

# کاربرد روش‌های تلفیقی فازی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه استنتاج گر فازی در اکتشاف کانسار تیتانیوم خانیک - غازان

حسن فیضی انهر<sup>۱</sup>، سهیلا اصلانی<sup>۲</sup>، فرهنگ علی یاری<sup>۳</sup>، عباس بحرودی<sup>۲</sup> و عبدالحمید سرتیپی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی کشور، مدیریت مرکز شمال باختری، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

## چکیده

کانسار تیتانیوم خانیک - غازان در فاصله ۸۲ کیلومتری شمال غرب ارومیه، بخش شمالی پهنه سندج - سیرجان واقع شده است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی مناطق پتانسیل دار و تهیه نقشه پتانسیل معدنی در بخش سنگی کانسار خانیک - غازان به کمک سامانه استنتاج گر فازی (Fuzzy Inference System) است. پس از تهیه نقشه‌های فاکتوری، مراحل اصلی این پژوهش شامل فازی سازی نقشه‌های فاکتوری با استفاده از متغیرهای زبانی و توابع عضویت مناسب، ترکیب نقشه‌های فاکتور با کمک استنتاج فازی (به وسیله ایجاد پایگاه قوانین اگر - آنگاه فازی)، شناسایی مناطق مستعد و تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از قطعی سازی خروجی است. همچنین، طی این تحقیق، به منظور کنترل صحت داده‌های به دست آمده سعی شد، دو روش نوین تلفیقی دیگر شامل روش‌های منطق فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی نیز به کار گرفته شود. نتایج به دست آمده از روش‌های مذکور تأیید کننده و مکمل یکدیگر بوده و مناطق پتانسیل کانی سازی را نمایان می‌کند. بررسی‌های اکتشافی انجام گرفته از جمله شواهد صحرایی رخنمون‌ها، کانه‌زایی و نمونه برداری از رخنمون‌های سنگی به تعداد ۸۰ نمونه در محدوده مورد مطالعه، مؤید این موضوع است. بر اساس نتایج حاصل، بخش مرکزی محدوده مورد مطالعه برای ادامه عملیات اکتشافی به خصوص اکتشافات عمقی به روش حفاری مغزه گیری مناسب تشخیص داده شد.

**کلیدواژه‌ها:** کانی سازی تیتانیوم، سامانه استنتاج گر فازی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، منطق فازی، پتانسیل یابی معدنی، خانیک - غازان.

\* نویسنده مسئول: فرهنگ علی یاری

E-mail: F.aliyari@uut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

اکتشاف منابع معدنی فرایند پیچیده‌ای است که نیازمند در نظر گرفتن مجموعه داده‌های مکانی مختلف (ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دورسنجی و زمین شناسی و ...) از منطقه مورد مطالعه است که هدف نهایی آن اکتشاف نوع خاصی از کانه‌زایی است. جهت رسیدن به این هدف، می‌بایست داده‌های مکانی مختلف برای مدل سازی پتانسیل معدنی جمع‌آوری، آنالیز و تلفیق شوند (Bonham Carter, 1994; Carranza, 2008). روش‌های دانش مینا و داده مینا دو نوع روش اصلی مدل سازی پتانسیل معدنی برای تلفیق لایه‌های وزن دار مختلف جهت شناسایی نواحی امید بخش نوع خاصی از کانه‌زایی هستند (Bonham Carter, 1994; Carranza, 2008). روش‌های داده مینا، احتیاج به دانش قبلی و یا به اصطلاح احتمال پیشین دارند. این دانش از ذخایر شناخته شده کانه‌زایی برای منطقه مورد مطالعه بیان می‌شوند. ارتباط فضایی بین داده‌های ورودی (نقشه‌های شاهد) و موقعیت مکانی ذخایر کانه‌زایی برای تعیین اهمیت (وزن هر یک از نقشه‌ها) استفاده می‌شود (فیضی انهر، ۱۳۹۶). راهکارهای دانش مینا بر اطلاعات و دانش زمین شناسان و متخصصان علوم زمین، جهت وزن دهی و تعیین اهمیت هر یک از لایه اطلاعات مورد استفاده (نقشه‌های شاهد) در یک مدل اکتشافی معین تکیه دارند. این روش بیشتر بر پایه دانش و ادراک انسانی قرار گرفته است، اما این مزیت را دارد که دانش و تجربه متخصصین را در فرایندهای مهندسی وارد می‌کند (فیضی انهر، ۱۳۹۶) که در این پژوهش از روش‌های منطق فازی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه استنتاج گر فازی که همگی شامل روش‌های دانش مینا هستند، استفاده شده است.

## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی

محدوده اکتشافی تیتانیوم خانیک - غازان در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ سرو (گنگجین) (آزدری و همکاران، ۱۳۸۳) در محدوده جغرافیایی ۴۴° ۳۷' ۵۱" تا ۴۴° ۴۵' ۵۲" طول شرقی و ۳۴° ۵۷' ۳۴" تا ۳۴° ۵۹' ۱۰" عرض شمالی و ۸۲ کیلومتری شمال

غرب شهرستان ارومیه واقع است. این محدوده در حال حاضر، شامل دو بخش سنگی و پلاسری است که در این تحقیق بخش سنگی غازان مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. محدوده مورد مطالعه، در شمال غرب پهنه سندج - سیرجان (Stocklin, 1968) و یا بخشی از پهنه خوی - ماکو (نبوی، ۱۳۵۵) در محل برخورد دو پهنه ساختاری ایران مرکزی و سندج - سیرجان جای گرفته است (حقی پور و آقاباتی، ۱۳۶۷). واحدهای سنگی کانسار خانیک - غازان براساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰ شامل گابروهای منتسب به کربونیفر پسین، مرمر و آمفیبولیت‌های منتسب به پس از کربونیفر پسین، گدازه‌های بازالتی و مواد پیرولاستیک منتسب به پلیستوسن و آبرفت‌های کواترنری هستند (علیپور و همکاران، ۱۳۹۵) (شکل ۱).

## ۳- روش مطالعه

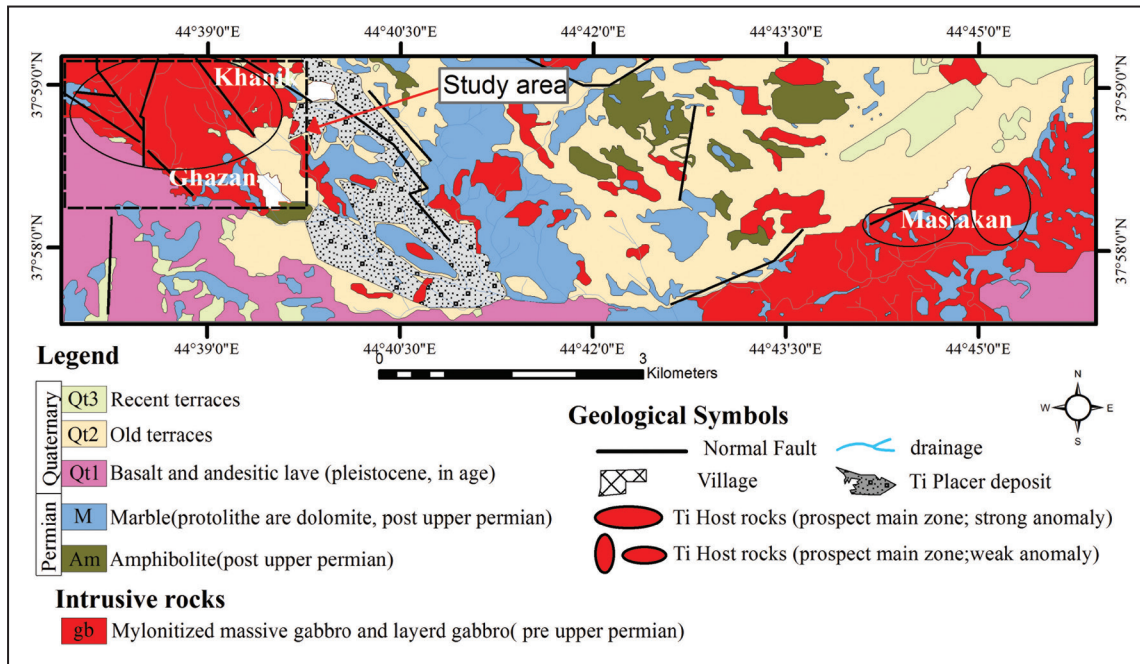
در این پژوهش، به منظور تلفیق لایه‌های اکتشافی، از سه روش منطق فازی، تحلیل سلسله مراتبی و سامانه استنتاج گر فازی استفاده شده است. تلفیق لایه‌های اکتشافی در محیط ArcMap صورت گرفته است. در ادامه روش‌های تلفیق لایه‌های اکتشافی به صورت اجمالی توضیح داده شده است.

### ۳-۱. روش منطق فازی

روش منطق فازی در سال ۱۹۶۰ توسط پرفسور لطفعلی عسگرزاده مطرح شد. در بسیاری مواقع نمی‌توان در مورد بود یا نبود پدیده خاصی تصمیم گیری کرد و بنابراین یک مرز تدریجی وجود دارد. منطق فازی هم دارای عملگرهایی است که در تصمیم گیری‌ها از آنها استفاده می‌شود.

- عملگر فازی AND که با عملگر بولین اشتراک معادل است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\text{combinatio}} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$$



شکل ۱- نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰ محدوده اکتشافی خانیک- غازان (با تغییر از شرکت توسعه و سرمایه گذاری آتیه سپیدآسیا، ۱۳۹۳).

همانگونه که مشاهده می‌شود، عملگر گاما ترکیبی است از عملگرهای جمع و ضرب فازی که در آن گاما پارامتری بین صفر و یک است. در هنگامی که گاما صفر باشد، این عملگر همان ضرب فازی و در هنگامی که گاما برابر یک است، این عملگر برابر با عملگر جمع فازی خواهد بود. این پارامتر مشخص می‌کند که رفتار واقعی عملگر، چگونه بین حالت AND و OR فازی تغییر کند (Ying, 2000).

### ۳-۲. روش تحلیل سلسله مراتبی AHP

روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی در دهه هفتاد میلادی توسط آل ساعتی ابداع و پیشنهاد شد و در ۱۹۷۰ توسط توماس توسعه داده شده است. AHP یک روش تصمیم‌گیری ریاضی است که امکان ارزیابی رتبه‌ای وزن‌ها را فراهم می‌آورد. در این روش راه‌حل بهینه برای حل یک مسئله به وسیله نمایش ساده‌ای از یک مدل سلسله مراتبی حاصل می‌شود (Najafi et al., 2014). AHP بر سه فرض استوار است: - ترجیح برای انتخاب‌های مختلف بستگی به انتخاب‌های مجزایی دارد که می‌توان آنها را مجزای از هم ارزیابی کرد و به هر یک امتیازهای عددی نسبت داد. - امتیاز برای یک معیار مشخص را می‌توان از زیر معیارها استخراج کرد. در این حالت معیار می‌تواند در یک سلسله مراتبی قرار گیرد و امتیاز در هر سطح سلسله مراتبی را به صورت مجموع وزن‌دار امتیاز در سطوح پایین‌تر محاسبه کرد. - در یک سطح مشخص امتیازهای مناسب را می‌توان با استفاده از مقایسه جفتی به دست آورد.

در این روش قبل از هر کاری باید اطلاعات لایه‌ها استاندارد شود. بعد از این مرحله ترتیبی از جمعیت شاخص‌ها تشکیل می‌شود، برای تشکیل این ماتریس ابتدا باید به شاخص‌ها وزن داده شود، بعد از این مرحله امتیاز هر شاخص با هم جمع می‌شود و سپس نسبت به حاصل جمع تمام شاخص‌ها محاسبه می‌شود. بدین ترتیب وزن هر یک از شاخص‌ها به دست می‌آید، بعد از ضرب وزن هر شاخص در تعداد همان شاخص امتیاز شاخص‌های هر مکان با هم جمع می‌شود و مکان‌ها بر اساس امتیازات به دست آمده سطح‌بندی می‌شوند. روال کار مدل AHP با مشخص کردن عناصر و تصمیم‌گیری اولویت‌دادن به آنها آغاز می‌شود. این عناصر شامل شیوه‌های مختلف انجام کار و اولویت دادن به سنج‌ها یا ویژگی‌ها است که شامل ساختن سلسله مراتبی، تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیر معیارها، وزن دادن به جایگزین‌ها، ترکیب ضریب اهمیت گزیننده‌ها، ترکیب وزن‌ها و آزمایش سازگاری هستند (Houshyar et al., 2014).

که به ترتیب، مقادیر عضویت فازی برای نقشه‌های A و B در یک نقطه خاص هستند. تأثیر این عملگر آن است که خروجی نقشه توسط کوچک‌ترین مقدار عضویت فازی موجود در هر نقطه کنترل شود. عملگر فازی AND در هنگامی کارا است که دو یا تعداد بیشتری از شواهد برای اثبات یک فرضیه باید به همراه هم وجود داشته باشند برای اینکه فرضیه صحیح باشد.

- عملگر فازی OR معادل عملگر بولین اجتماع است و در هنگامی که مقادیر عضویت فازی خروجی به وسیله ماکزیمم مقدار عضویت هر نقشه ورودی برای یک منطقه خاص کنترل می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملگر OR فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

این عملگر در هنگامی که شواهد مطلوب برای حضور کانی‌سازی کم هستند و حضور هر یک از شواهد به تنهایی می‌تواند برای نشان دادن مطلوبیت کافی باشد، استفاده می‌شود.

- عملگر ضرب فازی که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_{\text{combination}} = \prod_{i=1}^n \mu_i$$

که  $\mu_i$  مقدار عضویت فازی برای  $i$  امین نقشه‌ای است که باید ترکیب شود. مقدار عضویت فازی حاصله به سمت کوچک شدن تمایل دارد که این امر ناشی از ضرب چندین عدد کوچک‌تر از یک است. در نتیجه خروجی همواره کوچک‌تر یا مساوی کمترین مقدار عضویت فازی داده‌های ورودی است بنابراین اثر این عملگر کاهش‌دهنده است.

- عملگر جمع فازی که مکمل عملگر ضرب فازی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

- نتیجه حاصل از این عملگر همواره بزرگ‌تر یا مساوی مقادیر شرکت‌کننده است، بنابراین اثر افزایشی دارد. دو یا چند نشانه که همگی یک فرضیه را تأیید می‌کنند، می‌تواند منجر به تقویت اثر یکدیگر شوند و مقدار خروجی نشانه قوی‌تری برای اثبات فرضیه خواهد بود.

- عملگر گامای فازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

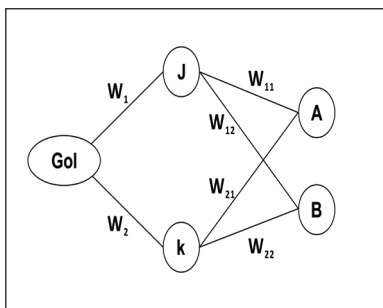
$$I.R = \frac{II}{I.I.R}$$

رابطه ۲)

که در آن n ابعاد ماتریس مقایسه‌ای،  $\lambda_{max}$  بردار ویژه ماتریس مقایسه‌ای و I.I.R شاخص ناسازگاری یک ماتریس تصادفی با ابعاد ماتریس مقایسه‌ای هستند. نهایتاً I.R شاخص نسبت ناسازگاریست. اگر نسبت ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، مقایسه سازگار است و در غیر این صورت مقایسه باید دوباره صورت گیرد. وزن نهایی هریک از گزینه‌ها و یا زیرمعیارها در یک سلسله مراتبی با استفاده از روابط ۳ و ۴ حاصل می‌شود (شکل ۲). مجموع وزن‌های محاسبه شده برای هر ماتریس مقایسه‌ای برابر یک خواهد بود (Saaty, 1990).

$$W_A = W_{11} W_1 + W_{21} W_2 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$W_B = W_{12} W_1 + W_{22} W_2 \quad \text{رابطه ۴}$$



شکل ۲- محاسبه وزن نهایی در یک سلسله مراتبی AHP.

مقدار عددی	ترجیحات (فضاوت شفاهی)	
۹	(Extremely Preferred)	کاملاً مرجع یا کاملاً مهمتر یا کاملاً مطلوبتر
۷	(Very Strongly Preferred)	ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	(Strongly Preferred)	ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	(Moderately Preferred)	کمی مرجع یا کمی مهمتر یا کمی مطلوبتر
۱	(Equally Preferred)	ترجیح با اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۰.۲ و ۰.۴ و ۰.۸		ترجیحات بین فواصل قوی

جدول ۱- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی.

### ۳-۳. سیستم‌های استنتاج گر فازی (FIS)

داده‌ها انجام می‌گیرد. برای تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی معمولاً از توابع عضویت استفاده می‌شود. باید توجه داشت که پیش از فازی‌سازی داده‌ها، به منظور امکان تبدیل داده‌ها به صورت بدون واحد و استاندارد، با تغییر دامنه متغیرها به بازه صفر و یک، عادی‌سازی داده‌ها انجام می‌گیرد. اعداد فازی مورد استفاده باید دو ویژگی عادی بودن و تحدب را داشته باشند. به طور 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 (Porwal et al., 2003). برای نمونه عدد فازی دوزنقه‌ای را که به صورت چهارتایی  $M = (a, b, c, d)$  بیان می‌شود، می‌توان با کمک رابطه ۵ بیان کرد.

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-b}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{b-x}{b-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad \text{رابطه ۵}$$

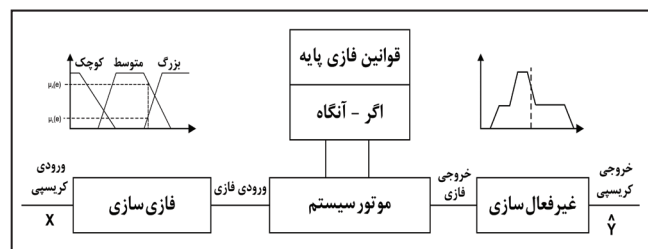
شکل ۳- سیستم استنتاج فازی.

تشکیل ماتریس مقایسه زوجی در فرایند AHP پس از تشکیل سلسله مراتبی، عناصر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل می‌شود. سپس با استفاده از این ماتریس اقدام به محاسبه وزن نسبی عناصر می‌شود. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیران از قضاوت‌های شفاهی استفاده خواهند کرد، به گونه‌ای که اگر عنصر i با عنصر j مقایسه شود، تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت عنصر i بر z یکی از حالات موجود است. این قضاوت‌ها توسط ساعتی به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شده‌اند (جدول ۱) (قدسی پور، ۱۳۸۸). باید توجه داشت که در مقایسه زوجی، ترجیح هر عنصر بر خودش برابر یک است. این روش میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد که از مزایای ممتاز این تکنیک در تصمیم‌گیری چند معیاره است. همچنین به منظور کاهش کاستی‌های موجود در اختصاص عدد به مقایسه‌های کیفی فرایند تحلیل سلسله مراتبی، اعداد فازی به کار گرفته می‌شود. نسبت سازگاری را می‌توان با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه کرد:

$$II \text{ (Inconsistency Index)} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه ۱}$$

استنتاج فازی فرایند نگاشت مجموعه ورودی داده شده به یک مجموعه خروجی با استفاده از منطق فازی است. به عبارتی، سامانه استنتاج گر فازی ابزاری قدرتمند به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی داده‌های اکتشاف ذخایر معدنی با استفاده از منطق فازی و قوانین زبان‌شناختی فازی است. از سیستم استنتاج گر فازی به عنوان یک روش دانش پایه، می‌توان در تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده کرد. مهم‌ترین مزیت استفاده از FIS این است که سیستم با استفاده از زبان طبیعی و مقادیر زبانی ساخته می‌شود، بنابراین زمین‌شناس اکتشافی می‌تواند به صورت مستقیم مقادیر را درک کند. این کار سیستم را شفاف‌تر می‌کند (علائی مقدم، ۱۳۹۰). هر مدل FIS به راحتی توسط زمین‌شناس اکتشافی برای دربرگیری ایده‌های جدید و برای دربرگیری متغیرهای جدید قابلیت به روز شدن دارد. روش FIS به صورت مؤثری در دو منطقه سبز و قهوه‌ای قابلیت استفاده را دارد زیرا نیازمند مثال‌های شناخته شده کانی‌زایی به عنوان داده آموزش یافته ندارد (Zadeh, 1965). یک سیستم استنتاج-گر فازی از سه قسمت عمده تشکیل می‌شود (شکل ۳): (۱) فازی‌سازی؛ (۲) موتور استنتاج گر فازی؛ (۳) خروج از حالت فازی.

فازی‌سازی: با تبدیل متغیرهای حقیقی به متغیرهای زبانی، مرحله فازی‌سازی



موجود است:

- ورودی‌ها به سیستم دارای مقادیر عددی هستند، و از روش استنتاجی و «ماکزیمم - مینیمم» استفاده می‌شود.
- ورودی‌ها به سیستم دارای مقادیر عددی هستند، و از روش استنتاجی و «ماکزیمم - ضرب» استفاده می‌شود.

همانطوری که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، دو ورودی کریسیبی با دو قانون موجود است که، محل تقاطع تابع عضویت با ورودی‌های کریسیبی عمل فازی‌سازی اتفاق افتاده است که این عمل برای قانون دوم نیز انجام شده است، سپس با عملگر AND مینیمم دو ورودی را در دو قانون به دست آورده که این عمل طول قانون را نیز نمایش می‌دهد. سپس به وسیله عملگر OR ماکزیمم دو خروجی انفرادی را محاسبه کرده و خروجی فازی نهایی به دست می‌آید (Ying, 2000).

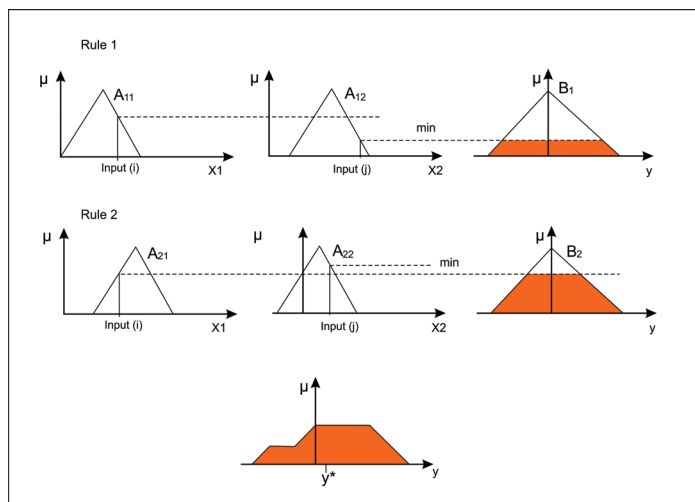
- **غیر فازی‌سازی (قطعی‌سازی):** خروجی موتور استنتاج فازی به طور معمول شامل یک یا چند عدد فازی است که باید به یک عدد حقیقی تبدیل شود، تا قابل درک و تفسیر شود. این کار توسط مرحله قطعی‌سازی داده‌ها انجام می‌شود. روش‌های زیادی مانند مرکز ثقل، میانگین وزن‌دار، بیشترین میانه، مرکز جمیع و بزرگ‌ترین مرکز سطوح برای این مرحله وجود دارد که در این پژوهش از روش مرکز ثقل استفاده شده است (Ying, 2000).

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 مراجعه کرد (Ying, 2000). مدل‌سازی داده‌های فازی در GIS این امکان را فراهم می‌سازد که با استفاده از عملیات هم‌پوشانی، تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره فازی را عملیاتی کرد.

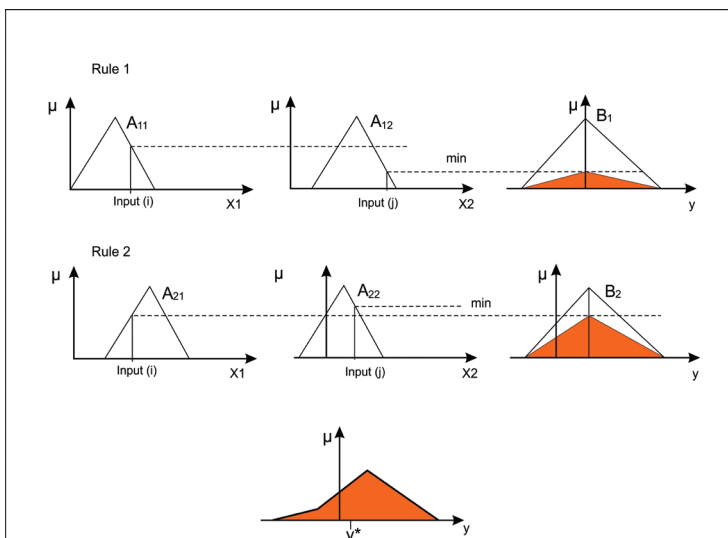
- **موتور استنتاج فازی:** مرحله دوم در سامانه‌های استنتاج‌گر فازی، تلفیق داده‌های فازی با به کارگیری موتور استنتاج فازی است. تلفیق داده‌ها با ایجاد پایگاه داده‌ای از قوانین به فرم اگر-آنگاه فازی و به کارگیری مدل تصمیم‌گیری انجام می‌پذیرد. مدل‌های ممدانی و سوگنو به عنوان متداول‌ترین مدل‌ها در این سیستم مطرح هستند (Ying, 2000).

- **مدل ممدانی:** سیستم استنتاج فازی ممدانی اولین بار توسط ممدانی و اصلیلان در سال ۱۹۷۵ بیان شد، که بیشترین استفاده را در بین دیگر سیستم‌ها دارد (Karimi et al., 2004). فرض می‌شود که سیستم ساده با دو قانون موجود است که هر قانون دو مقدمه و یک نتیجه دارد، که این روند می‌تواند بسط داده شود و چندین مقدمه و چندین نتیجه داشته باشد. فرم ممدانی به شکل زیر است:

اگر  $x_1$  is  $A_1$  AND  $x_2$  is  $B$  آنگاه  $y$ . که هر دو مقدمه و نتیجه، به صورت مجموعه فازی هستند. در ارائه زیر، دو وضعیت برای دو ورودی سیستم ممدانی



شکل ۴- مدل‌های گرافیکی استنتاج ماکزیمم - مینیمم با ورودی‌های کریسیبی.



شکل ۵- مدل‌های گرافیکی استنتاج ماکزیمم - ضرب با ورودی‌های کریسیبی.

#### ۴- لایه‌های اکتشافی

در این پژوهش، به منظور فرایند تلفیق لایه‌های اکتشافی، فاکتورها مربوط به کانی‌سازی به دو سری نقشه‌های فاکتور سطح اول و نقشه‌های فاکتور سطح دوم، تبدیل شده است. نقشه‌های فاکتور سطح اول، با استفاده از روش فازی و عملگرهای فازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تلفیق شده و سپس نقشه‌های فاکتورهای سطح دوم (نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک) تهیه و ترسیم شده است. سپس، عملیات تلفیق به روش سیستم استنتاج گر فازی، منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی بر روی این فاکتورها انجام گرفته است (جدول ۲). خروجی همه نقشه از نرم‌افزار ArcGIS در یک چارچوب معین و به فرمت تیف در پیکسل‌های ۵×۵ متر تهیه شده است.

#### ۴-۱. نقشه نهایی فاکتور زمین‌شناسی

جهت تهیه نقشه زمین‌شناسی از تلفیق نقشه‌های فاکتور تکنونیک و سنگ‌شناسی منطقه استفاده شده است.

– **نقشه فاکتور تکنونیک:** در منطقه مورد مطالعه، دو سیستم گسلی یکی با روند تقریبی شمال شرق – جنوب غرب و دیگری با امتداد شمال غرب – جنوب شرق مطالعه و بررسی شده‌اند. برای اهمیت دادن (وزن‌دهی) به گسل‌های نوع اول، گسل‌ها بر اساس روند عمومی خود کلاس‌بندی شده‌اند. بر این اساس به گسل‌هایی با امتداد شمال غرب – جنوب شرق بیشترین امتیاز تعلق گرفته و به گسل‌های با روند شمال شرق – جنوب غرب و شمالی – جنوبی به ترتیب امتیاز پایین‌تری نسبت به گسل‌های گروه اول تعلق گرفته است (جدول ۳).

جدول ۳- روندهای عمده گسل‌های منطقه مورد مطالعه و نحوه وزن‌دهی به آنها.

لايه	نوع کلاس	کلاس‌ها	وزن کلاس‌ها
گسل	بافر بندی ۴۰ متری گسلها بر اساس جهت	شمال غرب - جنوب شرق (A)	۹
		شمال شرق - جنوب غرب (B)	۷
		شمالی - جنوبی (C)	۴
		سایر (D)	۲
گسل	بافر ۴۰ متری	بافر ۵ متری	۹
		بافر ۱۰ متری	۷
		بافر ۲۰ متری	۴
		بافر ۳۰ متری	۳
		بافر ۴۰ متری	۲

جدول ۲- متغیرهای سطح اول و دوم تعریف شده جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی.

نقشه‌های فاکتور سطح دوم	نقشه‌های فاکتور سطح اول
زمین‌شناسی	جهت گسل‌ها
	بافر گسل‌ها
	چگالی گسل‌ها
	تقاطع با توجه جهت گسل‌ها
	بافر تقاطع گسل‌ها
	چگالی تقاطع گسل‌ها
دگرسانی	سنگ‌شناسی
	اکتیولیت، کلریت، اپیدوت، آمفیبول، گوتیت، هماتیت
ژئوشیمیایی	عیار تیتانیم
	عیار آهن
ژئوفیزیک	سیگنال تحلیلی

تکنونیک و سنگ‌شناسی با عملگر گاما به ارزش ۰/۸۵ استفاده شد (شکل ۶-ج).

#### ۴-۲. نقشه نهایی فاکتور دگرسانی

به منظور وزن‌دهی به مناطق مختلف دگرسانی، با توجه به موقعیت این پهنه‌ها در کانسارهای مرتبط با سنگ‌های مافیک و اولترامافیک و نیز کانه‌زایی تیتانیم، بیشترین وزن به دگرسانی گوتیت، هماتیت و سپس، دگرسانی‌های آمفیبول، اکتینولیتی، اپیدوتی و کلریتی اختصاص یافته است (جدول ۶). به دلیل انتخاب وزن‌های بالاتر به کلاس‌هایی با اهمیت بیشتر، از تابع Large جهت انجام فرایند فازی‌سازی استفاده شده است (شکل ۷-الف).

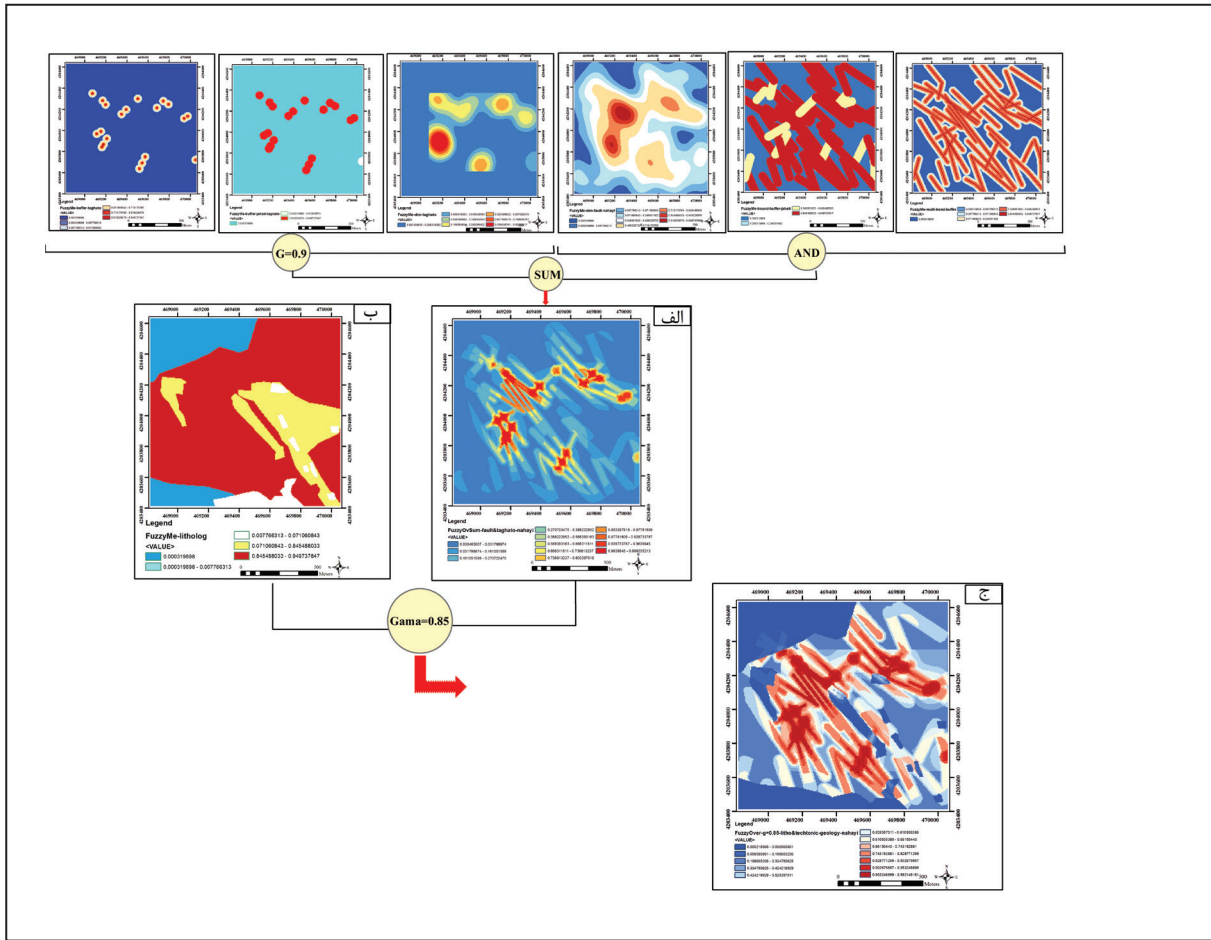
#### ۴-۳. نقشه نهایی ژئوشیمی

به دلیل همبستگی بالا و ارتباط ژنتیکی دو عنصر تیتانیم و آهن در کانسارهای تیتانومگنتیتی، برای تهیه لایه ژئوشیمی از تلفیق دو نقشه آهن و تیتانیم استفاده شده است. به منظور تلفیق این دو عنصر از عملگر OR استفاده شد، که دلیل این امر اهمیت حضور هر دو عنصر در این نوع کانسارها است. زیرا این عملگر، باعث پررنگ‌تر شدن کوچک‌ترین نشانه با اهمیت برای تشکیل کانسار می‌شود. همچنین، به منظور اختصاص وزن‌های بیشتر به نقاط پرعیار (جدول ۷)، طی فرایند فازی‌سازی این فاکتورها، از تابع عضویت Large استفاده شد (شکل‌های ۷-ب، ج و د).

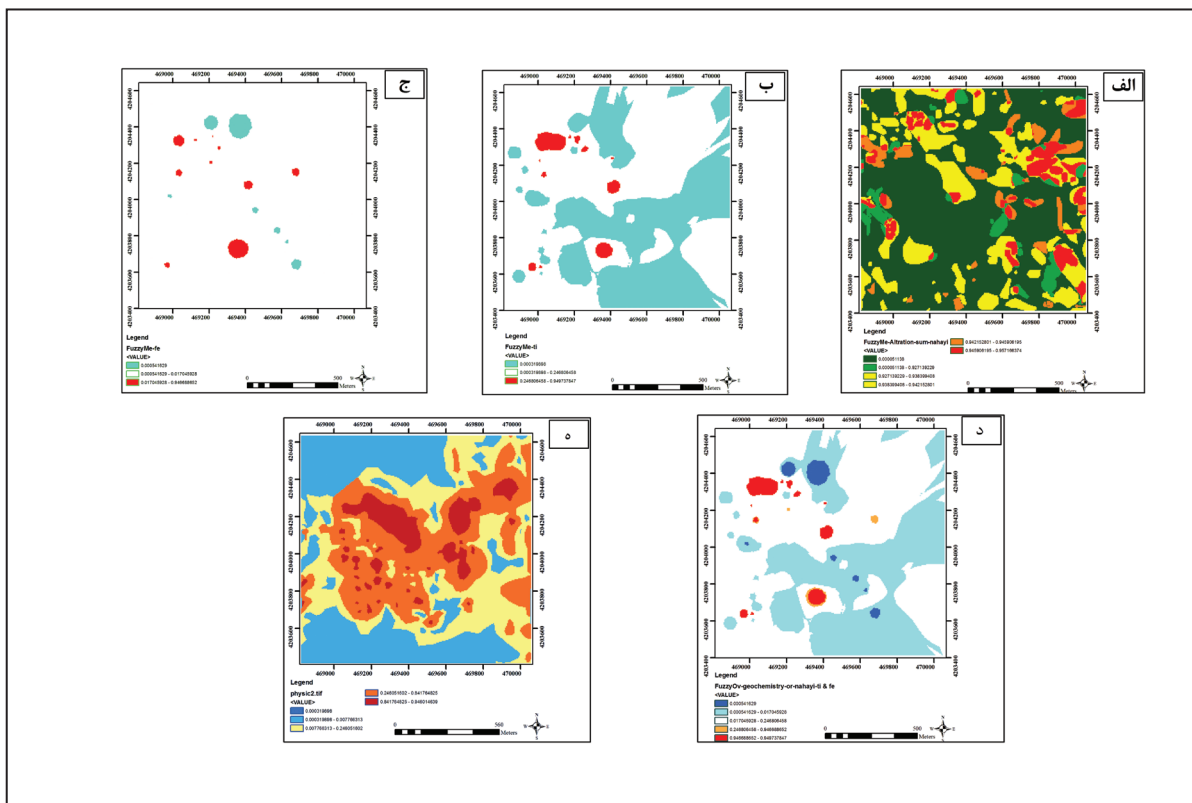
همچنین، نظر به اینکه، تقاطع گسل‌ها نیز در تشکیل ذخایر معدنی از اهمیت بسیاری زیادی برخوردار است، به منظور پردازش این پارامتر، تقاطع گسل‌ها نیز کلاس‌بندی شده و سپس بر اساس اهمیت هر یک، وزن‌دهی شده‌اند (جدول ۴). سپس نقشه چگالی، بافر و جهت گسل‌ها با عملگر AND و نقشه چگالی، بافر و جهت تقاطع گسل‌ها با استفاده از عملگر گاما برابر ۰/۹ به‌طور جداگانه تلفیق شده و در نهایت دو نقشه گسل‌ها و تقاطع گسل‌ها با استفاده از عملگر SUM تلفیق شدند (شکل ۶-الف).

– **نقشه فاکتور سنگ‌شناسی:** به منظور تهیه نقشه فاکتور سنگ‌شناسی منطقه، ابتدا نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۰۰۰ منطقه رقوم‌سازی شد، سپس واحدهای سنگی مشابه به دلیل دارا بودن درجه اهمیت یکسان، در یک گروه قرار گرفتند. در نتیجه تعداد دسته‌های سنگی به تعدادی معدودی کاهش یافته و یک نقشه فاکتور سنگ‌شناسی استنتاجی به دست آمد. سپس، به هر یک از دسته‌های سنگ‌شناسی مختلف به اهمیت و پتانسیل آنها به عنوان میزبان کانی‌سازی تیتانیم وزن معینی اختصاص داده شد (جدول ۵). در این فاکتور، به منظور فازی‌سازی از تابع Large استفاده شده است، که در این حالت به دسته‌های با وزن بالاتر، بیشترین مقادیر عضویت فازی تعلق گرفته است (شکل ۶-ب).

در نهایت برای به دست آوردن فاکتور نهایی زمین‌شناسی از تلفیق نقشه‌های



شکل ۶- نقشه نهایی: الف) فاکتور تکنیکی؛ ب) فاکتور سنگ‌شناسی استنتاجی؛ ج) فاکتور زمین‌شناسی.



شکل ۷- نقشه‌های فاکتوری منطقه مورد مطالعه: الف) فاکتور دگرسانی؛ ب) فاکتور عیار تیتانیوم؛ ج) فاکتور عیار آهن؛ د) فاکتور ژئوشیمی حاصل از روش تلفیق با استفاده از عملگر OR؛ ه) فاکتور ژئوفیزیکی.

جدول ۴- نقاط تقاطع گسل های مهم منطقه خانیك -غازان و نحوه وزن دهی به آنها.

وزن کلاس ها	کلاس ها	نوع کلاس	لایه
۹	A-B, A-A	تقاطع گسل ها بر اساس آزیعوت گسل ها	تقاطع گسل ها
۸	A-C, A-D		
۵	B-C, B-D		
۴	C-D		
۹	بافر ۸ متری	بافر گسل ها	
۸	بافر ۱۶ متری		
۶	بافر ۲۴ متری		
۳	بافر ۳۲ متری		
۲	بافر ۴۰ متری		

جدول ۵- وزن دهی به لایه سنگ شناسی و دسته بندی آنها.

وزن کلاس	کلاس ها	لایه
۹	Gb	سنگ شناسی
۷	Oxidized Zone	
۳	Qt <sub>1</sub>	
۲	Qt <sub>2</sub>	

جدول ۶- وزن دهی به لایه دگرسانی.

وزن کلاس	کلاس ها	لایه
۹	گویت	آلتراسیون ها
۸	هماتیت	
۵	آمفیبول	
۴	اکتینولیت	
۳	اپیدوت	
۳	کلریت	

جدول ۷- وزن دهی به لایه ژئوشیمیایی بر اساس عیار به دست آمده برای عناصر تیتانیم و آهن در محدوده مورد مطالعه.

وزن کلاس ها	کلاس ها	لایه
۹	آنومالی احتمالی	عیار تیتانیم
۷	آنومالی ممکن	
۴	آستانه	
۱	زمینه	
۸	آنومالی احتمالی	عیار آهن
۶	آنومالی ممکن	
۲	آستانه	
۱	زمینه	

#### ۴-۴. نقشه نهایی فاکتور ژئوفیزیک

فازی سازی نقشه ژئوفیزیک منطقه، این فاکتور را به ۵ کلاس تقسیم‌بندی کرده (جدول ۸) و به منظور فازی‌سازی از تابع عضویت گوسین استفاده شد، که در این حالت مرز توده‌های مغناطیسی که دارای مقادیر متوسط میدان مغناطیسی بوده و ارتباط فضایی قوی‌تری با کانه‌زایی دارند، بیشترین مقادیر عضویت فازی تعلق می‌گیرد (شکل ۷-۵).

با اعمال انواع فیلترها بر روی داده‌های مغناطیس سنج زمینی محدوده مورد مطالعه، پس از مقایسه انواع فیلترهای اعمال شده از فیلتر برگردان به قطب جهت تعیین محل تقریبی زون‌های کانه‌زایی و از فیلتر سیگنال تحلیلی جهت شناسایی مرز توده‌های مربوطه استفاده شد. در نتیجه، پس از مقایسه نقشه دو فیلتر مذکور و با در نظر گرفتن هدف نهایی از فیلتر سیگنال تحلیلی استفاده شد. لذا به منظور

جدول ۸- وزندهی به لایه ژئوفیزیک (سیگنال تحلیلی).

لايه	کلاس‌ها	وزن کلاس
ژئوفیزیک (سیگنال تحلیلی)	زیاد	۹
	متوسط	۷
	کم	۴
	خیلی کم	۲
	زمینه	۱

#### ۵- تلفیق لایه‌های اکتشافی

##### ۵-۱. تلفیق به کمک سیستم استنتاج‌گر فازی

(جدول‌های ۷ و ۸). در این پژوهش تمامی قوانین تعریف شده دارای ارزش یکسان بوده و دارای وزن یک هستند. این موتور مستلزم به کارگیری یک مدل تصمیم‌گیری جهت تلفیق نقشه‌ها است که در این پژوهش سیستم ممدانی به لحاظ سادگی، مؤثر بودن و کاربرد گسترده آن، استفاده شده است. در این سیستم مقدمه و نتیجه هر دو به صورت فازی هستند.

رابطه (۶)  $M^N$ : تعداد قوانین

در این رابطه  $M$  تعداد متغیر زبانی و  $N$  تعداد ورودی‌های سیستم استنتاج‌گر فازی (در اینجا شامل تعداد نقشه‌های فاکتور) است (Porwal et al., 2014). این سیستم، قوانین را بر روی ارزش پیکسل‌ها اعمال می‌کند، در واقع طبق این الگوریتم بر روی هر چهار پیکسل مشابه از لحاظ مکانی در چهار نقشه مختلف عملیات انجام می‌گیرد، در واقع چنانچه پیکسلی دارای ارزش  $0/462$  در نقشه زمین‌شناسی،  $0/485$  در نقشه ژئوشیمیایی،  $0/644$  در نقشه ژئوفیزیکی و  $0/346$  در نقشه دگرسانی باشد، ارزش پیکسل تلفیق شده  $0/711$  خواهد بود. طبق الگوریتم شکل ۹، ۳۰ قانون از ۸۱ قانون آن نمایش داده شده است.

**غیرفازی‌سازی و نقشه نهایی پتانسیل معدنی غازان:** همانطور که اشاره شد نتیجه سیستم ممدانی به حالت فازی بوده که در نتیجه باید از حالت فازی خارج شده و به صورت کریسپی مورد مطالعه قرار گیرد. به منظور تلفیق اعداد فازی در این سیستم از روش مرکز ثقل استفاده شده که ارزش مرکز ثقل پیکسل مورد بررسی همان عدد کریسپی (غیرفازی) است. در نهایت نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سیستم استنتاج‌گر فازی پس از غیرفازی‌سازی به روش مرکز ثقل آماده شد (شکل ۱۰-الف).

##### ۵-۲. تلفیق به کمک منطق فازی مرسوم

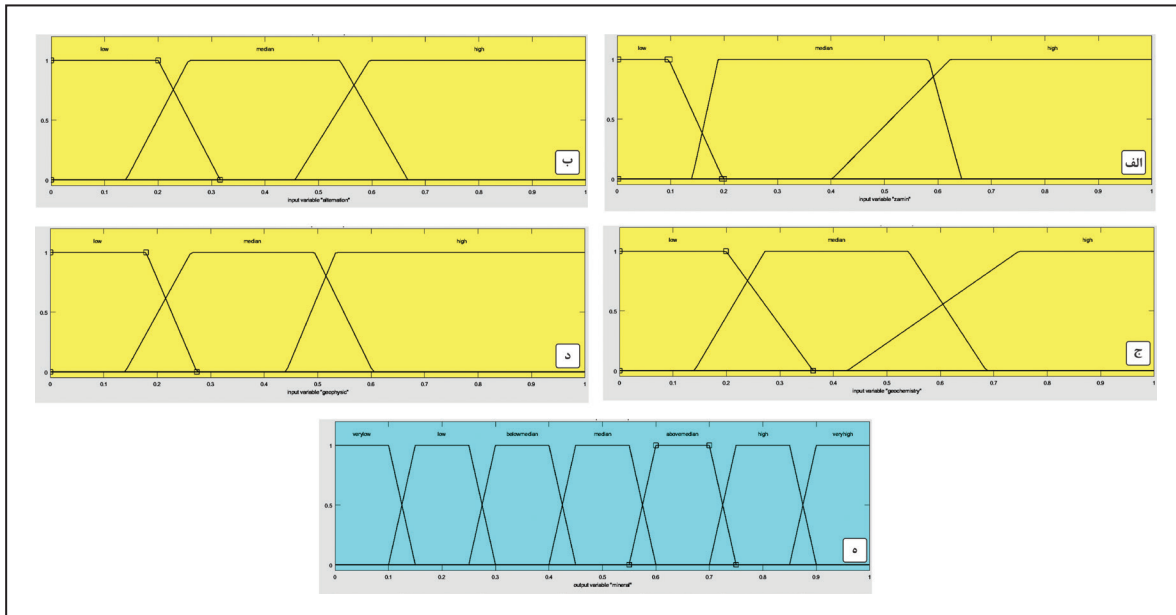
در این بخش، جهت تلفیق نهایی از منطق فازی استفاده شده است. در این روش پس از این که به واحدهای هر لایه کلاس‌های مناسب بر اساس مطالعات و نتایج کارشناسی داده شده از عملگرهای SUM، OR، AND و در نهایت عملگر  $\gamma$  استفاده شده است (Carranza and Hale, 2003) (شکل ۱۱). پس از پردازش انجام شده، نقشه محدوده‌های پتانسیل دار با استفاده از روش منطق فازی آماده شد (شکل ۱۰-ب).

در این بخش جهت تلفیق نهایی از سیستم استنتاج‌گر فازی استفاده شده است. پردازش بر روی نقشه‌ها که شامل فازی‌سازی، موتور سیستم استنتاج‌گر فازی و غیرفازی‌سازی هستند به کمک نرم‌افزار Matlab انجام گرفته است. همه نقشه‌ها در یک چارچوب  $247 \times 244$  پیکسل قرار گرفته و هر یک از پیکسل‌ها به صورت  $5 \times 5$  متری تعریف می‌شوند، پیکسل‌های ۵ متری نتیجه مقایسه خروجی‌های متفاوت در پیکسل‌های متفاوت بوده و به صورت بهینه انتخاب شده‌اند (زون‌های کوچک و بی‌ارزش را تقریباً فیلتر کرده و تصویر خروجی هموارتر و ملایم‌تر به دست می‌آید). این نقشه‌ها به فرمت tif درآمده و وارد نرم‌افزار متلب شده‌اند، نقشه نهایی تلفیق نیز به صورت فایل اسکی از نرم‌افزار متلب خارج شده و وارد نرم‌افزار ArcGIS می‌شود.

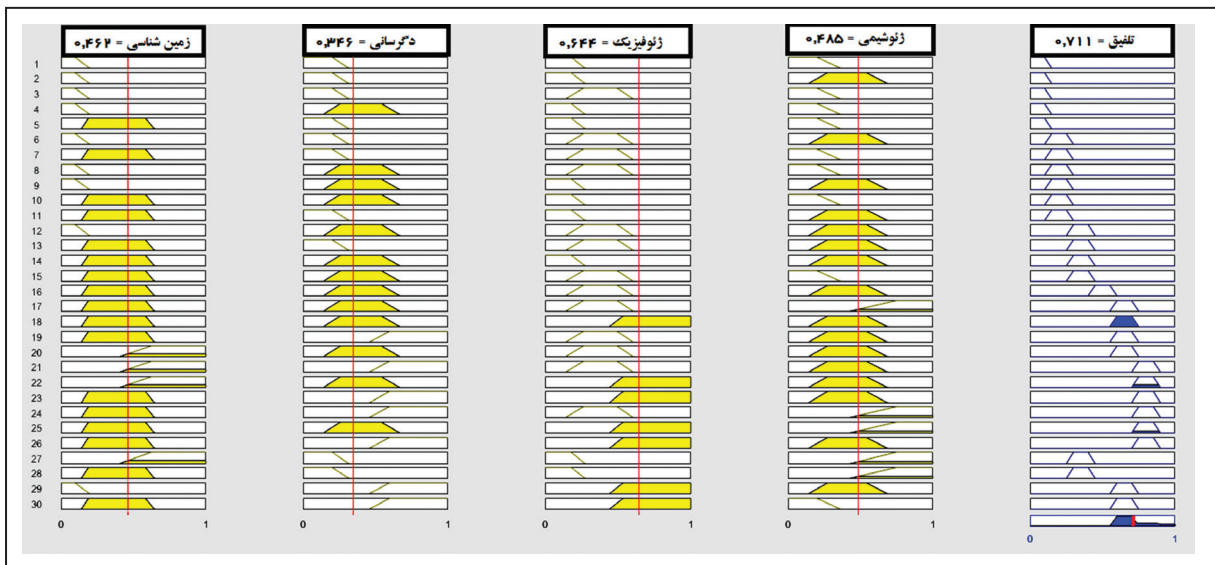
**فازی‌سازی:** فازی‌سازی نقشه‌های فاکتور در سیستم استنتاج‌گر فازی نیازمند تعریف توابع عضویت فازی مناسب هستند. نوع، تعداد و پارامترهای توابع عضویت فازی با بررسی‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شوند. طبق این فرایند نقشه‌ها از حالت کریسپی خارج شده و به حالتی با متغیرهای زبانی تبدیل می‌شوند، همانطور که قبلاً نیز اشاره شد قبل از عملیات فازی‌سازی داده‌های تشکیل دهنده باید به حالت نرمال باشند (داده‌ها در دامنه صفر تا یک قرار گرفته باشند) (Karimi et al., 2004)، که این کار به کمک نرم‌افزار ArcGIS انجام شده است. نقشه‌های فاکتور سطح دوم ورودی که شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، دگرسانی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی هستند، به کمک تابع عضویت دوزنقه در سه گروه پتانسیل قوی، ضعیف و متوسط تقسیم‌بندی شده‌اند و یک تابع عضویت دوزنقه نتیجه که شامل هفت گروه پتانسیل خیلی قوی، قوی، بالاتر از متوسط، متوسط، پایین‌تر از متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف تعریف شده است. تقسیم‌بندی و تعیین دامنه‌ها برای هر یک از توابع عضویت بر اساس شناخت از منطقه و مشورت با کارشناس مربوطه انجام گرفته و طبق این فرایند عملیات فازی‌سازی بر روی نقشه‌ها انجام گرفته شده است (شکل‌های ۸-الف تا ه).

**موتور سیستم استنتاج‌گر فازی:** پس از عملیات فازی‌سازی، نقشه‌ها وارد موتور سیستم استنتاج‌گر فازی می‌شوند، در این مرحله یک پایگاه اگر-آنگاه فازی برای نقشه‌ها تشکیل می‌شود، این قوانین بر اساس دانش کارشناسی تعریف شده‌اند (برک، ۱۳۹۴). براساس رابطه ۶ تعداد قوانین اگر-آنگاه فازی ۸۱ مورد است

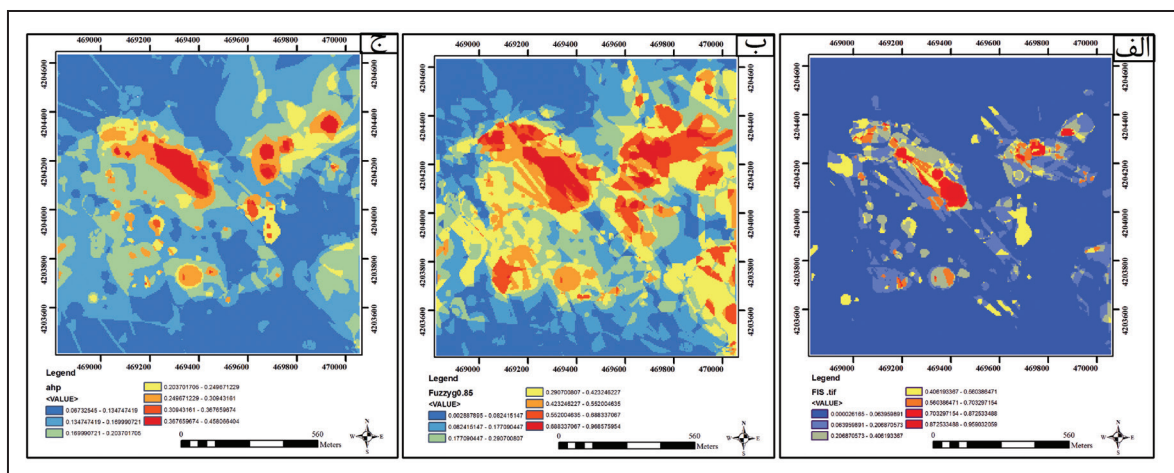




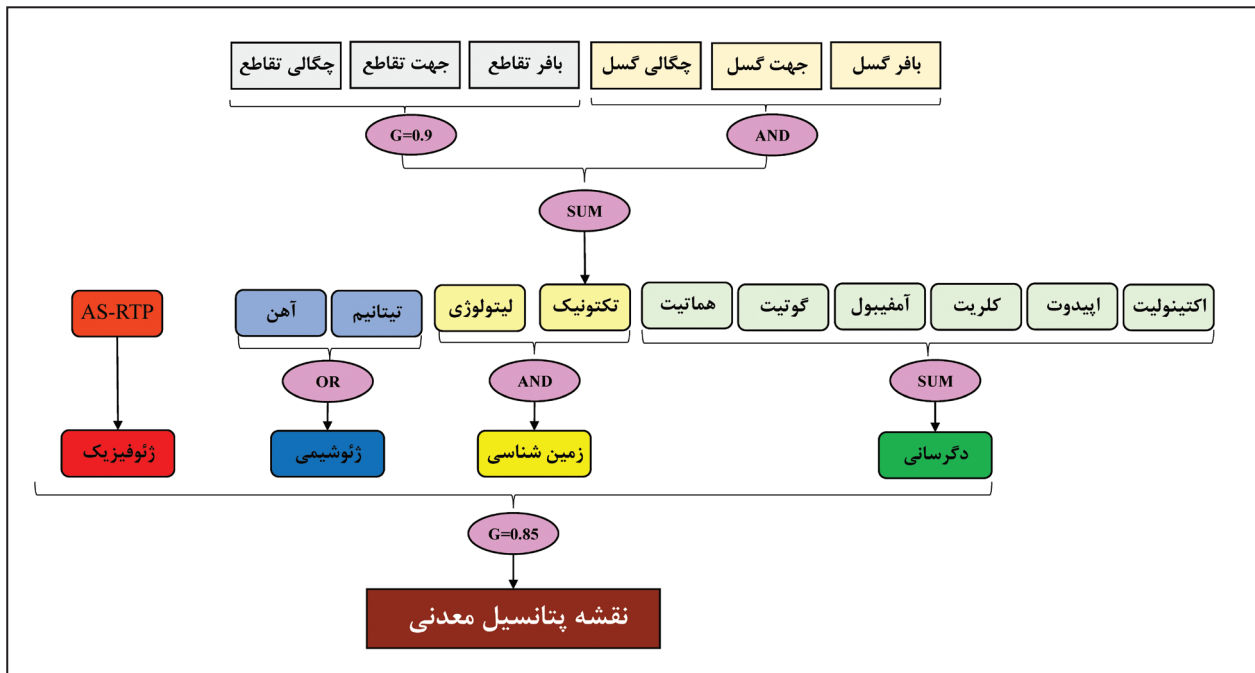
شکل ۸- توابع عضویت فازی تعریف شده جهت فازی سازی نقشه‌های فاکتور: الف) تابع عضویت فاکتور زمین‌شناسی؛ ب) تابع عضویت فاکتور دگرسانی؛ ج) تابع عضویت فاکتور ژئوشیمیایی؛ د) تابع عضویت فاکتور ژئوفیزیکی؛ ه) تابع عضویت خروجی (پتانسیل معدنی).



شکل ۹- نحوه تعیین پتانسیل معدنی یک پیکسل به کمک سیستم استنتاج گر فازی.



شکل ۱۰- نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه با روش الف) سیستم استنتاج گر فازی؛ ب) منطق فازی؛ ج) تحلیل سلسله مراتبی.



شکل ۱۱- فلوجارت تحلیل انجام شده بر روی لایه‌ها و زیرلایه‌های اکتشافی جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی به روش منطق فازی.

### ۵-۳. تلفیق به کمک تحلیل سلسله مراتبی

بنابراین انتخاب آگاهانه و صحیح وزن‌ها کمک بزرگی در جهت تعیین هدف مورد نیاز می‌نماید (یوسفی و کامکار روحانی، ۱۳۸۹) (جدول ۱۰). همچنین وزن نهایی هر گزینه در وزن گزینه‌ها به دست می‌آید (جدول ۱۱).

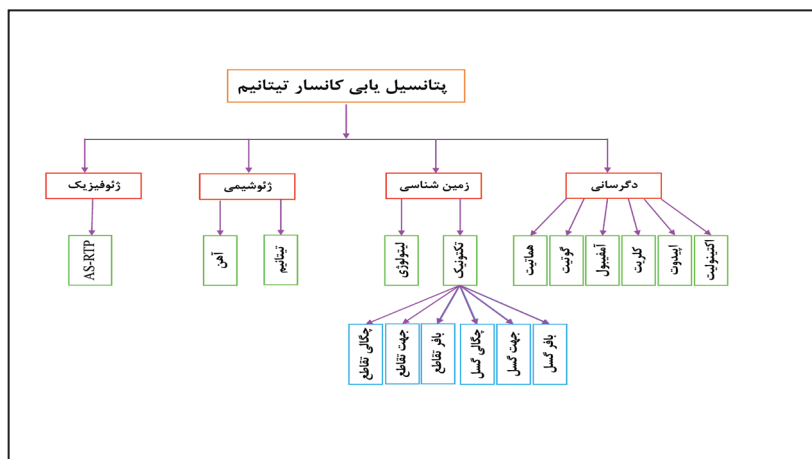
نقشه نهایی تلفیق لایه‌های اکتشافی با روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی برابر است با (لایه زمین‌شناسی \* ۰/۱۱۶) + (لایه دگرسانی \* ۰/۰۷۸) + (لایه ژئوشیمی \* ۰/۲۷۸) + (لایه ژئوفیزیک \* ۰/۵۲۷) است.

در نهایت، آهنگ ناسازگاری یک سلسله مراتبی محاسبه می‌شود که بهتر است این عدد کم‌تر از ۰/۱ باشد (قدسی پور، ۱۳۸۸). آهنگ ناسازگاری از معادله ۷ به دست می‌آید. برای محاسبه آهنگ ناسازگاری یک سلسله مراتبی شاخص ناسازگاری هر ماتریس را در وزن عنصر مربوطه ضرب کرده و حاصل جمع آنها به دست می‌آید، که این حاصل جمع II است. همچنین وزن عناصر را در II ماتریس‌های مربوطه ضرب کرده و مجموع آن‌ها I.R نام‌گذاری می‌شود. حاصل تقسیم آنها آهنگ ناسازگاری سلسله مراتبی است. در این تحقیق آهنگ ناسازگاری I.R برابر ۰/۰۱۷۴۵ است.

$$I.R = \frac{II}{I.I.R} \quad \text{معادله ۷}$$

برای انجام روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به منظور وزن‌دهی به لایه‌های اکتشافی تهیه شده مراحل زیر طی می‌شود. لازم به ذکر است که نظرات کارشناسی اعمال شده در ابتدا با هم مقایسه شده و نسبت پایداری آنها با استفاده از نرم افزار Expert choice بررسی و سپس جهت وزن‌دهی استفاده می‌شوند.

– **فرایند سلسله مراتبی:** گام اول برای اجرای روش تحلیل سلسله مراتبی برای تصمیم‌گیری، ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی است (یوسفی فر و همکاران، ۱۳۸۹). در این روش نیز مانند روش‌های پیشین، به واحدهای هر لایه کلاس‌های مناسب براساس مدل مفهومی کانسارهای تیتانیم از نوع ماگمایی (ایلمنیت، تیتانومگنتیت و مگنتیت) و تصمیم کارشناسان، داده شده و سپس درخت سلسله مراتبی که دارای سه سطح اصلی هدف (تهیه نقشه پتانسیل معدنی)، معیارها و گزینه‌هاست، که سطح معیار آن قابل تقسیم به زیر معیارهای متعدد است (شکل ۱۲). پس از این مرحله سنجه‌ها در یک ماتریس قرار گرفته و بعد از آن تعیین اهمیت (وزن) معیارها و زیر معیارهاست. دو به دو آن‌ها با هم مقایسه می‌شوند، سپس با استفاده از روش بهنجار کردن تمام سنجه‌ها هم وزن می‌شوند (جدول ۹). در مقیاس مقایسه زوجی‌ها وزن هر عامل نشان دهنده اهمیت و ارزش آن نسبت به عامل‌های دیگر در عملیات تعیین مکان است.



شکل ۱۲- روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی منطقه مورد مطالعه.

جدول ۹- وضعیت مقایسه لایه‌ها و وزن مربوط به آنها.

وضعیت مقایسه‌ها	وزن یا ارزش	وضعیت مقایسه‌ها	وزن یا ارزش
یکسان	۱	بیشتر	۵
یکسان تا متوسط	۲	بیشتر تا خیلی بیشتر	۶
متوسط	۳	خیلی بیشتر	۷
متوسط تا بیشتر	۴	به شدت مهم	۸

جدول ۱۰- ماتریس ارزیابی فازی لایه‌های اصلی.

ژئوفیزیک	ژئوشیمی	دگرسانی	زمین‌شناسی
۱/۵	۱/۳	۲	۱
۱/۶	۱/۳	۱	۱/۲
۱/۲	۱	۳	۳
۱	۲	۶	۵

جدول ۱۱- وزن نهایی لایه‌ها.

وزن	معیارها	تلفیق زیر لایه‌ها	زیر لایه‌ها	وزن
۰/۵	زمین‌شناسی	زمین‌شناسی = (۰/۵*لیتولوژی + ۰/۵*تکتونیک)	لیتولوژی	۰/۵
۰/۵			تکتونیک	۰/۵
۰/۳۲۱	دگرسانی	دگرسانی = (۰/۳۲۱*هماتیت + ۰/۳۷۲*گوتیت + ۰/۱۰۵*آمفیبول + ۰/۰۶۳*کلریت + ۰/۰۶۳*اپیدوت + ۰/۰۷۶*اکتیولیت)	هماتیت	۰/۳۲۱
۰/۳۷۲			گوتیت	۰/۳۷۲
۰/۱۰۵			آمفیبول	۰/۱۰۵
۰/۰۶۳			کلریت	۰/۰۶۳
۰/۰۶۳			اپیدوت	۰/۰۶۳
۰/۰۷۶	اکتیولیت	۰/۰۷۶	اکتیولیت	۰/۰۷۶
۰/۶۶۷	ژئوشیمی	ژئوشیمی = (۰/۶۶۷*عیار تیتانیم + ۰/۳۳۳*عیار آهن)	عیار تیتانیم	۰/۶۶۷
۰/۳۳۳			عیار آهن	۰/۳۳۳
۰/۵۲۷	ژئوفیزیک	ژئوفیزیک = (۰/۵۲۷*سیگنال تحلیلی)	سیگنال تحلیلی	۰/۵۲۷

بین سازندها به حالت ۰ و ۱ نبوده و به حالت شیب‌دار تغییر می‌کند یعنی مرز سازندها را در بازه ۰ و ۱ قرار داده و وزن‌های واقعی‌تر به سازندها خواهد داد. همچنین در بسیاری موارد روابط بین فاکتورهای مؤثر بر کانی‌سازی بسیار پیچیده‌تر از آن هستند که با یک سری اعداد و ماتریس‌ها قابلیت مدل‌سازی داشته باشند، از این گذشته، وزن‌دهی به لایه‌ها که به صورت مستقیم با نظر شخصی کارشناس بیان می‌شود از این رو احتمالاً خطاهایی به همراه داشته باشد، اما در سیستم استنتاج گر فازی برای تهیه لایه هدف، لایه‌های اکتشافی با کمک درجه عضویت فازی، تابع عضویت فازی و متغیرهای زبانی تهیه می‌شود که باعث می‌شود مشکلات مذکور نسبتاً بهبود یابد.

### سیاسگراری

نویسندگان مقاله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی دانشگاه تهران برخوردار بوده‌اند، لذا بدین وسیله نهایت سپاس و قدردانی خود را از مسئولین مربوطه اعلام می‌دارند. همچنین، از مدیریت محترم شرکت آتیه‌سپید آسیا به جهت همکاری و هماهنگی جهت دسترسی به اطلاعات اولیه کاناسر و نیز انجام بازدیدهای صحرائی و نمونه‌برداری سیاسگراری می‌نمایند. مؤلفین، همچنین از نظرات و پیشنهادات سازنده داوران محترم فصلنامه علوم زمین قدردانی می‌نمایند.

پس از پردازش‌های انجام شده نقشه پتانسیل محدوده مورد مطالعه با روش تحلیل سلسله مراتبی آماده شد (شکل ۱۰- ج).

### ۶- نتیجه‌گیری

از مقایسه نقشه‌های تهیه شده پتانسیل معدنی محدوده مورد مطالعه به روش فازی مرسوم و تحلیل سلسله مراتبی با سیستم استنتاج گر فازی مشاهده می‌شود که روش فازی مرسوم و تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب مناطق پریپتانسیل وسیع‌تری نسبت به روش استنتاج گر فازی نمایش می‌دهد. این در حالی است که در تهیه لایه‌های اکتشافی در هر سه روش مذکور از نظرات کارشناسی یکسان در تهیه لایه‌های اکتشافی هر سه روش استفاده شده است. با این تفاوت که در روش فازی مرسوم و تحلیل سلسله مراتبی فازی، لایه هدف به طور مستقیم نیز با نظر کارشناسی انجام شده است. از سوی دیگر نحوه امتیازدهی که به صورت مستقیم با نظر شخصی کارشناس بیان می‌شود از لحاظ منطقی با مشکل مواجه است. زیرا ممکن است که مقدار عیار در برخی از نقاط، به علت خطای اندازه‌گیری و یا خطای محاسباتی، به مقدار کمی از میزان واقعی آن انحراف پیدا کرده باشد و به علت این روش امتیازدهی اشتباه شود. مزیت روش سیستم استنتاج گر فازی نسبت به روش فازی مرسوم در این است که مرز

## کتابنگاری

- آزدری، ک.، محمدی ترک‌آباد، ح. و رضائی اردکانی، ف.، ۱۳۸۳- گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ سرو (گنگ‌چین)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- برک، س.، ۱۳۹۴- ارزیابی رهیافت تلفیقی با استفاده از سیستم استنتاج‌گر فازی و سنجش از دور در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، مطالعه موردی: کانسار مس پورفیری کهنک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- حقی‌پور، ع. و آقاباتی، ع.، ۱۳۶۷- شرح نقشه زمین‌شناسی چهارگوش سرو ۱/۲۵۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شرکت توسعه و سرمایه‌گذاری آتیه سپید آسیا، ۱۳۹۳- گزارش پایان عملیات اکتشافی محدوده تیتان خانیک ارومیه.
- علائی‌مقدم، س.، ۱۳۹۰- طراحی و ارزیابی سیستم استنتاج‌گر فازی جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- علیپور، ص.، حسین‌زاده، ب. و رحیم‌سوری، ی.، ۱۳۹۵- بررسی زمین‌شناسی و کانی‌سازی پتانسیل تیتانیم خانیک - غازان، غرب ارومیه، استان آذربایجان غربی، مجله علوم زمین، شماره ۱۰۰، ص ۶۷ تا ۷۸.
- فیضی‌انهر، ح.، ۱۳۹۶- ارزیابی روش تلفیقی سامانه استنتاج‌گر فازی و مطالعات پترولوژی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی تیتانیم خانیک- غازان، غرب ارومیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- قدسی‌پور، ح.، ۱۳۸۸- مباحثی در تصمیم‌گیری چند معیاره، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ هفتم، ۲۲۰ ص.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیاچهای بر زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- یوسفی، م. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۸۹- اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، جلد اول، چاپ اول.
- یوسفی‌فر، س.، خاکزاد، ا.، هوشنگ اسدی‌هارونی، ه.، محمدرضا جعفری، م. و وثوقی‌عابدینی، م.، ۱۳۸۹- استفاده از روش‌های تلفیقی شاخص همپوشانی، فازی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین مناطق پتانسیل‌دار مس و طلا در بخش شمالی کانسار پورفیری دالی، مجله علوم زمین، شماره ۸۳، ص ۴۹ تا ۵۸.

## References

- Bonham-Carter, G., 1994- Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Ontario, Canada. 398.
- Carranza, E. J., 2008- Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, vol. 11, Elsevier, Amsterdam, 351 p.
- Carranza, E. M. and Hale, M., 2003- Evidential belief functions for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines. Ore Geology. Rev. 22: 117-132.
- Houshyar, E., Sheikh Davoodi, M. J., Almassi, M., Bahrami, H., Azadi, H., Omid, M. and Witlox, F., 2014- Silage corn production in conventional and conservation tillage systems. Part I: sustainability analysis using combination of GIS/AHP and multi-fuzzy modeling. Ecological Indicators, 39, 102-114.
- Karimi, M. and Valadan Zoej, M. J., 2004- Mineral potential mapping of copper minerals with GIS. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, 35(4), 1103-1108.
- Najafi, A., Karimpour, M. H. and Ghaderi, M., 2014- Application of fuzzy AHP method to IOCG prospectivity mapping: A case study in Taherabad prospecting area, astern Iran. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation : 142-154.
- Porwal, A., Carranza, E. and 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., Das, R. D., Chaudhary, B., Gonzalez-Alvarez, I. and Kreuzer, O., 2014- Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia. Ore Geology Reviews.
- Saaty, T. L., 1990- Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world- RWS publications Press, Pittsburgh.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran: a review. American Association of Petroleum Geology, Bull., 52: 1229-125.
- Ying, H., 2000- Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications. Wiley-IEEE Press, 37(2), 125-128.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets, Information and control. vol. 8, pp. 338-353.

# Application of fuzzy integrated methods, analytical hierarchy process and fuzzy inference system for exploration of the Khanik-Ghazan titanium deposit

H. Feizi Anhar<sup>1</sup>, S. Aslani<sup>2</sup>, F. Aliyari<sup>3\*</sup>, A. Bahroudi<sup>2</sup> and A. Sartipi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Mineral Exploration, Faculty of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Mineral Exploration, Faculty of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

<sup>4</sup>M.Sc., Geological Survey of Iran, Management of Northwestern Center, Tabriz, Iran

Received: 2018 April 14

Accepted: 2019 January 09

## Abstract

The Khanik-Ghazan Titanium ore deposit is located at 82 km northwest of Urmia, northern Sanandaj-Sirjan zone. The main objective of this research is to identify potentially mineralized areas and to prepare a mineral prospectivity map in the Khanik-Ghazan deposit applying the Fuzzy Inference System (FIS). After preparing the fact maps, the main stages of the investigation comprise the preparation of fuzzy factor maps using the appropriate linguistic variables and proper membership functions, combining factor maps using the fuzzy inference (by creating a fuzzy database of If-OR rules), identification of susceptible areas, and the generation of a potential mineral map using the output closure. In this study, in order to control the accuracy of the data, we tried to apply two new integrated methods including the fuzzy logic and hierarchical analysis processes. The results obtained from these methods was confirmed and complemented by each other and demonstrated highly potential mineralized zones. This statement is validated by several investigation methods including the field surveys and evidence of 80 samples collected from rock outcrops. Based on obtained results and modelling of geophysical data, the central part of the study area was recognized for further exploration using the drillcore subsurface exploration.

**Keywords:** Titanium ore mineralization, fuzzy inference system, analytical hierarchy process, fuzzy logic, mineral prospecting, Khanik-Ghazan.

For Persian Version see pages 175 to 186

\*Corresponding author: F. Aliyari; E-mail: F.aliyari@uut.ac.ir