طراحی الگوریتم تولید مدل پتانسیل معدنی به منظور مدیریت بهینه عملیات اکتشاف، با نگرش ویژه به اکتشاف مقدماتی ذخایر طلا

مهیار یوسفی[1*]، رئوف غلامی[1]، ابوالقاسم کامکار روحانی[1] و علی مرادزاده[1]

[1]دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۱/ ۰۸/ ۱۳۸۸ تاریخ پذیرش: ۰۵/ ۰۳/ ۱۳۸۹

چکیده

در طراحی اکتشافات سیستماتیک و پی‌جویی ذخایر معدنی می‌توان با استفاده از مدل‌سازی ذخایر شناخته شده، الگوریتمی را طراحی نمود تا اجرای عملیات اکتشاف، تولید مدل پتانسیل معدنی و شناسایی نواحی هدف بر اساس مراحل ارائه شده در آن صورت گیرد. این مدل راهنمایی است که سبب شناسایی مناطق دارای بالاترین و بیشترین احتمال کانی‌سازی، افزایش احتمال موفقیت و کاهش ریسک اکتشاف می‌گردد. هدف از مقاله حاضر طراحی و ارائه یک الگوریتم به منظور دسترسی به مدل پتانسیل معدنی بهینه در عملیات اکتشاف با نگرش ویژه به اکتشاف ذخایر طلا و پلاسرهای حاصل از آنها می‌باشد. در این راستا پس از مدل‌سازی توصیفی ذخایر طلا و تعریف یک مدل مفهومی مناسب، همه مشخصاتی که می‌توانند به عنوان معیار اکتشافی مورد استفاده قرار گیرند، شناسایی و در قالب یک مدل هدف جمع‌آوری می‌شوند. سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل لایه‌های اطاعاتی مختلف، دسترسی به نقشه‌های شاهد و پیشگوی اکتشافی امکان‌پذیر می‌گردد. در مرحله بعد همه نقشه‌های دوتایی تلفیق می‌گردند تا مناطقی که در آنها همه معیارهای اکتشافی یکدیگر را تأیید می‌کنند، به صورت یک نقشه معرفی شوند. نقشه اخیر مدل پتانسیل معدنی طلا بوده که محل‌های احتمالی وقوع کانی‌سازی را به‌عنوان مناطق هدف نشان می‌دهد. در نهایت مراحل طراحی شده به‌صورت الگوریتمی ارائه می‌شود که در آن همه مراحل و روش‌های اکتشافی قابل استفاده به صورت برنامه‌ریزی شده و به‌ترتیب الویت آمده است.

کلیدواژه‌ها: طراحی الگوریتم اکتشاف، برنامه‌ریزی، مدل مفهومی، مدل پتانسیل معدنی، ذخایر طلا، منطق بولی.

***نویسنده مسئول:** مهیار یوسفی

E-mail: M.Yousefi.Eng@gmail.com

۱- مقدمه

به‌طور کلی اکتشاف فرایندی مرحله‌ای است که در محدوده گسترده و در مقیاس کوچک شروع و پس از کسب نتیجه در هر مرحله و تعیین مناطق امیدبخش، عملیات مراحل بعدی که تفصیلی‌تر هستند بر روی مناطق امیدبخش به‌دست آمده از مراحل پیشین متمرکز می‌شود. در هر مرحله از اکتشاف، با توجه به نوع ماده معدنی مورد پی جویی، ممکن است از روش‌ها و معیارهای مختلف اکتشافی مانند مطالعات زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ... استفاده شود. بنابراین، اگر روش‌ها و معیارهای اکتشافی مورد استفاده در هر مرحله به‌طور بهینه انتخاب شوند، مناطق امیدبخش نیز به‌طور بهینه به‌دست خواهند آمد. در این راستا اگر در شروع عملیات اکتشافی، برنامه مدونی از مراحل اکتشاف و روش‌های قابل استفاده تهیه شود، در هدفمند و سیستماتیک کردن عملیات اکتشافی، کاهش ریسک و بهینه‌سازی زمان و هزینه تأثیر بسزایی دارد. بنابراین باید در شروع عملیات اکتشافی، طراحی و برنامه‌ریزی اکتشافی صورت گیرد تا مراحل و روش‌های مورد استفاده مشخص شود. در این راستا با به‌کارگیری انواع داده‌ها و نقشه‌هایی که در دسترس هستند و استفاده از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، می‌توان طرحی را ارائه داد که با استفاده از آن بتوان مناطق پتانسیل‌دار را در قالب مدل پتانسیل معدنی پیش‌بینی کرد. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی وجود دارد که در هر یک از آنها با استفاده از شیوه‌های متفاوت، الگوهای پیش‌گو از میان مجموعه داده‌های فضایی استخراج و پس از تولید نقشه‌های شاهد، با استفاده از روابط مختلفی تلفیق می‌شوند. مسئله‌ای که وجود دارد این است که نحوه استخراج الگوها در مورد هر ماده معدنی متفاوت است زیرا ویژگی‌های کانی‌سازی‌های انواع (تیپ) مختلف با یکدیگر متفاوت است. بنابراین لازم است با تعریف یک مدل مفهومی مناسب از ذخیره مورد پی‌جویی، امکان نتیجه‌گیری (استنتاج) بهینه الگوهای پیش‌گو را فراهم کرد (Carranza, 2008) و با ساخت یک شبکه نتیجه‌گیری الگوها (Inference network) به‌صورت یک الگوریتم، تولید مدل پتانسیل معدنی را بهینه کرد. این الگوریتم باید برای هر ماده معدنی ویژه و مورد جستجو، به‌طور جداگانه و پس از تعریف مدل مفهومی مناسب (Carranza, 2008) طراحی شود. در این راستا، هدف از این پژوهش طراحی و ارائه یک الگوریتم برای دسترسی به مدل پتانسیل معدنی بهینه در اکتشاف و تولید نواحی هدف (Target generation) با نگرش ویژه به اکتشاف ذخایر طلا و پلاسرهای حاصل از آنها است. به این منظور، ابتدا مدل مفهومی (Conceptual model) و توصیفی از ذخایر مورد پی‌جویی به‌عنوان مدل هدف طراحی و پس از جمع‌آوری اطلاعات برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی و تولید نواحی هدف، تجزیه و تحلیل‌های لازم روی آنها بررسی و در پایان به‌عنوان یک روش جدید، الگوریتم و شبکه نتیجه‌گیری قابل استفاده برای اکتشاف مقدماتی طلا ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی پتانسیل معدنی

در فعالیت‌های اکتشاف ذخایر معدنی، شناسایی مناطق هدف، یکی از مراحل مهم است. این شناسایی بیشتر با استفاده از مدل‌سازی پتانسیل معدنی صورت می‌گیرد مدل‌سازی پتانسیل معدنی، یافتن مکان‌ها یا مناطقی است که یک سری معیارها و ملاک‌ها برای حضور ذخیره در آنها صدق کند. شناسایی هدف مرحله‌ای است که در آن مناطقی شناسایی می‌شوند که باید برای مطالعات اکتشافی بیشتر و تفصیلی‌تر با استفاده از روش‌های اکتشافی، مورد جستجو قرار گیرند. این مناطق در واقع بخش یا سطحی کوچک‌تر از ناحیه انتخاب شده اولیه هستند. عملیات اکتشافی در این مناطق برای کشف کانی‌سازی‌های جدید، بر اساس مدل‌های اکتشافی ذخایر مورد جستجو و داده‌های مناسب مانند زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ... صورت می‌گیرد. این مدل‌سازی بر اساس شناخت از ذخیره و محیط آن در نزدیک سطح زمین و در مکان‌هایی که فرایندهای زمین‌شناسی و ساختاری برای کانی‌سازی مناسب هستند، صورت می‌گیرد (Singer, 1993). در

مدل‌سازی پتانسیل معدنی، شناسایی و تولید مناطقی که باید به‌عنوان هدف مورد توجه قرار گیرند، شامل جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و تلفیق انواع داده‌های مرتبط و مناسب است که برای استخراج و نتیجه‌گیری بخش‌هایی از داده‌های فضایی الگو و شاهد کانی‌سازی، یعنی الگوهای زمین‌شناسی، بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی و یا ژئوفیزیکی همراه با ذخایر مورد پی‌جویی و ... صورت می‌گیرد. از آنجایی که تمام بی‌هنجاری‌های به‌دست آمده حاصل از هر یک از روش‌های اکتشافی، همراه و یا معرف کانی‌سازی نیستند، باید با مدل‌سازی و تلفیق چنین بی‌هنجاری‌هایی که حاصل نتایج روش‌های مختلف اکتشافی هستند، برای تأیید مناطق هدف استفاده شود. فرایند تجزیه و تحلیل و استخراج الگوهای پیش‌گو و همچنین ترکیب و تلفیق داده‌های فضایی که برای شناسایی مناطق هدف و رتبه‌بندی این مناطق در اکتشاف کانی‌سازی‌های ناشناخته صورت می‌گیرد، مدل‌سازی پتانسیل معدنی نامیده می‌شود (Carranza, 2008; Hronsky & Groves, 2008). خروجی مدل پتانسیل معدنی، نقشه‌ای خواهد بود که در آن، محل حضور احتمالی ذخایر شناخته نشده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است. این مدل پیش‌بینی، بر اساس وابستگی‌های میان متغیرهای پیشگویی‌کننده که می‌توانند الگوهای وابسته به متغیرهای هدف یعنی کانی‌سازی را آشکار کنند، بنا شده است (Carranza, 2008). بنابراین، با تولید مدل پتانسیل معدنی، حضور یا نبود یک کانی‌سازی در یک محل، به‌طور غیر مستقیم از روش یافتن ارتباط میان این کانی‌سازی با الگوهای شاهد و ویژگی‌های قابل اندازه‌گیری متغیرهای پیش‌گوی اکتشافی (زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ...) قابل ارزیابی است. در مدل‌های پتانسیل معدنی و شناسایی مناطق هدف، دو موضوع مهم زیر باید در نظر گرفته شود: الف) اگر در یک محل خاص، شواهد و ویژگی‌های مشابه یک نوع از اندیس‌های معدنی شناخته شده (از نوع ذخایر مورد پی‌جویی) وجود داشته باشد این محل در آینده برای اکتشافات بیشتر مورد توجه خواهد بود و ب) اگر در یک محل الگوهای پیش‌گو و شواهد مهم‌تر، بیشتر از محل‌های دیگر حضور دارد، احتمال حضور کانی‌سازی در آن محل بیش از دیگر نقاط است (Carranza, 2008). در هر بار مدل‌سازی، پیش‌بینی پتانسیل معدنی باید فقط برای یک نوع ذخیره معدنی صورت گیرد (Carranza, 2008). بنابراین، برای نمونه، مدل پیش‌بینی طلا، قابل استفاده برای راهنمایی در اکتشاف ذخایر مس پورفیری نیست و برعکس. مدل‌سازی پتانسیل معدنی پیرو تعیین و تعریف یک مدل توصیفی و مفهومی از ذخایر مورد پی‌جویی صورت می‌گیرد. در شکل ۱ فرایند تهیه مدل پتانسیل معدنی ارائه شده است.

چنین مدلی بیش از این که پیش‌گو باشد یک الگوریتم و مدل پیشنهادی و تجویزی (Prescriptive) است که با استفاده از کلمات و شکل‌هایی، وابستگی‌های میان فرایندهای زمین‌شناسی مختلف و یا کنترل کننده‌های کانی‌سازی را با مکان‌هایی که احتمال حضور ذخایر مورد پی‌جویی در آنجا بالاست، نشان می‌دهد (Carranza, 2008). تعریف یک مدل مفهومی برای یک نوع ذخیره مورد پی‌جویی به بررسی و مطالعه انواع مختلف فرایندهای زمین‌شناسی و مدل‌های ذخایر کشف شده هم‌نوع و همچنین محیط‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای مربوط به آنها، که تشریح‌کننده ویژگی‌های زمین‌شناسی یک نوع کانی‌سازی خاص (مورد پی‌جویی) هستند، نیاز دارد (Roberts et al., 1988; Berger & Drew, 2002). در طراحی مدل مفهومی با توجه به این که وقوع تعداد زیادی از ذخایر معدنی (نه تمام آنها) وابسته به زمین‌ساخت صفحه‌ای است (Pirajno, 1992; Robb, 2004)، مطالعه مجموعه‌های ساختاری و زمین‌ساختی ناحیه مورد مطالعه، ضروری و لازم الاجراست. افزون بر این، مطالعه و بازبینی یافته‌ها درباره سامانه‌های زمین‌شناسی معین (گسل‌ها و سیماهای زمین‌شناسی) که می‌توانند به‌عنوان کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی وابسته به نواحی هدف مطرح باشند؛ تجزیه و تحلیل پراگندگی فضایی ذخایر معدنی هم‌نوع ذخایر مورد جستجو (Carlson, 1991; Vearncombe & Vearncombe, 1999) و همچنین تحلیل همراهی و وابستگی فضایی میان ذخایر مورد پی‌جویی و ساختارهای زمین‌شناسی مشخص همچون گسل‌ها و سنگ میزبان (Bonham-Carter, 1985; Carranza & Hale, 2002b) نیز مفید است. بنابراین مشخصات زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی نواحی که شامل ذخایر هم‌نوع ذخایر مورد پی‌جویی هستند، اساس شناسایی و تعیین معیارهای اکتشافی مناسب هستند. مدل مفهومی ذخایر مورد پی‌جویی و شناسایی معیارهای اکتشافی مناسب برای پی‌جویی، اساس تهیه مدل‌های پتانسیل معدنی خواهد بود. نقشه‌برداری، برداشت و شناسایی الگوهای شاهد مثل دگرسانی گرمابی مربوط به ذخایر معدنی معین می‌توانند از راه برداشت‌های صحرایی و یا پردازش تصاویر ماهواره‌ای تعیین شوند (Spatz, 1997; Sabins, 1999; Carranza & Hale, 2002a). نقشه‌برداری الگوها و ساختارهای زمین‌شناسی مانند گسل‌ها و توده‌های نفوذی که پتانسیل‌دار هستند و می‌توانند به‌عنوان شاهد مطرح باشند و همچنین ساختارها و کنترل‌کننده‌های منابع گرمایی ذخایر معدنی مشخص، می‌توانند از راه مطالعات و بررسی‌های صحرایی و تحلیل و تفسیر مجموعه داده‌های ژئوفیزیکی و اعمال فیلترهای مناسب به‌دست آیند (Telford et al., 1990; Parasnis, 1997; Kearey et al., 2002). بنابراین، داده‌های فضایی مربوط به زمین‌شناسی و اکتشاف و همچنین نقشه‌های نشان‌دهنده شواهد و الگوهای اکتشافی از جمله ژئوشیمی، ژئوفیزیک، زمین‌شناسی، سنجش از دور و ... برای ارائه و نمایش یک معیار شناسایی مناسب و قابل استفاده در تهیه مدل پتانسیل معدنی، نیاز به اعمال یک سری اصلاحات و تبدیل شدن، دارند. این اصلاحات، تغییرات و تبدیل شدن، با استفاده از یک یا چند نوع عملگر مربوط به نقشه (Carranza, 2008) و همچنین با توجه به نوع معیارهای شناسایی انتخاب شده برای اکتشاف (با استفاده از تعریف مدل مفهومی)، روی داده‌ها انجام می‌شود. انواع روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی وجود دارد که در آنها روش نتیجه‌گیری الگوهای پیش‌گو از نقشه‌های شاهد و همچنین نوع روش تلفیق با هم متفاوت هستند. یکی از روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی که در مطالعه حاضر به‌کار گرفته شده، روش منطق بولی (Boolean logic) است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۳- روش منطق بولی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی

منطق بولی روشی است که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، به‌صورت مطلوبی می‌تواند در شناسایی مناطق هدف مورد استفاده قرار گیرد (Bonham-Carter, 1994 ;Thiart & De Wit, 2000; Harris et al., 2001). از نمونه‌های دیگری در این زمینه می‌توان تولید نواحی هدف برای اکتشاف فلورین در جنوب استان مازندران (یوسفی و همکاران، ۱۳۸۸) و طراحی الگوریتم اکتشاف سنگ‌های ساختمانی (یوسفی، ۱۳۸۳) را بیان کرد که در آنها، در تلفیق نقشه‌های شاهد از منطق بولی استفاده شده است. در این روش، ویژگی‌ها و یا بخش‌هایی (الگوها و کلاس‌هایی) از داده‌های فضایی که با یک معیار شناسایی مناسب همخوانی دارند (شرط حضور یک معیار اکتشافی در آن‌ها صدق می‌کند) با ارزش درست و بیشتر با امتیاز ۱ طبقه‌بندی و ذخیره می‌شوند. در غیر این صورت، با امتیاز ۰ و به معنی ارزش نادرست ذخیره می‌شوند. بنابراین، یک نقشه شاهد بولی فقط شامل دو الگو (کلاس) طبقه‌بندی شده با ارزش‌های ۰ به معنی نادرستی و ۱ به معنی درستی است (Carranza, 2008). نقشه‌های شاهد بولی مرحله به مرحله با استفاده از عملگرهای منطقی با هم ترکیب می‌شوند هر یک از نقشه‌های شاهد بولی در واقع به‌عنوان یک شرط، بازتابی از حضور یا نبود فرایندهای کنترل‌کننده کانی‌سازی و ارتباط میان آنها و الگوهای فضایی را در اختیار می‌گذارند. در هر مرحله، دست‌کم دو نقشه شاهد بولی با هم ترکیب می‌شوند و یک وابستگی میان دو مجموعه از فرایندهای کنترل‌کننده وقوع کانی‌سازی و الگوهای فضایی دلالت‌کننده حضور کانی‌سازی

را به نمایش می‌گذارند. در هر یک از مراحل مختلف ترکیب نقشه‌های شاهد بولی ممکن است از عملگرهای مختلفی به‌صورت عملگر AND (Intersection یا اشتراک) و OR (Union یا اجتماع) استفاده شود (Carranza, 2008). در جدول ۱ ترکیب‌های منطقی بولی با استفاده از عمل‌گرهای AND و OR نشان داده شده است.

عملگر AND وقتی استفاده می‌شود که دست‌کم باید دو مجموعه از شواهد فضایی با هم و همزمان برای به اثبات رسیدن هدف، حضور داشته باشند. عملگر OR وقتی استفاده می‌شود که دست کم یکی از دو گروه شواهد فضایی برای به اثبات رسیدن هدف کافی است. افزون بر دو عملگر بالا، عملگرهای دیگری نیز در منطق بولی وجود دارند که کمتر در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده شده‌اند (Carranza, 2008). خروجی ترکیب نقشه‌های شاهد با استفاده از منطق بولی، نقشه‌ای با دو کلاس است. یک کلاس نشان‌دهنده محل‌هایی است که تمام یا بیشتر معیارهای شناسایی در آن حضور دارند و کلاس دیگر نشان‌دهنده نقاطی است که در آنها معیارهای شناسایی حضور ندارند. در شکل ۲ یک نمونه از نقشه خروجی و نهایی مدل پتانسیل معدنی حاصل از ترکیب نقشه‌های شاهد به‌وسیله عملگرهای بولی برای اکتشاف فلورین (یوسفی و همکاران، ۱۳۸۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود این نقشه یک نقشه دوتایی و فقط شامل دو بخش با کد ۱ به معنی مناطق امیدبخش هدف و کد ۰ به معنی نواحی غیر امیدبخش است.

۴- لزوم طراحی الگوریتم عملیات اکتشافی، برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرایند اکتشاف

با توجه به این که داده‌های فضایی اکتشافی مختلف، دارای بخش‌های با ارزش متفاوت هستند که ممکن است همه آنها برای اکتشاف یک ماده معدنی خاص دارای ارزش یکسان نباشند، لازم است الگوهای شاهد کانی‌سازی مورد جستجو، از میان مجموعه داده‌های فضایی استخراج شود. نتیجه‌گیری بهترین الگوهای شاهد با استفاده از ارزش‌گذاری کلیه الگوها صورت می‌گیرد. بنابراین، ارزش‌گذاری بخش‌های مختلف یک نقشه برای جداسازی و نمایش شواهد با ارزش متفاوت (یا طبقه‌بندی) و همچنین تعیین میزان اهمیت حضور هر معیار اکتشافی، در هر موقعیت مکانی و برای هر نوع کانی‌سازی مشخص مورد جستجو، برای استفاده در مدل‌سازی مسئله ضروری است (Carranza, 2008). در این حالت تخلیص وزن، بر اساس میزان همراهی فضایی ذخایر معدنی هم‌نوع ذخایر مورد پی‌جویی با معیارهای اکتشافی صورت می‌گیرد (Bonham-Carter, 1994). الگوریتم عملیات اکتشافی مدلی است که به‌عنوان یک فیلتر اقتصادی، هزینه و زمان را کاهش می‌دهد. این الگوریتم قادر است با مدل‌سازی پتانسیل معدنی، مناطق هدف اکتشاف را شناسایی، نواحی با بیشترین احتمال حضور کانی‌سازی را معرفی و احتمال موفقیت اکتشاف را افزایش و ریسک را کاهش دهد (یوسفی، ۱۳۸۳). اجرای چنین طرحی برای بهینه‌سازی و مدیریت عملیات اکتشاف مؤثر است و ارائه یک مدل مناسب می‌تواند محدوده هدف اکتشاف را به‌صورت مطلوبی کاهش دهد. در پژوهش حاضر، این الگوریتم برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر طلا طراحی شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

۵- روش مطالعه

در این پژوهش، ابتدا با توجه به نوع ذخیره مورد پی‌جویی، کلیه معیارهای مناسب برای اکتشاف، در قالب یک مدل هدف و مفهومی تعریف می‌شود. سپس با جمع‌آوری اطلاعات و تجزیه و تحلیل‌های لازم، هر یک از متغیرهای مدل هدف جستجو و موقعیت هر یک از آنها به‌صورت یک نقشه، پیش‌بینی می‌شود. سپس با تلفیق همه نقشه‌ها، با استفاده از عملگرهای منطق بولی، محل‌هایی که در آنها کلیه معیارهای مدل هدف یکدیگر را تأیید می‌کنند، معرفی می‌شوند. در پایان، الگوریتم تهیه مدل پتانسیل معدنی و تولید نواحی هدف اکتشاف مقدماتی و سیستماتیک ذخایر طلا و پلاسرهای حاصل از آن ارائه شده است.

۶- انتخاب هدف و تعریف مدل مفهومی

برای شناسایی ذخایر طلا و پلاسرهای حاصل از آنها باید ابتدا محل‌های حضور واحدهای زمین‌شناسی و سنگ میزبان مناسب کانی‌سازی طلا شناسایی و سپس پلاسرهای در ارتباط با این ذخایر جستجو شوند. بنابراین باید ابتدا مدلی از ذخیره مورد پی‌جویی تهیه شود (یوسفی، ۱۳۸۳؛ Carranza, 2008) یعنی باید مشخص شود که چه ویژگی‌هایی مد نظر است تا بر اساس آن به جستجو پرداخته شود. در واقع با تعریف مدل هدف، ویژگی‌هایی را که یک منطقه باید داشته باشد تا جزو نواحی امیدبخش طبقه‌بندی شود، به‌صورت یک مدل مفهومی به‌دست می‌آید (Carranza, 2008). سپس با جمع‌آوری اطلاعات و پردازش روی آنها محل‌هایی که این ویژگی‌ها را دارند، شناسایی می‌شوند. با توجه به این که هدف این پژوهش شناسایی ذخایر طلا و پلاسرهای حاصل از آنها است، ابتدا باید سنگ منشأ و میزبان مناسب و پتانسیل‌دار، شناسایی و سپس پلاسرهایی جستجو شوند که از این واحدها منشأ می‌گیرند. بنابراین، می‌توان در مدل هدف دو بخش را به‌صورت زیر در نظر گرفت:

۶-۱. شناسایی مناطق مناسب و پتانسیل‌دار کانی‌سازی طلا

به‌طور کلی بیشتر ذخایر طلا، سنگ میزبان و یا سنگ منشأ آذرین اسیدی تا نیمه اسیدی (حد واسط) دارند (Muller & Groves, 1997). از دیگر سنگ‌های طلادار می‌توان شیست‌های سبز را نام برد. افزون بر این، در سنگ میزبان بیشتر ذخایر طلا دگرسانی‌های آلبیتی،آلونیتی و دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی،کربناتی، سریسیت) دیده می‌شود (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۴؛ Macdonald, 2007; Pirajno, 2009). برخی از انواع ذخایر طلا در مناطق گسلی و برشی یافت می‌شوند. بنابراین شناسایی واحدهای سنگی مناسب، دگرسانی‌ها و نیز مناطق گسلی مفید است. با توجه به ویژگی‌های بالا در مطالعه حاضر ذخیره‌ای مد نظر است که ویژگی‌های زیر را داشته باشد: ۱) سنگ میزبان و منشأ از نوع آذرین اسیدی تا حدواسط و شیست‌های سبز. ۲) دارای دگرسانی آلبیتی،آلونیتی و دگرسانی پروپیلیتیک (کلریتی،کربناتی، سریسیتی. ۳) مناطق گسلی.

۶-۲. شناسایی محل پلاسرها

پلاسرها ذخایری هستند که در مکان‌های خاصی تجمع می‌یابند. این مناطق شامل مناطق کوهپایه‌ای، رسوبات آبراهه‌ای، رسوبات دلتایی، سواحل دریاها و مناطق صحرایی است. شناسایی این مناطق می‌تواند در اکتشاف ذخایر پلاسری مفید باشد. پلاسرها از نظر منبع طلا، اورانیم، توریم، زیرکن، تیتانیم و به‌طور کلی کانی‌های سنگین و عناصر مقاوم، مهم هستند (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۴). این رسوبات برای اکتشاف طلا مورد توجه قرار دارند. افزون بر این از نظر الماس، روتیل، ایلمنیت، قلع و... با اهمیت هستند. بنابراین شناسایی محل حضور انواع پلاسرها نیز به‌عنوان هدف دوم مطرح است.

۷ - جمع‌آوری اطلاعات

پس از تعریف مدل توصیفی و مفهومی ایده‌آل و انتخاب متغیرهای مهم و مؤثر، برای رسیدن به اهداف، نیاز به‌جمع‌آوری اطلاعات مربوط به‌متغیرهای مدل هدف است (یوسفی، ۱۳۸۳). برای شناسایی محل حضور معیارهای اکتشافی تعریف شده در مدل هدف باید از نقشه‌های توپوگرافی، تصویر ماهواره‌ای، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی هوایی، نقشه زمین‌شناسی و نقشه‌های محتوی بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای استفاده کرد.

۸- تجزیه و تحلیل اطلاعات جمع آوری شده

پس از تعیین و انتخاب متغیرهای توصیفی مدل هدف، در واقع تعیین مدل مفهومی و سپس جمع آوری داده‌های مناسب، باید تجزیه و تحلیل‌های لازم صورت گیرد. بدین منظور پس از ساماندهی داده‌های ورودی و تهیه و ساخت یک بانک اطلاعاتی رقومی از داده‌های جمع‌آوری شده، پردازش‌های لازم روی آنها انجام می‌شود و برای هر یک از معیارهای مدل هدف، نقشه جداگانه‌ای به‌صورت دوتایی تهیه می‌شود. با توجه به مدل مفهومی هدف و ویژگی‌های توصیفی تعریف شده، ممکن است از روش‌های مختلف اکتشافی با توجه به نوع ماده معدنی مورد پی‌جویی استفاده شود. البته با توجه به این‌که هدف این پژوهش، اکتشاف سنگ میزبان ذخایر طلا و پلاسرهای طلا دار حاصل از این سنگ‌هاست، تجزیه و تحلیل‌های لازم صورت گرفته است. این روش قابل تعمیم برای دیگر مواد معدنی است. البته با توجه به نوع ماده معدنی باید تغییرات لازم انجام شود.

۸-۱. تجزیه و تحلیل نقشه زمین‌شناسی

در مراحل اولیه اکتشاف با توجه به مقدماتی بودن عملیات، بیشتر از نقشه‌های زمین‌شناسی کوچک مقیاس استفاده می‌شود. روی این نقشه‌ها، واحدهای مختلف زمین‌شناسی تفکیک‌شده و محل عوارض خطی مانند گسل‌ها نیز مشخص شده است. با توجه به این که در مدل مفهومی تعریف شده برای ذخایر طلا هر دو مورد بالا جزو مواردی است که باید مورد جستجو قرار گیرد، یکی از اطلاعات لازم، نقشه زمین‌شناسی است. البته با توجه به این که نقشه‌های کوچک مقیاس در بسیاری از موارد نمی‌توانند در جداسازی واحدها و میزان گسترش هر یک از آنها و نیز شناسایی گسل‌ها به اندازه کافی مفید باشند همان‌گونه که در بخش‌های بعدی تشریح شده است، به‌منظور بررسی دقیق‌تر و کامل‌تر از دیگر اطلاعات و روش‌های اکتشافی مانند سنجش از دور و پردازش تصاویر ماهواره‌ای و نقشه مغناطیس هوایی در به نقشه در آوردن مناطق مورد نظر و دسترسی به اطلاعات تکمیلی‌تر استفاده می‌شود. با مطالعه نقشه زمین‌شناسی دو نقشه می‌توان تهیه کرد. اول نقشه نشان‌دهنده واحدهای میزبان کانی‌سازی یعنی سنگ میزبان و منشأ مناسب که در آن سنگ‌های میزبان مناسب و پتانسیل‌دار برای کانی‌سازی طلا مشخص و جدا شده‌اند. دوم نقشه پراکندگی گسل‌ها که می‌تواند به‌عنوان معیاری برای کانی‌سازی رگه‌ای، برشی و خرد شده پذیرفته شود.

۸-۲. تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای

با توجه به مدل توصیفی، هدف مناطق با دگرسانی و گسل‌خورده و همچنین مناطق با سنگ میزبان مناسب (تعریف شده در مدل مفهومی) می‌توانند به‌عنوان محل‌های با ارزش اکتشافی بیشتر مورد توجه قرار گیرند. تصویر ماهواره‌ای، یکی از اطلاعاتی است که با مطالعه روی آن و انجام پردازش‌های لازم می‌توان مناطق با دگرسانی، محل گسل‌ها و همچنین نوع واحدهای سنگی و مناطق با رسوبات و پلاسرها را شناسایی کرد. بنابراین تصویر ماهواره‌ای با قدرت جدایش طیفی و مکانی مناسب از منطقه مورد مطالعه نیز باید به‌عنوان یکی از داده‌های ورودی مورد توجه قرار گیرد. با پردازش‌های لازم بر روی تصاویر ماهواره‌ای می‌توان نقشه‌هایی تولید کرد که در هر یک از آنها یکی از متغیرهای مدل هدف مورد جستجو قرار گیرد. این نقشه‌ها شامل نقشه دگرسانی های پروپیلیتی، آلبیتی و آلونیتی، نقشه گسل‌ها، نقشه واحدهای مناسب سنگی شامل گرانیت، گرانولیت، گرانودیوریت، گنیس و... و همچنین نقشه مناطق پلاسری (دارای پتانسیل برای تجمع کانسارهای پلاسری) هستند.

۸-۳. تجزیه و تحلیل نقشه توپوگرافی

با توجه به مدل به‌دست آمده در مرحله تعریف مدل مفهومی، شناسایی محل پلاسرها یکی از اهداف است. بنابراین، یکی از انواع داده‌های ورودی، نقشه توپوگرافی است. با استفاده از نقشه توپوگرافی و تهیه مدل ارتفاعی رقومی می‌توان انواع مناطق پلاسری را با توجه به نوع ریخت‌سنجی خاص خود جدا کرد.

۸-۴. تجزیه و تحلیل نقشه شدت کل میدان مغناطیسی

با توجه به این که بیشتر ذخایر طلا همراه توده‌ها و مواد مغناطیسی هستند و واحدهای سنگی میزبان مناسب در مدل هدف نیز جزو همین گروه محسوب می‌شوند با استفاده از پردازش نقشه‌های حاصل از برداشت‌های مغناطیس هوایی و اعمال فیلترهای مناسب مانند مشتق اول و دوم میدان مغناطیسی، گسترش به‌سوی پایین و ... می‌توان توده‌ها و مواد مغناطیسی نزدیک به سطح و نیز مناطق گسلی را شناسایی و نقشه‌ای تولید کرد که در آن محل توده‌های نفوذی و سنگ‌های آذرین به‌عنوان منشأ ذخایر طلا، مشخص شوند.

۸-۵. تجزیه و تحلیل نقشه بی‌هنجاری‌های ژئوشیمیایی

در مراحل اولیه اکتشاف در مناطق با گسترش زیاد، استفاده از اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات رودخانه‌ای یکی از روش‌های مؤثر در شناسایی مناطق با پتانسیل و هدف، به‌منظور متمرکز شدن در مراحل تفصیلی است (حسنی پاک، ۱۳۸۳). در این روش با شناسایی مناطق ناهنجار پراکندگی عناصر مورد اکتشاف و یا ردیاب‌های آنها می‌توان دگرسانی‌ها، هاله‌های پراکندگی و حتی رخنمون‌ها را شناسایی کرد. در این روش به طور معمول تعداد زیادی از عناصر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. اما چون هدف این پژوهش، جستجوی ذخایر طلا است، عناصر ردیاب و معرف طلا شامل Au، Ag، As، Sb، Bi، Hg، S، Te و ... مورد تجزیه و تحلیل و استفاده قرار می‌گیرند (حسنی پاک، ۱۳۸۳) تا با استفاده از این عناصر، وضعیت بالادست آبراهه‌ها از نظر میزان پتانسیل کانی‌سازی مشخص شود. بنابراین سنگ‌های بالادست نمونه‌های با بی‌هنجاری عناصر معرف و ردیاب طلا رقومی شوند و واحدها و مناطق مناسب و با پتانسیل احتمالی کانی‌سازی با استفاده از این نقشه‌ها به‌دست می‌آیند.

۸-۶. استفاده از ترکیب منطقی OR و تولید نقشه‌های دوتایی

در شناسایی محل حضور برخی از معیارها ممکن است از چند روش مختلف اکتشافی استفاده شود و همچنین نظر به این که بعضی از روش‌های اکتشافی قادر به شناسایی تمام متغیرهای مدل هدف نیستند، لازم است که تمام محل‌های شناسایی شده از روش‌های مختلف مورد توجه قرار گیرند و مناطق مشترک نیز یکی شوند. بنابراین هر یک از نقشه‌های به‌دست آمده حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی که به‌منظور شناسایی محل حضور یک متغیر خاص استفاده می‌شود، دوباره طبقه‌بندی می‌شود و با استفاده از ترکیب منطقی OR (جدول ۱) با دیگر نقشه‌های هم‌نوع (از نظر نوع معیار اکتشافی) تلفیق می‌شود تا یک نقشه به‌صورت دوتایی تولید شود (Carranza, 2008). در این نقشه دوتایی، مناطق حضور هر یک از متغیرهای مدل هدف که برای اکتشاف مراحل بعدی مناسب هستند با کد ۱ و دیگر مناطق با کد ۰ ذخیره می‌شوند. برای به‌دست آوردن نقشه دوتایی مناطق گسلی، کلیه نقشه‌های گسل‌های حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های مغناطیس هوایی، نقشه زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای با ترکیب OR تلفیق می‌شوند، تا نقشه دوتایی تولید شود که در آن مناطق گسلی با کد ۱ و دیگر مناطق با کد ۰ ذخیره شوند. البته منظور از مناطق گسلی، نواحی هستند که در فاصله مناسبی از گسل‌ها قرار دارند این فاصله مناسب باید طی یک مرحله مطالعه تعیین شود. کلیه نقشه‌های دگرسانی‌های پروپیلیتی، آلبیتی و آلونیتی که از پردازش تصاویر ماهواره‌ای به‌دست می‌آیند با ترکیب OR تلفیق می‌شوند تا نقشه‌ای حاصل شود که با کد ۱ برای کلیه مناطق دگرسانی و کد ۰ برای دیگر مناطق باشد. برای تهیه نقشه دوتایی پلاسرها، دو نقشه پلاسرهای حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و همچنین نقشه توپوگرافی و مدل ارتفاعی رقومی، با ترکیب منطقی OR تلفیق شده تا نقشه‌ای به‌دست آید که در آن کلیه مناطق پلاسری با کد ۱ و دیگر مناطق با کد ۰ ذخیره شده‌اند. برای تهیه نقشه دوتایی سنگ میزبان کانی‌سازی چهار نقشه حاصل از پردازش نقشه زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه شدت کل میدان مغناطیسی و مطالعات ژئوشیمیایی آبراهه‌ای با

استفاده از عملگر منطقی OR تلفیق شده تا نقشه‌ای به‌دست آید که در آن کلیه مناطق با سنگ میزبان مناسب با کد ۱ و دیگر مناطق با کد ۰ ذخیره شوند.

۹- تلفیق نقشه‌های دوتایی با ترکیب منطقی And و شناسایی واحدهای پتانسیل‌دار طلا

یکی از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب و تلفیق نقشه‌های مختلف با استفاده از عبارات جبری و ترکیبات منطقی است که با توجه به هدف و در موارد مختلف می‌توان از هر یک از آنها استفاده کرد. در شناسایی مناطق پتانسیل‌دار طلا برای به‌دست آوردن منطقه‌ای که کلیه متغیرهای مدل هدف در آن حضور داشته باشد، بایدتمام نقشه‌های دوتایی را که هر یک به تنهایی فقط یک متغیر را مشخص می‌کنند با هم ترکیب کرد. برای ترکیب نقشه‌ها می‌توان از ترکیب منطقی عطف (And) طبق جدول ۱ استفاده کرد (Carranza, 2008). همان‌گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود در نقشه‌هایی که به‌کمک عملگر (۸) با هم ترکیب می‌شوند، خروجی فقط وقتی ارزش درستی (۱) دارد که ارزش کلیه ورودی‌های اولیه درست و برابر ۱ باشد. بنابراین از آنجا که در کلیه نقشه‌ها مناطق مناسب که نشان‌دهنده حضور یکی از متغیرهای مدل هدف هستند با کد ۱ و مناطق نامناسب با کد ۰ ذخیره می‌شوند. اگر کلیه نقشه‌ها با استفاده از عملگر منطقی AND ترکیب شوند در پایان نقشه‌ای به‌دست خواهد آمد که در آن مناطقی که حضور کلیه ویژگی‌های مدل هدف تأیید شده با کد ۱ و جاهایی که حتی یک ویژگی حضور نداشته با کد ۰ نشان داده می‌شوند. نقشه خروجی نقشه‌ای خواهد بود که در آن مناطق مناسب برای اکتشاف ذخایر طلا با کد ۱ و یک رنگ جداگانه نسبت به مناطق نامناسب با کد ۰ مشخص شده‌اند. در این نقشه مناطق با کد ۱ بیشترین احتمال کانی‌سازی طلا را دارند زیرا در آنها کلیه شرایط لازم بیان شده در مدل هدف برای حضور ذخیره وجود دارد.

۱۰- شناسایی ارتباط میان واحدهای پتانسیل‌دار طلا و پلاسرها

برای شناسایی ارتباط میان واحدهای پتانسیل‌دار طلا و پلاسرها می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی و همچنین تصویر ارتفاعی رقومی استفاده کرد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان ارتباط میان پلاسرها و رسوبات موجود در یک منطقه را با سنگ منشأ آنها مشخص کرد. یعنی با استفاده از این تصاویر می‌توان مشخص کرد که آیا ارتباطی میان رسوبات و واحدهای سنگی پتانسیل‌دار طلا وجود دارد یا خیر. به بیان دیگر، اگر رسوبات منطقه از سنگ‌های پتانسیل‌دار طلا منشأ گرفته باشند می‌توان انتظار داشت که این رسوبات طلا دارند (Amiri et al., 2005). از ابزارهای دیگری که می‌تواند ارتباط میان رسوبات و منشأ آنها را با توجه به شیب توپوگرافی مشخص کند، استفاده از مدل ارتفاعی رقومی است که با استفاده از نقشه توپوگرافی تهیه می‌شود. این‌گونه نقشه‌ها تجزیه و تحلیل شیب و همچنین بررسی عوامل ثقلی انتقال و رسوب‌گذاری و مطالعه ارتباط میان رسوبات و منشأ را امکان‌پذیر می‌سازند.

۱۱- ارائه الگوریتم

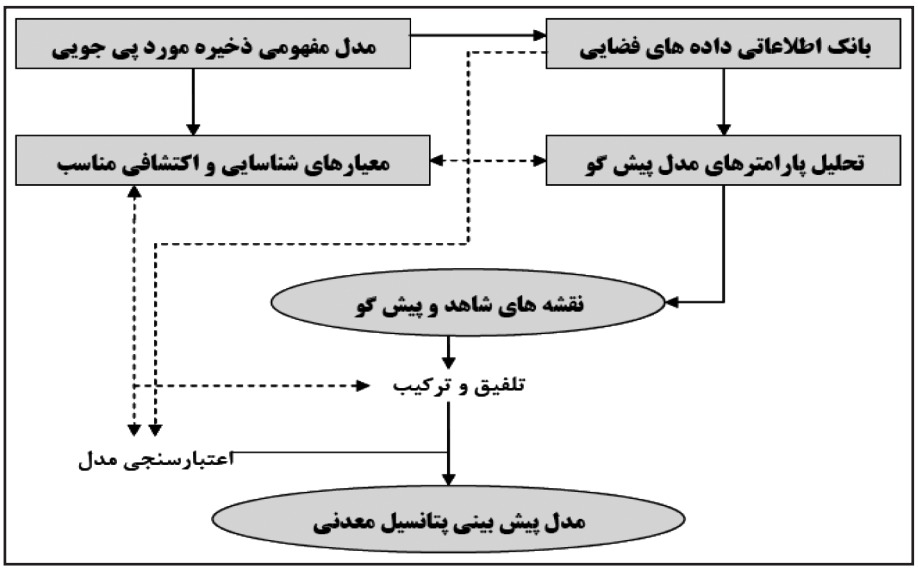
با توجه به کلیه مراحل شرح داده شده در مطالعه حاضر یعنی تعریف مدل مفهومی و هدف، جمع‌آوری اطلاعات، استخراج الگوهای پیش‌گو از داده‌های اولیه و تهیه نقشه‌های شاهد دوتایی با استفاده از عملگر OR، سپس تلفیق کلیه نقشه‌های دوتایی با عملگر AND، در نهایت مراحل تولید مدل پتانسیل معدنی برای طلا به‌صورت یک الگوریتم طراحی و به‌صورت شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، کلیه مراحل تولید مدل پتانسیل معدنی و شناسایی مناطق هدف و پتانسیل‌دار طلا از ابتدا تا انتها به‌صورت مرحله به مرحله نشان داده شده است. اگر این الگوریتم پیش از شروع هر پروژه اکتشافی برای هر نوع ماده معدنی به‌طور خاص، طراحی شود، روند اجرای عملیات اکتشافی سیستماتیک خواهد بود و کنترل و مدیریت پروژه به راحتی صورت می‌گیرد.

۱۲- نتیجه‌گیری

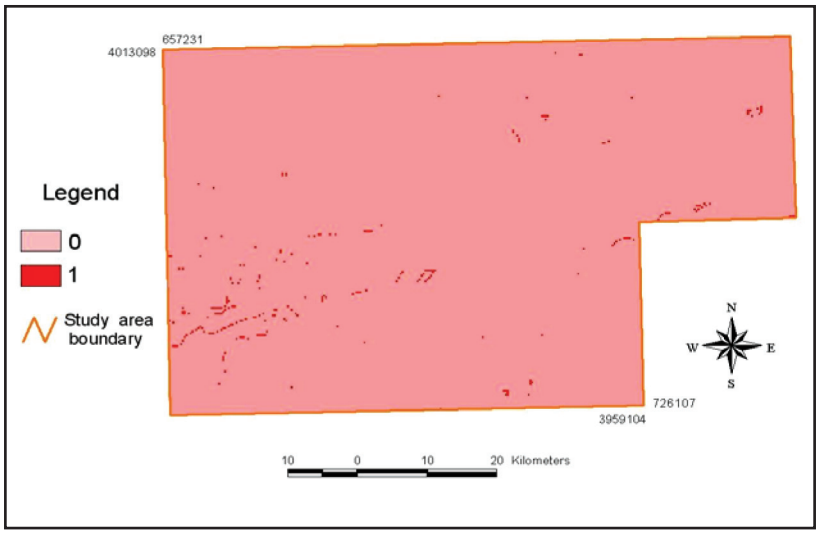
با توجه به مطالعات صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که اگر پیش از شروع عملیات اکتشافی برنامه مدونی به‌صورت سیستماتیک و در قالب یک الگوریتم طراحی شود که در آن فرایند عملیات اکتشافی به‌صورت مرحله به مرحله مشخص شده باشد، مدیریت بهینه زمان، هزینه و کنترل پروژه صورت گرفته و از ریسک عملیات اکتشافی نیز کاسته می‌شود. به این منظور باید با مطالعه روی ذخایر شناخته شده ماده مورد اکتشاف، یک مدل توصیفی و مفهومی از ذخایر مورد جستجو به‌دست آورد و سپس با استفاده از این مدل توصیفی و ویژگی‌های ذخایر شناخته شده، بهترین معیارهای اکتشافی برای پی‌جویی را در قالب یک مدل هدف انتخاب کرد. در مرحله بعد باید با استفاده از روش‌های اکتشافی مختلف کلیه محل‌هایی را که در آنها هر یک از معیارهای اکتشافی تعیین شده در مدل هدف حضور دارند به‌صورت الگوها و نقشه‌های شاهد استخراج و شناسایی کرد. با توجه به این که برخی از روش‌های اکتشافی قادر به شناسایی تمام متغیرهای مدل هدف نیستند و همچنین با نظر به این که برای شناسایی محل حضور برخی از متغیرها ممکن است از چند روش مختلف اکتشافی استفاده شود، باید به‌گونه‌ای رفتار کرد که تمام محل‌های شناسایی شده از روش‌های مختلف اکتشافی، مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، هر یک از نقشه‌های به‌دست آمده حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی که به‌منظور شناسایی محل حضور یک متغیر خاص استفاده می‌شود، دوباره طبقه‌بندی می‌شود و با استفاده از ترکیب منطقی OR با دیگر نقشه‌های هم‌نوع تلفیق می‌شود تا برای هر یک از معیارهای اکتشافی مدل هدف یک نقشه به‌صورت دوتایی تولید شود. در پایان، با استفاده از تلفیق کلیه نقشه‌ها با عملگر And نقاطی که در آنها حضور کلیه معیارهای اکتشافی مدل هدف مورد تأیید است، به‌صورت مدل پتانسیل معدنی به‌دست می‌آید. مراحل بالا باید برای هر نوع ماده معدنی مورد پی‌جویی به‌طور جداگانه بررسی و برای آن الگوریتم شبکه نتیجه‌گیری الگوهای پیش‌گو طراحی شود تا تولید نواحی هدف با در نظر گرفتن کلیه ویژگی‌های مؤثر در کانی‌سازی به‌طور بهینه صورت گیرد.

جدول ۱- ترکیب‌های منطقی OR و AND

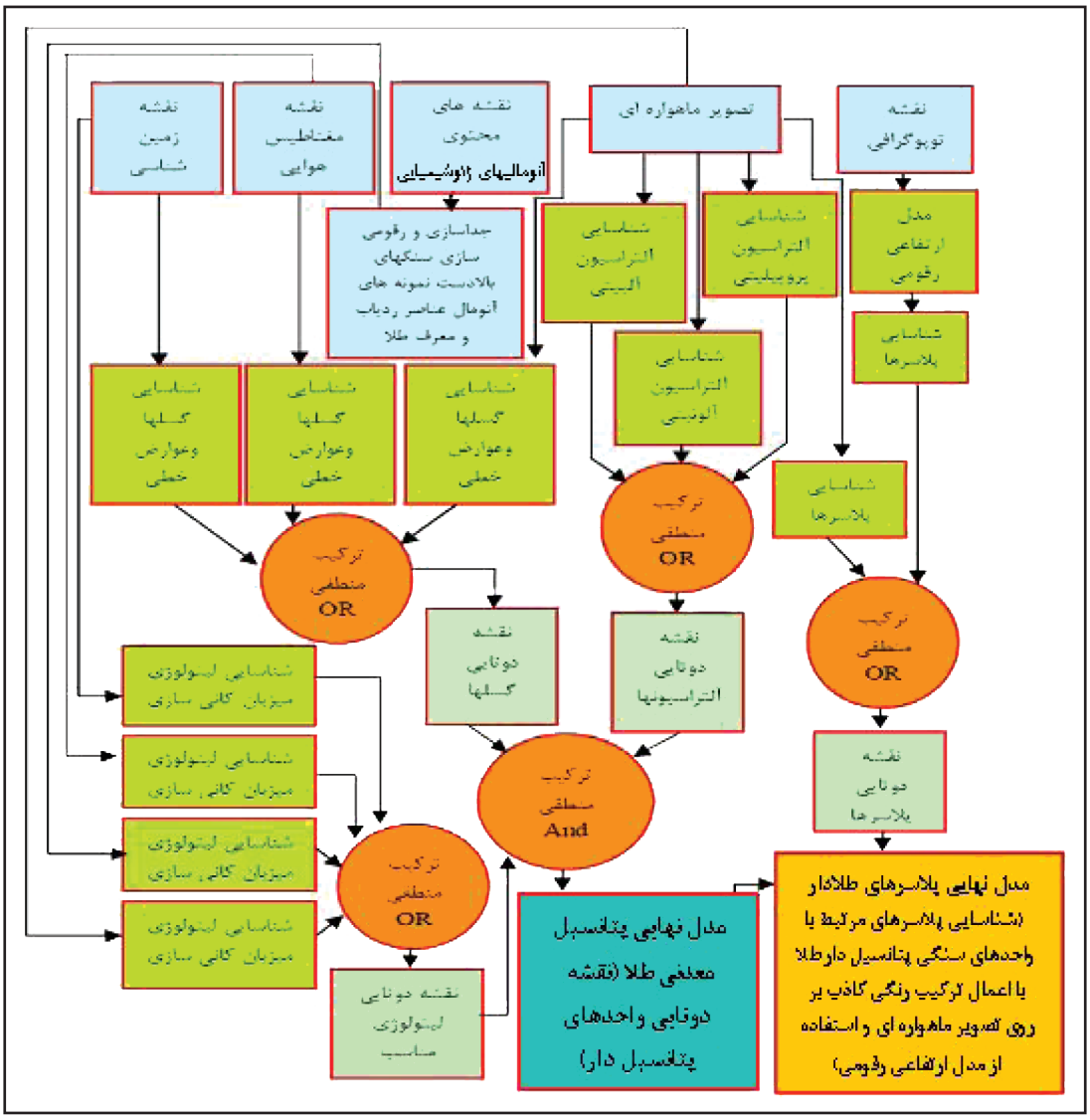
A	B	A and B	A OR B
۱	۱	۱	۱
۰	۱	۰	۱
۱	۰	۰	۱
۰	۰	۰	۰



شکل ۱- فرایند تهیه مدل پتانسیل معدنی (Carranza, 2008).



شکل ۲- نقشه پتانسیل معدنی حاصل ترکیب شواهد با عملگرهای بولی (یوسفی و همکاران، ۱۳۸۸).



شکل ۳- الگوریتم بهینه تولید مدل پتانسیل معدنی در اکتشاف مقدماتی ذخایر طلا.

کتابنگاری

حسنی پاک، ع.ا.، ۱۳۸۳- اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۱۵ ص.

کریم‌پور، م. ح. و سعادت، س.، ۱۳۸۴- زمین شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات نشر مشهد، ۵۳۵ ص.

یوسفی، م.، ۱۳۸۳- اکتشاف سنگ‌های تزئینی (نما) با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، اولین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

یوسفی، م.، کامکار روحانی، ا.، غلامی، ر.، رسولی، م.، میرصادقی، م.، ۱۳۸۸- شناسایی و تفکیک کانی‌سازی‌های فلورین عدسی شکل از کانی‌سازی در زون‌های گسل خورده در جنوب استان مازندران با استفاده از تجزیه و تحلیل اوزان شاهد، سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه یزد.

References

Amiri, A. H., Ranjbar, H. & Honarmand, M., 2005- Application of remote sensing techniques in alluvial sampling design for exploration of placer deposits in the semi-arid areas. Map India, Geomatics.

Berger, B. R. & Drew, L. J., 2002- Mineral-deposit models: new developments. In: A.G. Fabbri, Gaál, G., McCammon, R.B. (Eds.), Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security. NATO Science Series 2, Environmental Security, Vol. 80, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.121-134.

Bonham-Carter, G. F., 1985- Statistical association of gold occurrences with Landsat-derived lineaments, Timmins-Kirkland Lake area, Ontario. Canadian Journal of Remote Sensing 11(2): 195-211.

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

Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2002a- Mineral imaging with Landsat TM data for hydrothermal alteration mapping in heavily-vegetated terrane. International Journal of Remote Sensing 23(22): 4827-4852.

Carranza, E. J. M. & Hale, M., 2002b- Spatial association of mineral occurrences and curvi-linear geological features. Mathematical Geology 34(2): 199-217.

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

Carlson, C. A., 1991- Spatial distribution of ore deposits. Geology 19(2): 111-114.

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): 91-124.

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

Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I., 2002- An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd edn., Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Macdonald, E. H., 2007-Handbook of gold exploration & evaluation. Woodhead Publishing, 664p.

Muller, D. & Groves, D. I., 1997- Potassic Igneous Rocks & Associated Gold Copper Mineralization. Springer, 235p.

Parasnis, D. S., 1997- Principles of Applied Geophysics, 5th edn, Chapman and Hall, London.

Pirajno, F., 1992- Hydrothermal Mineral Deposits, Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologists, Springer-Verlag, Berlin.

Pirajno, F., 2009- Hydothermal Processes & Mineral System. Springer, 1273p.

Robb, L., 2004- Introduction to Ore-forming Processes, Blackwell, Oxford.

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

Sabins, F. F., 1999- Remote sensing for mineral exploration. Ore Geology Reviews 14(3): 157-183.

Singer, D. A., 1993- Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources. Nonrenewable Resources 2(2): 69-81.

Spatz, D. M., 1997- Remote sensing characteristics of sediment- and volcanic-hosted precious metal system: imagery selection for exploration and development. International Journal of Remote Sensing 18(7): 1413-1438.

Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E., 1990- Applied Geophysics, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge.

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): 215-230.

Vearncombe, J. & Vearncombe, S., 1999- The spatial distribution of mineralization: applications of Fry analysis. Economic Geology 94(4): 475-486.