

# مدل سازی فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی (منطقه مورد مطالعه: کانسار مس چاه فیروزه)

ساناز علایی مقدم<sup>۱</sup>، محمد کریمی<sup>۲</sup>، محمد سعدی مسگری<sup>۳</sup> و نادر صاحب الزمانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، شرکت معدنی پارس آسیا، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۰۵

## چکیده

با توجه به گستردگی نواحی پتانسیل دار ذخیره معدنی در کشور، وجود نگرشی سامان مند برای شناسایی و تبدیل اندیس های معدنی به معادن، ضروری به نظر می رسد. تنوع مدل مفهومی ذخایر گوناگون معدنی، وجود داده های متنوع کمی و کیفی اکتشاف ذخایر معدنی و همچنین وجود نظرات کارشناسی و سلاقی مختلف، فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی را بسیار پیچیده می کند. تاکنون روش های مختلفی مانند همپوشانی شاخص، منطق فازی، شبکه عصبی و وزن های نشانگر برای مدل سازی این پیچیدگی به کار گرفته شده است. در فرایند اکتشاف ذخایر معدنی توجه همزمان به مدل سازی ماهیت غیرقطعی داده های اکتشافی، به کارگیری دانش کارشناسی و انعطاف پذیری روش برای انواع ذخایر معدنی در قالب سامانه های یکپارچه، ضروری است. در مقایسه با روش های دیگر سامانه استنتاجگر فازی ویژگی های یاد شده را دارد. برای بررسی این امر، در این پژوهش یک سامانه استنتاجگر فازی برای مدل سازی فرایند تهیه پتانسیل معدنی پیشنهاد و در اندیس مس چاه فیروزه پیاده سازی شد. مراحل اصلی این پژوهش شامل فازی سازی نقشه های فاکتور با استفاده از تعریف متغیرهای زبانی و توابع عضویت مناسب، ترکیب نقشه های فاکتور با کمک استنتاج فازی (به وسیله ایجاد پایگاه قوانین اگر- آنگاه فازی و به کارگیری مدل تصمیم گیری مناسب) و تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از قطعی سازی خروجی، است. در نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده، مناطق مستعد کانی سازی مس پورفیری، در نواحی مرکزی و با گسترش شمالی- جنوبی شناسایی شده اند. برای ارزیابی، ۲۴ گمانه اکتشافی در منطقه با نقشه پتانسیل معدنی انطباق داده می شوند. بر پایه ۴ نوع رده بندی نقشه پتانسیل معدنی، میزان تطابق برابر با ۶۳/۶۴ درصد، ۷۵ درصد، ۶۳/۹۵ درصد و ۸۰/۲۳ درصد محاسبه شد. نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده در تعیین مناطق دارای پتانسیل خیلی ضعیف، دقیق تر است و با ۸۱/۵۲ درصد از گمانه های با وضعیت خیلی ضعیف انطباق دارد. همچنین نقشه پتانسیل معدنی به دست آمده با نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده از این منطقه به کمک عملگرهای فازی (با بهینه ترین ترکیب عملگرهای فازی) و بدون فازی سازی نقشه های ورودی مقایسه شد. نتیجه مقایسه نشان داد که نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی، در ۴ رده بندی مورد استفاده در این پژوهش به طور میانگین ۶ درصد تطابق بیشتری با گمانه های اکتشافی دارد.

**کلیدواژه ها:** نقشه پتانسیل معدنی، GIS، سامانه استنتاجگر فازی، کانسار مس پورفیری، چاه فیروزه.

\*نویسنده مسئول: ساناز علایی مقدم

E-mail: s.alaei@mail.kntu.ac.ir

## ۱- پیش گفتار

دانش- مبنا، داده- مبنا و ترکیبی قرار می گیرند (Carranza, 2008). روش های دانش- مبنا مانند منطق فازی (Karimi et al., 2008; An et al., 1991)، توابع نظر شهودی (Evidential Belief) (Moon, 1990; An et al., 1992 & 1994) PROMETHEE II (Abedi et al., 2011) و گربه وحشی (Wild Cat) (Carranza & Hale, 2002; Carranza, 2010)، بر پایه نقطه نظرات کارشناسی در مورد اهمیت نقشه های فاکتور در فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی گسترش یافته اند. در برابر آن، روش های داده- مبنا مانند شبکه عصبی (Porwal et al., 2003)، توابع نظر شهودی (Carranza & Carranza et al., 2005)، رگرسیون لجستیک (Hale, 2003; Agterberg & Bonham- Oh & Lee, 2008)، وزن های نشانگر (Carter, 1999; Bonham-Carter et al, 1989; Porwal et al, 2010) و ماشین برداری پشتیبان (Support Vector machine) (Zuo & Carranza, 2010)، بر پایه رابطه مکانی موجود میان فاکتورهای تهیه نقشه پتانسیل معدنی و ذخایر شناخته شده در منطقه به دست می آیند. برخی از پژوهشگران روش هایی به کار برده اند که ترکیبی از مدل داده- مبنا و دانش- مبنا است. شبکه عصبی- فازی (Porwal et al., 2004)، توابع نظر شهودی (Carranza et al, 2008)، وزن های نشانگر فازی (Porwal et al., 2006)؛ Cheng & Agterberg, 1999) و روش ترکیبی ارزیابی جامع فازی چندسطحی (Multilevel fuzzy comprehensive evaluation) و تحلیل رابطه فازی نامتقارن (Asymmetric fuzzy relation analysis) (Zuo et al., 2009) نمونه هایی از این

شناسایی و اکتشاف صحیح منابع معدنی، سبب پیشگیری از هدر رفتن منابع مالی و انسانی می شود. این مسئله ضرورت تهیه نقشه پتانسیل معدنی در اکتشاف ذخایر معدنی را آشکار می سازد. تهیه نقشه پتانسیل معدنی از مسائل تصمیم گیری چندمعیاره مکانی است و کارشناسان اکتشاف معدن بسته به مقیاس مطالعه از معیارهای مختلفی برای این منظور استفاده می کنند (Bonham-Carter, 1994). مراحل اصلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی شامل تعیین فاکتورهای تشخیص کانی سازی، آماده سازی اطلاعات، تهیه نقشه های فاکتور، تلفیق نقشه و ارزیابی نتایج است (Karimi et al., 2008). در فرایند اکتشاف ذخایر معدنی، داده های زمین شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و حفاری در مقیاس های مختلف، با روش ها و دقت های متفاوت به صورت کمی و کیفی تولید می شوند. بررسی محتوای داده های بالا نشان می دهد که اصول فیزیکی و شیمیایی حاکم بر تشکیل انباشته های معدنی در بیشتر موارد پیچیده تر از آن است که بتوان از یک نظریه ریاضی برای مدل سازی آنها استفاده کرد. بنابراین تعیین مدل مفهومی اکتشاف ذخایر معدنی فرایندی مشکل است. از سوی دیگر، در فرایند تلفیق داده های زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک دانش کارشناسی نقش مهمی دارد، این دانش معمولاً در قالب مقادیر کیفی یا متغیرهای زبانی ارائه می شود. کار با داده های گوناگون که به صورت های کیفی و کمی وجود دارند و لزوم استفاده از دانش کارشناسی، فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی را بسیار پیچیده و مدل سازی آن را دشوار کرده است. مدل های متداول نگاشت ذخایر معدنی بر پایه سازوکار استنتاج در ۳ دسته

روش‌ها هستند (روش توابع نظر شهودی به ۳ صورت داده‌مبنا، دانش‌مبنا و ترکیبی قابل استفاده شده است). گفتنی است که امروزه پیاده‌سازی روش‌های نگاشت ذخایر معدنی، چه داده- مبنا و چه دانش- مبنا، همواره در محیط GIS (سامانه اطلاعات جغرافیایی) صورت می‌گیرد (Carranza, 2008; Carranza, 2010). زیرا GIS امکان دریافت، ذخیره، بازیابی، بهنگام‌سازی، نمایش، پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های گوناگون و حجم مکان‌مرجع مرتبط با فعالیت‌های اکتشاف معدن را فراهم می‌آورد.

بررسی چگونگی عملکرد مدل‌های بالا نشان می‌دهد که این مدل‌ها توانایی مدل‌سازی کامل ماهیت غیر قطعی انباشته‌های معدنی را در کنار به‌کارگیری مؤثر دانش کارشناسی (به‌منظور بازتاب دقیق‌تر روابط پیچیده موجود میان نقشه‌های فاکتور و ذخیره معدنی) در قالب سامانه‌های یکپارچه و منسجم ندارند. با توجه به توانایی‌های سامانه استنتاجگر فازی (FIS)، به‌کارگیری این سامانه برای از بین بردن ضعف‌های مدل‌های بالا در این پژوهش ارائه شد.

سامانه استنتاجگر فازی نام عمومی برای سامانه‌هایی است که از استدلال فازی برای نگاشت مجموعه ورودی به یک مجموعه خروجی، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی پدیده‌ها، استفاده می‌کنند (Huang & Chiu, 2009). کار نگاشت در این سامانه با استفاده از منطق فازی و قوانین زبان‌شناختی فازی صورت می‌گیرد. در این پژوهش با توجه به ماهیت سامانه‌های استنتاجگر فازی، مدل‌سازی صحیح ابهام دانش کارشناسی و پیچیدگی‌های موجود در مراحل مختلف فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با کمک این سامانه‌ها، در دستور کار قرار می‌گیرد. سامانه استنتاجگر فازی در ترکیب با عملگرهای فازی به‌عنوان روشی نوین برای تلفیق نقشه‌های فاکتور به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانسار مس چاه‌فیروزه در محیط GIS به‌کار گرفته می‌شود. به‌منظور نشان دادن کارایی این روش، نتایج به‌دست آمده با نتایج روش استفاده از داده‌های عادی (غیرفازی) و عملگرهای فازی که برای این منطقه توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) پیاده‌سازی شده است، مقایسه شد.

در این پژوهش ابتدا مواد و روش‌های مطالعه شامل ارائه ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه و مبانی سامانه‌های استنتاجگر فازی بیان می‌شود. سپس در بخش آزمون عملی مراحل مختلف تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی در محیط GIS بیان می‌شود. در بخش نتایج، میزان تطابق نقشه پتانسیل معدنی به‌دست آمده با واقعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان روش مورد استفاده و نتایج مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲. سامانه استنتاجگر فازی

استنتاج فازی فرایند نگاشت مجموعه ورودی داده‌شده به یک مجموعه خروجی با استفاده از منطق فازی است (Tang, 2004). به عبارتی سامانه استنتاجگر فازی ابزاری قدرتمند به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی داده‌های اکتشاف ذخایر معدنی با استفاده از منطق فازی و قوانین زبان‌شناختی فازی است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، به‌کارگیری این سامانه در هر فرایند شامل ۳ مرحله فازی‌سازی، موتور استنتاج فازی و قطعی‌سازی خروجی‌هاست. در ادامه به توضیح این مراحل پرداخته می‌شود.

**فازی‌سازی:** با تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی، مرحله فازی‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد. برای نمونه، در فازی‌سازی نقشه عامل شارژابیلیته می‌توان از عبارت‌های زبانی شارژابیلیته ضعیف، متوسط و قوی استفاده کرد. برای تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی معمولاً از توابع عضویت استفاده می‌شود. باید توجه داشت که پیش از فازی‌سازی داده‌ها، به‌منظور امکان تبدیل داده‌ها به‌صورت بدون واحد و استاندارد، با تغییر دامنه متغیرها به بازه صفر و یک، عادی‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد. عادی‌سازی در این پژوهش با رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

$$V_{\text{norm}} = \frac{V - V_{\text{min}}}{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}} \quad (1)$$

در این رابطه  $V_{\text{min}}$  و  $V_{\text{max}}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار متغیر است. برای نمونه متغیر شارژابیلیته، در نقشه فاکتور شارژابیلیته در بازه  $[0/1, 0/75]$  قرار دارد که پس از عادی‌سازی با رابطه بالا به بازه  $[0, 1]$  تبدیل می‌شود. این بازه مطابق با شکل ۳ با عبارت‌های زبانی نمایش داده می‌شود.

برای نگاشت مجموعه ورودی به یک مجموعه خروجی، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی پدیده‌ها، استفاده می‌کنند (Huang & Chiu, 2009). کار نگاشت در این سامانه با استفاده از منطق فازی و قوانین زبان‌شناختی فازی صورت می‌گیرد. در این پژوهش با توجه به ماهیت سامانه‌های استنتاجگر فازی، مدل‌سازی صحیح ابهام دانش کارشناسی و پیچیدگی‌های موجود در مراحل مختلف فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با کمک این سامانه‌ها، در دستور کار قرار می‌گیرد. سامانه استنتاجگر فازی در ترکیب با عملگرهای فازی به‌عنوان روشی نوین برای تلفیق نقشه‌های فاکتور به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانسار مس چاه‌فیروزه در محیط GIS به‌کار گرفته می‌شود. به‌منظور نشان دادن کارایی این روش، نتایج به‌دست آمده با نتایج روش استفاده از داده‌های عادی (غیرفازی) و عملگرهای فازی که برای این منطقه توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) پیاده‌سازی شده است، مقایسه شد.

در این پژوهش ابتدا مواد و روش‌های مطالعه شامل ارائه ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه و مبانی سامانه‌های استنتاجگر فازی بیان می‌شود. سپس در بخش آزمون عملی مراحل مختلف تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی در محیط GIS بیان می‌شود. در بخش نتایج، میزان تطابق نقشه پتانسیل معدنی به‌دست آمده با واقعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان روش مورد استفاده و نتایج مورد بحث و ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده معدنی چاه‌فیروزه در فاصله تقریبی ۳۵ کیلومتری شمال باختر شهربابک، در بخش مرکزی شهرستان انار، در استان کرمان قرار گرفته است (شکل ۱) و جاده آسفالت شهربابک - شهرستان انار دسترسی به آن را ممکن می‌سازد. این ذخیره در محدوده عرض جغرافیایی  $30^{\circ} 23' 00''$  تا  $30^{\circ} 24' 30''$  و طول جغرافیایی  $55^{\circ} 00' 30''$  تا  $50^{\circ} 20' 00''$ ، در بخش جنوب خاوری پهنه اورمی- دختر قرار دارد (حاج‌ملاعلی، ۱۳۸۵). در این پهنه کانسارهای مس پورفیری مانند سرچشمه، دره‌زار، سونگون و میدوک قرار دارند و همچنین این پهنه پتانسیل کانی‌سازی قوی دارد.

اکتشافات مقدماتی ژئوشیمیایی معدن یادشده در سال ۱۳۸۴، اکتشافات ژئوفیزیکی آن سال ۱۳۸۵، تهیه نقشه زمین‌شناسی در سال ۱۳۸۶ و حفاری‌های اکتشافی طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷ انجام شده است (حاج‌ملاعلی، ۱۳۸۵). پیکره آتشفشانی- نفوذی (ولکانوپلوتونیسیم) سازمان‌یافته شامل سنگ‌های آتشفشانی متعلق به اتوسن و فعالیت ماگمایی که به پی‌آمد رخداد پیرنه و زمان الیگوسن مربوط است، ساختار زمین‌شناسی منطقه را تشکیل می‌دهد. در امتداد شمال به جنوب منطقه، داسیت پورفیری به سنگ‌های آتشفشانی نفوذ کرده و موجب دگرسانی آنها شده است.

استنتاجگر فازی در منطقه چاه‌فیروزه ارائه می‌شود، ولی پیش از آن به‌طور خلاصه مروری بر تهیه نقشه پتانسیل معدنی این منطقه با استفاده از عملگرهای فازی و بدون فازی کردن نقشه‌های فاکتور، خواهد شد. همان‌گونه که در پیش‌گفتار گفته شد این روش توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) به کار رفته است. بنابراین در بخش ۳-۱ روش بالا پیاده‌سازی دوباره و سپس در بخش ۳-۲ مراحل تهیه نقشه پتانسیل معدنی به کمک سامانه استنتاجگر فازی در منطقه چاه‌فیروزه بیان می‌شود.

### ۳-۱. تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از عملگرهای فازی

با توجه به مدل مفهومی ذخیره مس پورفیری و با استفاده از نتایج مطالعات کارشناسی، عوامل مؤثر در کانی‌سازی اندیس مس چاه‌فیروزه توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) مشخص شدند. این عوامل در جدول ۱ معرفی شده‌اند. برای تهیه نقشه‌های فاکتور، لایه‌های اطلاعاتی شامل نوع سنگ‌شناسی، دگرسانی، گسل، نشانه‌های کانی‌سازی، نقاط برداشت ژئوشیمی، منحنی هم‌عیار عنصر مس، بی‌هنجاری عنصر مس، منحنی هم‌عیار عنصر مولیبدن، بی‌هنجاری عنصر مولیبدن، منحنی هم‌عیار عنصر طلا، بی‌هنجاری عنصر طلا، منحنی شارژیابیلیته، زون بی‌هنجاری شارژیابیلیته، منحنی مقاومت ظاهری و زون بی‌هنجاری مقاومت ظاهری گردآوری و سپس در محیط GIS آماده‌سازی می‌شوند. آماده‌سازی در بیشتر موارد شامل مکان‌مرج کردن نقشه‌ها، جدایش لایه‌های اطلاعاتی از یکدیگر، رفع خطاهای ظاهری از هم‌رشدگی و به هم نرسیدگی، پیوسته کردن عارضه خطی گسل، حذف عوارض تکراری در فایل رقمی و به کارگیری تصحیحات در ذخیره‌سازی اطلاعات توصیفی است.

پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، با انجام پردازش‌هایی مانند رده‌بندی دوباره، ایجاد بافر، تولید نقشه مجاورت و تبدیل قالب نقشه‌ها به قالب رستر نقشه‌های فاکتور تهیه می‌شوند. عوامل مؤثر در وزن‌دهی نقشه‌های فاکتور کانی‌سازی و وزن مربوط به هر یک از فاکتورها در جدول ۱ ارائه شده است. وزن‌های نهایی هر کدام از رده‌های نقشه، از حاصل ضرب وزن رده در وزن نقشه فاکتور (وزن نقشه‌های فاکتور در شکل ۵ ارائه شده است) به دست می‌آیند. این فاکتورها در شکل ۴ نمایش داده شده است. پس از تهیه نقشه‌های فاکتور و وزن‌دهی به آنها، به تلفیق این نقشه‌ها در قالب شبکه استنتاجی پرداخته می‌شود. در شبکه استنتاجی مورد استفاده از مدل همپوشانی شاخص و عملگرهای جمع جبری و گامای فازی، برای تلفیق نقشه‌های فاکتور استفاده شده است. در بیشتر موارد در فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی، نقشه‌های فاکتور همدیگر را تقویت می‌کنند که این امر با ماهیت عملگرهای فازی جمع و گاما انطباق دارد. از سوی دیگر میزان تقویت نقشه‌های فاکتور را می‌توان با استفاده از مقدار گاما کنترل کرد، بنابراین عملگر فازی گاما نیز بیشتر از عملگر فازی جمع استفاده می‌شود. این مسئله برای تلفیق انواع نقشه‌ها به تفصیل توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) تشریح شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص شده است، ۴ نقشه فاکتور زمین‌شناسی توسط عملگر فازی گاما ترکیب می‌شوند و ۳ نقشه عیار ژئوشیمی توسط عملگر گامای فازی ترکیب و نقشه حاصل توسط عملگر همپوشانی شاخص با نقشه اندیس ادیو مس و مولیبدن ترکیب می‌شود. نقشه شارژیابیلیته و مقاومت ظاهری توسط عملگر جمع جبری فازی ترکیب و نقشه حاصل توسط عملگر همپوشانی شاخص با نقشه فاکتور فلزی ترکیب می‌شود. ۳ نقشه عامل زمین‌شناسی (GeoLg)، ژئوشیمی (GeoCH) و ژئوفیزیک (GeoPH) به دست آمده (شکل ۷)، توسط عملگر گامای فازی ترکیب می‌شود و نقشه پتانسیل معدنی به دست می‌آید. مقادیر مختلفی برای عملگر گامای فازی استفاده شده و نتایج ترکیب به‌وسیله هر کدام مورد ارزیابی قرار گرفت، در پایان استفاده از گامای ۰/۸۵ در تهیه نقشه پتانسیل معدنی (در رده‌بندی با روش Manual)، گامای ۰/۸۹ در تهیه نقشه زمین‌شناسی و گامای ۰/۹۵ در تهیه نقشه ژئوشیمی بهترین نتیجه را می‌دهد.

### ۳-۲. تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی

در این پژوهش، هدف تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر

در شکل ۳ توابع عضویت فازی شارژیابیلیته شامل ۳ متغیر زبانی و در پی آن ۳ عدد فازی است. اعداد فازی مورد استفاده باید دو ویژگی عادی بودن و تحدب را داشته باشند (منهاج، ۱۳۸۸). به‌طور معمول در تعریف توابع عضویت از اعداد فازی دوزنقه‌ای و مثلثی استفاده می‌شود که این اعداد را می‌توان به ترتیب به صورت چهارتایی  $M=(a,b,c,d)$  و سه تایی  $M=(a,b,c)$  در نظر گرفت. افزون بر این هر عدد فازی را می‌توان به صورت یک رابطه در نظر گرفت. برای نمونه عدد فازی دوزنقه‌ای فاکتور شارژیابیلیته متوسط را که به صورت چهارتایی  $M=[0/3, 0/5, 0/5, 0/7]$  بیان می‌شود، می‌توان با کمک رابطه ۲ بیان کرد:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{b-x}{b-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (2)$$

هر عارضه یا شی‌ای بر روی نقشه به عنصر واحدی از عدد فازی ارجاع داده می‌شود. بنابراین در GIS به ازای هر نقشه معیار با  $n$  عدد فازی،  $n$  نقشه جدا در نظر گرفته می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۳۸۸). چگونگی انجام این عملیات در بخش ۳-۲ ارائه شده است. عملیات جبری روی اعداد فازی با اعداد حقیقی تفاوت دارد و انواع محاسبات فازی با کمک اصل گسترش فازی ممکن می‌شود. با توجه به گستردگی موضوع می‌توان به منابع مرتبط مانند (منهاج، ۱۳۸۸) مراجعه کرد. مدل‌سازی داده‌های فازی در GIS این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از عملیات همپوشانی، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی را عملیاتی کرد (پرهیزکار و غفاری، ۱۳۸۶)

– **موتور استنتاج فازی:** مرحله دوم در سامانه‌های استنتاجگر فازی، تلفیق داده‌های فازی با به‌کارگیری موتور استنتاج فازی است. تلفیق داده‌ها با ایجاد پایگاه داده‌ای از قوانین به فرم “اگر-آنگاه” فازی و به کارگیری مدل تصمیم‌گیری انجام می‌پذیرد. مدل‌های ممدانی و سوگنو به عنوان متداول‌ترین مدل‌ها در این مرحله مطرح هستند. در مدل ممدانی برای ترکیب درجات عضویت فازی توابع ورودی از عملگرهای AND و OR استفاده می‌شود. در حالی که در روش سوگنو بخش “آنگاه” قواعد فازی به صورت رابطه‌ای ریاضی تعریف می‌شود و خروجی‌هایی با مقادیر حقیقی ایجاد می‌شود. به عبارتی در روش اخیر از مزایای استنتاج فازی کمتر استفاده شده است و لازم به توضیح است که این روش بیشتر در مسائل دارای ماهیت خطی و همچنین مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

– **قطعی‌سازی:** خروجی موتور استنتاج فازی به‌طور معمول شامل یک یا چند عدد فازی است که باید به یک عدد حقیقی تبدیل شود تا قابل درک و تفسیر شود. این کار توسط مرحله قطعی‌سازی داده‌ها انجام می‌شود. روش‌های زیادی مانند روش مرکز ثقل، میانگین وزن‌دار، بیشترین میانه، مرکز جمع و مرکز بزرگ‌ترین سطوح برای این مرحله وجود دارد. روش مرکز ثقل که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، با استفاده از رابطه ۳ انجام می‌گیرد:

$$z^* = \frac{\int \mu_A(x) \cdot x \, dx}{\int \mu_A(x) \, dx} \quad (3)$$

در این رابطه منظور از درجه عضویت فازی مقادیر  $X$  است که بیانگر تغییر درجه عضویت فازی در خروجی مرحله استنتاج فازی است.

### ۳-۳. آزمون عملی

همان‌گونه که در پیش‌گفتار گفته شد، تهیه نقشه پتانسیل معدنی فرایندی چند مرحله‌ای است و مراحل اصلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی شامل تعیین فاکتورهای تشخیصی کانی‌سازی، آماده‌سازی اطلاعات، تهیه نقشه‌های فاکتور، تلفیق نقشه و ارزیابی نتایج است. در ادامه مراحل بالا برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی به کمک سامانه

به این ترتیب به‌ازای هر یک از توابع عضویت ورودی یک نقشه تولید می‌شود. این نقشه‌ها در شکل ۹ نمایش داده شده‌اند.

**– استنتاج فازی:** پس از فازی‌سازی نقشه‌های فاکتور، تلفیق نقشه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. به‌منظور تلفیق داده‌ها با استفاده از قواعد استنتاجگر فازی، ابتدا یک پایگاه قواعد «اگر-آنگاه» فازی برای نقشه‌های فاکتور ایجاد می‌شود. در این مطالعه برای نقشه‌های فاکتور ورودی توابع عضویت فازی تعریف شد و با کمک دانش کارشناسی، پایگاه قواعد «اگر-آنگاه» فازی مورد نظر، تعریف گردید. نمایش نقشه‌های فازی ورودی به ۳ صورت پتانسیل قوی، متوسط و ضعیف (شکل ۹) به کارشناس در تعیین قواعد مناسب کمک می‌کند. برای نمونه یک نمونه از قوانین به این صورت است: اگر در یک پیکسل منطقه زمین‌شناسی قوی، ژئوشیمی قوی و ژئوفیزیک قوی داشته باشد، پتانسیل معدنی آن پیکسل خیلی زیاد است. در جدول ۳ تعدادی از قواعد مورد استفاده ارائه شده است. تلفیق داده‌های فازی با استفاده از قواعد «اگر-آنگاه» فازی نیازمند به‌کارگیری یک مدل تصمیم‌گیری است، در این پژوهش استفاده از روش کمینه بیشینه ممدانی، به دلیل ساختار ساده و مؤثر آن و همچنین کاربرد گسترده آن در مسائل علمی مدنظر قرار گرفت. در ادامه با ارائه نمونه‌ای عددی، فرایند تصمیم‌گیری با این روش به صورت روشن‌تر بیان می‌شود.

برای نمونه چنانچه پیکسلی دارای ارزش ۰/۰۰۹۳ در نقشه فاکتور زمین‌شناسی عادی، ارزش ۰/۴۸۱۹ در نقشه فاکتور ژئوشیمی عادی و ارزش ۰/۳۰۴۶ در نقشه فاکتور ژئوفیزیکی عادی باشد، میزان تعلق آن به رده پتانسیل قوی زمین‌شناسی ۰، به رده متوسط زمین‌شناسی ۰/۱۱۷۰، به رده پتانسیل ضعیف زمین‌شناسی ۰/۸۸۳۰، به رده پتانسیل قوی ژئوشیمی ۰/۶۷۷۲، به رده پتانسیل متوسط ژئوشیمی ۰/۳۲۲۸ و به رده پتانسیل ضعیف ژئوشیمی ۰، به رده پتانسیل قوی ژئوفیزیک ۱ و به رده پتانسیل متوسط و ضعیف ژئوفیزیک ۰ است.

در این بخش باید در پایگاه داده موجود، همه قواعدی که میزان زمین‌شناسی آنها متوسط و ضعیف، میزان ژئوشیمی آنها قوی و متوسط و میزان ژئوفیزیک آنها متوسط و ضعیف قوی و متوسط باشد، انتخاب شوند. در این حالت ۴ قاعده، مطابق شکل ۱۰ وجود دارد. در این شکل  $S, M, W, V, VS$  به ترتیب بیانگر مقادیر ضعیف، متوسط، قوی، خیلی ضعیف و خیلی قوی هستند. در هر قاعده تابع عضویت فازی خروجی با استفاده از پایگاه قواعد تعیین می‌شود. در مرحله بعد با توجه به درجات عضویت فازی پیکسل به توابع عضویت ورودی، درجه عضویت پیکسل به تابع عضویت خروجی محاسبه می‌شود. در مدل ممدانی برای ترکیب درجات عضویت ورودی از عملگر AND، معادل حداقل، استفاده می‌شود. به عنوان نمونه در قاعده اول با داشتن ۳ درجه عضویت ۰/۸۸۳، ۰/۳۲۲۸ و ۱ درجه عضویت این پیکسل در این قاعده برابر کمینه آنها یعنی ۰/۳۲۲۸ است. انجام مرحله دوم مدل ممدانی شامل تلفیق درجه عضویت فازی قواعدی است که تابع عضویت آنها یکسان است. در این مرحله از عملگر OR، معادل بیشترین، استفاده می‌شود. در نمونه ارائه‌شده، تابع عضویت قاعده دوم و سوم یکسان است (تابع عضویت این دو قاعده قوی است) و بیشترین مقدار ۲ درجه عضویت ۰/۱۱۷ و ۰/۶۷۷۲ به عنوان تلفیق دو قاعده انتخاب می‌شود.

**– قطعی‌سازی داده‌ها:** در مرحله پیش میزان پتانسیل معدنی هر پیکسل به‌صورت یک یا چند عدد فازی محاسبه می‌شود. برای نمونه، در شکل ۱۰ پتانسیل معدنی پیکسل مورد نظر با ۳ عدد فازی، پتانسیل معدنی متوسط با درجه عضویت ۰/۳۲۲۸، پتانسیل معدنی زیاد با درجه عضویت ۰/۶۷۷۲ و پتانسیل معدنی خیلی زیاد با درجه عضویت ۰/۱۱۷ معادل است. به منظور تلفیق اعداد فازی از روش مرکز ثقل استفاده می‌شود. خروجی این روش بیانگر پتانسیل معدنی هر پیکسل به صورت قطعی است. در مثال شکل ۱۱ خروجی برابر ۰/۶۵ است.

در این پژوهش، عملیات آماده‌سازی و پردازش نقشه‌ها در نرم‌افزار

فازی است که ورودی‌های آن ۳ نقشه فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک (شکل ۷) هستند. این ۳ نقشه به کمک عملگرهای فازی و شاخص همپوشانی توسط شبکه‌ای همانند شکل ۵ تهیه شده‌اند. ۳ نقشه فاکتور ورودی همانند شبکه استنتاجی شکل ۶ وارد سامانه استنتاج فازی شده و خروجی این سامانه نقشه پتانسیل معدنی است. در ادامه مراحل تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی، ارائه می‌شود.

**– فازی‌سازی نقشه‌های فاکتور ورودی:** تهیه نقشه پتانسیل معدنی در سامانه استنتاجگر فازی نیازمند تعریف توابع عضویت فازی مناسب به منظور مدل‌سازی ابهام موجود در مرز بین عوارض مکانی و رده‌های نقشه‌هاست. نوع، تعداد و متغیرهای توابع عضویت فازی با بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک منطقه مورد مطالعه و همچنین نظر کارشناسان مدیریت امور اکتشافات و مهندسی توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران و نمایندگان شرکت‌های مشاور انجام مطالعات و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک منطقه چاه‌فیروزه، تعیین شد. ۳ تابع عضویت ذوزنق‌های ضعیف، متوسط و قوی برای هر کدام از نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تعریف می‌شود که بیانگر میزان شدت تأثیر این عوامل است.

با توجه به خاصیت روش رده‌بندی Quantile یا چارک، استفاده از این روش برای تعیین متغیرهای توابع عضویت از سوی کارشناسان پیشنهاد شد. در روش رده‌بندی Quantile، نقشه پتانسیل معدنی به گونه‌ای رده‌بندی می‌شود که تعداد عوارض یا پیکسل‌های موجود در رده‌ها با یکدیگر برابر باشد. به عبارتی نقشه رستری پتانسیل معدنی به رده‌های هم‌مساحت تقسیم‌بندی می‌شود. برای نمونه در نقشه فاکتور زمین‌شناسی شکل ۷-الف مساحت مناطق دارای ارزش ۰/۰۰۷۶ تا ۰/۰۰۷۹ که در رده چهارم قرار دارند، با مساحت رده‌های دیگر برابر است. در این نقشه هر یک از کلاس‌ها ۱۰ درصد مساحت کل منطقه را در بر می‌گیرد. بنابراین برای نمونه مناطق با ارزش کمتر از ۰/۰۰۷۹، ۴۰ درصد از منطقه و مناطق با ارزش بیشتر از ۰/۰۰۷۹ کمتر از ۰/۰۵۳، ۵۰ درصد از منطقه را تشکیل می‌دهند.

نظرات کارشناسان برای تعیین متغیرهای توابع عضویت، در قالبی ۱۰ رده‌ای بیان می‌شود، بنابراین سه نقشه فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی حاصل از مرحله پیش، همانند شکل ۷، به کمک روش Quantile به ۱۰ رده، تقسیم می‌شوند. کارشناسان با بررسی نقشه‌های رده‌بندی‌شده، رده‌های ۹ و ۱۰ را در نقشه فاکتور زمین‌شناسی و رده ۱۰ را در ۲ نقشه فاکتور ژئوشیمی و ژئوفیزیکی به ترتیب به‌عنوان مناطقی با پتانسیل قوی زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی برای وجود معدن مس پورفیری، کلاس‌های ۷، ۸، ۶، ۵ و ۴ در نقشه زمین‌شناسی و کلاس‌های ۸، ۷، ۶، ۵ و ۴ را در ۲ نقشه ژئوشیمی و ژئوفیزیکی به‌عنوان مناطقی با پتانسیل متوسط زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک و رده‌های ۳، ۲ و ۱ را در هر ۳ نقشه به ترتیب به‌عنوان مناطقی با پتانسیل ضعیف زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک معرفی کردند. گفتنی است که علت انتخاب ۲ رده به عنوان زمین‌شناسی قوی، استفاده از عملگر گاما ۰/۸۹ در تولید نقشه فاکتور زمین‌شناسی است که خاصیت افزایشی دارد و موجب می‌شود بازه رده آخر بسیار بزرگ‌تر از رده‌های دیگر باشد، از سوی دیگر این عامل نسبت به دو عامل دیگر اهمیت بیشتری دارد. با در نظر گرفتن این رده‌ها، متغیرهای توابع عضویت مانند جدول ۲ استخراج می‌شود. برای نمونه ارزش‌های بیشتر از ۰/۳۵۰ در نقشه فاکتور زمین‌شناسی که شامل رده‌های ۹ و ۱۰ است، توسط کارشناسان، مناطقی با پتانسیل قوی زمین‌شناسی در نظر گرفته شده است، از سوی دیگر ارزش‌های میان ۰/۲۲۶ و ۰/۳۵ مناطقی با پتانسیل متوسط در نظر گرفته می‌شود، بنابراین عدد فازی زمین‌شناسی قوی برای این نقشه فاکتور [۰/۳۵۰، ۰/۲۲۶، ۰/۱] است. گفتنی است که خروجی موتور استنتاج فازی در قالب ۵ تابع عضویت پتانسیل معدنی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد ارائه می‌شود. این توابع در شکل ۸ ارائه شده‌اند.

و تلفیق نتایج حاصل از مطالعات زمین شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک برای شناسایی و ارزیابی پتانسیل های معدنی مورد استفاده قرار می گیرد. در فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی نکات زیر قابل ملاحظه است.

- در این پژوهش یک سامانه استنتاجگر فازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ویژگی های مدل های استفاده شده در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، استفاده از سامانه استنتاجگر فازی برای از بین بردن کاستی های موجود در این مدل ها ارائه شد. این سامانه ضمن وارد کردن ماهیت فازی داده های اکتشافی (در قالب نقشه های فاکتور فازی)، امکان مدل سازی دانش کارشناسی که نقش بنیادین در اکتشافات معدنی بر عهده دارد، فراهم می آورد. با این سامانه مدل کردن روابط پیچیده موجود در داده های اکتشافی با کمک متغیرهای زبان شناختی و پایگاه دانش (شامل پایگاه قواعد فازی و مدل تصمیم گیری) ممکن می شود، هر چند حجم محاسبات بیشتر از روش های متداول است.

- در منطقه مورد مطالعه، مناطق مستعد کانی سازی از دید وجود کانی سازی مس پورفیری، در نواحی مرکزی و با گسترش شمالی - جنوبی تعیین شده اند. با انطباق ۲۴ گمانه اکتشافی حفر شده با نقشه های پتانسیل معدنی، در جدایش سهرده ای، با روش رده بندی Jenk و Manual به ترتیب تطابق به میزان ۶۳/۶۴ درصد و ۷۵ درصد و در جدایش پنج رده ای، با روش رده بندی Jenk و Manual به ترتیب تطابق به میزان ۶۳/۹۵ درصد و ۸۰/۲۳ درصد به دست آمده است. نتایج حاصل از روش Manual با جدایش پنج رده ای بیشترین تطابق را دارد. نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده، در تعیین مناطق دارای پتانسیل خیلی ضعیف، دقیق تر عمل کرده و ۸۱/۵۲ درصد از گمانه های با وضعیت خیلی ضعیف را صحیح مکان یابی کرده است.

- نقشه پتانسیل معدنی به دست آمده در مقایسه با نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده از این منطقه به کمک عملگرهای فازی و نقشه های فاکتور غیر فازی، به طور میانگین ۶ درصد تطابق بیشتری با ۲۴ گمانه اکتشافی مورد استفاده در این پژوهش دارد.

- در مرحله استنتاج فازی، هر چه تعداد نقشه های فاکتور ورودی و همچنین توابع عضویت ورودی زیادتر باشد، حجم محاسبات زیادتر می شود. بنابراین رده بندی ورودی ها موجب کاهش تعداد قواعد موجود در پایگاه قواعد می شود.

- در این پژوهش، تعداد محدودی گمانه اکتشافی از منطقه مورد مطالعه در اختیار قرار داشت. در صورت استفاده از تعداد بیشتری گمانه اکتشافی، نتایج ارزیابی دقیق تر خواهد شد. همین طور پیشنهاد می شود در ارزیابی نتایج، نقشه به رده های با قابلیت بالا جدایش شود.

- در صورت وجود تعداد کافی گمانه اکتشافی حفر شده، با پراکندگی قابل قبول در منطقه، می توان در مرحله فازی سازی داده ها، نوع، تعداد و متغیرهای توابع عضویت فازی را با روش های داده - مینا به دست آورد. همین طور در مرحله استنتاج فازی امکان تعیین قواعد "اگر - آنگاه" فازی به کمک روش های داده - مینایی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی وجود دارد. در این پژوهش با هدف مدل سازی دانش کارشناسی و از سوی دیگر به دلیل نبود تعداد کافی گمانه اکتشافی در منطقه، موارد یاد شده به صورت دانش - مینا تعیین شد.

- مدل مفهومی و فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی ارائه شده در اندیس مس چاه فیروزه را می توان با به کارگیری تغییرات لازم در دیگر کانسارها و اندیس های معدنی مس پورفیری مورد استفاده قرار داد.

## سپاسگزاری

نویسندگان از جناب آقای مهندس اصفهانی پور، مدیر محترم امور اکتشاف و مهندسی توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران به خاطر همفکری صمیمانه ایشان در راستای انجام بهتر این پژوهش، سپاسگزاری می کنند.

ArcGIS Ver 9.3 و تعریف توابع عضویت فازی و ایجاد پایگاه قواعد فازی با استفاده از نرم افزار Matlab Ver 7.12.0 انجام شد. نقشه ها به صورت فازی در محیط ArcGIS تهیه و برای محاسبات فازی به فرمت قابل ورود به نرم افزار Matlab تبدیل شدند. پس از محاسبه پتانسیل معدنی در نرم افزار Matlab، خروجی به فرمت قابل ورود به نرم افزار ArcGIS تبدیل شد. به این ترتیب در این پژوهش اتصال میان دو نرم افزار یاد شده به منظور تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی انجام شد.

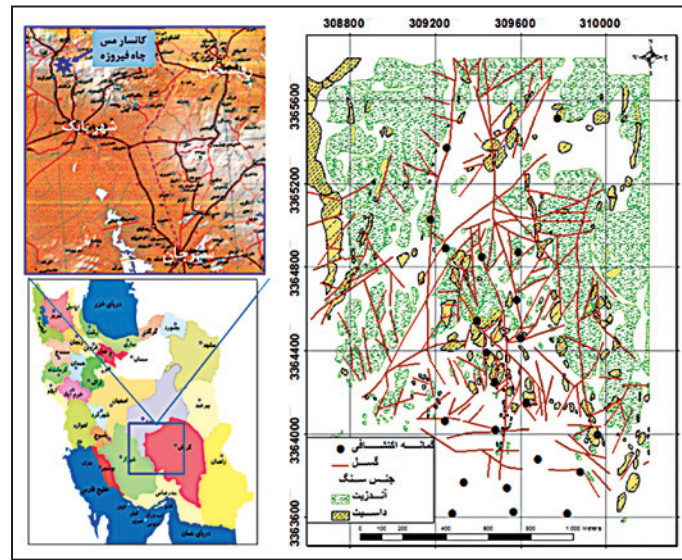
## ۴- نتایج

روش تهیه نقشه پتانسیل معدنی همانند شکل ۶، با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی بیان شد. نقشه پتانسیل معدنی به دست آمده با این روش در شکل ۱۲- الف نشان داده شده است. در این نقشه مناطق پتانسیل دار از دید وجود کانی سازی مس پورفیری در نواحی مرکزی منطقه و با گسترش شمالی - جنوبی تعیین شده است. برای ارزیابی نتایج، از اطلاعات مربوط به ۲۴ گمانه اکتشافی حفاری شده (الماسی، ۱۳۸۶) استفاده می شود. با توجه به تغییرات عیار مس در نیمرخ تغییرات آن در ژرفا و نیز بررسی مقادیر میانگین و همچنین کمینه و بیشینه عیار مس در هر یک از گمانه های موجود، هر کدام از گمانه ها در یک رده قرار داده شدند. مطابق جدول ۴ در وضعیت ۳ رده ای یکی از ۳ وضعیت قوی، متوسط و ضعیف و در وضعیت پنج رده ای یکی از ۵ وضعیت خیلی قوی، قوی، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف به هر یک از گمانه ها نسبت داده شد.

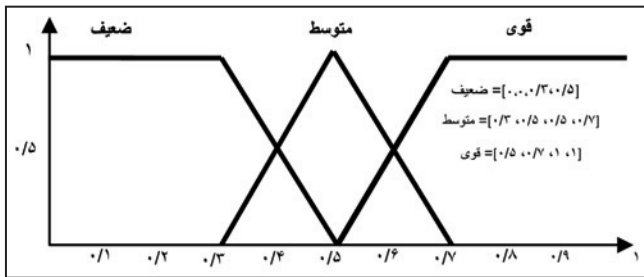
به منظور ارزیابی نقشه پتانسیل معدنی، از انطباق مقادیر پیکسل های نقشه یاد شده در موقعیت مکانی گمانه های اکتشافی با نتایج حفاری آن گمانه ها استفاده می شود. بنابراین نقشه پتانسیل معدنی به رده های مختلف جدا می شود و سپس مقادیر پیکسل های مربوط به گمانه های اکتشافی استخراج می شود. رده تعیین شده برای هر چاه با وضعیت گمانه مقایسه می شود. نقشه پتانسیل معدنی به دو روش Jenk و Manual (دستی) و به صورت های ۳ و ۵ رده ای، رده بندی می شود (شکل ۱۲- ب تا ث). گفتنی است که در رده بندی به روش دستی، ابتدا با دریافت نظرات کارشناسی، نقشه به رده های مساوی تقسیم می شود، سپس بازه رده ها طوری تغییر می کند که بیشترین انطباق با گمانه های اکتشافی به دست آید. نتایج ارزیابی بالا در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول اعداد ۱ تا ۳ در رده بندی سهرده ای به ترتیب بیانگر عبارت های ضعیف، متوسط و قوی و اعداد ۱ تا ۵ در رده بندی ۵ رده ای به ترتیب بیانگر عبارات خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی هستند. منظور از وزن گمانه میزان (Value) پتانسیل معدنی در موقعیت گمانه اکتشافی مورد نظر است. از این پایه در رده بندی ۳ و ۵ رده ای نتایج حاصل از روش Manual تطابق بیشتری دارد و بیشترین تطابق مربوط به روش Manual در دسته بندی ۵ رده ای و به میزان ۸۰/۲۳ درصد است. از این رو انجام عملیات حفاری در مناطق مستعد مشخص شده در نقشه پتانسیل شکل ۱۲- ث توصیه می شود. نقشه پتانسیل معدنی اندیس مس چاه فیروزه تهیه شده توسط عادل و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از عملگرهای فازی و نقشه های فاکتور غیر فازی، در بهینه ترین مقدار عملگر گاما، با روش Jenk و Manual سهرده ای به ترتیب به میزان ۵۶/۸۲ درصد و ۷۲/۷۳ درصد و با روش Jenk و Manual ۵ رده ای به ترتیب به میزان ۵۴/۶۵ درصد و ۷۴/۴۲ درصد با ۲۴ گمانه اکتشافی مورد استفاده در این پژوهش، تطابق دارد. نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی در مقایسه با این نتایج به ترتیب ۶/۸۲ درصد، ۲/۲۷ درصد، ۹/۳ درصد و ۵/۸۱ درصد دارای انطباق بیشتر با گمانه های اکتشافی است.

## ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

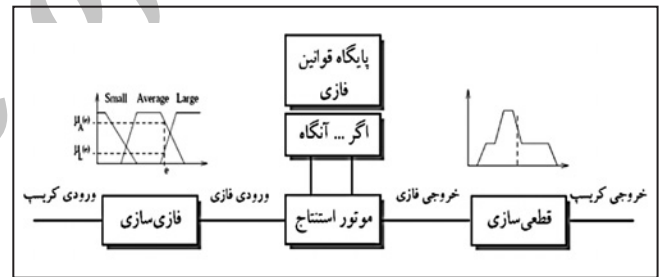
هدف پایانی مطالعات اکتشافی ذخایر معدنی، تهیه نقشه پتانسیل معدنی است. سامانه اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزاری توانمند در راستای ساماندهی، پردازش، تحلیل



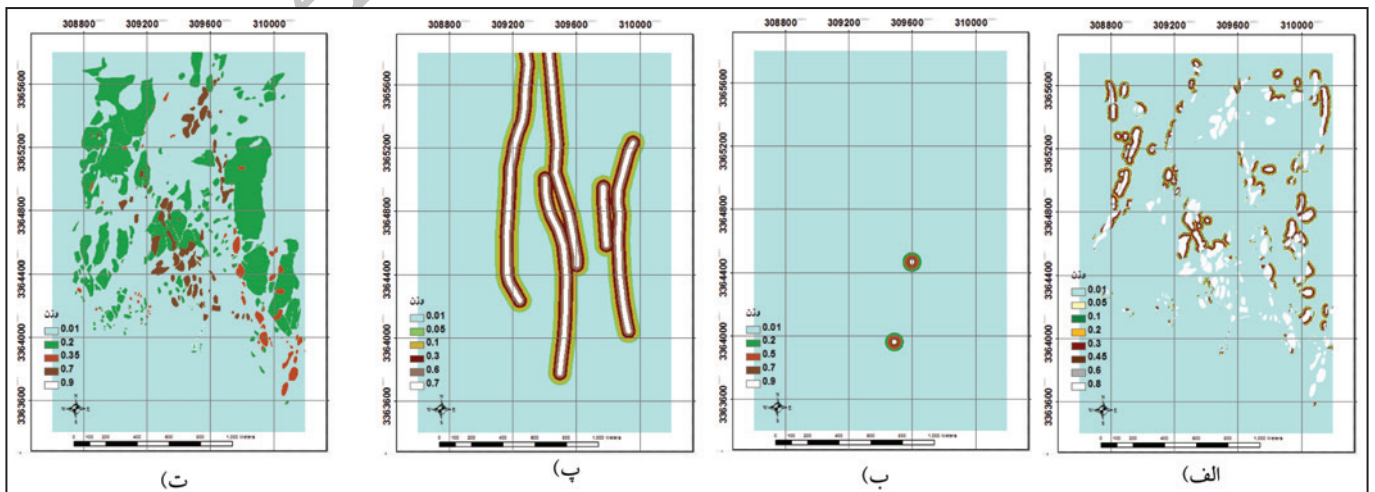
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.



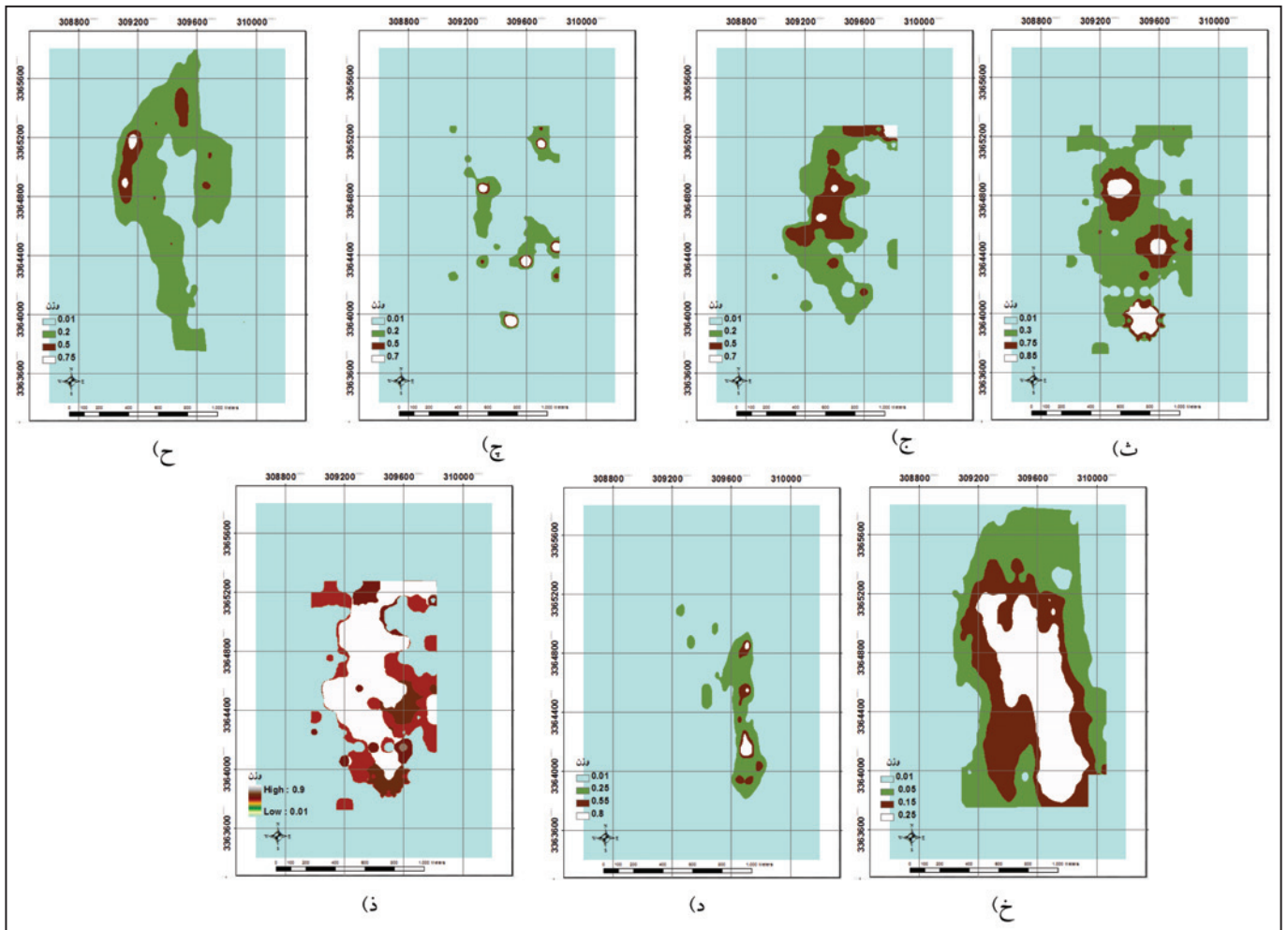
شکل ۳- توابع عضویت عامل شارژ ابلهت.



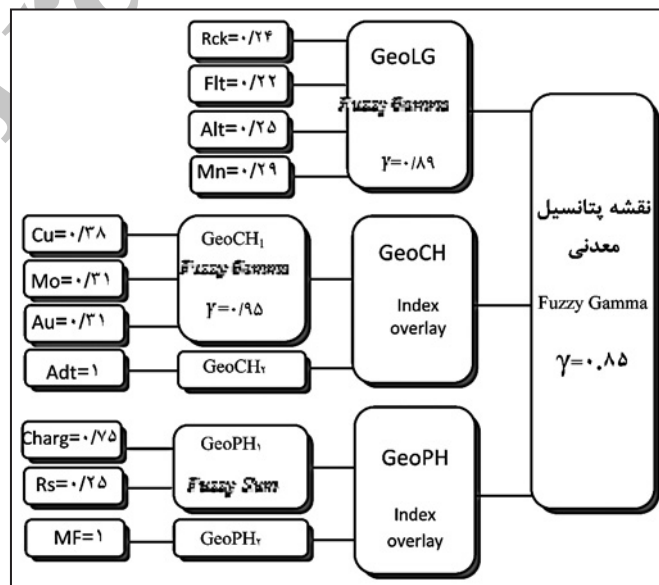
شکل ۲- سیستم استنتاج فازی (Stefanakis et al., 1996).



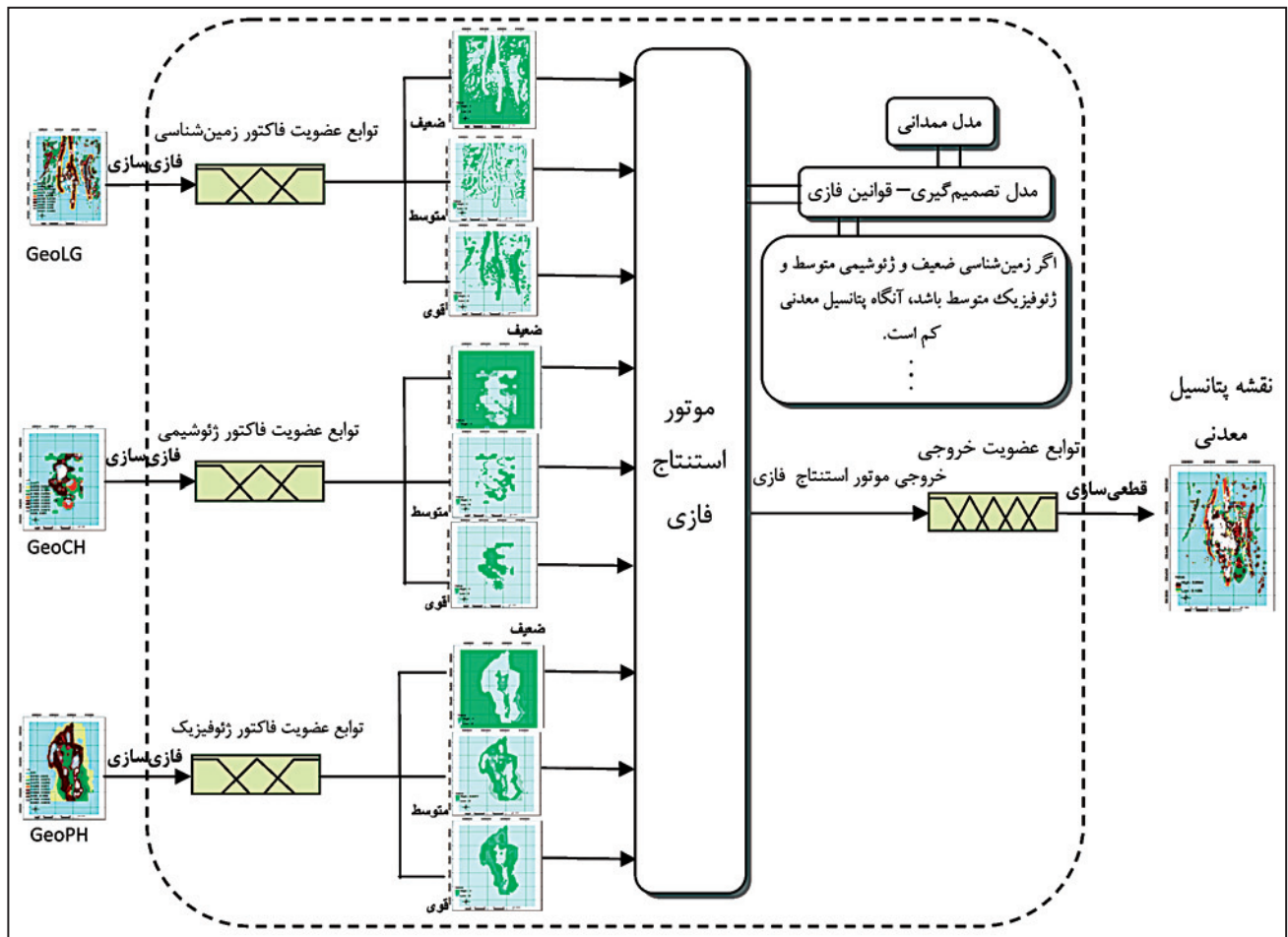
شکل ۴- نقشه‌های عامل (فاکتور؛ الف) زون منشأ حرارت و سنگ میزبان؛ (ب) نشانه معدنی محلی؛ (پ) گسل اصلی؛ (ت) دگرسانی.



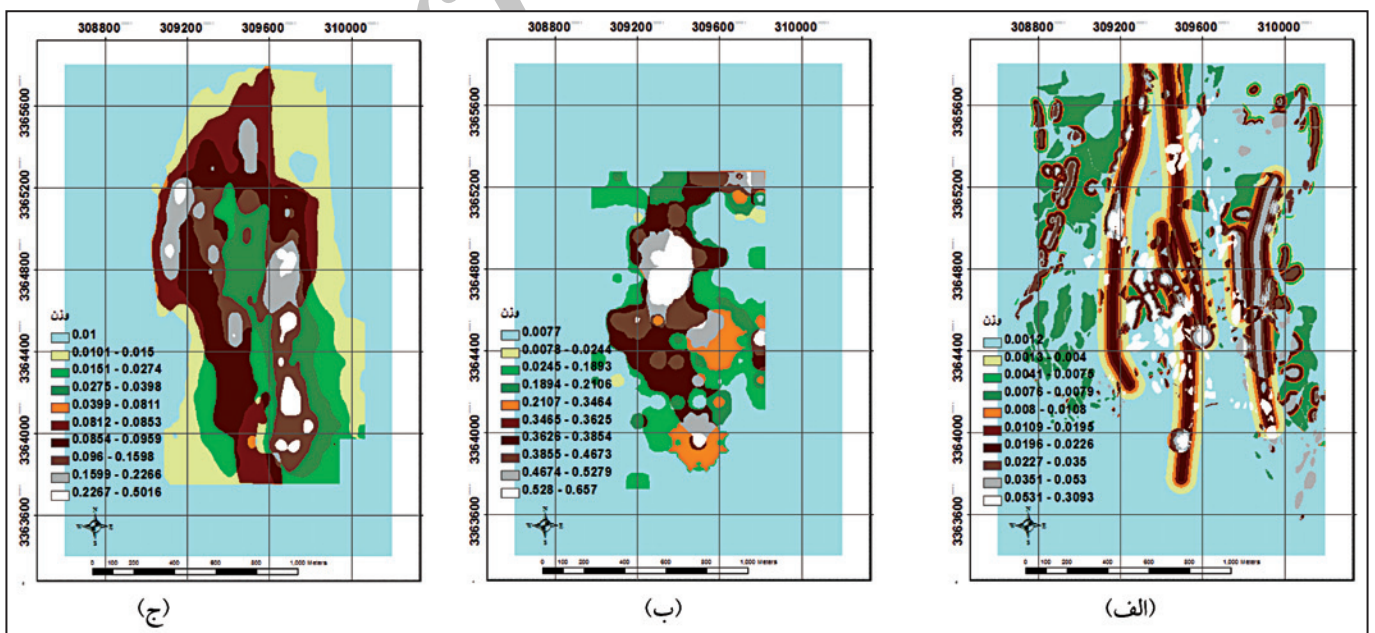
شکل ۴ - (ث) عيار مس؛ (ج) عيار موليبدن؛ (ج) عيار طلا؛ (ح) شارژيبيليت؛ (خ) مقاومت ظاهري؛ (د) عامل (فاكتور) فلزي او (ذ) اديتو مس و موليبدن.



شکل ۵ - شبکه استنتاجي مورد استفاده در تهیه نقشه پتانسيل معدني انديس چاه فيروزه با کمک عملگرهاي فزي (عادلي و همكاران، ۱۳۸۸).

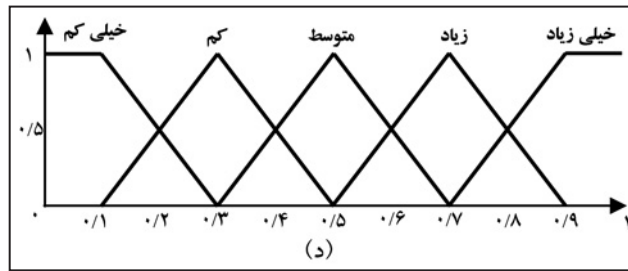


شکل ۶- شبکه استنتاجی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی توسط سامانه استنتاجگر فازی.

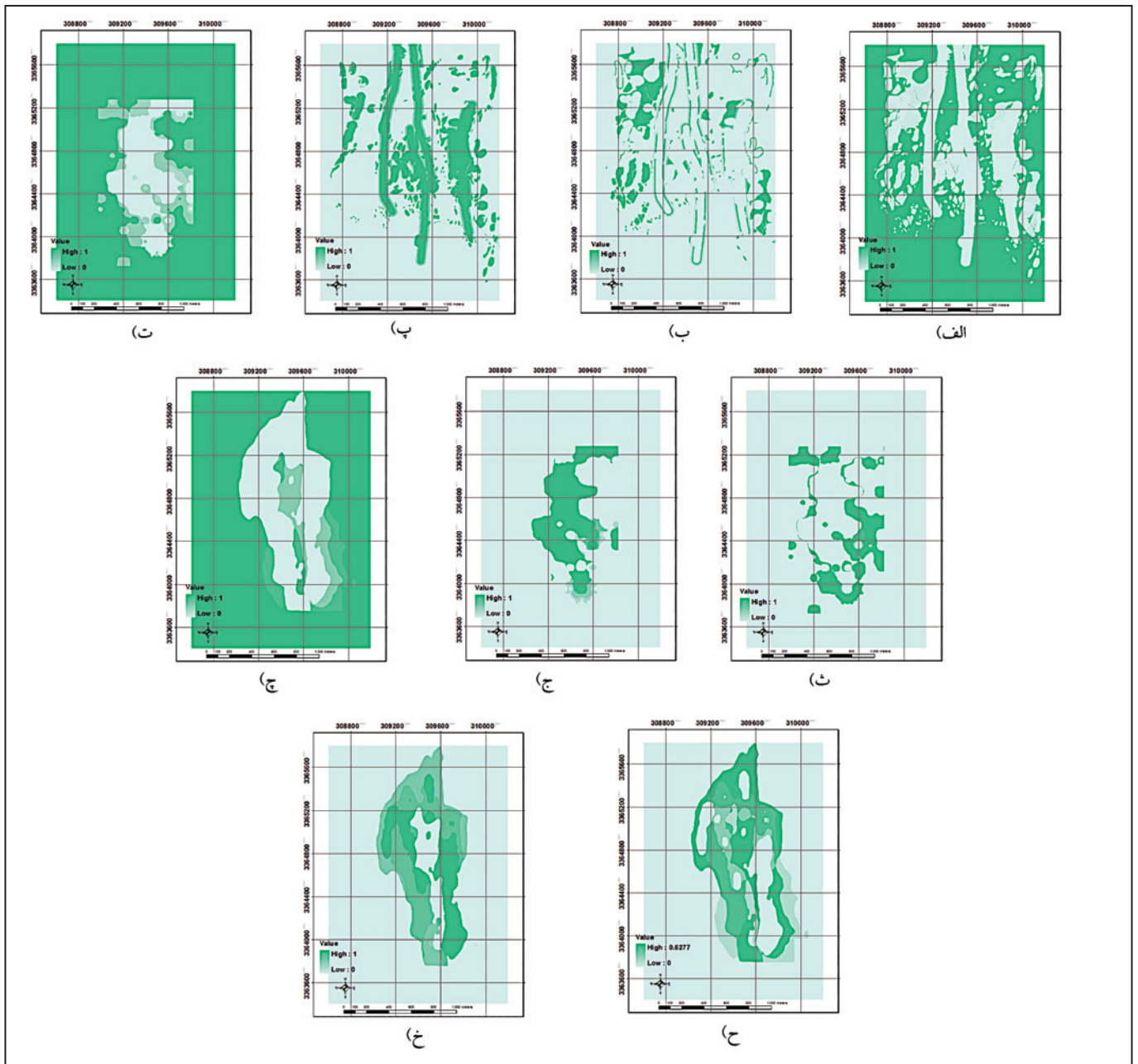


شکل ۷- نقشه های عامل رده بندی شده به روش Quantile؛ الف) عامل زمین شناسی؛ ب) عامل ژئوشیمی؛ ج) عامل ژئوفیزیکی.

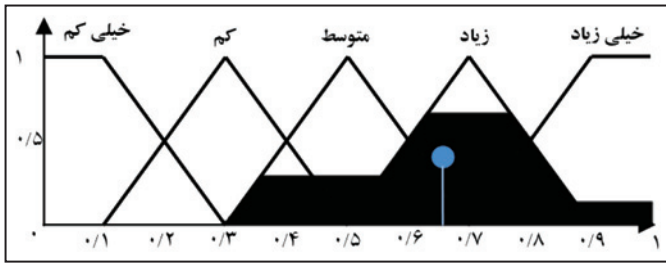




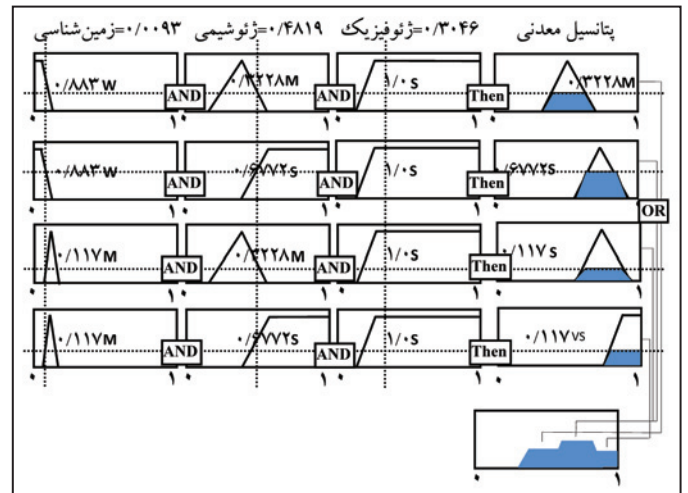
شکل ۸- توابع عضویت خروجی (پتانسیل معدنی).



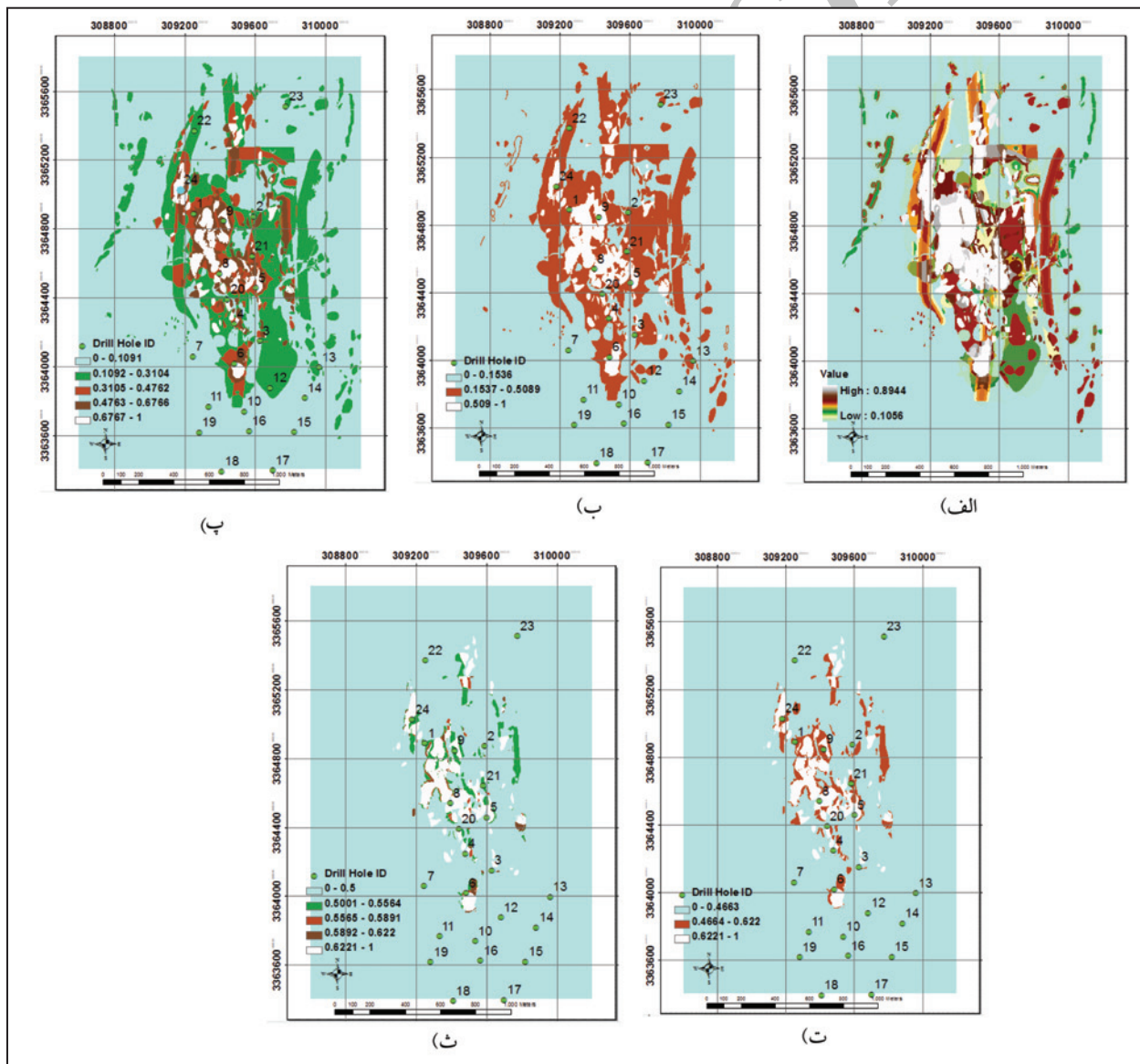
شکل ۹- نقشه عامل مناطق دارای الف) پتانسیل ضعیف زمین شناسی؛ ب) پتانسیل متوسط زمین شناسی؛ پ) پتانسیل قوی زمین شناسی، ت) پتانسیل ضعیف ژئوشیمی، ث) پتانسیل متوسط ژئوشیمی؛ ج) پتانسیل قوی ژئوشیمی؛ چ) پتانسیل ضعیف ژئوفیزیکی، ح) پتانسیل متوسط ژئوفیزیکی؛ خ) پتانسیل قوی ژئوفیزیکی.



شکل ۱۱- چگونگی محاسبه پتانسیل معدنی با استفاده از روش مرکز ثقل.



شکل ۱۰- چگونگی تعیین پتانسیل معدنی یک پیکسل به کمک سامانه استنتاجگر فازی ممدانی.



شکل ۱۲- الف) نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی و انطباق گمانه‌های اکتشافی با نقشه پتانسیل معدنی رده‌بندی شده با روش‌های (ب) Jenk سرده‌ای؛ (پ) Jenk پنج‌رده‌ای؛ (ت) Manual سرده‌ای و (ث) Manual پنج‌رده‌ای.

جدول ۱- عوامل مؤثر در وزن دهی و پردازش نقشه های عامل اندیس چاه فیروزه (بر گرفته از پژوهش عادل و همکاران، ۱۳۸۸).

وزن اولیه		پردازش و وزن دهی نقشه عامل	عوامل مؤثر در وزن دهی عامل	نقشه فاکتور
داسیت پورفیری	۰/۸	Buffering, Classification, Overlay and Union	داسیت پورفیری دگرشان شده پهنه منشأ حرارت است و سنگ میزبان در نظر گرفته می شود. سنگ های آتشفشانی که توده داسیت پورفیری در آنها نفوذ کرده، است سنگ دیواره در نظر گرفته می شوند. سنگ های دیواره به تنهایی در کانی سازی نقشه نداشته اند و با توجه به همبری داشتن با داسیت پورفیری، تنها در مجاورت با داسیت امکان کانی سازی افزایش می یابد.	پهنه منشأ حرارت و سنگ میزبان (Rek)
بافر ۵ متری	۰/۶			
بافر ۱۰ متری	۰/۴۵			
بافر ۱۵ متری	۰/۳			
بافر ۲۰ متری	۰/۲			
بافر ۲۵ متری	۰/۱			
بافر ۳۰ متری	۰/۰۵	Buffering and Classification	گسل های اصلی منطقه در راستای شمالی - جنوبی و شمال باختری - جنوب خاوری هستند. ارتباط تنگاتنگی میان گسل های اصلی منطقه و کانی سازی در کانسار چاه فیروزه (که در راستای شمالی - جنوبی است) وجود دارد. ارتباط معناداری میان گسل های فرعی منطقه و کانی سازی وجود ندارد.	گسل های اصلی (Fit)
بافر ۱۵ متری	۰/۷			
بافر ۳۰ متری	۰/۶			
بافر ۴۵ متری	۰/۳			
بافر ۶۰ متری	۰/۱			
بافر ۷۵ متری	۰/۰۵			
پتلسیک	۰/۹	Classification	دگرسانی های با اهمیت در منطقه، پتاسیک، فلیک و پروپیلیتی هستند. دگرسانی ها در بخش مرکزی شدید هستند و با فاصله گرفتن از مرکز ضعیف می شوند. دگرسانی های فلیک و پتاسیک در مرکز و دگرسانی پروپیلیتی در حاشیه منطقه است.	دگرسانی (Alt)
فلیک شدید	۰/۷			
فلیک ضعیف	۰/۳۵			
پروپیلیتی شدید	۰/۲			
پروپیلیتی ضعیف	۰/۲			
بافر ۱۵ متری	۰/۹			
بافر ۳۰ متری	۰/۷	Buffering and Classification	در ۲ نقطه از محدوده نشانه های کانی سازی دیده شده است. در نقطه اول که در نزدیکی معدن مترو که چاه فیروزه قرار دارد، کالکوپیریت، پیریت، مالاکیت و آزوریت و در نقطه دوم مالاکیت و آزوریت دیده می شود.	نشانه های کانی سازی (Mn)
بافر ۴۵ متری	۰/۵			
بافر ۶۰ متری	۰/۲			
بافر ۶۰ متری	۰/۲			
بی هنجاری قطعی	۰/۸۵	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۱۵۰ تا ۴۵۰ ppm تا ۱۳۵۰ ppm و مقادیر بیشتر از ۱۳۵۰ ppm به ترتیب به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی وزن دهی شدند.)	در مطالعات ژئوشیمی، عنصر مس به عنوان یکی از عوامل مؤثر شناخته شد.	عیار مس (Cu)
بی هنجاری احتمالی	۰/۷۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۳			
بی هنجاری قطعی	۰/۷	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۲ تا ۳ ppm تا ۵ ppm و مقادیر بیشتر از ۵ ppm به ترتیب به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی تعیین و وزن دهی شدند.)	در مطالعات ژئوشیمی، عنصر مولیبدن به عنوان عنصری که همبستگی بالایی با عنصر مس دارد، شناخته شده است.	عیار مولیبدن (Mo)
بی هنجاری احتمالی	۰/۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۲			
بی هنجاری قطعی	۰/۷	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۳۱ تا ۲۲ ppb تا ۲۲ ppb و مقادیر بیشتر از ۴۰ ppb به ترتیب به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی تعیین و وزن دهی شدند.)	در مطالعات ژئوشیمی، عنصر طلا به عنوان عنصری که همبستگی بالایی با عنصر مس دارد، شناخته شده است.	عیار طلا (Au)
بی هنجاری احتمالی	۰/۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۲			
ارزش هر پیکسل	بازه [۰/۱۰۰/۹]	Normalization (پس از تهیه نقشه اندیس ادیتو مس و مولیبدن به صورت رستری، این نقشه فاکتور به فاصله [۰/۱۰۰/۹] عادی و این اعداد به عنوان وزن در نظر گرفته می شود)	بی هنجاری اندیس ادیتو عنصر مس و مولیبدن با رابطه زیر به دست می آید: $CuZ + MoZ = \frac{Ln(Cu) - Ln(Cu)}{\sigma_{Ln(Cu)}} + \frac{Ln(Mo) - Ln(Mo)}{\sigma_{Ln(Mo)}} \quad (4)$ در رابطه بالا $Mo, Cu, Ln(Cu), Ln(Mo), \sigma(Ln(Cu)), \sigma(Ln(Mo))$ میانگین نپری مس و مولیبدن و انحراف معیار لگاریتم نپری مس و مولیبدن است.	اندیس ادیتو مس و مولیبدن (Adt)
بی هنجاری قطعی	۰/۷۵	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۳۵ تا ۴۵ mv/v تا ۴۵ mv/v و مقادیر بیشتر از ۵۰ mv/v به ترتیب به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی تعیین و وزن دهی شدند.)	با توجه به ویژگی های ژئوفیزیک، این عامل مؤثر شناخته شده است.	شارژ ابلتته (Charg)
بی هنجاری احتمالی	۰/۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۲			
بی هنجاری قطعی	۰/۲۵	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۵۰ ohm.m تا ۲۵ ohm.m و مقادیر کمتر از ۲۵ ohm.m به ترتیب به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی تعیین شدند.)	با توجه به ویژگی های ژئوفیزیک، این عامل مؤثر شناخته شده است.	مقاومت ظاهری (Rs)
بی هنجاری احتمالی	۰/۱۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۰۵			
بی هنجاری قطعی	۰/۸	Classification (مقادیر موجود میان پرندهای ۵۵۰۰ mhos/m تا ۴۰۰۰ mhos/m و مقادیر بیشتر از ۵۵۰۰ mhos/m به عنوان بی هنجاری ممکن، احتمالی و قطعی تعیین شدند.)	نقشه عامل فلزی نقاط با رابطه زیر تعیین می شود: $F = 2000 \times \left( \frac{Charg}{Rs} \right) \quad (5)$ $Rs, F, Charg$ عامل فلزی، مقاومت ظاهری و شارژ ابلتته در نقاط برداشت ژئوالکتریک هستند.	فاکتور فلزی (MF)
بی هنجاری احتمالی	۰/۵۵			
بی هنجاری ممکن	۰/۲۵			

جدول ۲- متغیرهای توابع عضویت برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی اندیس چاه‌فیروزه.

متغیرهای توابع عضویت دوزنقته‌ای	درصد از مساحت کل نقشه	رده‌های انتخابی در رده‌بندی Quantile
[۰/۰۲۲۶، ۰/۰۳۵، ۱، ۱]	٪۲۰	۹ و ۱۰
[۰/۰۰۷۵، ۰/۰۲۲۶، ۰/۰۰۲۲۶/۰۳۵]	٪۵۰	۴ و ۵، ۶، ۷، ۸
[۰، ۰، ۰/۰۰۷۵، ۰/۰۲۲۶]	٪۳۰	۱ و ۲، ۳
[۰/۳۸۵۴، ۰/۵۲۷۹، ۱، ۱]	٪۱۰	۱۰
[۰/۱۸۹۳، ۰/۳۸۵۴، ۰/۰۳۸۵۴/۵۲۷۹]	٪۶۰	۴ و ۵، ۶، ۷، ۸، ۹
[۰، ۰، ۰/۱۸۹۳، ۰/۳۸۵۴]	٪۳۰	۱ و ۲، ۳
[۰/۰۹۵۹، ۰/۲۲۶۶، ۱، ۱]	٪۱۰	۱۰
[۰/۰، ۰/۲۲۶۶/۰، ۰۹۵۹/۰، ۰۹۵۹/۲۲۶۶]	٪۶۰	۴ و ۵، ۶، ۷، ۸، ۹
[۰، ۰، ۰/۰۲۲۶۶، ۰/۰۹۵۹]	٪۳۰	۱ و ۲، ۳

جدول ۳- نمونه‌ای از قواعد «اگر-آنگاه» فازی برای پتانسیل معدنی اندیس مس چاه‌فیروزه.

پتانسیل معدنی	ژئوفیزیک	ژئوشیمی	زمین‌شناسی	شماره قانون
متوسط	قوی	متوسط	ضعیف	۱
زیاد	قوی	قوی	ضعیف	۲
زیاد	قوی	متوسط	متوسط	۳
خیلی زیاد	قوی	قوی	متوسط	۴

جدول ۴- ارزیابی میزان تطابق گمانه‌های اکتشافی با نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از روش‌های سه و پنج رده‌ای Jenk و Manual

شماره گمانه	وزن گمانه	سه رده‌ای					پنج رده‌ای				
		Jenk		Manual		Jenk		Manual			
		وضعیت	ارزیابی	وضعیت	ارزیابی	وضعیت	ارزیابی	وضعیت	ارزیابی		
۱	۰/۴۰۴۵	۲	۲	۰	۱	-۱	۲	۳	-۱	۱	-۱
۲	۰/۲۷۴۴	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۲	-۱	۱	۰
۳	۰/۰۹۰۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۴	۰/۴۰۴۵	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۳	-۲	۱	۰
۵	۰/۴۶۶۳	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۳	-۲	۱	۰
۶	۰/۶۲۲۱	۳	۳	۰	۳	۰	۵	۴	-۱	۵	۰
۷	۰	۳	۱	-۲	۱	-۲	۴	۱	-۳	۱	-۳
۸	۰/۴۱۸	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۳	-۲	۱	۰
۹	۰/۵۵۶۳	۱	۳	-۲	۲	-۱	۱	۴	-۳	۲	-۱
۱۰	۰	۳	۱	-۲	۱	-۲	۴	۱	-۳	۱	-۳
۱۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۲	۰/۱۴۶۶	۲	۱	-۱	۱	-۱	۳	۲	-۱	۱	-۲
۱۳	۰/۲۴۶۴	۲	۲	۰	۱	-۱	۳	۲	-۱	۱	-۲
۱۴	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۵	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۲	۱	-۱	۱	-۱
۱۶	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۷	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۸	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۱۹	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰
۲۰	۰/۲۴۶۴	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۲	-۱	۱	۰
۲۱	۰/۵	۱	۲	-۱	۲	-۱	۱	۴	-۳	۲	-۱
۲۲	۰/۲۴۶۵	۱	۲	-۱	۱	۰	۱	۲	-۱	۱	۰
۲۳	۰	۲	۱	-۱	۱	-۱	۳	۱	-۲	۱	-۲
۲۴	۰/۵	۱	۲	-۱	۲	-۱	۱	۴	-۳	۲	-۱
				-۱۶		-۱۱			-۳۱		-۱۷
میزان تطابق				٪۶۳/۶۴		٪۷۵			٪۶۳/۹۵		٪۸۰/۲۳

## کتابنگاری

- اسکویی، ر.، ۱۳۸۴- مطالعات ژئوفیزیکی در محدوده چاه فیروزه، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشاف و مهندسی توسعه، شرکت صمان کاو.
- اصفهان پور، ر.، تقی زاده، ح.، ایرانمنش، م. و خراسانی، ک.، ۱۳۸۴- اکتشافات ژئوشیمیایی به روش Soil Sampling در منطقه چاه فیروزه، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشاف و مهندسی توسعه.
- پرهیز کار، آ. و غفاری گیلاونده، آ.، ۱۳۸۶- ترجمه کتاب سیستم اطلاعات جغرافیایی و تحلیل تصمیم چند معیاری نوشته یاچک مالچفسکی، انتشارات سمت.
- حاج ملاعلی، ا.، ۱۳۸۵- گزارش نهایی مطالعات زمین شناسی و آلتراسیون محدوده چاه فیروزه در مقیاس ۱:۱۰۰۰، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشاف و مهندسی توسعه، مهندسین مشاور کان ایران.
- عادلی سرچشمه، ا.، کریمی، م.، بحرودی، ع. و الیاسی، غ.، ۱۳۸۸- تهیه تعیین نقاط حفاری اندیس مس چاه فیروزه با استفاده از منطق فازی در محیط GIS، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۵، شماره ۲، صفحات ۸۵ الی ۹۷.
- کاظمی مهرنیا، ا.، علیرضایی، س. و رسا، ا.، ۱۳۸۵- خصوصیات زمین شناسی، دگرسانی و ژئوشیمیایی و بررسی نوع پوشش شسته شده (LeachedCap) کانسار پور فیروزه چاه فیروزه (شمال باختری کمر بند کرمان)، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
- کریمی، م.، مسگری، م. س. و شریفی، م. ع.، ۱۳۸۸- مدل سازی توان اکولوژیکی سرزمین، با استفاده از منطق فازی (منطقه مورد مطالعه: شهرستان برخوار و میمه)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، شماره ۱، صفحات ۱۷ تا ۳۸.
- الماسی، ع.، ۱۳۸۶- نتایج حفاری های صورت گرفته در منطقه چاه فیروزه، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشاف و مهندسی توسعه، شرکت پارس اولنگ.
- منهاج، م.، ۱۳۸۸- محاسبات فازی: هوش مصنوعی، ویرایش اول، انتشارات دانه نگار ۶۴۰ ص.

## References

- Abedi, M., Torabi, A., Norouzi, Gh. N., Hamzeh, M. & Elyasi, Gh. R., 2011- PROMETHEE II: A knowledge-driven method for copper exploration, *Computer & Geosciences*, pp.1-9.
- Agterberg, F. & Bonham-Carter, G., 1999- Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration. *Proceedings of the 28th International Symposium on Applications of Computer in the Mineral Industry (APCOM)*, Golden, Colorado, pp. 483-490.
- An, P., Moon, W. & Bonham-Carter, G., 1992- On knowledge-based approach on integrating, remote sensing, geophysical and geological information. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1992. pp. 34-38.
- An, P., Moon, W. & Bonham-Carter, G., 1994- An object-oriented knowledge representation structure for exploration data integration, *Nonrenewable Resources*, 3: 132-145.
- An, P., Moon, W. & Rencz, A., 1991- Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27: 1-11.
- Bonham-Carter, G., 1994- *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Ontario, Canada. 398 p.
- Bonham-Carter, G., Agterberg, F. & Wright, D., 1989- Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, *Statistical applications in the Earth Sciences*, Geological Survey of Canada Paper, 89-9: 171-183.
- Carranza, E. & Hale, M., 2002- Wildcat mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section B—Applied Earth Science)* 111:100-105.
- Carranza, E. M. & Hale, M., 2003- Evidential belief functions for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines, *Ore Geology. Rev.* 22: 117-132.
- Carranza, E. M., Ruitenbeek, F. A., Hecker, C., Meijde, M. V. & Meer, F. D., 2008- Knowledge-guided data-driven evidential belief modeling of mineral prospectivity in Cabo de gata, SE Spain, *International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation*, 10:374-387.
- Carranza, E. M., Woldai, T. & Chikambwe, E. M., 2005- Application of Data\_Driven Evidential Belief Functions to Prospectivity Mapping for Aquamarinr-Bearing Pegmatites, Lundazi District, Zambia, *Natural Resources Research*, Vol.14(1):47-63.
- Carranza, E., 2008- Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, vol. 11, Elsevier, Amsterdam, 351 p.
- Carranza, E., 2010- Improved wildcat modelling of mineral prospectivity, *Resource Geology*, 60: 129-149.
- Cheng, Q. & Agterberg, F., 1999- Fuzzy weights of evidence and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8: 27-35.
- Huang, S. J. & Chiu, N. H., 2009- Applying fuzzy neural network to estimate software development effort. *Applied Intelligence*, 30(2): 73-83.
- Karimi, M., Menhaj, M. & Mesgari, M., 2008- Mineral potential mapping of copper minearls using fuzzy logic in GIS invironment, Beijing, China: ISPRS 2008.
- Moon, W., 1990- Integration of geophysical and geological data using evidential belief function. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 711-720.

- Oh, H. & Lee, S., 2008- Regional Probabilistic and statistical mineral potential mapping of gold-silver deposit using GIS in the Gangreung area, Korea, *Resource Geology*, 58: 171-178.
- Porwal, A., Carranza, E. & Hale, M., 2003- Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India, *Natural Resources Research*, 12: 156-171.
- Porwal, A., Carranza, E. M. & Hale, M., 2004- A Hybrid Neuro-Fuzzy Model for Mineral Potential Mapping, *Mathematical Geology*, 36 (7): 803-825.
- Porwal, A., Carranza, E. & Hale, M., 2006- A Hybrid fuzzy weight-of-evidence model for mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 15: 1-14.
- Porwal, A., Gonzalez-Alvarez, I. M., McCuaig, T. & Mamuse, A., 2010- Weights of evidence and logistic regression modeling of magmatic nickel sulfide prospectivity in the Yilgarn Craton, Western Australia, *Ore Geology Reviews*, 38: 184-196.
- Stefanakis, E., Vazirgiannis, M. & Sellis, T., 1996- Incorporating fuzzy logic methodologies into GIS operations, *Proceedings of the 1st International Conference on Geographic Information Systems in Urban, Regional and Environmental Planning*, Samos, Greece, pp. 61-68.
- Tang, X., 2004- Spatial object modeling in fuzzy topological spaces, with Applications to Land Cover Change, *International institute for geo information science and earth observation enschede*, The Netherlands, 2004.
- Zuo, R. & Carranza, E., 2010- Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity, *Computers & Geosciences*, (2010) IN PRESS, pp. 1-9.
- Zuo, R., Cheng, Q. & Agterberg, F., 2009- Application of a hybrid method combining multilevel fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity, *Ore Geology Reviews*, 35: 101-108.

Archive of SID

# Modeling Process of Mineral Potential Mapping Using Fuzzy Inference Systems (Case Study: Chah Firoozeh Copper Deposit)

S. Alaei Moghadam <sup>1\*</sup>, M. Karimi <sup>2</sup>, M. S. Mesgari <sup>3</sup> & N. Saheb Zamani <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph. D. Student, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Geodesy & Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology (KNTU), Tehran, Iran

<sup>4</sup> M.Sc., Pars Asia Mining Company, Tehran, Iran

Received: 2011 December 04

Accepted: 2012 June 25

## Abstract

Due to the extensive areas of potential mineral reserves in the country, it seems necessary to have a systematic approach to identify and convert indices of mineral deposits into mines. Existing various conceptual models of mineral deposits, variety of both quantitative and qualitative data to explore mineral deposits and the expertise and different interests, cause the mineral potential mapping process to be very complicated. So far, various methods such as the overlap index, fuzzy logic, neural networks and weights of evidence are used for modeling this complexity. Consideration the fuzzy nature of mineral exploration in the process of modeling exploratory data, applying expert knowledge and flexibility for all types of mineral deposits in the form of an integrated system is essential. Compared with other methods fuzzy inference system has stated characteristics. To verify this, in this study, a fuzzy inference system for modeling mineral potential was proposed and for the Chah Firoozeh copper deposit was implemented. The main stages of this research include fuzzifying factor maps using the appropriate membership functions and linguistic variables, combining factor maps using fuzzy inference (by creating if\_then fuzzy rules database and using an appropriate decision-making model) and generating mineral potential map with defuzzification output. In the resulted mineral potential map, porphyry copper mineralization prone area is located in the central regions with north-south extension. For evaluation, 24 exploration boreholes in the area are complying with the mineral potential map. Based on the four classification types of mineral potential map, the compliance rate was calculated as 63.64%, 75%, 63.95% and 80.23%. Obtained mineral potential map is more accurate in the very low potential areas and 81.52% of the holes with very low state are located properly. In addition, resulted mineral potential map was compared with the mineral potential map generated using only fuzzy operators and without fuzzifying factor maps. The comparison shows that the mineral potential map that was generated using fuzzy inference system, in four classifications used in this study has 6% greater compliance with the exploration boreholes in average.

**Keywords:** Mineral Potential Mapping, GIS, Fuzzy Inference System, Porphyry Copper Deposit, Chah Firoozeh

For Persian Version see pages 53 to 66

\*Corresponding author: S. Alaei Moghadam; E-mail: s.alaei@mail.kntu.ac.ir