داده‌مبنا و دانش‌مبنا گروه دیگری از روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی که به‌صورت ترکیبی از روش‌های داده‌مبنا و دانش‌مبنا هستند نیز وجود دارد [۳۱-۳۴]. هریک از روش‌های مورد اشاره دارای کاستی‌ها و برتری‌هایی هستند که با توجه به منطقه مورد مطالعه و داده‌های در دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرند. نویسندگان بسیاری [۳۴-۴۲] در تلاش بوده‌اند که از روش سامانه استنتاجگر فازی FIS برای مدل‌سازی رابطه‌های دوسویه بین مولفه‌های سامانه‌های معدنی در چارچوب راهبرد این سامانه‌ها استفاده کنند. از جمله مزایای این سامانه می‌توان به توانایی مدل‌سازی ماهیت غیرقطعی داده‌های اکتشافی و همچنین به‌کارگیری دانش کارشناسی و انعطاف دادن به انواع ذخایر معدنی در قالبی یکپارچه، اشاره کرد [۴۳-۴۵].

تنگستانی و مور [۴۶] نظریه مجموعه فازی را برای اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی به کار بردند. [۴۷] کاربرد روش منطق فازی دانش‌مبنا را برای تلفیق مجموعه داده‌های مکانی مختلف اکتشافی به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی برای اکتشاف مس در ذخیره مس سریدون واقع در استان کرمان را بررسی کردند. آن‌ها برای این منظور لایه‌های ژئوفیزیکی مختلف که از بررسی‌های مغناطیسی و الکتریکی به‌دست آمده‌اند، را به همراه لایه‌های استخراج‌شده از زمین‌شناسی مانند سنگ‌شناسی، گسل و دگرسانی و داده‌های ژئوشیمیایی در این فرایند استفاده کردند. آن‌ها سپس عملگرهای جمع و گامای فازی را برای ادغام هفت لایه شاهد ژئوفیزیک، سه لایه زمین‌شناسی و یک لایه ژئوشیمیایی به‌کار بردند. شاخص بهره‌وری گمانه‌های اکتشافی^۱ (عیار مس ضربدر ضخامت) برای ارزیابی نقشه پتانسیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت که نشان داد ضریب همبستگی^۲ بهینه ۰/۸۶ بین مقادیر نقشه پتانسیل و مقدار بهره‌وری مس در طول گمانه‌ها وجود دارد.

² Correlation Coefficient¹ The productivity of the drilled boreholes

در این پژوهش، پس از مرور مطالعات پیشین در حوزه تهیه نقشه پتانسیل معدنی، مواد و روش‌ها شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه و مبنای سامانه‌های استنتاج فازی معرفی می‌شود. پس از تبیین رویکرد مورد استفاده، مراحل اجرای آن بیان می‌شود. در بخش نتایج، میزان انطباق نقشه حاصل با داده‌های واقعی و موقعیت اندیس‌های معدنی شناخته‌شده ارزیابی می‌گردد. در نهایت، روش به‌کاررفته و نتایج آن تحلیل و با سایر روش‌ها مقایسه شده و نتیجه‌گیری همراه با پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- رویکرد پیشنهادی

مراحل اصلی مدل‌سازی پتانسیل معدنی شامل تعیین فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی، جمع‌آوری اطلاعات، ایجاد لایه‌های شاهد، وزندهی این لایه‌ها و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار، تلفیق نقشه‌های شاهد و در نهایت رتبه‌بندی نواحی اهداف اکتشاف برای بررسی‌های بیشتر در مراحل بعدی اکتشاف است [۵۰، ۵۱]. فرآیند ترکیب و تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار توسط روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که از جمله معتبرترین آن‌ها می‌توان منطق بولین، همپوشانی شاخص، عملگرهای منطق فازی، سامانه استنتاج فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی را نام برد. با این حال، انتخاب مناسب‌ترین روش (یا روش‌ها) همچنان چالشی باقی مانده است. ماهیت کلی‌نگر تکنیک‌های فعلی مدل‌سازی پتانسیل معدنی این مزیت را دارد که تقریباً همگی آن‌ها می‌توانند در بیشتر پروژه‌های اکتشافی مورد استفاده قرار گیرند. با این وجود، انتخاب روش مناسب MPM اغلب بیشتر به تجربه قبلی کاربر بستگی دارد تا به نوع و کیفیت داده‌های ورودی موجود یا نوع کانسار هدف. اگرچه بیشتر این روش‌ها از نظر آماری قابل قبول هستند، اما مقادیر پتانسیل به‌دست‌آمده از آن‌ها متفاوت است که این موضوع، مقایسه‌پذیری و تعیین یک روش قابل اعتماد و اثبات‌شده برای هدف‌گذاری

برک و همکاران [38] کاربرد روش سامانه استنتاجگر فازی (FIS) برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ساوه در استان مرکزی را با استفاده از تلفیق هفت لایه شاهد استخراج شده از مجموعه داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی در یک پایگاه داده جغرافیایی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا داده‌های اکتشافی را برای تولید سه لایه معیار زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی با استفاده از یک عملگر گامای فازی ادغام کردند. در مرحله دوم، این سه لایه را برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه با استفاده از FIS ترکیب کردند و به‌منظور ارزیابی دقت روش مورد استفاده، از شاخص بهره‌وری^۱ ۱۸ گمانه برای بررسی همبستگی بین زون‌های معدنی و نقشه پتانسیل معدنی خروجی استفاده کردند. لایه‌های شاهد ترکیب شده، ضریب همبستگی خطی پیرسون^۲ ۰/۴۴ را در تشخیص کانی‌سازی مس در عمق نشان دادند.

اسماعیل‌زاده و همکاران [48] داده‌های زمین‌شناسی، دگرسانی^۳ و ژئوشیمیایی را به‌منظور تولید نقشه پتانسیل معدنی در کانسار پورفیری مس-مولیبدن کیکال-بورملیک تلفیق کردند. سپس با در نظر گرفتن مدل مفهومی سیستم‌های مس پورفیری، به هر لایه وزنی اختصاص دادند و لایه‌ها با عملگر گامای فازی ترکیب و نقشه پتانسیل معدنی نهایی را تولید کردند. با توجه به مدل پتانسیل معدنی تولید شده، ۰/۸۶ درصد از منطقه مورد مطالعه پتانسیل کانی‌زایی پورفیری بالایی را نشان داد و آن‌ها این مناطق را برای حفاری‌های اکتشافی بعدی پیشنهاد کردند.

یکی از اهداف اصلی این مقاله ارائه رویکردی مبتنی بر سامانه استنتاج فازی به‌منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی است، تا علاوه بر بهبود نتایج که خود منجر به شناسایی دقیق‌تر مناطق امیدبخش می‌شود، عدم قطعیت و به دنبال آن عدم اطمینان و هزینه ادامه عملیات اکتشافی را نیز کاهش دهد. این مدل منطقی با استفاده از داده‌های کیفی و متغیرهای زبانی تهیه نقشه پتانسیل معدنی را نسبت به روش‌های تلفیق متداول که از ترکیب داده‌های کمی و کیفی استفاده می‌کنند، ساده‌تر و قابل درک می‌کند [۴۹].

² Pearson's linear correlation coefficient

³ Alteration

¹ The productivity Index

به صورت رابطه‌های ریاضی تعریف می‌شود و خروجی‌هایی با مقادیر حقیقی ایجاد می‌شود [۵۷].
تعداد قوانین فازی براساس رابطه ۱ تعیین می‌شود.

$$M^N = \text{تعداد قوانین فازی} \quad (1)$$

در این رابطه M تعداد متغیر زبانی و N تعداد ورودی‌های سامانه استنتاجگر فازی (در اینجا تعداد نقشه‌های شاهد) است. این سامانه، قوانین را بر روی ارزش پیکسل‌ها اعمال می‌کند.

غیرفازی‌سازی: خروجی سامانه استنتاج فازی معمولاً به صورت یک یا چند عدد فازی ارائه می‌شود که برای درک و تفسیر آسان‌تر، لازم است به یک مقدار حقیقی تبدیل شوند. روش‌های زیادی مانند روش مرکز ثقل^۴، میانگین وزن‌دار^۵، بیشترین میانه^۶، مرکز جمیع^۷ و مرکز بزرگترین سطوح^۸ برای این کار وجود دارد [۵۷].
شکل ۱ فرآیند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.

اکتشافی در شرایط واقعی تصمیم‌گیری را با مشکل مواجه می‌سازد [۵۲].

در این مقاله، از سامانه استنتاجگر فازی جهت تلفیق نقشه‌های شاهد استفاده شده است. این سامانه یک چارچوب محاسباتی مبتنی بر مفاهیم تئوری مجموعه‌های فازی است و می‌تواند به عنوان فرآیندی برای نگاشت یک مجموعه داده ورودی داده شده به یک مجموعه خروجی در نظر گرفته شود. صنعت معدن به‌ویژه پذیرای این روش‌ها بوده است، زیرا بسیاری از عملیات و فرآیندهای معدنی به روش‌های تجربی درک و کنترل می‌شوند. هدف از طراحی سیستم استنتاج فازی این است که دانش یک متخصص انسانی را نسبت به یک حوزه خاص جذب کند و آن را در رایانه به گونه‌ای کدگذاری کند که دانش متخصص در اختیار کاربری که تجربه کمتری دارد قرار گیرد [۵۳].
به کارگیری این سامانه در هر فرایند شامل ۳ مرحله فازی‌سازی^۱، موتور استنتاج فازی^۲ و قطعی‌سازی^۳ خروجی‌هاست [۵۴].

فازی‌سازی: به فرآیند دریافت داده‌های ورودی و تبدیل آن به مقادیر زبانی مناسب فازی‌سازی گفته می‌شود. توابع عضویت وظیفه تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی را برعهده دارند [۵۵].

موتور سامانه استنتاجگر فازی: پس از عملیات فازی‌سازی، داده‌ها وارد موتور سامانه استنتاجگر فازی می‌شوند. پایگاه قوانین شامل مجموعه‌ای از قوانین فازی اگر-آنگاه (if-then) است که رابطه بین متغیرهای زبانی ورودی به موتور استنتاجگر و خروجی آن را تعریف می‌کند [۵۵].
به طور کلی، یک سامانه استنتاجگر فازی را می‌توان بر اساس نوع فرمول‌بندی قوانین فازی به دو دسته، مدل ممدانی و مدل تاکاگی-سوگنو طبقه‌بندی کرد [۵۶].

در مدل ممدانی از عملگرهای AND و OR برای ترکیب درجات عضویت فازی توابع ورودی استفاده می‌کند. در حالی که در روش تاکاگی-سوگنو بخش "آنگاه" قوانین فازی

^۵ Weighted Average

^۶ Mean max

^۷ Center of Sums

^۸ Center of largest area

^۱ Fuzzification

^۲ Inference Engine

^۳ Defuzzification

^۴ Centroid of area

۲-۳- پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

هر یک از لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی دارای مقیاس اندازه‌گیری خاص خود هستند که این مسئله مقایسه مقادیر آن‌ها با یکدیگر را غیرممکن می‌سازد. بنابراین به‌منظور قابل مقایسه شدن و آماده‌سازی آن‌ها جهت تلفیق می‌بایست به‌طریقی آن‌ها را مستقل از واحد اندازه‌گیری و یا عبارتی دیگر بی‌مقیاس کرد. بدین منظور، در این پژوهش از روش بی‌مقیاس‌سازی فازی استفاده شد و دامنه تغییرات تمام داده‌ها در بازه ۰ و ۱ قرار گرفت.

```

graph TD
    subgraph "دریافت داده ها"
        A1[داده های ژئوشیمی]
        A2[داده های زمین شناسی]
        A3[داده های ژئوفیزیکی]
    end
    A1 --> B1[شناسایی و جایگزینی داده های غلط]
    A2 --> B1
    A3 --> B1
    B1 --> B2[بی مقیاس سازی داده ها]
    B2 --> B3[تبدیل داده ها به فرمت مناسب]
    B3 --> C1[تخصیص سیستم مختصات و سیستم مرجع یکسان به داده ها]
    C1 --> C2[ساخت پایگاه داده در محیط نرم افزار GIS]
    C2 --> C3[تهیه نقشه های فاکتور]
    C3 --> C4[تخصیص وزن مناسب به هر یک از نقشه های فاکتور]
    C4 --> D1[فازی سازی]
    C4 --> D2[مونوتور استنتاج فازی]
    C4 --> D3[غیرفازی سازی]
    D1 --> E[نقشه پتانسیل معدنی]
    D2 --> E
    D3 --> E
    E --> F[ارزیابی نتایج]
    F --> G[پایان مدل سازی]
    
```

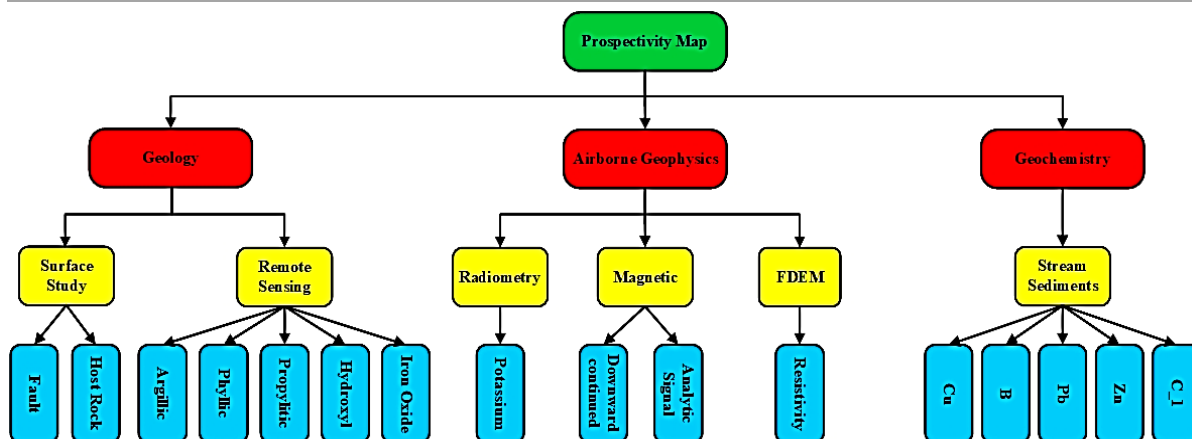
The flowchart illustrates the process of building a fuzzy model for land suitability evaluation. It begins with the acquisition of three types of data: geochemical, geological, and geophysical. These data are then processed through several steps: identification and replacement of erroneous data, unscaled data, and conversion to a suitable format. The data is then assigned a common coordinate system and reference system, and a GIS database is constructed. The next steps involve creating factor maps and assigning appropriate weights to each factor map. The weighted factor maps are then used to generate three types of fuzzy maps: fuzzy, fuzzy inference, and defuzzification. These maps are then used to generate a mineral potential map. Finally, the results are evaluated and the model is completed.

شکل ۱: فرآیند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاج فازی.

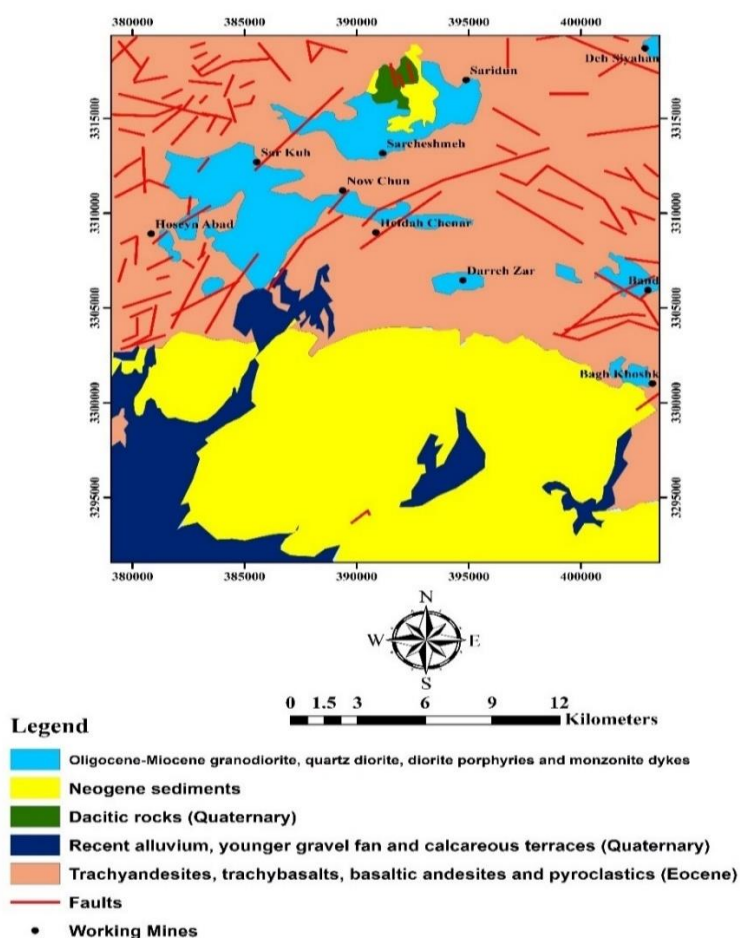
۲-۲- اطلاعات مورد استفاده

$$D_{norm} = \frac{D - D_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (2)$$

با بهره‌گیری از داده‌های موجود و پردازش شده طی مراحل قبلی، اقدام به تهیه نقشه‌های شاهد کانی‌سازی منطقه مورد مطالعه و سپس وزن‌دهی آن‌ها می‌شود. لازم به ذکر است که کلیه نقشه‌های شاهد، به شکل رستر و با اندازه پیکسل ۱۵ متر تهیه شدند. در نهایت، این نقشه‌ها به منظور تولید نقشه پتانسیل معدنی، با یکدیگر تلفیق می‌شوند.



شکل ۲: اطلاعات مورد استفاده و نحوه تلفیق لایه‌های شاهد.



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی و رخداد معدنی مس سرچشمه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در استان کرمان (دوباره رسم شده از [۵۸]).

۴-۲- لایه‌های مورد استفاده در تهیه نقشه پتانسیل مس در منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه واقع در قوس ماگمایی ارومیه - دختر^۱ (سهند- بزمان) از منطقه ایران مرکزی در واحدهای نفوذی ترشیری^۲ و پلیوکواترنری^۳ و یک روند وسیع شمالغربی- جنوب شرقی گسترش یافته است [۵۹-۶۲]. مطالعات گسترده حاکی از وجود یک مدل ماگمایی ناشی از فرورانش است. منطقه فرورانش^۴ ناشی از بسته شدن اقیانوس نفوتسین^۵ بین صفحه‌های عربستان- ترکیه و اوراسیا است [۶۲-۶۸].

این قوس ماگمایی بطور کلی دو ناحیه کانه‌زایی چهارگنبد در کرمان و سونگون^۶ در شمال غرب را شامل می‌شود. کانه‌زایی حاکم بر این منطقه اغلب انواع پورفیری مرتبط با گرانیتهای کواترنری ائوسن- پلئوسن^۷، توده‌های نفوذی پلوتونیک^۸ و سنگ‌های آتشفشانی است. هر کدام از این دو منطقه کانه‌زایی، شامل نهشته‌های پوفیری مانند سرچشمه، دره‌زار^۹ و سریدون^{۱۰} است (شکل ۳).

گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، پورفیری‌های دیوریتی و دایک‌های مونزونیتی با سن الیگوسن تا میوسن، واحدهای زمین‌شناسی مهم کانه‌زایی این منطقه به‌شمار می‌روند. معدن اصلی مس در این منطقه، معدن مس سرچشمه است که به‌عنوان یک ذخیره پورفیری مس در کلاس جهانی شناخته می‌شود و در بخش جنوبی کمر بند آتشفشانی- رسوبی ایران مرکزی، در جنوب غربی شهر کرمان واقع شده است.

کانه‌زایی پورفیری مس در سرچشمه با یک توده گرانودیوریتی مرتبط است که درون مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی چین‌خورده و گسل‌خورده از اوایل دوره سوم (ترشیری) شامل آندزیت، توف، ایگنمبریت

و آگلومرا نفوذ کرده است. در مرکز این سیستم، زون پتاسیک قرار دارد که آثار دگرسانی فلیک را نیز نشان می‌دهد. این زون توسط زون ضعیفی از دگرسانی بیوتیتی و فلیک احاطه شده است. زون پروپیلیتیک به ضخامت تقریبی یک کیلومتر، کل مجموعه را در بر گرفته و به تدریج به آندزیت آلتره نشده تبدیل می‌شود. کانه‌زایی عمدتاً در زون‌های پتاسیک، بیوتیتی و فلیک رخ می‌دهد [۶۹].

دگرسانی‌های گرمایی شامل کلریت، سریسیت، اپیدوت، کربنات، سیلیس، تورمالین و کانی‌های رسی در منطقه رایج هستند، با این حال، دگرسانی‌های فلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک بیشتر از سایر انواع در سراسر منطقه مشاهده می‌شوند [۵۸].

لایه‌های شاهد استخراج شده شامل لایه‌های نقشه زمین شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای و ژئوفیزیک هوابرد شامل رادیومتریک، مغناطیسی و الکترومغناطیسی حوزه فرکانس^{۱۱} (FDEM) به‌منظور تولید نقشه مدلسازی پتانسیل معدنی هستند.

۴-۲-۱- لایه گسل و زمین شناسی

با توجه به نقشه زمین‌شناسی شکل ۳، دو لایه شاهد شامل نواحی گسل خورده و مناطق مناسب سنگ میزبان کانه‌زایی بر اساس نظر تخصصی گروهی از زمین‌شناسان استخراج شده است که در شکل ۴ نمایان است. این نقشه‌ها، مناطق با پتانسیل بالا برای رخداد معدنی را نشان می‌دهند. دایک‌های مونزونیتی، دیوریت، پورفیریت، کوارتز دیوریت و گرانودیوریت‌های الیگوسن-میوسن، سنگ میزبان نهشته پورفیری در منطقه مورد مطالعه هستند. در شکل ۴-الف چهار بافر ۲۵۰ متری در اطراف واحدهای زمین‌شناسی مذکور در نظر گرفته شده است.

⁶ Sungun

⁷ Eocene-Pliocene-Quaternary granitoids

⁸ plutonic bodies

⁹ Darrehzar

¹⁰ Saridun

¹¹ Frequency Domain Electromagnetic

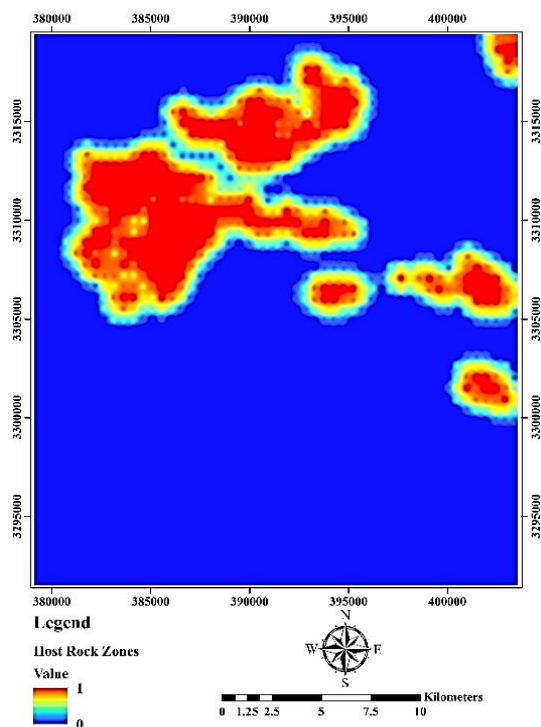
¹ The Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage (UDMA) arc

² Tertiary

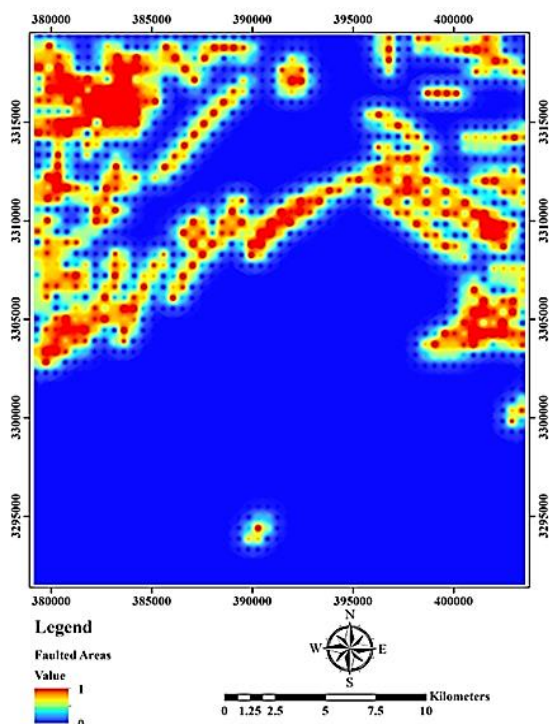
³ Plio-Quaternary

⁴ Subduction

⁵ Neo-Tethyan



الف



ب

گسلها فعالیت تکتونیکی بالایی از خود نشان می‌دهند و زونهای خرد شده مناسبی را برای کانی‌سازی مس پورفیری فراهم می‌کنند. این محلها می‌توانند معابر مناسبی برای نفوذ سیالات کانه‌دار و کانه‌زایی باشد؛ پس می‌توانند به‌عنوان کلیدهای مناسبی جهت شناخت و اکتشاف ذخایر معدنی مدنظر قرار گیرند؛ لذا مطالعه زون‌های شکسته و مقایسه نقشه آنومالی‌های ژئوشیمیایی با نقشه توزیع شکستگی‌ها می‌تواند در ارزیابی آنومالی‌ها مفید واقع شود [۷۰]. به همین دلیل، گسل‌های موجود در منطقه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است استخراج شدند و سپس نقشه چگالی گسل‌ها تهیه شد. شکل ۴-ب نقشه شاهد گسل‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۲-۴-۲- لایه‌های دگرسانی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای

استفاده از سنجنده‌های دورسنجی برای به نقشه در آوردن دگرسانی‌های سطحی، اطلاعات مفیدی در مراحل شناسایی اکتشاف مس پورفیری در مقیاس ناحیه‌ای بدست می‌دهد. سنجنده‌ی استر^۱ (ASTER)، ابزاری مناسب برای به نقشه در آوردن نواحی دگرسانی هیدروترمال مرتبط با نهشته مس پورفیری است. دگرسانی‌های هیدروترمال مرتبط با مس پورفیری مانند مجموعه کانی‌های فلیک، آرژلیک و پروپیلیتی ویژگی جذب طیفی مشخصی دارند که با استفاده از داده‌های استر قابل تمایز می‌باشند [۷۱].

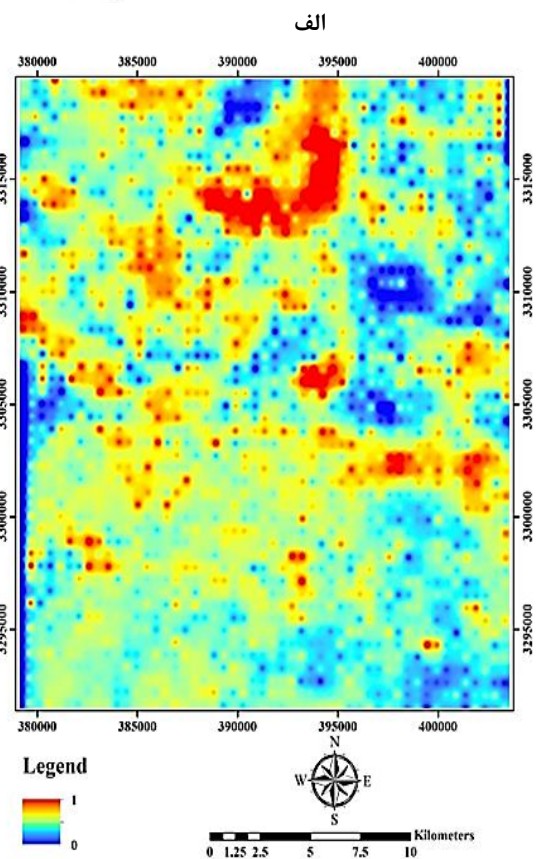
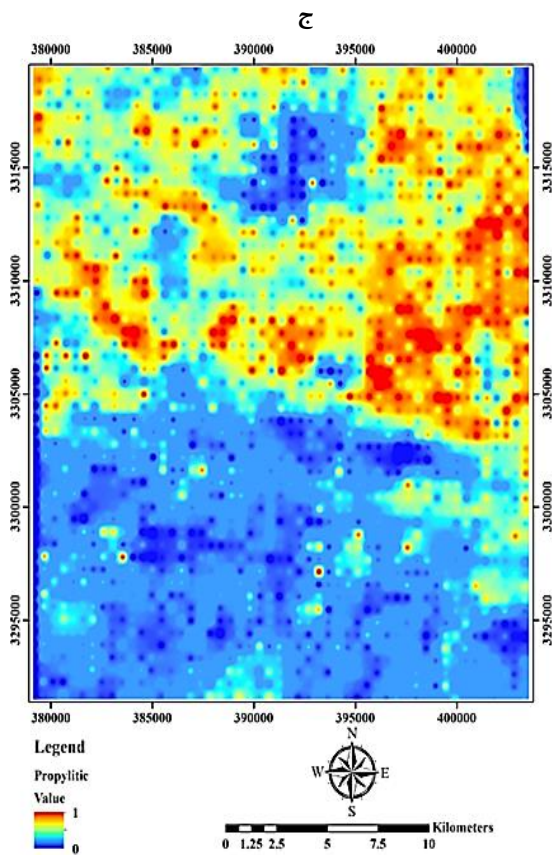
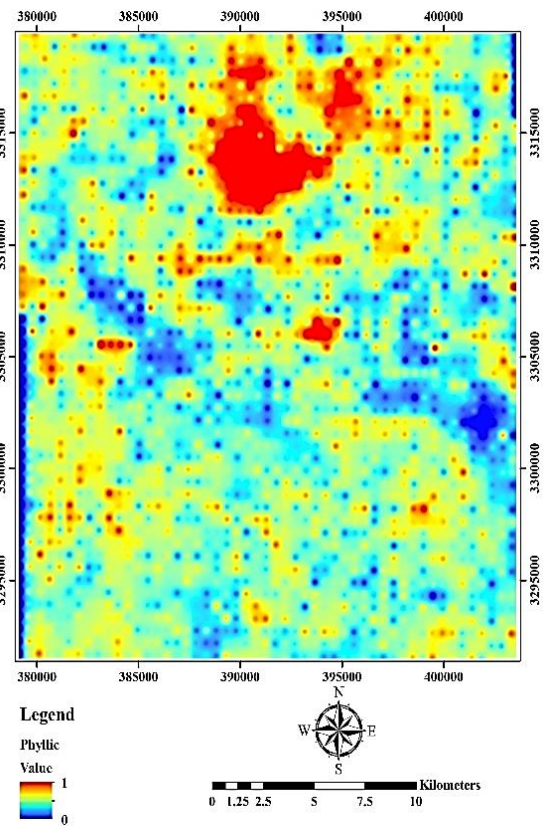
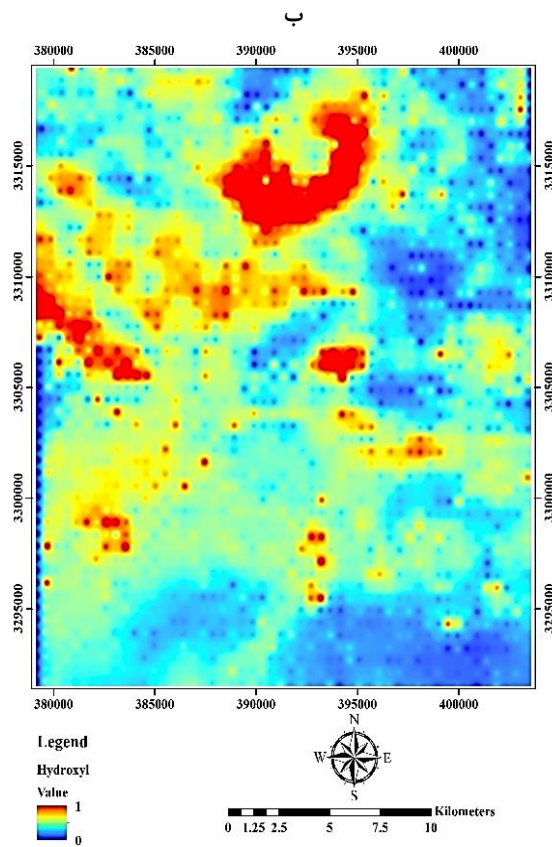
عمق باند جذب نسبی^۲ (RBD) رابطه نسبتی سه نقطه‌ای برای نمایش شدت جذب OH-Mg , Fe , OH-Al و CO_3 است. کانی‌های Al(OH) مانند کائولینیت، آلونیت، موسکویت و ایلیت دارای جذب عمده در باندهای ۵، ۶ و ۷ و کانی‌های Fe(OH) و Mg(OH) مانند کلریت و همچنین

^۲ Relative Absorption Depth

^۱ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

شکل ۴: داده نرمال شده زمین شناسی، الف)

سنگ میزبان ب) نواحی گسله.



شکل ۵: لایه‌های شاهد دورسنجی که مناطق دگرسانی را از داده‌های ASTER استخراج می‌کنند: (الف) فیلک؛ (ب) آرژلیک؛ (ج) هیدروکسیل؛ (د) پروپیلیتیک.

با طول موج کوتاه^۱ (SWIR) استر استفاده شده است. از نسبت باندی $band4/band6+band9$ نیز برای به نقشه در آوردن کانی‌های هیدروکسیل‌دار استفاده شده است (شکل ۵). در تمامی نقشه‌ها، پیکسل‌های با رنگ قرمز مناطق دگرسانی را نشان می‌دهد.

از شش باند ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ تصاویر Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) نیز برای ترسیم دگرسانی اکسید آهن مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶). برای مطابقت با نقشه‌های قبلی، پیکسل‌های قرمز در شکل ۶ متناظر با دگرسانی هستند.

۲-۴-۳- لایه‌های ژئوشیمیایی

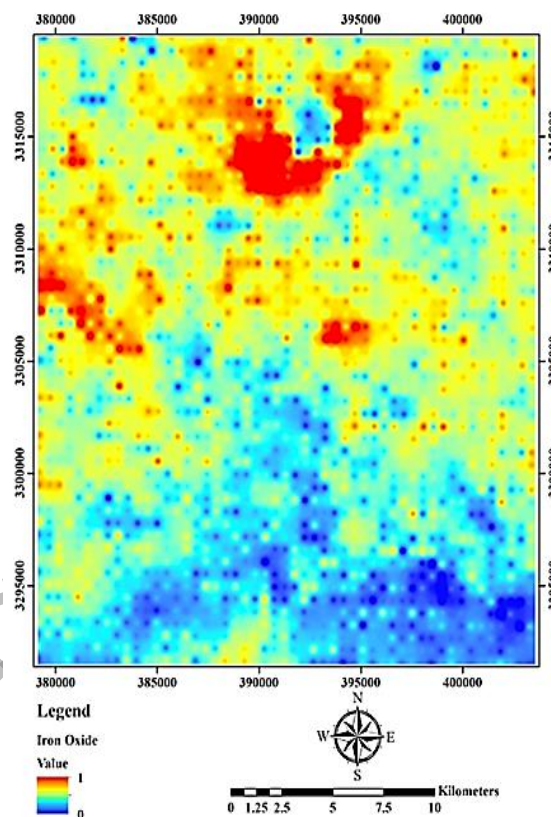
به منظور استخراج اطلاعات ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه، تعداد ۳۹۲ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای برداشت شد که از این تعداد ۲۳۲ نمونه در محدود اکتشافی قرار دارد. آنالیز عیار برای ۱۵ عنصر زیر نظر سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور انجام شده است. بعد از تجزیه و تحلیل‌های آماری تمامی عناصر، با استفاده از آنالیز خوشه‌ای داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، مشخص شد که همبستگی بین عناصر Cu، Pb و Zn نسبتاً قوی بوده و بیانگر همراهی آن‌ها در فرآیند کانی‌زایی است. عنصر B نیز همبستگی قابل توجهی با Cu و Zn نشان می‌دهد. فاکتور ۱ بیشترین ارتباط را با Cu و Pb دارد که حاکی از نقش غالب این دو عنصر در شکل‌گیری کانی‌سازی منطقه است.

جدول ۱: ضریب همبستگی خطی بین عناصر سرب، روی، بور

و مس.

				1	Cu
			1	0/654	Pb
		1	0/531	0/648	Zn
	1	0/504	0/51	0/697	B
1	0/507	0/582	0/81	0/711	فاکتور ۱
فاکتور ۱	B	Pb	Zn	Cu	

کربناته مانند کلسیت و دولومیت دارای جذب متمایزی در باندهای ۸ و ۹ عکس‌های استر می‌باشند [۷۲، ۷۳].



شکل ۶: لایه دگرسانی اکسید آهن استخراج شده از باندهای ETM+.

عمق باند جذب نسبی به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که در صورت کسر، باندهایی قرار می‌گیرند که کانی مورد نظر کمترین میزان جذب امواج الکترومغناطیس را نشان می‌دهد و در مخرج کسر باندهایی قرار دارند که کانی بیشترین جذب را دارد [۷۱، ۷۴]. سه نسبت باندی RBD_۵ (ویژگی‌های به‌کار گرفته شده در این مقاله شامل RBD_۵ (ویژگی‌های کانه زایی: آلونیت/ کائولنیت/ پیروفیلیت)، RBD_۶ (ویژگی‌های کانه زایی: سریسیت/ موسکویت/ ایلیت/ اسمکتیت) و RBD_۸ (ویژگی‌های کانه زایی: کربنات/ کلریت/ اپیدوت) هستند که به‌ترتیب برای شناسایی دگرسانی‌های هیدروترمال آرژلیک، فیلک و پروپیلیت به‌کار گرفته می‌شوند. بدین منظور، از باندهای مادون قرمز

^۱ Shortwave Infrared Region

۲-۴-۴- لایه‌های ژئوفیزیکی

نقشه‌های مغناطیس‌های در به نقشه در آوردن عوارض زمین‌شناسی زیرسطحی و نیز ساختارهای پنهان، نظیر توده‌های نفوذی کاربرد دارند [۷۵]؛ بنابراین به‌کارگیری داده‌های مغناطیس‌های هواورد جهت آشکارسازی توده‌های نفوذی زیرسطحی مرتبط با زون دگرسانی پتاسیک پیشنهاد شده است. اگر توده‌های نفوذی با خاصیت مغناطیسی متوسط درون سنگ دیواره با خاصیت مغناطیسی ضعیف، مانند کوارتزیت یا ولکانیک‌های سیلیسی نفوذ کند، در نقشه برگردان به قطب آنومالی مغناطیسی قوی مشاهده می‌شود [۷۶].

داده‌های هواورد مغناطیسی برای منطقه مورد مطالعه در سال ۱۹۷۷ تحت نظارت سازمان انرژی اتمی کشور ایران برداشت شد. فاصله خطوط برداشتی ۵۰۰ متر و ارتفاع پرواز ۱۵۰ متر بوده است. داده‌ها به صورت نقشه‌های هم‌تراز ژئوفیزیکی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ هستند. به دلیل عدم دسترسی به پایگاه داده ژئوفیزیک‌های هواورد در منطقه، نقشه‌های ژئوفیزیکی به صورت دستی رقومی شدند. از ۲۶۰۱ نقطه برداشت بدست آمده برای تهیه داده برگردان به قطب به منظور حذف اثر دوقطبی بی‌هنجاری مغناطیسی استفاده شده است.

برای استفاده از لایه ژئوفیزیکی مغناطیسی، بهتر است داده‌های هواورد مغناطیسی به ارتفاعی نزدیک به سطح زمین گسترش یابند تا محل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی مجزا شده و منابع کوچکتر مرتبط با هدف‌های معدنی بهتر خود را نشان دهند. بنابراین نقشه ادامه فروسوی ۱۵۰ متر داده برگردان شده به قطب نیز به عنوان یکی از لایه‌های شاهد ژئوفیزیکی تهیه شد (شکل ۹-الف).

فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های ادامه فروسو اعمال شد تا به عنوان یک لایه در اکتشاف هواورد از آن استفاده شود. این لایه مرز توده‌های ماگمایی نفوذی مسئول کانه‌زایی احتمالی را نسبت به زمینه بهتر نمایان می‌نماید (شکل ۹-ب).

روش‌های الکترومغناطیس (EM) برای بررسی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی به منظور تهیه نقشه بی‌هنجاری در حوزه‌های مختلف، به ویژه در اکتشافات معدنی، بسیار مفید هستند. محاسبه مقاومت ویژه ظاهری معمولاً نخستین گام در ارزیابی داده‌های FDEM محسوب می‌شود. توزیع جانبی

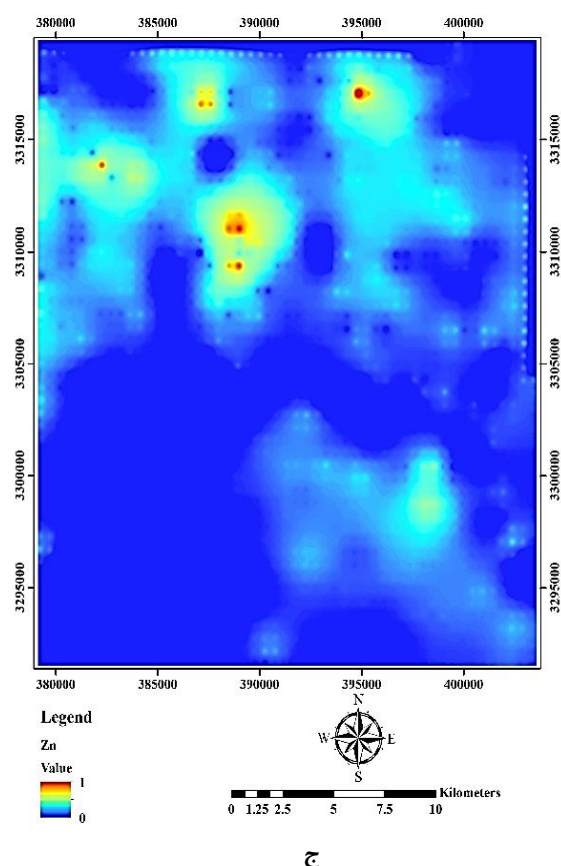
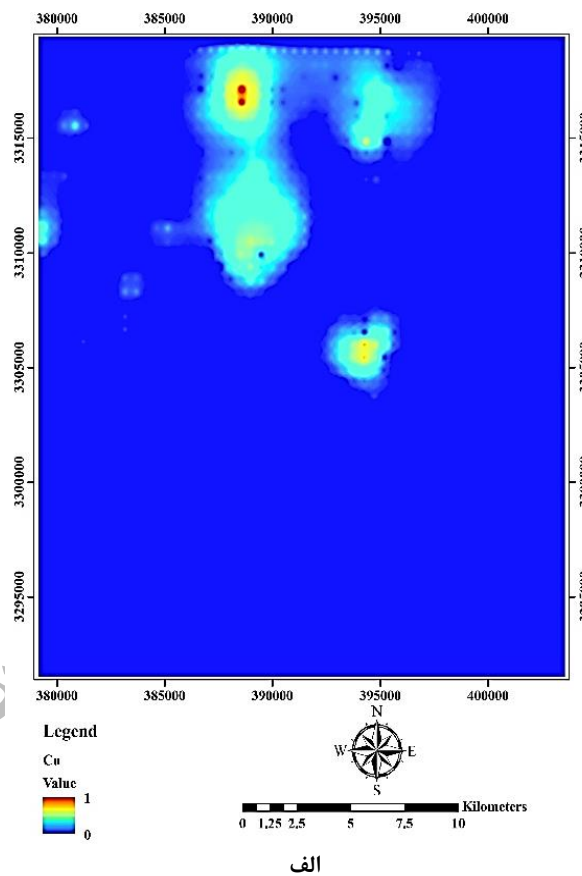
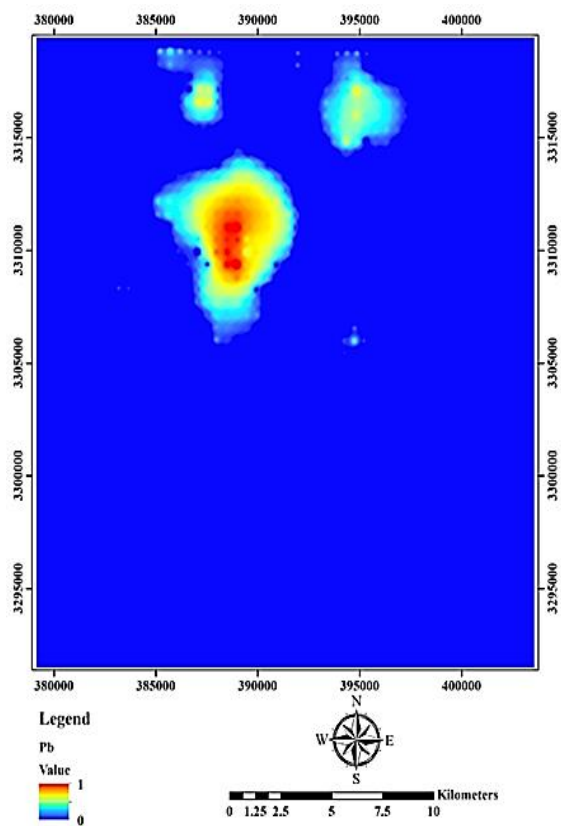
ضریب همبستگی بین این عناصر نسبت به مس در جدول ۱ آورده شده است. لایه‌های ژئوشیمیایی این عناصر در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. همه لایه‌ها در فاصله [۰ و ۱۰] ترسیم شده‌اند و در همه آن‌ها مقادیر بالا مربوط به مناطق با پتانسیل معدنی بالا هستند. در نهایت، تجزیه و تحلیل مولفه اصلی (PCA) برای ۱۰ عنصر به منظور استخراج مولفه اصلی ژئوشیمیایی مرتبط با کانه‌زایی مس در منطقه بکار گرفته شد. نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) نشان می‌دهد که سه مؤلفه نخست در مجموع ۶۷ درصد از تغییرات داده‌ها را تبیین می‌کنند. مؤلفه اول (۴۰ درصد واریانس) بیانگر همبستگی قوی Pb-Zn-Ba-Co و مرتبط با کانی‌سازی سولفیدی است. مؤلفه دوم (۱۵ درصد) ارتباط Cr-Ni-Mo را بازتاب می‌دهد که بیشتر منشأ لیتولوژیک دارد. مؤلفه سوم (۱۲ درصد) نیز نمایانگر آنومالی‌های محلی به‌ویژه برای Sn و B می‌باشد. این نتایج توانایی PCA در جداسازی عوامل کانی‌زایی از عوامل زمین‌زاد و افزایش دقت مدل‌سازی پتانسیل معدنی را تأیید می‌کند. همچنین وزن لایه‌های استخراج شده مربوط به چهار عنصر Cu, Pb, Zn و B در این فاکتور بالاتر می‌باشد (جدول ۲). این مولفه که در شکل ۸ نشان داده شده است به عنوان لایه ژئوشیمیایی دیگری برای تولید نقشه پتانسیل معدنی در نظر گرفته شده

عناصر	C_1	C_2	C_3
B	0/708	۰/۳۷	0/119
Ba	0/747	-۰/۱۴۲	0/018
Co	0/242	۰/۸۵۱	-0/060
Cr	0/039	۰/۷۷۵	0/171
Cu	0/750	۰/۴۲۱	-0/235
Mo	0/182	۰/۱۵۲	-0/775
Ni	0/104	۰/۸۲۸	-0/086
Pb	0/845	۰/۱۶۸	-0/007
Sn	0/228	۰/۲۴۶	0/696
Zn	0/450	۰/۴۶۸	0/168
واریانس (درصد)	40	15	12

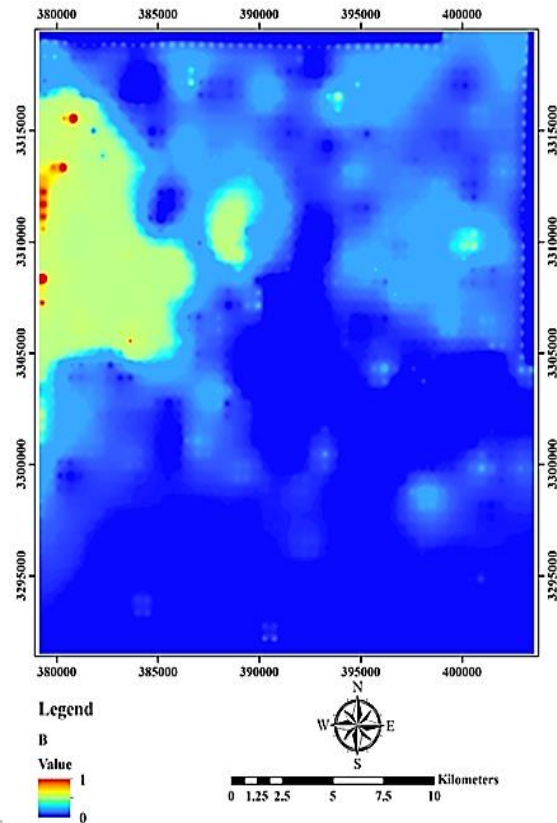
است.

جدول ۲: نتایج آنالیز PCA برای داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای.

مقاومت ویژه در منطقه تحت برداشت FDEM می‌تواند از طریق نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس‌های منفرد نمایش داده شود [۷۷].



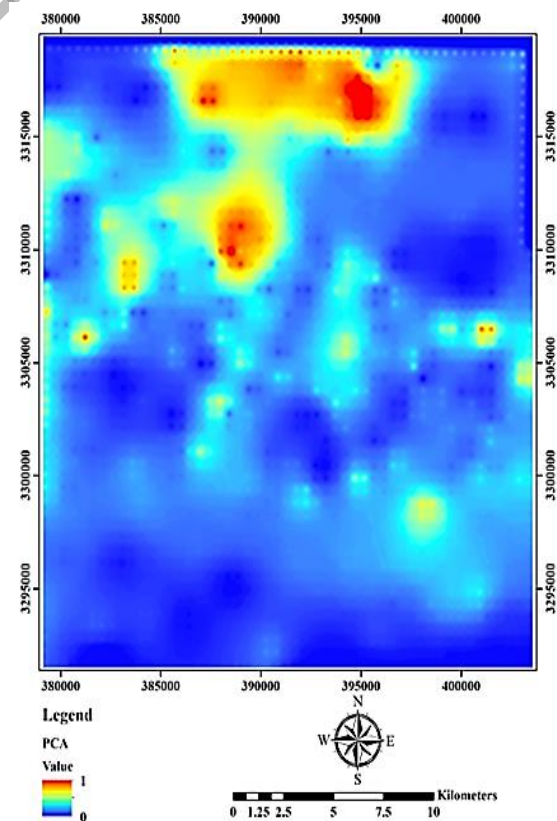
د



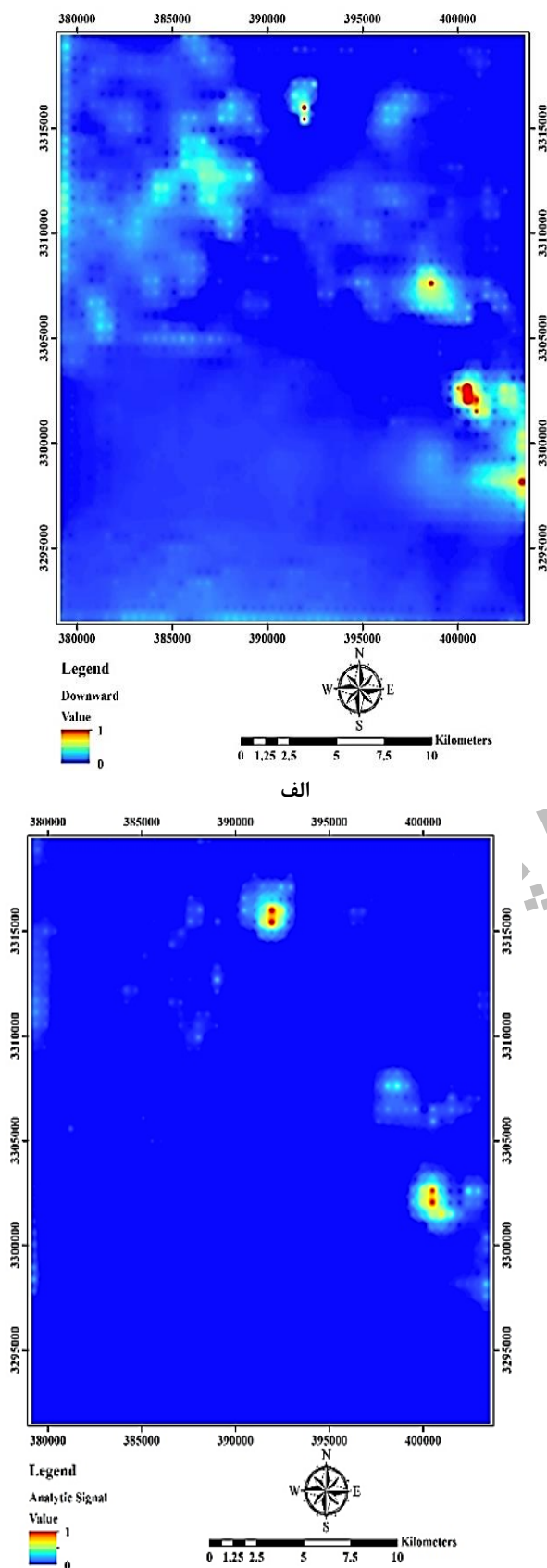
شکل ۷: لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی با مقادیر ثرمال شده (الف) مس، (ب) سرب، (ج) روی، و (د) بور.

برداشت‌های EM هوابرد را سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور با فاصله خطوط پرواز ۲۰۰ متر و ارتفاع سنسور ۳۰ متر انجام داده است. سیستم برداشت شامل پنج فرکانس می‌باشد که دو عدد از آن با پیچه‌های هم‌محور قائم در فرکانسهای ۹۱۲ و ۴۴۴۵ هرتز و سه عدد دیگر با پیچه‌های هم‌سطح افقی در فرکانسهای ۵۱۶، ۴۱۳۱ هرتز و ۳۲/۳۷ کیلوهرتز بوده است. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های EM در منطقه مورد مطالعه، تنها از توزیع مقاومت ویژه الکتریکی با فرکانس ۴۴۴۵ هرتز استفاده شده است. شکل ۹ ج، مقادیر بالای وزن داده شده (رسانایی بالاتر) متناظر با مناطق با پتانسیل بالا در اکتشاف مس پورفیری را نشان می‌دهد.

مقادیر بالای شکل ۹ مربوط به مناطق با پتانسیل بالای رخداد کانه‌زایی است. بر اساس دیدگاه‌های تیم تصمیم‌گیری، نقشه مقاومت ظاهری بدست آمده از داده‌های FDEM نشان داده شده در شکل ۹ برای تولید نقشه پتانسیل معدنی استفاده شد. مقادیر بالای نقشه FDEM مربوط به مقادیر کم مقاومت یا مناطق با پتانسیل بالای وقوع مواد معدنی است.



شکل ۸: لایه شاهد ژئوشیمیایی استخراج شده از مولفه اول تجزیه و تحلیل PCA.



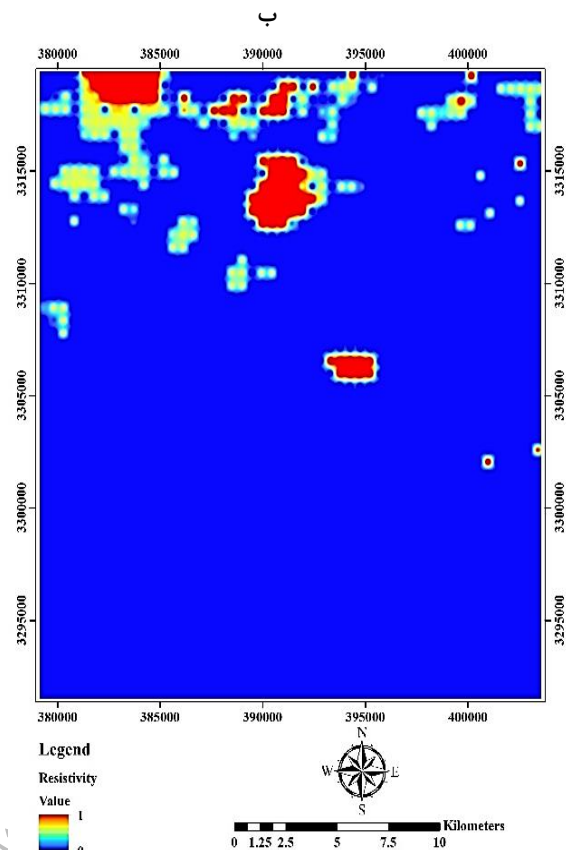
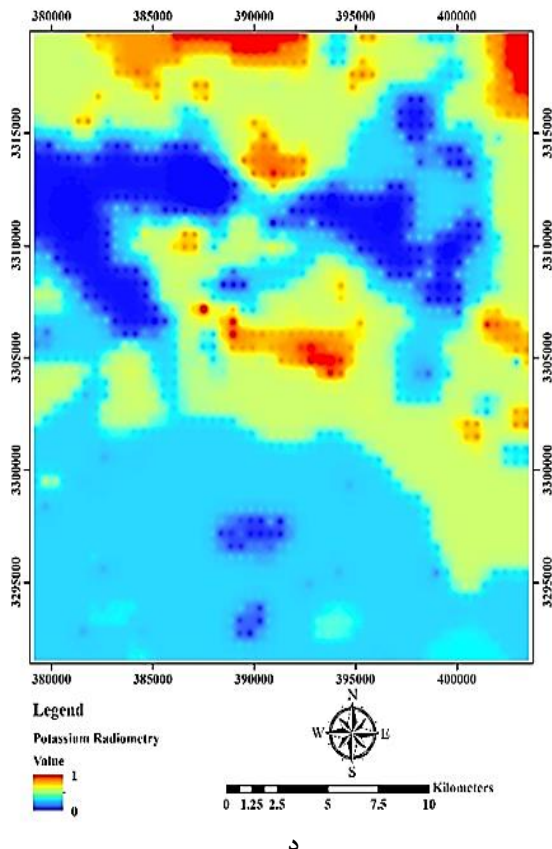
کانی‌های دگرسانی هیدروترمال (به‌عنوان مثال، سربیسیت، بیوتیت، فلدسپات پتاسیم و بسیاری از کانی‌های رسی حاوی پتاسیم (K) در ذخایر پورفیری و به‌ویژه در منطقه سربیسیت فراوان هستند. بنابراین، نقشه رادیومتری پتاسیم K نشان داده شده در شکل ۹ می‌تواند به‌عنوان معیار دیگری برای اکتشاف چنین کانسارهایی نیز در نظر گرفته شود. هوازگی شیمیایی همچنین منجر به غنی‌سازی پتاسیم می‌شود، بنابراین استفاده از نسبت Th/K ترجیح داده می‌شود. با این حال، نقشه رادیومتری Th جهت استفاده در این مطالعه در دسترس نبود.

۲-۵- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از رویکرد پیشنهادی

در این مقاله، جهت تلفیق نهایی نقشه‌های الگو از سامانه استنتاجگر فازی استفاده شده است. در رویکرد پیشنهادی سعی شده است به‌منظور رسیدن به نتایج نزدیک به واقعیت از اطلاعات گوناگونی استفاده شود و با استفاده از سامانه استنتاج فازی مدل‌سازی پتانسیل معدنی منطبق بر قوانین موجود در اکتشاف مس انجام پذیرد.

فازی‌سازی: برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در سامانه استنتاج فازی، لازم است توابع عضویت فازی مناسبی تعریف شوند تا بتوانند عدم قطعیت موجود در مرز میان عوارض مکانی و رده‌های نقشه‌ها را به‌درستی مدل‌سازی کنند. نوع، تعداد و پارامترهای توابع عضویت فازی با بررسی‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و دگرسانی منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شود. طبق این فرایند نقشه‌ها از حالت کریسپی^۱ خارج شده و به متغیرهای زبانی تبدیل می‌شوند [۵۷].

^۱ Crispy



ج

شکل ۹: لایه‌های شاهد ژئوفیزیکی، (الف) داده‌های مغناطیسی گسترش رو به پایین، (ب) سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی، (ج) مقاومت ویژه و (د) رادیومتری پتاسیم. همه لایه‌ها به بازه [۰،۱] تبدیل شدند.

لازم به ذکر است که قبل از عملیات فازی‌سازی، داده‌های تشکیل‌دهنده باید بی‌مقیاس بشوند (داده‌ها در بازه صفر تا یک قرار گرفته باشند).

با توجه به خاصیت روش رده‌بندی چارک یا Quantile استفاده از این روش برای تعیین متغیرهای توابع عضویت از سوی کارشناسان پیشنهاد می‌شود. در روش رده‌بندی Quantile نقشه پتانسیل معدنی به‌گونه‌ای رده‌بندی می‌شود که تعداد عوارض یا پیکسل‌های موجود در رده‌ها با یکدیگر برابر باشد. به عبارتی نقشه رستری پتانسیل معدنی به رده‌های هم‌مساحت تقسیم‌بندی می‌شود [۷۸]. در این مرحله نقشه‌های شاهد شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی (شکل‌های ۱۱-الف تا ج) هستند که به کمک تابع عضویت دوزنقه‌ای در سه گروه پتانسیل قوی، ضعیف و متوسط تقسیم‌بندی شدند و یک تابع عضویت دوزنقه‌ای که شامل پنج گروه پتانسیل خیلی

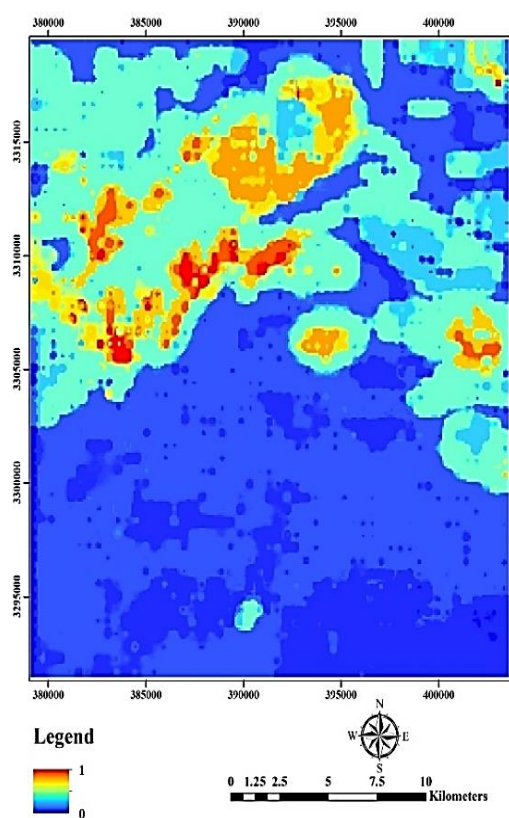
ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی جهت خروجی تعریف شده است. شکل ۱۰ توابع عضویت مورد استفاده در این مقاله را نشان می‌دهد.

موتور سامانه استنتاجگر فازی: پس از عملیات فازی‌سازی، نقشه‌ها وارد موتور سامانه استنتاجگر فازی می‌شوند. به‌منظور تلفیق داده‌ها با استفاده از قوانین استنتاجگر فازی، ابتدا یک پایگاه قوانین فازی اگر-آنگاه برای نقشه‌های شاهد ایجاد می‌شود. در این پژوهش از روش ممدانی به لحاظ سادگی، مؤثر بودن و کاربرد گسترده آن در مقالات علمی به‌ویژه در زمینه زمین‌شناسی و معدنی، استفاده شده است. همچنین، به کمک دانش کارشناسی، پایگاه قوانین اگر-آنگاه فازی مورد نظر، تعریف شد.

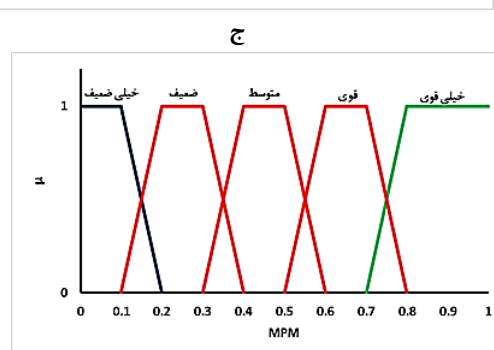
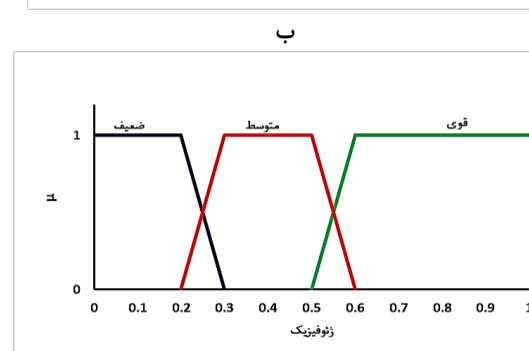
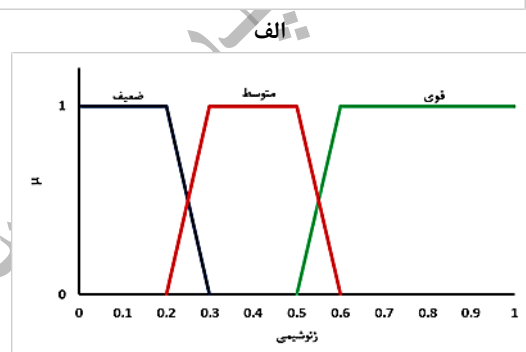
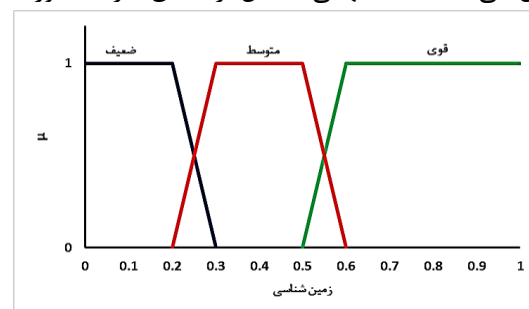
برای مثال یک نمونه از قوانین به این صورت است: اگر یک پیکسل زمین‌شناسی قوی، ژئوشیمی قوی و ژئوفیزیکی قوی داشته باشد، پتانسیل معدنی آن پیکسل خیلی زیاد است. با توجه به رابطه بالا، تعداد ۲۷ قانون فازی برای تلفیق با ۳ تابع عضویت تعریف و نوشته شد.

قطعی‌سازی داده‌ها و تهیه نقشه نهایی پتانسیل معدنی: در مرحله قبل پتانسیل معدنی هر پیکسل به‌صورت

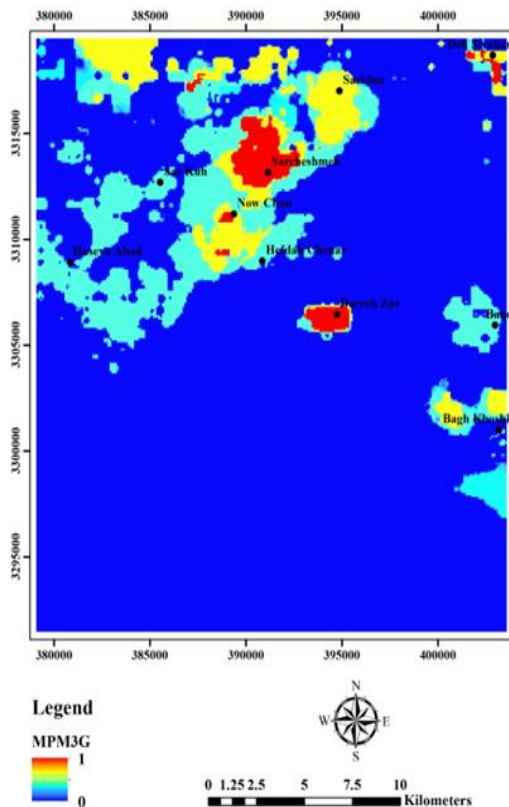
فایل Ascii از نرم افزار متلب خارج شده و به منظور افزودن اطلاعات مورد نیاز وارد محیط نرم افزار ArcGIS می‌شود. شکل ۱۲ نقشه پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از رویکرد پیشنهادی با سه لایه شاهد زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی با استفاده از ۳ تابع عضویت دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد.



یک یا چند عدد فازی محاسبه می‌شود. به منظور تلفیق اعداد فازی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این پژوهش از روش مرکز ثقل که در آن تاثیر تمام قوانین به گونه‌ای متناسب در نظر گرفته می‌شود استفاده شده است. خروجی این مرحله، نقشه پتانسیل معدنی است که پتانسیل معدنی هر پیکسل را به صورت یک عدد قطعی نشان می‌دهد. نقشه نهایی حاصل از تلفیق نیز به صورت



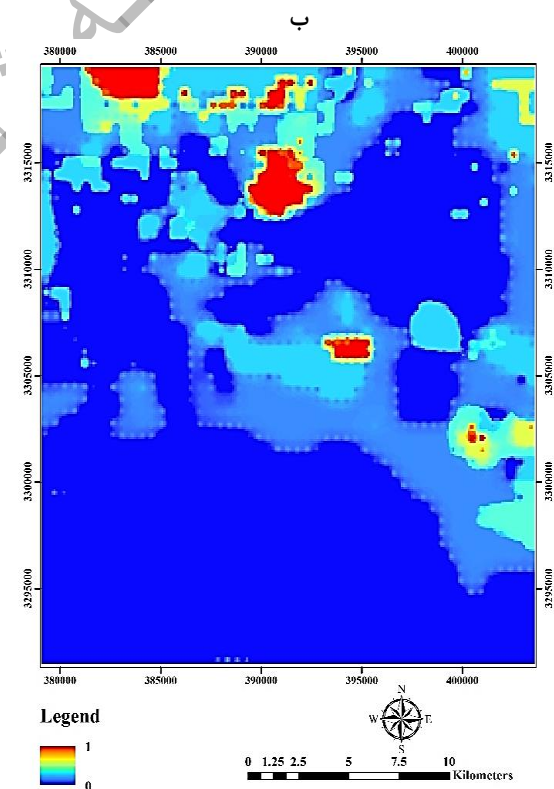
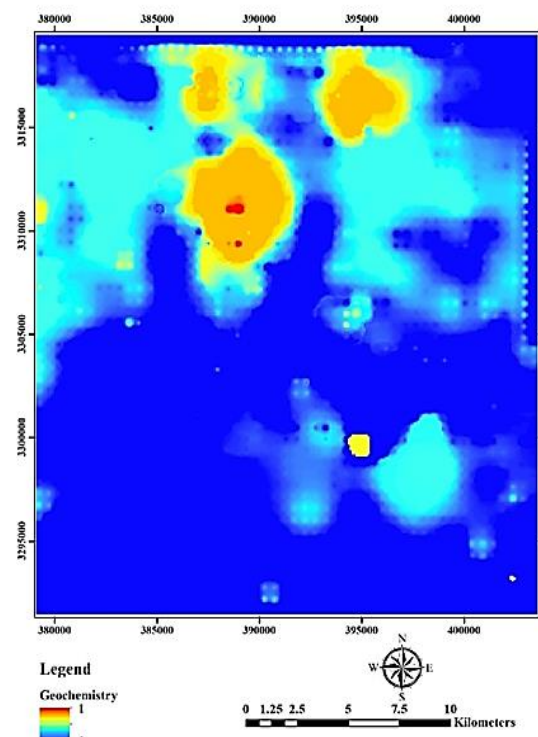
شکل ۱۰: توابع عضویت مورد استفاده: (الف) زمین‌شناسی؛ (ب) ژئوشیمی؛ (ج) ژئوفیزیک؛ (د) خروجی.



شکل ۱۲: نقشه پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از سامانه استنتاج فازی با سه لایه شاهد زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی.

۲-۶- ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج

خروجی مورد انتظار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی باید نشان‌دهنده نقاط با اهمیت بالای اکتشافی در منطقه مورد جستجو باشد. این امر بدان معنی است که نواحی معرفی شده باید با اندیس‌های شناخته‌شده و با نقاط بدون کانی‌سازی به ترتیب بیشترین و کمترین همبستگی را داشته باشند [۷۹]. جهت بررسی اینکه مدل تهیه شده و روش مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تا چه میزان در این مورد به خوبی عمل کرده است، ارزیابی و صحت‌سنجی انجام می‌گیرد. چندین رویکرد گوناگون برای این منظور وجود دارد که بیشتر آن‌ها اعتبارسنجی را از طریق مقایسه با داده‌های زمین‌شناسی و معادن فعال موجود در منطقه انجام می‌دهند. از جمله جدیدترین این



شکل ۱۱: نقشه‌های فاکتور ورودی سامانه استنتاج فازی. (الف) زمین‌شناسی (ب) ژئوشیمی (ج) ژئوفیزیک.

در رابطه فوق، N_d چگالی نرمال شده بر حسب مساحت در نقطه برخورد دو منحنی، P_r نرخ پیش‌بینی، O_d مساحت متناظر با نقطه برخورد در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت است. در این رابطه N_d اگر کوچکتر از عدد یک باشد، روش مورد استفاده جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پیش‌گوی مناسبی نیست و چگالی نرمال بالاتر از عدد یک به عنوان پیش‌گوی مناسب شناخته می‌شود.

۳- نتایج و بحث

همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، هدف اصلی این پژوهش، تهیه نقشه پتانسیل مس پورفیری با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی است. به این منظور، ۳ لایه زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه پتانسیل معدنی تهیه شد. با مقایسه نقشه زمین‌شناسی تهیه شده و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز مشاهده می‌شود که مناطق با پتانسیل بالا جهت اکتشاف مس پورفیری در نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱۱-الف) منطبق بر واحدهای گسل خورده و دگرسان شده گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، پورفیری‌های دیوریتی و دایک‌های مونزونیتی با سن الیگوسن تا میوسن هستند یکی از مستعدترین واحدهای کانه‌زایی مس پورفیری هستند. مطابق با نقشه ژئوشیمی (شکل ۱۱-ب) ۳ ناحیه نسبتاً غنی مس، سرب، روی و بور وجود دارد که با رنگ زرد مایل به قرمز مشخص شده‌اند. یک ناحیه مرکزی با شدت بالا به عنوان هسته اصلی ناهنجاری شناسایی شد که احتمالاً نشانگر یک سیستم پورفیری فعال است. علاوه بر آن، ناهنجاری‌های ثانویه در شمال شرق و جنوب شرق محدوده نیز مشخص شدند که می‌توانند معرف زون‌های فرعی باشند. سایر نواحی پراکنده عمدتاً در حد زمینه‌ای بوده و ارزش اکتشافی کمتری دارند. به‌طور کلی، نقشه مذکور بیانگر الگوی هاله‌ای کلاسیک سیستم‌های پورفیری است و می‌تواند به عنوان راهنمایی مؤثر در اولویت‌بندی نواحی امیدبخش برای بررسی‌های دقیق‌تر بعدی مورد استفاده قرار گیرد. نواحی قرمز رنگ در نقشه ژئوفیزیک مناطق با پتانسیل بالا جهت اکتشاف مس

روش‌ها می‌توان روش‌های عددی همچون نمودار پیش‌بینی - مساحت^۱ و چگالی نرمال شده^۲ را نام برد. با توجه به اینکه برای رسم نمودار پیش‌بینی - مساحت نیاز به طبقه‌بندی مدل‌های پتانسیل معدنی است از روش فرکتالی عیار - مساحت [۸۰] برای تعیین حد آستانه‌ای جوامع مختلف استفاده می‌شود. بدین صورت که با رسم نمودار لگاریتمی تغییرات مساحت نسبت به عیار، می‌توان حد آستانه هر جامعه آماری را از طریق محاسبه شیب خط برازش شده به آن تعیین کرد. در این نمودار، حد آستانه‌ای جوامع مختلف، نقاطی هستند که شیب خط برازش شده تغییر می‌کند. سپس مدل‌های پتانسیل تولید شده، بر اساس حدود آستانه‌ای حاصل از نمودار عیار - مساحت طبقه‌بندی می‌شوند. در نهایت، با توجه به مدل‌های پتانسیل معدنی طبقه‌بندی شده، تعداد اندیس‌های پیش‌بینی شده در هر کلاس و مساحت متناظر کلاس‌ها، نمودارهای پیش‌بینی - مساحت رسم می‌شود. در این نمودار، اولین منحنی نشان‌دهنده نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده متناظر با کلاس‌های مدل پتانسیل معدنی و منحنی دیگر مساحت پوشش داده شده توسط هر کلاس از مدل پتانسیل معدنی نسبت به کل مساحت منطقه مورد مطالعه است [۸۱]. نقطه تقاطع این دو منحنی به عنوان شاخصی برای ارزیابی عملکرد مدل در نظر گرفته می‌شود؛ بطوری که هر چه این نقطه در موقعیت بالاتری قرار گیرد، مدل کارایی بیشتری دارد زیرا اندیس‌های شناخته شده در سطوح کوچک‌تری از منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و در نتیجه احتمال رخداد ذخایر معدنی در این نواحی بالاتر است.

چگالی نرمال برای یک کلاس از یک مدل پیش‌بینانه به صورت نسبت درصد اندیس‌های پیش‌بینی شده توسط آن کلاس به مساحت اشغال شده توسط آن کلاس، با توجه به مساحت کل منطقه تعریف می‌شود [۸۲].

چگالی نرمال بر اساس پارامترهای به دست آمده از نقطه برخورد دو منحنی در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت از طریق رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$N_d = \frac{P_r}{O_d} \quad (3)$$

² Normalized density

¹ Prediction- Area

مرحله ۱: ساختن یک ماتریس تصمیم‌گیری از روی پایگاه داده اکتشافی با تخصیص وزن‌های برتری به هر گزینه i و معیار j ،

یک مجموعه از گزینه‌ها است. $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.
نشان‌دهنده معیارها است. $z = 1, 2, \dots, m$.

مرحله ۲: تعیین وزن اهمیت w_j برای تمامی معیارها با استفاده از روش‌های توسعه‌یافته به طوری که:

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

مرحله ۳: تهیه ماتریس تصمیم نرمال شده r_{ij} . ستون‌های ماتریس باید جهت جلوگیری از به هم ریختن نتایج الگوریتم TOPSIS هم‌مقیاس شوند. برای این منظور از فرمول زیر استفاده خواهد شد:

$$r_{ij} = x_{ij} / (\sum_{i=1}^n x_{ij}^2)^{0.5}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

مرحله ۴: تعیین ارزش‌های ایده‌آل مثبت (PIS) و ایده‌آل منفی (NIS):

$$f^+ = (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \{(\max[r_{ij} | i \in B], (\min[r_{ij} | i \in C])\} \quad (6)$$

$$f^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \{(\min[r_{ij} | i \in B], (\max[r_{ij} | i \in C])\} \quad (7)$$

مرحله ۵: محاسبه فواصل اقلیدسی وزن دار شده:

$$S_i^+ = \{ \sum_{j=1}^m w_j (r_{ij} - v_j^+)^2 \}^{0.5}, i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$S_i^- = \{ \sum_{j=1}^m w_j (r_{ij} - v_j^-)^2 \}^{0.5}, i = 1, \dots, n \quad (9)$$

در روابط بالا B و C به ترتیب به معیارهای سود و هزینه مربوط می‌شوند.

مرحله ۶: تعیین نقطه مرجع ایده‌آل S :

$$S = (S_i, S_i^n) = (\min(S_i^+), \max(S_i^-)), i = 1, \dots, n \quad (10)$$

مرحله ۷: محاسبه فاصله اقلیدسی بین نقطه S و مقادیر S_i^+ و S_i^- هر گزینه با رابطه زیر:

$$T_i^M = \{ (S_i^+ - S_i)^2 + (S_i - S_i^n)^2 \}^{0.5}, i = 1, \dots, n \quad (11)$$

مرحله ۸: محاسبه ارزش‌های نرمال شده M_i^M پتانسیل معدنی برای تهیه نقشه نهایی اکتشافی:

$$M_i^M = \max(T_i^M) - T_i^M / \max(T_i^M) - \min(T_i^M), i = 1, \dots, n \text{ \& } 0 \leq M_i^M \leq 1 \quad (12)$$

مقادیر بالا و پایین M_i^M منطبق با زون‌های با پتانسیل بالا و پایین در ناحیه اکتشافی می‌باشند.

پورفیری را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-ج). الگوی به‌دست‌آمده نشانگر چندین زون ناهنجاری است؛ مهم‌ترین آن‌ها در بخش شمال‌غربی محدوده، با شدت بالا و گستردگی قابل توجه، به‌عنوان محتمل‌ترین سیستم پورفیری مس شناسایی شد. ناهنجاری‌های کوچک‌تر در مرکز و جنوب‌شرق محدوده نیز مشاهده می‌شوند که می‌توانند معرف سیستم‌های فرعی یا ساختارهای گسلی مرتبط باشند. مناطق پراکنده کم‌شدت عمده‌تاً بیانگر زمینه طبیعی یا اثرات ثانویه هستند.

همان‌طور که در نقشه پتانسیل مس پورفیری تهیه شده مشخص است، معادن فعال و ذخایر مس با نواحی با پتانسیل بالای نقشه پتانسیل معدنی تطابق مناسبی دارند. به‌منظور ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی، نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده نیز تهیه شد.

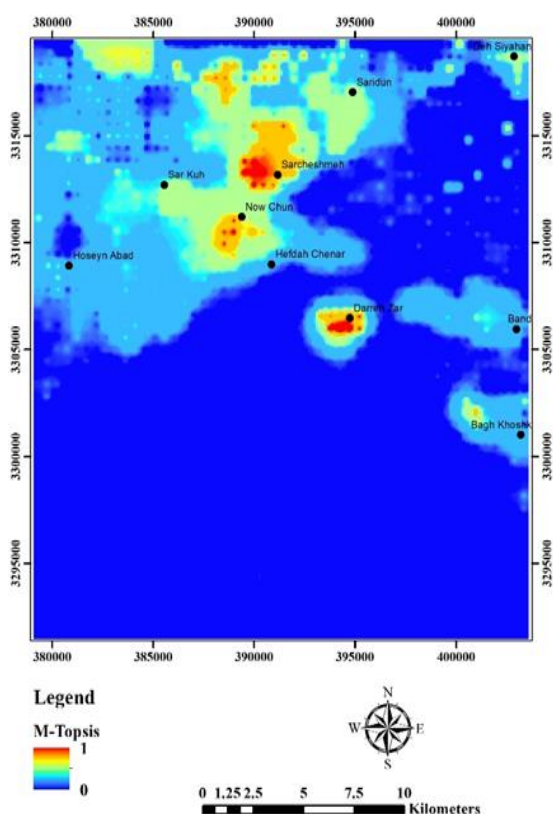
۳-۱- تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده

الگوریتم اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل یا تاپسیس از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که در ابتدا توسط [۸۳] ارائه شد و بعدها در سال ۱۹۹۲ توسط چن و هوانگ تکمیل شد. [۸۴] روش الگوریتم تاپسیس اصلاح شده را با توجه به مفهوم اولیه الگوریتم جهت جلوگیری از رتبه‌بندی اشتباه گزینه‌ها و حل اشتباهی که بعضی مواقع در روش مرسوم تاپسیس ایجاد می‌شود توسعه دادند.

جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در پتانسیل‌یابی ناحیه‌ای با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس اصلاح شده، از لایه‌های شاهد شکل ۲ استفاده شده است. روش دلفی برای تعیین وزن لایه‌ها به‌کار گرفته شد که در آن با طرح پرسش‌هایی از گروهی از کارشناسان، اوزان مشخص شدند. اوزان نرمال شده هر معیار در جدول ۳ ارائه شده‌اند. داده‌های مورد نظر در ۱۶ ستون لایه اکتشافی و ۲۶۰۱ ردیف مرتب شدند؛ به‌طوری که مقادیر بالاتر داده‌های نرمال شده متناظر با نقاط پتانسیل بالا در اکتشاف مس پورفیری می‌باشند.

بکارگیری روش تاپسیس اصلاح شده جهت تولید یک نقشه پتانسیل معدنی شامل مراحل زیر است:

مثال، با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که روش تاپسیس اصلاح شده قادر بوده است تا ۸۰ درصد از اندیس‌های شناخته شده را در ۲۰ درصد از مساحت منطقه پیش بینی کند و چگالی نرمال برای مدل پتانسیل معدنی تولید شده توسط این روش برابر با ۴ است و با توجه به بزرگتر بودن این عدد از عدد یک، می‌توان نتیجه گرفت که روش تاپسیس اصلاح شده روش سودمندی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی است. با توجه به شکل ۱۵ ب این عدد برای روش سامانه استنتاج برابر با ۶/۱۴ است. با توجه به عدد چگالی نرمال به دست آمده از روش تاپسیس اصلاح شده و رویکرد پیشنهادی در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مشاهده می‌شود که رویکرد پیشنهادی، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به روش تاپسیس اصلاح شده داشته است.



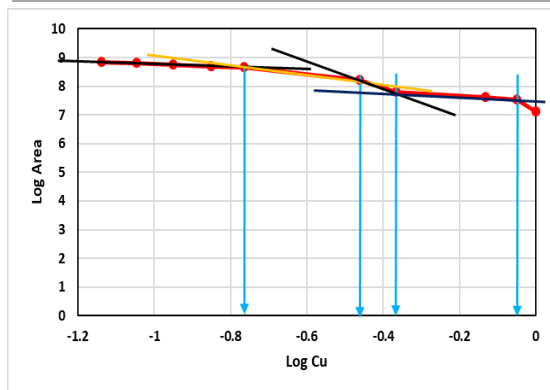
شکل ۱۳: نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه تولید شده با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده.

شکل ۱۳ نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده محدود مورد مطالعه با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده^۱ را نشان می‌دهد. در این روش، مناطق بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل و دوری از راه‌حل منفی رتبه‌بندی شدند و شاخص پتانسیل از ۰ (پایین) تا ۱ (بالا) محاسبه گردید. دایره‌های توپر سیاه نشان داده شده روی این نقشه، محل معادن فعال و نهشته‌های مس پورفیری را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که ناهنجاری‌های قوی اطراف معدن سرچشمه و دره‌زار همخوانی بالایی با ذخایر شناخته شده دارند و اعتبار مدل را تأیید می‌کنند. همچنین نواحی دیگری مانند نوچون و سرکوه با پتانسیل متوسط تا بالا شناسایی شدند، در حالی که ناهنجاری‌های پراکنده ضعیف در اولویت پایین‌تر قرار گرفتند.

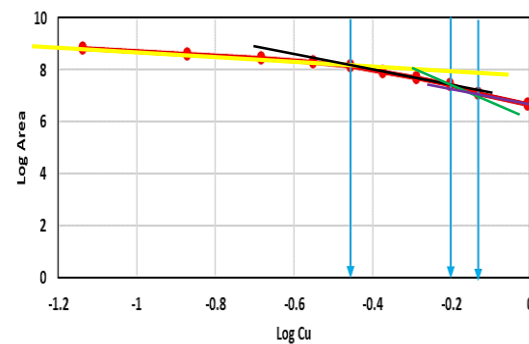
۳-۲- ارزیابی نتایج

در این پژوهش از روش نمودار پیش‌بینی-مساحت جهت ارزیابی نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. در نمودار پیش‌بینی-مساحت، دو منحنی وجود دارد که در مقابل کلاس‌های مختلف مدل پتانسیل معدنی رسم می‌شوند. شکل ۱۴ الف و ب نمودار عیار-مساحت مربوط به روش تاپسیس اصلاح شده و سامانه استنتاج فازی را نشان می‌دهند. نمودار پیش‌بینی-مساحت بر اساس حدود آستانه‌ای حاصل از نمودار عیار-مساحت ترسیم شدند. شکل ۱۵ الف و ب نمودار پیش‌بینی-مساحت مربوط به روش تاپسیس اصلاح شده و استنتاج فازی را نشان می‌دهند. نقطه تلاقی نمودار پیش‌بینی-مساحت بیانگر این است که روش انتخابی می‌تواند تا چند درصد از اندیس‌های شناخته شده را در چند درصد از مساحت منطقه پیش‌بینی کند و مقادیر بالای عدد یک چگالی نرمال شده که از نسبت درصد اندیس‌های شناخته شده به مساحت اشغال شده در نقطه تلاقی به دست می‌آید نشان‌دهنده این است که روش انتخاب شده به عنوان یک روش کارا در تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی به منظور شناسایی نواحی هدف اکتشافی عمل می‌کند. به عنوان

^۱ Modified Topsis



ب



الف

شکل ۱۴: نمودار عیار-مساحت پتانسیل معدنی به دست آمده با استفاده از (الف) روش تاپسیس اصلاح شده، (ب) سامانه استنتاج فازی.

جدول ۳: وزن‌های اختصاص داده شده به لایه‌های شاهد مورد استفاده در تلفیق.

وزن نهایی	وزن	زیرمعیارها	وزن	زیرمعیارها	وزن	معیارها
۰/۰۷۱	۰/۳۴	گسل	۰/۵۷۰	مطالعه سطح	۰/۳۶۷	زمین‌شناسی
۰/۱۳۸	۰/۶۶	نوع سنگ				
۰/۰۳۲	۰/۲	آرژبلیک	۰/۴۳۰	دورسنجی		
۰/۰۶۳	۰/۴	فیلیک				
۰/۰۱۶	۰/۱	پروپیلیتیک				
۰/۰۲۴	۰/۱۵	هیدروکسیل				
۰/۰۲۴	۰/۱۵	اکسید آهن				
۰/۰۶۱	۱	پتاسیم	۰/۲	رادایومتری	۰/۳۰۶	ژئوفیزیک
۰/۰۵۷	۰/۵۳	گسترش رو به پایین	۰/۳۵	مغناطیس‌سنجی		
۰/۰۰۵	۰/۴۷	سیگنال تحلیلی				
۰/۱۳۸	۱	مقاومت ویژه	۰/۴۵	FDEM	۰/۳۲۷	ژئوشیمی
۰/۰۸۸	۰/۲۷	مس	۱	رسوبات آبراه‌های		
۰/۰۶۱	۰/۱۸۷	بور				
۰/۰۵۸	۰/۱۷۷	سرب				
۰/۰۵۸	۰/۱۷۵	روی				
۰/۰۶۲	۰/۱۹۱	C1				

اعتبار نتایج با بهره‌گیری از اندیس‌های معدنی شناخته‌شده و روش پیش‌بینی-مساحت همراه با چگالی نرمال شده مورد سنجش قرار گرفت.

یافته‌ها نشان داد که مقادیر چگالی نرمال شده برای مدل‌های حاصل از روش تاپسیس اصلاح‌شده و رویکرد پیشنهادی به ترتیب ۴ و ۶/۱۴ بوده که هر دو بیانگر کارایی قابل قبول این روش‌ها در مدل‌سازی پتانسیل معدنی هستند. با این حال، مقدار بالاتر حاصل از رویکرد پیشنهادی

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی، نقشه‌های پتانسیل معدنی محدوده مورد مطالعه واقع در قوس ماگمایی ارومیه-دختر (سهند-زمان) در ایران مرکزی تهیه گردید. به منظور مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل معدنی، از روش تاپسیس اصلاح‌شده و سامانه استنتاج فازی استفاده شد و

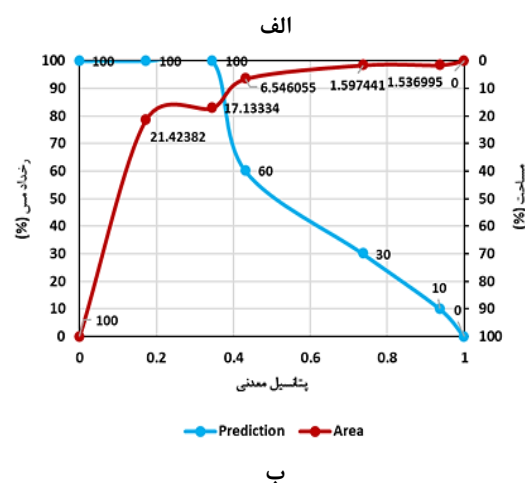
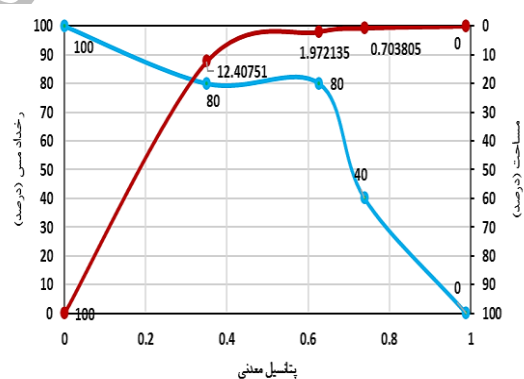
شکل ۱۵: نمودار پیش‌بینی - مساحت نقشه پتانسیل معدنی به دست آمده با استفاده از الف) روش تاپسیس اصلاح شده، ب) سامانه استنتاج فازی.

مراجع

- [1] M. Saremi, A. Hezarkhani, S. A. A. S. Mirzabozorg, R. DehghanNiri, A. Shirazy, and A. Shirazi, "Unsupervised Anomaly Detection for Mineral Prospectivity Mapping Using Isolation Forest and Extended Isolation Forest Algorithms," *Minerals*, vol. 15, no. 4, p. 411, 2025.
- [2] M. Saremi et al., "Evaluation of Deep Isolation Forest (DIF) Algorithm for Mineral Prospectivity Mapping of Polymetallic Deposits," *Minerals*, vol. 14, no. 10, p. 1015, 2024.
- [3] J. M. Hronsky and D. I. Groves, "Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement," *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 55, no. 1, pp. 3-12, 2008.
- [4] E. J. M. Carranza, *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier, 2008.
- [5] E. J. M. Carranza and M. Hale, "Where are porphyry copper deposits spatially localized? A case study in Benguet province, Philippines," *Natural Resources Research*, vol. 11, pp. 45-59, 2002.
- [6] R. Zuo, Z. Zhang, D. Zhang, E. J. M. Carranza, and H. Wang, "Evaluation of uncertainty in mineral prospectivity mapping due to missing evidence: a case study with skarn-type Fe deposits in Southwestern Fujian Province, China," *Ore Geology Reviews*, vol. 71, pp. 502-515, 2015.
- [7] C. Chen, H. Dai, Y. Liu, and B. He, "Mineral prospectivity mapping integrating multi-source geology spatial data sets and logistic regression modelling," in *Proceedings 2011 IEEE international conference on spatial data mining and geographical knowledge services*, 2011: IEEE, pp. 214-217.
- [8] A. Porwal, I. Gonzalez-Alvarez, V. Markwitz, T. McCuaig, and A. Mamuse, "Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia," *Ore Geology Reviews*, vol. 38, no. 3, pp. 184-196, 2010.

نشان‌دهنده عملکرد دقیق‌تر و کارآمدتر آن در شناسایی نواحی امیدبخش معدنی است. افزون بر این، مقایسه نقشه‌های تولیدی با پراکندگی معادن فعال موجود نشان داد که نقشه پتانسیل معدنی حاصل از رویکرد پیشنهادی انطباق بیشتری با شواهد معدنی موجود داشته و بنابراین می‌تواند به‌عنوان ابزاری مطمئن برای کاهش هزینه‌ها و ریسک عملیات اکتشافی مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس نتایج به دست آمده، نقشه پتانسیل معدنی نهایی علاوه بر تأیید موقعیت ذخایر شناخته‌شده، نواحی دیگری با پتانسیل بالا را نیز مشخص کرده است که می‌تواند در برنامه‌ریزی مطالعات اکتشافی آینده مد نظر قرار گیرد. همچنین بررسی عملکرد سامانه استنتاج فازی در این پژوهش نشان داد که استفاده از وزن‌های یکسان برای قوانین فازی نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد؛ با این حال، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تأثیر اختصاص وزن‌های متفاوت به قوانین فازی برای بهبود فرآیند تلفیق لایه‌های شاهد و افزایش دقت نقشه‌های پتانسیل معدنی مورد ارزیابی قرار گیرد.



- [19] M. Hajihosseini, A. Maghsoudi, and R. Ghezelbash, "Stacking: A novel data-driven ensemble machine learning strategy for prediction and mapping of Pb-Zn prospectivity in Varcheh district, west Iran," *Expert systems with applications*, vol. 237, p. 121668, 2024.
- [20] X. Yu, P. Yu, K. Wang, W. Cao, and Y. Zhou, "Data-driven mineral prospectivity mapping based on known deposits using association rules," *Natural Resources Research*, vol. 33, no. 3, pp. 1025-1048, 2024.
- [21] M. Abedi, 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*, vol. 54, no. 2, 2013.
- [22] M. Yousefi and E. J. M. Carranza, "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping," *Computers & Geosciences*, vol. 74, pp. 97-109, 2015.
- [23] Y. Bahrami, H. Hassani, and A. Maghsoudi, "Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran," *GeoJournal*, vol. 86, pp. 1797-1816, 2021.
- [24] V. Nykänen, D. Groves, V. Ojala, P. Eilu, and S. Gardoll, "Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland," *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 55, no. 1, pp. 25-38, 2008.
- [25] P. Afzal et al., "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 119, pp. 139-149, 2016.
- [26] W. M. Moon, "Integration of geophysical and geological data using evidential belief function," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 4, pp. 711-720, 1990.
- [27] M. Abedi and G.-H. Norouzi, "A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, vol. 46, pp. 31-44, 2016.
- [9] A. Porwal, E. Carranza, and M. Hale, "Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India," *Natural resources research*, vol. 12, pp. 155-171, 2003.
- [10] H.-J. Oh and S. Lee, "Application of artificial neural network for gold-silver deposits potential mapping: A case study of Korea," *Natural Resources Research*, vol. 19, pp. 103-124, 2010.
- [11] M. Abedi and G.-H. Norouzi, "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 83, pp. 35-45, 2012.
- [12] R. Zuo and E. J. M. Carranza, "Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity," *Computers & Geosciences*, vol. 37, no. 12, pp. 1967-1975, 2011.
- [13] M. Abedi, G.-H. Norouzi, and A. Bahroudi, "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas," *Computers & Geosciences*, vol. 46, pp. 272-283, 2012.
- [14] E. J. M. Carranza and A. G. Laborte, "Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: Application of Random Forests algorithm," *Ore Geology Reviews*, vol. 71, pp. 777-787, 2015.
- [15] M. Parsa, A. Maghsoudi, and M. Yousefi, "Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan district, NW Iran," *Ore Geology Reviews*, vol. 92, pp. 97-112, 2018.
- [16] A. Porwal, E. J. M. Carranza, and M. Hale, "Bayesian network classifiers for mineral potential mapping," *Computers & Geosciences*, vol. 32, no. 1, pp. 1-16, 2006.
- [17] C. Wang, J. Chen, and Y. Ouyang, "Determination of predictive variables in mineral prospectivity mapping using supervised and unsupervised methods," *Natural Resources Research*, vol. 31, no. 4, pp. 2081-2102, 2022.
- [18] S. Qaderi, A. Maghsoudi, A. B. Pour, and M. Yousefi, "Geological Controlling Factors on Mississippi Valley-Type Pb-Zn Mineralization in Western Semnan, Iran," *Minerals*, vol. 14, no. 9, p. 957, 2024.

- prospectivity model for IOCG deposits in the Kolari region, Finland," *Ore Geology Reviews*, p. 106326, 2024.
- [38] S. Barak, M. Abedi, and A. Bahroudi, "A knowledge-guided fuzzy inference approach for integrating geophysics, geochemistry, and geology data in a deposit-scale porphyry copper targeting, Saveh, Iran," *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 61, no. 2, 2020.
- [39] S. Barak, A. Imamalipour, and M. Abedi, "Employing multiple prospectivity mapping and exploration targeting, a case study from the Sonajil porphyry copper deposit, north-western Iran," *Bulletin of Geophysics and Oceanography*, DOI, vol. 10, 2024.
- [40] F. M. Khalifani, A. Imamalipour, S. Barak, M. Abedi, G. Jozanikohan, and A. Bahroudi, "The application of various mineral prospectivity modeling in the exploration of orogenic gold deposit in Saez-Sardasht region, northwest Iran," *Lithology and Mineral Resources*, vol. 58, no. 4, pp. 368-386, 2023.
- [41] B. Chudasama, S. Thakur, and A. Porwal, "Fuzzy Inference Systems for Mineral Exploration," in *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*: Springer, 2021, pp. 1-5.
- [42] M. Parsa, A. Maghsoudi, and M. Yousefi, "An improved data-driven fuzzy mineral prospectivity mapping procedure; cosine amplitude-based similarity approach to delineate exploration targets," *International journal of applied earth observation and geoinformation*, vol. 58, pp. 157-167, 2017.
- [43] S. Hoogendoorn, S. Hoogendoorn-Lanser, and H. Schuurman, "Fuzzy perspectives in traffic engineering," in *Workshop on Intelligent Traffic Management Models*, 1999.
- [44] T. Sayers, M. Bell, T. Mieden, and F. Busch, "Improving the traffic responsiveness of signal controllers using fuzzy logic," in *IEE Colloquium on Urban Congestion Management*, 1995: IET, pp. 6/1-6/4.
- [45] T. Sayers, M. Bell, T. Mieden, and F. Busch, "Traffic responsive signal control using fuzzy logic-A practical modular approach," in *IEE Colloquium on Fuzzy Logic Controllers in Practice*, 1996: IET, pp. 5/1-5/4.
- [28] M. Abedi, S. A. Torabi, G.-H. Norouzi, M. Hamzeh, and G.-R. Elyasi, "PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration," *Computers & Geosciences*, vol. 46, pp. 255-263, 2012.
- [29] H. Moradpour *et al.*, "Fusion of ASTER satellite imagery, geochemical and geology data for gold prospecting in the Astaneh granite intrusive, West Central Iran," *International Journal of Image and Data Fusion*, vol. 13, no. 1, pp. 71-94, 2022.
- [30] A. Porwal and E. J. M. Carranza, "Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration," vol. 71, ed: Elsevier, 2015, pp. 477-483.
- [31] A. Porwal, E. J. M. Carranza, and M. Hale, "A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping," *Natural Resources Research*, vol. 15, pp. 1-14, 2006.
- [32] A. K. Porwal, "Mineral potential mapping with mathematical geological models," 2006.
- [33] G. Ferrier, A. Ganas, R. Pope, and A. Jo Miles, "Prospectivity mapping for epithermal deposits of Western Milos using a fuzzy multi criteria evaluation approach parameterized by airborne hyperspectral remote sensing data," *Geosciences*, vol. 9, no. 3, p. 116, 2019.
- [34] P. Pahlavani, S. Riahi, and B. Bigdeli, "Ranking potentially favorable mineralization zones using fuzzy VIKOR vs. Dempster-Shafer-fuzzy AHP methods, a case study: southeast of the Sarcheshmeh copper mine, Kerman, Iran," *Arabian journal of Geosciences*, vol. 13, pp. 1-21, 2020.
- [35] A. Porwal, R. D. Das, B. Chaudhary, I. Gonzalez-Alvarez, and O. Kreuzer, "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*, vol. 71, pp. 839-852, 2015.
- [36] B. Chudasama, "Fuzzy inference systems for mineral prospectivity modeling-optimized using Monte Carlo simulations," *MethodsX*, vol. 9, p. 101629, 2022.
- [37] F. Khammar, V. Nykänen, C. Beier, and T. Niiranen, "Translating mineral systems criteria into a

- Conferences, 2021, vol. 342: EDP Sciences, p. 05006.
- [56] G. Castellano, A. M. Fanelli, and C. Mencar, "Generation of interpretable fuzzy granules by a double-clustering technique," *Archives of Control Science*, vol. 12, no. 4, pp. 397-410, 2002.
- [57] H. Ying, *Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications*. Wiley-IEEE Press, 2000.
- [58] H. Ranjbar and M. Honarmand, "Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, no. 21, pp. 4729-4741, 2004.
- [59] F. Berberian and M. Berberian, "Tectono- plutonic episodes in Iran," *Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, vol. 3, pp. 5-32, 1981.
- [60] T. Ahmad and M. Posht Kuhi, "Geochemistry and petrogenesis of Urumiah-Dokhtar volcanics around Nain and Rafsanjan areas: a preliminary study," *Treatise on the geology of Iran, Iranian Ministry of Mines and Metals*, vol. 90, 1993.
- [61] J. Hassanzadeh, *Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province)*. University of California, Los Angeles, 1993.
- [62] J. Omrani, P. Agard, H. Whitechurch, M. Benoit, G. Prouteau, and L. Jolivet, "Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences," *Lithos*, vol. 106, no. 3-4, pp. 380-398, 2008.
- [63] M. Takin, "Iranian geology and continental drift in the Middle East," *nature*, vol. 235, no. 5334, pp. 147-150, 1972.
- [64] J. Dercourt *et al.*, "Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias," *Tectonophysics*, vol. 123, no. 1-4, pp. 241-315, 1986.
- [65] J. Dercourt, L. E. Ricou, and B. Vrielynck, "Atlas Tethys palaeoenvironmental maps," (*No Title*), 1993.
- [46] M. Tangestani and F. Moore, "Mapping porphyry copper potential with a fuzzy model, northern Shahr-e Babak, Iran," *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 50, no. 3, pp. 311-317, 2003.
- [47] S. B. M. Kashani, M. Abedi, and G.-H. Norouzi, "Fuzzy logic mineral potential mapping for copper exploration using multi-disciplinary geo-datasets, a case study in seridune deposit, Iran," *Earth Science Informatics*, vol. 9, pp. 167-181, 2016.
- [48] M. Esmailzadeh, A. Imamipour, and F. Aliyari, "Application of Fuzzy Gamma Operator to Generate Mineral Prospectivity Mapping for Cu-Mo Porphyry Deposits (Case Study: Kighal-Bourmolk Area, Northwestern Iran)," *Journal of Mining and Environment*, vol. 13, no. 1, pp. 129-153, 2022.
- [49] S. Barak, A. Bahrudi, and G. Jozanikohan, "The use of fuzzy inference system in the integration of copper exploration layers in Neysian," *Journal of Mining Engineering*, vol. 13, no. 38, pp. 97-112, 2018.
- [50] G. F. Bonham-Carter, "Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS," *Computer methods in the geoscientists*, vol. 13, p. 398, 1994.
- [51] M. Karimi, M. Menhaj, and M. Mesgari, "Mineral potential mapping of copper minerals using fuzzy logic in GIS environment," *Beijing, China: ISPRS*, pp. 170-181, 2008.
- [52] M. Yousefi, M. D. Lindsay, and O. Kreuzer, "Mitigating uncertainties in mineral exploration targeting: Majority voting and confidence index approaches in the context of an exploration information system (EIS)," *Ore Geology Reviews*, vol. 165, p. 105930, 2024.
- [53] K. Tripathi, "A review on knowledge-based expert system: concept and architecture," *IJCA Special Issue on Artificial Intelligence Techniques- Novel Approaches & Practical Applications*, vol. 4, pp. 19-23, 2011.
- [54] E. Czogala and J. Leski, *Fuzzy and neuro-fuzzy intelligent systems*. Physica, 2012.
- [55] M. Galetakis, A. Vasiliou, E. Steiakakis, A. Soultana, and V. Deligiorgis, "Applications of fuzzy inference systems in mineral industry-an overview," in *MATEC Web of*

- mapping," *Journal of applied geophysics*, vol. 87, pp. 9-18, 2012.
- [76] D. A. Clark, "Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review," *Tectonophysics*, vol. 624, pp. 46-65, 2014.
- [77] B. Siemon, "Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 46, no. 1, pp. 65-76, 2001.
- [78] S. Alaei Moghadam, M. Karimi, M. Mesgari, and N. Saheb Zamani, "Modeling process of mineral potential mapping using Fuzzy inference systems (Case study: Chah Firoozeh Copper Deposit)," *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, vol. 24, no. 93, pp. 53-66, 2014.
- [79] A. Porwal, E. Carranza, and M. Hale, "Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India," *Natural resources research*, vol. 12, no. 3, pp. 155-171, 2003.
- [80] Q. Cheng, F. Agterberg, and S. Ballantyne, "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods," *Journal of Geochemical exploration*, vol. 51, no. 2, pp. 109-130, 1994.
- [81] M. Yousefi and E. J. M. Carranza, "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling," *Computers & Geosciences*, vol. 79, pp. 69-81, 2015.
- [82] M. J. Mihalasky and G. F. Bonham-Carter, "Lithodiversity and its spatial association with metallic mineral sites, Great Basin of Nevada," *Natural Resources Research*, vol. 10, pp. 209-226, 2001.
- [83] C.-L. Hwang, K. Yoon, C.-L. Hwang, and K. Yoon, "Methods for multiple attribute decision making," *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, pp. 58-191, 1981.
- [84] L. Ren, Y. Zhang, Y. Wang, and Z. Sun, "Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and TOPSIS," *Applied Mathematics Research eXpress*, vol. 2007, p. abm005, 2007.
- [66] P. Agard, J. Omrani, L. Jolivet, and F. Mouthereau, "Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation," *International journal of earth sciences*, vol. 94, pp. 401-419, 2005.
- [67] A. Sengor, D. Altiner, A. Cin, T. Ustaomer, and K. Hsu, "Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land," 1988.
- [68] L. Ricou, J. Braud, and B. JH, "Le Zagros," 1977.
- [69] G. C. Waterman and R. Hamilton, "The Sar Cheshmeh porphyry copper deposit," *Economic Geology*, vol. 70, no. 3, pp. 568-576, 1975.
- [70] M. Jahantigh, H. R. Ramazi, H. Ferdusi, and Z. Jafari, "Identifying high potential area of porphyry copper mineralization using the Aaptive Nero fuzzy method in Shahre-Babak studied area, Kerman province," *Advanced Applied Geology*, vol. 14, no. 1, 2024.
- [71] A. B. Pour and M. Hashim, "Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran," *Journal of Asian Earth Sciences*, vol. 42, no. 6, pp. 1309-1323, 2011.
- [72] J. C. Mars and L. C. Rowan, "Regional mapping of phyllic-and argillic-altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms," *Geosphere*, vol. 2, no. 3, pp. 161-186, 2006.
- [73] G. R. Hunt and R. P. Ashley, "Spectra of altered rocks in the visible and near infrared," *Economic Geology*, vol. 74, no. 7, pp. 1613-1629, 1979.
- [74] J. K. Crowley, D. W. Brickey, and L. C. Rowan, "Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: mineral discrimination using relative absorption band-depth images," *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, no. 2, pp. 121-134, 1989.
- [75] M. Abedi, S. A. Torabi, G.-H. Norouzi, and M. Hamzeh, "ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار