



داده‌های سنجش از دور برای نقشه‌برداری لیتیم در منطقه دق پترگان ایران: مقایسه الگوریتم بیشینه انتروپی و تکنیک‌های کلاسیک پردازش تصویر

مهسا جهان‌بخش^۱

علی اسماعیلی^۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

چکیده

در سال‌های اخیر شاهد تقاضای بالا برای لیتیم به دلیل کاربردهای فراوانش هستیم، به عنوان مثال لیتیم در تولید باتری‌های قابل شارژ و عمدتاً در بازارهای جهانی ساخت وسایل نقلیه الکتریکی و در راستای دستیابی به محیط زیست سالم و حمل و نقل مناسب به کار می‌رود، از این رو شناسایی ذخایر لیتیم بسیار مهم است. بهره‌گیری از داده‌ها و تکنیک‌های سنجش از دور در تشخیص منابع لیتیم به دلیل کاهش هزینه‌های اکتشاف میدانی می‌تواند مفید واقع شود. در این تحقیق، از تصاویر سنجنده ستینل-۲ در محدوده ۱۲ معدن شناخته شده لیتیم در سراسر جهان، به عنوان مناطق حضور لیتیم، استفاده شد و طی مراحل، از این داده‌ها، متغیرهای مناسب برای مدل‌سازی تولید شد. در محدوده‌ی این معادن، نمونه‌هایی تولید و به عنوان ورودی الگوریتم مدل‌سازی استفاده شدند. برای مدل‌سازی توزیع نمونه‌های حضور لیتیم، از الگوریتم بیشینه انتروپی استفاده شد. از آنجا که وجود همبستگی میان متغیرهای ورودی باعث کاهش عملکرد مدل می‌شود و تفسیر نتایج مدل‌سازی را دشوار می‌نماید، ابتدا توسط شاخص VIF، همبستگی میان متغیرهای ورودی محاسبه و متغیرهایی که همبستگی بالایی داشتند حذف شدند. در نهایت یک مدل مناسب با معیار AUC برابر با ۰/۷۰۶ به دست آمد و توسط آن، منطقه مطالعاتی دق پترگان، واقع در استان خراسان جنوبی، ایران پهنه‌بندی شد که به موجب آن، دو منطقه محتمل حاوی منابع لیتیم شناسایی شدند. سپس با تکنیک‌های کلاسیک سنجش از دور شامل ترکیب رنگی و نسبت بانندی و تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و SAM نیز پهنه‌بندی انجام شد. نتایج پهنه‌بندی بررسی و توانایی بالای الگوریتم بیشینه انتروپی مشخص شد، این روش به عنوان یک رویکرد هوشمند و کلی می‌تواند در مناطق دور افتاده و یا مناطق با مشکل دسترسی برای پتاسیل‌یابی‌های معدنی (خصوصاً لیتیم) به کار برده شود و در کاهش هزینه‌های نقشه‌برداری میدانی مفید واقع شود.

واژه‌های کلیدی: لیتیم، بیشینه انتروپی، سنجش از دور، SAM، ستینل-۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران (نویسنده مسئول) mahsajahanbaksh8778@gmail.com

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران Aliesmaeil@kgut.ac.ir

۱- مقدمه

تقریباً دو قرن است که لیتیم شناخته شده است، اما لیتیم به طور ناگهانی خبرساز شد، زیرا ماده‌ی اولیه در تولید باتری‌های لیتیم-یونی برای تأمین انرژی مورد نیاز خودروهای الکتریکی است و می‌تواند در قرن کنونی به ارزشمندی طلا باشد (Kim, et al. 2019)، بنابراین شناسایی ذخایر جدید لیتیم بسیار مهم و البته کاربرد روش‌های اکتشاف مدرن و کم هزینه، در اولویت است.

سنجش از دور می‌تواند پاسخی مناسب برای این موضوع باشد، در مراحل اولیه‌ی کاربرد سنجش از دور برای شناسایی مناطق با پتانسیل لیتیم، (Perrotta, et al. 2005) از تصاویر آستر برای پهنه‌بندی پگماتیت‌های لیتیم در برزیل استفاده کردند. (Mendes, et al 2017) نیز تحقیق مشابهی به منظور شناسایی الگوی طیفی کانی‌های لیتیم انجام دادند. (Cardoso-Fernandes, et al. 2018) به تعیین پتانسیل داده‌های سنتینل-۲ در تشخیص کانی‌های لیتیم، با بهره‌گیری از تکنیک‌های ترکیب باند، نسبت بانندی، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) پرداختند.

(Cardoso-Fernandes, et al. 2019) بار دیگر برای شناسایی لیتیم، از تصاویر لندست-۵، لندست-۸، سنتینل-۲ و آستر استفاده کردند. منطقه مورد مطالعه این کار Fregeneda (اسپانیا) - Almendra (پرتغال) بود، که در آن انواع مختلف لیتیم شناسایی شد و ترکیب باندها و نسبت بانندی‌های جدید و همچنین زیرمجموعه‌های جدیدی برای PCA انتخابی پیشنهاد شد که قادر به تمایز امضاها و طیفی لیتیم از امضای طیفی سنگ‌های میزبان بودند. (Gao, et al. 2020) با ترکیبی از روش‌های ژئوشیمیایی، زمین شناسی و سنجش از دوری، مناطق با پتانسیل لیتیم را مشخص کردند. نتایج این روش اکتشافی منجر به شناسایی منابع عظیمی از لیتیم در کمر بند بایانکالا چین شد.

(Cardoso-Fernandes, et al. 2020) در تحقیق دیگری اذعان کردند که در تحقیقات قبلی انجام شده، علیرغم توانایی بالای مدل‌های آن‌ها، تعداد زیادی از مناطق به طور

کاذب مثبت شناسایی شده‌اند، بنابراین از شبکه عصبی مصنوعی به منظور بهبود طبقه‌بندی استفاده کردند. در این تحقیق، از تصاویر سنتینل-۲ و شبکه عصبی سه لایه استفاده شد که توانست با دقت بالایی به شناسایی معادن لیتیم منطقه مطالعاتی بپردازد، همچنین نتایج روش‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، درخت تصادفی (RF) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. علیرغم بهبود نسبی نتایج، هنوز هم تعداد زیادی از مناطق لیتیم به طور کاذب مثبت شناسایی شدند، اما به طور کلی یک رویکرد یکپارچه برای اکتشاف لیتیم با استفاده از ANN ارائه دادند. (Booyesen, et al. 2022) با استفاده از تصویرهای فراطیفی (HSI) و ترکیب آن‌ها با نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه مورد مطالعه و آنالیز طیفی، یک مدل سه‌بعدی ابر نقطه برای نقشه‌برداری کانی‌های لیتیم تولید کردند و توانستند به نقشه توزیع مکانی لیتیم دست یابند. همچنین (Singh 2022) از تکنیک‌های سنجش از دوری و طبقه‌بندی نگاشت زاویه طیفی (SAM) و داده‌های های‌مپ و آستر و لندست-۸، بهره گرفت و در نتیجه با استفاده از ترکیبی از تصاویر و آنالیز طیفی رادیومتری، نقشه‌برداری از پگماتیت‌های لیتیم را انجام داد.

(Shevyrev, et al 2022) مدلی پیشنهاد دادند که توانست با استفاده از داده‌های سنجش از دوری مناطق با امکان دسترسی سخت و دارای پوشش گیاهی متراکم، را به طور نسبی پردازش کند و با به‌کارگیری تغییرات هیدروترمال مرتبط نقشه‌ی پیش‌بینی مواد معدنی مختلف را فراهم کند. اساس روش پیشنهادی کاربرد یک روش خودکار نقشه‌برداری دگرسانی‌ها با مدل پیش‌بینی بیشینه آنتروپی (MaxEnt) بود.

تحلیل مطالعات پیشین نشان می‌دهد که از متغیرهای مختلفی می‌توان برای آشکارسازی منابع لیتیم استفاده نمود که این متغیرها معمولاً باندهای تصاویر ماهواره‌ای گوناگون و یا ترکیب آن‌ها با روش‌های مختلف از جمله ترکیب بانندی، نسبت بانندی و یا تحلیل مؤلفه‌های اصلی هستند. در رویکردهای

است و با اقلیمی گرم و خشک، ارتفاع متوسط ۹۸۸ متر از سطح آب‌های آزاد و بارش سالانه حدود ۱۲۰ میلی‌متر، دارای دمای متوسط سالانه ۱۸ درجه سانتی‌گراد است (علی، ۱۳۸۸). دشت‌های سیلابی، فلات و تراس‌ها، واحدهای اراضی را تشکیل می‌دهند و دارای خاکی از رده رگوسول گچی، سولونچاک سدیمی و آهکی است. این منطقه با شیب متوسط ۳/۸ درصد، شامل آبرفت‌های جوان همراه با رسوبات تبخیری نمکی است که مربوط به دوران چهارم هستند (Rostampour, et al. 2017). پوشش حاشیه جنوب غربی و غرب دشت را غالباً سنگ‌های آهکی ضخیم لایه یا توده‌ای متعلق به کرتاسه زیرین تشکیل می‌دهد و علاوه بر واحد یاد شده، واحدهای دیگر کرتاسه شامل گابرو و میکروگابرو، مارن، ماسه سنگ، آندزیت-بازالت، کنگلومرا، سنگ‌های ولکانیکی، شیل هستند. همچنین گسترش قابل توجه سنگ‌های ائوسن که شامل ماسه سنگ ژپس دار و کنگلومرا است نیز در منطقه وجود دارد و سنگ‌های پالئوسن با رخنمون اندک از جنس کربناته قابل رؤیت است. آبخوان اصلی دشت شاهرخت-دق پترگان از سمت شمال، رسوبات ماسه بادی، تراس‌های قدیمی و جوان و پهنه‌های رسی و کویری از سمت شرق، کنگلومرا و بازالت پلیسون از سمت غرب و آندزیت-بازالت‌های الیگومیوسن نیز در منتهی الیه غربی ارتفاعات دشت شاهرخت، بافت زمین شناسی منطقه را تشکیل داده‌اند. سطح عمده دشت توسط رسوبات کواترنر که ضخامت آن‌ها براساس چاه‌های حفر شده، به‌طور میانگین ۷۰ متر برآورد شده، پوشیده شده است (علی، ۱۳۸۸).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از منابع ذیل استفاده شد که شامل دو دسته (الف) تصاویر ماهواره‌ای و (ب) موقعیت مکانی و اطلاعات برخی معادن شناخته شده و مطرح لیتیم در جهان است. این داده‌ها طی مراحل آماده‌سازی شدند و سپس داده‌های نهایی مورد نیاز برای مدل‌سازی، از طریق آن‌ها تهیه شد.

پیشرفته‌تر و هوشمندتر که از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود، در این روش‌ها، الگوریتم یادگیری ماشین، مطابق با منطقی که پشت طراحی آن وجود دارد و همچنین بر اساس داده‌های موجود، به بهینه‌سازی می‌پردازد و سعی می‌کند بهترین ترکیب متغیرهای ورودی را بیابد.

در این تحقیق با بهره‌گیری از روشی مدرن سعی شد، رویکردی کلی و هوشمند ارائه شود، به‌طوری که با کمترین زمان و هزینه، پس از انتخاب باندهای تصاویر ماهواره‌ای مورد نظر به نقشه‌برداری مناطق محتمل وجود ذخایر لیتیم، پردازد و در این راستا توانایی روش یادگیری ماشین نظارت شده و روش‌های سنجش از دوری کلاسیک مقایسه و به چالش کشیده شوند. به این منظور در تحقیق حاضر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و الگوریتم پیشینه آنتروپی به همراه روش‌های کلاسیک ترکیب باند و نسبت باندی و آنالیز مؤلفه اصلی و SAM به کار برده شد و در نهایت، هدف این تحقیق، میسر شد و ضمن معرفی دو منطقه با احتمال حضور مناسب برای لیتیم توانایی بالای الگوریتم پیشینه آنتروپی در قیاس با روش‌های پردازش تصویر کلاسیک مشخص شد.

۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مطابق با گزارش بهمن ماه سال (۱۳۹۵) سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو)، منطقه‌ای در دق پترگان (نگاره ۱)، در شهرستان زیرکوه استان خراسان جنوبی، به‌عنوان منطقه محتمل به حضور منابع لیتیم شناسایی شده است و همچنان عملیات اکتشاف در آن ادامه دارد. محدوده مورد نظر، بین طول‌های جغرافیایی ۳۳° 33' تا ۳۳° 48' 60 شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳° 20' تا ۳۳° 31' شمالی و با مساحت حدودی ۲۱۵۵۰ هکتار در حوزه دق پترگان واقع شده است. دشت دق پترگان در استان خراسان جنوبی، از شمال به نمکزار خواف و زوزن، از شرق به مرز افغانستان، از جنوب به محدوده خوشاب، از غرب به محدوده اسفدن و از جنوب غرب به گزیک آواز محدود شده

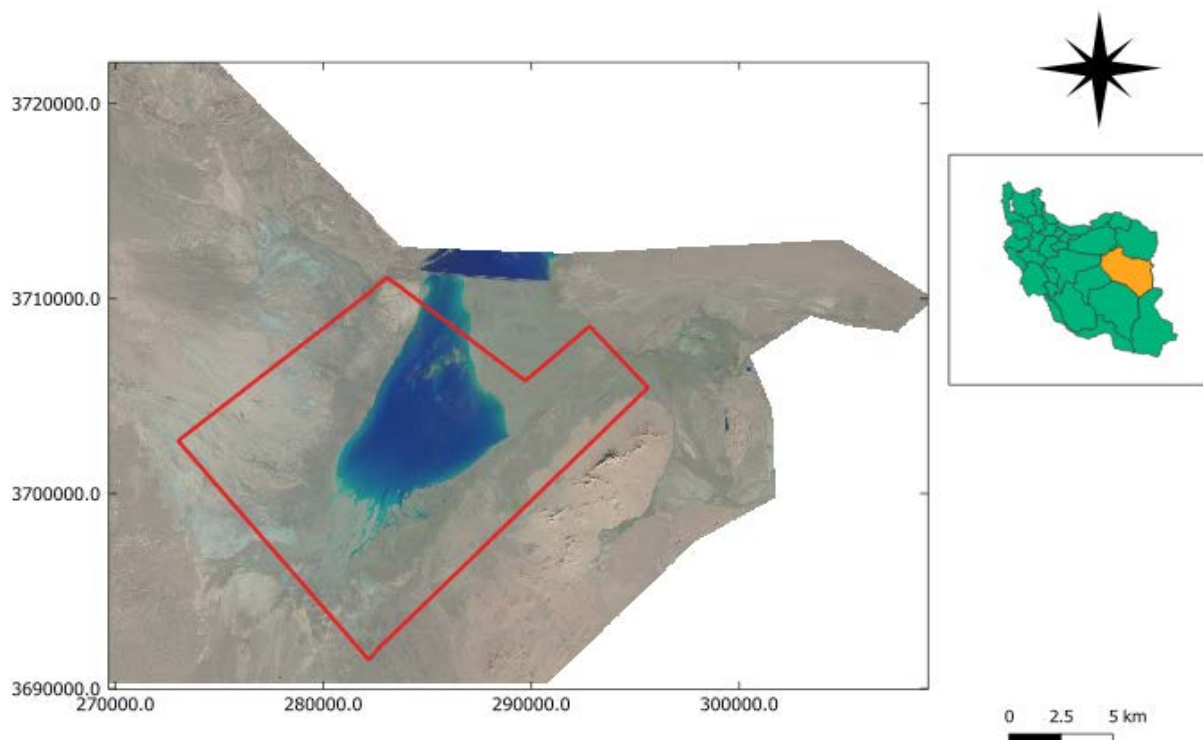
۱-۲-۲- تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ به عنوان داده‌های اولیه استفاده شدند. زیرا مواد معدنی، ویژگی‌های جذب مهمی در طول موج‌های مختلف، به خصوص در نواحی مرئی و مادون قرمز دارند که برای شناسایی این ویژگی‌ها، داده‌های سنتینل-۲، امتحان خود را پس داده‌اند و همواره توسط پژوهشگران زیادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. (Cardoso-Fernandes, et al. 2018) (Cardoso-Fernandes, et al. 2019) (Köhler, et al. 2020).

۲-۲-۲- منابع لیتیم

نظر به اینکه بخشی از داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، مربوط به محدوده معادن مطرح و شناخته شده موجود در سراسر جهان است، ابتدا به معرفی انواع منابع اصلی لیتیم پرداخته شد. ذخایر لیتیم به شکل شورابه، پگماتیت و سنگ‌های رسوبی یافت می‌شوند (Gruber, et al. 2011). پراکندگی جهان برای لیتیم به‌طوری است که حدود ۶۲ درصد شورابه‌ای و ۳۸ درصد سنگ معدنی است (Grosjean,

2012). پگماتیت، در واقع نامی است که به سنگ آذرین دانه درشت داده می‌شود. پگماتیت‌های گرانیتی منبع مهمی از فلزات کمیاب از جمله لیتیم، قلع، تانتالم، نیوبیم، بریلیم، سزیم، روبیدیم، اسکاندیم، اسکاندیم، توریم، اورانیوم و خاک‌های کمیاب هستند (London 1986). دسته‌ی دیگر از منابع لیتیم، به صورت شورابه‌ای هستند. شورابه‌ها آب‌های شوری هستند که به دلیل تبخیر آب، دارای نمک زیاد هستند و مواد معدنی مانند لیتیم در تخلخل سنگ‌های آن‌ها به دام می‌افتند (Gruber, et al. 2011). لیدولیت، اسپودومن و پتالیت کانی‌های شاخص لیتیم هستند که دارای ویژگی‌های جذبی قابل توجهی در باندهای با طول موج تقریباً یکسان، هستند. (Cardoso-Fernandes, et al. 2021) با توجه به بخش (۱-۲) خصوصیات زمین‌شناسی منطقه به گونه‌ای است که پیش‌بینی می‌شود منبع لیتیم موجود در دق پترگان از نوع شورابه‌ای باشد، اما در آموزش مدل معادن با منابع لیتیم مختلف مورد استفاده قرار گرفت تا کلیه احتمالات حضور لیتیم در نظر گرفته شود.



نگاره ۱: منطقه مطالعاتی دشت دق پترگان

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (س)

داده‌های سنجش از دور برای نقشه‌برداری لیتیم در منطقه دق پترگان ایران و ... / ۳۱

از معادن بزرگ لیتیم جهان هستند. معدن Jajika واقع در چین نیز از معادن پگماتیتی است. معدن Kings Mountain Volta و Mibra است معدن در ایالت کارولینای امریکا واقع در برزیل شامل عناصر مختلف و همچنین لیتیم هستند. معدن Tanco در مجاورت دریاچه برنیک کانادا دارای سزیم لیتیم تانتالیوم است. در نگاره‌های ۲ و ۳ تصویر معدن معروف نشان داده شده است.

۱-۲-۲-۲- موقعیت مکانی و اطلاعات مربوط به معادن لیتیم مطرح دنیا

دوازده معدن مطرح جهان شامل معادن Feli, Alberto, Bajoca که در مرز اسپانیا و پرتغال قرار دارند و این منطقه شامل پگماتیتهای مختلف که در سنگ‌های رسوبی نفوذ کرده‌اند است و معدن Bikita در زیمبابوه واقع شده که سرشار از عناصر لیتیم تانتالیوم قلع و... است و معدن Green Mount marion, Mount catlin, bushes واقع در استرالیا که



نگاره ۲: تصویر معدن Mount marion



نگاره ۳: تصویر معدن Green bushes

۳-۲- روش های مورد استفاده

۱-۳-۲- الگوریتم بیشینه انترپی (MAXENT)

مدل های توزیع گونه ها (SDMs)، رابطه بین حضور گونه ها در مکان ها و ویژگی های محیطی آن مکان ها را تخمین می زنند (Franklin 2010). ویژگی ها یا متغیرها در روش های SDM شامل عوامل محیطی مربوط به منطقه مطالعاتی است که متناسب با هدف انتخاب می شوند (Austin 2002). یکی از پرکاربردترین روش های SDM، مدل بیشینه انترپی است که عملکرد مدل سازی آن به طور مداوم با روش هایی با عملکرد بالا در رقابت است (Elith et al. 2006).

در مورد بیشینه انترپی اصطلاحاتی وجود دارد که برای استفاده از این مدل، آگاهی از آن ها لازم است. یکی از این اصطلاحات، منطقه جغرافیایی پیشنهادی (L) متناسب با موضع است. به زبانی ساده تر، منظور از L، منطقه ای است که مدل باید توسط داده های مربوط به آن تربیت شود. L1، زیرمجموعه ای از L است، که گونه در آن حضور دارد و با عنوان (نمونه های وقوع) تعریف می شوند و علاوه بر این، متغیرهای کمکی مرتبط نیز که در اصطلاح، به آن ها نمونه های پس زمینه (عدم وقوع) گفته می شود تعریف می شوند. موقعیت مکانی این نمونه ها با روش های مختلفی از جمله روش تصادفی و همچنین روش شبکه بندی تعیین می شود که روش شبکه بندی می تواند این اطمینان را بدهد که کل منطقه، با گام هایی مشخص پوشش داده شود. همانطور که در بخش (۲-۲) گفته شد، داده های مورد استفاده در این تحقیق، محدوده برخی معادن لیتیم و تصاویر ماهواره ای آن ها و همچنین تصاویر ماهواره ای مربوط به منطقه مطالعاتی دق پترگان است لذا باندهای (سنتینل-۲) به عنوان متغیرهای محیطی و همچنین محدوده ی معادن لیتیم شناخته شده، به عنوان مناطق نمونه های حضور لیتیم در نظر گرفته شدند. مدل سازی توزیع نمونه ها صرفاً با داده های وقوع (مناطق حضور کانی های لیتیم) انجام می شود. خروجی این الگوریتم از نوع احتمال است و نشان دهنده میزان پتانسیل حضور نمونه های وقوع است.

۲-۳-۲- روش های کلاسیک سنجش ازدوری

۱-۲-۳-۲- نتایج ترکیب باند RGB

ترکیب باند یک تکنیک بهبود تصویر است، که با ترکیبی از باندهای مختلف طیفی و حرارتی یک ترکیب رنگی تولید می کند که تغییرات از نظر حرارتی و واحدهای زمین شناسی را در مقیاس منطقه ای بارزتر می کند (Pour et al. 2015).

۲-۲-۳-۲- نسبت باندی

نسبت باند یک تکنیک استخراج اطلاعات از باندهای تصویر است که از تقسیم یک باند بر باند دیگر با هدف برجسته سازی تفاوت های طیفی خاص حاصل می شود. نسبت ها براساس قله ها و فرورفتگی های منحنی بازتاب هستند (Ali et al. 2014).

۳-۲-۳-۲- تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه های اصلی یک تکنیک آماری قدرتمند است که می تواند برای کاهش نویز اثرات تابشی که بر همه باندها غالب است، استفاده شود؛ بنابراین بازتاب طیفی عارضه های زمین را بهبود می بخشد (Crosta, et al. 2003). تبدیل تعدادی از باندهای همبسته به تعدادی باند ناهمبسته، آنالیز مؤلفه اصلی نامیده می شود. باندهای تصویر اغلب دارای همبستگی زیادی باهم هستند، تحلیل مؤلفه های اصلی اطلاعات مشابه و اطلاعات اضافی باندها، را ضمن حفظ و نگهداری اطلاعات اصلی موجود، کاهش می دهد (Moghtaderi, et al. 2007, Gupta 2017).

۴-۲-۳-۲- SAM

یک روش طبقه بندی است که از شباهت طیفی بین طیف بازتابش هر پیکسل و طیف بازتابش مرجع، برای طبقه بندی استفاده می کند. الگوریتم شباهت طیفی را با محاسبه زاویه طیفی بین هر پیکسل و طیف مرجع در یک فضای n بعدی که n تعداد باندها است بررسی می کند و یک پیکسل با کوچک ترین زاویه طیفی که نشان دهنده تطابق نزدیک تری

با کلاس مرجع است به یک کلاس خاص اختصاص داده می‌شود (Lee, et al. 2022).

۳- بحث و یافته‌های تحقیق

۳-۱- پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای

تصاویر بدون ابر، ماهواره‌ای سنتینل-۲ برای ۱۲ معدن شناخته شده لیتیم در نقاط مختلف دنیا و همچنین برای منطقه مطالعاتی (دق پترگان) از سایت usgu بارگیری شدند. در شناسایی لیتیم، قبل از استفاده از باندهای تصاویر ماهواره‌ای، بازتاب سطح زمین برای آن‌ها محاسبه شد.

۳-۲- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

به‌منظور پهنه‌بندی منطقه دق پترگان روش‌های پردازش تصویر کلاسیک شامل ترکیب باند و نسبت باندی و آنالیز مؤلفه اصلی و SAM در محیط نرم‌افزار ENVI اجرا شدند. همچنین مدل‌سازی با روش بیشینه انتروپی، به کمک نرم‌افزارهای QGIS و MaxEnt و با برنامه‌نویسی به زبان پایتون انجام شد.

۳-۳- آماده‌سازی داده‌ها برای مدل‌سازی

۳-۳-۱- ایجاد شبکه‌ای از نمونه‌های وقوع (نقاط حضور لیتیم)

محدوده معادن شناخته‌شده لیتیم جهان به‌عنوان مناطق وقوع در نظر گرفته شدند و بنابراین نمونه‌هایی به‌صورت نقطه، که هر نقطه بیانگر یک موقعیت مکانی است، در محدوده معادن تولید شدند. به‌این منظور، به‌صورت شبکه‌بندی شده و با فواصل ۲۰۰ متری در طول و عرض جغرافیایی، نقاط وقوع تولید شدند. کم بودن میزان این فواصل، باعث می‌شود که نمونه‌ها، بدون دارا بودن اطلاعات جدید، سرعت پردازش را به‌شدت کاهش دهند، در نتیجه این فواصل طوری انتخاب شدند که نه الگوریتم از اطلاعات جدید محروم بماند و نه سرعت پردازش کاهش چشمگیری پیدا کند.

۳-۲-۲- ایجاد شبکه‌ای از نمونه‌های پس‌زمینه
دو نگرش کلی برای انتخاب موقعیت نمونه‌های پس‌زمینه وجود دارد که مطابق با نگرش اول، نمونه‌های پس‌زمینه در واقع همان نمونه‌های عدم وقوع یا شبه-عدم وقوع هستند و بیانگر موقعیت‌هایی هستند که گونه‌های هدف (کانی‌های شاخص لیتیم) در آن وجود ندارند (Radosavljevic et al 2014) و مطابق با نگرش دوم، از آنجا که بیشینه انتروپی صرفاً با نمونه‌های وقوع به مدل‌سازی می‌پردازد، ممکن است در میان نمونه‌های پس‌زمینه، نمونه‌هایی باشند که به‌عنوان نمونه وقوع شناخته شوند و وجود این نمونه‌ها، مشکلی در فرآیند مدل‌سازی ایجاد نمی‌کند (Phillips, et al. 2006). سعی شد از ترکیبی از هر دو نگرش برای انتخاب موقعیت نمونه‌های پس‌زمینه استفاده شود، از آنجا که نگرش دوم، حساسیت‌های تعیین مقدار این فواصل را از بین می‌برد، این مقادیر به‌طور تقریبی برابر با ۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ متر در نظر گرفته شدند. با توجه به اینکه، محدوده‌ی در نظر گرفته شده برای نمونه‌های پس‌زمینه در محدوده میان بافرهای ۲۵۰۰ و ۵۰۰۰ متری است، فضای بزرگ‌تری را به نسبت مناطق وقوع شامل می‌شوند و انتخاب آن‌ها مطابق با آنچه گفته شد از حساسیت کمتری برخوردار است. بنابراین به جای شبکه‌ای از نقاط با فواصل ۲۰۰ متری، از فاصله ۱۰۰۰ متر برای انتخاب موقعیت آن‌ها استفاده شد.

۳-۳-۲- تعیین متغیرهای الگوریتم بیشینه انتروپی

ماهواره سنتینل-۲ دارای ۱۳ باند در طول موج‌های مختلف است، به‌منظور بارزسازی بهتر تفاوت‌های طیفی، به‌همراه کلیه‌ی نسبت‌های باندیشان به‌عنوان متغیرهای محیطی در نظر گرفته شدند. در مدل‌سازی، تفاوتی ندارد که خود یک متغیر استفاده شود یا معکوس آن، زیرا بعد از فرایند آموزش، مدل می‌تواند تشخیص دهد که از یک متغیر به چه صورت (مستقیم یا معکوس) استفاده کند. با در نظر گرفتن نکته مذکور، تمامی نسبت‌های ممکن از ۱۳ باند مختلف مربوط به معادن شناخته شده، محاسبه شدند و به‌همراه خود باندها، ۹۱ متغیر تشکیل شد.

۳-۵- محاسبه وابستگی بین متغیرهای ورودی و محاسبه مقادیر متغیرهای منتخب برای نمونه‌ها

۳-۶- محاسبه مقادیر متغیرهای منتخب برای منطقه مطالعاتی دق پترگان

پس از آنکه متغیرهای دارای وابستگی قابل قبول، توسط شاخص VIF شناسایی شدند، به وسیله باندهای تصاویر مربوط به محدوده منطقه دق پترگان، مقادیر این متغیرهای منتخب محاسبه و آماده ورود برای مدل‌سازی شدند.

۳-۷- مدل‌سازی با الگوریتم حداکثر آنتروپی

به‌طور معمول، برای آموزش مدل بیشینه آنتروپی، از یک منطقه واحد استفاده می‌شود و باندهای تصویر آن منطقه در مدل‌سازی به کار می‌روند، اما در تحقیق حاضر برای آموزش مدل از محدوده معادن مختلف که در سراسر دنیا قرار دارند استفاده شد. لذا منطقی و بهینه نیست که تصاویری به وسعت کره زمین تهیه و در مدل‌سازی استفاده شوند، زیرا علاوه بر نیاز به حجم حافظه ذخیره‌سازی و پردازشی بسیار بالا، فرآیند آموزش مدل بسیار کند انجام خواهد شد و همچنین ممکن است نمونه‌های پس‌زمینه در مناطق بسیار دور افتاده از محدوده معادن انتخاب شوند. برای حل این مشکل، امکان استفاده از نمونه‌ها به همراه داده (SWD) در نرم‌افزار بیشینه آنتروپی قرار داده شده است. در صورت بهره‌گیری از این ویژگی، مقدار متغیرها برای نمونه‌ها، به‌طور مستقیم، از ماتریس تشکیل شده در بخش ۳-۵ فراخوانی می‌شود.

پس از طی مراحل که بیان شد داده‌ها، که شامل الف) نمونه‌های وقوع با عنوان Samples. ب) نمونه‌های پس‌زمینه با عنوان Environmental layers ج) مقادیر متغیرهای منتخب مربوط به منطقه دق پترگان، در نرم‌افزار معرفی شدند. همچنین این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم Jackknife طی فرایند مدل‌سازی می‌تواند به تعیین اهمیت نسبی هریک از متغیرهای ورودی بپردازد.

برای نمونه‌های وقوع و پس زمینه، باید مقدار متغیرها (شامل باندها و نسبت‌های باندی آن‌ها) از تصاویر استخراج شود و برای آموزش مدل به کار روند، قبل از آن لازم است که همبستگی میان متغیرها بررسی شود. وجود همبستگی میان متغیرهای مختلف، امری طبیعی است و ممکن است پس از بررسی میزان همبستگی، بسیاری از متغیرها کنار گذاشته شوند. برای بررسی میزان همبستگی میان متغیرها و کنار گذاشتن (حذف) متغیرها با همبستگی بالا، از شاخص عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. برای هر متغیر اگر مقدار شاخص VIF بیشتر از ۱۰ بود، آن متغیر کنار گذاشته شد و در آخر ۱۶ متغیر با همبستگی مناسب به دست آمد (جدول ۱).

جدول ۱: متغیرهای منتخب با محاسبه شاخص تورم واریانس

متغیرهای منتخب	VIF
B10	1.99
B03/B04	2.18
B02/B03	2.32
B01/B02	2.62
B05/B11	2.92
B06/B07	2.93
B07/B8A	3.74
B06/B08	3.75
B8A/B09	3.97
B04/B05	4.19
B08/B8A	4.38
B11/B12	4.61
B09/B10	5.50
B10/B11	5.58
B01/B10	6.75
B09/B11	7.17

سپس از تصاویر مربوط به محدوده دورازده معادن لیتیم مقدار این متغیرها برای نمونه‌های وقوع و پس‌زمینه محاسبه شد و این مقادیر به تفکیک در دو ماتریس به همراه مختصات

۳-۸- نتایج

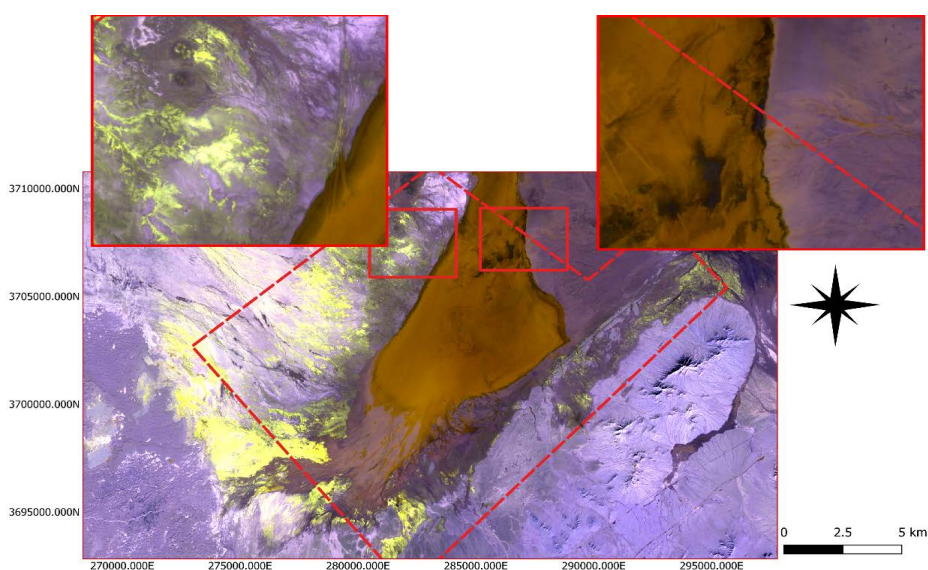
۳-۸-۱- نتایج ترکیب باند RGB

شهری و مزارع به رنگ سفید و زرد روشن ظاهر شدند.

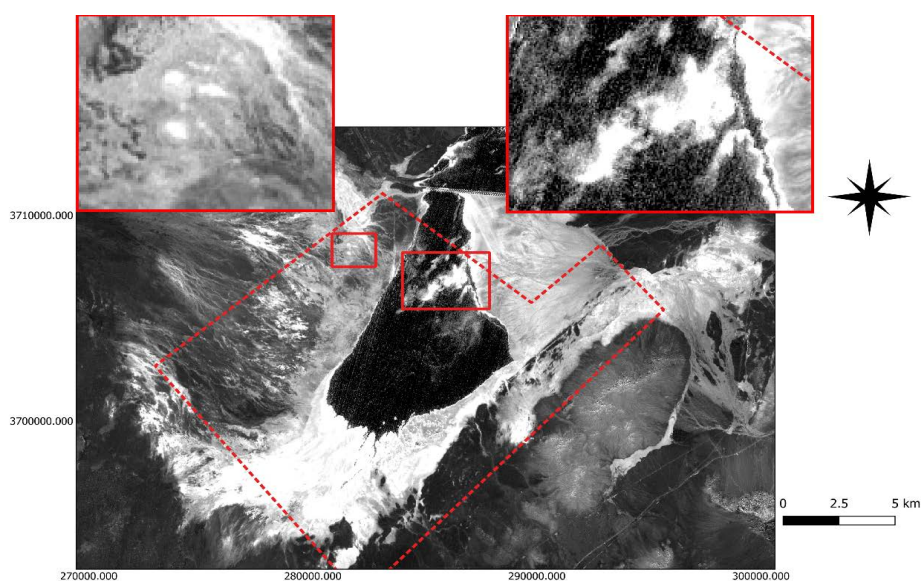
۳-۸-۲- نتایج نسبت باندی

کلیه نسبت‌های باندی شاخته شده و پیشنهادی در منطقه مطالعاتی پیاده‌سازی شدند، از بین آن‌ها نسبت باندی ۱۱/۱۲ بارزسازی مناسب‌تری را ارائه داد اما همانطور که در (نگاره ۵) مشخص است، پیکسل‌های زیادی روشن شده‌اند.

از بین ترکیب‌های شناخته شده برای سنجنده‌ی ستینل-۲، ترکیب ۳۲۱۲ انتخاب شد، که نسبت به سایر ترکیب‌ها قادر به برجسته‌سازی مناسب‌تری برای کانی‌های شاخص لیتیم در منطقه است (نگاره ۴). با استفاده از این ترکیب مناطق حضور لیتیم به رنگ زرد و همچنین مناطق



نگاره ۴: نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی توسط ترکیب ۳۲۱۲



نگاره ۵: نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی (دق پترگان) توسط نسبت باند ۱۱/۱۲

۳-۸-۳- نتایج آنالیز مؤلفه اصلی

تصاویر معادن لیتیم استفاده شد. در نهایت بارزسازی در محدوده مطالعاتی انجام شد و تعدادی از پیکسل‌ها برجسته شدند (نگاره ۷).

به منظور ایجاد نقشه کانی‌های شاخص لیتیم، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی به صورت انتخابی و بر روی باندهای سنجنده سستینل-۲ انجام شد. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر بردار ویژه در مؤلفه اصلی ۱۰ بیشترین تفاوت را نشان می‌دهد، بنابراین انتخاب شد و در تصویر حاصل پیکسل‌هایی روشن شدند و بارزسازی انجام شد (نگاره ۶).

جدول ۲: مقادیر بردارهای ویژه باندهای انتخابی

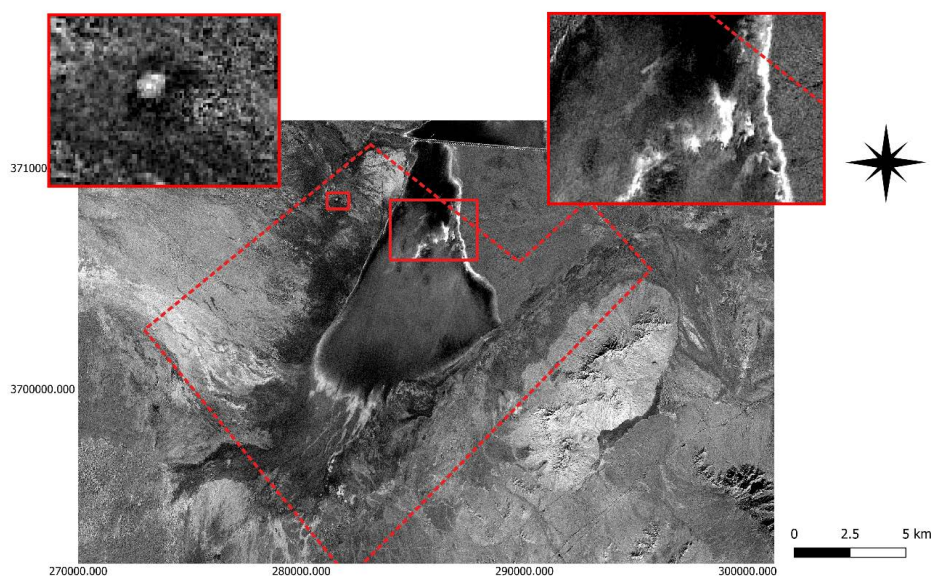
	BAND11	BAND12
PC2	-0.001410	0.006556
PC3	0.029351	0.008696
PC8	-0.065797	-0.054708
PC10	-0.420272	0.797499

۳-۸-۴- نتایج SAM

۳-۸-۵- نتایج الگوریتم بیشینه آنتروپی
۳-۸-۵-۱- معیار موفقیت مدل‌سازی، شاخص AUC
شاخصی به نام AUC که به معنی مساحت زیر منحنی است (منحنی ROC)، به کار گرفته شد که یک معیار مستقل از آستانه برای دقت پیش‌بینی است و صرفاً بر مبنای رتبه بندی مکان‌ها و در واقع نشان‌دهنده میزان موفقیت مدل در تمایز نمونه‌های وقوع و پس‌زمینه است. هرچه مقدار AUC بیشتر باشد به این معنی است که مدل، عملکرد بهتری دارد و بیشترین مقدار آن می‌تواند ۱ باشد. مقادیر AUC بین ۰/۱ و ۰/۵، به معنی پیش‌بینی تصادفی محل نقاط وقوع، مقادیر بین ۰/۵ و ۰/۷ به معنای عملکرد ضعیف مدل و مقادیر میان ۰/۷ تا ۱ به معنای عملکرد مناسب مدل است.

برای آشکارسازی کانی‌های شاخص لیتیم در محدوده مطالعاتی با استفاده از روش طبقه‌بندی SAM احتیاج به معرفی طیف کانی‌های شاخص لیتیم از یک کتابخانه طیفی یا تصویر است، که در این راستا از طیف‌های مختلف

در نمودار ۱ خط مشکی رنگ نشان‌دهنده مرز میان یک پیش‌بینی تصادفی و غیرتصادفی است که مساحت زیر سطح نمودار آن (AUC) برابر با ۰/۵ است. هرچه نمودار ROC مربوط به داده‌های آموزش و آزمون، از سمت بالا

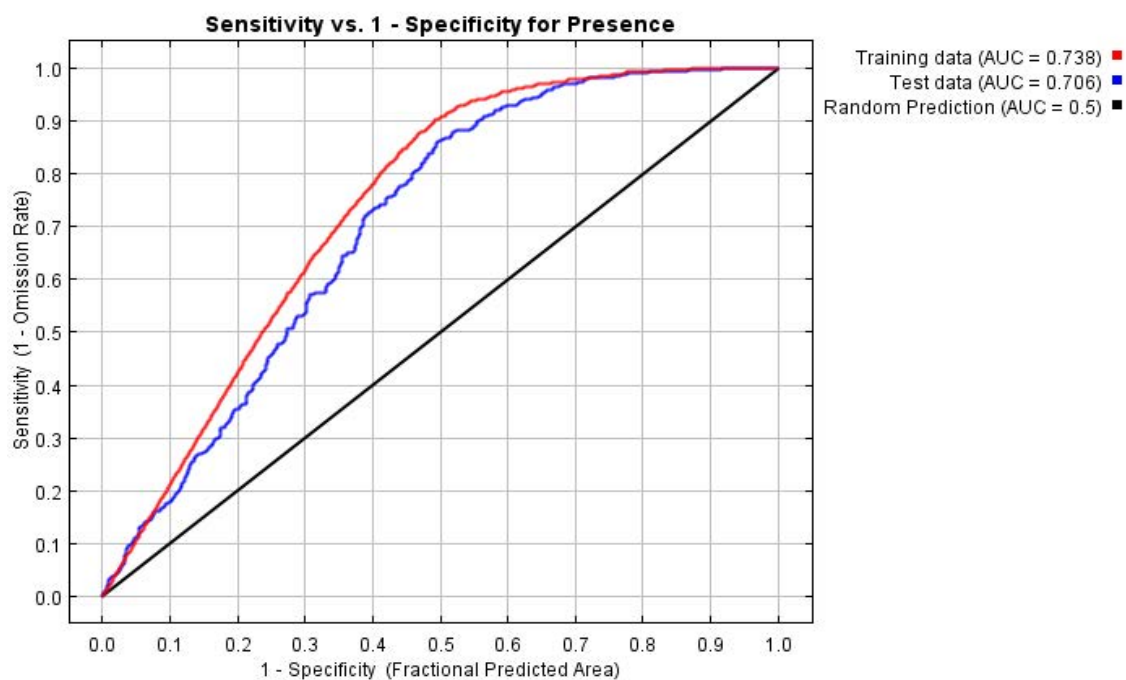


نگاره ۶: نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی (دق پترگان) توسط مؤلفه اصلی ۱۰



نگاره ۷: نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی توسط روش SAM

از آن فاصله داشته باشند، مساحت سطح زیر نمودار بیشتر خواهد بود و به تبع، مقدار AUC بیشتر خواهد شد. در تحقیق حاضر، این نمودارها، از سمت بالا فاصله خوبی با خط مشکی رنگ دارند و مقدار AUC برای داده‌های آموزش و آزمون، به ترتیب برابر با ۰/۷۳۸ و ۰/۷۰۶ محاسبه شد که چون بیشتر از ۰/۷ شده است، می‌توان نتیجه گرفت که مدل، عملکرد مناسبی در مدل‌سازی با نمونه‌های وقوع داشته است.



نمودار ۱: ROC مدل بیشینه آنتروپی، بر حسب مقدار AUC

۳-۸-۵-۲- اهمیت نسبی متغیرهای ورودی در فرایند

مدل سازی پیشینه آنتروپی

ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای ورودی، حاوی اطلاعات ارزشمندی است که انتخاب متغیرها برای استفاده در مدل سازی را محدود می کند و موجب تسهیل در انجام مدل سازی می شود. در مدل سازی پیشینه آنتروپی، برای تعیین اهمیت و سهم نسبی متغیرهای ورودی در پیش بینی نمونه های وقوع، الگوریتم Jackknife به کار برده شد. الف) رویکرد اول، مدل سازی تنها با یکی از متغیرهای ورودی انجام می شود و این کار به ازای تمامی متغیرهای ورودی تکرار می شود. متغیری که بتواند به تنهایی به عملکرد بهتری در پیش بینی برسد، اهمیت نسبی بالاتری نسبت به دیگر متغیرهای ورودی دارد.

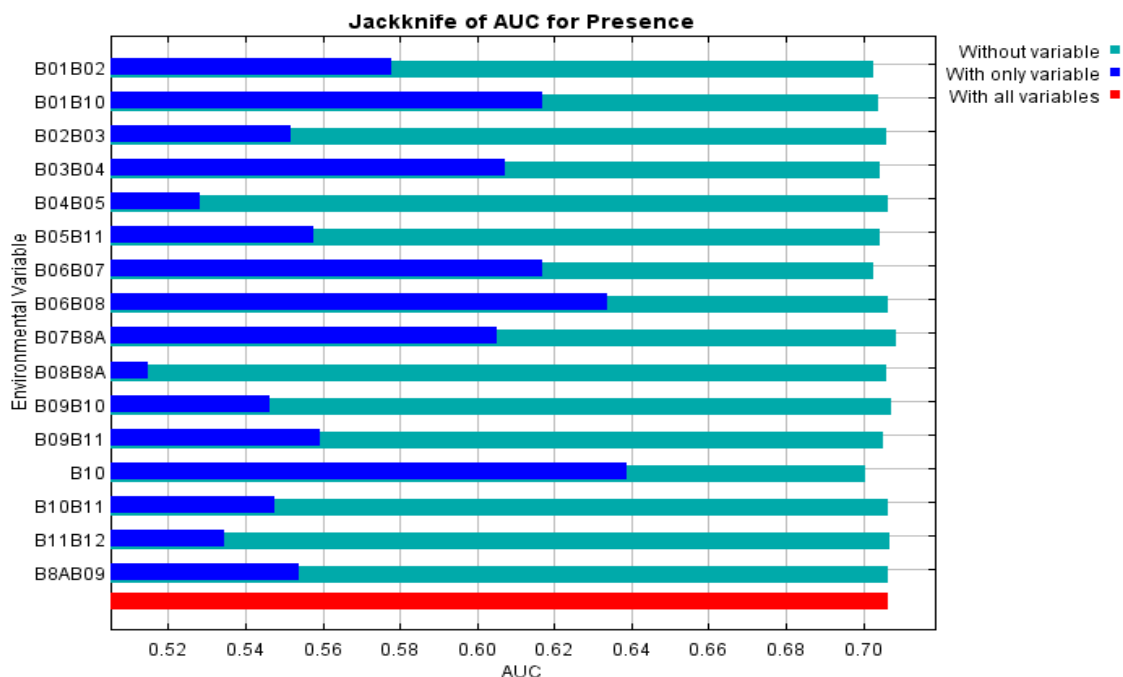
ب) رویکرد دوم، مدل سازی هر بار با تمامی پارامترها انجام می شود و تنها یکی از آنها کنار گذاشته می شود. به این ترتیب، متغیری که در فقدان آن، عملکرد مدل کاهش بیشتری داشته باشد، از اهمیت نسبی بالاتری به نسبت دیگر متغیرهای ورودی برخوردار است.

در نمودار ۲، رنگ آبی مربوط به رویکرد اول و رنگ فیروزه ای مربوط به رویکرد دوم است. هرچه مقدار نمودار آبی به ازای یک متغیر بیشتر باشد و مقدار نمودار فیروزه ای کمتر باشد، آن متغیر از اهمیت نسبی بیشتری برخوردار است. نمودار قرمز رنگ نیز مقادیر مربوطه را، با حضور تمامی متغیرهای ورودی مدل، نشان می دهد. براساس نمودار ۲ که بر مبنای شاخص AUC محاسبه شده است، متغیرهای B10، B06/B08، B06/B07، B01/B10 و B01/B02 از اهمیت نسبی بالایی برخوردارند که نشان می دهد، اطلاعاتی در آنها نهفته است که در سایر متغیرها کمتر است.

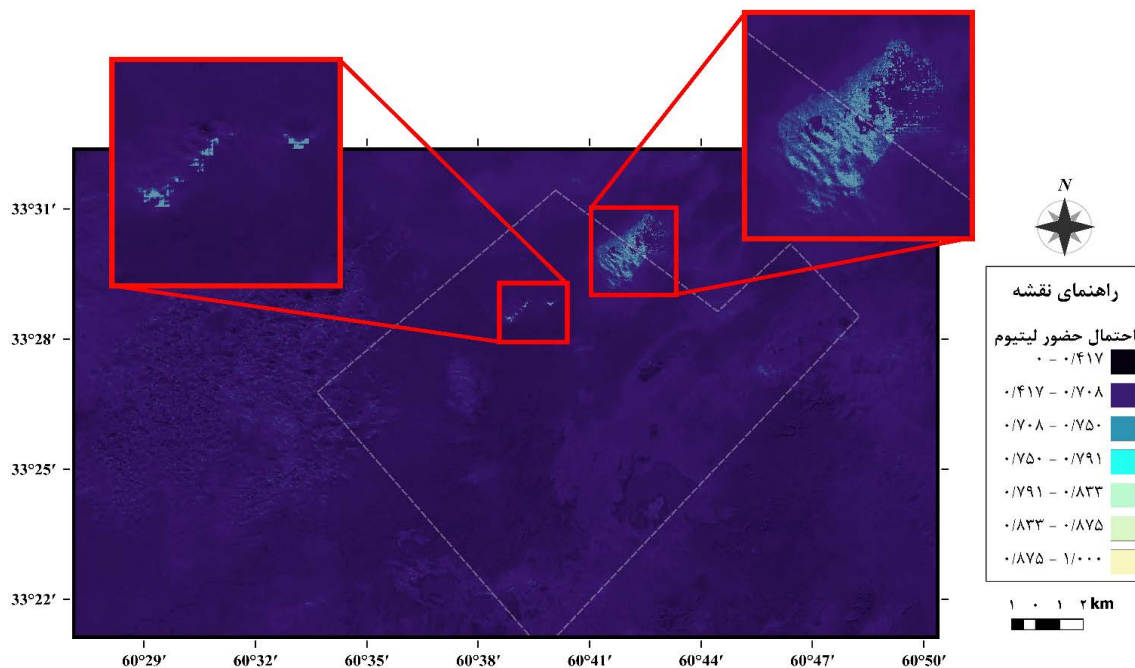
۳-۸-۵-۳- نقشه ی پهنه بندی منطقه مورد مطالعه با روش

پیشینه آنتروپی

پس از طی تمامی مراحل آماده سازی داده ها و انجام مدل سازی توسط نرم افزار پیشینه آنتروپی، پهنه بندی منطقه مطالعاتی انجام شد که میزان احتمال حضور لیتیم برای هر پیکسل از منطقه را برآورد می کند و این نتایج در نهایت، در یک تصویر زمین مرجع شده (نگاره ۸) نشان داده شد.



نمودار ۲: اهمیت نسبی متغیرهای ورودی بر مبنای شاخص AUC و با الگوریتم روش Jackknife



نگاره ۸: نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی توسط مدل پیشینه آنتروپی

لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره ساز انرژی در دنیا از تکمیل عملیات اکتشاف عمومی ذخایر دق پترگان خبر داد. بدیهی است که اگر چه در این تحقیق احتمال حضور کانی‌های شاخص لیتیم سنجیده شد اما این گزارش‌ها می‌توانند گواهی بر صحت پتانسیل‌یابی‌های معدنی از طریق سنجش از دور باشند.

۳-۹-۱- محاسبه دقت پهنه‌بندی

یکی از مراحل نهایی پهنه‌بندی تصویر ارزیابی دقت است که هدف آن مشخص کردن کمیت اختصاص صحیح پیکسل‌های تصویر به کلاس‌های مورد نظر است. پیش‌تر از طریق شاخص AUC نحوه‌ی عملکرد الگوریتم پیشینه آنتروپی ارزیابی شد و نتایج مناسبی به‌دست آمد. به‌منظور مقایسه روش‌ها مجدداً یک ارزیابی انجام شد. مطابق با پیکسل‌های تصاویر ماتریس خطا در محدوده مطالعاتی دق پترگان (نگاره ۱) با استفاده از نقاطی که به‌عنوان حضور لیتیم در نظر گرفته شدند و کلیه نقاط برای هر روش تعیین شد و با استفاده از این ماتریس دقت کلی و آنالیز کاپا محاسبه شدند. نتایج دقت کلی و آنالیز کاپا در جدول ۳- نشان داده شده‌اند.

مطابق با نتیجه پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی (خط مقطع با رنگ روشن)، دو قسمت مختلف به‌عنوان مناطق محتمل حاوی کانی‌های شاخص لیتیم شناسایی شدند. منطقه اول با موقعیت جغرافیایی تقریبی ۶۰° ۳۹' شرقی و ۳۳° ۲۸' شمالی به مساحت تقریبی ۳۳۷۴ هکتار و دیگری در موقعیت جغرافیایی تقریبی ۶۰° ۴۱' شرقی و ۳۳° ۲۹' شمالی به مساحت تقریبی ۲۲۵ هکتار واقع شده است که به وضوح از سایر مناطق قابل تمایز هستند و به خوبی بارزسازی شدند.

۳-۹-۲- اعتبارسنجی

عملیات اکتشاف محدوده دق پترگان استان خراسان جنوبی توسط سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران انجام شد. نتایج آن در گزارشی تحت عنوان پهنه‌های اکتشافی ایمیدرو در سال (۱۳۹۵) منتشر و عملیات اکتشاف در فاز پی‌جویی و شناسایی اولیه اعلام شد. نگاره (۱) طبق این گزارش محدوده دق پترگان را مشخص می‌کند. در گزارش دیگری در سال (۱۳۹۷) تحت عنوان بررسی پتانسیل‌های کشور برای اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز

جدول ۳: ارزیابی دقت کلی و ضریب کاپا

ضریب کاپا	دقت کلی	روش پهنه‌بندی
0.877516	0.943565	مدل بیشینه آنتروپی
0.597037	0.641975	ترکیب باند
0.798418	0.858514	نسبت باندی
0.785653	0.844788	تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی
0.597037	0.641975	روش SAM

۳-۱۰- بحث

در سنجش از دور، مناطق معدنی عمدتاً از طریق تغییرات هاله‌های مرتبط شناسایی می‌شوند. به این منظور در مطالعه حاضر چند روش شناخته شده و کلاسیک پردازش تصویر، به کار برده شد. در تحقیق مشابهی (Cardoso-Fernandes, et al., 2019) ترکیب رنگی ۳۲۱۲ را اعمال کردند در نتیجه مناطقی با رنگ زرد روشن حاصل شد که علاوه بر مناطق حضور لیتیم مناطق شهری را نیز به رنگ زرد روشن نشان دادند که با نتیجه کاربرد ترکیب باندی ۳۲۱۲ در منطقه مطالعاتی دق پترگان هم‌خوانی داشت (نگاره ۴). وجود باند حرارتی نقش کلیدی در بارزسازی لیتیم با تکنیک ترکیب باند دارد اما در ترکیب پیشنهادی ۳۲۱۲ از آنجایی که سنجنده سستینل-۲ باند حرارتی در دسترس ندارد، باند حرارتی با یک باند SWIR جایگزین شد. تشابه رنگی برای مناطق محتمل حضور لیتیم و مناطق شهری و مزارع مانع استفاده آن به تنهایی برای آشکارسازی است و لذا ترکیب باند ۳۲۱۲، اگرچه در کنار سایر روش‌های پردازش تصویر می‌تواند اطلاعات مناسبی ارائه دهد اما به تنهایی تمایز مناسبی برای مناطق محتمل حضور لیتیم، ندارد و برای بررسی پاسخ‌های مشابه باید مطالعات طیفی و میدانی انجام شود.

پس از آزمودن نسبت‌های باندی مختلف سرانجام نسبت باندی ۱۱/۱۲ پیشنهادی (Pour et al 2015) به منظور بارزسازی تغییرات معدنی، مورد استفاده قرار گرفت (نگاره ۵). پیکسل‌های بسیار زیادی در منطقه با رنگ روشن نمایان شد که تشخیص مناطق محتمل حضور لیتیم را دشوار ساخت و با توجه به ضریب کاپا و دقت کلی ۰/۶۴۱۹۷۵ و ۰/۵۹۷۰۳۷

پهنه‌بندی تقریباً تصادفی حاصل شد. به طور کلی، نسبت باند در شناسایی با شکست مواجه شد و با توجه به تحقیقات پیشین (Pour et al 2015) می‌توان گفت این روش در مقیاس کوچک و در مناطق معدنی در حال بهره‌برداری نتایج بهتری ارائه می‌دهد. البته به کارگیری تصاویر ماهواره‌ای با وضوح طیفی بالاتر می‌تواند منجر به راندمان بالاتر در تهیه نقشه و تفکیک مواد معدنی شود.

PCA انتخابی برای برجسته‌سازی لیتیم به کار برده شده در نگاره ۶، PC10 مناطقی زیادی را به صورت روشن نشان داد (Cardoso-Fernandes, et al. (2019) نیز از PCA انتخابی برای بارزسازی لیتیم استفاده کردند و در نتیجه بعضی از مناطق شهری و زمین‌های کشاورزی به صورت پیکسل‌های روشن نشان داده شدند که بر لزوم حذف این مناطق در فرایند پردازش تصویر تأکید می‌کند. در روش SAM از طیف تصاویر معادن مختلف لیتیم و طیف‌های کتابخانه‌ی طیفی مربوط به کانی‌های شاخص لیتیم استفاده شد. تعدادی از پیکسل‌ها بارز شدند، که البته یکی از مناطق بارز شده در روش بیشینه آنتروپی را نیز تقریباً برجسته نموده است (نگاره ۷). البته برای بهبود عملکرد این روش می‌توان از طیف‌سنجی برای داده‌های زمینی کمک گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج مربوط به روش‌های کلاسیک پردازش تصویر در شناسایی لیتیم، نشان می‌دهد که اگرچه بعضی از این روش‌ها مناطق بارز شده توسط الگوریتم بیشینه آنتروپی را نیز بارز کردند، اما بر لزوم توصیف تغییرات مرتبط با کانی‌های شاخص لیتیم از طریق الگوریتم‌های سنجش از دور نظارت شده تأکید می‌کنند. (Shevyrev et al (2022) برای اکتشاف منابع معدنی مختلف در مناطق استراتژیک و دور افتاده و با مشکل دسترسی، از مدل پیش‌بینی بیشینه آنتروپی استفاده کردند و یک نقشه پیش‌بینی معدنی برای کانی‌های مختلف ارائه دادند و به شاخص $AUC = 0.7$ دست یافتند که حاکی از عملکرد مناسب مدل‌سازی بود. در اینجا نیز مدل بیشینه آنتروپی با استفاده از شاخص AUC ارزیابی شد و مقدار AUC آن ۰/۷۰۶ به دست آمد (نمودار ۱)،

بنابراین نقاط بیشتری به‌طور کاذب ارائه دادند. مدل‌سازی بیشینه آنتروپی روشی نظارت شده است و با ویژگی‌های منحصر به فرد خود ابزاری قدرتمند برای استخراج ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای است و توانست نقاط کاذب مثبت کمتری در مقیاس بزرگ ارائه دهد. ارزیابی دقت کلی و ضریب کاپای محاسبه شده برای روش‌های مختلف، نشان داد که مدل بیشینه آنتروپی با میزان دقت کلی ۰/۹۴۳ و ضریب کاپای ۰/۸۷۷ عملکرد مناسب‌تری داشت.

۵- پیشنهادات

تحقیق حاضر، به‌طور خاص هدف پتانسیل‌سنجی منابع لیتیم را دنبال کرد، اما اهداف کلی‌تری را نیز محقق ساخت. به‌طور کلی یک رویکرد خودکار با الگوریتم بیشینه آنتروپی برای اکتشاف منابع لیتیم مختلف ارائه شد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مناطق مختلف و برای اکتشاف منابع گوناگون مورد استفاده قرار گیرد. یک نکته حائز اهمیت، استفاده از حداقل داده‌های ممکن در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی توزیع گونه‌ها است و این، خود یک مزیت مهم برای کار فعلی به حساب می‌آید و با کاهش هزینه‌های نقشه‌برداری میدانی توجه به اکتشاف از طریق سنجش از دور را به خود جلب می‌کند. اما با این حال، طبیعتاً در صورتی که نیاز به دقت و اطمینان بیشتری برای اکتشاف محدوده معادن باشد، داده‌های زمینی می‌توانند عملکرد مدل را بهبود بخشند. به‌عنوان یک پیشنهاد دیگر، می‌توان علاوه بر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، از دیگر داده‌های سنجش از دوری شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست-۸ و ۹ نیز استفاده نمود و با توجه به اینکه میزان همبستگی میان تمامی متغیرها بررسی می‌شود، می‌توان انبوهی از تصاویر ماهواره‌ای مختلف را مورد استفاده قرار داد و در نهایت مشخص می‌شود که چه باندها و شاخص‌هایی برای مدل‌سازی می‌توانند مفید باشند و مشخص می‌شود که هریک چه سهمی در مدل‌سازی داشته‌اند و این نتایج در اختیار محققان و کاوشگران قرار می‌گیرد.

نتایج موفقیت‌آمیز این مدل می‌تواند گواهی بر توانایی پتانسیل‌سنجی معدنی از طریق سنجش از دور، باشد.

۴- نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش، پتانسیل‌سنجی منابع لیتیم، با استفاده از داده‌ها و روش‌های سنجش از دور و مقایسه عملکرد این روش‌ها در راستای نیل به این هدف بود. داده‌های تحقیق حاضر، تصاویر سنجنده سنتینل-۲ و همچنین محدوده معادن شناخته شده جهان بود که هر دو به راحتی قابل تهیه هستند. در محدوده معادن شناخته شده، نمونه‌های حضور لیتیم و نمونه‌های پس‌زمینه (عدم‌حضور لیتیم) انتخاب شدند و برای آن‌ها، متغیرهای مدل‌سازی استخراج شد. به‌منظور جلوگیری از کاهش عملکرد مدل و همچنین برای داشتن اطمینان بیشتر در تفسیر نتایج مدل، همبستگی بین متغیرهای ورودی با شاخص عامل تورم واریانس بررسی شد و متغیرهایی که دارای همبستگی بالا بودند کنار گذاشته شده و مابقی وارد مدل شدند. سپس مدل‌سازی توزیع گونه‌ها توسط مدل بیشینه آنتروپی انجام شد، مقدار شاخص AUC به عدد ۰/۷۰۶ رسید که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌سازی توزیع کانی‌های شاخص لیتیم بود. علاوه بر این، اهمیت نسبی هریک از متغیرها در فرایند مدل‌سازی مشخص شد. از میان تمامی باندهای سنتینل-۲، باندهای B01، B07 و به‌طور خاص، B10 از اهمیت بالایی برخوردار بودند. به‌عنوان نتیجه نهایی مدل بیشینه آنتروپی دو قسمت از منطقه مطالعاتی دق پترگان، به‌عنوان مناطق محتمل منابع لیتیم شناسایی شد که می‌تواند اطلاعات مفیدی را در اختیار کاوشگران قرار دهد. برای مقایسه عملکرد پهنه‌بندی روش بیشینه آنتروپی با روش‌هایی که در تحقیقات پیشین برای پتانسیل‌سنجی معدنی به‌کار برده شده‌اند روش‌های ترکیب باند، نسبت بانندی، آنالیز مؤلفه اصلی انتخابی، SAM نیز پیاده‌سازی شدند و بعضی از آن‌ها نیز مناطق بارز شده توسط مدل بیشینه آنتروپی را برجسته کردند اما در استخراج ویژگی‌های مفید برای پهنه‌بندی عملکرد ضعیفی داشتند،

& Rode-Robles, E. (2020, September). Lithium (Li) Pegmatite Mapping Using Artificial Neural Networks (ANNs): Preliminary Results. In IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 557-560). IEEE.

11- Cardoso-Fernandes, J., Silva, J., Perrotta, M. M., Lima, A., Teodoro, A. C., Ribeiro, M. A., ... & Roda-Robles, E. (2021). Interpretation of the Reflectance Spectra of Lithium (Li) Minerals and Pegmatites: A Case Study for Mineralogical and Lithological Identification in the Fregeneda-Almendra Area. *Remote Sensing*, 13(18), 3688.

12- Crosta, A. P., De Souza Filho, C. R., Azevedo, F., & Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International journal of Remote sensing*, 24(21), 4233-4240.

13- Elith*, J., H. Graham*, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... & E. Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129-151.

14- Franklin, J. (2010). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.

15- Gao, Y., Bagas, L., Li, K., Jin, M., Liu, Y., & Teng, J. (2020). Newly discovered Triassic lithium deposits in the Dahongliutan area, Northwest China: A case study for the detection of lithium-bearing pegmatite deposits in rugged terrains using remote-sensing data and images. *Frontiers in Earth Science*, 8, 591966.

16- Grosjean, C., et al. (2012). "Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(3): 1735-1744.

17- Gruber, P. W., et al. (2011). "Global lithium availability: A constraint for electric vehicles?" *Journal of Industrial Ecology* 15(5): 760-775.

18- Gupta, R. P. (2017). Remote sensing geology. Springer.

منابع و مآخذ

۱- «بررسی پتانسیل‌های کشور به‌منظور اکتشاف، استحصال و بازیافت فلز لیتیم به‌عنوان مهم‌ترین ذخیره‌ساز انرژی در دنیا» ۱۳۹۷. <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1084010>

۲- پهنه‌های اکتشافی ایمیدرو ۱۳۹۵. <https://angouran.impasco.gov.ir>

۳- نخعی، ودیعتی، میرعربی؛ محمد، میثم، علی، ۱۳۸۸. منشاء شوری آب زیرزمینی دشت شاهرخت (خراسان جنوبی)، دومین کنفرانس سراسری آب، بهبهان، <https://civilica.com/doc/83530>

4- Ali, Ahmed SO, & Amin Beiranvand Pour. (2014). Lithological mapping and hydrothermal alteration using Landsat 8 data: a case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan. *International Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(3), 199.

5- Austin, Mike P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological modelling*, 157(2-3), 101-118.

6- Booyesen, R., Lorenz, S., Thiele, S. T., Fuchsloch, W. C., Marais, T., Nex, P. A., & Gloaguen, R. (2022). Accurate hyperspectral imaging of mineralised outcrops: An example from lithium-bearing pegmatites at Uis, Namibia. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112790.

7- Cardoso-Fernandes, J., Lima, A., & Teodoro, A. C. (2018, October). Potential of Sentinel-2 data in the detection of lithium (Li)-bearing pegmatites: a study case. In *Earth resources and environmental remote sensing/ GIS applications IX* (Vol. 10790, pp. 201-215). SPIE.

8- Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A. C., & Lima, A. (2019). Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 10-25.

9- Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A. C., Lima, A., & Roda-Robles, E. (2020). Semi-automatization of support vector machines to map lithium (Li) bearing pegmatites. *Remote Sensing*, 12(14), 2319.

10- Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A. C., Lima, A.,

relacionadas a mineralizações de lítio, gemas e minerais industriais na região do Vale do Jequitinhonha (MG) a partir de imagens ASTER. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12(2005), 1855-1862.

26- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.

27- Pour, A. B., & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 9(2), 155-166.

28- Radosavljevic, A., & Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of biogeography*, 41(4), 629-643.

29- Rostampour, M., Jafari, M., Tavili, A., Azarnivand, H., & Eslami, S. V. (2017). Investigation of Plant species composition and diversity along a soil salinity gradient in margin rangelands of Petregan Playa, Southern Khoresan. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(16), 11-24.

30- Shevyrev, S., & Carranza, E. J. M. (2022). Application of maximum entropy for mineral prospectivity mapping in heavily vegetated areas of Greater Kurile Chain with Landsat 8 data. *Ore Geology Reviews*, 142, 104758.

31- Singh, Y. (2022). Lithium Potential of the Indian Granitic Pegmatites. *Journal of the Geological Society of India*, 98(7), 917-925.

19- Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y. (2019). Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of materials chemistry A*, 7(7), 2942-2964.

20- Köhler, M., Hanelli, D., Schaefer, S., Barth, A., Knobloch, A., Hielscher, P., ... & Teodoro, A. C. (2021). Lithium potential mapping using artificial neural networks: a case study from Central Portugal. *Minerals*, 11(10), 1046

21- Lee, B., Kim, B., Woo, C., Jung, G., Kwon, G., & Park, J. (2022). Forest Burn Severity Mapping Using Multispectral Unmanned Aerial Vehicle Images and Light Detection and Ranging (LiDAR) Data: Comparison of Maximum Likelihood, Spectral Angle Mapper, and U-Net Classifiers. *Sensors and Materials*, 34(12), 4599-4614.

22- London, D. (1986). "Holmquistite as a guide to pegmatitic rare metal deposits." *Economic Geology* 81(3): 704-712.

23- Mendes, D., Perrotta, M. M., Costa, M. A. C., & Paes, V. J. C. (2017). Mapeamento espectral para identificação de assinaturas espectrais de minerais de lítio em imagens ASTER (NE/MG). *Proceedings of the Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos-SP, Brasil, 28-29.

24- Moghtaderi, A., Moore, F., & Mohammadzadeh, A. (2007). The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(2), 238-252.

25- Perrotta, M. M., Souza Filho, C. R., & Leite, C. A. S. (2005). Mapeamento espectral de intrusões pegmatíticas

COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)



