

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

مهیار یوسفی^۱، رؤف غلامی^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^۱ و علی مرادزاده^۱

^۱دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

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

چکیده

در طراحی اکتشافات سیستماتیک و پی جویی ذخایر معدنی می توان با استفاده از مدل سازی 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 کانی سازی، افزایش احتمال موفقیت و کاهش ریسک اکتشاف می گردد. 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 می باشد. در این راستا پس از مدل سازی توصیفی ذخایر طلا و تعریف یک مدل مفهومی مناسب، همه مشخصاتی که می تواند به عنوان معیار اکتشافی مورد استفاده قرار گیرند، شناسایی و در قالب یک مدل هدف جمع آوری می شوند. سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل لایه های اطاعتی مختلف، دسترسی به نقشه های شاهد و پیشگوی اکتشافی امکان پذیر می گردد. در مرحله بعد همه نقشه های دوتایی تلفیقی می گردند تا مناطقی که در آنها همه معیارهای اکتشافی یکدیگر را تأیید می کنند، به صورت یک نقشه معرفی شوند. نقشه اخیر مدل پتانسیل معدنی طلا بوده که محل های احتمالی وقوع کانی سازی را به عنوان مناطق هدف نشان می دهد. در نهایت مراحل طراحی شده به صورت الگوریتمی ارائه می شود که در آن همه مراحل و روش های اکتشافی قابل استفاده به صورت برنامه ریزی شده و به ترتیب الویت آمده است.

کلیدواژه ها: طراحی الگوریتم اکتشاف، برنامه ریزی، مدل مفهومی، مدل پتانسیل معدنی، ذخایر طلا، منطق بولی.

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

*نویسنده مسئول: مهیار یوسفی

۱- مقدمه

پتانسیل معدنی را بهینه کرد. این الگوریتم باید برای هر ماده معدنی ویژه و مورد جستجو، به طور 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 پی جویی به عنوان مدل هدف طراحی و پس از جمع آوری اطلاعات برای مدل سازی پتانسیل معدنی و تولید نواحی هدف، تجزیه و تحلیل های لازم روی آنها بررسی و در پایان به عنوان یک روش جدید، الگوریتم و شبکه نتیجه گیری قابل استفاده برای اکتشاف مقدماتی طلا ارائه شده است.

۲- مدل سازی پتانسیل معدنی

در فعالیت های اکتشاف ذخایر معدنی، شناسایی مناطق هدف، یکی از مراحل مهم است. این شناسایی بیشتر با استفاده از مدل سازی پتانسیل معدنی صورت می گیرد. مدل سازی پتانسیل معدنی، یافتن مکان ها یا مناطقی است که یک سری معیارها و ملاک ها برای حضور ذخیره در آنها صدق کند. شناسایی هدف مرحله ای است که در آن مناطقی شناسایی می شوند که باید برای مطالعات اکتشافی بیشتر و تفصیلی تر با استفاده از روش های اکتشافی، مورد جستجو قرار گیرند. این مناطق در واقع بخش یا سطحی کوچک تر از ناحیه انتخاب شده اولیه هستند. عملیات اکتشافی در این مناطق برای کشف کانی سازی های جدید، بر اساس مدل های اکتشافی ذخایر مورد جستجو و داده های مناسب مانند زمین شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ... صورت می گیرد. این مدل سازی بر اساس شناخت از ذخیره و محیط آن در نزدیک سطح زمین و در مکان هایی که فرایندهای زمین شناسی و ساختاری برای کانی سازی مناسب هستند، صورت می گیرد (Singer, 1993). در

به طور کلی اکتشاف فرایندی مرحله ای 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 تفصیلی تر هستند بر روی مناطق امیدبخش به دست آمده از مراحل پیشین متمرکز می شود. در هر مرحله از اکتشاف، با توجه به نوع ماده معدنی مورد پی جویی، ممکن است از روش ها و معیارهای مختلف اکتشافی مانند مطالعات زمین شناسی، دورسنجی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و ... استفاده شود. بنابراین، اگر روش ها و معیارهای اکتشافی مورد استفاده در هر مرحله به طور بهینه انتخاب شوند، مناطق امیدبخش نیز به طور بهینه به دست خواهند آمد. در این راستا اگر در شروع عملیات اکتشافی، برنامه مدونی از مراحل اکتشاف و روش های قابل استفاده تهیه شود، در هدمند و سیستماتیک کردن عملیات اکتشافی، کاهش ریسک و بهینه سازی زمان و هزینه تأثیر بسزایی دارد. بنابراین باید در شروع عملیات اکتشافی، طراحی و برنامه ریزی اکتشافی صورت گیرد تا مراحل و روش های مورد استفاده مشخص شود. در این راستا با به کارگیری انواع داده ها و نقشه هایی که در دسترس هستند و استفاده از قابلیت های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، می توان طرحی را ارائه داد که با استفاده از آن بتوان مناطق پتانسیل دار را در قالب مدل پتانسیل معدنی پیش بینی کرد. روش های مختلفی برای مدل سازی پتانسیل معدنی وجود دارد که در هر یک از آنها با استفاده از شیوه های متفاوت، الگوهای پیش گو از میان مجموعه داده های فضایی استخراج و پس از تولید نقشه های شاهد، با استفاده از روابط مختلفی تلفیق می شوند. مسئله ای که وجود دارد این است که نحوه استخراج الگوها در مورد هر ماده معدنی متفاوت است زیرا ویژگی های کانی سازی های انواع (تیپ) مختلف با یکدیگر متفاوت است. بنابراین لازم است با تعریف یک مدل مفهومی مناسب از ذخیره مورد پی جویی، امکان نتیجه گیری (استنتاج) بهینه الگوهای پیش گو را فراهم کرد (Carranza, 2008) و با ساخت یک شبکه نتیجه گیری الگوها (Inference network) به صورت یک الگوریتم، تولید مدل

و همچنین تحلیل همراهی و وابستگی فضایی میان ذخایر مورد پی جویی 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 پی جویی هستند، اساس شناسایی و تعیین معیارهای اکتشافی مناسب هستند. مدل مفهومی ذخایر مورد پی جویی و شناسایی معیارهای اکتشافی مناسب برای پی جویی، اساس تهیه مدل‌های پتانسیل معدنی خواهد بود. نقشه‌برداری، برداشت و شناسایی الگوهای شاهد مثل دگرسانی گرمایی مربوط به ذخایر معدنی معین می‌تواند 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 پتانسیل دار 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 خواهد 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 تلفیق با هم متفاوت هستند. یکی از روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی که در مطالعه حاضر به کار 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

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 پی جویی 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 پیش‌گویی 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 پی جویی) 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 پی جویی 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 کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی را با مکان‌هایی که احتمال حضور ذخایر مورد پی جویی در آنجا بالاست، نشان می‌دهد (Carranza, 2008). تعریف یک مدل مفهومی برای یک نوع ذخیره مورد پی جویی 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 پی جویی) 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)

تهیه مدل پتانسیل معدنی و تولید نواحی هدف اکتشاف مقدماتی و سیستماتیک ذخایر طلا و پلاسره‌های حاصل از آن ارائه شده است.

۶- انتخاب هدف و تعریف مدل مفهومی

برای شناسایی ذخایر طلا و پلاسره‌های حاصل از آنها باید ابتدا محل‌های حضور واحدهای زمین‌شناسی و سنگ میزبان مناسب کانی‌سازی طلا شناسایی و سپس پلاسره‌های 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، به صورت 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 پلاسره‌های حاصل از آنها است، ابتدا باید سنگ منشأ و میزبان مناسب و پتانسیل‌دار، شناسایی و سپس پلاسره‌هایی جستجو شوند که از این واحدها منشأ می‌گیرند. بنابراین، می‌توان در مدل هدف دو بخش را به صورت 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 آلپیتی، آلونیتی و دگرسانی پروپلیتیک (کلریتی، کربناتی، سربست) دیده می‌شود (کریم پور و سعادت، ۱۳۸۴; Pirajno, 2009; Macdonald, 2007). 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 آلپیتی، آلونیتی و دگرسانی پروپلیتیک (کلریتی، کربناتی، سربستی. (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 صحرائی 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 به جمع‌آوری اطلاعات مربوط به متغیرهای 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.

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 دست‌کم 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

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 جمع آوری شده، پردازش‌های لازم روی آنها انجام می‌شود و برای هر یک از معیارهای مدل هدف، نقشه جداگانه‌ای به صورت 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 این که هدف این پژوهش، اکتشاف سنگ میزبان ذخایر طلا و پلاسره‌های 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 تفکیک شده 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، به منظور 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 به عنوان 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 گسل خورده و همچنین مناطق با سنگ میزبان مناسب (تعریف شده در مدل مفهومی) می‌توانند به عنوان 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 به عنوان 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 دگرسانی‌های 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 به دست 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 به عنوان 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 بی‌هنجاری عناصر معرف و ردیاب طلا رقومی شوند و واحدها و مناطق مناسب و با پتانسیل احتمالی کانی‌سازی با استفاده از این نقشه‌ها به دست 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 به دست آمده حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی که به منظور 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 به صورت 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 به دست 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 به دست 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 پلاسرها حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و همچنین نقشه توپوگرافی و مدل ارتفاعی رقومی، با ترکیب منطقی OR تلفیق شده تا نقشه‌ای به دست 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

۱۱- ارائه الگوریتم

با توجه به کلیه مراحل شرح داده شده در مطالعه حاضر یعنی تعریف مدل مفهومی و هدف، جمع آوری اطلاعات، استخراج الگوهای پیش گو 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 به صورت یک الگوریتم طراحی و به صورت شکل ۳ ارائه شده است. همان گونه که مشخص است، کلیه مراحل تولید مدل پتانسیل معدنی و شناسایی مناطق هدف و پتانسیل دار طلا از ابتدا تا انتها به صورت مرحله به مرحله نشان داده شده است. اگر این الگوریتم پیش از شروع هر پروژه اکتشافی برای هر نوع ماده معدنی به طور خاص، طراحی شود، روند اجرای عملیات اکتشافی سیستماتیک خواهد بود و کنترل و مدیریت پروژه به راحتی صورت می‌گیرد.

۱۲- نتیجه گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته در این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که اگر پیش از شروع عملیات اکتشافی برنامه مدونی به صورت سیستماتیک و در قالب یک الگوریتم طراحی شود که در آن فرایند عملیات اکتشافی به صورت 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 به دست 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 به صورت 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 به گونه‌ای رفتار کرد که تمام محل‌های شناسایی شده از روش‌های مختلف اکتشافی، مورد توجه قرار گیرند. بنابراین، هر یک از نقشه‌های به دست آمده حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های ورودی که به منظور 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 به صورت 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، به صورت مدل پتانسیل معدنی به دست می‌آید. مراحل بالا باید برای هر نوع ماده معدنی مورد پی‌جویی به طور 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 به طور بهینه صورت گیرد.

استفاده از عملگر منطقی OR تلفیق شده تا نقشه‌ای به دست 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 پتانسیل دار طلا

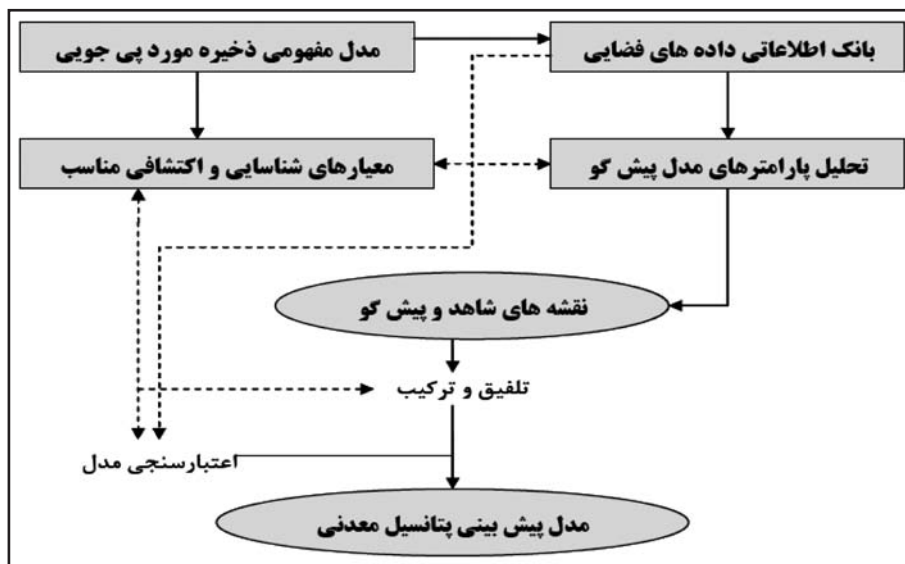
یکی از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب و تلفیق نقشه‌های مختلف با استفاده از عبارات جبری و ترکیبات منطقی است که با توجه به هدف و در موارد مختلف می‌توان از هر یک از آنها استفاده کرد. در شناسایی مناطق پتانسیل دار طلا برای به دست آوردن منطقه‌ای که کلیه متغیرهای مدل هدف در آن حضور داشته باشد، باید تمام 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). همان گونه که در جدول ۱ دیده می‌شود در نقشه‌هایی که به کمک عملگر (\wedge) 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 به دست 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 پتانسیل دار طلا و پلاسرها

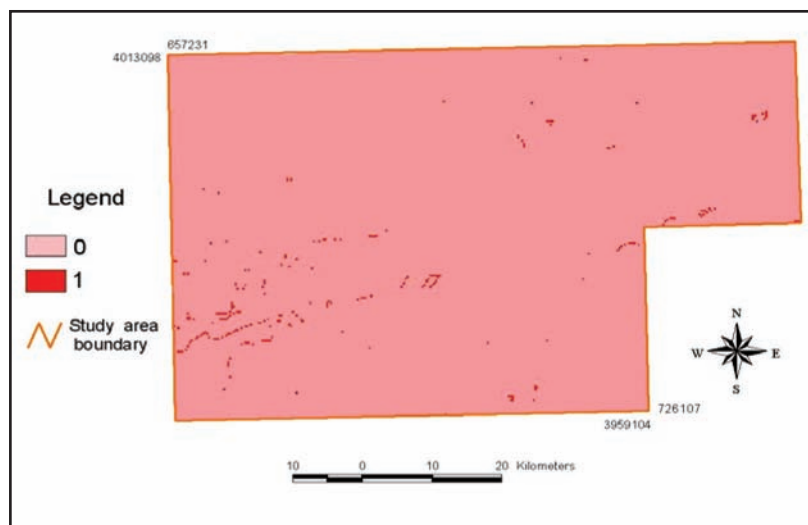
برای شناسایی ارتباط میان واحدهای پتانسیل دار طلا و پلاسرها می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی و همچنین تصویر ارتفاعی رقومی استفاده کرد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان ارتباط میان پلاسرها و رسوبات موجود در یک منطقه را با سنگ منشأ آنها مشخص کرد. یعنی با استفاده از این تصاویر می‌توان مشخص کرد که آیا ارتباطی میان رسوبات و واحدهای سنگی پتانسیل دار طلا وجود دارد یا خیر. به بیان دیگر، اگر رسوبات منطقه از سنگ‌های پتانسیل دار 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. این گونه نقشه‌ها تجزیه و تحلیل شیب و همچنین بررسی عوامل نقلی انتقال و رسوب‌گذاری و مطالعه ارتباط میان رسوبات و منشأ را امکان‌پذیر می‌سازند.

جدول ۱- ترکیب‌های منطقی AND و OR

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).

- 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 with GIS*, 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- *Hydrothermal 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.