مدل‌سازی پتانسیل معدنی اندیس مس سوناجیل با استفاده از GIS و منطق فازی

محمد کریمی، محمد جواد ولدان‌زوج: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکدهٔ نقشه برداری
نادر صاحب‌الزمانی: شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشافات و مهندسی توسعه
امیر عادلی سرچشمه، غلامرضا الیاسی، عباس بحرودی: دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن

چکیده

حجم عظیم داده‌های گردآوری شده از بررسی‌های اکتشافی، تا زمانی که به درستی سازمان‌دهی نشوند، نتایج مفید و قابل اطمینانی را نشان نمی‌دهند. تهیه نقشهٔ پتانسیل معدنی با استفاده از روش‌های سنتی و متداول بسیار دشوار و در بعضی مواقع ناممکن است. فناوری سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی ضمن آن‌که می‌تواند در سامان‌دهی اطلاعات مربوط به بررسی‌های اکتشاف ذخایر معدنی استفاده شود، توانایی آن را دارد که تهیه و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف را در قالب مدل‌های گوناگون، با سرعت و دقت بیش‌تری انجام دهد و به منزلهٔ پشتیبانی برای تصمیم‌گیری‌های فضایی استفاده شود. در این مقاله نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس سوناجیل به منظور تعیین نقاط حفاری تهیه شده است. لایه‌های مورد استفاده شامل لایه‌های تیپ سنگ‌شناسی، آلتراسیون، نشانه‌های کانی‌سازی، زون ناهنجاری شارژابیلیته و مقاومت ظاهری و آنومالی عناصر مس، مولیبدن و طلا هستند. بعد از آماده‌سازی اطلاعات و تهیهٔ نقشه‌های فاکتور و وزن‌دهی آن‌ها، این نقشه‌ها در قالب شبکهٔ استنتاجی تلفیق شدند. استفاده از عمل‌گرهای منطق فازی در شبکهٔ استنتاجی ضمن برطرف کردن نقایص موجود در سایر مدل‌ها، امکان ترکیب انعطاف‌پذیرتر نقشه‌های فاکتور را فراهم کرده است. در نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه شده، محتمل‌ترین منطقه از نظر وجود کانی‌سازی مس پرفیری به‌صورت دو کانون احتمالی شمال شرق و جنوب غرب تعیین شد. در نهایت با انطباق گمانه‌های اکتشافی با نقشه‌های پتانسیل معدنی، میزان تطابق نتایج بر اساس دو نوع کلاسه‌بندی نقشهٔ پتانسیل معدنی به‌ترتیب برابر ۹۰/۹۱ و ۸۳/۳۳ درصد محاسبه و انجام عملیات حفاری جدید در مناطق مستعد مشخص شده بر روی این نقشه‌ها توصیه شد. ضمناً در صورت انجام این بررسی‌ها قبل از انجام عملیات حفاری و تنها با فرض حفر نکردن گمانه‌های اکتشافی در مناطق دارای وضعیت ضعیف یا خیلی ضعیف، با استفاده از نقشه‌های سه و پنج کلاسه به‌ترتیب ۸۱/۸ و ۹۰/۹ درصد از گمانه‌ها حفاری نشده و در حدود ۵۰۰ میلیون تومان در هزینه‌های حفاری صرفه‌جویی می‌شد.

واژه‌های کلیدی: سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقشهٔ پتانسیل معدنی، منطق فازی، سوناجیل

دریافت ۸۷/۸/۸ پذیرش ۸۸/۱۰/۱۳

adeli_amir@yahoo.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

مقدمه

در ایران با توجه به وسعت زیاد کشور و گستردگی مناطق پتانسیل‌دار ذخایر معدنی (وجود کمربند ولکانیکی ارومیه ـ دختر) و لزوم شناسایی و مدیریت صحیح این ذخایر، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی دارای اهمیت بسیاری است. پیش از گسترش فراگیر GIS اکثر دانشمندان علوم زمین که با مجموعه داده‌های مکانی مختلف کار می‌کردند، انتخاب، ارزیابی و ترکیب شواهد و مدارك ذخایر معدنی را بر روی میزهای سبك و مجهز به سیستم روشنایی انجام می‌دادند. در این دوره آن‌ها نقشه‌های گوناگون را در قالب لایه‌های اطلاعاتی به طور فیزیکی بر روی هم قرار می‌دادند تا روابط مشترك میان آنومالی‌ها را تعیین کنند[۱].

امروزه GIS تحولی چشمگیر در بسیاری از رشته‌های کاربردی به‌ویژه در زمینهٔ معدن پدید آورده است. این تحول چشمگیر بدین دلیل است که GIS پردازش و تجزیه و تحلیل لایه‌های مجزایی از داده‌های فضایی را امکان‌پذیر می‌سازد و ابزارهایی به منظور تجزیه و تحلیل و مدل‌سازی روابط متقابل میان لایه‌ها فراهم می‌آورد[۱].

امروزه استفاده از GIS به منظور تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی در میان دانشمندان علوم زمین بسیار متداول است؛ برای مثال رایت و بونهام کارتر با استفاده از GIS، پتانسیل معدنی مناطق دریاچهٔ چیزل و دریاچهٔ آندرسن را به‌عنوان بخشی از پروژهٔ تحقیقاتی سازمان زمین‌شناسی کانادا، ارزیابی کرده‌اند. در این ارزیابی، فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی به سه روش منطق فازی، وزن‌های نشان‌گر و تئوری دمپسفر-شفر تلفیق شده‌اند. در این پروژه نتایج این سه روش با ۱٦ ذخیرهٔ معدنی شناخته شده مطابقت داده شد[۲].

در نمونه دیگر، کرانزا و هال در تحقیقی منطق فازی را به‌منظور تهیهٔ پتانسیل معدنی در ذخایر طلای اپی ترمال در ناحیه باگویو در کشور فیلیپین، به‌کار برده‌اند. در این تحقیق فاکتورهای مؤثر در کانی‌سازی با ٤ نوع ترکیب آزمایشی عمل‌گر فازی با یک‌دیگر ترکیب و نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه شد. درصد تطابق با ذخایر تایید شده در ٤ ترکیب مذکور به‌ترتیب برابر با ۷۷/۸، ۷۷/۸، ۷۷/۸ و ۷٦/۲ است[۳]،[۴]. بعضی پژوهندگان دیگر نظیر پوروال، موخوپاژای، آن و همکاران، کریمی و همکاران نیز روش منطق فازی را به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی به کار برده‌اند[۵]،[٦]،[۷]،[۸].

این مقاله در نظر دارد تا با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به‌عنوان بستر مناسبی به منظور آماده‌سازی، پردازش و تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیك و به‌کارگیری روش تلفیق منطق فازی، متدلوژی تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی این اندیس در مقیاس تفصیلی را با هدف تعیین نقاط حفاری در محیط GIS ارائه کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی

تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی روند تحلیلی بسیار پیچیده‌ای دارد که نیازمند توجه همزمان به نقش فاکتورهای متعدد است. با این حال، عملیاتی که برای تهیه نقشه‌های پتانسل معدنی انجام می‌شود، در بسیاری از جهات به عملیات به کار گرفته شده برای کاربردهای متنوع GIS شبیه است. جستجو برای سایر انواع منابع زمین‌شناسی، ارزیابی خطرها، تقابل زیست محیطی و بررسی‌های انتخاب سایت نیز مستلزم گرفتن همزمان داده‌های فضایی از چندین منبع است[۱].

در بررسی‌های اکتشاف ذخایر معدنی نقشه‌های متعددی- که هر کدام بیان‌گر ویژگی‌های معیّن از محدودهٔ پژوهش هستند، تهیه می‌شود. با استفاده از تلفیق نقشه‌های فوق، نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه می‌شود. تهیه نقشهٔ پتانسیل معدنی فرایندی در جهت جداسازی و تفکیک مناطق مطلوب و دارای پتانسیل معدنی از سایر نواحی موجود در یک منطقه است. مناطق موجود بر روی نقشهٔ پتانسیل معدنی با توجه به معیارهای در نظر گرفته شده اعم از معیارهای زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی- از نظر پتانسیل معدنی اولویت‌بندی می‌شوند. مراحل اصلی تهیه نقشهٔ پتانسیل معدنی را می‌توان شامل موارد تعیین فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی، آماده‌سازی اطلاعات، تهیهٔ نقشه‌های فاکتور و تلفیق نقشه‌ها و ارزیابی نتایج دانست [۱]،[۸].

معرفی مدل‌های تلفیق

مدل‌های تلفیق که معمولاً در GIS به منظور اکتشاف ذخایر معدنی به‌کار گرفته شده‌اند، شامل مدل‌های بولین، وزن‌های نشان‌گر، هم‌پوشانی شاخص، منطق فازی و شبکه عصبی هستند. به دلیل اتکای روش وزن‌های نشان‌گر بر وجود ذخایر معدنی شناخته شده، این روش یکی از بررسی‌هایین روش‌ها در تهیه نقشهٔ پتانسیل معدنی در بررسی‌های پی‌چوبی اولیه بوده و در بررسی‌های نیمه تفصیلی و تفصیلی دارای اهمیت و کاربرد کمتری است و به همین دلیل در این پژوهش استفاده نشده است. آگتربرگ و همکاران، بونهام‌کارتر و همکاران، بولنز، اسدی و هال این روش را به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی در بررسی‌های پی‌چوبی اولیه به‌کار گرفته‌اند [۹]، [۱۰]،[۱]،[۱۱]،[۱۲]،[۱۳].

شبکه‌های عصبی توانایی زیادی در حل مسائل پیچیده‌ای دارند که عوامل متعددی در فرایند و نتیجهٔ آن تأثیر می‌گذارند. در ارزیابی روش یادشده می‌توان گفت که این روش نیاز به داده‌های آموزشی دارد و فقط در مناطقی قابل استفاده است که متغیرهای واکنشی، نظیر پراکندگی ذخایر معدنی شناخته شده و یا چاه‌های اکتشافی وجود داشته باشند. بنا بر این، روش شبکه‌های عصبی در بررسی‌های تفصیلی کمتر استفاده می‌شود. براون، پوروال اقدام به تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی با استفاده از شبکه‌های عصبی کرده‌اند[۱۴]،[۱۵].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در روش هم‌پوشانی شاخص فاکتورها بسته به اهمیت آن‌ها وزن‌دار و مطابق با یك الگوی هدفمند با یك‌دیگر ترکیب می‌شوند. در بررسی‌های اکتشافی که معمولاً نقشه‌های معیار، نقشه‌های چند کلاسه‌اند، به‌منظور تلفیق نقشه‌ها از رابطهٔ (۱) استفاده می‌شود.

$$\overline{S} = \frac{\sum_{i}^{n} S_{ij} W_i}{\sum_{i}^{n} W_i} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در این رابطه $\overline{S}$ امتیاز محاسبه شده برای موضوع یا عارضه، W_i وزن i امین نقشهٔ ورودی و S_{ij} امتیاز j امین کلاس از i امین نقشه است. بزرگ‌ترین نقطه ضعف این روش ماهیت افزودهٔ خطی آن است[۱].

استفاده تلفیقی از عمل‌گرهای منطق فازی و هم‌پوشانی شاخص در شبکهٔ استنتاجی ضمن برطرف‌کردن نقایص موجود در سایر مدل‌ها، مشکل ماهیت افزایشی و خطی مدل را اصلاح و امکان ترکیب قابل انعطاف‌تر نقشه‌های فاکتور را فراهم کرده و در این مقاله نیز به‌کار گرفته شده است. در ادامه، مدل یاد شده به اختصار ارائه می‌شود.

منطق فازی: در نظریهٔ کلاسیك مجموعه‌ها، عضویت یك عنصر در یك مجموعه به‌عنوان صفر یا یك تعریف می‌شود. در نظریهٔ فازی مجموعه‌ها، مجموعهٔ فازی به‌عنوان یك زیرمجموعه از عناصری تعریف می‌شود که درجهٔ عضویتشان در مجموعه بین صفر و یك است[۱۶]. مقدارهای عضویت فازی مانند وزن‌های موجود در روش هم‌پوشانی شاخص، می‌توانند بر اساس قضاوت ذهنی در بارهٔ اهمیت نسبی نقشه‌ها و کلاس‌های موجود در هر نقشه و یا بر اساس داده‌ها تعیین شود. به منظور تلفیق داده‌های اکتشافی ذخایر معدنی، پنج عمل‌گر فازی مفید تشخیص داده شده است که در جدول۱ به صورت مختصر معرفی شده‌اند[۷]،[۱].

جدول ۱. معرفی عمل‌گرهای فازی مفید در تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی[۱]،[۸]

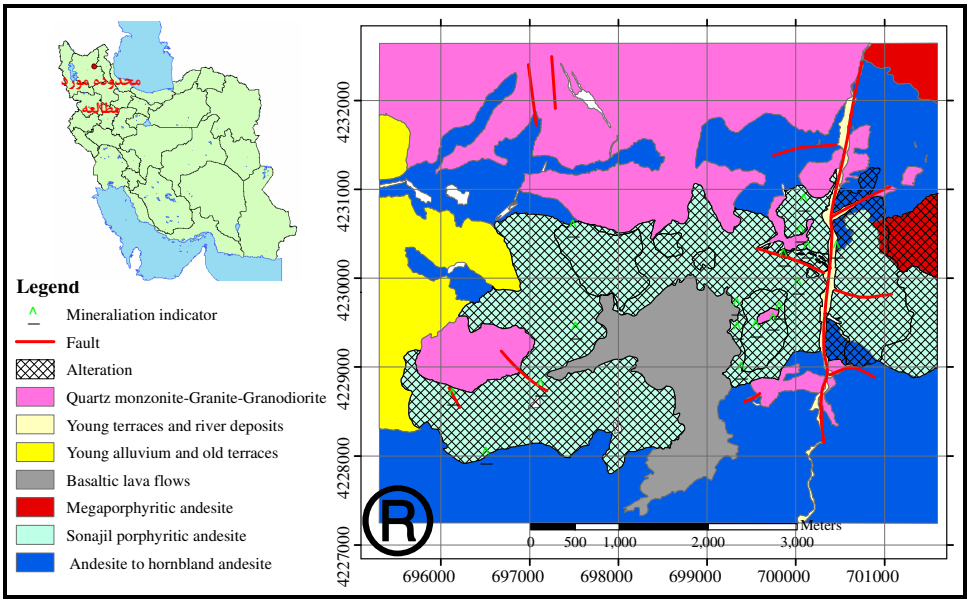
عمل‌گر	رابطه عمل‌گر	ویژگی‌های عمل‌گر
Fuzzy AND	$\mu_{\text{Combination}} = MIN(\mu_A, \mu_B, \mu_C, ...)$	هم‌ارز عمل‌گر منطقی AND در مجموعهٔ کلاسیك، پدید آمدن تخمینی محافظه کارانه و لزوم وجود دو یا چند شاهد برای اثبات یك فرضیه
Fuzzy OR	$\mu_{\text{Combination}} = MAX(\mu_A, \mu_B, \mu_C, ...)$	هم‌ارز عمل‌گر منطقی OR در مجموعهٔ کلاسیك، کاربرد در مواردی که فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی کم و حضور هر فاکتور مثبت برای اظهار مطلوبیت کافی باشد
Fuzzy Product	$\mu_{\text{Combination}} = \prod_{i=1}^{n} \mu_i$	دارای اثر کاهشی و کاربرد در مواردی که دو فاکتور یك‌دیگر را تضعیف می‌کنند
Fuzzy Sum	$\mu_{\text{Combination}} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - \mu_i)$	دارای اثر افزاینده و کاربرد در مواردی که دو یا چند شاهد یك فرضیه را تأیید و یك‌دیگر را تقویت می‌کنند
Fuzzy Gamma	$\mu_{Combinaticn} = (Fuzzy\ Agebraic\ Sum)^{\gamma}$ $(Fuzzy\ \text{Algebraic Product})^{1-\gamma} *$	γ بین عدد صفر تا یك، ایجاد سازگاری قابل انعطاف میان گرایش‌های کاهشی و افزایشی دو عمل‌گر فازی Product و Sum با انتخاب صحیح و آگاهانه γ

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

در روابط یاد شده n فاکتور کنترل‌کننده کانی‌سازی ترکیب می‌شوند و μ_i بیان‌گر وزن لایه i ام است. در عمل ممکن است تعداد متنوعی از عمل‌گرهای فازی در تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی استفاده شوند. بنا بر این به‌جای ترکیب تمامی نقشه‌ها با عمل‌گر خاصی مانند γ، ممکن است بهتر باشد که با توجه به ماهیت فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی و اثرات آن‌ها بر روی یک‌دیگر از عمل‌گر مناسب در هر مرحله از فرایند تلفیق نقشه‌ها استفاده کرد[۱]. با توجه به ویژگی‌های هر یک از مدل‌های بررسی‌شده، مدل منطق فازی مناسب بوده است و استفاده از این مدل به منظور تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی در جهت تعیین نقاط حفاری بهینه در مرحلهٔ تفصیلی مناسب است.

بررسی موردی

منطقهٔ سوناجیل در فاصلهٔ هوایی ۱۷ کیلومتری شرق هریس و ۴۵ کیلومتری جنوب شرق اهر قرار گرفته است. طول این محدودهٔ ۶/۲۸ کیلومتر و عرض آن ۵/۳۷ کیلومتر است و مساحتی در حدود ۳۴ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. نقشهٔ زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی اندیس مس سوناجیل در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی اندیس مس سوناجیل

منطقهٔ پژوهش تقریباً در نقشهٔ زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰,۰۰۰ اهر واقع شده است. این منطقه طبق تقسیمات زمین‌شناسی ایران در زون البرز غربی- آذربایجان قرار گرفته و بخشی از نوار آتش‌فشانی البرز- آذربایجان به سن ترشیر است. واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده شامل واحدهای آندزیت تا هورنبلند آندزیت، آندزیت مگاپورفیری، آندزیت پورفیری، گرانیتوئیدی (کوارتز مونزونیت، گرانیت و گرانودیوریت) و بازالتی است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی صورت گرفته در منطقهٔ سوناجیل، می‌توان تودهٔ نفوذی نسبتاً عمیقی را به‌عنوان منبع احتمالی سیالات هیدروترمال برای کانی‌سازی و آلتراسیون فرض کرد. آلتراسیون‌های موجود در منطقه شامل آلتراسیون‌های پتاسیک- فیلیک، فیلیک، فیلیک- پروفیلیک، آرژیلیک- فیلیک، آرژیلیک و اکسید آهن است.

بررسی اجمالی روندهای ساختاری در منطقه نشان می‌دهد که گسله‌ها و شکستگی‌های با راستای *NW* - *W* و *E* - *SE* در منطقه معمول هستند. لازم به ذکر است که نشانه‌های کانی‌سازی در قسمت‌هایی از منطقه مشاهده شده است.

منطقهٔ انتخاب شده برای بررسی‌های لیتوژئوشیمیایی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ در شمال شهرستان سراب قرار دارد که حدود ۱۲/۵ کیلومتر مربع مساحت دارد. برداشت‌های لیتوژئوشیمیایی و آلتراسیون در شبکه نمونه‌برداری ۱۰۰m × ۱۰۰m و با تعداد ۱۲۴۸ سلول صورت گرفته است.

عملیات مربوط به پردازش داده‌های اولیه شامل، اندازه‌گیری خطای آنالیز، جای‌گزینی مقادیر سنسورد، تعیین حدود بالا و پایین خارج از رده، نرمالایز کردن، تحلیل‌های تک‌متغیره ، دومتغیره (تعیین ضرایب هم‌بستگی پیرسون و اسپیرمن) و چندمتغیره (آنالیز فاکتوری، آنالیز خوشه‌ای و Z-Score)، تعیین جامعه آنومال معادل ۲/۵% فوقانی جامعهٔ کل، تهیهٔ نقشه‌های تک‌متغیره و چندمتغیره (به روش کریجینگ) و در نهایت تفسیر آن‌ها بوده است.

اکتشافات ژئوفیزیکی به روش‌های پلاریزاسیون القایی (IP) با آرایش مستطیلی و مقاومت ویژه (Rs) به عمل آمده است. خط مبنای عملیات به موازات روند آلتراسیون به طول ۲۳۰۰ متر با جهت شرقی - غربی و پروفیل‌ها عمود بر آن (شمالی- جنوبی) به طول ۱۰۰۰ متر با نقاط ۲۰ متر و فواصل پروفیل‌ها از یک‌دیگر ۵۰ متر انتخاب و محدوده با آرایش مستطیلی AB=۱۲۰۰ و MN=۲۰ متر تحت پوشش عملیات ژئوفیزیکی قرار گرفته است.

۱. تعیین فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی در سوناجیل

در این مرحله همهٔ فاکتورهای مؤثر در رخداد کانی‌سازی مشخص شدند. این مرحله از کار اصولاً با توجه به مدل مفهومی ذخیره مورد نظر امکان‌پذیر است. با توجه به نتایج بررسی‌ها و عدم نقش گسل‌ها و دایک‌ها در کانی‌سازی، فاکتورهای تشخیص کانی‌سازی اندیس سوناجیل شامل زون منشأ حرارت و سنگ میزبان، آلتراسیون هیدروترمال، نشانه‌های کانی‌سازی، توزیع میزان عیار عنصر مس، توزیع میزان عیار عنصر مولیبدن، توزیع میزان عیار عنصر طلا، توزیع میزان شارژابیلیتیه و توزیع میزان مقاومت ظاهری است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

۲. آماده سازی اطلاعات

در مرحلهٔ آمادهسازی اطلاعات، همهٔ لایههای اطلاعاتی مورد نظر که در مرحله تعیین فاکتورهای تشخیص کانیسازی تعیین شدند، جمعآوری و آمادهسازی شدند. لایههای اطلاعاتی آمادهسازی شده شامل تیپ سنگشناسی، آلتراسیون، نشانههای کانیسازی، نقاط برداشت ژئوشیمی، منحنی همعیار عنصر مس، آنومالی عنصر مس، منحنی همعیار عنصر مولیبدن، آنومالی عنصر مولیبدن، منحنی همعیار عنصر طلا، آنومالی عنصر طلا، منحنی شارژ- ابیلیتیه، زون ناهنجاری شارژابیلیتیه، منحنی مقاومت ظاهری و زون ناهنجاری مقاومت ظاهری هستند.

۳. تهیه نقشههای فاکتور تشخیص کانی سازی

نحوهٔ تأثیر و ارزش لایههای اطلاعاتی که آمادهسازی میشوند، از نظر اکتشاف یك نوع ذخیرهٔ معدنی خاص، متفاوت است. نقشهٔ پتانسیل معدنی از تلفیق لایههای اطلاعاتی با توجه به نحوهٔ تأثیر و ارزش لایهها تهیه میشود. به همین منظور لازم است با انجام مجموعهای از پردازشها (ایجاد بافر، کلاسهبندی مجدد و....)، نقشه یا نقشههای فاکتور هر لایهٔ اطلاعاتی تهیه شود. با توجه به تنوع تأثیر و ارزشدهی لایههای اطلاعاتی مختلف، پردازشهای مورد نیاز برای تهیهٔ نقشههای فاکتور متفاوت است.

در تهیهٔ نقشههای فاکتور یك کانسار خاص، علاوه بر استفاده از مدل مفهومی زمینشناسی و کانیسازی ذخیره معدنی مربوطه، به دانش کارشناسی در تعیین نحوهٔ تأثیر و ارزش اطلاعات نیاز است. در این جهت با برگزاری جلسات کارشناسی مختلف با کارشناسان شرکت ملی صنایع مس ایران و تشریح عوامل مؤثر در هر یک از فاکتورها، وزن مربوط به آنها مشخص شد. در ادامه عوامل مؤثر در وزندهی فاکتورهای کانیسازی تشریح شده است. وزن مربوط به هر یک از فاکتورها در جدول ۲ و نقشههای مربوط به هر یک از این فاکتورها در شکلهای ۲ تا ۹ ارائه شده است.

نقشهٔ فاکتور زون منشأ حرارت و سنگ میزبان(A): با توجه به بررسی ویژگیهای زمینشناسی، سنگ میزبان به صورت توده نفوذی نسبتاً عمیقی است که به علت فقدان در سطح وزنی به آن اختصاص نیافته است. تودهٔ نفوذی مذکور در سنگهای آندزیت مگاپرفیریت، آندزیت هورنبلندیت و آندزیت پرفیریت نفوذ و باعث آلتراسیون و کانیسازی در آنها شده است. لازم به ذکر است که شدت آلتراسیون و کانیسازی در سنگهای آندزیت پرفیریت بسیار بیشتر از سنگهای آندزیت هورنبلندیت و آندزیت مگاپرفیریت است. دیگر سنگهای منطقه (شامل توف آندزیت، بازالت کواترنر، آبرفت و توده گرانیتوئیدی اینچه)، نقشی در کانیسازی نداشتهاند و برای این تیپ سنگها وزن حداقل (۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

نقشهٔ فاکتور آلتراسیون(B): با توجه به بررسی ویژگیهای زمینشناسی، دگرسانیهای بااهمیت و مشخص شده در نقشه، شامل دگرسانیهای پتاسیک- فیلیک، فیلیک، آرژیلیک- فیلیک، اکسیدآهن، فیلیک- پروفیلیک و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

آرژیلیک هستند که با توجه به اهمیت انواع آلتراسیون‌ها در کانی‌سازی مس پرفیری و بر اساس نظر کارشناسی وزن‌دهی شدند.

نقشهٔ فاکتور نشانه‌های کانی سازی(C): با توجه به بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، این فاکتور به‌عنوان یکی از فاکتورهای مؤثر شناخته شده و به منظور نمایش نحوهٔ تأثیر این نشانه‌ها ۴ بافر ۱۵ متری با وزن‌های متفاوت در پیرامون آن‌ها در نظر گرفته شد.

نقشهٔ فاکتور عیار مس(D): با توجه به اطلاعات موجود و نظر کارشناسی، مقادیر آستانه مربوط به آنومالی‌های قطعی، احتمالی و ممکن تعیین و وزن‌دهی شد. مقادیر موجود در میان پربندهای ۲۰۶ تا ppm ۳۵۵ به‌عنوان آنومالی ممکن و مقادیر موجود در میان پربندهای ۳۵۵ تا ۴۶۸ppm به‌عنوان آنومالی احتمالی و مقادیر بالای ppm ۴۶۸ به‌عنوان آنومالی قطعی مشخص شدند. برای سایر مناطق وزن حداقل (۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

نقشهٔ فاکتور عیار مولیبدن(E): با توجه به اطلاعات موجود، مقادیر آستانه مربوط به آنومالی‌های قطعی، احتمالی و ممکن تعیین و وزن‌دهی شد. مقادیر موجود در میان پربندهای ۶/۴۱ تاppm ۱۰/۳۳ به‌عنوان آنومالی ممکن و مقادیر موجود در میان پربندهای ۱۰/۳۳ تا ppm ۱۲/۴ به‌عنوان آنومالی احتمالی و مقادیر بالای ppm ۱۲/۴ به‌عنوان آنومالی قطعی مشخص شدند. برای سایر مناطق وزن حداقل (۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

نقشهٔ فاکتور عیار طلا(F): با توجه به اطلاعات موجود، مقادیر آستانهٔ مربوط به آنومالی‌های قطعی، احتمالی و ممکن تعیین و وزن‌دهی شد. مقادیر موجود در میان پربندهای ۳۶ تا ppm ۱۷۳ به‌عنوان آنومالی ممکن و مقادیر موجود در میان پربندهای ۱۷۳ تا ppm ۲۹۹ به‌عنوان آنومالی احتمالی و مقادیر زیاد ppm ۲۹۹ به‌عنوان آنومالی قطعی مشخص شدند. برای سایر مناطق وزن حداقل(۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

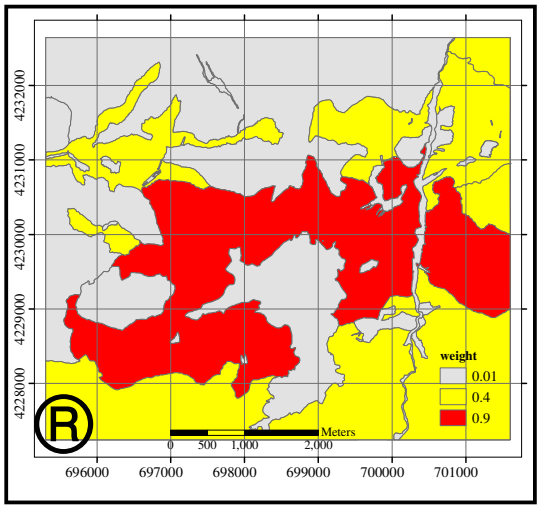
نقشهٔ فاکتور شارژابیلیته(G): با توجه به بررسی ویژگی‌های ژئوفیزیکی، مقادیر آستانهٔ مربوط به آنومالی‌های قطعی، احتمالی و ممکن تعیین و وزن‌دهی شد. مقادیر موجود در میان پربندهای ۲۰ تا mv/v ۲۵ به‌عنوان آنومالی ممکن و مقادیر موجود در میان پربندهای ۲۵ تا mv/v ۳۲/۵ به‌عنوان آنومالی احتمالی و مقادیر زیاد mv/v ۳۲/۵ به‌عنوان آنومالی قطعی مشخص شدند. برای سایر مناطق وزن حداقل (۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

نقشهٔ فاکتور مقاومت ظاهری(H): با توجه به بررسی ویژگی‌های ژئوفیزیکی، مقادیر آستانه مربوط به آنومالی‌های قطعی، احتمالی و ممکن تعیین و وزن‌دهی شد. مقادیر موجود در میان پربندهای ۸۰ تا ۱۰۰ اهم متر به‌عنوان آنومالی ممکن و مقادیر موجود در میان پربندهای ۶۰ تا۸۰ اهم متر به‌عنوان آنومالی احتمالی و مقادیر کم‌تر از ۶۰ به‌عنوان آنومالی قطعی مشخص شدند. برای سایر مناطق وزن حداقل(۰/۰۱) در نظر گرفته شد.

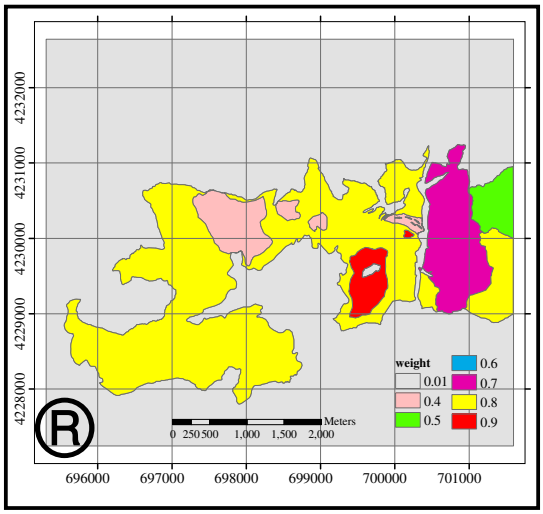
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

جدول۲. وزن‌های اولیه و نهایی استفاده شده در تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس سوناجیل

وزن نهایی	وزن اولیه	توزیع عنصر مس	وزن نهایی	وزن اولیه	نشانه‌های کانی‌سازی	وزن نهایی	وزن اولیه	آلتراسیون	وزن نهایی	وزن اولیه	زون منشأ حرارت و سنگ میزبان
۰/٤	۰/۸	آنومالی قطعی	۰/۲۸٦	۰/۷	بافر ۱۵ متری	۰/۲۰٤	۰/۵	فیلیک و پروفیلیک	۰/۳٤۷	۰/۹	آندزیت پرفیریت
۰/۳	۰/۶	آنومالی احتمالی	۰/۲۲۱	۰/۵۴	بافر ۳۰ متری	۰/۲۸٦	۰/۷	آرژیلیک و فیلیک	۰/۱۵٤	۰/۴	آندزیت مگا پرفیریت
۰/۱۵	۰/۳	آنومالی ممکن	۰/۱۲۳	۰/۳	بافر ۴۵ متری	۰/۱٦۳	۰/۴	آرژیلیک	۰/۱۵٤	۰/۴	آندزیت هورنبلندیت
			۰/۰٦۱	۰/۱۵	بافر ۶۰ متری	۰/۳۲۷	۰/۸	فیلیک			
						۰/۳٦۷	۰/۹	پتاسیک و فیلیک			
						۰/۲۴۵	۰/۶	اکسید آهن			
وزن نهایی	وزن اولیه	مقاومت ظاهری	وزن نهایی	وزن اولیه	شارژ-ابیلیته	وزن نهایی	وزن اولیه	توزیع عنصر طلا	وزن نهایی	وزن اولیه	توزیع عنصر مولیبدن
۰/۲۵	۰/۲۵	آنومالی قطعی	۰/۷۵	۰/۷۵	آنومالی قطعی	۰/۳۵	۰/۷	آنومالی قطعی	۰/۲۵	۰/۵	آنومالی قطعی
۰/۱۵	۰/۱۵	آنومالی احتمالی	۰/۵	۰/۵	آنومالی احتمالی	۰/۲۷۵	۰/۵۵	آنومالی احتمالی	۰/۲	۰/۴	آنومالی احتمالی
۰/۰۵	۰/۰۵	آنومالی ممکن	۰/۲۵	۰/۲۵	آنومالی ممکن	۰/۱۲۵	۰/۲۵	آنومالی ممکن	۰/۱	۰/۲	آنومالی ممکن

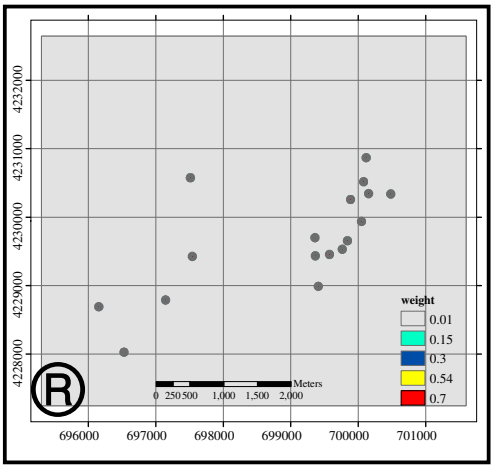


شکل ۲. نقشهٔ فاکتور سنگ میزبان

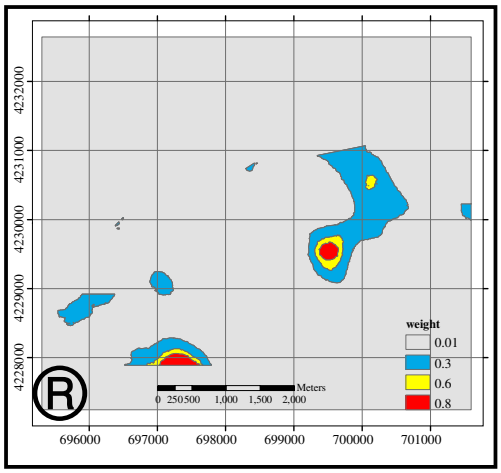


شکل ۳. نقشهٔ فاکتور آلتراسیون

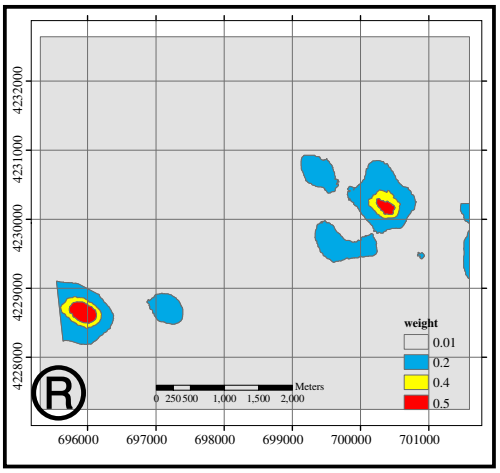
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



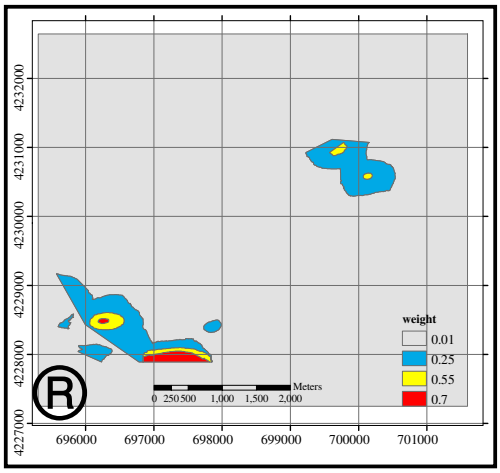
شکل ٤. نقشهٔ فاکتور نشانه‌های کانی‌سازی



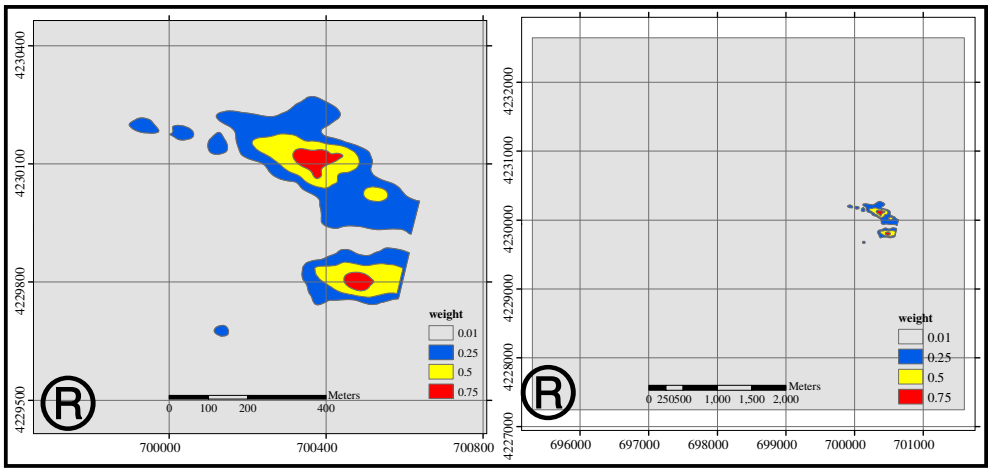
شکل ٥. نقشهٔ فاکتور عیار مس



شکل ٦. نقشهٔ فاکتور عیار مولیبدن

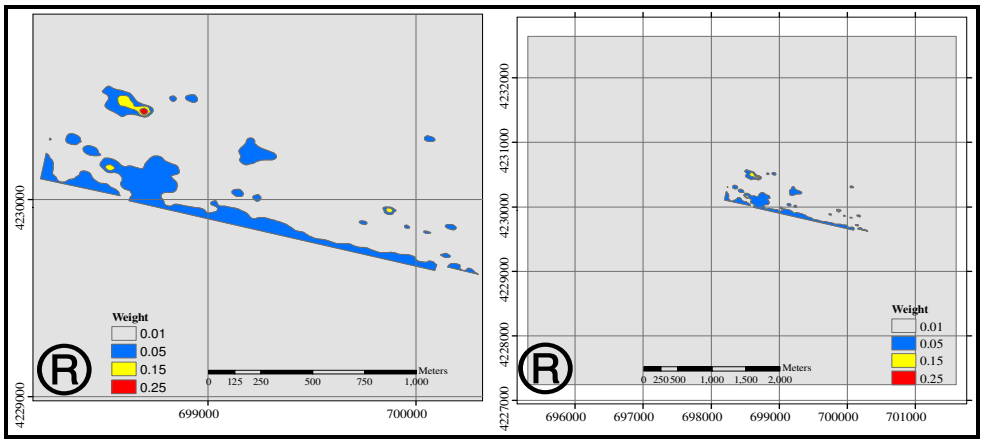


شکل ۷. نقشهٔ فاکتور عیار طلا



شکل ۸. نقشهٔ فاکتور شارژابیلیتیه

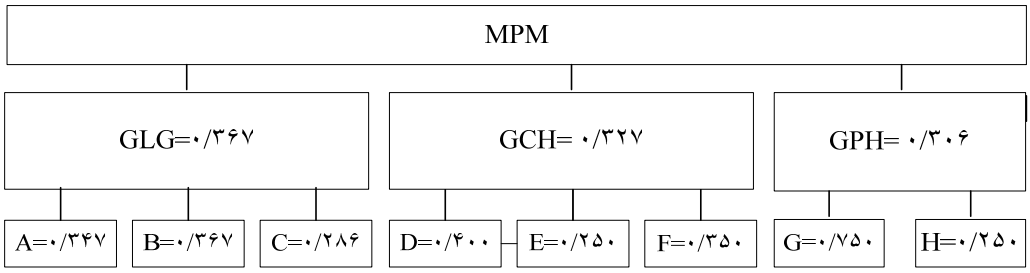
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]



شکل ۹. نقشهٔ فاکتور مقاومت ظاهری

٤. تلفیق نقشه‌ها و ارزیابی نتایج

به منظور تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی در مرحله تفصیلی باید نقشه‌های فاکتور را مطابق با شبکهٔ استنتاجی مناسبی با هم تلفیق کرد. در شبکهٔ استنتاجی مورد استفاده از عمل‌گرهای مختلف منطق فازی استفاده شده است. نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس سوناجیل مطابق با شبکهٔ استنتاجی ارائه شده در شکل ۱۰ تهیه شده است. همچنین پارامترهای موجود در شبکهٔ استنتاجی مذکور در جدول ۳ معرفی شده‌اند.



شکل ۱۰. شبکهٔ استنتاجی استفاده شده در تهیهٔ نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس سوناجیل

جدول ۳. معرفی پارامترهای موجود در شبکهٔ استنتاجی

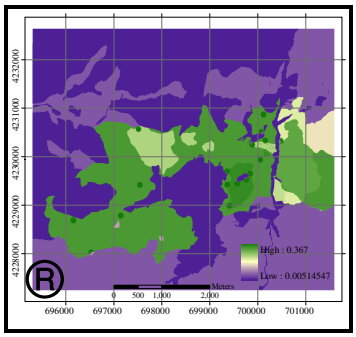
GLG	نقشهٔ فاکتور زمین‌شناسی با استفاده از عمل‌گر فازی گاما
GCH	نقشهٔ فاکتور ژئوشیمی با استفاده از عمل‌گر فازی گاما
GPH	نقشهٔ فاکتور ژئوفیزیک با استفاده از عمل‌گر فازی Sum
MPM	نقشهٔ پتانسیل معدنی با استفاده از عمل‌گر فازی گاما

با استفاده از شبکهٔ استنتاجی فوق و وزن‌های نمایش داده شده در جدول۱، نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس سوناجیل تهیه شد، روال تهیه نقشهٔ پتانسیل معدنی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نمایش داده شده است.

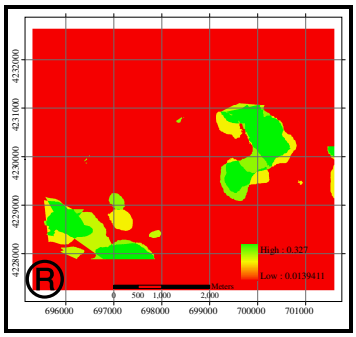
به منظور ارزیابی نتایج، از داده‌های گمانه‌های اکتشافی استفاده شد. در اندیس سوناجیل، بعد از انجام بررسی‌های اکتشافی ۱۷ گمانه اکتشافی حفاری شده است که اطلاعات مربوط به ۱۱ گمانه در اختیار قرار گرفته است. پس از آماده‌سازی اطلاعات مربوط به این گمانه‌ها در محیط GIS به منظور ارزیابی نتایج حفاری،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

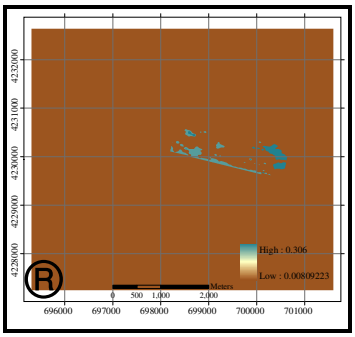
پروفیل تغییرات میزان عیار مس نسبت به عمق برای هر گمانه ترسیم شد. پروفیل‌های مذکور در شکل ۱۷نمایش داده شده است.



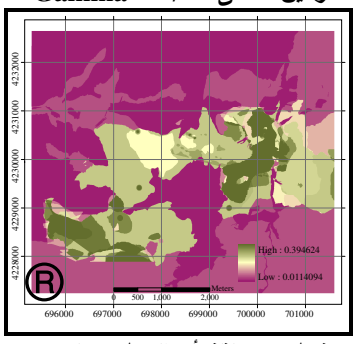
شکل ۱۱- نقشهٔ پتانسیل معدنی زمین‌شناسی Gamma = ۰/۸۵



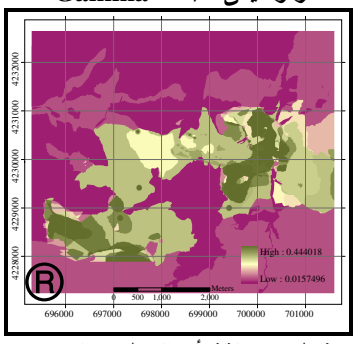
شکل ۱۲- نقشهٔ پتانسیل معدنی ژئوشیمی Gamma = ۰/۸



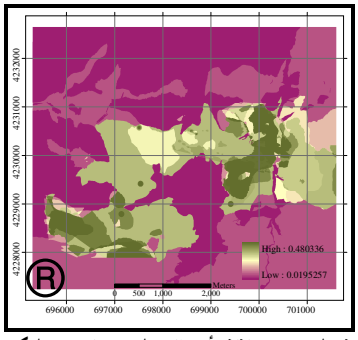
شکل ۱۳- نقشهٔ پتانسیل معدنی ژئوفیزیك Sum



شکل ۱٤- نقشهٔ پتانسیل معدنی فازی Gamma =۰/۹۲



شکل ۱۵- نقشهٔ پتانسیل معدنی عمل‌گر فازی Gamma =۰/۹۵

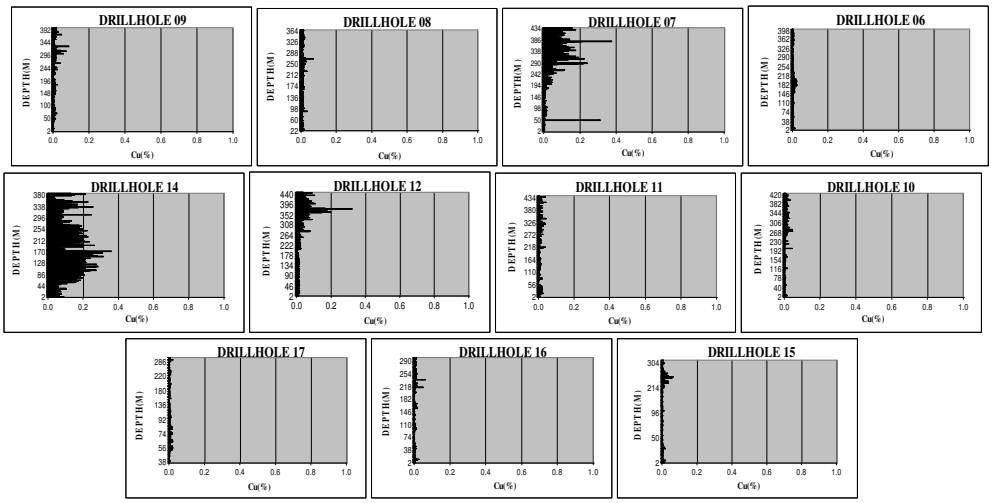


شکل ۱٦- نقشهٔ پتانسیل معدنی عمل‌گر عمل‌گر فازی Gamma =۰/۹۷

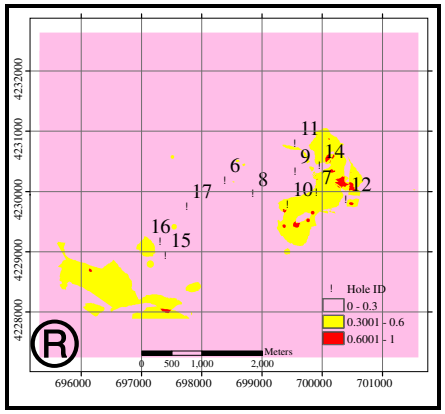
با توجه به تغییرات میزان عیار مس در هر یک از گمانه‌ها و نیز بررسی مقادیر حداکثر و حداقل و همچنین متوسط عیار مس در هر یک از گمانه‌های موجود، هر یك از گمانه‌ها از لحاظ میزان عیار عنصر مس در کلاس معینی قرار گرفتند. در بررسی سه کلاسه یکی از سه وضعیت خوب، متوسط و ضعیف و در بررسی پنج کلاسه یکی از پنج وضعیت بسیار خوب، خوب، متوسط، ضعیف و یا خیلی ضعیف به هر یك از گمانه‌ها نسبت داده شد. در مرحلهٔ بعد به منظور ارزیابی نقشه‌های پتانسیل معدنی، از انطباق مقادیر پیکسل‌های نقشهٔ فوق در موقعیت مکانی گمانه‌های اکتشافی با نتایج حفاری آن گمانه‌ها استفاده شد. بدین ترتیب با توجه به روش‌های کلاسه‌بندی موجود، هر نقشهٔ پتانسیل معدنی به کلاس‌های مختلف تفکیك شد. سپس مقادیر پیکسل‌های مربوط به گمانه‌های اکتشافی در نقشهٔ پتانسیل معدنی استخراج شد. با توجه به مقادیر پیکسل‌های هر گمانه، کلاس آن گمانه تعیین شد. به عبارت دیگر، از نظر نقشهٔ پتانسیل معدنی کلاس هر گمانه با توجه به مقادیر هر پیکسل در یکی از کلاس‌های تعریف شده تعیین شد. کلاس تعیین‌شده برای هر چاه با وضعیت هر گمانه مقایسه شد. نتایج ارزیابی فوق در جدول‌های ٤ و ٥ ارائه شده است. همچنین نقشه‌های انطباق گمانه‌های اکتشافی با نقشهٔ پتانسیل معدنی اندیس

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

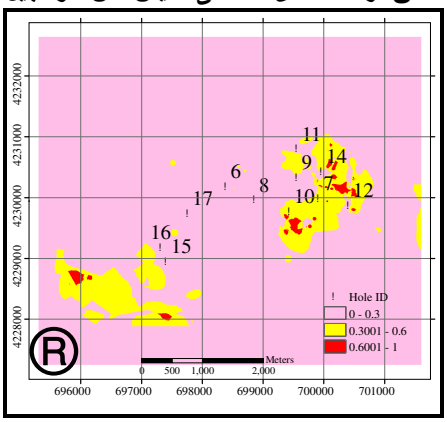
سوناجیل که به صورت سه کلاسه و پنج کلاسه با استفاده از روش Manual کلاسه‌بندی شده است، در شکل‌های ۱۸ تا ۲۳ آمده است.



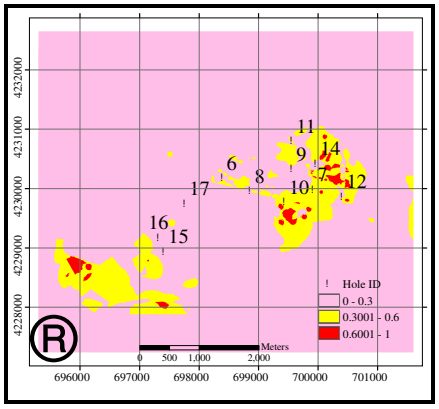
شکل ۱۷. پروفیل‌های تغییرات عیار مس نسبت به عمق در گمانه‌های اکتشافی اندیس مس سوناجیل



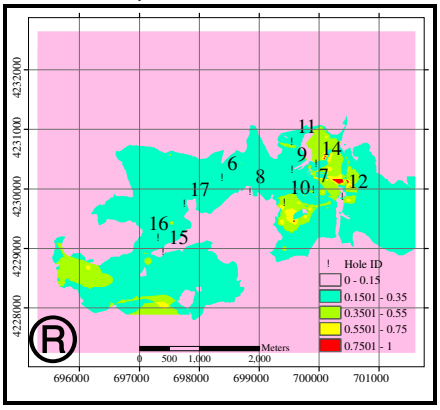
شکل۱۸. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل Gamma=۰/۹۲



شکل۱۹. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل Gamma=۰/۹۵

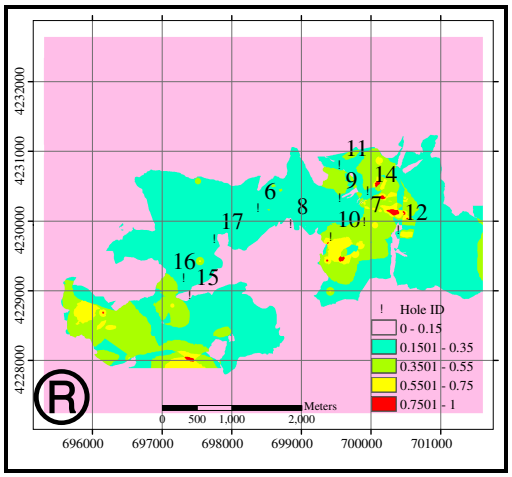


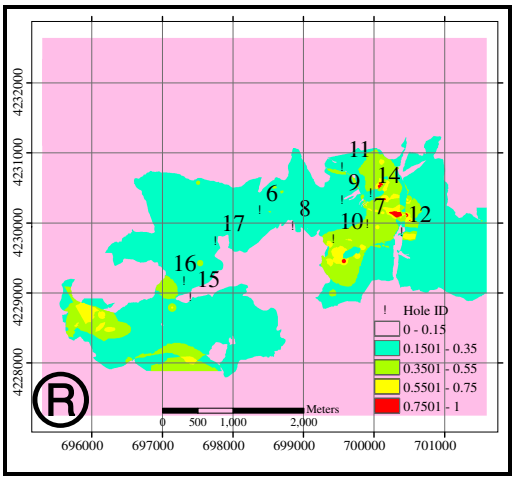
شکل۲۰. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل Gamma=۰/۹۷



شکل۲۱. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل Gamma=۰/۹۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]





شکل۲۲. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل۰/۹۵=Gamma شکل۲۳. انطباق گمانه‌ها با نقشهٔ پتانسیل۰/۹۷=Gamma

جدول ۴. ارزیابی میزان تطابق در نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه شده با استفاده از روش Manual سه کلاسه

خ=خیلی		Gamma= ۰/۹۲			Gamma= ۰/۹۵			Gamma= ۰/۹۷		
شماره گمانه	وضعیت گمانه	وزن گمانه	وضعیت	ارزیابی	وزن گمانه	وضعیت	ارزیابی	وزن گمانه	وضعیت	ارزیابی
٦	ضعیف	۰/۲۱۸۹	ضعیف	۰	۰/۲۵۶۳	ضعیف		۰/۲۸۴۹	ضعیف	۰
۷	ضعیف	۰/۳۲۷۵	متوسط	۱-	۰/۳۶۵۷	متوسط	۱-	۰/۳۹۳۷	متوسط	۱-
۸	ضعیف	۰/۰۱۹۹	ضعیف	۰	۰/۰۲۳۴	ضعیف	۰	۰/۰۲۶۱	ضعیف	۰
۹	ضعیف	۰/۲۱۸۹	ضعیف	۰	۰/۲۵۶۳	ضعیف	۰	۰/۲۸۴۹	ضعیف	۰
۱۰	ضعیف	۰/۳۸۷۵	متوسط	۱-	۰/۴۲۹۰	متوسط	۱-	۰/۴۵۹۳	متوسط	۱-
۱۱	ضعیف	۰/۱۹۹۰	ضعیف	۰	۰/۲۲۶۸	ضعیف	۰	۰/۲۴۷۶	ضعیف	۰
۱۲	ضعیف	۰/۰۴۹۷	ضعیف	۰	۰/۰۶۰۰	ضعیف	۰	۰/۰۶۸۲	ضعیف	۰
١٤	ضعیف	۰/۱۹۲۵	ضعیف	۰	۰/۲۳۲۹	ضعیف	۰	۰/۲۶۴۶	ضعیف	۰
۱۵	ضعیف	۰	ضعیف	۰	۰	ضعیف	۰	۰	ضعیف	۰
١٦	ضعیف	۰/۲۱۸۹	ضعیف	۰	۰/۲۵۶۳	ضعیف	۰	۰/۲۸۴۹	ضعیف	۰
۱۷	ضعیف	۰/۲۱۸۹	ضعیف	۰	۰/۲۵۶۳	ضعیف	۰	۰/۲۸۴۹	ضعیف	۰
میزان تطابق		% ۹۰/۹۱			% ۹۰/۹۱			% ۹۰/۹۱		

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

جدول ۵. ارزیابی میزان تطابق در نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه شده با استفاده از روش Manual پنج کلاسه

Gamma= ۰/۹۷			Gamma= ۰/۹۵			Gamma= ۰/۹۲			خ=خیلی	
ارزیابی	وضعیت	وزن گمانه	ارزیابی	وضعیت	وزن گمانه	ارزیابی	وضعیت	وزن گمانه	وضعیت گمانه	شماره گمانه
۱-	ضعیف	۰/۲۸۴۹	۱-	ضعیف	۰/۲۵۶۳	۱-	ضعیف	۰/۲۱۸۹	خ ضعیف	٦
۱-	متوسط	۰/۳۹۳۷	۱-	متوسط	۰/۳۶۵۷	۰	ضعیف	۰/۳۲۷۵	ضعیف	۷
۰	خ ضعیف	۰/۰۲۶۱	۰	خ ضعیف	۰/۰۲۳۴	۰	خ ضعیف	۰/۰۱۹۹	خ ضعیف	۸
۱-	ضعیف	۰/۲۸۴۹	۱-	ضعیف	۰/۲۵۶۳	۱-	ضعیف	۰/۲۱۸۹	خ ضعیف	۹
۲-	متوسط	۰/۴۵۹۳	۲-	متوسط	۰/۴۲۹۰	۲-	متوسط	۰/۳۸۷۵	خ ضعیف	۱۰
۱-	ضعیف	۰/۲۴۷۶	۱-	ضعیف	۰/۲۲۶۸	۱-	ضعیف	۰/۱۹۹۰	خ ضعیف	۱۱
۰	خ ضعیف	۰/۰۶۸۲	۰	خ ضعیف	۰/۰۶۰۰	۰	خ ضعیف	۰/۰۴۹۷	خ ضعیف	۱۲
۰	ضعیف	۰/۲۶۴۶	۰	ضعیف	۰/۲۳۲۹	۰	ضعیف	۰/۱۹۲۵	ضعیف	۱٤
۰	خ ضعیف	۰	۰	خ ضعیف	۰	۰	خ ضعیف	۰	خ ضعیف	۱۵
۱-	ضعیف	۰/۲۸۴۹	۱-	ضعیف	۰/۲۵۶۳	۱-	ضعیف	۰/۲۱۸۹	خ ضعیف	۱٦
۱-	ضعیف	۰/۲۸۴۹	۱-	ضعیف	۰/۲۵۶۳	۱-	ضعیف	۰/۲۱۸۹	خ ضعیف	۱۷
% ۸۰/۹۶			% ۸۰/۹۶			% ۸۳/۳۳			میزان تطابق	

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) دارای قابلیت‌های مختلفی از جمله امکان ذخیره‌سازی، نمایش، بازیابی، پردازش، تلفیق و تبادل اطلاعات مکان مرجع است. این سیستم می‌تواند به‌عنوان دانش و فناوری بهینه در جهت ساماندهی، پردازش، تحلیل و تلفیق نتایج پژوهش‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیك به منظور شناسایی و ارزیابی پتانسیل‌های معدنی مس مورد استفاده قرار گیرد.

با تکیه بر بررسی‌های انجام شده استفاده از عمل‌گرهای منطق فازی ضمن برطرف‌کردن نقایص موجود در سایر مدل‌ها، مشکل ماهیت افزایشی و خطی مدل هم‌پوشانی شاخص را اصلاح و امکان ترکیب قابل انعطاف‌تر نقشه‌های فاکتور را فراهم می‌سازد. همچنین استفاده از مدل مذکور تعیین بهینه نقاط حفاری در بررسی‌های تفصیلی را امکان‌پذیر می‌سازد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

با توجه به نقشهٔ پتانسیل معدنی تهیه شده در این مقاله، محتمل‌ترین منطقه نسبت به سایر مناطق از نظر وجود کانی‌سازی مس پرفیری به‌صورت دو کانون احتمالی شمال شرق و جنوب غرب بر روی نقشهٔ نهایی مشخص شده است. در نهایت با انطباق گمانه‌های اکتشافی حفر شده با نقشه‌های پتانسیل معدنی نهایی، میزان تطابق در پیش‌بینی نتایج گمانه‌های موجود محاسبه شد.

بر این اساس، در دسته‌بندی سه کلاسه نتایج حاصل از روش Manual با گاماهای ۰/۹۲ و ۰/۹۵ و ۰/۹۷ بیش‌ترین تطابق به میزان ۹۰/۹۱ درصد و در دسته‌بندی پنج کلاسه نتایج حاصل از روش Manual با گامای ۰/۹۲ بیش‌ترین تطابق به میزان ۸۳/۳۳ درصد را در پیش‌بینی نتایج گمانه‌های موجود داشته است و انجام عملیات حفاری جدید تنها در مناطق مستعد مشخص شده بر روی این نقشه‌ها توصیه می‌شود.

ضمناً در صورت انجام این بررسی‌های قبل از انجام عملیات حفاری و تنها با فرض عدم حفر گمانه‌های اکتشافی در مناطقی که دارای وضعیت ضعیف یا خیلی ضعیف هستند، با استفاده از نقشه‌های سه و پنج کلاسه به‌ترتیب ۸۱/۸ و ۹۰/۹ درصد از گمانه‌ها حفاری نشده بود. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، با به‌کارگیری GIS و منطق فازی در تعیین نقاط حفاری حداقل از حفاری ۳۵۰۰ متر گمانه اکتشافی ممانعت و حدود ۵۰۰ میلیون تومان در هزینه‌های حفاری صرفه‌جویی می‌شد.

تشکر و قدردانی

نگارندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری مدیریت امور اکتشافات و مهندسی توسعه شرکت ملی صنایع مس ایران به‌ویژه مهندس حیدری و مهندس صاحب‌الزمانی به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز و همچنین همکاری در تشکیل جلسات کارشناسی تشکر و قدردانی کنند.

منابع

1. G.F. Bonham-Carter, *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*, Pergamon Press, Ontario, Canada (1994).
2. D.F. Wright and G.F. Bonham-Carter, *VHMS favorability mapping with GIS-based integration models, Chisel-Andersen Lake area*, Geological Survey of Canada, Bulletin, Vol.426 (1996) 339-376.
3. E.J.M.Carranza and M. Hale, *Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district*, Philippines, Natural Resources Research, Vol.10 (2001) 125-136.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

4. J. Carranza, *Geographically-Constrained Mineral Potential Mapping*, PhD Thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, (2002) 480.

5. A. Porwal, E.J.M. Carranza and M. Hale, *Knowledgedriven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping*, Natural Resources Research, Vol.12 (2003) 1-25.

6. B. Mukhopadhyay, N. Hazra, S.R. Sengupta, S. Kumar Das, *Mineral Potential Map by a Knowledge Driven GIS Modeling: an Example from Singhbhum Copper Belt*, Jharkhad, Geological Survey of India (1996).

7. P. An, W.M. Moon and A. Rencz, Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data, Canadian Journal of Exploration Geophysics, Vol.27 (1991) 1-11 .

8. M. Karimi, M.B. Menhaj and M.S. Mesgari, *Mineral potential mapping of copper minearls using fuzzy logic in GIS invironment*, *ISPRS 2008*, Beijing, China (2008).

9. F.P. Agterberg, Combining indicator patterns in weights of evidence modeling for resource estimation, Nonrenewable Resources,.1 (1992) 39-50 .

10. F.P. Agterberg and G.F. Bonham-Carter, *Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for prediction of discrete events*, Proceedings of the 22nd APCOM Symposium, Berlin, Germany, Vol.2 (1990) 381-395.

11. D.E. Boleneus, G.L. Raines, J.D. Causey, A.A. Bookstrom, T.P. Frost and P.C. Hyndman, *Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling*, USGS Open-File Report (2001) 01-501, 52.

12. H.H. Asadi, M. Hale, *A Predictive GIS Model For Mapping Potential Gold And Base Metal Mineralization In Takab Area, Iran*, Computer & Geosciences.9 (1999).

13. H.H. Asadi, *The Zarshuran Gold Deposit Model Applied In Mineral Exploration GIS In Iran, PhD Thesis*, ITC, Netherlands, (2000) 190.

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

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]

15. A., Porwal, *Mineral Potential Mapping with Mathematical Geological Models*, Ph.D Thesis, University of Utrecht, The Netherlands, (2006) 289.

16. L.A. Zadeh, Fuzzy sets, *IEEE Information and Control*, Vol.8 (1965) 338-353.

۱۷. ع. جوانمردی و دیگران، گزارش زمین‌شناسی کانسار مس سوناجیل، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشافات و مهندسی توسعه، دفتر اکتشافات شمالغرب (۱۳۸۱).

۱۸. گزارش بررسی‌های ژئوفیزیکی بر روی کانسار مس سوناجیل، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشافات و مهندسی توسعه، شرکت صمان کاو، (۱۳۸۰).

۱۹. نتایج حفاری‌های صورت گرفته در منطقه سوناجیل، شرکت ملی صنایع مس ایران، امور اکتشافات و مهندسی توسعه، شرکت پارس اولنگ، (۱۳۸۵).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-28]