

تعیین مناطق با پتانسیل بالای سرب و روی منطقه ایرانکوه اصفهان در محیط GIS

نادر فتحیان پور^{۱*}، رضا فائدرحمتی^۲، مهدی حاضری^۳

۱- استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان؛ Email: fathian@cc.iut.ac.ir

۲- مربی دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن دانشگاه لرستان، Email: rezaghaedrahmaty@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد اکتشاف معدن

(دریافت ۱۲ تیر ۱۳۸۷، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۸۸)

چکیده

امروزه بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در امر اکتشاف ذخایر معدنی یکی از روش های مهم و در عین حال اجتناب ناپذیر محسوب می شود، به همین منظور در این مقاله توانایی الگوریتم اوزان شواهد در سیستم اطلاعات جغرافیایی با دقت و صحت بالا برای تلفیق داده های زمین شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، سنجش از دور و استخراجی جهت تعیین و تمیز نقاط امید بخش ماده معدنی در مطالعه موردی ناحیه ایرانکوه اصفهان به نمایش گذارده شده است. به دلیل استفاده داده های سنجش از دور جهت استخراج یک سری لایه های اطلاعاتی ابتدا داده های سنجش از دور ASTER و ETM⁺ منطقه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و اطلاعات لازم جهت تهیه و تکمیل بعضی از لایه های اطلاعاتی استخراج گردیده است. سایر لایه های شاهد از مدارک موجود برای استفاده در محیط GIS تهیه شده است. سپس با استفاده از روش اوزان شواهد، اوزان برای هشت لایه ژئوفیزیک، گسل، ژئوشیمی، دولومیت، نقاط دارای کانی سازی باریت، رخنمون ماده معدنی، اکسیداسیون و هیدروکسیدها محاسبه گردیده است و میزان وابستگی لایه ها با استفاده از آزمون استقلال شرطی مورد بررسی قرار گرفته است. نقشه نهایی پتانسیل سنجی با استفاده از روش های اوزان شواهد ترسیم و اولویت بندی مناطق مستعد بر اساس اوزان هشت لایه کنترل کننده کانی سازی برحسب احتمال رخداد ماده معدنی و عدم قطعیت نشان داده شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که در محدوده معادن فعلی، پتانسیل سرب و روی دارای بالاترین میزان بوده و در بخش های غربی معدن گوشفیل تا تپه سرخ، غرب معدن تپه سرخ و شمال کلاه دروازه مناطق مستعد جهت تمرکز عملیات اکتشافی وجود دارد.

کلمات کلیدی

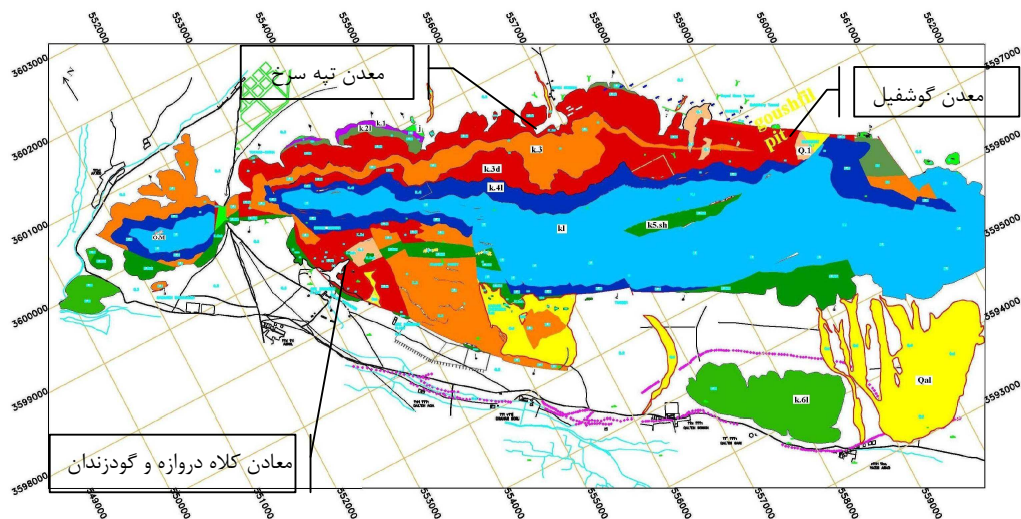
اکتشاف، GIS، سنجش از دور، اوزان شواهد، ایرانکوه

۱- مقدمه

نتیجه با انتخاب الگوی اکتشافی، مقبول‌ترین و منطقی‌ترین پاسخ را برای معرفی نواحی اکتشافی مورد نظر برای یک عنصر بخصوص یا گروهی از عناصر بدست می‌آورد. برای کشف آنومالی‌های ظریف در رابطه با کانسار تنها یک لایه اطلاعاتی کافی نیست، و نیاز به بررسی چندین لایه اطلاعاتی در محیط سیستم زمین مرجع است [۱].

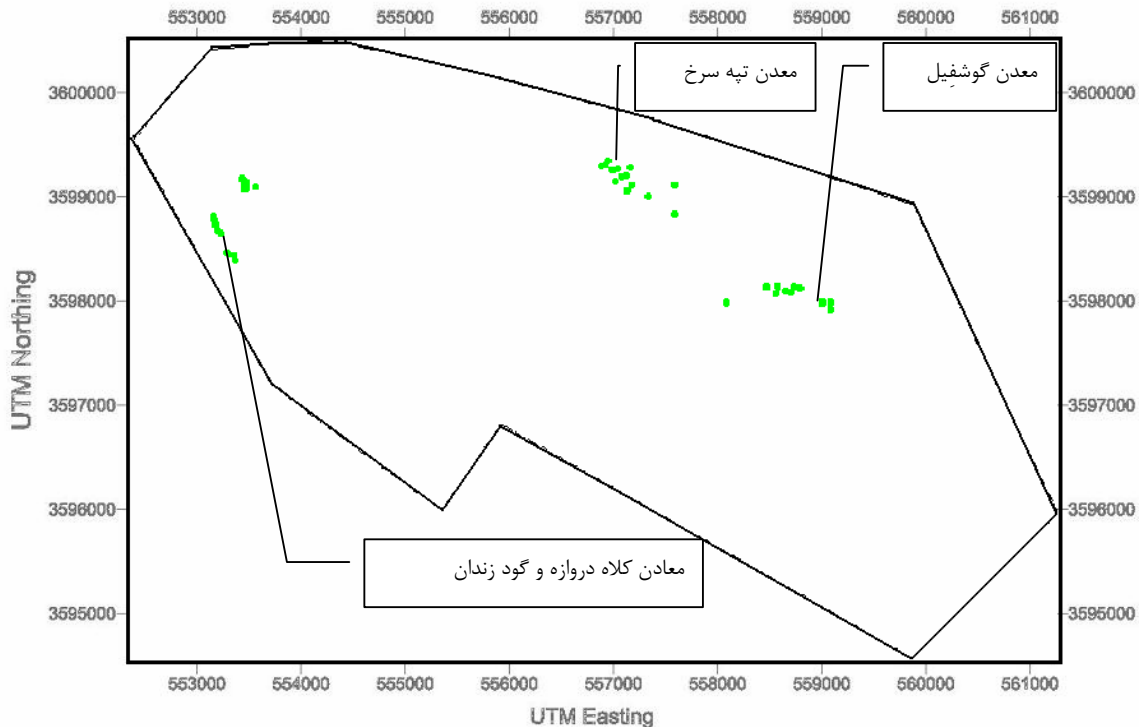
مجتمع معدنی ایرانکوه در ۲۵ کیلومتری جنوب غرب اصفهان واقع شده است، سابقه معدنکاری سرب و روی در منطقه ایرانکوه بیش از ۵۰ سال است. بخشی از یال شمالی ناحیه ایرانکوه شامل معادن گوشفیل، تپه سرخ، کلاه دروازه و گود زندان به عنوان محدوده مورد مطالعه در این مقاله مد نظر است (شکل ۱ و ۲).

تلفیق و تحلیل کلیه اطلاعات در یک محیط مناسب و الگوسازی اکتشافی می‌تواند منجر به شناسایی مناطق امید بخش معدنی برای مطالعات بعدی باشد. به این منظور سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۱ به عنوان یک سیستم زمین مرجع که در اینجا معادل GIS در نظر گرفته شده است، محیط مناسبی را برای طراحی الگوهای قابل قبول اکتشافی فراهم می‌آورند. یکی از کاربردهای سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی معدنی فراهم آوردن محیطی مناسب برای ورود، تجزیه و تحلیل و مدلسازی حجم عظیمی از داده‌ها به منظور مطالعات اکتشافی می‌باشد. امروزه بکارگیری سیستم زمین مرجع در امر اکتشاف ذخایر معدنی یکی از روش‌های مهم و در عین حال اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. در اینگونه مطالعات پژوهشگر ضمن بررسی کلیه داده‌های ورودی سیستم به صورت همزمان امکان استفاده بهینه از این داده‌ها را در دسترس داشته و در



| SYSTEM | SYMBOL | LITHOLOGY |
|------------|--------------|---|
| QUATERNARY | Qal | Flood plains and recent river deposit. |
| | Q.2 | Young terraces alluvial fan. |
| | O.1 | Talus fan. |
| TER. | Oli-Miocene | O.M Light-coloured sandy limestone with baselconglomerate. |
| CRETACEOUS | L.Albian | K.6l Grey coloured marly bedded orbitolina limestone. |
| | U.Aptian | K.5sh Greyish to black shale and marl with limestone intercalation. |
| | Aptian | K.l Grey coloured thick bedded to massive orbitolina limestone with intercalation of dark gray to brown dolomite (kt=in general). K.4l Grey coloured well bedded orbitolina limestone with dolomite lenses. |
| | | K.3: Grey coloured medium bedded limestone with intercalations or yellow to brown dolomite. K.3: Grey coloured medium to thick bedded limestone (rudist limestone). K.3d: Brown to dark grey medium to thick bedded dolomite (ore-bearing). |
| | | K.2l Grey to yellowish grey medium to thin bedded orbitolina limestone. |
| JUR. | Barremian | K.l Wine-red basal sandstone conglomerate topped by red to yellow medium to thick bedded sandy dolomite. |
| | Low.Jurassic | J grey to blue silty shale and sandstone. |

شکل ۱: نقشه زمین‌شناسی منطقه ایرانکوه در مقیاس شبکه UTM بر حسب متر با موقعیت معادن سرب و روی به همراه راهنمای سنگ‌شناسی [۲]



شکل ۲: محدوده مورد مطالعه به صورت چند ضلعی در مختصات شبکه UTM بر حسب متر و موقعیت نقاط آزمایشی در آن [۲]

زمین‌شناسی دارای پتانسیل دلخواه برای نوع خاصی از ذخایر معدنی است، به صورت کلی ترسیم کنند. در مقیاس متوسط، بخش‌هایی از این مناطق کلی برای اکتشاف تفصیلی بعدی، بر اساس شواهد حاصل از تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌برداری ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی منطقه‌ای و تعیین موقعیت مکان‌های شناخته شده معدنی، انتخاب می‌شوند. با شناسایی مناطق مطلوب‌تر، نقاط هدف را می‌توان به طور مستقیم یا غیر مستقیم انتخاب کرد و یا مرحله دقیق‌تری از عمل مساحی را به عهده گرفت. در نهایت، این فرآیند به ایجاد نقشه بزرگ مقیاس منجر می‌شود که نشان دهنده موقعیت‌ها و الویت‌های محل‌های بالقوه معدنی است و به آن نقشه پتانسیل معدنی گفته می‌شود [۱].

۳- منطق بکارگیری اوزان شواهد در پتانسیل‌یابی مواد معدنی

روش اوزان شواهد بیزین ارتباط کمی بین مجموعه داده‌ها، معیارهای شناسایی کانسار و رخداد‌های معدنی شناخته شده را نشان می‌دهد [۱]، [۳] و [۴]. نقشه‌های دوتایی برای رخداد کانی‌سازی و شناختن معیارهای ویژه ایجاد می‌شود که این نقشه‌ها به عنوان نقشه‌های ورودی آنالیز آماری بیزین استفاده

با توجه به سوابق فعالیت‌های اکتشافی و بهره‌برداری از ذخایر سرب و روی در این ناحیه اطلاعات مختلف زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و معدنکاری ناحیه تا حد قابل قبولی موجود می‌باشد. در این مقاله سعی شده است با تلفیق تمامی اطلاعات مفید زمین‌شناسی، اکتشافی و معدنکاری محدوده مورد مطالعه و تبدیل این داده‌ها به نقشه‌های رقومی حداکثر لایه‌های اطلاعاتی برای یک سیستم زمین مرجع مهیا گردد تا کاربرد عملی سیستم اطلاعات جغرافیایی با دقت مناسب در تعیین نقاط با پتانسیل بالا که در اینجا ماده معدنی سرب و روی است به نمایش گذارده شود. همچنین توانایی الگوریتم اوزان شواهد^۲ در محیط سیستم زمین مرجع و بکارگیری دقیق آن نشان داده می‌شود.

۲- تهیه نقشه‌های پتانسیل معدنی

اکتشاف معدن یک فعالیت چند مرحله‌ای است که در مقیاسی کوچک از نظر نقشه آغاز می‌شود و به مقیاس بزرگ تبدیل می‌شود و سرانجام با انتخاب محل‌هایی به عنوان هدف برای حفاری به منظور دست یافتن به ذخایر معدنی در عمق پایان می‌پذیرد. در یک مقیاس کوچک، شرکت‌های اکتشافی باید مناطق کلی را که ممکن است بر اساس ویژگی‌های وسیع

دامنه آزمایش کوچک و تعداد رخدادهای ماده معدنی کم عدم قطعیت وزن‌ها خیلی بیشتر است در نتیجه اختلاف معنی‌دار نیست [۳] و [۷]. از نسبت C به انحراف معیارش (C/S(C)) به عنوان یک مفهوم ریاضی برای بیان میزان همبستگی فضایی بین نقاط رخداد ماده معدنی و دامنه آزمایش و همچنین برای مشخص کردن مرز بهینه [۱] استفاده می‌شود که معادل مقدار t جدول استیودنت^۳ برای مقدار اختلاف C است [۶]. انحراف معیار C از رابطه ۴ محاسبه می‌شود [۷] و [۶].

$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (۴)$$

که S^2 مقدار واریانس اوزان را نشان می‌دهد.

۴- تعیین نقاط آزمایشی

در محدوده مورد مطالعه که تقریباً ۲۹/۵ کیلومتر مربع مساحت دارد تعداد ۵۳ نقطه آزمایشی در نظر گرفته شده است که از معادن فعال، گمانه‌ها، حفاری‌های حاصل از واگن‌دریل‌ها و رخنمون‌های سطحی که میزان سرب و روی آنها بیشتر از سه درصد بوده است انتخاب شده‌اند. شکل ۲ محدوده مورد مطالعه و موقعیت نقاط آزمایشی در منطقه ایرانکوه را نشان می‌دهد.

۵- تهیه لایه‌های شاهد و محاسبه اوزان این لایه‌ها در

منطقه مورد مطالعه

۵-۱- لایه ژئوفیزیک

در این منطقه دو نوع داده ژئوفیزیکی موجود است که شامل داده‌های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی (IP) است، برای تهیه لایه اطلاعاتی ژئوفیزیک از داده‌های IP که کامل‌تر بوده‌اند استفاده شده است. در منطقه مورد مطالعه داده‌های IP مناطق گوشفیل، رومرمر (غرب گوشفیل)، غرب تپه‌سرخ و شرق تپه‌سرخ موجود است. برای بدست آوردن آنومالی هر منطقه حد آستانه‌ای آن منطقه توسط رابطه $\bar{X} + 2S$ محاسبه شده است سپس مناطق بیشتر از حد آستانه‌ای به عنوان آنومالی انتخاب شده‌اند. نقشه ژئوفیزیک نهایی از ترکیب نقشه آنومالی مناطق ذکر شده بدست آمده و به صورت چند ضلعی به عنوان لایه ژئوفیزیک استفاده شده است (شکل ۳). دامنه ژئوفیزیک ۰/۵۴ کیلومتر مربع از ناحیه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد و ۸ نقطه از ۵۳ نقطه آزمایشی در این محدوده قرار دارند. اوزان محاسبه شده برای این لایه بعد از تعمیم دادن در جدول ۱ نشان داده شده است. میزان اختلاف برای این لایه برابر ۲/۴۰ است.

می‌شود و مجموع وزن نقشه‌ها رتبه‌بندی مناطق مستعد را نتیجه می‌دهد. هر نقشه دوتایی مناطقی را رسم می‌کند که دامنه آزمایش با یک نقشه حضور (D_p) و عدم حضور (D_n) نمایش داده می‌شود. امتیاز بندی به منظور دستیابی به دامنه‌ای از وزن‌های مثبت و منفی (W^+, W^-) بر اساس دامنه رویدادهای معدنی شناخته شده صورت می‌گیرد [۵].

اساس محاسبه وزن‌ها بر پایه ریاضیات است [۳]، که به طور ساده بر اساس تخمین احتمال شرطی بیان می‌شود:

اگر نسبت درصد رخدادهای معدنی در D_p به درصد مساحت اشغال شده توسط D_p بزرگ‌تر از ۱ باشد ارتباط فضایی مثبت است، در صورتی این نسبت کوچک‌تر از ۱ باشد ارتباط فضایی منفی و در حالتی که این نسبت مساوی ۱ است ارتباط فضایی وجود ندارد.

در ارتباط فضایی مثبت تعداد رویدادهای معدنی شناخته شده موجود در دامنه آزمایش بیشتر از رخدادهای معدنی مورد انتظار است. این در صورتی است که رخدادهای معدنی و دامنه آزمایش مستقل باشند. برعکس ارتباط فضایی منفی بیانگر وقوع تعداد کمتر رخدادهای ماده معدنی مشاهده شده در دامنه آزمایش نسبت به رخدادهای ماده معدنی مورد انتظار است. در این مورد نیز شرط استقلال رخدادهای ماده معدنی و دامنه آزمایش وجود دارد. از آنجا که مساحت رخداد ماده معدنی نسبت به دامنه آزمایش خیلی کوچک‌تر است، وزن مشاهده‌ای با لگاریتم نسبت احتمال تخمین زده می‌شود [۳] و [۶].

$$W^+ = \text{Ln}\left(\frac{N_{D_p}}{S_{D_p}}\right) \quad (۱)$$

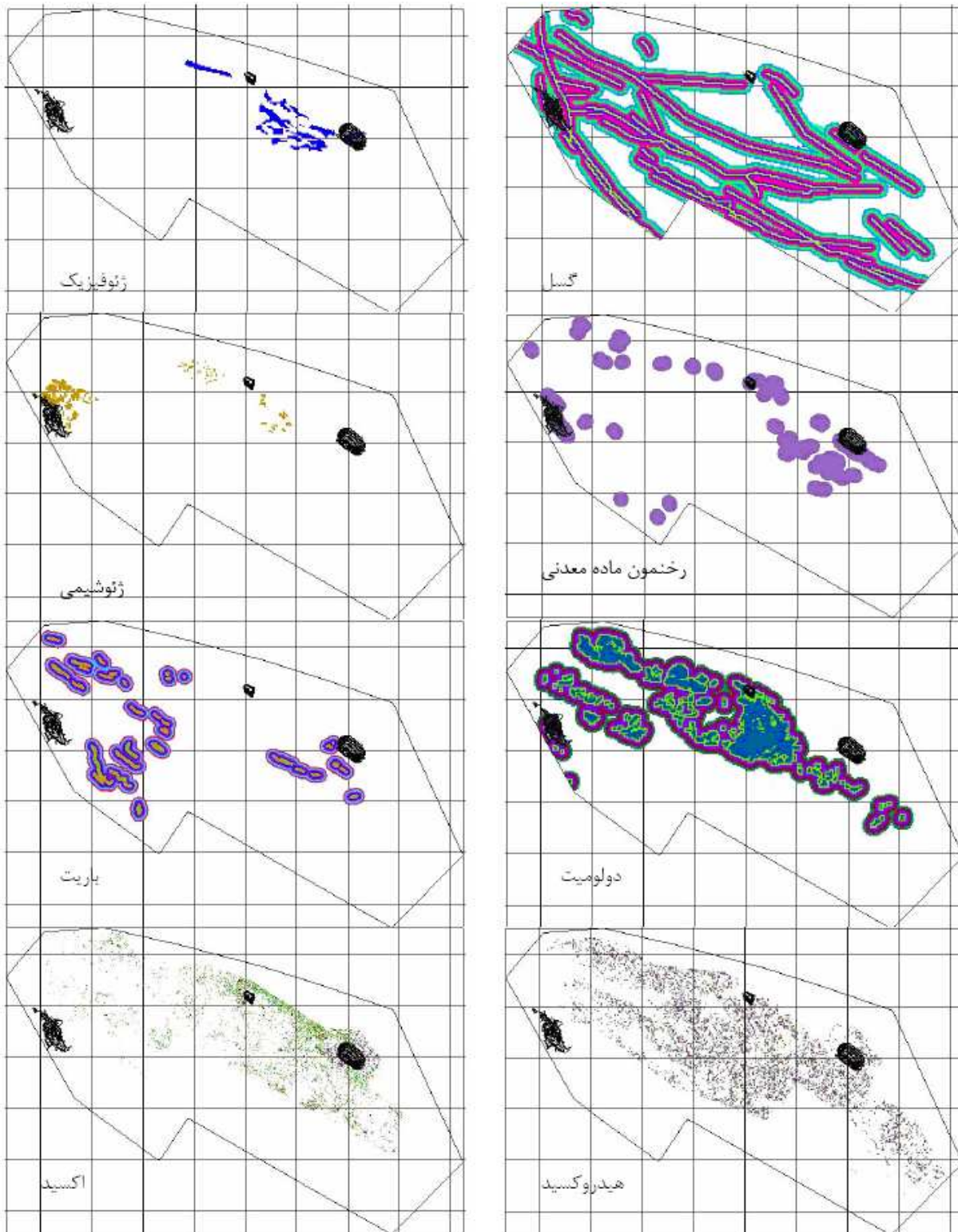
$$W^- = \text{Ln}\left(\frac{N_{D_n}}{S_{D_n}}\right) \quad (۲)$$

بطوریکه N_{D_p} و N_{D_n} به ترتیب درصد رخدادهای معدنی در D_p و D_n و همچنین S_{D_p} و S_{D_n} درصد مساحت اشغال شده توسط D_p و D_n است.

این وزن‌ها میزانی از همبستگی فضایی بین رخدادهای ماده معدنی و معیارهای شناسایی را نشان می‌دهند که فاقد واحد می‌باشند. اختلاف وزن‌ها که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = W^+ - W^- \quad (۳)$$

یک معیار کلی برای ارتباط یک دامنه آزمایشی مشخص را بیان می‌کند. برای رابطه فضایی مثبت اختلاف مثبت و در یک رابطه فضایی منفی اختلاف منفی است. برای هر دامنه آزمایشی اغلب اختلاف ماکزیمم، بهترین معیار همبستگی فضایی با نقاط رخداد ماده معدنی را بدست می‌دهد مشروط بر اینکه تعداد رخداد ماده معدنی زیاد و دامنه آزمایش بزرگ باشد. در مورد



شکل ۳: لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در محیط سیستم زمین مرجع برای منطقه ایرانکوه

جدول ۱: نتایج محاسبات اوزان لایه‌های شاهد

| Stud (C) | S (C) | C | S (W-) | W- | S (W+) | W+ | Point | Area (Sq.Km) | لایه اطلاعاتی |
|----------|-------|------|--------|-------|--------|------|-------|--------------|---------------|
| ۵/۸۴ | ۰/۴۱ | ۲/۴۰ | ۰/۱۵ | -۰/۱۵ | ۰/۳۸ | ۲/۲۵ | ۸ | ۰/۵۴۹ | ژئوفیزیک |
| ۴/۴۰ | ۰/۲۹ | ۱/۳۱ | ۰/۲۴ | -۰/۶۸ | ۰/۱۷ | ۰/۶۳ | ۳۵ | ۱۰/۷۲ | گسل |
| ۱۲/۱۲ | ۰/۳۶ | ۴/۴۴ | ۰/۱۷ | -۰/۴۴ | ۰/۳۲ | ۴/۰۰ | ۱۹ | ۰/۳۸ | ژئوشیمی |
| ۵/۹۸ | ۰/۲۸ | ۱/۶۹ | ۰/۲۰ | -۰/۵۸ | ۰/۱۹ | ۱/۱۱ | ۲۸ | ۵/۴۳ | رخنمون |
| ۲/۵۱ | ۰/۵۲ | ۱/۳۲ | ۰/۱۴ | -۰/۰۶ | ۰/۵۰ | ۱/۲۶ | ۴ | ۰/۶۵ | باریت |
| ۶/۰۹ | ۰/۳۰ | ۱/۸۴ | ۰/۲۵ | -۰/۸۷ | ۰/۱۷ | ۰/۹۷ | ۳۶ | ۷/۹۶ | دولومیت |
| ۲/۹۱ | ۰/۵۹ | ۱/۷۴ | ۰/۱۵ | -۰/۰۵ | ۰/۵۸ | ۱/۶۹ | ۳ | ۰/۲۷ | اکسید |
| ۲/۲۲ | ۱/۱۱ | ۲/۴۸ | ۱/۰۰ | -۱/۳۲ | ۰/۵۰ | ۱/۱۶ | ۴ | ۰/۴۶ | هیدروکسید |

۵-۲- لایه گسل

نمونه‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه به روش لب‌پری برداشت [۹] و آنالیز شیمیایی برای عناصر سرب و روی و همچنین بر روی مغزه‌های حفاری صورت گرفته است. سپس حد آستانه‌ای مجموع دو عنصر سرب و روی با استفاده از رابطه $\bar{X} + 2S$ برابر با ۰/۵ درصد محاسبه شده است و مناطق بالاتر از این حد به عنوان آنومالی در نظر گرفته شده‌اند [۹]. محدوده ژئوشیمی مساحتی در حدود ۰/۳۸ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد (شکل ۳). ۱۹ نقطه از نقاط آزمایشی در این محدوده قرار گرفته‌اند. اوزان برای این لایه بعد از تعمیم دادن محاسبه شده بطوریکه میزان اختلاف برای این لایه برابر ۴/۴۴ است (جدول ۱).

۵-۴- رخنمون ماده معدنی

یکی از عوامل مرتبط با کانی‌سازی در منطقه مورد مطالعه رخنمون ماده معدنی سرب و روی است. برای تهیه این لایه از نقشه زمین‌شناسی منطقه ایرانکوه [۲] استفاده شده است و مناطقی که ماده معدنی در آن رخنمون نشان داده است از این نقشه جدا شده و بعد از کنترل صحرایی به صورت چند ضلعی به عنوان لایه اطلاعات رخنمون ماده معدنی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳). ماده معدنی در ۰/۳۴ کیلومتر مربع از ناحیه مورد مطالعه رخنمون نشان می‌دهد. که برای آن از ۵۰ تا ۲۰۰ متر بافر در نظر گرفته شده است. بعد از محاسبه اوزان بافرها، بافرها تا بافر بهینه تعمیم داده شده و اوزان نهایی محاسبه شده است (جدول ۱).

۵-۵- لایه نقاط دارای کانی‌سازی باریت

باریت به دو صورت رگه‌ای و رسوبی تشکیل می‌شود. باریت رگه‌ای به صورت اپیژنتیک است و کانی‌سازی باریت در امتداد گسل‌ها، شکستگی‌ها یا زون‌های برشی شده روی می‌دهد. در منطقه مورد مطالعه نیز باریت تشکیل شده است که با کانی‌سازی سرب و روی در ارتباط است [۹]. مناطق آلوده به

یکی از عوامل کانی‌سازی در منطقه با توجه نوع و ماهیت تشکیل ماده معدنی گسل‌ها هستند که ممکن است کانی‌سازی در امتداد آنها صورت گرفته باشد [۸]. برای تهیه گسل‌های موجود در منطقه از دو روش استفاده شده است که یکی از آنها روش دورسنجی و دیگری استفاده از نقشه زمین‌شناسی منطقه [۲] بوده است (شکل ۱).

با توجه به شواهد موجود در منطقه دو نوع گسل با راستای شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و همچنین شمال‌شرقی- جنوب‌غربی وجود دارد که این گسل‌ها از یکدیگر جدا و در لایه‌های جداگانه‌ای قرار داده شده‌اند. برای محاسبه اوزان، ۲۰۰ متر بافر با فاصله ۵۰ متری در نظر گرفته شده است. محاسبه اوزان نشان می‌دهد که تنها گسل‌های شمال‌غربی- جنوب‌شرقی با کانی‌سازی در ارتباط هستند و گسل‌هایی که دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی هستند با کانی‌سازی ارتباطی ندارند. چراکه هیچ نقطه آزمایشی در محدوده این گسل‌ها قرار نگرفته است و در نتیجه وزنی ندارند. لذا فقط از گسل‌های دارای روند شمال غربی- جنوب شرقی در مدل تلفیقی سیستم زمین مرجع استفاده شده است (شکل ۳). با توجه به مقدار C/S(C) که در فاصله ۱۰۰ متری بیشترین مقدار خود را دارد این فاصله به عنوان بافر بهینه در نظر گرفته شده است و بافرها تا فاصله ۱۰۰ متر تعمیم داده شده است (جدول ۱).

۵-۳- لایه ژئوشیمی

کشف هاله‌های قوی عنصر روی در رسوبات آبراهه‌ای و خاک‌های برجا و کشف هاله‌های همین عنصر در سنگ‌های کربناتی نزدیک به کانسار راهنمای مفیدی برای اکتشاف است، ولی این هاله‌ها ممکن است زیاد قوی نباشد. روش لیتوژئوشیمیایی برای کشف هاله‌های اولیه بخصوص برای انواع مرتبط با کانی‌سازی پنهان بسیار سودمند است [۹]. ابتدا

۵-۸- لایه هیدروکسید

یکی دیگر از عوامل مرتبط با کانی‌سازی در منطقه، هیدروکسیدها هستند که هیدروکسیدهای آهن، مارن‌ها و رس‌ها را در بر می‌گیرند. بعد از تشخیص نواحی آلوده به هیدروکسیدها که از روش‌های دورسنجی برای این منظور استفاده شده است، این مناطق به صورت رستر وارد سامانه زمین مرجع شده‌اند (شکل ۳). اوزان محاسبه شده برای لایه هیدروکسید با توجه به ماکزیمم مقدار $C/S(C)$ کلاس بهینه مشخص شده است. سپس تعمیم تا کلاس بهینه صورت گرفته و اوزان نهایی محاسبه شده‌اند (جدول ۱).

۶- استقلال مشروط

عدم وابستگی یا استقلال مشروط^۴ به طور فرضی هنگامی وجود دارد که دو یا چند نقشه به کمک مدل بیزین با هم ترکیب شوند. آزمون استقلال مشروط با آزمایش‌های آماری نقشه‌هایی را که دارای همبستگی هستند و ایجاد مشکل می‌کنند، مشخص می‌کند. در نتیجه نقشه‌های مشکل آفرین را می‌توان هنگام تجزیه و تحلیل کنار گذاشت یا برای کاهش دادن مشکل آنها را اصلاح کرد [۵].

اگر دو نقشه B_1 و B_2 از نظر آماری مستقل باشند این بدان معنی است که:

$$P\{B_1|B_2\} = P\{B_1\}$$

$$P\{B_2|B_1\} = P\{B_2\}$$

$P\{B_1|B_2\}$ احتمال B_1 به شرط B_2 ، $P\{B_2|B_1\}$ احتمال B_2 به شرط B_1 و $P\{B_1\}$ و $P\{B_2\}$ به ترتیب احتمال B_1 و B_2 هستند. حال اگر دو الگوی جفت به طور مشروط با توجه به مجموعه‌ای از نقاط ذخیره و انباشته‌های معدنی (D) مستقل باشند، بدان معنی است که رابطه زیر در آنها صدق می‌کند [۵]:

$$P\{B_1 \cap B_2 | D\} = P\{B_1 | D\}P\{B_2 | D\} \quad (۴)$$

نتایج آزمون استقلال مشروط لایه‌های اطلاعاتی شاهد محدوده مورد مطالعه در سطح اعتماد ۹۵٪ در جدول ۲ آورده شده است. در این سطح اعتماد، احتمال کمتر ۵ درصد تا حدودی معرف وابستگی بین دو لایه اطلاعاتی است. با توجه به این نتایج تعداد کمی از لایه‌ها تا حدودی وابستگی نشان می‌دهند که به دلیل وسعت کم محدوده قابل پیش‌بینی بوده در نتیجه هیچکدام از لایه‌های اطلاعاتی حذف نشده است.

باریت به صورت چندضلعی از نقشه زمین‌شناسی منطقه جدا شده است (شکل ۳). لایه اطلاعاتی باریت $۰/۵۵$ کیلومتر مربع از ناحیه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد که برای آن از ۵۰ تا ۲۰۰ متر بافر در نظر گرفته شده و اوزان برای مدل نهایی محاسبه شده است (جدول ۱).

۵-۶- لایه دولومیت

با توجه به اینکه کانی‌سازی اسفالریت و گالن به صورت استراتی‌بند در لایه‌های دولومیت آهن‌دار موجود در منطقه مورد مطالعه صورت گرفته است، دولومیت یکی از عوامل کنترل کننده کانی‌سازی در منطقه محسوب می‌گردد [۸]. برای تفکیک بهتر مرز دولومیت‌ها با آهک‌ها و با توجه به ارتباط نزدیک دولومیت‌ها با کانی‌سازی سرب و روی در منطقه [۸] دولومیت‌های منطقه علاوه بر بررسی نقشه زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های دورسنجی مشخص شده‌اند. این دولومیت‌ها به صورت چندضلعی جدا شده و به عنوان یکی از لایه‌های اطلاعاتی شاهد مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۳). دلیل وجود بافر را می‌توان احتمال وجود دولومیت در عمق دانست که توسط واحدهای جوان پوشیده شده‌اند و رخنمون ندارد. دولومیت $۲/۰۵$ کیلومتر مربع از ناحیه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد که برای آن از ۵۰ تا ۲۰۰ متر بافر در نظر گرفته شده است. بعد از محاسبه اوزان بافرها با توجه به ماکزیمم مقدار $C/S(C)$ فاصله ۱۰۰ متری به عنوان بافر بهینه در نظر گرفته شده است و بافرها تا این فاصله تعمیم داده شده‌اند. سپس اوزان نهایی محاسبه شده است (جدول ۱).

۵-۷- لایه اکسیدهای مواد معدنی

به علت وجود پیریت و سایر سولفیدهای فلزی در منطقه و تاثیر آبهای جوی بر آنها، گوگرد تشکیل سولفات داده است و آهن و سایر مواد معدنی سرب و روی در اثر هوازدگی به اکسید تبدیل شده‌اند [۸]، [۱۰]. اکسیدهای مواد معدنی آهن، سرب و روی یکی از لایه‌های اطلاعاتی مرتبط با کانی‌سازی در منطقه است [۱۰]. بعد از تشخیص نواحی آلوده به این اکسیدها با استفاده از روش‌های دورسنجی، این مناطق به صورت رستر به عنوان لایه اطلاعاتی اکسید استفاده شده‌اند (شکل ۳). ابتدا اوزان این لایه محاسبه شده سپس کلاسه‌بندی مجدد با توجه به این اوزان بر روی این لایه صورت گرفته است تا کلاس‌هایی که ارتباط بیشتری با کانی‌سازی دارند در مدل نهایی استفاده شوند. اوزان محاسبه شده برای لایه اکسیدهای مواد معدنی با توجه به ماکزیمم مقدار $C/S(C)$ برای کلاس بهینه مشخص شده است (جدول ۱).

۷- مدل نهایی روش اوزان شواهد

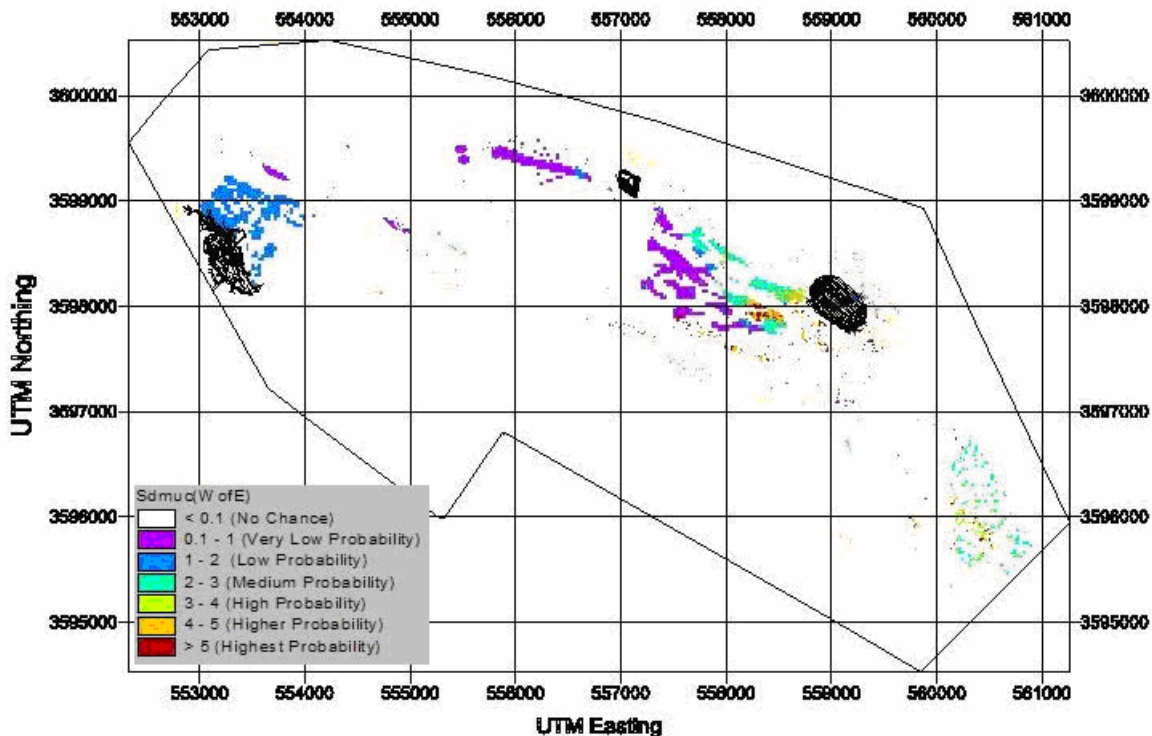
اساس مدل نهایی بر جمع اوزان لایه‌های اطلاعاتی شاهد در محدوده مورد مطالعه، پایه‌گذاری شده است. جمع اوزان لایه‌ها مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱ در صورتیکه نقاط آزمایشی در دامنه داده‌های شاهد مطلوب قرار گرفته باشند ۱۳/۰۷ و در صورتیکه این نقاط در دامنه داده‌های مطلوب قرار نگرفته باشند ۴/۱۵- است.

شکل ۳ مدل نهایی مناطق امیدبخش کانی‌سازی سرب و روی در منطقه را نشان می‌دهد که برحسب احتمال رخداد ماده معدنی اولویت‌بندی شده و به شش کلاس مختلف تقسیم

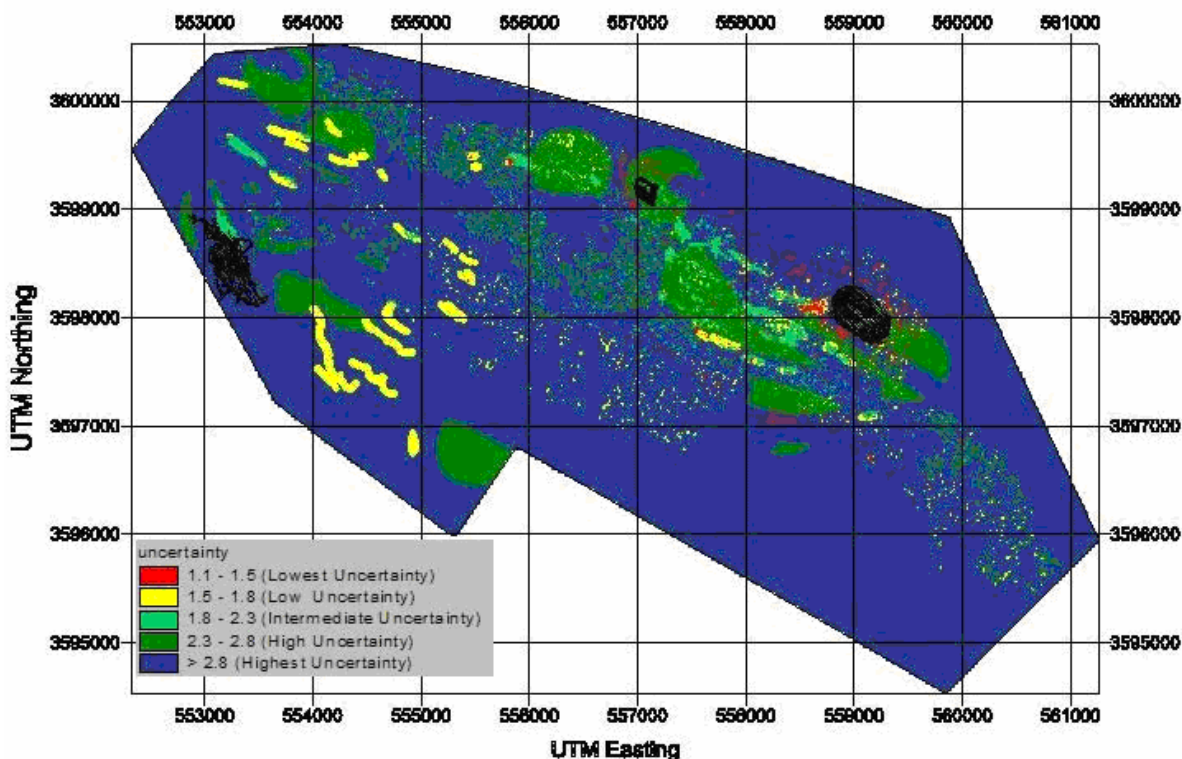
شده است. مدل نهایی کانی‌سازی در پیت‌ها را نشان داده که قابل پیش‌بینی بوده است. همچنین ناحیه بین معادن تپه سرخ و گوشفیل با توجه به موقعیت آنها در این نقشه احتمال بالای کانی‌سازی را نشان داده است. در شکل ۴ مدل نهایی بر حسب عدم قطعیت ۵ اولویت‌بندی شده و به پنج کلاس مختلف تقسیم شده است (از عدم قطعیت خیلی کم تا عدم قطعیت خیلی زیاد). در این حالت کمترین عدم قطعیت بهترین اولویت را نشان می‌دهد [۵]، [۱۱]. مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که ناحیه بین معادن گوشفیل و تپه‌سرخ در هر دو نقشه بهترین اولویت اکتشافی را مشخص می‌کند.

جدول ۲: نتایج آزمون استقلال مشروط برای هشت لایه شاهد محدوده مورد مطالعه

| باریت | گسل | ژئوشیمی | ژئوفیزیک | اکسید | دولومیت | رخنمون | |
|--------|--------|---------|----------|--------|---------|--------|-----------|
| ۰/۷۴۲۷ | ۰/۰۱ | ۰/۶۶۹۴ | ۰/۸۷۹۴ | ۰/۹۶۵۸ | ۰/۹۳۰۶ | ۰/۸۳۴۳ | هیدروکسید |
| ۰/۱۶۷۶ | ۰/۶۷۸۷ | ۰/۰۱ | ۰/۷۶۴۸ | ۰/۷۵۳۸ | ۰/۸۳۹۵ | | رخنمون |
| ۰/۰۱ | ۰/۳۷۰۲ | ۰/۲۹۸۷ | ۰/۰۱ | ۰/۵۶۸۲ | | | دولومیت |
| ۰/۸۳۱۹ | ۰/۴۹۰۶ | ۰/۴۳۲۳ | ۰/۸۹۰۸ | | | | اکسید |
| ۰/۰۱ | ۰/۷۵۲۷ | ۰/۰۱ | | | | | ژئوفیزیک |
| ۰/۴۰۰۹ | ۰/۰۱ | | | | | | ژئوشیمی |
| ۰/۶۳۹۷ | | | | | | | گسل |



شکل ۴: مدل نهایی اوزان شواهد (اولویت بندی بر اساس احتمال رخداد ماده معدنی)



شکل ۵: مدل نهایی اوزان شواهد (اولویت بندی بر اساس عدم قطعیت)

۸- نتیجه گیری

بطور خلاصه از آنجائیکه در یک مطالعه پتانسیل یابی معدنی به روش مدل تلفیقی در سیستم زمین مرجع مهم ترین بخش تهیه لایه های اطلاعاتی است، در تهیه این لایه ها تا حد امکان بایستی لایه های مفید و موثر انتخاب گردد و همچنین نهایت دقت و صحت در این زمینه بکار گرفته شود، با توجه به اوزان محاسبه شده برای گسل ها، تنها گسل های دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی با کانی سازی در ارتباطند همچنین اوزان محاسبه شده نشان می دهد که نقاط دارای کانی سازی باریت، دولومیت های آهن دار و اکسیدهای آهن و سایر مواد معدنی موجود در منطقه مورد مطالعه با کانی سازی در ارتباط هستند. نتایج استقلال مشروط بیانگر این است که بعضی از لایه ها تا اندازه ای نسبت به یکدیگر در محدوده کانی سازی شده وابستگی نشان می دهند که با توجه به وسعت محدوده منطقی به نظر می رسد. در مدل نهایی اوزان شواهد مناطق امید بخش، حداکثر احتمال رخداد با مناطق معادن فعال فعلی تطبیق نشان می دهد.

۶- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از زحمات و راهنمایی های آقایان مهندس خداکریم غریبی و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی کمال امتنان و سپاسگزاری را داریم.

منابع

- [1] Bonham-Carter, G.F.; 1994; "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS"; Pergamon, Oxford, pp. 398.
- [۲] بخش زمین شناسی و اکتشاف شرکت معدنی باما بهره بردار معادن سرب و روی ایرانکوه؛ ۱۳۸۲؛ نقشه زمین شناسی منطقه ایرانکوه.
- [3] Bonham-Carter, G.F.; Agterberg F.P.; Wright, D.F.; 1989; "Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential, in Statistical applications in the earth sciences"; Geological Survey of Canada, Paper 89-9, pp. 171-183.

- models*"; Chisel Lake-Anderson Lake area, in
- [8] Rastad, E.; 1981; "*Geological, mineralogical and ore facies investigations the lower on cretaceous strataband Zn, Pb, (Ba, Cu) deposits on the Inrankuh mountain range*"; Isfahan west Central Iran, Ph.D. Thesis.
- [۹] حسنی پاک، علی اصغر؛ ۱۳۷۹؛ مدل سازی کانسارهای فلزی - غیرفلزی و کاربرد اکتشافی آن؛ دانشگاه تهران.
- [۱۰] غضبان، ف؛ حاجی کاظمی، ا.؛ (۱۳۷۳)؛ "شواهد زمین شناسی و ژئوشیمیایی موجود در سنگ میزبان نهشته های سرب، روی و باریم در ناحیه ایرانکوه غرب ایران مرکزی؛ چهارمین سمپوزیم معدنکاری ایران، جلد اول (اکتشاف)، صص ۷۹-۴۹، یزد.
- [11] Chinn, G.T.; Ascough, G.L.; 1997; "Mineral Potential Mapping Using an Expert System and GIS "; Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, pp. 105-114.
- [4] Wright, D.F.; Bonham-Carter, G.F.; 1996; "*VHMS favourability mapping with GIS-based integration* Bonham-Carter, G.F.; Galley, A.G.; Hall, G.E.M., eds.; EXTECH I: a multidisciplinary approach to massive sulphide research in the Rusty Lake-Snow Lake greenstone belts, Manitoba; Geological Survey of Canada, Bulletin 426, pp. 339-376, 387-401.
- [5] Wang, H.; Cai, G.; Cheng, Q.; 2002; "*Data integration using Weights of evidence Model*"; Proc Applications In mapping mineral resource potentials.
- [6] Turner, D.D.; 1997; "*Predictive GIS Model For Sediment-Hosted Gold Deposits, North-Central Nevada, U.S.A.*"; Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration"; pp. 115-126.
- [7] Bonham-Carter, G.F.; Agterberg, F.P.; Wright, D.F.; 1987; "*Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia*"; Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, No. 11, pp. 1585-1592.

پی نوشت ها

-
- ¹ Geographic Information System
² Weights of Evidence
³ Student
⁴ Conditional Independing
⁵ Uncertainty