

مقایسه روش‌های میانگین هندسی، ارزش هم زمانی شواهد و عملگرهای فازی در تهیه نقشه شاهد ژئوشیمی

میثم نیک فرجام^{۱*} و اردشیر هزارخانی^۲

^۱دانشجوی دکترا، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲استاد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۱

چکیده

یکی از مهم‌ترین لایه‌های اطلاعاتی در تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی، نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی هستند که در این پژوهش روش‌های مختلف تلفیق برای تهیه آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. ناحیه مورد مطالعه (ورقه ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان) در استان آذربایجان شرقی و زون متالوژنی اهر- ارسباران واقع می‌باشد. این ناحیه به دلیل موقعیت زمین‌شناسی و حضور اندیس‌های مس پورفیری به ویژه معدن مس سونگون، به عنوان یک ایالت متالوژنی مهم در شمال غرب ایران به شمار می‌رود. در این پژوهش، از ۱۰۶۷ نمونه رسوب آبراه‌های به‌عنوان داده اولیه برای انجام مطالعات ژئوشیمی استفاده گردید. با انتخاب عناصر Cu ، Mo ، Au ، Ag ، Pb ، Zn ، As به عنوان عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری، نقشه شاهد فازی شده هرکدام با استفاده از تابع لجستیکی ترسیم شدند. این نقشه‌ها با استفاده از روش‌های OR فازی، میانگین هندسی و ارزش هم‌زمانی شواهد تلفیق گشتند. به منظور اعتبارسنجی نتایج، از نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت اشغال شده استفاده گردید. با استفاده از این نمودار، نقشه نهایی تلفیق یافته به روش ارزش هم‌زمانی شواهد با اختصاص ۷۶ درصد نرخ پیش‌بینی برای کانسارهای شناخته شده، به عنوان یک روش مناسب در شناسایی کانسارهای مس پورفیری در نظر گرفته شد.

کلیدواژه‌ها: نقشه شاهد ژئوشیمی، فازی، تلفیق، مس پورفیری، ورزقان.

***نویسنده مسئول:** میثم نیک فرجام

E-mail: meysamnikfarjam47@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

امروزه به منظور دستیابی به محدوده‌های مستعدتر که در مطالعات اکتشافی در مقیاس ناحیه‌ای انجام می‌شود، از روش‌های تلفیق لایه‌های اکتشافی مختلف نظیر لایه‌های ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دورسنجی و زمین‌شناسی استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت موضوع، در سالیان اخیر کارشناسان و محققان فراوانی بر روی روش‌های مختلف در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مطالعاتی را انجام داده‌اند (Pazand et al., 2014; Yousefi and Carranza, 2015a; Pazand and Hezarkhani, 2018) که هر یک مزیت‌ها و معایبی را به همراه دارند. از روش‌هایی که برای تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شوند، می‌توان به روش‌های داده محور و دانش‌محور اشاره کرد. روش‌های داده محور برای نواحی استفاده می‌شوند که عملیات اکتشافی به‌خوبی در آن‌ها انجام نشده یا تعداد کانسارهای شناخته شده اندک باشند. در این روش، از نظر و تجربه کارشناس برای وزن‌دهی کمک گرفته می‌شود. در طرف مقابل، روش‌های داده محور برای مناطقی استفاده می‌شوند تعداد کانسارهای شناخته شده در آن ناحیه زیاد باشد (Yousefi and Carranza, 2015a). روش‌های فازی ازجمله روش‌های دانش‌محور هستند که از نظر کارشناس در وزن‌دهی استفاده می‌کند (یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹).

در تهیه یک نقشه پتانسیل معدنی که با روش فازی تهیه شده است، توابع مختلف فازی‌ساز برای فازی‌کردن داده‌های هر کدام از لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد که هر تابع نیز دارای پارامترهایی است که عدم انتخاب صحیح آن‌ها می‌تواند خروجی نادرستی را نتیجه دهد. علاوه بر این، روش‌های مختلفی نیز برای تلفیق هر کدام از نقشه‌های شاهد و لایه‌های اطلاعاتی وجود دارد که توسط محققین مختلف استفاده شده است. در سالیان اخیر محققین توجه ویژه‌ای به این موضوع نموده‌اند و روش‌های بهینه‌ای برای تهیه هرکدام از لایه‌های اطلاعاتی برای نوع خاصی از کانسارها را ارائه داده‌اند. برای مثال می‌توان به پژوهشی که در خصوص کانسارهای طلای کوه‌زایی در بخش طلاخیز سفز- سردشت که توسط Almasi et al. (2017) انجام شده است، اشاره کرد. با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت جزئیات روش‌های مورد استفاده در تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی، در

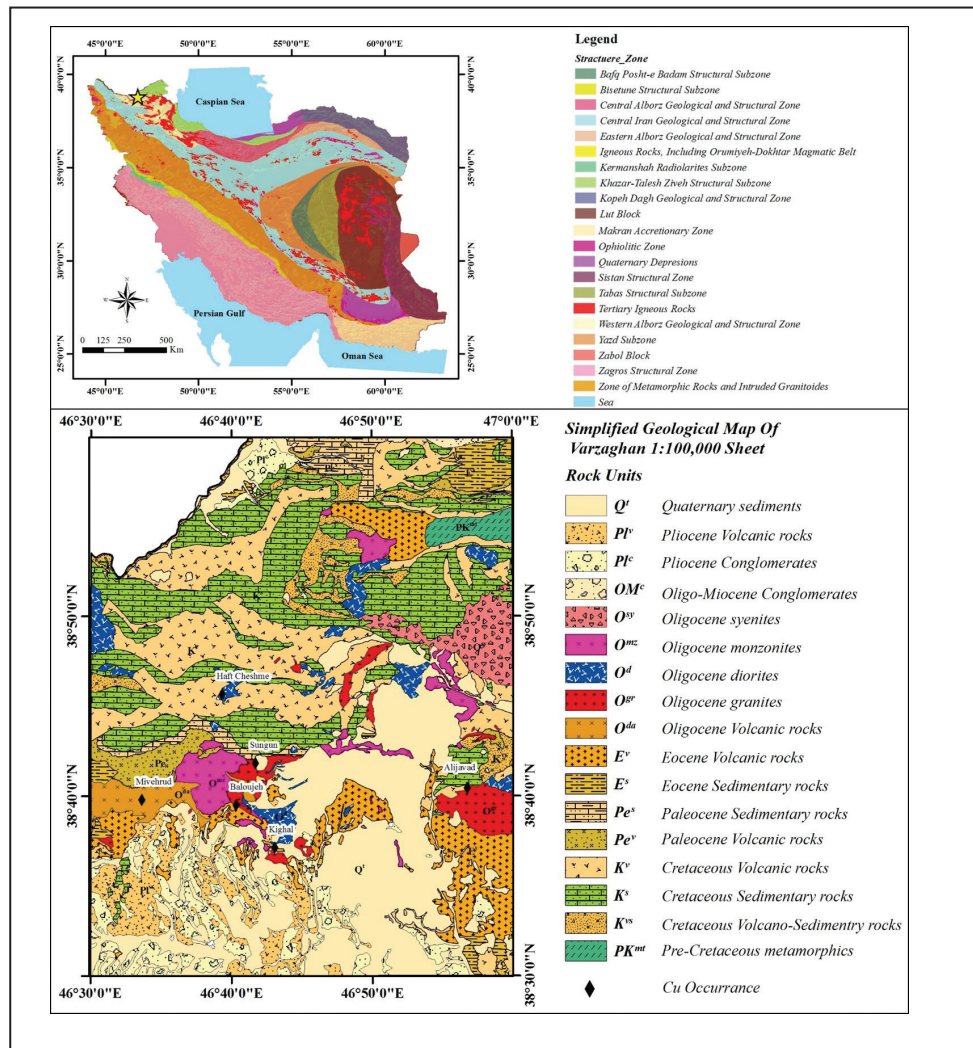
این پژوهش عملکرد روش‌های تلفیق میانگین هندسی، ارزش هم زمانی شواهد (US; Union Score) و عملگرهای فازی در تهیه نقشه‌های شاهد ژئوشیمی کانسارهای مس پورفیری در ناحیه ورزقان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

ورقه یکصد هزارم ورزقان بخش مهمی از زون ارسباران را تشکیل می‌دهد (شکل ۱) که از حدود ۲۵ کیلومتری خاور اهر تا ۳۵ کیلومتری خاور جلفا امتداد داشته و شامل چهارگوش اهر و گوشه شمالی و شمال شرقی چهارگوش تبریز- پلدشت می‌باشد. این محدوده به دلیل حضور فراوان معادن، کانسارها و اندیس‌های مس پورفیری به‌ویژه معدن مس سونگون، مس و آهن اسکارن (مانند معدن متروکه انجرد) و طلا، نقره و مس اپی ترمال (مانند اندیس‌های معدنی هیزه‌جان) به عنوان یک ایالت متالوژنی مهم در شمال غرب ایران به شمار می‌رود (Jamali and Mehrabi, 2014). فروانش و سپس تصادم قاره‌ای متعاقب آن در طول پالئوسن تا الیگوسن در امتداد حاشیه جنوبی اوراسیا، موجب فعالیت‌های آتشفشانی و پلوتونیک گسترده آلکالین و کالک آلکالین نظیر نفوذ استوک‌های کالک آلکالین پورفیریتهیکی در سونگون و هفت‌چشمه و تعدادی از ذخایر پورفیری مشابه مس- مولیبدن در طول ائوسن شده است (حسن پور، ۱۳۸۹؛ Aghazadeh et al., 2012; Asgari and Hezarkhani, 2010; Jamali et al., 2010; McInnes et al., 2003; Shahabpour, 1982). در این ایالت متالوژنی، سنگ‌های میزبان آتشفشانی و پلوتونیک با سن سنوزوئیک دارای ترکیب پتاسیم متوسط تا زیاد و کالک آلکالین تا آلکالین بوده و کانسارهای موجود در این ناحیه از نظر زمین‌شناسی، سنگ‌های میزبان، سن، دگرسانی و کانی‌سازی از خصوصیات مشترکی برخوردار هستند (حسن پور، ۱۳۸۹؛ Hezarkhani and Williams Jones, 1998; Jamali et al., 2010). براساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان (مهرپرتو و همکاران، ۱۳۷۱)، قسمت اعظم این ناحیه را سنگ‌های آتشفشانی انوسن و توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن تشکیل می‌دهد. به لحاظ چینه‌شناسی، قدیمی واحدهای سنگی موجود در ناحیه مورد مطالعه مربوط به ۱۷

از مرکز و شمال ناحیه مورد مطالعه شده است. واحدهای دوره الیگوسن که عمدتاً گرانیت و گرانودیوریت، مونزونیت و دیوریت می‌باشند، سبب کانی‌سازی‌های با ارزشی در اطراف این توده‌های نفوذی شده‌اند. در زمان‌های الیگو-میوسن و پالئوسن نیز کنگلومرا و سنگ‌های آتشفشانی اسیدی را می‌توان عمدتاً در بخش‌های جنوبی مشاهده کرد (شکل ۱). همچنین طبق نقشه زمین‌شناسی ورزقان، در اطراف اکثر واحدهای نفوذی می‌توان دگرسانی‌های هیدروترمال را مشاهده نمود.

سنگ‌های دگرگونی قبل از کرتاسه می‌باشد. واحدهای کرتاسه این ناحیه که عمدتاً به صورت واحدهای آتشفشانی-رسوبی، واحدهای رسوبی و واحدهای ولکانیک نمایان می‌شوند، در بخش‌های مرکزی و شمالی ناحیه، قابل مشاهده می‌باشند. واحدهای آتشفشانی و رسوبی پالئوسن با گسترش در بخش‌های میانی نقشه، قدیمی‌ترین واحدهای سنوزوئیک ورقه ورزقان می‌باشند. فعالیت آتشفشانی در ائوسن سبب مشاهده واحدهایی همچون آندزیت، داسیت و تراکیت در بخش‌هایی



شکل ۱- موقعیت ناحیه مورد مطالعه در نقشه زون‌های ساختاری ایران (اصلاح پس از آقاباتی، ۱۳۸۳)؛ نقشه زمین‌شناسی ساده شده ورقه ۱:۱۰۰,۰۰۰ ورزقان (مهرپرتو و همکاران، ۱۳۷۱).

می‌شوند. بنابراین با در نظر گرفتن عناصر Ag و Cu ، Mo ، Au ، Zn ، Pb ، As عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری، نقشه فازی پیوسته هر کدام از این عناصر ترسیم و سپس تلفیق شدند.

۴- مجموعه‌های فازی

تئوری فازی اولین‌بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید (Zadeh, 1965). لطفی‌زاده به ناتوانی ریاضیات کلاسیک برای پرداختن به مسائل نادقیق دنیای واقعی اشاره کرد و چارچوب تئوری مجموعه‌های فازی را بنا نمود. در نظریه کلاسیک مجموعه‌ها، مقدار عضویت یک عنصر در یک مجموعه ۰ یا ۱ می‌باشد. درحالی‌که در نظریه مجموعه فازی، مجموعه‌ها شامل عناصری هستند که

۳- مدل توصیفی کانسارهای مس پورفیری

به منظور شناخت دقیق از پارامترهای موثر در کانی‌سازی و شکل‌گیری نوع کانسار مورد نظر، باید ابتدا مدل توصیفی کانسار هدف تعریف گردد مدل توصیفی کانسارهای مس پورفیری در قالب محیط زمین‌شناسی، تکنیکی، دگرسانی‌ها و کانی‌سازی‌های رایج و نیز زون‌بندی فلزی مطرح می‌شود. در این پژوهش به دلیل اهمیت بخش ژئوشیمی و توزیع عناصر و بالتبع زون‌بندی فلزی در این کانسارها، تنها اشاره مختصری به این دسته از مشخصات کانسارهای مس پورفیری می‌پردازیم. عناصر Au و Cu ، هسته‌های پتاسیک، کلریت-سربست و سربست سیستم‌های مس پورفیری را مشخص می‌کند. هسته‌های Cu ، Mo و Au هاله‌هایی در مقیاس کیلومتری دارند که توسط مقادیر آنومالی‌هایی از عناصر Ag و Zn ، Pb ، As که شرایط دما پایین و هیدروترمال را نشان می‌دهند، معرفی

مقادیر شاهد هر پیکسل در نقشه ورودی می باشد.

۵-۱. تعیین شیب و نقطه عطف به صورت داده محور

برای فازی سازی، معمولاً به مقدار بیشینه یا بالاترین کلاس از مقادیر شاهد را امتیازی نزدیک به ۱ (همچون ۰/۹۹) می دهند. به همین صورت کمترین مقدار نیز با اختصاص امتیازی نزدیک به صفر (۰/۰۱) به آن در نظر گرفته می شود. بر اساس روش پیشنهاد شده، مقادیر مناسب برای شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی، از حل دستگاه دو معادله و دو مجهول ارائه شده در زیر حاصل می شود (Yousefi and Carranza, 2015a):

$$\begin{cases} F_{Ev(min)} = \frac{1}{1 + e^{-s(Ev(min)-i)}} \\ F_{Ev(max)} = \frac{1}{1 + e^{-s(Ev(max)-i)}} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، $F_{Ev(max)}$ و $F_{Ev(min)}$ به ترتیب کمترین و بیشترین امتیاز فازی از مقادیر شاهد هستند که به ترتیب معادل با ۰/۰۱ و ۰/۹۹ می باشند. $E_{v(max)}$ نیز مقادیر شاهد کمینه و بیشینه متناظر در مجموعه داده های ورودی می باشند. بنابراین دو معادله با دو مجهول شیب و نقطه عطف وجود دارد. با حل این معادله مقدار مناسب برای این دو متغیر حاصل می شود. با اختصاص ۰/۹۹ به ترتیب برای کمترین و بیشترین امتیاز فازی، مقادیر i و s محاسبه می شوند (Yousefi and Carranza, 2015a):

$$s = \frac{9.2}{E_{v(max)} - E_{v(min)}} \quad (4)$$

$$i = \frac{E_{v(max)} - E_{v(min)}}{2}$$

با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه هر عنصر، مقادیر شیب و نقطه عطف تابع لجستیکی فازی ساز حاصل شد (جدول ۱). از این رو با جایگزین کردن این مقادیر در رابطه (۲)، مقدار فازی هر عنصر برای هر پیکسل به دست آمد. در شکل ۲ نقشه های شاهد حاصل از فازی سازی با تابع لجستیکی ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود نقشه های عناصر مولیبدن و مس که در مرکز کانسارهای مس پورفیری هستند، با محل کانسارهای بزرگ مس پورفیری مطابقت دارند.

درجه عضویشان در آن مجموعه بین صفر تا یک متغیر است (Zadeh, 1965). این مقادیر می توانند توسط نظر کارشناسان تعیین شوند و یا با استفاده از توابع عضویت فازی حاصل گردند. یک مجموعه فازی A ، به صورت مجموعه ای از زوج مرتب ها ارائه می شود که هر جفت شامل یک عنصر عمومی x و درجه عضویت (مقدار عضویت) آن می باشد (Chiang and Lee, 1995):

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (1)$$

که در آن یک متغیر زبانی x در مجموعه U با تابع عضویت فازی $\mu_A(x)$ تعریف می شود. در این پژوهش، به منظور فازی سازی داده های عیار عناصر شاخص کانسارهای مس پورفیری، از تابع لجستیکی با تعیین داده محور پارامترهای آن استفاده شده است.

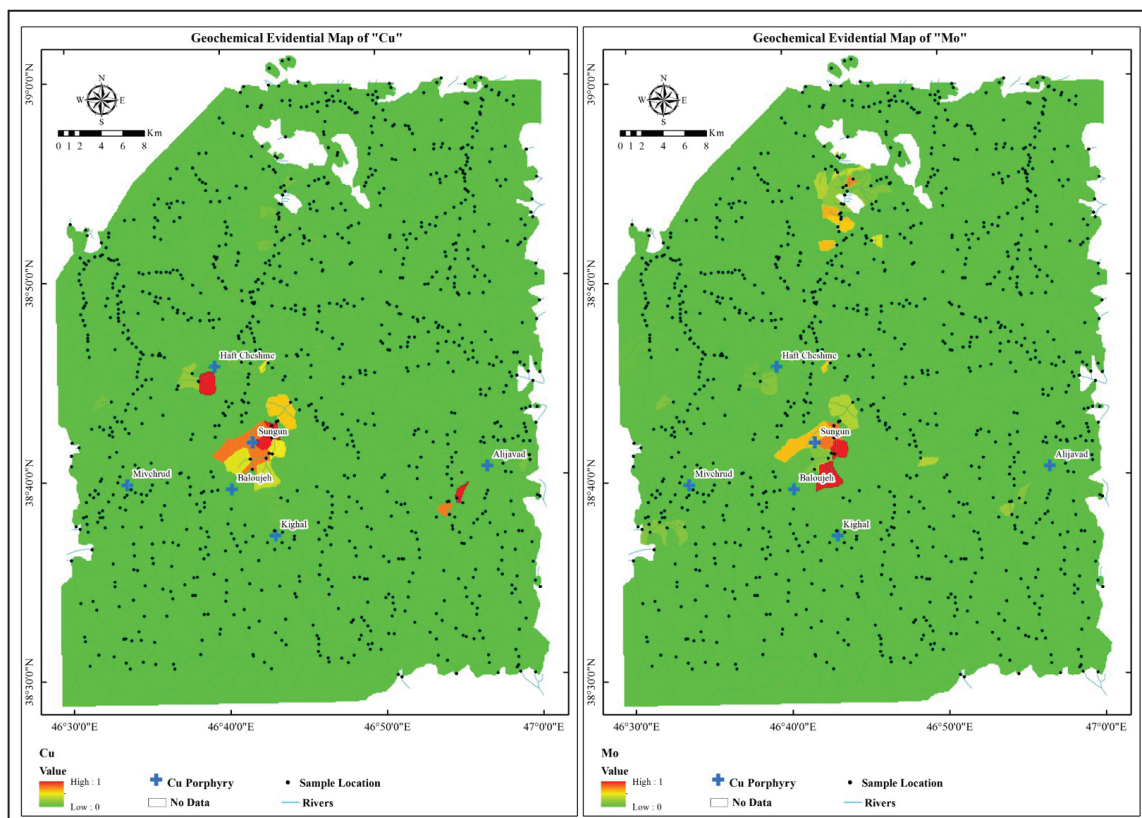
۵-۲ فازی سازی با استفاده از تابع لجستیک

در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، هدف طبقه بندی مناطقی با اولویت بالای اکتشافی برای اکتشافات بیشتر، مناطقی با اولویت بسیار اندک و کلاس هایی بین این دو می باشد. بنابراین در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مشکل طبقه بندی مناطق و در نتیجه مشکل مدل نهایی که می تواند به صورت طبقه بندی شده ارائه شود، وجود دارد (Yousefi and Carranza, 2015a). ایشان نشان دادند که تابع لجستیک سیگموئیدی می تواند برای انتقال داده های یک لایه شاهد استفاده شود (Yousefi and Carranza, 2015b). بنابراین داده ها در نقشه شاهد وزن دار، بین ۰ و ۱ قرار می گیرند. از این رو توابع مختلفی وجود دارند که می توانند داده ها را براساس مقدار کمینه و بیشینه شان به فضای لجستیکی منتقل کند (Yousefi and Carranza, 2015a). در این پژوهش از تابع لجستیکی استفاده شده به وسیله یوسفی و کارانزا در سال ۲۰۱۵، برای انتقال مجموعه مقادیر شاهد به یک فضای یکسان به کار گرفته شده است:

$$F_{Ev} = \frac{1}{1 + e^{-s(Ev-i)}} \quad (2)$$

به طوری که F_{Ev} یک امتیاز فازی بین ۰ و ۱ و یک وزن فازی در فضای لجستیک می باشد، i و s به ترتیب نقطه عطف و شیب تابع لجستیکی می باشد و $E_{v(i)}$

شکل ۲- نقشه فازی عناصر مس و مولیبدن (فازی شده با تابع لجستیک).



جدول ۱- مقادیر شیب و نقطه عطف برای عناصر مختلف.

عنصر	شیب (s)	نقطه عطف (i)
As	0.031	147.5
Au	94	0.05
Ag	5.9	0.83
Cu	0.005	1001
Mo	0.161	28.5
Pb	0.014	321
Zn	0.01	510

۶- روش‌های تلفیق

۶-۱. عملگرهای فازی

$$\mu_{combination} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (5)$$

که در این رابطه μ_A مقدار عضویت فازی نقشه A در یک موقعیت خاص است و μ_B مقدار عضویت فازی نقشه B در همان موقعیت است و به همین ترتیب برای سایر. اثر این عملگر ایجاد خروجی است که به وسیله کمترین مقدار عضویت فازی در هر نقطه کنترل می‌شود. این عملگر با پدید آمدن یک برآورد محافظه کارانه، در مواقعی که دو یا چند شاهد لازم برای اثبات یک فرضیه باید باهم وجود داشته باشند، مناسب است (Carranza and Hale, 2001).

– **عملگر فازی OR:** این عملگر شبیه عملگر OR بولین (اتحاد منطقی) است و در آن مقادیر فازی برای هر نقطه‌ای از نقشه خروجی توسط بیشترین مقادیر نقشه‌های ورودی کنترل می‌شود. این عملگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

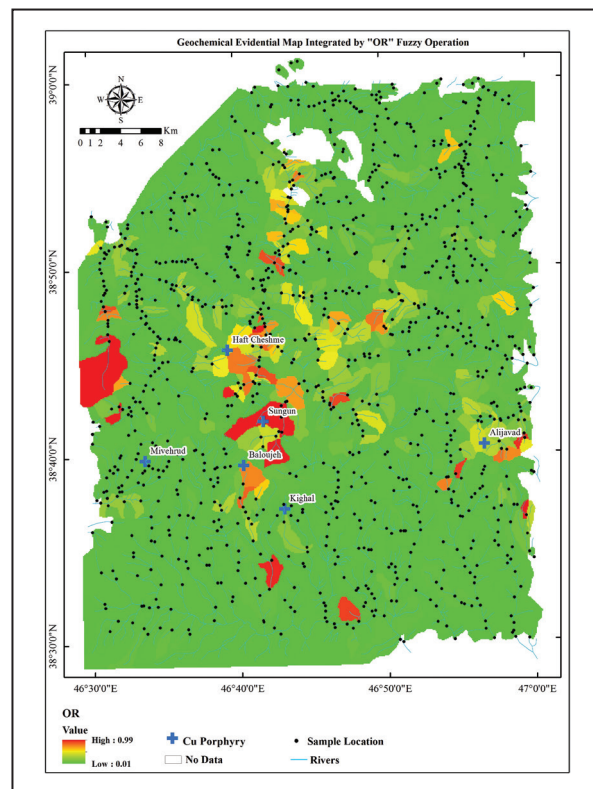
$$\mu_{combination} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (6)$$

این تابع برای نقشه‌های پتانسیل معدنی مناسب است به ویژه در شرایطی که عوامل مورد نظر در تشخیص کانی سازی کم باشند و حضور هر عامل مثبت می‌تواند برای اظهار مطلوبیت کافی باشد (Carranza and Hale, 2001). با توجه به اینکه ژئوشیمی عناصر مدنظر، یک عامل مثبت در تعیین کانسارهای مس پورفیری هستند، لذا این عملگر مناسب‌ترین عملگر فازی برای تلفیق نقشه‌های ژئوشیمی منفرد می‌باشد (شکل ۳).

با در دست داشتن دو یا چند نقشه با توابع عضویت فازی، عملگرهای متنوعی را می‌توان برای ترکیب کردن مقادیرهای عضویت با یکدیگر به کار گرفت (Bonham-Carter, 1994). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پنج عملگر در ترکیب داده‌های اکتشافی نتایج بهتری را ارائه می‌دهند (Moon, 1998). عملگرهای AND و ضرب فازی خاصیت کاهشی دارند و هنگامی که چند عامل یکدیگر را تضعیف کنند به کار می‌رود. در طرف مقابل عملگرهای OR و جمع فازی دارای خاصیت افزایشی هستند و زمانی استفاده می‌شوند که حتی وجود یک عامل مثبت، موثر تلقی شود. عملگر دیگر، عملگر گاما می‌باشد که ترکیبی از ضرب و جمع فازی است. در این پژوهش از عملگر OR فازی استفاده شد که متداول‌ترین روش در تلفیق نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی می‌باشد. توسط این عملگر، مقادیر فازی برای هر نقطه‌ای از نقشه خروجی، توسط بیشترین مقادیر نقشه‌های ورودی کنترل می‌شود. در زیر به صورت مختصر به نحوه عملکرد هر کدام از عملگرهای فازی پرداخته می‌شود.

– **عملگر فازی AND:** این عملگر معادل یک عملیات AND بولین (اشتراک منطقی) بر روی مقادیرهای مجموعه کلاسیک (صفر و یک) است. این عملگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

شکل ۳- نقشه شاهد ژئوشیمی حاصل از تلفیق با روش OR فازی.

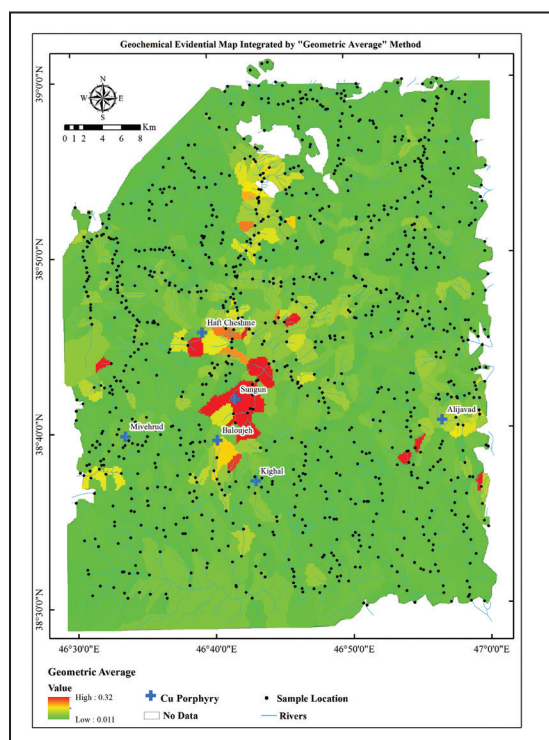


فازی برای هر یک از عناصر نقره، آرسنیک، طلا، مس، مولیبدن، سرب و روی در هر پیکسل از تصویر رستری می‌باشد. این مقادیر با استفاده از تابع لجستیکی که در بخش فازی سازی با روش‌های پیوسته مطرح شدند، حاصل گشته‌اند (Yousefi and Carranza, 2015b). پس از محاسبه مقادیر میانگین هندسی برای هریک از پیکسل‌ها، نقشه تلفیقی با این روش ترسیم گردید (شکل ۴). همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر پر پتانسیل در نقشه تلفیق یافته، اغلب منطبق بر کانسارهای مس پورفیری شناخته شده در ناحیه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۴).

۳-۶. روش ارزش هم زمانی شواهد

روش دیگر برای تهیه نقشه شاهد، استفاده از رابطه زیر می‌باشد:

$$UnionScore (US) = \sum_{i=1}^n Fx_i \quad (13)$$



شکل ۴- نقشه شاهد ژئوشیمی حاصل از تلفیق با روش میانگین هندسی.

که در آن US، امتیاز نهایی برای هر سلول، Fx امتیاز فازی هر سلول که با تابع لجستیکی حاصل شده است و n، تعداد لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی برای تلفیق می‌باشد. در این پژوهش از رابطه (۱۳) که یک تابع افزایشی است، برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد (Carranza, 2008). در این روش هر سلول اکتشافی با تعداد ویژگی‌های شاهد زیاد، دارای وزن بیشتر برای تلفیق و اولویت بیشتر برای اکتشاف‌های آتی می‌باشد. بنابراین نقشه‌های به دست آمده از این روش برای تابع لجستیک، دارای مناطقی با بیشترین امتیاز به عنوان مناطق مستعد برای کانسارهای مس پورفیری هستند (شکل ۵).

در مقایسه این روش با روش جمع جبری فازی، باید توجه کرد که خروجی نقشه شاهد تلفیق شده با استفاده از عملگر جمع جبری فازی، بزرگ‌تر یا مساوی بیشترین مقدار امتیاز فازی در بین سایر مقادیر ورودی است. عملگر جمع جبری فازی دارای اثر افزایشی است به این معنی که حضور امتیازات فازی خیلی زیاد سبب بیش از حد ارزشمند شدن مناطق مربوطه می‌شود (Carranza, 2008). بر این اساس Knox-Robinson (2000) اعلام کرد که جمع جبری فازی همان جمع واقعی نمی‌باشد و تا حدودی پیچیده‌تر است. در حالی که روش تلفیق ارزش هم‌زمانی شواهد، همان جمع واقعی می‌باشد.

— عملگر فازی ضرب: در این جا تابع عضویت فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{combination} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (7)$$

در این رابطه n عامل کنترل‌کننده کانی‌سازی ترکیب می‌شوند که در آن n مقدار عضویت فازی نقشه آم است که بایستی ترکیب شوند. این عملگر اثر کاهشی دارد و هنگامی که دو عامل یکدیگر را تضعیف می‌کنند، به کار می‌رود. در این روش برخلاف فازی OR و AND کلیه مقادیرهای عضویت نقشه‌های ورودی در نقشه خروجی تاثیر می‌گذارند (Carranza and Hale, 2001).

— عملگر فازی جمع جبری: این عملگر مکمل حاصل ضرب جبری است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{combination} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (8)$$

در این روش n عامل کنترل‌کننده کانی‌سازی ترکیب می‌شوند که در آن n مقدار عضویت فازی نقشه آم می‌باشد. نتیجه این عملگر همیشه بزرگ‌تر یا مساوی بزرگ‌ترین درجه عضویت است. این عملگر اثر افزایشی دارد و هنگامی که اثر ترکیب دو یا چند قسمت از شواهد که یک فرضیه را تأیید می‌کنند و یکدیگر را تقویت می‌نمایند به کار می‌رود (Carranza and Hale, 2001).

— عملگر فازی گاما: این عملیات برحسب حاصل ضرب جبری فازی و حاصل جمع جبری فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{combination} = (\prod_{i=1}^n \mu_i)^{1-\gamma} (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i))^{\gamma} \quad (9)$$

در این رابطه مقدار γ بین عدد صفر تا یک تعیین می‌شود. انتخاب صحیح و آگاهانه گاما مقدارهایی را در خروجی به وجود می‌آورد که یک سازگاری انعطاف‌پذیری میان گرایش‌های کاهشی و افزایشی دو عملگر فازی جمع و ضرب را دارد (Carranza and Hale, 2001).

۳-۶. روش میانگین هندسی

میانگین هندسی به صورت ریشه nام از ضرب n مقدار تعریف می‌شود. میانگین هندسی (GA) مجموعه داده‌های $(v_1, v_2, \dots, v_n)$ به صورت زیر تعریف می‌شود (Wang et al., 2007):

$$G_A(v_1, v_2, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n v_i = \sqrt[n]{v_1 v_2 \dots v_n} \quad (10)$$

در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پارامترهای معادله ارائه شده در رابطه ۱۰ برای یک سلول واحد و یا هر پیکسل اعمال می‌شود. به این صورت که $v_1 = f_1$ مقدار فازی مربوط به یک معیار اکتشافی (مثلاً مقدار فازی عنصر آرسنیک) در هر سلول واحد، $v_2 = f_2$ مقدار فازی مربوط به یک معیار اکتشافی دیگر (در اینجا عنصر دیگر) و به همین صورت مقدار فازی برای n معیار اکتشافی لحاظ می‌شود. بنابراین f_i وزن فازی مربوط به شاخص iام در هر سلول می‌باشد که توسط روش میانگین هندسی محاسبه شده است. بنابراین ناحیه مورد مطالعه باید به عنوان یک ماتریسی از پیکسل‌ها در تصویر رستری در نظر گرفته شود، تا مقدار میانگین هندسی به صورت زیر محاسبه گردد (Yousefi and Carranza, 2015b):

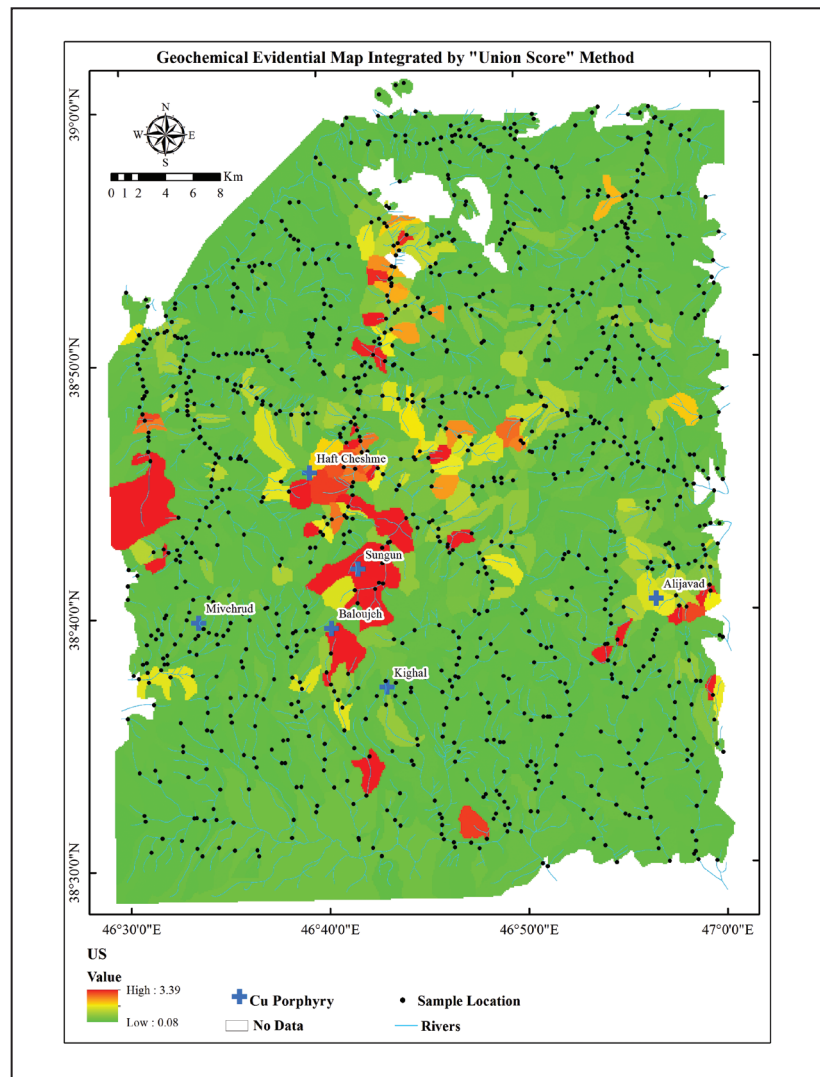
$$G_A[X] = G_A \left[\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} G_A(x_{11}) & G_A(x_{12}) & \dots & G_A(x_{1n}) \\ G_A(x_{21}) & G_A(x_{22}) & \dots & G_A(x_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_A(x_{n1}) & G_A(x_{n2}) & \dots & G_A(x_{nm}) \end{pmatrix} \quad (11)$$

برای ناحیه مورد مطالعه رابطه میانگین هندسی به این صورت محاسبه گردید:

$$G_{A_{Cu-Porphyry}}(F_{Ag}, F_{As}, F_{Au}, F_{Cu}, F_{Mo}, F_{Pb}, F_{Zn}) = \sqrt[7]{F_{Ag} F_{As} F_{Au} F_{Cu} F_{Mo} F_{Pb} F_{Zn}} \quad (12)$$

که در آن $(F_{Ag}, F_{As}, F_{Au}, F_{Cu}, F_{Mo}, F_{Pb}, F_{Zn})$ به ترتیب بیانگر مقادیر وزن

شکل ۵- نقشه شاهد ژئوشیمی حاصل از تلفیق با روش ارزش همزمانی شواهد.



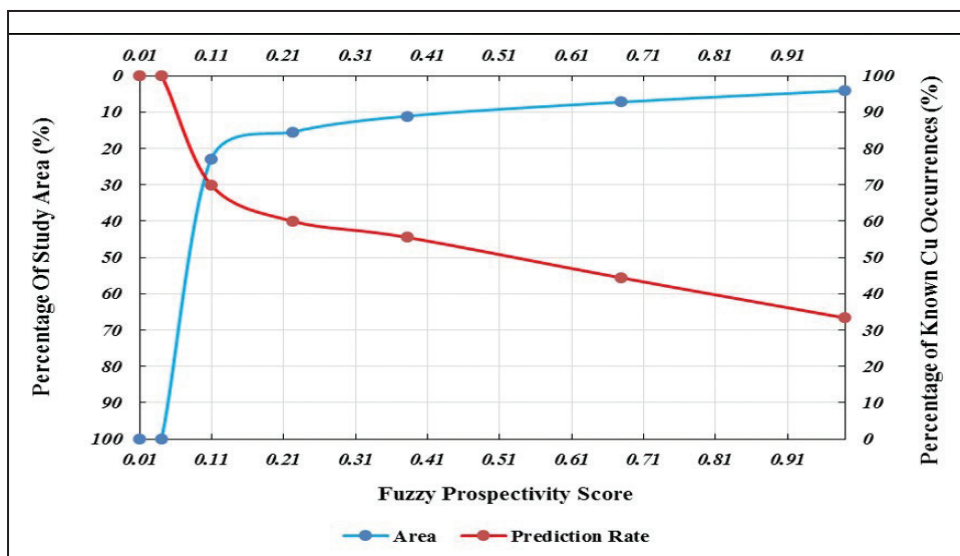
۷- اعتبارسنجی

و توانسته است با اشغال ۳۰ درصد از ناحیه مورد مطالعه، ۷۰ درصد از کانسارها را شناسایی کند (شکل ۸).

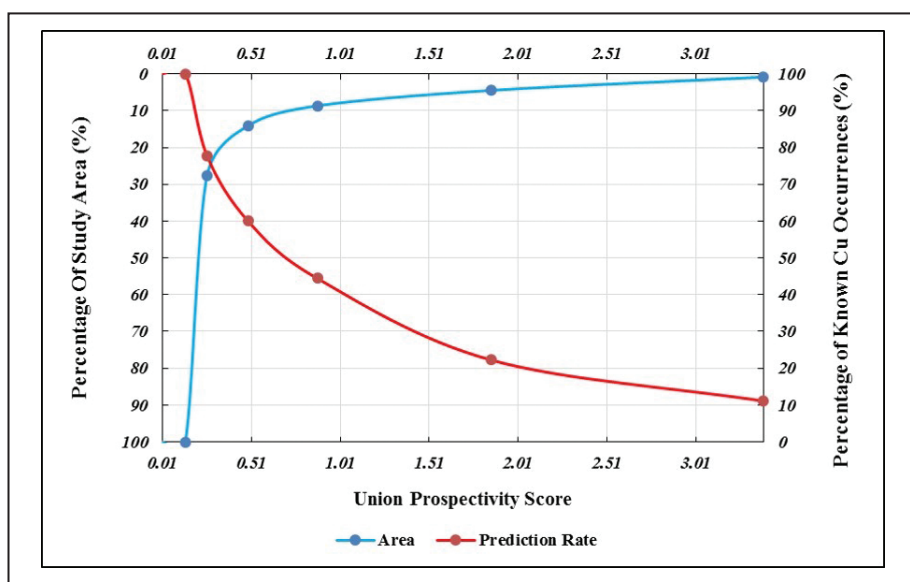
۸- نتیجه‌گیری

همان گونه که در مقاله حاضر ذکر شد، لایه‌های اطلاعاتی ژئوشیمیایی یکی از مهمترین لایه‌های اکتشافی در تلفیق و تهیه نقشه پتانسیل معدنی به حساب می‌آیند. بنابراین با تمرکز بیشتر روی روش‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه شاهد ژئوشیمیایی و یافتن بهترین روش، می‌توان صحت نقشه پتانسیل معدنی را تا حدودی افزایش داد. در این مقاله نیز با نظر بر نکته ذکر شده، روش‌های مختلف برای تلفیق نقشه‌های منفرد ژئوشیمیایی به کار گرفته شدند و مشاهده شد که استفاده از روش تلفیق ارزش هم‌زمانی شواهد می‌تواند در تهیه نقشه شاهد ژئوشیمی برای کانسارهای مس پورفیری در منطقه ورزقان مفیدتر باشد.

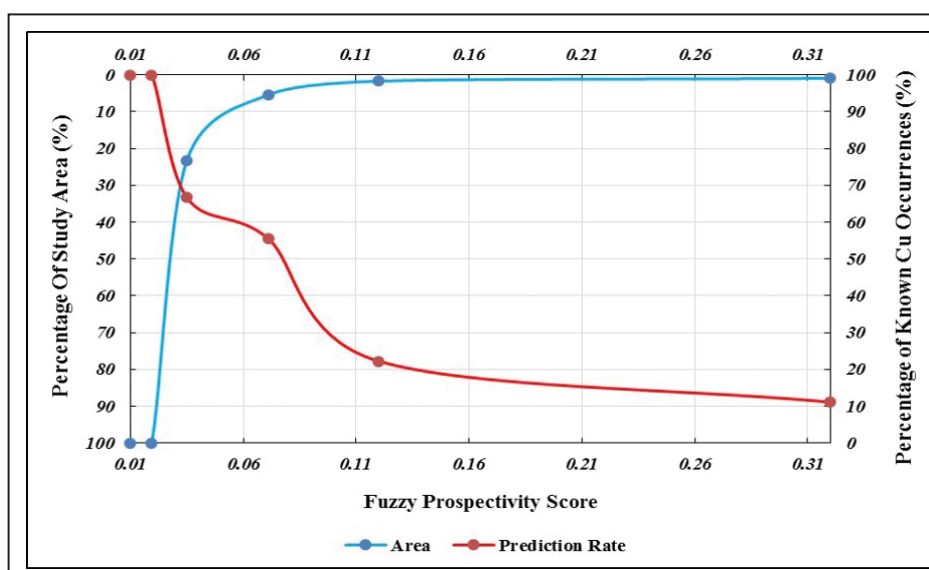
در نمودارهای P-A (Yousefi and Carranza, 2015c) ترسیم شده برای دو روش تلفیق OR، ارزش هم‌زمانی شواهد و میانگین هندسی برای لایه‌های شاهد فازی با تابع لجستیک، مشاهده می‌شود که تلفیق با روش ارزش هم‌زمانی شواهد نتایج بهتری را ارائه می‌کند. در تلفیق با استفاده از عملگر OR فازی، نقطه تقاطع دو منحنی مساحت اشغال شده و نرخ پیش‌بینی بیانگر این است که ۲۸ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه توان پیش‌بینی ۷۲ درصد از کانسارهای شناخت شده را دارد (شکل ۶). در طرف مقابل و در نمودار P-A که به بررسی تلفیق با روش ارزش هم‌زمانی شواهد می‌پردازد، محل تقاطع دو منحنی نشان‌دهنده این است که ۷۶ درصد از کانسارهای منطقه مورد مطالعه به‌وسیله ۲۴ درصد از مساحت اشغال شده در این ناحیه، قابل پیش‌بینی است (شکل ۷). در بررسی عملکرد روش میانگین هندسی در تلفیق لایه‌های شاهد فازی شده، مشخص است که در بین روش‌های تلفیق برای لایه‌های فازی شده با تابع لجستیک، عملکرد ضعیف‌تری داشته است



شکل ۶- نمودار P-A برای لایه‌های شاهد فازی شده با تابع لجستیکی که با روش OR تلفیق یافته‌اند.



شکل ۷- نمودار P-A برای لایه‌های شاهد فازی شده با تابع لجستیکی که با روش ارزش هم‌زمانی شواهد (US) تلفیق یافته‌اند.



شکل ۸- نمودار P-A برای لایه‌های شاهد فازی شده با تابع لجستیکی که با روش میانگین هندسی تلفیق یافته‌اند.

کتابنگاری

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 حسن پور، ش.، ۱۳۸۹- متالوژنی و کانیزایی مس و طلا در زون ارسباران (آذربایجان شرقی)، رساله دکترا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ۲۳۰ ص.
 یوسفی، م. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹- اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی (در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی)، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، تهران، جلد اول، ص ۴۱-۸۰.
 مهرپرتو، م.، امینی فضل، آ. و رادفر، ج.، ۱۳۷۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ ورزقان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشاف معدنی کشور.

References

- Aghazadeh, M., Hou, Z. and Badrzadeh, Z., 2012- Porphyry copper mineralization in Iran: main metallogenic belts and ore-forming episodes. International Geological Congress, Brisbane, Australia.
- Almasi, A., Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2017- Prospectivity analysis of orogenic gold deposits in Saqez-Sardasht Goldfield, Zagros Orogen, Iran, *Ore Geology Reviews*, V 91, p. 1066-1080. DOI:10.1016/j.oregeorev.2017.11.001.
- Asgari, O. and Hezarkhani, A., 2010- Investigations of alteration zones based on fluid inclusion microthermometry at Sungun porphyry copper deposit, NW Iran. *Miner. Resour. Explor. Bull.* 140, 19–34.
- Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS, Pergamon, Ontario.
- Carranza, E. and Hale, M., 2001- Geologically constrained fuzzy mapping of Gold mineralization potential, Baguio district, Philippines, *Nat.Resour.Res.*, Vol.10, pp 125-136. DOI:10.1023/A:1011500826411.
- Carranza, E., 2008- Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS, Handbook of exploration and environmental geochemistry, Vol.11, Elsevier, Amsterdam.
- Chiang, W. and Lee, J., 1995- fuzzy logic for the application to complex systems, World scientific publishing. doi.org/10.1007/s005000050005.
- Hezarkhani, A. and Williams Jones, A. E., 1998- Controls of alteration and mineralization in the Sungun porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions and stable isotopes. *Econ. Geol.* 93, 651–670. doi: 10.2113/gsecongeo.93.5.651.
- Jamali, H. and Mehrabi, B., 2014- Relationships between arc maturity and Cu-Mo-Au porphyry and related epithermal mineralization at the Cenozoic Arasbaran Magmatic Belt, *Ore Geology Reviews*, p. 487–501. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.017.
- Jamali, H., Dilek, Y., Daliran, F., Yaghubpur, A. and Mehrabi, B., 2010- Metallogeny and tectonic evolution of the Cenozoic Ahar-Arasbaran volcanic belt, northern Iran. *Int. Geol. Rev.* 52, 608–630. doi.org/10.1080/00206810903416323.
- Knox-Robinson, C. M., 2000- Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping, with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia. *Aust. J. Earth Sci.* 47, 929e941. doi:10.1046/j.1440-0952.2000.00816.x.
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., Belousova, E., Griffin, W. T. and Andrew, R. L., 2003- Timing of mineralization and exhumation processes at the Sarcheshmeh and Meiduk porphyry Cu deposits, Kerman belt, Iran. In: Eliopoulos, et al. (Eds.), *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Mill Press, Rotterdam, pp. 1197–1200.
- Moon, W. M., 1998- Integration and fusion of geological exploration data: A Theoretical Review of fuzzy logic approach, *Geosci*, Vol.2, pp175-183. DOI: 10.1007/BF02910163.
- Pazand, K. and Hezarkhani, A., 2018- Predictive Cu porphyry potential mapping using fuzzy modelling in Ahar–Arasbaran zone, Iran, *Geology, Ecology, and Landscapes*, DOI: 10.1080/24749508.2018.1438741.
- Pazand, K., Hezarkhani, A. and Ghanbari, Y., 2014- Fuzzy analytical hierarchy process and GIS for predictive Cu porphyry potential mapping: a case study in Ahar–Arasbaran Zone (NW, Iran), *Arab J Geosci* 7:241–251. DOI: 10.1007/s12517-012-0774-4.
- Shahabpour, J., 1982- Aspects of alteration and mineralization at the Sarcheshmeh copper–molybdenum deposit, Kerman, Iran. (PhD Thesis) Leeds University, 342 pp.
- Wang, Y. M., Chin, K. S. and Yang, J. B., 2007- Measuring the performances of decision making units using geometric average efficiency. *Journal of the Operational Research Society*, 58, 929–937. doi:10.1057/palgrave.jors.2602205.
- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015a- Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral prospectivity mapping. *Comput. Geosci.* 74, 97–109. doi:10.1016/j.cageo.2014.10.014.
- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015b- Geometric average of spatial evidence data layers: A GIS-based multi-criteria decisionmaking approach to mineral prospectivity mapping, *Computers and Geosciences*. doi:10.1016/j.cageo.2015.07.006.
- 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*, V 79, p. 69-81. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.03.007.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets. *IEEE Inf. Control* 8, 338–353.

Comparison of geometric average, union score and fuzzy operations methods for geochemical evidential mapping

M. Nikfarjam^{1*} and A. Hezarkhani²

¹Ph.D. Student, Department of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

²Professor, Department of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Received: 2019 April 21

Accepted: 2020 March 11

Abstract

In this research, we have used different integration methods for creating the geochemical evidential map that is one of the most important layers in mineral potential mapping. The Study area (Varzaghan 1:100,000 sheet) is located in East Azarbaijan province and Ahar-Arasbaran metallogenic zone. This region, because of its geological situation and presence of several porphyry copper deposits like Sungun porphyry-skarn deposit, is considered as an important metallogenic province in the northwest of Iran. In this study, we have used 1067 stream sediment samples as primary data that picked up by Geological Survey & Mineral Explorations organization of Iran. By selecting indicator elements of porphyry copper deposit, like Cu, Mo, Au, Ag, Pb, Zn, Au and As, the evidential map of each element have generated by the continuous fuzzy method. In the next step, by using Union Score (US) method, fuzzy OR operation, and geometric average, the individual geochemical maps have integrated. Finally, Prediction-Area plots have drawn to validate the evidential maps. This plot showing that geochemical evidential map that produced by US method, can predict 76 percent of known mineral occurrences and it can consider as a proper method for creating the geochemical evidential map for porphyry copper deposits.

Keywords: Geochemical evidential map, Fuzzy, Integration, Copper porphyry, Varzaghan.

For Persian Version see pages 17 to 24

*Corresponding author: M. Nikfarjam; E-mail: meysamnikfarjam47@yahoo.com