

برنامه‌ریزی جهت کاوش کانی‌های آهک به کمک پردازش نگاشت زاویه طیفی (SAM) و مدل‌سازی عامل مبنا (ABM)

مریم جهانبانی^۱، محمد حسن وحیدنیا^{۲*}، محمد اسپنانی^۱

^۱ دانشجوی دکتری سنجش‌ازدور و GIS - دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و

تحقیقات تهران

maryam.jahanbani2020@yahoo.com

aspananim@gmail.com

^۲ استادیار گروه سنجش‌ازدور و GIS - دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و

تحقیقات تهران

vahidnia84@gmail.com

(تاریخ دریافت تیر ۱۴۰۰، تاریخ تصویب مهر ۱۴۰۰)

چکیده

یکی از مزایای روش سنجش‌ازدور به کمینه رساندن بررسی‌های سطحی، به‌ویژه در مناطق غیرقابل دسترسی براساس اطلاعات طیفی به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. وجود مواد معدنی توسط امضای طیفی ثبت‌شده‌شان در تصاویر ماهواره‌ای قابل ردیابی هستند. فرضیه اصلی این تحقیق آن است که تلفیق چنین پردازش‌هایی همراه با مدل‌سازی عامل مبنا (Agent-based Modeling) می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر کاوش منطقه و کاهش هزینه و زمان بیانجامد. در این مطالعه از اطلاعات سنجنده ASTER و سنجنده OLI برای شناسایی مناطق حاوی مواد معدنی در بخش یانه‌سر شهرستان بهشهر استفاده شده است. با توجه به اینکه ترکیب کانی‌شناسی و سنگ شناختی منطقه مورد مطالعه اساساً از آهک، شیل، رس و مارن است، حاصل پردازش، بارزسازی واحدهای آهکی می‌باشد که پس از انجام پیش‌پردازش‌ها بر روی اطلاعات و تصاویر سنجنده، از روش‌های نسبت باندی برای مشخص کردن مناطق دارای پتانسیل کانی آهک استفاده شد. سپس از روش نگاشت زاویه طیفی (Spectral Angle Mapper) برای تفکیک دقیق‌تر این مناطق با استفاده از کتابخانه طیفی آزمایشگاهی USGS بهره برده شد. در ادامه جهت بهینه‌سازی زمان و هزینه در جهت شناسایی مناطق حاوی کانی آهک از مدل‌سازی عامل مبنا به‌عنوان رویکردی نوین استفاده گردید. با در نظر گرفتن چندین استراتژی براساس حرکت تصادفی و حرکت در نواحی پتانسیل معدنی، جداول زمانی و هزینه به دست آمده و با هم مقایسه گردید و در نهایت بهترین نتایج از نظر زمان، هزینه و تعداد عوامل جستجوگر به دست آمد.

واژگان کلیدی: مواد معدنی، سنجش‌ازدور، مدل‌سازی عامل مبنا، Netlogo، الگوریتم نگاشت زاویه طیفی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

وجود معدن به عنوان یک صنعت مادر به لحاظ تولید کانی‌ها و سایر مواد معدنی برای زندگی روزمره یک امر ضروری است، زیرا بسیاری از اسباب و لوازم زندگی به طور مستقیم و یا غیرمستقیم از کانی‌ها و مواد معدنی تامین می‌شوند. به طور کلی صنایع با در نظر گرفتن چرخه کامل آن یعنی اکتشاف و استخراج مواد طبیعی، تبدیل این مواد به تولیدات صنعتی، مصرف انرژی، تولید مواد پسماند و در دسترس قراردادن محصولات برای افراد جامعه بر منابع طبیعی و زندگی بشر اثر گذارند [۲]. اکتشافات معدنی شامل روش‌های متعددی است که به منظور حل یک یا چند مشکل اکتشافی ابداع شده و توسعه یافته است. این روش‌ها شامل اکتشافات چکشی، اکتشافات ژئوشیمیایی، اکتشافات ژئوفیزیکی و دور سنجی است. در اکتشافات معادن، سنجش‌ازدور به عنوان روشی نو با بررسی مناطق وسیع در زمان بسیار کمتری نسبت به اکتشافات زمینی کاربرد فراوانی داشته است [۹].

امروزه بررسی‌های دورسنجی به دلیل داشتن داده‌هایی با دید وسیع و یکپارچه و محدوده‌های طول موجی مختلف، از بهترین روش‌ها در پی‌جویی کانسارها شناخته می‌شوند. در واقع دورسنجی ابزار مفیدی برای تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی اعم از زمین‌شناسی ساختمانی و زمین‌ساختی، سنگ‌شناسی و دگرسانی در مراحل اولیه اکتشاف و به ویژه در مرحله پی‌جویی و پتانسیل ماده معدنی مورد نظر است [۶]. در سنجش‌ازدور برای شناسایی مواد معدنی از کتابخانه‌های طیفی استفاده می‌کنند. کتابخانه‌های طیفی مجموعه‌ای غنی از رفتارهای طیفی پوشش‌های سطح زمین هستند. رفتارهای طیفی موجود در کتابخانه‌ها دقیق‌ترین اطلاعات طیفی در دسترس برای پردازش و اعتبارسنجی تصاویر ماهواره‌ای است [۲۰]. وجود روشی مناسب برای تخصیص صحیح وظایف نقش مهمی در بهبود کارایی و تصمیم‌گیری در عملیات با محدوده بزرگ دارد. به عبارتی برای کاهش هزینه‌های اکتشاف معادن مخصوصاً در اکتشافات سیستماتیک و برنامه‌ریزی شده استفاده از تکنیک‌های نوین مدل‌سازی عامل‌مبنا کارآمد می‌باشد.

در زمینه کاوش مواد معدنی به کمک سنجش‌ازدور از تصاویر سنجنده‌های مختلف می‌توان بهره‌مند شد. استفاده

از تصاویر ASTER توسط موای و همکاران (۲۰۲۱) جهت جستجوی سنگ‌های کیمبرلیت در آفریقای جنوبی نتایج خوبی را نشان می‌دهند. کیمبرلیت‌ها به علت داشتن الماس در ساختار خود از نظر اقتصادی اهمیت فراوانی دارند. آنها از تصاویر ASTER استفاده کردند و سپس به بررسی میدانی در منطقه پرداختند. در نهایت نقشه به دست آمده به کمک فناوری سنجش‌ازدور با نمونه‌های دریافتی از منطقه مقایسه گردید. نتایج به دست آمده بیانگر دقت بالای تصاویر ASTER در شناسایی سنگ‌های کیمبرلیت بوده است [۱۳]. تصاویر لندست ۸ در شناسایی مناطق دارای آبهای معدنی به کار گرفته شدند. با پردازش‌های صورت گرفته در این تصاویر با روش نسبت باندی اوسی نووو و همکاران (۲۰۲۱) توانستند کمریند سنگ‌های سبز را شناسایی کنند که مربوط به دوره پرکامبرین بودند و جز مناطق دارای پتانسیل آبهای گرم معدنی هستند [۱۴]. داده‌های سنجنده OLI^۱ و تصاویر سنجنده ASTER به منظور پتانسیل یابی مواد معدنی حاوی کانی‌های طلا توسط تاکوجو وامبو وو همکاران (۲۰۲۰) مورد استفاده قرار گرفتند. برای این پژوهش آنها از روش نگاشت زاویه طیفی (SAM)^۲ استفاده کردند [۱۹]. منطقه مورد مطالعه آنها شامل چندین رگه کوارتز دارای طلا می‌باشد که با مناطق اکسیدهای آهن، سیلیکات‌ها و مسکویت، سرسیت مرتبط است. برای استخراج اطلاعات طیفی مربوط به پوشش گیاهی، مواد معدنی اکسید آهن، AL-OH، OH Fe-Mg، مواد معدنی کربنات از تجزیه و تحلیل اجزای اصلی (PCA)^۳ و تجزیه و تحلیل اجزای مستقل (ICA)^۴ و نسبت‌های باند طیفی استفاده گردید. فرتوسو و همکاران (۲۰۲۱) نیز از تصاویر سنجنده OLI برای دستیابی به مناطق دارای مواد معدنی حاوی کانی‌های طلا با استفاده از روش مولفه‌های اصلی در شمال پرتغال بهره جستند. آنها برای شناسایی مناطق معدنی از روش تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) و نسبت باندی استفاده کردند. نتایج این پژوهش حاکی از مطابقت مناطق دگرگونی گرمایی با مکان‌های حاوی فلزات پایه همانند روی، نیکل، مس در منطقه مورد مطالعه بود

^۱ The Operational Land Imager

^۲ Spectral Angle Mapper

^۳ Principle Component Analysis

^۴ Analysis Component Independent

[۷]. جانوراجی و همکاران (۲۰۲۰) با تلفیق سنجنش از دور و داده‌های ژئوشیمیایی به اکتشاف کانی‌های مس در حوضه الوار، راجستان هند پرداختند. برای این پژوهش آنها از تصاویر سنجنده ASTER و روش نگاشت زاویه طیفی (SAM) استفاده کردند. روش نگاشت زاویه طیفی برای تشخیص کانی‌های گالنا، کالکوپیریت (ماده معدنی اولیه مس)، مالاکیت استفاده گردید. ناهنجاری‌های طیفی نمونه جمع‌آوری شده از منطقه با استفاده از داده‌های پراش اشعه X (XRD) تجزیه و تحلیل شد و نتایج نشان دهنده وجود مالاکیت و کالکوپیریت در منطقه مورد مطالعه می‌باشد [۳]. روزبان و همکاران (۱۳۹۴) به شناسایی معدن باریت مریوان با استفاده از تصاویر سنجنده OLI پرداختند و برای شناسایی از روش‌های نسبت باندی و آنالیز مولفه‌های اصلی و نگاشت زاویه طیفی بهره بردند. نتایج نشان می‌داد به دلیل اینکه نمودار رفتار طیفی باریت برای بلورخالص است و باریت در طبیعت کمتر به صورت خالص یافت می‌شود روش نسبت باندی و روش آنالیز مولفه‌های اصلی نتایج قابل قبول‌تری ارائه داده است [۱۸]. پورمحمدی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر نظیر نسبت‌گیری باندها، تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی و تجزیه عاملی، مناسب‌ترین شاخص‌های تفکیک‌کننده واحدهای سنگی را انتخاب و نقشه شناسایی واحدهای سنگی با ضریب کاپا ۰.۵۱ به دست آمد. نهایتاً با هم‌پوشانی نقشه حاصل با نقشه واحدهای زمین‌شناسی توانستند مرز واریزه‌های آهکی از سازندهای غیرآهکی در منطقه را تفکیک کنند [۱۶]. مجرد و همکاران (۲۰۱۹) به منظور پتانسیل‌یابی معدنی، پهنه‌بندی نواحی دگرسانی و شناسایی بخش‌های پنهان کانی‌زایی معدنی از شمال شرق مشکین شهر تا شمال غرب سراب به اعمال پردازش‌های متناسب بر روی تصاویر سنجنده ASTER و تلفیق اطلاعات داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیس سنجی هابرد پرداختند. با توجه به شواهد زمین‌شناسی و نتایج حاصل از این پژوهش اعم از چشمه‌های آب گرم، گسل‌های فعال، گنبد‌های نمکی و دگرسانی‌ها و مناطق مستعد که دارای پتانسیل بالایی از منابع معدنی هستند، شناسایی و ارزیابی شدند [۱۲]. توکلی (۲۰۲۰) برای بارزسازی واحدهای

سنگ شناختی و کانی‌شناسی گنبد‌های نمکی فیروزآباد فارس با استفاده از طیف‌های آزمایشگاهی^۲ (JHU) و (USGS)^۳ از روش نگاشت زاویه طیفی بهره جست. حاصل پردازش آنها بارزسازی واحدهای رسی، آهکی و گچی می‌باشد [۲۰]. با توجه به اینکه در زمینه مدل‌سازی عامل‌مبنا و شبیه‌سازی برنامه اکتشاف به ندرت پژوهشی صورت گرفته است، جهت تنویر مزایای مدل عامل‌مبنا، به چند نمونه در سایر کاربردها اشاره می‌شود. سالز و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی برای بررسی اثرات آگاهی داشتن از خطرات ناشی از سوانح مربوط به فعالیت‌های صنعتی و موقعیت مکانی این نوع از خطرات سوانح صنعتی از مدل عامل‌مبنا بهره جستند و به استفاده بهینه از زمان و هزینه در مواقع وقوع سوانح پرداختند [۱۵]. یوسفی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی از نت لوگو برای شبیه‌سازی یک مدل عامل‌محور و سپس ترکیب آن با یک تکنیک تصمیم‌گیری گروهی به منظور بهبود عملکرد دپارتمان‌های اورژانس استفاده کردند [۲۳]. در تحقیق دیگری از یوسفی و همکاران (۲۰۱۸) از Netlogo برای ایجاد یک شبیه‌سازی مدل عامل‌مبنا و ترکیب آن با یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک به منظور تخصیص بهینه منابع برای دپارتمان‌های اورژانس استفاده شد [۱۱]. حسینی و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی یک مدل عامل‌مبنا برای شبیه‌سازی گسترش کاربری اراضی شهری و مسکونی در شهرستان‌های قزوین و البرز ایجاد و پیاده‌سازی کردند. در این تحقیق با توجه به ماهیت مکانی مسئله، برای فراهم‌سازی بستر حرکت و جستجوی عامل‌ها و نیز جمع‌بندی و تحلیل نتایج به دست آمده از سامانه‌های اطلاعات مکانی^۴ (GIS) استفاده شد [۸].

با توجه به وسعت و شرایط ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه و صعب‌العبور بودن منطقه، استفاده از تعداد عوامل و مسیرهای مشخص برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جستجو مناسب به نظر نمی‌رسد. براین‌اساس در شرایطی که مسیرهای جستجو مشخصی برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جستجو در دسترس نیست، مدل عامل‌مبنا برای برنامه‌ریزی فرایند جستجو استفاده شده است. مدل‌سازی

^۲ Johns Hopkins University

^۳ The United States Geological Survey

^۴ Geographic Information System

^۱ X-Ray Diffraction

عامل مینا^۱ (ABM) کمک شایانی به برنامه‌ریزی جهت نمونه‌برداری توسط عامل‌ها می‌نماید. در شیوه مدل عامل مینا ابتدا اجزای (عامل‌ها) یک سیستم را شناسایی می‌کند، سپس رفتار آنها و نحوه تعاملات آنها را تعریف نموده و در آخر و با راه اندازی مدل مشاهده می‌کند که رفتار و تعاملات چه اتفاقاتی را در سطح کلان سیستم به وجود می‌آورند [۲۱]. در این پژوهش عامل‌ها افرادی هستند که می‌خواهند منطقه را کاوش نمایند و محیط، محدوده‌ای با وجود پتانسیل کانی آهک می‌باشد. در محیط شبیه‌سازی، هر عامل به صورت موازی پردازش‌های خود را دنبال می‌نماید. در واقع ABM نشان می‌دهد که چگونه قواعد رفتاری حرکتی گاه تصادفی و گاه هدفمند عامل‌ها (با توجه به محدوده‌های پتانسیل معدنی) و تعاملات عامل با محیط می‌تواند الگوهای بسیار پیچیده‌ای را در سطح کلان ایجاد کند و مشخص شود چه هزینه و زمانی با توجه به تعداد مشخصی عامل صرف عملیات کاوش می‌شود.

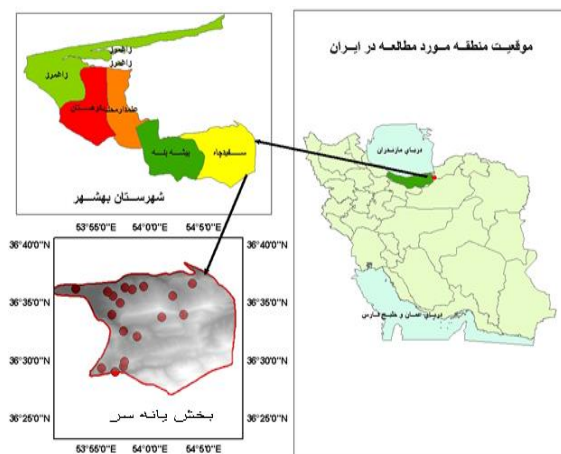
۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

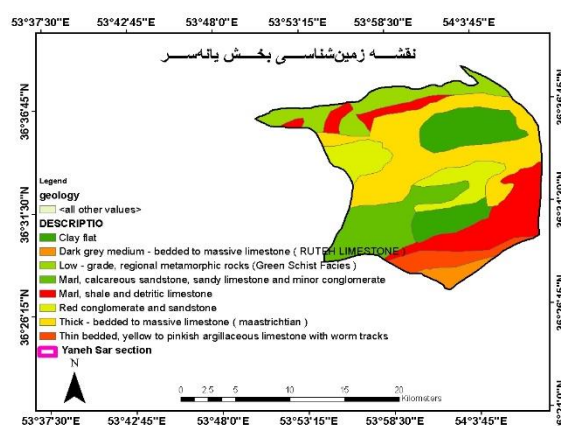
منطقه مورد مطالعه در استان مازندران و در شهرستان بهشهر در بخش یانه‌سر واقع شده است. این منطقه با مساحت ۳۱۵۲۲ هکتار در محدوده جغرافیایی ۵۳ درجه، ۵۳ دقیقه، ۱۱ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه، ۳۶ دقیقه، ۹ ثانیه عرض شمالی قرار گرفته است. از نظر زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه متعلق به دوران پرکامبرین، دوران پالئوزوئیک، مزوزوئیک و سنوزوئیک می‌باشد. رسوبات دوران اول زمین‌شناسی (پالئوزوئیک) که بیشتر آهکی‌اند در ارتفاعات شهرستان بهشهر گسترش دارند. سازندهای این منطقه شامل ماسه سنگ‌ها و شیل‌های سازند شمشک در قسمت شرق منطقه و سازندهای دلیچای و لار می باشد. سازند لار به طور کلی از سنگ آهک دوران دوم تشکیل شده و محدوده جنوبی بین شهرهای نکا و بهشهر از سازند آهکی لار تشکیل شده است. لیتولوژی سنگ‌های آهکی این منطقه، آهکی- مارنی همراه با مواد آتشفشانی است. رسوبات دوران سنوزوئیک نیز به صورت ماسه، رس، رسوبات آبرفتی و رسوبات واریزه‌ای می‌باشد. این منطقه

دارای ذخایر رسوبی آهک (Calcite) و دولومیت (Dolomite) و سنداستون (Sand Stone) و لایم استون (Lime Stone) و شیل (Shale) که از جمله کانسارهای در برگیرنده آهن می‌باشد، است [۵].

سنگ آهک (Lime Stone) جز سنگ‌های طبیعی آهکی و رسوبی است. چون درصد بیشتری از ساختار سنگ آهک از مواد آهکی می‌باشد، جذب آب بسیار بالایی دارد. سنگ‌های آهکی (Carbonate Rocks) رنگ زمینه یکنواخت، روشن و بسیار زیبایی دارد. سنگ آهک سنگ رسوبی با منشا شیمیایی یا زیست شیمیایی که بیشتر از کربنات کلسیم تشکیل شده است. سازند عمده سنگ‌های آهکی می‌تواند ترکیبات حاصل از پیوند کلسیم و بنیان بی کربنات باشد. این ترکیب می‌تواند در قالب انواع کانی‌ها ظهور کند. عمده ترکیب آن کانی‌های کلسیت (CaCO_3) دولومیت (CaMgCO_3) و انواع دیگر نظیر سیدریت (FeCO_3) و انکريت ($\text{CaFe}[\text{CO}_3]_2$) می‌باشد [۵].



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور، استان مازندران و شهرستان بهشهر، بخش یانه‌سر

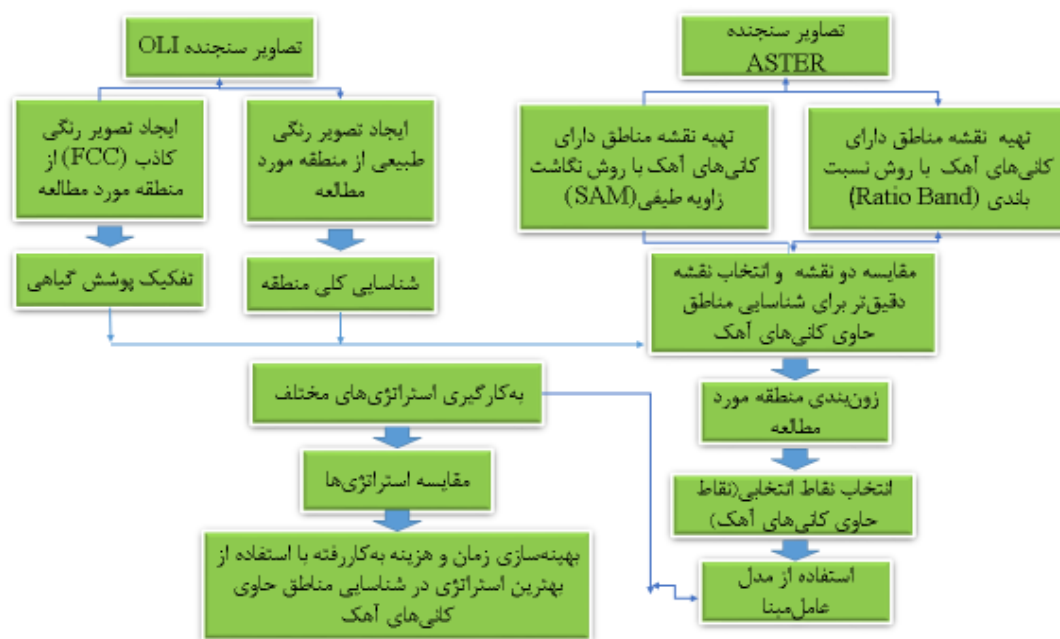


شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی بخش یانه‌سر برگرفته از آرشیو سازمان نقشه‌برداری کشور

^۱ Agent-based mode

۲-۲- مراحل اصلی فرایندها

در فلوچارت شکل (۳) فهرستی از مراحل انجام پذیرفته در این پژوهش آورده شده است. مراحل اصلی فرایند به این صورت می باشد که با استفاده از داده های ورودی که همان تصاویر ماهواره ای و لایه های وکتوری مربوط به منطقه مورد مطالعه می باشد و تکنیک های سنجنش از دور مانند روش نسبت باندی و الگوریتم نگاشت زاویه طیفی به شناسایی مناطق دارای پتانسیل آهک پرداخته شده است. سپس نقشه به دست آمده زون بندی شده و یک سری نقاط انتخابی



شکل ۳- فلوچارت پژوهش

که باند ۵ سنجنده OLI باند مادون قرمز نزدیک است و این طیف سلامت گیاهان را نشان می دهد، گیاهان در این باند بیشترین بازتاب را دارند لذا برای تفکیک پوشش گیاهی، از ترکیب رنگی این باندها نیز استفاده گردید [۲۲]. در جدول شماره (۱) مشخصات باندهای طیفی مورد استفاده این دو سنجنده نشان داده شده است. تصویربرداری از سطح زمین بهتر است زمانی انجام شود که پوشش گیاهی در نازک ترین و کمترین وضعیت سیکل رشد خود باشد. همچنین پوشش ابر نیز کمتر از ۱۰ درصد باشد. زمان تصویربرداری اکتبر ۲۰۰۴ می باشد. جهت استفاده از تصاویر به دست آمده از سایت زمین شناسی آمریکا (USGS) و از نرم افزار ENVI 5.1 بهره برده شد. در ضمن انواع خطاهای هندسی که ناشی از شکل بیضوی زمین و خطاهای رادیومتریک که

۲-۳- شیوه های پردازش به کاررفته روی تصاویر ماهواره ای

سنجنده ASTER با داشتن قدرت تفکیک مکانی و طیفی به نسبت مناسب، تأثیرات چشمگیری بر مطالعات زمین شناسی و اکتشافی گذاشته است، همچنین با داشتن قدرت تفکیک طیفی به نسبت مناسب در محدوده فرورسرخ بازتابی که بیشتر کانی ها در آن دارای نمودار جذب طیفی هستند، امکان تفکیک انواع دگرسانی ها را فراهم کرده است. همچنین با استفاده از ترکیب باندهای قرمز (۴)، سبز (۳) و آبی (۲) سنجنده OLI لندست ۸ که در کل دارای ۱۱ باند می باشد، تصویری با رنگ های طبیعی به دست آمد که در شناسایی کلی منطقه مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجا

ناشی از اثرات اتمسفر می‌باشد قبلاً از روی تصویر حذف و تصحیح گردیده است. بسیاری از تجزیه و تحلیل‌ها و تکنیک‌های پردازش تصویر را می‌توان برای تفسیر داده‌های طیفی مورد استفاده قرار داد. در این مقاله از باندهای سنجنده ASTER و سنجنده OLI و از روش‌های ترکیب رنگی کاذب (FCC)، نسبت‌های باندی (Band Ratio) و

نگاشت زاویه طیفی (SAM) استفاده شده است. برای شناخت اولیه از منطقه و دگرسانی‌ها ابتدا از روش ترکیب رنگی طبیعی و سپس از ترکیب رنگی کاذب و سپس از روش نسبت باندی برای تشخیص کانی‌های آهک استفاده شد و در ادامه به منظور تفکیک دقیق‌تر کانی‌های آهک از روش نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) بهره برده شده است.

جدول ۱- مشخصات باندهای طیفی سنجنده ASTER و سنجنده OLI مورد استفاده در این پژوهش

باندهای مورد استفاده	قدرت تفکیک مکانی (متر)	دامنه انعکاسی (میکرومتر)	باندها
امواج مادون قرمز کوتاه	۳۰m	۲/۲۳۵ - ۲/۲۸۵	۷
امواج مادون قرمز کوتاه	۳۰m	۲/۲۹۵ - ۲/۳۶۵	۸
امواج مادون قرمز کوتاه	۳۰m	۲/۳۶۰ - ۲/۴۳۰	۹
طول موج آبی	۳۰m	۰/۴۷۵ - ۰/۵۷۵	۲
طول موج سبز	۳۰m	۰/۵۲۵ - ۰/۶۰۰	۳
طول موج قرمز	۳۰m	۰/۶۳۰ - ۰/۶۸۰	۴
امواج مادون قرمز کوتاه	۳۰m	۰/۸۴۵ - ۰/۸۸۵	۵

۳- نتایج

۳-۱- ترکیب رنگی کاذب (FCC)^۱

برای شناسایی کلی منطقه مورد مطالعه با رنگ طبیعی از باندهای سنجنده OLI استفاده شده است. به این ترتیب که با ترکیب باندهای ۲،۳،۴ این سنجنده، تصویری با رنگ‌های طبیعی به دست آمد (همانند شکل ۴ - الف). مهم‌ترین باندها در رفتار طیفی گیاه باندهای سبز، قرمز و مادون قرمز نزدیک است. باند قرمز از بیشترین جذب و باند مادون قرمز نزدیک از بیشترین بازتاب در رفتار طیفی گیاه برخوردار است. باند سبز نیز بازتاب گیاه را آشکار می‌سازد. از این رو با ترکیب رنگی کاذب این سه باند می‌توان پوشش گیاهی را بهتر آشکار کرد. بنابراین شکل (۴-ب) ترکیب باندهای ۳،۴،۵ را برای بازسازی بهتر منطقه (تفکیک پوشش گیاهی) به نمایش گذاشته است.



شکل ۴- الف) ترکیب رنگی طبیعی با باندهای ۲،۳،۴ سنجنده OLI
ب) ترکیب رنگی کاذب باندهای ۳،۴،۵ سنجنده OLI

^۱ False Color Composite

۳-۲- روش نسبت بانندی (Band Ratio)

تغییرات طیفی در یک پدیده زمین‌شناسی حاصل ترکیبات متفاوت، ناخالصی‌های موجود و یا اختلاف در بافت سنگ‌ها می‌باشد. تبدیلات نسبت بانندی روش مفیدی برای تشخیص کانیهای معدنی است. این روش تکنیکی است جهت بارزسازی اختلافات طیفی میان باندها و کاهش اثرات سایه ایجاد شده به دلیل توپوگرافی و نویزها. این روش اختلاف و شدت تفاوت بین مقادیر روشنایی را بالا برده و مرزها را مشخص‌تر می‌سازد. با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آنها می‌توان به کمک روش فوق پدیده‌های مختلف را بارز ساخت. عمق جذب نسبی باندها نسبتی است که در آن صورت کسر شامل باندهایی است که کانی مورد نظر در آنها کمترین مقدار جذب امواج الکترومغناطیسی را دارد [۴]. با استفاده از همبستگی باندها نسبت به همدیگر و هم چنین مطالعه منحنی طیفی کانی‌های کربنات کلسیم نسبت مناسب بر روی باندهای سنجنده ASTER اعمال شد. طبق منحنی طیفی کانی‌های آهک (کربنات کلسیم)، بازتاب آن در باند ۷ و ۹ سنجنده ASTER و جذب در باند ۸ اتفاق می‌افتد. بنابراین برای آشکارسازی آهک (کربنات کلسیم) رابطه (۱) بر روی باندهای ۷، ۸، ۹ تصویر اعمال گردید (شکل ۵):

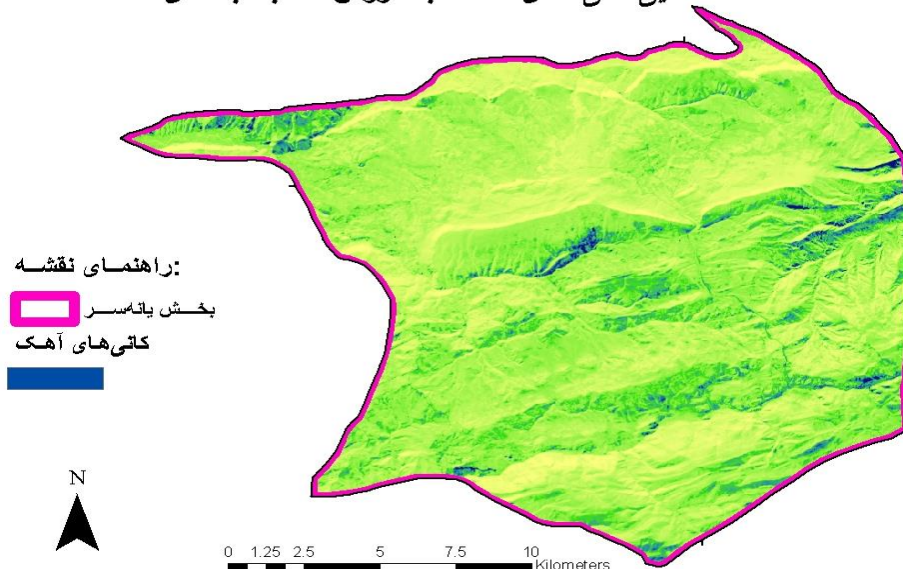
$$\text{Carbonate Index} = \frac{B7 + B9}{B8} \quad (1)$$

۳-۳- نگاشت زاویه طیفی (SAM)

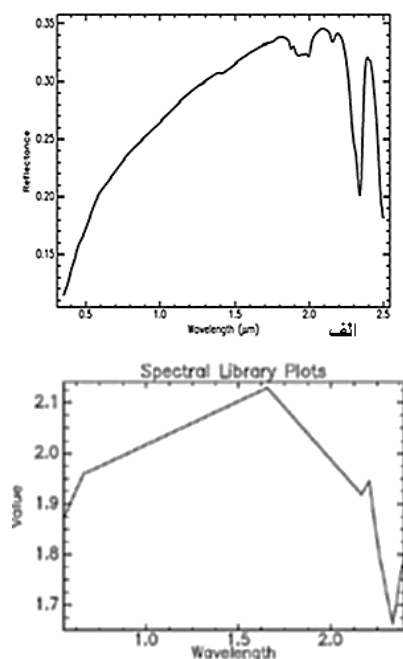
نگاشت زاویه طیفی یک روش طبقه‌بندی شده تصویر می‌باشد که تشابه بین طیف تصویر را با طیف مرجع اندازه گیری می‌کند. الگوریتم این روش، مشابهت بین ۲ طیف را به وسیله زاویه طیفی بین آن دو محاسبه می‌کند [۱]. در واقع با تبدیل طیف‌ها به بردار در فضایی به ابعاد تعداد باندها، زاویه بین دو بردار محاسبه می‌شود. در این روش برای محاسبه زاویه بردار، جهت بردارها اهمیت دارد و نه طول آنها. بنابراین در این روش فاکتورهای دیگر در نظر گرفته نمی‌شود. در واقع هر چه مقدار زاویه بین ۰ و ۱ (رادیانس) کم‌تر باشد، شناسایی دقیق‌تر خواهد بود. در صورتی که مقدار زاویه ۱ باشد، کل تصویر به عنوان پدیده موردنظر شناسایی می‌شود. برای مقایسه یک پیکسل، طیف پیکسل موردنظر از منطقه مورد مطالعه با طیف همان پیکسل در آزمایشگاه (کتابخانه) بر روی دو باند در یک محور مختصات رسم می‌گردد. سپس نقاط به دست آمده به مبدا وصل می‌گردد و زاویه بین دو خط به دست آمده به عنوان زاویه شناسایی پیکسل شناخته می‌شود [۱۰]. برای به دست آوردن زاویه α بین دو بردار به دست آمده از طیف نقاط آزمایشگاهی t و مرجع r از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$a = \left[\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (2)$$

شناسایی کانی‌های آهک با روش نسبت بانندی

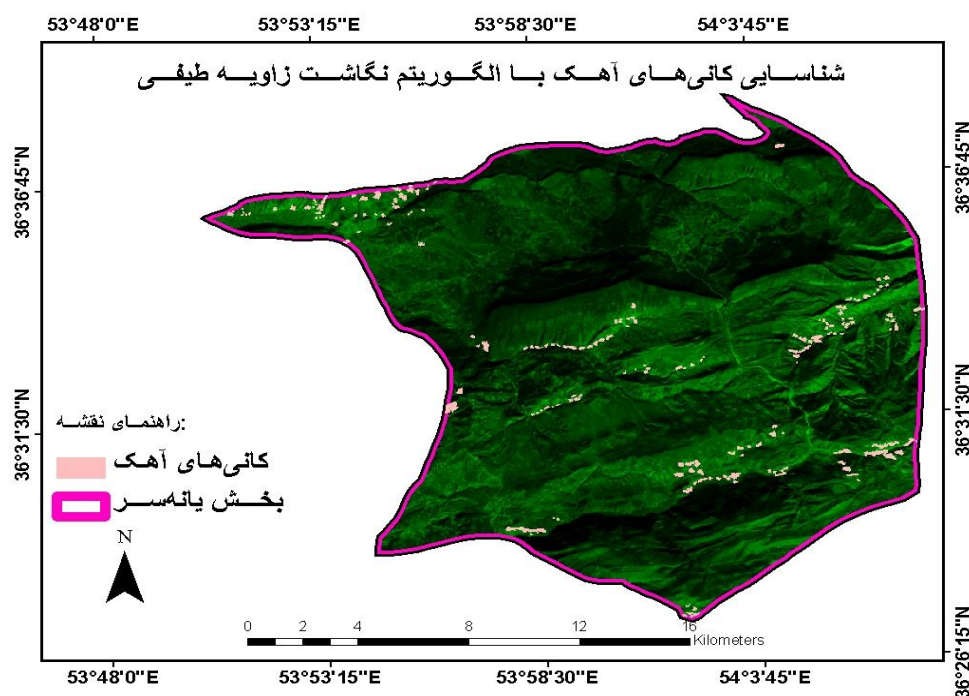


شکل ۵- شناسایی کانی‌های آهک به رنگ آبی با استفاده از روش نسبت بانندی



شکل ۶- الف) نمودار طیفی کانی‌های limestone (نوعی سنگ آهک) برگرفته از کتابخانه USGS (ب) نمودار بازنویسی شده کانی‌های آهک با سنجنده ASTER در نرم‌افزار ENVI

در این رابطه nb تعداد باندها، ti طیف ناشناخته و ri طیف مرجع می‌باشد. زاویه‌های کوچکتر بین این طیف‌ها تشابه بیشتر و زاویه‌های بزرگتر نشان‌دهنده تشابه کمتر است [۴]. بنابراین، طبقه‌بندی SAM در منطقه مطالعاتی با استفاده از کتابخانه‌های طیفی انجام شد. کتابخانه‌های طیفی متعددی برای اهداف سنجش‌ازدور موجود می‌باشد. از میان این کتابخانه‌ها، مجموع سه کتابخانه طیفی USGS، JPL و JHU با نام کتابخانه طیفی ASTER در این جمله کتابخانه‌های معروف در این زمینه می‌باشند. در این پژوهش الگوریتم SAM، با استفاده از طیف‌های کتابخانه طیفی متعلق به سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای کانی‌های مورد مطالعه، بر روی تصویر مورد نظر اجرا شد (شکل ۶). نتیجه استفاده از الگوریتم SAM در شکل (۷) نشان داده شده است که پراکندگی کانی‌های آهک (کربنات کلسیم) را آشکار می‌سازد.



شکل ۷- شناسایی کانی‌های آهک در منطقه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم نگاشت زاویه طیفی

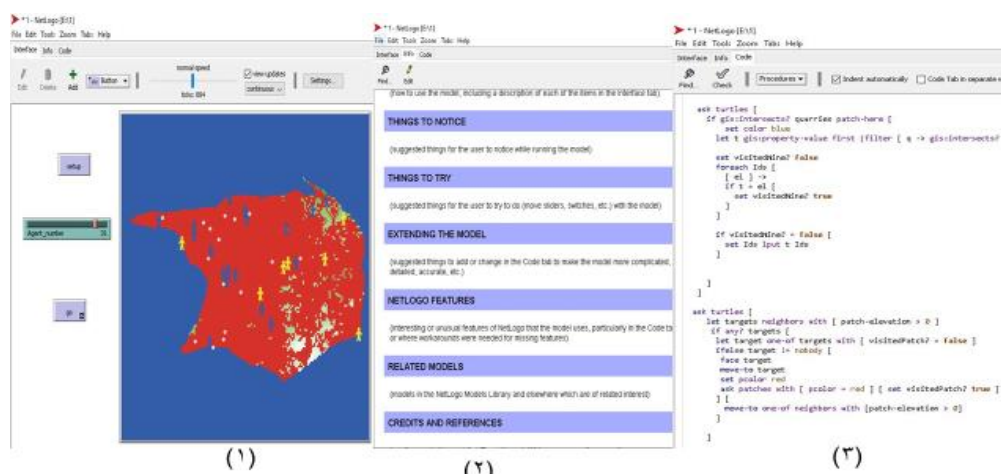
نمونه برداری در حوزه‌های مختلف از جمله جستجو منابع معدنی است. مدل‌سازی عامل‌مبنا قادر است تا با در نظر گرفتن گروه‌های کاری مختلف به عنوان عوامل هوشمند و پیاده‌سازی مواردی که در تصمیم‌گیری موثر هستند را مهیا کند [۲۳]. در این پژوهش برای پیاده سازی مدل عامل‌مبنا از نرم‌افزار Netlogo استفاده گردید.

۳-۴- شبیه سازی برنامه ریزی جهت نمونه برداری با استفاده از مدل عامل‌مبنا در پتانسیل یابی مناطق معدنی

مدل‌سازی عامل‌مبنا (ABM) رویکردی نوین جهت توسعه ابزارهای شبیه‌سازی برای برنامه ریزی در جهت

مربوط به منوی Procedure است کد مربوط به برنامه نویسی مدل در آن نوشته می شود و متناسب با طراحی مدل، این کد را می توان تغییر داد. در این نرم افزار عامل ها به سه دسته لاک پشت ها یا ترتل (Turtle)، اجزای محیط یا پیچ (Patch) و لینک (Link) تقسیم می شوند. مدل عامل مبنا به محققان این امکان را می دهد که پدیده های متفاوت را شبیه سازی و رفتار آنها را تحت شرایط متفاوت تحلیل نمایند.

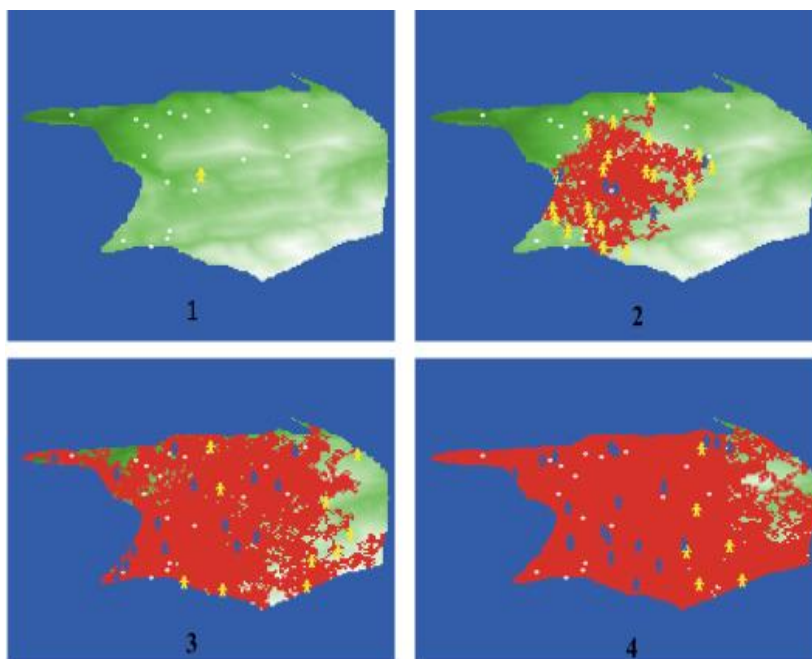
برای شبیه سازی در محیط نرم افزار Netlogo از سه بخش اصلی آن استفاده شد: در بخش اول که مربوط به منوی Interface است، شکل کلی مدل مشاهده می شود و این بخش شامل کنترل کننده های مدل از جمله: کلیدها، لغزنده ها، سوییچ ها، نمودارها، نمایشگرها و غیره است. بخش دوم شامل اطلاعاتی راجع به مدل، چگونگی کارایی آن و همچنین نحوه استفاده از مدل است که به صورت منوی Information معرفی می شود. در بخش سوم که



شکل ۸- نمایشی از اجرای کدهای توسعه یافته شبیه سازی و نمایش بخش های مختلف (۱) Interface، (۲) Info، (۳) Code

مشاهده شده تغییر می کند و عامل های دیگر وارد آن نمی شوند. به ازای هر سلول پتانسیل معدنی یک زمان اضافی به زمان کاوش عامل مربوطه اضافه می شود. بدین معنی که ممکن است عملیات نمونه برداری در آن نقطه چند دقیقه ای به طول بیانجامد. در حالت حرکت هدفمند در مدل طراحی شده، ابتدا به هر عامل یک منطقه اختصاص پیدا می کند. اگر تعداد عامل ها از نواحی بیشتر باشد، ممکن است نواحی تکراری به دو عامل اختصاص یابد. سپس عامل ها از موقعیت اولیه به سمت ناحیه هدف حرکت می کنند و در این حالت کوتاهترین مسیر بر اساس توپوگرافی و DEM منطقه برای عامل ها در نظر گرفته می شود. سپس با رسیدن به محدوده، حرکت تصادفی در محدوده انجام شده و کاوش صورت می پذیرد. در صورتی که کاوش یک ناحیه به پایان رسید و ناحیه ای باقیمانده باشد، عامل هایی که وظیفه آن ها به پایان رسیده به سمت ناحیه جدید حرکت می کنند. پس از فراخوانی داده های مورد نیاز و وارد کردن داده های ورودی (تعداد عوامل جستجوگر، زمان اختصاص داده شده به هر عامل برای جستجو) در این ابزار، نتایج شبیه سازی شامل فرایند پیمایش منطقه مورد مطالعه توسط عوامل جستجو با استفاده از مدل عامل مبنا در شکل ۹ نمایش داده شده است.

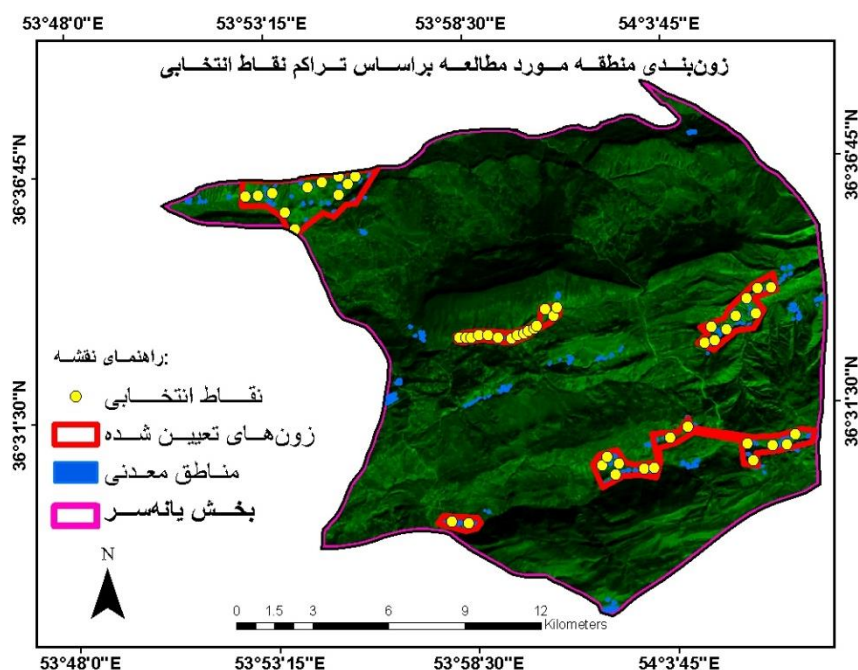
مدل توسعه یافته در سیستم شبیه سازی در این پژوهش به این صورت می باشد که ابتدا لایه های داده ای در محیط Arc GIS ایجاد گردید که شامل نقشه زمین شناسی منطقه، نقشه راه ها، لایه نمونه های انتخاب شده، نقشه ارتفاع منطقه می باشد. بعد از فراخوانی داده های مورد نیاز در نرم افزار Netlogo، برای شبیه سازی و تحلیل نتایج یک سری ورودی و یک سری خروجی داریم که ورودی ها شامل تعداد نقاط تعلیمی متفاوت، تعداد عوامل جستجوگر متفاوت و زمان متفاوت اختصاص داده شده به هر عامل و مسافت پیموده شده می باشد و خروجی ها شامل کل زمانی که به ازای هر نفر در هر مساحت به طول می انجامد و کل هزینه پرداخت شده و کل مسافت پیموده شده و سرعت نمونه برداری می باشند. به عبارتی عوامل جستجوگر را X در نظر می گیریم و نقاط نمونه انتخابی Y در نظر گرفته شده است. در این حالت یک تابع تعریف شده است که به ازای X های مختلف (ورودی های متفاوت)، Y های مختلفی (خروجی های متفاوتی) به دست می آید. در حالت حرکت تصادفی یکی از سلول های مجاور به عنوان نقطه بعدی عامل در نظر گرفته می شود. برای هر عامل یک سرعت حرکت متوسط برابر در نظر گرفته می شود. اگر سلول مورد بررسی محل کانی باشد که از تحلیل های سنجش از دور به دست آمده، آنگاه آن سلول به حالت



شکل ۹- چهار برش از مراحل جستجوی عامل برای اکتشاف کانی‌های آهن در محیط Netlogo با استفاده از مدل عامل‌منا

ازای مساحت هر زون تعداد عوامل جستجوگر و زمان اختصاص داده شده به هر عامل را محاسبه کردیم. نحوه تعیین زون‌ها براساس تراکم نقاط انتخابی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این استراتژی ما ۲۰ نفر را در ۵ زون براساس مساحت زون‌ها تقسیم کردیم. مساحت کل این زون‌ها مجموعاً ۲۵ هکتار، و مساحت کل منطقه ۳۱۵۲۲ هکتار می‌باشد. بنابراین عوامل جستجوگر تنها ۱۵۷۶ هکتار از ۳۱۵۲۲ هکتار را جستجو می‌کنند که از نظر زمان و هزینه بهینه‌سازی مطلوبی صورت گرفته است.

در این پژوهش از سه استراتژی جستجو استفاده کردیم. در استراتژی نخست درکل منطقه مورد مطالعه زون‌هایی به عنوان زون جستجو یا هدف انتخاب کردیم، این زون‌ها براساس تراکم نقاط دارای پتانسیل کانی‌های آهن که با توجه به نقشه به دست آمده از روش نگاشت زاویه طیفی (SAM) تهیه شده است، تعیین گردید. در این استراتژی تعداد عوامل جستجو با توجه به مساحت هر زون انتخاب می‌شود. ابتدا مساحت هر زون را به دست می‌آوریم که در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. سپس به



شکل ۱۰- زون‌بندی منطقه مورد مطالعه برای هدفمندتر شدن شبیه‌سازی کاوش

جدول ۲- نحوه تقسیم عوامل جستجوگر براساس مساحت زون‌های تعیین شده

زون‌های منطقه مورد مطالعه	مساحت هر زون	تعداد عوامل جستجوگر	زمان اختصاص داده شده (دقیقه)
زون اول	۲۵۲/۱	۴	۳۰
زون دوم	۶۳	۱	۳۰
زون سوم	۶۳۰	۸	۳۰
زون چهارم	۴۴۱	۶	۳۰
زون پنجم	۱۸۹	۳	۳۰

در استراتژی دوم مشابه استراتژی اول زون‌هایی را براساس تراکم نقاط تعلیمی تعیین نموده و جستجو را به زون‌های تعیین شده محدود کردیم به این معنی که عوامل جستجوگر براساس الگوریتم‌های تعریف شده در مدل عامل‌مبنا در زون‌های تعیین شده تقسیم می‌شود. زمان اختصاص داده شده به عوامل جستجوگر برابر هم می‌باشد. به عبارتی در استراتژی اول ما عوامل جستجوگر را براساس مساحت هر زون تقسیم کردیم اما در استراتژی دوم تقسیم عوامل جستجوگر بین زون‌ها توسط مدل عامل‌مبنا صورت می‌گیرد. در استراتژی سوم تنها از نقاط تعلیمی برای شبیه‌سازی جستجو استفاده گردید. عوامل جستجوگر در کل منطقه مورد مطالعه به وسیله رفتارهای تعریف شده عملیات جستجو را انجام می‌دهند. تعریف عامل‌ها به این صورت بوده است که متخصص زمین‌شناسی نیستند ولی با توجه

به رنگ و سختی کانی به نمونه برداری می‌پردازند. سرعت عامل‌ها و ارتباط میان آنها با توجه به سه استراتژی به کار رفته در پژوهش بیان شده است. عامل‌ها بین زون‌های مشخص تقسیم شدند. تعداد عامل‌ها در هر زون با توجه به نسبت مساحت و تعداد نقاط مشخص شده برای نمونه برداری در هر زون تعیین شده است. همچنین نقاطی که نمونه برداری شدند دوباره نمونه برداری نمی‌شوند (این شرط در واقعیت با استفاده از نرم افزار مکان‌یابی موبایل یا دستگاه‌های جی پی اس اجرا می‌شود). با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در مدل عامل‌مبنا که در جداول ۲ و ۳ آورده شده، مشاهده می‌شود که در شرایط مشابه و با تعداد عوامل جستجوگر برابر، در استراتژی دوم و با کمترین تعداد عوامل جستجوگر، نتایج بهینه‌تری از نظر زمان و هزینه کل حاصل می‌شود.

جدول ۳- نتایج شبیه‌سازی در استراتژی‌های تعریف شده

داده‌های ورودی		داده‌های خروجی			
انواع استراتژی	تعداد نقاط انتخابی	تعداد عوامل جستجوگر	زمان اختصاص داده شده به هر عامل(دقیقه به ازای هر کیلومتر)	زمان کل(دقیقه)	هزینه کل (میلیون ریال)
استراتژی اول	۵۰	۱۰	۳۰	۱۰۰	۱۰۰۰
	۵۰	۲۰	۳۰	۷۰	۱۴۰۰
	۵۰	۳۰	۳۰	۵۰	۱۵۰۰
استراتژی دوم	۵۰	۱۰	۳۰	۹۰	۹۰۰
	۵۰	۲۰	۳۰	۶۵	۱۳۰۰
	۵۰	۳۰	۳۰	۴۵	۱۳۵۰
استراتژی سوم	۵۰	۱۰	۳۰	۱۴۵	۱۴۵۰
	۵۰	۲۰	۳۰	۱۰۵	۲۱۰۰
	۵۰	۳۰	۳۰	۷۰	۲۱۰۰

۴- نتیجه‌گیری

معدن‌کاری و صنایع وابسته به آن، نقش ارزشمند و مثبتی در مولفه‌های اقتصادی و اجتماعی توسعه پایدار با ایجاد اشتغال و تولید ثروت دارد. همچنین با توجه به نیاز روزافزون جامعه جهانی به مواد معدنی، صنعت معدن‌کاری

برای ادامه فعالیت‌های خود با چالش‌هایی روبه‌رو است که از جمله آنها می‌توان به اکتشاف کانی‌ها و فلزات مورد نیاز صنایع اشاره کرد. در این راستا از روش‌های تصویر رنگی کاذب، نسبت باندی و نقشه‌برداری زاویه طیفی برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل معدنی بهره بردیم. روش‌های نسبت باندی با استفاده از داده‌های تصاویر

سنجده OLI نشان می‌دهد، که اعمال نسبت باندی برای شناسایی آهن بهترین خروجی را داشته باشند. استفاده از روش SAM برای طبقه‌بندی کانی‌های معدنی، تشخیص مرز این واحدها را با دقت بیشتری نسبت به برداشت زمینی مشخص می‌کند. در روش مدل‌سازی عامل‌مبنا با به‌کارگیری داده‌های مورد نیاز همانند DEM منطقه و نمونه‌های انتخاب شده و الگوریتم هوش مصنوعی مناطق دارای پتانسیل معدنی در منطقه مورد مطالعه تحت بررسی قرار گرفت و با استفاده از استراتژی‌های مختلف و به کار گرفتن بهترین استراتژی توسط عامل‌ها کارایی بالایی را در زمان و هزینه نشان می‌دهند. شبیه‌سازی عامل‌مبنا می‌تواند به عنوان روشی نوین برای مدل‌سازی سیستم‌های که شامل عامل‌های مستقل و تعامل‌پذیر است، معرفی شود. نرم افزار Netlogo یکی از پرکاربردترین ابزارهای شبیه‌سازی عامل‌مبنا می‌باشد که در صورت ادغام با سیستم اطلاعات مکانی و استفاده از داده‌های

مراجع

سنجش‌ازدور، می‌توان در آن مدل‌های عامل‌مبنای مکانی را طراحی کرد و توسعه داد. جهت توسعه‌ی ابزارهای شبیه‌سازی برای پدیده‌های پیچیده در حوزه‌های مختلف از جمله مطالعات زمین‌شناسی و اکتشاف مناطق حاوی مواد معدنی می‌باشد. در این مقاله یک سیستم شبیه‌سازی برای جستجوی مناطق حاوی مواد معدنی با استفاده از مدل‌سازی عامل‌مبنا و نرم افزار Netlogo مفهوم هماهنگ‌سازی برای انتساب پویای وظایف بین عامل‌های جستجوگر ارائه می‌دهد. این سیستم می‌تواند برای مدیریت و برنامه‌ریزی در اکتشاف معادن استفاده شود.

سپاسگزاری

بدینوسیله مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از جناب آقای مهندس علی اکبری به دلیل یاری و راهنمایی‌های ارزشمندشان اعلام می‌داریم.

- [1] Abdolrahman, K. Darghahi, S. and Hojjatollah, Ranjbar. (2015). "Alteration mapping zones using spectral angle mapper (SAM) in the Khaneh-Khatun 1:100000 geological sheet, Kerman Province." 7th Conference of Iranian Economic Geological Society
- [2] Bedini, E. (2011). "Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data." *Advances in Space Research* 47(1): 60-73.
- [3] Chatteraj, S. L., Prasad, G., Sharma, R. U., van der Meer, F. D., Guha, A., & Pour, A. B. (2020). "Integration of remote sensing, gravity and geochemical data for exploration of Cu-mineralization in Alwar basin, Rajasthan, India." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102162.
- [4] De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yopez, S., & Amon, C. (2021). "The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela)." *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.
- [5] Ehsani, A. (2003). "Study of natural environment features of Behshahr watershed with emphasis on geomorphology and soil units in relation to vegetation " *Iranian Range and Desert Research* 10(2): 215-235.
- [6] Abou El-Magd, I., Mohy, H., & Basta, F. (2015). "Application of remote sensing for gold exploration in the Fawakhir area, Central Eastern Desert of Egypt." *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 3523-3536.
- [7] Frutuoso, R., Lima, A., & Teodoro, A. C. (2021). "Application of remote sensing data in gold exploration: targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal." *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6), 1-18.
- [8] Hosseinali, F., ALE, S. A., & Nourian, F. (2012). "Developing an agent-based model to simulate urban land-use expansion (Case Study: Qazvin)."
- [9] Ilyati, I., Mozdianfard, M.R. (2016). "Porphyry copper exploration using ETM Landsat data (Case study: Baft city of Kerman)." *International Conference and Exhibition of New Approaches to Energy Conservation (ETEC 2016)* 4.
- [10] Jellouli, A., El Harti, A., Adiri, Z., Chakouri, M., El Hachimi, J. and Bachaoui, E.M. (2021). "Application of optical and radar satellite images for mapping tectonic lineaments in Kerdous inlier of the Anti-Atlas belt, Morocco." *Remote Sensing Applications: Society and Environment*: 100509.
- [11] Yousefi, M., Yousefi, M., Ferreira, R.P.M., Kim, J.H. and Fogliatto, F.S. (2018). "Chaotic genetic algorithm and Adaboost ensemble metamodeling approach for optimum resource planning in emergency departments." *Artificial Intelligence in Medicine* 84: 33-23.

- [12] Mojarad. S., et al. (2019). "Mineralization Potential and Integration of Airborne Magneto Metric Geophysical Data and EO-1, ASTER and ETM+ Hyperspectral Satellite (Sheet 1:100000 Meshkinshahr." Iranian Remote Sensing and GIS 11(3): 142-113.
- [13] Muavhi, N. and Tessema, A. (2021). "Identification of potential targets for kimberlite exploration using satellite imagery and map combination approach in the Lesotho Kimberlite Province." Ore Geology Reviews 132: 104001.
- [14] Osinowo, O.O., Gomy, A. and Isseini, M. (2021). "Mapping hydrothermal alteration mineral deposits from Landsat 8 satellite data in Pala, Mayo Kebbi Region, Southwestern Chad." Scientific African 11: e00687.
- [15] Salze, P., Beck, E., Douvinet, J., Amalric, M., Bonnet, E., Daudé, E., Duraffour, F. and Sheeren, D. (2014). "TOXI-CITY: an agent based model for exploring the effects of risk awareness and spatial configuration on the survival rate in the case of industrial accidents" Cybergeog. European Journal of Geography.
- [16] PourMohammadi, S., et al. (2015). "Identification and separation of calcareous deposits from non-calcareous constituents with the combined application of telemetry sciences and lithological characteristics (Case study: Bahadoran region in Yazd province) " Journal of Engineering Geology 9(4).
- [17] Rokos, D., Argialas, D., Mavrantza, R., Seymour, K.S., Vamvoukakis, C., Kouli, M., Lamera, S., Paraskevas, H., Karfakis, I. and Denes, G. (2000). "Structural Analysis for Gold Mineralization Using Remote Sensing and Geochemical Techniques in a GIS Environment: Island of Lesvos, Hellas." Natural Resources Research 9(4): 277-293.
- [18] Roozban Ali, I. A. (2015). Identification of Marivan Barite Mine using Landsat 8 image National Geomatics Conference 22.
- [19] Wambo, J.D.T., Pour, A.B., Ganno, S., Asimow, P.D., Zoheir, B., dos Reis Salles, R., Nzenti, J.P., Pradhan, B. and Muslim, A.M. (2020). "Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon." Ore Geology Reviews 122: 103530.
- [20] Tavakkoly, H. (2020). "Spectral Angle Mapping (SAM) Using JHU & USGS Spectral Library (Case Study: Firouzabad Salt Domes, Fars)." Geography and Human Relationships 3(2): 60-67.
- [21] Vahidnia, M.H., and Alesheikh, A.A., (2014). "Plain move predicate and its consistency concerning the moving agents in a network." International Journal of Geographical Information Science 28(11): 2145-77.
- [22] Yarmohammadi, A. (2015). "Lithological and Structural Mapping Related to Sediment Hosted Zn-Pb Deposits in the Tiran Basin, NW of Esfahan, Iran: Using ASTER and ETM Images Processing." International Geoinformatics Research and Development Journal 6: 1-14.
- [23] Yousefi, M. and R. P. M. Ferreira (2017). "An agent-based simulation combined with group decision-making technique for improving the performance of an emergency department." Brazilian journal of medical and biological research = Revista brasileira de pesquisas medicas e biologicas 50(5).