



مقاله پژوهشی

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

سجاد نان بده^۱، یوسف شرقی^{۱*}، علیرضا چهرقان^۱، میثم عابدی^۲

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی تبریز (سهند)، تبریز، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۶ بهمن ۱۴۰۳، بازنگری: ۰۹ مهر ۱۴۰۴، پذیرش: ۱۷ آبان ۱۴۰۴)

چکیده

اجرای عملیات اکتشاف مواد معدنی بسیار پرهزینه و زمان بر 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 مبنا 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 تیپ 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 به کارگیری 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

*عهده دار مکاتبات: sharghi@sut.ac.ir

DOI: 10.22034/anm.2025.22750.1664

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 قابل توجه 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 این‌رو، استفاده از رویکردهای تلفیقی و چندمنظوره برای افزایش دقت و کارایی در مراحل مختلف اکتشاف ضروری به نظر می‌رسد [۱، ۲].

مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) یک چارچوب مهم در اکتشاف مواد معدنی است که به‌منظور 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 [۳]. 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 [۴، ۵].

این مراحل در قالب سه دسته روش‌های داده‌مبنا، روش‌های دانش‌مبنا و ترکیبی از هر دو روش انجام می‌گیرد [۵]. روش‌های داده‌مبنا [۶-۲۱] 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 [۲۲].

در مقابل، روش‌های دانش‌مبنا [۲۳-۳۰] 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) [۳۱]. 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 [۳۲-۳۵]. هریک از روش‌های مورد اشاره دارای کاستی‌ها و برتری‌هایی هستند که باتوجه‌به منطقه مورد مطالعه و داده‌های در دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرند. نویسندگان بسیاری [۳۵-۴۳] در تلاش بوده‌اند که از روش سامانه استنتاج‌گر فازی FIS برای مدل‌سازی رابطه‌های دوسویه بین مؤلفه‌های 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 [۴۴-۴۶].

تنگستانی و مور [۴۷] 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 به کار 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.

برک و همکاران [۳۸] 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 ژئوفیزیک در یک پایگاه‌داده جغرافیایی بررسی کردند. آن‌ها ابتدا داده‌های اکتشافی را برای تولید سه لایه معیار زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک با استفاده از یک

۲- مواد و روش ها

۲-۱- رویکرد پیشنهادی

مراحل اصلی مدل سازی پتانسیل معدنی شامل تعیین فاکتورهای تشخیص کانی سازی، جمع آوری اطلاعات، ایجاد لایه های شاهد، وزن دهی این لایه ها و تولید نقشه های شاهد وزن دار، تلفیق نقشه های شاهد و در نهایت رتبه بندی نواحی اهداف اکتشاف برای بررسی های بیشتر در مراحل بعدی اکتشاف است [۴۹، ۵۰].

فرآیند ترکیب و تلفیق نقشه های شاهد وزن دار توسط روش های مختلفی انجام می گیرد که از جمله معتبرترین آن ها می توان منطق بولین، همپوشانی شاخص، عملگرهای منطق فازی، سامانه استنتاج فازی و شبکه های عصبی مصنوعی را نام برد. با این حال، انتخاب مناسب ترین روش (روش ها) همچنان چالشی باقی مانده است. ماهیت کلی نگر تکنیک های فعلی مدل سازی پتانسیل معدنی این مزیت را دارد که تقریباً همگی آن ها می توانند در بیشتر پروژه های 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 داده های ورودی موجود یا نوع کانسار هدف. اگرچه بیشتر این روش ها از نظر آماری قابل قبول هستند، اما مقادیر پتانسیل به دست آمده از آن ها متفاوت است که این موضوع، مقایسه پذیری و تعیین یک روش قابل اعتماد و اثبات شده برای هدف گذاری اکتشافی در شرایط واقعی تصمیم گیری را با مشکل مواجه می سازد [۵۱].

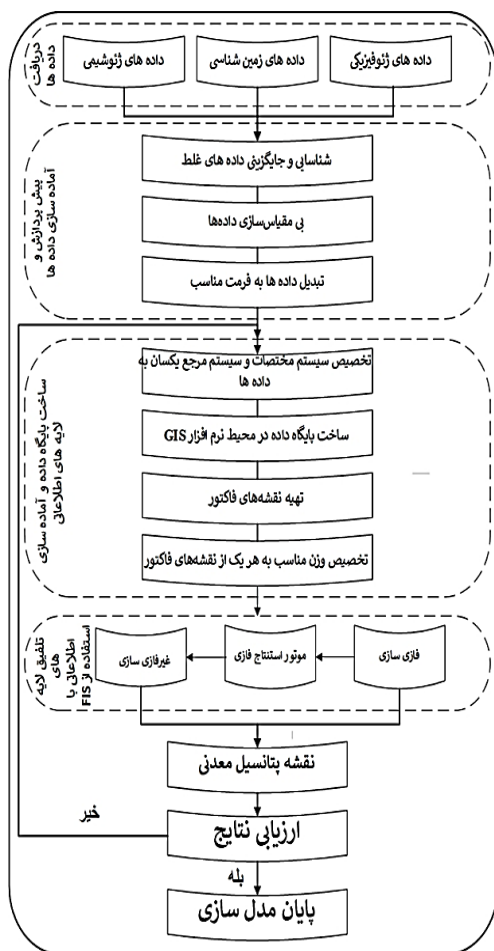
در این مقاله، از سامانه استنتاج گر فازی جهت تلفیق نقشه های شاهد استفاده شده است. این سامانه یک چارچوب محاسباتی مبتنی بر مفاهیم تئوری مجموعه های فازی است و می تواند به عنوان فرآیندی برای نگاشت یک مجموعه داده ورودی داده شده به یک مجموعه خروجی در نظر گرفته شود. صنعت معدن به ویژه پذیرای این روش ها بوده است، زیرا بسیاری از عملیات و فرآیندهای معدنی به روش های تجربی درک و کنترل می شوند. 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 گونه ای کدگذاری کند که دانش متخصص در اختیار کاربری که تجربه کمتری دارد قرار گیرد [۵۲].

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 به منظور ارزیابی دقت روش مورد استفاده، از شاخص بهره وری^۳ ۱۸ گمانه برای بررسی همبستگی بین زون های معدنی و نقشه پتانسیل معدنی خروجی استفاده کردند. لایه های شاهد ترکیب شده، ضریب همبستگی خطی پیرسون^۴ ۰/۴۴ را در تشخیص کانی سازی مس در عمق نشان دادند.

اسماعیل زاده و همکاران [۴۸] داده های زمین شناسی، دگرسانی^۵ و ژئوشیمیایی را به منظور تولید نقشه پتانسیل معدنی در کانسار پورفیری مس-مولیبدن کیکال-بورملک تلفیق کردند. سپس با در نظر گرفتن مدل مفهومی سیستم های مس پورفیری، به هر لایه وزنی اختصاص دادند و لایه ها با عملگر گامای فازی ترکیب و نقشه پتانسیل معدنی نهایی را تولید کردند. باتوجه به مدل پتانسیل معدنی تولید شده، ۰/۸۶ درصد از منطقه مورد مطالعه پتانسیل کانی زایی پورفیری بالایی را نشان داد و آن ها این مناطق را برای حفاری های اکتشافی بعدی پیشنهاد کردند.

یکی از اهداف اصلی این مقاله ارائه رویکردی مبتنی بر سامانه استنتاج فازی به منظور مدل سازی پتانسیل معدنی است، تا علاوه بر بهبود نتایج که خود منجر به شناسایی دقیق تر مناطق امیدبخش می شود، عدم قطعیت و به دنبال آن عدم اطمینان و هزینه ادامه عملیات اکتشافی را نیز کاهش دهد. این مدل منطقی با استفاده از داده های کیفی و متغیرهای زبانی تهیه نقشه پتانسیل معدنی را نسبت به روش های تلفیق متداول که از ترکیب داده های کمی و کیفی استفاده می کنند، ساده تر و قابل درک می کند [۴۸].

در این پژوهش، پس از مرور مطالعات پیشین در حوزه تهیه نقشه پتانسیل معدنی، مواد و روش ها شامل ویژگی های زمین شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه و مبانی سامانه های استنتاج فازی معرفی می شود. پس از تبیین رویکرد مورد استفاده، مراحل اجرای آن بیان می شود. در بخش نتایج، میزان انطباق نقشه حاصل با داده های واقعی و موقعیت اندیس های معدنی شناخته شده ارزیابی می گردد. در نهایت، روش به کاررفته و نتایج آن تحلیل و با سایر روش ها مقایسه شده و نتیجه گیری همراه با پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه می شود.



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

۲-۲- اطلاعات مورد استفاده

بر اساس مدل مفهومی کانسارهای مس پورفیری، ملاک‌ها و معیارهای اکتشافی، جهت اکتشاف ذخیره هدف در منطقه مورد مطالعه، تعیین شدند. با مطالعه و بررسی مدل توصیفی ذخیره مورد نظر، معیارها و ملاک‌های راهنما جهت اکتشاف ذخیره به صورت موردی تعیین شدند. سپس داده‌های مورد نیاز برای ساخت مدل پتانسیل معدنی مس پورفیری در منطقه مورد مطالعه، با در نظر گرفتن ملاک‌ها و معیارهای تعیین شده در مرحله قبل، جمع‌آوری شدند. این داده‌ها در قالب ۱۶ لایه شاهد از داده‌های زمین‌شناسی سطحی (۲ لایه)، تصاویر ماهواره‌ای (۵ لایه)، ژئوفیزیک (۴ لایه) و ژئوشیمی (۵ لایه) استخراج شد. شکل ۲ لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این تحقیق و نحوه تلفیق و ترکیب آن‌ها جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

به کارگیری این سامانه در هر فرایند شامل ۳ مرحله فازی‌سازی^۶، موتور استنتاج فازی^۷ و قطعی‌سازی^۸ خروجی‌هاست [۵۳].

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 [۵۴].

موتور سامانه استنتاج گر فازی: پس از عملیات فازی‌سازی، داده‌ها وارد موتور سامانه استنتاج گر فازی می‌شوند. پایگاه قوانین شامل مجموعه‌ای از قوانین فازی-آنگاه (if-then) است که رابطه بین متغیرهای زبانی ورودی به موتور استنتاج گر و خروجی آن را تعریف می‌کند [۵۴]. به طور کلی، یک سامانه استنتاج گر فازی را می‌توان بر اساس نوع فرمول‌بندی قوانین فازی به دو دسته، مدل ممدانی و مدل تاکاگی-سوگنو طبقه‌بندی کرد [۵۵].

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 به صورت رابطه‌های ریاضی تعریف می‌شود و خروجی‌هایی با مقادیر حقیقی ایجاد می‌شود [۵۶]. تعداد قوانین فازی براساس رابطه (۱) تعیین می‌شود.

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

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

غیر فازی‌سازی: 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^۹، میانگین وزن دار^{۱۰}، بیشترین میانه^{۱۱}، مرکز جمیع^{۱۲} و مرکز بزرگ‌ترین سطوح^{۱۳} برای این کار وجود دارد [۵۶]. شکل ۱ فرآیند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از رویکرد پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۲-۳- پیش پردازش و آماده سازی داده ها

به منظور استفاده از داده های خام جمع آوری شده از منابع اطلاعاتی مختلف به صورت نقشه، این داده ها توسط روش ها و راه کارهای آماری مختلف و با استفاده از نرم افزارهای مرتبط، مورد پردازش و تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. این مرحله شامل حذف و جایگزینی داده های غلط، انجام تصحیحات مربوطه (به خصوص در مورد داده های ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و دورسنجی)، مکان مرجع کردن، بی مقیاس سازی و تبدیل داده ها به شکل و قالب مناسب جهت انجام مراحل بعدی است.

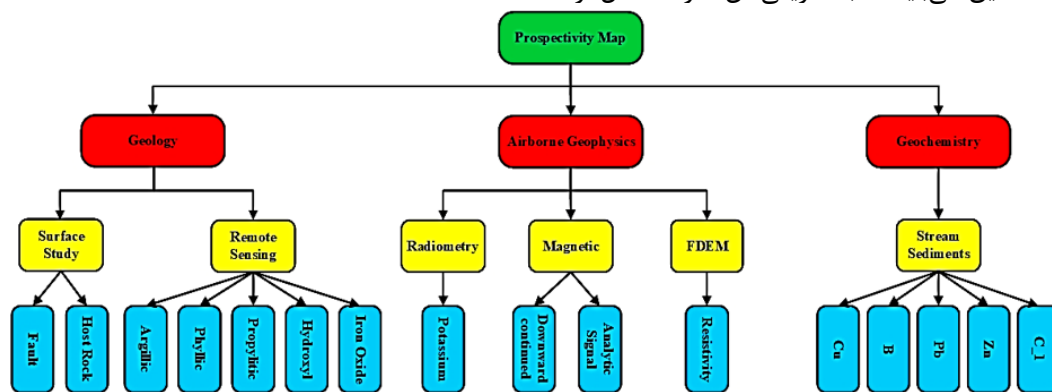
هر یک از لایه های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل سازی پتانسیل معدنی دارای مقیاس اندازه گیری خاص خود هستند که این مسئله مقایسه مقادیر آن ها با یکدیگر را غیرممکن می سازد؛ بنابراین به منظور قابل مقایسه شدن و آماده سازی آن ها جهت تلفیق می بایست به طریقی آن ها را مستقل از

واحد اندازه گیری و یا عبارتی دیگر بی مقیاس کرد. بدین منظور، در این پژوهش از روش بی مقیاس سازی فازی استفاده شد و دامنه تغییرات تمام داده ها در بازه ۰ و ۱ قرار گرفت. بی مقیاس سازی فازی با استفاده از رابطه (۲) انجام می شود.

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

در این رابطه، D_{min} و D_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار متغیر است.

با بهره گیری از داده های موجود و پردازش شده طی مراحل قبلی، اقدام به تهیه نقشه های شاهد کانی سازی منطقه مورد مطالعه و سپس وزن دهی آن ها می شود. لازم به ذکر است که کلیه نقشه های شاهد، به شکل رستر و با اندازه پیکسل ۱۵ متر تهیه شدند. در نهایت، این نقشه ها به منظور تولید نقشه پتانسیل معدنی، با یکدیگر تلفیق می شوند.



شکل ۲: اطلاعات مورد استفاده و نحوه تلفیق لایه های شاهد.

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

پلئوسن^{۲۰}، توده های نفوذی پلوتونیک^{۲۱} و سنگ های آتشفشانی است. هر کدام از این دو منطقه کانه زایی، شامل نهشته های پوفیری مانند سرچشمه، دره زار^{۲۲} و سریدون^{۲۳} است (شکل ۳). گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، پورفیری های دیوریتی و دایک های مونزونیتی با سن الیگوسن تا میوسن، واحدهای زمین شناسی مهم کانه زایی این منطقه به شمار می روند. معدن اصلی مس در این منطقه، معدن مس سرچشمه است که به عنوان یک ذخیره پورفیری مس در کلاس جهانی شناخته می شود و در بخش جنوبی کمر بند آتشفشانی-رسوبی ایران مرکزی، در جنوب غربی شهر کرمان واقع شده است.

کانه زایی پورفیری مس در سرچشمه با یک توده گرانودیوریتی مرتبط است که درون مجموعه ای از سنگ های آتشفشانی-رسوبی چین خورده و گسل خورده از اوایل دوره

منطقه مورد مطالعه واقع در قوس ماگمایی ارومیه - دختر^{۱۴} (سهند- بزمان) از منطقه ایران مرکزی در واحدهای نفوذی ترشیری^{۱۵} و پلیوکواترنری^{۱۶} و یک روند وسیع شمال غربی-جنوب شرقی گسترش یافته است [۵۷-۶۰]. مطالعات گسترده حاکی از وجود یک مدل ماگمایی ناشی از فرو رانش است. منطقه فرو رانش^{۱۷} ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتسین^{۱۸} بین صفحه های عربستان- ترکیه و اوراسیا است [۶۰-۶۶]. این قوس ماگمایی به طور کلی دو ناحیه کانه زایی چهارگنبد در کرمان و سونگون^{۱۹} در شمال غرب را شامل می شود. کانه زایی حاکم بر این منطقه اغلب انواع پورفیری مرتبط با گرانیتهای کواترنری ائوسن-

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.

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 [۶۹]. 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.

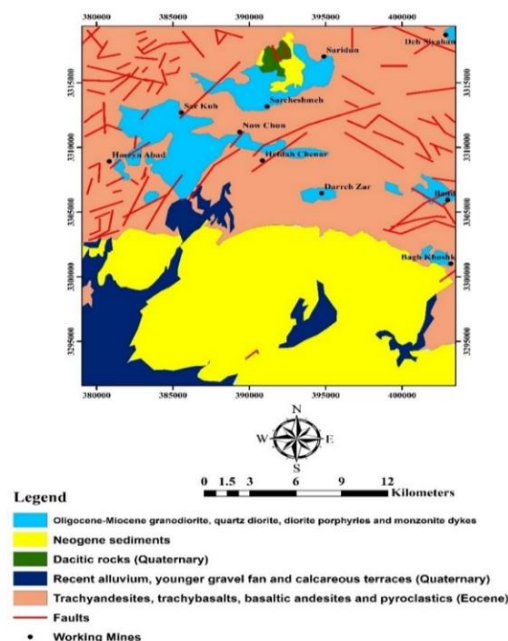
۲-۴-۲- لایه‌های دگرسانی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای

استفاده از سنجنده‌های دورسنجی برای به نقشه در آوردن دگرسانی‌های سطحی، اطلاعات مفیدی در مراحل شناسایی اکتشاف مس پورفیری در مقیاس ناحیه‌ای به دست می‌دهد. سنجنده‌ی استر^{۲۵} (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 فیلک، آرژلیک و پروپیلیتی ویژگی جذب طیفی مشخصی دارند که با استفاده از داده‌های استر قابل تمایز می‌باشند [۷۰، ۷۱].

عمق باند جذب نسبی^{۲۶} (RBD) رابطه نسبتی سه نقطه‌ای برای نمایش شدت جذب OH-Mg, Fe, OH-Al و CO₃ 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 کربناته مانند کلسیت و دولومیت دارای جذب متمایزی در باندهای ۸ و ۹ عکس‌های استر می‌باشند [۷۲، ۷۳].

سوم (ترشیری) شامل آندزیت، توف، ایگنمبریت و آگلومرا نفوذ کرده است. در مرکز این سیستم، زون پتاسیک قرار دارد که آثار دگرسانی فیلک را نیز نشان می‌دهد. این زون توسط زون ضعیفی از دگرسانی بیوتیتی و فیلک احاطه شده است. زون پروپیلیتیک به ضخامت تقریبی یک کیلومتر، کل مجموعه را دربر گرفته و به تدریج به آندزیت آلتره نشده تبدیل می‌شود. کانه‌زایی عمدتاً در زون‌های پتاسیک، بیوتیتی و فیلک رخ می‌دهد [۶۷]. دگرسانی‌های گرمابی شامل کلریت، سریسیت، اپیدوت، کربنات، سیلیس، تورمالین و کانی‌های رسی در منطقه رایج هستند، باین‌حال، دگرسانی‌های فیلک، آرژلیک و پروپیلیتیک بیشتر از سایر انواع در سراسر منطقه مشاهده می‌شوند [۶۸].

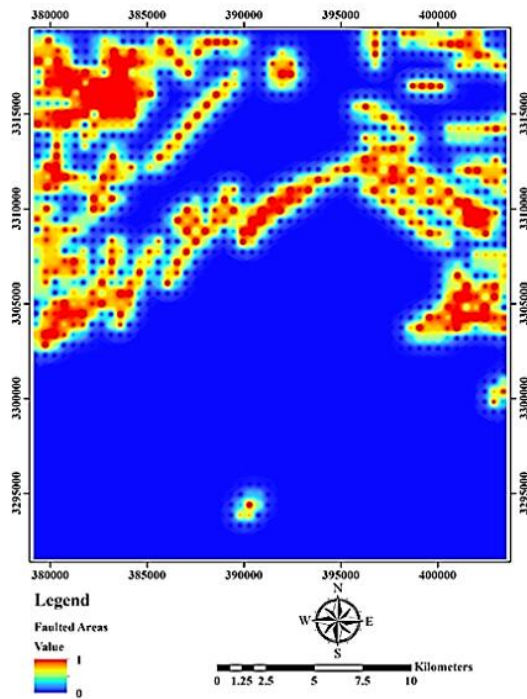
لایه‌های شاهد استخراج شده شامل لایه‌های نقشه زمین شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای و ژئوفیزیک هابرد شامل رادیومتریک، مغناطیسی و الکترومغناطیسی حوزه فرکانس^{۲۴} (FDEM) به منظور تولید نقشه مدلسازی پتانسیل معدنی هستند.



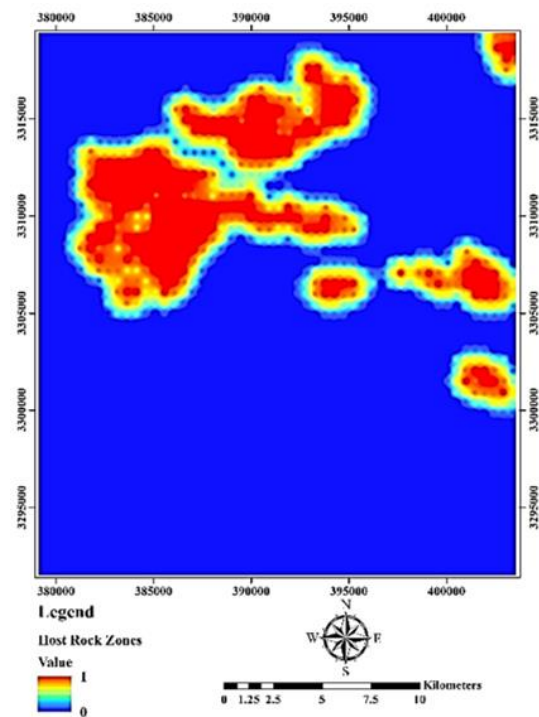
شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی و رخداد معدنی مس سرچشمه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در استان کرمان (دوباره رسم شده از [۵۸]).

۲-۴-۱- لایه گسل و زمین شناسی

باتوجه 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

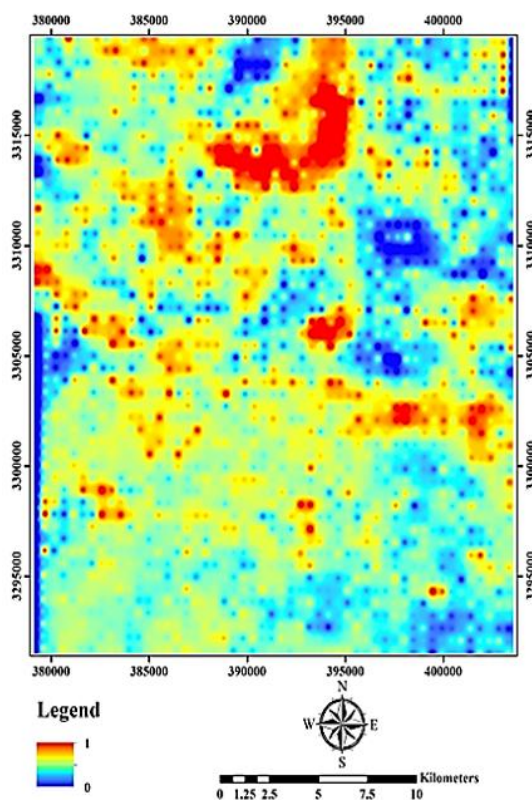


(ب)

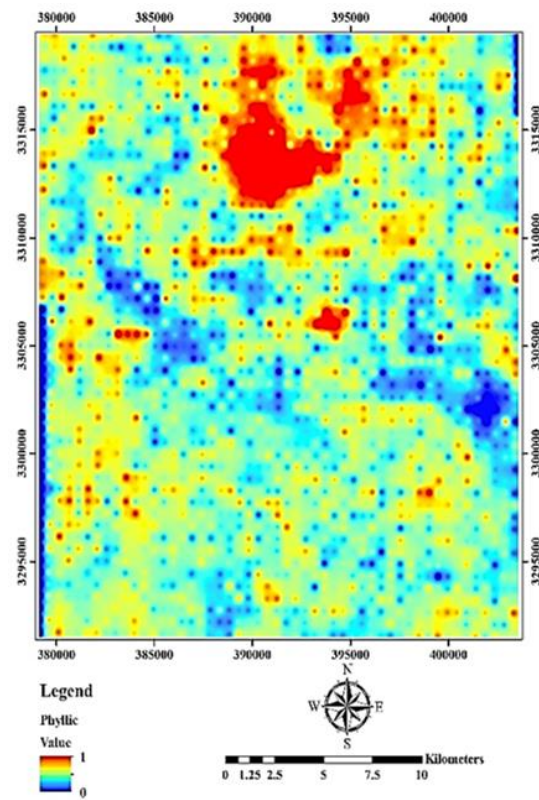


(الف)

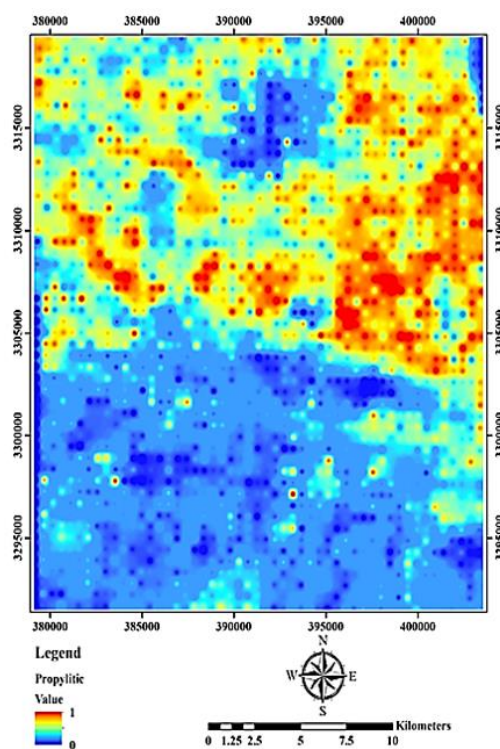
شکل ۴: داده نرمال شده زمین شناسی، (الف) سنگ میزبان (ب) نواحی گسله.



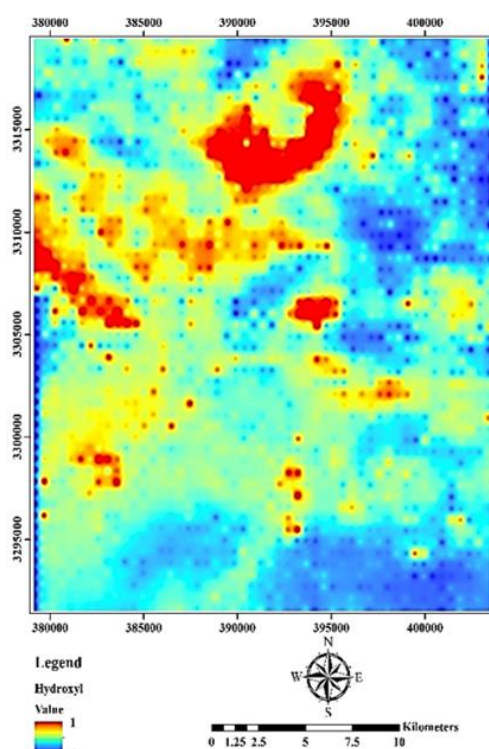
(ب)



(الف)



(د)

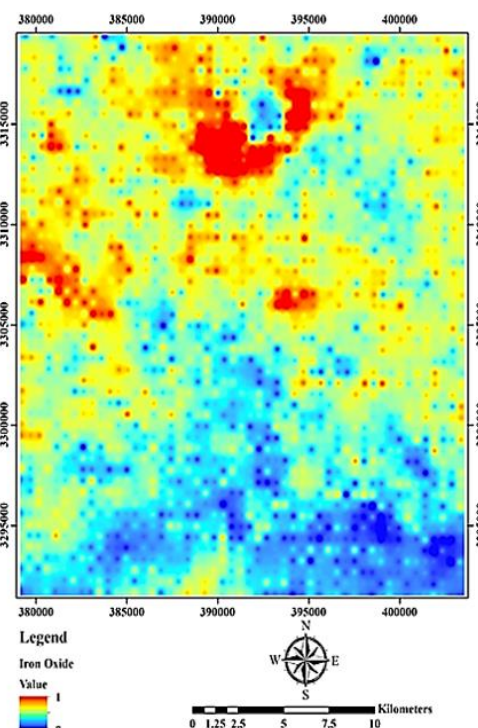


(ج)

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

کمترین میزان جذب امواج الکترومغناطیس را نشان می‌دهد و در مخرج کسر باندهایی قرار دارند که کانی بیشترین جذب را دارد [۷۰، ۷۲]. سه نسبت باندهی RBD به کار گرفته شده در این مقاله شامل RBD₅ (ویژگی‌های کانه‌زایی: آلونیت/ کائولینیت/ پیروفیلیت)، RBD₆ (ویژگی‌های کانه‌زایی: سریسیت/ موسکویت/ ایلیت/ اسمکتیت) و RBD₈ (ویژگی‌های کانه‌زایی: کربنات/ کلریت/ اپیدوت) هستند که به ترتیب برای شناسایی دگرسانی‌های هیدروترمال آرژلیک، فلیک و پروپیلیتی به کار گرفته می‌شوند. بدین منظور، از باندهای مادون قرمز با طول موج کوتاه^{۲۷} (SWIR) استر استفاده شده است. از نسبت باندهی $band4 / band6 + band9$ نیز برای به نقشه در آوردن کانی‌های هیدروکسیل دار 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.



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

عمق باند جذب نسبی به گونه‌ای تعریف می‌شود که در صورت کسر، باندهایی قرار می‌گیرند که کانی موردنظر

۲-۴-۳- لایه های ژئوشیمیایی

به منظور استخراج اطلاعات ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه، تعداد ۳۹۲ نمونه از رسوبات آبراهه ای برداشت شد که از این تعداد ۲۳۲ نمونه در محدود اکتشافی قرار دارد. آنالیز عیار برای ۱۵ عنصر زیر نظر سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور انجام شده است. بعد از تجزیه و تحلیل های آماری تمامی عناصر، با استفاده از آنالیز خوشه ای داده های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه ای، مشخص شد که همبستگی بین عناصر Cu، Pb و Zn نسبتاً قوی بوده و بیانگر همراهی آن ها در فرآیند کانی زایی است. عنصر B نیز همبستگی قابل توجهی با Cu و Zn نشان می دهد. فاکتور ۱ بیشترین ارتباط را با Cu و Pb دارد که حاکی از نقش غالب این دو عنصر در شکل گیری کانی سازی منطقه است.

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

				۱	Cu
			۱	۰.۶۵۴	Pb
		۱	۰.۵۳۱	۰.۶۴۸	Zn
	۱	۰.۵۰۴	۰.۵۱	۰.۶۹۷	B
۱	۰.۵۰۷	۰.۵۸۲	۰.۸۱	۰.۷۱۱	فاکتور ۱
فاکتور ۱	B	Pb	Zn	Cu	

ضریب همبستگی بین این عناصر نسبت به مس در جدول ۱ آورده شده است. لایه های ژئوشیمیایی این عناصر در شکل ۷ نشان داده شده اند. همه لایه ها در فاصله [۰ و ۱] ترسیم شده اند و در همه آن ها مقادیر بالا مربوط به مناطق با پتانسیل معدنی بالا هستند. در نهایت، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) برای ۱۰ عنصر به منظور استخراج مؤلفه اصلی ژئوشیمیایی مرتبط با کانه زایی مس در منطقه بکار گرفته شد. نتایج تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) نشان می دهد که سه مؤلفه نخست در مجموع ۶۷ درصد از تغییرات داده ها را تبیین می کنند. مؤلفه اول (۴۰ درصد واریانس) بیانگر همبستگی قوی Pb-Zn-Ba-Co و مرتبط با کانی سازی سولفیدی است. مؤلفه دوم (۱۵ درصد) ارتباط Cr-Ni-Mo را بازتاب می دهد که بیشتر منشأ لیتولوژیک دارد. مؤلفه سوم (۱۲ درصد) نیز نمایانگر آنومالی های محلی به ویژه برای Sn و B است. این نتایج توانایی PCA در جداسازی عوامل کانی زایی از عوامل زمین زاد و افزایش دقت مدل سازی پتانسیل معدنی را تأیید می کند. همچنین وزن لایه های استخراج شده مربوط به چهار عنصر Cu, Pb, Zn و B در این

فاکتور بالاتر است (جدول ۲). این مؤلفه که در شکل ۸ نشان داده شده است به عنوان لایه ژئوشیمیایی دیگری برای تولید نقشه پتانسیل معدنی در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: نتایج آنالیز PCA برای داده های ژئوشیمیایی

رسوبات آبراهه ای

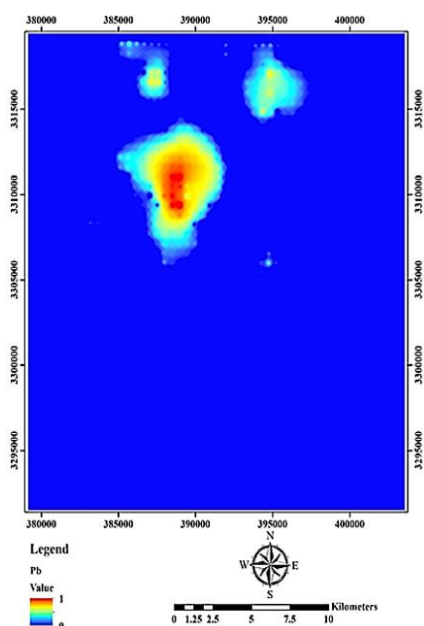
عنصر	C_1	C_2	C_3
B	۰.۷۰۸	۰.۳۷	۰.۱۱۹
Ba	۰.۷۴۷	-۰.۱۴۲	۰.۰۱۸
Co	۰.۲۴۲	۰.۸۵۱	-۰.۰۶۰
Cr	۰.۰۳۹	۰.۷۷۵	۰.۱۷۱
Cu	۰.۷۵۰	۰.۴۲۱	۰.۲۳۵
Mo	۰.۱۸۲	۰.۱۵۲	۰.۷۷۵
Ni	۰.۱۰۴	۰.۸۲۸	۰.۰۸۶
Pb	۰.۸۴۵	۰.۱۶۸	۰.۰۰۷
Sn	۰.۲۲۸	۰.۲۴۶	۰.۶۹۶
Zn	۰.۴۵۰	۰.۴۶۸	۰.۱۶۸
واریانس (درصد)	۴۰	۱۵	۱۲

۲-۴-۴- لایه های ژئوفیزیکی

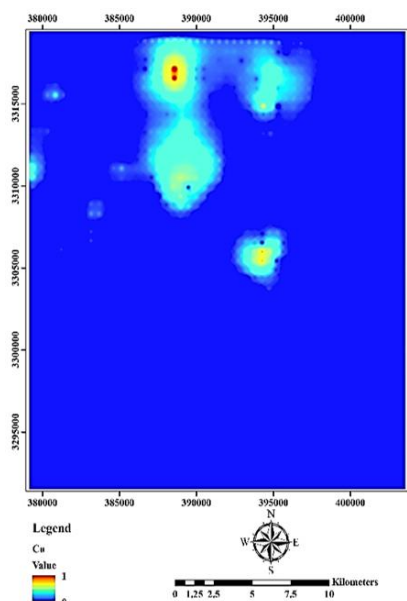
نقشه های مغناطیس هوایی در به نقشه در آوردن عوارض زمین شناسی زیرسطحی و نیز ساختارهای پنهان، نظیر توده های نفوذی کاربرد دارند [۷۳]؛ بنابراین به کارگیری داده های مغناطیس هوا برد جهت آشکارسازی توده های نفوذی زیرسطحی مرتبط با زون دگرسانی پتاسیک پیشنهاد شده است. اگر توده های نفوذی با خاصیت مغناطیسی متوسط درون سنگ دیواره با خاصیت مغناطیسی ضعیف، مانند کوارتزیت یا ولکانیک های سیلیسی نفوذ کند، در نقشه برگردان به قطب آنومالی مغناطیسی قوی مشاهده می شود [۷۴]. داده های هوا برد 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. داده ها به صورت نقشه های هم تراز ژئوفیزیکی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ هستند. به دلیل عدم دسترسی به پایگاه داده ژئوفیزیک هوایی در منطقه، نقشه های ژئوفیزیکی به صورت دستی رقومی شدند. از ۲۶۰۱ نقطه برداشت به دست آمده برای تهیه داده برگردان به قطب به منظور حذف اثر دوقطبی بی هنجاری مغناطیسی استفاده شده است. برای استفاده از لایه ژئوفیزیکی مغناطیسی، بهتر است داده های هوا برد مغناطیسی به ارتفاعی نزدیک به سطح زمین گسترش یابند تا محل بی هنجاری های مغناطیسی

الکترومغناطیس (EM) برای بررسی توزیع مقاومت ویژه الکتریکی به منظور تهیه نقشه بی‌هنجاری در حوزه‌های مختلف، به‌ویژه در اکتشافات معدنی، بسیار مفید هستند. محاسبه مقاومت ویژه ظاهری معمولاً نخستین گام در ارزیابی داده‌های FDEM محسوب می‌شود. توزیع جانبی مقاومت ویژه در منطقه تحت برداشت FDEM می‌تواند از طریق نقشه‌های مقاومت ویژه ظاهری در فرکانس‌های منفرد نمایش داده شود [۷۵].

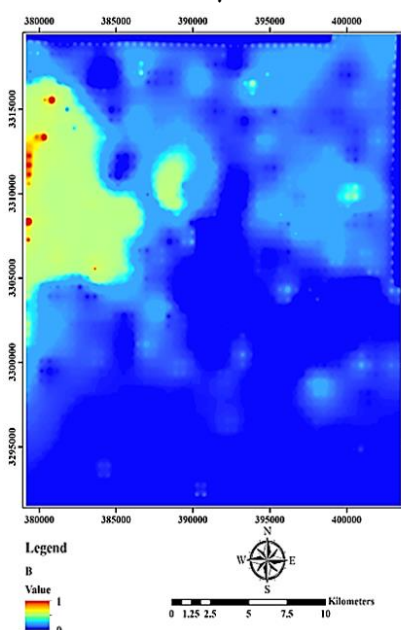
مجزا شده و منابع کوچک‌تر مرتبط با هدف‌های معدنی بهتر خود را نشان دهند؛ بنابراین نقشه ادامه فروسوی ۱۵۰ متر داده برگردان شده به قطب نیز به‌عنوان یکی از لایه‌های شاهد ژئوفیزیکی تهیه شد (شکل ۹-الف). فیلتر سیگنال تحلیلی روی داده‌های ادامه فروسو اعمال شد تا به‌عنوان یک لایه در اکتشاف هوابرد از آن استفاده شود. این لایه مرز توده‌های ماگمایی نفوذی مسئول کانه‌زایی احتمالی را نسبت به زمینه بهتر نمایان می‌نماید (شکل ۹-ب). روش‌های



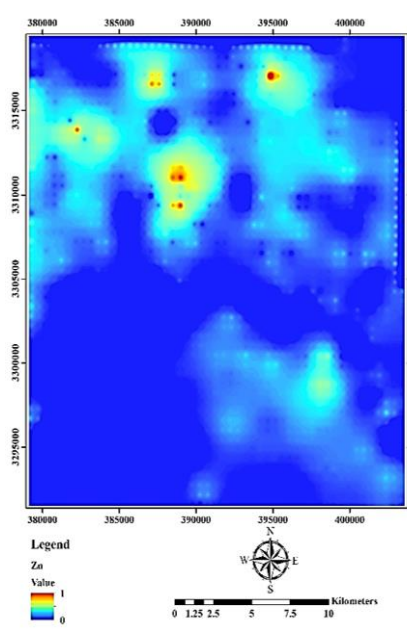
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

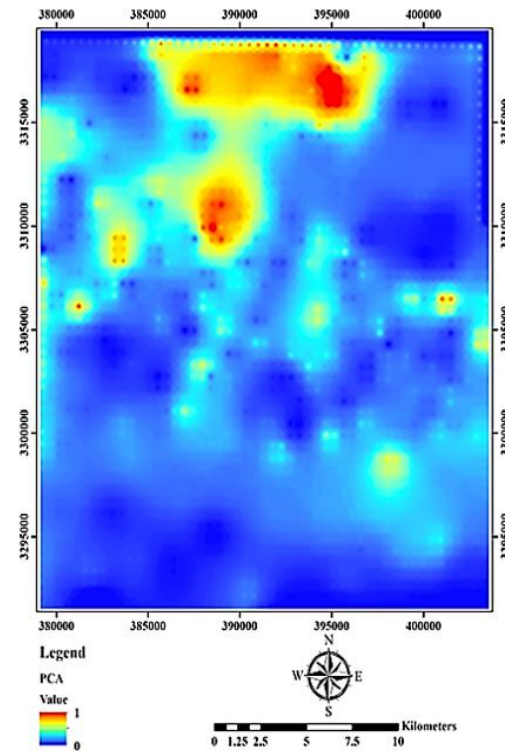
شکل ۷: لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی با مقادیر نرمال شده (الف) مس، (ب) سرب، (ج) روی، و (د) بور.

مقاومت ظاهری به دست آمده از داده های 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. کانی های دگرسانی هیدروترمال (به عنوان مثال، سریسیت، بیوتیت، فلدسپات پتاسیم و بسیاری از کانی های رسی حاوی پتاسیم (K) در ذخایر پورفیری و به ویژه در منطقه سریسیت فراوان هستند؛ بنابراین، نقشه رادیومتری پتاسیم K نشان داده شده در شکل ۹ می تواند به عنوان معیار دیگری برای اکتشاف چنین کانسارهایی نیز در نظر گرفته شود. هوازدگی شیمیایی همچنین منجر به غنی سازی پتاسیم می شود، بنابراین استفاده از نسبت Th/K ترجیح داده می شود. با این حال، نقشه رادیومتری Th جهت استفاده در این مطالعه در دسترس نبود.

۲-۵- تلفیق لایه های اطلاعاتی با استفاده از رویکرد پیشنهادی

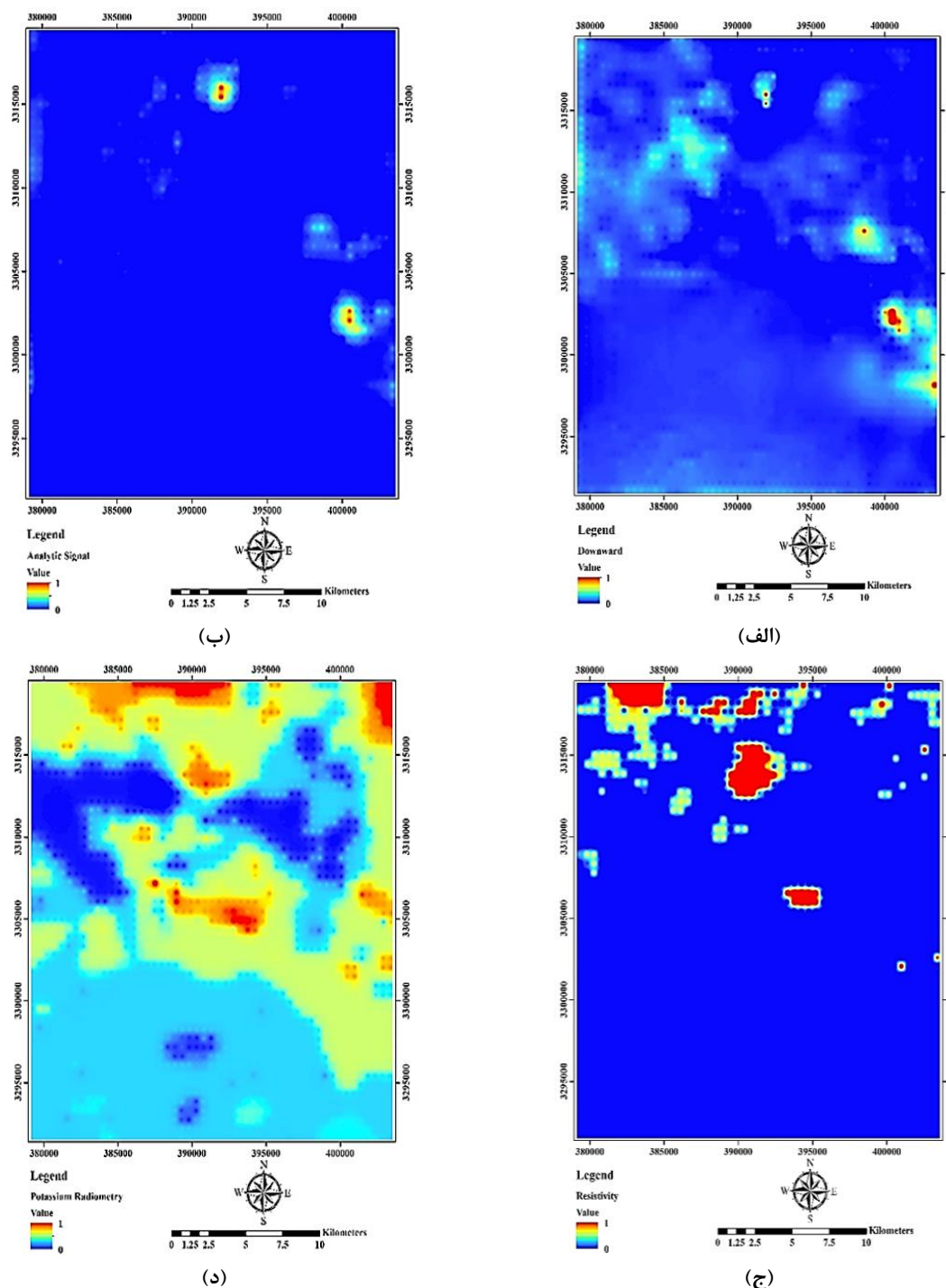
در این مقاله، جهت تلفیق نهایی نقشه های الگو از سامانه استنتاج گر فازی استفاده شده است. در رویکرد پیشنهادی سعی شده است به منظور رسیدن به نتایج نزدیک به واقعیت از اطلاعات گوناگونی استفاده شود و با استفاده از سامانه استنتاج فازی مدل سازی پتانسیل معدنی منطبق بر قوانین موجود در اکتشاف مس انجام بپذیرد.

فازی سازی: 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 رده های نقشه ها را به درستی مدل سازی کنند. نوع، تعداد و پارامترهای توابع عضویت فازی با بررسی های زمین شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و دگرسانی منطقه مورد مطالعه تعیین می شود. طبق این فرایند نقشه ها از حالت کریسپی^{۲۸} خارج شده و به متغیرهای زبانی تبدیل می شوند [۵۶].



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

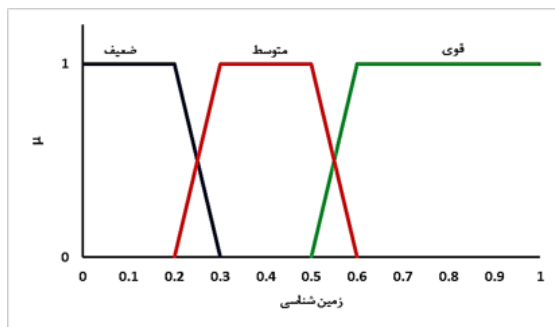
برداشت های EM هواپرد را سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور با فاصله خطوط پرواز ۲۰۰ متر و ارتفاع سنسور ۳۰ متر انجام داده است. سیستم برداشت شامل پنج فرکانس است که دو عدد از آن با پیچده های هم محور قائم در فرکانس های ۹۱۲ و ۴۴۴۵ هرتز و سه عدد دیگر با پیچده های هم سطح افقی در فرکانس های ۵۱۶، ۴۱۳۱ هرتز و ۳۲/۳۷ کیلوهرتز بوده است. به دلیل عدم دسترسی به داده های 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 می دهد. مقادیر بالای شکل ۹ مربوط به مناطق با پتانسیل بالای رخداد کانه زایی است. بر اساس دیدگاه های تیم تصمیم گیری، نقشه



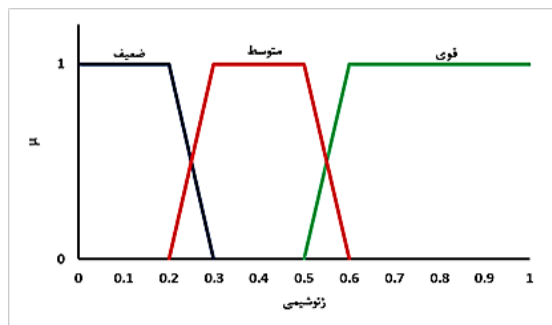
شکل ۹: لایه‌های شاهد ژئوفیزیکی، (الف) داده‌های مغناطیسی گسترش روبه پایین، (ب) سیگنال تحلیلی داده‌های مغناطیسی، (ج) مقاومت ویژه و (د) رادیومتری پتاسیم. همه لایه‌ها به بازه [۰،۱] تبدیل شدند.

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 [۷۶]. 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

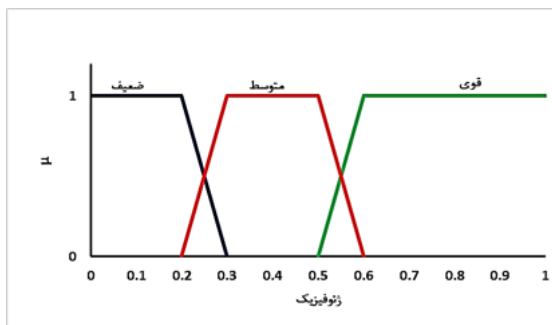
لازم به ذکر است که قبل از عملیات فازی‌سازی، داده‌های تشکیل‌دهنده باید بی‌مقیاس بشوند (داده‌ها در بازه صفر تا یک قرار گرفته باشند). باتوجه به خاصیت روش رده‌بندی چارک یا Quantile استفاده از این روش برای تعیین متغیرهای تابع عضویت از سوی کارشناسان پیشنهاد می‌شود. در روش رده‌بندی Quantile نقشه پتانسیل معدنی



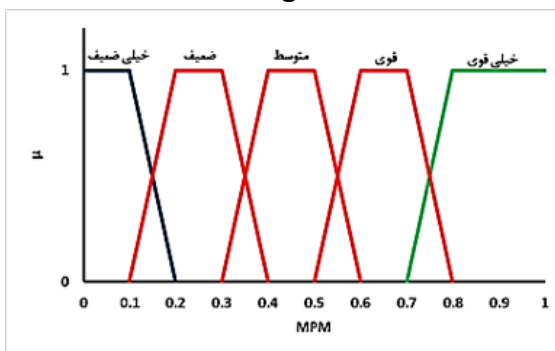
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

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

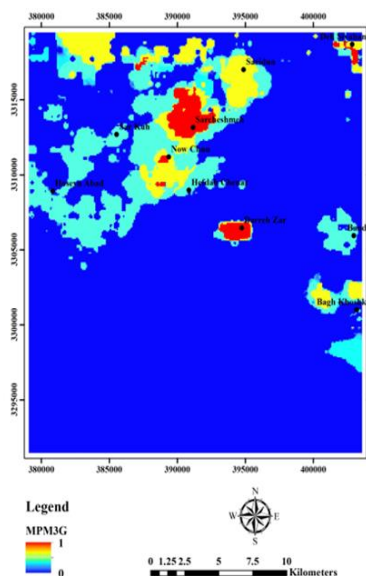
پتانسیل قوی، ضعیف و متوسط تقسیم بندی شدند و یک تابع عضویت دوزنقه ای که شامل پنج گروه پتانسیل خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی جهت خروجی تعریف شده است. شکل ۱۰ توابع عضویت مورد استفاده در این مقاله را نشان می دهد.

موتور سامانه استنتاج گر فازی: پس از عملیات فازی سازی، نقشه ها وارد موتور سامانه استنتاج گر فازی می شوند. به منظور تلفیق داده ها با استفاده از قوانین استنتاج گر فازی، ابتدا یک پایگاه قوانین فازی اگر-آنگاه برای نقشه های شاهد ایجاد می شود. در این پژوهش از روش ممدانی به لحاظ سادگی، مؤثر بودن و کاربرد گسترده آن در مقالات علمی به ویژه در زمینه زمین شناسی و معدن، 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 زمین شناسی قوی، ژئوشیمی قوی و ژئوفیزیک قوی داشته باشد، پتانسیل معدنی آن پیکسل خیلی زیاد است. باتوجه به رابطه بالا، تعداد ۲۷ قانون فازی برای تلفیق با ۳ تابع عضویت تعریف و نوشته شد.

قطعی سازی داده ها و تهیه نقشه نهایی پتانسیل معدنی:

در مرحله قبل پتانسیل معدنی هر پیکسل به صورت یک یا چند عدد فازی محاسبه می شود. به منظور تلفیق اعداد فازی از روش های مختلفی استفاده می شود که در این پژوهش از روش مرکز ثقل که در آن تأثیر تمام قوانین به گونه ای متناسب در نظر گرفته می شود استفاده شده است. خروجی این مرحله، نقشه پتانسیل معدنی است که پتانسیل معدنی هر پیکسل را به صورت یک عدد قطعی نشان می دهد. نقشه نهایی حاصل از تلفیق نیز به صورت فایل Ascii از نرم افزار متلب خارج شده و به منظور افزودن اطلاعات مورد نیاز وارد محیط نرم افزار ArcGIS می شود. شکل ۱۲ نقشه پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از رویکرد پیشنهادی با سه لایه شاهد زمین شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی با استفاده از ۳ تابع عضویت دوزنقه ای را نشان می دهد.

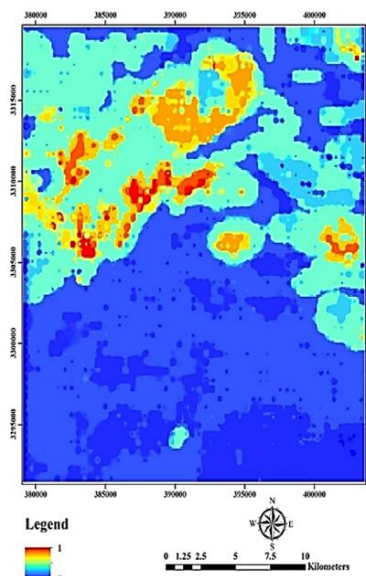


شکل ۱۲: نقشه پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از سامانه استنتاج فازی با سه لایه شاهد زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی.

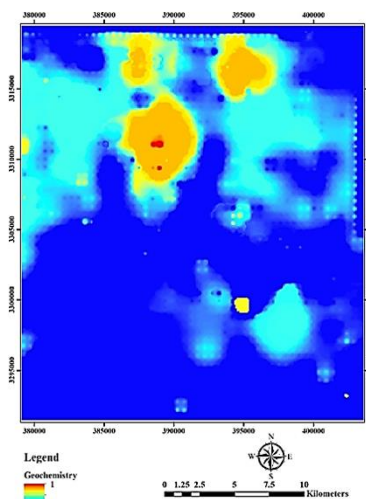
۲-۶- ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج

خروجی موردانتظار 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 [۷۷]. جهت بررسی اینکه مدل تهیه شده و روش مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تا چه میزان در این مورد به‌خوبی 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 روش‌ها می‌توان روش‌های عددی همچون نمودار پیش‌بینی-مساحت^{۲۹} و چگالی نرمال شده^{۳۰} را نام برد.

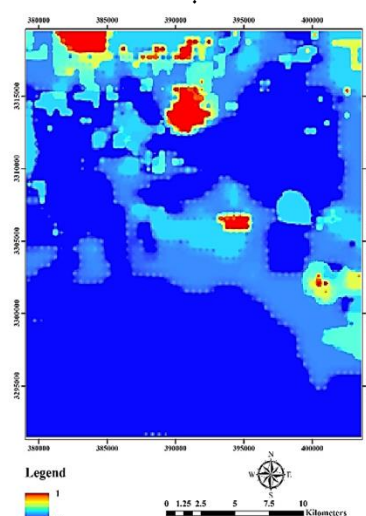
با توجه به اینکه برای رسم نمودار پیش‌بینی-مساحت نیاز به طبقه‌بندی مدل‌های پتانسیل معدنی است از روش فرکتالی عیار-مساحت [۷۸] برای تعیین حد آستانه‌ای جوامع مختلف استفاده می‌شود. بدین صورت که با رسم نمودار لگاریتمی تغییرات مساحت نسبت به عیار، می‌توان حد آستانه هر جامعه آماری را از طریق محاسبه شیب خط برازش شده به آن تعیین کرد. در این نمودار، حد آستانه‌ای جوامع مختلف، نقاطی هستند که شیب خط برازش شده



الف



ب



ج

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

معدنی تهیه شد. با مقایسه نقشه زمین شناسی تهیه شده و نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز مشاهده می شود که مناطق با پتانسیل بالا جهت اکتشاف مس پورفیری در نقشه زمین شناسی (شکل ۱۱- الف) منطبق بر واحدهای گسل خورده و دگرسان شده گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، پورفیری های دیوریتی و دایک های مونزونیتی با سن الیگوسن تا میوسن هستند یکی از مستعدترین واحدهای کانه زایی 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 شده اند. یک ناحیه مرکزی با شدت بالا به عنوان هسته اصلی ناهنجاری شناسایی شد که احتمالاً نشانگر یک سیستم پورفیری فعال است. علاوه بر آن، ناهنجاری های ثانویه در شمال شرق و جنوب شرق محدوده نیز مشخص شدند که می توانند معرف زون های فرعی باشند. سایر نواحی پراکنده عمدتاً در حد زمینه ای بوده و ارزش اکتشافی کمتری دارند.

به طور کلی، نقشه مذکور بیانگر الگوی هاله ای کلاسیک سیستم های پورفیری است و می تواند به عنوان راهنمایی مؤثر در اولویت بندی نواحی امیدبخش برای بررسی های دقیق تر بعدی مورد استفاده قرار گیرد. نواحی قرمز رنگ در نقشه ژئوفیزیک مناطق با پتانسیل بالا جهت اکتشاف مس پورفیری را نشان می دهد (شکل ۱۱- ج). الگوی به دست آمده نشانگر چندین زون ناهنجاری است؛ مهم ترین آن ها در بخش شمال غربی محدوده، با شدت بالا و گستردگی قابل توجه، به عنوان محتمل ترین سیستم پورفیری مس شناسایی شد. ناهنجاری های کوچک تر در مرکز و جنوب شرق محدوده نیز مشاهده می شوند که می توانند معرف سیستم های فرعی یا ساختارهای گسلی مرتبط باشند. مناطق پراکنده کم شدت عمدتاً بیانگر زمینه طبیعی یا اثرات ثانویه هستند. همان طور 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. به منظور 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 اولویت بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده آل یا تاپسیس از روش های تصمیم گیری چندمعیاره است که در

تغییر می کند. سپس مدل های پتانسیل تولید شده، بر اساس حدود آستانه ای حاصل از نمودار عیار- مساحت طبقه بندی می شوند [۷۹]. در نهایت، با توجه به مدل های پتانسیل معدنی طبقه بندی شده، تعداد اندیس های پیش بینی شده در هر کلاس و مساحت متناظر کلاس ها، نمودارهای پیش بینی- مساحت رسم می شود. در این نمودار، اولین منحنی نشان دهنده نرخ پیش بینی اندیس های شناخته شده متناظر با کلاس های 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 [۸۰].

نقطه تقاطع این دو منحنی به عنوان شاخصی برای ارزیابی عملکرد مدل در نظر گرفته می شود؛ به طوری که هر چه این نقطه در موقعیت بالاتری قرار گیرد، مدل کارایی بیشتری دارد زیرا اندیس های شناخته شده در سطوح کوچک تری 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 پیش بینانه به صورت نسبت درصد اندیس های پیش بینی شده توسط آن کلاس به مساحت اشغال شده توسط آن کلاس، با توجه به مساحت کل منطقه تعریف می شود [۸۱]. چگالی نرمال بر اساس پارامترهای به دست آمده از نقطه برخورد دو منحنی در نمودار نرخ پیش بینی- مساحت از طریق رابطه (۳) به دست می آید.

$$N_d = \frac{Pr}{O_a} \quad (3)$$

در رابطه فوق، N_d چگالی نرمال شده بر حسب مساحت در نقطه برخورد دو منحنی، Pr نرخ پیش بینی، O_a مساحت متناظر با نقطه برخورد در نمودار نرخ پیش بینی- مساحت است. در این رابطه N_d اگر کوچک تر از عدد یک باشد، روش مورد استفاده جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پیش گوی مناسبی نیست و چگالی نرمال بالاتر از عدد یک به عنوان پیش گوی مناسب شناخته می شود.

۳- نتایج و بحث

همان طور که در بخش های قبل اشاره شد، هدف اصلی این پژوهش، تهیه نقشه پتانسیل مس پورفیری با استفاده از سامانه استنتاج گر فازی است. به این منظور، ۳ لایه زمین شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی با استفاده از سامانه استنتاج گر فازی با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه پتانسیل

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

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

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

مرحله ۶: تعیین نقطه مرجع ایده‌آل S:

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

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 پتانسیل بالا و پایین در ناحیه اکتشافی می‌باشند. شکل ۱۳ نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش تاپسیس اصلاح شده^{۳۱} 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، درحالی‌که 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

ابتدا توسط [۸۲] ارائه شد و بعدها در سال ۱۹۹۲ توسط چن و هوانگ تکمیل شد. [۸۳] روش الگوریتم تاپسیس اصلاح شده را باتوجه 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 چندمعیاره تاپسیس اصلاح شده، از لایه‌های شاهد شکل ۲ استفاده شده است. روش دلفی برای تعیین وزن لایه‌ها به کار 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 موردنظر 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. به‌کارگیری روش تاپسیس اصلاح شده جهت تولید یک نقشه پتانسیل معدنی شامل مراحل زیر است:

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. $j = 1, 2, \dots, m$

مرحله ۲: تعیین وزن اهمیت برای تمامی معیارها با استفاده از روش‌های توسعه یافته به‌طوری 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 بهم‌ریختن نتایج الگوریتم TOPSIS هم‌مقیاس شوند. برای این منظور از فرمول زیر استفاده خواهد شد:

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

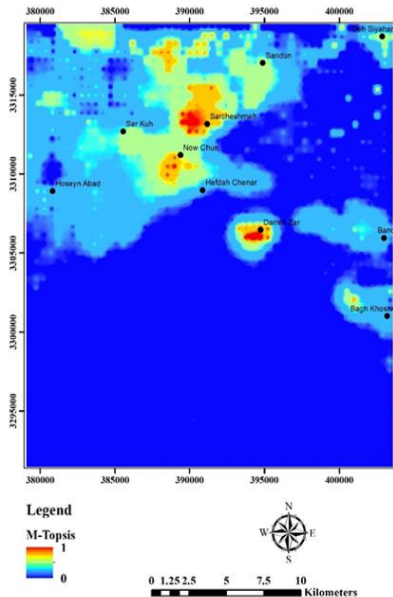
مرحله ۴: تعیین ارزش‌های ایده‌آل مثبت (PIS) و ایده‌آل منفی (NIS):

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

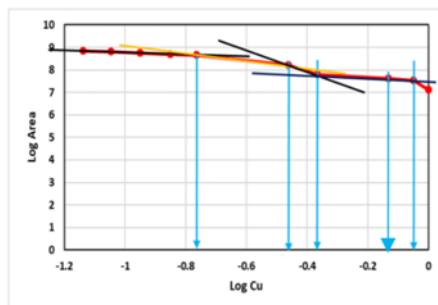
$$f^- = (v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-) = \{(\min[r_{ij}] \mid i \in B), (\max[r_{ij}] \mid i \in C)\} \quad (7)$$

مرحله ۵: محاسبه فواصل اقلیدسی وزن دار شده:

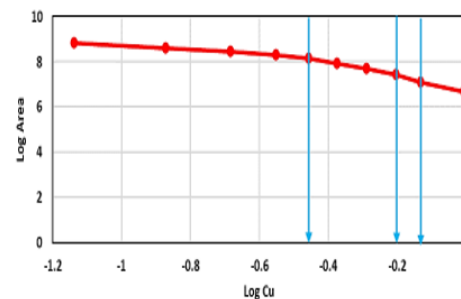
روش سامانه استنتاج برابر با ۶/۱۴ است. باتوجه به عدد چگالی نرمال به دست آمده از روش تاپسیس اصلاح شده و رویکرد پیشنهادی در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مشاهده می شود که رویکرد پیشنهادی، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به روش تاپسیس اصلاح شده داشته است.



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

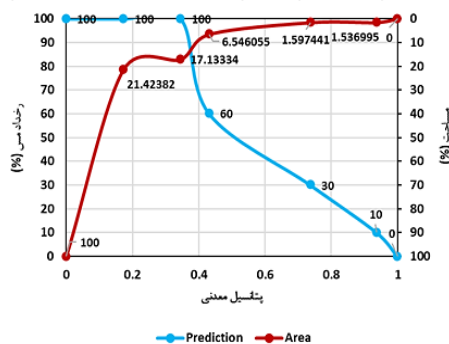


(ب)

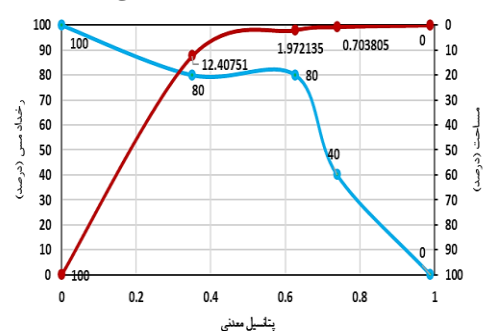


(الف)

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



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: نمودار پیش بینی- مساحت نقشه 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	آرژلیک				
۰/۰۶۳	۰/۴	فیلیک	۰/۴۳۰	دورسنجی		
۰/۰۱۶	۰/۱	پروپیلیتیک				
۰/۰۲۴	۰/۱۵	هیدروکسیل				
۰/۰۲۴	۰/۱۵	اکسید آهن				
۰/۰۶۱	۱	پتاسیم	۰/۲	رادیومتری	۰/۳۰۶	ژئوفیزیک
۰/۰۵۷	۰/۵۳	گسترش روبه‌پایین	۰/۳۵	مغناطیس‌سنجی		
۰/۰۵	۰/۴۷	سیگنال تحلیلی				
۰/۱۳۸	۱	مقاومت ویژه	۰/۴۵	FDEM		
۰/۰۸۸	۰/۲۷	مس	۱	رسوبات آبراهه‌ای	۰/۳۲۷	ژئوشیمی
۰/۰۶۱	۰/۱۸۷	بور				
۰/۰۵۸	۰/۱۷۷	سرب				
۰/۰۵۸	۰/۱۷۵	روی				
۰/۰۶۲	۰/۱۹۱	Cl				

۴- نتیجه‌گیری

موقعیت ذخایر شناخته شده، نواحی دیگری با پتانسیل بالا را نیز مشخص کرده است که می‌تواند در برنامه‌ریزی مطالعات اکتشافی آینده مدنظر 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.

مراجع

- [1] Saremi, M., et al., Unsupervised Anomaly Detection for Mineral Prospectivity Mapping Using Isolation Forest and Extended Isolation Forest Algorithms. *Minerals*, 2025. 15(4): p. 411.
- [2] keykhay hosseinpoor, M. , Kohsary, A. H. , Hossein Morshedy, A. and Porwal, A. (2020). Mineral Potential Modeling Using Deep Learning Auto-Encoder Network in the Dehsalm District, Eastern Iran. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(22), 77-94. doi: 10.29252/anm.2020.12606.1412
- [3] Saremi, M., et al., Evaluation of Deep Isolation Forest (DIF) Algorithm for Mineral Prospectivity Mapping of Polymetallic Deposits. *Minerals*, 2024. 14(10): p. 1015.
- [4] Hronsky, J.M. and D.I. Groves, *Science of*

در این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیک و ژئوشیمیایی، نقشه‌های پتانسیل معدنی محدوده مورد مطالعه واقع در قوس ماگمایی ارومیه-دختر (سهند-بزمان) در ایران مرکزی تهیه گردید. به منظور مدل‌سازی و ارزیابی پتانسیل معدنی، از روش تاپسیس اصلاح شده و سامانه استنتاج فازی استفاده شد و اعتبار نتایج با بهره‌گیری از اندیس‌های معدنی شناخته شده 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 اصلاح شده 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 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 به عنوان 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

Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan district, NW Iran. Ore Geology Reviews, 2018. **92**: p. 97-112.

[17] Porwal, A., E.J.M. Carranza, and M. Hale, *Bayesian network classifiers for mineral potential mapping.* Computers & Geosciences, 2006. **32**(1): p. 1-16.

[18] Wang, C., J. Chen, and Y. Ouyang, *Determination of predictive variables in mineral prospectivity mapping using supervised and unsupervised methods.* Natural Resources Research, 2022. **31**(4): p. 2081-2102.

[19] Qaderi, S., et al., *Geological Controlling Factors on Mississippi Valley-Type Pb-Zn Mineralization in Western Semnan, Iran.* Minerals, 2024. **14**(9): p. 957.

[20] Hajihosseini, M., 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, 2024. **237**: p. 121668.

[21] Yu, X., et al., *Data-driven mineral prospectivity mapping based on known deposits using association rules.* Natural Resources Research, 2024. **33**(3): p. 1025-1048.

[22] 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).

[23] Yousefi, M. and E.J.M. Carranza, *Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping.* Computers & Geosciences, 2015. **74**: p. 97-109.

[24] Bahrami, Y., H. Hassani, and A. Maghsoudi, *Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran.* GeoJournal, 2021. **86**: p. 1797-1816.

[25] Nykänen, V., et al., *Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland.* Australian Journal of Earth Sciences, 2008. **55**(1): p. 25-38.

[26] Afzal, P., et al., *Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis.* Journal of African Earth Sciences, 2016. **119**: p. 139-149.

[27] Moon, W.M., *Integration of geophysical and geological data using evidential belief function.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990. **28**(4): p. 711-720.

[28] Abedi, M. and G.-H. Norouzi, *A general*

targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences, 2008. **55**(1): p. 3-12.

[5] Carranza, E.J.M., *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS.* Vol. 11. 2008: Elsevier.

[6] Carranza, E.J.M. and M. Hale, *Where are porphyry copper deposits spatially localized? A case study in Benguet province, Philippines.* Natural Resources Research, 2002. **11**: p. 45-59.

[7] Zuo, R., et al., *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, 2015. **71**: p. 502-515.

[8] Chen, C., et al. *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.

[9] Porwal, A., et al., *Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia.* Ore Geology Reviews, 2010. **38**(3): p. 184-196.

[10] Porwal, A., E. Carranza, and M. Hale, *Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India.* Natural resources research, 2003. **12**: p. 155-171.

[11] Oh, H.-J. and S. Lee, *Application of artificial neural network for gold-silver deposits potential mapping: A case study of Korea.* Natural Resources Research, 2010. **19**: p. 103-124.

[12] Abedi, M. 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, 2012. **83**: p. 35-45.

[13] Zuo, R. and E.J.M. Carranza, *Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity.* Computers & Geosciences, 2011. **37**(12): p. 1967-1975.

[14] Abedi, M., G.-H. Norouzi, and A. Bahroudi, *Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas.* Computers & Geosciences, 2012. **46**: p. 272-283.

[15] Carranza, E.J.M. and A.G. Laborte, *Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: Application of Random Forests algorithm.* Ore Geology Reviews, 2015. **71**: p. 777-787.

[16] Parsa, M., A. Maghsoudi, and M. Yousefi,

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, 2024. **10**.

[41] Khalifani, F.M., et al., *The application of various mineral prospectivity modeling in the exploration of orogenic gold deposit in Saqez-Sardasht region, northwest Iran.* Lithology and Mineral Resources, 2023. **58**(4): p. 368-386.

[42] Chudasama, B., S. Thakur, and A. Porwal, *Fuzzy Inference Systems for Mineral Exploration*, in *Encyclopedia of Mathematical Geosciences*. 2021, Springer. p. 1-5.

[43] Parsa, M., 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, 2017. **58**: p. 157-167.

[44] Hoogendoorn, S., S. Hoogendoorn-Lanser, and H. Schuurman. *Fuzzy perspectives in traffic engineering.* in *Workshop on Intelligent Traffic Management Models*. 1999.

[45] Sayers, T., et al. *Improving the traffic responsiveness of signal controllers using fuzzy logic.* in *IEE Colloquium on Urban Congestion Management*. 1995. IET.

[46] Sayers, T., et al. *Traffic responsive signal control using fuzzy logic-A practical modular approach.* in *IEE Colloquium on Fuzzy Logic Controllers in Practice*. 1996. IET.

[47] Tangestani, M. and F. Moore, *Mapping porphyry copper potential with a fuzzy model, northern Shahr-e-Babak, Iran.* Australian Journal of Earth Sciences, 2003. **50**(3): p. 311-317.

[48] Barak, S., A. Bahroudi, and G. Jozanikohan, *The use of fuzzy inference system in the integration of copper exploration layers in Neysian.* Journal of Mining Engineering, 2018. **13**(38): p. 97-112.

[49] Bonham-Carter, G.F., *Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS.* Computer methods in the geoscientists, 1994. **13**: p. 398.

[50] Karimi, M., M. Menhaj, and M. Mesgari, *Mineral potential mapping of copper minerals using fuzzy logic in GIS environment.* Beijing, China: ISPRS, 2008: p. 170-181.

[51] Yousefi, M., 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, 2024. **165**: p. 105930.

framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2016. **46**: p. 31-44.

[29] Abedi, M., et al., *PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration.* Computers & Geosciences, 2012. **46**: p. 255-263.

[30] Moradpour, H., 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, 2022. **13**(1): p. 71-94.

[31] Porwal, A. and E.J.M. Carranza, *Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration.* 2015, Elsevier. p. 477-483.

[32] Porwal, A., E.J.M. Carranza, and M. Hale, *A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping.* Natural Resources Research, 2006. **15**: p. 1-14.

[33] Porwal, A.K., *Mineral potential mapping with mathematical geological models.* 2006.

[34] Ferrier, G., et al., *Prospectivity mapping for epithermal deposits of Western Milos using a fuzzy multi criteria evaluation approach parameterized by airborne hyperspectral remote sensing data.* Geosciences, 2019. **9**(3): p. 116.

[35] Pahlavani, P., 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, 2020. **13**: p. 1-21.

[36] 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, 2015. **71**: p. 839-852.

[37] Chudasama, B., *Fuzzy inference systems for mineral prospectivity modeling-optimized using Monte Carlo simulations.* MethodsX, 2022. **9**: p. 101629.

[38] Khammar, F., et al., *Translating mineral systems criteria into a prospectivity model for IOCG deposits in the Kolari region, Finland.* Ore Geology Reviews, 2024: p. 106326.

[39] Barak, S., 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, 2020. **61**(2).

[40] Barak, S., A. Imamali-pour, and M. Abedi,

- Cheshmeh porphyry copper deposit*. Economic Geology, 1975. **70**(3): p. 568-576.
- [68] Ranjbar, H. 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, 2004. **25**(21): p. 4729-4741.
- [69] Jahantigh, M., et al., *Identifying high potential area of porphyry copper mineralization using the Aptive Nero fuzzy method in Shahre-Babak studied area, Kerman province*. Advanced Applied Geology, 2024. **14**(1).
- [70] Pour, A.B. and M. Hashim, *Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran*. Journal of Asian Earth Sciences, 2011. **42**(6): p. 1309-1323.
- [71] maasoumi, I. and Ranjbar, H. (2018). Enhancement of Hydrothermal Alteration in ASTER Images of Sar Cheshmeh Area, Using Logical Operators. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, **7**(14), 61-71. doi: 10.29252/anm.7.14.61
- [72] Crowley, J.K., 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, 1989. **29**(2): p. 121-134.
- [73] Abedi, M., et al., *ELECTRE III: A knowledge-driven method for integration of geophysical data with geological and geochemical data in mineral prospectivity mapping*. Journal of applied geophysics, 2012. **87**: p. 9-18.
- [74] Clark, D.A., *Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review*. Tectonophysics, 2014. **624**: p. 46-65.
- [75] Siemon, B., *Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data*. Journal of Applied Geophysics, 2001. **46**(1): p. 65-76.
- [76] Alaei Moghadam, S., et al., *Modeling process of mineral potential mapping using Fuzzy inference systems (Case study: Chah Firoozeh Copper Deposit)*. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 2014. **24**(93): p. 53-66.
- [77] Porwal, A., E. Carranza, and M. Hale, *Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India*. Natural resources research, 2003. **12**(3): p. 155-171.
- [78] Cheng, Q., F. Agterberg, and S. Ballantyne, *The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods*. Journal of
- [52] Tripathi, K., *A review on knowledge-based expert system: concept and architecture*. IJCA Special Issue on Artificial Intelligence Techniques- Novel Approaches & Practical Applications, 2011. **4**: p. 19-23.
- [53] Czogala, E. and J. Leski, *Fuzzy and neuro-fuzzy intelligent systems*. Vol. 47. 2012: Physica.
- [54] Galetakis, M., et al. *Applications of fuzzy inference systems in mineral industry-an overview*. in *MATEC Web of Conferences*. 2021. EDP Sciences.
- [55] Castellano, G., A.M. Fanelli, and C. Mencar, *Generation of interpretable fuzzy granules by a double-clustering technique*. Archives of Control Science, 2002. **12**(4): p. 397-410.
- [56] Ying, H., *Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications*. 2000: Wiley-IEEE Press.
- [57] Berberian, F. and M. Berberian, *Tectono-plutonic episodes in Iran*. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution, 1981. **3**: p. 5-32.
- [58] Ahmad, T. 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, 1993. **90**.
- [59] Hassanzadeh, J., *Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province)*. 1993: University of California, Los Angeles.
- [60] Omrani, J., et al., *Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences*. Lithos, 2008. **106**(3-4): p. 380-398.
- [61] Takin, M., *Iranian geology and continental drift in the Middle East*. nature, 1972. **235**(5334): p. 147-150.
- [62] Dercourt, J., et al., *Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias*. Tectonophysics, 1986. **123**(1-4): p. 241-315.
- [63] Dercourt, J., L.E. Ricou, and B. Vrielynck, *Atlas Tethys palaeoenvironmental maps*. (No Title), 1993.
- [64] Agard, P., et al., *Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation*. International journal of earth sciences, 2005. **94**: p. 401-419.
- [65] Sengor, A., et al., *Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land*. 1988.
- [66] Ricou, L., J. Braud, and B. JH, *Le Zagros*. 1977.
- [67] Waterman, G.C. and R. Hamilton, *The Sar*

- [81] Mihalasky, M.J. and G.F. Bonham-Carter, *Lithodiversity and its spatial association with metallic mineral sites, Great Basin of Nevada*. Natural Resources Research, 2001. **10**: p. 209-226.
- [82] Hwang, C.-L., et al., *Methods for multiple attribute decision making*. Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey, 1981: p. 58-191.
- [83] Ren, L., et al., *Comparative analysis of a novel M-TOPSIS method and TOPSIS*. Applied Mathematics Research eXpress, 2007. **2007**: p. abm005.
- Geochemical exploration, 1994. **51**(2): p. 109-130.
- [79] Ziaii, M. , Shabani, A. , Soleimani Monfared, M. , Shirazi, A. and Hamed, S. A. (2025). Mineral Prospectivity Mapping of the Hidden Cu-Au Porphyry Mineralization in the Basiran and Kodegan 1:100,000 Sheets. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, **15**(42), 37-50. doi: 10.22034/anm.2023.18917.1568
- [80] Yousefi, M. 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, 2015. **79**: p. 69-81.
-
- ¹ The productivity of the drilled boreholes
- ² Correlation Coefficient
- ³ The productivity Index
- ⁴ Pearson's linear correlation coefficient
- ⁵ Alteration
- ⁶ Fuzzification
- ⁷ Inference Engine
- ⁸ Defuzzification
- ⁹ Centroid of area
- ¹⁰ Weighted Average
- ¹¹ Mean max
- ¹² Center of Sums
- ¹³ Center of largest area
- ¹⁴ The Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage (UDMA) arc
- ¹⁵ Tertiary
- ¹⁶ Plio-Quaternary
- ¹⁷ Subduction
- ¹⁸ Neo-Tethyan
- ¹⁹ Sungun
- ²⁰ Eocene-Pliocene-Quaternary granitoids
- ²¹ plutonic bodies
- ²² Darrehzar
- ²³ Saridun
- ^{rf} Frequency Domain Electromagnetic
- ^{ra} Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
- rd Relative Absorption Depth
- ²⁷ Shortwave Infrared Region
- ²⁸ Crispy
- ²⁹ Prediction- Area
- ³⁰ Normalized density
- ³¹ Modified Topsis