

به کارگیری روش میانگین هندسی برای مدل سازی پتانسیل معدنی مس پورفیری در ناحیه بافت کرمان

سعید قاسمزاده^۱، عباس مقصودی^۲* و مهیار یوسفی^۳

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

^۲دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

^۳دانشیار، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

چکیده

منطقه معدنی بافت در استان کرمان در بخش جنوب خاوری کمان ماگمایی ارومیه دختر واقع شده است. این کمان به وسیله گسترش وسیعی از توده های نفوذی و سنگ های آتشفشانی سنوزویک مشخص می شود و شرایط مطلوبی برای توسعه سیستم های هیدروترمالی و کانی سازی به خصوص کانی زایی مس پورفیری فراهم می کند. به منظور پتانسیل معدنی با هدف شناسایی مناطق پرتانسیل، چند نقشه منفرد از شواهد شامل فاصله از توده های نفوذی، چگالی گسل، فاصله از آلتراسیون های هیدروترمالی و اثر ژئوشیمیایی چند عنصری تولید شد. مقادیر شاهد فضایی در هر نقشه با استفاده از یک تابع لجستیک از مقادیر بدون کران به بازه (۰ و ۱) انتقال یافتند. سپس نقشه های پیوسته از لایه های شاهد فازی شده توسط روش میانگین هندسی تلفیق شدند. برای ارزیابی نتایج نقشه پتانسیلی نهایی یک روش داده محور پیش بینی - مساحت به کار گرفته شد. نتایج نشان می دهد که برای مدل احتمالی (پتانسیلی) میانگین هندسی، ۸۷ درصد از کانسارهای شناخته شده در ۱۳ درصد از منطقه مورد مطالعه پیش بینی شده اند. از این رو، این روش می تواند برای مدل سازی پتانسیل معدنی با هدف شناسایی مناطق هدف برای اکتشاف یک نوع کانسار خاص مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: مدل سازی پتانسیل معدنی، میانگین هندسی، مس پورفیری، بافت.

*نویسنده مسئول: عباس مقصودی

E-mail: a.maghsoudi@aut.ac.ir

۱- پیش نوشتار

به منظور معرفی مناطق امیدبخش بر اساس مقایسه و قضاوت کارشناسی صورت می گیرد که سبب ایجاد یک خطای سیستماتیک است و به عنوان محدودیت این قبیل از روش ها تلقی می شود (Yousefi and Carranza, 2015a). از مهم ترین روش های دانش محور می توان به منطق بولی، شاخص همپوشانی، منطق فازی، مدل سازی وایلکت، روش های تصمیم گیری چند معیاره و غیره اشاره کرد.

گروه سوم از روش های مدل سازی پتانسیل معدنی به صورت ترکیبی از دو دسته روش فوق هستند. روش های فازی - وزن های نشانگر، فازی - شبکه عصبی و غیره مثال هایی از این دسته هستند. روش های ترکیبی در وزن دهی و تلفیق لایه های اکتشافی محدودیت های هر دو روش دانش محور و داده محور را دارند (Yousefi and Nykänen, 2017). اخیراً (Nykänen et al., 2008) دسته دیگری از روش های مدل سازی پتانسیل معدنی را برای وزن دهی مقادیر شاهد فضایی به کار بردند. این روش ها به منظور مدل سازی پتانسیل معدنی، به جای استفاده از موقعیت کانسارهای شناخته شده و گسسته سازی داده های پیوسته به کلاس های دلخواه از طریق نظر کارشناس، از یک تابع لجستیک مناسب استفاده می کنند. با توجه به مطالب اشاره شده، در مدل سازی پتانسیل معدنی (به عنوان یک مسئله تصمیم گیری چندمعیاره)، اختصاص وزن به مقادیر شاهد فضایی و همچنین تلفیق انواع مختلف لایه های شاهد اکتشافی که از مجموعه داده های منفرد خاصی تولید می شوند و یک نوعی از عدم قطعیت را حمل می کنند، یک چالش بزرگ است. در این زمینه به منظور تلفیق لایه های شاهد، غلبه بر مشکلات ناشی از عدم قطعیت و در نتیجه شناسایی اهداف اکتشافی معنادار، (Yousefi and Carranza, 2015b) روشی را بر مبنای سیستم های اطلاعات جغرافیایی تحت عنوان میانگین هندسی برای مدل سازی پتانسیل معدنی ارائه کردند. آنها نشان دادند که با توجه به اینکه این روش برای وزن دهی لایه های شاهد اکتشافی و در نهایت مدل سازی پتانسیل معدنی از یک تابع لجستیک سیگموییدی مناسب استفاده می کند و تحت تأثیر هیچ یک از خطاهای تصادفی یا سیستماتیک ناشی از مدل سازی های داده محور و دانش محور قرار نمی گیرد، لذا به عنوان یک روش مناسب در به نقشه در آوردن مناطق هدف برای یک نوع

کانسارهای مس پورفیری مهم ترین منبع برای مس و مولیبدن در جهان هستند. این کانسارها میزان قابل توجهی از طلا، نقره، تنگستن و قلع را نیز شامل می شوند (Meinert, 2007; Sillito, 2010). تنوع شرایط طبیعی حاکم بر سیستم های پیچیده زمین شناسی و فرایندهای کنترل کننده کانی سازی سبب شده تا اکتشاف کانسارهای مس پورفیری و یا هر نوع مواد معدنی دیگر در فضای عدم قطعیت انجام گیرد (Carranza, 2008). هدر رفتن زمان و هزینه به عنوان نتیجه ای از انجام عملیات اکتشاف در فضای عدم قطعیت و در حضور ریسک است. مدل سازی پتانسیل مواد معدنی به عنوان یک روش کلیدی، در اکتشاف مواد معدنی استفاده می شود و هدف اساسی آن این است که هزینه (و زمان عملیات) اکتشاف را کاهش دهد و در عین حال باعث سودی یک برنامه اکتشافی شود (Chen and Wu, 2016). وزن دهی الگوهای شاهد و تلفیق نقشه های پیشگو با هدف مدل سازی پتانسیل معدنی و در نتیجه شناسایی اهداف اکتشافی به چندین صورت انجام می گیرد.

روش های داده محور که روش های نظارت شده نیز خوانده می شوند، در مناطقی مناسب هستند که عملیات اکتشافی و مطالعات قبلی در حد متوسط تا خوب انجام گرفته است (نواحی قهوه ای). در این مناطق موقعیت اندیس های شناخته شده به عنوان نقاط آموزش و یادگیری به کار گرفته می شوند و از طریق بررسی ارتباط میان مکان این اندیس ها و الگوهای شاهد فضایی به مدل سازی پتانسیل معدنی پرداخته می شود (Bonham-Carter et al., 1989; Carranza, 2008). روش های وزن های نشانگر، وزن های نشانگر مبسوط، رگرسیون لجستیک، توابع برآورد شاهد، طبقه بندی شبکه ای بیزی، شبکه های عصبی مصنوعی و غیره از انواع مختلف روش های داده محور هستند. استفاده از مکان کانسارهای شناخته شده به عنوان نقاط آموزش باعث ایجاد یک خطا و تمایل تصادفی در این روش ها می شود (Coolbaugh et al., 2007).

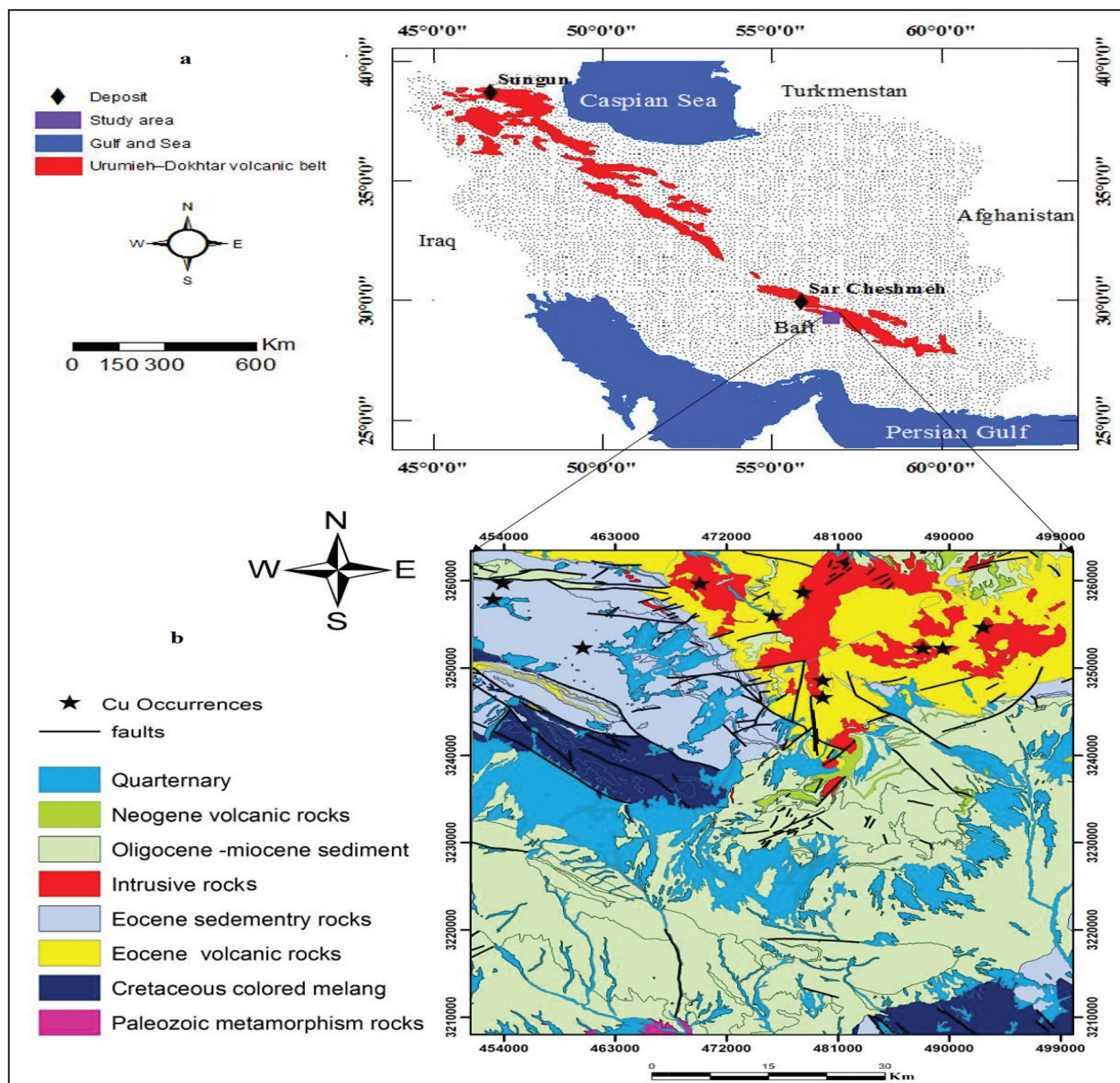
مدل سازی پتانسیل معدنی با روش های دانش محور در شرایطی انجام می گیرد که در منطقه مورد مطالعه تعداد اندیس های شناخته شده کم و یا هیچ اندیس شناخته شده ای وجود نداشته باشد (نواحی سبز) (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008) در چنین روش هایی تخصیص وزن به نقشه ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه های شاهد

جستجوی این کانسارها برخوردار است. از دیدگاه زمین شناسی واحدهای لیتولوژی در این منطقه در ۸ کلاس طبقه بندی می شوند (شکل ۱-ب). در این واحدها سنگ های متامورفیسیم پالئوزویک و ملائزه های کرتاسه به عنوان قدیمی ترین سنگ های منطقه به شمار می روند. از دیگر واحدهای زمین شناسی منطقه می توان به سنگ های آتشفشانی و سنگ های رسوبی انوسن اشاره کرد. سنگ های نفوذی این منطقه از نظر لیتولوژی شامل گرانیتوئید، کوارتز دیوریت و دیوریت پورفیری و از نظر سنی متعلق به کرتاسه، انوسن، الیگوسن- میوسن و نوژن هستند. سنگ های آتشفشانی نوژن و رسوبات کواترنری جوان ترین واحدهای لیتولوژی این منطقه هستند. از لحاظ زمین شناسی اقتصادی در این منطقه اندیس هایی از مس دیده می شود که از معروف ترین آنها می توان به حراران و لاله زار اشاره کرد. این منطقه همچنین به لحاظ ذخایر سرب و روی و کرومیت حائز اهمیت و از مهم ترین آنها، سرب و روی قنات مروان است.

کانسار مورد جستجو است. در مطالعه حاضر به منظور شناسایی مناطق هدف برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری از روش اشاره شده استفاده شد. بدین منظور ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ بافت استان کرمان به دلیل قرارگیری بر روی کمربند ماگمایی ارومیه- دختر (اکثر کانسارهای شناخته شده مس پورفیری در ایران بر روی این کمربند قرار دارند) و عدم انجام مدل سازی پتانسیل معدنی در این منطقه، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

ورقه یک صد هزار بافت با مساحتی حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، در بخش جنوبی کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر واقع شده و جزئی از استان کرمان است. با توجه به اینکه کمربند ارومیه- دختر از لحاظ کانسارهای مس پورفیری اهمیت دارد، لذا منطقه بافت نیز به سبب قرارگیری بر روی این کمربند، از پتانسیل لازم برای



شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی کمربند ارومیه- دختر؛ (b) نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه بافت.

۳- روش ها

۳-۱. تابع تبدیل لجستیک سیگموئیدی

نظر، مجموعه داده های فضایی مورد نیاز جمع آوری می شود و برای تولید نقشه های شاهد مورد استفاده قرار می گیرد. با توجه به اینکه مجموعه داده های فضایی دارای مقادیر ماکزیمم و مینیمم یکسانی نیستند، لذا واحد و بعد یکسانی ندارند. از این

در مدل سازی پتانسیل معدنی که به منظور شناسایی مناطق اهداف اکتشافی برای یک نوع کانسار خاص انجام می گیرد، بر اساس یک مدل مفهومی از کانسار مورد

این رو برای محاسبه میانگین هندسی می توان از رابطه ماتریسی ۳ استفاده کرد. (۳)

$$GA[X] = GA \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} GA[X_{11}] & GA[X_{12}] & \dots & GA[X_{1n}] \\ GA[X_{21}] & GA[X_{22}] & \dots & GA[X_{2n}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ GA[X_{m1}] & GA[X_{m2}] & \dots & GA[X_{mn}] \end{bmatrix}$$

۳-۳. مدل سازی پتانسیل معدنی در منطقه بافت

تولید نقشه های شاهد: در مدل سازی پتانسیل معدنی، نقشه های آنومالی های ژئوشیمیایی یکی از مهم ترین لایه های اکتشافی هستند و از طرفی نقشه برداری آنومالی های ژئوشیمیایی یکی از مهم ترین و چالش برانگیزترین کارها در ژئوشیمی اکتشافی است (Zuo and Wang, 2016). در مطالعه حاضر به منظور تولید لایه شاهد از آنومالی های ژئوشیمیایی، یک رویکرد جامع مورد استفاده قرار گرفت که نتیجه آن تولید یک اثر ژئوشیمیایی چندعنصری است. از این رو مقادیر غلظت ۸۷۷ نمونه رسوبات آبراه های برداشت، آماده سازی و آنالیز شده با روش طیفسنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، برای ۸ عنصر شاخص کانی زایی مس پورفیری مس، مولیبدن، طلا، نقره، آرسنیک، آنتیموان، روی و سرب (Cooke et al., 2005; Yang et al., 2009; Parsa et al., 2016a) به کار گرفته شد. پارامترهای آماری از این عناصر در جدول ۱ آورده شده است. داده های ژئوشیمیایی داده های ترکیبی (بسته هستند، لذا قبل از انجام هر گونه مطالعات، با هدف دستیابی به نتایج معنی دار لازم است که مقادیر با استفاده از تبدیلات لگاریتمی مناسب باز شوند (Filzmoser et al., 2009). بدین منظور به منظور رفع مشکل بسته بودن داده های ژئوشیمیایی از تبدیل لگاریتمی ایزومتریک (ilr) استفاده شد (Carranza, 2011). در ادامه برای هر مقدار از هر کدام از عناصر شاخص کانی زایی مس پورفیری مورد استفاده در این مطالعه، مقدار آماره U (Cheng, 1999) محاسبه شد، مقادیر آماره U برای تمام نمونه ها از هر کدام عناصر شاخص برای تفسیر بهتر از طریق رابطه ۱ به فضای ۱ و ۰ انتقال داده شد و در نهایت به منظور تولید یک اثر ژئوشیمیایی چندمتغیره (تولید یک لایه شاهد ژئوشیمیایی چندمتغیره)، مقادیر آماره U انتقال یافته تمام عناصر شاخص با روش OR (اجتماع) فازی ادغام شدند (شکل ۲)

رو برای تفسیر هر چه بهتر نتایج، انتقال مقادیر شاهد به یک فضای یکسان مانند ۱ و ۰ ارزشمند است (Parsa et al., 2016b). در این زمینه یک تابع لجستیک سیگموئیدی (رابطه ۱) که پارامترهای آن به صورت داده محور تعریف می شوند (Yousefi and Carranza, 2015a)، می تواند برای انتقال لایه های شاهد به یک فضای یکسان مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه به منظور انتقال مقادیر شاهد فضایی به یک فضای یکسان (۱ و ۰) و وزن دهی مقادیر شاهد در هر یک از نقشه های شاهد - که اهمیت نسبی هر مقدار شاهد را به طور معناداری نشان می دهند - از تابع لجستیک زیر استفاده شده است:

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

که M_x و x به ترتیب مقادیر انتقال داده شده و مقادیر خام هستند. در رابطه اشاره شده در بالا i و s به ترتیب شیب و نقطه عطف تابع لجستیک هستند.

۳-۲. روش میانگین هندسی

میانگین هندسی برای n مقدار به صورت ریشه n حاصل ضرب آنها تعریف می شود. این تابع برای مجموعه ای از داده با استفاده از رابطه های زیر به دست می آید:

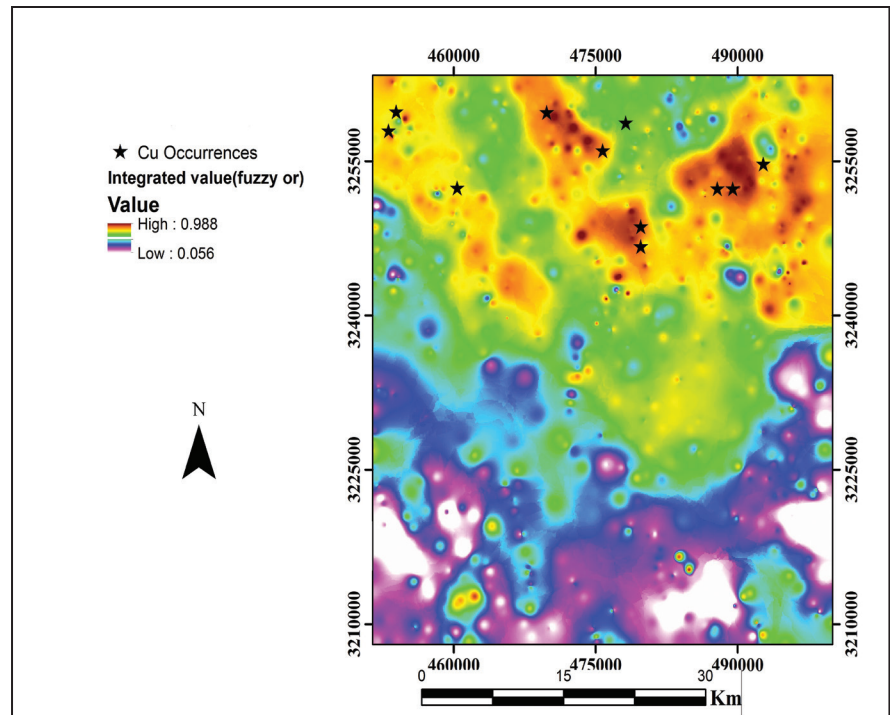
$$G_A(V_1, V_2, \dots, V_n) = \left(\prod_{i=1}^n v_i \right)^{1/n} = \sqrt[n]{v_1 \cdot v_2 \cdot \dots \cdot v_n} \quad (2)$$

روش میانگین هندسی به عنوان یکی از انواع روش های تصمیم گیری چندمعیاره است که می تواند به منظور تلفیق انواع داده ها استفاده شود (Wang and Yang, 2007). در مدل سازی پتانسیل معدنی نیز می توان از این روش برای تلفیق نقشه های شاهد استفاده کرد. این روش یکی از روش های فازی پیوسته بوده که در آن برای وزن دهی از یک تابع لجستیک مناسب (برای مثال رابطه ۱) استفاده می شود. با توجه به اینکه برخی از نقشه های شاهد استفاده شده در مدل سازی پتانسیل معدنی، مقادیر منفی دارند و روش میانگین هندسی فقط برای مقادیر مثبت استفاده می شود، لذا مزیت استفاده از تابع لجستیک این است که مقادیر منفی را به یک فضای مثبت انتقال می دهد (Yousefi et al., 2014).

در مدل سازی پتانسیل معدنی، پارامترهای رابطه ۱ به صورت $v_i = f_i$ اصلاح می شوند. به طوری که f_i عبارت است از وزن فازی متناظر با مقدار الگوی f_i در سلول واحدی که میانگین هندسی برای آن محاسبه می شود. پس برای روش میانگین هندسی، منطقه مورد مطالعه به صورت ماتریسی از پیکسل ها در نقشه رستری در نظر گرفته شود. از

جدول ۱- پارامترهای آماری برای عناصر شاخص کانی زایی مس پورفیری.

روى	سرب	آنتیموان	آرسنیک	نقره	طلا	مولیبدن	مس	تعداد نمونه
۸۷۷	۸۷۷	۸۷۷	۸۷۷	۸۷۷	۸۸۷	۸۷۷	۸۷۷	۸۷۷
۱	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۵	۱	حد تشخیص
۱۱۳/۲	۴۲/۶۲	۱/۷	۱۹/۳۶	۰/۱۳	۰/۰۰۳۴	۱/۰۳	۵۷,۵	میانگین
۸۸	۱۲/۶	۰/۸۱	۱۳	۰/۰۶	۰/۰۰۱	۰/۸۳	۵۵	میانه
۵۶۴۰	۱۰۰۰۰	۱۱۹	۷۴۳	۲۹/۴	۰/۲۵۱	۶/۹۶	۳۳۱	ماکزیمم
۴۵	۳/۴	۰/۵	۱/۲	۰/۱	۰/۰۰۱	۰/۵	۳/۴	مینیمم
۵۵۹۵	۹۹۹۶/۶	۱۱۸/۵	۷۴۱/۸	۲۹/۳	۰/۲۵	۴۶/۶	۳۲۷/۶	رنج
۲۳۰	۴۰۶/۲	۴/۹۳	۲۹/۶۲	۱/۰۴	۰/۰۱۱	۰/۶۲	۲۶/۵	انحراف معیار
۸۰۴/۴	۴۳۹/۵	۷۷/۳۷۷	۴۰۹/۶۲	۶۹۷/۷	۲۴۹/۱۵	۲۳/۹۷	۱۵/۵	کشیدگی
۱۸/۷	۱۹/۶	۱۷/۲۱	۱۷/۳۱	۲۵/۴	۱۳/۳۹	۴/۰۳	۲/۳۶	جولگی



شکل ۲- نقشه شاهد اثر ژئوشیمیایی چند متغیر (لایه شاهد ژئوشیمیایی چندمتغیره) از عناصر شاخص کانی زایی مس پورفیری.

هندسی استفاده شد. از این رو بر اساس مدل مفهومی مس پورفیری و الگوهای شاهد استخراج شده، ۵ نوع نقشه منفرد شاهد مورد استفاده قرار گرفت: (۱) نقشه فازی شده اثر ژئوشیمیایی حاصل شده از عناصر مؤثر؛ (۲) نقشه فازی شده چگالی گسل در منطقه مورد مطالعه؛ (۳) نقشه فازی شده فاصله از مرز توده های نفوذی مرتبط با کانسار مس پورفیری؛ (۴) نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون فلیک؛ (۵) نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون پروپلیتیک. در این مطالعه، روش میانگین هندسی برای مدل سازی پتانسیل معدنی در ارتباط با کانسارهای مس پورفیری به صورت رابطه ۴ اصلاح می شود:

$$G_{ACu_pouphyry}(F_U, F_{FD}, F_{ID}, F_{PHD}, F_{ProD}) = \left(\prod_{i=1}^5 F_i \right) = \sqrt[5]{F_U F_{FD} F_{ID} F_{PHD} F_{ProD}} \quad (4)$$

که در آن $F_U, F_{FD}, F_{ID}, F_{PHD}, F_{ProD}$ به ترتیب مقادیر فازی شده اثر ژئوشیمیایی حاصل از تلفیق عناصر مؤثر، چگالی گسل، نزدیکی به مرز توده های نفوذی، نزدیکی به آلتراسیون فلیک و نزدیکی به آلتراسیون پروپلیتیک هستند. پس از محاسبه مقادیر میانگین هندسی برای تمام پیکسل ها، این مقادیر به منظور تولید یک نقشه مدل سازی پتانسیل معدنی استفاده شدند (شکل ۷).

۳-۵. ارزیابی مدل پتانسیل معدنی

مدل پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از روش میانگین هندسی، از طریق بررسی ارتباط مکانی اندیس های شناخته شده با هر یک از کلاس های مدل پیش بینانه مورد ارزیابی قرار می گیرد. یکی از روش های رایج مورد استفاده برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ها، روش چگالی نرمال شده (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001) است. چگالی نرمال شده برای یک کلاس از یک مدل پیش بینانه به صورت نسبت درصد اندیس های پیش بینی شده توسط آن کلاس به مساحت اشغال شده توسط آن کلاس، با توجه به مساحت کل منطقه تعریف می شود (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001). به طوری که مقادیر بزرگ تر از یک برای آن نشانگر ارتباطی مثبت میان کلاس مورد نظر با کانسارهای شناخته شده است. برای محاسبه چگالی نرمال شده می توان از نمودار پیش بینی - مساحت (Yousefi and Carranza, 2015c) بهره برد. به طوری که از روی نقطه تلاقی نمودار پیش بینی - مساحت، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه چگالی نرمال شده به دست می آید.

کانسارهای پورفیری از سیال های هیدروترمال تولید و موجب تغییرات شیمیایی و فیزیکی در سنگ های اطراف می شوند (Rowan et al., 2003). هر کانسار پورفیری عموماً با چهار نوع از آلتراسیون های هیدروترمالی در ارتباط است. این آلتراسیون ها به دلیل اینکه وسعت زیادی نسبت به خود کانسارهای پورفیری و نیز شکل هندسی و ویژگی های طیفی خاصی دارند، لذا شناسایی آنها از طریق علم سنجش از دور، به عنوان یک موضوع جالب در فرایند اکتشاف مواد معدنی به شمار می رود و در مدل سازی پتانسیل معدنی نیز به عنوان یک لایه شاهد اکتشافی مورد استفاده قرار می گیرد.

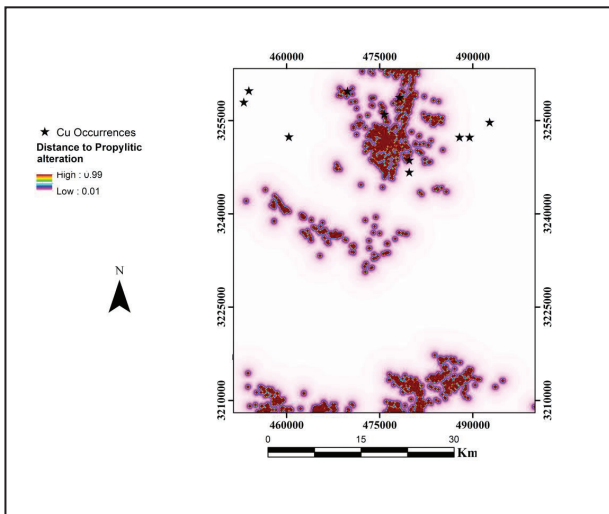
در مطالعه حاضر به منظور تولید لایه فاصله از آلتراسیون های هیدروترمالی، با به کارگیری روش مناسب، از روی داده های سنجنده استر، آلتراسیون های فلیک و پروپلیتیک شناسایی و فاصله از آنها محاسبه شد و پس از انتقال به فضای فازی ۱ و ۰ به صورت شکل های ۳ و ۴ به تصویر کشیده شدند.

کانسارهای مس پورفیری در کمربند ماگمایی ارومیه - دختر با توده های نفوذی ارتباط فضایی و ژنتیکی دارند (Hezarkhani, 2006). با توجه به اینکه حاشیه توده های نفوذی دچار خردشدگی شدیدی است، لذا انتقال گرما و فلزات از طریق سیالات هیدروترمال از توده های نفوذی در این حاشیه ها انجام می شود (Sillito, 2010). از این رو کانسارهای مس پورفیری با مناطق نزدیک به مرز توده های نفوذی ارتباط بیشتری دارند؛ تا مناطقی که در فاصله بیشتری هستند. در مطالعه حاضر فاصله از توده های نفوذی به عنوان یکی دیگر از لایه های شاهدی استفاده شد که می تواند پیشگوی کانسارهای مس پورفیری باشد (شکل ۵).

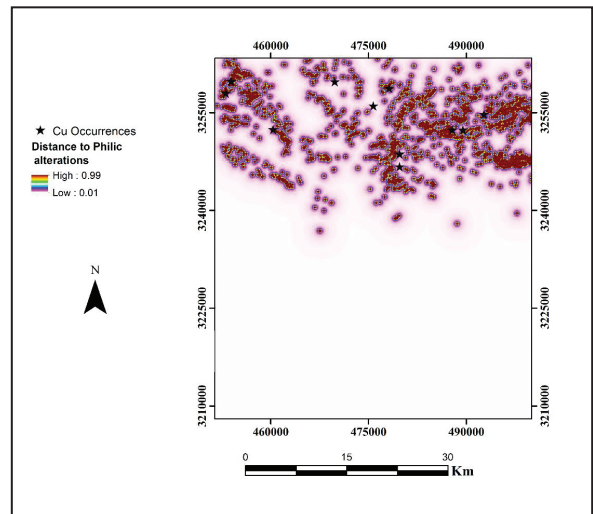
به طور عمومی پذیرفته شده است که عوارض زمین شناسی (به طور مثال گسل ها)، به عنوان ساختارهای کنترل کننده کانی زایی هستند و نقش کلیدی در تشکیل کانسارها دارند (Carranza, 2008). گسل ها و شکستگی ها مهم ترین مسیر عبور و چرخش همرفتی سیالات هیدروترمال هستند و چگالی بالایی از آنها برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری مطلوب است (Pirajno, 2010). در این زمینه، یک نقشه از چگالی گسل که با استفاده از تابع لجستیک (رابطه ۱) به حالت فازی در آمده است، برای تلفیق با سایر لایه های شاهد در مدل سازی پتانسیل معدنی تولید شد (شکل ۶).

۳-۴. تلفیق لایه های شاهد با استفاده از روش میانگین هندسی

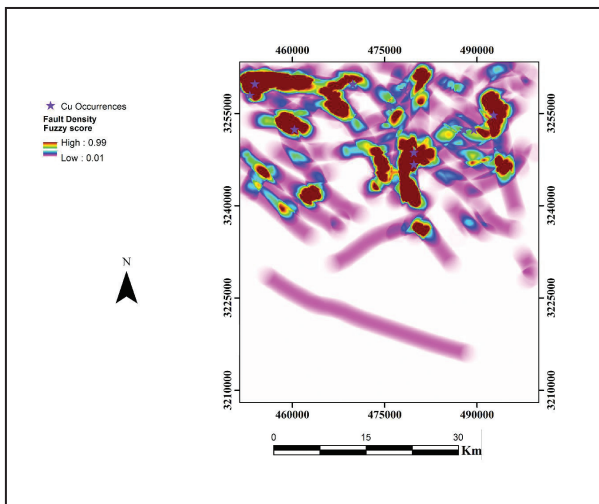
با هدف مدل سازی پتانسیل معدنی در ورقه زمین شناسی بافت، از روش میانگین



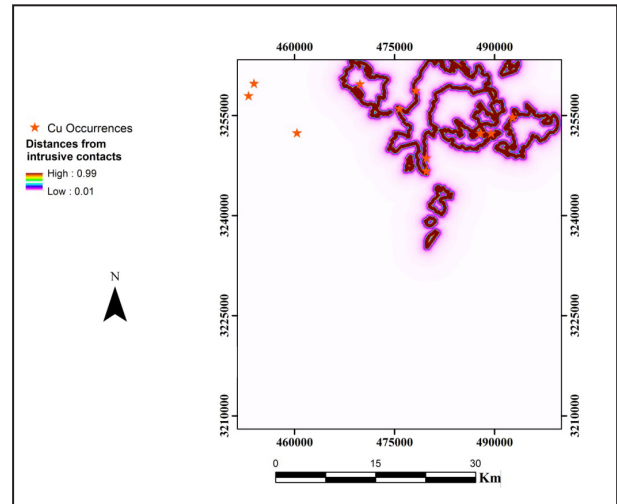
شکل ۴- نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون پروپیلیتیک.



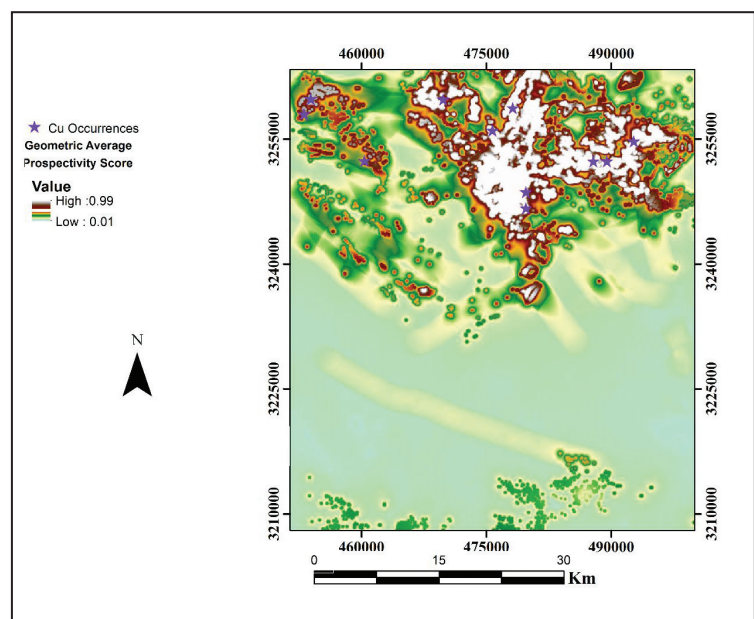
شکل ۳- نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون فیلیک.



شکل ۶- نقشه فازی شده چگالی گسل.



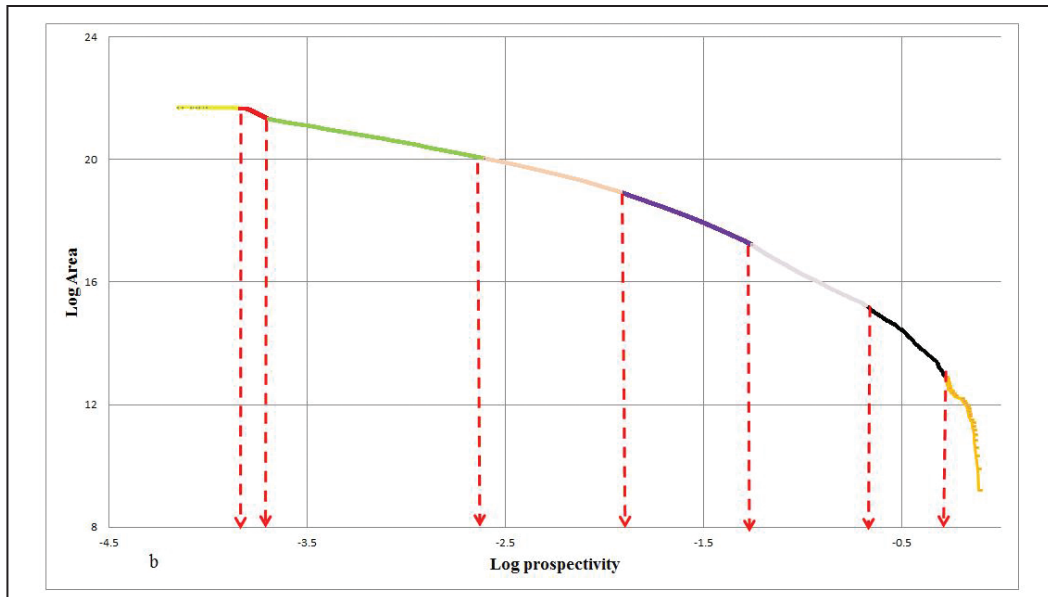
شکل ۵- نقشه فازی شده فاصله از مرز توده‌های نفوذی مرتبط با کانسار مس پورفیری.



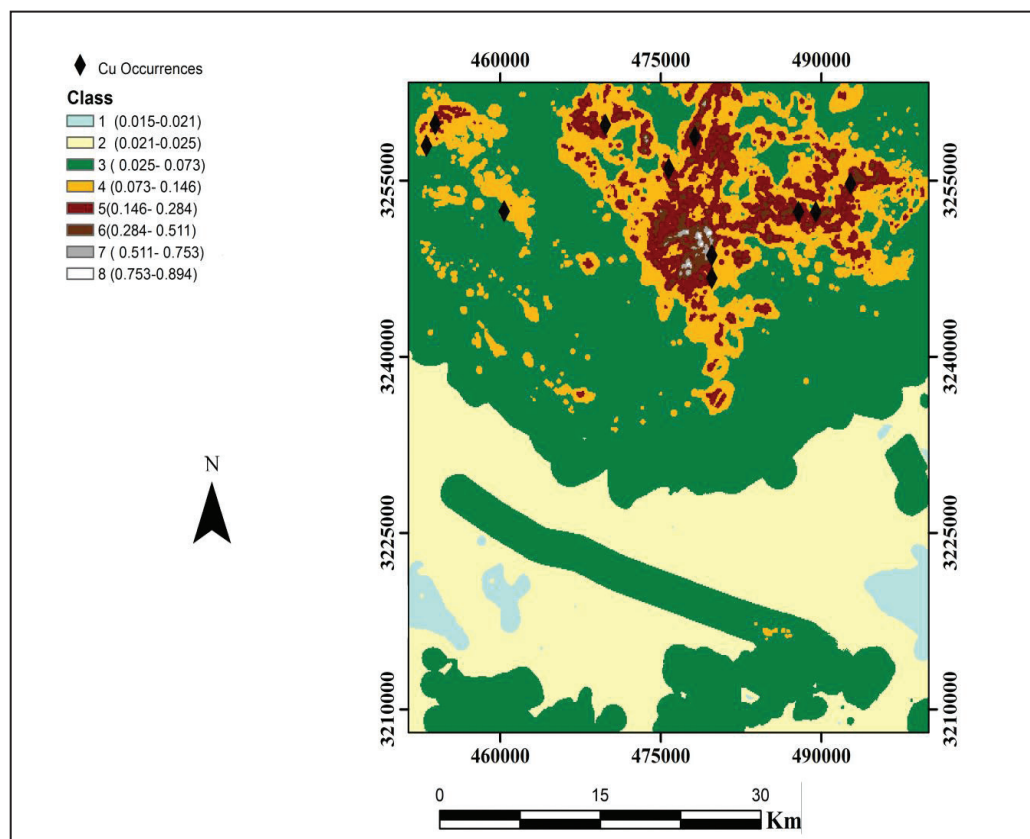
شکل ۷- نقشه میانگین هندسی تولید شده به وسیله تلفیق لایه‌های شاهد.

این است که روش میانگین هندسی می تواند تا ۸۷ درصد از اندیس های شناخته شده را در ۱۳ درصد از مساحت منطقه پیش بینی کند و چگالی نرمال شده برای این مدل پتانسیلی تولید شده ۶/۷ است که از نسبت درصد اندیس های شناخته شده به مساحت اشغال شده در نقطه ی تلاقی به دست می آید. با توجه به اینکه مقدار چگالی نرمال شده برای مدل پتانسیل حاصل از روش میانگین هندسی بزرگ تر از یک است، لذا می توان استنباط کرد که روش میانگین هندسی به عنوان یک روش کارا در تلفیق لایه های شاهد اکتشافی به منظور شناسایی نواحی هدف اکتشافی عمل می کند.

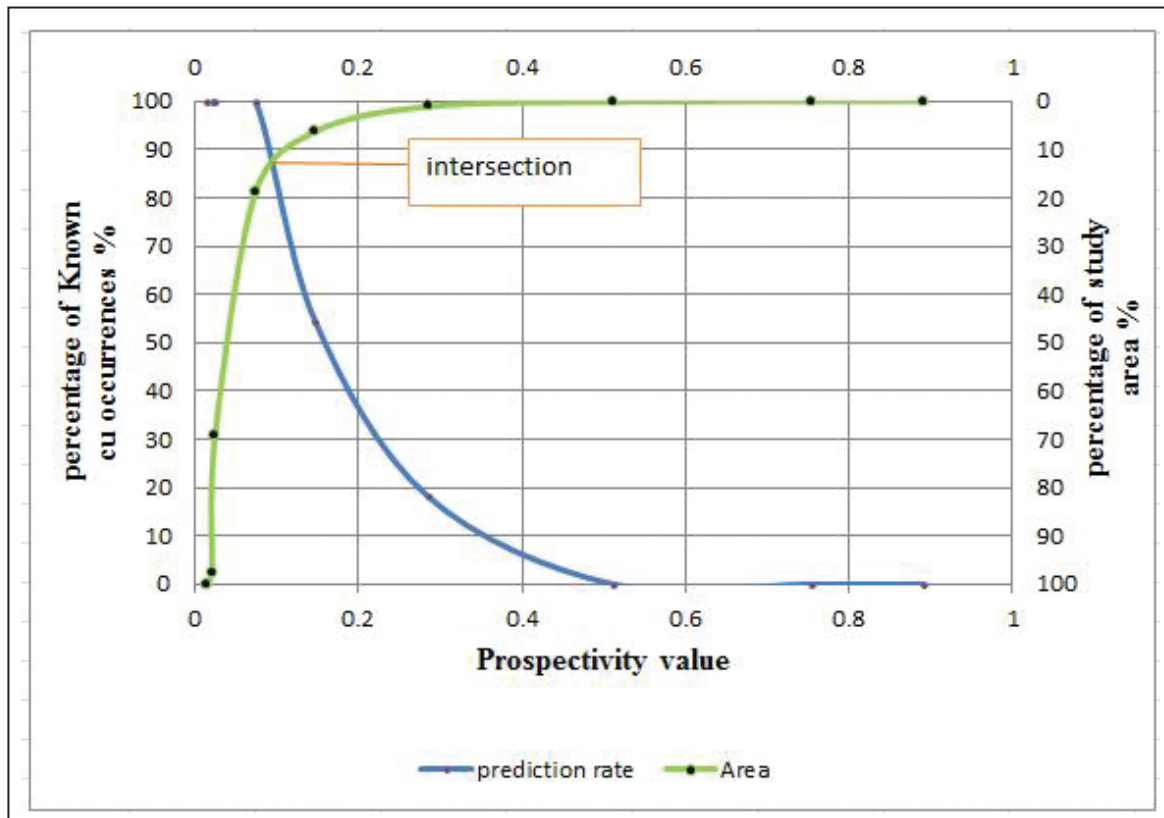
در این زمینه برای ایجاد نمودار پیش بینی- مساحت لازم است مقادیر پیوسته میانگین هندسی به برخی از کلاس ها طبقه بندی شوند. برای تعیین حد آستانه مناسب برای طبقه بندی داده های پیوسته، روش فرکتالی عیار- مساحت (Cheng et al., 1994) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۸). بر اساس مدل فرکتالی، مقادیر میانگین هندسی به ۸ کلاس طبقه بندی شد (شکل ۹). در نهایت بر اساس موقعیت اندیس های شناخته شده و نقشه طبقه بندی شده، نمودار پیش بینی- مساحت به دست آمد (شکل ۱۰). نقطه تلاقی نمودار پیش بینی- مساحت (شکل ۱۰) بیانگر



شکل ۸- مدل عیار مساحت برای مقادیر میانگین هندسی.



شکل ۹- نقشه طبقه بندی شده مقادیر مدل سازی میانگین هندسی.



شکل ۱۰- نقشه پیش‌بینی مساحت برای نقشه طبقه‌بندی مقادیر مدل‌سازی میانگین هندسی.

۴- بحث

روش‌هایی مانند فازی پیوسته، ارزش منتظره و میانگین هندسی در یک تراز قرار دارند. تلفیق لایه‌های شاهد با استفاده از روش فازی پیوسته از طریق چندین عملگر انجام می‌گیرد. این عملگرها عبارتند از: AND، OR، جمع فازی، ضرب فازی و در نهایت گامای فازی. عملگرهای فازی یک نوع عدم قطعیت را شامل می‌شوند. این بدان دلیل است که خروجی حاصل از طریق این عملگرها فقط یا اکثراً تحت تأثیر یک مقدار ورودی قرار می‌گیرند و یا معایب دو نوع از عملگرها را به صورت همزمان شامل می‌شوند. پس بنا بر دلایل اشاره شده روش فازی پیوسته برای تلفیق لایه‌ها شاهد روش مناسبی نیست. فراتر از روش فازی پیوسته روش ارزش منتظره است. در این روش بر عکس روش فازی پیوسته که در آن تنها یا اکثراً یک مقدار ورودی، خروجی را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ همه داده‌ها برای تلفیق در نظر گرفته می‌شوند. پس می‌تواند به عنوان روشی برای غلبه بر روش فازی پیوسته باشد. در این روش ضروری است که تمام لایه‌ها در یک واحد یکسان باشند. لذا لازم است واحدهای مختلف تمام لایه‌ها به یک واحد معین تبدیل شوند. تغییر واحدها سبب می‌شود که ساختارهای آماری داده‌های مکانی تغییر پیدا کند که خود می‌تواند به عنوان محدودیت روش ارزش منتظره باشد. پس این روش نیز برای حالتی که لایه‌های مختلف دارای واحدهای متفاوتی با یکدیگر هستند، نمی‌تواند به عنوان ابزاری برای تلفیق باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به صورت زیر خلاصه شود:
روش میانگین هندسی، یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بر مبنای GIS است که می‌تواند به محدودیت‌های هر دو روش فازی پیوسته و روش ارزش منتظره غلبه کند و عدم قطعیت حاصل از ساختارهای زمین‌شناسی را بهبود بخشد.

علاوه بر این که این روش از نظر آماری صحت دارد، این روش همچنین برای هر دو نوع ناحیه قهوه‌ای (ناحیه‌ای با بررسی‌های اکتشافی خوب یا ناحیه‌ای که در آن اندیس‌های شناخته شده کافی از کانسار مورد جستجو وجود دارد) و ناحیه سبز (محدوده با تعداد اندیس‌های کمتر) مناسب است.

در این مطالعه از روش میانگین هندسی برای تلفیق لایه‌های شاهد استفاده و برای ارزیابی نتایج نقشه پتانسیلی نهایی، یک روش داده‌محور پیش‌بینی-مساحت به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که برای مدل احتمالی (پتانسیلی) میانگین هندسی، ۸۷ درصد از کانسارهای شناخته شده در ۱۳ درصد از منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی شده‌اند. از این رو، این روش می‌تواند برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی با هدف شناسایی مناطق هدف برای اکتشاف یک نوع کانسار خاص مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. *Computer methods in the geoscientists*, 13, 398.
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P. and Wright, D. F., 1989- Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 89(9), 171- 183.
- Carranza, E. J. M., 2008- Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS (Vol. 11). Elsevier.
- Carranza, E. J. M., 2011- Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 110(2), 167- 185.
- Chen, Y. and Wu, W., 2016- A prospecting cost-benefit strategy for mineral potential mapping based on ROC curve analysis. *Ore Geology Reviews*, 74, 26- 38.
- Cheng, Q., 1999- Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *Journal of Geochemical exploration*, 65(3), 175-194.
- 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.
- Cooke, D. R., Hollings, P. and Walshe, J. L., 2005- Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5), 801- 818.
- Coolbaugh, M. F., Raines, G. L. and Zehner, R. E., 2007- Assessment of exploration bias in data-driven predictive models and the estimation of undiscovered resources. *Natural Resources Research*, 16(2), 199- 207.
- Filzmoser, P., Hron, K. and Reimann, C., 2009- Principal component analysis for compositional data with outliers. *Environmetrics*, 20(6), 621- 632.
- Hezarkhani, A., 2006- Petrology of the intrusive rocks within the Sungun porphyry copper deposit, Azerbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3), 326- 340.
- Meinert, L. D., 2007- Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces and Exploration Methods. *Economic Geology*, 102(7), 1355- 1355.
- 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(3), 209- 226.
- Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P. and Gardoll, S. J., 2008- Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55(1), 25-38.
- 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.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M. and Sadeghi, M., 2016b- Recognition of significant multi-element geochemical signatures of porphyry Cu deposits in Noghdoz area, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 165, 111- 124.
- Pirajno, F., 2010- Intracontinental strike-slip faults, associated magmatism, mineral systems and mantle dynamics: examples from NW China and Altay-Sayan (Siberia). *Journal of Geodynamics*, 50(3), 325- 346.
- Rowan, L. C., Hook, S. J., Abrams, M. J. and Mars, J. C., 2003- Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, 98(5), 1019- 1027.
- Sillitoe, R. H., 2010- Porphyry copper systems. *Economic geology*, 105(1), 3- 41.
- Wang, Y. M. and Yang, J. B., 2007- Measuring the performances of decision-making units using interval efficiencies. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 198(1), 253- 267.
- Yang, Z., Hou, Z., White, N. C., Chang, Z., Li, Z. and Song, Y., 2009- Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 36(1), 133- 159.
- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015a- Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. *Computers and Geosciences*, 74, 97- 109.
- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015b- Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping. *Computers and Geosciences*, 83, 72-79.
- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015c- Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers and Geosciences*, 79, 69- 81.
- Yousefi, M. and Nykänen, V., 2017- Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential targeting.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E. J. M., 2014- Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. *Geochemistry: Exploration, Environmental, Analysis*, 14, 45- 58.
- Zuo, R. and Wang, J., 2016- Fractal/multifractal modeling of geochemical data: a review. *Journal of Geochemical Exploration*, 164, 35- 41.

Application of geometric average approach for Cu-porphyry prospectivity mapping in the Baft area, Kerman

S. Ghasemzadeh¹, A. Maghsoudi^{2*} and M. Yousefi³

¹Ph.D. Student, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Polytechnic), Tehran, Iran

²Associate Professor, Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology (Polytechnic), Tehran, Iran

³Associate Professor, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2018 January 30

Accepted: 2018 July 21

Abstract

The Baft district in Kerman province is located in the southeastern segment of the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. This arc is characterized by thick accumulations of Cenozoic plutonic and volcanic rocks and provide favorable conditions to the development of hydrothermal systems and mineral deposition, in particular porphyry copper mineralization. For mineral prospectivity mapping (MPM) to delineate prospective areas some individual maps of evidence including distance to intrusive contacts, fault density, distance to hydrothermal alterations and multi-element geochemical signature were generated. Spatial evidence values in each map were transformed using a logistic function of unbounded values into the [0,1] range. Thus continuous maps of fuzzy evidence layers were integrated using geometric average function. To evaluate results of final potential map a data-driven prediction-area was used. The results showed that for the geometric average prospectivity model, 87% of the known mineral occurrences are predicted in 13% of the study area. Hence, this method can be utilized for mineral prospectivity mapping to delineate target areas for further exploration of a certain deposit-type.

Keywords: Mineral potential mapping, Geometric average, Cu-porphyry, Baft.

For Persian Version see pages 123 to 130

*Corresponding author: A. Maghsoudi; E-mail: a.maghsoudi@aut.ac.ir