



تشخیص مناطق دگرسانی مس پورفیری مبتنی بر سنجش از دور با استفاده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2

مرتضی حصیری^۱، سید سعید قناده‌پور^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک)، تهران morteza.hasiri77@aut.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران s.ghannadpour@aut.ac.ir

چکیده

جهت شناسایی مناطق امید بخش از نظر کانی‌سازی مس، تکنولوژی‌های نوینی برای رسیدن به این هدف توسعه یافته است. یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین روش‌ها در این حوزه، بهره‌گیری از علم سنجش‌ازدور و تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای است. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توان مناطق امیدبخش از نظر کانی‌سازی مس پورفیری را مشخص کرد. محدوده مطالعاتی ظرفرقد در ۸۵ کیلومتری شهر اصفهان واقع شده است. این محدوده بخشی از کمربند فلززایی ارومیه - دختر بوده که این کمربند فلززایی به صورت یک نوار آتشفشانی بین زون ایران مرکزی و سنندج - سیرجان کشیده شده است. از نظر سنگ‌شناسی این محدوده شامل رخنمون‌های محدود ریولیت پورفیری خاکستری مایل به صورتی، داسیت‌ها و ریوداسیت‌های پورفیری خاکستری تا سبز، آندزیت‌های خاکستری، دیوریت و یک توده دیوریت کوارتز پورفیری می‌شود. در این محدوده مطالعاتی پنج زون دگرسانی مس پورفیری که شامل پتاسیک، فیلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی می‌شود، وجود دارد. در این مطالعه از تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 که دارای قدرت تفکیک مکانی بالایی بوده جهت بررسی و شناسایی مناطق امید بخش محدوده مطالعاتی ظرفرقد استفاده شده است. جهت شناسایی مناطق امیدبخش از روش‌های مختلف پردازش تصاویر ماهواره‌ای که شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA)، ترکیب رنگی کاذب (FCC) و نسبت باندهای (Band Ratio) می‌شود، برای شناسایی زون‌های دگرسانی در محدود ظرفرقد استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده اهمیت محدوده مطالعاتی ظرفرقد از نظر کانی‌سازی مس پورفیری بوده است.

واژه‌های کلیدی

Sentinel-2، مس پورفیری، سنجش‌ازدور، ارومیه - دختر، شناسایی مناطق امید بخش.



۱. مقدمه

سنجش‌ازدور از روش‌های مختلفی برای شناسایی هدف استفاده می‌کند و توانایی ما را برای تشخیص ویژگی‌های خاص در چشم‌انداز افزایش می‌دهد. تجزیه و تحلیل طیفی شامل بررسی خواص بازتابی یا انعکاسی در تصاویر چند طیفی یا ابرطیفی برای شناسایی شاخص‌های طیفی مرتبط با اهداف مختلف است [3-5]. Sentinel-2 بخشی از برنامه Copernicus است که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) در سال ۲۰۱۵ پرتاب شد. هدف اصلی مأموریت Sentinel-2 ارائه داده‌های ماهواره‌ای با وضوح بالا برای نظارت بر کشاورزی، توسعه شهری، نظارت بر جنگل، نقشه‌برداری بلایای طبیعی و اکتشاف مواد معدنی است. داده‌های Sentinel-2 در مقایسه با سایر تصاویر ماهواره‌ای (Landsat و ASTER) با وضوح مکانی بالا ارائه می‌دهد. تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 وضوح مکانی بالا (۱۰ متر) را ارائه می‌دهد. این داده‌ها برای بهبود برنامه‌های خود با سایر مأموریت‌های Sentinel مانند Sentinel-1 و Sentinel-3 یکپارچه شده است. با وجود مزایای آن، داده‌های Sentinel-2 تحت تأثیر پوشش ابر قرار می‌گیرد و کاربرد آن در مناطق مستعد ابری محدود می‌شود. به‌طور کلی، Sentinel-2 فرصت‌های جدیدی را برای بخش‌های مختلف ارائه می‌دهد و این پتانسیل را دارد که به طور قابل توجهی در تجزیه و تحلیل محیطی استفاده شود [6]. در جدول ۱ ویژگی‌های طیفی باندهای مختلف ماهواره Sentinel-2 ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های طیفی تمامی باندهای مختلف ماهواره Sentinel-2 [7].

MSI Band Spatial	Spatial Resolution (m)	Central Wavelength (nm)	Bandwidth (nm)
B1: Coastal Aerosol	60	443	20
B2: Blue	10	490	65
B3: Green	10	560	35
B4: Red	10	665	30
B5: Red-Edge	20	705	15
B6: Red-Edge	20	740	15
B7: Red-Edge	20	783	20
B8: NIR	10	842	115
B8A: Vegetation RE	20	865	20
B9: Water Vapor	60	945	20
B10: SWIR Cirrus	60	1375	30
B11: SWIR	20	1610	90
B12: SWIR	20	2190	180

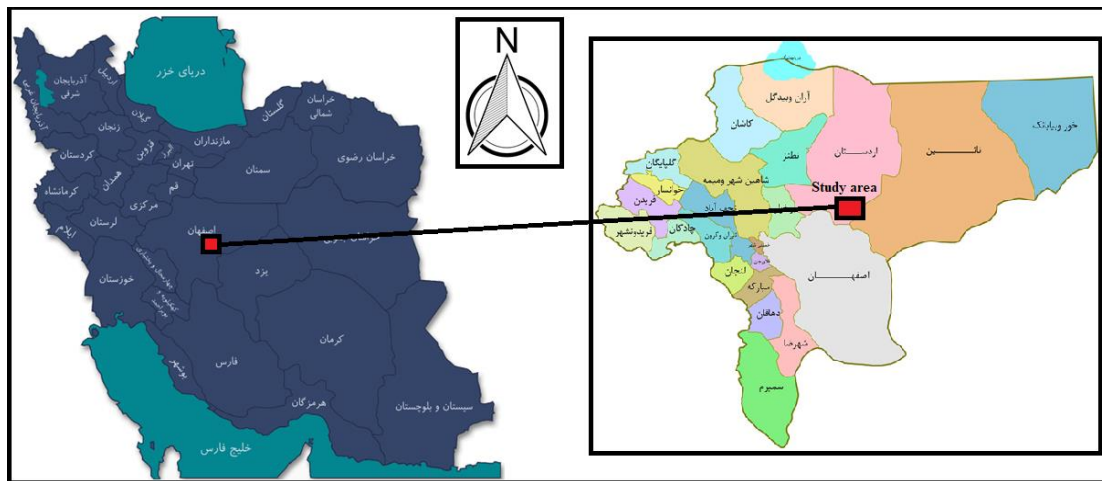
در این مطالعه از تصویر Sentinel-2 جهت شناسایی مناطق امید بخش از نظر کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. بر روی تصویر ماهواره‌ای در محدوده مطالعاتی پیش‌پردازش (تصحیحات هندسی و اتمسفری) و پردازش‌های مختلفی (تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی، ترکیب رنگی کاذب و نسبت باندی) در نرم‌افزار ENVI جهت بارزسازی زون‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی مس، اعمال شده است.

۲. زمین‌شناسی

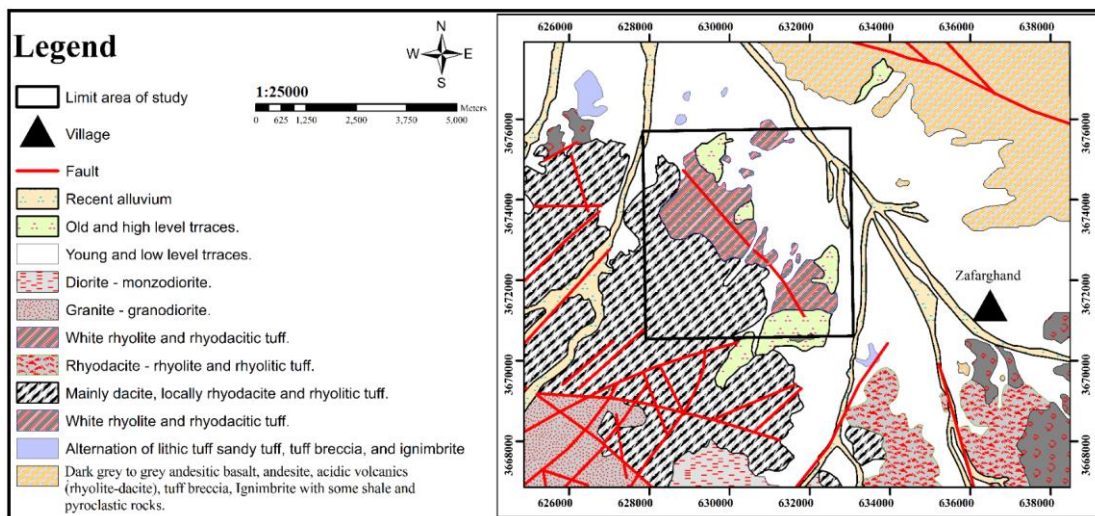
محدوده مطالعاتی ظفرقند با مختصات جغرافیایی ۳۰°۱۰' تا ۳۰°۲۶' شمالی و ۵۲°۱۱' تا ۵۵°۲۳' شرقی در ۸۵ کیلومتری شهر اصفهان، استان اصفهان واقع شده است (شکل ۱). از نظر موقعیت زون ساختاری در امتداد کمربند فلززایی ارومیه - دختر قرار دارد در شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است. بررسی‌های میدانی در این محدوده وجود سنگ‌های آتشفشانی با سن ائوسن بالایی و توده‌های نفوذی با سن الیگوسن نشان می‌دهد. واحدهای سنگی شناسایی شده عبارتند از: ریولیت که رخنمون‌های محدود در گوشه شمال غربی، رنگ خاکستری مایل به صورتی و بافت پورفیری را نشان می‌دهد، داسیت‌ها و ریوداسیت‌ها که پوشش گسترده در منطقه با رنگ‌های خاکستری تا سبز داشته و این واحد با بافت پورفیری، خمیر فلسیک ریزدانه، آمورف و متخلخل به عنوان سنگ میزبان



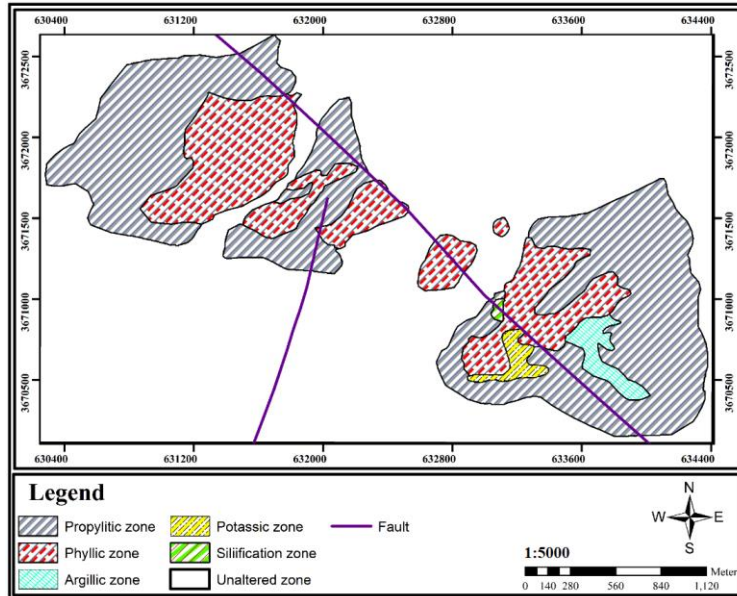
اصلی برای کانی سازی مس شناخته می‌شود، آندزیت‌ها که عمدتاً در بخش‌های جنوب غربی و غربی یافت می‌شوند و به دلیل فراوانی کریستال‌های درشت خاکستری تیره و توخالی به نظر می‌رسند و توده‌های نفوذی: دیوریت، دیوریت کوارتز و میکرو دیوریت در قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرقی بیرون زده‌اند که با رنگ خاکستری تیره مشخص می‌شود. توده دیوریت کوارتز پورفیری نیمه نفوذی، ناحیه کوچکی را در قسمت جنوب شرقی منطقه پوشش می‌دهد [2,8]. دگرسانی‌های مختلف منطقه شامل دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک، پروپیلیتیک و سیلیسی می‌باشد. این دگرسانی‌ها اغلب در نزدیکی توده‌های نفوذی و سنگ‌های میزبان در اطراف گسل جنوبی اردستان مشاهده می‌شوند. در گوشه جنوب شرقی منطقه، دگرسانی پتاسیک در نزدیکی توده دیوریت کوارتز بسیار محدود است، در حالی که دگرسانی فلیک در نزدیکی توده‌های دیوریت نفوذی و دیوریت کوارتز پورفیری و همچنین سنگ‌های آتشفشانی داسیت و ریوداسیت مشاهده می‌شود [8]. در شکل ۳ نقشه زون‌های دگرسانی محدوده مطالعاتی نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایش محدوده مطالعاتی ظفرقند در ۸۵ کیلومتری شهر اصفهان از توابع استان اصفهان.



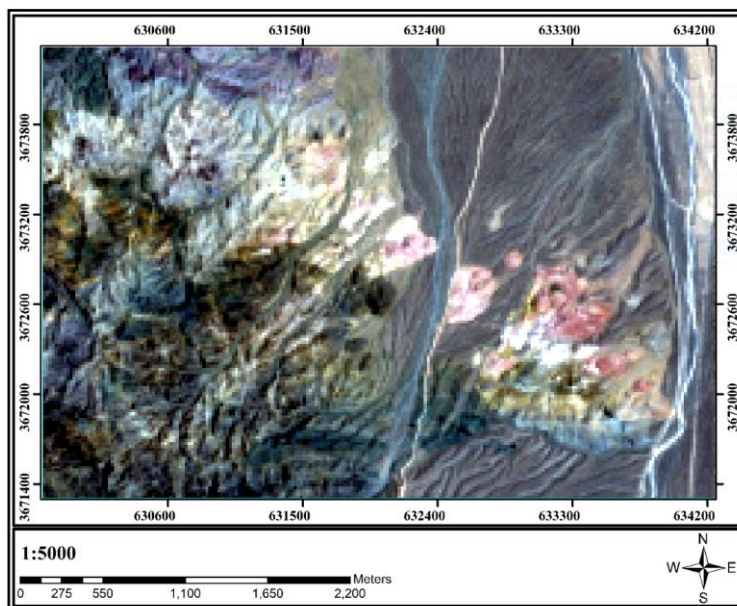
شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی ظفرقند. کادر مشکی رنگ درون نقشه، محدوده مطالعاتی ظفرقند را مشخص کرده است، مثلث سیاه رنگ نشان دهنده روستای ظفرقند که در ۸۵ کیلومتری شهر اصفهان واقع شده است را نمایش می‌دهد.



شکل ۳. نقشه هاله‌های دگرسانی در محدوده مطالعاتی ظفرقند (برگرفته از مطالعه قنادپور و همکاران ۲۰۲۳) [8].

۳. پیش‌پردازش تصویر ماهواره Sentinel-2

تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 L1C استفاده شده در این مطالعه مربوط به تاریخ 2023/07/28 است. این تصویر زمین مرجع بوده و برای تصحیح اتمسفری از نرم افزار SNAP و افزونه Sen2cor استفاده شده است. Sen2cor یک الگوریتم حیاتی است که برای رفع تأثیرات جوی بر تصاویر ماهواره‌ای طراحی شده است. هنگام ثبت تصاویر ماهواره‌ای، شرایط جوی تابش الکترومغناطیسی خورشید را قبل از رسیدن به سطح زمین تغییر می‌دهد و بر انرژی ثبت شده تأثیر می‌گذارد. برای کاهش این امر، تصحیح اتمسفر برای حذف اثرات اتمسفر بر مقادیر بازتاب بالای جو ضروری است [9].



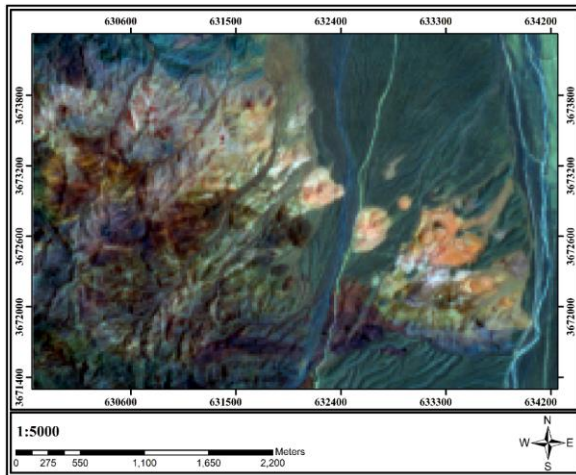
شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 حاصل از تصحیح اتمسفری در نرم افزار SNAP با استفاده از افزونه Sen2cor.



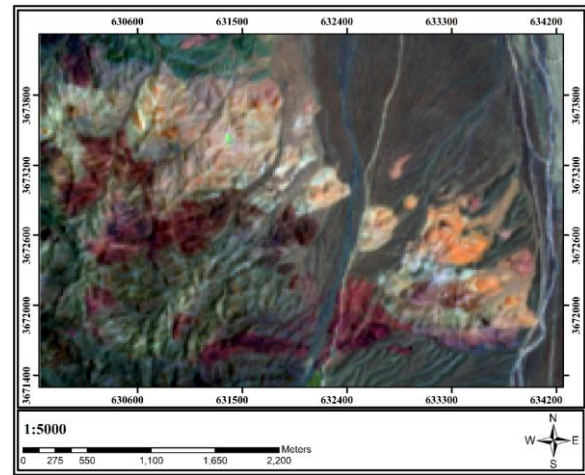
۴. پردازش تصویر ماهواره Sentinel-2

۱.۴. ترکیب رنگی کاذب (FCC)

ترکیب رنگی کاذب (False color combinations) شامل ادغام باندهای طول موج قرمز، سبز و آبی برای ایجاد تصاویری است که به تفسیر بصری کمک می‌کند به ویژه در شناسایی واحدهای زمین‌شناسی. برخلاف ترکیب‌های رنگ واقعی که رنگ‌های طیف مرئی را منعکس می‌کنند، تصاویر رنگی کاذب ناشی از استفاده از باندهای طیف الکترومغناطیسی مختلف بوده که انتخاب باند به هدف بستگی دارد. چشم انسان نسبت به تصاویر سیاه و سفید حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات رنگ جزئی نشان می‌دهد که در تشخیص ویژگی‌های زمین‌شناسی ارزشمند است. این رویکرد با نمایش همزمان اطلاعات متنوع از یک نقطه واحد، تفسیرپذیری را افزایش می‌دهد و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های زمین‌شناسی را بهبود می‌بخشد [10]. در این مطالعه از ترکیب RGB باند ۱۲، ۸ و ۳ جهت تفکیک دگرسانی (شکل ۵)، ترکیب باند ۱۱، ۴ و ۲ برای تفکیک نواحی با احتمال وجود اکسیدهای آهن، نواحی واجد دگرسانی رسی و کانی‌های رسی (شکل ۶) [1].



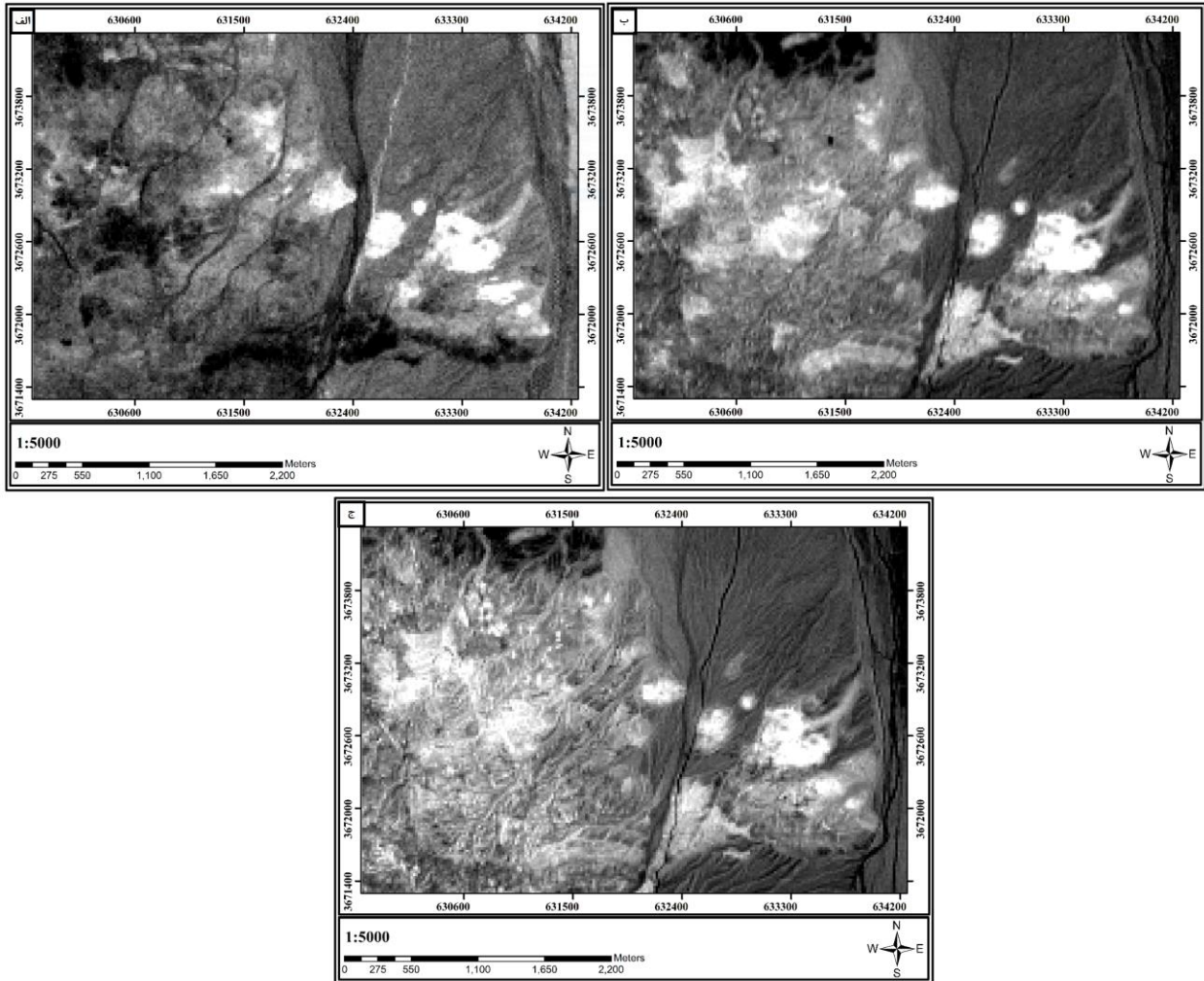
شکل ۶. تصویر ترکیب رنگی کاذب RGB=11, 4, 2 تفکیک نواحی با احتمال وجود اکسیدهای آهن، نواحی واجد دگرسانی رسی و کانی‌های رسی.



شکل ۵. تصویر ترکیب رنگی کاذب RGB=12, 8, 3 تفکیک دگرسانی.

۲.۴. نسبت بانندی (Band Ratio)

نسبت بانندی برای افزایش اختلاف طیفی بین باندها و کاهش اثرات توپوگرافی استفاده شد. تقسیم یک باند طیفی بر دیگری تصویری تولید می‌کند که شدت باند نسبی را ارائه می‌دهد [11]. این تکنیک شامل تقسیم مقدار عدد دیجیتال (DN) یک باند بر مقدار DN یک باند دیگر است. نسبت‌های باند ابزار ارزشمندی در سنجش‌ازدور برای برجسته کردن ویژگی‌های زمین‌شناسی خاص و موادی هستند که ممکن است به راحتی در باندهای خام قابل مشاهده نباشند [12]. در این مطالعه از نسب بانندی ۴/۳ برای شناسایی آهن سه ظرفیتی (شکل ۷ الف)، ۱۱/۸ برای شناسایی اکسیدهای آهن (شکل ۷ ب) و ۱۱/۴ برای شناسایی گوسان (شکل ۷ ج) استفاده شده است [13].



شکل ۷: نتایج حاصل از روش نسبت بانندی بر روی تصویر ماهواره Sentinel-2 به صورت پیکسل روشن؛ (الف) بارزسازی آهن سه ظرفیتی با نسبت بانندی ۴/۳، (ب) بارزسازی اکسید آهن با نسبت بانندی ۱۱/۸ و (ج) بارزسازی گوسان با نسبت بانندی ۱۱/۴.

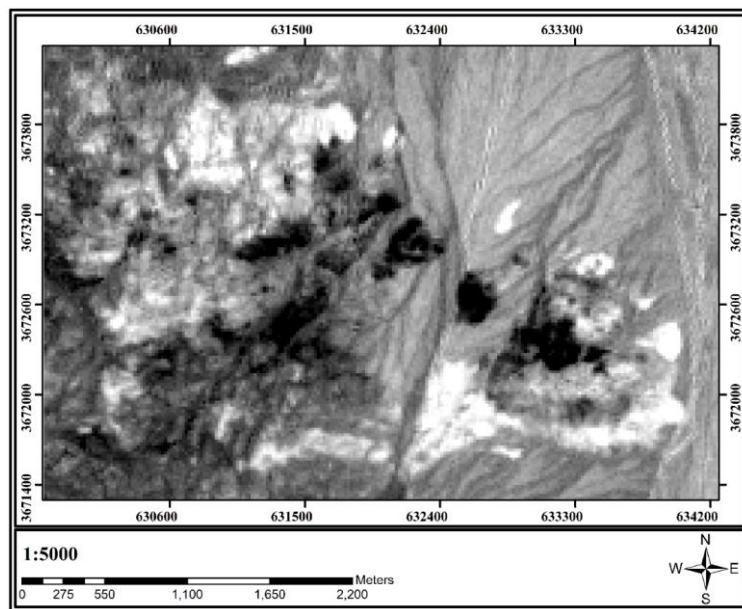
۴.۴. تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (SPCA)

تجزیه و تحلیل اجزای اصلی انتخابی (Selective Principal Components Analysis) یک روش پیشرفته است که بر اساس تجزیه و تحلیل اجزای اصلی (PCA) ساخته شده است [14]. این تکنیک به بهبود تفسیر علائم طیفی مرتبط با کانی‌های دگرسانی مختلف کمک می‌کند. پس از اعمال PCA انتخابی، ماتریس بردارهای ویژه برای شناسایی بررسی می‌شود. توزیع فضایی مناطق مختلف دگرسانی به طور مؤثر با استفاده از این تکنیک ترسیم می‌شود. کاربرد این تکنیک با تأیید وجود مناطق دگرسانی که قبلاً با استفاده از روش‌های دیگر در منطقه مورد مطالعه شناسایی شده بودند تأیید می‌شود [15]. با توجه به نمودار طیفی کانی‌های شاخص، برای اکسید/هیدروکسیدهای آهن باندهای ۲، ۴، ۱۱ و ۱۲ به عنوان باندهای ورودی روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی انتخاب شد [16]. برای انتخاب PC مناسب در روش تحلیل مؤلفه اصلی انتخابی به بررسی ماتریس مقادیر ویژه که بر اساس شرط انتخاب بیشترین اختلاف بین باندها است، PC مناسب برای اکسید/هیدروکسیدهای آهن PC3 (جدول ۲) انتخاب شد. نتیجه حاصل از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی در شکل ۸ نمایش داده شده است.



جدول ۲. ماتریس بردار ویژه اکسید/هیدروکسیدهای آهن به دست آمده از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی.

	باند ۲	باند ۴	باند ۱۱	باند ۱۲
PC 1	-۰/۲۲۴۶۵۷	-۰/۴۶۹۷۲۶	-۰/۶۷۷۸۹۰	-۰/۵۱۸۹۹۱
PC 2	-۰/۵۸۰۴۹۵	-۰/۶۲۸۵۹۷	۰/۴۸۰۳۲۱	۰/۱۹۲۸۲۹
PC 3	۰/۰۹۹۹۶۲	-۰/۲۲۷۰۱۸	-۰/۵۰۷۵۵۰	۰/۸۲۵۱۴۴
PC 4	-۰/۷۰۶۲۴۹	۰/۵۷۶۷۸۹	-۰/۲۲۸۳۶۴	۰/۱۱۲۲۶۰



شکل ۸. بارزسازی مناطق اکسید/هیدروکسیدهای آهن استخراج شده از روش SPCA، پیکسل‌های روشن نشان دهنده دگرسانی پروپیلیتیک و تا مقداری آرژیلیک و پیکسل‌های تیره نشان دهنده دگرسانی فیلیک.

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با به‌کارگیری تصویر ماهواره Sentinel-2، برای اولین بار به منظور شناسایی مناطق امید بخش از نظر کانی‌سازی مس پورفیری در محدوده اکتشافی ظفرقند در شمال غرب استان اصفهان پرداخته شد. نتایج روش‌های پردازش تصاویر ماهواره به شرح زیر است:

- روش ترکیب رنگی کاذب به‌خوبی زون‌های دگرسانی را در محدوده مطالعاتی مشخص کرده است.
- روش نسبت باندی مربوط به کانی‌سازی آهن بر روی تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و نتایج به دست آمده از آن باعث بارزسازی و شناسایی زون‌های دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک و تا حدودی زون دگرسانی آرژیلیک به‌صورت دقیق در محدوده مطالعاتی گردیده است.
- روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی به‌خوبی توانسته دگرسانی فیلیک و پروپیلیتیک را در محدوده مطالعاتی شناسایی کند.

نتایج هر سه روش استفاده شده در این پژوهش انطباق بسیار خوبی با نقشه هاله‌های دگرسانی در محدوده مطالعاتی داشته که نشان دهنده کارآمدی تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2 در اکتشاف مواد معدنی از جمله مس پورفیری بوده و می‌توان از این تصاویر در کنار تصاویر ماهواره‌های ASTER و Landsat جهت اکتشاف مواد معدنی استفاده کرد. محدوده مطالعاتی ظفرقند با توجه به نتایج حاصل شده در این پژوهش از نظر کانی‌سازی مس پورفیری حائز اهمیت شناخته شده است.



منابع

- [1] مریم سادات احمدی، عباس مالیان، ۱۳۹۷. بررسی نواحی دگرسانی کانسار مس پورفیری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای چند طیفی (سنیتل-۲، لندست-۸ و استر) و کنترل‌های زمینی (مطالعه موردی: کانسار مس مسجد داغی - شمال غرب ایران)، مجله سنجش از دور و GIS ایران، ۱۴، ۴۷-۷۴.
- [2] سید سعید قنادپور، مرزقی حصیری، سمیه طالبی اسفندارانی، هادی جلیلی، ۱۴۰۲. بکارگیری روش هندسه فرکتال (مدل عیار - مساحت) به منظور پردازش تصاویر ماهواره‌ای ASTER، مجله مهندسی منابع معدنی (JMRE)، مقاله در دست چاپ.
- [3] Shevryev, 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.
- [4] Peng, N., Wang, Z., Nie, B., Zhang, X., Liu, Y. (2023). Correlation between fractal characteristics of fault structures and metallogenetic density in the Nanling area, South China. *Ore Geology Reviews*, 162, 105717.
- [5] Lu, Y., Yang, C., He, R. (2022). Towards lithology mapping in semi arid areas using time series Landsat 8 data. *Ore Geology Reviews*, 150, 105163.
- [6] Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., Ranagalage, M. (2020). Sentinel 2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. *Remote Sensing*, 12, 2291.
- [7] Segarra, J., Buchailot, M.L., Araus, J.L., Kefauver, S.C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel 2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10, 641.
- [8] Ghannadpour, S. S., Hasiri, M., Jalili, H., & Talebiesfandarani, S. (2023). Satellite Image Processing: application for alteration separation based on U-statistic method in the Zafarghand porphyry system (Iran). *Journal of Mining and Environment*, Articles in Press.
- [9] Raiyani, K., Gonçalves, T., Rato, L., Salgueiro, P., Marques da Silva, J.R. (2021). Sentinel-2 Image Scene Classification: A Comparison between Sen2Cor and a Machine Learning Approach. *Remote Sensing*, 13, 300.
- [10] Sharma, R. C., Hara, K., Tateishi, R. (2018). Developing Forest Cover Composites through a Combination of Landsat-8 Optical and Sentinel-1 SAR Data for the Visualization and Extraction of Forested Areas. *Journal of Imaging*, 4, 105.
- [11] Pazand, K., Pazand, K. (2020). Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring porphyry copper deposit using ASTER data: a case study of Varzaghan area, NW Iran. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 6, 217-223.
- [12] Inzana, J., Kusky, T., Higgs, G., Tucker, R. (2003). Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*, 37(1), 59-72.
- [13] Ge, W., Cheng, Q., Jing, L., Wang, F., Zhao, M., Ding, H. (2020). Assessment of the Capability of Sentinel-2 Imagery for Iron-Bearing Minerals Mapping: A Case Study in the Cuprite Area, Nevada. *Remote Sensing*, 12, 16.
- [14] Wang, C., Chen, J., Ouyang, Y. (2022). Determination of Predictive Variables in Mineral Prospectivity Mapping Using Supervised and Unsupervised Methods. *Natural Resources Research*, 31, 2081-2102
- [15] Youssef, A., Soulaïmani, A., Ait Lamqadem, A. (2022). Identifying Hydrothermally Altered Rocks Using ASTER Satellite Imageries: A Case Study from Imiter Silver Mine. *Unknown Journal*, 13, 337-361.
- [16] Chen, Q., Xia, J., Zhao, Z., Zhou, J., Zhu, R., Zhang, R., Zhao, X., Chao, J., Zhang, X., Zhang, G. (2022). Interpretation of hydrothermal alteration and structural framework of the Huize Pb-Zn deposit, SW China, using Sentinel-2, ASTER, and Gaofen-5 satellite data: Implications for Pb-Zn exploration. *Ore Geology Reviews*, 150, 105154.