



## ارائه روشی بر مبنای پهنه‌بندی فازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس جهت انتخاب مناطق امیدبخش مس پورفیری در منطقه فلززایی شرق معدن مس سرچشمه

شکوه ریاحی\*، نادر فتحیان پور و سیدحسن طباطبایی

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۴، پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

### چکیده

اولویت‌بندی و انتخاب بهترین منطقه برای تمرکز و ادامه عملیات اکتشافی، به گونه‌ای که نتیجه به‌دست آمده قابل اطمینان و با خطرپذیری کمتر باشد، یکی از مهمترین چالش‌ها در اکتشاف مواد معدنی است. بدین منظور سعی می‌شود از روش‌های اکتشافی هوشمند و کارآمدتر برای شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی استفاده شود. در این بررسی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس و منطق فازی برای پهنه‌بندی، با استفاده از لایه‌های اکتشافی دورسنجی، زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و ساختاری به‌عنوان معیارها و نشانه‌های کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده معدن مس سرچشمه که شامل مناطق شناخته‌شده کانی‌سازی از این نوع است، استفاده شده است. اعتبارسنجی نهایی نشان‌دهنده برتری محدوده کانسار دره‌زار است که معدن شناخته‌شده مس پورفیری به حساب می‌آید و سایر مناطق نیز بر اساس اهمیت اکتشافی اولویت‌بندی و مناطق جدیدی از دیدگاه توانایی کانی‌زایی مس پورفیری نیز معرفی شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** اکتشاف مواد معدنی، منطق فازی، روش تاپسیس، کانی‌سازی مس پورفیری، مناطق امیدبخش

### مقدمه

اندازه‌گیری‌های مستقیم یا غیرمستقیمی که بر روی مناطق مرتبط با کانی‌سازی انجام می‌دهند، اطلاعات مفیدی را از منطقه مورد بررسی ارائه دهند و با پردازش و تفسیر این اطلاعات مناطقی را به‌عنوان مناطق مستعد کانی‌سازی معرفی کنند. برای شناسایی یک سیستم کانی‌سازی لازم است تا پس از پردازش و تصحیح داده‌ها و سپس مدل‌سازی داده‌های به‌دست آمده و تفسیر این مدل‌ها، به نحوی مناسب در GIS تلفیق شوند تا ضمن تعیین ارتباط داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی بتوان مناطق مناسبی را برای ادامه عملیات اکتشافی در مرحله بعدی مشخص کرد. با این حال، تنها استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای انتخاب مناطق کانی‌سازی به خوبی نمی‌تواند در این زمینه عمل کند، از این رو، اگر از روش‌های تصمیم‌گیری

نیاز روز افزون به فلزات پایه مانند آهن، مس، سرب و روی از یک طرف و کاهش منابع آسان‌یاب و سطحی این عناصر از طرف دیگر موجب شده است تا ذخایر عمیق‌تر این فلزات مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، کشف این کانسارها به روش‌های پیشرفته‌تر و پیچیده‌تری در بررسی‌های اکتشافی نیاز دارد. از آن‌جا که کشف نهشته‌های جدید به‌طور روزافزونی مشکل‌تر می‌شود مسأله استفاده از فن‌آوری جدید و متنوع در امر اکتشاف مطرح می‌شود، به‌طوری که شایسته است در این راه از روش‌های مختلفی استفاده شود تا صرف هزینه‌های زیاد اکتشاف توده معدنی با خطرپذیری کمتری روبه‌رو باشد. بدین منظور از روش‌های اکتشافی استفاده می‌شود که این روش‌ها قادرند با

چندمعیاره در اولویت‌بندی و انتخاب گزینه‌های مناسب برای انجام عملیات اکتشافی استفاده شود، می‌توان تا حد زیادی در صرف هزینه، وقت و انرژی صرفه جویی کرد و از طرفی انتخاب بهتری انجام داد. در این بررسی از داده‌های اکتشافی زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی استفاده شده است تا با استفاده از روش تلفیق فازی و تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس<sup>۱</sup> بهترین مناطق از نظر توانایی ماده معدنی شناخته شود.

### سابقه موضوع پژوهش

استفاده از روش‌های داده محور و دانش محور در رابطه با پتانسیل‌یابی مواد معدنی از چندین سال قبل مورد توجه بوده است (Bonham-Carter, 1994). در علوم زمین نیز از روش‌های وزن‌دهی در زمینه تهیه نقشه توانایی معدنی استفاده می‌شود، بنهام کارتر و همکاران (Bonham-Carter et al., 1998)، برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی در جنوب شرقی نواسکوشیا عوامل اصلی مدل مفهومی ذخیره را تعیین کرده‌اند. در ایران نیز رنجبر و همکاران (Ranjbar et al., 2003)، برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری در نوار ولکانیکی ایران مرکزی در منطقه دره‌زار از تلفیق داده‌های سنجش از دور که شامل تصاویر ماهواره‌ای استر<sup>+</sup> ETM و داده‌های ژئوفیزیک هوایی بودند، استفاده کردند، نتایج نشان داد که این روش برای توصیف مناطق دگرسان‌شده گرمایی مفید است و می‌تواند اطلاعاتی از نوع کانی‌سازی ارائه دهد (Ranjbar et al., 2001; Ranjbar et al., 2003). تاکنون نیز بررسی‌های بسیاری از روش‌های تلفیقی با استفاده از منطق فازی در زمینه اکتشاف معدن صورت گرفته است (Noorollahi et al., 2007; Yousefifar et al., 2010; Ford and Hart., 2013)، ترکیب این روش‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری، نتایج مثبت و قابل قبولی داشته است و در بسیاری از بررسی‌ها از آن استفاده شده است (Malkzewski., 1999; Abedi et al., 2011).

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس توسط هوانگ و یون

معدنی مس پورفیری در منطقه اهر- ارسباران استفاده کردند. در محدوده مورد بررسی، به دلیل اهمیت اکتشافی زیاد و نزدیکی به معدن مس سرچشمه، بررسی‌های اکتشافی زیادی بر روی کانسارها و اندیس‌های معدنی مس پورفیری شناخته‌شده، از جمله کانسارهای دره‌زار و کوه‌پنج، انجام شده است (Honarmand, 2003; Ravankhah et al., 2009; Ranjbar et al., 2001)، که البته وسعت مناطق بررسی شده کوچکتر از وسعت محدوده مورد بررسی در این پژوهش بوده است، همچنین در این مطالعه سعی شده است به‌طور جامع از تمام داده‌ها و لایه‌های اکتشافی و امکانات در پتانسیل‌یابی کانسارهای مس پورفیری استفاده شود.

### داده‌ها و روش تحقیق

در این پژوهش برای تهیه لایه‌های اولیه اکتشافی از داده‌های ژئوفیزیک مغناطیس هوابرد، ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای، داده‌های ماهواره‌ای سه سنجنده استر<sup>+</sup> ETM و ALI و داده‌های زمین‌شناسی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه که از سازمان زمین‌شناسی تهیه شد، استفاده شده است. برای به‌دست آوردن لایه‌های اکتشافی اولیه، منطق فازی به کار گرفته شد و نتایج نهایی با به کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس به‌دست آمد.

### روش منطق فازی

تئوری مجموعه فازی، تعمیمی از منطق‌های بولی برای داده‌هایی است که برای نواحی با تغییرات تدریجی مدل شده‌اند. بررسی

- مشخص کردن راه حل ایده‌آل و راه حل ضد ایده‌آل. راه حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

بردار بهترین مقادیر هر شاخص ماتریس = راه حل ایده‌آل

بردار بدترین مقادیر هر شاخص ماتریس = راه حل ضد ایده‌آل  
بهترین مقادیر برای شاخص‌های مثبت، بزرگترین مقادیر و برای شاخص‌های منفی، کوچکترین مقادیر و بدترین مقادیر برای شاخص‌های مثبت، کوچکترین مقادیر و برای شاخص‌های منفی بزرگترین مقادیر است.

- به دست آوردن میزان فاصله هر گزینه تا ایده‌آل و ضد ایده‌آل: فاصله اقلیدسی هر گزینه تا ایده‌آل و فاصله هر گزینه تا ضد ایده‌آل را به دست می‌آوریم.

- در این مرحله، میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به راه حل ایده‌آل که شاخص شباهت نام دارد، محاسبه می‌شود.

- در این مرحله با توجه به مقادیر ضرایب نزدیکی، بهترین گزینه انتخاب می‌شود. مقدار شاخص شباهت بین صفر و یک است.

### روش مطالعه

در این بررسی از روش‌های تلفیقی با استفاده از منطق فازی برای به دست آوردن مناطق پتانسیل دار مس پورفیری و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس برای اولویت‌بندی مناطق و انتخاب بهترین منطقه، به دلیل داشتن قابلیت‌های فراوان و جلوگیری از خطاها استفاده شده است، به این صورت که ابتدا داده‌های اکتشافی زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و دورسنجی مربوط به منطقه در نرم‌افزارهای مربوطه پردازش شدند و در نهایت لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی نهایی مربوط به محدوده مورد بررسی به دست آمدند. پس از آن با اعمال هم‌پوشانی به روش منطق فازی مناطق پتانسیل دار به دست آمدند و در نهایت با اعمال روش تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی تاپسیس، مناطق به دست آمده اولویت‌بندی شد و بهترین منطقه برای تمرکز و ادامه عملیات اکتشافی به دست آمد. با توجه به روابط و کاربردهای روش تاپسیس و همچنین، به دلیل داشتن

پدیده‌های طبیعی و اهداف طبیعی ثابت کرده‌اند که استفاده از منطق بولی روشی ناقص، با نتایج خیلی نامطلوب است (Hassani Pak., 2005; Brreto-Neto et al., 2008).

برای استفاده از این روش پس از رستر کردن نقشه‌ها جهت استفاده از آنها برای تلفیق فازی، ابتدا تمامی آنها در بازه صفر تا یک قرار گرفت و سپس نقشه‌های رده‌بندی شده به وسیله توابع Large، Small، Gaussian، و Near امتیازدهی شد، یعنی؛ به رده‌های موجود در هر نقشه یک امتیاز مشخص تعلق گرفت تا میزان اهمیت هر رده برای تلفیق مشخص شود. قبل از استفاده از این توابع و امتیازدهی نقشه‌های رستری شده، رده‌بندی مجدد شدند و در نهایت توسط عملگرهای AND، OR، Sum و Gamma با یکدیگر تلفیق شدند.

### مبنای روش تاپسیس

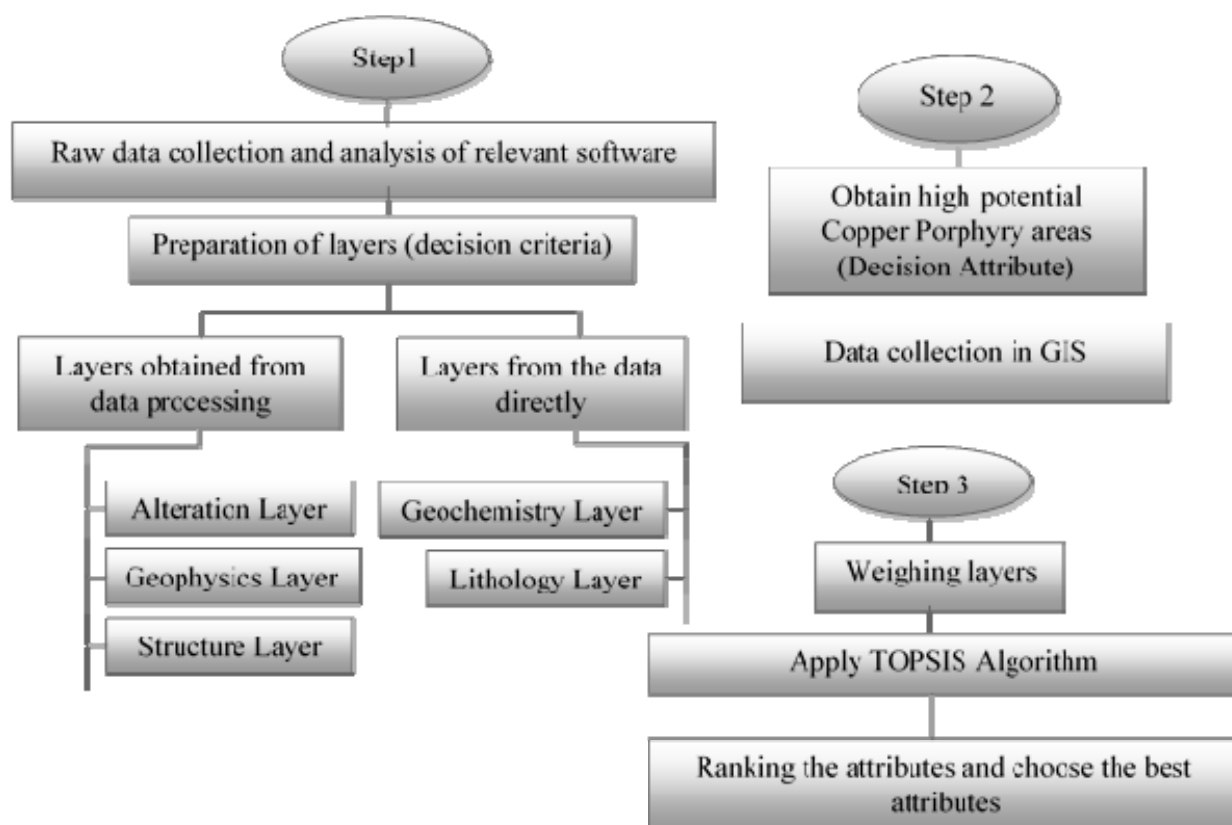
روش تاپسیس از پشتوانه ریاضی قوی برخوردار است و همانند بسیاری از روش‌های علمی، دانستن و رعایت مفروضات، محدوده و شرایط اعتبار قوانین و درستی فرمول‌های پیشنهادی، محدوده دقت نتایج و شرایط قابل قبول بودن جواب‌ها بسیار حائز اهمیت است. الگوریتم تاپسیس یک روش چند شاخصه جبرانی بسیار قوی برای اولویت‌بندی گزینه‌ها از طریق شبیه کردن به جواب ایده‌آل است. از امتیازات مهم این روش آن است که همزمان می‌توان از شاخص‌ها و معیارهای عینی و ذهنی استفاده کرد. در این مدل برای محاسبات ریاضی، تمامی مقادیر نسبت داده شده به معیارها باید از نوع کمی باشد و در صورت کیفی بودن نسبت داده شده به معیارها، باید آنها را به مقادیر کمی تبدیل کرد (Shakour shahabi et al., 2008; Ataei, 2010; Wang et al., 2009). مراحل انجام این روش به صورت زیر است:

- تبدیل ماتریس تصمیم‌گیری موجود به یک ماتریس بی‌مقیاس شده، که توسط بی‌مقیاس‌سازی معدل‌گیری انجام می‌شود.

- به دست آوردن ماتریس بی‌مقیاس موزون، ماتریس بی‌مقیاس شده را در ماتریس قطری وزن‌ها ضرب می‌کنیم.

روش با روش فازی می‌تواند نتایج مثبت و قابل قبولی ارائه کند. در شکل ۱، چگونگی مراحل انجام این بررسی آورده شده است.

دقت و حساسیت بسیار بالا در عین آسانی و همچنین سرعت تحلیل آن، به‌عنوان روشی مناسب می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های پیچیده‌ای مانند اکتشاف معدن که همراه با عدم قطعیت فراوان است، کاربرد مهم و ویژه‌ای داشته باشد، در نتیجه ترکیب این



شکل ۱. مراحل فرآیند تلفیق داده‌ها در پژوهش حاضر که شامل آماده‌سازی داده‌ها و لایه‌های اکتشافی، به‌دست آوردن مناطق مستعد کانی‌سازی و بهترین منطقه و اولویت‌بندی سایر مناطق موجود در محدوده شرق سرچشمه به روش تاپسیس می‌شود.

**Fig. 1.** The process of research methodology, include preparing data and exploration layers and identify the best mineralization areas and Ranking other areas in the east of Sarcheshmeh with using TOPSIS method.

بر اساس نقشه زمین‌شناسی محدوده، در قسمت‌هایی که کانی‌سازی مس پورفیری رخ داده، در زون ماگمایی ترشیری ارومیه-دختر واقع شده است. رخنمون‌های عمده در این منطقه سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن است که به‌شدت چین‌خورده و توسط توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی (الیگومیوسن) مورد تهاجم واقع شده‌اند. تزریق این توده‌ها در راستای گسل‌های مهم و محور تاقدیس‌های موجود در منطقه صورت

### موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

منطقه مورد بررسی، محدوده واقع در قسمت جنوب و جنوب‌شرقی سرچشمه در استان کرمان است، مختصات جغرافیایی آن  $55^{\circ}15'$  شرقی و  $56^{\circ}15'$  شرقی و  $29^{\circ}46'$  شمالی و  $30^{\circ}$  شمالی است و از نظر راه‌های دسترسی در  $160$  کیلومتری جنوب‌غربی کرمان و  $50$  کیلومتری رفسنجان قرار دارد.

ژئوفیزیک، ژئوشیمی، ساختارها و زمین‌شناسی منطقه به صورت زیر است:

دگرسانی‌های غالب موجود در منطقه دگرسانی آرژلیک، فلیک و پروپلیتیک هستند (Honarmand and Ranjbar, 2005). برای تهیه این لایه‌ها از پردازش داده‌های ماهواره‌ای سه سنجنده  $ETM^+$ ، ASTER و ALI، با توجه به رفتار طیفی کانی‌های مختلف در طول موج‌های مربوط به هر کدام از باندهای داده‌های ماهواره‌ای استفاده شد. پس از به‌دست آوردن باندهای مفید برای شناسایی دگرسانی‌ها و اکسید آهن، پردازش‌های لازم انجام شد. دگرسانی آرژلیک توسط روش‌های نسبت بانندی ترکیبی و مؤلفه‌های اصلی با استفاده از داده‌های ASTER به‌دست آمد (Mars and Rowan, 2006).

دگرسانی فلیک با استفاده از روش نسبت بانندی ترکیبی و روش SAM با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ASTER تهیه شد (Beiranvand Pour and Hashim, 2012). دگرسانی پروپلیتیک نیز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ASTER مشخص شد (Khaleghi and Ranjbar, 2011). به دلیل نبود الزام وجود اکسید آهن در کانی‌سازی مس پورفیری این دگرسانی به صورت جداگانه بررسی شد و اکسید آهن نیز توسط نسبت بانندی با استفاده از داده‌های  $ETM^+$  و ترکیب رنگی کاذب با استفاده از داده‌های ALI به‌دست آمد (Najafian et al., 2010). نتایج حاصل از پردازش بر روی داده‌های ماهواره‌ای در شکل ۲ مشخص است.

برای تهیه لایه حاوی اطلاعات ژئوفیزیکی محدوده، از داده‌های مغناطیس هوابرد محدوده مورد نظر استفاده شد، از آنجا که داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابردی با سنگ‌های آذرین و بازیک ارتباط مستقیم دارند و این که شدت مقادیر آنها بر روی مناطق اسیدی کاهش می‌یابد، قابلیت تفکیک زون‌های دگرسان‌شده را دارد و به همین دلیل به عنوان یک لایه پیشگو می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای استفاده از این داده‌ها از پردازش‌های فیلتر برگردان به قطب و سینگال تحلیلی (Hosseinzadegan gouya, 1994; Gunn, 1995; Malekzadeh

گرفته و بر حسب جنس و ابعاد توده‌ها، دگرسانی گرمایی با ابعاد متفاوت در اطراف آنها حاصل شده است. بالازدگی ارتفاعات ولکانو-پلوتونیک به ایجاد دشت‌های فشاری و تشکیل رسوبات تبخیری و تخریبی نئوژن (میوسن) در این حوضه‌ها منجر شده است. این نهشته‌ها به موازات رخنمون نوار ماگمائی ائوسن-الیگوسن در منطقه، گسترش دارند و مرز مشخصی با این نوار تشکیل می‌دهند.

زون آمیزه رنگین به سن کرتاسه بالایی (تورونین-سنونین) و با راستای NW-SE در جنوب غرب محدوده گسترش داشته و در جنوب آن سنگ‌های نوار دگرگونی سندج-سیرجان رخنمون یافته است. با توجه به میدان تنش (راستای استرس‌های اصلی) حاکم بر منطقه مورد بررسی، مرز واحدهای زمین‌شناختی اصلی در این منطقه گسله بوده و این گسل‌ها در راستای NW-SE اغلب دارای سازوکار فشاری راست گرد است.

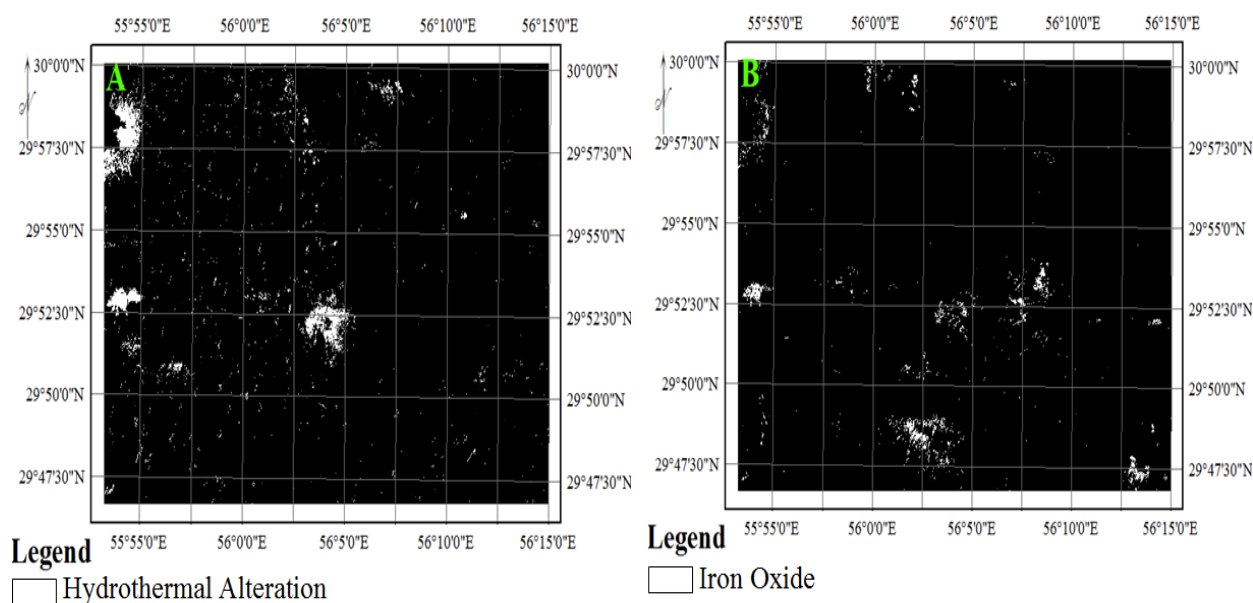
یکی از مهمترین کانسارهای موجود، کانسار مس سرچشمه است که قسمت اعظم آن در خارج از محدوده مورد بررسی قرار گرفته است. مناطق کانی‌سازی مس پورفیری که در محدوده واقع شده اند، کانسارهای دره‌زار، ناحیه ده سیاهان (بندر باغو)، نشانه معدنی کوه پنج، نشانه معدنی مس بند ممزار، نشانه معدنی مس گورعلی اسماعیلی و کانسار مس سریدون شمالی هستند (Khouei et al., 1999).

### تهیه و پردازش داده‌های اکتشافی

از آنجا که هدف نهایی این بررسی، پتانسیل‌یابی مس پورفیری است، هر چه اطلاعات و لایه‌های اکتشافی بیشتری در اختیار باشد، نتیجه مطلوب‌تری به‌دست خواهد آمد. به همین دلیل، از تمام اطلاعاتی که از نقشه زمین‌شناسی استخراج شد، داده‌های ژئوشیمی در دسترس مربوط به منطقه، تمامی داده‌های ماهواره‌ای محدوده مورد نظر و همچنین داده‌های ژئوفیزیکی محدوده برای به‌دست آوردن لایه‌های اکتشافی استفاده شد. لایه‌های به دست آمده از تحلیل داده‌های اولیه دورسنجی،

اغلب لبه‌ها و مرزها را برجسته می‌کنند و دارای جابه‌جایی نسبت به توده‌های منطیسی هستند، استفاده شد. در شکل ۳، نتایج به‌دست آمده از پردازش بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی نشان داده شده است.

(shafaroodi et al., 2010) به‌دلیل این‌که هر دو روش بر روی مناطق دارای خودپذیری مغناطیسی بالا مقادیر حداکثر و بر روی مناطق بدون خودپذیری مغناطیسی مقادیر کم را نمایش می‌دهند و سایر روش‌های پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی



شکل ۲. تصاویر حاصل از انجام پردازش بر روی داده‌های ماهواره‌ای منطقه شرق سرچشمه با اندازه پیکسل‌های ۳۰ متری، نقاط سفید مناطق وجود دگرسانی را نشان می‌دهند، A: دگرسانی هیدروترمال موجود در محدوده و B: اکسید آهن موجود در محدوده

**Fig. 2.** Images of processing satellite data related to the east of Sarcheshmeh area on the pixel size of 30 m, white color points show alterations, A: hydrothermal alteration in the study area, and B: iron oxide in the study area

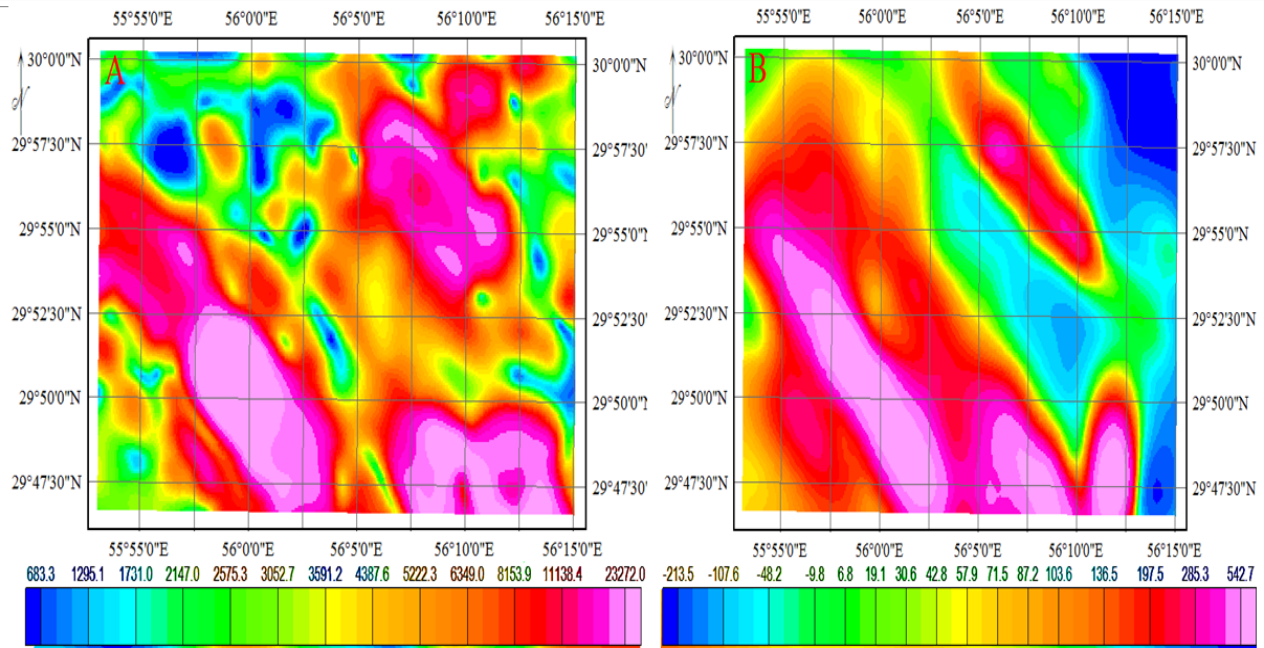
روش PCA بررسی شد (جدول ۱) و مقادیر مربوط PC که در آن مقادیر Zn, Pb, Cu و پایین Mo, بالا داشتند، به‌عنوان نشان‌دهنده مناطق توانایی بالای کانی‌سازی مس پورفیری مشخص شد (شکل ۴).

لایه اکتشافی ژئوشیمی محدوده، از داده‌های ژئوشیمی حاصل از آنالیز رسوبات آب‌راه‌های محدوده، که شامل غلظت عناصری مانند Zn, Pb, Cu, Mo, Sb, Co, Sn, Ba, W است، تهیه شد. بدین‌منظور، همبستگی بین این عناصر با استفاده از

جدول ۱. نتایج مربوط به انجام PCA بر روی داده‌های ژئوشیمی منطقه شرق مس سرچشمه

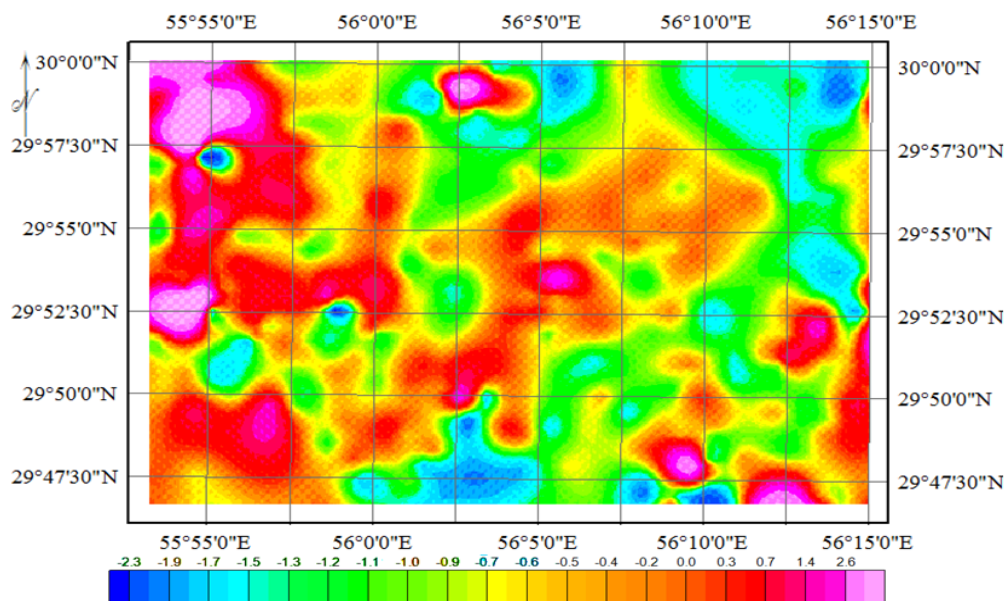
**Table. 1.** Results of PCA method on data from the east of Sarcheshmeh area

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Pb	0.294	0.449	0.069	0.047	0.135	0.006
Ni	0.577	0.200	0.000	0.036	0.004	0.183
Cu	0.559	0.000	0.012	0.420	0.008	0.000
Co	0.488	0.291	0.003	0.035	0.061	0.122
Zn	0.232	0.117	0.648	0.000	0.002	0.000
Mo	0.585	0.066	0.073	0.013	0.233	0.029



شکل ۳. تصاویر حاصل از انجام پردازش داده‌های مغناطیسی مربوط به محدوده شرق سرچشمه با اندازه پیکسل‌های ۳۰ متری، مناطق میزان خاصیت مغناطیسی از مناطق صورتی رنگ تا مناطق آبی رنگ کاهش می‌یابد، A: تصویر حاصل از سیگنال تحلیلی در محدوده مورد بررسی و B: تصویر حاصل از اعمال فیلتر کاهش به قطب

**Fig. 3.** Images from magnetic data processing related the east of Sarcheshmeh area on pixel size 30 m, magnetic property reduce from pink color areas to blue color areas, A: Image from the analytical signal in the study area, and B: Image of reduced to pole filter

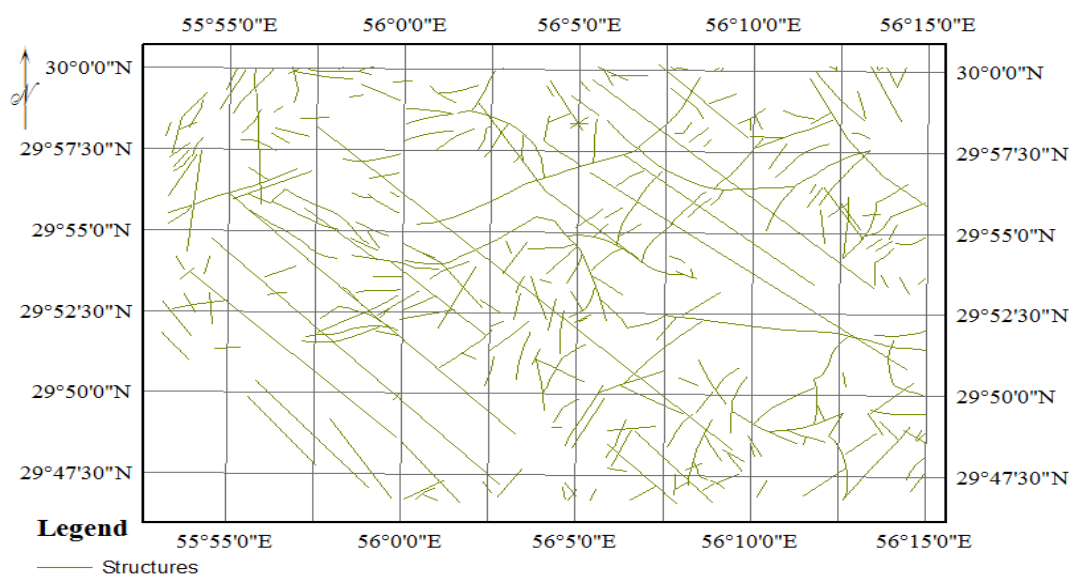


شکل ۴. نقشه حاصل از انجام PC1 بر روی داده‌های ژئوشیمی مربوط به محدوده شرق سرچشمه، احتمال وجود مس از مناطق صورتی رنگ به سمت مناطق آبی رنگ کاهش می‌یابد.

**Fig. 4.** Raster image of PC1 on geochemical data of the east of Saecheshmeh area, probability existence of Cu porphyry increase from pink color areas to blue color areas.

روی داده‌های مغناطیس‌هوابرد از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی به‌دست آمد، می‌شوند. نقشه خطواره‌های به‌دست آمده در محدوده در شکل ۵ نشان داده شده است. در نهایت لایه اطلاعات زمین‌شناسی با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موجود از محدوده مورد نظر تهیه شد (شکل ۶).

لایه خطواره‌های موجود در منطقه از سه لایه دیگر که مربوط به ساختارها هستند، تهیه شد که شامل لایه گسل‌های به‌دست آمده از نقشه زمین‌شناسی، لایه خطواره‌ها که از اعمال فیلترهای جهت‌ی در زوایای مختلف بر روی تصاویر ماهواره‌ای ASTER به‌دست آمد و لایه ساختارهای بزرگ و اصلی در منطقه که با استفاده از نقشه‌های حاصل از مشتق زاویه تیلت و مشتق افقی بر



شکل ۵. نقشه خطواره‌های موجود در محدوده شرق سرچشمه

Fig. 5. Structural map of the east of Sarcheshmeh area

ارتباط آنها با وجود کانی‌سازی مس پورفیری انجام شد.

۲. **لایه اطلاعاتی ژئوشیمی:** این لایه مستقیماً از داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای منطقه به‌دست آمد. پس از پردازش داده‌ها و حذف اثر زمینه، با توجه به این که چه تعداد متغیر با وجود مس در ارتباط است و پس از تعیین عاملی که بیشترین ارتباط و همبستگی را با کانی‌سازی مس پورفیری دارد، روش PCA بر روی داده‌ها اعمال و لایه ژئوشیمی تهیه شد.

۳. **لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی:** این لایه از تلفیق لایه‌های به‌دست آمده از سیگنال تحلیلی و همچنین فیلتر کاهش به قطب در محیط GIS به‌دست آمد. به‌دلیل اهمیت وجود هر دو لایه و این که باید به نحوی استفاده شوند تا مناطق وسیعی را که دارای

### تلفیق لایه‌های مختلف و تهیه نقشه پهنه‌بندی اولویت مناطق مستعد

چگونگی به دست آوردن هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی نهایی به‌صورت زیر است:

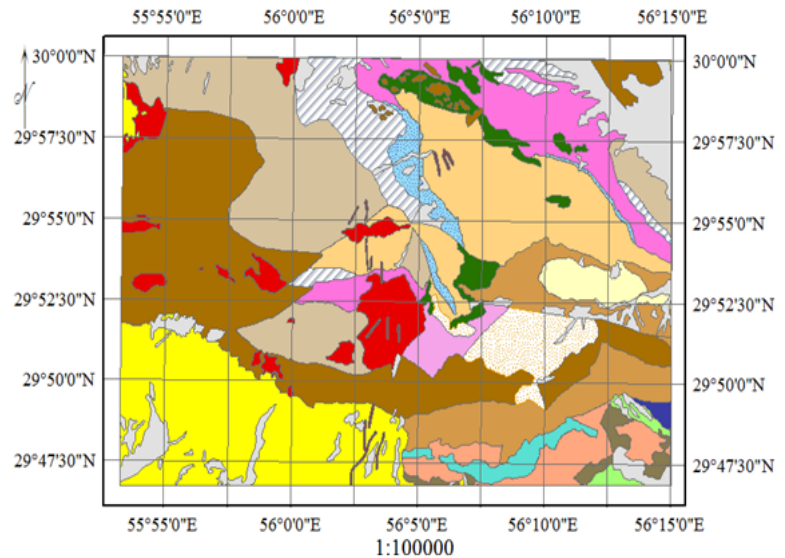
۱. **لایه اطلاعاتی زمین‌شناسی:** با استفاده از نقشه زمین‌شناسی مربوط به محدوده مورد نظر، پس از جدا کردن واحدهای موجود در محدوده و مشخص کردن اهمیت هر کدام از آنها در کانی‌سازی مس پورفیری طبق جدول ۲، لایه اطلاعات اکتشافی حاوی ارزش‌های هر سازند زمین‌شناسی به‌دست آمد که این امتیازدهی بر اساس رخ دادهای کانی‌سازی مس پورفیری و همچنین نظرات کارشناسی در مورد سازندهای منطقه و میزان



خاصیت مغناطیس بالایی هستند نشان دهند، از ترکیب فازی AND استفاده شد. در شکل ۷، نحوه ترکیب شدن این دو لایه آمده است.

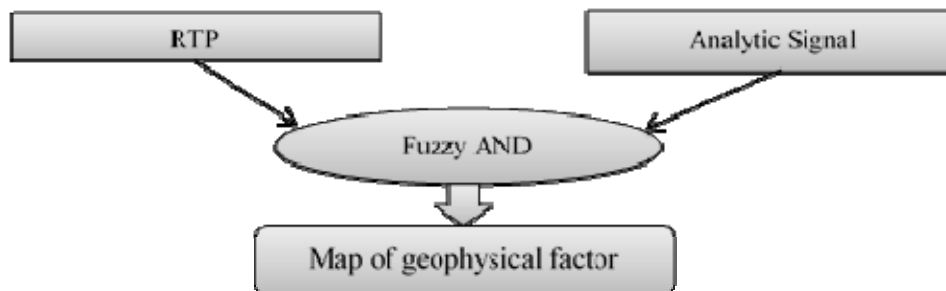
**Legend**

- Altration of conglomerate and sandstone
- Altration of dacitic tuff breccia and hyaloporphyr
- Andesite
- Andesitic basalt and basaltic lava flows
- Andesitic basalt and volcanic breccia
- Andesitic volcanic breccia,with lava flows
- Aphanitic andesitic lava flows,with volcanic brecc
- Ash tuff,lahar and breccia
- Breccia and conglomerate with intercalations of si
- Coloured tuff,Sandy tuff and tuffite
- Conglomerate,gray-brown,unconsolidated,tilted
- Dacites and dacite pyroclastics, dacite porphyri
- Dacitic tuff-breccia and lithic tuff,green
- Granit,Granodiorite
- Granodiorte;dots:exo contact phenomena;Veins:dior
- Megaporphyritic andesite
- Porphyilitic andesite lava with volcanic breccia
- Quaternary,Alluvium
- Rhyolitic and dacite tuff breccia and volcanic bre
- Sandstones:microconglomerates with opal and halit
- Submarine andesitic rocks,vesicular



شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی برگرفته شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ پاریز و چهارگنبد مربوط به محدوده شرق سرچشمه که سازندهای زمین‌شناسی به همراه ساختارهای موجود در محدوده در آن مشخص است (Dimitrijevic, 1959, Khannazer, 1996).

**Fig. 6.** Geological map of the east of Saecheshmeh area which geological formations have been shown (Dimitrijevic, 1959, Khannazer, 1996).



شکل ۷. چگونگی ترکیب لایه‌های حاصل داده‌های ژئوفیزیک برای به‌دست آوردن لایه اطلاعاتی ژئوفیزیکی مربوط به منطقه شرق سرچشمه

**Fig. 7.** Method of Fuzzy overlay layers from geophysics data to obtain Information geophysics layer from the east of Sarcheshmrh area

جدول ۲. سازندهای موجود در منطقه شرق سرچشمه و امتیازات داده شده به هر کدام بر اساس اهمیت هر یک از آنها

**Table 2.** Formations in the east of Sarchshme area and the scores given to each according to the importance of each of them

Discription	Value
Granodiorite;dots: exo contact phenomena;Veins: diorite	10
Sandstones:microconglomerates with opal and halite	1
Granite,Granodiorite	10
Dacites and dacite pyroclastics, dacite porphyry	8
Andesitic volcanic breccia,with lava flows	7
Andesitic basalt and volcanic breccia	6
Coloured tuff,Sandy tuff and tuffite	4
Megaporphyritic andesite	8
Altration of dacitic tuff breccia and hyalo-porphyritic dacite	7
Submarine andesitic rocks,vesicular	5
Dacitic tuff-breccia and lithic tuff,green	5
Andesite	7
Porphyritic andesite lava with volcanic breccia	7
Altration of conglomerate and sandstone	4
Conglomerate,gray-brown,unconsolidated,tilted	4
Breccia and conglomerate with intercalations of Siltstone	4
Aphanitic andesitic lava flows,with volcanic breccia	4
Ash tuff,lahar and breccia	1
Rhyolitic and dacite tuff breccia and volcanic breccia	4
Quaternary,Alluvium	0

نمایش دهد، به صورت شکل ۸ آماده شد.

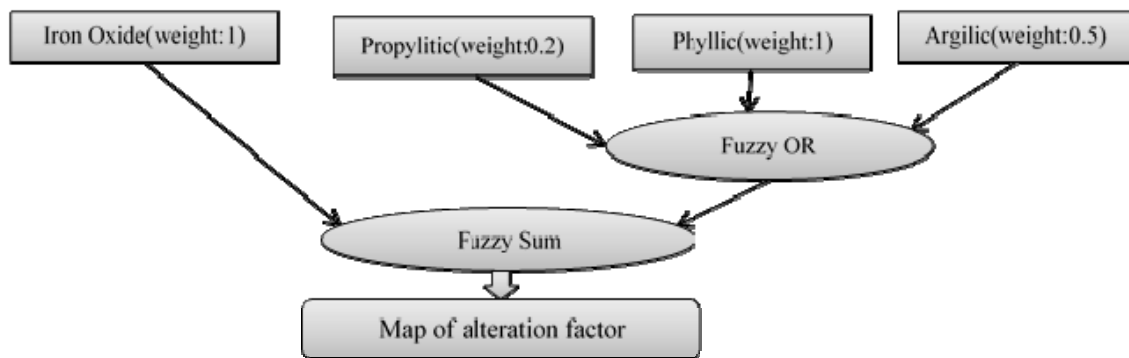
۵. لایه اطلاعاتی ساختارها: با تلفیق لایه دانسیته مربوط به گسل‌های حاصل از نقشه زمین‌شناسی، با بافر لایه ساختارهای به‌دست آمده از داده‌های دورسنجی و ساختارهای به‌دست آمده از نقشه زاویه تیلت و مشتق افقی حاصل داده‌های مغناطیس به این صورت که در شکل ۹ نشان داده شده است، نقشه نهایی نشان‌دهنده ساختارهای موجود در محدوده به‌دست آمد. از آن‌جا که ساختارهای به‌دست آمده از داده‌های مغناطیسی و داده‌های ماهواره‌ای اهمیت کمتری دارند، ضریب تأثیر کمتری به آنها اختصاص یافت و از ترکیب فازی AND به‌دلیل این که هر دو لایه باید با هم هماهنگ باشند، برای هم‌پوشانی آنها استفاده شد. در مورد گسل‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی منطقه به‌دلیل اهمیت بیشتر، ضریب تأثیر بیشتری اختصاص یافت و به‌صورت جداگانه با ترکیب فازی Sum در نظر گرفته شد تا اثر آن در نقشه نهایی حفظ شود. در نهایت تلفیق این لایه‌ها در محیط GIS به نحوی که با اهمیت‌ترین ساختارها در کانی‌زایی مس پورفیری مشخص باشند، انجام شد.

۴. لایه اطلاعاتی دگرسانی‌های منطقه: برای تهیه این لایه، از لایه‌های دگرسانی‌های آرژیلیک، پروپیلیتیک، فلیک و لایه اکسید آهن استفاده شد. بر اساس شدت و اهمیت دگرسانی‌های موجود در منطقه، ضریب تأثیری به هر یک از دگرسانی‌ها تعلق گرفت؛ به این صورت که دگرسانی فلیک اهمیت بیشتری در کانی‌سازی مس پورفیری در منطقه داشته است و به همین جهت بیشترین ضریب تأثیر به آن تعلق گرفت. پس از آن دگرسانی آرژیلیک دارای اهمیت بیشتر بوده و در نهایت لایه به‌دست آمده مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک است که کمترین ضریب تأثیر به آن اختصاص داده شد. پس از آن با توجه به این که در منطقه مستعد هر سه لایه دگرسانی باید حضور داشته باشند از ترکیب فازی OR برای دگرسانی‌های هیدروترمال استفاده شد و در نهایت از آن‌جا که حضور اکسید آهن در کانسارهای مس پورفیری الزامی نیست، با لایه اکسید آهن ترکیب Sum انجام شد تا نقشه دگرسانی نهایی مجموعی از همه دگرسانی‌ها باشند و به این ترتیب لایه نهایی مربوط به دگرسانی توسط تلفیق فازی، به نحوی که مناطق مرتبط با کانی‌زایی مس پورفیری را در منطقه

**نتایج تلفیق به روش منطق فازی**

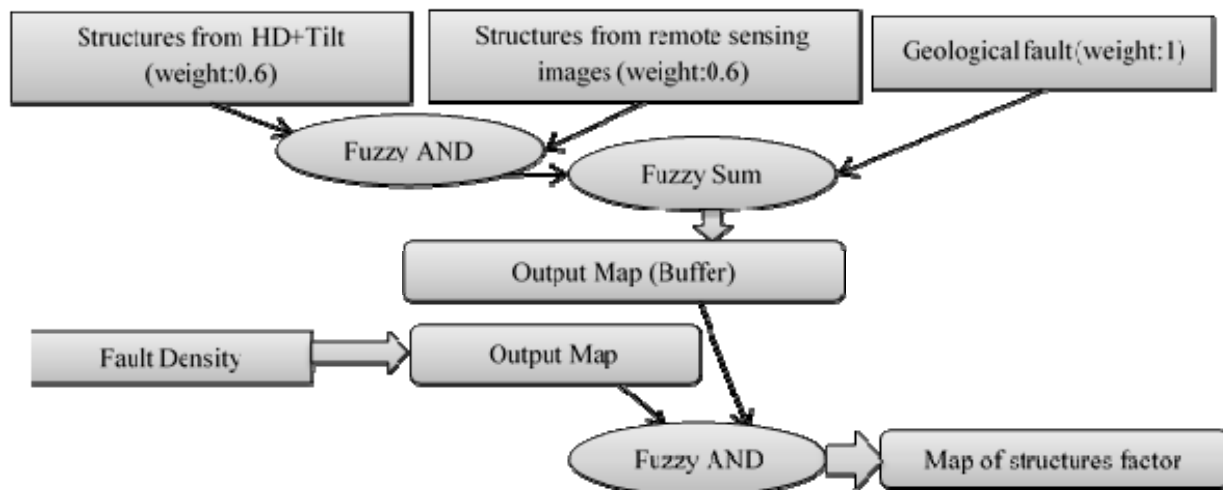
پس از به‌دست آوردن تمام لایه‌های اطلاعات اکتشافی، به‌عنوان یک تک لایه در محیط GIS نیاز است تا دامنه تغییرات ارزش‌های هر کدام یکسان شود، بدین منظور دامنه تغییر مقادیر تمام آنها در بازه ۰ تا ۱ آورده شد. برای به‌دست آوردن لایه نهایی که مناطق پتانسیل‌دار مواد معدنی را نمایش دهد، باید

لایه‌های اطلاعاتی به‌دست آمده با هم تلفیق شوند. بدین منظور، برای این که تمام اطلاعات را داشته باشیم و چیزی حذف نشود و تمام معیارها در نتیجه نهایی تأثیر داشته باشند، از روش هم‌پوشانی فازی گاما ۰/۹۵، چنان‌که در شکل ۱۰ نیز مشخص است، استفاده شد.



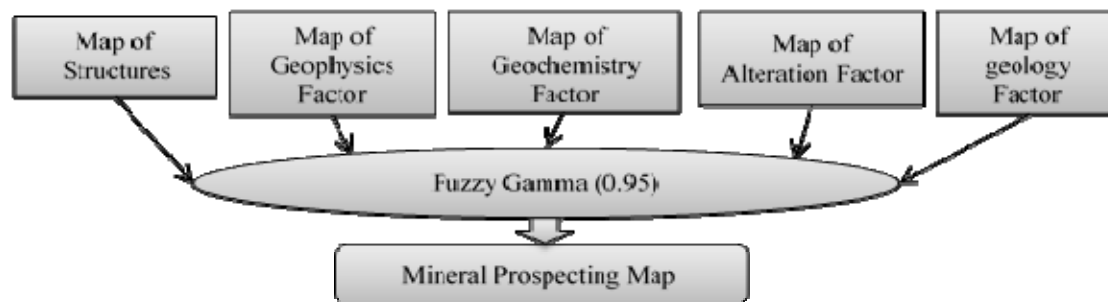
شکل ۸. چگونگی ترکیب لایه‌های به‌دست آمده از داده‌های دورسنجی مربوط به محدوده شرق سرچشمه برای به‌دست آوردن لایه اطلاعاتی دگرسانی

**Fig. 8.** Method of Fuzzy overlay layers from Remote Sensing data from the east of Sarcheshmeh area to obtain Information alteration layer



شکل ۹. چگونگی ترکیب لایه‌های مربوط به ساختارهای موجود در منطقه و به‌دست آوردن لایه اطلاعاتی ساختارهای موجود در محدوده شرق سرچشمه

**Fig. 9.** Method of Fuzzy overlay layers from types of structures data to obtain Information structures layer from the east of Sarcheshmeh area

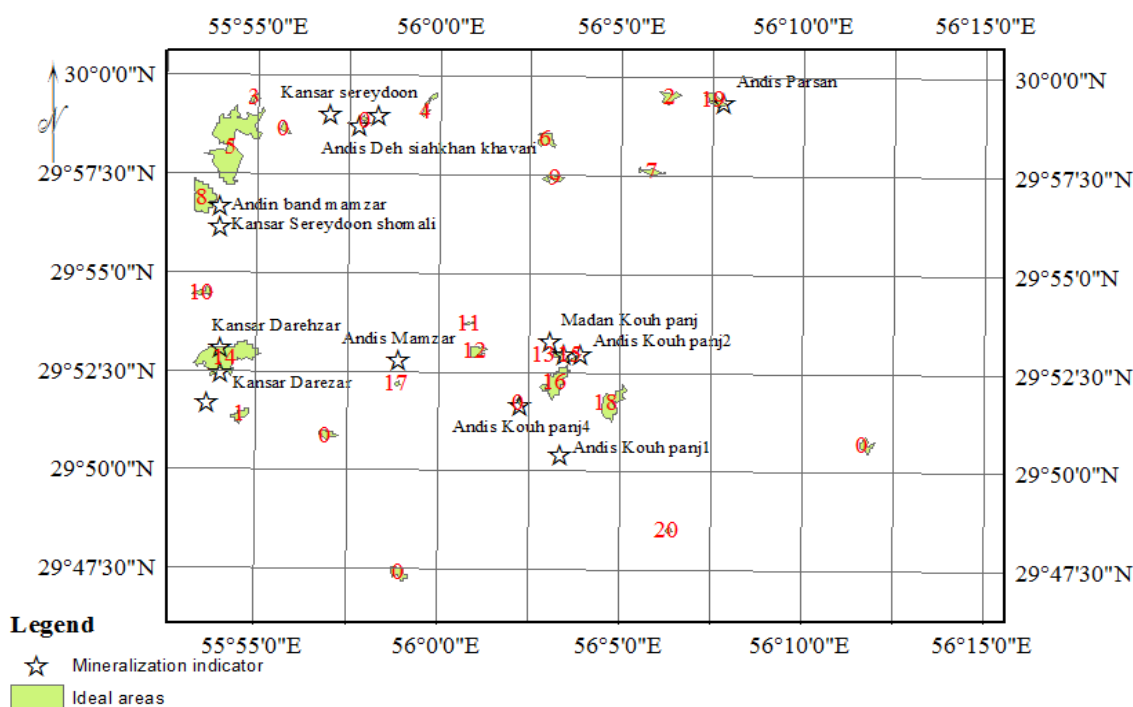


شکل ۱۰. تلفیق فازی لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی به‌دست آمده با یکدیگر و به‌دست آوردن نقشه نشان‌دهنده مناطق با توانایی کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده شرق سرچشمه

**Fig. 10.** Method of fuzzy overlay information exploration layer to obtain final mineral prospecting map of the east of Sarcheshmeh area

مشخص و با توجه به مناطقی که به‌عنوان نشانه معدنی مس پورفیری در محدوده مورد بررسی شناخته شده بود، به ترتیب حدود ۲۰ منطقه، به‌عنوان مناطق کانی‌سازی مس پورفیری مشخص و انتخاب شدند. مناطق به‌دست آمده در شکل ۱۱ مشخص شده است.

مناطقی که از روش تلفیق فازی به‌دست آمدند، توسط پلی‌گون‌هایی در محیط GIS مشخص شدند و مساحت هر کدام به‌عنوان یکی از معیارهای مورد سنجش به دست آمد. پس از آن با در نظر گرفتن مرز جدایش مشخص که بر اساس سعی و خطا و با توجه به این که مناطق با حداقل مساحت ۲ کیلومتر مربع وجود داشته باشند، به‌دست آمد و همچنین در نظر گرفتن مساحت‌های



شکل ۱۱. مناطق مشخص شده مستعد کانی‌سازی مس پورفیری که به‌عنوان گزینه‌های ماتریس تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس استفاده می‌شوند و همچنین مناطقی که به‌عنوان نقاط کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده شرق سرچشمه شناخته شده است

**Fig. 11.** Porphyry copper mineralization areas in the east of Sarcheshmeh are used as attributes TOPSIS and Fuzzy TOPSIS Multi Criteria Decision Making matrix and known Porphyry Copper index

**بحث و بررسی****به‌دست آوردن مناطق مستعد به روش هم‌پوشانی فازی**

همان‌طور که در قسمت‌های قبل گفته شد، پس از به‌دست آوردن لایه‌های اکتشافی در محیط GIS با هم‌پوشانی لایه‌ها به روش منطق فازی مناطق مستعد کانی‌سازی مس پورفیری به‌دست آمد. مسأله‌ای که وجود دارد، مشخص کردن میزان اهمیت هر منطقه و به‌دست آوردن بهترین منطقه مستعد کانی‌سازی است که این امر نیاز به روشی منطقی با اصول و روابط ریاضی قابل قبول دارد، به‌همین دلیل پس از مشخص شدن نواحی پتانسیل‌دار از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس برای اولویت‌بندی مناطق و یافتن بهترین منطقه استفاده شد.

**اولویت‌بندی مناطق مستعد با استفاده از الگوریتم****تاپسیس**

در این قسمت، ۲۰ منطقه که در مرحله قبل به‌دست آمد، به‌عنوان

گزینه‌های تصمیم‌گیری و ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و دگرسانی‌های مربوط به هر کدام از آنها که به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری است، برای تهیه ماتریس تصمیم، جهت انجام روش تاپسیس استفاده می‌شود، بدین‌منظور ابتدا لازم است تا با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی اکتشافی به‌دست آمده در قسمت‌های قبلی، ویژگی‌های مربوط به مناطق انتخاب شده در جدولی تهیه و تنظیم شود. مهمترین ویژگی‌های قابل بررسی در این مرحله شامل گسترش سطحی کانی‌سازی، متوسط شدت دگرسانی، متوسط ویژگی‌های ژئوشیمی، متوسط ویژگی‌های ژئوفیزیکی، تراکم ساختارهای خطی (غالباً گسل‌ها) در منطقه و نوع سنگ‌شناسی موجود در منطقه می‌شوند. در جدول ۳، ماتریس تصمیم‌گیری حاصل از معیارهای تصمیم‌گیری و مقادیر اختصاص یافته به هر کدام نشان داده شده است.

جدول ۳. ماتریس تصمیم (مقادیر معیارهای به‌دست آمده برای هر کدام از گزینه‌ها)

Table 3. Decision matrix (values of criteria obtained for each of the options)

Criteria Attribute	Area (km <sup>2</sup> )	Lithology	Alteration (Normalized)	Geochemistry (Normalized)	Geophysics (Normalized)	Structures (Normalized)
1	3.273	0.6	0.3	0.858	0.715	0.549
2	2.716	0.51	0.23	0.77	0.697	0.9
3	3.165	0.6	0.1	0.453	0.777	0.316
4	1.779	0.8	0.42	0.92	0.726	0.447
5	9.613	0.8	0.54	0.84	0.787	0.626
6	4.716	0.79	0.18	0.803	0.755	0.673
7	1.859	0.5	0.044	0.803	0.267	0.624
8	9.292	0.77	0.42	0.806	0.677	0.603
9	1.736	0.8	0.176	0.703	0.707	0.69
10	2.465	0.63	0.377	0.88	0.195	0.208
11	2.657	0.7	0.02	0.81	0.287	0.824
12	3.504	0.75	0.286	0.831	0.297	0.76
13	1.721	1	0.107	0.92	0.34	0.463
14	9.310	0.85	0.76	0.85	0.287	0.476
15	1.465	1	0.172	0.701	0.498	0.805
16	9.292	0.95	0.32	0.819	0.236	0.51
17	1.075	0.7	0.02	0.813	0.536	0.916
18	9.018	0.95	0.3	0.816	0.538	0.603
19	3.206	0.6	0.155	0.703	0.236	0.684
20	1.316	0.7	0.01	0.9	0.29	0.726

در جدول ۴ اوزان اختصاص داده شده به هر یک از معیارها جهت انجام روش تاپسیس که توسط نظر کارشناسی و با توجه به دقت و تاثیر هر معیار به دست آمد، آورده شده است.

جدول ۴. وزن‌های داده شده به هر یک از معیارها، بر اساس اهمیت آنها  
**Table 4.** The weights given to each criterion, according to their importance

Criteria	Area	Lithology	Alteration	Geochemistry	Geophysics	Structures
Weight	0.100	0.25	0.25	0.2	0.15	0.15
$\sum w=1$						

الگوریتم تاپسیس بر روی مقادیر مربوط به گزینه‌ها و معیارها که همان ماتریس تصمیم‌گیری است و همچنین اوزان اختصاص داده شده به هر معیار که همان ماتریس اوزان معیارهاست، اجرا شد (Ataei, 2010) و نتایج زیر حاصل از انجام این روش در سه حالت مختلف، چنان‌که در جدول ۵ آورده شده است، به دست آمد.

جدول ۵. ضرایب نزدیکی به دست آمده از انجام روش تاپسیس در حالت‌های مختلف، ردیف‌های ستاره‌دار نشان‌دهنده اولویت مناطق دارای توانایی کانی‌سازی مس پورفیری هستند

**Table 5.** Closeness Coefficient (CC) obtained from three different modes of TOPSIS method, the rows that have been marked by star show the regions with high potential of porphyry copper mineralization

Attributes	General Closeness Coefficient	Closeness Coefficient without Area Criteria	Closeness Coefficient of Optimization TOPSIS
1	0.447866697	0.4564	0.1128
2	0.392860017	0.4009	0.1131
3	0.288279635	0.2899	0.1109
4	0.573366739	0.6001	0.1304
*5	0.721912886	0.7127	0.1454
6	0.412635071	0.4121	0.1085
7	0.271736419	0.2768	0.1166
*8	0.604400631	0.5899	0.13
9	0.388987699	0.3996	0.1154
10	0.49975514	0.5152	0.1375
11	0.303103144	0.3065	0.1171
12	0.446829299	0.4539	0.1266
13	0.37008586	0.3783	0.1178
*14	0.796969957	0.7927	0.1871
15	0.420246744	0.432	0.1277
16	0.512783724	0.4943	0.1318
17	0.325074353	0.3326	0.1151
18	0.522262561	0.5055	0.1237
19	0.284142029	0.2856	0.1172
20	0.295792167	0.3021	0.1147

مساحت، این روش به کار برده شد. حالت دیگر به دلیل قابلیت تفکیک داده‌های ژئوفیزیکی و این‌که در برخی کانسارهای مس پورفیری به لحاظ وجود رگه‌چه‌های مگنتیتی و

چنان‌که در جدول نتایج مربوط به روش تاپسیس نیز مشخص است، این روش در سه حالت، یک‌بار به صورت کلی با به کارگیری تمام معیارها، در حالت بعدی با حذف معیار

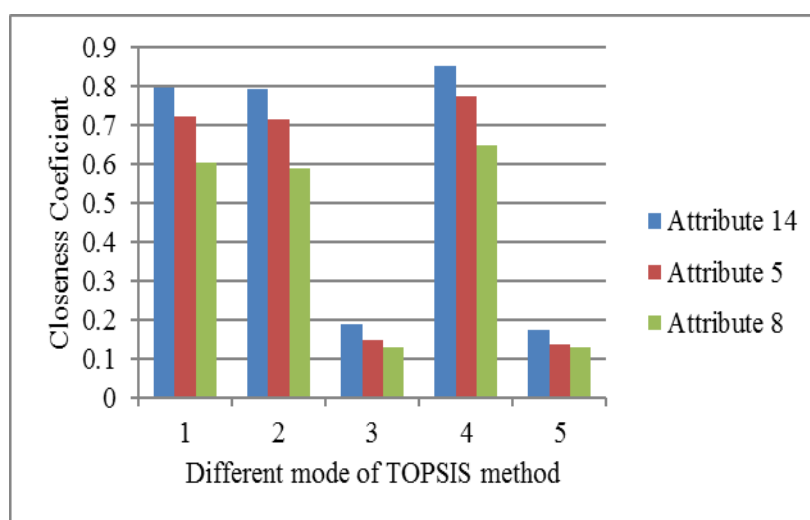
تاپسیس به‌عنوان مناطق پتانسیل‌دار به‌دست آمدند، عبارتند از: اندیس پارسیان، منطقه شماره ۱۸، اندیس کوه پنج ۴ و اندیس کوه پنج ۲.

نتایج حاصله با واقعیت‌های زمین‌شناسی و بررسی‌های میدانی و اطلاعات در دسترس از محدوده دره‌زار و سایر مناطق، تطابق قابل قبولی نشان دادند.

در نمودارهای شکل ۱۲ میزان تغییرات نتیجه روش تاپسیس برای سه گزینه به‌دست آمده، به صورت مقایسه نتایج در سه حالت اعمال روش تاپسیس که شماره ۱ حالت کلی، شماره ۲ حالت حذف معیار سطح و حالت شماره ۳ اعمال روش تاپسیس به صورت بهینه و همچنین در حالت شماره ۴ تغییر ۱۰٪ مقدار معیارها و حالت ۵ تغییر ۱۰٪ وزن معیارها و به‌منظور تحلیل حساسیت نتایج تغییرات مقدار معیارها آورده شده است. چنان‌که دیده می‌شود، با افزایش ۱۰٪ معیارها نتیجه حاصل تا حدودی به همین میزان تغییر می‌کند و می‌توان دریافت کرد نتایج به تغییر مقادیر معیارها حساسیت بالایی ندارد. همچنین با تغییر اوزان، نتایج به‌دست آمده تغییر زیادی از خود نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که تغییر اوزان می‌تواند تأثیر زیادی در نتایج داشته باشد. مقادیر حاصل از انجام این تغییرات در جدول ۶ آمده است.

استوک‌ورک‌های مگنتیتی می‌تواند مغناطیده باشد و آنومالی مغناطیسی داشته باشد و در برخی نیز به‌دلیل وجود دگرسانی آنومالی نداشته باشد، مقدار میانگین برای معیار ژئوفیزیکی به‌عنوان بهترین مقدار این شاخص در نظر گرفته شد. بدین صورت با استفاده از نتایج حاصل بهترین مکان برای تمرکز عملیات اکتشافی مشخص شد و سایر مناطق نیز به ترتیب اهمیت اولویت‌بندی شدند.

به‌دلیل حساسیت و دقتی که روش تاپسیس در زمینه تصمیم‌گیری دارد (Ataei., 2010; Pazand et al., 2012) و با تحلیل نتایج حاصل، می‌توان گفت نتایج به‌دست آمده منطقی و قابل قبول است؛ از این رو، در نهایت و با انجام روش تاپسیس در سه حالت، از بین ۲۰ گزینه مستعد که از روش تلفیق لایه‌های اکتشافی در محیط GIS به‌دست آمده بودند، محدوده کانسار دره‌زار با حداکثر امتیاز ۰/۷۹۶۹ از قابلیت بیشتری برای ورود به مرحله بعدی اکتشاف نسبت به سایر مناطق برخوردار است. پس از کانسار دره‌زار، مناطق با شماره‌های ۵ و ۸ که نزدیک به مناطق سریدون و سریدون شمالی هستند، با امتیازات ۰/۷۲۱۹ و ۰/۶۰۴۴ به‌عنوان مناطق با اولویت برتر شناخته شدند. سایر مناطقی که با توجه به جدول نتایج نهایی حاصل از روش



شکل ۱۲. مقایسه نتایج به‌دست آمده در حالات مختلف انجام روش تاپسیس برای سه گزینه برتر حاصل از این روش، منطقه دره‌زار، گزینه شماره ۱۴، منطقه گزینه ۵ که در نزدیکی سریدون و منطقه گزینه ۸ که در نزدیکی سریدون شمالی است.

**Fig. 12.** Comparing the results of different modes TOPSIS method for top three attributes of this method, No 14 attribute is Darehzar, 5 is near Sereydoon and 8 is near North Sereydoon.

جدول ۶. نتایج حاصل از تغییر مقادیر معیارها و اوزان اختصاص یافته به هر یک از معیارها، ردیف‌های ستاره‌دار نشان‌دهنده اولویت مناطق دارای توانایی کانی‌سازی مس پورفیری هستند

**Table 6.** The results of the change values of criteria and values weights of criteria, , the rows that have been marked by star show the regions with high potential of porphyry copper mineralization

Attributes	Closeness coefficient with change 10% Values of criteria	Closeness coefficient with change 10% values weights of criteria
1	0.479217366	0.1081
2	0.420360218	0.1087
3	0.308459209	0.1111
4	0.613502411	0.1226
*5	0.772446788	0.1351
6	0.441519526	0.1032
7	0.290757968	0.1038
*8	0.646708675	0.1293
9	0.416216838	0.1122
10	0.534738	0.1224
11	0.324320364	0.1114
12	0.47810735	0.1035
13	0.39599187	0.1121
*14	0.852757854	0.1728
15	0.449664016	0.1129
16	0.548678585	0.12
17	0.347829558	0.1216
18	0.55882094	0.1246
19	0.304031971	0.1099
20	0.316497619	0.1169

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از داده‌های دورسنجی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی و زمین‌شناسی موجود از محدوده جنوب و جنوب‌شرق کانسار مس سرچشمه، لایه‌های اکتشافی زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ساختارهای نشانگر مربوط به هر کدام از داده‌ها تهیه و سپس با استفاده از روش تلفیق منطق فازی در محیط GIS، پهنه‌بندی پتانسیل‌یابی مناطق مستعد از نظر کانی‌سازی مس پورفیری انجام شد و مناطق پتانسیل‌دار کانی‌زایی مس پورفیری شناسایی و تعیین شدند. بررسی و مقایسه مناطق پیشنهادی از تلفیق به‌روش منطق فازی با مناطقی که به‌عنوان اندیس کانی‌سازی مس پورفیری که از قبل شناخته

شده بودند، همخوانی و تطبیق قابل قبولی داشت و نتایج به‌دست

آمده با واقعیت‌های زمین‌شناسی همخوانی دارد.

در ادامه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس در سه حالت به‌کار گرفته شد: الف) حالت اول: در نظر گرفتن تمامی معیارهای موجود زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، ساختارها و مساحت، ب) حالت دوم: بدون در نظر گرفتن معیار گسترش سطحی و درحالی‌که ماتریس بیشترین شباهت به گزینه ایده‌آل به‌صورت اصلاح شده، استفاده شود و ج) حالت سوم: ترکیب مناطق مستعد پیشنهادی از روش تلفیق فازی. منطقه دره‌زار با دارا بودن بیشترین ضریب نزدیکی به شرایط گزینه ایده‌آل (مقدار ۰/۷۹۶۹)، بهترین منطقه برای



آمد با نتایج حاصل از روش کلی تاپسیس مقایسه و مشخص شد که اندکی تغییر در مقادیر معیارها تأثیر چندانی در نتایج نخواهد داشت. این در حالی است که با تغییر ۱۰٪ در وزن معیارها، نتایج حاصله از انجام روش تاپسیس تغییر چشم‌گیری کرد. لذا، استنباط می‌شود که وزن داده شده به معیارها دارای نقش بسیار مهمی است و اوزانی که به هر معیار داده می‌شود، باید بسیار دقیق و سنجیده شده باشند.

تمرکز و ادامه عملیات اکتشافی با استفاده از این روش شناخته شد. مناطق شماره‌گذاری شده با شماره‌های ۵ و ۸ که نزدیک به مناطق سریدون و سریدون شمالی هستند، با امتیازات ۰/۷۲۱۹ و ۰/۶۰۴۴ به‌عنوان اولویت‌های دوم و سوم شناسایی شدند. سایر مناطق به‌دست آمده نیز توسط این روش اولویت‌بندی و به‌عنوان بهترین مکان‌ها برای ادامه عملیات اکتشافی شناسایی و انتخاب شدند. برای تحلیل حساسیت نتایج به میزان اوزان اختصاص داده شده به معیارها، نتایجی که با تغییر ۱۰٪ مقادیر معیارها به‌دست

## References

- Abedi, M., Torabi, A., Norouzi, Gh., Hamzeh, M. and Elyasi, GR., 2011. PROMETHEE II: A knowledge driven method for copper exploration. *Computers & Geosciences*, 46(1): 255–263.
- Ataei, M., 2010. *Multi Criteria Decision Making*. Shahrood University Publications, Shahrood, 333 pp
- Beiranvand Pour, A. and Hashim, M., 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44(1): 1-9.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. *Geographic information system for geoscientists-molding with GIS*. Geological Survey of Canada, Ontario, Canada, 398 pp.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1998. Integration of Geological Datasets for Gold Exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1585-1592.
- Brreto-Neto, A.A., Roberto, C. and Fillo, S., 2008. Application of fuzzy logic to the evaluation of run off In a tropical watershed. *Environmental Modelling & Software*, 23(2): 244-253.
- Dimitrijevic, M.D., Dimitrijevic, M.N., Djordjevic, M. and Voluvic D., 1959. *Geological map of Pariz, No. 7149, Series 1:100,000*. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Ford, A. and Hart, C.J.R., 2013. Mineral potential mapping in frontier regions: A Mongolian case study. *Ore Geology Reviews*, 51(1): 15-26.
- Gunn, P.J., 1995. An Algorithm for Reduction to the Pole that works at all Magnetic Latitudes. *Exploration Geophysics*, 26(3): 247-254.
- Hassani Pak, A.A., 2005. *Exploration Data Analysis*. Tehran University Press, Tehran, 987 pp.
- Honarmand, M. and Ranjbar, H., 2005, Application of image processing techniques in order to explore the ETM<sup>+</sup> data to exploration type of Porphyry Copper and veins deposits in the kouh mamzar and kouh panj regions in Kerman. *Geosciences, Scientific Quarterly Journal*, 57(15): 110-127.
- Hosseinzadegan gouya, N., 1994. Select the appropriate filter in the exploration by Magneto metric method. *Journal of the Earth and Space Physics*, 21(1, 2): 52-64.
- Hwang, C.L. and Yoon, K., 1981; *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 228 pp.
- Khaleghi, M. and Ranjbar, H., 2011. Alteration Mapping for Exploration of Porphyry Copper Mineralization in the Sarduiyeh Area, Kerman Province, Iran, Using ASTER SWIR Data. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(5): 61-69.
- Khannazer, N.H., 1996. *Geological map of Chahar Gonbad, scale 1:100000*. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Khoei, N., Ghorbani, M. and Tajbakhsh, P., 1999. *Copper deposits in Iran*. Publication of Geological Survey of Iran. Tehran, 421 pp.
- Li, X., Wang, k., Liu, L., Xin, J., Yang, H. and Gao, Ch., 2011. Application of the Entropy Weight and TOPSIS Method in Safety

- Evaluation of Coal Mines. *Procedia Engineering*, 26(1): 2085-2091.
- Malekzadeh shafaroodi, A., Heydarien shahri, M. and Karimpour, M.H., 2010. Mineralization and geophysical exploration with IP/RS and ground-based magnetometers methods in MA-I and its surrounding area, the exploration of porphyry copper-gold Maherabad, East Iran. *Journal of Economic Geology*, 1(1): 1-17. (in Persian)
- Malkzewski, J., 1999, GIS and Multi Criteria Decision Analysis. John Whily and Sons, Canada, 387 pp.
- Mars, J.C. and Rowan, L.C., 2006. 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*, 2(3): 161-186.
- Minatour, Y., Khazaei, J. and Gholami, A., 2013. Extension of an integrated AHP and TOPSIS approach in water resources management. 9th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran.
- Najafian, T., Ranjbar, H. and Fathianpour, N., 2010. Evaluate the integration of ALI and ASTER spectral sensor data to identify zones of porphyry copper deposits. 14th Iran Geophysics Conference. Institute of Geophysics, Tehran, Iran.
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H. and Tanaka, T., 2007. Geochemical Resources Exploration and Well Site Selection With Enviromental Consideration using GIS in Sablan Geothermal Area, IRAN. Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, United States.
- Pazand, K., Hezarkhani, A. and Ataei, M., 2012. Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran). *Computers & Geosciences*, 49(1): 62-71.
- Ranjbar, H., Hassanzadeh, H., Torabi, M. and Ilaghi, O., 2001. Integration and analysis of airborne geophysical data of the Darrehzar area, Kerman Province, Iran, using principal component analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 48(1): 33-41.
- Ranjbar, H., Honarmand, M. and Moezifar, Z., 2003. Integration and analysis of airborne geophysics and remote sensing data for exploration of porphyry copper deposits in the Central Iranian Volcanic Belt. Map Asia Conference, Petronas Twin Towers, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Ravankhah, A., Moayed, M., Sadr al Din, A. and Hosseinzadeh, Gh., 2009. Geology, petrology, economic geology and alteration zones studies of porphyry copper Darrehzar deposit (South West Kerman). *Quarterly Iranian Journal of Geology*, 12(3): 75-63.
- Shakour shahabi, R., Kakaei, R., and Basiri, M., 2008. Iran Minerals Ranking by TOPSIS Method. *Iranian Journal of Mining Engineering*, 2(4): 1-10.
- Wang, J.J., Jing, Y.Y, and Zhang, C.F., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9): 2263-2278.
- Yousefifar, S., Khakzad, A., Asadi Harooni, H., Jafari, M.R. and Vosoughi Abedini, M., 2010. Using Index Overlay, Fuzzy Logic Mrthod and Analytical Hierrarchy Process in order to determine Au and Cu Potential Targets in North part of Dalli Porphyry Deposit. *Journal of Geosciences*, 21(83): 49-58.



## Presenting a mapping method based on fuzzy Logic and TOPSIS multi criteria decision-making methods to detect promising porphyry copper mineralization areas in the east of the Sarcheshmeh copper metallogenic district

Shokouh Riahi\*, Nader Fathianpour and Seyed Hassan Tabatabaei

Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Submitted: Apr. 13, 2015

Accepted: Apr. 6, 2016

**Keywords:** *mineral exploration, Fuzzy logic approach, TOPSIS method, porphyry copper mineralization, favorable regions*

### Introduction

The growing demand for base metals such as iron, copper, lead and zinc on the one hand and the diminishing of surficial and shallow resources of these elements on the other hand have forced explorationists to focus on detecting deep deposits of these metals. As a result, the discovery of such deep deposits requires more advanced and sophisticated methods in the course of preliminary prospecting stages. Since the discovery of new deposits is getting to be increasingly difficult, deploying new prospecting technologies that employ more deposit attributes in the course of combining exploratory evidence may reduce the exploration costs with lower uncertainties. In the past two decades, a number of new data mining and integrating approaches capable of incorporating direct and indirect mineralization indicators, based on expert knowledge, data, or a combination of both, have been proposed (Bonham-Carter, 1994). In the first step, the input exploratory data layers are corrected and validated through applying some statistical pre-processing algorithms such as background and outlier removal methods. In order to detect a mineralization occurrence, it is necessary to find the proper exploratory geological, geochemical and geophysical data layers which have direct or indirect associations with the governing mineralization followed by constructing these

models in an appropriate GIS platform (Malkzewski, 1999). Due to the imperfect available data and a number of unknown parameters affecting the mineralization process, the application of conventional GIS integration methods such as Boolean or weighted overlay or even fuzzy logic methods alone may not produce appropriate results, pointing to a need for deploying multi-criteria decision-making methods such as TOPSIS. In the present study, the pre-processed exploratory data including geological, remotely sensed geophysical and geochemical imagery were used to detect favorable mineralization zones through applying the multi-criteria decision-making method. Finally, the selected favorable areas in the metallogenic strip located at the south to the south-east of the Sarcheshmeh porphyry copper deposit are prioritized and introduced for further follow up ground exploration operations.

### Methodology

In order to solve complex decision-making problems like the problem of mapping favorable porphyry copper mineralization zones under great uncertainties, the TOPSIS method is considered as an appropriate approach offering significant simplicity, flexibility and capability (Ataei., 2010). The TOPSIS method is considered to be an efficient method due to having very high

\*Corresponding authors Email: shokouh.riahi@mi.iut.ac.ir

accuracy, speed, sensitivity as well as being easy to implement and interpret the outputted results (Hwang and Yoon, 1981). It has found many applications in important areas of mining industry where there is a need to make decisions under risky conditions and data uncertainties.

One basic issue in applying decision-making methods in the field of mineral exploration is to rank and propose the best possible candidates among all potentially favorable areas for the next stage of mineral exploration. In this regard, the best favorable areas are selected based on exploratory data layers including favorable lithologies, alterations, structures plus geochemical and geophysical anomalies (Pazand et al., 2012).

### Results and discussion

In the first step, the area located south to the southeast of one of the largest porphyry copper deposits in Iran known as Sarcheshmeh was investigated for favorable areas using all available exploratory data as mentioned in the previous section using fuzzy logic integration approach in the GIS environment.

Evaluating the highly favorable areas presented by the fuzzy logic approach showed great consistency with the already known copper mineralization prospects. Next, the first 20 priorities obtained from the fuzzy logic approach were chosen as the best candidates to be ranked using the TOPSIS multi criteria decision-making method. Among these favorable prospects, the one with the highest coefficient close to the ideal solution of 0.796 was found to be coincident with the Darehzar area that is a well known porphyry copper deposit 12 kilometers south of the Sarcheshmeh deposit.

The favorable areas numbered 5 and 8 that correspond to well known porphyry copper

mineralization prospects called Sereydoon and North Sereydoon were ranked as the second and third priorities with scores of 0.721 and 0.604, respectively. Other favorable areas ranked by the TOPSIS method were also prioritized and presented for further follow up explorations.

To assess the sensitivity of the results obtained by the TOPSIS method, an amount of 10% of the values of each of the criteria were added and the outputted ranking results were compared to that of the original TOPSIS results. It was concluded that a slight change in the values of the criteria would not have significant impact on the results. However, 10 percent change of each criteria weight would greatly affect the prospects priorities obtained by re-applying the TOPSIS method.

### References

- Ataei, M., 2010. Multi Criteria Decision Making. Shahrood University Publications, Shahrood, 333 pp
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic information system for geoscientists-molding with GIS. Geological Survey of Canada, Ontario, Canada, 398 pp.
- Hwang, C.L. and Yoon, K., 1981; Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 228 pp.
- Malkzewski, J., 1999, GIS and Multi Criteria Decision Analysis. John Wiley and Sons, Canada, 387 pp.
- Pazand, K., Hezarkhani, A. and Ataei, M., 2012. Using TOPSIS approaches for predictive porphyry Cu potential mapping: A case study in Ahar-Arasbaran area (NW, Iran). Computers & Geosciences, 49(1): 62-71.