

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

سعید قاسمزاده<sup>۱</sup>، عباس مقصودی<sup>۲\*</sup> و مهیار یوسفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

<sup>۳</sup>دانشیار، 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).

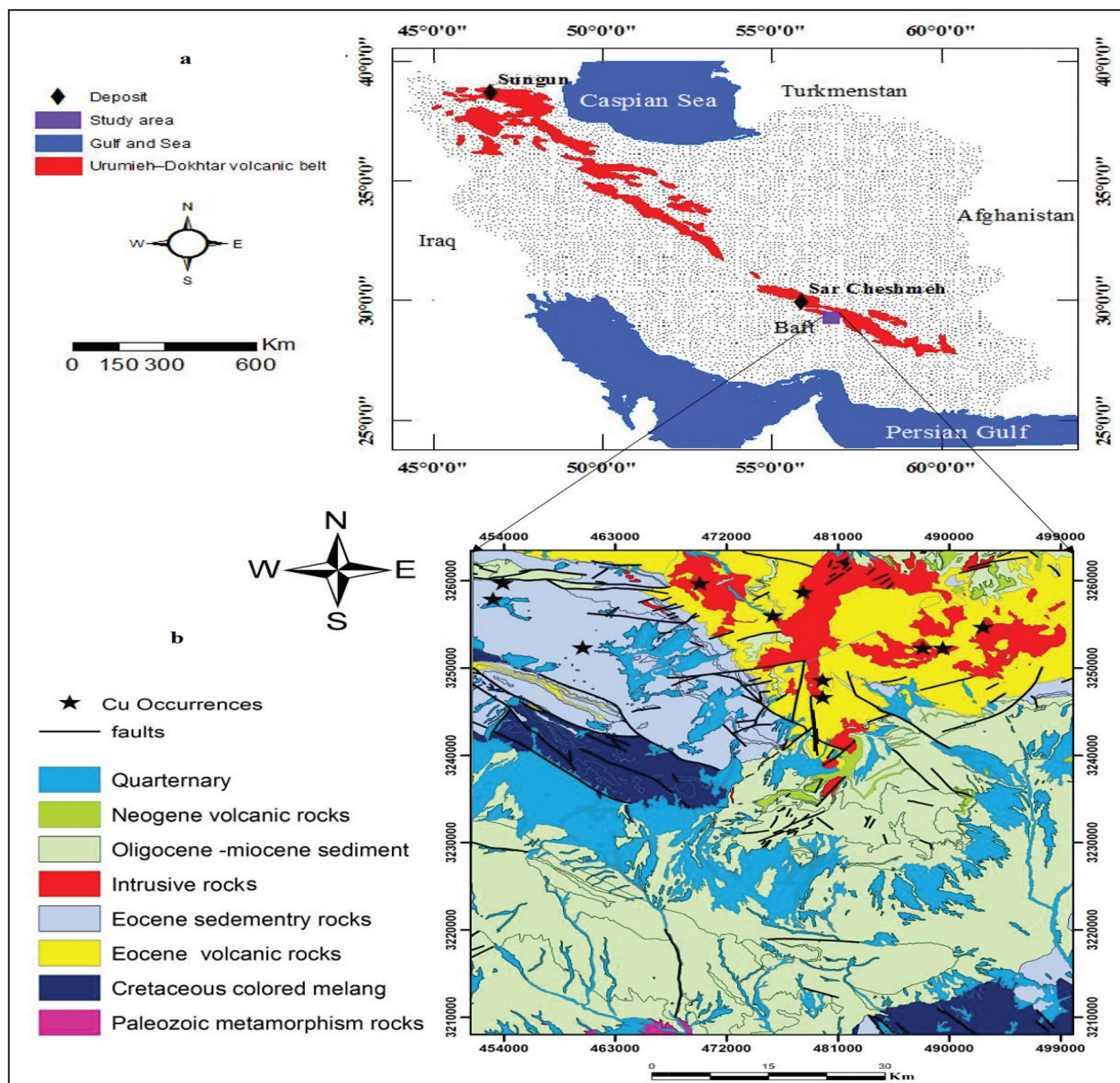
مدل سازی پتانسیل معدنی با روش های دانش محور در شرایطی انجام می گیرد که در منطقه مورد مطالعه تعداد اندیس های شناخته شده کم و یا هیچ اندیس شناخته شده ای وجود نداشته باشد (نواحی سبز) (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008) در چنین روش هایی تخصیص وزن به نقشه ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه های شاهد

جستجوی این کانسارها برخوردار است. از دیدگاه زمین‌شناسی واحدهای لیتولوژی در این منطقه در ۸ کلاس طبقه‌بندی می‌شوند (شکل ۱-ب). در این واحدها سنگ‌های متامورفیسیم پالئوزویک و ملائزه‌های کرتاسه به عنوان قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه به شمار می‌روند. از دیگر واحدهای زمین‌شناسی منطقه می‌توان به سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های رسوبی انوسن اشاره کرد. سنگ‌های نفوذی این منطقه از نظر لیتولوژی شامل گرانیتوئید، کوارتزدیوریت و دیوریت پورفیری و از نظر سنی متعلق به کرتاسه، انوسن، الیگوسن-میوسن و نوژن هستند. سنگ‌های آتشفشانی نوژن و رسوبات کواترنری جوان‌ترین واحدهای لیتولوژی این منطقه هستند. از لحاظ زمین‌شناسی اقتصادی در این منطقه اندیس‌هایی از مس دیده می‌شود که از معروف‌ترین آنها می‌توان به حراران و لاله‌زار اشاره کرد. این منطقه همچنین به لحاظ ذخایر سرب و روی و کرومیت حائز اهمیت و از مهم‌ترین 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 مدل‌سازی 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 زمین‌شناسی ساده شده منطقه بافت.

## ۳- روش‌ها

### ۳-۱. تابع تبدیل لجستیک سیگموئیدی

نظر، مجموعه داده‌های فضایی مورد نیاز جمع‌آوری می‌شود و برای تولید نقشه‌های شاهد مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه مجموعه داده‌های فضایی دارای مقادیر ماکزیمم و مینیمم یکسانی نیستند، لذا واحد و بعد یکسانی ندارند. از این

درمدل‌سازی پتانسیل معدنی که به منظور شناسایی مناطق اهداف اکتشافی برای یک نوع کانسار خاص انجام می‌گیرد، بر اساس یک مدل مفهومی از کانسار مورد

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

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

### ۳-۳. مدل‌سازی پتانسیل معدنی در منطقه بافت

تولید نقشه‌های شاهد: در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی یکی از مهم‌ترین لایه‌های اکتشافی هستند و از طرفی نقشه‌برداری آنومالی‌های ژئوشیمیایی یکی از مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین کارها در ژئوشیمی اکتشافی است (Zuo and Wang, 2016). در مطالعه حاضر به منظور تولید لایه شاهد از آنومالی‌های 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 آبراه‌های برداشت، آماده‌سازی و آنالیز شده با روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، برای ۸ عنصر شاخص کانی‌زایی 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. داده‌های ژئوشیمیایی داده‌های ترکیبی (بسته) هستند، لذا قبل از انجام هر گونه مطالعات، با هدف دستیابی به نتایج معنی‌دار لازم است که مقادیر با استفاده از تبدیلات لگاریتمی مناسب باز شوند (Filzmoser et al., 2009). بدین منظور به منظور رفع مشکل بسته بودن داده‌های ژئوشیمیایی از تبدیل لگاریتمی ایزومتریک (ilr) استفاده شد (Carranza, 2011). در ادامه برای هر مقدار از هر کدام از عناصر شاخص کانی‌زایی مس پورفیری مورد استفاده در این مطالعه، مقدار آماره U (Cheng, 1999) محاسبه شد، مقادیر آماره U برای تمام نمونه‌ها 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 ۰ و ۱ ارزشمند است (Parsa et al., 2016b). در این زمینه یک تابع لجستیک سیگموئیدی (رابطه ۱) که پارامترهای آن به صورت داده‌محور تعریف می‌شوند (Yousefi and Carranza, 2015a)، می‌تواند برای انتقال لایه‌های شاهد به یک فضای یکسان مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه به منظور انتقال مقادیر شاهد فضایی به یک فضای یکسان (۰ و ۱) و وزن‌دهی مقادیر شاهد در هر یک از نقشه‌های شاهد - که اهمیت نسبی هر مقدار شاهد را به طور معناداری نشان می‌دهند - 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  $n$  حاصلضرب آنها تعریف می‌شود. این تابع برای مجموعه‌ای از داده با استفاده از رابطه‌های زیر به دست می‌آید:

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

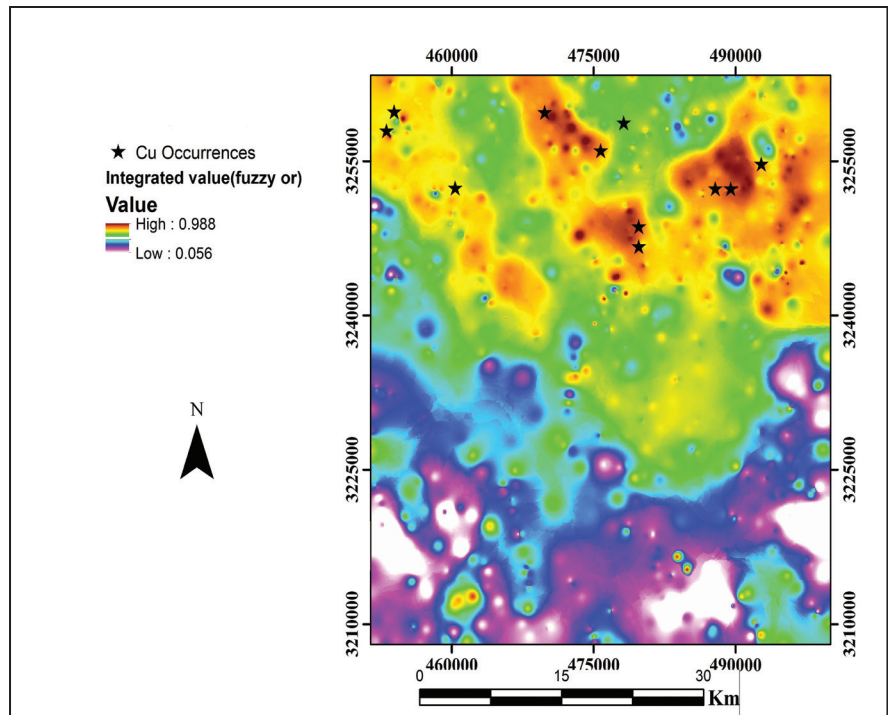
روش میانگین هندسی به عنوان یکی از انواع روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که می‌تواند به منظور تلفیق انواع داده‌ها استفاده شود (Wang and Yang, 2007). در مدل‌سازی پتانسیل معدنی نیز می‌توان از این روش برای تلفیق نقشه‌های شاهد استفاده کرد. این روش یکی از روش‌های فازی پیوسته بوده که در آن برای وزن‌دهی از یک تابع لجستیک مناسب (برای مثال رابطه ۱) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه برخی از نقشه‌های شاهد استفاده شده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، مقادیر منفی دارند و روش میانگین هندسی فقط برای مقادیر مثبت استفاده می‌شود، لذا مزیت استفاده از تابع لجستیک این است که مقادیر منفی را به یک فضای مثبت انتقال می‌دهد (Yousefi et al., 2014).

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

جدول ۱- پارامترهای آماری برای عناصر شاخص کانی‌زایی 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	کشدگی
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 کانی‌زایی 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 توده‌های 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 مدل‌سازی پتانسیل معدنی در ارتباط با کانسارهای مس پورفیری به صورت رابطه ۴ اصلاح می‌شود:

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

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 توده‌های نفوذی، نزدیکی به آلتراسیون فلیک و نزدیکی به آلتراسیون پروپلیتیک هستند. پس از محاسبه مقادیر میانگین هندسی برای تمام پیکسل‌ها، این مقادیر به منظور تولید یک نقشه مدل‌سازی 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 اندیس‌های شناخته شده با هر یک از کلاس‌های مدل پیش‌بینانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های رایج مورد استفاده برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها، روش چگالی نرمال شده (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001) است. چگالی نرمال شده برای یک کلاس از یک مدل پیش‌بینانه به صورت نسبت درصد اندیس‌های پیش‌بینی شده توسط آن کلاس به مساحت اشغال شده توسط آن کلاس، با توجه به مساحت کل منطقه تعریف می‌شود (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001). به طوری که مقادیر بزرگ‌تر از یک برای آن نشانگر ارتباطی مثبت میان کلاس مورد نظر با کانسارهای شناخته شده است. برای محاسبه چگالی نرمال شده می‌توان از نمودار پیش‌بینی - مساحت (Yousefi and Carranza, 2015c) بهره برد. به طوری که از روی نقطه تلاقی نمودار پیش‌بینی - مساحت، پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه چگالی نرمال شده به دست می‌آید.

کانسارهای پورفیری از سیال‌های هیدروترمال تولید و موجب تغییرات شیمیایی و فیزیکی در سنگ‌های اطراف می‌شوند (Rowan et al., 2003). هر کانسار پورفیری عموماً با چهار نوع از آلتراسیون‌های هیدروترمالی در ارتباط است. این آلتراسیون‌ها به دلیل اینکه وسعت زیادی نسبت به خود کانسارهای پورفیری و نیز شکل هندسی و ویژگی‌های طیفی خاصی دارند، لذا شناسایی آنها از طریق علم سنجش از دور، به عنوان یک موضوع جالب در فرایند اکتشاف مواد معدنی به شمار می‌رود و در مدل‌سازی پتانسیل معدنی نیز به عنوان یک لایه شاهد اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

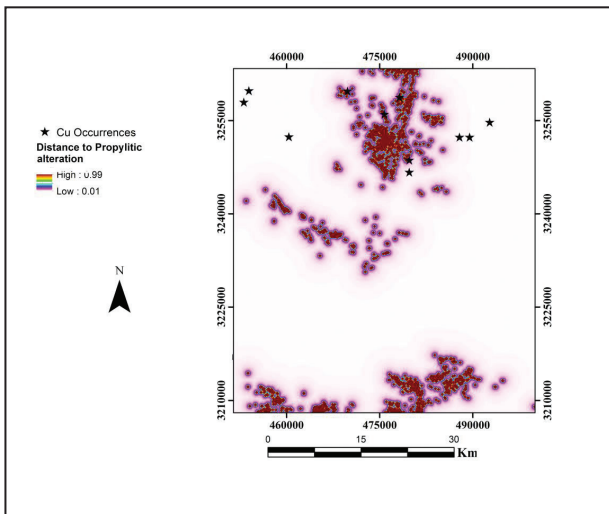
در مطالعه حاضر به منظور تولید لایه فاصله از آلتراسیون‌های هیدروترمالی، با به کارگیری روش مناسب، از روی داده‌های سنجنده استر، آلتراسیون‌های فلیک و پروپلیتیک شناسایی و فاصله از آنها محاسبه شد و پس از انتقال به فضای فازی ۱ و ۰ به صورت شکل‌های ۳ و ۴ به تصویر کشیده شدند.

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

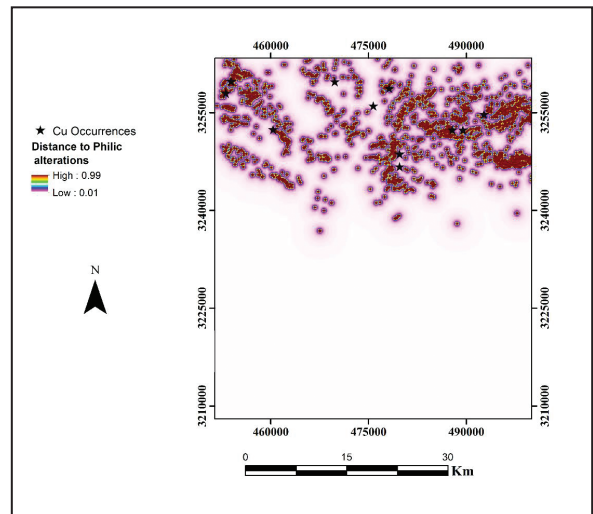
به طور عمومی پذیرفته شده است که عوارض زمین‌شناسی (به طور مثال گسل‌ها)، به عنوان ساختارهای کنترل کننده کانی‌زایی هستند و نقش کلیدی در تشکیل کانسارها دارند (Carranza, 2008). گسل‌ها و شکستگی‌ها مهم‌ترین مسیر عبور و چرخش همرفتی سیالات هیدروترمال هستند و چگالی بالایی از آنها برای اکتشاف کانسارهای مس پورفیری 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 لایه‌های شاهد در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تولید شد (شکل ۶).

### ۳-۴. تلفیق لایه‌های شاهد با استفاده از روش میانگین هندسی

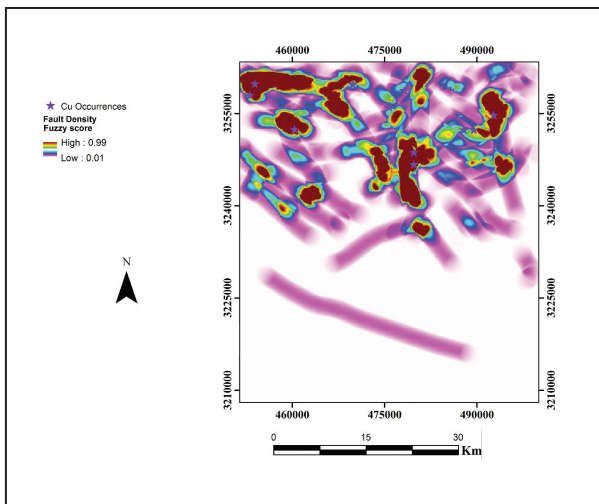
با هدف مدل‌سازی پتانسیل معدنی در ورقه زمین‌شناسی بافت، از روش میانگین



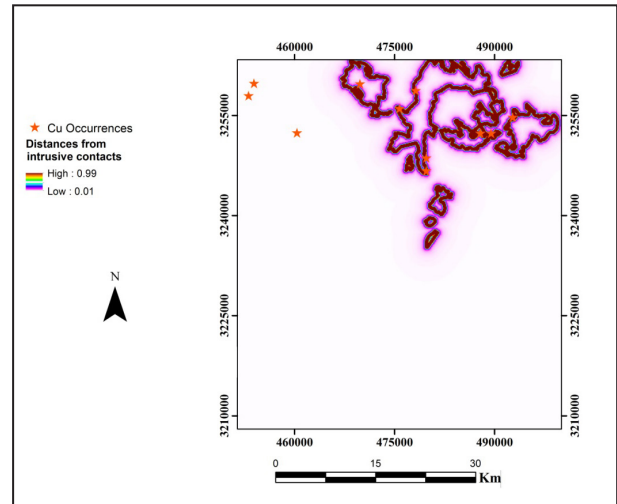
شکل ۴- نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون پروپیلیتیک.



شکل ۳- نقشه فازی شده فاصله از آلتراسیون فیلیک.

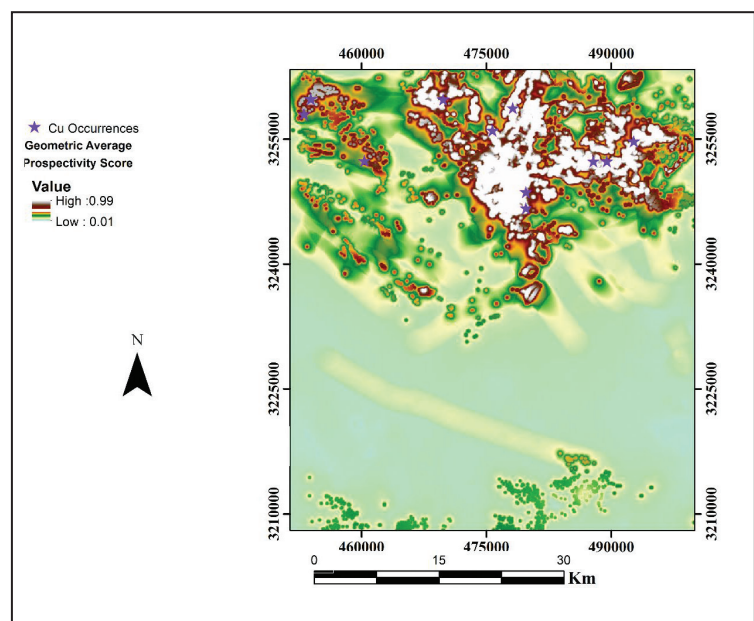


شکل ۶- نقشه فازی شده چگالی گسل.



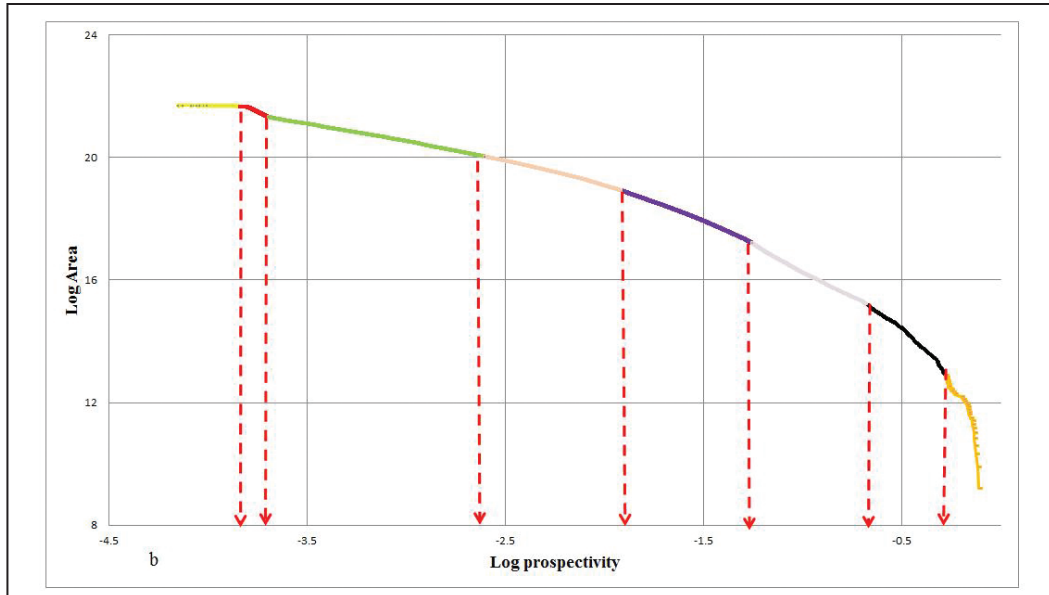
شکل ۵- نقشه فازی شده فاصله از مرز توده‌های نفوذی مرتبط با کانسار مس پورفیری.

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

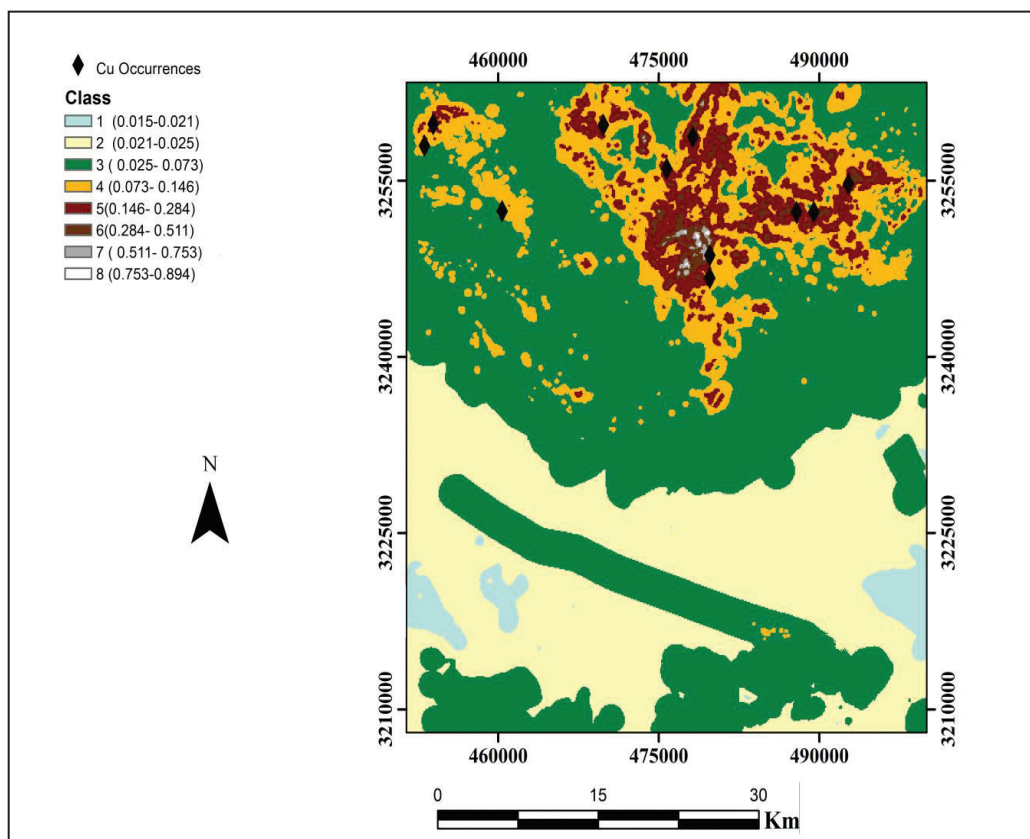


این است که روش میانگین هندسی می‌تواند تا ۸۷ درصد از اندیس‌های شناخته شده را در ۱۳ درصد از مساحت منطقه پیش‌بینی کند و چگالی نرمال شده برای این مدل پتانسیلی تولید شده ۶/۷ است که از نسبت درصد اندیس‌های شناخته شده به مساحت اشغال شده در نقطه‌ی تلاقی به دست می‌آید. با توجه به اینکه مقدار چگالی نرمال شده برای مدل پتانسیل حاصل از روش میانگین هندسی بزرگ‌تر از یک است، لذا می‌توان استنباط کرد که روش میانگین هندسی به عنوان یک روش کارا در تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی به منظور شناسایی نواحی هدف اکتشافی عمل می‌کند.

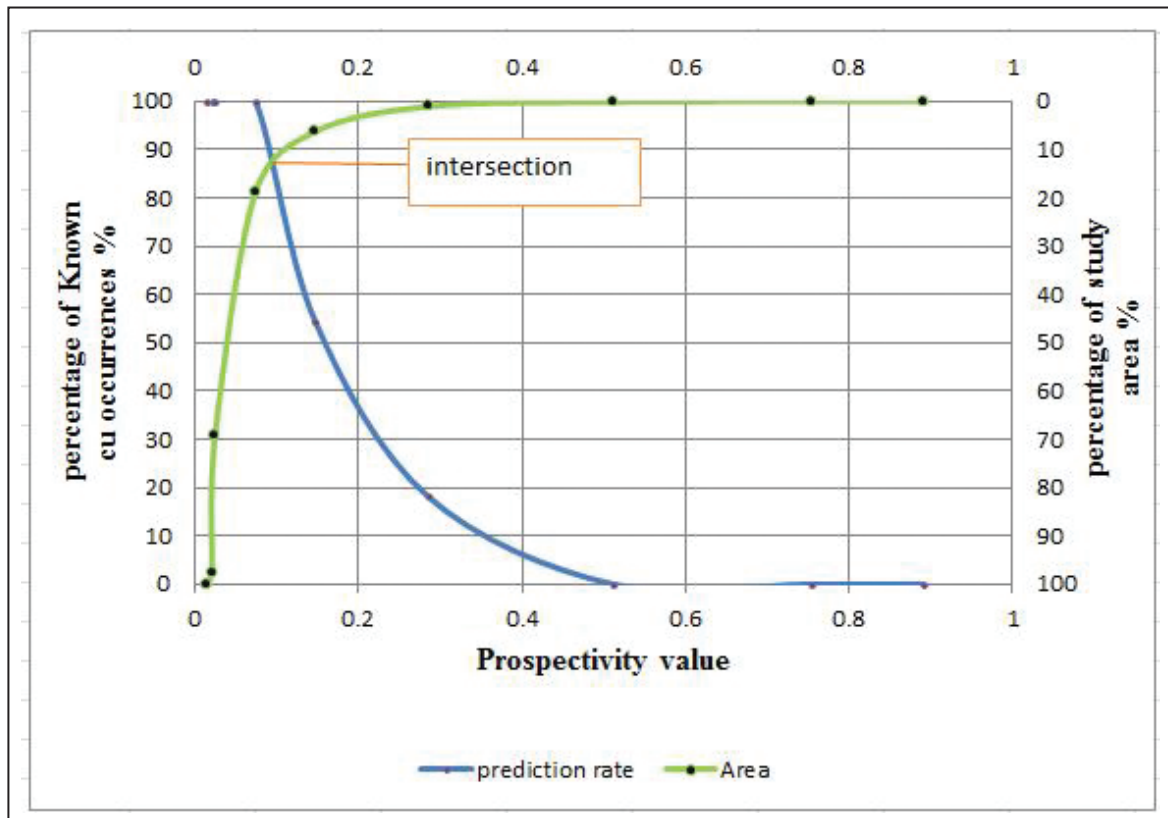
در این زمینه برای ایجاد نمودار پیش‌بینی- مساحت لازم است مقادیر پیوسته میانگین هندسی به برخی از کلاس‌ها طبقه‌بندی شوند. برای تعیین حد آستانه مناسب برای طبقه‌بندی داده‌های پیوسته، روش فرکتالی عیار- مساحت (Cheng et al., 1994) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۸). بر اساس مدل فرکتالی، مقادیر میانگین هندسی به ۸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



شکل ۸- مدل عیار مساحت برای مقادیر میانگین هندسی.



شکل ۹- نقشه طبقه‌بندی شده مقادیر مدل‌سازی 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, 33- 41.



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

S. Ghasemzadeh<sup>1</sup>, A. Maghsoudi<sup>2\*</sup> and M. Yousefi<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup>Associate 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