Archive of SID

زمستان ۹۳، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴، صفحه ۲۷۷ تا ۲۸۶ (سنگ و کانی)

تهیه نقشه پتانسیل معدنی برای کانسارهای مس با استفاده از مدل ترکیبی نروفازی: مطالعه موردی برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد در استان کرمان

صادق کیانپوریان [۱*]، مهران فرهمندیان [۱]، محمد کریمی [۲] و عباس بحرودی [۳]

[۱] کارشناسی ارشد، جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و ژئودزی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۱۹

چکیده

وجود ذخایر متعدد مس در ایران و اهمیت اکتشاف آنها، تهیه دقیق نقشه پتانسیل معدنی را به عنوان یک نیاز اساسی به‌وجود آورده است. فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی یک فرایند پیچیده است که با استفاده از روش‌های مختلف قابل انجام است. یکی از روش‌های قدرتمند در تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده از روش مدل ترکیبی نروفازی است که در آن تلفیقی از اطلاعات تجربی و استنباطی به طور همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرد که این مسئله سبب افزایش سطح اعتماد این روش می‌شود. در این مطالعه از روش نروفازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد در استان کرمان استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی شامل نقشه‌های فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، ساختارهای خطی، دگرسانی و ۲۲ اندیس معدنی بودند. پس از تهیه این لایه‌ها در محیط نرم‌افزار GIS با اندازه سلول ۱۰۰ متر، اطلاعات حاصل از آنها برای آموزش شبکه آماده‌سازی شد. ابتدا باید شبکه با استفاده از اندیس‌های معدنی آموزش داده شود، با این حال یکی از مشکلات استفاده از این روش تعداد کم داده‌های آموزشی بود. برای حل این مشکل به هر یک از اندیس‌ها بیش از یک سلول نسبت داده شد، این کار با تعیین فواصل ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر برای اندیس‌های معدنی، انجام شد. سپس شبکه با استفاده از سری‌های متفاوت داده‌ها آموزش داده شد و در نهایت اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی شد. نتایج حاصل نشان داد که بهترین جواب برای شعاع تأثیرهای ۵۰۰ متر برای اندیس‌های معدنی به‌دست می‌آید که در آن ۸۰٪ از اندیس‌ها در محدوده با پتانسیل بالا قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: نقشه پتانسیل معدنی، مدل ترکیبی نروفازی، GIS، برگه چهارگنبد.

***نویسنده مسئول:** صادق کیانپوریان
Email: s.kianpouryan@ut.ac.ir

۱- پیش‌گفتار

فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی در اکتشافات معدنی گسترش زیادی پیدا کرده است. سیستم اطلاعات جغرافیایی یک سیستم کامپیوتری برای مدیریت و تجزیه و تحلیل اطلاعات مکانی بوده که قابلیت جمع‌آوری، ذخیره، تجزیه و تحلیل و نمایش اطلاعات مکان مرجع را دارد. هدف نهایی یک سیستم اطلاعات جغرافیایی، پشتیبانی برای تصمیم‌گیری‌های پایه‌گذاری شده بر پایه داده‌های مکانی است و عملکرد اساسی آن به‌دست آوردن اطلاعاتی است که از ترکیب لایه‌های متفاوت داده‌ها با روش‌های مختلف و با دیدگاه‌های گوناگون به‌دست می‌آیند (Malczewski, 1999). بر طبق نظریه Bonham Carter (1994) مدل‌های تلفیق داده در GIS به دو دسته کلی داده- مبنا و دانش- مبنا تقسیم می‌شوند. در مدل‌های داده- مبنا وزن‌ها با استفاده از روش‌های آماری و اندیس‌های معدنی موجود در منطقه محاسبه می‌شوند و در مناطقی که داده‌های آموزشی کافی وجود داشته باشد، کاربرد دارند. در حالی که در مدل‌های دانش- مبنا وزن‌ها با استفاده دانش کارشناسی محاسبه می‌شوند و در مناطق شناخته نشده بیشتر کاربرد دارند. روش‌های شبکه عصبی، وزن‌های نشانگر و رگرسیون لجستیگ از مهم‌ترین مدل‌های داده- مبنا و روش‌های فازی، دمپستر- شفر و همپوشانی شاخص از مهم‌ترین مدل‌های دانش- مبنا هستند (Bonham Carter, 1994).

پژوهش‌های مرتبط به استفاده از شبکه عصبی به دو بخش شبکه عصبی و ترکیبی از شبکه عصبی و فازی تقسیم می‌شوند (شکل ۱). تاکنون پژوهش‌های زیادی در این زمینه شبکه عصبی صورت گرفته است که از این بین می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. Porwal et al. (2003) از داده‌های سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، سنگ آذرین مافیک، فاصله از خطواره‌ها و ۵۴ اندیس شناخته شده در یک شبکه با تابع شعاعی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی اقدام کردند. نقشه خروجی حاصل از این شبکه ۶ درصد از منطقه را به عنوان محدوده پتانسیل بالا مشخص کرد که شامل ۹۶ درصد از کل اندیس‌های موجود را شامل می‌شود (Porwal et al., 2003).

Sanchez et al. (2003) برای اکتشاف طلا در جنوب خاوری اسپانیا در محدوده‌ای به مساحت ۱۵۰ کیلومتر مربع از شبکه عصبی استفاده کردند. لایه‌های موجود برای ورود به شبکه عصبی، دگرسانی، برداشت‌های ژئوشیمی، برداشت‌های مغناطیس و گرانی، نقشه شکستگی‌ها و ۴۹ اندیس معدنی شناخته شده بودند که با استفاده از یک شبکه MLP برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج این شبکه بر روی داده‌های طلا نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند به طور مؤثری به عنوان ابزاری برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و داده‌های اکتشافی از جمله ژئوفیزیک و ژئوشیمی مورد استفاده قرار گیرد (Sanchez et al., 2003).

Brown et al. (2000) از نقشه‌های زمین‌شناسی، گسل‌های منطقه‌ای، مغناطیس هوایی، داده‌های اشعه گاما و ۶۳ اندیس معدنی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی طلا در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ در تنترفیلد استرالیا از یک شبکه عصبی MLP استفاده شده است. برای تأیید نتایج حاصل از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، دو روش وزن‌های نشانگر و فازی نیز برای تهیه نقشه پتانسیل مورد استفاده قرار گرفتند که نتایج نشان برتری این روش بر روش وزن‌های نشانگر و فازی داشت (Brown et al., 2000). از دیگر کارها در این زمینه می‌توان به Singer & Kouda (1996); Behnia (2007) ; Skaber (2005); Haris & Pan (1999); Hosseinali & Alesheikh (2008) و Nykanen (2008) می‌توان اشاره کرد.

اطلاعات علوم زمین که در رسم نقشه پتانسیل مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل یک بخش تجربی است که بر پایه داده‌های اکتشافی است و بخش دیگر استنباطی است که بر پایه دانش کارشناسی است (Porwal et al., 2003). روش‌های داده مبنا برای رسم نقشه پتانسیل بر پایه بخش تجربی و روش‌های دانش مبنا بر پایه بخش استنباطی استوار هستند. از طرفی روش‌های داده مبنا به طور مستقیم از اطلاعات استنباطی در فرایند

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌سازی استفاده نمی‌کند، اگرچه از این اطلاعات برای تعیین معیارهای تشخیص و تفسیر نقشه‌های برآوردی بهره می‌گیرد و از سوی دیگر، روش‌های دانش مبنا نیز به طور مستقیم از اطلاعات تجربی در فرایند مدل سازی استفاده نمی‌کنند اگرچه این اطلاعات به طور استنتاجی در تقویت روش دانش مبنا مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب بخش بیشتری از اطلاعات علوم زمین نیازمند اعمال هر دو روش داده مبنا و دانش مبنا برای رسم نقشه پتانسیل هستند. بنابراین استفاده بهینه از اطلاعات علوم زمین نیازمند استفاده مکمل همراه با متمم از بخش استنباطی و تجربی است.

از روش نروفازی به ندرت در تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده شده است. در یک پژوهش (Porwal et al., 2004) با استفاده از روش نروفازی اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی در ایالت راجستان هند کردند. داده‌های سنگ‌شناسی، چینه‌شناسی، سنگ آذرین مافیک، فاصله از خطواره‌ها و ۵۴ اندیس شناخته شده ورودی‌های شبکه آنها بودند. نتایج حاصل از این روش ۱۰ درصد از منطقه را به عنوان پتانسیل بالا که شامل نزدیک به ۹۶ درصد از کل اندیس‌ها بود.

در این مقاله هدف ارائه روشی است که با استفاده از آن بتوان با تعداد اندیس کم هم از روش نروفازی برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده کرد. در این نوشتار نقشه‌های فاکتور با اندازه سلول‌های (۱۰۰×۱۰۰ متر) رستر شده‌اند ولی اندیس‌های موجود در منطقه را با توجه به اینکه معمولاً گسترشی بیشتر از ۱۰۰ متر دارند با شعاع تأثیرهای متفاوت و بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر درنظر گرفته شدند که این کار باعث افزایش تعداد داده‌های آموزشی شد، سپس سعی در پیدا کردن اندازه فاصله بهینه برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی شد.

۲- قوانین اگر- آنگاه فازی و سیستم‌های استنتاج فازی

قوانین اگر- آنگاه فازی یا عبارت‌های شرطی فازی بیانگر فرم اگر A آنگاه B هستند که در آنها A و B بیانگر مجموعه‌های فازی هستند که با توابع عضویت مناسب مشخص می‌شوند. به علت خلاصه و مفید بودن، این قوانین قادرند که شیوه استدلالی را که انسان‌ها از آن در فضای مبهم و نادقیق استفاده می‌کنند مجسم سازند. نمونه زیر می‌تواند این واقعیت ساده را نشان دهد (Jang, 1993).

اگر فشار زیاد است آنگاه حجم کم است. در این نمونه فشار و حجم متغیرهای زبانی بوده و زیاد و کم مقادیر زبانی هستند. مقادیر زبانی با توابع عضویت مشخص می‌شوند.

به‌طور کلی یک سیستم استنتاج فازی از ۵ بخش تشکیل شده است که شامل بخش‌های زیر هستند (شکل ۲). ۱) بخش پایه که شامل قوانین اگر- آنگاه فازی است، ۲) پایگاه داده که توابع عضویت مجموعه‌های فازی مورد استفاده در قوانین فازی را تعریف می‌کنند، ۳) واحد تصمیم‌گیری که عملگرهای استنتاجی را بر روی قوانین اجرا می‌کند، ۴) استنتاج فازی‌سازی که ورودی‌های غیرفازی را به مقدارهای زبانی تبدیل می‌کند و ۵) استنتاج غیرفازی‌سازی که نتایج فازی را به خروجی‌های غیرفازی تبدیل می‌کند (Jang, 1993).

۳- روش نروفازی

به‌طور کلی واژه مدل نروفازی به مدل‌هایی می‌گویند که این شرایط را داشته باشند: مدل نروفازی یک مدل تعمیم‌یافته است که با یک الگوریتم آموزشی که برگرفته از شبکه‌های عصبی است، آموزش می‌بینند. فرایند آموزش تنها روی اطلاعات محلی کار می‌کند و روی مدل فازی تغییرات محلی انجام می‌دهد. افزون بر این فرایند آموزش بر اساس داده‌هاست نه بر پایه دانش. مدل نروفازی یک شبکه پیشخور چندلایه است که واحدهای آن از t- نرم و t- کونرم به جای تابع فعال‌سازی در شبکه‌های عصبی استفاده می‌کنند. این مدل یک سیستم از قوانین است و برای ساخت آن هم می‌توان کار را از صفر شروع کرد و هم می‌توان با دانش پیشین که از سیستم وجو دارد (به صورت قوانین فازی) ساخت سیستم را آغاز کرد (Jang, 1993). امکان ایجاد ترکیبات مختلف روش‌های مدل‌سازی فازی و شبکه‌های عصبی وجود دارد. در جدول ۱ ترکیب‌های مختلف آنها آورده شده است.

در این نوشتار از مدل‌های ترکیبی نروفازی استفاده شده است که در چارچوب شبکه عصبی انطباقی اعمال شده است. این سیستم استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی یا به اصطلاح سیستم استنتاج شبکه عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) می‌تواند، برای پتانسیل‌یابی معدنی به‌کار گرفته شود. تاکنون چندین پردازشگر فازی توسط افراد مختلفی (Mamdani & Assilian, 1975 ; Mamdani, 1974 ; Zadeh, 1973; Sugeno & Kang, 1985 ; Takagi & Sugeno, 1985 ; Tsukamoto, 1979; Sugeno & Tanaka, 1991) معرفی شده‌اند اما از بین آنها پردازشگرهای ارائه شده توسط Mamdani (1974) ; Mamdani & Assilian (1975) Mamdani (1974)، Sugeno & Kang (1988); Sugeno & Tanaka (1991) و Takagi & Sugeno (1985)، که به ترتیب به نوع Mamdani (1974) و Takagi & Sugeno (1985) شناخته می‌شوند کاربرد بیشتری پیدا کرده‌اند. در پردازشگر نوع Mamdani (1974)، مقدمه (اگر) و نتیجه (آنگاه) فازی، هر دو، دارای گزاره‌های فازی هستند. در پردازشگر نوع Takagi & Sugeno (1985) که در اینجا از آن استفاده شده، بخش اول از قانون فازی اگر- آنگاه از نوع فرضیه فازی است و بخش نتیجه آن یک تابع ریاضی است که معمولاً تابع چند جمله‌ای درجه یک یا صفر است.

در مدل فازی عصبی، هر پیکسل از نقشه‌ای که حاصل انطباق نقشه‌های برآوردی روی یکدیگر است به عنوان یک بردار ویژگی به شمار می‌آید. از آنجا که هر نقشه برآوردی در یک پیکسل تنها می‌تواند متعلق به یک کلاس باشد و آن کلاس را در بردار ویژگی نشان می‌دهد، بنابراین تعداد مؤلفه‌های این بردار ویژگی برابر با تعداد نقشه‌های برآوردی است. مطلوبیت بردارهای ویژگی با توجه به نوع نهشته معدنی هدف به صورت زیر تعیین می‌شود.

۳-۱. ساختار سیستم استنتاج شبکه عصبی فازی تطبیقی

ساختار اولیه سیستم استنتاج شبکه عصبی فازی تطبیقی شامل یک سیستم پردازشگر فازی نوع Takagi & Sugeno (1985) در قالب یک شبکه پس خور پنج لایه است. شکل ۳ ساختار ساده شده چهارلایه‌ای سیستم استنتاج شبکه عصبی فازی تطبیقی را که در رسم نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. محاسبات انجام شده در هر لایه به طور مختصر در ادامه آمده است (Porwal, 2006).

لایه اول: در لایه اول تعداد 2^n (تعداد مجموعه‌های فازی تعریف شده در (X) گره وجود دارد. از توابع عضویت متفاوتی برای تعیین درجات عضویت استفاده می‌شود که در اینجا از تابع عضویت گوسی استفاده شد. پارامترهای c و σ که شکل توابع و در حقیقت مقادیر عضویت فازی را کنترل می‌کنند، به عنوان پارامترهای مقدمه معرفی می‌شوند.

لایه دوم: هر کدام از 2^n (تعداد قوانین فازی اگر- آنگاه) گره موجود در این لایه شامل عملگر T- نرم به عنوان تابع گره هستند، که با استفاده از اطلاعات تولید شده در لایه اول، بزرگای هر یک از قوانین فازی اگر- آنگاه را محاسبه می‌کند (رابطه ۱):

$$S_k = \mu_{\tilde{A}_1^q}(x_{1j}) \times \mu_{\tilde{A}_2^q}(x_{2j}) \times \ldots \times \mu_{\tilde{A}_n^q}(x_{nj}) \qquad (۱)$$

در این رابطه، q برابر با مقدار صفر یا یک است که این مقدار بر اساس اینکه آیا مقدار عضویت فازی x_{ij} در مجموعه فازی $\tilde{A}_i^j$ را تعریف می‌کند و یا در مجموعه فازی. خروجی هر گره مقدار نرمال شده بزرگای $\bar{s}_k (k=1:2^n)$ مربوط به k امین قانون فازی اگر- آنگاه است:

$$\bar{S}_k = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^{2\pi} S_k} \qquad (۲)$$

لایه سوم: هر یک از 2^n (تعداد قوانین اگر- آنگاه فازی) گره در این لایه، شامل تابع انطباقی زیر هستند:

$$O_k = \bar{s}_k . F_k = \bar{s}_k \left(P_{k0} + P_{k1} x_{1j} + P_{k2} x_{2j} + \ldots + P_{kn} x_{nj} \right) \qquad (۳)$$

در این رابطه O_k مقدار خروجی k امین قانون اگر- آنگاه فازی است. پارامترهای

www.SID.ir

Archive of SID

$P_{kj}\left(k=1:2^n, i=0:n\right)$ با عنوان پارامترهای نتیجه معرفی می‌شوند. در مورد سیستم پردازشگر فازی نوع Takagi & Sugeno (1985) مرتبه صفر $F_k = P_{k0}$.

لایه چهارم: تک گره موجود در این لایه، با استفاده از اطلاعات منتقل شده از لایه سوم، مقدار خروجی کلی را به صورت زیر ارائه می‌دهد:

$$\text{Overall Output} = \sum_{k=1}^{2n} O_k \qquad (۴$$

۳-۲. الگوریتم یادگیری ترکیبی

اساس قانون یادگیری شبکه‌های قابل تنظیم روش گرادیان نزولی و قوانین زنجیره‌ای است که توسط Werbos (1974) معرفی شد. از این روش می‌توان برای تنظیم پارامترهای شبکه استفاده کرد ولی دارای دو مشکل گیر کردن در مینیمم‌های محلی و کند بودن است. در اینجا از قانون هیبریدی برای آموزش استفاده شد که در روش گرادیان نزولی و برآورد حداقل مربعات را با هم ترکیب کرده و آنها را برای تعیین پارامترهای شبکه به‌کار می‌گیرد.

فرض کنید یک ANFIS دارای دو متغیر x_1 و x_2 است، خروجی نهایی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} O_1 + O_2 &= \bar{s}_1\left(P_{10} + P_{11}x_1 + P_{12}x_2\right) + \bar{s}_2\left(P_{20} + P_{21}x_1 + P_{22}x_2\right) \\ &= \left(\bar{s}_1\right)P_{10} + \left(\bar{s}_1 x_1\right)P_{11} + \left(\bar{s}_1 x_2\right)P_{12} + \left(\bar{s}_2\right)P_{20} \\ &\quad + \left(\bar{s}_2 x_2\right)P_{11} + \left(\bar{s}_2 x_2\right)P_{22} \end{aligned} \qquad (۵$$

که در صورتی که پارامترهای مقدمه و بنابراین قدرت آتش شدن قوانین اگر- آنگاه فازی ثابت باشند، پارامترهای P_{ki} خطی است.

مدل ترکیبی نروفازی از فرایند یادگیری هیبریدی برای برآورد پارامترهای مقدمه و نتیجه استفاده می‌کند. فرایند یادگیری هیبریدی پارامترهای نتیجه را در یک مسیر رو به جلو و پارامترهای مقدمه را در یک مسیر رو به عقب برآورد می‌کند. در مسیر رو به عقب، سیگنال‌های خطا به عقب انتشار پیدا کرده و پارامترهای مقدمه به وسیله روش گرادیان نزولی تجدید می‌شوند (جدول ۲) (Jang, 1993).

۴- زمین‌شناسی منطقه

ناحیه چهارگنبد در شمال خاوری شهرستان سیرجان و بین عرض‌های ′۳۰ °۲۹ تا ′۰۰ °۳۰ شمالی و طول‌های ′۰۰ °۵۶ تا ′۳۰ °۵۶ خاوری واقع شده است (شکل ۴). این ناحیه بسیار کوهستانی بوده که بیشتر نواحی چهارگوش را می‌پوشانند، کوه بیدخان با ارتفاع ۳۹۶۱ متر بلندترین کوه و پس از آن کوه‌های چهل‌تن در خاور، کوه پنج در شمال خاور و کوه خرسی در جنوب را می‌توان نام برد. پایین‌ترین نقطه در محدوده نقشه در کناره‌های رودخانه سرخ با ارتفاع ۲۰۰۰ متر است. دره‌های زیادی در ناحیه وجود دارد که در نتیجه حرکات زمین‌ساختی ایجاد شده‌اند. در مرکز چهارگوش فرسایش باعث ایجاد زمین‌های هموار شده است. مهم‌ترین رودخانه در این ناحیه رود سرخ است، رود تنگو و رودپلنگی از دیگر رودهای این محدوده هستند.

ناحیه چهارگنبد از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در جنوب زون ایران مرکزی و به طور عمده در کمربند آتشفشانی ارومیه- دختر قرار دارد. در ورقه چهارگنبد حدود ۷۰ درصد رخنمون‌های سنگی متعلق به سنگ‌های آتشفشانی است، فعالیت ژرف توده‌ای به صورت جایگیری توده‌های درونی و نیمه‌ژرف در زمان‌های الیگوسن، میوسن میانی و بالایی صورت گرفته است. همچنین در بخش‌های جنوبی ناحیه واحدهای افیولیتی کرتاسه در حد واسط دو زون ارومیه- دختر و سنندج- سیرجان قرار گرفته‌اند. در بخش جنوب باختری محدوده رخنمون کوچکی از تشکیلات پالئوزوییک وجود دارند که شامل سنگ‌های دگرگونی عمدتاً شیست‌های سبز به همراه دولومیت‌های بلورین هستند. زون آمیزه رنگین عمدتاً در کوه خرسی رخنمون دارد، سنگ‌های گابرویی، بازالتی، سرپانتینیتی، آهک‌های پلاژیک، اسپلیت‌ها، دایک‌های دیابازی، آمیزه رنگین را تشکیل می‌دهند، در بخش بالایی واحدهایی از آهک ستبرلایه در این کمپلکس وجود دارد (قلمقاش، ۱۳۷۸).

زیرین‌ترین بخش ائوسن در هسته تاقدیس چهل‌تن دیده شده است که حاوی لایه‌های کنگلومرا و ماسه‌سنگ است که ۲۰۰ متر ستبرا دارد، به سمت افق‌های بالاتر، سنگ‌های آندزیتی، لایه‌های توفی- آندزیتی در ناودیس گهدیج فعالیت‌های آتشفشانی زیردریایی سنگ‌های آذرآواری و لایه‌های گدازه‌ای را ایجاد کرده که شامل آندزیت- بازالت‌ها و آندزیت‌پورفیری‌ها هستند. در شمال باختری چهارگوش توف‌های داسیتی گسترش دارند. به سمت افق‌های بالاتر انواع واحدهای سنگی با ترکیبات آندزیتی، آذرآواری، توف‌ها، تناوبی از آندزیت و آهک‌های نومولیت‌دار و توف‌های ریولیتی در ناحیه دیده شده است. توف‌های ریولیتی بیشتر در اطراف معدن چهارگنبد گسترش دارند و رسوبات الیگوسن با کنگلومرای سرخ‌رنگ شروع می‌شود (قلمقاش، ۱۳۷۸).

در بخش شمالی چهارگوش رسوبات تخریبی شامل ماسه‌سنگ، کنگلومرا و مارن‌های گچ‌دار که مربوط به میوسن هستند وجود دارد، در اطراف معدن چهارگنبد رسوبات آهک ریفی بر روی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن قرار گرفته‌اند، بررسی فسیل‌ها سن آنها را از الیگوسن تا میوسن مشخص کرده است. در ادامه مجموعه‌ای از سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگی، شیل، مارن با لایه‌هایی از توف و گدازه‌های آندزیتی دیده می‌شوند که سازند چهارگنبد نام‌گذاری شده‌اند. در بخش شمالی چهارگوش و در کناره کوه پنج رسوبات کنگلومرایی، ماسه‌سنگی، سیلتستون وجود دارند که به الیگومیوسن نسبت داده شده‌اند. بالاترین واحد سنگی زمان نئوژن را در هسته ناودیس ماه خاتونی (شمال جاده کرمان- سیرجان) می‌توان دید که شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ و مارن هستند. در خاور و جنوب خاور ناحیه چهارگوش چهارگنبد بخشی از مجموعه آتشفشانی بیدخان واقع شده است. بخشی از این مجموعه که استراتوولکان است در برگه بردسیر واقع شده، فرآورده‌های آن عمدتاً انفجاری و شامل برش‌های داسیتی، اگلومرا، توف، روانه‌های آندزیتی که از دگرسانی مصون مانده‌اند، مجموعه‌ای از توف، لاهار و کنگلومرا با قطعات داسیتی- آندزیتی و در پایان روانه‌های آندزیتی- بازالتی هستند که در بخش‌هایی به صورت دایک در طبقات تزریق گشته‌اند. رسوبات پلیوسن- کواترنری که عموماً رسوبات ناپیوسته هستند شامل کنگلومراهای سست، تراورتن، تراس و فن‌های گراولی و آلوویوم‌های جدید هستند. برخی از تراورتن‌های این ناحیه مرغوبیت خوبی دارند (قلمقاش، ۱۳۷۸).

سنگ‌های نفوذی گسترش خوبی در ناحیه چهارگنبد دارند که آنها را به دو بخش می‌توان تقسیم کرد، اول توده‌های گرانیتی- گرانودیوریتی که عمدتاً در بخش‌های مرکزی ناحیه رخنمون دارند، در بخش‌هایی از این سنگ‌ها دگرسانی وجود دارد. این توده‌ها در اطراف خود دگرسانی‌های سریسیتی و اپیدوتی را ایجاد کرده‌اند. سری دوم از توده‌های نفوذی که سنگ‌های آنها ترکیبی کوارتزدیوریتی دارند ظاهراً از سری اول جوان‌تر بوده و در اواخر میوسن تزریق گشته‌اند و کانی‌سازی مس بیشتر در این سری رخ داده است. انواع دگرسانی‌ها شامل رسی پیشرفته، رسی، فیلیک، جاروسیت و سیلیس در این توده‌ها و اطراف آنها ایجاد شده است. دایک‌های داسیتی و آندزیتی از جمله نفوذی‌های نیمه‌ژرف هستند که از توده‌های یادشده جوان‌ترند (قلمقاش، ۱۳۷۸).

۵- نقشه‌های فاکتور

لایه‌های اطلاعاتی که برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی در این منطقه مورد استفاده قرار گرفتند شامل نقشه‌های فاکتور سنگ میزبان، ژئوشیمی تک‌متغیره عنصر مس، ژئوشیمی چندمتغیره، ژئوفیزیک، گسل و دگرسانی است. افزون بر این، اطلاعات مربوط به تعداد ۲۲ اندیس معدنی موجود در منطقه نیز برای این پژوهش در دسترس بود. این نقشه‌ها با استفاده از دانش کارشناسی کلاسه‌بندی شده و به کلاس‌های آنها با توجه به ارتباطشان با کانی‌زایی از ۱۰ تا ۱ وزن داده شد.

www.SID.ir

Archive of SID

اطلاعات واحدهای سنگی و ساختارهای استفاده شده در این پژوهش مربوط به نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور است. تعداد کل انواع سنگی موجود در ورقه چهارگنبد برابر ۷۰ نوع سنگی است. پس از ترکیب کردن آنها ۱۲ کلاس کلی انتخاب شد. سپس با توجه به ارتباط آنها به کانی‌سازی به هر یک از کلاس‌ها امتیاز داده شد که بالاترین امتیاز به نوعی از سنگ که بیشترین ارتباط را با کانی‌سازی داشت و کمترین امتیاز برابر زمینه در نظر گرفته شد و در نهایت ۶ کلاس تعیین شد (شکل ۵- الف) (خان‌ناظر، ۱۳۷۵). با توجه به این‌که گسل‌های موجود در منطقه تا فاصله ۲۰۰۰ متری با کانی‌سازی ارتباط دارند، بنابراین برای آنها شعاع تأثیرهای ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ متری تعیین شد که وزن آنها به نسبت فاصله آنها از کانی‌سازی کم شد (شکل ۵- ب).

داده‌های ژئوشیمی استفاده شده در این پژوهش مربوط به نمونه‌های برداشت شده توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور است. اکتشافات ژئوشیمیایی در این محدوده با برداشت ۸۴۶ نمونه از رسوبات آبراهه‌ای به انجام رسیده است. برای فاکتور ژئوشیمی نقشه‌های تک‌متغیره عنصر مس و چندمتغیره (Cu، Pb، Zn) ترکیب شده و به صورت یک نقشه واحد تبدیل شد (شکل ۶- الف).

شرکت ملی صنایع مس ایران به منظور شناسایی مناطق مستعد کانی‌سازی مس در ایران طی قراردادی با شرکت‌های ژاپنی ERSDAC و NED از سال ۲۰۰۵ میلادی مطالعات سنجش از دور را در نواحی مستعد شروع کرد. در این ناحیه تصاویر لندست و استر برای پردازش‌های مختلف تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس نتایج مطالعات فوق، پنج دگرسانی رسی پیشرفته، رسی، فیلیک، جاروسیت و سیلیس در این ناحیه شناسایی شده‌اند که در این بین به دگرسانی‌های آرژیلیک و آرژیلیک پیشرفته وزن برابر و بیشتر از دیگر دگرسانی‌ها داده شد و به‌طور کلی یک نقشه فاکتور ۶ کلاسه برای این لایه تهیه شد (شکل ۶- ب).

اطلاعات ژئوفیزیک استفاده شده داده‌های رادیومتری شامل مقدار پتاسیم و نسبت توریم به پتاسیم بودند. معیارهای مورد استفاده در این اولویت‌بندی به شرح زیر است: ۱) نواحی اولیه به‌دست آمده اولیه در اولویت سوم و دارای مقدار ۱ در نقشه تلفیق، ۲) نواحی دارای نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵ در اولویت دوم و دارای مقدار ۲، ۳) نواحی دارای نسبت توریم به پتاسیم کمتر از ۲/۵ به همراه پتاسیم بیش از ۳ درصد در اولویت اول و دارای مقدار ۳ در نقشه تلفیق. در نهایت نقشه ژئوفیزیک نیز به ۴ کلاس طبقه‌بندی شد (شکل ۶- ج).

۵-۱. پیش‌پردازش

برای آماده‌سازی داده‌ها برای تلفیق، لایه‌های اطلاعاتی با اندازه سلول ۱۰۰ m×۱۰۰ شبکه‌بندی شدند. لایه هدف دارای یک حالت صفر برای عدم وجود کانسار و حالت یک برای وجود کانسار است. با توجه به اندیس‌های موجود در منطقه شعاع تأثیرهای متفاوتی برای آنها در نظر گرفته شد که آنها شامل اندازه‌های ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری بودند که با افزایش این اندازه تعداد داده‌های آموزشی افزایش پیدا کرد. پس از آن مقادیر کل لایه‌های اطلاعاتی بین ۰/۱ تا ۰/۹قرار گرفتند.

۵-۲. ساختار شبکه نروفازی و آموزش شبکه

شبکه نروفازی (شکل ۷) به‌کار گرفته شده یک شبکه نروفازی نوع Takagi & Sugeno (1985) از مرتبه صفر است که روی هر لایه دو تابع از نوع Gbell یا گوسین تعریف شد که این توابع شامل مقادیر مطلوبیت و غیرمطلوبیت نهشته‌های معدنی هستند. با توجه به این که در این نوع شبکه‌ها تعداد قوانین فازی برابر 2^n (n برابر تعداد لایه‌های ورودی) است، بنابراین شبکه دارای ۳۲ قانون اگر- آنگاه فازی است که ۲۰ پارامتر مقدمه باید در این لایه برآورد شود و تعداد پارامترهای نتیجه نیز برابر ۳۲ است.

برای آموزش شبکه مقادیر مربوط به پیکسل‌ها بین ۰/۱ و ۰/۹ قرار گرفت و پس از آماده‌سازی ماتریس مربوط به داده‌های آموزشی که ۶۰ درصد آنها به عنوان داده‌های آموزش و ۴۰ درصد دیگر به عنوان داده‌های چک تعیین شد، شبکه مورد آموزش قرار گرفت. تعداد تکرار برای این شبکه برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شد و پس از آموزش آن داده‌های جدید به عنوان ورودی برای کلاسه‌بندی به شبکه داده شد.

همان‌طور که گفته شد یکی از مشکلات استفاده از روش‌های داده- مبنا تعداد کم داده‌های آموزشی است که این مسئله باعث می‌شود که شبکه پایدار نباشد. به عبارت دیگر، به کلاسه‌بندی انجام شده نمی‌توان اعتماد کرد. تاکنون تعدادی از پژوهشگران برای حل این مسئله راه‌حل‌هایی ارائه داده‌اند (Brown et al., 2003; Skaber, 2005). همان‌طور که پیشتر گفته شد در این نوشتار تعداد داده‌های آموزشی نسبت به دیگر کارهای انجام شده در این زمینه خیلی پایین بود و برای این مشکل شعاع تأثیرهای متفاوت برای اندیس‌ها در نظر گرفته شد. با به کار بردن این روش تعداد داده‌های آموزشی افزایش داده شد. با استفاده از این سری داده شبکه آموزش داده شده و داده‌های جدید برای کلاسه‌بندی وارد شبکه شدند که از بین آنها سه تا از نقشه‌ها که به صورت دوکلاسه و برای مقایسه هستند در شکل ۸ قابل مشاهده‌اند. در شکل ۹ نیز نقشه نهایی این منطقه نشان داده شده است. در تمام این نقشه‌ها مقدار خروجی بیشتر از ۰/۵ به عنوان بی‌هنجاری و کمتر از آن به عنوان زمینه در نظر گرفته شد.

برای اعتبارسنجی نقشه‌ها از اندیس‌های موجود در منطقه استفاده شد، گفتنی است که از بین ۲۲ اندیس موجود ۲ اندیس به دلیل اینکه هیچ تأثیری در کلاسه‌بندی نداشتند حذف شدند. در حالی که هیچ اطلاعاتی نیز راجع به این اندیس‌ها وجود نداشت. با توجه به محاسبات آماری انجام شده دیده شد که بهترین کلاسه‌بندی برای شعاع تأثیر ۵۰۰ متر برای اندیس‌ها به‌دست آمد که همان‌طور که از شکل ۹ نیز مشخص است ۸۰٪ (۱۶ اندیس از بین ۲۰ اندیس) از کل اندیس‌ها در منطقه با پتانسیل بالا قرار گرفته‌اند. این مقدار برای بدون شعاع تأثیر و شعاع تأثیرهای ۲۰۰ و ۱۰۰۰ متری به ترتیب برابر ۵۵٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ است (شکل ۸).

۶- بحث

یکی از فاکتورهای مهم در استفاده از روش‌های فازی- عصبی تعیین نوع توابع عضویت و همچنین تعداد آنهاست. توابع عضویت استفاده شده در این نوشتار از نوع گوسین بوده که مقدارهای ورودی را بین صفر و یک قرار می‌دهد و در این نوع تابع دو پارامتر مرکز و مقیاس فاصله باید بهینه شوند (Zimmermann, 1991). به دلیل اینکه در این پژوهش هدف جدا کردن مناطق دارای پتانسیل کانی‌سازی از دیگر مناطق بود بنابراین تعداد توابع عضویت برابر دو تابع در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر هدف تهیه نقشه‌ای بود که بتواند محدوده را به دو کلاس پتانسیل‌دار و غیرپتانسیل‌دار تبدیل کند. با این حال، در صورتی که کلاس‌ها افزایش داده شود، تعداد این توابع عضویت نیز باید افزایش داده شود. برای نمونه، با افزودن یک کلاس متوسط به این نقشه تعداد توابع عضویت برابر ۳ خواهد شد.

همان‌طور که گفته شد افزون بر پارامترهای تابع گوسین که به عنوان پارامترهای مقدمه هستند، پارامترهای نتیجه نیز باید بهینه شوند (Jang, 1993). در اینجا تعداد لایه‌های ورودی برابر ۵ بود و شبکه نروفازی استفاده شده از نوع Takagi & Sugeno (1985) مرتبه صفر بود پس تعداد پارامترهای مقدمه برابر ۲۰ و نتیجه برابر ۳۲ است. با توجه به اینکه تعداد اندیس‌هایی که برای آموزش شبکه قابل استفاده بودند برابر ۲۰ (آموزش و اعتبارسنجی شبکه) و تعداد پارامترهای که باید بهینه می‌شدند ۵۲ بود، بنابراین این شبکه پایدار نیست و نمی‌توان به نتایج آن اطمینان کرد. راه‌حل ارائه شده برای این مسئله تعیین شعاع تأثیر برای اندیس‌های معدنی بود (از آنجایی که معمولاً اندیس‌ها گسترشی بیشتر از ۱۰۰ متر دارند، این راه‌حل قابل قبول به نظر می‌رسد). گفتنی است که اندازه‌های سلول‌ها برای رستر کردن لایه‌های اطلاعاتی برابر ۱۰۰ متر در نظر گرفته شد.

استفاده از این روش دو مزیت مهم برای شبکه مورد استفاده داشت. ابتدا تعداد مثال‌های آموزشی که کم بودن آنها یکی از محدودیت‌های استفاده از روش‌های

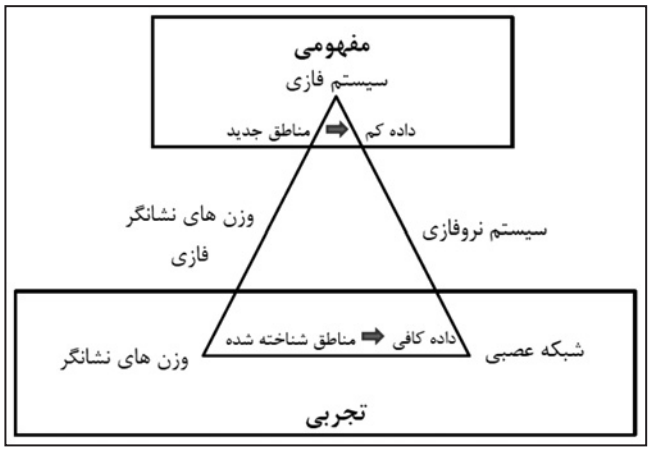
www.SID.ir

Archive of SID

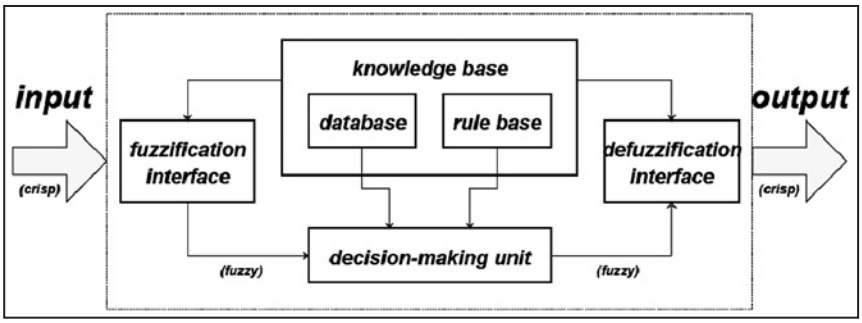
داده مبنا است را افزایش داده و باعث پایداری شبکه شد. برای نمونه با تعیین شعاع تأثیرهای ۲۰۰ متری برای اندیس‌ها تعداد داده‌های آموزشی از ۲۰ به ۱۸۰ افزایش پیدا کرد. دوم اینکه تعداد اعتبار نقشه نهایی افزایش پیدا کرد، در حالتی که شعاع تأثیری برای اندیس‌ها تعیین نشد تعداد اندیس‌هایی که در محدوده پتانسیل بالا قرار گرفتند برابر ۵۵٪ و در بهترین حالت (شعاع تأثیرهای ۵۰۰ متری) این مقدار به ۸۰٪ افزایش پیدا کرد.

۷- نتیجه‌گیری

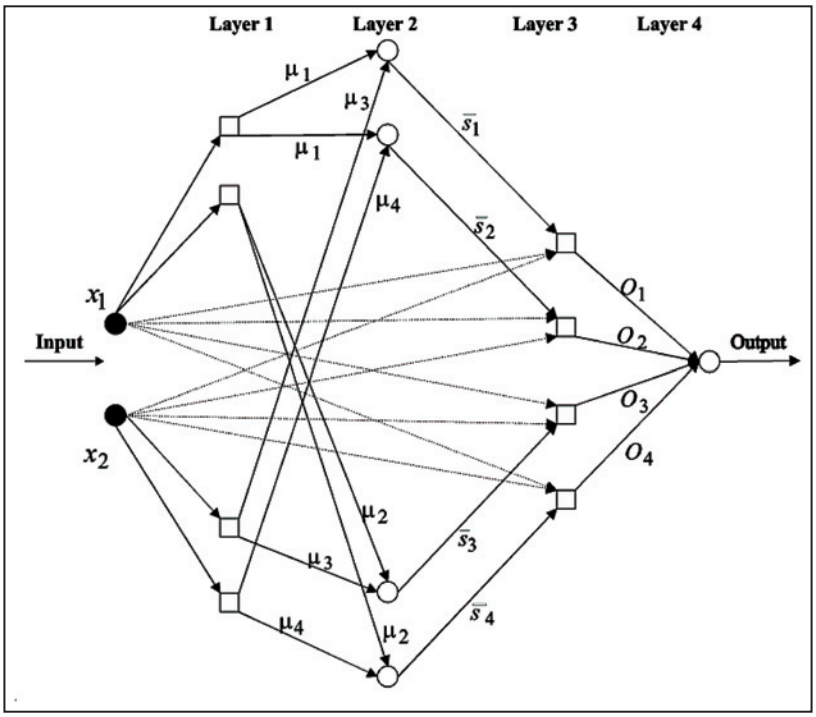
مدل ترکیبی نروفازی یکی از مهم‌ترین روش‌های تهیه نقشه پتانسیل معدنی در یک منطقه است. به دلیل این که در این روش از هر دو روش داده- مبنا و دانش- مبنا برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی استفاده می‌شود، بنابراین افزون بر این که از تمام اطلاعات موجود استفاده می‌شود باعث کاهش عدم قطعیت نیز خواهد شد. مشکل ابعاد داده‌ها در این روش با تعیین شعاع تأثیر برای اندیس‌ها برطرف می‌شود، بدین صورت که هر اندیس شامل بیش از یک سلول خواهد بود. در این نوشتار با استفاده از این روش (شعاع تأثیرهای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متری برای اندیس‌ها) اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی شد و همان‌طور که نشان داده شد (شکل‌های ۸ و ۹) اعتبار نقشه نهایی از ۵۵٪ به ۸۰٪ افزایش پیدا کرد.



شکل ۱- ارتباط بین روش‌های داده- مبنا و دانش مبنا و روش‌های ترکیبی آنها (Brown et al., 2003).



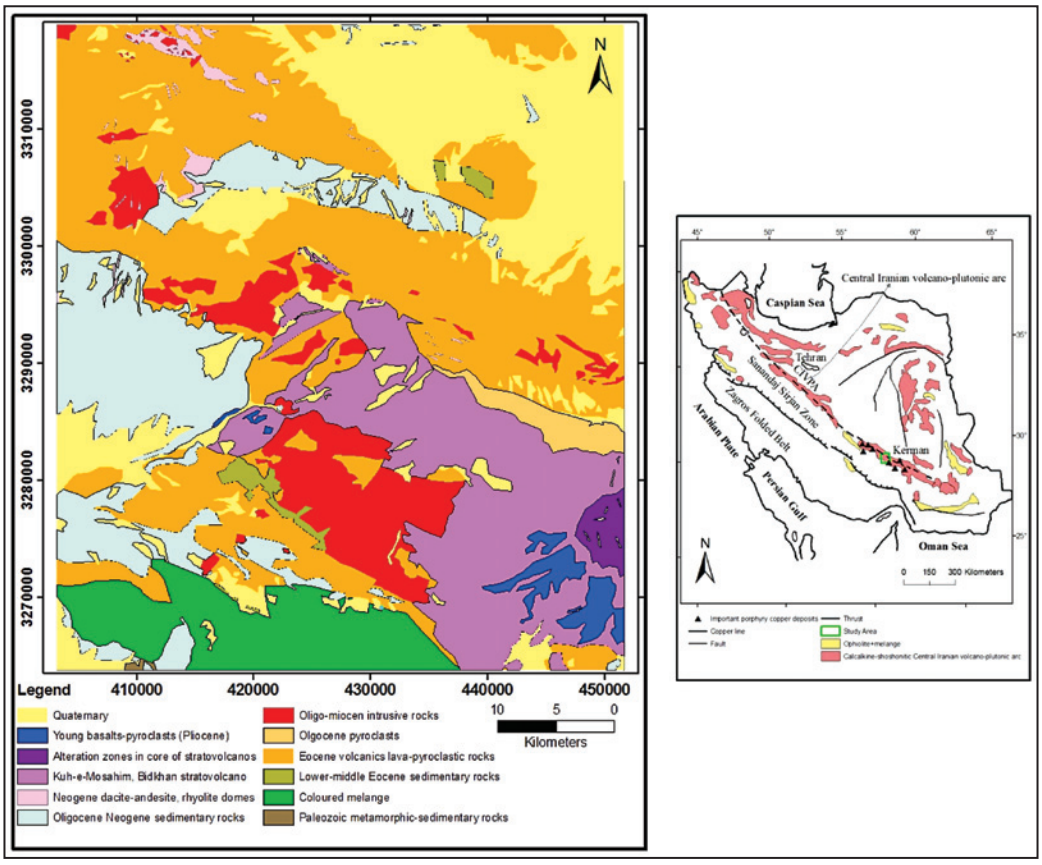
شکل ۲- بخش‌های یک سیستم استنتاج فازی (Jnag, 1993).



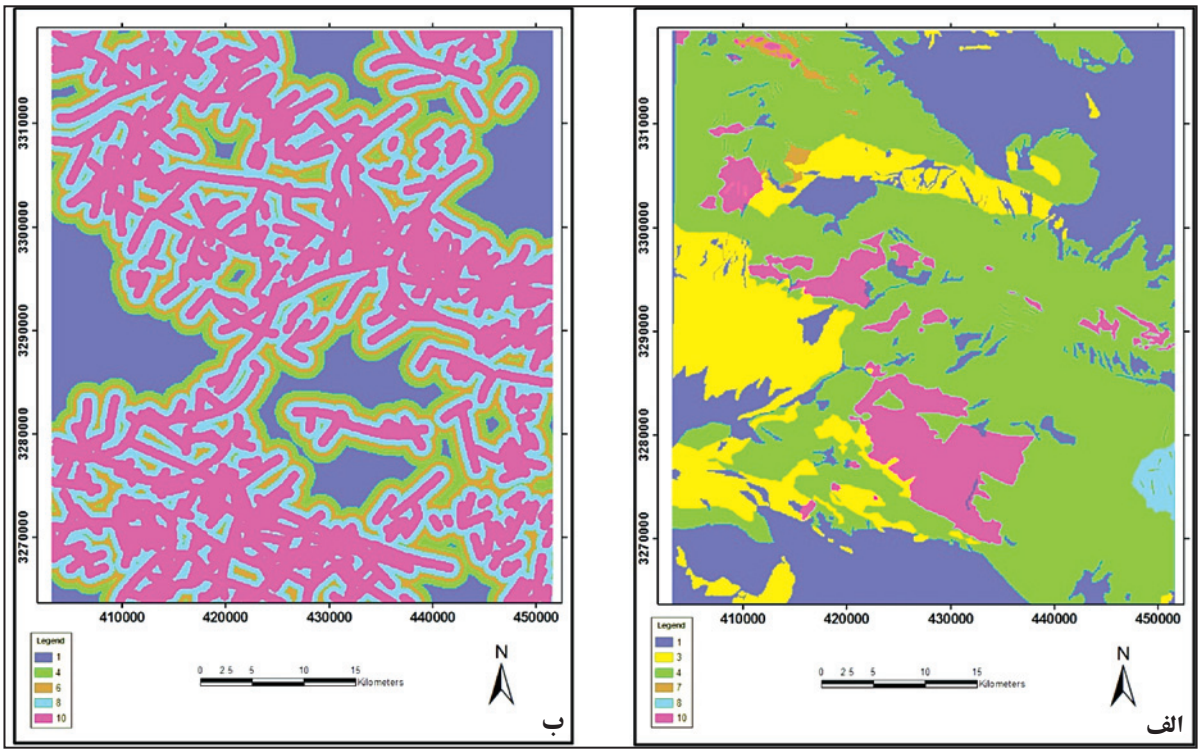
شکل ۳- نمای ساده شده از ANFIS برای رسم نقشه پتانسیل معدنی (Porwal, 2004).

www.SID.ir

Archive of SID



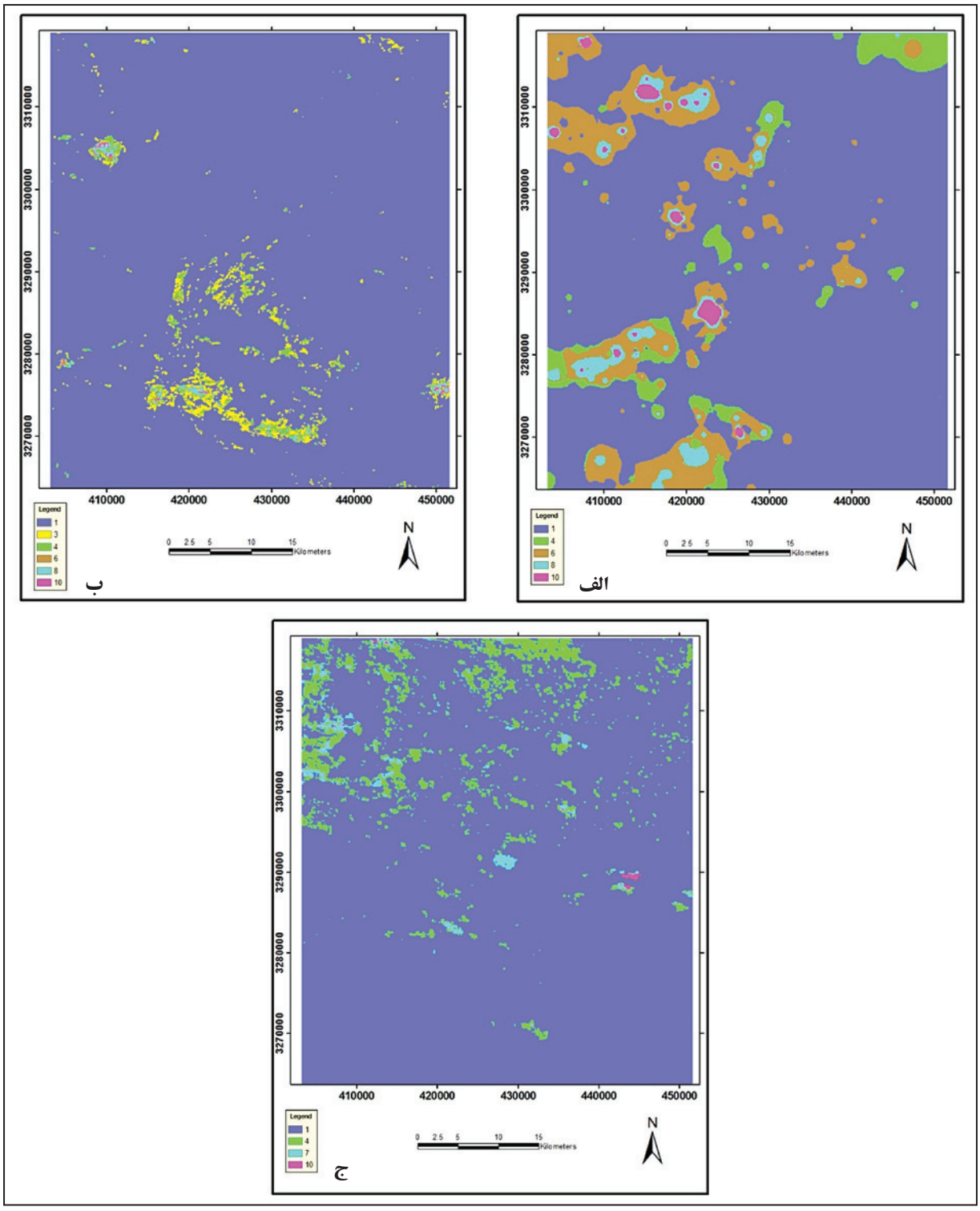
شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ و موقعیت جغرافیایی برگه چهارگنبد.



شکل ۵ - نقشه فاکتورهای الف) زمین‌شناسی و ب) گسل‌های موجود در منطقه.

www.SID.ir

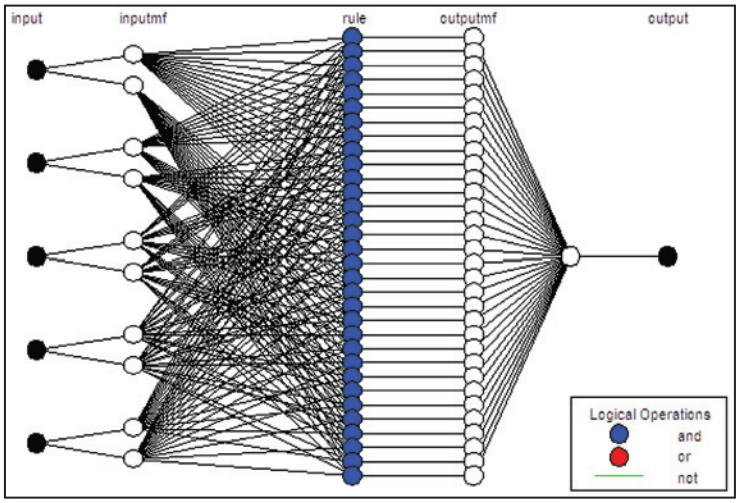
Archive of SID



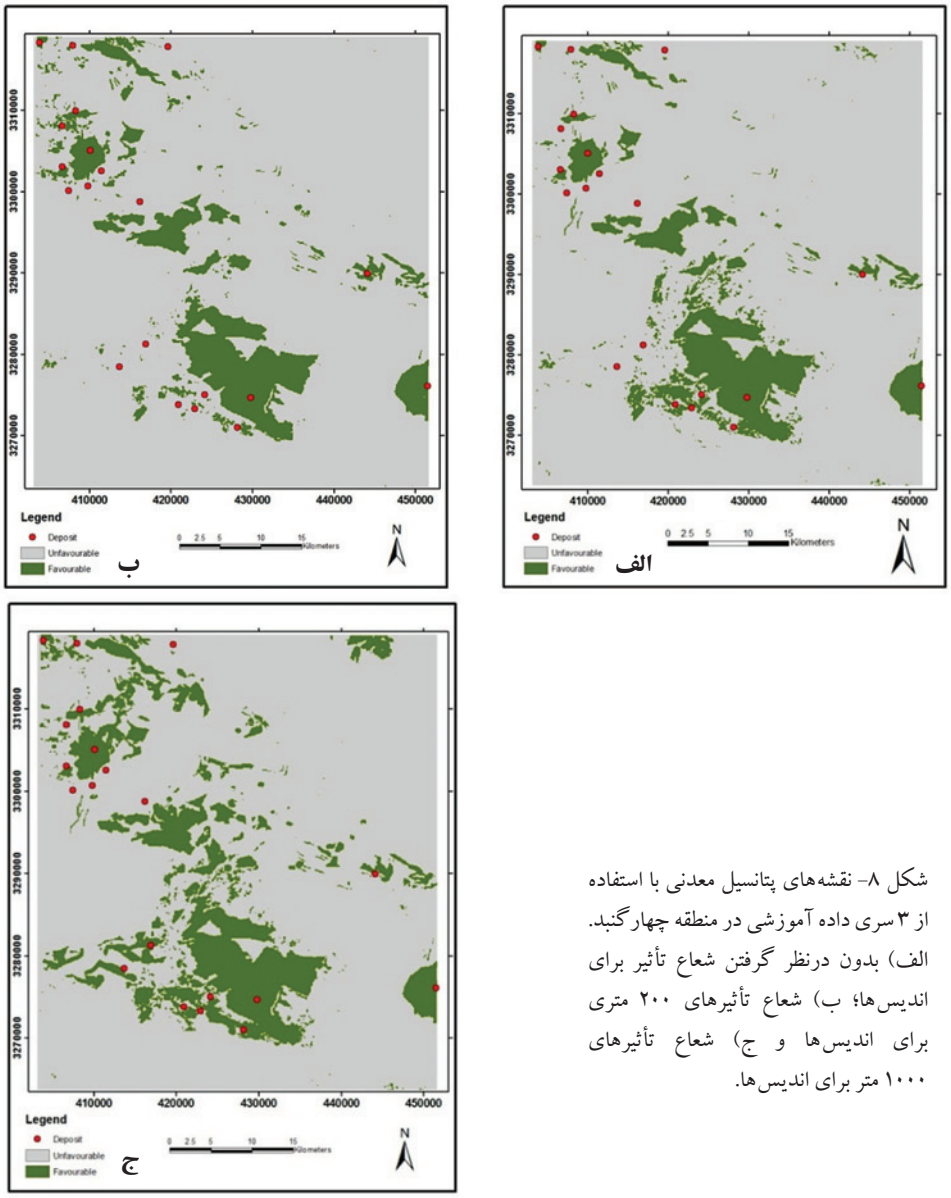
شکل ۶- نقشه فاکتورهای الف) ژئوشیمی؛ ب) دگرسانی و ج) ژئوفیزیک.

www.SID.ir

Archive of SID



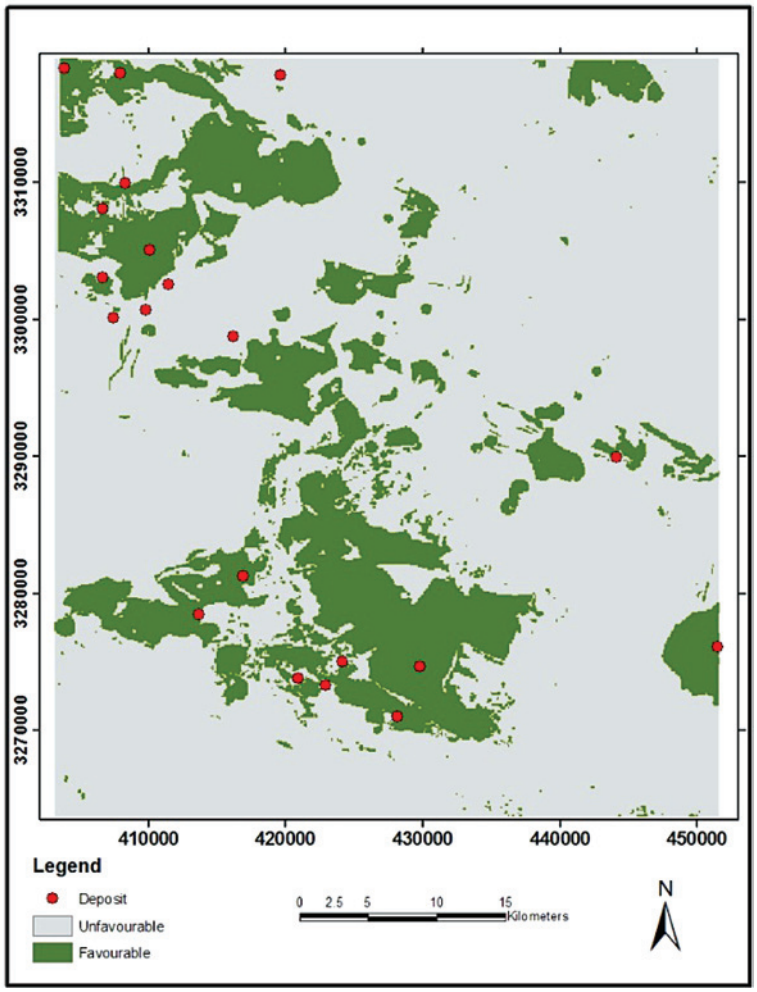
شکل ۷- شبکه نروفازی به‌کار گرفته شده در تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در منطقه چهارگنبد.



شکل ۸- نقشه‌های پتانسیل معدنی با استفاده از ۳ سری داده آموزشی در منطقه چهارگنبد. الف) بدون درنظر گرفتن شعاع تأثیر برای اندیس‌ها؛ ب) شعاع تأثیرهای ۲۰۰ متری برای اندیس‌ها و ج) شعاع تأثیرهای ۱۰۰۰ متر برای اندیس‌ها.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹- نقشه دوکلاسه نهایی پتانسیل معدنی مس با استفاده از روش نروفازی در برگه چهارگنبد..

جدول ۱- ترکیبات مختلف روش‌های مدل‌سازی فازی و شبکه‌های عصبی.

نوع مدل	تعریف مدل
شبکه‌های عصبی فازی	مدل‌های فازی برای بهتر کردن عملکرد شبکه‌های عصبی به‌کار می‌روند، مثلاً این کار را با تغییر میزان آموزش شبکه با استفاده از قوانین فازی انجام می‌دهند.
سیستم‌های فازی/ شبکه‌های عصبی همزمان	در اینجا هر دو روش با همکاری هم روی یک موضوع کار می‌کنند ولی روی هم اثر نمی‌گذارند.
سیستم‌های نروفازی که با هم کار می‌کنند	شبکه‌های عصبی برای تعیین پارامترهای سیستم فازی به‌کار می‌روند ولی پس از تعیین پارامترها، سیستم فازی به تنهایی عمل می‌کند.
مدل‌های ترکیبی نروفازی	هر دو مدل شبکه عصبی و سیستم فازی با هم ترکیب شده و در یک قالب همگن قرار می‌گیرند.

جدول ۲- دو مسیر در فرایند یادگیری هیبریدی برای ANFIS (Jang, 1993).

	مسیر رو به جلو	مسیر رو به عقب
پارامترهای مقدمه	ثابت	گرادیان نزولی
پارامترهای نتیجه	تخمین حداقل مربعات	ثابت
سیگنال‌ها	خروجی‌های گره	نرخ‌های خطا

www.SID.ir

Archive of SID

کتابنگاری

خان‌ناظر، ن. ح.، ۱۳۷۵ - نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ منطقه چهارگنبد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

قلمقاش، ج.، ۱۳۷۸- مطالعات سنگ‌شناسی منطقه چهارگنبد، پروژه اکتشافات سیستماتیک در کمربند ارومیه- دختر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

References

Behnia, P., 2007- Application of radial basis functional link networks to exploration for Proterozoic mineral deposits in Central Iran: Natural Resources Research., Vol. 16, No. 2, pp. 147–155.

Bonham-Carter, G. F., 1994- Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS, Pergamon, Ontario.

Brown, W. M., Gedeon, T. D. & Groves, D. I., 2003- Use of noise to augment training data: a neural network method of mineral potential mapping in regions of limited known deposit examples. Natural Resources Research, v. 12(3), pp. 141-152.

Brown, W. M., Gedeon, T. D., Groves, D. I. & Barnes, R. G., 2000- Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping: Australian Journal of Earth Sciences, Vol. 47, pp. 757-770.

Haris, D. P. & Pan, G. C., 1999- Mineral favorability mapping: a comparison of artificial neural networks, logistic regression and discriminate analysis. Natural Resources Research, Vol. 8(2), pp. 93-109.

Hosseinali, F. & Alesheikh, A. A., 2008- Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration, American Journal of Applied Sciences, 5 (9): pp. 1187-1198.

Jang, J. S. R., 1993- ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 23, pp. 665-685.

Malczewski, J., 1999- GIS and Multicriteria Decision Analysis, John Wiley & Sons INC.

Mamdani, E. H. & Assilian, S., 1975- An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7(1), p. 1-13.

Mamdani, E. H., 1974- Applications of fuzzy algorithm for control of a simple dynamic plant. Proceedings of IEEE, v. 121(12), p. 1585-1588.

Nykanen, V., 2008- Radial basis function link net used as a prospectivity mapping tool for orogenic gold deposit within the central Lapland greenstone belt, Northern Fennoscandian Shield, Natural Resources Research, Vol. 17, No. 1.

Porwal, A., 2006- Mineral potential mapping with mathematical geological models, Ph.D Thesis, University of Utrechet, The Netherland, 289 p.

Porwal, A., Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2003- Artificial neural networks for mineral potential mapping: A case study from Aravalli province, western India, Natural Resources Research, v. 12(3), pp. 155-177.

Porwal, A., Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2004- A hybrid neurofuzzy model for mineral potential mapping, Mathematical Geology, v. 36(7), pp. 803-826.

Sanchez, J. P., Chica-Olmo, M. & Abarca, F., 2003- Artificial neural network as a tool for mineral potential mapping with GIS, INT.J, Remote Sensing, Vol. 24, pp. 1151-1156.

Singer, D. A. & Kouda, R., 1996- Application of a feedforward neural network in the search for Kuroko Deposits in the Hokuroku district, Japan, Mathematical Geology, Vol. 28(8), pp. 1017-1023.

Skaber, A., 2005- Mapping mineralization probabilities using multilayer perceptrons, Natural Resources Research, Vol. 14, No.2.

Sugeno, M. & Kang, G. T., 1988- Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets and Systems, v. 28, p. 12-33.

Sugeno, M. & Tanaka, K., 1991- Successive identification of a fuzzy model and its application to prediction of complex systems. Fuzzy Sets and Systems, v. 42, p. 315-334.

Takagi, T. & Sugeno, M., 1985- Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, v. 15(1), p. 116-132.

Tsukamoto, Y., 1979- An approach to fuzzy reasoning method. In: Gupta, M.M., Ragade, R.K. and Yager, R.R., (Eds.), Advances in Fuzzy Set Theory and Applications, North-Holland, Amsterdam, p. 137-149.

Werbos, P., 1974- Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences. Ph.D. Dissertation, Committee on Applied Mathematics, Harvard University, Cambridge, MA, 61 pp.

Zadeh, L. A., 1973- Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision process. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 3, p. 28-44.

Zimmermann, H. J., 1991- Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 399 p.

www.SID.ir