نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰

Vol.9, No.4, Winter 2022

۶۳ -۸۵

مقاله پژوهشی

DOR: *20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8*

نقشه‌برداری دگرسانی‌های مرتبط با کانسارهای مس پورفیری با استفاده از تصاویر چند طیفی استر بر مبنای یادگیری عمیق

احمد رجبی[۱]، رضا شاه حسینی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

چکیده

یکی از کاربردهای سنجش از دور، بررسی نواحی دگرسانی و طبقه‌بندی آن‌ها است که یکی از سریعترین روش‌ها برای اکتشاف سامانه مس پورفیری، تعیین مرکز تجمع آن و جانمایی نقاط حفاری هستند. هدف از این تحقیق شناسایی دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک (مرتبط با سامانه) در محدوده‌های اکتشافی با ابعاد کوچک و تعیین محدوده تجمع مس پورفیری است. در این راستا، یک الگوریتم برمبنای شبکه‌های عصبی کانولوشنی عمیق طراحی شد. در الگوریتم پیشنهادی ابتدا پیش‌پردازش‌هایی نظیر تصحیح و ترمیم هندسی و طیفی و تقویت داده‌های آموزشی برای آماده‌سازی داده‌های مادون قرمز طول موج کوتاه (*SWIR*) و رنگی (*RGB*) سنجنده استر (*ASTER*) برای ورود به شبکه انجام شد. شبکه عصبی کانوولوشنی (*CNN*) پیشنهادی دارای ساختاری کدگذار-کدگشا می‌باشد که در مرحله کدگذاری ویژگی‌های مختلف و کارآمد در مقیاس‌های متفاوت استخراج شده و در مرحله کدگشایی ویژگی‌های تولید شده برای تخمین مناطق دگرسانی با یکدیگر تلفیق می‌گردند. سپس شبکه مورد نظر برای تصاویر محدوده اکتشافی مورد مطالعه به نام "دهانه گمرکان" واقع در شهرستان جیرفت اجرا شده و مناطق دگرسانی منطقه استخراج شد. برای ارزیابی میدانی نتایج بدست آمده از روش سنگ‌شناسی و ژئوشیمیایی روی ۸۴ نمونه استفاده شد. با ادغام نتایج شبکه و استخراج ساختار هندسی دگرسانی‌ها، مکان آن روی نقشه درونیابی عیاری مس و طلای منطقه جانمایی شد. در نتیجه، شناسایی دگرسانی‌های منطقه با دقت آماری پارامترحساسیت: ۰/۹۴۳ ، امتیاز *F1*: ۰/۴۷۲ ، شاخص اشتراک روی اجتماع (*IoU*): ۰/۸۹۶ و دقت تشخیص سنگ ۹۲ درصد و میانگین عیاری مس بالای ۴ درصد در منطقه مورد مطالعه، انجام شد. بر اساس محل حلقه‌های دگرسانی‌های شناسایی شده، نقشه ترانشه‌های حفاری جهت استخراج مواد معدنی بدست آمد.

کلید واژه‌ها : کانسار مس پورفیری، ساختارهای هندسی، دگرسانی، سنجش‌ازدور، یادگیری عمیق.

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۵۲۷

Email: rshahosseini@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]

[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

۱- مقدمه

عنصر مس در چندین مدل کانساری وجود دارد که اکتشاف آن از نظر اقتصادی قابل توجیه است. مهمترین مدل کانساری مس، مدل پورفیری[۱] است که اغلب کانسارهای پورفیری شناخته‌شده در دنیا، الگوی منطقه‌بندی مناسبی از کانی‌سازی و دگرسانی را نشان می‌دهند (شکل(۱)). دگرسانی عبارت است از کلیه تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی که تحت تأثیر آب‌های ماگمایی و یا گرمایی در سنگ‌ها ایجاد می‌شود. ازآنجایی‌که کانی‌سازی کانسارهای فلزی رابطه نزدیکی با فعالیت‌های گرمابی دارد و ازآنجاکه اثرات فعالیت‌های گرمابی را به‌طور مستقیم نمی‌توان روی نقشه زمین‌شناسی نشان داد و نیز گاهی تشخیص آن روی زمین مشکل است، لذا شناسایی این‌گونه پدیده‌ها، در انتخاب محل کانی‌سازی و بررسی محدوده کانی‌سازی، با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند بسیار مفید و مناسب باشد. لوول و گیلبرت (۱۹۷۰)، توده معدنی سان مانوئل- کلامازو را توصیف و یافته‌های خویش را با ۲۷ کانسار مس پورفیری دیگر مقایسه کردند[۱]. آن‌ها در این تحقیق ارزشمند و بنیادی نشان دادند که بهترین چهارچوب مرجعی که می‌تواند تمام سیماهای دیگر این ذخایر را به هم ارتباط دهد، ماهیت و توزیع مناطق دگرسانی گرمابی سنگ دیواره است. بر اساس ادعای آن‌ها عموماً چهار منطقه دگرسانی وجود دارد. این مناطق بیشتر در اطراف استوک پورفیری به‌صورت مناطق هم‌محوری که پوسته‌هایی هم‌مرکز و اغلب ناکامل را می‌سازند متمرکز می‌شود و غالباً این مناطق در اکتشاف ذخایر مس پورفیری به‌عنوان یک راهنما مورداستفاده قرار می‌گیرند.

این مناطق در مدل لوول- گیلبرت عبارت است از:

منطقه پتاسیک[۲]: این منطقه همیشه وجود ندارد و در صورت وجود با تشکیل ارتوکلاز و بیوتیت ثانویه، یا تشکیل ارتوکلاز- بیوتیت- کلریت شناسایی می‌شود.

منطقه فیلیک[۳]: نوعی دگرسانی است که در ذخایر دیگر به‌عنوان سریسیتی شدن و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته شناخته می‌شود.

منطقه فیلیک در صورت وجود، دارای بیشترین توسعه پیریت افشان و رگچه‌ای است. منطقه آرژیلیک[۴]: کانی‌های رسی، ویژگی این منطقه بوده و با نزدیک‌تر شدن به توده معدنی کائولن و با دور شدن از آن مونتموریونیت افزایش می‌یابد. ناحیه‌های غنی از سیلیس در نزدیکی سطح به محیط اپی‌ترمال انتقال داده‌شده‌اند. منطقه پروپیلیتیک[۵]: این منطقه که خارجی‌ترین منطقه است، همواره وجود دارد. کلریت رایج‌ترین کانی این منطقه است. پیریت، کلسیت و اپیدوت نیز با آن همراه است. در سال‌های اخیر محققان بسیاری برای مطالعه مناطق دگرسان شده (مناطق حاوی کانی‌های رسی) از داده‌های چندطیفی سنجنده‌های نگاشت موضوعی پیشرفته (*ETM+*[۶])، تصویربردار عملیاتی زمین(*OLI*[۷]) داده‌های رادیومتر بازتاب و تابش حرارتی پیشرفته فضابرد (*ASTER*[۸]) استفاده کرده‌اند. این پژوهشگران روش‌های نسبت‌های باندی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی، ترکیبات کاذب رنگی و الگوریتم نگاشت زاویه طیفی را برای بارزسازی مناطق دگرسان شده بکارگرفته‌اند[۲، ۳ و ۴]. کانسارهای مس پورفیری از مهم‌ترین منابع معدنی در جهان و ایران

[۱] *Porphyry*

[۲] *Potassic Zone*

[۳] *Phyllic Zone*

[۴] *Argillic Zone*

[۵] *Propylitic Zone*

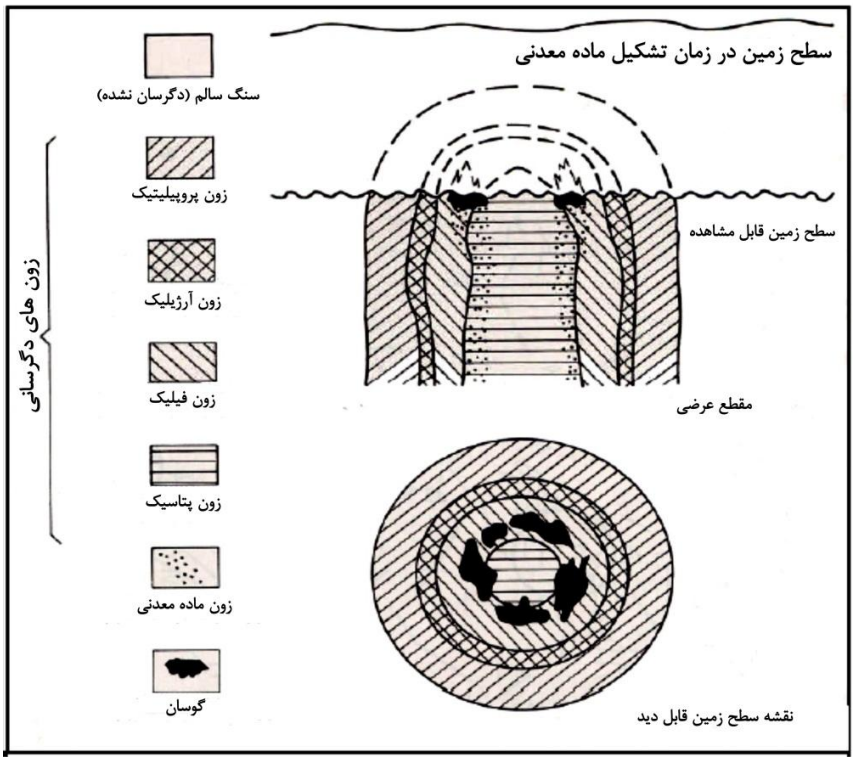
[۶] *Enhanced Thematic Mapper Plus*

[۷] *Operational Land Imager*

[۸] *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

می‌باشند. برای پی بردن به نوع کار و تحقیقات مرتبط با سنجش‌ازدور در مهم‌ترین منابع پورفیری داخل و خارج کشور، خلاصه‌ای از مهم‌ترین تحقیقات انجام‌شده در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل۱: موقعیت قرارگیری دگرسانی‌های فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک و همچنین بخش گوسانی نسبت به یکدیگر در کانسارهای مس پورفیری

صلاتی (۲۰۱۱) الگوریتم دوران تطبیق الگو (*RTM*[۱]) را به تصاویر *ASTER* برای شناسایی مرزهای سنگ‌شناسی از پیش تعیین شده اعمال نمود، این مرزها اطلاعاتی را برای فعالیت‌هایی مانند اکتشاف مواد معدنی و هیدروکربنی، نقشه‌برداری منابع آب و ارزیابی مخاطرات طبیعی فراهم می‌کنند. این الگوریتم با چرخاندن قالب‌ها بر روی تصاویر *ASTER* با موفقیت مرزهای سنگ‌شناسی را شناسایی و برای تعیین دقت مرزهای تشخیص داده شده به صورت مکانی، از نظریه مجموعه فازی استفاده کرد. مرزهای تشخیص داده شده و مناطق مرزی عکس هوایی را بهتر از مرزهای تشخیص داده شده و مناطق مرزی نقشه زمین‌شناسی ارائه نمودند *[۵]*.

بیرانوندپور و همکاران (۲۰۱۲) سنجنده *ASTER* را به عنوان یک ابزار برای نقشه‌سازی دگرسانی هیدروترمال ناحیه‌های معدنی مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال (فیلیک، آرژیلیک و پروپیلیتیک) و وابسته به سنگ‌شناسی سنگ میزبان بررسی نمودند. از الگوریتم‌های نسبت باندی، شاخص‌ها و روش‌های مبتنی بر عملگر منطقی، مؤلفه‌های اصلی و روش‌های مبتنی بر افزایش مانند تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (*PCA*[۲]) و ضریب حداقل نویز (*MNF*[۳])؛ الگوریتم‌های مبتنی بر ثابت کردن شکل مانند نگاشت زاویه طیفی

[۱] *Rotate Template Matching*

[۲] *Principal Component Analysis*

[۳] *Minimum Noise Factor*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

(*SAM*[۱])، فیلتر تطابقی (*MF*[۲])، و فیلتر مقدار مخلوط تطابقی (*MTMF*[۳])؛ و روش‌های جزئی غیرمخلوط از قبیل طیف خطی غیرمخلوط (*LSU*[۴]) و کمینه کردن فشار انرژی (*CEM*[۵]) برای استخراج اطلاعات طیفی از داده‌های *ASTER* استفاده کردند و نشان دادند که الگوریتم‌های عملگر منطقی برای نقشه‌سازی دگرسانی معدنی هیدروترمال مرتبط با کانی‌سازی مس پورفیری در مقیاس منطقه‌ای مناسب است. الگوریتم‌های بر پایه شکل و روش‌های جزئی غیر مخلوط برای تشخیص مجموعه‌های معدنی و معادن خاص در ناحیه‌های دگرسانی گرمآبی در مقیاس منطقه‌ای استوار و قابل اعتماد هستند. بنابراین، ادغام نتایج حاصل از عملگر منطقی، الگوریتم‌های مبتنی بر شکل‌گیری و روش‌های جزئی غیر مخلوط اطلاعات جامع و دقیقی برای مراحل مقدماتی اکتشاف طلا و مس در هر دو مقیاس محلی و منطقه‌ای تولید می‌کنند. تمام روش‌ها و کاربردهای مورد بررسی، نشان‌دهنده مفید بودن داده‌های *ASTER* برای اکتشاف ذخایر مس پورفیری و طلای اپی‌ترمال در سراسر جهان بود *[۶]*.

ماتار (۲۰۱۳) از باندهای مادون قرمز حرارتی سنجنده *ASTER* برای بررسی سنگ‌ها، از جمله رگه‌های سفید کوارتز، در منطقه جبل الحصیر، جنوب غربی سپر عربستان استفاده نمود. داده‌های به دست آمده با استفاده از تصحیحات رادیومتری و هندسی پردازش شدند. داده‌های پردازش شده با تصاویر کاذب رنگی با نسبت باند مادون قرمز حرارتی ترکیب شدند. این تصاویر مرکب بین سنگ‌های گرانیت فلسیک روشن و سنگ‌های گابرویی مافیک تیره به وضوح تفاوت دارد. این تصاویر همچنین رگه‌های کوارتز را از رسوبات خشک رودخانه‌ای تشریح می‌کند، هرچند که هر دو آنها در رنگ‌های روشن و درجه خاکستری روشن بسیار شبیه به هم ظاهر می‌شوند. نتایج نسبت باندی نیز با نقشه زمین‌شناسی از این منطقه مقایسه و نشان دادند که با در نظرگرفتن توان تفکیک به دست آمده، تصاویر مربوط به نسبت باندی اطلاعات مفید بیشتری پیدا می‌کنند و تصاویر مرکب رنگ واقعی، مفیدتر هستند. بر اساس این مشاهدات ماتار ادعا کرد که سنجنده *ASTER* برای کاربردهای زمین‌شناسی بسیار قوی است. با توجه به موفقیت آن در منطقه مورد مطالعه، استفاده از این سنجنده نیز می‌تواند به دیگر مناطق پیچیده در سپر عربستان و فراتر از آن گسترش یابد *[۷]*.

مقدم (۲۰۱۴) ، تعمیم نتایج پردازش داده‌های ماهواره‌ای هایپریون به تصاویر ماهواره‌ای *ASTER* در منطقه لاهرود را با تلفیق داده‌های هایپریون با توان طیفی بالا در تشخیص عوارض و داده‌های *ASTER* با توان تفکیک مکانی بهتر در مرحله طبقه‌بندی بررسی کرد و از داده‌های هایپریون به روش *MTMF* به عنوان رده‌های آموزشی بر روی تصاویر *ASTER* استفاده کرد و در نهایت رده‌های مشابه (با تفکیک‌پذیری پایین) با هم ادغام و ۶ رده با تفکیک‌پذیری قابل قبول برای انجام طبقه‌بندی تعیین کرد. نقشه طبقه‌بندی به سه روش پارامتریک حداکثر درست نمایی، حداقل فاصله و فاصله ماهالانوبیس را تهیه کرد و به منظور بررسی میزان کارآیی نقشه‌های به دست آمده و با مقایسه بین روش‌ها، از ماتریس ابهام بر پایه استفاده از کل پیکسل‌های تصاویر هایپریون به عنوان رده‌های مبنا پس از ارزیابی، روش حداکثر درست نمایی بهترین عملکرد را داشت. نقشه فراوانی کانی‌ها با روش‌های به کارگرفته شده با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه تطابق داشته، به نحوی که گسترش بالای کانی‌های سولفاته مانند ژیپس و پلی هالیت، نشانه‌های اندکی از کانی مالاکیت با پراکندگی باریک و کم در اطراف کانی‌های ژئولیت، اندیس‌های تازه شناخته شده از مس در منطقه و گسترش فراوان کانی‌های ژئولیتی آتالسیم و مزولیت

[۱] *Spectral Angel Mapper*
[۲] *Matched Filter*
[۳] *Mixture Tuned Matched Filter*
[۴] *Linear Spectra Unmixed*
[۵] *Compression Energy Minimize*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

براساس گزارش زمین‌شناسی منطقه قابل توجیه بوده است [۸].

بویسیو (۲۰۱۷) نشان داد که چگونه داده‌های ابرطیفی تصویری هوابرد از سنگ‌های پریدوتیت چندین آب و هوا در طبقات سنگی کوهستانی در نیو کالدونیا جمع‌آوری شده است که با استفاده از ترکیبی از روش‌های تولید یک نقشه رگولیت-زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گرفت که می‌تواند برای هدفمندسازی اکتشاف نیکل بسیار مؤثر باشد. پردازش تصویر ترکیبی از دو روش معمول شامل استخراج ویژگی طیفی و ماشین بردار پشتیبان (*SVM*[۱]) می‌باشد. مواد معدنی کلیدی مورد نظر سرپانتین بود که به عنوان شاخصی برای سنگ پریدوتیت هیدرولیز شده و اکسید هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوئتیت) در نظر گرفته می‌شود که به عنوان تشخیص توسعه لاتریت است [۹].

حسین‌پور (۲۰۲۰) با استفاده از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین (*RF*[۲] و *RBM*[۳]) و استخراج بصری محل دپوی ماده معدنی به عنوان داده آموزشی، شناسایی بخش‌های دارای ماده معدنی در مناطق کانسارهای مس پورفیری را مورد مطالعه قرار داد. در این تحقیق از لایه‌های اطلاعاتی مربوط به دگرسانی‌ها، گسل‌ها و نقاط کانی‌زایی طلا و مس به عنوان ورودی استفاده کرده و در نهایت نقشه طبقه‌بندی توزیع ماده معدنی در منطقه را ارائه داده است [۱۰].

سایر تحقیقات سنجش از دوری مهمی که در حوزه منابع مس انجام شده در جدول (۱) ارائه شده است.

با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای می‌توان مرزهای بسیاری از دگرسانی‌ها و سازندهای زمین‌شناسی را از یکدیگر تفکیک کرد که این مسئله در تحقیقات گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته است. اما در بحث مس پورفیری، طبقه‌بندی و تفکیک دگرسانی‌های مرتبط با آن، علاوه بر تایید مستعد بودن محدوده مورد مطالعه در دارا بودن منبع مس پورفیری، در تعیین مرکز تجمع ماده معدنی جهت احداث گمانه و چاه‌های حفاری بسیار موثر است که مدل ساختاری سامانه‌های مس پورفیری نیز تاییدکننده آن هست. علاوه بر این، با توجه به قرارگیری موقعیت جغرافیایی کشور ایران در کمربند آلپ-هیمالیا که یکی از خواستگاه‌های تشکیل سامانه‌های مس پورفیری است، این سامانه‌ها با ابعاد گوناگون در نقاط مختلف کشور تشکیل شده که اجرای مراحل اکتشاف (تعیین محل تجمع و عیار ذخیره) آن برای سازمان‌های دولتی متولی امر معادن، بسیار هزینه بردار است. لذا از توجه به محدوده‌های معدنی با ابعاد کوچک که تعداد قابل توجهی دارند اجتناب می کنند.

با توجه به پیشینه تحقیق ارائه شده، مواردی مثل تعیین مرکز تجمع ماده معدنی و تعیین نقاط حفاری و همچنین اکتشاف در محدوده‌های با ابعاد کوچک مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه روشی دقیق و کم هزینه در مبحث اکتشاف منابع مس پورفیری بر مبنای تئوری مشترک در اینگونه کانسارها در اغلب محدوده‌های اکتشافی است. شناسایی آن نوع از دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک که مرتبط با ماده معدنی هستند (غیر از نوع فرسایش شده و نابرجای آن‌ها)، که بصورت حلقه‌های دگرسانی ماده معدنی را در برگرفته‌اند (حلقه بیرونی دگرسانی پروپیلیتیک، حلقه میانی دگرسانی آرژیلیک، حلقه درونی دگرسانی فیلیک)، یکی از مهمترین راهکارهای اکتشاف منابع معدنی پورفیری است که در این تحقیق ارائه می‌گردد.

دگرسانی‌های مورد مطالعه در این تحقیق که با برخی تصاویر سنجش از دور قابل مشاهده هستند، دارای ویژگی هندسی خاصی نیستند، بلکه حضور آنها در کنار یکدیگر یک ساختار معنادار را تشکیل می‌دهد. البته ویژگی طیفی کانی‌های تشکیل دهنده این دگرسانی‌ها نیز موجب شده تا هر کدام از این دگرسانی‌ها در یک

[۱] *Support Vector Machine*
[۲] *Restricted Boltzmann machine*
[۳] *Random Forest*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

محـدوده خـاص از امـواج الکترومغناطیسـی بازتـاب بیشتری داشته باشند. در این راستا ، مـا بـه یـک روش قوی برای شناسایی دگرسانی‌های مورد نظر، نیاز داریم.

جدول ۱ : تحقیقات سنجش از دوری در حوزه مس پورفیری

خروجی	منطقه – ماده معدنی	داده	روش	نویسنده – سال
پتانسیل یابی	پاکستان - دگرسانی	*MODIS*	*BR*[1]	شهاب خان (۲۰۰۸) [۱۱]
تهیه نقشه دگرسانی منطقه	کرمان - مس	*ASTER*	*SAM*	یوسفی و همکاران (۲۰۰۹) [۱۲]
پتانسیل یابی	هند - دگرسانی	*ASTER*	*BR, PCA*	بهادر و همکاران (۲۰۱۳) [۱۳]
شناسایی کانی ها	کرمان - مس	*XRD*	*XRD*[2]	حسینجانی زاده و همکاران (۲۰۱۶) [۱۴]
تهیه نقشه دگرسانی منطقه	کرمان - مس	*hyperion*	*MTMF*	حسینجانی زاده و همکاران (۲۰۱۷) [۱۵]
پتانسیل یابی	کرمان - طلا و مس	*ASTER*	*MF, MTMF, PCA, SAM, MNF*	بیرانوند پور و همکاران (۲۰۱۷) [۱۶]
تهیه نقشه دگرسانی منطقه	کرمان - مس	*ASTER*	*MF, DMF*[3]*, SSF*[4]	فریدونی و همکاران (۲۰۱۷) [۱۷]
تهیه نقشه دگرسانی منطقه	مسگران - مس	*ASTER*	*BR, PCA, LS-fit*[5]*,SAM*	شیرازی و همکاران (۲۰۱۸) [۱۸]
تهیه نقشه دگرسانی منطقه	هند - دگرسانی	*ASTER*	*BR, PCA*	رانی و همکاران (۲۰۲۰) [۱۹]

[1] *Band Ratio*
[2] *X-Ray Diffraction*
[3] *Directed Matched Filtering*
[4] *Spectral Signature-based Filter*
[5] *Least Square Fit*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

در تحقیق حاضر با استفاده از تصاویر چندطیفی *ASTER*، بر مبنای یادگیری عمیق (*DL*[1]) و به کارگیری شبکه عصبی کانولوشنی[2](*CNN*)، دگرسانی‌های مذکور از سایر دگرسانی‌های موجود در منطقه معدنی تفکیک و استخراج شده و سپس با توجه به تئوری تشکیل دگرسانی‌های مرتبط با سامانه‌های پورفیری، محل تقریبی تجمع ماده معدنی تعیین می‌شود. شکل (۲) روندنمای روش تحقیق را نمایش می‌دهد.

۲- منطقه و داده ها

محدوده اکتشافی دهانه گمرکان در استان کرمان و در جنوب شرق شهر جیرفت واقع است. این محدوده دارای ۵۰ هکتار مساحت است. این محدوده در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جبال بارز بررسی می‌شود.

شکل (۳) نقشه اورتوفتو محدوده اکتشافی را ارائه می‌دهد که در آن محل کانی‌زایی اکسید مس با نقاط زرد، اکسیدهای آهن با نقاط بنفش و رگه‌های سیلیسی با نقاط سفید مشخص شده‌اند. نقشه اورتوفتو، زمین‌شناسی و توپوگرافی با استفاده از تصاویر پرنده بدون سرنشین ماویک۲پرو[3] در تاریخ ۱۴۰۰/۲/۳۱ تهیه گردید (شکل(۴) و (۵)).

دگرسانی‌های مورد مطالعه در این تحقیق ذاتا رسی هستند. از طرفی با توجه به امضای طیفی کانی‌های رسی، تفکیک آن‌ها از یکدیگر در حوزه *SWIR* امواج الکترومغناطیسی امکان‌پذیر است که باندهای ۴ تا ۹ سنجنده *ASTER* دارای این قابلیت هستند. سنجنده‌های دیگر مانند *OLI* (لندست ۸) تنها ۲باند ۶ و ۷ را در این ناحیه دارند که برای تفکیک کانی‌های رسی از یکدیگر کافی نیست. به همین دلیل از باندهای مختلف محدوده الکترومغناطیسی *SWIR* سنجنده *ASTER* برای تهیه مجموعه داده استفاده شد. این داده‌ها از سایت اینترنتی (*Earthexplorer.USGS.gov*) برای تاریخ ۲۸ جولای ۲۰۰۱ به دست آمد.

منطقه مورد مطالعه یک کانسار چندفلزی[4] (پلی متال) است که رخنمون‌های مس بیشترین گسترش را در منطقه دارد.

نتیجه حاصل از بررسی این محدوده پاسخ به این سوال است که با توجه به دگرسانی‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، مدل تشکیل کانسار مس بصورت پورفیری بوده و یا رگه‌ای و محدود است؟ پاسخ به این سوال می‌تواند اقتصادی یا غیر اقتصادی بودن فعالیت معدنی در این محدوده را مشخص نماید.

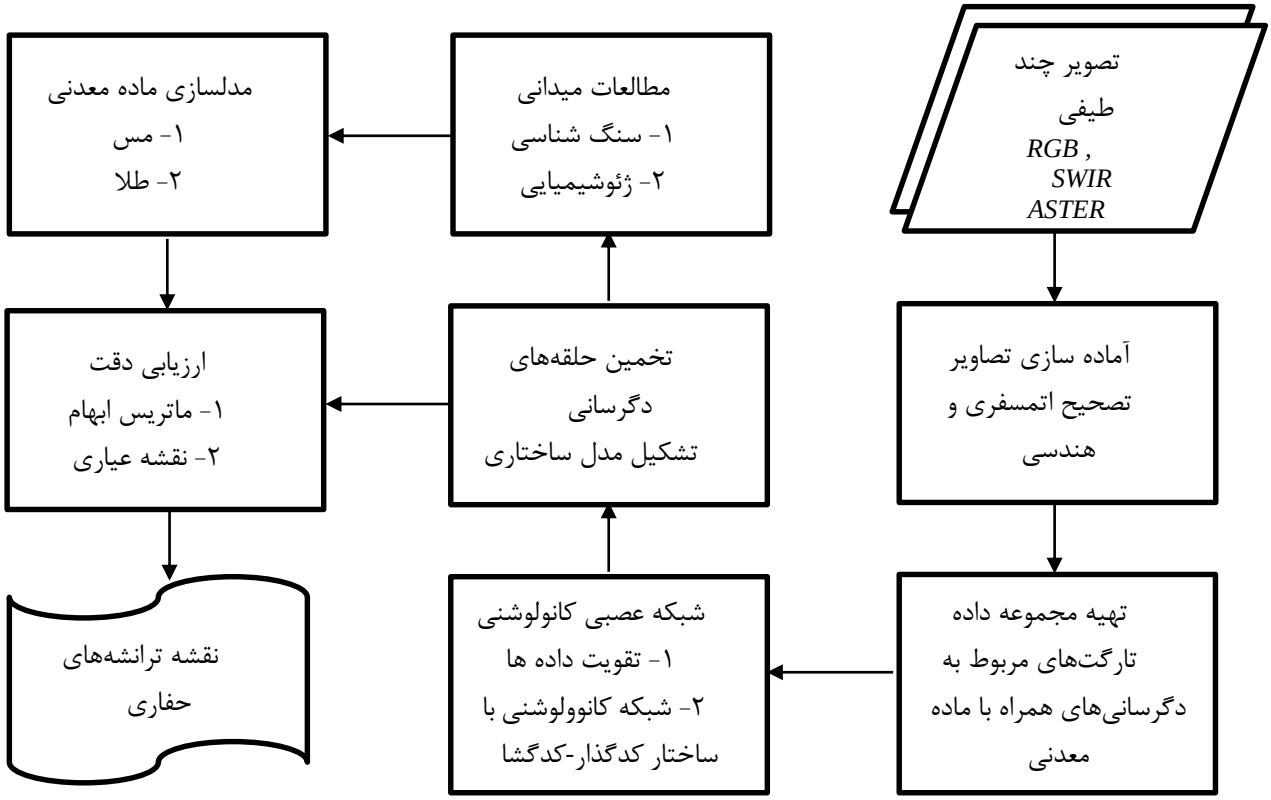
[1] *Deep Learning*

[2] *Convolutional Neural Network*

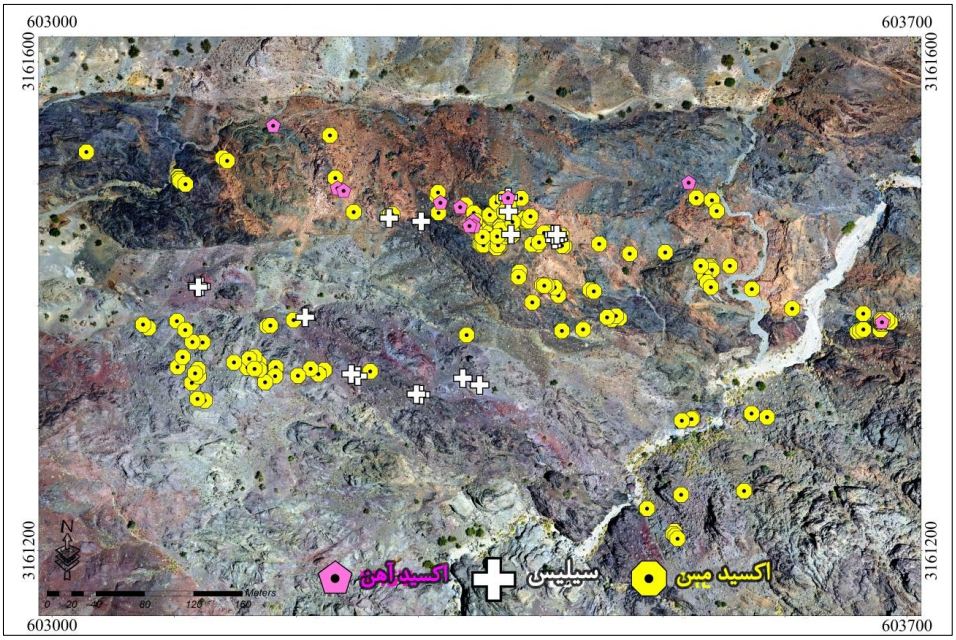
[3] *Mavic2Pro*

[4] *Polymetal*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

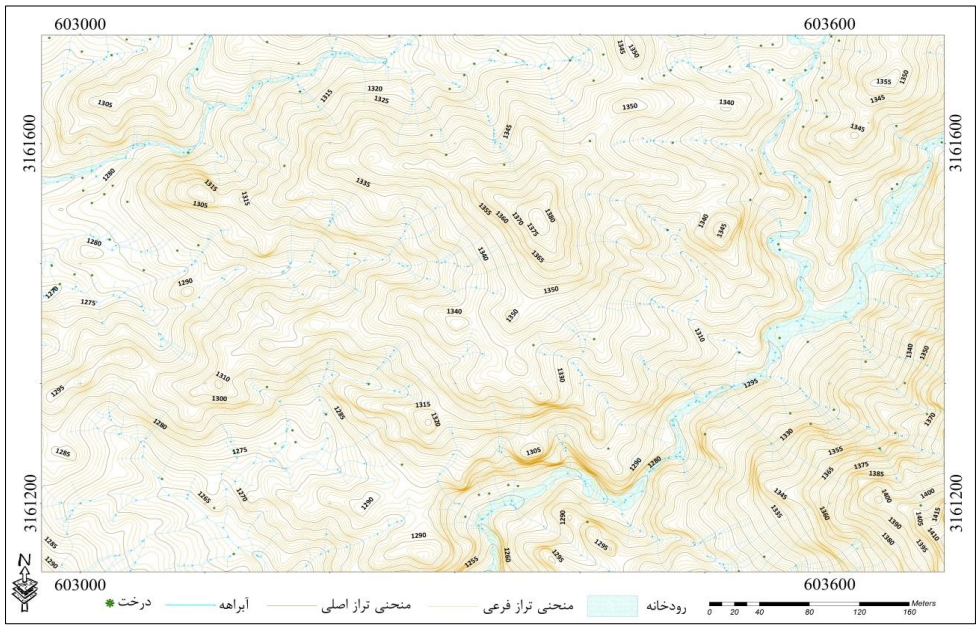


شکل۲: روندنمای روش تحقیق

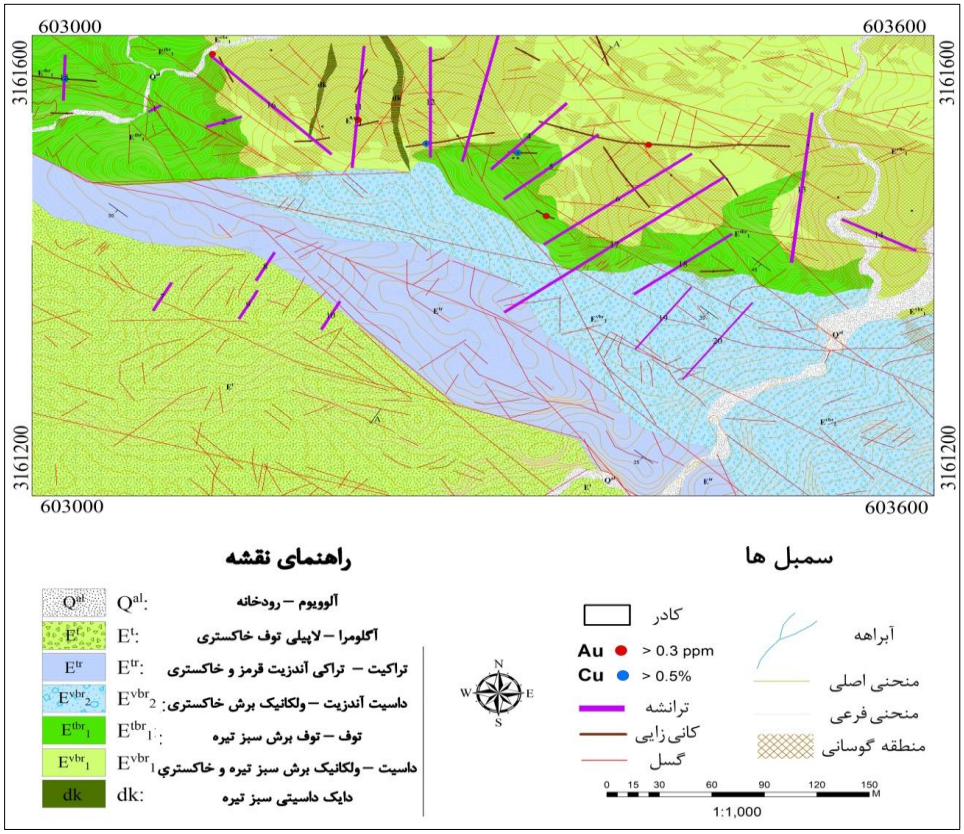


شکل۳: نقشه جانمایی نقاط کانی‌زایی مس روی تصویر اورتو فتو

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



شکل۴: نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه



شکل۵: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

۳- روش تحقیق

در تحقیقات گذشته موضوع شناسایی دقیق و صحیح دگرسانی‌های اصلی حوزه کانسارهای پورفیری (فیلیک-آرژیلیک-پروپیلیتیک)، و همچنین ساختار هندسی حلقوی و موقعیت شکل‌گیری این دگرسانی‌ها نسبت به یکدیگر کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- شبکه عمیق *CNN*

یادگیری عمیق زیر مجموعه‌ای از شبکه ماشین‌های یادگیری هست که می‌تواند شکل دیگری از داده‌ها را نمایش دهد. این فرآیند یادگیری از لایه‌ها و سطوح مختلف بدون نظارت بوده و سطح بالاتری از ویژگی‌ها ارائه می‌دهد که دارای دقت بیشتری هست. یادگیری عمیق بیشتر در کاربردهایی مثل طبقه‌بندی تصاویر، تشخیص صدا، شناسایی عوارض مورد استفاده قرار گرفته است. شبکه‌های عصبی کانولوشن نوعی از یادگیری عمیق هستند که شامل تعداد زیادی لایه‌های کانولوشن ونمونه‌برداری در یک ساختار منطبق بر سیستم بصری انسان می باشد. لایه ورودی *CNN* معمولا یک ماتریس تصویری با ابعاد دلخواه و خروجی آن یک بردار ویژگی با تفکیک‌پذیری بالا و متناظر با کلاس‌های مختلف عوارض است. لایه‌های پنهان در این شبکه شامل لایه کانولوشن، لایه نمونه‌برداری و لایه اتصال کامل است[۲۰].

لایه کانولوشن: هسته اصلی شبکه *CNN* لایه کانولوشن است که درصد اعظم محاسبات شبکه عصبی کانولوشن را به خود اختصاص داده است. هر لایه کانولوشن شامل مجموعه ای فیلتر است و از کانولوشن بین فیلترها و لایه ورودی است که خروجی ساخته می‌شود. این لایه شامل وزن ها و بایاس‌های قابل آموزشی است که به صورت فیلتر با ابعاد و اعماق مختلف بر روی پنجره‌های نمونه ای از لایه ورودی اعمال می شوند و یک نقشه ویژگی به ازای هر نمونه و هر فیلتر تولید می شود. با اتصال این نقشه‌های ویژگی به یکدیگر، یک لایه کانولوشن تشکیل می شود[۲۰]. لایهنمونه‌برداری: لایهنمونه‌برداری یک تابع نمونه‌برداری غیر خطی به همراه کاهش مقیاس است که می تواند توابعی مانند ماکزیمم گیری و حتی نرم کمترین مربعات باشد. اعمال این لایه بر روی لایه ورودی، باعث می شود که ابعاد لایه ورودی به تدریج کاهش یابد[۲۰]. لایه اتصال کامل: این لایه ها معمولا آخرین لایه‌های یک شبکه را تشکیل می دهند که یک نقشه ویژگی در لایه قبلی را به یک بردار ویژگی تبدیل می نماید[۲۰]. توابع غیر خطی: این توابع به منظور مدلسازی روند فعالسازی نورون‌هایی خاص و جدا نمودن داده‌هایی است که به صورت خطی قابل جداسازی نمی باشد. کارآمدترین تابع در زمینه تابع *ReLU*[۱] هست که با اعمال آن مقادیر منفی صفر شده و مقدیر مثبت ثابت می ماند[۲۱]. لایه نرمالسازی دسته ای[۲]: این لایه ها موجب یک دست کردن داده‌های ورودی می شود و به مقادیر بسیار بزرگ یا بسیار کوچک اجازه ورود به تابع فعالسازی نمی دهد. این کار باعث می شود نرخ یادگیری[۳] شبکه افزایش یابد و سرعت همگرایی بیشتر شود[۲۲]. لایه حذف تصادفی[۴]: این لایه جهت جلوگیری از بیش برازش[۵] در شبکه‌های عصبی معرفی شده و در آن با تعیین مولفه P (از ۰ تا ۱) در زمان آموزش، هر کدام از نورون ها با احتمال P-1 حذف می شوند که معمولا ۰/۵ درنظر گرفته می شود[۲۳]. شبکه‌های *CNN* دارای ساختار کدگذار-کدگشا هستند. در مرحله کدگذاری به تدریج ابعاد ماتریس نقشه‌های ویژگی تولید شده کاهش یافته و تعداد ویژگی‌های تولید شده و عمق ماتریس افزایش می‌یابد. افزایش عمق در شبکه‌های *CNN* با قراردادن لایه‌های کانولوشن صورت می پذیرد. اما با قراردادن مکرر لایه‌ها

[۱] *Rectified Linear Unit*

[۲] *Batch Normalization*

[۳] *Learning rate*

[۴] *Drop out*

[۵] *Overfitting*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

بدون معماری مناسب، شبکه در مرحله پس انتشار[1] دچار عدم تغییر وزن یا صفر شدن گرادیان خواهد شد که در نتیجه دقت شبکه افزایش نمی یابد.

۳-۲- پیش پردازش داده ها

بهتر است قبل از پردازش اصلی، پیش‌پردازش مورد نیاز داده‌ها کنترل شود تا کیفیت تصویر افزایش یابد. در تصاویر سری *ASTER* پیش‌پردازش تصاویر از نظر تصحیح اتمسفری، تصحیح هندسی و تصحیح رادیومتریکی قابل انجام است. تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق از نظر هندسی اصلاح شده و با توجه به متادیتا تصاویر، در زمان تصویربرداری پوشش ابر کمتر از ۵٪ بوده است، بنابراین نیازی به حذف ابر نیست. پیش‌پردازش اعمال شده بر روی تصاویر، تصحیح اتمسفری است که در نرم افزار انوی[2] نسخه ۵,۳ انجام شد.

۳-۳- تهیه مجموعه داده[3] آموزشی

برای آموزش شبکه عصبی یادگیری عمیق با توجه به کاربرد موردنظر در این تحقیق، مجموعه داده آموزشی وجود نداشت. لذا با استفاده از تصاویر *SWIR* سنجنده *ASTER* که توانایی تفکیک این دگرسانی‌ها را دارد مجموعه داده آموزشی تهیه گردید.

کمربند مس پورفیری ایران با روند شمال غربی جنوب شرقی با کمان ماگمایی سهند بزمان (یا ارومیه دختر) منطبق است. بخش جنوبی این کمربند تحت عنوان کمربند مس کرمان شناخته شده و کانسارهای بزرگی چون سرچشمه و میدوک و ذخایر امیدبخشی مانند درهزار، نوچون، ایجو، علی آباد و چاه فیروزه در آن واقع شده‌اند. به همین دلیل در این فرآیند از تصاویر *ASTER* در محدوده جنوب استان کرمان استفاده شد. برای افزودن جنبه تحقیاتی به موضوع مورد مطالعه، مجموعه داده متشکل از داده‌های ۶ باندی *SWIR* و داده‌های۳ باندی (۴-۶-۸) که بیشترین تفکیک طیفی بین نمایش دگرسانی‌های مورد نظر را دارند، در ابعاد مکانی ۲۵۶*۲۵۶ با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر ایجاد شدند.

برای ایجاد داده‌های آموزشی از دگرسانی‌ها متناسب با داده‌های تصویری، از آنجا که جداسازی بصورت بصری دارای دقت لازم نیست، از رابطه (۱) تا رابطه (۳) که در سایت *https://www.indexdatabase.de* برای جداسازی دگرسانی‌های فیلیک(سرسیت)، آرژیلیک و پروپیلیتیک ارائه شده استفاده گردید.

رابطه (۱): دگرسانی فیلیک (کانی‌های سرسیت، موسکوویت و ایلیت) *(SWIR_Band5+SWIR_Band7) / SWIR_Band6*

رابطه (۲): دگرسانی آرژیلیک (کانی‌های آلونیت، کائولینیت و پیروفیلیت)
(SWIR_Band4+SWIR_Band6) / SWIR_Band5

رابطه (۳): دگرسانی پروپیلیتیک (کانی‌های اپیدوت، کلریت و کلسیت) *(SWIR_Band6+SWIR_Band9) / (SWIR_Band7+SWIR_Band8)*

شکل (۶) چند نمونه از تصاویر با ترکیب رنگی کاذب (۴-۶-۸) به عنوان ورودی و تصاویر باینری مربوط به محل دگرسانی‌های مورد نظر را به عنوان هدف نمایش می‌دهد.

۴- پیاده‌سازی

شبکه عصبی کانولوشنی پیشنهادی دارای ساختاری کدگذار-کدگشا[4] همراه با تابع فعال‌سازی *ReLU* می‌باشد که در مرحله کدگذاری از ۱۰ لایه کانولوشنی، ۱۰ لایه نرمالسازی دسته ای و ۴ لایه ادغام استفاده شده و ویژگی‌های مختلف و کارآمد در مقیاس‌های

[1] *Back propagation*

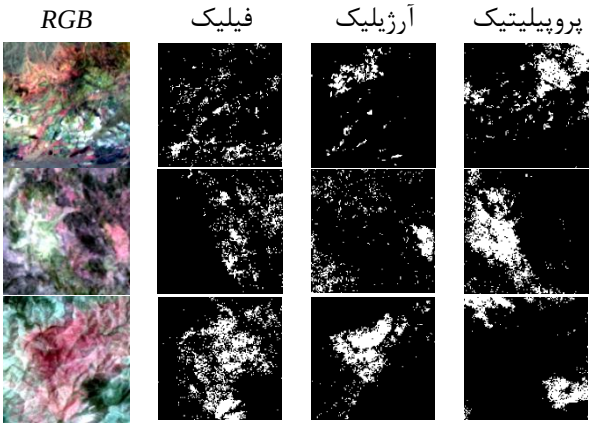
[2] *ENVI*

[3] *Dataset*

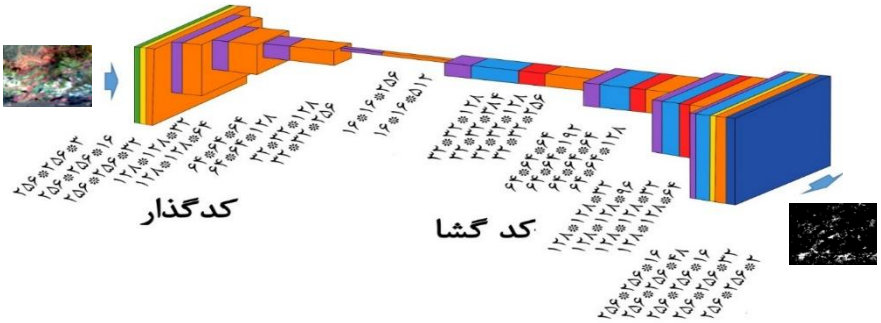
[4] *Encoder-Decoder*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

متفاوت استخراج شده و در مرحله کدگشایی با استفاده از ۴ لایه کانولوشنی ترانهاده، ۹ لایه کانولوشنی، ۸ لایه نرمالسازی دسته ای و ۱ لایه حذف تصادفی، ویژگی‌های تولید شده برای تخمین مناطق دگرسانی با یکدیگر تلفیق می‌گردند. شکل (۷) معماری شبکه پیشنهادی را نمایش می‌دهد. داده‌های آموزشی و دگرسانی‌های هدف در دو مجموعه داده جداگانه وارد شبکه شده و پس از چندین مرتبه سعی و خطا در اجرای شبکه *CNN* برای هر دگرسانی بصورت مجزا، حالت بهینه پارامترها و نتایج مربوطه استخراج شد که در جدول (۲) و شکل‌های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. در حالت بهینه، برای هر یک از دگرسانی‌ها ۶۰ داده آموزشی، برای دگرسانی آرژیلیک ۶ داده ارزیابی و برای هریک از دگرسانی‌های فیلیک و پروپیلیتیک۱۲ داده ارزیابی ، و برای هریک از دگرسانی‌ها ۵ داده آزمایشی اختصاص یافت. شناسایی حالت بهینه با توجه به نتایج بصری مربوط به نمودار دقت و تابع *Loss* بدست آمده از ورودی‌های ۳ باندی و ۶ باندی و نتایج آماری ماتریس ابهام هرکدام از آن‌ها انجام شد که نتایج آن در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل۶: نمونه ای از داده‌های آموزشی و دگرسانی‌های مربوطه



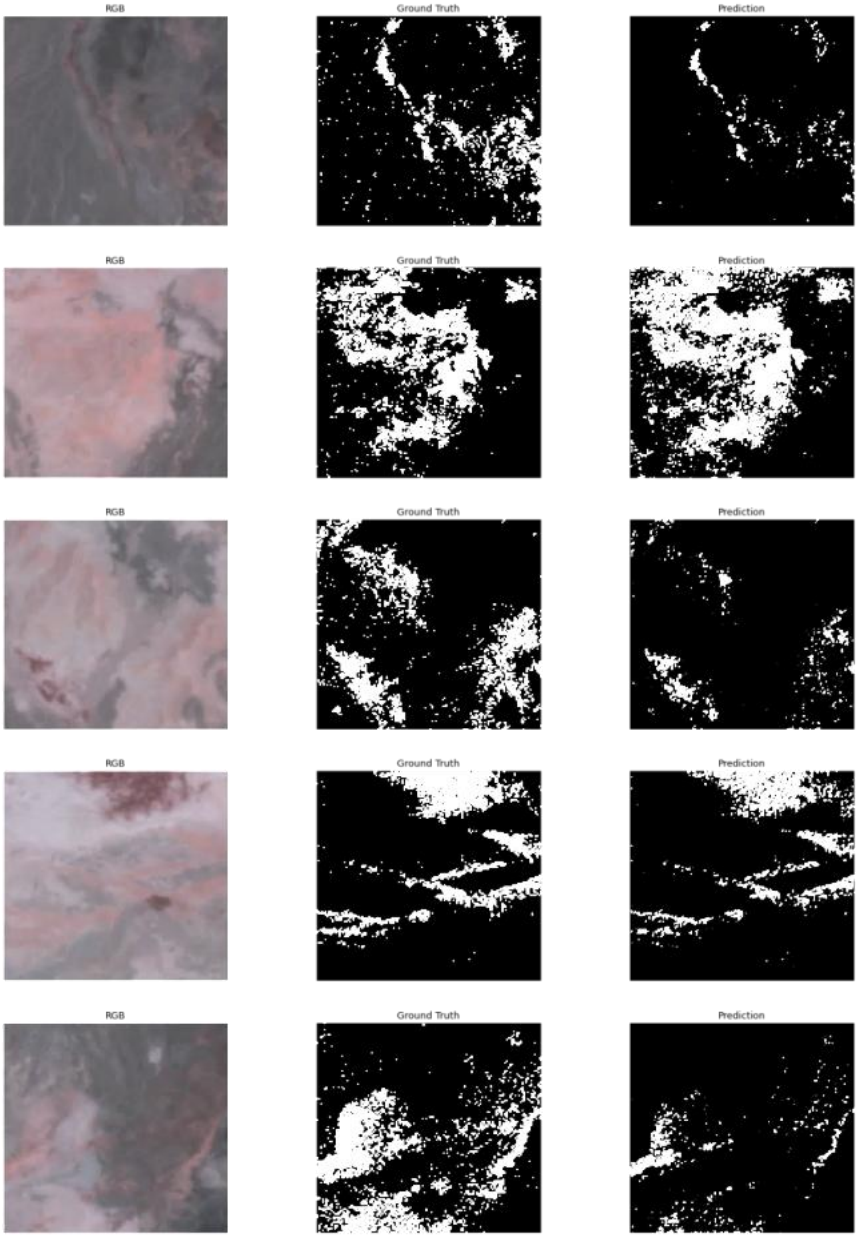
شکل ۷: معماری شبکه پیشنهادی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

جدول ۲: پارامترهای شبکه در تفکیک دگرسانی‌ها

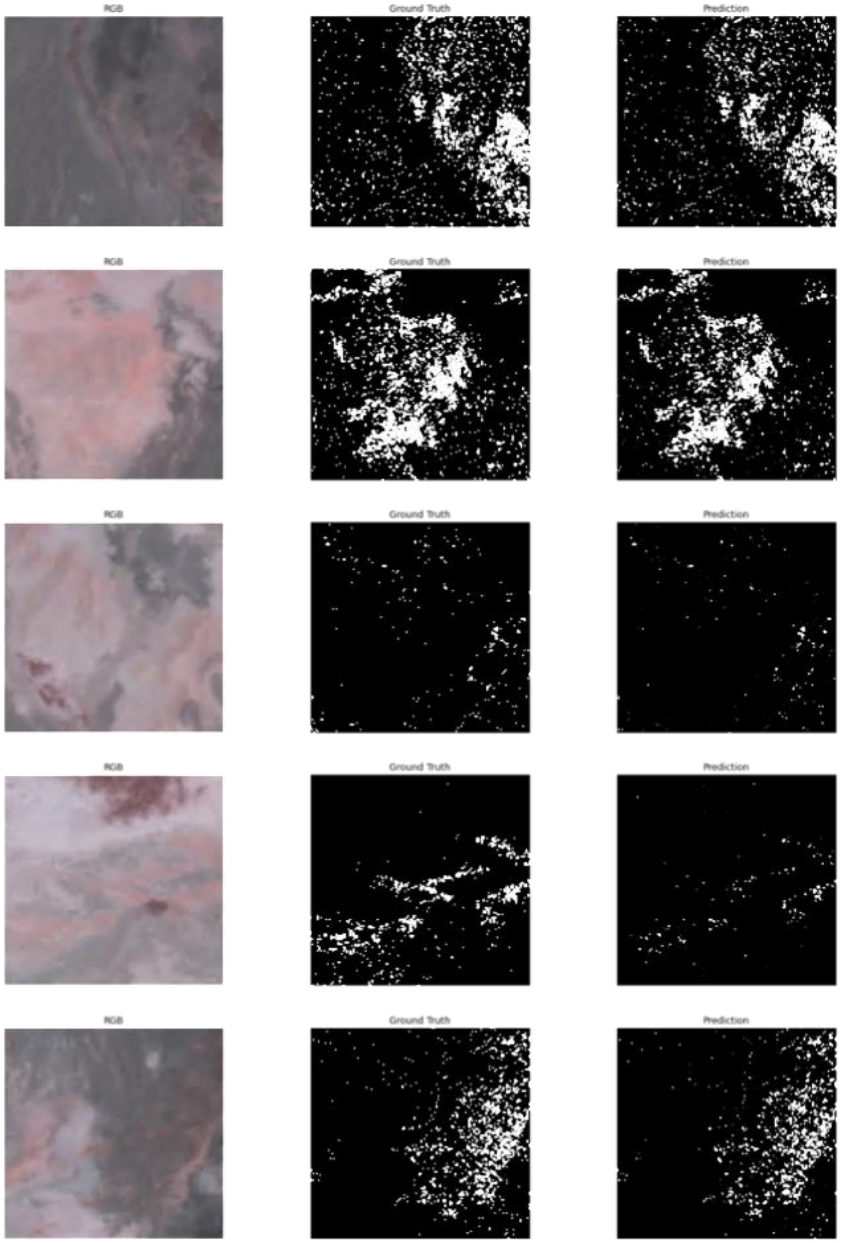
دگرسانی	آرژیلیک				فیلیک				پروپیلیتیک			
ورودی	*RGB*	*RGB*	*SWIR*	*SWIR*	*RGB*	*RGB*	*SWIR*	*SWIR*	*RGB*	*RGB*	*SWIR*	*SWIR*
مشاهده	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰
نرخ یادگیری *Adam*	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰۰۱
حذف تصادفی	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۴	۰٫۵
تقویت داده	*۴	*۴	*۴	*۴	*۸	*۸	*۴	*۴	*۲	*۲	*۴	*۸
آموزش	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
ارزیابی	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۳
امتحان	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
دسته گذاری	۲	۲	۲	۲	۳	۳	۲	۲	۲	۲	۳	۳
حساسیت	۰٫۸۵۳	۰٫۸۴۵	۰٫۸۹۲	۰٫۹۰۱	۰٫۸۵۵	۰٫۸۷۶	۰٫۹۵۵	۰٫۹۷۶	۰٫۹۵۵	۰٫۹۵	۰٫۹۶۴	۰٫۹۵۳
F1 امتیاز	۰٫۴۲۶	۰٫۴۲۲	۰٫۴۴۶	۰٫۴۵۱	۰٫۴۲۸	۰٫۴۳۸	۰٫۴۷۷	۰٫۴۸۸	۰٫۴۷۷	۰٫۴۷۵	۰٫۴۸۲	۰٫۴۹۶
IoU	۰٫۷۴۳	۰٫۷۳۲	۰٫۷۸۸	۰٫۸۱۹	۰٫۷۴۸	۰٫۷۸۰	۰٫۹۱۴	۰٫۹۵۳	۰٫۹۱۴	۰٫۹۰۵	۰٫۹۳۱	۰٫۹۱۱

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



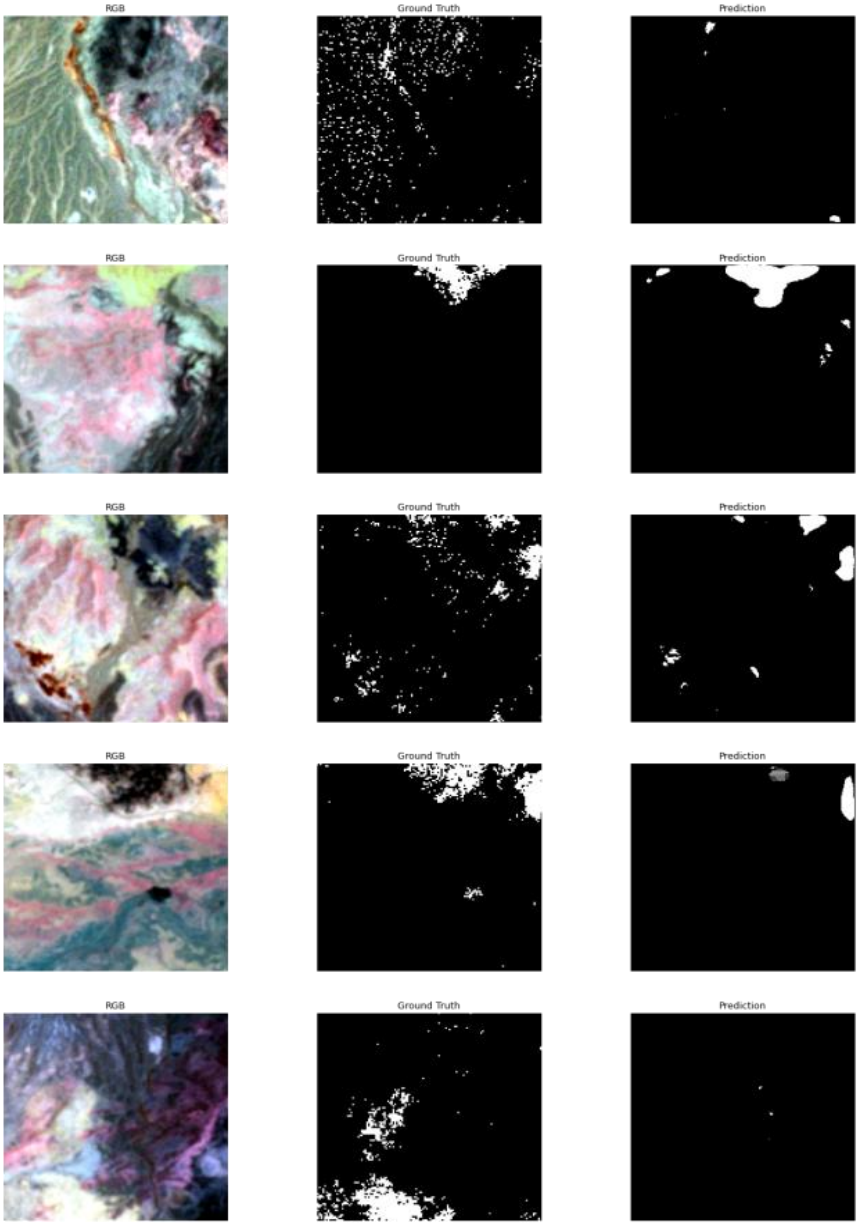
شکل۸: نتایج پیش‌بینی شبکه برای داده های آزمایش آرژیلیک (ستون سوم) در حالت بهینه (***SWIR***۲۰۰مشاهده)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



شکل۹: نتایج پیش‌بینی شبکه برای داده های آزمایش فیلیک (ستون سوم) در حالت بهینه (*SWIR*۲۰۰مشاهده)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



شکل۱۰: نتایج پیش‌بینی شبکه برای داده های آزمایش پروپیلیتیک (ستون سوم) در حالت بهینه (*RGB*۱۰۰مشاهده)

۵- نتایج و بحث

در ذخایر معدنی مرتبط با مس پورفیری، دگرسانی آرژلیک بالای زون دگرسانی فیلیک قرار گرفته و این دگرسانی‌ها توسط زون دگرسانی پروپیلیتیک بصورت حلقوی احاطه می‌شوند که در منطقه داخلی این حلقه و در مجاورت بخش گوسانی و زون فیلیک، بسیاری از رگه‌های فلزات پایه دیده می‌شود (شکل(۱)). گوسان مجموعه ای از اکسید و هیدروکسیدهای آهن است که در اثر هوازدگی و اکسیداسیون کانی‌های سولفیدی در نزدیکی سطح زمین تشکیل می‌شوند. در این فرآیند، آب‌های سطحی عناصر قابل حل را شسته و اکسید و هیدروکسیدهای آهن ثانویه (گوتیت، هماتیت) و اکسید

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

سولفات‌ها (کانی‌های مربوط به گروه ژاروسیت) نزدیک ذخیره سولفید توده‌ای تشکیل می‌شود.

پس از چندین مرتبه سعی و خطا، پارامترهای بهینه شبکه برای هر دگرسانی در قالب جدول (۱) بدست آمد. شبکه بهینه بر روی تصاویر منطقه مورد مطالعه اجرا شد که نتایج آماری میانگین مربوط به سه پارامتر مهم ماتریس ابهام آن که با استفاده از رابطه (۴) تا رابطه(۶) برآورد می‌شوند، عبارتند از: حساسیت= ۰/۹۴۳ ، امتیاز $F1$= ۰/۴۷۲ و پارامتر IOU= ۰/۸۹۶ .

رابطه (۴): محاسبه پارامتر حساسیت ماتریس ابهام

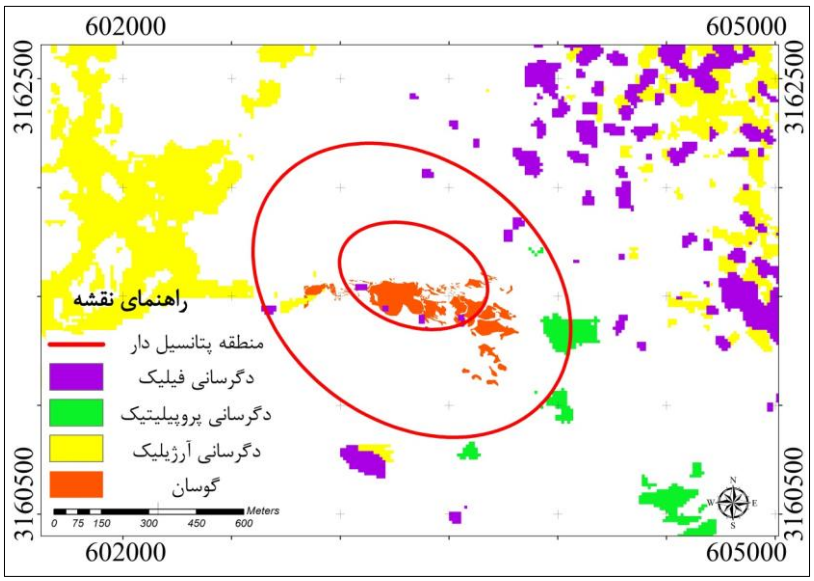
$$= TN/(TN+FP)$$

رابطه (۵): محاسبه پارامتر امتیاز $F1$ ماتریس ابهام =

$$TP / (2*TP + FP + FN)$$

رابطه (۶): محاسبه پارامتر IOU ماتریس ابهام =

$$TP / (TP + FP + FN)$$



شکل۱۱: نقشه جانمایی دگرسانی‌ها (رنگ زرد = دگرسانی آرژیلیک، رنگ بنفش = دگرسانی فیلیک، رنگ سبز = دگرسانی پروپیلیتیک) به همراه بخش گوسانی (رنگ آجری) منطقه مورد مطالعه

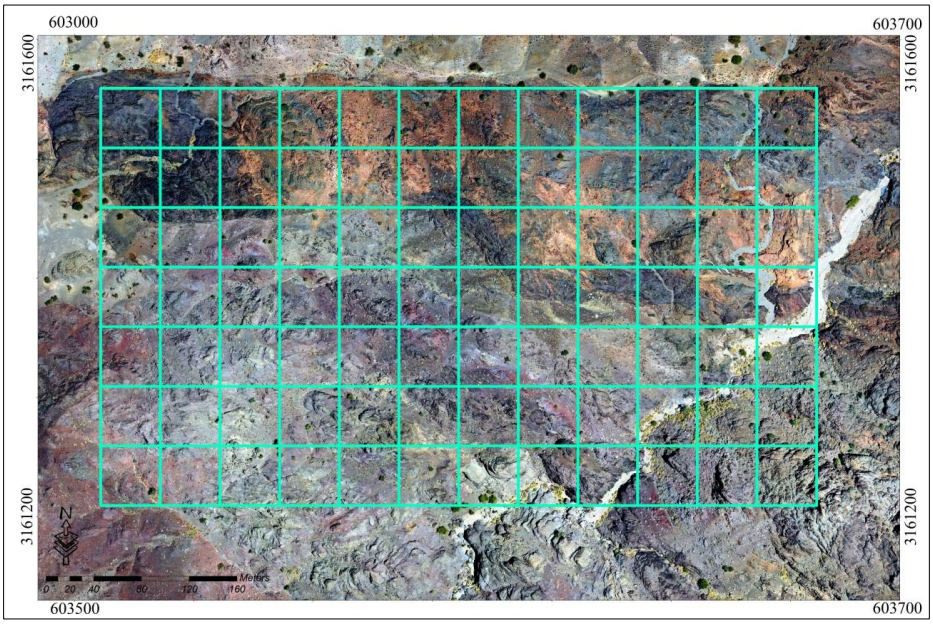
در منطقه مورد مطالعه، دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک پیشبینی شده توسط شبکه CNN همراه با بخش گوسانی منطقه که به روش زمینی برداشت شده بود، جانمایی شده و در قالب شکل (۱۱) ارائه گردید. با توجه به این شکل، و با در نظر گرفتن تئوری تشکیل کانسارهای مس پورفیری، حلقه قرمز رنگ بیرونی برمبنای چیدمان کمانی ۴ پچ پروپیلیتیکی ترسیم شد. حلقه قرمز رنگ درونی هم بر مبنای چیدمان کمانی ۴ پچ فیلیکی ترسیم شد. این حلقه بخش گوسانی را نیز در بر می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، منطقه مورد مطالعه پتانسیل ذخیره مس پورفیری را دارد اما برای قطعیت در نتیجه باید ارزیابی‌های میدانی انجام گردد.

جهت بررسی و ارزیابی میدانی نتایج بدست آمده در شناسایی دگرسانی‌های منطقه توسط شبکه یادگیری عمیق کانولوشنی، از تکنیک اکتشافی میدانی ژئوشیمیایی استفاده شد. ویژگی این رشته از تکنیک اکتشافی، کشف نهشته‌های سطحی با عیار اندک و یا توده های معدنی عمیق با عیار بالاست. ژئوشیمی اکتشافی با تکیه بر اصول رفتار عناصر شیمیایی و

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

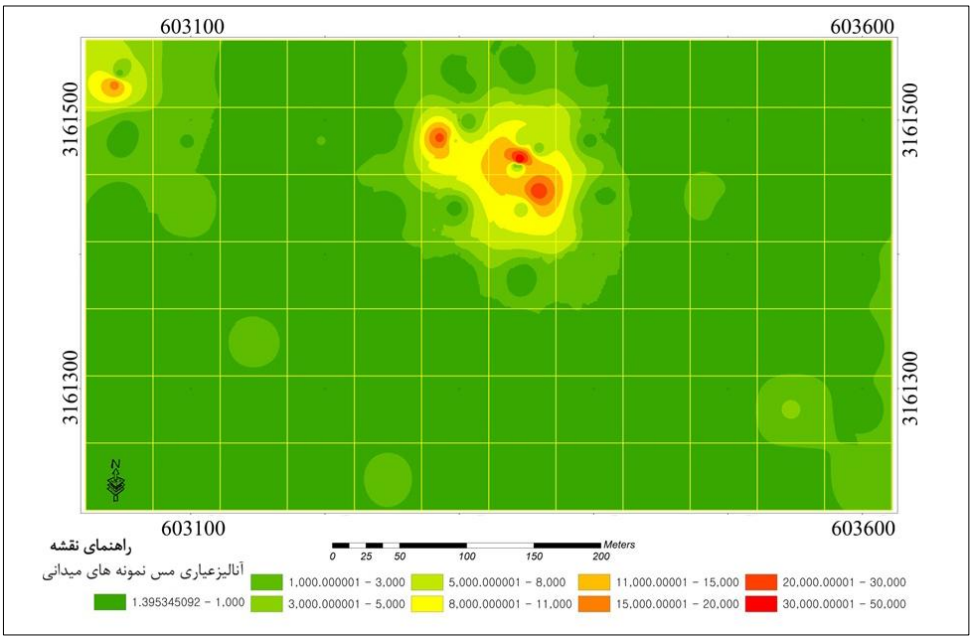
مناسبات گروهی آن ها و مطالعه دقیق در خواص آن ها در پی یافتن کلیدهایی است که با استفاده از آن ها نقاط امید بخش و زون‌های کانی سازی را معرفی نماید.

در این روش کل منطقه به سلول‌های ۵۰ متری تقسیم شده و از سنگ‌های هر سلول یک نمونه یک کیلویی تهیه شده و در مجموع ۸۴ نمونه به آزمایشگاه ارسال شد. در آزمایشگاه عناصر فلزی مختلف آنالیز شده و مقدار حضور هر کدام از آن‌ها در سلول‌های مختلف بر حسب *ppm* و *ppb* اعلام گردید. برای مس مقادیر بالای ۵۰۰۰ *ppm* و برای طلا مقادیر بالای ۳۰۰ *ppb* اقتصادی هستند. در ادامه با استفاده از درونیابی عیاری برای دو عنصر مس و طلا، مرکز تجمع سطحی این عناصر بدست آمد که رخنمونی از منبع زیرسطحی آن است. در شکل(۱۲) نقشه توزیع محل نمونه‌ها، در شکل(۱۳) نقشه درونیابی میزان توزیع عیاری عنصر مس، در شکل(۱۴) نقشه درونیابی میزان توزیع عیاری عنصر طلا و در شکل(۱۵) نقشه جانمایی محدوده‌های آنومالی عناصر مس و طلا در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

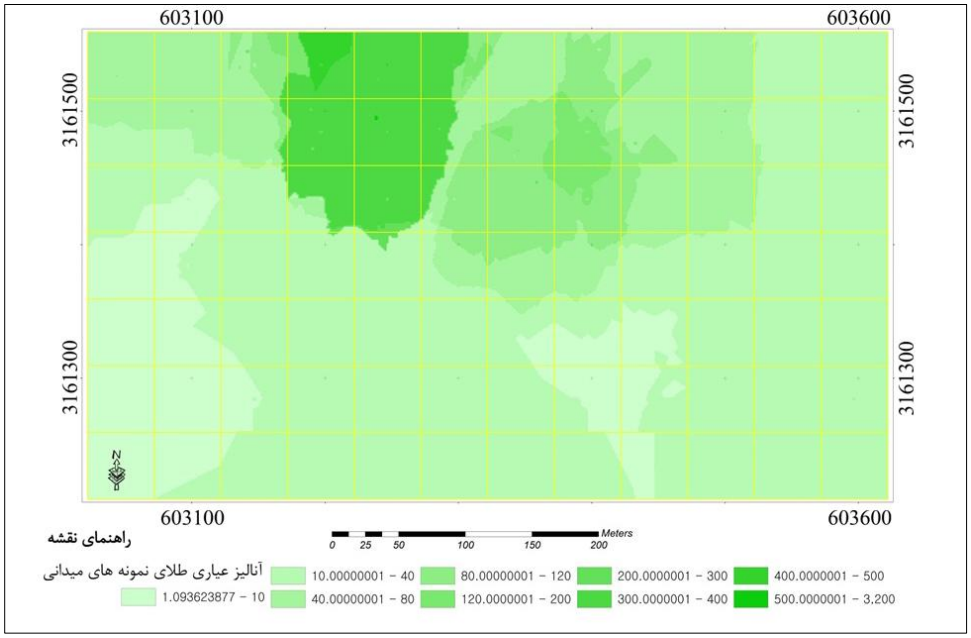


شکل۱۲: نقشه توزیع محل نمونه‌برداری ژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

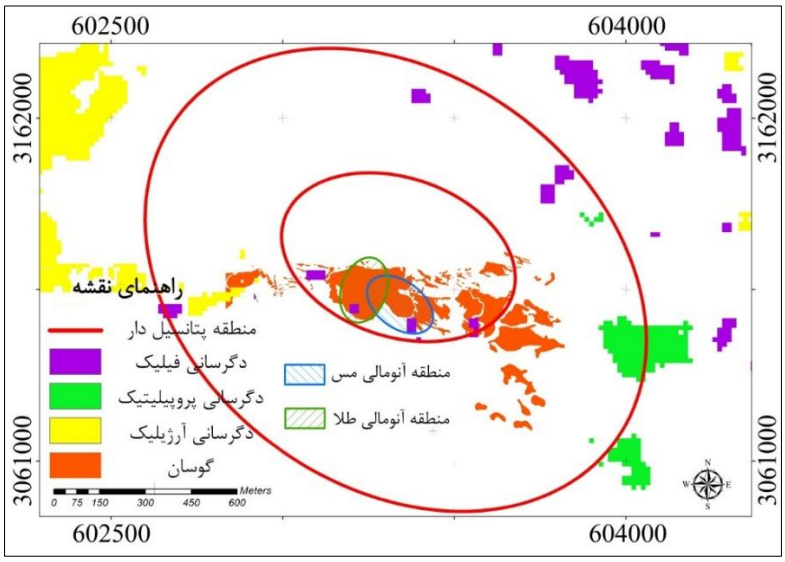


شکل۱۳: نقشه درونیابی میزان توزیع عیاری عنصر مس در منطقه مورد مطالعه



شکل۱۴: نقشه درونیابی میزان توزیع عیاری عنصر طلا در منطقه مورد مطالعه

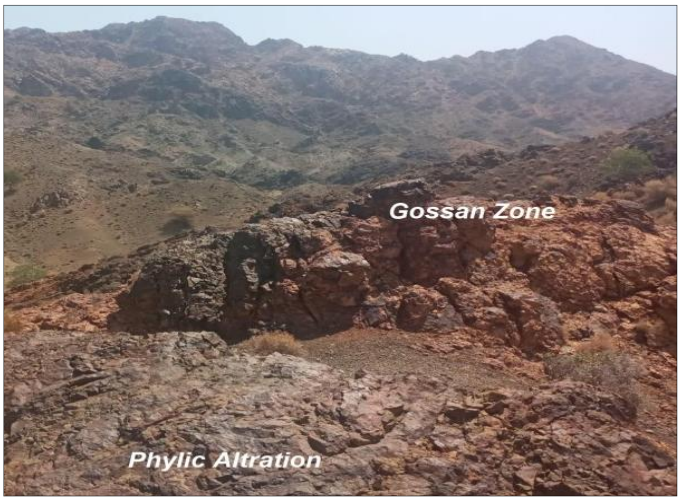
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



شکل۱۵: نقشه جانمایی محدوده‌های آنومالی عناصر مس و طلا در منطقه مورد مطالعه

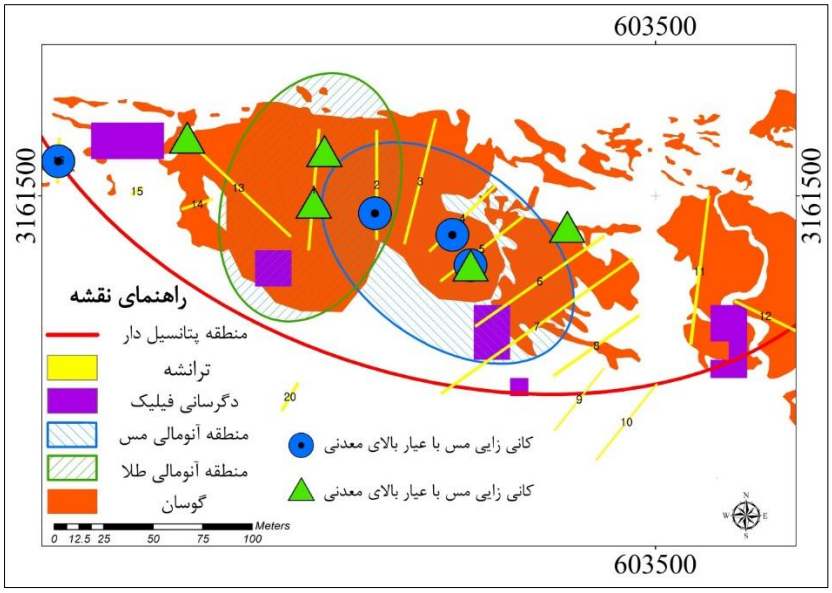
در مطالعات سنگ‌شناسی منطقه، وجود دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک در پچ‌های شناسایی شده مورد تایید قرار گرفت. همچنین مشخص شد که در بالای قسمت‌های فیلیکی، دگرسانی آرژیلیکی وجود داشته که در طول زمان و بر اثر فرسایش از بین رفته است. این نتایج در واقع تائید کننده نتایج بدست آمده از شبکه *CNN* در مرحله قبل بود. صحت و نظم وجود دگرسانی‌های مورد نظر به همراه گوسان در کنار ماده معدنی، نشانه‌هایی از حضور یک سامانه مس پورفیری در منطقه مورد مطالعه دارد.

بنابر نتایج عیاری در منطقه مورد مطالعه که در بخش‌های آنومال، بین ۳ تا ۵ درصد برای عنصر مس و ۴۰۰ تا ۱۳۰۰ *ppb* برای عنصر طلا می‌باشد، اکتشاف تکمیلی در منطقه و حفاری مورد نیاز هست و توجیه اقتصادی دارد. بدین منظور با توجه به حلقه‌های دگرسانی بدست آمده از شبکه *CNN* و نقاط کانه‌زایی پر عیار مس و طلا بدست آمده از نمونه‌برداری میدانی، ترانشه‌های حفاری طراحی گردید(شکل (۱۶) و (۱۷)).



شکل۱۶: نمایی از دگرسانی فیلیک و زون گوسان در محل تلاقی آنومالی‌های عیاری مس و طلا در منطقه مورد مطالعه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]



شکل۱۷: طراحی ترانشه‌های حفاری

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از شبکه یادگیری عمیق کانولوشنی برای جداسازی دگرسانی‌های آرژیلیک، فیلیک و پروپیلیتیک که در مناطق پتانسیل‌دار سامانه‌های مس پورفیری الزام به حضور دارند، در محدوده اکتشافی گمرکان واقع در جنوب شرقی شهرستان جیرفت استفاده شد. پس از استخراج نتایج پیش‌بینی شبکه از محل دگرسانی‌ها و استفاده از عملیات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که تمامی دگرسانی‌های پروپیلیتیک و فیلیک شناسایی شده صحیح بوده و دگرسانی آرژیلیک بر اثر فرسایش بصورت کامل از روی دگرسانی فیلیک حذف شده است. بنابراین نتایج شبکه *CNN* کاملا صحیح و در تکمیل نتایج میدانی بوده و بیانگر پتانسیل بالای منطقه مورد مطالعه در تشکیل سامانه مس پورفیری است. با استفاده از نتایج بدست آمده، مرکز تجمع مواد معدنی (طلا و مس) با کمترین هزینه و سریعترین و دقیق‌ترین حالت ممکن شناسایی شد که نتایج عملیات میدانی نیز آن را تایید کرد. یکی از نتایج مهم تحقیق حاضر، استخراج نقشه ترانشه‌های حفاری جهت تکمیل مطالعات میدانی و استخراج ماده معدنی است که باعث ارزش افزوده مالی در منطقه مورد مطالعه می‌گردد.

بر اساس نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر، محققین حوزه پی‌جویی و اکتشاف می‌توانند با استفاده از شبکه های *CNN* و تهیه داده های آموزشی متناسب با ماده معدنی مورد مطالعه، نتایج دقیق تری نسبت به روش های کلاسیک بدست بیاورند.

در نهایت باید بیان کرد که استفاده از این روش در محدوده‌های کوچک و بدون حامی دولتی، می‌تواند هزینه و زمان اکتشاف را بسیار کاهش داده و همچنین با افزایش داده‌های آموزشی و متنوع از دگرسانی‌های مورد مطالعه در کانسارهای گوناگون مس، صحت و دقت شبکه یادگیری عمیق کانولوشنی مورد استفاده، بهتر و قوی‌تر خواهد شد.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی روی اکتشاف عناصر نادر خاکی که در آینده جنبه پدافند تکنولوژی خواهند داشت، مانند لیتیوم، و یا عناصر گرانبهایی مانند طلا و تیتانیوم با استفاده از تکنیک‌های مشابه تحقیق گردد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

مراجع

[1] *J. D. Lowell, J. M. Guilbert, "Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits". Economic Geology, 65 (4), 373-408,1970.*

[2] *H. Ranjbar, M. Honarmand & Z. Moezifar, "Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt". Journal of Asian Earth Sciences, 24: 237-243, 2004.*

[3] *M. H. Tangestani, N. Mazhari, B. Agar, F. Moore, "Evaluating Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semiarid area, northern Shahr-e-Babak, SE Iran". International Journal of Remote Sensing . 29: 2833–2850, 2008.*

[4] *M. H. Tangestani, "Abundance and spatial distribution of clay minerals fraction detected using sub-pixel classification data mining Esther Abade independence". Journal of Economic Geology, Volume 2, Issue 1, Pages 39-49, 2010.*

[5] *S. Salati, "Lithological mapping and fuzzy set theory: Automated extraction of lithological boundary from ASTER imagery by template matching and spatial accuracy assessment". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13, 753–765, 2011.*

[6] *A. Beiranvand Pour, H. Mazlan, "The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits", Ore Geology Reviews 44, 1–9,2012.*

[7] *S. S. Matar and A.O. Bamousa, "Integration of the ASTER thermal infra-red bands imageries with geological map of Jabal Al Hasir area, Asir Terrane, the Arabian Shield". Journal of Taibah University for Science, 7 (1), 1–7. doi:10.1016/j.jtusci.2013.01.001. 2013.*

[8] *H. Moghaddam, M. Oskouei, H. Zekri, "Application of Hyperion data to classify ASTER image for mineral detection in Lahroud, Iran". Iranian Journal of Mining Engineering, 9(25), 97-108, 2015.*

[9] *F. D. Boissieua, B. Sevinb, T. Cudahyc, M. Mangeasa, S. Chevreld, C. Ongc, A. Rodgerc, P. Maurizotb, C. Laukampc, I. Lauc, T. Touraivanee, D. Cluzele, M. Despinoy, "Regolith-geology mapping with support vector machine: A case study over weathered Ni-bearing peridotites, New Caledonia". Int. J. Appl. Earth Observ.Geoinform, 64, 377–385, 2017.*

[10] *M. Keykhay-Hosseinpoor, A. H. Kohsari, A. Hossein-Morshedy, A. Porwal, "A machine learning-based approach to exploration targeting of porphyry Cu-Au deposits in the Dehsalm district, eastern Iran". Ore Geology Reviews, 116(2020): 103234, 2020.*

[11] *S. D. Khan, K. Mahmood, "The application of remote sensing techniques to the study of ophiolites". Earth-Science Reviews, 89, 135-143, 2008.*

[12] *S. Yousefifar, B. Rashidi, "Introducing Dali Cu-Au deposit as the first type of diorite porphyry deposit in central Iran". 34th International Geological Congress,2009.*

[13] *B. K. Bhadra, S. Pathak, G. Karunakar, "ASTER Data Analysis for Mineral Potential Mapping Around Sawar-Malpura Area, Central Rajasthan". J Indian Soc Remote Sens 41, 391–404, 2013.*

[14] *M. Hosseinjani Zadeha, M. H. Tangestani, F. V. Roldan, I. Yustac, "Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran". Ore Geology Reviews, 62, 191-198, 2014.*

[15] *M. Hosseinjani Zadeh, M. Honarmand, "A remote sensingbased discrimination of high- and low-potential mineralization for porphyry copper deposits; a case study*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

from Dehaj–Sarduiyeh copper belt, SE Iran". European Journal of Remote Sensing, 50:1, 332-342, 2017.

[16] A. B. Pour, M. Hashim, "Application of Landsat-8 and ALOS-2 data for structural and landslide hazard mapping in Kelantan, Malaysia, Nat". Hazards Earth Syst, Sci, 17, 1285–1303, 2017.

[17] H. Fereydooni, S. Mojeddifar, "A directed matched filtering algorithm (DMF) for discriminating hydrothermal alteration zones using the ASTER remote sensing data". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 61, 1-13, 2017.

[18] A. Shirazi, A. Shirazy, J. Karami, "Remote Sensing to Identify Copper Alterations and Promising Regions, Sarbishe, South Khorasan, Iran". International Journal of Geology and Earth Sciences, 4, 36-52, 2018.

[19] N. Rani, T. Singh, V.R. Mandla, "Mapping hydrothermal alteration zone through aster data in Gadag Schist Belt of Western Dharwar Craton of Karnataka, India". Environ Earth Sci 79, 526, 2020.

[20] S. L. Phung, and A. Bouzerdoum, " MATLAB Library for Convolutional Neural Networks, Technical Report ‖ " . Visual and Audio Signal Processing Lab, University of Wollongong, 2009.

[21] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deeplearning". Nature, vol. 521, pp. 436-444,2015.

[22] S. Ioffe and C. Szegedy, "Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift", arXiv preprint arXiv:1502.03167,2015.

[23] S. Wager, S. Wang, and P. S. Liang, "Dropout training as adaptive regularization", Advances in neural information processing systems, pp. 351-359, 2013.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9, No.4, Winter 2022

Research Paper

Mapping Alterations associated with Porphyry Copper Ores using ASTER Multispectral Imaging Based on Deep Learning

Ahmad Rajabi [1]***, Reza Shah-Hosseini*** [2*]

1- PhD student of remote sensing in Department of Geomatics, College of Engineering, University of Tehran
2- Assistant professor in School of Surveying and Geo Spatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran

Abstract

One of the applications of remote sensing is to study and classify the alteration areas, which is one of the fastest methods to explore the porphyry copper deposit, determine its accumulation center and location of drilling points. The aim of this study is to identify argillic, phyllite, and propylitic alterations in small exploration ranges and to determine porphyry copper accumulation area as well. In this regard, an algorithm on the basis of deep convolutional cane crusts was designed. In the proposed algorithm, first, preprocessings such as geometric and spectral correction and repairing and training data amplification were performed in order to prepare RGB and SWIR data of the ASTER sensor to enter the chip. The proposed convolutional shear chip (CNN) has a coder-decoder structure that in the coding stage different and efficient features are extracted at different scales and in the decoding stage the generated features are combined to estimate the alteration regions. Then, the desired network was implemented for the images of the studied exploratory area called "Customs Mouth" located in Jiroft city, and the alteration areas of the region were extracted. For field evaluation of the results, lithological and geochemical methods were used on 84 samples. By merging the network results, extracting the geometric structure of the alterations and locating it on the fine copper and gold interpolation map of the region, and examining the lithological results, the alterations of the region with a statistical accuracy of sensitivity parameters: 0.943, F1 score: 0.472, IoU: 0.896 and lithographic detection accuracy 92% and an average copper grade above 4% were identified in these areas. The digging trenches map to extract mineral deposits was obtained on the basis of the detected alterations.

Key words: *Porphyry copper deposit, Geometric structures, Alteration, Remote sensing, Deep Learning.*

Correspondence Address*: Photogrammetry & Remote Sensing Group, School of Surveying & Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel*: +98 21 61114527*
Email: *rshahosseini@ut.ac.ir*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.5.8]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.63]