

DOI: 10.30479/jmre.2019.10748.1268

به کارگیری روش SWARA-MOORA به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰، ابهر، ایران

یوسف بهرامی^۱، حسین حسینی^۲، عباس مقصودی قره بلاغ^۲

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

(دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۰۱، پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۱۸)

چکیده

اجرای عملیات اکتشاف هزینه‌های سنگین و زمان طولانی به همراه دارد و این مساله ضرورت مدل‌سازی پتانسیل معدنی را برای اکتشاف ذخایر معدنی آشکار می‌سازد. مدل‌سازی پتانسیل معدنی را می‌توان یکی از مسایل تصمیم‌گیری چندمعیاره دانست؛ چراکه هدف آن تولید نقشه‌های پیش‌بینی بر اساس معیارهای اکتشافی است. بر این اساس، مطالعه حاضر علاوه بر معرفی یک روش ترکیبی جدید به نام "SWARA-MOORA"، به مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس در ورقه یکصد هزار ابهر با تلفیق لایه‌های مختلف شاهد اکتشافی پرداخته است. برای نیل به این هدف، بر اساس قضاوت کارشناسان، شش لایه شاهد اکتشافی شامل بی‌هنجاری ژئوشیمیایی مس، نقشه فاصله از واحدهای سنگی آذرین نفوذی و واحدهای ولکانیک، نقشه فاصله از گسل و نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های فیلیک و آرژبلیک به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی در نظر گرفته شد. برای آماده‌سازی نقشه‌های شاهد اطلاعاتی به منظور تلفیق، ابتدا مقادیر این نقشه‌ها با استفاده از تابع لجستیکی به فضای مناسب با دامنه (۰-۱) منتقل و سپس توسط روش فرکتالی عیار-مساحت، کلاسه‌بندی شدند. در ادامه، معیارها و زیرمعیارهای مختلف با روش "SAWRA"، وزن‌دهی و جایگزین‌های مستخرج از نقشه‌های شاهد، توسط روش "MOORA" رتبه‌بندی شدند. در نهایت، مدل نهایی معرف نواحی امیدبخش مس ایجاد و با استفاده از نمودار Prediction-Area (P-A) مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بر اساس این نمودار، قرارگیری نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده بر روی مقدار ۸۱ درصد، چگالی نرمال شده ۴٫۲۶ را نتیجه داد که توان بالای مدل مذکور را در معرفی نواحی امیدبخش مس ثابت می‌کند. بنابراین در کنار اعتماد به قابلیت و توانمندی‌های روش "SWARA-MOORA"، از این مدل می‌توان به منظور انجام عملیات اکتشافی دقیق‌تر در منطقه مورد مطالعه بهره‌گرفت.

کلمات کلیدی

ابهر، SWARA، MOORA، فرکتال، P-A Plot.

۱- مقدمه

به دلیل آنکه عملیات اکتشاف هزینه‌های سنگین و زمان طولانی به همراه دارد، بنابراین با شناسایی و اکتشاف درست منابع معدنی، از هدر رفتن منابع مالی، انسانی و زمان جلوگیری می‌شود. این مساله ضرورت استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را در ترکیب همه شاخص‌های اکتشافی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی (MPM)^۲ آشکار می‌سازد [۲،۱]. صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان عملیات اکتشاف، به عنوان دست‌آورد بسیار مهم استفاده از تلفیق به‌شمار می‌آید. تلفیق و ترکیب داده‌ها یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن، می‌توان مطالعات اکتشافی را به صورت یک‌جا و هم‌زمان، بر روی همه داده‌های در دسترس منطقه مورد مطالعه انجام داد و پتانسیل‌های معدنی یک منطقه را در قالب نقشه‌های پیش‌بینی معرفی کرد [۳]. برای نیل به این هدف، داده‌های مکانی مختلف (زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دورسنجی، ژئوفیزیکی و غیره) در محیط GIS جمع‌آوری، آنالیز و ترکیب می‌شوند [۴-۷]. چون هدف مدل‌سازی پتانسیل معدنی، ترسیم نقشه‌های پیش‌بینی براساس معیارهای اکتشافی مختلف است، بنابراین می‌توان آن را به عنوان یکی از عوامل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)^۲ در نظر گرفت [۸]. تا کنون روش‌های مختلفی از تلفیق داده‌های مکانی جهت آشکارسازی مناطق پرتانسیت معدنی معرفی شده است [۹]. روش‌های دانش‌محور و داده‌محور، دو روش اصلی مدل‌سازی پتانسیل‌های معدنی (MPM) در تلفیق و ترکیب لایه‌های وزن‌دار برای شناسایی نواحی امیدبخش معدنی به‌شمار می‌روند [۲،۱].

روش‌های داده‌محور به‌طور عمده برای مناطقی به‌کار می‌روند که کارهای اکتشافی لازم و کافی صورت گرفته (Brown Fields) و دارای تعداد قابل توجهی نقاط دارای پتانسیل معدنی و یا کانسار هستند و مختصات آن‌ها در تعیین روابط مکانی داده‌ها، به‌عنوان نقاط آموزشی در نظر گرفته می‌شوند [۱۰]. از جمله روش‌های داده‌محور که در طول دو دهه اخیر برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی به‌کار گرفته شده‌اند، عبارتند از: وزن‌های نشان‌گر [۱۱-۱۴]، رگرسیون لجستیک [۱۵-۱۷]، شبکه عصبی [۱۸-۲۱]، ماشین پشتیبان‌برداری [۲۳،۲۲]، جنگل تصادفی [۲۴-۲۶] و شبکه بیزین [۲۷]. در مقابل، روش‌های دانش‌محور بر پایه نقطه‌نظرات کارشناسی در مورد اهمیت نقشه‌های فاکتور در تهیه نقشه پتانسیل معدنی گسترش یافته‌اند و عمدتاً در تهیه مدل‌سازی برای مناطقی

مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن‌ها مطالعات اکتشافی کمی صورت گرفته است (Green Fields) [۲۰،۱]. از آن جمله می‌توان به روش‌های شاخص هم‌پوشانی [۲۹،۲۸]، منطق فازی [۳۱،۳۰]، تصمیم‌گیری چندمعیاره [۳۳،۳۲]، تئوری دمپسفر-شفر^۴ [۳۴]، روش‌های اولویت‌بندی مانند تاپسیس [۳۵] و پرومته^۵ [۳۶] اشاره کرد. هدف از مطالعه حاضر، شناسایی نواحی امیدبخش مس در ورقه یک‌صد هزار ابهر با استفاده از یک روش ترکیبی جدید با نام SWARA-MOORA است.

روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی، (SWARA)^۶ از جمله جدیدترین روش‌های وزن‌دهی به معیارها است که اولین بار توسط "کرسولین و همکاران" پیشنهاد شده است [۳۷]. براساس این روش، به مهم‌ترین معیار، رتبه نخست و به کم‌اهمیت‌ترین معیار، آخرین رتبه اختصاص می‌یابد. در نهایت اهمیت و وزن هر معیار توسط مقدار متوسط رتبه‌های داده‌شده به هر معیار توسط کارشناسان مختلف تعیین می‌شود [۳۷]. در نتیجه این روش در مواقعی می‌تواند مفید واقع شود که اولویت معیارها از قبل مشخص باشند. انتخاب راه‌حل منطقی حل اختلافات [۳۷]، انتخاب تأمین‌کننده [۳۸]، طراحی محصول [۳۹]، اولویت‌بندی گزینه‌های سرمایه‌گذاری در صنایع با تکنولوژی پیشرفته [۴۰] از جمله موضوع‌هایی هستند که در آنها از روش SWARA برای وزن‌دهی به معیارها بهره برده‌اند. همچنین در این مطالعه برای رتبه‌بندی جایگزین‌ها از روش بهینه‌سازی چندهدفه براساس تجزیه و تحلیل نسبت (MOORA)^۷ استفاده شده است که توسط "براورس و زاوادسکاس" معرفی شده است [۴۱]. سادگی و سهولت پیاده‌سازی، محاسبات ریاضی کم، پایداری خوب و زمان حل بسیار کم از ویژگی‌های مهم این روش است [۴۱]. برخی پژوهش‌هایی که از روش MOORA بهره گرفته‌اند، عبارتند از: انتخاب مواد [۴۲]، انتخاب پروژه [۴۳] و ارزیابی ریسک [۴۴]. بنابراین، روش SWARA-MOORA دو گام اساسی دارد: (۱) ابتدا مقادیر وزنی هر یک از لایه‌های اکتشافی (معیارها) با استفاده از روش SWARA و براساس نظر کارشناسان تعیین و محاسبه می‌شود. (۲) برای رتبه‌بندی گزینه‌ها و در نهایت تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی، روش MOORA مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، متناسب با تیپ کانه‌زایی‌های مس هدف که همگی از نوع رگه‌ای هستند، شش لایه شاهد اکتشافی شامل: نقشه پیوسته ژئوشیمیایی منتج از روش تحلیل مولفه‌های اصلی^۸ (PCA)،

دو لایه فاصله از واحدهای سنگی (واحدهای نفوذی و واحدهای آتشفشانی ایوسن)، سه نقشه پیوسته فاصله از گسل‌های منطقه و دگرسانی‌های آرژلیک و فیلیک برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در نظر گرفته شده است. به منظور وزن دهی لایه‌های شاهد توسط روش SWARA، ابتدا مقادیر نقشه‌های پیوسته مکانی که حدود مختلفی را شامل می‌شدند، توسط تابع لجستیک سیگموئیدی به فضایی جدید با دامنه [۰-۱] منتقل و سپس برای تعیین حدود آستانه جوامع مختلف با استفاده از روش فرکتالی عیار-مساحت، کلاسه‌بندی شدند. در ادامه، معیارها (لایه‌های شاهد) و زیرمعیارها (کلاس‌های مختلف لایه‌های شاهد) وزن دهی شدند. در نهایت، جایگزین‌ها (پیکسل‌های استخراج شده از تمام نقشه‌های کلاسه‌بندی شده) با استفاده از روش MOORA رتبه‌بندی و نقشه پتانسیل مورد نظر تهیه شد و توسط نمودار Predication-Area (P-A) مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- زمین‌شناسی منطقه

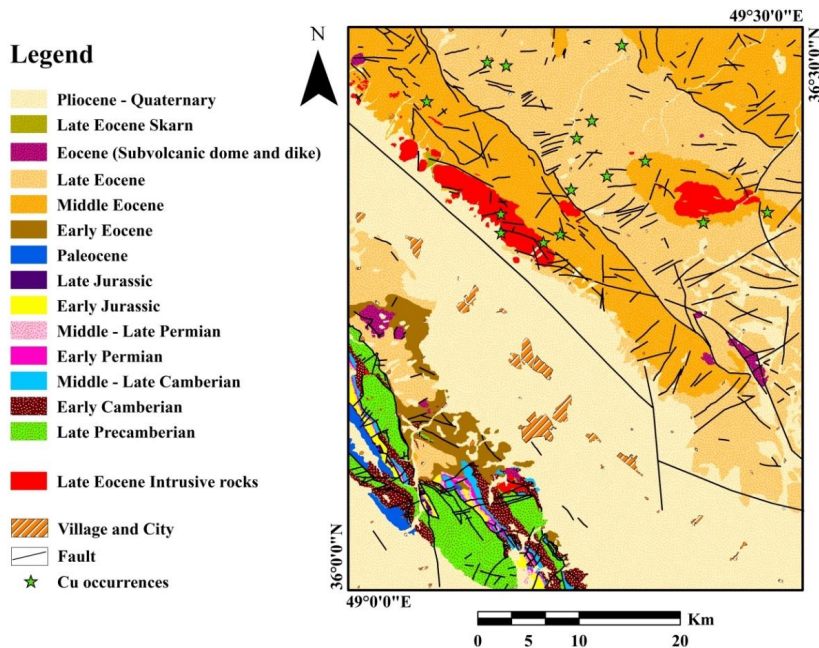
ناحیه مورد مطالعه در شمال باختر ایران و در گوشه جنوب خاوری چهارگوش ۱:۲۵۰,۰۰۰ زنگان، بین طول‌های خاوری ۴۹°۰۰' تا ۴۹°۳۰' و عرض‌های شمالی ۳۶°۰۰' تا ۳۶°۳۰' واقع شده است. محدوده ورقه ابهر از نگاه ساختاری، بخش‌هایی از دو زون طارم و سلطانیه را در برمی‌گیرد. زون طارم به پیکر یک فرازمین با روند شمال-باختر- جنوب‌خاور، یک کمان ماگمایی مرکب از نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشان‌های ائوسن است که توسط توده‌های نفوذی الیگوسن تحت تاثیر قرار گرفته و در حقیقت دنباله نوار آتشفشانی نفوذی البرز باختری است. زون سلطانیه به صورت یک فرازمین با روند شمال-باختر- جنوب‌خاوری موازی با زون طارم، بیشتر از نهشته‌های رسوبی پرکامبرین- پالیوزویک و بسیار کم‌تر مزوزویک پدید آمده است [۴۶]. زون طارم که بیشتر از نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشانی-آواری سازند کرج تشکیل شده، نشان‌دهنده فعالیت آتشفشانی در یک حوضه رسوبی کم‌عمق با فازهای متناوب انفجاری و خروج روانه‌های آندزیتی، داسیتی و بسیار اندک ریولیتی است. تکتونیک ملایم زون طارم مرتبط با نفوذ توده‌های گرانیتی به درون این کمان ماگمایی است که باعث سخت شدن و پایداری آن در برابر فرآیندهای تکتونیک آلپ میانی و پسین شده است. زون سلطانیه که در حقیقت پی‌سنگ بالا آمده پرکامبرین- پالیوزویک در زون اصلی ایران مرکزی است، به شکل یک رشته طویل و باریک، با رخساره‌های سنگی پرکامبرین و پالیوزویک و حتی مزوزویک است که به طور

کامل همسان با البرز قرار گرفته و چنین برمی‌آید از پرکامبرین تا ژوراسیک، حوضه رسوبی واحدی را با البرز، تشکیل داده است. این زون بالا آمده باریک و کشیده، دارای مرز شمال خاوری گسله با حوضه فرو رفته ابهر است که بالا آمدگی در امتداد گسله طویل را نشان می‌دهد [۴۶]. در این ناحیه سنگ‌های ولکانیکی ائوسن با یک دگرشیبی واضح در تماس با رسوباتی از سازندهای مختلف قرار گرفته است که قدمت بعضی از آنها به زمان پرکامبرین نیز می‌رسد. با توجه به دو ویژگی ساختاری مختلف پهنه طارم و پهنه سلطانیه، محدوده ورقه ابهر نیز شامل دو پهنه ساختاری و متالورژیکی متفاوت در بخش شمالی (پهنه طارم) و جنوبی (پهنه سلطانیه) است. پهنه طارم که بیشتر دارای استعداد کانه‌زایی مس، سرب و روی و طلا به صورت رگه‌ای و با عیار بالاست، نیاز به بررسی‌های اکتشافی دقیق‌تر دارد. همه کانسارها و نشانه‌های معدنی ناحیه طارم، در پیوند با سنگ‌های آتشفشانی (بیشتر آندزیت) ائوسن و به ویژه توده‌های نفوذی تونالیتی تا گرانیتی ائوسن است. پهنه سلطانیه نیز با توجه به نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی هم‌دوران با پرکامبرین بالایی در نهشته‌های سازند کهر و توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن در دولومیت‌های سلطانیه و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن، نویدبخش کانی‌سازی اسکارنی آهن و مس در این پهنه است. علاوه بر آن، ذخایر عظیم سیلیس در افق کوارتزیت فوقانی و فسفات رسوبی در سازند سلطانیه نیز، اهمیت معدنی آن را نشان می‌دهد [۴۷]. از جمله کانسارهای مهم منطقه، کانسار سرب و روی زه‌آباد، مس خلیفه‌لو، مس چرگر، کانسار سرب و روی باریک‌آب را می‌توان نام برد. در شکل ۱، نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه یک‌صد هزار ابهر نشان داده شده است.

۳- روش‌شناسی

۳-۱- روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA)

وزن‌دهی به معیارها از جمله مهم‌ترین گام‌های حل مساله در بیشتر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است [۴۹]. روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA) یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای تحلیل اختلاف معقول بین معیارها به کار می‌رود [۵۰]. همان‌طور که بیان شد، مهم‌ترین معیار در رتبه اول و کم‌اهمیت‌ترین معیار در رتبه آخر قرار داده می‌شود. سپس رتبه‌بندی معیارها براساس مقادیر متوسط اهمیت نسبی



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ ابهر [۴۸]

معیار اول (به عنوان مهم‌ترین معیار) برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$q_j = (K_{j-1}) / K_j \quad (2)$$

گام پنجم: محاسبه وزن نرمال نهایی؛ آخرین گام در این روش، محاسبه وزن نرمال شده معیارها که همان وزن نهایی معیارها بوده و از طریق رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$w_j = (q_{j-1}) / (\sum q_j) \quad (3)$$

۲-۳- روش بهینه‌سازی چندهدفه براساس تجزیه و تحلیل نسبت (MOORA)

تصمیم‌گیری شامل تعیین اهداف، جمع‌آوری اطلاعات مرتبط و انتخاب گزینه بهینه است [۵۶]. در این بین، یکی از روش‌هایی که در طیف گسترده‌ای از مسایل تصمیم‌گیری کاربرد دارد، روش بهینه‌سازی چندهدفه براساس تجزیه و تحلیل نسبت (MOORA) است. این روش، هم‌زمان معیارهای مطلوب و نامطلوب را برای رتبه‌بندی و انتخاب یک گزینه یا بیشتر از میان تمامی گزینه‌ها به کار می‌گیرد [۴۲]. این روش بر مبنای تحلیل نسبی و روش نقطه مرجع است که البته در مسیر توسعه‌ای، فرم ضریبی نیز به آن اضافه و منجر به

(قضاوت کارشناسان) رتبه‌بندی می‌شوند [۵۱]. نهایتاً با توجه به ارزش متوسط رتبه‌های گروهی به دست آمده، وزن هر معیار تعیین می‌شود [۵۲]. از جمله مزایای روش SWARA این است که این روش ساده و قابل فهم است و در قیاس با روش‌هایی مانند AHP و ANP، از تعداد مقایسات زوجی کمتری استفاده می‌کند [۵۳-۵۶]. گام‌های اصلی وزن‌دهی بر طبق روش SWARA به شرح زیر است [۳۷]:

گام اول: مرتب کردن معیارها؛ در ابتدا معیارهای موردنظر تصمیم‌گیرندگان متناسب با هدف، انتخاب و مرتب می‌شوند. مهم‌ترین معیارها در رده‌های بالا قرار می‌گیرند و رده‌های پایین، به معیارهای کم اهمیت‌تر اختصاص می‌یابند.

گام دوم: تعیین اهمیت نسبی هر شاخص (S_j)؛ در این مرحله باید اهمیت نسبی هر یک از معیارها، نسبت به شاخص مهم‌تر قبلی تعیین شود.

گام سوم: محاسبه ضریب K_j ؛ ضریب K_j که تابعی از مقدار اهمیت نسبی هر معیار است، با استفاده از رابطه شماره ۱ به دست می‌آید.

$$K_j = S_j + 1 \quad (1)$$

گام چهارم: محاسبه وزن اولیه هر معیار؛ وزن اولیه هر معیار با کمک رابطه ۲ محاسبه می‌شود. گفتنی است که وزن

۴- مدل سازی، بحث و بررسی

۴-۱- آماده سازی لایه های شاهد برای انجام عملیات تلفیق

مدل سازی پتانسیل معدنی در واقع یافتن مکان ها یا مناطقی است که دسته ای از معیارها و شاخص ها برای حضور ذخیره در آنها صدق می کند. این معیار و ملاکها به عنوان متغیرهای پیش گو و اکتشافی، خصوصیتی هستند که مستقیماً قابل مشاهده و اندازه گیری بوده و با یکدیگر ارتباط آشکار یا پنهان دارند. بنابراین در این مطالعه متناسب با تیپ کانه زایی های مس مورد نظر (که همگی از نوع رگه ای هستند)، بهره گیری از نظر کارشناسان و شواهد اکتشافی موجود در محدوده مورد مطالعه، شش لایه شاهد اکتشافی در قالب سه فاکتور اصلی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس به کار گرفته شد. این شش لایه عبارتند از:

۱) **معیار ژئوشیمیایی:** هدف از ایجاد این لایه، شناخت الگوهای رفتاری عناصر مورد نظر در محیط نمونه برداری و جدایش مقادیر بی هنجار مرتبط با کانه زایی است. با توجه به اهمیت ویژه روابط و همبستگی ژنتیکی مستقیم و معکوس بین عناصر در کنسارهای گوناگون، عناصر مذکور تحت مطالعه و بررسی های دو و چندمتغیره قرار گرفتند و از ۸۷۹ نمونه رسوب آبراهه ای برداشت شده توسط سازمان زمین شناسی (GSI) استفاده شد. یکی از روش های به کار گرفته شده، تجزیه و تحلیل مولفه اصلی (PCA) است که ابزاری مناسب برای تبدیل مقادیر عیاری چندعنصری به حالت تک مولفه ای به شمار می رود. بر اساس روش PCA، مس همراه با کبالت و عناصر سنگ ساز در شاخص اول (PC1) قرار گرفتند؛ بنابراین لایه ژئوشیمیایی پیوسته PC1 به عنوان لایه شاهد ژئوشیمیایی برای مدل سازی نواحی امیدبخش مس انتخاب شد.

۲) **معیار زمین شناسی:** یکی از لایه های مهم اطلاعاتی

در مدل سازی پتانسیل معدنی، نقشه های زمین شناسی هستند. از این رو با استفاده از نقشه زمین شناسی ورقه یک صد هزار ابهر که توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه شده است، تمامی واحدهای زمین شناسی موجود در منطقه به صورت دستی و در محیط ArcGIS به صورت رقمی درآمدند و سپس نقشه پیوسته فاصله از توده های نفوذی و ولکانیک که از لحاظ ژنتیکی، نزدیکی زیادی با کانه زایی مس در منطقه مورد مطالعه دارند، ایجاد شد. نقش کنترل کننده های ساختاری نیز در شناسایی و کشف مواد معدنی در مناطق متاثر از فعالیت های ماگمایی و گرمایی بسیار حایز اهمیت

ایجاد روش Multi-MOORA به عنوان یک روش قدرتمند در بهینه سازی چندهدفه شد. از جمله ویژگی های بارز روش MOORA، سادگی و سهولت پیاده سازی، محاسبات ریاضی کم و زمان حل بسیار پایین است. مراحل اصلی اجرای مدل به شرح زیر است:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری؛

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix}$$

گام دوم: نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم گیری؛ یکی از روش

های نرمال سازی در مدل MOORA، بی مقیاس سازی معمولی است که در آن هر یک از مؤلفه های ماتریس تصمیم (گزینه ها) بر مجموع مؤلفه های ستون مربوطه تقسیم می شود (رابطه ۴).

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (4)$$

در این رابطه، مقدار \bar{x}_{ij} بی بعد شده گزینه i ام از معیار j ام بوده و همیشه در بازه $[0-1]$ است.

گام سوم: تعیین مقدار مطلوبیت و عدم مطلوبیت مقادیر

نرمال شده براساس رویکرد سیستم نسبت که با رابطه ۵ محاسبه می شود:

$$Y_i = \sum_{j=1}^g w_j \cdot \bar{x}_{ij} - \sum_{j=g+1}^n w_j \cdot \bar{x}_{ij} \quad (5)$$

g ، معرف تعداد معیارهای مطلوب است که باید بیشینه شوند و $g+1$ ، معرف تعداد معیارهای نامطلوب است که باید کمینه شوند. w_j ، وزن معیارها می باشد که با روش SWARA حاصل شده است.

گام چهارم: رتبه بندی گزینه ها براساس رویکرد نقطه

مرجع؛ در این گام باید برای هر معیار، نقطه مرجع به دست آورد که برای معیارهای مطلوب (مثبت) برابر با بزرگ ترین مقدار معیار و برای معیارهای منفی برابر با کوچک ترین مقدار معیار است.

For objectives to be maximized $r_i = \max w_j \cdot \bar{x}_{ij}$

For objectives to be minimized $r_i = \min w_j \cdot \bar{x}_{ij}$

رتبه بندی در این روش، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\text{Min} \{ \max | w_j \cdot r_i - w_j \cdot \bar{x}_{ij} | \} \quad (6)$$

روش مبتنی بر مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه اشغال کرده است [۶۱،۶۰]. بزرگ‌ترین برتری این روش آن است که علاوه بر در نظر گرفتن فراوانی داده‌ها، تغییرات فضایی آن‌ها روی زمین نیز بررسی می‌شود و می‌توان با اعتماد بالایی جوامع بی‌هنجار را از مقادیر زمینه جدا کرد و به همین دلیل در جدایش جوامع ژئوشیمیایی روش بسیار موفقی به شمار می‌رود. یکی دیگر از کاربردهای این روش، استفاده از شمارش جعبه‌ای برای شناسایی و جداسازی حدود آستانه است که در آن مساحت کل پیکسل‌های مربوط به یک عیار مشخص، با یکدیگر جمع و داده‌های به دست آمده در قالب یک نمودار تمام لگاریتمی عیار در مقابل مساحت رسم می‌شوند [۶۲]. سپس برای تعیین جوامع مختلف براساس قانون کمترین مربعات، خطوطی را بر نقاط نمودار برازش داده و بر اساس آن حدود آستانه و تعداد جوامع مختلف تعیین شد. نقاط شکست در این نمودار بیان‌گر تغییر جامعه‌ای به جامعه دیگر و به تبع آن، تغییرات در شرایط زمین‌شناسی به‌ویژه کانی‌سازی است [۶]. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای تمام‌لگاریتمی و نقشه‌های شاهد کلاسه‌بندی شده حاصل از روش "فرکتالی عیار- مساحت" نشان داده شده است.

۴-۲- تلفیق و ترکیب لایه‌های اکتشافی

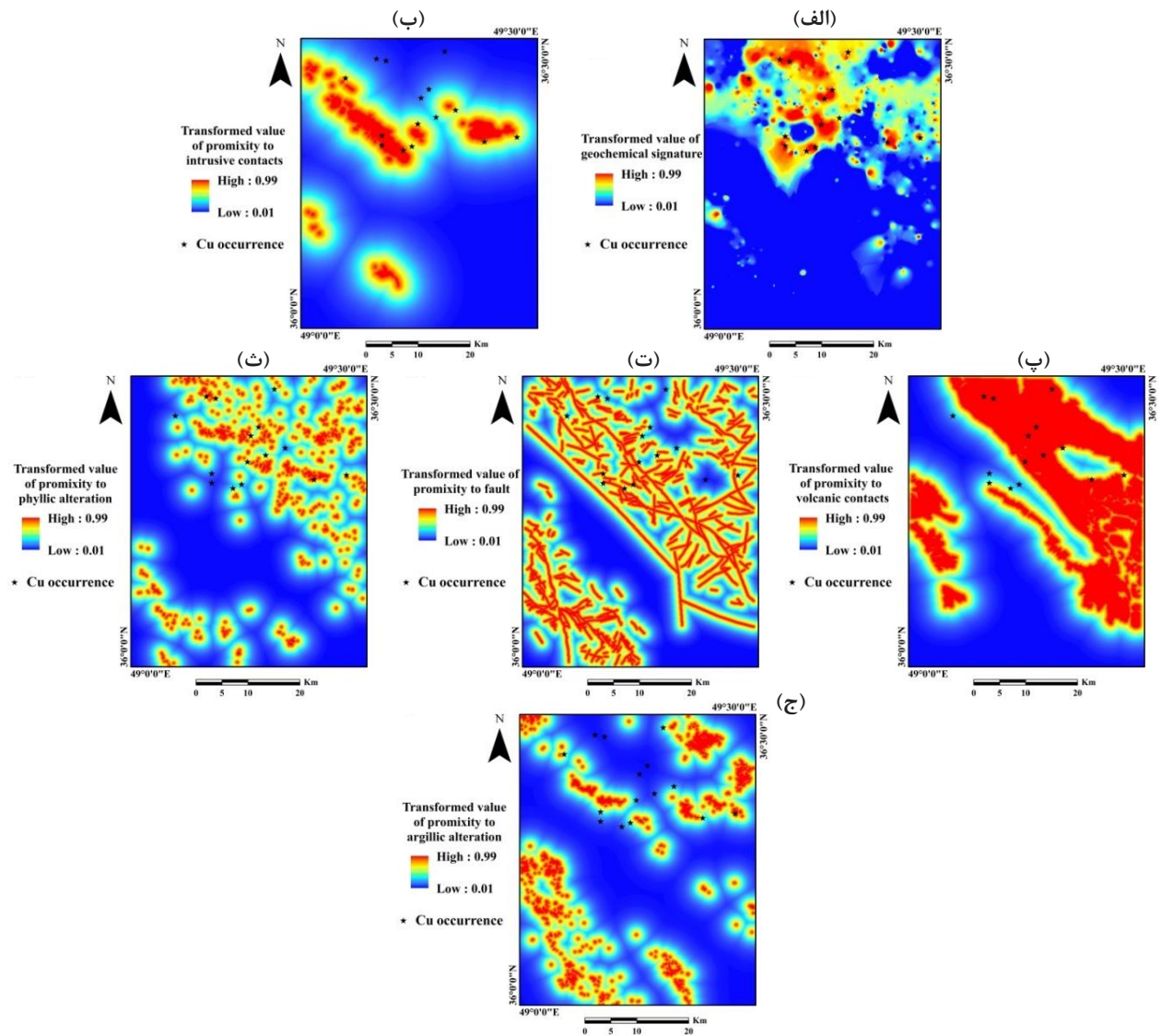
مساله مهمی که در تصمیم‌گیری‌های مکانی وجود دارد، چگونگی ترکیب نقشه‌های معیار است. در این مطالعه، روش ترکیبی "SAWRA-MOORA" مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های "SWARA" و "MOORA" از جمله روش‌های "MCDM" هستند که از روش "SWARA" برای محاسبه وزن معیارها (و زیرمعیارها) و از روش "MOORA" برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است. حتی با در نظر گرفتن توانایی هر روش به تنهایی، تجربه نشان داده است که ترکیب هر دو و استفاده هم‌زمان از آنها نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. به‌عنوان نمونه، در این تحقیق روش "MOORA" بر خلاف روش "SWARA"، امکان بهره‌مندی مستقیم از اولویت و قضاوت‌های کارشناسان را نداشت (اوزان اختصاصی به معیارها که از روش SWARA یا سایر روش‌های وزن‌دهی حاصل می‌شوند، به دقیق‌تر شدن نتیجه نهایی منجر خواهد شد). همچنین روش "SWARA" نیز با وجود کلاسه‌بندی معیارهای شاهد، مساحت بزرگی را به‌عنوان منطقه امیدبخش معرفی می‌کرد، بنابراین تصمیم بر آن شد تا از تلفیق هر دو

است. چرا که محل برخورد گسل‌ها و یا شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های برشی، می‌تواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلول‌های کانه‌دار و کانه‌زا باشد [۵۷]. بر این اساس، گسل‌های برداشت‌شده از منطقه ابهر توسط سازمان زمین‌شناسی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بازبینی شد و در محیط ArcGIS به صورت رقومی درآمد. در انتها نقشه فاصله از گسل نیز به عنوان یکی دیگر از لایه‌های شاهد اطلاعاتی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی ایجاد شد.

۳) معیار دورسنجی: شناخت نواحی دگرسانی یکی از عوامل تشخیص مناطق کانه‌دار است. اگر در تشخیص این مناطق، نوع دگرسانی مشخص شود، می‌تواند در تعیین الگویی مناسب برای کانه‌زایی منطقه مورد استفاده قرار گیرد [۵۸]. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل قابلیت پوشش چندطیفی و چندزمانی مناطق وسیع، از پتانسیل بالایی برای شناسایی مناطق دگرسان مرتبط با توده‌های کانساری و در نتیجه اکتشاف ذخایر معدنی برخوردار هستند [۳]. با توجه به ارتباطی که کانه‌زایی عناصری همچون مس، سرب و روی می‌تواند با دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک داشته باشد، در این پژوهش به‌منظور شناسایی نواحی مستعد این دگرسانی‌ها از داده‌های سنجنده چندطیفی "استر" استفاده شد. سپس دگرسانی‌های تشخیص داده‌شده، جهت انتقال به محیط ArcGIS، در نرم‌افزار ENVI به صورت شیپ‌فایل ذخیره و در نهایت در نرم‌افزار ArcGIS، نقشه نهایی پیوسته فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک ترسیم شد.

از آنجایی که لایه‌های شاهد دارای مقادیر کمینه و بیشینه مشابه نیستند، ضرورت دارد که قبل از انجام تلفیق، مقادیر مکانی لایه‌های شاهد اکتشافی توسط یک تابع خطی یا غیرخطی به فضایی با مقدار واحد منتقل شوند. بنابراین در این پژوهش با استفاده از روش‌های مبتنی بر منطق فازی، مقادیر مربوط به لایه‌های شاهد به یک فضای جدید با دامنه ۰ تا ۱ منتقل شدند. برای این هدف، از تابع لجستیک سیگموئیدی استفاده شد که نه تنها اجازه تفکیک بهتری از ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی را در اختیار قرار می‌دهد، بلکه نرخ پیش‌بینی توسط رخدادهای معدنی را نیز بهبود می‌بخشد [۵۹]. شکل ۲، نقشه‌های شاهد فازی شده را نشان می‌دهد.

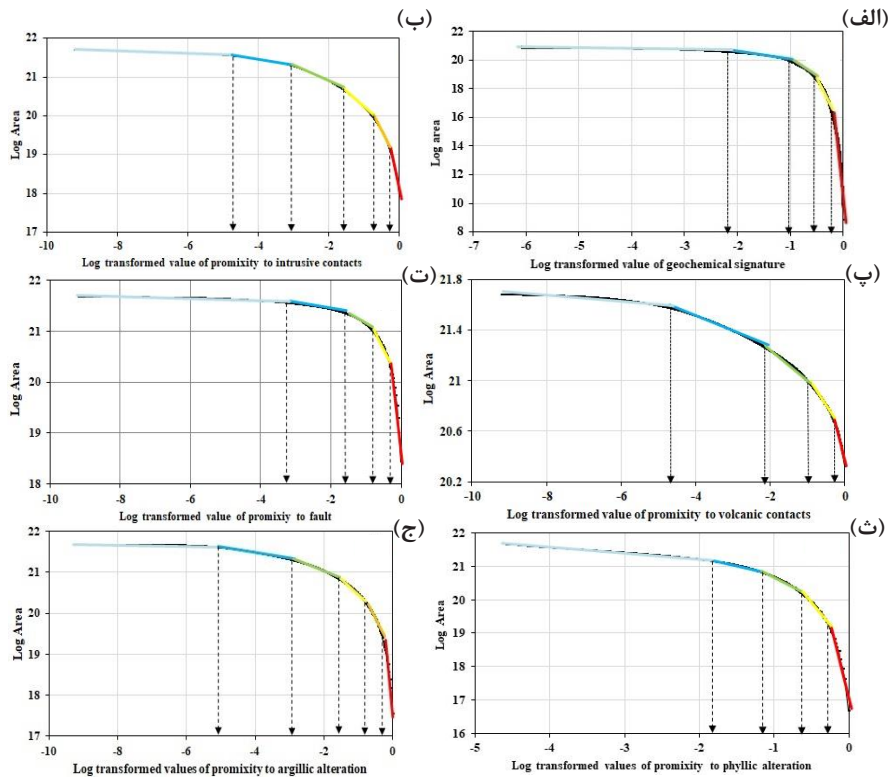
برای کلاسه‌بندی مقادیر پیوسته مکانی در لایه‌های شاهد و دستیابی به نقشه‌های کلاسه‌بندی شده وزن‌دار از روش "فرکتالی عیار- مساحت" (C-A) [۴۵] استفاده شد. این



شکل ۲: لایه‌های شاهد مختلف فازی سازی شده با استفاده از تابع لجستیک سیگموئیدی: (الف) نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی مس، (ب) نقشه فاصله از واحدهای نفوذی، (پ) نقشه فاصله از واحدهای ولکانیک، (ت) نقشه فاصله از گسل‌های منطقه، (ث) نقشه فاصله از دگرسانی فیلیک و (ج) نقشه فاصله از دگرسانی آرژیلیک

روش بهره گرفته شود. پس از فازی‌سازی، برای دستیابی به نقشه‌های کلاسه‌بندی شده وزن‌دار، با استفاده از روش "فرکتالی عیار- مساحت" کلاسه‌بندی شدند. برای وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها نیز از روش "SWARA" استفاده شد. اوزان اختصاصی به معیارها بر طبق گام‌های برشمرده در بخش ۳، تعیین و در جدول ۱ آورده شد. لازم به ذکر است که وزن‌های اختصاص یافته به هر یک از زیرمعیارها (کلاس‌های مختلف هر یک از لایه‌های شاهد) نیز به همین روش تعیین شد که در جدول ۲ آورده

بدین ترتیب برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس با استفاده از روش ترکیبی "SWARA-MOORA"، مطابق با نظر متخصصان، شش لایه شاهد شامل نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی مس حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی، نقشه فاصله از واحدهای سنگی آذرین نفوذی و واحدهای ولکانیک، نقشه فاصله از گسل‌های منطقه و در نهایت نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک و فیلیک در نظر گرفته شد. این نقشه‌ها



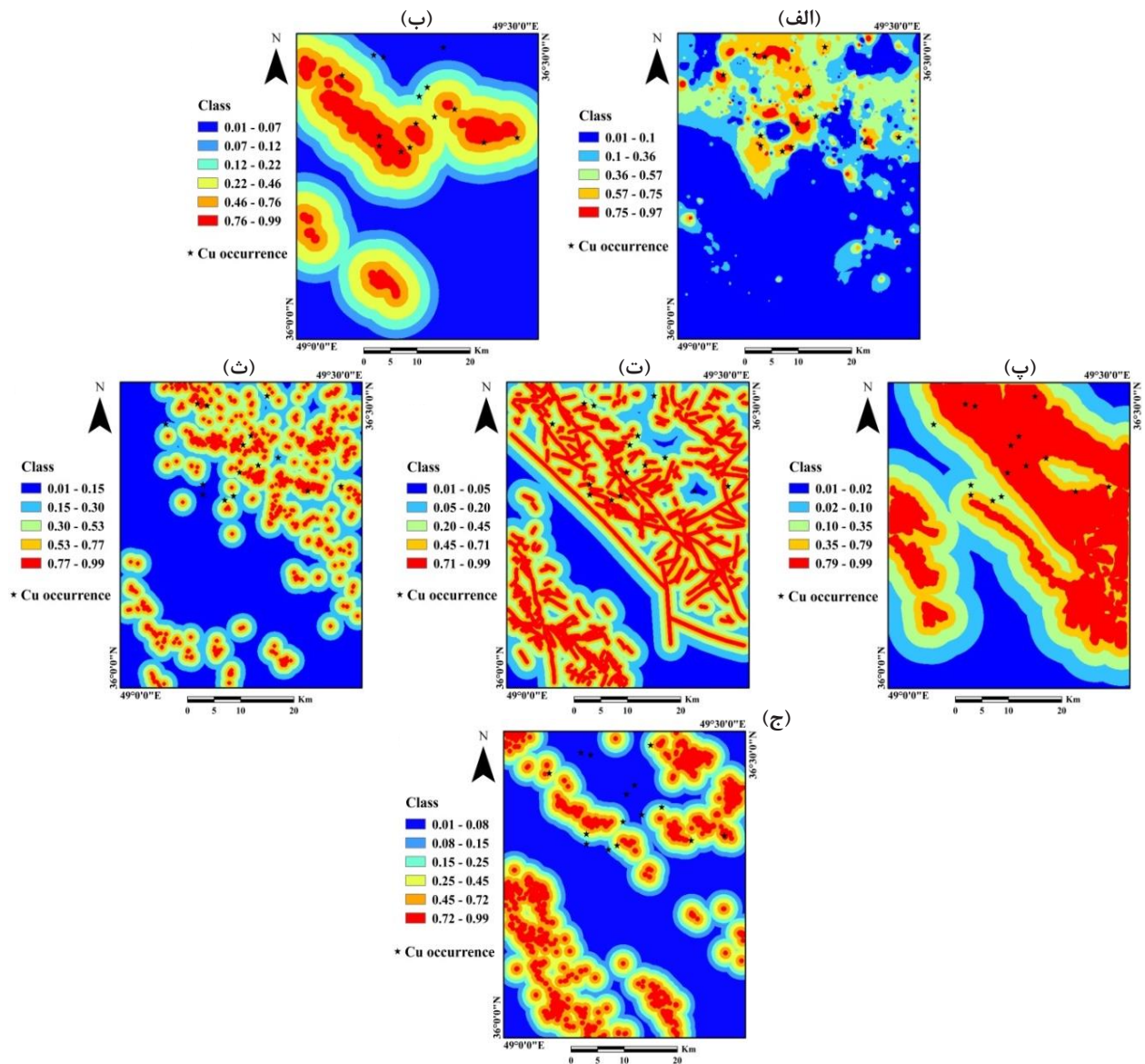
شکل ۳: نمودار تمام لگاریتمی حاصل از روش فرکتالی عیار-مساحت مربوط به (الف) بی‌هنجاری ژئوشیمیایی مس، (ب) فاصله از واحدهای نفوذی، (پ) فاصله از واحدهای ولکانیک، (ت) فاصله از گسل، (ث) فاصله از دگرسانی فیلیک و (ج) فاصله از دگرسانی آرژیلیک

مدل‌های پیش‌گوی پتانسیل‌های معدنی است. در این پژوهش برای اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل نهایی حاصل از روش Prediction-Area (P-، از نمودار SWARA-MOORA، استفاده شد. این نمودار از کارآمدترین روش‌ها در ارزیابی خصوصیات تعیین، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌ها است و میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند [۶]. برای نیل به این هدف و تعیین تعداد اندیس‌های قرار گرفته در هر کلاس و همچنین تعیین حدود آستانه از نقشه‌های کلاسه‌بندی شده استفاده شد. سپس نمودار نرخ پیش‌بینی (P_r) و مساحت اشغال شده (O_p) برای هر کلاس از نقشه‌های نهایی نسبت به حد آستانه متناظرش رسم شد. نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده معرف میزان موفقیت مدل در پیش‌بینی مناطق هدف است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نقطه تقاطع با قرار گرفتن در نقطه ۸۱ درصد، توانمندی مدل در شناسایی نواحی امیدبخش مس را اثبات می‌کند. در واقع این عدد بیان می‌دارد که ۸۱ درصد از اندیس‌های شناخته‌شده در منطقه مورد مطالعه در ۱۹

شده است. در گام بعد، برای رتبه‌بندی جایگزین‌ها و تلفیق و ترکیب نقشه‌های شاهد از روش "MOORA" استفاده شد. بدین منظور نقشه‌های وزن‌دار شده معیارهای مختلف به شکل یک ماتریس تصمیم (تعداد ستون‌ها برابر با تعداد معیارها و تعداد سطرها برابر با تعداد سلول‌های ایجاد شده از این نقشه‌ها یا همان جایگزین‌ها) با ابعاد 6×361638 درآمدند که در آن عدد شش تعداد معیارها و عدد 361638 برابر با تعداد جایگزین‌ها (هر جایگزین معرف یک پیکسل 85×85 متری در نقشه‌های شاهد) است. در نهایت مطابق با گام‌های ذکر شده در بخش ۲-۳، نقشه نهایی پتانسیل معدنی مس ایجاد شد (شکل ۵). لازم به ذکر است که در رتبه‌بندی جایگزین‌های مورد نظر با استفاده از روش "MOORA" برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی از روش "سیستم نسبت" بهره گرفته شده است.

۴-۳- ارزیابی مدل پتانسیل معدنی

سنجش اعتبار مدل‌های ایجاد شده امری ضروری و هدف از آن تعیین اعتبار مدل‌ها و یا انتخاب بهترین مدل از میان



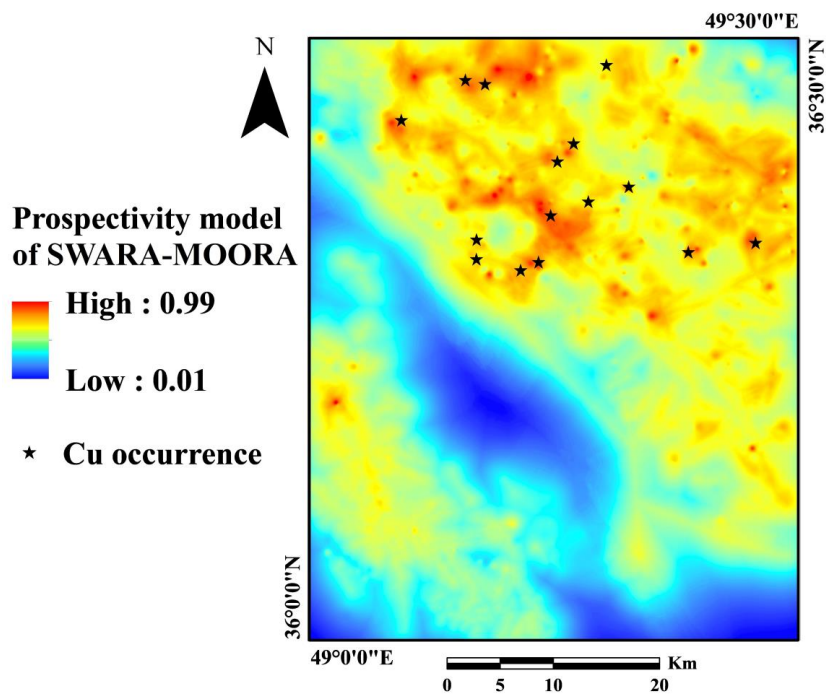
شکل ۴: نقشه‌های کلاسه‌بندی شده حاصل از روش فرکتالی عیار - مساحت مربوط به (الف) بی‌هنجاری ژئوشیمیایی (ب) فاصله از واحدهای نفوذی، (پ) فاصله از واحدهای ولکانیک، (ت) فاصله از گسل‌های منطقه، (ث) فاصله از دگرسانی فیلیک و (ج) فاصله از دگرسانی فیلیک

جدول ۱: اوزان اختصاصی به معیارها با استفاده از روش SWARA

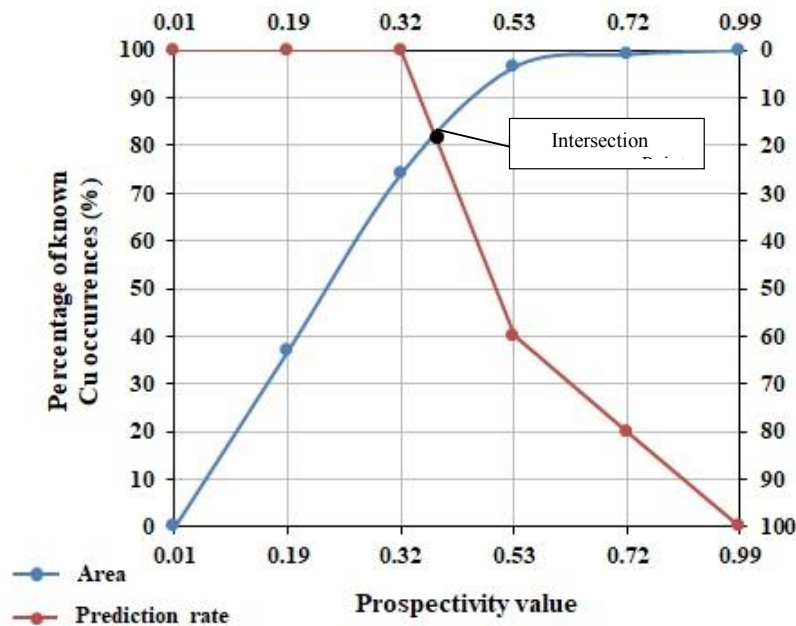
Criteria	S_j	K_j	q_j	W_j	Weights
Geochemical anomaly	1.000	1.000	1.000	1.000	0.267
Intrusive	0.300	1.300	0.769	0.7699	0.200
Volcanic	0.300	1.300	0.591	0.591	0.166
Fault	0.180	1.180	0.501	0.501	0.133
Phyllic	0.090	1.090	0.460	0.466	0.121
Argillic	0.065	1.065	0.4317	0.444	0.113

جدول ۲: اوزان اختصاصی به زیرمعیارها با استفاده از روش SWARA

Criteria	Sub-criteria	Weight	Criteria	Sub-criteria	Weight
Multi-element geochemical signature	class 1	0.055	Proximity to fault	class 1	0.053
	class 2	0.114		class 2	0.096
	class 3	0.193		class 3	0.190
	class 4	0.238		class 4	0.259
	class 5	0.400		class 5	0.412
Proximity to intrusive contacts	class 1	0.042	Proximity to phyllic alteration	class 1	0.057
	class 2	0.086		class 2	0.154
	class 3	0.108		class 3	0.164
	class 4	0.149		class 4	0.212
	class 5	0.235		class 5	0.413
	class 6	0.380	Proximity to argillic alteration	class 1	0.065
Proximity to volcanic contacts	class 1	0.059		class 2	0.067
	class 2	0.116		class 3	0.101
	class 3	0.160		class 4	0.196
	class 4	0.231		class 5	0.214
	class 5	.380	class 6	0.357	



شکل ۵: مدل نهایی پتانسیل مس حاصل از روش SWARA-MOORA



شکل ۶: نمودار Prediction-Area (P-A) مربوط به مدل پتانسیل نهایی حاصل از روش SWARA-MOORA

شاهد اکتشافی شامل نقشه بی‌هنجاری ژئوشیمیایی مس، نقشه فاصله از واحدهای سنگی آذرین نفوذی و واحدهای ولکانیک، نقشه فاصله از گسل‌های منطقه و در نهایت نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های آرژلیک و فیلیک در نظر گرفته شد. به‌منظور آماده‌سازی لایه‌های مذکور برای تلفیق و در نتیجه ایجاد نقشه پتانسیل معدنی، لایه‌های شاهد ابتدا توسط تابع لجستیک سیگموئیدی فازی‌سازی شده و در گام بعد با استفاده از روش "فرکتالی عیار-مساحت" (C-A) برای تعیین جوامع مختلف، کلاس‌بندی شدند. در مرحله بعد، معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش "SWARA" وزن‌دهی شدند و در نهایت با استفاده از روش "MOORA" همه جایگزین‌های مستخرج از نقشه‌های شاهد، رتبه‌بندی و نقشه معرف مناطق پرتانسیل مس ایجاد شد. اعتبار مدل مذکور با نمودار Prediction-Area (P-A) مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس این نمودار، نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال‌شده مربوطه، مقدار ۸۱ درصد را نشان داد. لازم به‌ذکر است که مقدار چگالی نرمال‌شده (N_d) محاسبه‌شده برای این مدل نیز عدد ۴٫۲۶ است که توان بالای مدل مذکور را در معرفی نواحی امیدبخش مس نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از مدل مذکور در انتخاب و اولویت‌بندی مناطق هدف به‌منظور انجام عملیات اکتشاف بعدی بهره‌گرفت. بر اساس مدل مذکور عمده مناطق پرتانسیل در نیمه شمالی ورقه و در

درصد از سطح منطقه قابل شناسایی هستند. چگالی نرمال‌شده (N_d) برای مدل مذکور بر اساس $N_d = P_r / O_a$ محاسبه و عدد حاصل برابر ۴٫۲۶ شد. براساس نظر "می‌هالسکای و کارتر" [۶۳]، چنانچه $N_d > 1$ آنگاه مدل مذکور از قدرت پیش‌بینی بالایی برخوردار است.

۵- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، نشان‌دادن کاربرد موفقیت‌آمیز روش ترکیبی "SWARA-MOORA" به‌عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ورقه یک‌صدهزار ابهر است. با وجود توانایی هر روش به‌تنهایی، ترکیب و استفاده هم‌زمان از آن‌ها نتایج بهتری را در پی خواهد داشت. چراکه روش "MOORA" به‌تنهایی امکان بهره‌مندی از قضاوت‌های کارشناسی را ندارد، بنابراین از دقت خوبی در معرفی مناطق امیدبخش برخوردار نخواهد بود.

روش "SWARA" نیز اگرچه از قضاوت‌های کارشناسی بهره‌مند است، اما سطح نسبتاً وسیعی را به‌عنوان محدوده امیدبخش معرفی می‌کند. به‌این‌ترتیب استفاده هم‌زمان این دو روش در کنار یکدیگر، در نهایت منجر به کاهش مساحت مناطق امیدبخش و دقت پیش‌بینی بالا خواهد شد. برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس، شش معیار اصلی در قالب لایه‌های

(Eds.), Computer Applications in Resource Estimation, Pergamon Press, Oxford, 1-21.

زیرزون طارم واقع شده است.

۶- مراجع

- [12] Brown, W. M., Gedeon, T. D., Groves, D. I., and Barnes, R. G. (2000). "Artificial neural networks: a new method for mineral potential mapping". Australian Journal of Earth Sciences, 47(4): 757-770.
- [13] Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2002b). "Where porphyry copper deposits are spatially localized? A case study in Benguet province, Philippines". Natural Resources Research, 11: 45-59.
- [14] Zuo, R., Zhang, Z., Zhang, D., Carranza, J., and Wang, H. (2016). "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, 71: 502-515.
- [15] Agterberg, F. P., and Bonham-Carter, G. F. (1999). "Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration". In Proceedings of the 28th International Symposium on Applications of Computer in the Mineral Industry (AP-COM), Golden, Colorado, 483-490.
- [16] Chen, C., Dai, H., Liu, Y., and He, B. (2011). "Mineral Prospectivity Mapping Integrating Multisource Geology Spatial Data Sets and Logistic Regression Modelling". In Proceedings of IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM), 214-217.
- [17] Porwal, A., González-Álvarez, I., Markwitz, V., McCuaig, T. C., and Mamuse, A. (2010a). "Weights-of-evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia". Ore Geology Reviews, 38: 184-196.
- [18] Harris, D. P., Zurcher, L., Stanley, M., Marlow, J., and Pan, G. (2003). "A comparative analysis of favourability mappings by weights of evidence probabilistic neural networks, discriminant analysis, and logistic regression". Natural Resources Research, 12: 241-255.
- [19] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2003). "Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India". Natural Resources Research, 12: 155-171.
- [20] Oh, H. J., and Lee, S. (2010). "Application of artificial neural network for gold-silver deposits potential mapping: a case study of Korea". Natural Resources Research, 19(2): 103-124.
- [21] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2012). "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for
- [1] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectively mapping in GIS". In of Exploration and Environmental Geochemistry Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 368.
- [2] Bonham Carter, G. F. (1998). "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS". Pergamon Press, Oxford, pp. 398.
- [۳] بهرامی، ی.؛ ۱۳۹۷؛ "شناسایی مناطق امیدبخش معدنی در ناحیه ابهر با استفاده از تلفیق لایه‌های اکتشافی در محیط GIS". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [4] Bonham-Carter, G. F. (1994). "Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS". Computer Methods in the Geoscientists, pp. 398.
- [5] Najafi, A., Karimpour, M. H., and Ghaderi, M. (2014). "Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, eastern Iran". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 33: 142-154.
- [6] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 74: 97-109.
- [7] Ghezelbash, R., Maghsoudi, A., and Daviran, M. (2018a). "Prospectivity modeling of porphyry copper deposits: recognition of efficient mono-and multi-element geochemical signatures in the Varzaghan district, NW Iran". Acta Geochimica, 1-14.
- [8] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2012). "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration". Journal of Applied Geophysics, 83: 35-45.
- [9] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2003). "Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping". Natural Resources Research, 12(1): 1-25.
- [10] Abedi, M., Torabi, S. A., and Norouzi, G. H. (2013). "Application of fuzzy-AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: seridune copper deposit". Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 54(2): 145-164.
- [11] Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., and Wright, D. F. (1990). "Statistical pattern integration for mineral exploration". In Gaál, G., Merriam, D. F.

- fuzzy methods in the Gilan province, Iran". *GeoJournal*. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>.
- [33] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2019). "BWM-ARAS: A new hybrid MCDM method for Cu prospectivity mapping in the Abhar area, NW Iran". *Spatial Statistics*, 33: 100382. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2019.100382>.
- [34] Moon, W. M. (1990). "Integration of geophysical and geological data using evidential belief function". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 711-720.
- [35] Abedi, M., and Norouzi, G. H. (2015). "A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 46: 31-44.
- [36] Abedi, M., Torabi, S. A., Norouzi, G. H., Hamzeh, M., and Elyasi, G. R. (2012a). "PROMETHEE II: a knowledge-driven method for copper exploration". *Computers & Geosciences*, 46: ۲۶۳-۲۵۵.
- [37] Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., and Turskis, Z. (2010). "Selection of Rational Dispute Resolution Method by Applying New Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)". *Journal of Business Economics and Management*, 11(2): 243-258.
- [38] Alimardani, M., Zolfani, S. H., Aghdaie, M. H., and Tamošaitienė, J. (2013). "A Novel Hybrid SWARA and VIKOR Methodology for Supplier Selection in an Agile Environment". *Technological and Economic Development of Economy*, 19(3): 533-548.
- [39] Sarfaraz, H. Z., Zavadskas, E. K., and Turskis, Z. (2013). "Design of Products with Both International and Local Perspectives based on Yin-Yang Balance Theory and Swara Method". *Economic Research*, 26(2): 451-466.
- [40] Hashemkhani Zolfani, S., and Bahrami, M. (2014). "Investment prioritizing in high tech industries based on SWARA-COPRAS approach". *Technological and Economic Development of Economy*, 20(3): 534-553.
- [41] Brauers, W. K., and Zavadskas, E. K. (2006). "The MOORA method and its application to privatization in a transition economy". *Control and Cybernetics*, 35(2): 445-469.
- [42] Karande, P., and Chakraborty, S. (2012). "Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection". *Materials & Design*, 37: 317-324.
- [43] Brauers, W. K., and Zavadskas, E. (2012). "Robustness of MULTIMOORA: A method for multi-objective optimization". *Informatica*, 23(1): 1-25.
- [22] Zuo, R., and Carranza, E. J. M. (2011). "Support vector machine: a tool for mapping mineral potential". *Computers & Geosciences*, 37(12): 1967-1975.
- [23] Abedi, M., Norouzi, G. H., and Bahroudi, A. (2012a). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". *Computers & Geosciences*, 46: 272-283.
- [24] Rodriguez-Galiano, V. F., Chica-Olmo, M., and Chica-Rivas, M. (2014). "Predictive modelling of gold potential with the integration of multisource information based on random forest: a case study on the Rodalquilar area, Southern Spain". *International Journal of Geographical Information Science*, 28: 1336-1354.
- [25] Carranza, E. J. M., and Laborte, A. G. (2015a). "Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: application of random forests algorithm". *Ore Geology Reviews*, 71: 777-787.
- [26] Parsa, M., Maghsoudi, A., and Yousefi, M. (2018). "Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan District, NW Iran". *Ore Geology Reviews*, 92: 97-112.
- [27] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2006b). "Bayesian network classifiers for mineral potential mapping". *Computers & Geosciences*, 32(1): 1-16.
- [28] Carranza, E. J. M., Mangaoang, J. C., and Hale, M. (1999). "Application of mineral exploration models and GIS to generate mineral potential maps as input for optimum land-use planning in the Philippines". *Natural Resources Research*, 8: 165-173.
- [29] Mirzaei, M., Afzal, P., Adib, A., Khalajmasoumi, M., and Zarifi, A. Z. (2014). "Prospection of iron and manganese using index overlay and fuzzy logic methods in Balvard 1:100,000 sheet, Southeastern Iran". *Iranian Journal of Earth Sciences*, 6: 1-11.
- [30] Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P., and Gardoll, S. J. (2008). "Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modeling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland". *Australian Journal of Earth Sciences*, 55: 25-38.
- [31] Afzal, P., Mirzaei, M., Yousefi, M., Adib, A., Khalajmasoumi, M., Zia Zarifi, A., Foster, P., and Yasrebi, A. B. (2016). "Delineation of geochemical anomalies based on stream sediment data utilizing fractal modeling and staged factor analysis". *Journal of African Earth Sciences* 119: 139-149.
- [32] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2020). "Landslide susceptibility mapping using AHP and

- s12517-017-3290-8.
- [55] Shahsavari, S., Jafari Rad, A., Afzal, P., Nezafati, N., and Akhavan Aghdam, M. (2019). "Prospecting for polymetallic mineralization using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) and fractal modeling in Aghkand Area, NW Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7): 248-257.
- [56] Hees, P., and Siciliano, J. (1996). "Management: Responsibility for performance". New York, McGraw-Hill.
- [57] Forster, H. (1978). "Mesozoic - Cenozoic metallogenesis in Iran". Geological Society London, 135: 443-445.
- [58] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2018). "Investigating the capabilities of multispectral remote sensors data to map alteration zones in the Abhar area, NW Iran". *Geosystem Engineering*. DOI: 10.1080/12269328.2018.1557083.
- [59] Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., and Sadeghi, M. (2016a). "Prospectivity modeling of porphyry-Cu deposits by identification and integration of efficient mono-elemental geochemical signatures". *Journal of African Earth Sciences*, 114: 228-241.
- [60] Adib, A., Afzal, P., Mirzaei Ilani, Sh., and Aliyari, F. (2017). "Determination of the relationship between major fault and zinc mineralization using fractal modeling in the Behabad fault zone, central Iran". *Journal of African Earth Sciences*, 134: 308-319.
- [61] Afzal, P., Adib, A., and Ebadati, N. (2018). "Delineation of seismic zonation using fractal modeling in West Yazd province, Central Iran". *Journal of Seismology*, 22(6): 1377-1393.
- [۶۲] قزل‌باش، ر.، مقصودی، ع.؛ ۱۳۹۷؛ "استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS برای مدل‌سازی پتانسیل کانی‌زایی مس پورفیری در ورقه ورزقان، شمال باختر ایران". نشریه علوم زمین، دوره ۲۸، شماره ۱۰۹، ص ۴۲-۳۳.
- [63] Mihalasky, M. J., and Bonham-Carter, G. F. (2001). "Lithodiversity and its spatial association with metallic mineral sites, Great Basin of Nevada". *Natural Resources Research*, 10: 209-226.
- [44] Liu, H. C., You, J. X., Lu, C., and Chen, Y. Z. (2015). "Evaluating health-care waste treatment technologies using a hybrid multi-criteria decision making model". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41: 932-942.
- [45] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109-130.
- [46] Hirayama, K., Haghypour, A., and Hajian, J. (1966). "Geological map of Zanjan". Geological Survey of Iran (GSI).
- [۴۷] قلی‌پور، م.؛ ۱۳۸۸؛ "کنترل و معرفی نواحی امیدبخش معدنی در ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ زمین‌شناسی ابهر". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [۴۸] اختیاری‌آبادی، م.؛ ۱۳۹۵؛ "نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورقه ابهر". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- [49] Zolfani, S. H., Aghdaie, M. H., Derakhti, A., Zavadskas, K. E., and Varzandeh, M. H. (2013). "Decision making on business issues with foresight perspective; an application of new hybrid MCDM model in shopping mall locating". *Expert Systems with Applications*, 40(17): 7111-7121.
- [50] Hashemkhanizolfani, S., and Saparauskas, J. (2013). "New Application of SWARA Method in Prioritizing Sustainability Assessment Indicators of Energy System". *Inzinerine Ekonomika-E engineering Economics*, 24(5): 408-414.
- [51] Alimardani, M., Hashemkhanizolfani, S., Aghdaie, M. H., and Tamosaitien, J. (2013). "A Novel Hybrid SWARA and VIKOR Methodology for Supplier Selection in an Agile Environment". *Technological and Economic Development of Economy*, 19(3): 533-548. ISSN 2029-4913 print/ISSN 2029-4921.
- [52] Taherkhani, H., and Esfahani, M. H. (2012). "Choose the best plan overtaken by inhibiting the release of the release of the shoulder of a road of a using a new hybrid model of MCDM methods". *National Conference on Transportation Infrastructure*, Iran University of and Technology, 1-11.
- [53] Stanujkic, D., Karabasevic, D., and Zavadskas, E. K. (2015). "Framework for the Selection of a packaging design based on the SWARA method". *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 26(2): 181-187.
- [54] Panahi, S., Khakzad, A., and Afzal, P. (2017). "Application of Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) for copper prospectivity mapping in Anarak region, central Iran". *Arabian Journal of Geosciences*, 10(484): 2-17. <https://doi.org/10.1007/>

¹ Geography Information System

² Mineral Prospectivity Mapping

³ Multi-Criteria Decision Making

⁴ Dempster-Shafer

⁵ PROMETHEE

⁶ Step wise Weight Assessment Ratio Analysis

⁷ Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis

⁸ Principle Component Analysis

⁹ Concentration- Area



DOI:10.30479/jmre.2019.10748.1268

Application of the SWARA-MOORA Method for Cu Prospectivity Mapping in Abhar 1:100000 Geological Map, Iran

Bahrami Y.¹, Hassani H.^{2*}, Maghsoudi A.³

1- Ph.D. Student, Dept. of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
y.bahrami@aut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
hhassani@aut.ac.ir

3- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
a.maghsoudi@aut.ac.ir

(Received: 22 May 2019, Accepted: 08 Jun. 2019)

Abstract: Execution of exploration activities is costly and time-consuming, which reveals the necessity of mineral prospectivity mapping (MPM) for identifying highly mineral potential zones. In this regard, the present study introduces a new hybrid method called SWARA-MOORA, through which different evidence layers can be integrated to map Cu highly potential zones in the Abhar area. Thus, based on expert judgments, six evidence layers as targeting criteria was considered. For fulfilling the integration process, the spatial values of predictor maps were initially transformed into a new space ranging [0,1] and then were categorized by C-A fractal-based model to determine thresholds of favorable populations. To generate the overlay prospectivity map pertaining to the mineral deposit of type sought, SWARA method was used to determine the weights of criteria and sub-criteria and MOORA was concerned with order preference of decision alternatives. In order to evaluate the efficiency of SWARA-MOORA overlay prospectivity map, the Predication-Area (P-A) plot along with normalized density (Nd) was used. This predictive map foresees 19% of the study area as prospective areas through which 81% of the known Cu occurrences are ascertained. The relevant Nd is 4.26 that affirms that SWARA-MOORA overlay prospectivity map can be applied efficiently as a target map for subsequent detailed explorations.

Keywords: Abhar, SWARA, MOORA, Fractal, P-A Plot.

INTRODUCTION

Mineral Potential Mapping (MPM) as an efficacious tool includes the integration of multiple geoscience data to outline the target areas with a high potential in a region of interest [1,2]. MPM which is commonly used in the rudimentary stages of mineral exploration [3] utilizes computer and Geographical information systems (GIS) by which various spatial geo-dataset can be visualized, processed, analyzed and integrated [4]. For GIS-Based MPM, various methods have been developed over the past three decades that are categorized into data- or knowledge-based techniques [5]. In data-based, the known mineral deposits are

exploited as “training point” to evaluate the spatial association between of the deposits with particular evidential features based on quantitative analysis in well-explored and data-rich region of interest [6]. Weights of evidence [7], logistic regression [8], neural networks [9-11], support vector machines [11,12], random forest [13,14], and Bayesian networks [15] are used as data-based methods. The knowledge-driven methods are opportune for poorly explored areas of interest [1,6]. These methods use the judgments of experienced geoscientists for determining weights of evidence features based on evaluating the relationship between the mineral occurrence of deposit and predictor maps [6]. The knowledge-driven methods involves the methods of index overlay [16], fuzzy logic [17], Boolean logic [16], wildcat mapping [18], Dempster–Shafer belief theory [19], and multi-criteria decision making approaches [20]. This study aims to represent a new combinatorial MCDM method called SWARA-MOORA to outline Cu highly potential zones in the Abhar area. This method merges two distinct methods of Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) and Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (MOORA). SWARA [21] is an eligible procedure for determination of the weights and comparative importance of a set of criteria and sub-criteria. MOORA method [22] has been applied to order the precedence of decision alternatives.

METHODS

Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)

Step 1. The criteria (and sub-criteria) are assorted in descending order according to their anticipated importance.

Step 2. The relative importance of criterion j is characterized in relation to the previous ($j-1$) criterion (by starting from the second criterion). Mentioned ratio is called the comparative importance of average value (s_j).

Step 3. The coefficient k_j is determined as equation 1:

$$K_j = S_j + 1 \quad (1)$$

Step 4. The initial weight of each criterion is calculated with through the equation 2.

$$q_j = (K_{j-1}) / K_j \quad (2)$$

Step 5. The relative weights (final weights) of the criteria (and sub-criteria) are determined as equation 3:

$$w_j = (q_{j-1}) / (\sum q_j) \quad (3)$$

Multi-Objective Optimization on the basis of Ratio Analysis (MOORA)

Step 1. Form the decision-making matrix comprising n possible alternatives (rows) rated on m appointed criteria (columns).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

Step 2. Normalize the decision matrix using following function (Equation 4):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (4)$$

Step 3. The ratio system part of MOORA method: For multiobjective optimization, these normalized performances are added in case of maximization (for beneficial attributes) and subtracted in case of minimization (for non-beneficial attributes). Then the optimization problem becomes (Equation 5):

$$Y_i = \sum_{j=1}^g w_j \cdot \bar{x}_{ij} - \sum_{j=g+1}^n w_j \cdot \bar{x}_{ij} \quad (5)$$

W_j are the weights determined by SWARA method. An ordinal ranking of Y_i presents the final priority. Thus, the best alternative has the highest Y_i value, while the worst alternative has the lowest y_i value.

Step 4. The reference point part of MOORA method: In this step, a reference point is calculated for each criterion:

For objectives to be maximized $r_i = \max w_j \cdot \bar{x}_{ij}$

For objectives to be minimized $r_i = \min w_j \cdot \bar{x}_{ij}$

The ranking in the reference point part of MOORA method can be calculated from the equation 6:

$$\text{Min } \{ \max | w_j \cdot r_i - w_j \cdot \bar{x}_{ij} | \} \tag{6}$$

In this formula r_i is the i -th co-ordinate of the reference point.

FINDINGS AND ARGUMENT

Present paper aims to outline Cu highly potential areas in the Abhar area among the integration of six evidential maps. In this regard, substantial criteria were selected according to the arbitrations of geo-scientific experts and commensurate to the desired goal. The spatial evidence values in the obtained maps are not involved identical maximum and minimum values. Inevitably, the evidential values of mentioned maps were transformed into a new space. Then concentration-area (C-A) fractal model [23] was applied to classify spatial values of evidential maps. Finally, SWARA-MOORA MCDM method was applied to generate Cu prospectivity map. In this regard, SWARA method was used to determine the weights of criteria and sub-criteria (Table 1) and MOORA method was used to rank the alternatives. At the end, the Cu prospectivity map was generated (Figure 1). To evaluate the efficiency of prospectivity map obtained by SWARA-MOORA method, the Predication-Area (P-A) plot [24] was applied (Figure 2). According to the result of this P-A plot, the SWARA-MOORA prospectivity map can be used as target map for subsequent detailed explorations.

Table 1. The obtained weights for criteria using SWARA method

Criteria	S_j	K_j	q_j	W_j	Weights
Geochemical anomaly	1.000	1.000	1.000	1.000	0.267
Intrusive	0.300	1.300	0.769	0.7699	0.200
Volcanic	0.300	1.300	0.591	0.591	0.166
Fault	0.180	1.180	0.501	0.501	0.133
Phyllic	0.090	1.090	0.460	0.466	0.121
Argillic	0.065	1.065	0.4317	0.444	0.113

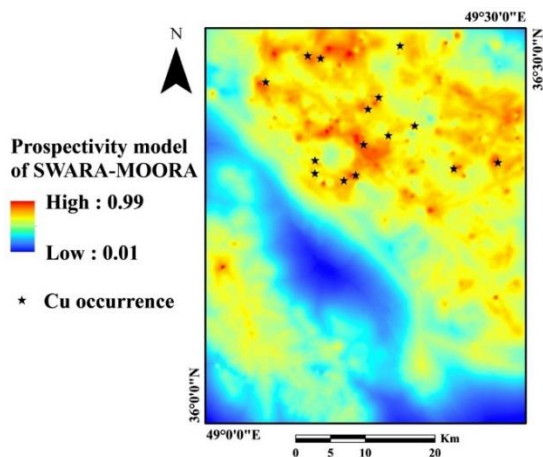


Figure 1. SWARA-MOORA prospectivity map for Cu mineralization in the study area

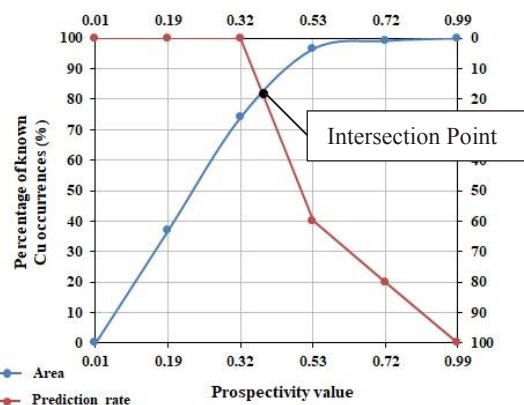


Figure 2. Prediction-area (P-A) plots of SWARA-MOORA prospectivity models

CONCLUSIONS

The present study addresses the successful application of a new hybrid MCDM method called SWARA-MOORA to generate a predictive model for Cu mineralization in the Abhar area. Despite the ability of two methods alone, experience has demonstrated that the combination MCDM methods eventuate to better results. After generating the SWARA-MOORA overlay prospectivity map, P–A plot was used to evaluate its efficiency in predicting favorable areas. Based on the results, the SWARA-MOORA method can provide a potent tool for quantifying the specifications of geo-anomalies and for delimiting of target areas in mineral exploration programs.

REFERENCES

- [1] Bonham–Carter, G. F. (1994). *“Geographic Information Systems for Geoscientists, Modelling with GIS”*. Pergamon, New York, pp. 398.
- [2] Porwal, A., and Carranza, E. J. M. (2015). *“Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration”*. Ore Geology Reviews, 71: 477–483.
- [3] Liu, Y., Cheng, Q., Xia, Q., and Wang, X. (2014). *“Mineral Potential Mapping for Tungsten Polymetallic Deposits in the Nanling Metallogenic Belt, South China”*. Journal of Earth Science, 25(4): 689–700.
- [4] Zuo, R., and Carranza, E. J. M. (2011). *“Support vector machine: a tool for mapping mineral potential”*. Computers & Geosciences, 37(12): 1967–1975.
- [5] Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P., and Gardoll, S. J. (2008). *“Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modeling for iron oxide copper–gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland”*. Australian Journal of Earth Sciences, 55: 25–38.
- [6] Carranza, E. J. M. (2008). *“Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS”*. In Handb. Explor. Environ. Geochem. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 368.
- [7] Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., and Wright, D. F. (1990). *“Statistical pattern integration for mineral exploration”*. In Gaál, G., Merriam, D. F. (Eds.), Computer Applications in Resource Estimation, Pergamon Press, Oxford, 1–21.
- [8] Chen, C., Dai, H., Liu, Y., and He, B., (2011). *“Mineral Prospectivity Mapping Integrating Multisource Geology Spatial Data Sets and Logistic Regression Modelling”*. In Proceedings of IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM), 214–217.
- [9] Harris, D. P., Zurcher, L., Stanley, M., Marlow, J., and Pan, G. (2003). *“A comparative analysis of favourability mappings by weights of evidence probabilistic neural networks, discriminant analysis, and logistic regression”*. Natural Resources Research, 12: 241–255.
- [10] Oh, H. J., and Lee, S. (2010). *“Application of artificial neural network for gold–silver deposits potential mapping: a case study of Korea”*. Natural Resources Research, 19(2): 103–124.
- [11] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2018). *“Investigating the capabilities of multispectral remote sensors data to map alteration zones in the Abhar area, NW Iran”*. Geosystem Engineering. DOI: 10.1080/12269328.2018.1557083.
- [12] Abedi, M., Norouzi, G. H., and Bahroudi, A. (2012a). *“Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas”*. Computers & Geosciences, 46: 272–283.
- [13] Parsa, M., Maghsoudi, A., and Yousefi, M. (2018). *“Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan District, NW Iran”*. Ore Geology Reviews, 92: 97–112.
- [14] Rodriguez-Galiano, V. F., Chica-Olmo, M., and Chica-Rivas, M. (2014). *“Predictive modelling of gold potential with the integration of multisource information based on random forest: a case study on the Rodalquilar area, Southern Spain”*. International Journal of Geographical Information Science, 28: 1336–1354.
- [15] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2006b). *“Bayesian network classifiers for mineral potential mapping”*.

Computers & Geosciences, 32(1): 1–16.

- [16] Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., and Wright, D. F. (1989). “Weights-of-evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential”. In Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F. (Eds.), Statistical Applications in the Earth Sciences. Paper 89–9. Geological Survey of Canada, 171–183.
- [17] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A. (2020). “Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran”. GeoJournal. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>.
- [18] Carranza, E. J. M. (2010). “Improved wildcat modelling of mineral prospectivity”. Resource Geology, 60: 129–149.
- [19] Moon, W. M. (1990). “Integration of geophysical and geological data using evidential belief function”. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28: 711–720.
- [20] Bahrami, Y., Hassani, H., and Maghsoudi, A., (2019). “BWM-ARAS: A new hybrid MCDM method for Cu prospectivity mapping in the Abhar area, NW Iran”. Spatial Statistics, 33. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2019.100382>.
- [21] Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., and Turskis, Z. (2010). “Selection of Rational Dispute Resolution Method by Applying New Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)”. Journal of Business Economics and Management, 11(2): 243-258.
- [22] Brauers, W. K., and Zavadskas, E. K. (2006). “The MOORA method and its application to privatization in a transition economy”. Control and Cybernetics, 35(2): 445–469.
- [23] Cheng, Q., Agterberg, F. P., and Ballantyne, S. B. (1994). “The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods”. Journal of Geochemical Exploration, 51(2): 109-130.
- [24] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M., (2015). “Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping”. Computers & Geosciences, 74: 97-109.