

ترکیب روش‌های فازی داده‌محور و دانش‌محور در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور تولید نواحی اهداف اکتشاف

الهام قدیری صوفی^۱ و مهیار یوسفی^۲

^۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۲

چکیده

تلفیق داده‌ها یکی از روش‌هایی است که با استفاده از آن می‌توان مطالعات اکتشافی را به صورت یکجا و همزمان روی همه داده‌های در دسترس از یک منطقه مورد مطالعه انجام داد. بدیهی است نتایجی که با در نظر گرفتن همه داده‌ها و ارتباط میان آنها به دست می‌آید، دارای دقت و اطمینان بیشتری است. در چنین شرایطی عموماً از مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای تلفیق و ترکیب نتایج روش‌های اکتشافی مختلف به منظور تولید نواحی اهداف اکتشاف و تعیین نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. در این پژوهش، اطلاعات اکتشافی سطحی در منطقه ۱۰:۱۰۰۰۰۰ ماهانشان در استان زنجان به منظور تعیین مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی با استفاده از یک روش جدید ترکیبی فازی داده‌محور و دانش‌محور تلفیق شدند. لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در مطالعه حاضر شامل نقشه زمین‌شناسی توزیع واحد سنگی، داده‌های ژئوشیمیایی و نقشه پراکندگی گسل‌هاست. در روش جدید معرفی شده در مقاله حاضر، نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی و چگالی گسل‌ها بدون قضاوت کارشناس و همچنین بدون استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده وزن‌دهی و تولید شدند ولی نقشه شاهد وزن‌دار زمین‌شناسی با استفاده از قضاوت کارشناسی تولید شد. در مرحله بعد لایه‌های وزن‌دار اطلاعاتی که به صورت فازی تولید شده‌اند با استفاده از عملگرهای OR و Gamma فازی به طور جداگانه با یکدیگر تلفیق شدند. در پایان از رخدادهای معدنی شناخته شده کانی‌سازی اسکارن سرب و روی منطقه، به منظور ارزیابی مدل‌های تولید شده استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد مناطق اهداف مشخص شده برای اکتشاف بیشتر، انطباق خوبی با رخدادهای معدنی موجود دارند.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی پتانسیل معدنی، منطق فازی، ترکیب، داده‌محور، دانش‌محور، اهداف اکتشاف، کانی‌سازی اسکارن.

E-mail: Elham_ghadirisufi@yahoo.com

*نویسنده مسئول: الهام قدیری صوفی

۱- پیش‌نوشتار

صورت می‌گیرد (یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹). یکی از معایب روش‌های دانش‌محور این است که وزن تخصیص یافته به یک الگوی شاهد واحد توسط دو یا چند کارشناس، ممکن است متفاوت باشد که می‌تواند مدل‌های پتانسیل متفاوتی را در خروجی تولید کند. افزون بر این ممکن است به علت اجرای فعالیت اکتشافی بیشتر و در پی آن حضور یک یا چند اندیس شناخته شده در یک بخش از منطقه، مثلاً در یک واحد زمین‌شناسی مشخص از یک نقشه زمین‌شناسی، نظر کارشناس جلب و موجب تخصیص وزن بیشتر به آن واحد شود. این در حالی است که نبود اندیس شناخته شده در دیگر بخش‌های منطقه، ممکن است به دلیل شرایط سخت دسترسی یا ژرفی تر بودن کانی‌سازی و در نتیجه اجرا نشدن فعالیت اکتشافی مناسب، باشد. بنابراین در روش‌های دانش‌محور احتمال تخصیص وزن جهت‌دار به الگوهای شاهد زیاد و ممکن است موجب حذف برخی از مناطق در اولویت از اهداف اکتشافی آینده شود و یا حتی مناطق بدون ارزش اکتشافی، در اولویت قرار گیرند. بنابراین اگر تخصیص وزن به شواهد و الگوهای اکتشافی مختلف و در نتیجه تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون یا با کمترین قضاوت کارشناسی صورت گیرد، مشکل دو روش بالا مرتفع می‌شود و همچنین می‌توان در مناطق بدون اندیس شناخته شده نیز بدون نظر و قضاوت کارشناسی، مدل پتانسیل معدنی را تولید کرد. در این راستا در مطالعه حاضر از آنجا که روش تخصیص وزن به واحدهای زمین‌شناسی و تولید لایه زمین‌شناسی وزن‌دار بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده درون محدوده مورد مطالعه و همچنین بدون دخالت قضاوت کارشناس هنوز گسترش داده نشده، ابتدا با استفاده از روش دانش‌محور، مقادیر عضویت فازی واحدهای مختلف زمین‌شناسی تعیین و نقشه شاهد وزن‌دار فازی برای لایه زمین‌شناسی تولید شده است. سپس از آنجا که روش تخصیص وزن بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده درون محدوده

در اکتشاف مواد معدنی، به منظور کوچک کردن منطقه زیر پوشش عملیات اکتشاف، بیشتر از مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای تلفیق و ترکیب نتایج روش‌های مختلف اکتشافی به منظور تولید نواحی هدف و شناسایی نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. به این منظور بیشتر از دو روش اصلی مدل‌سازی پتانسیل معدنی داده‌محور و دانش‌محور استفاده می‌شود (Bonham-Carter, 1994; Harris et al., 2001; Porwal et al., 2003; Madani, 2011; Nykänen & Salmirinne, 2007; Carranza, 2008). در روش‌های داده‌محور از ویژگی‌های اندیس‌های شناخته شده هم‌تیپ ماده معدنی مورد جستجو درون محدوده مورد مطالعه برای مدل‌سازی و شناسایی مناطق امیدبخش استفاده می‌شود (Porwal et al., 2003; Abedi et al., 2013). از آنجایی که پایه روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی داده‌محور استفاده از ویژگی‌های اندیس‌ها و معادن شناخته شده در محدوده مورد مطالعه است (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008)، بنابراین اگر درون محدوده مورد اکتشاف، شمار اندیس‌های شناخته شده هم‌تیپ ماده معدنی مورد جستجو کم باشد، خروجی این مدل‌ها اعتبار کمی دارد و نتایج قابل اعتماد نیست (Carranza, 2008). همچنین در این روش‌ها به علت استفاده از اندیس‌های شناخته شده درون محدوده مورد مطالعه در مدل‌سازی (Nykänen & Salmirinne, 2007; Carranza, 2008)، یک خطای سامان‌مند وجود دارد که موجب معطوف و جهت‌دار شدن مناطق امیدبخش معرفی شده به سوی اندیس‌های شناخته شده می‌شود. بنابراین به منظور حل مشکل کمبود یا نبود اندیس‌های شناخته شده قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی داده‌محور، روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی گسترش داده شده‌اند (Carranza, 2008؛ یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹). در مدل‌سازی دانش‌محور سنجش میزان اهمیت نسبی الگوهای شاهد اکتشافی و بخش‌های مختلف نقشه‌های شاهد و همچنین تخصیص وزن به آنها از راه قضاوت، تجربه و نظر کارشناسی

(لطفی، ۱۳۷۹). با توجه به اینکه در این منطقه توده‌های نفوذی در مجاورت آهک‌ها و دولومیت‌ها قرار دارند و سامانه شکستگی نیز در ناحیه وجود دارد، می‌توان کانی‌سازی منطقه را از نوع اسکارن و یا گرمابی پیش‌بینی کرد.

لايه اطلاعاتی دیگری که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، لایه ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای است. به منظور بررسی ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای در محدوده ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهشان، در مساحتی در حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، از این منطقه نمونه‌برداری و ۸۱۷ نمونه رسوبات آبراهه‌ای گردآوری شد. تجزیه نمونه‌ها برای تعیین غلظت عناصر Zn, Pb, Ag, Cr, Ni, Bi, Sc, Cu, As, Sb, Cd, Co, Sn, Y, Ba, V, Sr, Hg انجام شد و نتایج آن پایه کار تحلیل‌های آماری قرار گرفت. پس از مرتب‌سازی داده‌ها و رفع نواقص موجود در نتیجه کار آزمایشگاه، داده‌های اولیه برای بررسی‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره آماده شد.

افزون بر نقشه زمین‌شناسی توزیع واحد سنگی و داده‌های ژئوشیمیایی، نقشه پراکنندگی گسل‌ها نیز پس از تبدیل به لایه شاهد چگالی گسل‌ها، به‌عنوان لایه سوم برای تلفیق با دو لایه دیگر مورد استفاده قرار گرفت.

۴- تولید لایه‌های شاهد اکتشافی وزن‌دار

۴-۱. تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی

در مواردی که هدف، جستجوی کانی‌سازی یک تیپ مشخص است، بیشتر از روش‌های چندمتغیره (مانند تحلیل فاکتوری) برای تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای به منظور استخراج پاسخ(های) ژئوشیمیایی کانی‌سازی مورد جستجو استفاده می‌شود. با توجه به اینکه برای کانی‌سازی اسکارن سرب و روی، عناصر Zn, Pb, Ag, Bi, Cu, As, Sb, Co, Sn, W هستند (کریم‌پور و سعادت، ۱۳۸۹)، در مطالعه حاضر تجزیه و تحلیل روی این عناصر و داده‌های مربوطه انجام شد. از آنجایی که یکی از پیش‌شرط‌های لازم برای اجرای تحلیل فاکتوری نزدیک بودن توزیع عناصر به یک توزیع عادی یا تقریباً عادی است (Reimann & Filzmoser, 2000; Yousefi et al., 2013)، ابتدا تبدیل لگاریتمی و سپس تحلیل فاکتوری مرحله‌ای روی این داده‌ها انجام شد. در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله‌ای دو فاکتور معرف و بهینه به دست آمد که در فاکتور اول عناصر Zn, Pb, Ag, As, Co, Sn و در فاکتور دوم عناصر Bi, Sb, W قرار گرفتند. پس از انجام تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، برای فازی‌سازی امتیازات فاکتوری و به دست آوردن نقشه شاهد ژئوشیمیایی از شاخص GMPI که در معادله ۱ نشان داده شده است استفاده شد (Yousefi et al., 2012 & 2013):

$$GMPI = \frac{e^{FS}}{1 + e^{FS}} \quad (1)$$

در معادله بالا، FS امتیاز فاکتوری هر نمونه در مؤلفه شاخص به دست آمده در تحلیل فاکتوری مرحله‌ای است. بنابراین، برای محاسبه GMPI مؤلفه‌های شاخص Pb, Ag, As, Zn, Bi, Sb, Co, Sn و برای نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، از معادلات ۲ و ۳ استفاده شد:

$$GMPI = \frac{e^{FS_{Pb, Ag, As, Co, Sn}}}{1 + e^{FS_{Pb, Ag, As, Co, Sn}}} \quad (2)$$

$$GMPI = \frac{e^{FS_{Zn, Bi, Sn, W}}}{1 + e^{FS_{Zn, Bi, Sn, W}}} \quad (3)$$

در پایان با توجه به اینکه عناصر سرب و روی که از عناصر معرف کانی‌سازی اسکارن سرب و روی هستند، در دو فاکتور جدا از هم قرار گرفته‌اند، این دو شاخص با استفاده از معادله ۴ (Yousefi et al., 2012) با یکدیگر ترکیب شدند و مقدار نهایی GMPI برای جستجوی کانی‌سازی اسکارن به دست آمد. حد آستانه در معادله ۴ مطابق با درصد تجمعی ۹۵٪ برای مؤلفه‌های شاخص Zn, Pb, Ag, As, Co, Sn و Bi, Sb, W و Zn و W به دست آمد که برای مؤلفه Zn, Pb, Ag, As, Co, Sn برابر با ۰/۷۹۴ و برای مؤلفه Zn, Bi, Sb, W برابر با ۰/۷۶ بود.

مورد مطالعه و همچنین بدون دخالت قضاوت کارشناس در زمینه تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار و تولید لایه شاهد وزن‌دار گسل‌ها گسترش داده شده است (Yousefi et al., 2012 & 2013)، با استفاده از این روش‌ها، لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی و گسل‌ها تولید شد. در پایان از آنجا که همه لایه‌های شاهد تولید شده دارای وزن فازی هستند این نقشه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی با هم تلفیق شدند تا در پایان با استفاده از ترکیب روش‌های فازی داده‌محور و دانش‌محور، مدل پتانسیل معدنی تولید شود. از آنجا که مدل‌سازی پتانسیل معدنی باید روی یک تیپ کانی‌سازی مشخص صورت گیرد (یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹) روش ترکیبی یاد شده به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی کانی‌سازی‌های اسکارن در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهشان اجرا و نتایج ارزیابی شده است.

۲- روش مطالعه

در مطالعه حاضر از دو روش داده‌محور و دانش‌محور به‌طور همزمان در تولید مدل پتانسیل معدنی استفاده شده است. با توجه به روش ارائه‌شده توسط (Yousefi et al., 2013)، نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی و چگالی گسل‌ها با استفاده از روش داده‌محور، ولی بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده، فازی شد. به‌طوری که برای تهیه نقشه شاهد فازی ژئوشیمیایی، ابتدا تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (Yousefi et al., 2012 & 2013) روی نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای انجام شد. به منظور وزن‌دهی به داده‌های ژئوشیمیایی، از رده‌بندی داده‌ها (رده‌بندی و تقسیم مقادیر ژئوشیمیایی به رده‌های مختلف) و سپس تخصیص وزن واحد به همه اعداد یک دامنه، استفاده نشده است؛ بلکه هر نمونه ژئوشیمیایی بر پایه مقادیر غلظت عنصر مورد نظر یا بر پایه مقادیر شاخص چندعنصری برای نمونه مقادیر امتیازات فاکتوری، به‌طور مستقیم وزن‌دار شده است. از این رو برای فازی‌سازی امتیازات فاکتوری به‌دست آمده حاصل از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، از شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی (GMPI) استفاده شد (Yousefi et al., 2012). در این زمینه از رابطه شماره ۱ ارائه‌شده توسط (Yousefi et al., 2012) استفاده شد. همچنین با استفاده از فرمول ۳ ارائه‌شده توسط (Yousefi et al., 2013)، فازی‌سازی لایه چگالی گسل‌ها صورت گرفت و لایه فازی چگالی گسل‌ها به دست آمد. برای به دست آوردن لایه وزن‌دار زمین‌شناسی، از روش دانش‌محور استفاده شد. به‌گونه‌ای که وزن واحدهای سنگی موجود در منطقه با استفاده از دید کارشناس تعیین شد (Harris et al., 2001; Carranza, 2008). در پایان، این لایه‌های وزن‌دار شده با استفاده از دو عملگر OR و Gamma فازی با یکدیگر تلفیق شدند و با استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته شده مورد نظر در منطقه ماهشان مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۳- منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه شامل نقشه زمین‌شناسی برکه ۱/۱۰۰۰۰۰ ماهشان مربوط به ناحیه ماهشان در استان زنجان و در شمال باختری ایران است. این برکه در محدوده ۳۶° ۳۰' تا ۳۷° عرض شمالی و ۴۷° ۳۰' تا ۴۸° طول خاوری قرار دارد. در ناحیه ماهشان انواع سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی دیده می‌شود که بیشتر آن را سنگ‌های رسوبی فرا گرفته است و گسترش سنگ‌های آذرین و دگرگونی در بخش‌های خاور، جنوب خاور و باختر نقشه دیده می‌شود. مهم‌ترین واحدهای سنگی ناحیه که از دید اکتشافی اهمیت دارند در جدول ۱ آورده شده است (لطفی، ۱۳۷۹). موقعیت و نیز واحدهای سنگی نقشه زمین‌شناسی ماهشان در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به مطالعات زمین‌شناسی اقتصادی انجام شده در ناحیه، بیشتر اندیس‌ها و نشانه‌های معدنی دیده شده شامل قلع، تنگستن، سرب و روی و گاه طلاست

در این راستا وزن ۰/۹۵ که در اینجا بیشترین وزن برای واحدهای سنگی است، به واحدهای کربناتی اختصاص داده شده و وزن واحدهای گرانیتی ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. کمترین وزن نیز که معادل ۰/۰۱ است، به واحدهای گچی، آبرفت‌ها و پادگانه‌های رودخانه‌ای کهن و جدید اختصاص داده شده است. دیگر واحدها نیز با توجه به ارتباط آنها نسبت به اسکارن سرب و روی در نظر گرفته شده‌اند. نقشه وزن دار واحدهای زمین‌شناسی که با استفاده از روش دانش محور، فازی سازی شده در شکل ۴ آمده است.

۵- تلفیق لایه‌های اطلاعاتی

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی پس از تولید لایه‌های وزن دار، باید این لایه‌ها با یکدیگر تلفیق شوند تا مناطق مورد جستجو برای اکتشافات بیشتر با دقت بیشتری به نقشه در آیند (Ranjbar & Honarmand, 2004; Abedi et al., 2013; De Quadros et al., 2006; Nykänen et al., 2007). روش فازی به دلیل قالب تئوری قوی و انعطاف‌پذیری بالا، از جمله روش‌های تلفیق است که قابلیت کاربرد آن برای تلفیق نقشه‌های پیچیده و چند کلاسه وجود دارد. از آنجا که همه لایه‌های شاهد اکتشاف تولید شده در مطالعه حاضر به‌طور فازی وزن دار شده‌اند بنابراین می‌توانند با استفاده از عملگرهای فازی ترکیب شوند. در مطالعه حاضر نیز با استفاده از عملگرهای فازی OR و Gamma فازی، لایه‌های اطلاعاتی وزن دار تولید شده با یکدیگر تلفیق شدند. نقشه پتانسیل نهایی کانی‌سازی اسکارن سرب و روی در شکل ۵ دیده می‌شود.

۵-۱. تولید مدل پتانسیل معدنی دوتایی و خروج از حالت فازی

تفسیر نقشه‌های مطلوبیت فازی با توجه به پیوسته بودن مقادیر ارزش پیش‌بینی در این نقشه‌ها و تعیین دقیق محل اهداف اکتشافی به آسانی امکان‌پذیر نیست. بدین منظور نقشه تولید شده با مقیاس پیوسته باید با رده‌بندی دوباره به نقشه‌ای با تعداد رده محدود و قابل تفسیر تبدیل و از حالت فازی خارج شود (Defuzzification). شمار رده‌های موجود در نقشه پایانی با توجه به هدف مورد مطالعه تعیین می‌شود. از جمله روش‌های مورد استفاده در این مرحله، انتخاب حد آستانه بر پایه نظر کارشناس، متغیرهای آماری، نمودار درصد فراوانی تجمعی و روش گرافیکی است (Porwal, 2006). از این رو در اینجا برای تهیه مدل پتانسیل معدنی دوتایی و خروج از حالت فازی، نقشه‌های Gamma و OR فازی دوباره رده‌بندی شدند. در رده‌بندی دوباره نقشه‌های پایانی پتانسیل کانی‌سازی، دو رده در نظر گرفته شد. به گونه‌ای که الگوها و مناطق دارای ارزش اکتشافی بالا و مناسب برای اکتشافات بعدی با کد ۱ و دیگر مناطق بدون ارزش اکتشافی یا با ارزش اکتشافی کم با کد ۰ ذخیره شدند. مرز میان این دو مناطق (مقدار حد آستانه) برای دو نقشه متفاوت بود به گونه‌ای که با توجه به نظر کارشناس، برای نقشه OR فازی مقدار ۰/۷۵ و برای نقشه Gamma فازی مقدار ۰/۹ برای این منظور در نظر گرفته شد.

۶- ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی تولیدشده

به منظور ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی در صورتی که در منطقه مورد مطالعه شماری اندیس شناخته شده وجود داشته باشد، از موقعیت این اندیس‌ها به‌عنوان نمونه‌های آزمون و اعتبارسنجی استفاده می‌شود (Porwal, 2006; Carranza, 2008). در منطقه مورد مطالعه در مقاله حاضر نیز ۶ اندیس شناخته شده وجود دارد که از موقعیت آنها برای ارزیابی مدل‌های پتانسیل تولید شده استفاده شد. به این منظور ابتدا نقشه همپوشانی موقعیت اندیس‌های شناخته شده و مدل‌های پتانسیل معدنی تولید و سپس با استفاده از مقایسه تعداد اندیس‌های پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌ها، ارزیابی و اعتبارسنجی آنها انجام شد. در این زمینه همان‌طور که در شکل‌های ۵- الف و ب دیده می‌شود، مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی با

$$GMPI_{Pb,Zn} = \begin{cases} GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn} & \geq 0.794 \text{ and } GMPI_{Zn,Bi,Sb,W} < 0.76 \\ \text{If } GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn} < 0.794 \text{ and } GMPI_{Zn,Bi,Sb,W} \geq 0.76 \\ GMPI_{Zn,Bi,Sb,W} & \geq 0.794 \text{ and } GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn} < 0.76 \\ \text{Average } (GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn}, GMPI_{Zn,Bi,Sb,W}) & \geq 0.794 \text{ and } GMPI_{Zn,Bi,Sb,W} \geq 0.76 \\ \text{Average } (GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn}, GMPI_{Zn,Bi,Sb,W}) & \text{if } GMPI_{Pb,Ag,As,Co,Sn} < 0.794 \text{ and } GMPI_{Zn,Bi,Sb,W} < 0.76 \end{cases} \quad (۴)$$

در پایان مقادیر $GMPI_{Pb,Zn}$ به نقشه تبدیل شد و نقشه نهایی شاهد ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای تهیه شد که در شکل ۲ نشان داده شده است. از آنجایی که هدف اصلی این مقاله اکتشافات ژئوشیمیایی نیست، از آوردن جزئیات بیشتر در مورد تحلیل فاکتوری مرحله‌ای و شاخص $GMPI$ خودداری شده است؛ برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مقالات ارائه شده توسط (Yousefi et al., 2012 & 2013) مراجعه کرد.

۴-۲. تولید لایه شاهد چگالی گسل‌ها

از آنجا که گسل‌ها مناطق مناسبی برای تشکیل نهشته‌های اسکارن هستند (Wan et al., 2012; Xiao et al., 2012; Canet et al., 2011; Zuo, 2011; Bertelli et al., 2009; Canet et al., 2009; Öztürk et al., 2008; Zhao et al., 2003)، مناطق با چگالی بالایی از درزه، شکستگی و گسل به‌طور مطلوبی برای جستجوی نهشته‌های اسکارن سرب و روی مناسب هستند. در منطقه مورد مطالعه نیز برای تولید نقشه چگالی گسل، مجموع طول گسل‌ها در هر پیکسل از منطقه مورد مطالعه به دست آمد. مقادیر چگالی گسل‌ها غیر فازی هستند و به‌عنوان امتیازات شاهد فازی مناسب نیستند. بنابراین، مقادیر محاسبه شده چگالی گسل‌ها نیز با استفاده از یک تابع لجستیکی که در معادله ۵ نشان داده شده است به مقادیر فازی تبدیل شد (Yousefi et al., 2013):

$$F_{FD} = \frac{1}{1 + e^{-s(FD-i)}} \quad (۵)$$

در معادله FFD امتیاز فازی چگالی گسل‌ها و i و s به ترتیب نقطه عطف و شیب تابع لجستیکی هستند. متغیرهای i و s شکل تابع لجستیکی و در نتیجه، مقادیر خروجی را تعیین می‌کنند. این متغیرها با استفاده از روش سعی و خطا به گونه‌ای به دست می‌آیند که با استفاده از آنها در پایان مقادیر بیشینه در داده‌های ورودی (برای نمونه بیشترین مقدار چگالی گسل) وزن نزدیک ۱ و مقادیر کمینه در داده‌های ورودی (برای نمونه کمترین مقدار چگالی گسل) وزن نزدیک به ۰ را به خود اختصاص دهند تا فازی‌سازی داده‌ها به گونه مطلوبی به منظور سنجش اهمیت نسبی شواهد کانی‌سازی صورت گیرد (Yousefi et al., 2013). در پایان مقادیر ۰/۰۰۰۴ و ۵۰۰۰ به ترتیب برای s و i مورد استفاده قرار گرفت (Yousefi et al., 2013). نقشه پایانی چگالی گسل وزن دار شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

۴-۳. تولید لایه شاهد زمین‌شناسی

اسکارن به سنگ‌های دگرگونی گفته می‌شود که با استفاده از جانمایی سنگ‌های دربر گیرنده کربنات (در بیشتر موارد) در طول دگرگونی مجاورتی یا ناحیه‌ای تشکیل می‌شوند و دارای سیلیکات‌های کلسیم، آهن، منیزیم و آلومینیم هستند (Gottesmann, 2012; Meinert et al., 2005). از این رو وجود سنگ‌های کربناتی و توده‌های نفوذی برای تشکیل اسکارن‌ها ضروری است. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماهشان که در شکل ۱ نشان داده شده است، واحدهای مختلفی دارد که بنا بر نظر کارشناس، وزن‌دهی واحدهای موجود در این لایه، با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه و ارتباط واحدهای سنگی مختلف با کانی‌سازی اسکارن مورد جستجو انجام شد. در مرحله وزن‌دهی واحدهای سنگی، با توجه به اینکه اسکارن‌های سرب و روی در محل تماس توده‌های اسیدی تا متوسط و بیشتر در پهنه اسکارن بیرونی تشکیل می‌شوند (Zuo, 2011; Canet et al., 2005; Meinert, 1992; Zhao et al., 2003; Meinert et al., 2005; Zuo, 2011; Canet et al., 2011)؛ کریم‌پور و سعادت، (۱۳۸۹) به واحدهای کربناتی وزن بیشتری نسبت به توده‌های نفوذی اسیدی تا متوسط اختصاص داده شده است.

تنها از عملگر AND بولین به منظور تعیین اشتراک شواهد مختلف استفاده می‌شد و دیگر روش‌های جدید مدل‌سازی پتانسیل معدنی و تلفیق گسترش پیدا نمی‌کرد. به همین دلیل است که حتی در برخی از روش‌های تلفیق، استقلال شواهد مختلف بررسی می‌شود و شرط این روش‌ها مستقل بودن داده‌هاست. افزون بر این در شروع عملیات اکتشافی با توجه به نوع ماده معدنی مورد جستجو، معیارهای اکتشافی مورد استفاده بر پایه مدل مفهومی و اختصاصات ذخیره مورد جستجو (همچنین داده‌های در دسترس)، انتخاب و استفاده شده است (در اینجا ژئوشیمی، زمین‌شناسی و گسل). بنابراین اگر چه ممکن است ورودی‌ها با هم همبستگی بالایی نشان ندهند ولی مسئله نهایی، وزن‌دهی و سنجش اهمیت نسبی بخش‌های مختلف نقشه‌های شاهد است که در پایان در تلفیق و معرفی مناطق اهداف نهایی، تأثیر می‌گذارد. این مسئله همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است خود را نشان می‌دهد و مناطق پر پتانسیل به دست آمده با موقعیت اندیس‌های موجود در منطقه (که از آنها تنها به‌عنوان آزمون و ارزیابی استفاده شده) منطبق هستند (Carranza, 2008; Bonham-Carter, 1994). همچنین، با توجه به اینکه شکل ۶- الف حاصل عملگر OR فازی و شکل ۶- ب حاصل عملگر Gamma فازی است و این دو، دو عملگر متفاوت هستند، در نتیجه تفاوت‌هایی با هم در نقشه نهایی دارند؛ ولی همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی با استفاده از عملگرهای Gamma و OR فازی با اندیس‌های موجود در منطقه منطبق بوده و آنها را پیش‌بینی کرده‌اند.

۸- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته در مقاله حاضر می‌توان نتایج به دست آمده را به‌صورت زیر خلاصه کرد:

- می‌توان با استفاده از شاخص GMPI بدون استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون قضاوت کارشناس، نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار تولید کرد.
- با استفاده از تابع لجستیکی می‌توان نقشه شاهد وزن‌دار چگالی گسل‌ها را بدون استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون قضاوت کارشناس تولید کرد.

- از آنجا که با استفاده از شاخص GMPI و تابع لجستیکی، نقشه‌های وزن‌دار فازی تولید می‌شوند، این نقشه‌ها می‌توانند با عملگرهای فازی به گونه مطلوبی ترکیب و تلفیق شوند.

- نقشه‌های شاهد وزن‌دار فازی تولید شده بدون استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون قضاوت کارشناس، می‌توانند با دیگر نقشه‌های وزن‌دار فازی که ممکن است به‌صورت دانش‌محور نیز تولید شده باشند (مانند نقشه شاهد وزن‌دار فازی زمین‌شناسی در مقاله حاضر) ترکیب شوند و مناطق اهداف اکتشاف را معرفی کنند.

- ترکیب روش‌های فازی داده‌محور و دانش‌محور معرفی شده در مقاله حاضر سبب تولید مدل پتانسیل معدنی خواهد شد که مناطق اهداف اکتشاف تولید شده در آن انطباق خوبی با اندیس‌های شناخته شده (نقاط ارزیابی و اعتبارسنجی) دارد.

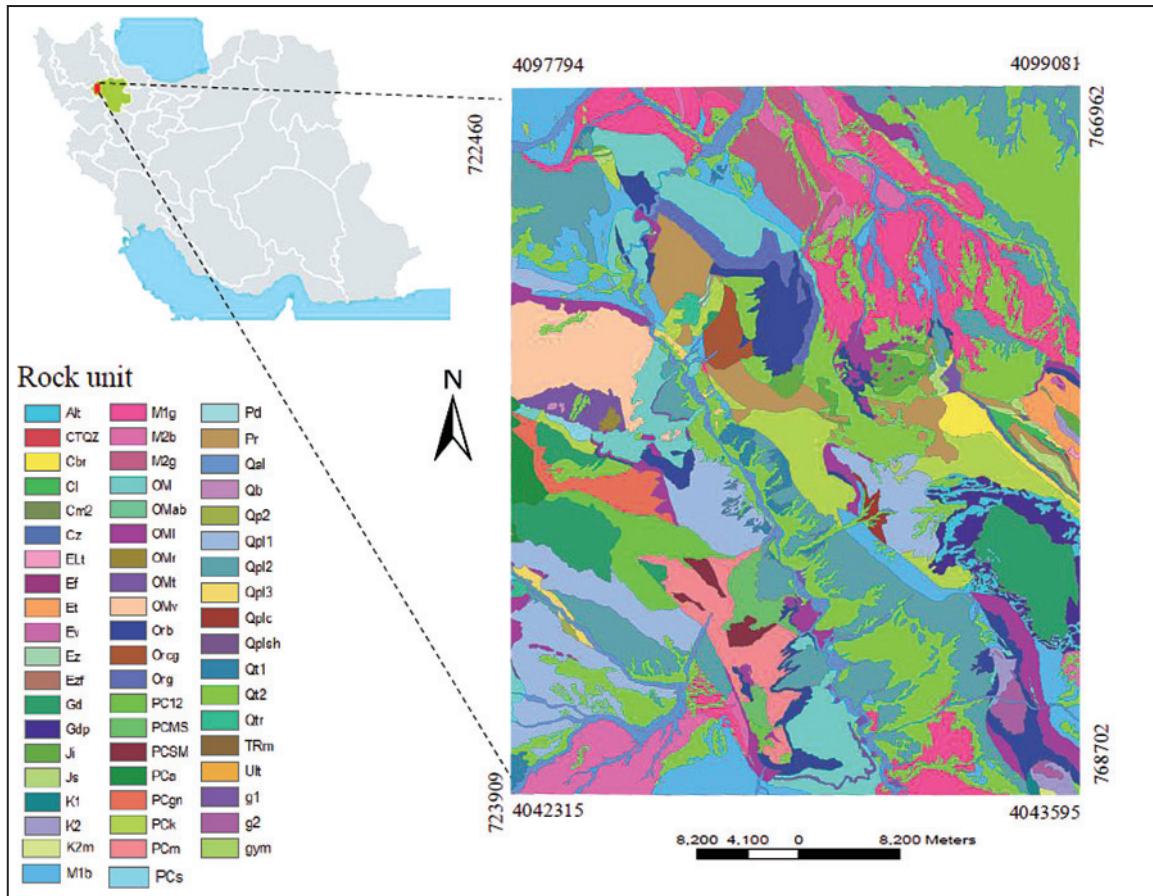
- روش ترکیبی معرفی شده در مقاله حاضر ضمن استفاده همزمان از روش‌های داده‌محور و دانش‌محور، مشکل مربوط به تخصیص وزن جهت‌دار به لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی و گسل‌ها را مرتفع می‌کند و سبب بهبود خروجی مدل و تولید نواحی هدف اکتشاف قابل اعتمادتر می‌شود که می‌توانند برای اکتشافات بیشتر مورد توجه قرار گیرند. بدیهی است که اگر تمرکز فعالیت‌های اکتشافی بعدی که بررسی‌های زمینی و اکتشافات بزرگ مقیاس‌تر است، روی این مناطق باشد، از صرف هزینه و زمان در مناطقی که دارای پتانسیل کانی‌سازی نیستند جلوگیری می‌شود.

استفاده از عملگرهای Gamma و OR فازی با همه اندیس‌های موجود در منطقه منطبق هستند. اما با توجه به شکل‌های ۶- الف و ب، عملگر Gamma فازی در مرز ۰/۹، همه اندیس‌های معدنی موجود در منطقه را دربر می‌گیرد؛ اما اگر این مقدار (حد جدایش ۰/۹) برای عملگر OR فازی اختصاص داده شود، تعداد کمتری از اندیس‌ها را شناسایی خواهد کرد. در نقشه باینری (Binary) که با استفاده از عملگر OR فازی به دست آمده است، با وجود اینکه مرز جدایش برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته شده است، اما همه اندیس‌های موجود در منطقه شناسایی شده و همچنین مناطق با گسترش کمتری برای اکتشافات تفصیلی‌تر نسبت به عملگر Gamma فازی به دست آمده است (شکل‌های ۶- الف و ب). از این رو تعیین حد آستانه برای جدایش مناطق مناسب و نامناسب اهداف اکتشافات بعدی مسئله مهمی است که باید با توجه به رخدادهای معدنی موجود در منطقه و نیز با استفاده از نظر کارشناس به‌گونه مطلوبی صورت گیرد (Bonham-Carter, 1994).

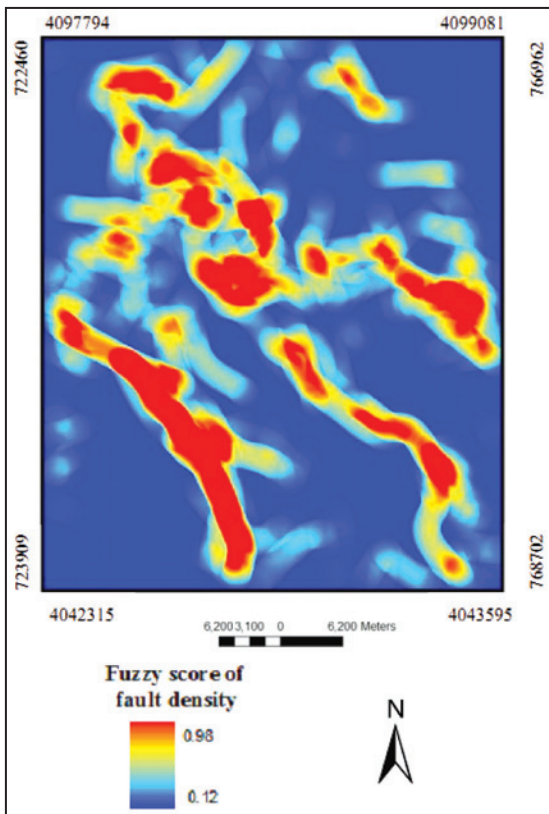
۷- بحث

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور جستجوی یک تیپ ماده معدنی مشخص، در صورتی که در منطقه مورد مطالعه اندیس شناخته شده وجود نداشته و یا تعداد اندیس‌های شناخته شده کم باشد، نمی‌توان از روش داده‌محور استفاده کرد. همچنین اگر در این موارد از روش دانش‌محور استفاده شود، وزن تخصیص یافته به یک الگوی شاهد واحد توسط دو یا چند کارشناس، ممکن است متفاوت باشد. در مقاله حاضر در مورد تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار ژئوشیمی و گسل‌ها با استفاده از روش‌های به کار گرفته شده این مشکلات مرتفع شده است. به‌گونه‌ای که وزن تخصیص یافته به یک الگوی شاهد واحد توسط دو یا چند کارشناس در مناطق با فعالیت‌های اکتشافی کم و یا حتی بدون فعالیت‌های اکتشافی، یکسان است. از این رو در مورد استفاده از شاخص GMPI در تهیه لایه شاهد ژئوشیمیایی می‌توان گفت که روش GMPI می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تحلیل داده‌های اکتشافی در ایجاد یک نقشه شاهد وزن‌دار بدون استفاده از نظر کارشناسی در تخصیص وزن‌ها و همچنین در مناطقی که تعداد اندیس‌های شناخته شده در آن کم است و روش داده‌محور قابل کاربرد نیست، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از آنجا که مقادیر GMPI در دامنه [۱ و ۰] قرار دارند، نقشه شاهد ژئوشیمیایی تهیه شده با استفاده از روش GMPI یک لایه وزن‌دار ژئوشیمیایی است که می‌تواند با دیگر لایه‌های اکتشافی در روش‌های مختلف مدل‌سازی پتانسیل معدنی، از جمله مدل‌سازی به روش منطق فازی و نیز مدل‌سازی به روش شاخص همپوشانی چند کلاسه مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، تابع نشان داده شده در معادله ۱ که برای فازی‌سازی نقشه چگالی گسل‌ها مورد استفاده قرار گرفت است، می‌تواند به فواصل مختلف از گسل، یک وزن فازی تخصیص دهد؛ به‌گونه‌ای که هر یک از فواصل یک وزن جداگانه می‌گیرند. با توجه به اینکه برای کانی‌سازی اسکارن سرب و روی پتانسیل کانی‌سازی با فاصله از گسل‌ها نسبت عکس دارد، با استفاده از این تابع، به نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتری نسبت به نقاط دورتر از گسل‌ها اختصاص داده می‌شود. در پایان، خروجی که با استفاده از این تابع به دست آمد نیز یک لایه شاهد فازی وزن‌دار شده است که می‌تواند با دیگر نقشه‌های شاهد فازی وزن‌دار شده برای مدل‌سازی ذخایر معدنی مورد جستجو، ترکیب شود (Carranza & Hale, 2001; Porwal et al., 2003 & 2004; Yousofi et al., 2013). همچنین با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته در زمینه نتایج مدل‌های پتانسیل تولید شده با استفاده از روش‌های ترکیبی معرفی شده در مقاله حاضر و به کارگیری موقعیت اندیس‌های شناخته شده به عنوان نمونه‌های آزمون، دیده شد که این روش می‌تواند به گونه مطلوبی نواحی اهداف اکتشاف برای مطالعات بعدی را کوچک کند.

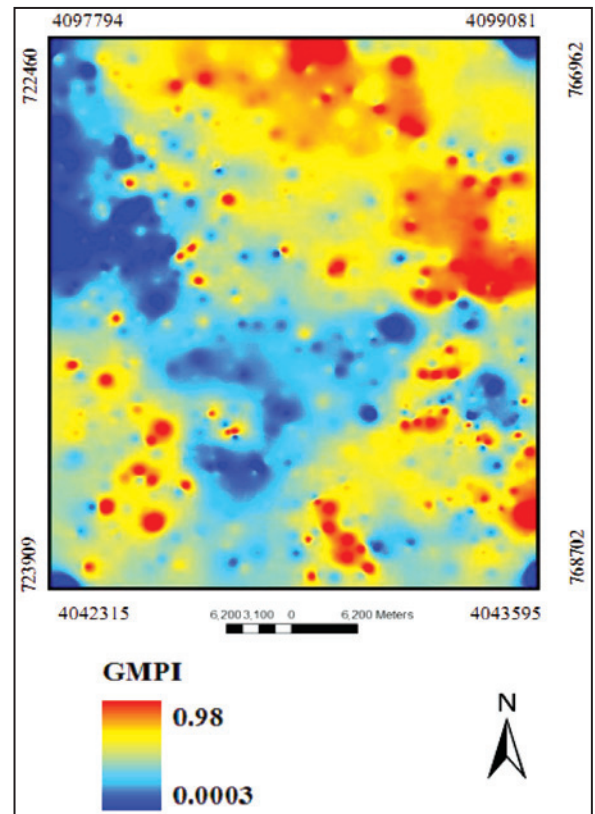
یکی از مسائلی که در اکتشاف وجود دارد این است که اگر فرض شود همه لایه‌ها (داده‌های اکتشافی) باید با هم همبستگی بالا داشته باشند، در آن صورت



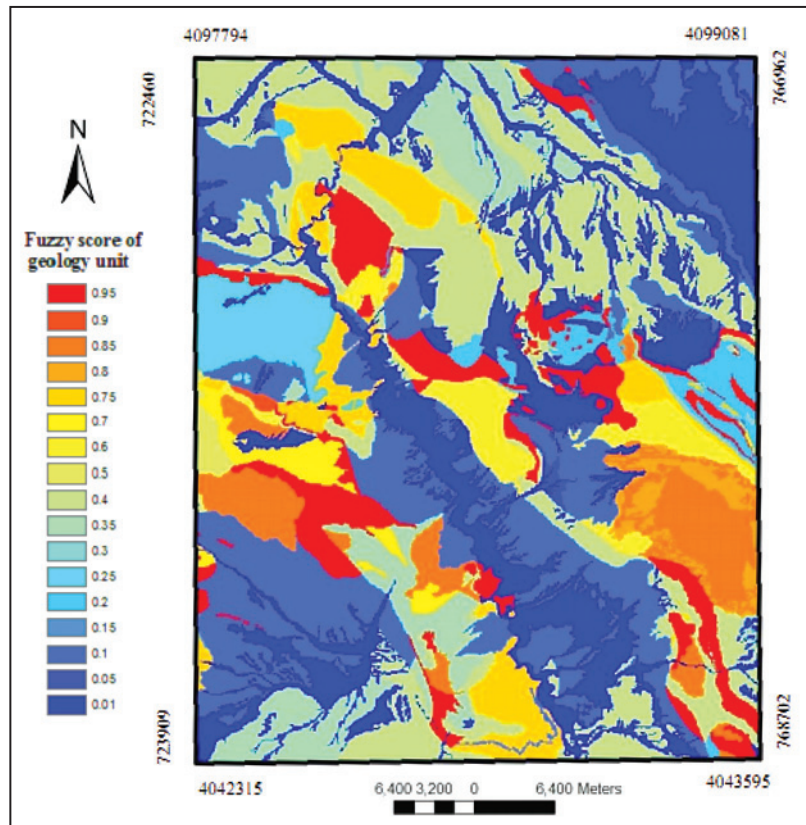
شکل ۱- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ماہنشان (لطفی، ۱۳۷۹).



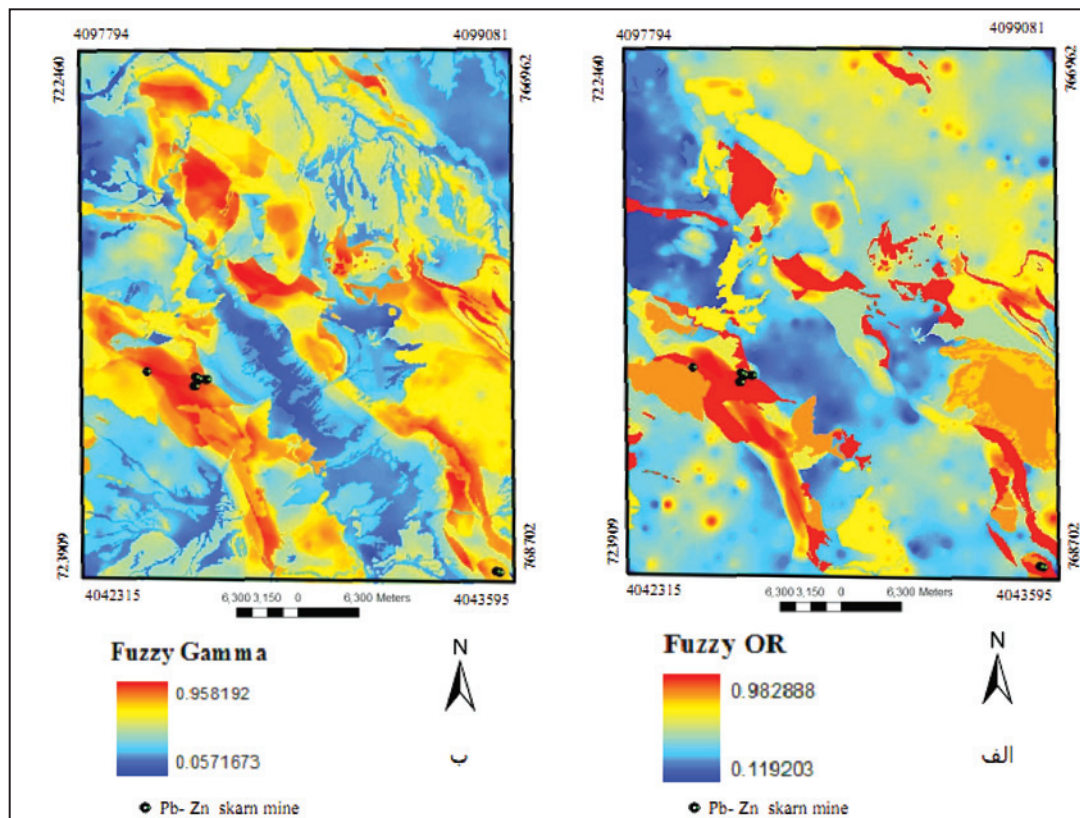
شکل ۳- نقشه وزن دار چگالی گسل‌ها، فازی شده بر پایه روش داده‌محور.



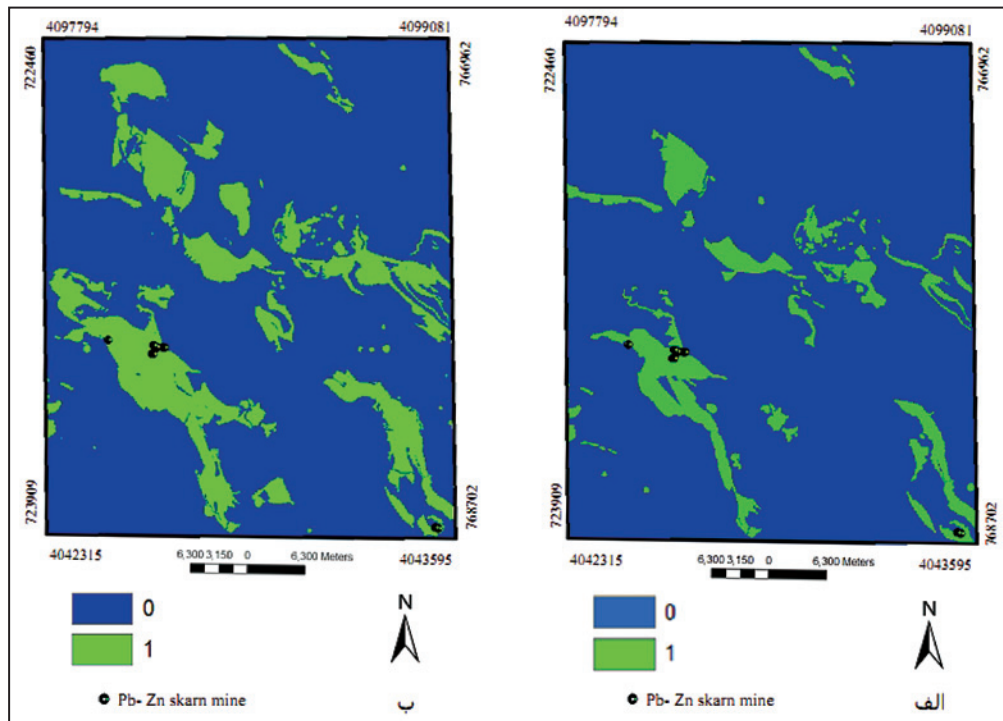
شکل ۲- نقشه توزیع $GMPI_{Zn-Pb\ skarn}$ برای کانی‌سازی اسکارن.



شکل ۴- نقشه توزیع امتیازات فازی واحدهای زمین‌شناسی، لایه شاهد وزن‌دار زمین‌شناسی.



شکل ۵- نقشه مدل پتانسیل کانی‌سازی اسکارن سرب و روی حاصل تلفیق با استفاده از: الف) عملگر OR فازی؛ ب) عملگر Gamma فازی.



شکل ۶- نقشه دوتایی پتانسیل کانی‌سازی اسکارن سرب و روی حاصل رده‌بندی دوباره مدل‌های به دست آمده از تلفیق لایه‌های وزن‌دار. (الف) با استفاده از عملگر OR فازی؛ (ب) با استفاده از عملگر Gamma فازی.

جدول ۱- مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی در برکه ۱/۱۰۰۰۰۰ منطقه ماهنشان.

گنایس بیوتیت‌دار با بافت پورفایروبلاستیک تا گرانوبلاستیک	PC ^{gn}
کوارتز شیبست میکادار، آمفیبولیت شامل میان‌لایه‌هایی از گنایس گرانیتی و در برخی جاها توده‌های ناجور از سنگ‌های الترامافیک	PC ^{ca}
کوارتز شیبست میکادار با بافت لیپیدوبلاستیک با گسترده‌گی یکنواخت و به رنگ خاکستری تیره	PC ^m
تناوبی از مرمر و شیبست به رنگ خاکستری روشن که در آن لایه‌های مرمر، واحدهای سنگی چیره‌اند	PC ^{ms}
تناوبی از شیبست و مرمر به رنگ خاکستری که در آن لایه‌های شیبستی، واحدهای سنگی چیره‌اند	PC sm
مرمر (در برخی جاها به علت ترکیب دولومیتی به تالک تبدیل شده است) و میان‌لایه‌هایی از کالک شیبست کوارتز و دیوپسیددار به‌عنوان مرمرهای نواری به رنگ کرمی تا سفید	PC ^{l2}
فیلیت- اسلیت، شیل، توف، گدازه‌های آندزیتی دگرگونی و به مقدار کم دولومیت به رنگ سبز تیره	PC ^k
ماسه‌سنگ و شیل نازک‌لایه به رنگ خاکستری تیره، در برخی جاها لایه‌های عدسی شکل از زغال‌سنگ	Js
بیومیکروسپاریت متوسط لایه فسیل‌دار به رنگ خاکستری روشن	K ₂
ماسه‌سنگ، شیل و آهک مارنی به رنگ خاکستری	K ₂ ^m
ماسه‌سنگ و شیل به شدت خرد شده به رنگ سبز تیره	K ₁
گرانودیوریت تا مونزونیت کوارتزار به رنگ سفید متمایل به صورتی	g ₂
پگماتیت درشت‌دانه بیوتیت- مسکوویت- گرونادار از مرحله پنوماتولیتی- ماگمایی با بافت گرافیکی	Gd ^p
گرانیت آتاکسی با ترکیب قلیایی به رنگ سفید تا خاکستری روشن	Gd
دگرسانی‌های آرژیلیکی در پیرامون گرانیت‌ها	Alt

کتابنگاری

کریم‌پور، م. و سعادت، س.، ۱۳۸۹- زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات ارسلان، ۵۳۵ ص.
 لطفی، م.، ۱۳۷۹- بررسی زمین‌شناسی و ذخایر معدنی در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش ماهنشان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 یوسفی، م. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹- اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۲۲۴ ص.

References

- Abedi, M., Norouzi, G. H. & Fathianpour, N., 2013- Fuzzy outranking approach: A knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21, 556–567.
- Bertelli, M., Baker, T., Cleverley, J. S. & Ulrich, T., 2009- Geochemical modelling of a Zn – Pb skarn: Constraints from LA–ICP–MS analysis of fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration* 102, 13–26.
- Bonham-Carter, G. F., 1994- *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon, Ontario.

- Canet, C., Camprubí, A., González-Partida, E., Linares, C., Alfonso, P., Piñeiro-Fernández, F. & Prol-Ledesma, R. M., 2009- Mineral assemblages of the Francisco I. Madero Zn– Cu – Pb– (Ag) deposit, Zacatecas, Mexico: Implications for ore deposit genesis. *Ore Geology Reviews* 35 (20 09) 423– 435.
- Canet, C., González-Partida, E., Camprubí, A., Castro-Mora, J., Romero, F. M., Prol-Ledesma, R. M., Linares, C., Romero-Guadarrama, J. A. & Sánchez-Vargas, L. I., 2011- The Zn – Pb– Ag skarns of Zacatepec, Northeastern Oaxaca, Mexico: A study of mineral assemblages and ore-forming fluids. *Ore Geology Reviews* 39. 277– 290.
- Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2001- Geologically-constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines. *Natural Resources Research* 10 (2) , 125–136.
- Carranza, E. J. M., 2008- Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS, *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, Vol. 11, Elsevier, Amsterdam.
- De Quadros, T. F. P., Koppe, J. C., Strieder, A. J. & Costa, J. F. C. L., 2006- Mineral-potential mapping: a comparison of weights-of-evidence and fuzzy methods. *Natural Resources Research* 15 (1), 49–65.
- Gottesmann, W., 2012- Distribution of the main ore elements in the Tumurtijn-ovoo Fe–Mn–Zn skarn deposit, Mongolia. *Chemie der Erde* 72, 333–344.
- Harris, J. R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M. A., Ayer, J. & Dahn, R., 2001- Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps—a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. *Natural Resources Research* 10, 91–124.
- Madani, A., 2011- Knowledge-driven GIS modeling technique for gold exploration, Bulghah gold mine area, Saudi Arabia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 14, 91–97.
- Meinert, L. D., 1992- Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada* 19:145–162.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M. & Nicolescu, S., 2005- World skarn deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists. Littleton, Colorado, pp. 299–336.
- Nykänen, V. & Salmirinne, H., 2007- Prospectivity analysis of gold using regional geophysical and geochemical data from the Central Lapland Greenstone Belt, Finland. *Geological Survey of Finland*, 251–269.
- Nykänen, V. M., Ojala, V. J., Sarapää, O., Hulkki, H. & Sarala, P., 2007- Spatial modelling techniques and data integration using GIS for target scale gold exploration in Finland. In: *Exploration in the new millennium: proceedings of the Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto: Decennial International Mineral Conferences, 911–917.
- Öztürk, Y. Y., Helvac, C., Satir, M., 2008- The influence of meteoric water on skarn formation and late-stage hydrothermal alteration at the Evciler skarn occurrences, Kazdağ , NW Turkey. *Ore Geology Reviews* 34. 271 – 284.
- Porwal, A., 2006- Mineral potential mapping with mathematical geological models, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, The Netherlands, 289 pp.
- Porwal, A., Carranza, E. J. M., & Hale, M., 2003- Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 12, 1–25.
- Porwal, A., Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2004- A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping. *Mathematical Geology*, 36, 803–826.
- Ranjbar, H. & Honarmand, M., 2004- Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 4729–4741.
- Reimann, C. & Filzmoser, P., 2000- Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39, 1001–1014.
- Wan, B., Xiao, W., Zhang, L. & Han, C., 2012- Iron mineralization associated with a major strike – slip shear zone: Radiometric and oxygen isotope evidence from the Mengku deposit, NW China. *Ore Geology Reviews* 44. 136 –147.
- Xiao, F., Chen, J., Zhang, Z., Wang, C., Wu, G. & Agterberg, F. P., 2012- Singularity mapping and spatially weighted principal component analysis to identify geochemical anomalies associated with Ag and Pb–Zn polymetallic mineralization in Northwest Zhejiang, China. *Journal of Geochemical Exploration* 122. 90 – 100.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. & Carranza, E. J. M., 2012- Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. *Journal of Geochemical Exploration*, 115, 24–35.
- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. & Carranza, E. J. M., 2013- Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. First published August 16, 2013; doi10.1144/geochem2012-144.
- Zhao, Y., Dong, Y., Li, D. & Bi, C., 2003- Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolomite-hosted Zn – Pb – Ag skarn deposit, Liaoning Province, China. *Ore Geology Reviews* 23. 153 – 182.
- Zuo, R., 2011- Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb– Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum – area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China). *Journal of Geochemical Exploration* 111. 13 –22.