

بررسی رخداد آهن با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی بر روی داده‌های لندست ۸، استر و سنتینل-۲ در شمال خاور زواره، اصفهان

شیوا فرنگی^{۱*}، ریحانه احمدی روحانی^۲، زهرا اعلمی نیا^۱

۱- گروه زمین‌شناسی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، shivafarangi.geo@gmail.com

۲- اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه شمال شرق، مشهد، ایران

چکیده

شناسایی کانسارها با بررسی زونهای دگرسانی در اکتشاف، از اهمیت زیادی برخوردار است. نقشه برداری نواحی دارای پتانسیل آهن با استفاده از داده‌های سنجش از دور، نسبت به پی‌جویی‌های میدانی از جمله مطالعات ژئوفیزیک و ژئوشیمی با هزینه کمتر و سرعت بیشتری همراه است اگرچه تأیید مطالعات صحرایی براین امر الزامیست. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش واقع در شمال خاوری اصفهان، جزئی از کمربند متالوژنی انارک است. در این تحقیق از روش‌های مختلف پردازش تصویر چون نسبت‌گیری باندی، ترکیب باندی، نقشه بردار زاویه طیفی (SAM) بر روی محدوده‌های طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک و کوتاه (SWIR+VNIR) داده‌های سنتینل-۲، استر و لندست ۸، به منظور شناسایی دگرسانیهای مرتبط با کانسارهای آهن استفاده شده است. تحلیل و تفسیر نتایج و بازدیدهای میدانی نشان دهنده کارایی پردازش‌ها، بخصوص قابلیت داده‌های سنتینل-۲ در نمایش، تفکیک، توزیع و گسترش ترکیبات مختلف آهن در محدوده مطالعاتی است.

کلیدواژه: کانی‌زایی آهن، سنتینل-۲، زواره، زون ارومیه دختر

Investigation of iron occurrence using Landsat 8, ASTER and Sentinel-2 satellites remote sensing techniques in the NE Zavareh, Isfahan

Shiva Farangi^{1*}, Reyhaneh Ahmadirohani², Zahra Alaminia¹

¹ Department of Geology, University of Isfahan & shivafarangi.geo@gmail.com

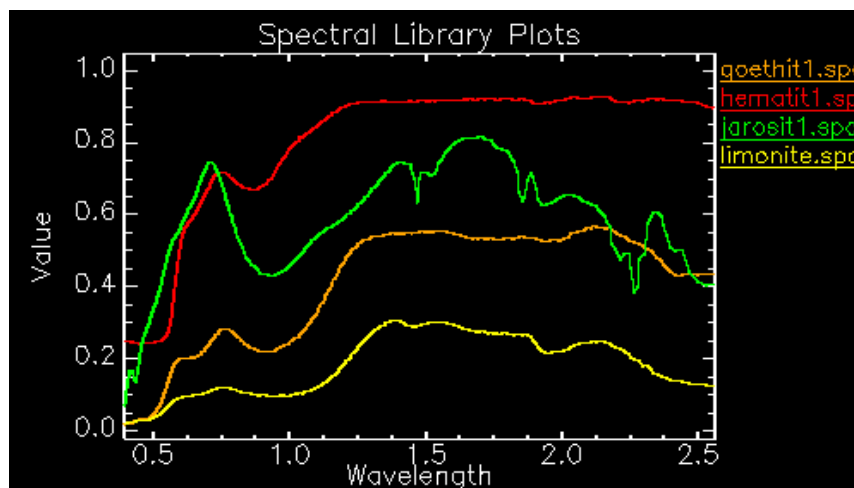
² Geological survey of Iran, North East territory, Mashhad, Iran

Abstract

Reconnaissance of mineral deposits is very important by studying alteration zones in exploration. Mapping of iron potential areas using remote sensing data is less expensive and faster than field surveys such as geophysical and geochemical studies, although field studies approval is required. The study area in this research, located in the northeast of Isfahan, is part of the Anarak metallogenic belt. In this research, different image processing methods such as band ratio, band composition, spectral angle mapping (SAM) on visible and near and short infrared spectral ranges (SWIR + VNIR) of Sentinel-2, ASTER and Landsat 8 has been used to identify alterations associated with iron ores. Analysis and interpretation of the results and field visits show the efficiency of the processes, especially the capability of Sentinel-2 data in enhancement, separation, extent, and distribution of different iron compounds in the study area.

منطقه مطالعاتی در شمال‌خاور زواره، ۲۸۵ کیلومتری شمال‌خاوری اصفهان، جزئی از کمربند متالوژنی انارک است. از نگاه ساختاری پهنه بافق-طبس-انارک به واسطه عناصر مس، سرب، روی، طلا، آنتیموان و آرسنیک و بویژه آهن از گذشته مورد توجه بوده است. بر طبق آمارهای موجود، در ایران بیش از ۲۰۰ ذخیره آهن با بیش از ۴ بیلیون تن ماده معدنی آهن وجود دارد (Nabatian et al, 2015). در سالهای اخیر با رشد تقاضا در بازار آهن، محققین زمین‌شناسی اقتصادی بر روی رخدادهای آهن در این پهنه بیشتر متمرکز شده‌اند. پیشرفت چشمگیر ابزارها و روشهای نوین پردازش در علم دورسنجی، این فرصت ارزشمند را برای پیجویی، شناسایی و نقشه برداری پهنه‌های دگرسانی و ساختارهای زمین‌شناسی فراهم کرده است که در این زمینه مطالعات فراوانی بر روی سنجنده‌های لندست و استر صورت پذیرفته است. اولین ماهواره سری لندست در ۱۹۷۲ و اخیراً ماهواره لندست ۸، هفتمین ماهواره فعال این سری در ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شده است. ماهواره لندست ۸ دارای ۱۱ باند می‌باشد که از ویژگی‌های این ماهواره، داشتن ۵ باند در محدوده طیف مرئی و مادون‌قرمز نزدیک است که برای شناسایی اکسیدهای آهن مناسب است (شکل ۱). تصاویر این ماهواره به دلیل برخورداری از نسبت بالای نوفه به سیگنال و قدرت تفکیک پرتوسنجی بالا (داده‌های ۱۲ بیتی)، توانایی بیشتری برای بازسازی پدیده‌های سطح زمین دارند. قدرت تفکیک مکانی داده‌های لندست ۸ برابر با ۱۵ متر (باند پانکروماتیک) تا ۱۰۰ متر (باندهای حرارتی) است. سنجنده استر یک تصویربردار چند طیفی پیشرفته است که در دسامبر ۱۹۹۹ روی سکوی ترا پرتاب شد. این سنجنده ۱۴ باند دارد که عبارتند از سه باند VNIR (بین ۰/۵۲ تا ۰/۸۶ میکرومتر) با تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند SWIR (۱/۶۰ تا ۲/۴۳ میکرومتر) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند TIR (بین ۸/۱۵ تا ۱۱/۶۵ میکرومتر) با تفکیک مکانی ۹۰ متر که تشعشعات الکترومغناطیسی را منعکس و ساطع می‌کند. از سری ماهواره‌های سنتینل تاکنون ۶ ماهواره (سنتینل ۱ تا ۶) به فضا پرتاب شده‌اند. یکی از مهمترین این ماهواره‌ها و در واقع دومین ماهواره از این سری، ماهواره سنتینل-۲ می‌باشد. این ماهواره در ۲۳ ژوئن ۲۰۱۵ توسط آژانس فضایی اروپا طراحی و به فضا پرتاب گردید. سنتینل-۲ از ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی (Visible)، مادون قرمز نزدیک (VNIR) و مادون قرمز کوتاه (SWIR) تشکیل شده است. باندهای ۴، ۳، ۲ و ۸ دارای تفکیک مکانی ۱۰ متر و باندهای ۵a، ۵b، ۶، ۷ و ۱۲ تفکیک مکانی ۲۰ متر و باندهای ۱ و ۹، ۱۰ از تفکیک مکانی ۶۰ متر برخوردارند. داده‌های نامبرده، علاوه بر تفکیک مکانی مناسب (۲۰، ۱۰ و ۶۰ متر) از تفکیک طیفی نسبتاً خوبی (محدوده ۴۴۳ تا ۲۱۹۰ نانومتر) نیز برخوردارند (Wang et al., 2020; Gabr et al, 2010; Adiri et al, 2017; Sadeghi et al, 2013).

محدوده طیفی مرئی و مادون قرمز نزدیک (VNIR) اهمیت زیادی در شناسایی ترکیبات آهن دارند، درحالیکه محدوده طیفی مادون‌قرمز طول موج کوتاه (SWIR) برای کانی‌های کربناتی، هیدرات‌ها و هیدروکسیدها جذب مولکولی مشخصی داشته و برای بررسی ترکیب کانی‌شناختی مفید است همچنین محدوده طیفی مادون قرمز حرارتی (TIR) در کمی‌سازی کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده سنگ هم چون کوارتز و فلدسپات و نیز دگرسانی گرمایی سیلیسی مناسب هستند.



شکل ۱- طیف بازتابی VNIR-SWIR آزمایشگاهی از کانیهای هماتیت، لیمونیت، گوئیت و لیمونیت از کتابخانه طیفی USGS.

در تشخیص ناهنجاریهای معدنی و از جمله کانسارهای آهن، تکنیکهای سنجش از دور نسبت به روشهای صحرایی دارای مزایایی چون هزینه های کمتر، گستره دید وسیع و دریافت سریع اطلاعات می باشند. سنجنده های بکار برده شده در ماهواره ها با توجه به تفکیک مکانی، در دسترس بودن و هزینه‌های داده با یکدیگر تفاوت دارند. هدف این پژوهش، نقشه برداری انواع مختلف دگرسانیهایی مرتبط با ناهنجاری آهن در منطقه با استفاده و مقایسه تصاویر لندست ۸، استر و سنتینل-۲ جهت بارزسازی و پیشنهاد نواحی با بیشترین احتمال حضور آهن در محدوده مورد مطالعه می باشد. بعبارتی به کمک روشهایی همچون تصاویر رنگی کاذب، نسبت باندی و همچنین الگوریتم نقشه بردار زاویه طیفی (SAM)، ویژگیهای طیفی کانیهای دگرسانی کلیدی مانند هماتیت، گوئیت، لیمونیت و ژاروسیت (شکل ۱) بررسی و شناسایی گردید. سرانجام، بررسی‌های میدانی و مطالعات آزمایشگاهی به منظور تایید نتایج دورسنجی از جمله بررسی و مقایسه کارایی انواع داده ها و روش ها در محدوده انجام گرفت.

زمین شناسی

منطقه مطالعاتی در پهنه متالورژی انارک و در چهارگوش‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ انارک و ۱:۱۰۰۰۰۰ کوه دم واقع گردیده است. به عقیده بسیاری از پژوهشگران ناحیه کوه دم در اثر فروانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی در طی کوهزایی آلپ - هیمالیا شکل گرفته است (سرجوقیان، ۱۳۹۲). توده نفوذی گرانیتوئیدی کوه دم ترکیب کالک‌آلکان، پرتاسیم از نوع I و سن ۴۷ میلیون سال دارد (Kananian et al., 2014). پیمایش صحرایی دو روزه از منطقه نشان می‌دهد کهن ترین واحد زمین شناسی منطقه، واحد آهکی کرتاسه است و گسترده‌ترین واحدهای سنگی مربوط به سنگ‌های آتشفشانی ائوسن زیرین است که توسط سنگهای درونی و نیمه نفوذی ائوسن بالایی قطع شده اند. رسوبات کواترنری با تپه های بسیار کم ارتفاع از جنس عموماً ماسه، شن، گراول و کنگلومرا ست که بخش عمده ای از شمال منطقه و بخش های کمتری از جنوب منطقه را تحت پوشش قرار میدهد.

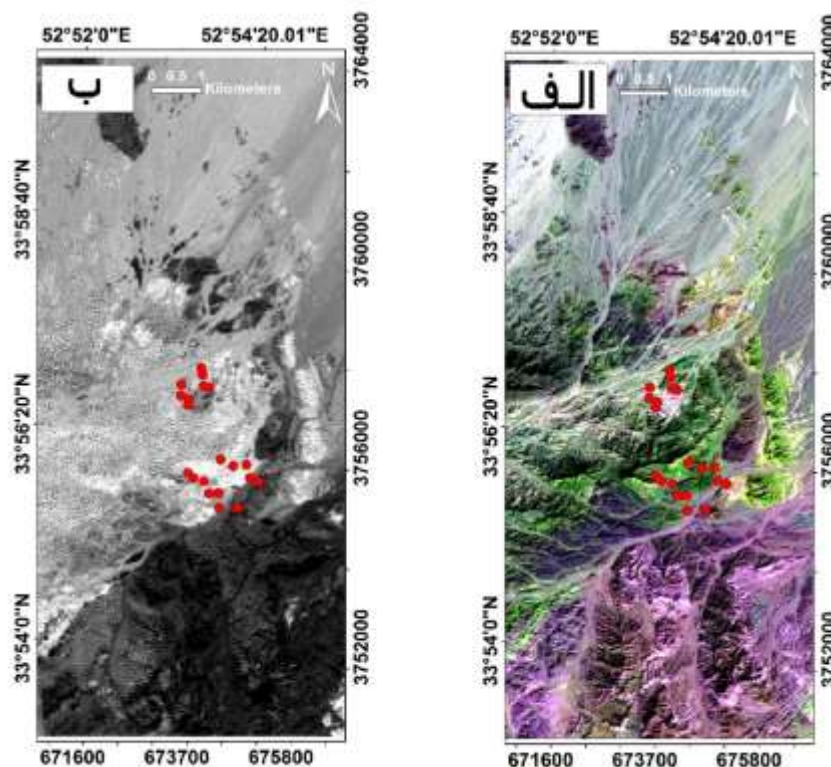
پردازش داده های ماهواره ای

- پردازش تصاویر لندست ۸

از داده های سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ با مشخصات: path/row 163/36 و تاریخ اخذ ۲۲ اکتبر ۲۰۱۷، جهت بارزسازی دگرسانیهایی مربوط به کانی زایی آهن محدوده استفاده گردید. لندست ۸ شامل دو سنجنده OLI (Operational Land Imager) با توانایی برداشت ۹ باند در محدوده مرئی و مادون قرمز (visible, NIR,

SWIR) با تفکیک مکانی ۳۰ و ۱۵ متر است و سنجنده TIRS (Thermal Infrared Sensor) دو باند حرارتی با تفکیک مکانی ۱۰۰ متر را در برمی‌گیرد.

ترکیب رنگی کاذب حاصل (RGB) 472 بر روی داده‌های لندست ۸، عمدتاً برای بارزسازی ترکیبات آهن بکار می‌رود با این پردازش، ترکیبات آهن به رنگ سبز نمایش داده می‌شود (شکل ۲ الف). به منظور شناسایی نواحی حاوی آهن، همچنین از نسبت باندی $(4+6)/5$ استفاده شده است (Ducart et al, 2016). نتایج نشانگر گسترش وسیع ترکیبات آهن (به رنگ روشن) در محدوده مورد مطالعه است. (شکل ۲ ب).



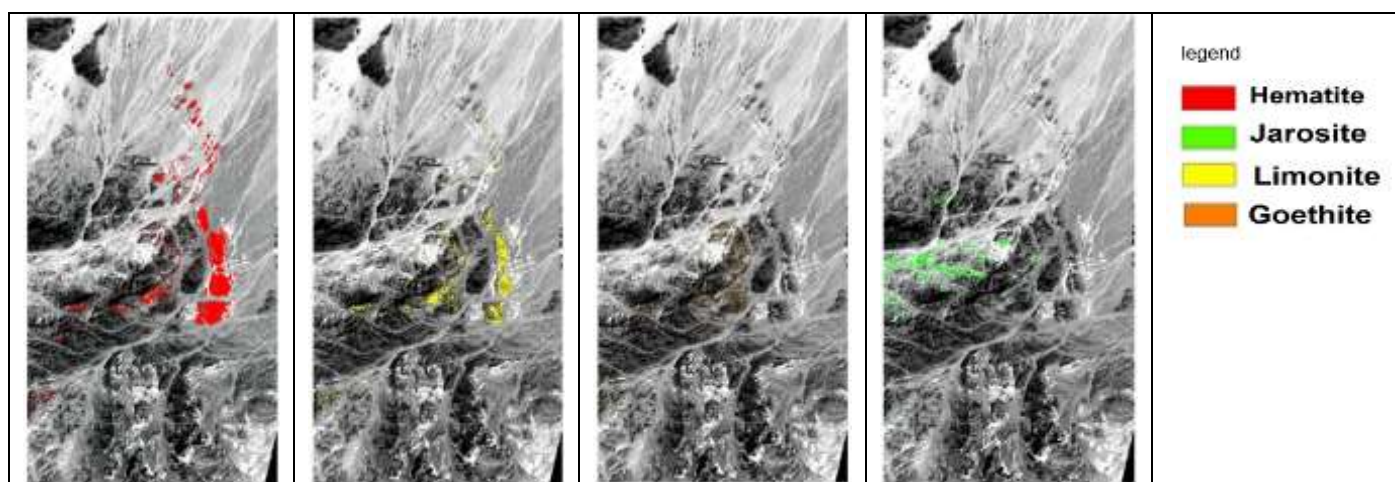
شکل ۲- پردازش داده لندست ۸: الف- ترکیب باندی 472 RGB، ترکیبات آهن را در طیفی از رنگ سبز نشان می‌دهد. ب- نسبت باندی $(4+6)/5$ به منظور شناسایی نواحی با میزان آهن بالا (به رنگ روشن). نقاط کنترلی به صورت دایره قرمز رنگ بر روی تصاویر مشاهده می‌شود.

پردازش تصاویر استر

پیش‌پردازش و تصحیحات لازم بر روی داده استر محدوده با مشخصه AST_L1T به تاریخ اخذ ۱۰ سپتامبر ۲۰۰۲، انجام گرفت. داده‌های استر این قابلیت را دارند که بتوان ترکیبات آهن فریک و فرو را از یکدیگر تفکیک نمود. به منظور بارزسازی ترکیبات آهن با استفاده از داده‌های استر از روشهای ترکیب رنگی، نسبت باندی و نقشه برداری زاویه طیفی (SAM) استفاده گردید. بکارگیری ترکیب رنگی ۶۲۱ (RGB) یکی از بهترین نتایج را جهت بارزسازی اکسیدهای آهن دارد (Kanlinowski and Oliver, 2004) در این پردازش محدوده‌های دارای ناهنجاری آهن به رنگ قرمز تفکیک می‌شوند.

همچنین بارزسازی کانی‌های آهن دار شامل: هماتیت، ژاروسیت، گوئیتیت و لیمونیت به روش نقشه برداری زاویه طیفی (SAM) در منطقه انجام شد. روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (Spectral Angel Mapper) یک تکنیک قابل دسترس برای تشخیص کانی‌های دگرسان است. این یک روش طبقه‌بندی و رده‌بندی طیفی است که در آن

شبهات میان طیف مرجع با طیف پیکسل به‌وسیله محاسبه زاویه بین طیف‌ها مشخص می‌شود (Abdi and Karimpour, 2012). در پردازش به روش SAM ابتدا طیف‌های مرجع کانیهای هماتیت، گوئیت، لیمونیت و ژاروسیت از کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استخراج و برای مطابقت باندهای طیفی موجود در مجموعه USGS با تصاویر ASTER مورد استفاده، طیف‌های آزمایشگاهی با باندهای داده نمونه‌برداری مجدد (Resampling) شدند، آنگاه مشابهت‌های میان طیف تصویر و طیف مرجع محاسبه گردید. سپس با انتخاب کمترین حدآستانه (minimum threshold)، کوچکترین میزان SAM، بیش‌ترین شبهات‌ها را میان طیف پیکسل و طیف مرجع مشخص گردید. نتایج پایانی کار با تعیین حد آستانه (Threshold) برای کانی‌های انتخابی بر روی باند یک تصویر ASTER (بصورت سیاه و سفید) با تفکیک مکانی ۱۵ متر در شکل ۳ به تفکیک برای کانیهای آهن‌دار مشخص است. پردازش‌های داده استر نیز گسترش حضور انواع کانیهای آهن‌دار را در محدوده نمایش می‌دهند.



شکل ۳- پردازش داده‌های استر: الف- بارزسازی و چگونگی توزیع کانی‌های هماتیت، ژاروسیت، لیمونیت و گوئیت در محدوده با استفاده از داده استر، بکارگیری روش SAM و استفاده از طیف‌های کتابخانه طیفی USGS.

۲- پردازش تصاویر سنتینل-۲

داده‌های سنتینل ۲ بر خلاف داده‌های لندست و استر که تنها یک باند در محدوده طیفی جذب آهن دارند دارای چندین باند (۴ باند: 6, 7, 9, 8a) در محدوده ۰٫۹ میکرومتر (جذب طیفی آهن) هستند. پردازش داده‌های سنتینل-۲ محدوده با مشخصه: Level 1C و تاریخ اخذ ۲۰۲۰،۱۱،۰۵ و بکارگیری روشهای نسبت باندی و ترکیب باندی بر روی داده ۱۳ باند یکپارچه شده انجام گرفت.

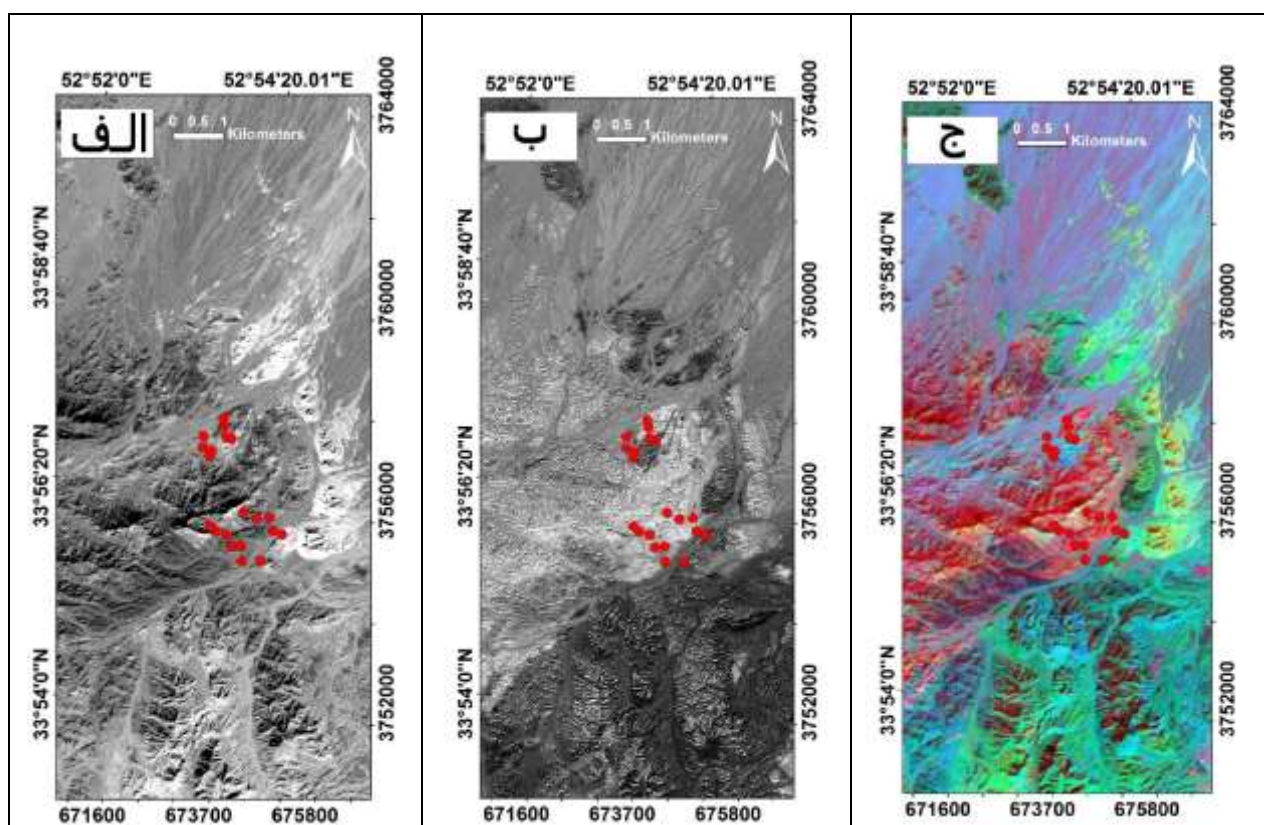
Van der Meer et al, 2014 با استفاده از معادل سازی نسبت باندی داده‌های استر، نسبت باندی‌های ترکیبات آهن و سایر دگرسانی‌ها را برای داده سنتینل-۲ همسان سازی نمودند جدول ۱ نسبت باندیهای بدست آمده، جهت بارزسازی انواع ترکیبات آهن برای داده سنتینل-۲ را نشان می‌دهد.

با توجه به کانی‌زایی مگنتیت و حضور دگرسانی وسیع هماتیت در محدوده بر پایه مطالعات صحرایی، تفکیک ترکیبات آهن فریک و فروس به روش نسبت باندی بر روی داده سنتینل-۲ محدوده انجام گرفت (شکل‌های ۴الف و ۴ب) سپس با ساخت ترکیب نسبت رنگی کاذب RGB (Ferrous iron, Ferric iron, 2) به تفکیک ترکیبات آهن

فروس در فیلتر قرمز و فریک در فیلتر سبز و باند ۲ در فیلتر آبی، تفکیک ترکیبات فوق در طیف رنگهای مختلف انجام شد (شکل ۴ج).

جدول ۱- نسبت باندی های قابل استفاده در ماهواره سنتینل-۲ و همسان سازی شده با نسبت باندی های سنجنده استر (Van der Meer et al, 2014).

Feature	ASTER	Sentinel-2
Iron		
Ferric Iron, Fe ³⁺	2/1	4/3
Ferrous Iron, Fe ²⁺	5/3 + 1/2	12/8 + 3/4
Laterite	4/5	11/12 [†]
Gossan	4/2	11/4
Ferrous silicates (Biotite, chloride, amphibole)	5/4	12/11 [†]
Ferric oxides	4/3	11/8



شکل ۴- پردازش داده های سنتینل-۲: الف: نسبت باندی به منظور بارزسازی آهن فریک Fe^{+3} (پیکسل های روشن). ب: نسبت باندی به منظور بارزسازی آهن فرو Fe^{2+} (پیکسل های روشن) و ج: تفکیک ترکیبات آهن فرو (قرمز) و آهن فریک (سبز پسته ای روشن) به روش ترکیب نسبت باندی

بررسی های صحرایی

بررسی های میدانی برای جمع آوری نمونه ها از نواحی دگرسانی حاوی اکسیدهای آهن جهت تایید نتایج پردازش انجام گرفته است. بازدیدهای صحرایی حضور و گسترش ترکیبات آهن در محدوده را تایید می نمایند. نواحی شرقی محدوده که در تمامی تصاویر به وضوح حضور اکسید و هیدروکسیدهای آهن فریک (هماتیت) را بارزسازی کرده است مربوط به

واحدهای آتشفشانی با زمینه ارغوانی رنگ حاوی اکسیدهای آهن می‌باشد (شکل ۵ الف). واحدها در مرکز تصاویر عمدتاً با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (فریک و فرو) پوشیده شده است (شکل ۵ ب).



شکل ۵- تصاویری از کانی‌سازی منطقه مطالعاتی الف: سنگ‌های ولکانیک ائوسن قرمز رنگ حاوی اکسید آهن در شرق منطقه. ب: حضور اکسید و هیدروکسیدهای آهن در سطح واحدهای منطقه بخوبی قابل تشخیص است. ج: رگچه‌های هماتیت در سطح گرانیت. د: قطعات مگنتیت پلاستی در ابعاد مختلف در مناطق کم ارتفاع منطقه.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه داده‌های ماهواره‌های مختلف جهت بارزسازی آنومالی‌های آهن در منطقه مورد مطالعه استفاده شد و صحت نتایج آنها با یافته‌های صحرایی برداشت شده از ناحیه مطالعاتی کنترل گردید. نتایج پردازش داده‌های لندست ۸، استر و سنتینل ۲ محدوده، حاکی از گسترش فراوان ترکیبات آهن (آهن فریک و فرو) از جمله کانیهای: هماتیت، ژاروسیت، گوئیت و لیمونیت در محدوده مورد مطالعه دارد که بازدیدهای میدانی حضور و گسترش آنها را تایید می‌کنند.

داده‌های سنتینل-۲ با توجه به تفکیک مکانی خوب و دارا بودن باندهای قرار گرفته در محدوده جذب طیفی آهن، قابلیت بالایی در بارزسازی محدوده‌های دارای ناهنجاری آهن و بخصوص تفکیک انواع ترکیبات آهن دو ظرفیتی و سه ظرفیتی دارند. استفاده از ترکیب نسبت باندی با بکارگیری تصویر حاصل از بارزسازی آهن فروس در فیلتر قرمز، آهن فریک در فیلتر سبز و باند ۲ در فیلتر آبی داده سنتینل-۲ (با توجه به تفکیک مکانی ۱۰ متر) می‌تواند خروجی خوبی جهت تفکیک و نمایش ترکیبات آهن فریک و آهن فروس و ارزیابی‌های بعدی جهت اکتشاف آهن باشد.

تقدیر و تشکر

این تحقیق بخشی از فعالیت پژوهشی مشترک دانشگاه اصفهان و شرکت فولاد مبارکه است لذا از همکاریهای صمیمانه کارشناسان محترم فولاد مبارکه بویژه آقایان مهندس واحدی، رضایی و حدادی نژاد که امکان بازدیدهای صحرایی به منطقه را فراهم نمودند تشکر و از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه اصفهان برای انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

References

- Abdi, M., karimpour, MH., 2012. Application of Spectral Angel Mapper classification to discriminate hydrothermal alteration in SW Birjand, Iran by using ASTER image processing. *Journal of Economic Geology*, 1(4).
- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M. and Bachaoui, E.M., 2017. Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research*, 60(11).
- Ducart, DF., Silva, AM., Toledo, CLB., Assis, LM., 2016. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 46, pp.331-349.
- Gabr, S., Ghulam, A., and Kusky, T., 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1-2).
- Kalinowski, A., Oliver, S., 2004. ASTER mineral index processing manual, Remote Sensing Applications, Geoscience Australia 37(36).
- Kananian, A., Sarjoughian, F., Nadimi, A., Ahmadian, J. and Ling, W., 2014. Geochemical characteristics of the Kuh-e Dom intrusion, Urumieh–Dokhtar Magmatic Arc (Iran): Implications for source regions and magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90, pp.137-148.
- Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M. and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe–Mn mineralisation in Iran: implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62(2), pp.211-241.
- Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A.B., Wetherelt, A., Foster, P. and Ziazarifi, A., 2013. Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1: 100,000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 85, pp.103-114.
- van der Meer, F.D., van der Werff, H.M.A., van Ruitenbeek, F.J.A., 2014 . Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sens. Environ*, 148, pp.124 -133.
- Van der Werff, H. Van der Meer, F ., 2015. Sentinel-2 for Mapping Iron Absorption Feature Parameters, *Remote Sensing in Geology* 7(10).
- Wang, Z., Zhou, C. and Qin, H., 2020. Detection of hydrothermal alteration zones using ASTER data in Nimu porphyry copper deposit, south Tibet, China. *Advances in Space Research*, 65(7), pp.1818-1830.