بررسی کانه‌سازی فلورین، سرب و روی در برگه چهارگوش پل سفید مازندران با استفاده از منطق فازی لجیک

نسرین چهاردولی[۱]، حمید رضا همتی آهویی[۲]، مهیار یوسفی[۳]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین
[۳]استادیار گروه معدن، دانشگاه ملایر، ملایر

چکیده: منطقه پل سفید مازندران یکی از مناطق اکتشافی فلورین، سرب و روی در دو زون ساختاری قرار گرفته است؛ بدین صورت که نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی از قسمت شرقی زون خزر و نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی از قسمت میانی زون البرز واقع شده، که با استفاده از منطق فازی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. با معرفی یک مدل مفهومی مناسب، در قالب یک مدل هدف، معیارهای اکتشافی در منطقه، شناسایی و جمع‌آوری گردید. در مرحله بعد لایه‌های جدیدی به صورت نقشه‌های شاهد و پیشگو با استفاده از تحلیل لایه های اطلاعاتی مختلف و بهره گیری از فاکتور اکتشافی هر یک از آنها به دست آمد. سپس با تلفیق کلیه نقشه هایی که نشان دهنده حضور یک معیار خاص هستند، محل وقوع هر یک از آنها که از روش های مختلف اکتشافی به دست آمده اند؛ به طور خاص در یک نقشه جداگانه ذخیره شدند. نقشه ها در این پژوهش به صورت فازی وزن دهی شده و نقشه های شاهد وزن دار بدست آمده است. کلیه نقشه های وزن دار به صورت ژئومتریک ترکیب گردیده تا مناطقی که در آن ها کلیه معیارهای اکتشافی یکدیگر را تایید می کنند، به صورت یک نقشه معرفی شوند. نقشه حاصله مناطق امید بخش را درمنطقه نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی: مدل پتانسیل معدنی، فلز، فلورین، سرب، روی، نقشه شاهد پیشگو، پل سفید، مازندران.

Investigate the fluorine, lead and zinc Occurence In the quadrate map of the pol-sefid Using the fuzzy logic

nasrin, chahardoli[1]; hamid reza ahoee hemati[2]; mahyar, yousefi [3]
[1] Masters student, Department of Mine, Imam Khomeini International University, Ghazvin
[2] Assistant Professor, Department of Mining, Imam Khomeini International University, Ghazvin
[3] Assistant Professor, Department of Mining, Malayer University, Malayer

Abstract

Pol-sefid area is one of the fluorine, lead and zinc exploration areas, which was studied by using fuzzy logic in this study. By introducing an appropriate conceptual model, exploratory criteria were identified and collected in the form of a target model. In the next step, new layers were obtained as check and predictive maps by using analysis of different information layers and utilization of exploratory factor of each of them. Then, by combining all the maps that representing the presence of a particular criterion, the occurrence location of each of them, which was obtained by various exploratory methods, was saved specifically in a separate map. The maps in this study were weighted in a fuzzy-logic and weighted check maps were obtained. All weighted maps have been geometrically combined so that the regions where all the exploratory criteria are approved by each other are introduced as a map. The resulting map shows areas of hope in the area.

Key word: Mineral Potential Model, Metal, fluorine, lead, zinc, Fuzzy-logic, Predictive map, Pol-Sefid, Mazandaran.

۱ ۱ مقدمه

با توجه به مرحله ای بودن فرآیند اکتشاف، در هر مرحله از آن بسته به نوع ماده معدنی مورد پی جویی از روش های مختلف اکتشاف مانند زمین شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، دورسنجی، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و... می توان استفاده کرد. در هدفمند کردن عملیات اکتشافی داشتن برنامه مشخص از مراحل اکتشاف تأثیر مهمی در کاهش ریسک و بهینه سازی زمان و فاکتورهای اکتشافی دارد. به همین منظور با به کارگیری انواع داده ها و نقشه های در دسترس؛ و استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می توان طرحی را اجرایی کرد، که با استفاده از آن بتوان مناطق پتانسیل دار را در قالب مدل پتانسیل معدنی پیش بینی نمود. روش های مختلفی برای مدل پتانسیل معدنی وجود دارد. اختصاصات کانه سازی های تیپ های مختلف با یکدیگر متفاوت می باشد؛ بنابراین هر ماده معدنی، نحوه اکتشاف متفاوتی دارد. بدین ترتیب لازم است با تعریف یک مدل هدف از ذخیره مورد پی جویی، امکان سنجی بهینه الگوهای اکتشافی را فراهم نمود؛ و با ساخت یک شبکه استنتاج الگو به صورت یک الگوریتم، تولید مدل پتانسیل معدنی را بهینه نمود. این الگوریتم پس از تعریف مدل مفهومی مناسب به طور جداگانه باید برای هر ماده معدنی خاص، طراحی گردد [۱]. در این راستا از شبکه استنتاج الگوهای شاهد اکتشافی مرتبط، به منظور دسترسی به مدل پتانسیل معدنی بهینه در تولید نواحی هدف و شناسایی نواحی امید بخش اکتشافی اولیه کانه سازی فلورین، سرب و روی تیپ های مختلف در نقشه چهارگوش زمین شناسی پل سفید استفاده شده است. به این منظور ابتدا مدل توصیفی ذخایر مورد پی جویی به عنوان مدل هدف مدنظر قرار گرفت و پس از جمع آوری اطلاعات به منظور تهیه مدل پتانسیل معدنی و تولید نواحی هدف، تجزیه و تحلیل های لازم روی آن ها اجرا شده است. در نهایت مدل پتانسیل معدنی تولید شده است..

۱ ۲ بحث

وابستگی بین فرآیندهای زمین شناسی مختلف و یا کنترل کننده های کانه سازی را با مکان هایی که احتمال حضور ذخایر مورد پی جویی در آنجا بالاست، می توان توسط شبکه استنتاج الگوهای شاهد با استفاده از کلمات و اشکال مختلف، نشان داد [۴]. بدین منظور لازم است الگوهای شاهد کانه سازی مورد پی جویی، از میان مجموعه داده های فضایی، استخراج گردد. به دلیل این که داده های فضایی اکتشافی مختلف، دارای بخش هایی با ارزش متفاوت می باشند، ممکن است همه آنها برای اکتشاف یک ماده معدنی خاص دارای ارزش یکسان نباشند. از طریق ارزش گذاری کلیه الگوها، استنتاج بهترین الگوهای شاهد انجام می گیرد. بنابراین ارزش گذاری بخش های مختلف یک نقشه برای جداسازی و نمایش شواهد دارای ارزش متفاوت (یا طبقه بندی) و همچنین تعیین میزان اهمیت حضور هر معیار اکتشافی، در هر موقعیت مکانی و برای هر نوع کانه سازی مورد جستجو، به منظور استفاده در مورد هدف، مسئله ضروری می باشد [۱]. در این حالت تخصیص وزن، بر اساس میزان همراهی فضایی ذخایر معدنی هم نوع ذخایر مورد پی جویی با معیارهای اکتشافی صورت می گیرد [۹]. الگوریتم عملیات اکتشافی، مدلی می باشد که می تواند با مدل پتانسیل معدنی، نواحی دارای بیشترین احتمال حضور کانه سازی را معرفی و احتمال موفقیت اکتشاف را افزایش دهد [۳].

در فعالیت های اکتشافی ذخایر معدنی، با استفاده از مدل پتانسیل معدنی، شناسایی مناطق هدف صورت می گیرد. مدل پتانسیل معدنی در واقع یافتن مناطقی است که یک سری معیارها و ملاک ها برای حضور کانه سازی در آن ها صدق کند. این مدل بر اساس شناخت از ذخیره و محیط آن در نزدیک سطح زمین و در جاهایی که فرآیندهای زمین شناسی و ساختاری برای کانه سازی مناسب هستند، صورت می گیرد [۵]. در مدل پتانسیل معدنی، مواردی که باید مورد توجه قرار گیرند، شامل جمع آوری، تجزیه و تحلیل و تلفیق انواع داده های مرتبط می باشد، که به منظور استنتاج الگوهای شاهد کانه سازی، یعنی الگوهای زمین شناسی، آنومالی های ژئوشیمیایی و یا ژئوفیزیکی همراه با ذخایر مورد پیجویی و... صورت می گیرد. در واقع، فرآیند استخراج الگوهای پیشگو و همچنین ترکیب و تلفیق داده های فضایی به منظور شناسایی مناطق هدف و رتبه بندی آنها در اکتشاف، مدل پتانسیل معدنی نامیده می شود [۴، ۶]. خروجی مدل پتانسیل معدنی، نقشه ای خواهد بود که در آن محل حضور احتمالی ذخایر شناخته نشده، تخمین زده شده. بنابراین با تولید مدل پتانسیل معدنی، حضور یا عدم حضور یک کانه سازی در یک محل، به طور غیر مستقیم از طریق یافتن ارتباط بین این کانه سازی با الگوهای شاهد و خصوصیات قابل اندازه گیری متغیرهای پیشگوی اکتشافی قابل ارزیابی است [۱].

۱ ۴ -مدل مفهومی و روش کار

تعریف مدل مفهومی برای یک تیپ ذخیره مشخص نیاز به بررسی فرآیندهای زمین شناسی و مدل های ذخایر کشف شده مشابه و همچنین محیط های زمین شناسی آن ها، که تشریح کننده مشخصات و خصوصیات زمین شناسیِ کانه سازی مورد پی جویی می¬باشند، دارد [۱۰]. در طراحی مدل مفهومی، مشخصات زمین شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی نواحی که شامل ذخایر هم نوع ذخایر مورد پی جویی؛ اساس شناسایی و تعیین معیارهای اکتشافی مناسب می باشند. اساس تهیه مدل های پتانسیل معدنی مدل مفهومی ذخایر مورد پی جویی و شناسایی معیارهای اکتشافی مناسب برای پی جویی، خواهد بود [۱]. در مطالعه حاضر به منظور دستیابی به مدل توصیفی ذخایر فلورین، سرب و روی تیپ های مختلف در نقشه چهارگوش پل سفید، از خصوصیات مهم ترین معادن فلورین، سرب و روی در مقیاس جهانی، و همچنین معادن و اندیس های شناخته شده این تیپ در منطقه مورد بررسی در مقیاس محلی به عنوان الگو استفاده شده است. به طور کلی باتوجه به تیپ غالب کانه سازی (تیپ فلورین، سرب و روی دره می سی سی پی)، مهم ترین سنگ میزبان کانسارهای فلورین، سرب و روی، سنگ های رسوبی ریز دانه شامل آهک های دولومیتی بخش فوقانی سازند الیکا با سن تریاس میانی می باشد. البته در بعضی موارد بسیار اندک جایگزینی فلورین در سازند تیزکوه گزارش شده است [۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۸، ۱۹]. به طور کلی، آلتراسیون های همراه و اطراف کانه سازی این تیپ به خوبی مشخص نشده اند؛ ولی آلتراسیون های برش هیدروترمال، دولومیتی و کلسیتی شدن، سیلیسی شدن، و دیاژنز رس، میکا، فلدسپار و آلتراسیون تورمالینیتی [۱۶] گزارش شده است.

روش های مختلفی جهت تولید نقشه های شاهد وزن دار وجود دارد. روشی که در مطالعه حاضر به کار گرفته شده، روش منطق فازی لجیک می باشند که به نحو مطلوبی می تواند در شناسایی مناطق هدف مورد استفاده قرار گیرند [۱، ۷، ۸، ۹]. از این رو برای وزن دهی به لایه ها از «رابطه ۱» استفاده [۹، ۱۰، ۱۱]؛ و نقشه های فازی تولید شده است.

$$FWX=1/1+e-s(x-i) \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

FWX نقشه فازی شده، S شیب تابع، i نقطه عطف تابع، x نقشه مورد نظر و e عدد ثابت نپر تعریف شده است.

و مقادیر S و I از «رابطه ۲» بدست می آید [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۷].

$$S=9.2/(EVmax-EVmin) \qquad I=(EVmax+EVmin)/2 \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

EVmax بیشترین مقدار مشاهده ای و EVmin کمترین مقدار مشاهده ای است.

۱ ۴ -منطقه مورد مطالعه

نقشه چهارگوش زمین شناسی پل سفید در دو زون ساختاری قرار گرفته است؛ بدین صورت که نیمه شمالی منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی از قسمت شرقی زون خزر و نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی از قسمت میانی زون البرز واقع شده که مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است (شکل ۱). به طور کلی سنگ میزبان کانسارهای فلورین، سرب و روی در منطقه مورد مطالعه، آهک های دولومیتی بخش فوقانی سازند الیکا با سن تریاس میانی می باشد. البته در بعضی موارد بسیار اندک جایگزینی فلورین در سازند تیزکوه گزارش شده است [۲]. با توجه به بررسی های صورت گرفته روی خصوصیات برجسته معادن شناخته شده، مدل توصیفی ذخایر فلورین، سرب و روی منطقه مورد مطالعه به عنوان لیتولوژی سنگ میزبان بطور عمده دولوستون و سنگ آهک به ندرت در ماسه سنگ یافت است، دارای آلتراسیون های سیلیسی، کائولینیتی و آلونیتی، از نظر ساختاری تمرکز کانی سازی در دو نوع زون گسلی و عدسی و از نظر پاراژنزهای اصلی همراه عمدتاً شامل فلورین، باریت، گالن، آسفالریت، قابل تعریف است [۲].

۱ ۵ -مدل مورد بررسی

این مدل می تواند به عنوان الگویی برای تشخیص نواحی امید بخش و شناسایی اندیس های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این مدل برای شناسایی ذخایر جدید می توان از هر یک از این خصوصیات و دقت روی آن ها به عنوان یک معیار اکتشافی استفاده نمود [۱، ۳]. در واقع با تعریف مدل توصیفی، ابتدا کلیه معیارهای مناسب برای اکتشاف، در قالب یک مدل هدف و مفهومی تعریف گردید، سپس با جمع آوری اطلاعات و پردازش روی آن ها، محل هایی که دارای این ویژگی ها هستند، شناسایی می شوند.

در مرحله اول، سنگ میزبان این تیپ کانه سازی در منطقه مورد مطالعه شناسایی و نقشه وزن دار واحد های سنگی تولید و رسم گردید (شکل ۲ - A). در مرحله دوم، با توجه به این مطلب که همواره ساختارهای خطی و گسل ها، در هدایت محلوهای هیدروترمال تاثیر گذار می باشند؛ و همچنین در مدل توصیفی ذخایر تیپ هدف نیز حضور دارند؛ لذا چگالی حضور این ساختارها از پتانسیل بالای کانه زایی برخوردار می باشد، بنابراین در مطالعه حاضر از نقشه وزن دار چگالی گسل ها استفاده شده است (شکل ۲ - B). در مرحله سوم، مطالعه پراکندگی عناصر ردیاب و معرف کانه سازی، از طریق بررسی رسوبات آبراهه ای در مراحل کوچک مقیاس ناحیه ای بسیار مفید بوده و مورد استفاده قرار گرفت؛ در مطالعه

حاضر داده های حاصل از تجزیه نمونه های برداشت شده از رسوبات آبراهه ای توسط سازمان زمین شناسی استفاده شده؛ که با توجه به منطقه بندی ژئوشیمیایی، بهترین ترکیب از عناصر اصلی معرف کانه سازی تیپ هدف شامل فلورین (F)، روی (Zn) و سرب (Pb) می باشد [۱۶]؛ و نقشه وزن دار ژئوشیمیایی این عناصر تولید گردید (شکل ۲ - C)؛ و به عنوان نقشه شاهد ژئوشیمیایی در مدل پتانسیل معدنی استفاده گردید. لازم به ذکر است که در تولید مدل پتانسیل معدنی تیپ هدف، در منطقه مورد مطالعه از آلتراسیون ها استفاده نشده است؛ زیرا وسعت و گسترش آنها برای ذخایر منطقه، محدود و یا پنهان (در عمق و پوشیده) می باشد. لازم به ذکر است که مدل مورد استفاده برای مراحل مقدماتی بوده و می تواند با توجه به نوع کانه سازی مورد جستجو و همچنین با توجه به مرحله اکتشاف (شناسایی، پی جویی و...) و حتی نظر به نوع روش وزن دهی به شواهد تغییر کند. از شبکه استنتاج الگوهای شاهد، در مدل پتانسیل معدنی ذخایر تیپ هدف در ورقه چهارگوش پل سفید استفاده شد است.

۱ ۶ -تولید مدل پتانسیل معدنی

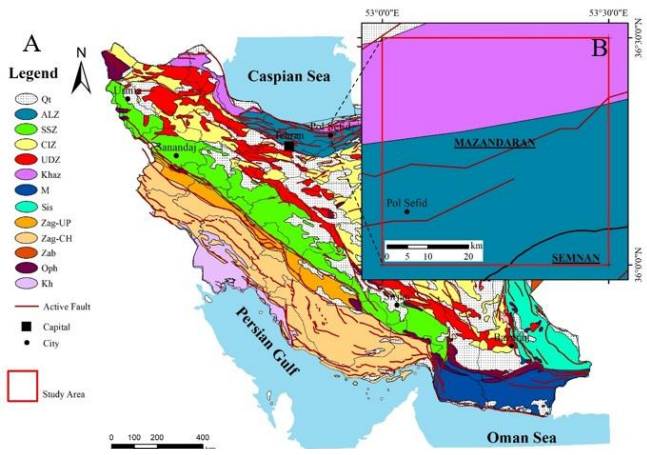
همانطور که بیان شد، مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عملگر ژئومتریک، تولید شده است [۱۳] (شکل ۲ - D).

۱ ۷ نتایج و بحث

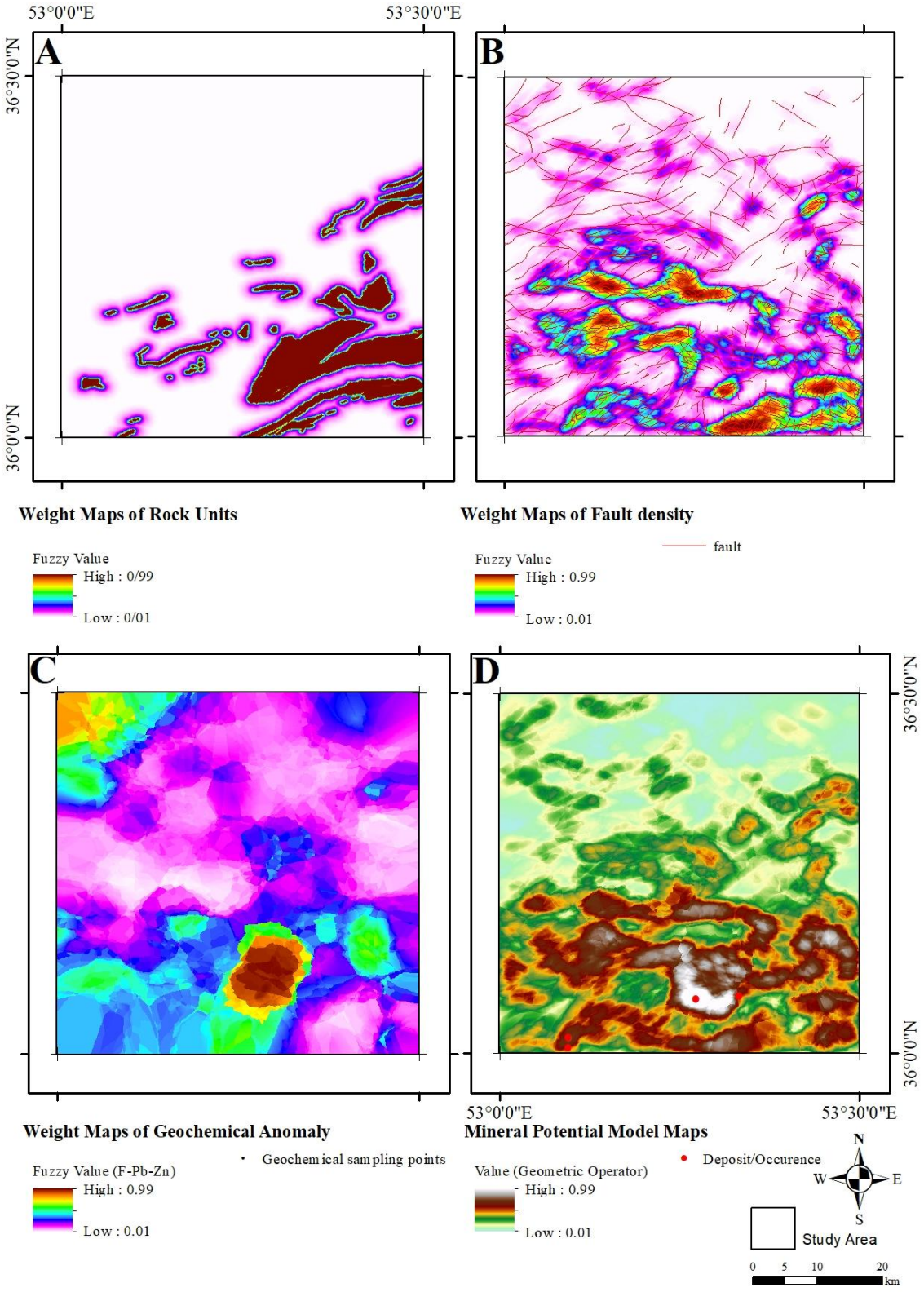
با توجه به مطالعات صورت گرفته در مقاله حاضر، با استفاده از شبکه استنتاج الگوهای شاهد، فرآیند عملیات اکتشاف کنترل و برنامه ریزی شد. به این منظور، با مطالعه بر روی ذخایر شناخته شده مورد اکتشاف، یک مدل توصیفی و مفهومی از ذخایر مورد جستجو به دست آمد. سپس الگوریتم فرآیند اکتشاف تهیه شد. با توجه به این که بعضی از روش های اکتشافی قادر به شناسایی تمام پارامترهای مدل هدف نیستند؛ و همچنین با نظر به اینکه به منظور شناسایی محل حضور برخی از پارامترها ممکن است از چند روش مختلف اکتشافی استفاده شود؛ باید به گونه ای عمل می شد که تمام محل های شناسایی شده از روش های مختلف اکتشافی مورد توجه قرار گیرند. بنابراین هر یک از نقشه های به دست آمده حاصل از تجزیه و تحلیل داده های ورودی که به منظور شناسایی محل حضور یک پارامتر خاص از مدل هدف هستند، مجدداً طبقه بندی شده و با سایر نقشه های هم نوع تلفیق شد، تا برای هر یک از معیارهای اکتشافی مدل هدف (به عنوان مثال گسل ها) تنها یک نقشه به صورت لایه جداگانه تولید شود. در نهایت با استفاده از وزن دهی به لایه های مختلف و تلفیق کلیه نقشه ها با استفاده از قوانین و عمل گرهای منطق فازی نقاطی که در آنها حضور کلیه معیارهای اکتشافی مدل هدف مورد تأیید است، به صورت مدل پتانسیل معدنی به دست می آید. مراحل فوق باید برای هر نوع ماده معدنی مورد پی جویی به طور جداگانه بررسی شده و برای آن الگوریتم شبکه استنتاج الگوهای پیش گو تهیه گردد تا تولید نواحی هدف با در نظر گرفتن کلیّه اختصاصات و ویژگی های موثر در کانه سازی به طور بهینه صورت گیرد.

۱ ۸ نتیجه گیری

به طور کلّی، با توجه به این مهم که وزن دهی به نقشه های شاهد باید از دقت بالایی جهت رسیدن به نتیجه مطلوب برخوردار باشند، مشاهده می شود که در نقشه نهایی (نقشه مدل پتانسیل معدنی (شکل ۲ قسمت D)) مناطق کانی سازی شناخته شده بطور مطلوبی پیش بینی شده است. با توجه به مطالب بیان شده می توان از مدل سازی پتانسیل معدنی و تولید نقشه های شاهد پیشگو به جهت پایین آوردن هزینه و زمان در جهت رسیدن به نتیجه مطلوب استفاده کرد. در نقشه مدل پتانسیل معدنی تولید شده مناطقی با ارزش بالا معرفی شده است که می توان از آن جهت اکتشافات بعدی استفاده شود.



شکل ۱: نقشه زون‌های ساختاری ایران با تغییرات براساس تقسیم بندی نوگل ساداتی (۱۹۶۲) و موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ (Qt: رسوبات عهد حاضر، ALZ: زون البرز، SSZ: زون سنندج-سیرجان، CIZ: زون ایران مرکزی، UDZ: زون ارومیه-دختر، Khaz: زون خزر، M: زون مکران، Sis: زون سیستان (زون شرق ایران)، Zag-Up: زاگرس رورانده، Zag-CH: زاگرس چین‌خورده، Zab: زون زابول، Oph: افیولیت، Kh: زون خوزستان.



شکل ۲: A: نقشه وزن دار واحد های سنگی، B: نقشه وزن دار چگالی گسل ها، C: نقشه وزن دار آنومالی ژئوشیمیایی عناصر سرب، روی و نقره، D: مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عمل گر ژئومتریک

مراجع

[۱] یوسفی، مهیار، کامکار روحانی، ابوالقاسم؛ اصول روشهای مدلسازی پتانسیل معدنی (در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی)، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیرکبیر، ۱، ۱، ۱۳۸۹.

[۲] حیاتی، سبهان؛ مطالعه خصوصیات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی کانه‌های نقره‌دار و کان‌سنگ آهن کانسار آهنگران،جنوب شرقی ملایر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی‌سینا، ۱۳۹۴.

[۳] یوسفی، مهیار، کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در اکتشاف سنگهای تزئینی، اولین کنفرانس مهندسی معدن. ایران. دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۸۳.

[4] Carranza, E.J.M., 2008, Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS, Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Vol. 11, Elsevier Amsterdam.

[5] Singer, D.A., 1993, “Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources”. Nonrenewable Resources, 2(2), p. 69-81.

[6] Hronsky, J.M.A., Groves, D.I., 2008, Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement. Australian Journal of Earth Sciences 55(1), p. 3-12.

[7] Bonham-Carter, G.F., 1994, Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling withGIS, Pergamon, Ontario.

[8] Harris, J.R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M.A., Ayer, J., Dahn, R., 2001, Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps – a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada. Natural Resources Research, 10(2), p. 91-124.

[9] Thiart, C., De Wit, M., 2000, Linking spatial statistics to GIS: exploring potential gold and tin models of Africa, South African Journal of Geology, 103(3-4), p. 215-230.

[10] Roberts, R.G., Sheahan, P., Cherry, (Eds.), M.E., 1988, Ore Deposit Models, Geoscience’s Canada Reprint Series 3, Geological Association of Canada, Newfoundland.

[11] Carlson, C.A., 1991, Spatial distribution of ore deposits, Geology, 19(2), p. 111-114.

[12] Carranza, E.J.M., Hale, M., 2002, Spatial association of mineral occurrences and curvilinear geological features, Mathematical Geology, 34(2), p. 199-217.

[13] Yousefi, M., Kamkar Rouhani, A. Carranza, E.J.M., 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping.J. Geochem. Explor.115, p. 24–35.

[14] Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A., Carranza, E.J.M., 2014. Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. Geochem.: Explor. Environ Anal. 14, p. 45–58.

[15] Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., Large, R.R., Garven, Grant, Allen, C.R., Gutzmer, Jens, and Walters, S., 2005b, Sediment-hosted lead-zinc deposits—A global perspective, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., Economic geology—One hundredth anniversary volume, 1905–2005: Littleton, Colo., Society of Economic Geologists, p. 561–607.

[16] Goodfellow, W.D., and Lydon, J.W., 2007, Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada—A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Survey of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, p. 163–184.

[17] Mahyar Yousefi, Emmanuel John M. Carranza; 2014, Fuzzification of continuous-value spatial evidence for mineral pro-spectivity mapping.

[18] Hannigan, P., 2007, Metallogeny of the Pine Point Mississippi Valley-Type zinc-lead district, southern Northwest Territories, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication no. 5, p. 609–632.

[19] Lydon, J.W., 2004a, Genetic models for Sullivan and other SEDEX deposits, in Deb, M., and Goodfellow, W.D., eds., Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits—Attributes and models of some major deposits in India, Australia and Canada: New Delhi, Narosa Publishing House, p. 149–190.