Archive of SID.ir

استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس در ورقه یکصدهزار ابهر، شمال‌غرب ایران

یوسف بهرامی[1]، حسین حسنی*[1]، عباس مقصودی[1]

۱-گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(علمی – پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۵/۲۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸

چکیده

اساساً دلیل تهیه مدل پتانسیل معدنی این است که با شناسایی بهترین نواحی امیدبخش و مناطق اهداف اکتشاف، ناحیه مورد مطالعه محدودتر شده تا با کوچک شدن آن، ریسک عملیات اکتشاف کاهش و با قطعیت بیش‌تری بتوان نواحی امیدبخش را برای متمرکز شدن در مراحل تفصیلی انتخاب نمود. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر تلفیق لایه‌های شاهد مختلف با استفاده از روش ترکیبی AHP-TOPSIS، به منظور شناسایی نواحی امیدبخش مس در ورقه یکصدهزار ابهر می‌باشد. بدین منظور، ۷ لایه شاهد اطلاعاتی شامل آنومالی ژئوشیمیایی مس حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی، نقشه فاصله از واحدهای سنگی آذرین نفوذی و واحدهای آتشفشانی، نقشه فاصله از گسل‌های منطقه و در نهایت نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک در نظر گرفته شد. جهت آماده‌سازی نقشه‌های شاهد برای تلفیق، ابتدا مقادیر نقشه‌ها با استفاده از تابع لجستیکی به فضای مناسب با دامنه (۰-۱) منتقل و سپس توسط روش فرکتالی عیار- مساحت کلاسه‌بندی شدند. در گام بعد معیارها و زیرمعیارهای مختلف توسط روش AHP وزن‌دهی و در ادامه توسط روش TOPSIS تلفیق شدند. نقشه پتانسیل نهایی توسط نمودار Prediction-Area (P-A) مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. بر طبق این نمودار، نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال‌شده مربوطه، مقدار ۷۸ را نشان داد که توان بالای مدل مذکور را در معرفی نواحی امیدبخش مس ثابت می‌کند. در مدل پتانسیل معدنی مس ایجادشده، عمده نواحی پرپتانسیل مس در نیمه شمالی ورقه و در زیرزون طارم معرفی شده است که به خوبی با محل کانسارهای قدیمی مس نظیر خلیفه‌لو، چرگر، الوند، حصار و دوه‌یاتاقی منطبق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ابهر، عیار- مساحت، مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نمودار P-A، AHP-TOPSIS.

*- نویسنده مسئول: Email: hhassani@aut.ac.ir

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مقدمه

شناسایی و اکتشاف صحیح منابع معدنی، مانع از هدر رفتن منابع مالی و انسانی می‌شود. این مسئله ضرورت تهیه نقشه پتانسیل معدنی در اکتشاف ذخایر معدنی را آشکار می‌سازد. تهیه نقشه پتانسیل معدنی فرآیندی بسیار پیچیده است که نیازمند توجه همزمان به نقش فاکتورهای متعدد از منطقه مورد مطالعه می‌باشد تا به اکتشاف نوع خاصی از کانه‌زایی منجر شود. در واقع تهیه نقشه پتانسیل معدنی فرآیندی در جهت جداسازی و تفکیک مناطق مطلوب و دارای پتانسیل معدنی از سایر نواحی موجود در منطقه است (کریمی و همکاران، ۱۳۸۷). جهت نیل به این هدف، لایه‌های اطلاعات مکانی مختلف (ازجمله لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، سنجش از دور، ژئوفیزیک و غیره) از محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری و پس از پردازش، برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM)[1] جهت یافتن مناطق امیدبخش با یکدیگر تلفیق می‌شوند (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008; Nouri et al, 2013; Bahrami et al, 2019; Shahsavar et al, 2019; Ghaeminejad et al, 2020). مراحل اصلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی شامل تعیین فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی، آماده‌سازی اطلاعات، تهیه نقشه‌های فاکتور، تلفیق نقشه‌ها و در نهایت ارزیابی نتایج می‌شود (Karimi et al, 2008; Bonham-Carter, 1994). اساساً دلیل تهیه مدل پتانسیل معدنی (MPM) این است که با شناسایی بهترین نواحی امیدبخش و مناطق اهداف اکتشاف، ناحیه مورد مطالعه محدودتر شده تا با کوچک شدن آن، ریسک عملیات اکتشاف کاهش یافته و با قطعیت بیش‌تری بتوان نواحی امیدبخش را برای متمرکز شدن در مراحل تفصیلی شناسایی نمود. مسئله صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان در عملیات‌های اکتشافی که با صرف هزینه‌های سنگین و زمان طولانی همراه است، از جمله دست‌آورد بسیار مهمی است که در نتیجه استفاده از تلفیق در محیط GIS حاصل شده است. تا به امروز روش‌های متنوعی به‌کار گرفته شده تا داده‌های مکانی را با یکدیگر تلفیق و مناطق دارای پتانسیل را استخراج کرد (Porwal et al, 2003). روش‌های دانش و داده‌محور دو نوع روش اصلی مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM) برای تلفیق لایه‌های وزن‌دار مختلف جهت شناسایی نواحی امیدبخش معدنی می‌باشند (Carranza, Bonham-Carter, 1994; Bahrami et al, 2019; 2008). روش‌های داده-محور عمدتا برای مناطقی استفاده می‌شود که کار اکتشافی در آن‌ها به خوبی صورت گرفته (Brown Fields) و دارای تعداد قابل توجهی اندیس و کانسار هستند که احتمال رخداد کانه‌زایی در آن‌ها بالا می‌باشد (Bahrami et al, 2019) و مختصات آن‌ها در تعیین روابط مکانی داده‌ها به عنوان نقاط آموزشی در نظر گرفته می‌شوند (Abedi et al, 2013). از جمله این روش‌ها می‌توان شبکه‌های عصبی (Porwal et al, 2003)، روش بیزین (Bonham-Carter et al, 1988)، رگرسیون لجستیکی (Chung and Agterberg, 1980) و وزن‌های نشانگر (Agterberg and Cheng, 2002) را نام برد. در مقابل روش‌های دانش‌محور بر پایه نقطه‌نظرات کارشناسی در مورد اهمیت نقشه‌های فاکتور در فرآیند تهیه نقشه پتانسیل معدنی گسترش یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان روش-های تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر تحلیل سلسله مراتبی (Hosseinali and Alesheikh, 2008; Bahrami et al, 2020)، منطق فازی (An et al, 1991; Bahrami et al, 2020)، پرومته (Abedi et al, 2011)، شاخص همپوشانی (Yousefi and Carranza, 2015) و روش اولویت‌بندی با شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) (Ataei et al, 2008)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اشاره کرد. روش‌های اخیر عمدتا در تهیه MPM برای مناطقی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در آن‌ها مطالعات اکتشافی کمی صورت گرفته است (Green Fields). مسئله مهمی که در تصمیم-گیری‌های مکانی وجـود دارد، چگونگی ترکیب نقشه‌های معیار است. در این مطالعه، از روش ترکیبی AHP-TOPSIS جهت شناسایی نواحی امیدبخش مس در ورقه یکصدهزار ابهر استفاده شده است. روش‌های AHP و TOPSIS از جمله روش‌های MCDM هستند که از روش AHP برای محاسبه وزن معیارها (و زیرمعیارها) و از روش TOPSIS برای رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده شده است. علیرغم توانایی هر روش به تنهایی، تجربه نشان داد که ترکیب دو یا چند روش و استفاده همزمان از آن‌ها نتایج بهتری را در پی خواهد داشت (Pazand and Hezarkhani, Porwal et al, 2004; Bahrami et al, 2019; 2015). روش TOPSIS به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک چندمعیاره، از جمله روش‌های قدرتمند در ارزیابی همزمان چندین مورد انتخاب شده می‌باشد که اولین بار توسط پازند و همکاران (Pazand et al, 2012) در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گرفت. اساس تلفیق لایه‌های اکتشافی در این تکنیک، نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل مثبت[۲] (PIS) و حداکثر فاصله تا راه‌حل ایده‌آل منفی[۳] (NIS) است (Asadi et al, 2016). این روش همچنین به صورت ترکیبی در کنار روش AHP به منظور شناسایی مناطق پرپتانسیل در شمال‌غرب ایران توسط پازند و هزارخانی (Pazand and Hezarkhani, 2015) مورد استفاده واقع شده است. روش AHP-TOPSIS، دو گام اساسی را در بر می‌گیرد: ۱) ابتدا مقادیر وزنی هر یک از لایه‌های اکتشافی (معیارها) با استفاده از روش AHP و براساس نظر کارشناسان تعیین و محاسبه می‌شود، ۲) الگوریتم TOPSIS جهت تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Asadi et al, 2016). در این مطالعه، به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی ۷ لایه شاهد اطلاعاتی شامل نقشه پیوسته ژئوشیمیایی منتج از روش تحلیل مؤلفه اصلی[۴] (PCA)، دو لایه فاصله از واحدهای سنگی (واحدهای نفوذی ائوسن و واحدهای آتشفشانی ائوسن)، نقشه پیوسته فاصله از گسل‌های منطقه و سه نقشه پیوسته فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک در نظر گرفته شد. به منظور وزن‌دهی لایه‌های شاهد توسط روش AHP، نخست لازم است تا این نقشه-های پیوسته مکانی، همگی به کلاس‌های مختلف تفکیک شوند که بدین منظور از روش فرکتالی عیار- مساحت استفاده شد. روش فرکتالی عیار-مساحت در مقابل روش‌های مبتنی بر آمار کلاسیک قرار دارد که علاوه بر توزیع فراوانی داده‌ها، موقعیت فضایی آن‌ها را نیز در نظر می‌گیرد (Cheng et al, 1994). بدین‌ترتیب نقشه‌های کلاسه‌بندی شده وزن‌دار ایجاد شده که در گام بعدی با استفاده از الگوریتم TOPSIS مورد تلفیق واقع شدند. در نهایت مدل حاصل از روش AHP-TOPSIS، توسط نمودار Predication-Area (P-A) (Yousefi and Carranza, 2015) مورد ارزیابی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

زمین‌شناسی منطقه

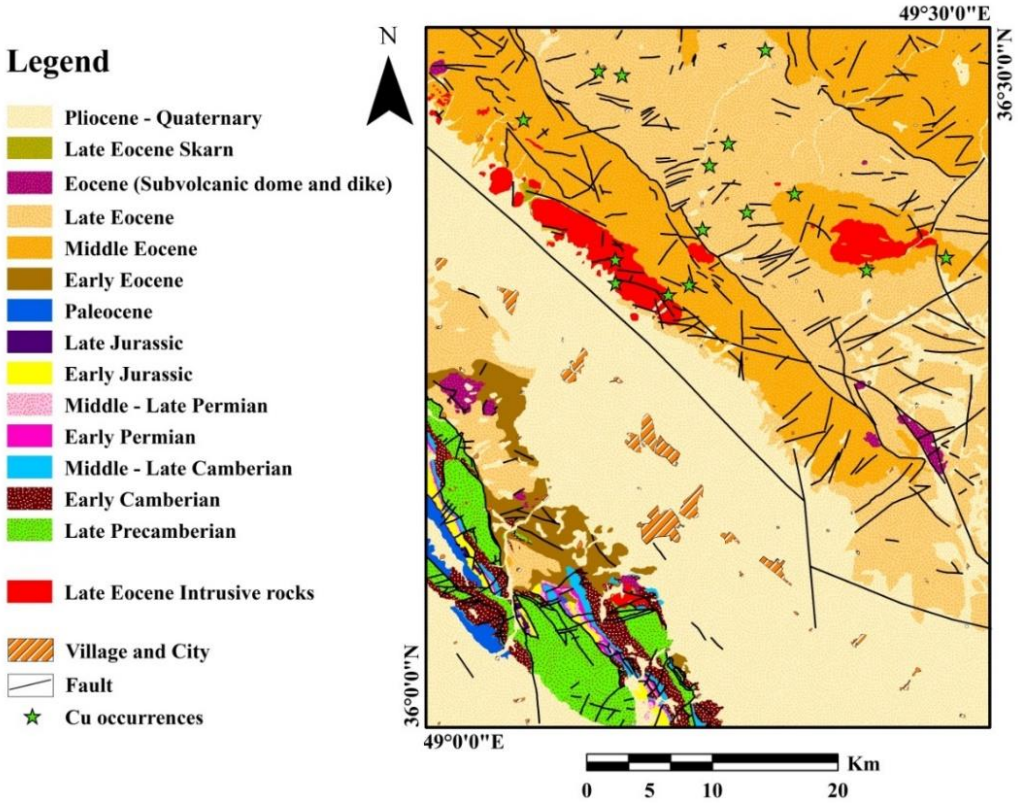
ناحیه مورد مطالعه در شمال باختر ایران و در گوشه جنوب‌خاوری چهارگوش ۱:۲۵۰،۰۰۰ زنجان، بین طول‌های خاوری '۰۰ °۴۹ تا '۳۰ °۴۹ و عرض‌های شمالی '۰۰ °۳۶ تا '۳۰ °۳۶ واقع شده است. محدوده ورقه ابهر از نگاه ساختاری، بخش‌هایی از دو زیرزون طارم و سلطانیه را در برمی‌گیرد. زیرزون طارم به پیکر یک فرازمین با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاور، یک کمان ماگمایی مرکب از نهشته‌های آتشفشانی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

و آتشفشان‌های ائوسن است که توسط توده‌های نفوذی الیگوسن تحت‌تأثیر قرار گرفته و در حقیقت دنباله نوار آتشفشانی- نفوذی البرز باختری است. زیرزون سلطانیه به صورت یک فرازمین با روند شمال‌باختر- جنوب‌خاوری موازی با زیرزون طارم، به‌طور عمده از نهشته‌های رسوبی پرکامبرین- پالئوزوئیک (و بسیار کم‌تر مزوزوئیک) پدید آمده است (Hirayama et al, 1966).

زیرزون طارم که غالباً از نهشته‌های آتشفشانی و آتشفشانی- آواری سازند کرج تشکیل شده، نشان‌دهنده فعالیت‌های آتشفشانی در یک حوضه رسوبی کم‌عمق با فازهای متناوب انفجاری و خروج روانه‌های آندزیتی، داسیتی و بسیار اندک ریولیتی است. تکتونیک ملایم زیرزون طارم در ارتباط با نفوذ توده‌های گرانیتی به درون این کمان ماگمایی می‌باشد که باعث سخت شدن و پایداری آن در برابر فرآیندهای تکتونیک آلپ میانی و پسین شده است. زیرزون سلطانیه که در حقیقت پی‌سنگ بالا آمده پرکامبرین- پالئوزوئیک در زون اصلی ایران مرکزی است، به صورت یک رشته طویل و باریک، دارای رخساره‌های سنگی پرکامبرین و پالئوزوئیک و حتی مزوزوئیک است که به‌طور کامل همسان با البرز می‌باشد و چنین می‌نماید که در زمان پرکامبرین تا سرانجام ژوراسیک، حوضه رسوبی واحدی را با البرز تشکیل داده است. این زیرزون بالا آمده باریک و کشیده دارای مرز شمال خاوری گسله با حوضه فرو رفته ابهر است و بالاآمدگی در امتداد گسله طویل را نشان می‌دهد (Hirayama et al, 1966). در این ناحیه سنگ‌های ولکانیکی ائوسن با یک دگرشیبی واضح در تماس با رسوباتی از سازندهای مختلف که قدمت بعضی از آن‌ها به زمان پرکامبرین نیز می‌رسد، قرار گرفته است.



شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ ابهر (اختیارآبادی، ۱۳۹۱؛ قلی‌پور، ۱۳۸۸)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

با توجه به دو ویژگی ساختاری متفاوت زیرزون‌های طارم و سلطانیه، محدوده ورقه ابهر شامل دو پهنه ساختاری و متالوژنیکی متفاوت در بخش شمالی (زیرزون طارم) و جنوبی (زیرزون سلطانیه) می‌باشد. زیرزون طارم که عمدتاً دارای توان معدنی کانی‌سازی مس، سرب و روی و طلا به صورت رگه‌ای است که در این رابطه قابل بررسی‌های بیشتر اکتشافی می‌باشد. در این زیزون، مس چرگر، خلیفه‌لو، حصار، دوه‌یاتاقی، فیله‌ورین، علی‌آباد، الوند، پالاس، مرشون، زه‌آباد، غنچه‌خوران و باریک‌آب همگی از نوع مس رگه‌ای گزارش شده‌اند. زیرزون سلطانیه نیز با توجه به نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی دوران با زمان پرکامبرین بالایی در نهشته‌های سازند کهر و توده‌های گرانیتوئیدی الیگوسن در دولومیت‌های سلطانیه و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن، نویدبخش کانی‌سازی اسکارن آهن و مس در این زیرپهنه است. علاوه بر آن ذخایر عظیم سیلیس در افق کوارتزیت فوقانی و فسفات رسوبی در سازند سلطانیه نیز در این پهنه، اهمیت معدنی آن را نشان می‌دهد (قلیپور، ۱۳۸۸). از جمله کانسارهای مهم منطقه، کانسار سرب و روی زه‌آباد، مس خلیفه‌لو، مس چرگر، کانسار سرب و روی باریک‌آبرا می‌توان نام برد. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه یکصدهزار ابهر نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

روش تحلیل سلسله مراتبی [۵](AHP)

در ارزیابی هر موضوعی ما نیاز به معیار اندازه‌گیری با شاخص داریم. انتخاب شاخص مناسب به ما این امکان را می‌دهد که مقایسه درستی بین جایگزین‌ها به عمل آوریم. اما وقتی که چند یا چندین شاخص برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود، کار ارزیابی پیچیده می‌شود و پیچیدگی کار زمانی بالا می‌گیرد که معیارهای چندین‌گانه باهم در فضا و از جنس‌های مختلف باشند. در این هنگام کار ارزیابی و مقایسه از حالت ساده تحلیلی که ذهن قادر به انجام آن است، خارج می‌شود و به یک ابزار تحلیل عملی قوی نیاز خواهد بود. یکی از ابزارهای توانمند برای چنین وضعیت‌هایی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) است. مدل AHP اولین بار توسط توماس. ال. ساعتی (Saaty, 1980, 1990) برای تحلیل مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌صورت یک فرآیند سلسله مراتبی، براساس مقایسه زوجی اهمیت معیارها و زیرمعیارهای اکتشافی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Saaty, 2005). این فرآیند شامل سه گام اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، قضاوت مقایسه‌ای معیارها و زیرمعیارها و تلفیق نهایی براساس وزن‌های رتبه‌ای اختصاص داده شده می‌باشد (Pazand and Hezarkhani, 2015). کاربرد روش تحلیل سلسله مراتبی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی و در واقع تخصیص وزن به شواهد، توسط افراد مختلفی توسعه پیدا کرده است (Moreira et al, 2003; Hosseinali and Alesheikh, 2008; De Araújo and Macedo, 2002). در تخصیص وزن در روش AHP، معیارها به‌منظور بررسی میزان اهمیت هرکدام از آن‌ها دو به دو مورد مقایسه قرار می‌گیرند. با استفاده از روش عناصر مربوط به سطح میانی (معیارها و زیرمعیارها) به صورت مقایسه زوجی و با استفاده از جدول پیشنهاد داده شده توسط ساعتی (Saaty, 2005) (جدول ۱) از حالت کیفی به کمی تبدیل شده و در نهایت با توجه به هدف تصمیم‌گیری رتبه‌بندی می‌شوند. ماتریس مقایسه زوجی برای n معیار (یا زیرمعیار) مختلف به صورت رابطه ۱ تعریف شده و سپس مقادیر وزنی مناسب معیارها (یا زیر معیارها) طبق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

رابطه ۱)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_1{}^{n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a^{n}{}_1 & \cdots & a^{nn} \end{bmatrix}$$

رابطه ۲)

$$a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}} ; a_{ij} = 1 \forall i.$$

$$AW = \lambda_{max} W$$

جدول ۱: چگونگی ارزش‌گذاری شاخص‌ها نسبت به هم (Saaty, 1990)

ارزش ترجیحی	وضعیت i نسبت به j	توضیحات
۱	اهمیت برابر	گزینه یا شاخص i نسبت به j اهمیت برابر دارند و یا ارجحیتی نسبت به هم ندارند.
۳	نسبتا مهم‌تر	گزینه یا شاخص i نسبت به j کمی مهم‌تر است.
۵	مهم‌تر	گزینه یا شاخص i نسبت به j مهم‌تر است.
۷	خیلی مهم‌تر	گزینه یا شاخص i دارای ارجحیت خیلی بیشتری از j است.
۹	کاملا مهم	گزینه یا شاخص i مطلقا از j مهم‌تر و قابل مقایسه با j نیست.
۲، ۴، ۶ و ۸		ارزش‌های میانی بین ارزش‌های ترجیحی را نشان می‌دهد

- روش اولویت‌بندی با شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS)

الگوریتم TOPSIS در ابتدا توسط هووانگ و یون (Hwang and Yoon, 1981) ارائه شد. اساس این روش بدین‌صورت است که گزینه‌ها باید کمترین فاصله را تا راه‌حل ایده‌آل مثبت (PIS)[۶] و حداکثر فاصله تا راه‌حل ایده‌آل منفی (NIS)[۷] دارا باشند (Samimi Namin et al, 2008). برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش TOPSIS باید مراحل زیر را انجام داد:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری لایه‌های شاهد اطلاعاتی (زمین‌شناسی، ژئوشیمی و غیره)

گام دوم: تشکیل ماتریس تصیم‌گیری نرمال‌شده؛ مقدار نرمال‌شده r_{ij} از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

رابطه ۳)

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} f_{ij}{}^{2}}}. \; i = 1.2.\ldots.n \;\&\; j = 1.2.\ldots.m$$

گام سوم: تعیین ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده موزون V_{ij}؛ در این مرحله ابتدا وزن هر یک از شاخص‌ها مشخص می‌شود و یک ماتریس مربعی شامل وزن شاخص‌ها (W_j) تعیین می‌گردد که درایه‌های قطر اصلی آن، وزن هر یک از شاخص‌ها می‌باشد و بقیه درایه‌ها صفر می‌باشد. در ادامه به وسیله ضرب ماتریس وزن‌ها در ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده، ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده موزون به دست می‌آید.

رابطه ۴)

$$V_{ij} = W_j \times r_{ij}. i = 1.2.\ldots.m$$

گام چهارم: مشخص کردن گزینه ایده‌آل و گزینه ضد ایده‌آل

رابطه ۵)

$$\text{گزینه ایده‌آل} \left(A_j^{+}\right) = \left[V_j^{+} \mid V \text{ بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس}\right]$$

رابطه ۶)

$$\text{گزینه ایده‌آل} \left(A_j^{-}\right) = \left[V_j^{-} \mid V \text{ بردار بهترین مقدار هر شاخص در ماتریس}\right]$$

برای شاخص‌های مثبت، بهترین مقدار همان بیشترین مقدار است و بدترین مقدار، همان کمترین مقدار است. همچنین برای شاخص‌های منفی، بهترین مقدار، کمترین مقدار و بدترین مقدار، بیشترین مقدار می‌باشد.

گام پنجم: به دست آوردن فاصله هر گزینه از گزینه ایده‌آل و گزینه ضد ایده‌آل

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

رابطه ۷)

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^+)^2}$$

$$i = 1.2.\ldots.m$$

رابطه ۸)

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^-)^2}$$

$$i = 1.2.\ldots.m$$

s_i^+ برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ایده‌آل و S_i^- برابر با فاصله هر گزینه تا گزینه ضد ایده‌آل است.

گام ششم: محاسبه شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه با گزینه ایده‌آل؛ بدین‌منظور شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه (Cl_i^*) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید و در انتها براساس مقدار Cl_i^* رتبه‌بندی انجام می‌گیرد.

رابطه ۹)

$$Cl_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$$

نتایج

مدل‌سازی، بحث و بررسی

متناسب با تیپ کانه‌زایی‌های مس هدف که همگی از نوع رگه‌ای هستند و همچنین براساس شواهد و داده‌های اکتشافی موجود از ورقه یکصدهزار ابهر، ۷ لایه شاهد در قالب ۳ فاکتور اصلی برای مدل‌سازی نواحی امیدبخش مس مورد استفاده قرار گرفت که عبارتند از:

الف) معیار ژئوشیمیایی: هدف از ایجاد این لایه، شناخت الگوهای رفتاری عناصر موردنظر در محیط نمونه‌برداری و جدایش مقادیر آنومال در رابطه با کانه‌زایی است. با توجه به اهمیت ویژه روابط و همبستگی ژنتیکی مستقیم و معکوس بین عناصر در کانسارهای گوناگون، عناصر مذکور تحت مطالعه و بررسی‌های دو و چندمتغیره قرار گرفتند که بدین‌منظور از ۸۷۹ نمونه رسوب آبراهه‌ای برداشت-شده توسط سازمان زمین‌شناسی (GSI) استفاده گردید. از جمله روش‌های به کار گرفته شده تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) است که ابزاری مناسب برای تبدیل مقادیر عیاری چندعنصری به حالت تک‌مؤلفه‌ای می‌باشد. براساس روش PCA، مس همراه با کبالت و عناصر سنگ‌ساز در فاکتور اول (PC1) قرار گرفتند؛ بنابراین لایه ژئوشیمیایی پیوسته PC1 به عنوان لایه شاهد ژئوشیمیایی جهت مدل‌سازی نواحی امیدبخش مس انتخاب شد.

ب) معیار زمین‌شناسی: نقشه زمین‌شناسی یکی از لایه‌های مهم اطلاعاتی در بحث مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌باشد. با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ورقه یکصدهزار ابهر که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور تهیه و تدوین شده است، تمامی واحدهای زمین‌شناسی موجود در منطقه به صورت دستی در محیط ArcGIS به صورت رقومی درآمده، سپس نقشه پیوسته فاصله از توده‌های نفوذی و ولکانیک که از لحاظ ژنتیکی، نزدیکی زیادی با کانه‌زایی مس در منطقه موردمطالعه دارند، ایجاد گردید. نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری نیز در شناسایی و کشف مواد معدنی در مناطق متأثر از فعالیت‌های ماگمایی و گرمابی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به‌طور کلی محل برخورد گسل‌ها و همچنین محل برخورد شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های برشی می‌تواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلول‌های کانه‌دار و کانه‌زایی باشد (Forster, 1978). بر این اساس، گسل‌های برداشت‌شده از منطقه ابهر توسط سازمان زمین-شناسی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای بازبینی شده و در محیط ArcGIS به صورت رقومی درآمده و سپس نقشه فاصله از گسل نیز به عنوان یکی دیگر از لایه‌های شاهد اطلاعاتی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی ایجاد گردید.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

پ) معیار دورسنجی: شناخت نواحی دگرسانی یکی از عوامل تشخیص مناطق کانه‌دار است. اگر در تشخیص این مناطق، نوع دگرسانی مشخص گردد، می‌تواند در تعیین الگویی مناسب جهت کانه‌زایی منطقه مفید باشد (Bahrami et al, 2018). 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 ذخائر معدنی برخوردار می‌باشند. با توجه به ارتباطی که کانه‌زایی عناصری نظیر مس، سرب و روی می‌تواند با دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک داشته باشد، لذا در این پژوهش از سنجنده چندطیفی استر به‌منظور شناسایی نواحی واجد این دگرسانی‌ها استفاده گردید. سپس دگرسانی‌های تشخیص داده شده در نرم‌افزار ENVI، جهت انتقال به محیط ArcGIS، به صورت شیپ‌فایل ذخیره شده و در نهایت در نرم‌افزار ArcGIS نقشه نهایی پیوسته فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک ایجاد گردید.

فازی‌سازی لایه‌های اکتشافی

چون لایه‌های شاهد دارای مقادیر کمینه و بیشینه مشابه نیستند، لذا با استفاده از روش‌های مبتنی بر منطق فازی، مقادیر مربوط به لایه‌های شاهد به یک فضای جدید با دامنه ۰ تا ۱ منتقل می‌شوند. در این پژوهش از تابع لجستیک سیگموئیدی بدین‌منظور استفاده شده است که نه‌تنها اجازه تفکیک و جدایش بهتری از آنومالی‌های ژئوشیمیایی را در اختیار ما قرار می‌دهد، بلکه نرخ پیش‌بینی توسط رخدادهای معدنی را نیز بهبود می‌بخشد (Parsa et al, 2016a). مزیت این تابع این است که می‌تواند با استفاده از مقادیر مناسب i و s، اعداد صحیح و مقادیر شناور در محدوده‌های مختلف را به (۱-۰) تبدیل کند (یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵):

رابطه ۱۰)

$$F_x = \frac{1}{1+ e^{-s\,(x-i)}}$$

که در این رابطه، F_x و x به ترتیب مقادیر تبدیل یافته و مقادیر اولیه داده‌های ژئوشیمیایی هستند. s و i به ترتیب مقادیر شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی می‌باشند، که از روابط ۱۱ قابل محاسبه می‌باشند. نقشه‌های فازی‌سازی شده لایه‌های شاهد اکتشافی در شکل ۲ نشان داده شده است.

رابطه ۱۱)

$$i = \frac{max(x)-min(x)}{2},$$

$$s=\frac{2\,Ln\,99}{max(x)-min(x)}$$

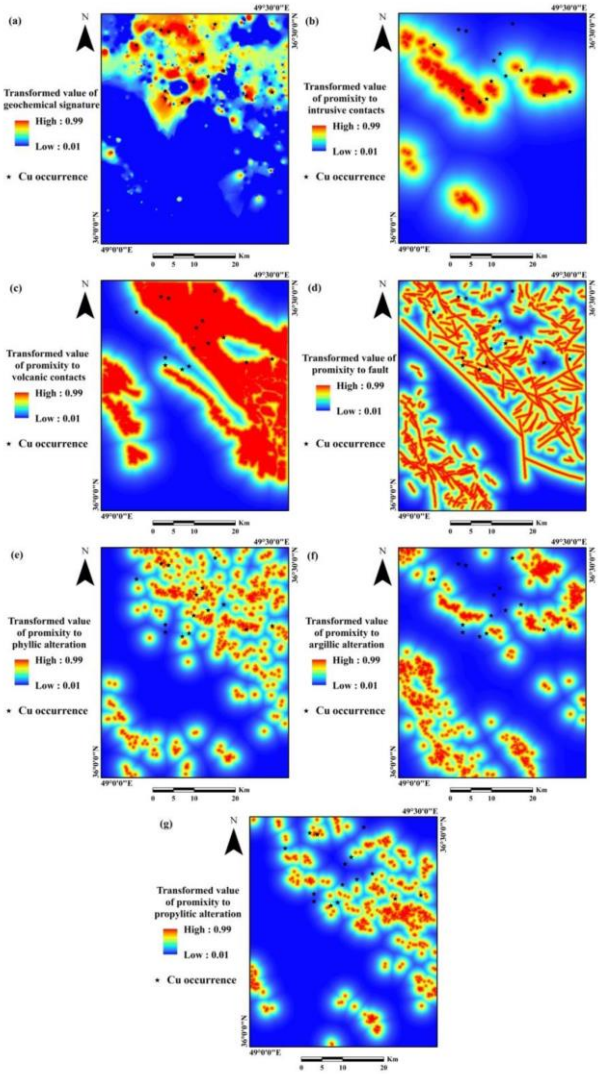
گسسته‌سازی نقشه‌های شاهد

در این پژوهش به منظور گسسته‌سازی و کلاسه‌بندی مقادیر پیوسته مکانی در لایه‌های اطلاعاتی شاهد به‌منظور دست یافتن به نقشه‌های کلاسه‌بندی‌شده وزن‌دار از روش فرکتالی عیار-مساحت (C-A)[۸] استفاده شده است. روش فرکتالی عیار- مساحت (C-A) است توسط چنگ و همکارانش (Cheng et al, 1994) ارائه شد. این روش مبتنی بر مساحتی است که هر عیار خاص در منطقه اشغال نموده است. هر چه عیار عنصر افزایش یابد، مقدار مساحت اشغالی توسط آن کاهش می‌یابد. بزرگترین مزیت این روش این است که علاوه بر در نظر گرفتن فراوانی داده‌ها، میزان مساحت اشغال‌شده توسط آن‌ها را نیز لحاظ می‌کند؛ یعنی همزمان با فراوانی داده‌ها، تغییرات فضایی آن‌ها روی زمین نیز بررسی شده و طبق آن می‌توان با اعتماد بالایی جوامع آنومال را از مقادیر زمینه جدا نمود و به همین دلیل روش بسیار موفقی در جدایش جوامع ژئوشیمیایی به شمار می‌رود (Parsa et al, 2016). یکی از کاربردهای این روش، استفاده از شمارش جعبه‌ای برای شناسایی و جداسازی حدود آستانه‌ای است. در این روش

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

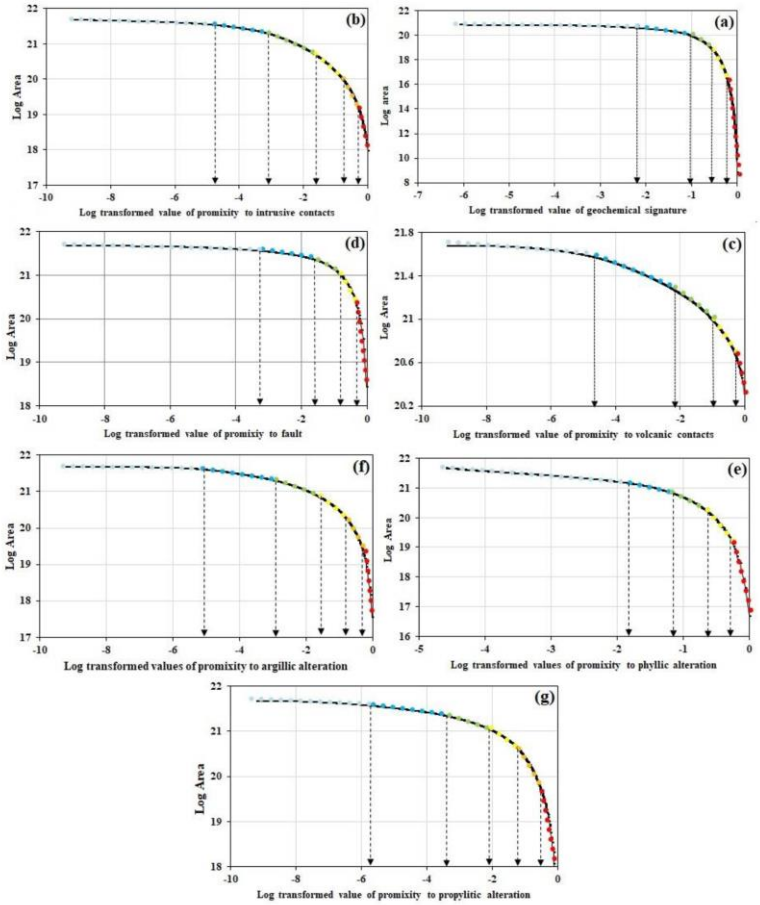
مساحت کل پیکسل‌های مربوط به یک عیار مشخص با یکدیگر جمع و داده‌های به دست آمده در قالب یک نمودار تمام‌لگاریتمی عیار در مقابل مساحت رسم می‌شوند (Cheng et al, 1994; Afzal et al, 2019). سپس جهت تعیین جوامع مختلف براساس قانون کمترین مربعات خطوطی را بر نقاط نمودار برازش داده و براساس آن حدود آستانه و تعداد جوامع مختلف تعیین گردید. نقاط شکست در این نمودار بیانگر تغییر جامعه‌ای به جامعه‌ای دیگر و به تبع آن تغییرات در شرایط زمین‌شناسی به خصوص کانی‌سازی است (Yousefi and Carranza, 2015). در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودارهای تمام‌لگاریتمی و نقشه-های شاهد کلاسه‌بندی شده را که از روش فرکتالی عیار- مساحت حاصل گردیده، نشان داده شده است.



شکل ۲: لایه‌های شاهد مختلف فازی‌سازی شده با استفاده از تابع لجستیک سیگموئیدی: a) نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مس، b) نقشه فاصله از واحدهای نفوذی، c) نقشه فاصله از واحدهای ولکانیک، d) نقشه فاصله از گسل‌های منطقه، e) نقشه فاصله از دگرسانی آرژیلیک، f) نقشه فاصله از دگرسانی فیلیک و g) نقشه فاصله از دگرسانی پروپیلیتیک.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۳: نمودار تمام‌لگاریتمی حاصل از روش فرکتالی عیار مساحت مربوط به: a) آنومالی ژئوشیمیایی مس، b) فاصله از واحدهای نفوذی، c) فاصله از واحدهای ولکانیک، d) فاصله از گسل‌های منطقه، e) فاصله از دگرسانی آرژیلیک، f) فاصله از دگرسانی فیلیک و g) فاصله از دگرسانی پروپیلیتیک.

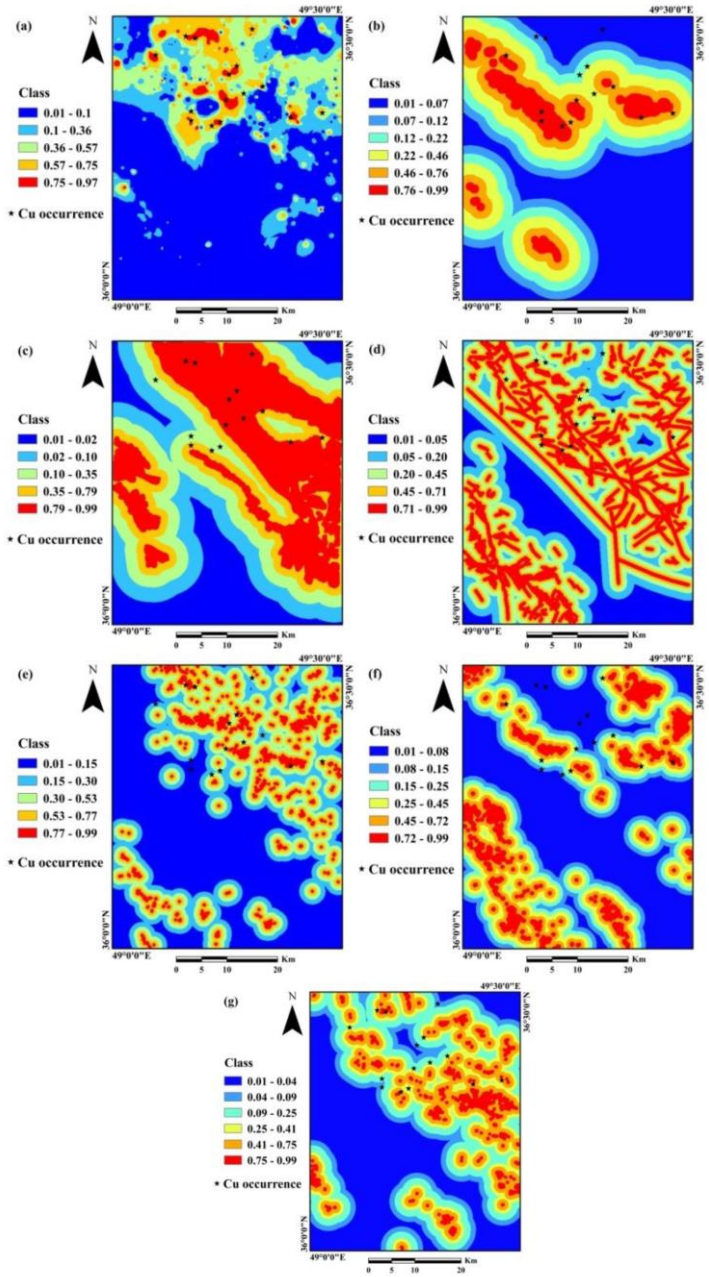
تلفیق لایه‌های اکتشافی

همان‌طور که قبلا گفته شد، هدف از این مطالعه، شناسایی نواحی امیدبخش مس با استفاده از روش ترکیبی AHP- TOPSIS است که در ۳ گام اصلی قابل انجام است (Pazand and Hezarkhani, 2015): ۱) تعیین معیارها براساس اطلاعات اکتشافی موجود در منطقه، ۲) تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها و ۳) تلفیق نهایی و تعیین نواحی امیدبخش مس. ابتدا در گام نخست، ۷ معیار اکتشافی متناسب با نظر متخصصین در نظر گرفته شد که عبارتند از: نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مس حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی، نقشه فاصله از واحدهای سنگی آذرین نفوذی و واحدهای ولکانیک، نقشه فاصله از گسل‌های منطقه و در نهایت نقشه‌های فاصله از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک. در گام بعدی، برای معیارهای برشمرده، ماتریس مقایسه زوجی ایجاد شده که در نهایت با استفاده از روش AHP به هر یک از معیارها و زیرمعیارها وزن مناسبی اختصاص داده شد (جدول ۲ و ۳). در گام نهایی، نقشه موزون معیارهای مختلف در قالب 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 ۷×۳۶۱۶۳۸ در نظر گرفته شدند. تمامی جایگزین‌ها با استفاده از روش TOPSIS براساس نزدیکی به راه‌حل

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ایده‌آل مثبت و دوری از ضد ایده‌آل‌ها وزن‌دهی و در نهایت رتبه‌بندی شده و در نهایت منجر به تولید نقشه مناطق امیدبخش مس با استفاده از روش AHP-TOPSIS می‌شود (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشخص است، همبستگی بالایی بین مناطق امیدبخش پیش‌بینی شده حاصل از روش AHP-TOPSIS و رخدادهای معدنی که پیش از این شناخته شده‌اند، وجود دارد و همین امر می‌تواند شاهدی بر عملکرد موفقیت‌آمیز مدل حاصله باشد.



شکل ۴: نقشه‌های کلاسه‌بندی شده حاصل از روش فرکتالی عیار-مساحت مربوط به: a) آنومالی ژئوشیمیایی مس، b) فاصله از واحدهای نفوذی، c) فاصله از واحدهای ولکانیک، d) فاصله از گسل‌های منطقه، e) فاصله از دگرسانی آرژیلیک، f) فاصله از دگرسانی فیلیک و g) فاصله از دگرسانی پروپیلیتیک.

Archive of SID.ir

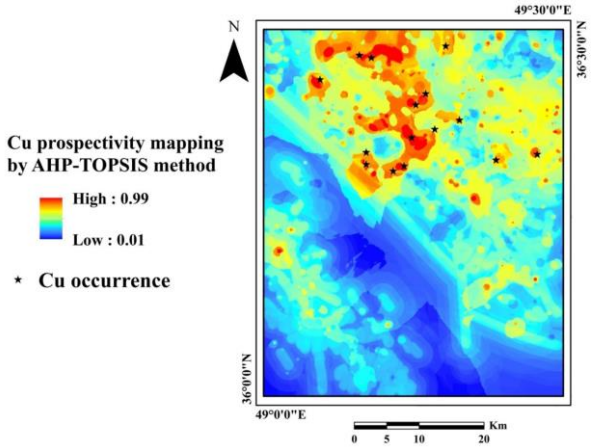
Archive of SID.ir

جدول ۲: اوزان اختصاصی به لایه‌های شاهد جهت پتانسیل‌یابی مس با استفاده از روش AHP

Criteria	Weights	Inconsistency Ratio
PC1	0.353	
Intrusive	0.24	
Volcanic	0.159	
Fault	0.104	0.03
Phyllic	0.068	
Argillic	0.045	
Propylitic	0.031	

جدول ۳: اوزان اختصاصی به زیرلایه‌های معیارهای شاهد اطلاعاتی با استفاده از روش AHP

Criteria	Sub-criteria	Weight	Inconsistency ratio	Criteria	Sub-criteria	Weight	Inconsistency ratio
Multi-element geochemical signature	class 1	0.439	0.04	Proximity to phyllic alteration	class 1	0.40	0.03
	class 2	0.243			class 2	0.282	
	class 3	0.18			class 3	0.167	
	class 4	0.077			class 4	0.09	
	class 5	0.061			class 5	0.061	
Proximity to intrusive contacts	class 1	0.360	0.06	Proximity to argillic alteration	class 1	0.42	0.03
	class 2	0.272			class 2	0.263	
	class 3	0.15			class 3	0.159	
	class 4	0.111			class 4	0.097	
	class 5	0.067			class 5	0.061	
	class 6	0.04		Proximity to propylitic alteration	class 1	0.382	0.04
Proximity to volcanic contacts	class 1	0.419	0.07		class 2	0.25	
	class 2	0.273			class 3	0.16	
	class 3	0.15			class 4	0.101	
	class 4	0.087			class 5	0.064	
	class 5	0.071			class 6	0.043	
Proximity to fault	class 1	0.42	0.05				
	class 2	0.262					
	class 3	0.145					
	class 4	0.112					
	class 5	0.061					



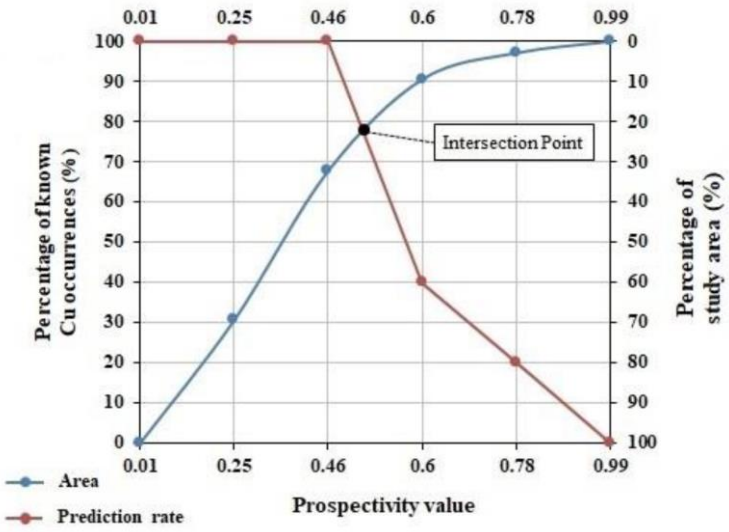
شکل ۵: نقشه نواحی امیدبخش مس حاصل از روش ترکیبی AHP-TOPSIS

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اعتبارسنجی مدل پتانسیل معدنی

اندازه‌گیری و سنجش اعتبار مدل‌های ایجاد شده امری ضروری است که هدف از آن، تعیین اعتبار مدل‌ها و یا انتخاب بهترین مدل از میان مدل‌های پیش‌گوی پتانسیل معدنی می‌باشد. در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل نهایی حاصل از روش AHP-TOPSIS، از نمودار Prediction-Area (P-A) استفاده شده است. این نمودار از کارآمدترین روش‌ها در ارائه خصوصیات تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به صورت کمی برآورد می‌کند (Yousefi and Carranza, 2015). بدین منظور از نقشه‌های کلاسه‌بندی شده با استفاده از روش فرکتال عیار- مساحت جهت تعیین تعداد اندیس‌های قرار گرفته در هر کلاس و همچنین تعیین حدود آستانه‌ای استفاده شد. سپس نمودار نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده برای هر کلاس از نقشه‌های نهایی نسبت به حد آستانه‌ای متناظرش رسم گردید. 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 عدد ۷۸ را نشان می‌دهد که توانمندی مدل در شناسایی نواحی امیدبخش مس را اثبات می‌کند.



شکل ۶: نمودار P-A مربوط به مدل‌های پتانسیل معدنی حاصل از روش AHP-TOPSIS

نتیجه‌گیری

به کارگیری همزمان سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در انتخاب و اولویت‌بندی مناطق مستعد کانه‌زایی جهت انجام عملیات اکتشاف تفصیلی، نقش مهمی در کمی-سازی و تلفیق لایه‌های مختلف ایفا می‌کند. مطالعه حاضر به کاربرد موفقیت‌آمیز روش ترکیبی AHP-TOPSISبه عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره در شناسایی مناطق پرپتانسیل مس در ورقه یکصدهزار ابهر می‌پردازد. در این راستا، ۷ معیار اکتشافی در قالب لایه‌های شاهد اطلاعاتی در نظر گرفته شد. لایه‌های مزبور پس از فازی‌سازی توسط تابع لجستیک سیگموئیدی، با استفاده از روش فرکتالی عیار- مساحت (C-A) به منظور

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تعیین جوامع مختلف، گسسته‌سازی شدند. در ادامه، معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش AHP وزن‌دهی و در نهایت با استفاده از روش TOPSIS تلفیق شدند. علیرغم توانایی هر روش به تنهایی، تجربه نشان داده است که ترکیب دو یا چند روش و استفاده همزمان از آن‌ها نتایج بهتری را در پی خواهد داشت. به عنوان مثال، روش TOPSIS بر خلاف روش AHP، امکان بهره‌مندی مستقیم از اولویت و قضاوت‌های کارشناسان را ندارد؛ در واقع اوزان اختصاصی به معیارها که از روش AHP یا سایر روش‌های وزن‌دهی حاصل می‌شوند، به دقیق‌تر شدن نتیجه نهایی منجر خواهد شد. همچنین روش AHP نیز علیرغم کلاسه‌بندی معیارهای شاهد، مساحت بزرگتری را به عنوان منطقه امیدبخش معرفی می‌کرد، لذا تصمیم بر آن شد تا از تلفیق هر دو روش بهره گرفته شود. در واقع، در روش ترکیبی (AHP-TOPSIS) از دو نوع وزن استفاده می‌شود: وزن‌های معیار و وزن‌های ترتیبی. وزن‌های معیار نشان دهنده اهمیت نسبی هر کدام از معیارهای ارزیابی (لایه‌ها یا نقشه‌های شاهد اکتشافی) هستند. اما وزن‌های ترتیبی براساس موقعیت مکانی سلول های لایه‌ها اختصاص داده می‌شوند. استفاده همزمان این دو روش در کنار یکدیگر، در نهایت منجر به کاهش مساحت مناطق امیدبخش و افزایش صحت پیش‌بینی خواهد شد. در نهایت، قدرت پیش‌بینی این مدل توسط نمودار Prediction-Area (P-A) مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس این نمودار، نقطه تلاقی منحنی‌های نرخ پیش‌بینی و مساحت اشغال شده مربوطه با کسب مقدار ۷۸ نشانگر توان بالای مدل در معرفی نواحی امیدبخش مس است. لذا می‌توان از این مدل در انتخاب و اولویت‌بندی مناطق هدف به‌منظور انجام عملیات اکتشاف بعدی بهره‌گرفت.

پانوشت

1-Mineral Prospectivity Mapping
2-Positive Ideal Solution
3-Negative Ideal Solution
4-Principal Component Analysis
5-Analytical Hierarchy Process
6-Positive Ideal Solution
7-Negetive Ideal Solution
8-Concentration- Area

منابع

-اختیارآبادی، م.، ۱۳۹۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورقه ابهر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

-بهرامی، ی.، حسنی، ی. و مقصودی، ع.، ۱۳۹۹. به کارگیری روش SWARA-MOORA به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس در ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ ابهر، ایران. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره ۵، شماره ۲، ص ۱-۲۰.

-قلیپور، م.، ۱۳۸۸. کنترل و معرفی نواحی امیدبخش معدنی در ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ زمین‌شناسی ابهر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

-کریمی، م.، ولدان‌زوج، م.ج.، صاحب‌الزمانی، ن.، عادلی‌سرچشمه، ا.، الیاسی، غ.ر. و بحرودی، ع.، ۱۳۸۷. مدل‌سازی پتانسیل معدنی اندیس مس سوناجیل با استفاده از GIS و منطق فازی، نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، دوره ۸، شماره ۳، ص ۲۵-۴۴.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

-Abedi, M., Torabi, A., Norouzi, Gh.N., Hamzeh, M. and Elyasi, Gh.R., 2011- PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration, Computer & Geosciences, p. 1-9.
-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, Boll Geofis Teor Appl, v. 54(2), p. 145-164.
-Afzal, P., Yousefi, M., Mirzaei, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S. and Daneshvar Saein, L., 2019. Delineation of podiform-type chromite mineralization using Geochemical Mineralization Prospectivity Index (GMPI) and staged factor analysis in Balvard area (southern Iran). Journal of Mining and Environment 10, v. 705-715.
-Agterberg, F.P. and Cheng, Q., 2002. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. Natural Resources Research, v. 11(4), p. 249-255.
-An, P., Moon, W.M. and Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. Canadian Journal of Exploration Geophysics, v. 27(1), p. 1-11.
-Asadi, H.H., Sansoleimani, A., Fatehi, M. and Carranza, E.J.M., 2016. An AHP–TOPSIS Predictive Model for District-Scale Mapping of Porphyry Cu–Au Potential: A Case Study from Salafchegan Area (Central Iran). Natural Resources Research, p. 1-13.
-Ataei, M., Sereshki, F., Jamshidi, M. and Jalali, S.M.E., 2008. Suitable mining method for Golbini No. 8 deposit in Jajarm (Iran) using TOPSIS method. Mining Technology.
-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.
-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.
-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.
-Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic Information Systems for geoscientists-modeling with GIS, Computer methods in the geoscientists, v. 13, 398 p.
-Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 54(11), p. 1585-1592.
-Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists, v. 13, 398 p.
-Carranza, E.J.M., 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS, v. 11, 365 p.
-Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. Journal of Geochemical Exploration, v. 51(2), p. 109-130.
-Chung, C.F. and Agterberg, F.P., 1980. Regression models for estimating mineral resources from geological map data. Mathematical Geology, v. 12 (5), p. 473-488.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

-De Araújo, C.C. and Macedo, A.B., 2002. Multicriteria geologic data analysis for mineral favorability mapping: application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil. Natural Resources Research, v. 11(1), p. 29-43.
-Forster, H., 1978. Mesozoic - Cenozonic metallogensis in Iran. Geological Society London, v. 135, p. 443-445.
-Ghaeminejad, H., Abedi, M., Afzal, P., Zaynali, F. and Yousefi, M., 2020. A fractal-based outranking approach for mineral prospectivity analysis. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata (In press).
-Hirayama, K., Haghipour, A. and Hajian, J., 1966. Geological map of Zanjan. Geological Survey of Iran (GSI).
-Hosseinali, F. and Alesheikh, A.A., 2008. Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration. American Journal of Applied Sciences, v. 5(9), p. 1187-1198.
-Hwang, C.L. and Yoon, K., 1981. Methods for multiple attribute decision making. In Multiple attribute decision making, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 58-191.
-Karimi, M., Menhaj, M.B. and Mesgari, M.S., 2008. Mineral potential mapping of copper minearls using fuzzy logic in GIS invironment, ISPRS 2008, Beijing, China.
-Moreira, F.R., Almeida-Filho, R. and Câmara, G., 2003. Spatial Analysis techniques applied to mineral prospecting: an evaluation in the Poços de Caldas Plateau. Brazilian Journal of Geology, v. 33(2), p. 183-190.
-Nouri, R., Jafari, M.R., Arian, M., Feizi, F. and Afzal, P., 2013. Prospection for Copper Mineralization with Contribution of Remote Sensing, Geochemical and Mineralographicaldata in Abhar 1:100,000 Sheet, NW Iran. Archives of Mining Sciences, v. 58(4), p. 1071-1084.
-Parsa, M., Maghsoudi, A. and Ghezelbash, R., 2016. Decomposition of anomaly patterns of multi-element geochemical signatures in Ahar area, NW Iran: a comparison of U-spatial statistics and fractal models. Arabian Journal of Geosciences, v. 9(4), p. 1-16.
-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, v. 114, p. 228-241.
-Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2015. Porphyry Cu potential area selection using the combine AHP-TOPSIS methods: a case study in Siahrud area (NW, Iran). Earth Science Informatics, v. 8(1), p. 207-220.
-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 and Geosciences, v. 49, p. 62-71.
-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, v. 12(1), p. 1-25.
-Porwal, A., Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2004. A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping mathematical geology, Mathematical Geosciences, v. 36 (7), p. 803-826.
-Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, v. 15(3), p. 234-281.
-Saaty, T.L., 1980. The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, 475 p.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

-Saaty, T.L., 1990. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. RWS.
-Saaty, T.L., 2005. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. In Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, Springer New York, 405 p.
-Samimi Namin, F., Shahriar, K., Ataee-Pour, M. and Dehghani, H., 2008. A new model for mining method selection of mineral deposit based on fuzzy decision making. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 108(7), p. 385-395.
-Shahsavar, 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, v. 12 (7), p. 248-257.
-Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015. Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping. Computers and Geosciences, v. 83, p. 72-79.
-Yousefi, M. and Carranza, E.J.M., 2015. Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. Computers & Geosciences, v. 74, p. 97-109.

Archive of SID.ir