



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال پنجم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۲
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.5, No.4, Winter 2014

۱-۲۲

مدل سازی اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از سیستم های استنتاج گر و روابط فازی

ساناز علایی مقدم^{۱*}، محمد کریمی^۲، محمد سعیدی مسگری^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد GIS، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲. استادیار گروه GIS، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳. دانشیار گروه GIS، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۴/۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۸

چکیده

فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی به دلیل وجود فاکتورهای متعدد کانی سازی، داده های متنوع کمی و کیفی اکتشافی و همچنین دیدگاه های کارشناسی و سلاقی گوناگون، فرایندی پیچیده و دشوار است. در این فرایند توجه هم زمان به مدل سازی ماهیت غیرقطعی داده های اکتشافی، به کارگیری دانش کارشناسی و انعطاف پذیری روش برای انواع ذخایر معدنی در قالب سامانه ای یکپارچه، ضروری است. در پژوهش حاضر، روشی جدید با استفاده از سیستم استنتاج گر و روابط فازی ارائه شد و در اندیس مس چاه فیروز پیاده سازی گردید. این روش در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله نخست، نقشه های فاکتور اولیه با استفاده از روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی وزن دهی و به روش ارزیابی جامع چندسطحی فازی با یکدیگر تلفیق شدند و نقشه های فاکتور سطح دوم - که فازی هستند - به دست آمد. در مرحله دوم، نقشه های فاکتور تهیه شده در مرحله قبل با استفاده از سیستم استنتاج گر فازی تلفیق و نقشه پتانسیل معدنی تهیه شد. در نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده، مناطق مستعد کانی سازی مس پورفیری در نواحی مرکزی و با گسترش شمالی - جنوبی شناسایی شدند. به منظور ارزیابی، وضعیت گمانه های اکتشافی موجود در منطقه با نقشه پتانسیل معدنی انطباق داده شدند. بیشترین میزان تطابق در نقشه پتانسیل معدنی برابر با ۸۳/۳۳ درصد به دست آمد.

کلیدواژه ها: نقشه پتانسیل معدنی، GIS، سیستم استنتاج گر فازی، ذخیره معدنی مس پورفیری، چاه فیروزه.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان ولی عصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشکده نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تلفن: ۰۹۱۲۳۴۲۳۸۸۰

۱- مقدمه

تهیه نقشه پتانسیل معدنی از موضوعات تصمیم‌گیری چندمعیاری مکانی است و کارشناسان اکتشاف معدن متناسب با مقیاس مطالعه از معیارهای مختلفی برای این منظور استفاده می‌کنند (Bonham-Carter, 1994). مراحل اصلی تهیه نقشه پتانسیل معدنی اینهاست: تعیین فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی، آماده‌سازی اطلاعات، تهیه نقشه‌های فاکتور، تلفیق نقشه‌ها، و ارزیابی نتایج (Karimi et al., 2008).

در فرایند اکتشاف ذخایر معدنی، داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و حفاری در مقیاس‌های مختلف، با روش‌ها و دقت‌های متفاوت به صورت کمی و کیفی تولید می‌شوند. بررسی محتوای داده‌ها نشان می‌دهد که اصول فیزیکی و شیمیایی حاکم بر تشکیل انباشته‌های معدنی در بیشتر موارد آن قدر پیچیده است که نمی‌توان از یک نظریه ریاضی برای مدل‌سازی آنها استفاده کرد. از این رو تعیین مدل مفهومی اکتشاف ذخایر معدنی فرایندی دشوار است. در فرایند تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک دانش کارشناسی که معمولاً در قالب مقادیر کیفی یا متغیرهای زبانی ارائه می‌گردد، نقش مهمی ایفا می‌کند. کار با داده‌های متنوع کیفی و کمی و لزوم استفاده از دانش کارشناسی، فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی را پیچیده و مدل‌سازی آن را دشوار می‌گرداند.

منطق فازی به صورت‌های گوناگونی اعم از عملگرها و روابط و سیستم‌های فازی برای نگاشت ذخایر معدنی استفاده می‌شود. اغلب پژوهشگران به دنبال یافتن شبکه استنتاجی مناسبی برای تلفیق نقشه‌های فاکتور با استفاده از عملگرهای فازی بوده‌اند (Karimi et al., 2008; An et al., 1991; Porwal et al., 2003; Bonham-Carter, 1994; Carranza and Hale, 2001; Adeli et al., 2009). زوو و همکاران (۲۰۰۹) از روابط فازی در قالب روش آنالیز رابطه نامتقارن و ارزیابی جامع چندسطحی فازی برای تلفیق نقشه‌های فاکتور استفاده کردند. پوروال و همکاران (۲۰۰۴) سیستم

استنتاج‌گر فازی^۱ سوگنو ساده‌ای را با دو ورودی و دو تابع عضویت فازی برای هر ورودی در مدل شبکه عصبی - فازی، به منظور نگاشت ذخایر معدنی به کار گرفتند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این مدل‌ها توانایی مدل‌سازی کامل ماهیت غیرقطعی انباشته‌های معدنی را به منظور انعکاس دقیق‌تر روابط پیچیده موجود بین نقشه‌های فاکتور و ذخیره معدنی در قالب سامانه‌ای یکپارچه و منسجم ندارند. از این رو در تحقیق حاضر از سیستم استنتاج‌گر فازی ممدانی در قالب مدلی مستقل برای مدل‌سازی صحیح ابهام دانش کارشناسی و پیچیدگی‌های موجود در مراحل گوناگون فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده شده است.

در این تحقیق مدلی براساس روابط فازی و سیستم استنتاج‌گر فازی شرح و بسط داده می‌شود، که در آن نقشه‌های فاکتور در دو مرحله با یکدیگر تلفیق می‌شوند. در مرحله نخست، نقشه‌های فاکتور با استفاده از روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی وزن‌دهی و روش ارزیابی جامع چندسطحی فازی تلفیق شدند و نقشه‌های فاکتور فازی زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تهیه شدند. این نقشه‌های فاکتور در مرحله دوم در سیستم استنتاج‌گر فازی با یکدیگر تلفیق شدند. از آنجا که نقشه‌های فاکتور تولیدشده در مرحله نخست فازی هستند، در سیستم استنتاج‌گر فازی، مرحله فازی‌سازی انجام نمی‌شود.

امروزه پیاده‌سازی روش‌های مدل‌سازی ذخایر معدنی، همواره در محیط GIS (سامانه اطلاعات جغرافیایی) صورت می‌گیرد (Carranza, 2008; Carranza, 2010)، زیرا GIS امکان اخذ، ذخیره، بازیابی، بهنگام‌سازی، نمایش، پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌های متنوع و حجیم مکان‌مرجع مرتبط با فعالیت‌های اکتشاف معدن را فراهم می‌آورد.

در ادامه ابتدا مبانی نظری تئوری فازی استفاده‌شده در این تحقیق شامل روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی و

1. Fuzzy Inference Systems

نامتقارن فازی شرح داده می‌شود و در بخش ۴-۱ از این روش برای وزن‌دهی به نقشه‌های فاکتور استفاده می‌شود. در ادامه، برخی تعاریف مربوط به روابط فازی برای بیان روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی ارائه می‌گردد.

در مجموعه $E = \{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ شامل k متغیر، رابطه فازی به صورت‌هایی که در ادامه می‌آید، تعریف می‌شود (Kaufmann, 1975; Zimmermann, 1991).

تعریف ۱-۱ $R(x, y)$ رابطه فازی نامیده می‌شود، اگر به ازای هر x و y متعلق به E ، یک مقدار R که بیان‌گر میزان ارتباط x و y است با شرایط زیر وجود داشته باشد:

$$(1) \quad 0 \leq R(x, y) \leq 1; \text{ هر چه مقدار } R \text{ بزرگ‌تر}$$

باشد، رابطه قوی‌تری بین دو متغیر برقرار است.

(۲) اگر x و y دارای قوی‌ترین رابطه باشند،
 $R(x, y) = 1$

(۳) اگر x و y دارای ضعیف‌ترین رابطه باشند،
 $R(x, y) = 0$

تعریف ۲-۲ $S(x, y)$ رابطه ترتیبی فازی نامیده می‌شود، اگر به ازای هر x, y و z متعلق به E روابط زیر برقرار باشد:

$$1 - S(x, x) = 0 \quad \text{و}$$

$$2 - S(x, z) \geq \min \{S(x, y), S(y, z)\}$$

رابطه فوق بیان می‌کند که وابستگی مستقیم، رابطه چیره بین دو متغیر است.

تعریف ۳-۳ $T(x, y)$ رابطه نامتقارن کامل فازی است اگر:

$$\forall x, y \in E, x \neq y \text{ if } T(x, y) > 0 \text{ then}$$

$$T(y, x) = 0$$

تعریف ۴-۴ $U(x, y)$ رابطه ترتیبی جزئی فازی^۱ است، اگر U رابطه ترتیبی نامتقارن کامل فازی باشد. در این صورت متغیرها فقط براساس رابطه مستقیم و

ارزیابی چندسطحی فازی و مبانی سیستم‌های استنتاج‌گر فازی بیان می‌گردد. در بخش سوم، ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیکی منطقه مطالعه‌شده ارائه می‌گردد. در بخش چهارم، مراحل مختلف تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از مدل آنالیز رابطه نامتقارن فازی و ارزیابی چندسطحی فازی و سیستم استنتاج‌گر فازی در محیط GIS بیان می‌گردد. در قسمت نتایج، میزان تطابق نقشه پتانسیل معدنی به‌دست‌آمده با گمانه‌های اکتشافی، ارزیابی می‌شود. در نهایت روش به‌کار گرفته‌شده و نتایج آن به بحث و بررسی گذاشته می‌شود.

۲- مبانی نظری تئوری فازی

در تئوری فازی برخلاف روش‌های کلاسیک، مرزهای مجموعه‌ها صریح و شفاف نیستند. در مجموعه‌های فازی، برخی اعضا یا تمامی آنها فاقد عضویت مشخص‌اند و عضویت صرفاً به‌صورت اعدادی بین صفر و یک بیان می‌شود. در این بخش مبانی نظری دو روش فازی استفاده‌شده در این تحقیق به‌منظور تلفیق نقشه‌های فاکتور ارائه می‌گردد.

۲-۱- روابط فازی

ضرب کاتزین $A \times B$ مجموعه تمام ترکیب‌های ممکن اعضای A و B است. در مجموعه‌های قطعی، رابطه R ، مجموعه‌ای از زوج‌های مرتب $(a, b) \in A \times B$ است و تعلق یا عدم‌تعلق زوج‌های مرتب (a, b) به ترتیب به‌صورت « a به b ارتباط دارد» یا « a به b ارتباط ندارد» بیان می‌شود. رابطه فازی بین مجموعه A و مجموعه B ، زیرمجموعه فازی از ضرب کاتزین $A \times B$ است، و a می‌تواند به اندازه مثلاً 0.7 با b ارتباط داشته باشد.

عملیات گوناگونی روی روابط فازی انجام می‌شوند. انواع روابط فازی، عملگرهایی که روی روابط فازی عمل می‌کنند، و انواع محاسبات مربوط به روابط فازی را می‌توان در منابع مرتبط مانند منهاج (۲۰۰۸) و کلیر و یوان (۲۰۰۷) یافت. در این بخش تئوری آنالیز رابطه

1. Fuzzy partial order

احتمال، احتمال شرطی یا توابع عضویت فازی مدل می‌کند، و شامل چهار مرحله به شرح زیر است (Zou et al., 2009):

۱- ماتریس ارتباط متقارن فازی برای نشان دادن ارتباط مستقیم بین متغیرها ساخته می‌شود. برای مثال چنانچه در سطح دوم سه متغیر I_1 ، I_2 و I_3 وجود داشته باشد و زیرمتغیرهای هر کدام از متغیرها همانند جدول ۱ باشد، ماتریس متقارن فازی بین هر دو متغیر سطح دوم تشکیل می‌شود. برای مثال، ماتریس رابطه متقارن فازی بین دو متغیر I_1 و I_2 همانند جدول ۲ بیان می‌گردد، که در آن e_{ij} تعداد دفعاتی است که دو زیرمتغیر X_i و X_j در مکان گمانه‌های اکتشافی با یکدیگر اتفاق افتاده باشند.

رابطه غلبه رتبه‌بندی می‌شوند و وزن نسبی متغیرها همانند تعریف ۵ به دست می‌آید.

تعریف ۵- اگر $U(x,y)$ رابطه ترتیبی جزئی فازی

باشد، وزن هر متغیر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d(x) = \max U(x,z) - \min U(y,x)$$

$$-1 \leq d(x) \leq 1$$

۲-۱-۱- آنالیز رابطه نامتقارن فازی

رابطه نامتقارن بین متغیرها، جهان واقعی را دقیق‌تر مدل می‌کند. اگر ارتباط بین دو متغیر X_i و X_j را نشان دهد، چنانچه $a_{ij} = a_{ji}$ باشد یعنی ارتباط دو متغیر متقارن و اگر $a_{ij} \neq a_{ji}$ یعنی ارتباط نامتقارن است. روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی، ارتباط نامتقارن بین متغیرها را به کمک ضرایب همبستگی، کوواریانس،

جدول ۱. متغیرهای سطح اول و دوم برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی

نقشه‌های فاکتور سطح دوم	نقشه‌های فاکتور سطح اول
I_1	X1 (زون منشأ حرارت و سنگ میزبان)
(زمین‌شناسی)	X2 (گسل‌های اصلی)
	X3 (نشانه‌های معدنی)
	X4 (آلتراسیون)
I_2	X5 (عیار مس)
(ژئوشیمی)	X6 (عیار مولیبدن)
	X7 (عیار طلا)
	X8 (اندیس ادیتو مس و مولیبدن)
I_3	X9 (شارژابیلیته)
(ژئوفیزیک)	X10 (مقاومت ظاهری)
	X11 (فاکتور فلزی)

جدول ۲. ماتریس رابطه متقارن فازی (W) بین دو متغیر I_1 و I_2

	X_0	X_1	X_2	X_3
X_1	e_{15}	e_{16}	e_{17}	e_{18}
X_2	e_{25}	e_{26}	e_{27}	e_{28}
X_3	e_{35}	e_{36}	e_{37}	e_{38}
X_4	e_{45}	e_{46}	e_{47}	e_{48}

$$\bar{R} = R \cup R^1 \cup \dots \cup R^k$$

با به دست آوردن Transitive Closure رابطه نامتقارن فازی، این رابطه به رابطه نامتقارن ترتیبی فازی تبدیل می شود.

قضیه ۲- اگر S یک رابطه نامتقارن ترتیبی فازی باشد، U در رابطه زیر رابطه ترتیبی جزئی فازی را نشان می دهد:

$$U(x, y) = \begin{cases} S(x, y) - S(y, x) & \text{if } S(x, y) > S(y, x) \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

۴- با استفاده از ماتریس رابطه ترتیبی جزئی فازی (U) و تعریف ۵، وزن هر کدام از متغیرها و زیرمتغیرها به دست می آید.

۲-۱-۲- ارزیابی جامع چندسطحی فازی

پس از وزن دهی به متغیرها و زیرمتغیرها، به کمک ارزیابی جامع چندسطحی، نقشه های فاکتور تلفیق می شوند. در این روش ابتدا ماتریس قضاوت فازی R برای زیرمتغیرها تشکیل می شود. ماتریس قضاوت فازی را می توان از توابع عضویت فازی به دست آورد. سپس این ماتریس در بردار وزن $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ (که از روش هایی مختلفی مانند آنالیز رابطه نامتقارن فازی به دست می آید) ضرب می شود و بردار ارزیابی فازی B را برای زیرمتغیر می سازد.

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$B = A.R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad \text{رابطه (۷)}$$

بردار B نتیجه جامع برای هر سطح است، که می تواند برای تشکیل ماتریس قضاوت فازی سطح بالاتر استفاده شود. با تکرار مرحله ضرب ماتریس قضاوت در وزن متغیر در آن سطح، به سطح بالاتر خواهیم رسید.

۲- ماتریس رابطه نامتقارن فازی (V) بین متغیرها ایجاد می گردد و برای تشکیل آن از روابط زیر استفاده می شود:

رابطه (۱)

$$Q_{pq}^y = \frac{n}{(n-1)m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{e_L} \right)^2 - \frac{1}{n-1}$$

رابطه (۲)

$$Q_{qp}^y = \frac{m}{(m-1)^n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{e_{oj}} \right)^2 - \frac{1}{m-1}$$

$$e_{i_0} = \sum_j e_{ij}, \quad e_{o_j} = \sum_i e_{ij} \quad \text{رابطه (۳)}$$

Q_{qp}^y و Q_{pq}^y وابستگی نامتقارن بین دو متغیر p و q، m و n تعداد زیرمتغیرهای دو متغیر p و q است، و i و j زیرمتغیرهای دو متغیر هستند. ماتریس ارتباط نامتقارن فازی بین زیرمتغیرها با کمک روابط (۴) و (۵) به دست می آید:

$$Q_{ij}^y = \left(\frac{e_{ij}}{e_{i_0}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$Q_{ji}^y = \left(\frac{e_{ij}}{e_{o_j}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

Q_{ji}^y و Q_{ij}^y ضرایب incidence مستقیم و غیرمستقیم بین دو متغیر i و j هستند.

۳- رابطه فازی نامتقارنی که با استفاده از روابط (۱)، (۲)، (۴) و (۵) بین متغیرها و زیرمتغیرها تشکیل می شود، رابطه ترتیبی جزئی فازی نیست، در حالی که برای رتبه بندی و وزن دهی به متغیرها می بایست به رابطه ترتیبی جزئی فازی تبدیل شود. با استفاده از دو قضیه ۱ و ۲ می توان هر رابطه فازی نامتقارنی را به رابطه ترتیبی جزئی فازی تبدیل کرد.

قضیه ۱ - Transitive Closure هر ماتریس با استفاده از رابطه زیر به دست می آید:

جدول ۳. وزن متغیرها و زیرمتغیرها

متغیر	I ₁				I ₂				I ₃		
وزن (A ₁)	۰/۴				۰/۳				۰/۳		
زیر متغیر	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
وزن (A ₂)	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲۵

$$B_{21} = A_{22}, R_{23} = (0/3 \quad 0/3 \quad 0/2 \quad 0/2).$$

$$\begin{bmatrix} 0/2 & 0/8 & 0 \\ 0/15 & 0/85 & 0 \\ 0 & 0/45 & 0/55 \\ 0/7 & 0/3 & 0 \end{bmatrix} = (0/245 \quad 0/645 \quad 0/11)$$

پیکسل مورد نظر به میزان ۲۴/۵ درصد دارای پتانسیل زمین‌شناسی ضعیف، ۶۴/۵ درصد پتانسیل زمین‌شناسی متوسط و ۱۱ درصد پتانسیل زمین‌شناسی قوی است.

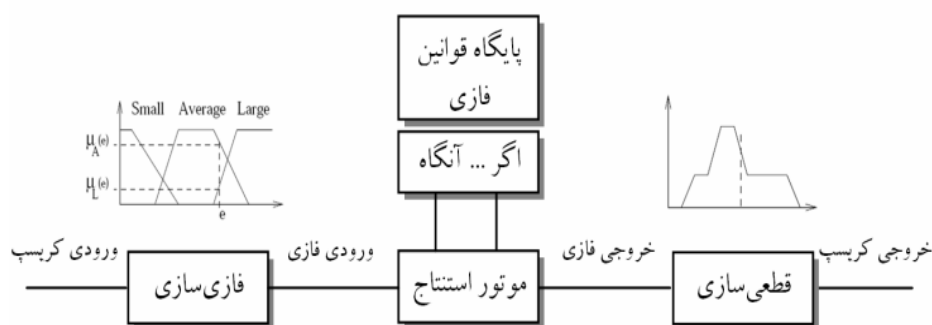
۲-۲- سیستم استنتاج‌گر فازی

استنتاج‌فازی فرایند نگاشت مجموعه ورودی داده شده به یک مجموعه خروجی با استفاده از منطق فازی است (Tang, 2004). سیستم استنتاج‌گر فازی ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی داده‌های اکتشاف ذخایر معدنی با استفاده از منطق فازی و قوانین زبان‌شناختی فازی به‌شمار می‌آید. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، به‌کارگیری این سیستم در هر فرایند شامل سه مرحله فازی‌سازی، موتور استنتاج فازی، و قطعی‌سازی خروجی هاست. در ادامه به توضیح این مراحل پرداخته می‌شود.

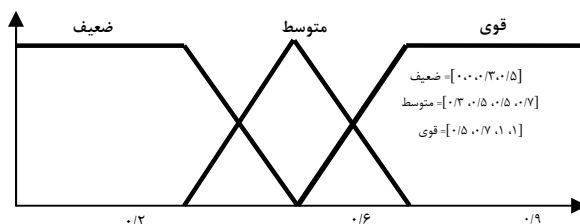
ماتریس قضاوت فازی با نظر کارشناسی تعیین می‌گردد. برای مثال، چنانچه کارشناس سه متغیر زبان‌شناختی برای نقشه‌های فاکتور تعریف کند، تعداد ستون‌های ماتریس فوق برابر با سه می‌گردد؛ در این صورت I₁₁ میزان کم‌بودن فاصله از داسیت پورفیری، I₂₁ میزان کم‌بودن فاصله از گسل، I₃₁ میزان کم‌بودن فاصله از نشانه معدنی، I₄₁ میزان ضعیف‌بودن آلتراسیون، I₁₂، I₂₂، I₃₂ و I₄₂ میزان متوسط‌بودن متغیرهای فوق و I₁₃، I₂₃، I₃₃ و I₄₃ میزان خوب یا قوی بودن متغیرهای فوق است. ماتریس قضاوت فازی برای پیکسل مورد نظر در نقشه به صورت زیر تشکیل می‌گردد:

$$R_{zY} = \begin{bmatrix} 0/2 & 0/8 & 0 \\ 0/15 & 0/85 & 0 \\ 0 & 0/45 & 0/55 \\ 0/7 & 0/3 & 0 \end{bmatrix}$$

به همین ترتیب ماتریس فوق برای دو متغیر دیگر نیز تشکیل می‌شود. حال با استفاده از وزن‌های به‌دست آمده در جدول ۳، نقشه‌های فاکتور اولیه تلفیق می‌شوند؛ برای مثال نقشه‌های فاکتور زمین‌شناسی به صورت زیر تلفیق می‌گردند:



شکل ۱. سیستم استنتاج‌گر فازی
منبع: Stefanakis et al., 1996



شکل ۲. توابع عضویت فاکتور شارژ ابلیتته

هر نقشه معیار با n عدد فازی، n نقشه مجزا در نظر گرفته می شود (Karimi et al., 2009).

۲-۲-۲-۲- موتور استنتاج فازی

مرحله دوم در سیستم های استنتاج گر فازی، تلفیق داده های فازی با به کارگیری موتور استنتاج فازی است. تلفیق داده ها با ایجاد پایگاه داده ای از قوانین به صورت «اگر - آنگاه» فازی و به کارگیری مدل تصمیم گیری انجام می پذیرد. مدل های ممدانی و سوگنو از متداول ترین مدل ها در این مرحله هستند. در مدل ممدانی برای ترکیب درجات عضویت فازی توابع ورودی از عملگرهای AND و OR استفاده می شود. در روش سوگنو بخش «آنگاه» قواعد فازی به صورت رابطه ای ریاضی تعریف می شود و خروجی هایی با مقادیر حقیقی ایجاد می گردد. در روش اخیر از مزایای استنتاج فازی کمتر استفاده شده است. از این روش غالباً در مسائل دارای ماهیت خطی و مسائل بهینه سازی استفاده می شود.

۲-۲-۳- قطعی سازی

خروجی موتور استنتاج فازی به طور معمول شامل یک یا چند عدد فازی است که بایستی به یک عدد حقیقی تبدیل گردد تا قابل درک و تفسیر باشد. این عمل در مرحله قطعی سازی داده ها انجام می شود. روش های زیادی از قبیل روش مرکز ثقل، میانگین وزن دار، ماکزیمم میانه، مرکز تجمیع و مرکز بزرگ ترین سطوح برای این مرحله وجود دارد. روش مرکز ثقل که در این تحقیق به کار گرفته شده است، با استفاده از رابطه (۹) اعمال می شود.

$$Z^* = \frac{\int \mu_{\bar{A}}(x) \cdot x \, dx}{\int \mu_{\bar{A}}(x) \, dx} \quad \text{رابطه (۹)}$$

۲-۲-۱- فازی سازی

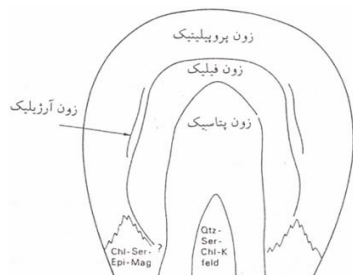
با تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی، مرحله فازی سازی داده ها انجام می گیرد. به عنوان مثال، در فازی سازی نقشه فاکتور شارژ ابلیتته می توان از عبارت های زبانی شارژ ابلیتته ضعیف، متوسط، و قوی استفاده کرد. برای تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی معمولاً از توابع عضویت استفاده می شود. باید توجه داشت که پیش از عمل فازی سازی داده ها، به منظور امکان تبدیل داده ها به داده های بدون واحد و استاندارد، با تغییر دامنه متغیرها به بازه صفر و یک، نرمال سازی داده ها انجام می گیرد. این بازه مطابق شکل ۲ با عبارت های زبانی نمایش داده می شود.

در شکل ۲ توابع عضویت فازی شارژ ابلیتته شامل سه متغیر زبانی و به تبع آن سه عدد فازی است. اعداد فازی ای که استفاده می شوند می بایست دارای دو ویژگی نرمال بودن و تحدب باشند (Menhaj, 2008). به طور معمول در تعریف توابع عضویت از اعداد فازی دوزنقه ای و مثلثی استفاده می شود که می توان آنها را به ترتیب به صورت $M=(a,b,c)$ و $M=(a,b,c,d)$ در نظر گرفت. علاوه بر این، هر عدد فازی را می توان به صورت یک رابطه در نظر گرفت؛ مثلاً عدد فازی دوزنقه ای فاکتور شارژ ابلیتته متوسط را که به صورت چهارتایی $M=[0.3, 0.5, 0.7, 1.0]$ بیان می گردد، می توان با کمک رابطه (۸) بیان کرد:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{b-x}{b-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

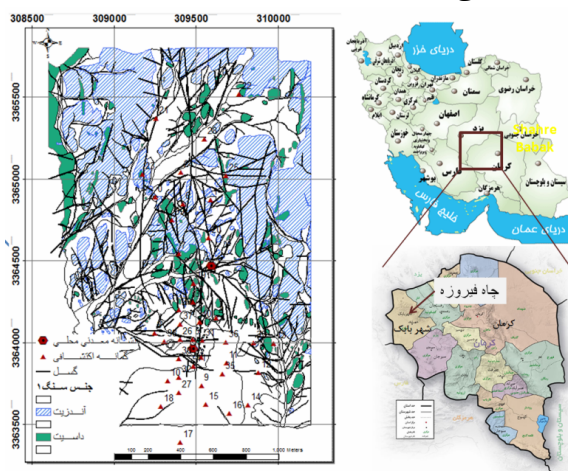
هر عارضه یا شیء روی نقشه به عنصر واحدی از عدد فازی ارجاع داده می شود. بنابراین در GIS به ازای

گرانیت با ترکیبی از گرانیت به سمت گرانودیوریت تا تونالیت، کوارتز، مونزودیوریت و دیوریت است (Karimi et al., 2009). در بین مدل‌های ارائه شده برای دگرسانی گرمایی، لاول و گیلبرت الگوی منطقه بندی دگرسانی گرمایی توده معدنی سان مانوئل - کالامازو (آریزونا) را توصیف و یافته‌های شان را با ۲۷ کانسار مس پورفیری دیگر مقایسه کرده‌اند (Antoni, 2000). براساس ادعای آنها عموماً منطقه دگرسانی در ذخایر مس پورفیری به صورت چهار زون آلتراسیون پتاسیک، فلیک، آرژلیک و پروپیلیک پیرامون استوک پورفیری به صورت مناطق هم‌محوری که پوسته‌های هم‌مرکز و اغلب ناکامل را می‌سازد، تعریف می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. الگوی منطقه بندی دگرسانی گرمایی در مدل لاول - گیلبرت برای نهشته‌های مس پورفیری
منبع: Antonio, 2000

محدوده معدنی چاه فیروزه در فاصله تقریبی ۳۵ کیلومتری شمال غرب شهر بابک، در بخش مرکزی شهرستان انار در استان کرمان واقع شده است (شکل ۴).



شکل ۴. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعه شده

در رابطه فوق منظور از $\mu_{\bar{A}}(X)$ درجه عضویت فازی مقادیر X است، که تغییر درجه عضویت فازی را در خروجی مرحله استنتاج فازی نشان می‌دهد.

۳- مدل مفهومی ذخایر مس پورفیری و منطقه مورد مطالعه

ذخایر مس پورفیری معمولاً در کمرندهای کوه‌زایی موازی - خطی قرار دارند و کانسارهای از نوع استوک ورک تا افشان بزرگ، دارای عیار پایین (کیفیت ۰/۴ تا ۱ درصد) و تناژ بالا (مقدار تا ۱۰۰۰ میلیون تن) هستند. این کمرندهای کوه‌زایی ممکن است از ده‌ها تا صدها و حتی هزاران کیلومتر درازا داشته باشند. یکی از کانسارهای مس پورفیری، توده نفوذی مرکب، استوانه‌ای و استوک‌مانندی است که رخنمونی کشیده یا نامنظم به ابعادی در حدود $2 \times 1/5$ کیلومتر داد و غالباً سنگ‌هایی متوسط‌دانه با بافتی همسان‌دانه آن را دربر می‌گیرند. در مراحل پیش از کوه‌زایی، کانسارهای سولفیدی توده‌ای با خاستگاه ماگمایی از آتشفشانی بازالتی پیدایش یافته‌اند. در پایان این مرحله، اسکارن‌های مس و آهن و نخستین مس‌های پورفیری با فعالیت ماگماتیسم گرانیتی پلاژیو کلازدار پدیدار شده‌اند. کارشناسان در اواسط دوره کوه‌زایی، کانسارهای مهمی از مس نیافتند، ولی در مراحل پایانی کوه‌زایی بخش عمده‌ای از کانسارهای مس پورفیری در جهان به‌وجود آمده‌اند. کانی‌سازی مس پورفیری حاصل از سرد شدن توده‌های عظیم سنگ آذرین درونی از خانواده

بین عناصر مس و مولیبدن (۰/۵۲۳) نسبتاً بالاست. حدود ۲۰ درصد نمونه‌ها عیار بی‌ش از ۱۲/۶ میلی‌گرم در تن طلا دارند و همبستگی بین عناصر مس و طلا (۰/۶۶۵) بالاست. نتایج نمونه‌برداری سنگی نشان می‌دهد که چاه‌فیروزه نمونه‌ای از پورفیری مس، بدون مقادیر بااهمیتی از مولیبدن و طلاست که از این نظر مشابه میدوک است (Kazemi Mehrnia et al., 2006). نقشه‌های توزیع عناصر مس، مولیبدن و طلا تهیه و سپس محدوده‌های آنومالی ممکن، احتمالی و قطعی برای هر کدام مشخص می‌شود (Esfehanipour et al., 2005).

برداشت‌های ژئوفیزیکی به‌روش ژئوالکتریک برای تعیین وجود کانی‌سازی سولفیدی در سطوح زیرین، محل توده‌های سولفیدی و تمرکز کانی‌سازی سولفیدی انجام شده است. شارژابیلیته و مقاومت ظاهری به روش آرایش مستطیلی در هر کدام از برداشت‌ها اندازه‌گیری شده و الکترودهای جریان با فاصله ۱۲۰۰ متر و الکترودهای پتانسیل با فاصله ۲۰ متر استفاده شده‌اند (Oscoe, 2005). سپس نقشه‌های توزیع شارژابیلیته و مقاومت ظاهری تهیه و محدوده‌های آنومالی ممکن، احتمالی و قطعی برای هر کدام مشخص می‌شود.

۴- تهیه نقشه پتانسیل معدنی

عادلی (۲۰۰۹) با توجه به مدل مفهومی ذخیره مس پورفیری و با استفاده از نتایج مطالعات کارشناسی، فاکتورهای مؤثر در کانی‌سازی اندیس مس چاه‌فیروزه را مشخص کرد. این فاکتورها در جدول ۴ معرفی شده‌اند. پس از آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی، با انجام پردازش‌هایی از قبیل کلاس‌بندی مجدد، ایجاد بافر، تولید نقشه مجاورت و تبدیل قالب نقشه‌ها به قالب رستر نقشه‌های فاکتور تهیه می‌شوند. پردازش‌های انجام‌شده روی آنها در جدول ۴ ذکر شده است. با توجه به جدول ۴ اغلب نقشه‌های فاکتور با محاسبه فاصله از عوارض یا درون‌یابی تهیه می‌شوند. نقشه‌های فاکتور تهیه‌شده در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند. در ادامه، مراحل تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از روابط و سیستم استنتاج‌گر فازی ارائه می‌گردد.

این ذخیره در محدوده عرض جغرافیایی $30^{\circ} 23' 00'' - 30^{\circ} 24' 30''$ و طول جغرافیایی $55^{\circ} 01' 00'' - 55^{\circ} 02' 00''$ در بخش جنوب‌شرقی زون اورمی - دختر قرار گرفته است (Hajmalo-ali, 2006). در این زون، کانسارهای مس پورفیری مانند سرچشمه، دره‌زار، سونگون و میدوک قرار دارند. این زون همچنین پتانسیل کانی‌سازی قوی دارد.

اکتشافات مقدماتی ژئوشیمیایی معدن مذکور در سال ۱۳۸۴، اکتشافات ژئوفیزیکی آن در سال ۱۳۸۵، تهیه نقشه زمین‌شناسی در سال ۱۳۸۶ و حفاری‌های اکتشافی طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۷ انجام شده است (Ibid). پیکره ولکانوپلوتونیک سازمان‌یافته شامل سنگ‌های ولکانیکی متعلق به ائوسن و ماگماتیسم که به پیامد رخداد پیرنه و زمان الیگوسن مربوط است، ساختار زمین‌شناسی منطقه را تشکیل می‌دهد. در امتداد شمال به جنوب منطقه، داسیت پورفیری به سنگ‌های ولکانیکی نفوذ کرده و موجب دگرسانی آنها شده است. کانی‌سازی اغلب در سنگ‌های داسیت پورفیری که تحت تأثیر گسل‌های منطقه بوده است، اتفاق می‌افتد (Ibid). این پدیده بیشتر در بخش‌های مرکزی دیده می‌شود. سیستم مس پورفیری چاه‌فیروزه دارای چهار مرکز دگرسانی سیلیکات پتاسیم با رگه و رگچه‌های کوارتزی و کانی‌سازی مس با سنگ میزبان نفوذی است. کانسار دارای منطقه‌بندی بارزی از نظر دگرسانی است، به‌طوری‌که دگرسانی پتاسیک در مرکز به‌وسیله دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک احاطه شده است (Kazemi Mehrnia et al., 2006).

اکتشافات ژئوشیمیایی را شرکت ملی صنایع مس ایران، با طراحی شبکه نمونه‌برداری به ابعاد $100m \times 100m$ و در محدوده‌ای به وسعت ۱/۲ کیلومتر مربع انجام داده است. بیش از ۲۰ درصد نمونه‌ها عیار بیش از ۳۳۹ گرم در تن، مس دارند و ناهنجاری مس در مرکز (متمایل به شرق) و جنوب دیده‌شده و دارای روند شمالی - جنوبی است. تقریباً ۵ درصد نمونه‌ها عیار بیش از ۵ گرم در تن مولیبدن دارند (Esfehanipour et al., 2005). میزان همبستگی

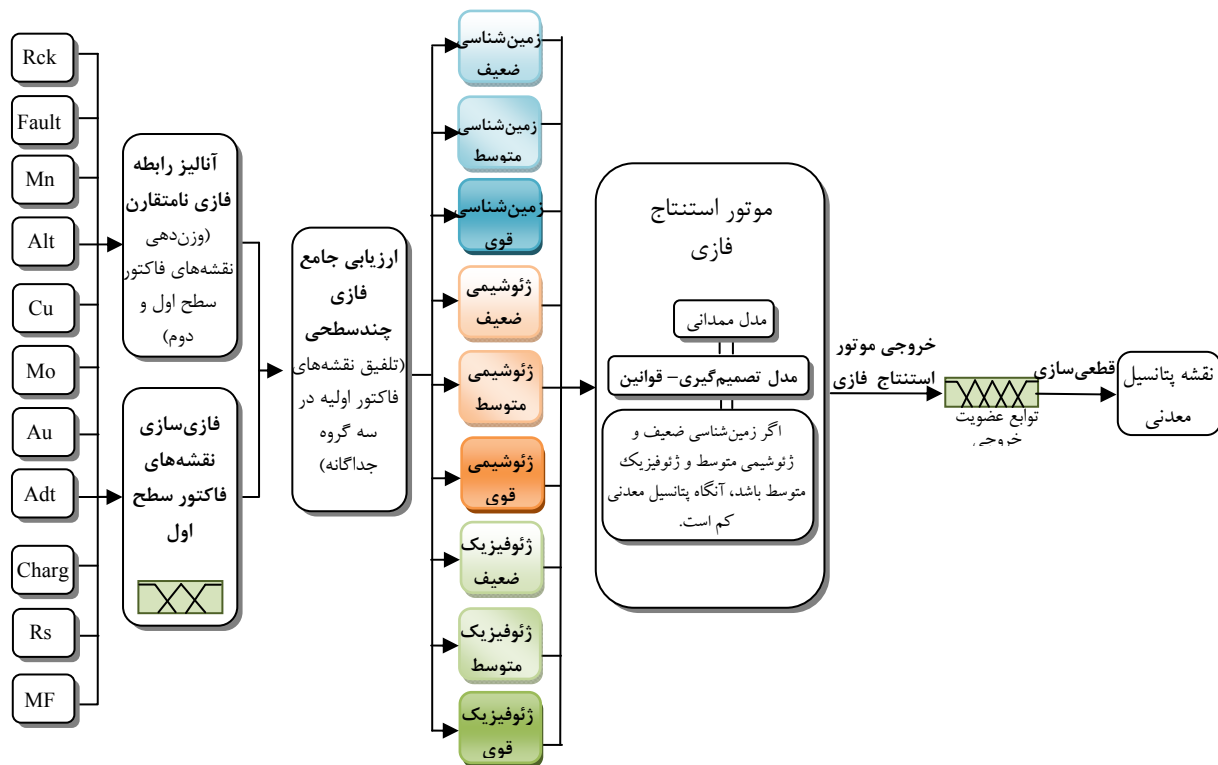
ساناز علائی مقدم و همکاران

شبکه استنتاجی شکل ۵ وارد موتور استنتاج فازی می‌شود و خروجی غیرفازی می‌گردد و نقشه پتانسیل معدنی به‌دست می‌آید. در ادامه، مراحل تهیه نقشه پتانسیل معدنی از نقشه فاکتور به‌وسیله این مدل بیان می‌گردد.

تلفیق نقشه‌های فاکتور اولیه به روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی و ارزیابی چندسطحی فازی صورت می‌گیرد و سه نقشه فاکتور فازی زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک تهیه می‌گردد. سه نقشه فاکتور فازی همانند

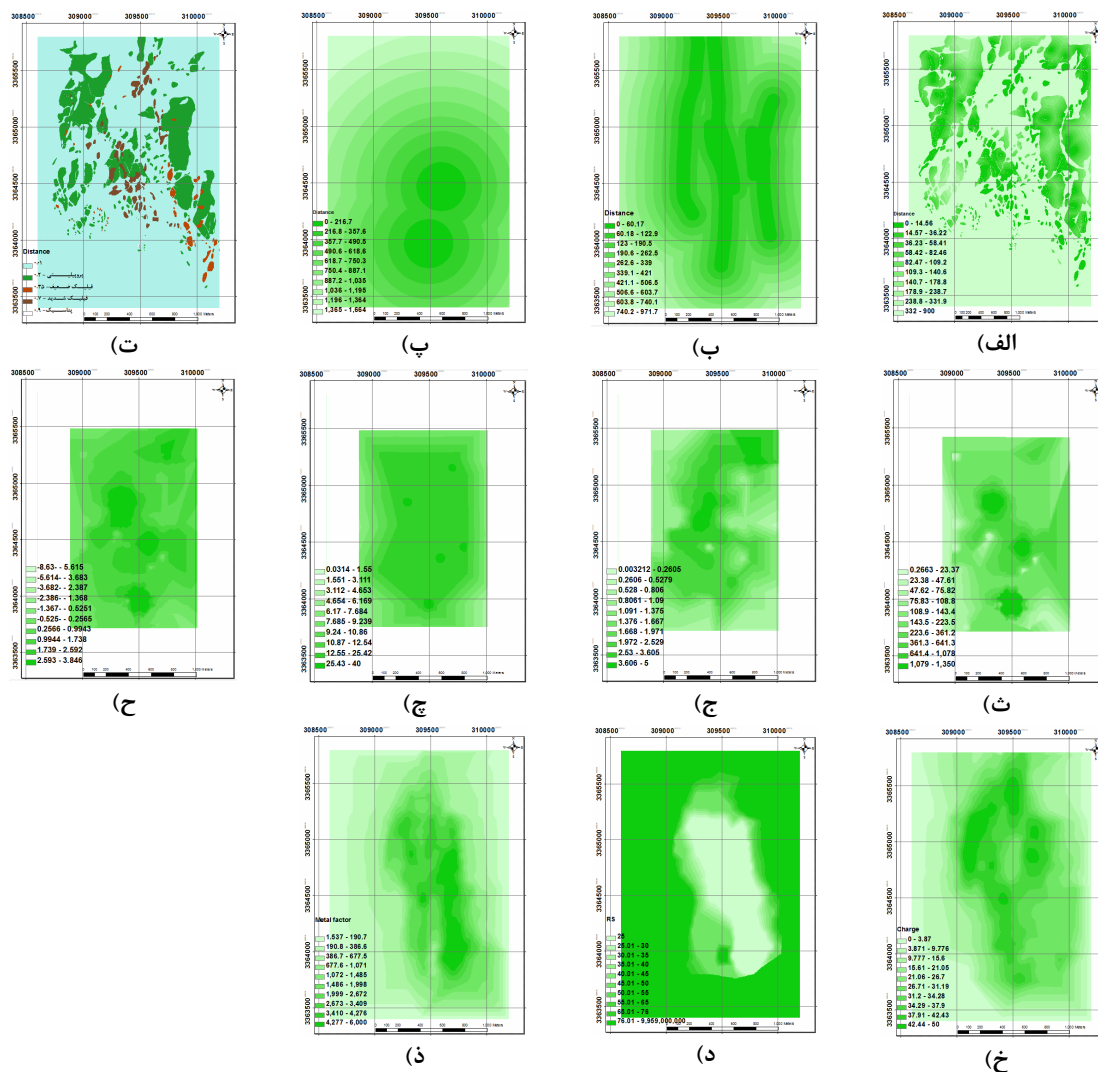
جدول ۴. آماده‌سازی نقشه‌های فاکتور تهیه نقشه پتانسیل معدنی اندیس مس چاه‌فیروزه

نقشه‌های فاکتور سطح اول	پردازش‌های انجام‌شده
زون منشأ حرارت و سنگ میزبان (Rck)	محاسبه فاصله اقلیدسی از سنگ داسیت پورفیری آتزه‌شده و مجاورت آن با سنگ دیواره آندزیت
گسل‌های اصلی (Fault)	محاسبه فاصله اقلیدسی از گسل اصلی
نشانه‌های معدنی (Mn)	محاسبه فاصله اقلیدسی از نشانه معدنی
آلتراسیون (Alt)	کلاس‌بندی نقشه به چهار کلاس پتاسیک، فلیک شدید، فلیک ضعیف، پروپیلیتی شدید و پروپیلیتی ضعیف
عیار مس (Cu)	تهیه نقشه منحنی میزان و سپس درون‌یابی
عیار مولیبدن (Mo)	تهیه نقشه منحنی میزان و سپس درون‌یابی
عیار طلا (Au)	تهیه نقشه منحنی میزان و سپس درون‌یابی
اندیس ادیتو مس و مولیبدن (Adt)	آنومالی اندیس ادیتو عنصر مس و مولیبدن از رابطه زیر به‌دست می‌آید و سپس نرمال می‌شود: $CuZ + MoZ = \frac{Ln(Cu) - Ln(Cu)}{\sigma Ln(Cu)} + \frac{Ln(Mo) - Ln(Mo)}{\sigma Ln(Mo)}$
شارژآبلیته (Charge)	در رابطه فوق Cu, Mo, Ln(Cu), Ln(Mo), $\sigma(Ln(Cu))$ و $\sigma(Ln(Mo))$ میزان عیار مس، مولیبدن، میانگین نه‌ری مس و مولیبدن و انحراف معیار لگاریتم نه‌ری مس و مولیبدن است.
مقاومت ظاهری (Rs)	تهیه نقشه منحنی میزان و سپس درون‌یابی
فاکتور فلزی (MF)	تهیه نقشه منحنی میزان و سپس درون‌یابی



شکل ۵. مراحل تلفیق نقشه‌های فاکتور کانی‌سازی با استفاده از روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی و ارزیابی جامع چندسطحی فازی و سیستم استنتاج‌گر فازی

مدل سازی اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از سیستم های استنتاج گر و روابط فازی



شکل ۶. نقشه فاکتور؛ (الف) وزن منشأ حرارت و سنگ میزبان، (ب) گسل های اصلی، (پ) نشانه های معدنی، (ت) آلتراسیون، (ث) عیار مس، (ج) عیار مولیبدن، (چ) عیار طلا، (ح) ادیتو مس و مولیبدن، (خ) شارژ ابلیت، (د) مقاومت ظاهری، و (ذ) فاکتور فلزی

استفاده می گردد. با بررسی پروفیل تغییرات عیار مس در عمق برای هریک از گمانه ها، وضعیت آنها در حالت های ۳ و ۵ کلاسه، همانند جدول ۵ تعیین گردید. در تقسیم بندی ۵ کلاسه، عددهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب بیانگر وضعیت های خیلی ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی و در تقسیم بندی ۳ کلاسه، عددهای ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر وضعیت هایی ضعیف، متوسط و قوی هستند. اطلاعات ۲۴ گمانه اکتشافی برای تعیین ماتریس رابطه متقارن و اطلاعات ۱۸ گمانه

۴-۱- محاسبه وزن نقشه های فاکتور سطح اول و دوم با استفاده از آنالیز رابطه نامتقارن فازی برای تعیین وزن نقشه های فاکتور سطح اول و دوم اندیس مس چاه فیروزه، مراحل روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی - همان گونه که در بخش ۲-۱ نشان داده شد - پیاده سازی می شود. در ادامه این مراحل بیان می گردند. مرحله اول - در این تحقیق به منظور تشکیل ماتریس ارتباط متقارن، از داده های گمانه اکتشافی

ساناز علائی مقدم و همکاران

طرفی با توجه به جدول ۵، موقعیت این گمانه در کلاس ضعیف نقشه فاکتور گسل قرار می‌گیرد. بنابراین وضعیت این گمانه با وضعیت آن در نقشه فاکتور گسل انطباق دارد. در مقابل، گمانه شماره ۲ دارای وضعیت خیلی ضعیف در تقسیم‌بندی ۵ کلاسه است. از طرفی با توجه به جدول ۵، موقعیت این گمانه در کلاس ضعیف نقشه فاکتور گسل قرار می‌گیرد. بنابراین وضعیت این گمانه با وضعیت آن در نقشه فاکتور گسل انطباق ندارد.

اکتشافی باقی‌مانده به‌منظور ارزیابی کارایی روش استفاده شده است. ابتدا وضعیت گمانه‌های اکتشافی با وضعیت آنها در هر نقشه فاکتور مقایسه می‌شود. برای انجام این مقایسه، هر کدام از نقشه‌های فاکتور همانند جدول ۶ کلاس‌بندی می‌شوند. نتیجه انطباق وضعیت هر گمانه در نقشه‌های فاکتور در جدول ۷ ارائه شده است. برای مثال، گمانه شماره ۱ دارای وضعیت ضعیف در تقسیم‌بندی ۵ کلاسه است. از

جدول ۵. وضعیت گمانه‌های اکتشافی اندیس مس چاه‌فیروزه

وضعیت گمانه (۵ کلاسه)	وضعیت گمانه (۳ کلاسه)	شماره گمانه	وضعیت گمانه (۵ کلاسه)	وضعیت گمانه (۳ کلاسه)	شماره گمانه	وضعیت گمانه (۵ کلاسه)	وضعیت گمانه (۳ کلاسه)	شماره گمانه	وضعیت گمانه (۵ کلاسه)	وضعیت گمانه (۳ کلاسه)	شماره گمانه
۳	۲	۳۴	۲	۳	۲۳	۲	۳	۲۳	۲	۳	۱
۴	۳	۳۵	۱	۱	۲۴	۱	۱	۲۴	۱	۱	۲
۳	۲	۳۶	۳	۳	۲۵	۲	۳	۲۵	۲	۳	۳
۲	۱	۳۷	۱	۱	۲۶	۱	۱	۲۶	۱	۱	۴
۳	۲	۳۸	۴	۴	۲۷	۳	۴	۲۷	۳	۴	۵
۲	۱	۳۹	۳	۳	۲۸	۲	۳	۲۸	۲	۳	۶
۳	۲	۴۰	۲	۲	۲۹	۱	۲	۲۹	۱	۲	۷
۴	۳	۴۱	۳	۳	۳۰	۲	۳	۳۰	۲	۳	۸
۴	۳	۴۲	۳	۳	۳۱	۳	۴	۳۱	۳	۴	۹
					۳۲	۳	۴	۳۲	۳	۴	۱۰
					۳۳	۳	۴	۳۳	۳	۴	۱۱

جدول ۶. کلاس‌بندی نقشه‌های فاکتور اولیه برای انطباق با وضعیت گمانه‌های اکتشافی

آلتراسیون	نشانه معدنی	گسل	زون منشأ حرارت و سنگ میزبان	وضعیت
پتاسیک	بافر ۱۵ متری	بافر ۱۵ متری	داسیت پورفیری	خیلی قوی
فیلیک شدید	بافر ۳۰ متری	بافر ۳۰ متری	بافر ۱۰ متری	قوی
فیلیک ضعیف	بافر ۴۵ متری	بافر ۶۰ متری	بافر ۲۰ متری	متوسط
پروپیلیتی	بافر ۶۰ متری	بافر ۷۵ متری	بافر ۳۰ متری	ضعیف
سایر مناطق	سایر مناطق	سایر مناطق	سایر مناطق	خیلی ضعیف
اندیس ادیتو مس و مولیبدن	عیار طلا	عیار مولیبدن	عیار مس	وضعیت
۰/۷۳۱۹-۱	آنومالی قطعی و احتمالی	آنومالی قطعی و احتمالی	آنومالی قطعی و احتمالی	قوی
۰/۷۳۱۸ - ۰/۵۱۲۸	آنومالی ممکن	آنومالی ممکن	آنومالی ممکن	متوسط
۰-۰/۵۱۲۷	سایر مناطق	سایر مناطق	سایر مناطق	ضعیف
فاکتور فلزی	مقاومت ظاهری	شارژ اَبیلیته	وضعیت	
آنومالی قطعی و احتمالی	آنومالی قطعی و احتمالی	آنومالی قطعی و احتمالی	قوی	
آنومالی ممکن	آنومالی ممکن	آنومالی ممکن	متوسط	
سایر مناطق	سایر مناطق	سایر مناطق	ضعیف	

استخراج شده از: تحقیق عادل (۲۰۰۹)

مدل سازی اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از سیستم های استنتاج گر و روابط فازی

جدول ۷. انطباق و عدم انطباق گمانه های اکتشافی با وضعیت هر نقشه فاکتور

فاکتور فلزی	مقاومت ظاهری	شارژ ایلیمته	ادیتو	طلا	مولیبدن	مس	التراسیون	نشانه معدنی	گسل	زون منشأ حرارت	شماره گمانه
X ₁₁	X ₁₀	X ₉	X ₈	X ₇	X ₆	X ₅	X ₄	X ₃	X ₂	X ₁	
۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۱
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۲
۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۳
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۴
۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۵
۰	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۷
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۸
۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۹
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰
۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۱
۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲
۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱۳
۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۴
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱۵
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۶
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۷
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۸
۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۹
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۲۰
۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۲۱
۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۲۲
۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳
۱	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۲۴
۱۷	۶	۱۲	۱۱	۱۵	۱۲	۱۱	۱۵	۱۵	۱۱	۱۵	Σ

می شود (جدول ۱۰). جدول های ۹ و ۱۰ نشان می دهند که رابطه بین نقشه های فاکتور نامتقارن است (برای مثال در جدول ۹ مشاهده می شود که $Q_{۳۱} \neq Q_{۳۲}$). بنابراین جدول های فوق، ماتریس رابطه نامتقارن فازی بین نقشه های فاکتور را نشان می دهند. سطرها و ستون های این ماتریس بیانگر میزان تأثیر گذاری و تأثیر پذیری فاکتورها بر یکدیگر است. برای مثال عددهای سطر اول در جدول ۹، نشان می دهند که هر کدام از فاکتورها تا چه اندازه به وسیله فاکتور زون منشأ حرارت کنترل می شوند و عددهای ستون اول در جدول ۹ نشان می دهند که فاکتور زون منشأ حرارت تا چه اندازه به وسیله هر کدام از فاکتورها کنترل می شود. فاکتور عیار مولیبدن (X_6) در جدول ۹ کمترین تأثیر پذیری از فاکتورهای دیگر و فاکتور فلزی (X_{11}) بیشترین تأثیر پذیری را از فاکتورهای دیگر دارند.

با استفاده از جدول ۷، ماتریس رابطه متقارن بین نقشه های فاکتور اولیه، همانند جدول ۸ تشکیل می گردد. T_{ij} (درایه i ام و j ام در این ماتریس)، بیانگر تعداد دفعاتی است که گمانه های اکتشافی در نقشه فاکتور i و j به طور همزمان دارای وضعیت سازگار با نقشه اند یا به طور همزمان وضعیت ناسازگاری با نقشه دارند. به عبارتی، T_{ij} تعداد گمانه هایی است در جدول ۷ که در هر دو ستون i و j مقدار یک، یا در هر دو ستون i و j مقدار صفر گرفته اند.

مرحله دوم - همان طور که در بخش ۱-۱-۲ بیان شد، با استفاده از روابط (۴) و (۵) و جدول ۸، ماتریس وابستگی بین نقشه های فاکتور اولیه تشکیل می شود (جدول ۹) و با استفاده از روابط (۱) و (۲) ماتریس وابستگی بین نقشه های فاکتور سطح دوم تشکیل

سازار علائی مقدم و همکاران

جدول ۸. ماتریس رابطه متقارن فازی (W) بین نقشه‌های فاکتور اولیه اندیس مس چاه‌فیروزه

		I ₁					I ₂					I ₃	
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	
I ₁	X1	۱۵	۱۶	۲۲	۲۴	۱۴	۹	۲۰	۱۲	۱۵	۱۱	۲۰	
	X2	۱۶	۱۱	۱۶	۱۶	۱۶	۹	۱۶	۱۴	۱۷	۱۵	۱۴	
	X3	۲۲	۱۶	۱۵	۲۲	۱۶	۹	۲۲	۱۴	۱۵	۱۱	۲۰	
	X4	۲۴	۱۶	۲۲	۱۵	۱۴	۹	۲۰	۱۲	۱۵	۱۱	۲۰	
I ₂	X5	۱۴	۱۶	۱۶	۱۴	۱۱	۵	۱۸	۲۲	۱۹	۱۷	۱۶	
	X6	۹	۹	۹	۹	۵	۱۲	۷	۵	۴	۸	۹	
	X7	۲۰	۱۶	۲۲	۲۰	۱۸	۷	۱۵	۱۶	۱۵	۱۳	۲۰	
	X8	۱۲	۱۴	۱۴	۱۲	۲۲	۵	۱۶	۱۱	۱۷	۱۷	۱۴	
I ₃	X9	۱۵	۱۷	۱۵	۱۵	۱۹	۴	۱۵	۱۷	۱۲	۱۶	۱۷	
	X10	۱۱	۱۵	۱۱	۱۱	۱۷	۸	۱۳	۱۷	۱۶	۶	۱۱	
	X11	۲۰	۱۴	۲۰	۲۰	۱۶	۹	۲۰	۱۴	۱۷	۱۱	۱۷	

جدول ۹. ماتریس وابستگی (V) بین نقشه‌های فاکتور اولیه

		I ₁					I ₂					I ₃	
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	
I ₁	X1	۱/۰۰۰۰	۰/۰۴۳۲	۰/۰۸۱۶	۰/۰۹۷۱	۰/۰۶۴۸	۰/۰۲۶۸	۰/۱۳۲۲	۰/۰۴۷۶	۰/۱۰۶۳	۰/۰۵۷۲	۰/۱۸۹۰	
	X2	۰/۰۷۳۵	۱/۰۰۰۰	۰/۰۷۳۵	۰/۰۷۳۵	۰/۰۸۴۶	۰/۰۲۶۸	۰/۰۸۴۶	۰/۰۶۴۸	۰/۱۳۶۶	۰/۱۰۶۳	۰/۰۹۲۶	
	X3	۰/۰۸۶۰	۰/۰۴۵۵	۱/۰۰۰۰	۰/۰۸۶۰	۰/۰۶۸۸	۰/۰۲۱۸	۰/۱۳۰۱	۰/۰۵۲۷	۰/۱۰۶۳	۰/۰۵۷۲	۰/۱۸۹۰	
	X4	۰/۰۹۷۱	۰/۰۴۳۲	۰/۰۸۱۶	۱/۰۰۰۰	۰/۰۶۴۸	۰/۰۲۶۸	۰/۱۳۲۲	۰/۰۴۷۶	۰/۱۰۶۳	۰/۰۵۲۷	۰/۱۸۹۰	
I ₂	X5	۰/۰۵۴۴	۰/۰۷۱۱	۰/۰۷۱۱	۰/۰۵۴۴	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۸۰	۰/۱۰۳۳	۰/۱۵۴۳	۰/۱۳۳۵	۰/۱۰۶۹	۰/۰۹۴۷	
	X6	۰/۰۶۲۵	۰/۰۶۲۵	۰/۰۶۲۵	۰/۰۶۲۵	۰/۰۲۹۷	۱/۰۰۰۰	۰/۰۵۸۳	۰/۰۲۹۷	۰/۰۳۶۳	۰/۱۴۵۱	۰/۱۸۳۷	
	X7	۰/۰۶۵۷	۰/۰۴۲۱	۰/۰۷۹۶	۰/۰۶۵۷	۰/۱۰۳۳	۰/۰۱۵۶	۱/۰۰۰۰	۰/۰۸۱۶	۰/۰۹۷۷	۰/۰۷۳۴	۰/۱۷۳۶	
	X8	۰/۰۵۳۳	۰/۰۷۲۵	۰/۰۷۲۵	۰/۰۵۳۳	۰/۱۶۶۰	۰/۰۰۸۶	۰/۰۸۷۸	۱/۰۰۰۰	۰/۱۲۵۴	۰/۱۲۵۴	۰/۰۸۵۱	
I ₃	X9	۰/۰۵۸۵	۰/۰۷۵۲	۰/۰۵۸۵	۰/۰۵۸۵	۰/۱۱۹۳	۰/۰۰۵۳	۰/۰۷۴۴	۰/۰۹۵۵	۱/۰۰۰۰	۰/۱۲۶۴	۰/۱۴۲۷	
	X10	۰/۰۵۲۵	۰/۰۹۷۷	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۲۵	۰/۰۹۵۵	۰/۰۲۱۲	۰/۰۵۵۹	۰/۰۹۵۵	۰/۳۳۵۱	۱/۰۰۰۰	۰/۱۱۱۱	
	X11	۰/۰۷۳۰	۰/۰۳۵۸	۰/۰۷۳۰	۰/۰۷۳۰	۰/۰۷۳۵	۰/۰۲۳۳	۰/۱۱۴۹	۰/۰۵۶۳	۰/۱۴۲۷	۰/۰۵۹۸	۱/۰۰۰۰	

جدول ۱۰. ماتریس وابستگی (V) بین نقشه‌های فاکتور سطح دوم

	I ₁	I ₂	I ₃
I ₁	۱	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۲۵
I ₂	۰/۰۰۱۹	۱	۰/۰۱۷۸
I ₃	۰/۰۰۴۹	۰/۰۳۵۹	۱

مرحله چهارم - وزن نقشه‌های فاکتور اولیه با استفاده از تعریف ۵ و جدول ۹ محاسبه می‌شود. وزن نقشه‌های فاکتور سطح دوم نیز با استفاده از تعریف فوق و جدول ۱۰ محاسبه می‌شود. وزن محاسبه شده و نرمال شده نقشه‌های فاکتور اولیه و نقشه‌های فاکتور سطح دوم به ترتیب در جدول ۱۱ و جدول ۱۲ ارائه شده‌اند.

مرحله سوم - ماتریس رابطه نامتقارن جدول‌های ۹ و ۱۰، رابطه ترتیبی جزئی فازی نیست، از این رو برای رتبه‌بندی و وزن‌دهی به متغیرها می‌بایست رابطه بین آنها به رابطه ترتیبی جزئی فازی تبدیل شود. با استفاده از قضیه ۱ و ۲، ماتریس‌های فوق به ماتریس رابطه ترتیبی جزئی فازی تبدیل می‌شوند.

مدل‌سازی اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از سیستم‌های استنتاج‌گر و روابط فازی

جدول ۱۱. وزن نقشه‌های فاکتور اولیه محاسبه‌شده با روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی

وزن نرمال شده	وزن محاسبه شده	نقشه فاکتور اولیه	نقشه فاکتور سطح دوم
۰/۲۱۸۹	۰/۴۶۸	X_1	I_1
۰/۲۶۰۴	۰/۵۵۶۷	X_2	
۰/۲۶۰۴	۰/۵۵۶۷	X_3	
۰/۲۶۰۴	۰/۵۵۶۷	X_4	
۰/۲۱۳۹	۰/۴۲۱۶	X_5	
۰/۳۳۳۳	۰/۶۵۶۹	X_6	I_2
۰/۲۳۸۸	۰/۴۷۰۶	X_7	
۰/۲۱۳۹	۰/۴۲۱۶	X_8	
۰/۳۱۴۱	۰/۳۸۱۷	X_9	I_3
۰/۴۰۳۵	۰/۴۹۰۳	X_{10}	
۰/۲۸۲۴	۰/۳۴۳۱	X_{11}	

جدول ۱۲. وزن نقشه‌های فاکتور سطح دوم محاسبه‌شده با روش آنالیز رابطه نامتقارن فازی

وزن نرمال شده	وزن محاسبه شده	نقشه فاکتور سطح دوم
۰/۳۴۷۱	۰/۵۲۰۸	I_1
۰/۳۱۹۴	۰/۴۷۹۲	I_2
۰/۳۳۳۶	۰/۵۰۰۵	I_3

جدول ۱۳. درجه‌های عضویت نقشه فاکتور آلتراسیون

ضعیف	متوسط	خوب
۰	۰/۱	۰/۹
۰	۰/۳	۰/۷
۰	۰/۶۵	۰/۳۵
۰	۰/۸	۰/۲
۰	۰/۸	۰/۲
۰/۹	۰/۱	۰

می‌گردند. سپس نقشه‌های فازی شده با یکدیگر تلفیق می‌شوند. توابع عضویت تعریف شده برای نقشه‌های فاکتور در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. از آنجا که آلتراسیون متغیر اسمی است، با توجه به نظر کارشناسی، همانند جدول ۱۳ فازی می‌شود.

با استفاده از توابع عضویت تعریف شده، به ازای هر نقشه فاکتور، سه نقشه فازی تولید می‌شود. با استفاده از رابطه (۷) و وزن‌های به دست آمده در جدول ۱۱، نقشه‌های فاکتور سطح اول با یکدیگر ترکیب و ۹ نقشه فاکتور فازی زمین‌شناسی ضعیف، متوسط و قوی، ژئوشیمی ضعیف، متوسط و قوی و ژئوفیزیک ضعیف، متوسط و قوی تولید می‌شود (شکل ۸).

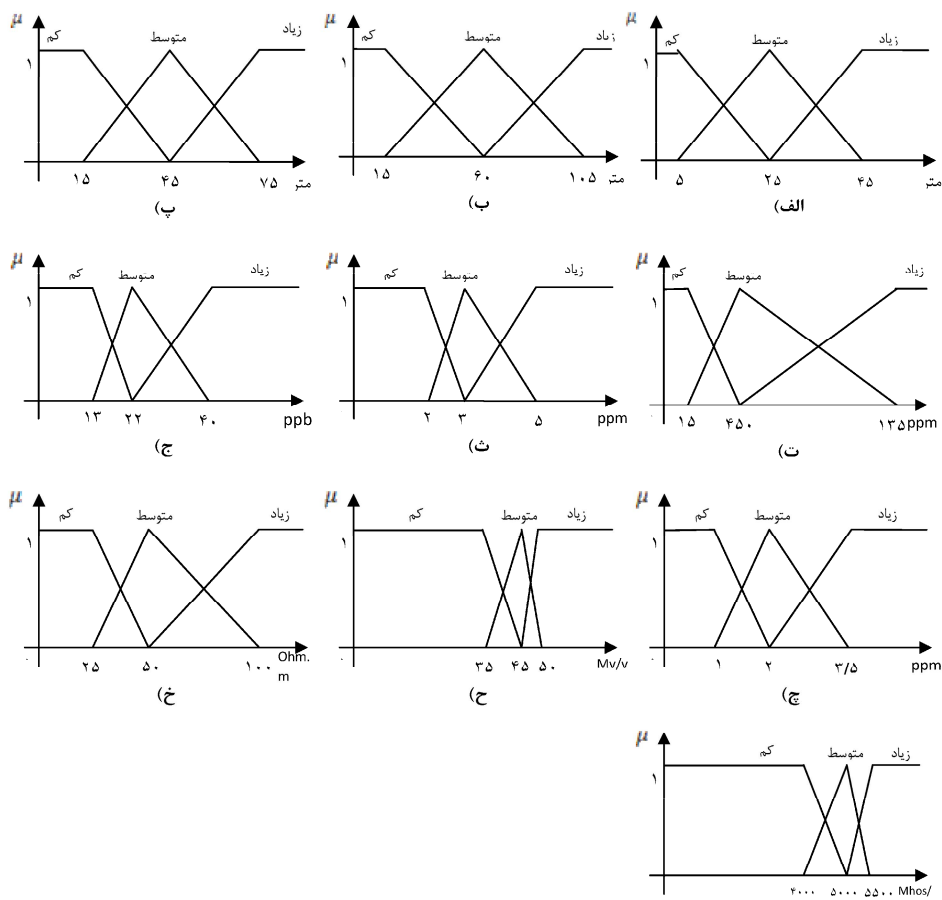
نتایج نشان می‌دهند که بین نقشه‌های فاکتور سطح اول، نقشه عیار عنصر مولیبدن (X_6) بیشترین تأثیر و نقشه فاکتور فلزی (X_{11}) کمترین تأثیر را دارد؛ و بین نقشه‌های فاکتور سطح دوم، نقشه زمین‌شناسی (I_1) دارای بیشترین تأثیر و نقشه ژئوشیمی (I_2) دارای کمترین تأثیر است.

۴-۲- تلفیق نقشه‌های فاکتور سطح اول با

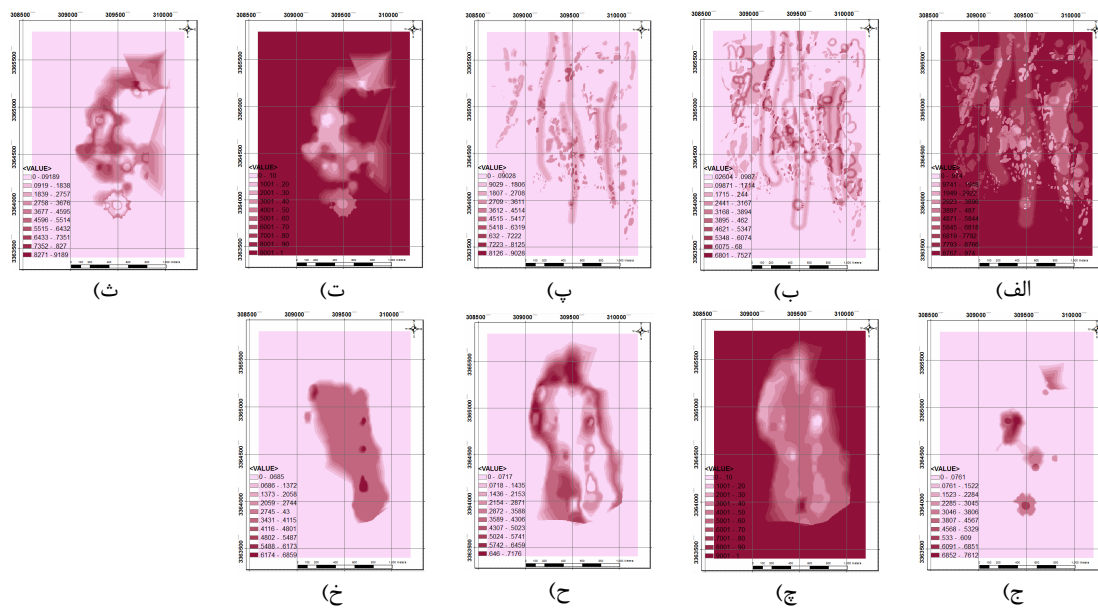
استفاده از روش ارزیابی جامع چندسطحی فازی

در این مرحله ابتدا نقشه‌های فاکتور اولیه با استفاده از توابع عضویتی که کارشناسان تعریف کرده‌اند، فازی

ساناز علائی مقدم و همکاران



شکل ۷. توابع عضویت؛ الف) فاصله از زون منشأ حرارت و سنگ میزبان، ب) فاصله از گسل‌های اصلی، پ) فاصله از نشانه معدنی، ت) عیار مس، ث) عیار مولیبدن، ج) عیار طلا، چ) ادیتو مس و مولیبدن، ح) شارژ ایلیمته، خ) مقاومت ظاهری، و د) فاکتور فلزی



شکل ۸. نقشه فاکتور؛ الف) زمین‌شناسی ضعیف، ب) زمین‌شناسی متوسط، پ) زمین‌شناسی قوی، ت) ژئوشیمی ضعیف، ث) ژئوشیمی متوسط، ج) ژئوشیمی قوی، چ) ژئوفیزیک ضعیف، ح) ژئوفیزیک متوسط، و خ) ژئوفیزیک قوی

۳-۴- تلفیق نقشه‌های فاکتور سطح دوم با

استفاده از سیستم استنتاج‌گر فازی

نقشه‌های فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک که به صورت فازی شده از مرحله قبل به دست آمدند وارد موتور استنتاج فازی ممدانی می‌شوند و خروجی با روش مرکز ثقل قطعی می‌گردد. از این‌رو نیازی به فازی‌سازی سه نقشه فاکتور فوق با استفاده از توابع عضویت نیست. در ادامه، مراحل استنتاج فازی و قطعی‌سازی نقشه‌های فاکتور سطح دوم بیان می‌شود.

۱-۳-۴ استنتاج فازی

پس از فازی‌سازی نقشه‌های فاکتور، تلفیق نقشه‌ها مدنظر قرار می‌گیرد. به منظور تلفیق داده‌ها با استفاده از قواعد استنتاج‌گر فازی، ابتدا یک پایگاه قواعد «اگر - آنگاه» فازی برای نقشه‌های فاکتور ایجاد می‌شود. به عنوان مثال، نمونه‌ای از قوانین چنین است: اگر در یک پیکسل منطقه زمین‌شناسی قوی، ژئوشیمی قوی و

ژئوفیزیک قوی باشد، پتانسیل معدنی آن پیکسل خیلی زیاد است. در جدول ۱۴ برخی از این قواعد ارائه شده است.

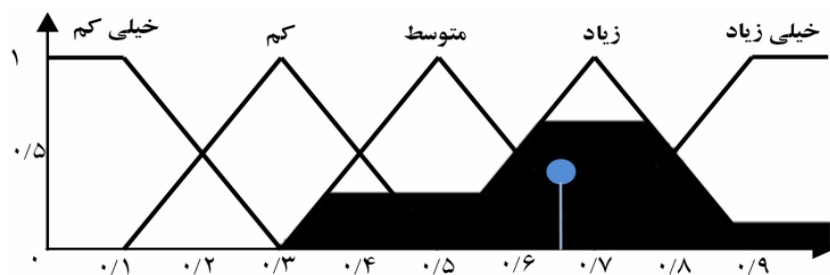
تلفیق داده‌های فازی با استفاده از قواعد «اگر - آنگاه» فازی مستلزم به کارگیری مدل تصمیم‌گیری است. در این تحقیق از روش حداقل - حداکثر ممدانی، به دلیل ساختار ساده و مؤثر آن و همچنین کاربرد گسترده آن در مسائل علمی استفاده شد.

۲-۳-۴ قطعی‌سازی داده‌ها

در این مرحله، میزان پتانسیل معدنی هر پیکسل به صورت یک یا چند عدد فازی محاسبه می‌شود. 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 ۹ خروجی برابر با ۰/۶۵ است.

جدول ۱۴. نمونه‌ای از قواعد «اگر- آنگاه» فازی برای پتانسیل معدنی اندیس مس چاه‌فیروزه

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



شکل ۹. نحوه محاسبه پتانسیل معدنی با استفاده از روش مرکز ثقل

۵- ارزیابی نتایج

کلاس‌بندی شده در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند. از ۱۸ داده تست که در فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی وارد نشده‌اند، برای ارزیابی استفاده شده است. گمانه‌های اکتشافی شماره ۲۵ الی ۴۲، همان داده‌های تست ارزیابی نتیجه هستند. با توجه به وضعیت گمانه‌های اکتشافی تست، حداکثر حالت‌ها برای امتیاز گمانه در حالت سه کلاس برابر با ۲۹ و در حالت پنج کلاس برابر با ۴۸ است. درصد انطباق نقشه پتانسیل معدنی با گمانه‌های موجود از رابطه (۱۰) به دست می‌آید. نتایج ارزیابی در جدول ۱۵ ارائه شده است.

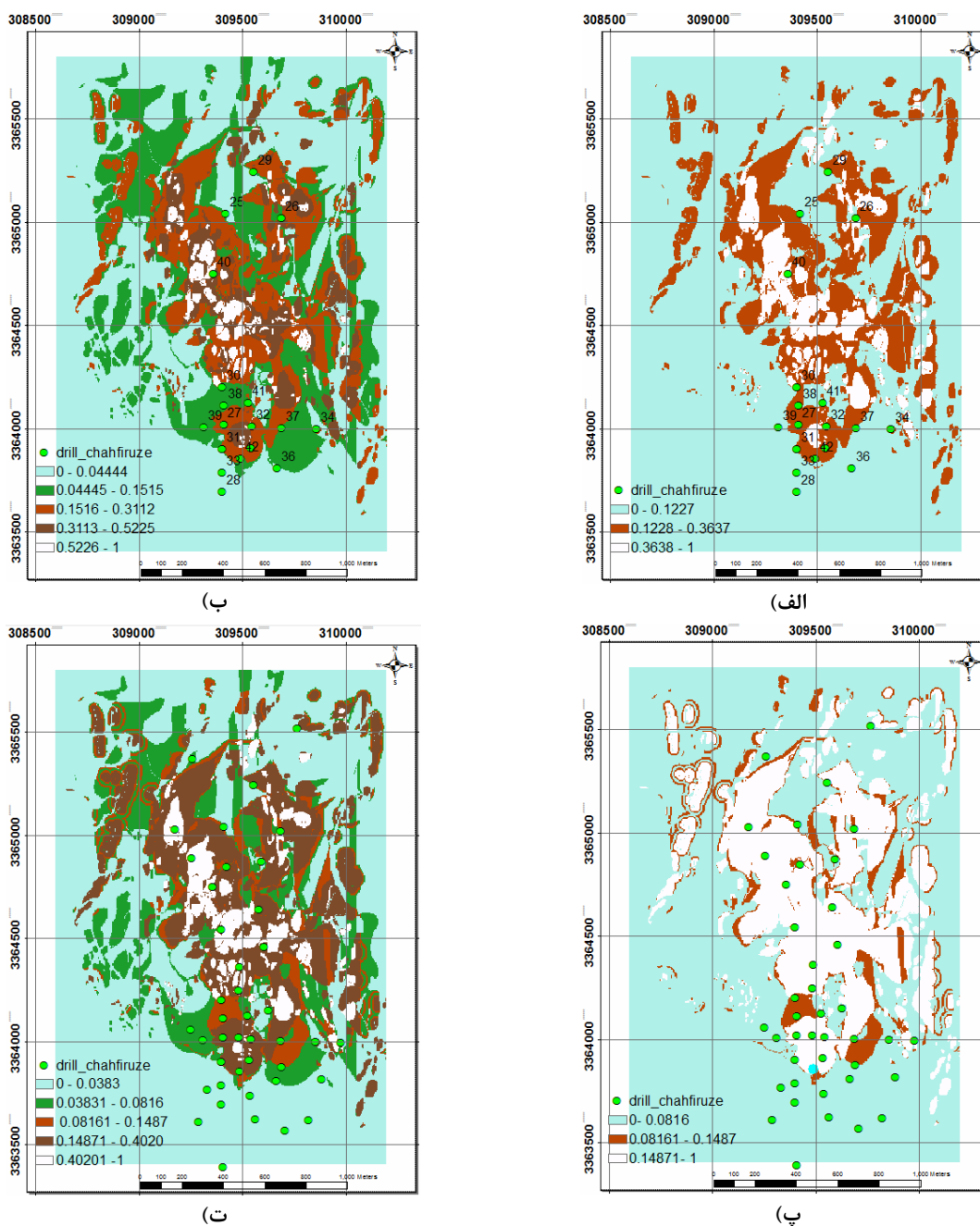
به منظور ارزیابی نقشه‌های پتانسیل معدنی تهیه شده، از انطباق مقادیر پیکسل‌های نقشه‌های پتانسیل تهیه شده در موقعیت مکانی گمانه‌های اکتشافی با نتایج حفاری آن گمانه‌ها استفاده گردید. وضعیت گمانه‌های اکتشافی از حیث میزان عیار در دسته‌بندی ۳ کلاس به صورت ضعیف، متوسط و قوی و در دسته‌بندی ۵ کلاس به صورت خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی تعیین گردید. از این رو به منظور انطباق نقشه‌های پتانسیل معدنی با گمانه‌ها، نقشه‌های پتانسیل معدنی نیز به صورت ۳ و ۵ کلاس، با دو روش Jenk و Manual کلاس‌بندی می‌شوند. نقشه‌های پتانسیل معدنی

$$\text{رابطه (۱۰)} = \frac{\text{جمع امتیازهای منفی - حداکثر حالت‌های ممکن برای امتیاز گمانه}}{\text{حداکثر حالت‌های ممکن برای امتیاز گمانه}} = \text{درصد انطباق}$$

جدول ۱۵. ارزیابی میزان تطابق گمانه‌های اکتشافی با نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده به وسیله روابط فازی و FIS

شماره گمانه	Jenk						Manual					
	سه کلاس			پنج کلاس			سه کلاس			پنج کلاس		
وضعیت گمانه	وضعیت در نقشه	ارزیابی	وضعیت گمانه	وضعیت در نقشه	ارزیابی	وضعیت گمانه	وضعیت در نقشه	ارزیابی	وضعیت گمانه	وضعیت در نقشه	ارزیابی	
۲۵	۲	۲	۰	۳	۳	-۱	۲	۲	۰	۳	۳	۰
۲۶	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۲	-۱
۲۷	۳	۲	-۱	۴	۳	-۱	۳	۳	۰	۴	۴	۰
۲۸	۲	۱	-۱	۳	۱	-۲	۲	۱	-۱	۳	۱	-۲
۲۹	۱	۱	۰	۲	۲	۰	۱	۲	-۱	۲	۲	۰
۳۰	۲	۲	۰	۳	۲	-۱	۲	۲	۰	۳	۳	۰
۳۱	۳	۲	-۱	۴	۲	-۲	۳	۳	۰	۴	۴	۰
۳۲	۳	۲	-۱	۴	۳	-۱	۳	۳	۰	۴	۴	۰
۳۳	۳	۱	-۲	۴	۱	-۳	۳	۱	-۲	۴	۱	-۳
۳۴	۲	۲	۰	۳	۲	-۱	۲	۲	۰	۳	۳	۰
۳۵	۳	۳	۰	۴	۴	۰	۳	۳	۰	۴	۴	۰
۳۶	۲	۱	-۱	۳	۱	-۲	۲	۱	-۱	۳	۲	-۱
۳۷	۱	۱	۰	۲	۲	۰	۱	۲	-۱	۲	۲	۰
۳۸	۲	۲	۰	۳	۲	-۱	۲	۲	۰	۳	۳	۰
۳۹	۱	۱	۰	۲	۱	-۱	۱	۱	۰	۲	۲	۰
۴۰	۲	۳	-۱	۳	۴	-۱	۲	۳	-۱	۳	۴	-۱
۴۱	۳	۲	-۱	۴	۳	-۱	۳	۳	۰	۴	۴	۰
۴۲	۳	۲	-۱	۴	۲	-۲	۳	۳	۰	۴	۴	۰
			۶۵/۵۲٪			۵۸/۳۳٪			۷۵/۸۶٪			۸۲/۳۳٪

مدل‌سازی اکتشاف ذخایر مس پورفیری با استفاده از سیستم‌های استنتاج‌گر و روابط فازی



شکل ۱۰. نقشه پتانسیل معدنی تهیه شده. الف) در حالت jenک ۳ کلاسه، ب) در حالت jenک ۵ کلاسه، پ) در حالت Manual ۳ کلاسه، و ت) در حالت Manual ۵ کلاسه

۶- نتیجه‌گیری

پایگاه دانش (شامل پایگاه قواعد فازی و مدل تصمیم‌گیری) امکان‌پذیر می‌شود، هرچند حجم محاسبات در آن بیشتر از روش‌های متداول است. در منطقه مطالعه شده، مناطق مستعد کانی‌سازی مس پورفیری در نواحی مرکزی و با گسترش شمالی -

در این تحقیق از مدلی شامل سیستم استنتاج‌گر و روابط فازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده شد. در این سیستم مدل‌سازی روابط پیچیده موجود در داده‌های اکتشافی با کمک متغیرهای زبان‌شناختی و

تدوین قوانین و توابع عضویت فازی و به‌کارگیری داده‌گمانه‌های موجود در منطقه برای وزن‌دهی به نقشه‌های فاکتور است. در این روش با استفاده از منطق فازی در قالب شبکه‌ای از عملگرهای فازی (Adeli et al., 2009; Karimi et al., 2008; An et al., 1991)، ضمن به‌کارگیری داده‌های اکتشافی در قسمت روابط فازی، با واردکردن ماهیت فازی داده‌های اکتشافی (در قالب نقشه‌های فاکتور فازی) و به‌کارگیری قوانین فازی، امکان مدل‌سازی دانش کارشناسی - که در اکتشافات معدنی اهمیت بسیار دارد - فراهم می‌گردد.

تعیین توابع عضویت و قوانین فازی برای مدل‌سازی صحیح انباشته‌های معدنی همواره آسان نیست. به‌رغم انجام تست‌های بسیار، هنوز نمی‌توان تعیین کرد که چه نوع و چه تعداد تابع عضویت نیاز است. در صورت وجود تعداد کافی گمانه اکتشافی، می‌توان با توزیع مناسب در منطقه، نوع، تعداد و پارامترهای توابع عضویت فازی را با روش‌های داده‌مبنا به‌دست آورد. در مرحله استنتاج فازی نیز امکان تعیین قواعد فازی به کمک روش‌های داده‌مبنایی - مانند الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی - وجود دارد. در این تحقیق با هدف مدل‌سازی دانش کارشناسی و به‌دلیل نبود تعداد کافی گمانه اکتشافی، موارد مذکور به‌صورت دانش‌مبنا تعیین گردید. در صورت استفاده از سیستم استنتاج‌گر فازی برای تلفیق تمامی نقشه‌های فاکتور سطح اول و در نتیجه افزایش تعداد قوانین فازی، می‌توان از روش‌هایی مانند حذف قوانین مشابه یا قوانین وابسته برای کاهش تعداد قوانین فازی نیز استفاده کرد.

۷- منابع

Adeli Sarcheshmeh, A., Karimi, M., Bahroudi, A. & Elyasi, G., 2009, **Determination of Drilling Point of the Chah Firoozeh Prospect Using Fuzzy Logic in GIS**, Journal of Science, University of Tehran, 35, PP. 85-97 (Persian).

جنوبی تعیین شده‌اند و نقشه پتانسیل معدنی تهیه‌شده در دسته‌بندی ۵ کلاس به‌روش Manual، بیشترین تطابق را با گمانه‌های اکتشافی منطقه دارد. میزان تطابق مدل مذکور ۸۳/۳۳ درصد است.

در روش ارائه‌شده، نقشه‌های فاکتور اولیه با توابع عضویت فازی و متغیرهای زبان‌شناختی، فازی می‌شوند و نیازی به فازی‌سازی نقشه‌های فاکتور سطح دوم - که ورودی سیستم استنتاج‌گر فازی هستند - وجود ندارد. افزون بر این، از نظر کارشناسان، تعریف متغیرهای زبان‌شناختی و توابع عضویت فازی برای نقشه‌های فاکتور اولیه ملموس‌تر و ساده‌تر از تعریف پارامترهای مذکور برای نقشه زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک است. در مرحله استنتاج فازی، هرچه تعداد نقشه‌های فاکتور ورودی زیادتر باشد، حجم محاسبات بیشتر می‌شود. از این‌رو دسته‌بندی ورودی‌ها موجب کاهش تعداد قوانین پایگاه قواعد می‌شود.

روابط نامتقارن فازی، روابط حاکم بر فاکتورهای مؤثر بر کانی‌سازی ذخایر معدنی را دقیق‌تر نشان می‌دهد. با توجه به وزن تعیین‌شده برای نقشه‌های فاکتور با استفاده از آنالیز رابطه نامتقارن فازی، بین نقشه‌های فاکتور سطح اول، نقشه عیار عنصر مولیبدن دارای بیشترین تأثیر و نقشه فاکتور فلزی دارای کمترین تأثیر است.

در مدل ارائه‌شده در این تحقیق هم از دانش کارشناسی و هم از داده‌های موجود استفاده شده است. در مقابل، روش‌هایی مانند عملگرهای فازی (Karimi et al., 1991; An et al., 2008) و گربه وحشی (Carranza, 2010; Hale, 2002) بدون توجه به داده‌های موجود، نقشه پتانسیل معدنی را تهیه می‌کنند و روش‌هایی همچون شبکه عصبی مصنوعی (Porwal et al., 2010) و وزن‌های نشانگر (Porwal et al., 2003)، و ماشین‌برداری پشتیبان (Zuo & Carranza, 2010)، بدون پرداختن به دانش کارشناسی فقط از داده‌های گمانه‌های اکتشافی منطقه کمک می‌گیرند. ویژگی مهم مدل ارائه‌شده، استفاده از دانش و تجربه کارشناسان در

- An, P., Moon, W. & Rencz, A., 1991, **Application of Fuzzy Set Theory to Integrated Mineral Exploration**, Canadian Journal of Exploration Geophysics, 27, PP. 1-11.
- Antonio M.A., 2000, **Ore Geology Introduction and Industrial Ores**, Translated by Farid, M. et al., Shiraz University Publication.
- Bonham Carter, G., 1994, **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**, Pergamon, Ontario, Canada, 398 p.
- 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. & Hale, M., 2001, **Wildcat Mapping of Gold Potential, Baguio District**, Philippines. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section B—Applied Earth Science) 111, PP. 100-105.
- Carrenza, E., 2010, **Improved Wildcat Modelling of Mineral Prospectivity**, Resource Geology, 60, PP. 129-149.
- Esfehani pour, R., Taghizadeh, H., Iranmanesh, M. & Khorasani, K., 2005, **Geochemical Explorations Using Soil Sampling Method in the Chah Firoozeh Area**, National Iranian Copper Industries Co, Exploration and Engineering development Division (Persian).
- Hajmola-ali, A., 2006, **Final Report of Geology and Alteration in the Chah Firoozeh Area in 1:1000 Scale**, National Iranian Copper Industries Co, Exploration and Engineering development, Kan Iran Co (Persian).
- Karimi, M., Menhaj, M. & Mesgari, M., 2008, **Mineral Potential Mapping of Copper Minerals Using Fuzzy Logic in GIS Environment**, Beijing, China, ISPRS 2008.
- Karimi, M., Mesgari, M.S., Sharifi, M.A., 2009, **Modeling Ecological Capability, Using Fuzzy Logic (Case study area: Bprkhar and Meymeh townships)**, Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, Vol. 1, PP. 17-38 (Persian).
- Kazemi Mehrnia, A., Alirezaei, S. & Rasa, A., 2006, **Geological, Alteration and Geochemical Characteristics and Study Leached Cap of Chah Firoozeh Deposit (Northwest belt of Kerman)**, Twenty-fifth Meeting of Earth Sciences, Geological Survey of Iran (Persian).
- Kaufmann, A., 1975, **Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets: V. 1**, NY, Academic Press, 416p.
- Klir, J.G., Yuan, B., 2007, **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**, Published by Prentice of India Private limited., 574p.
- Menhaj, M., 2008, **Fuzzy Computing: Artificial Intelligence**, The first edition, Danesh Negar publication 628p (persian).
- Oskoei, R., 2005, **Geophysical Studies in Chah Firoozeh Region**, National Iranian Copper Industries Co., Exploration and engineering development Division, Saman Kaveh Company (Persian).

- Porwal, A., Carranza, E.M. & Hale, M., 2004, **A Hybrid Neuro-Fuzzy Model for Mineral Potential Mapping**, *Mathematical Geology*, 36 (7), PP. 803-825.
- 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, PP. 156-171.
- 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, PP. 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 insitute for geo information science and earth observation enschede*, The Netherlands.
- Zimmermann, H.J., 1991, **Fuzzy Set Theory and Its Applications**, Kluwer Academic Publishers, Boston, 399p.
- 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 Hybird Method Combining Multilevel Fuzzy Comperhensiv Evaluation with Asymmetric Fuzzy Relation Analysis to Mapping Prospectivity**, *Ore Geology Reviews*, 35, PP. 101-108.