



## طیف‌سنجی بازتابی گوسان‌های مرتبط با کانه زایی روی و نقشه‌برداری آن‌ها با سنتینل ۲

علی قربانی<sup>۱</sup>، مهدی هنرمند<sup>۲</sup>، هادی شهریاری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان alighorbani68414@yahoo.com

<sup>۲</sup> دانشیار دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان mehonarmand167@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار دانشگاه ولی عصر، رفسنجان shahriarihi@gmail.com

### چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی طیف‌سنجی نمونه‌های کانسنگ روی استخراج‌شده از معدن گوجر و بارزسازی آن‌ها با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل ۲ پرداخته می‌شود. معدن گوجر یک معدن فعال واقع در شمال استان کرمان است. نمونه‌های کانسنگ روی استخراج‌شده از گوسان‌های مرتبط با کانه‌زایی روی مورد مطالعه طیف‌سنجی و XRD قرار گرفتند نتایج نشان داد که سیمای طیفی جذب و بازتاب کانی همی‌مورفیت به‌عنوان کانه اصلی روی در گستره طیفی در ۱ میکرومتر و ۱/۲ دارای عارضه جذبی مشخص اما کوچک و در ۱/۴ و ۱/۹ میکرومتر دارای جذب شدید است همچنین در ۲/۵ میکرومتر عارضه جذبی شدید دارد که این عوارض جذبی با سیمای طیفی همی‌مورفیت کتابخانه استاندارد دارای همخوانی است. اما عوارض طیفی مشاهده‌شده در نمونه‌های معدن گوجر دارای تفاوت‌هایی نیز هستند که به طبیعت پیچیده زمین‌شناسی برمی‌گردد از جمله وجود دیگر کانی‌های روی مانند هیدروزینسیت و ویلمیت، کانی‌های کربناتی و اکسیدهای آهن. دلیل اصلی تفاوت در گستره طیفی ۰/۳ تا ۱ میکرومتر نمونه‌های استخراج‌شده از معدن گوجر با نمونه کتابخانه طیفی استاندارد حضور اکسیدهای آهن است. کانی‌های گروه اکسید آهن مانند هماتیت، گوتیت، ژاروسیت در گستره ۰/۳ تا ۱ میکرومتر دارای شاخصه طیفی بسیار شاخص بوده که آن‌ها را از دیدگاه طیف‌سنجی متمایز می‌کند. طیف‌های استخراج‌شده از معدن گوجر بر مبنای داده سنتینل ۲ بازنویسی شده و با انجام روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی و فرکتال عیار-مساحت بر مبنای مؤلفه‌های اصلی بارزسازی گوسان‌های مرتبط با کانه زایی روی در معدن گوجر صورت پذیرفت که نتایج به‌دست‌آمده همخوانی بسیار مطلوبی را با داده‌های زمینی ارائه نمود.

**واژه‌های کلیدی:** طیف‌سنجی، گوسان، سنتینل ۲، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، فرکتال

**Abstract:** This study investigates the spectroscopy of zinc ore samples extracted from the Gojer Mine and their enhancement using Sentinel-2 satellite data. The Gojer Mine is located in the northern Kerman province. Ore samples collected from gossans related to zinc mineralization were analyzed using spectroscopy and XRD. The results showed that the absorption and reflectance spectral features of hemimorphite, the main zinc ore mineral, have a small but distinct absorption feature at 1  $\mu\text{m}$  and 1.2  $\mu\text{m}$ , strong absorption at 1.4 and 1.9  $\mu\text{m}$ , and a strong absorption feature at 2.5  $\mu\text{m}$ . These absorption features are consistent with the spectral signature of hemimorphite in the standard library. However, the spectral features observed in the Gojer Mine samples also show some differences, which are attributed to the complex geological nature of the area, including the presence of other zinc minerals such as hydrozincite and willemite, carbonate minerals, and iron oxides. The main reason for the difference in the spectral range of 0.3  $\mu\text{m}$  to 1  $\mu\text{m}$  between the Gojer Mine samples and the standard spectral library is the presence of iron oxides. Iron oxide group minerals such as hematite, goethite, and jarosite have a very distinctive spectral signature in the range of 0.3  $\mu\text{m}$  to 1  $\mu\text{m}$ , which distinguishes them from a spectroscopic point of view. The spectra extracted from Gojer Mine were resampled based on Sentinel-2 data and the principal component analysis (PCA) and fractal method were applied to enhance the gossans associated with zinc mineralization in Gojer Mine. The results showed a very good agreement.

**Keywords:** Spectrometry, Gossan, Sentinel-2, PCA, Fractal



## ۱. مقدمه

کانسارهای سرب و روی به پنج نوع سولفید توده‌ای، اسکارن، نوع دره می‌سی‌سی‌پی، رگه‌ای و جانشیننی و لایه‌ای با سنگ میزبان رسوبی تقسیم می‌شوند [1]. نهشته‌های سولفیدی با میزبان کربناته مانند نوع دره می‌سی‌سی‌پی، سدکس، تیپ ایرلندی، تیپ رگه‌ای و تا حدی اسکارن، در محیط‌های سوپرژن تحت هوازدگی شدید می‌توانند سبب تشکیل کانه‌های روی غیر سولفیدی شوند [2][3]. اسمیتسونیت طی سده‌های ۱۹ و ۲۰ جهت استخراج به‌عنوان سنگ معدن اصلی روی مورد توجه بود، به دنبال پیشرفت‌های حاصل‌شده در فرآوری مواد معدنی مانند استخراج انحلالی، تغلیظ به‌وسیله اسید و فناوری الکتروپینینگ، کانسارهای سولفیدی روی در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفتند. کانسارهای غیر سولفیدی روی به دو دسته کلی برون‌زاد و درون‌زاد تقسیم می‌شوند که البته خود دارای زیر شاخه‌هایی هستند [4]. نهشته‌های سوپرژن که از طریق اکسید شدن نهشته‌های گوگردی و غیر گوگردی تولید گشته‌اند اغلب از نوع غیر سولفیدی هستند و در گستره‌ای از جهان توزیع شده‌اند. اغلب نهشته‌های سوپرژن غیر سولفیدی در سنگ‌های کربناتی به‌عنوان سنگ میزبان رخ می‌دهند که مرسوم واکنش‌پذیری بالای سنگ‌های کربناتی با محلول‌های اسیدی-اکسیدی غنی از روی که حاصل شکسته شدن از کانی اسفالریت می‌باشند به وجود می‌آیند. اکثریت نهشته‌های سوپرژن از نوع دره می‌سی‌سی‌پی یا از نوع جانشیننی با حرارت بالا هستند [1]. برای شیوه تشکیل نهشته‌های غیر سولفیدی برون‌زاد روی سه الگو پیشنهاد شده است، جانشیننی مستقیم که در آن نهشته‌های روی بخصوص گوسان‌های غنی از روی که در آن اسمیتسونیت و همی‌مورفیت جانشین اسفالریت شده است. جانشیننی سنگ دیواره که نهشته‌های روی از نواحی مجاور و پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی توده‌های مرتبط سولفیدی مستقیماً جایگزین شده است. پرکننده‌های کارستی و برجاماندی که در آن‌ها نهشته‌های غیر سولفیدی از انباشتگی‌های فیزیکی و شیمیایی شکل گرفته‌اند (از نخستین رویداد چرخه غنی‌شدگی برون‌زاد) [4].

کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی منابع اصلی سرب و روی در آمریکا و اروپا می‌باشند که در درجه حرارت پایین تشکیل می‌شوند و سنگ میزبان آن‌ها کربناتی است، ژرفای تشکیل آن‌ها کمتر از ۲ کیلومتر، حرارت تشکیل از ۵۰ تا ۲۵۰ (میانگین ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد)، ریخت‌شناسی آن‌ها بیشتر لایه کران و گاهی لایه‌ای شکل و جانشیننی و رگه‌ای، جایگاه تشکیلشان در سنگ‌های دولومیتی و آهکی دولومیتی شده می‌باشند. شیوه تجمع به‌صورت شکافه‌پرکن و نیز به‌صورت جانشیننی است فلزات آن‌ها سرب، روی، کادمیوم، ژرمانیوم و کانه‌های موجود در آن‌ها گالن، اسفالریت، باریت و فلوریت است. باطله‌ها کلسیت و دولومیت است که می‌تواند همراه باریت و فلوریت باشد. دگرسانی رخ داده از نوع دولومیتی شدن و سیلیسی شدن است. زمان تشکیل نسبت به سنگ‌های میزبان به‌صورت غیر همزاد است [1].

به‌منظور پی‌جویی و اکتشاف نهشته‌های غیر سولفیدی روی، روش‌های ژئوفیزیکی کارایی چندانی ندارند، ژئوشیمی رسوبات آبراه‌های نیز می‌توانند کانه‌زایی کربنات‌های روی را بدون حساسیت به معیار سولفیدی یا غیر سولفیدی آن مشخص کنند. مطالعه و جستجوی معادن شناخته‌شده و گوسان‌ها می‌تواند یک راهنمای تجربی موفق برای اکتشاف ذخایر غیر سولفیدی با میزبان کربناتی ارائه دهد [5]. گوسان‌ها به دلیل دارا بودن عارضه‌های طیفی مشخص می‌توانند به‌عنوان سرخ‌های اکتشافی در حیطه سنجش‌از‌دور جهت اکتشاف نهشته‌های روی مورد توجه قرار گیرند [6][7][8][9].

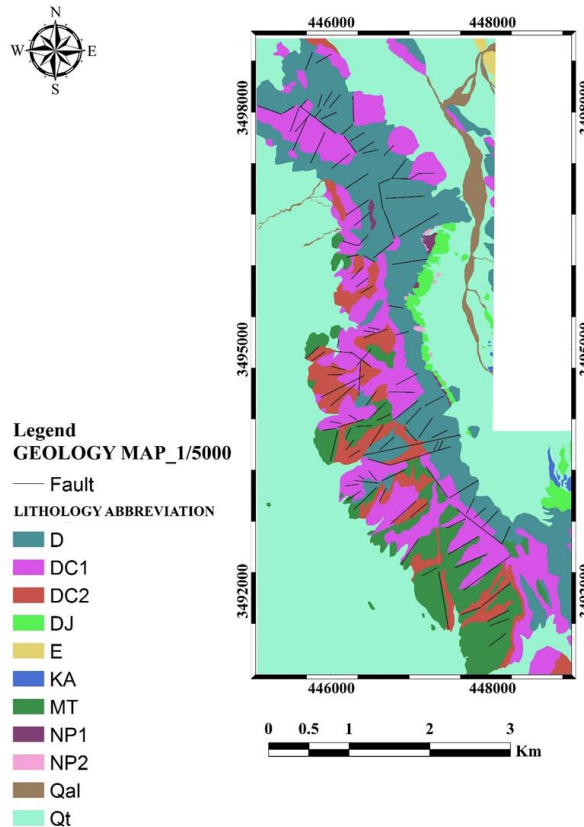
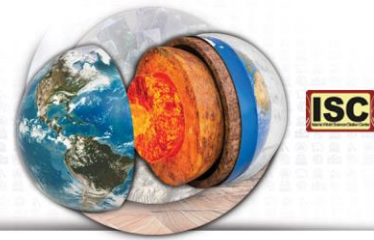
تجزیه سولفیدهای آهن می‌تواند باعث تشکیل گوسان‌های غنی از روی در نزدیکی سطح و قسمت‌های فوقانی نهشته‌های لایه کران نوع می‌سی‌سی‌پی شود [4]. در اکثر مواقع هیدروکسیدهای آهن مانند گوتیت و هماتیت، همی‌موفیت، اسمیتسونیت، هیدروزینسیت و سروزیت کانی‌های هستند که در گوسان‌های غنی از روی یافت می‌شوند از این‌رو گوسان‌ها را می‌توان هدف مطلوبی جهت اکتشاف نهشته‌های روی در نظر گرفت [10]. این کانی‌ها در گستره طیفی مرئی-فروسرخ نزدیک (اکسیدهای آهن) و فرسرخ موج کوتاه (کانی‌های آبدار روی) دارای عارضه‌های طیفی هستند که می‌توان با شناخت آن‌ها به مطالعه و پی‌جویی با استفاده از سنجش‌از‌دور این گروه از کانی‌ها و نواحی امیدبخش نهشته‌های روی پرداخت. در این پژوهش به طیف‌سنجی کانی‌های یافت شده در گوسان‌های روی در معدن گوجر واقع در شمال استان کرمان پرداخته‌شده و کارایی سنجنده سنتینل ۲ جهت نقشه‌برداری و مطالعه گوسان‌های مرتبط با کانه‌زایی روی مورد بحث قرار می‌گیرد.



## ۲. بحث و روش تحقیق

### ۱.۲. زمین‌شناسی محدوده

محدوده مورد مطالعه در ایالت زمین‌ساختی ایران مرکزی و در گوشه جنوب خاوری مثلث ایران مرکزی جای می‌گیرد. هوکریده و همکاران (۱۹۶۰) مدل چین‌خوردگی ناحیه مورد بحث را از نوع آلپی فرض می‌کنند. معدن گوجر در فاصله ۶۰ کیلومتری شمال شرق شهر راور واقع شده است که در قسمت مرکزی چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ راور و قسمت جنوب شرقی ورقه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بهاباد قرار گرفته است. واحدهای سنگی اصلی این محدوده از نظر زمانی مربوط به دوران‌های پالئوزوئیک و مزوزوئیک می‌باشند. این واحدها شامل سری‌های کربناته (سنگ‌آهک و دولومیت) می‌باشند که توسط رسوبات عهد حاضر احاطه شده‌اند سیمای سنگ‌شناسی منطقه گوجر به‌طور عمده سنگ‌های پالئوزوئیک بالا متشکل از ماسه‌سنگ و شیل سازندهای جمال و سرخ‌شیل (پرمن) و مزوزوئیک (تریاس-ژوراسیک زیرین) متشکل از دولومیت‌های سازند شتری (تریاس) رخنمون دارند و بیش از ۴۰ کانسار و نشانه معدنی سرب و روی شناخته شده که کانسنگ چیره آن‌ها ترکیب اکسیدی دارد در آن حضور دارند [11]. به‌طور کلی بر اساس نقشه‌ی ۱/۵۰۰۰ (شکل ۱) واحدهای اصلی که در منطقه معدنی گوجر وجود دارند بدین شرح می‌باشند: واحد هم‌ارز سازند کالشانه (KA) به سن کامبرین میانی که در نیمه شرقی محدوده رخنمون داشته و دارای تناوبی از واحدهای گچی، مارن، دولومیت، شیل و ماسه‌سنگ است. واحد هم‌ارز سازند درنجال (DJ) بر روی واحد KA به سن کامبرین میانی-بالایی قرار دارد که تناوبی از دولومیت‌های قرمز روشن تا صورتی و درون لایه‌هایی از جنس ماسه‌سنگ سیلتی و شیل‌های قرمز می‌باشند. واحد هم‌ارز سازند نیور و پادها (NP) به سن سیلورین تا دونین تحتانی که بیشتر در بخش شرقی منطقه دیده می‌شود. این واحد در بیشتر مناطق به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش زیرین (NP1) شامل ماسه‌سنگ کوارتز آرنیتی و سیلت‌ستون قرمز تیره با درون لایه‌هایی از جنس شیل و برخی مناطق دولومیت کرم‌رنگ است. بخش بالایی (NP2) که تناوبی از لایه‌های شیلی، دولومیتی و ماسه‌سنگ کوارتز آرنیتی سفیدرنگ بر روی بخش قاعده‌ای از جنس ماسه‌سنگ آرزوزی سفید قرار دارد. واحد هم‌ارز دولومیت سیبزار (D) به سن دونین بالایی که گسترش زیادی در منطقه داشته و شامل دولومیت خاکستری تا خاکستری تیره و بندرت کرم‌رنگ است. واحد (DC1) به سن دونین میانی تا کربونیفر زیرین که به لحاظ تجمع ماده معدنی در بخش‌های قاعده‌ای آن اهمیت زیادی دارد. رنگ هوازده دولومیت‌های این واحد کرم تا قهوه‌ای روشن و رنگ سطح تازه آن خاکستری روشن تا کرم با بافت دانه شکری است. با توجه به مطالعات قبلی [11] این واحد در اصل ترکیب آهکی داشته که در اثر دولومیتی شدن ثانویه باعث ایجاد فضای خالی جهت جریان سیالات کانه‌دار سرب و روی در سنگ شده است. نفوذ آب‌های فرورو اسیدی به داخل لایه‌های دولومیتی موجب انحلال آن‌ها و ایجاد کارست‌های انحلالی شده که این فضاهای کارستی در تمرکز سرب و روی نقش مهمی داشته‌اند. واحد (DC2) به سن دونین بالایی تا کربونیفر زیرین شامل تناوبی از دولومیت و آهک است. دولومیتی شدن در این واحد نیز مشاهده می‌شود. واحد (MT) به سن تریاس میانی تا بالایی و شامل لایه‌های آهکی خاکستری روشن تا تیره بوده و فاقد پدیده دولومیتی شدن است. واحد (Ng) یک کنگلومرای پلی‌میکتیک با قلوه‌هایی از جنس آهک و سنگ‌های دیرین‌تر با ستبرای چند ده متر است که در جنوب شرقی محدوده قرار دارد و با یک دگرشیبی زاویه‌دار واحدهای قدیمی‌تر را می‌پوشاند. واحدهای رسوبی کواترنری (Qal و Qt) شامل پادگانه‌های آبرفتی بلند و مخروط‌افکنه‌های قدیمی شامل قلوه‌سنگ‌های ریزودرشت، ریگ، ماسه و خاک و مخروط‌افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی جوان حاشیه رودخانه‌ها (Qt) و آبرفت‌های بستر رودخانه‌های کنونی (Qal) است [11]. کانی‌سازی اصلی در گوجر از نوع ثانویه است که به‌طور عمده در درون آهک‌ها و دولومیت‌های دونین-تریاس قرار گرفته است. قسمت بیشتر کانی‌های بجای مانده روی در معدن از نوع همی‌مورفیت است و در کنار آن کانی‌های انگلزیت، سروسیت و هیدروزنسیت به‌طور فرعی دیده می‌شوند. کانی‌های اکسید آهن موجود در گوسان‌های منطقه بیشتر از نوع هماتیت و گوتیت هستند که معمولاً دارای عیار بالایی از روی می‌باشند و کانی‌های ثانویه روی در آن‌ها به‌وفور یافت می‌شود. مهم‌ترین دگرسانی‌هایی که در این کانسار دیده می‌شوند دولومیتی شدن و سیلیسی شدن است.

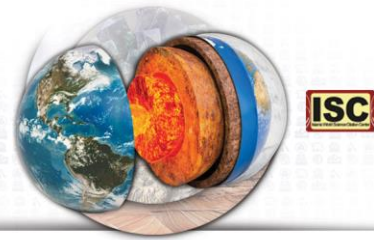


شکل ۱- نقشه زمین شناسی ۱/۵۰۰۰ معدن گوجر

## ۱.۲. داده‌های مورد استفاده

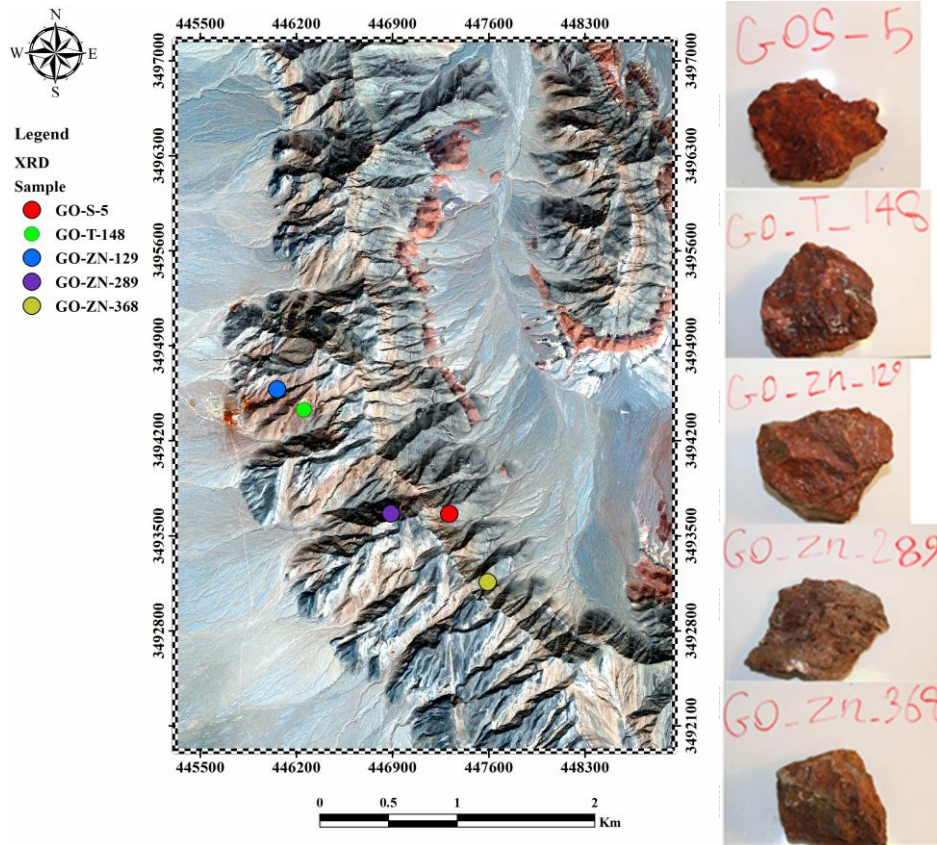
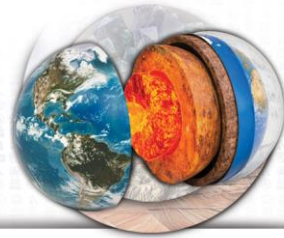
طیف‌سنج استفاده شده در این پژوهش ASD FieldSpec است. پیشینه به‌کارگیری این ابزار به‌منظور اندازه‌گیری بازتاب مواد و سطوح گوناگون به سال ۱۹۹۶ بازمی‌گردد. دقت بالا و توانایی تکرارپذیری از نقاط قوت این وسیله است. این ابزار یک سنجنده ابر طیفی با گستره طیفی ۲۵۰۰-۳۵۰۰ نانومتر با درجه وضوح ۱ نانومتر است [12][13][14]. در این پژوهش از این ابزار برای طیف‌سنجی از نمونه‌های سنگ و تشکیل کتابخانه طیفی استفاده است. لازم به ذکر است که از یک لامپ هالوژنی به‌عنوان سرچشمه نور استفاده شده است.

به‌منظور نقشه‌برداری گوسان‌ها نیز از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ استفاده شده است. ماهواره سنتینل ۲ یک ماهواره منابع زمینی است که جهت تهیه نقشه پوشش اراضی طراحی شده است. سنتینل ۲ یک سنجنده چند طیفی با ۱۳ باند با وضوح مکانی ۱۰ متر، ۲۰ متر و ۶۰ متر است. این ماهواره با دارا بودن توان تفکیک مکانی مناسب در گستره مرئی و فروسرخ نزدیک (۱۰ متر) و فروسرخ موج کوتاه (۲۰ متر) می‌تواند جهت انجام پژوهش‌های زمین‌شناسی کارآمد واقع شود [15]. این ماهواره از سنجنده MSI (Multi-Spectral Instrument) با سامانه تصویربرداری Pushbroom استفاده می‌کند. ماهواره‌های سنتینل در واقع بخشی از برنامه فراگیر پایش زمین اتحادیه اروپا موسوم به کوپرنیک هستند.

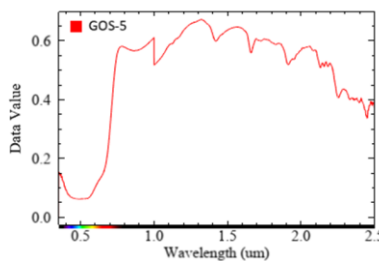


## ۲.۲. ویژگی طیفی کانی‌ها

هرکدام از کانی‌های موجود در گوسان‌ها دارای ویژگی‌های طیفی ویژه‌ای هستند که می‌توانند بر پایه آن قابل شناسایی باشند. سیمای طیفی در گستره مرئی و فروسرخ نزدیک از طیف الکترومغناطیس وابسته به فرایندهای الکترونی عناصر واسطه می‌باشند (مانند آهن، منگنز، مس، نیکل، کروم و...) برجسته‌ترین عضوی که خصوصیات طیفی آن مربوط به این ناحیه می‌شود آهن است. اکسید آهن که معمولاً در سطح زمین حضور دارد، جذب شدیدی را در گستره طول‌موج ماورا بنفش-مرئی به علت اثر انتقال بار الکتریکی داشته و باعث کاهش شدید بازتابش در گستره طول‌موج نور آبی و افزایش بازتاب به طرف گستره طیفی فروسرخ می‌شود که بیشینه آن در ناحیه ۱/۶-۱/۳ میکرومتر است. بین ۰/۳۵ و ۱/۳ میکرومتر فرایندهای الکترونی فلزات واسطه در کانی‌های آهن‌دار مانند هماتیت، ژاروسیت، گوتیت و مونت موریلونیت باعث ایجاد سیمای طیفی کمینه، در نزدیکی ۰/۴۳، ۰/۶۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۳ میکرومتر می‌گردد [17][16]. فاصله بین ۱/۳ تا ۲/۵ میکرومتر که گستره طیفی فروسرخ موج‌کوتاه را شامل می‌شود، یکی از مهم‌ترین بخش‌های طیف الکترومغناطیس می‌باشد. این قسمت از طیف به دلیل دارا بودن گستره سیمای طیفی گروه‌های هیدروکسیل (OH)، آب (H<sub>2</sub>O) و کربنات (CO<sub>3</sub>) که از مهم‌ترین اجزا تشکیل‌دهنده پوسته زمین می‌باشند، اهمیت فراوان دارد. ترکیب این گروه‌ها با دیگر عناصر باعث ایجاد سیماهای طیفی ویژه‌ای در این گستره می‌شود [18]. از نمونه‌های معدنی کانسنگ روی متعلق به گوسان‌های معدن گوجر نیز طیف‌نگاری صورت پذیرفته و همچنین شماری نیز مورد آزمایش XRD قرار گرفتند. در شکل ۲ تصویر نمونه دستی و محل نمونه‌برداری این دسته از نمونه‌ها بر روی تصویر ماهواره GeoEye نشان داده شده است. در شکل ۳ تا شکل ۷ سیمای طیفی این نمونه‌ها به همراه نتایج XRD قابل مشاهده است. سیمای طیفی تمامی این نمونه‌ها دارای انطباق بسیار زیاد با یکدیگر هستند که نتایج آزمایش XRD نیز بیانگر این مطلب است. سیمای طیفی این نمونه‌ها به دلیل حضور و آغشتگی اکسید آهن در گستره طیف مرئی (نور آبی) جذب و پس از آن بازتاب بالا نشان می‌دهد. یک جذب ناگهانی در ۱ میکرومتر وجود دارد و در ادامه چندین بازه جذب و بازتاب (۱/۴، ۱/۹ و ۲/۵) در تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. البته با عنایت به نتایج XRD، کانه‌های دیگر روی از جمله ویلمیت و هیدروزینسیت به‌عنوان کانه اصلی و حضور کانی‌های فرعی دیگر، سیمای طیفی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

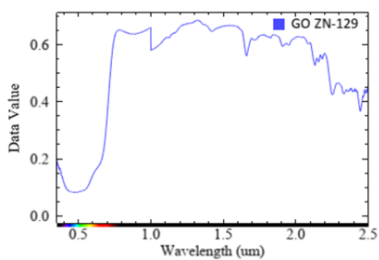


شکل ۲- نمونه‌های گوسان معدن گوجر و محل نمونه برداری آن‌ها بر روی تصویر GEO EYE



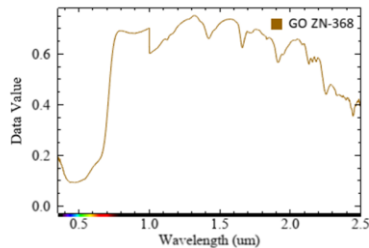
Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
GO-S-5	Hemimorphite (05-0555)	Goethite (29-0713)
Az: 10904-45747	Zn4Si2O7(OH)2 · H2O	Fe(OH)
Date :	Willemite (37-1485)	Calcite (05-0586)
3/1/2016	Zn2SiO4	CaCO3
kV = 40	Hematite (33-0664)	Dolomite (36-0426)
mA = 30	Fe2O3	CaMg(CO3)2
Ka. = Cu		Fluorite (35-0816)
Fl. = Ni		CaF2

شکل ۳- سیمای طیفی و نتایج XRD نمونه GOS-5



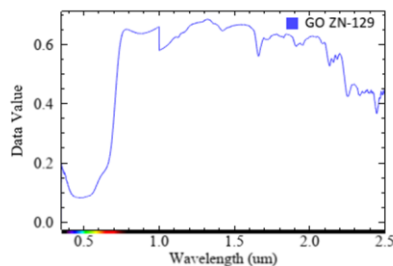
Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
GO-ZN-129	Hemimorphite (05-0555)	Calcite (05-0586)
Az: 10904-45743	Zn4Si2O7(OH)2 · H2O	CaCO3
Date :	Willemite (37-1485)	Dolomite (36-0426)
3/1/2016	Zn2SiO4	CaMg(CO3)2
kV = 40		Fluorite (35-0816)
mA = 30		CaF2
Ka. = Cu		Hematite (33-0664)
Fl. = Ni		Fe2O3

شکل ۴- سیمای طیفی و نتایج XRD نمونه GO ZN-129



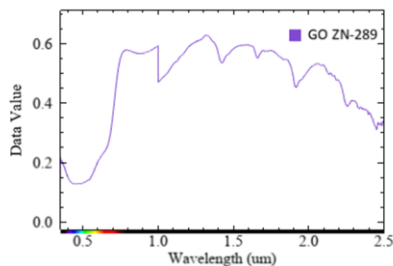
Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
GO-ZN-368	Hemimorphite (05-0555)	Calcite (05-0586)
<b>Az: 10904-45744</b>	Zn4Si2O7(OH)2, H2O	CaCO3
Date :	Willemite (37-1485)	Dolomite (36-0426)
3/1/2016	Zn2SiO4	CaMg(CO3)2
kV = 40		Goethite (29-0713)
mA = 30		FeO(OH)
Ka. = Cu		
Fil. = Ni		

شکل ۵-سیمای طیفی و نتایج XRD نمونه GO ZN-368



Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
GO-ZN-129	Hemimorphite (05-0555)	Calcite (05-0586)
<b>Az: 10904-45743</b>	Zn4Si2O7(OH)2, H2O	CaCO3
Date :	Willemite (37-1485)	Dolomite (36-0426)
3/1/2016	Zn2SiO4	CaMg(CO3)2
kV = 40		Fluorite (35-0816)
mA = 30		CaF2
Ka. = Cu		Hematite (33-0664)
Fil. = Ni		Fe2O3

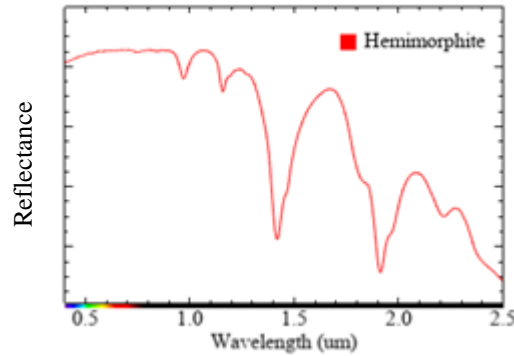
شکل ۶-سیمای طیفی و نتایج XRD نمونه GO ZN-129



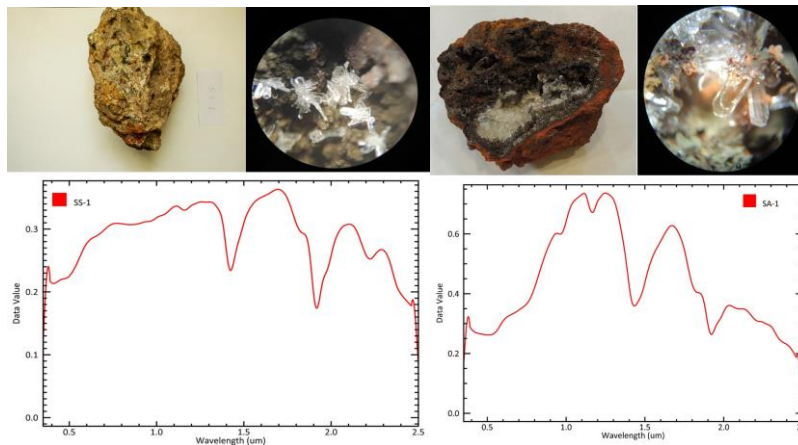
Sample:	Major Phase(s)	Minor Phase(s)
GO-ZN-289	Hemimorphite (05-0555)	Calcite (05-0586)
<b>Az: 10904-45752</b>	Zn4Si2O7(OH)2, H2O	CaCO3
Date :	Willemite (37-1485)	Fluorite (35-0816)
3/1/2016	Zn2SiO4	CaF2
kV = 40		Goethite (29-0713)
mA = 30		FeO(OH)
Ka. = Cu		
Fil. = Ni		

شکل ۷-سیمای طیفی و نتایج XRD نمونه GO ZN-289

یکی از مهمترین کانی‌های با ارزش روی همی‌مورفیت است که در واقع یک نوع سیلیکات آبدار است. از این جهت پیش‌بینی می‌شود که این کانی در گستره فرورسرخ موج‌کوتاه دارای ویژگی‌های جذبی باشد. سیمای طیفی همی‌مورفیت برگرفته از کتابخانه طیفی استاندارد در شکل ۸ نشان از شاخصه‌های جذبی در گستره فرورسرخ موج‌کوتاه دارد. در ۱ میکرومتر و ۱/۲ دارای عارضه جذبی مشخص اما کوچک و در ۱/۴ و ۱/۹ میکرومتر دارای جذب شدید است همچنین در ۲/۵ میکرومتر عارضه جذبی شدید دارد. سیمای طیفی جذبی نشان از یک‌روند پایدار بازتاب تا نزدیکی ۱ میکرومتر دارد و در بازه‌های جذبی گستره طیف فرورسرخ نیز چند عارضه بازتابی شاخص دیده می‌شود. در شکل ۹ دو نمونه استخراج شده از گوسان معدن گوجر به همراه تصویر میکروسکوپی بلور همی‌مورفیت و سیمای طیفی نمونه مشاهده می‌شود. همانگونه که از سیمای طیفی می‌توان استنباط نمود، این دو نمونه نیز در گستره طیفی ۱ میکرومتر تا ۱.۲ میکرومتر عارضه جذبی کوچک دارند و در ۱/۴ و ۱/۹ میکرومتر دارای جذب شدید بوده همچنین عارضه جذبی نیز در ۲/۵ میکرومتر نیز وجود دارد. در واقع عوارض جذبی در سیمای طیفی نمونه‌های استخراج شده همخوانی بسیار بالایی با سیمای طیفی همی‌مورفیت در کتابخانه استاندارد را نشان می‌دهند. وجود تمایز در سیمای طیفی نمونه کتابخانه استاندارد و نمونه‌های استخراج شده از معدن گوجر به دلیل حضور دیگر کانی‌ها به خصوص کانی‌های اکسید آهن است که تاثیر خود را به خوبی نمایان ساخته است. این تاثیر را میتوان در عوارض طیفی گستره ۰.۳ میکرومتر تا ۱ میکرومتر مشاهده نمود، عوارض طیفی یاد شده در سیمای طیفی همی‌مورفیت کتابخانه استاندارد (شکل ۸) وجود ندارند.

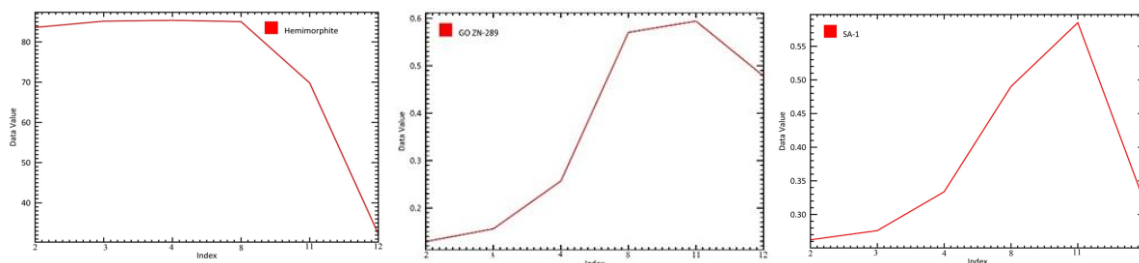


شکل ۸- سیمای طیفی همی مورفیت برگرفته از کتابخانه طیفی استاندارد



شکل ۹- سیمای طیفی دو نمونه اخذ شده از گوسان معدن گوجر حاوی همی مورفیت

سیمای طیفی نمونه های استخراج شده از معدن گوجر و نمونه کتابخانه طیفی استاندارد بر مبنای باندهای سنتینل ۲ بازنویسی شدند. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود همی مورفیت در گستره باندهای ۲ تا ۸ دارای بازتاب است و پس از آن سیمای جذبی از خود نمایش می دهد. نمونه های متعلق به معدن گوجر علاوه بر جذب شاخص در باندهای ۱۱ و ۱۲ عوارض طیفی در گستره طیف مرئی-فروسرخ نزدیک که به دلیل اکسید آهن است را نشان می دهند.



شکل ۱۰- سیمای طیفی بازنویسی شده نمونه های استخراج شده از معدن گوجر و نمونه کتابخانه طیفی استاندارد بر مبنای سنتینل ۲

## ۲.۲. نقشه برداری گوسان ها با استفاده از داده ماهواره سنتینل ۲

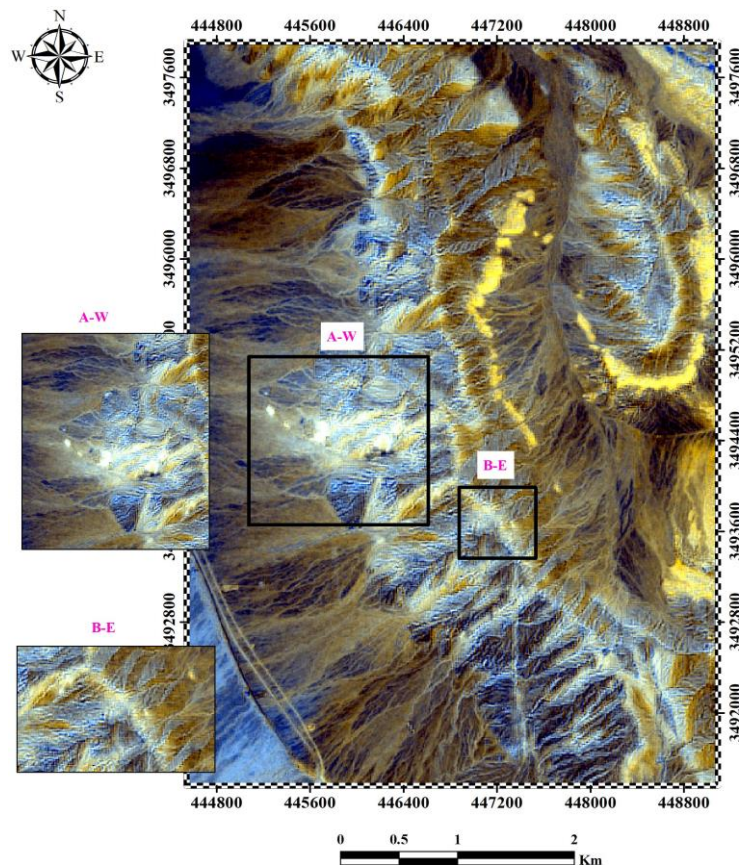
به منظور بارزسازی و نقشه برداری گوسان های در پیوند با کانه زایی روی از روش تحلیل مؤلفه های اصلی استاندارد و تحلیل مؤلفه های اصلی انتخابی استفاده شده است. همچنین از روش فرکتال عیار-مساحت بر مبنای نتایج تحلیل مؤلفه های اصلی استاندارد بهره گرفته شده است. از تحلیل مؤلفه های اصلی استاندارد تنها برای روش فرکتال استفاده شده و از روش تحلیل مؤلفه های اصلی انتخابی به طور جداگانه





برای بارزسازی و نقشه برداری گوسان‌ها استفاده شده است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش آماری قدرتمند برای از بین بردن اختلاف اثرات تابشی که بر روی تمام باندهای سنجنده اثر می‌گذارد و بالا بردن و تقویت سیمای بازتابش ترکیبات مختلف سطح زمین است [19]. واژه فراکتال توسط ماندلبروت معرفی شد [20] وی از هندسه فراکتال برای کالبدشناسی اشیای نامنظم که از دید هندسه اقلیدسی قابل‌بحث نیستند استفاده کرد [21]. مفهوم خود همانندی یا خود وابستگی در مقیاس‌های مختلف می‌تواند توضیحی قانع‌کننده در رابطه با مقیاس مستقل مشخص اشیاء یا پدیده‌ها داشته باشد [22]. در بسیاری از پدیده‌های زمین‌شناسی هندسه فراکتال وجود داشته و می‌توان برای آن توضیحی ارائه داد مانند کانی‌زائی، اکتشافات ژئوشیمیایی و حتی تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات مکانی، را با استفاده از هندسه فراکتال شرح داد [23][24][25].

از آنجایی که سیمای طیفی کانی‌های موجود در گوسان‌ها در گستره طیفی مرئی-فروسرخ نزدیک دارای شاخصه طیفی بوده (اکسیدهای آهن) و کانی‌های آبدار روی نیز در گستره فرروسرخ موج‌کوتاه دارای شاخصه طیفی هستند، تصاویر سنتینل ۲ را می‌توان برای نقشه برداری گوسان‌های مرتبط با کانه‌زایی روی بکار برد. به همین منظور تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای نقشه برداری کانی‌های اکسید آهن با استفاده از باندهای ۲، ۴، ۸، ۱۱ و برای نقشه برداری کانی‌های آبدار از باندهای ۲، ۸، ۱۱، ۱۲ استفاده شد که مقادیر آن‌ها در جدول ۲ و جدول ۳ آورده شده است. تصویر حاصل از مؤلفه‌های اصلی برای اکسید آهن را می‌توان F نامید و تصویر زون هیدروکسیل را H نامید و حاصل جمع این دو را H+F نامید و با استفاده از این داده می‌توان یک تصویر ترکیب رنگی ساخت که در آن گوسان‌های مرتبط با کانه زایی به رنگ سفید دیده می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱- ترکیب رنگی کاذب حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی انتخابی که گوسان‌های حاوی کانه‌های روی به رنگ سفید دیده می‌شوند.



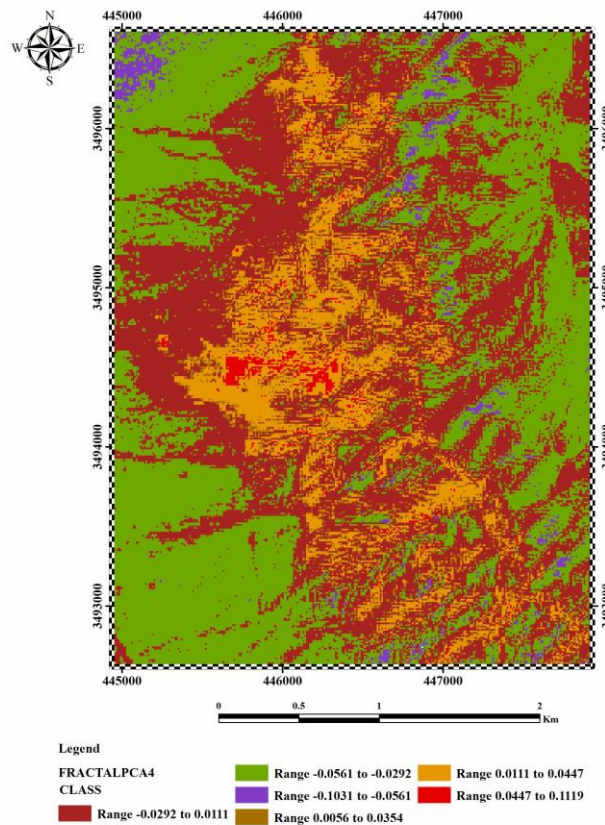
جدول ۲- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی برای کانی‌های اکسید آهن در سنجنده سنتینل ۲

Eigenvector	Band 2	Band 4	Band 8	Band 11
PC 1	-0.35	-0.54	-0.56	-0.50
PC 2	-0.48	-0.58	0.43	0.48
PC 3	-0.79	0.58	0.07	-0.15
PC 4	-0.09	0.13	-0.69	0.69

جدول ۳- نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی برای کانی‌های آبدار در سنجنده سنتینل ۲

Eigenvector	Band 2	Band 8	Band 11	Band 12
PC 1	-0.35	-0.53	-0.55	-0.53
PC 2	-0.30	-0.37	-0.24	0.83
PC 3	0.84	-0.12	0.51	-0.58
PC 4	-0.26	0.75	-0.60	0.057

به‌منظور قطعه‌بندی تصویر به روش فرکتال عیار-مساحت بر مبنای تحلیل مؤلفه‌های اصلی استاندارد بر روی تصویر سنتینل ۲ جهت نقشه‌برداری گوسان‌های مرتبط با کانه‌زایی روی، ابتدا تحلیل مؤلفه‌های اصلی استاندارد انجام شد که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است، مقادیر بارگذاری در مؤلفه چهارم برای باندهای ۱۱ و ۱۲ بیان‌کننده حضور کانی‌های آبدار بوده و با استفاده از روش فرکتال عیار-مساحت قطعه‌بندی تصویر صورت گرفت که مقادیر عددی حداکثری که در شکل ۱۲ به رنگ قرمز دیده می‌شود نشان‌دهنده گوسان‌های مرتبط با کانه‌زایی روی بوده و با داده‌های صحرایی انطباق بسیار بالایی دارد.



شکل ۱۲- نتایج قطعه‌بندی تصویر به روش فرکتال عیار-مساحت



جدول ۴ - تحلیل مؤلفه‌های اصلی استاندارد در سنجنده سنتینل ۲

Eigenvector	Band2	Band3	Band4	Band8	Band11	Band12
PC1	-0.18	-0.23	-0.35	-0.44	-0.60	-0.52
PC2	-0.30	-0.35	-0.45	-0.45	0.50	0.37
PC3	0.48	0.44	0.13	-0.68	-0.14	0.30
PC4	-0.15	-0.30	0.067	0.15	0.70	-0.60
PC5	-0.50	-0.17	0.80	-0.35	0.08	-0.10
PC6	0.65	-0.72	0.20	-0.05	0.09	-0.10

### ۳. نتیجه‌گیری

طیف‌سنجی نمونه‌های گوسان متعلق به معدن گوجر و نتایج XRD حاکی از حضور کانه‌های بارزش روی مانند همی‌مورفیت، هیدروزینسیت، ویلمیت در کنار کانی‌های گروه اکسید آهن و حتی کانی‌های کربناتی در گوسان‌ها بود که این مربوط به طبیعت پیچیده زمین‌شناسی است. هرکدام از این کانی‌ها دارای سیمای طیفی خاص خود هستند که بنا به سهم خود بر سیمای طیفی کلی گوسان‌ها تأثیر می‌گذارند. کانه‌های بارزش روی مانند همی‌مورفیت در گستره طیفی ۱ میکرومتر تا ۱.۲ میکرومتر، در ۱/۴ و ۱/۹ میکرومتر و نیز در ۲/۵ میکرومتر دارای عارضه جذبی شاخص هستند هرچند در گستره طیفی مرئی-فروسرخ نزدیک دارای طیف بازتابی بوده و فاقد عارضه جذبی می‌باشند. کانی‌های گروه اکسید آهن مانند هماتیت و ژاروسیت دارای عارضه طیفی شاخص در گستره طیفی مرئی و فرسرخ نزدیک هستند از این جهت برای شناسایی هرکدام از این پدیده‌ها باید از داده ماهواره‌ای استفاده نمود که در گستره طیفی مرئی تا فرسرخ موج‌کوتاه قابلیت تهیه تصویر را داشته باشد سنجنده سنتینل ۲ به دلیل قدرت تفکیک مکانی خوب و دارا بودن گستره طیفی مرئی-فروسرخ نزدیک و فرسرخ موج‌کوتاه می‌تواند در نقشه‌برداری واحدهای سنگی و دگرسانی‌های مرتبط مفید واقع شود زیرا با استفاده از باندهای محدوده SWIR این سنجنده در کنار باندهای VNIR می‌توان گوسان‌هایی را که دارای کانی‌های ثانویه روی مثل همی‌مورفیت که آبدار هستند را شناسایی نمود و از سایر واحدهای دارای کانی‌های ثانویه آهن که فاقد دگرسانی‌های مرتبط با کانه زایی هستند متمایز ساخت.

### منابع

- [1] ج. شهاب پور، زمین‌شناسی اقتصادی. کرمان: انتشارات دانشگاه باهنر کرمان، ۱۳۹۰.
- [2] S. Paradis, G. J. Simandl, J. Bradford, C. Leslie, and C. Brett, "Carbonate-hosted lead-zinc mineralization on the Cariboo zinc property, Quesnel Lake area, east-central British Columbia (NTS 093A/14E, 15W)," *Geol. Fieldwork*, pp. 2010–2011, 2008.
- [3] G. J. Simandl and S. Paradis, "Carbonate-hosted, nonsulphide, zinc-lead deposits in the southern Kootenay Arc, British Columbia (NTS 082F/03)," *Geol. Fieldwork*, pp. 2001–2009, 2008.
- [4] M. W. Hitzman, N. A. Reynolds, D. F. Sangster, C. R. Allen, and C. E. Carman, "Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide zinc deposits," *Econ. Geol.*, vol. 98, no. 4, pp. 685–714, 2003, doi: 10.2113/gsecongeo.98.4.685.
- [5] G. Borg, "Geological and economical significance of supergene nonsulphide zinc deposits in Iran and their exploration potential," in *Mining and Sustainable Development. 20th World Mining Congress*, 2005, pp. 385–390.
- [6] R. Frutuoso, A. Lima, and A. C. Teodoro, "Application of remote sensing data in gold exploration: targeting hydrothermal alteration using Landsat 8 imagery in northern Portugal," *Arab. J. Geosci.*, vol. 14, pp. 1–18, 2021.
- [7] B. K. Bhadra, A. K. Jain, G. Karunakar, H. Meena, S. B. Rehpade, and S. S. Rao, "Integrated remote sensing and geophysical techniques for shallow base metal deposits (Zn, Pb, Cu) below the gossan zone at Kalabar, Western Aravalli Belt, India," *J. Appl. Geophys.*, vol. 191, p. 104365, 2021, doi: 10.1016/j.jappgeo.2021.104365.
- [8] M. Chakouri, A. El Harti, R. Lhissou, J. El Hachimi, and A. Jellouli, "Geological and mineralogical mapping in Moroccan central Jebilet using multispectral and hyperspectral satellite data and machine



- learning,” *Int. J.*, vol. 9, pp. 5772–5783, 2020.
- [9] M. Honarmand, H. Shahriari, M. Hosseinjani, and A. Ghorbani, “The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Enhancing Zn-bearing gossans from GeoEye-1 and Landsat 8 OLI data for non-sulphide Zn deposit exploration,” *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 93–107, 2024, doi: 10.1016/j.ejrs.2024.01.003.
- [10] F. Velasco, J. M. Herrero, S. Suárez, I. Yusta, A. Alvaro, and F. Tornos, “Supergene features and evolution of gossans capping massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 53, pp. 181–203, 2013.
- [11] SPCE, “Report of Semi-Detailed Exploration in the Gujer Mine Area (Unpublished).”, Iran, Kerman, 2013.
- [12] M. Kuester, K. Thome, K. Krause, K. Canham, and E. Whittington, “Comparison of surface reflectance measurements from three ASD FieldSpec FR spectroradiometers and one ASD FieldSpec VNIR spectroradiometer,” in *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)*, vol. 1, pp. 72–74. doi: 10.1109/IGARSS.2001.976060.
- [13] S. Kratzer, M. Ligi, C. Giardino, and J. M. Beltrán-abauza, “Intercomparison in the field between the new WISP-3 and other radiometers (TriOS Ramses, ASD FieldSpec, and TACCS),” 2017, doi: 10.1117/1.JRS.6.063615.
- [14] A. A. Madani, “Spectral properties of carbonatized ultramafic mantle xenoliths and their host olivine basalts, Jabal Al Maqatal basin, South Eastern Desert, Egypt, using ASD FieldSpec spectroradiometer,” *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 41–48, 2011, doi: 10.1016/j.ejrs.2011.05.001.
- [15] F. D. van der Meer, H. M. a. van der Werff, and F. J. a. van Ruitenbeek, “Potential of ESA’s Sentinel-2 for geological applications,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 148, pp. 124–133, 2014, doi: 10.1016/j.rse.2014.03.022.
- [16] J. Hunt, G.R., Salisbury, “Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, II. Carbonates,” *Mod. Geol.*, vol. 2, pp. 23–30, 1970.
- [17] R. P. HUNT, Graham R.; ASHLEY, “of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared,” vol. 74, pp. 1613–1629, 1979.
- [18] G. R. Hunt, “IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED,” *Geophysics*, vol. 42, no. 3, pp. 501–511, 1977, doi: 10.1190/1.1440721.
- [19] C. R. D. S. Filho and C. Brodie, “International Journal of Remote Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis,” no. July 2013, pp. 37–41, doi: 10.1080/0143116031000152291.
- [20] B. Mandelbrot, “The Fractal Geometry of Nature, Freeman and Co., San Francisco,” p. 209, 1982.
- [21] J. C. Davis, *Statistics and data analysis in Geology*, 3rd ed. Wiley, 2002.
- [22] M. Bb, “Intermittent turbulence in self-similar cascades : divergence of high moments and dimension of the carrier,” *J. Fluid Mech.*, vol. 62, pp. 331–358, 1974.
- [23] Q. Cheng, “Multifractality and spatial statistics,” vol. 25, pp. 949–961, 1999.
- [24] Q. Cheng and Q. Li, “A fractal concentration – area method for assigning a color palette for image representation,” vol. 28, pp. 567–575, 2002.
- [25] H. Shahriari, H. Ranjbar, and M. Honarmand, “Image Segmentation for Hydrothermal Alteration Mapping Using PCA and Concentration – Area Fractal Model,” no. Mandelbrot 1974, 2013, doi: 10.1007/s11053-013-9211-y.