



مطالعات زمین‌شناسی در جنوبگان با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری و تصاویر ماهواره‌ای

پروانه سبحانی^{۱*}، افشین دانه کار^۲

۱- استادیار گروه محیط‌زیست، دانشگاه لرستان، دانشکده منابع طبیعی، خرم‌آباد، ایران

۲- استاده، گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* رایانامه نویسنده مسئول: sobhani.pa@lu.ac.ir

چکیده

اطلاعات زمین‌شناسی دقیقی از قطب جنوب به دلیل پوشش یخی گسترده، دسترسی دشوار و سنگ‌شناسی ضعیف، در اختیار نیست. بنابراین، مطالعات علوم زمین‌شناسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای در این منطقه امری ضروری است. براین‌اساس هدف از این مطالعه، ارزیابی کاربرد داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی Landsat-8 و رادیومتر تابش و انعکاس حرارتی پیشرفته فضایی (ASTER) برای نقشه‌برداری زمین‌شناسی در مناطق غیرقابل دسترس قطب جنوب است. مطابق نتایج به دست آمده، داده‌های ASTER مقادیر بالاتری از $R=0/89$ را نسبت به داده‌های Landsat-8 به‌ویژه در ارتباط با کانی‌های Al-OH-MI نشان می‌دهند که این نتایج به دلیل مقادیر طیفی بالای SWIR در ماهواره ASTER می‌باشد. به‌طور کلی در تمایز بین مجموعه‌های معدنی آلتراسیون آرژیلیک (آلونیت کائولینیت)، سرسیتیک (مسکوویت) و پروپیلیتیک (اپیدوت-کلریت-کلسیت) ماهواره ASTER از دقت بیشتری برخوردار است. نتایج این بررسی نشان داد که رویکرد سنجش از دور مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند برای شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگ‌شناسی مرتبط با مناطق بزرگ و غیرقابل دسترسی هم‌چون قطب جنوب که امکان مطالعات میدانی در منطقه محدود است، از کارایی بالایی برخوردار باشد. از طرفی دیگر، تهیه نقشه‌های دقیق زمین‌شناسی به تفکیک واحدهای اصلی سنگ‌شناسی در منطقه هدف نیز امکان‌پذیر است.

کلیدواژه‌ها: علوم زمین‌شناسی، تکنیک‌های سنجش‌ازدور ماهواره‌ای، قطب جنوب

مقدمه

زمین‌شناسی در قطب جنوب را فراهم می‌سازند و ظهور سنجش‌ازدور انقلاب عظیمی در سنگ‌شناسی و اکتشافات معدنی در قطب جنوب محسوب می‌شود. از این‌رو، زمین‌شناسان از داده‌های سنجش‌ازدور برای ارزیابی خطرات زمین‌شناسی، پایش لرزه‌ای، بهره‌برداری از مواد معدنی، پایش یخچال‌های طبیعی و استخراج اطلاعات معدنی در مطالعات زمین‌شناسی استفاده می‌کنند (Wu et al., 2020).

تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری پیشرفته، کاربردی‌ترین ابزار برای نقشه‌برداری و شناسایی مناطق غیرقابل دسترس در قطب جنوب و نقشه‌برداری میدانی زمین‌شناسی از این منطقه هستند (Xu et al., 2022). مطابق با مطالعات صورت گرفته، تصاویر SAR² برای پایش مکانیسم‌های لرزه‌ای، فعالیت‌های آتشفشانی، تغییر شکل توپوگرافی و تجزیه و تحلیل گسل کاربرد دارند. در حالی که، داده‌های سنجش‌ازدور نوری در مطالعات معادن، فعالیت‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی و آتشفشانی استفاده می‌شوند و این تصاویر در مطالعات زلزله، یخبندان و گسل‌شناسی از کاربرد کمتری برخوردارند (Chen et al., 2017; Li et al., 2014; Asadzadeh & de Souza Filho, 2016).

در سال‌های اخیر، فناوری ماهواره‌ای سنجش‌ازدور نوری به سرعت توسعه یافته است و کاربرد فزاینده و تصویربردارهای متنوع آن به وضوح قابل مشاهده است، به‌طور مثال داده‌های SPOT-5/6/7 نقش مهمی در مطالعات زمین‌شناسی دارند و برخی از کاربردهای کلیدی این ماهواره شامل سنگ‌شناسی، مدل‌های توپوگرافی زمین، مخاطرات زمین‌شناسی و بوم‌شناسی معدن می‌باشد (Sonbul et al., 2016; Han et al., 2018). ماهواره‌های WorldView نیز دارای دقت موقعیت‌یابی جغرافیایی مدرن و قابلیت واکنش عالی می‌باشند و همچنین با توجه به مزایای این ماهواره در ویژگی‌های

قطب جنوب به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین مناطق یخی و پوشیده از برف، به دلیل موقعیت جغرافیایی منحصر به فرد، شرایط طبیعی خاص و تغییرات پیچیده زمین‌شناسی، مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران در سراسر جهان قرار گرفته است (Stokes et al., 2022; An et al., 2023). این منطقه از نظر گرمایش جهانی، پایداری منابع و حفظ تنوع زیستی از اهمیت بالایی برخوردار است. با این حال، تحقیقات و مطالعات زمین‌شناسی در قطب جنوب به دلیل پوشیده شدن ۹۹/۶۶ درصد از این منطقه در یخ و برف، با چالش‌های زیادی مواجه است. به‌طور کلی در این منطقه به دلیل پوشش یخی گسترده، دسترسی دشوار و سنگ‌شناسی ضعیف، اطلاعات زمین‌شناسی دقیقی در دسترس نمی‌باشد (Zhang et al., 2023). از این‌رو، تصاویر ماهواره‌ای سنجش‌ازدور به‌عنوان راه‌حلی برای غلبه بر مشکلات و محدودیت‌های میدانی و اکتشافات معدنی در این منطقه، از کاربرد بالایی برخوردار هستند. همچنین داده‌های چندطیفی رادیومتر پیشرفته فضا برد بازتابی و همچنین گسیل گرمایی (ASTER)¹ در تهیه نقشه‌های سنگ‌شناسی و بهبود در جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی قطب جنوب دارای اهمیت فراوانی می‌باشند (Tovar-Sánchez et al., 2021; Baumhoer et al., 2018; Amer et al., 2016; Eldosouky et al., 2017).

امروزه فناوری استفاده از هوا و فضا برای جمع‌آوری اطلاعات زمین‌شناسی و شناسایی واحدهای سنگ‌شناسی، به‌عنوان تکنولوژی سنجش‌ازدور، به‌صورت گسترده مورد استفاده کشورهای مختلف قرار گرفته است و در زمان کوتاهی حجم قابل ملاحظه‌ای از اطلاعات زمینی و نقشه‌های زمین‌شناسی را در اختیار محققان قرار می‌دهد (Gabarró et al., 2023; Spasova, & Avetisyan, 2023). از طرفی نقشه‌ها و منابع تهیه شده اساس مطالعات

¹ - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

² - Synthetic Aperture Radar (SAR)

دارای وضوح بالاتر و اطلاعات تصویر بصری بیشتری نسبت به داده‌های SAR می‌باشند که تفسیر و شناسایی اطلاعات زمین‌شناسی را ساده‌تر می‌کند (جدول ۱). همچنین در مطالعات زمین‌شناسی قطب جنوب، ادغام تصاویر نوری و SAR نیز می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی با ترکیب مزایای هر دو روش، دقت تشخیص را با توجه به هدف پژوهش بهبود بخشد (Asadzadeh et al., 2016; Wu et al., 2020). براین اساس، داده‌های سنجش‌ازدوری می‌تواند برای بهبود در وضعیت مطالعات زمین‌شناسی قطب جنوب و استخراج انواع کانی‌ها، سنگ‌شناسی و اکتشافات معدنی مورد استفاده قرار گیرد (Cox et al., 2023).

جدول ۱- مقایسه کارایی داده‌های نوری و راداری در مطالعات زمین‌شناسی قطب جنوب (Wu et al., 2020)

کاربرد زمین‌شناسی	داده‌های نوری	داده‌های راداری
مخاطرات زمین‌شناسی	بالا	متوسط به بالا
زمین‌لرزه	متوسط به بالا	بالا
اکتشاف معادن	بالا	متوسط به بالا
یخچال‌های طبیعی	متوسط به پایین	بالا
توپوگرافی	پایین	متوسط به پایین
گسل‌شناسی	پایین	بالا
سنگ‌شناسی	بالا	پایین
فعالیت‌های آتشفشانی	متوسط به بالا	متوسط به پایین

باتوجه به اهمیت علوم زمین‌شناسی در قطب جنوب و محدودیت‌های موجود در تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی و فقدان اطلاعات کافی از این منطقه، منجر شده‌است که بسیاری از محققان به مطالعه این موضوع با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدوری بپردازند. در این راستا، می‌توان به مطالعه An و همکاران (۲۰۲۳)، در بررسی اکتشافات زمین‌فیزیکی ورقه‌های یخی قطب جنوب اشاره کرد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که تحقیق روی ورقه یخی قطب جنوب با چالش‌های عظیمی روبه‌رو است و

طیفی و فضایی مناسب، داده‌های آن به‌طور گسترده در کانی‌شناسی و نقشه‌برداری سنگ‌شناسی، تهیه نقشه‌های توپوگرافی، تشخیص تغییرات ناشی از نشت گاز، یخبندان و شناسایی سنگ‌های آتشفشانی استفاده می‌شوند. داده‌های این ماهواره در مقایسه با داده‌های TM و ASTER، دارای وضوح فضایی، طیفی و تشعشی بالاتر و پتانسیل بیشتری برای کاربردهای سنجش از دور مرتبط با استخراج اطلاعات زمین‌شناسی می‌باشند. بنابراین، می‌توان از داده‌های WorldView برای مطالعات و پایش سنگ‌شناسی، تکتونیک، و منابع زمین‌شناسی استفاده نمود (Ye et al., 2017; Fieber et al., 2018). علاوه‌براین، ماهواره Sentinel-2 برای استخراج کانی‌های زمین‌شناسی به‌کار گرفته می‌شوند. از آنجایی که باندهای Sentinel-2، ۵۹ درصد از باندهای فراطیفی و اهداف چندطیفی را پوشش می‌دهند، می‌توانند نقش کلیدی در افزایش داده‌های فراطیفی ایفا نمایند و کاربردهای بالقوه‌ای را در تفکیک‌پذیری‌های مکانی، زمانی و طیفی از خود نشان دهند. همچنین این ماهواره‌ها در پایش زباله‌های معدنی نیز کاربرد فراوانی دارد (Transon et al., 2018; Paul et al., 2016).

داده‌های سنجش از دور SAR نیز اطلاعات زمین‌شناسی و معدنی متعددی مانند ساختار زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی، به‌ویژه مربوط به رسوبات آتشفشانی، برخورد شهاب سنگ‌ها و گسل‌های بزرگ را ارائه می‌دهند. در سال‌های اخیر استفاده از SAR برای نظارت بر تغییر شکل سطح زمین و مخاطرات زمین‌شناسی به یک موضوع کلیدی تبدیل شده‌است. این تکنیک که برای تغییر شکل زمین در مقیاس بزرگ مناسب است، به‌طور گسترده در فعالیت‌های معدنی و پایش وضعیت زمین‌شناسی کاربرد دارد (Wu et al., 2020).

براساس بررسی‌های صورت گرفته، داده‌های ماهواره‌ای سنجش‌ازدور نوری در مطالعات زمین‌شناسی قطب جنوب

این دانش تکمیل و جبران گردد. براین اساس، هدف از این تحقیق ارزیابی کاربرد داده‌های ماهواره‌ای چندطیفی Landsat-8 و رادیومتر تابش و انعکاس حرارتی پیشرفته فضایی (ASTER) برای نقشه‌برداری زمین‌شناسی در مناطق غیرقابل دسترس قطب جنوب است. در این راستا مطالعه حاضر، یک رویکرد سنجش‌ازدوری مبتنی بر کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در نقشه‌برداری زمین‌شناسی قطب جنوب را ارائه می‌دهد. همچنین شاخص‌های نسبت طیفی باندهای بررسی شده در این مطالعه، می‌تواند در زمینه تحقیقات دانش زمین‌شناسی در قطب جنوب مفید باشد و به تهیه نقشه‌های دقیقی از این مناطق، کمک نماید.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

از نظر زمین‌شناسی قطب جنوب از سه منطقه تکتونیکی اصلی شامل قطب جنوب شرقی، قطب جنوب غربی و کوه‌های فراقطب جنوبی تشکیل شده است (Beiranvand Pour et al., 2018; Talarico & Kleinschmidt, 2008). بدین ترتیب شرق قطب جنوب دارای لیتوسفر قاره‌ای پرکامبرین با ضخامت ۳۵ تا ۴۵ کیلومتر می‌باشد که از نظر موقعیت مرکزی در ابرقاره پالئوزوئیک گندوانا با طبقات توپوگرافی بالا قرار گرفته‌است. همچنین قطب جنوب ترکیبی از ورقه‌های پوسته‌ای کم‌ارتفاع با ضخامت ۲۰ تا ۳۵ کیلومتر است که در غرب با قله‌هایی با بیش از ۴ کیلومتر ارتفاع از سطح دریا قرار گرفته‌اند (Ji et al., 2018). شبه‌جزیره قطب جنوب (AP)^۱ در دسترس‌ترین منطقه در غرب قطب جنوب است که در امتداد حاشیه جنوب شرقی اقیانوس آرام واقع شده‌است. این شبه‌جزیره شامل تعدادی حوزه بزرگ می‌باشد که بزرگ‌ترین بلوک تکتونیکی آن در غرب قطب جنوب واقع شده‌است. مطابق مطالعات جغرافیایی-فیزیکی و زمین‌شناسی صورت گرفته، شبه‌جزیره قطب جنوب متشکل از یک کمان ماگمایی

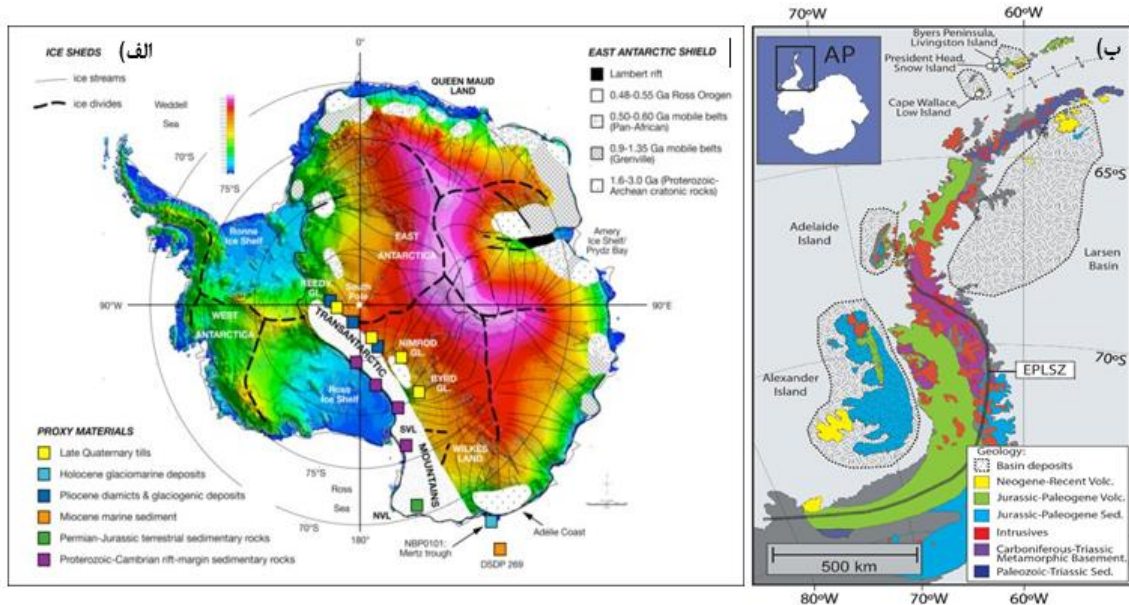
پرداختن به این موضوع امری ضروری می‌باشد و می‌تواند به ترویج بیشتر تحقیقات زمین‌شناسی در قطب جنوب کمک نماید. در مطالعه‌ای دیگر، Zhang و همکاران (۲۰۲۳)، به تحلیل مطالعات زمین‌شناسی در قطب جنوب پرداختند. همان‌طور که نتایج نشان داد بررسی‌های زمین‌شناسی نقش مهمی در افزایش درک ساختار بنیادی قطب جنوب ایفا می‌کند و همچنین نتایج ارزشمندی را به‌عنوان فرصت‌های تحقیقاتی در قطب جنوب، در اختیار قرار می‌دهد. همچنین Wu و همکاران (۲۰۲۰)، به مرور کاربرد داده‌های سنجش‌ازدور با وضوح مکانی بالا در مطالعات زمین‌شناسی قطب جنوب پرداختند. مطابق نتایج به‌دست آمده، تحقیقات سنجش‌ازدور زمین‌شناسی باید چندرشته‌ای یا بین‌رشته‌ای باشد و از بررسی‌های دقیق‌تر و کارآمدتری برخوردار باشد تا بتواند از طریق کاربرد فناوری یادگیری عمیق قابلیت‌های پردازش خودکار و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها را بهبود بخشد. Beiranvand Pour و همکاران (۲۰۱۸)، نیز مطالعات زمین‌شناسی در قطب جنوب را با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور مورد سنجش و تحلیل قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که تصاویر ماهواره‌ای نوری و راداری پیشرفته، کاربردی‌ترین ابزار برای نقشه‌برداری و شناسایی مناطق غیرقابل دسترس در قطب جنوب است و نتایج این مطالعه می‌تواند به بازنگری و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی با دقتی بالا در این منطقه کمک نماید.

مطابق پژوهش‌های صورت گرفته، علی‌رغم اهمیت بالای علوم زمین‌شناسی در قطب جنوب، این منطقه با محدودیت‌ها و چالش‌های فراوانی در زمینه جمع‌آوری اطلاعات و تهیه نقشه‌های دقیق زمین‌شناسی روبه‌رو است و بسیاری از بخش‌های آن در مقیاس زمین‌شناسی منطقه‌ای و ساختاری ناشناخته باقی مانده‌است. بنابراین، مطالعات علوم زمین‌شناسی با استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور و تصاویر ماهواره‌ای در قطب جنوب امری ضروری است تا از این طریق کمبود اطلاعات موجود از

^۱ - Antarctic Peninsula

توزیع واحدهای اصلی زمین‌شناسی در شبه‌جزیره قطب جنوب نمایش داده شده‌است.

مرکب با دو یا سه لایه مجزا می‌باشد که در امتداد حاشیه گندوانا در اواسط کرتاسه ایجاد شده است (Cui et al., 2020). در شکل ۱، نقشه زمین‌شناسی قطب جنوب و



شکل ۱- (الف) نقشه زمین‌شناسی قطب جنوب، (ب) واحدهای اصلی زمین‌شناسی شبه‌جزیره قطب جنوب (Lythe & Vaughan, 2001; Burton-Johnson & Riley, 2015)

پردازش تصاویر

در این مطالعه، چندین شاخص نسبت طیفی برای باندهای تصاویر Landsat-8 و ASTER در نقشه‌برداری از واحدهای سنگ‌شناسی و با بازتاب نوری ضعیف، به‌ویژه در مکان‌های غیرقابل دسترس مورد استفاده قرار گرفت (Inzana et al., 2003; Rockwell & Hofstra, 2008; Mars & Rowan, 2011). بدین ترتیب شاخص‌های نقشه‌برداری طیفی حذف پیوسته (CR)^۴ و تجزیه و تحلیل اجزای مستقل (ICA)^۵ بر تصاویر Landsat-8 (باندهای VNIR+SWIR+TIR) اعمال شد. علاوه بر این، از شاخص‌های نشانه‌های طیفی برف/یخ، کانی‌های اکسید آهن/هیدروکسید، عناصر Al-OH، Fe و Mg-O-H

داده‌های سنجش‌ازدور

در این مطالعه برای بررسی وضعیت واحدهای زمین‌شناسی شبه‌جزیره قطب جنوب از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و رادیومتر تابش و انعکاس حرارتی پیشرفته فضایی (ASTER)، استفاده گردید. تصاویر مورد مطالعه در طی ماه‌های دسامبر تا فوریه (در طول فصل تابستان) با پوشش ابر کم و وضوح بیشتر سنگ‌ها و عناصر معدنی، تهیه و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین پردازش داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ENVI و نقشه‌سازی تصاویر نیز در محیط Arc GIS نسخه 10.8 انجام شد.

^۴ - Continuum Removal (CR)

^۵ - Independent Components Analysis (ICA)

منابع معدنی CO_3 و سنگ‌های فلسیک غنی از کوارتز، مافیک و اولترامافیک نیز استفاده گردید.

شدت انعکاس طیفی تابش خورشید از سطوح طبیعی تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی مواد می‌باشد. در این راستا، برف و یخ بازتاب بالایی را در طول موج‌های مرئی (۰/۴ میکرومتر تا ۰/۷۵ میکرومتر)، بازتاب متوسطی در طول موج‌های مادون قرمز نزدیک (۰/۷۸ میکرومتر تا ۰/۹۰ میکرومتر) و بازتاب کمی را در محدوده طیفی SWIR (۰/۷۸ میکرومتر تا ۰/۹ میکرومتر) نشان می‌دهند (Keshri et al., 2009). از آنجایی که سنگ‌ها از کانی‌های مختلفی تشکیل شده‌اند، فراوانی نسبی ترکیبات معدنی آن‌ها عامل اصلی کنترل‌کننده بازتاب طیفی و نوردهی آن‌ها می‌باشد. سنگ‌ها در محدوده طیفی VNIR دارای جذب بالا و بازتاب بسیار محدودی می‌باشند. در مطالعه حاضر، برای شناسایی اثرات بازتاب برف/یخ، از شاخص طیفی تفاوت نرمال شده برف (NDSI)^۶ روی تصاویر Landsat-8 و ASTER به‌ترتیب مطابق رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شد.

$$\text{NDSI} = (\text{band3} - \text{band6}) / (\text{band3} + \text{band6}) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$\text{NDSI} = (\text{band1} - \text{band4}) / (\text{band1} + \text{band4}) \quad \text{رابطه ۲}$$

مقادیر NDSI برای سطوح برفی حدود ۰/۴ و برای سطوح سنگی مقادیر منفی یا بسیار کوچک می‌باشد زیرا سنگ‌ها معمولاً بازتاب کمی در ناحیه VNIR از خود نشان می‌دهند. براین اساس در قطب جنوب، NDSI از پتانسیل بالایی برای تمایز برف/یخ از سطوح سنگی برخوردار است (Haselwimmer et al., 2010; Zhu & Woodcock, 2014; Zhu & Woodcock, 2012). همچنین برای نقشه‌سازی فراوانی گروه‌های معدنی اکسید آهن/هیدروکسید موجود در سطوح سنگی، دو نسبت نواری براساس طیف آزمایشگاهی کانی‌ها روی باندهای

Clark et al.,) ایجاد شد (ASTER و Landsat-8, 1993, Clark and Swayze, 1993). هماتیت، زاروسیت، گوتیت و لیمونیت تمایل بالا به جذب طول موج VNIR (۱/۴-۱/۰ میکرومتر) در باندهای ۲، ۳، ۴ و ۵ در Landsat-8 و ۱، ۲ و ۳ از ASTER، نشان می‌دهند، در حالی که بازتاب بالایی در طول موج SWIR (۱/۵۶ میکرومتر تا ۱/۷۰ میکرومتر) دارند. از این رو برای محاسبه شاخص Fe-minerals (Fe-MI) می‌توان از باندهای ۳، ۴، ۵ و ۶ ماهواره Landsat-8 و باندهای ۱، ۲، ۳ و ۴ ماهواره ASTER استفاده نمود (رابطه‌های ۳ و ۴).

رابطه ۳

$$\text{Fe - MI for Landsat - 8} = (\text{band6}/\text{band5}) \times (\text{band6}/\text{band5})$$

رابطه ۴

$$\text{Fe - MI for ASTER} = (\text{band4}/\text{band3}) \times (\text{band2}/\text{band1})$$

در این مطالعه از باندهای SWIR ماهواره Landsat-8 و ASTER برای شناسایی گروه‌های معدنی هیدروکسیل دار (Al-OH و Mg-OH و Fe) و CO_3 استفاده شد. کانی‌های خاک رس و کربناته دارای ویژگی‌های جذب طیفی در دامنه ۲/۱ تا ۲/۴ میکرومتر و بازتاب ۱/۵۵ تا ۱/۷۵ میکرومتری می‌باشند که به‌ترتیب با باند ۷ (۲/۱۱ تا ۲/۲۹ میکرومتر) و باند ۶ (۱/۵۷ تا ۱/۶۵ میکرومتر) Landsat-8 منطبق هستند. بنابراین در تشخیص این کانی‌ها، باندهای ۶ و ۷ باید با یکدیگر ترکیب شوند. همچنین برای تمایز بیشتر مواد معدنی خاک رس و کربناته، نقشه‌های حاصل از تصاویر Landsat-8 در باند ۷ (باند جذب) ضرب شد و بدین ترتیب شاخص کانی‌های آلتراسیون حاوی (Al-OH (Amer et al., 2016; Modabberi et al., 2017; Safari et al., 2018). در مورد تصاویر ASTER نیز از باندهای ۵، ۶ و ۷ برای محاسبه شاخص دگرسانی کانی‌های Al-OH (Al-OH-MI) مطابق رابطه ۵ محاسبه شد (Amer et al., 2016; Modabberi et al., 2017; Safari et al., 2018). در مورد تصاویر ASTER نیز از باندهای ۵، ۶ و ۷ برای محاسبه شاخص دگرسانی کانی‌های Al-OH (Al-OH-MI) استفاده شد (رابطه ۶).

⁶ - Normalized Difference Snow Index (NDSI)

نتایج و بحث

مطابق شکل ۲، نقشه بصری از ویژگی جذب و انتشار حرارتی منطقه، با استفاده از یک تصویر رنگی کاذب و باندهای ۵، ۷ و ۱۰ در Landsat-8 قابل مشاهده است. این تصویر نشان‌دهنده واحدهای سنگی و کانی‌هایی با نوردی ضعیف براساس شناسایی ویژگی‌های جذب کانی Al-OH در طول موج ۲/۲ میکرومتر، ویژگی جذب "Fe" ۲/۳۳-۲/۳۱ "Mg-O-H" و "CO₃" در دامنه طیفی میکرومتر (باند ۷ Landsat-8)، ویژگی‌های جذب Fe₃+ در دامنه ۰/۸۳-۰/۹۷ میکرومتر (باند ۵ Landsat-8) و ویژگی‌های حداقل انتشار باند SiO در طول موج‌های ۱۱/۷۰-۱۰/۳۰ میکرومتر (باند ۱۰ Landsat-8) می‌باشد. بدین ترتیب، از باند ۷، Landsat-8 برای شناسایی Al-OH مسکویت و کائولینیت و همچنین "Mg-O-H" و "CO₃" (جذب آهن، اپیدوت، کلسیت و کلریت) استفاده شد. علاوه بر این، برای نمایش بهتر جزئیات سنگ‌شناسی منطقه، در شکل ۳ به نمایش یک زیرساخت فضایی از سنگ‌های منطقه پرداخته شد. رنگ قهوه‌ای نمایش داده شده در تصویر، نشان‌دهنده مقادیر بالایی از مسکویت/کلریت و کوارتز است که شامل واحدهای سنگ‌شناسی غنی از کوارتز و فلسیک می‌باشند. همچنین مناطق نارنجی/زرد حاکی از سنگ‌های غنی از کوارتز با محتوای هماتیت/گوتیت یا فیلوسیلیکات‌های مافیک (Fe، Mg-O-H و CO₃) و پیروکسن هستند.

در ادامه به منظور تمایز مجموعه‌های معدنی دگرسانی و واحدهای سنگ‌شناسی منطقه، ICA روی تصاویر Landsat-8 (باندهای VNIR+SWIR+TIR) اعمال شد. مطابق شکل ۴، تصویر رنگ کاذب (FCC)^۷ از زیرمجموعه فضایی انتخاب شده Landsat-8 نمایش داده شده است که به ترتیب از ترکیب رنگ IC5 RGB (باند ۶ Landsat-

رابطه ۵)

$$Al - OH - MiforLandsat - 8 = (band6 / band7) \times (band7)$$

رابطه ۶)

$$Al - OH - MiforASTER = (band5 \times band7) \times (band6 \times band6)$$

برای تشخیص گروه‌های معدنی Fe، Mg-OH، CO₃، از باندهای ۷، ۸ و ۹ ASTER استفاده شد (مطابق رابطه ۷)، زیرا ویژگی‌های جذب بالای این گروه در موقعیت تعریف شده توسط باندهای ۸ و ۹ و ویژگی‌های جذب پایین در باند ۷ قابل مشاهده است (Mars & Rowan, 2011).

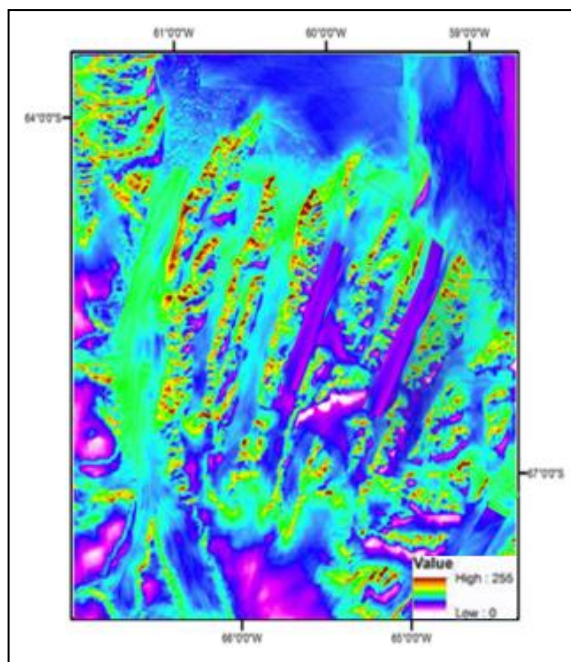
رابطه ۷)

$$Fe, Mg - OH - MiforASTER = (band7 \times band9) / (band8 \times band8)$$

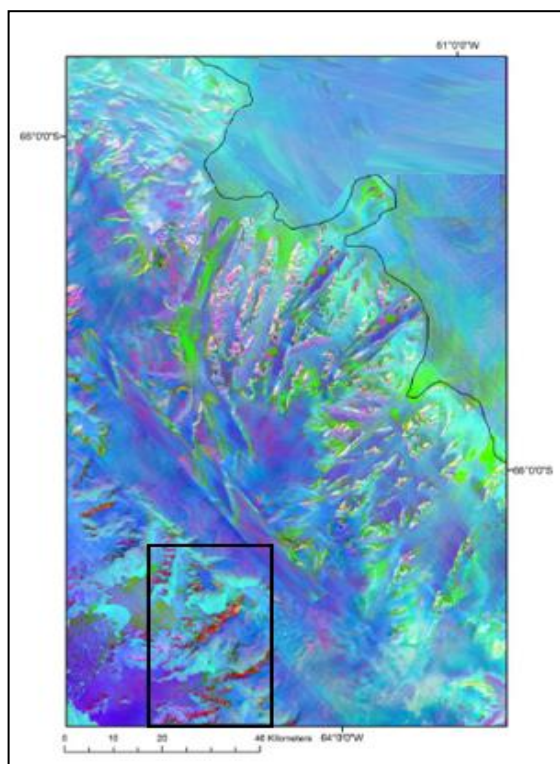
باندهای ۱۰ و ۱۱ Landsat-8 برای اندازه‌گیری ویژگی‌های انتشار طیفی کانی‌های سیلیکات مناسب است. بنابراین، باندهای TIR لندست-۸ را می‌توان برای تشخیص سنگ‌هایی با تابش بالا از سنگ‌هایی با گسیل متوسط و کم استفاده کرد. در ماهواره ASTER نیز باندهای ۱۳ و ۱۴ دارای انتشار بالایی در محدوده طیفی ۱۰-۱۲ میکرومتری می‌باشند و از آنجایی که کانی‌های فلدسپات قلیایی از همزیستی بالایی با کوارتز برخوردارند، حداقل انتشار را در باند ۱۱ نشان می‌دهند. به‌طور کلی در قطب جنوب، باندهای TIR دارای قابلیت بالایی برای شناسایی واحدهای سنگ‌شناسی براساس اطلاعات گسیل طیفی و دمای سطح محیط هستند و تابش TIR به‌عنوان تابعی از دما و بازتاب نور بیان می‌شود که با توجه به مقادیر تابش حرارتی بالای سنگ‌ها به‌خوبی قابل تشخیص است (Yajima & Yamaguchi, 2013).

در مطالعه حاضر، ارزیابی دقت نیز از طریق تجزیه و تحلیل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ۲۰۰ نقطه پیکسل نقشه برداری شده با تغییرات حاصل از تصاویر و مقایسه نتایج با منابع و اطلاعات در دسترس از منطقه انجام شد.

⁷ - False Color Composite (FCC)



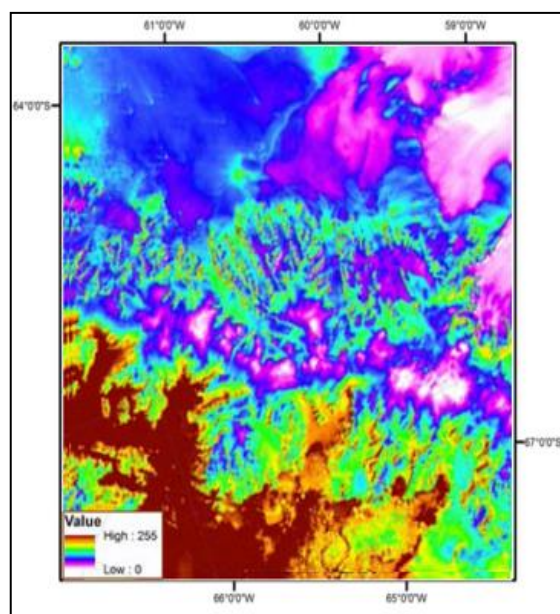
شکل ۳- تصویری از زیرساخت فضایی سنگ‌شناختی منطقه



شکل ۴- تصویری FCC از زیرمجموعه فضایی انتخاب شده (Landsat-8 IC5, IC6 و IC7 در باندهای VNIR+SWIR+TIR)

8)، IC6 (باند ۷ Landsat-8) و IC7 (باند ۱۰ Landsat-8) تشکیل شده است.

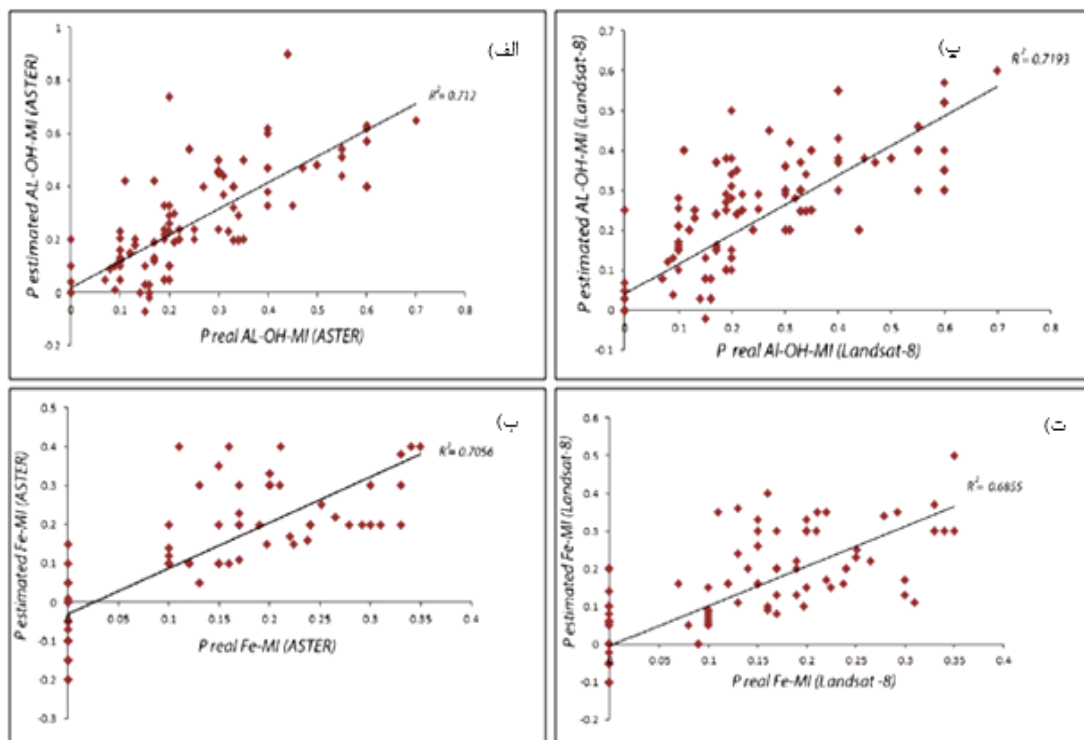
باندهای IC به دلیل وجود پیکسل‌های ناهمگن و غیرنرمال در تصاویر لندست-۸، برای تشخیص کانی‌های رسی و سنگ‌های سیلیکاتی از توان بالایی برخوردار می‌باشند (Crispini et al., 2014). به طوری که کانی‌های رسی و کربناتی دارای ویژگی‌های بازتابی ۱/۷۵۰-۱/۵۵۰ میکرومتر معادل باند ۶ در Landsat-8 و ویژگی‌های جذبی ۲/۴۰۰-۲/۱۰ میکرومتر معادل باند ۷ در Landsat-8 هستند. همچنین در مورد کانی‌های سیلیکاتی نیز تغییرات قابل توجهی از ۸/۵۰ تا ۱۱/۷۰ میکرومتر در بخش TIR معادل باند ۱۰ در Landsat-8 را نشان می‌دهند.



شکل ۵- تصویر رنگ کاذب باندهای ۵، ۷ و ۱۰ Landsat-8

داده‌های Landsat-8، سازگاری منطقی از تجزیه و تحلیل XRD را نشان می‌دهد. به‌طور کلی در تمایز بین مجموعه‌های معدنی آلتراسیون آرژیلیک (آلونیت کائولینیت)، سرسیتیک (مسکوویت) و پروپیلیتیک (اپیدوت-کلریت-کلسیت) باندهای SWIR در ماهواره ASTER از دقت بیشتری برخوردار است. براین اساس در این مطالعه، نتایج به دست آمده از شاخص‌های نسبت باند طیفی در مقایسه با نقشه‌های زمین‌شناسی و منابع موجود از محدوده مورد مطالعه از دقت بالایی برخوردار بوده و مورد تأیید است.

مقایسه نتایج RMSE حاصل از تصاویر ماهواره‌ای Landsat-8 و ASTER حاکی از آن است که داده‌های ASTER مقادیر بالاتری از $R=0.89$ را نسبت به داده‌های Landsat-8 به‌ویژه در ارتباط با کانی‌های Al-OH-MI نشان می‌دهند (شکل ۵). این نتایج به دلیل مقادیر طیفی بالای SWIR در ماهواره ASTER می‌باشد (۱/۶۰ تا ۲/۴۳ میکرومتر). علاوه بر این، در مورد کانی‌های "Mg-OH-MI, Fe" نیز به قابلیت بالای باندهای SWIR در این ماهواره اشاره دارد. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده از کانی‌های Fe-MI و Al-OH-MI در



شکل ۵- نتایج RMSE برای کانی‌های Fe-MI و Al-OH-MI در تصاویر ASTER (الف و ب) و Landsat-8 (پ و ت)

مطالعات میدانی در منطقه محدود است، از کارایی بالایی برخوردار باشد. همچنین در این مطالعه از چندین شاخص نسبت باندهای طیفی بر داده‌های Landsat-8 و ASTER استفاده شد که نتایج به‌دست آمده حاکی از تمایز دقیق سطوح برف/یخ از واحدهای سنگ‌شناسی (با بازتاب ضعیف) می‌باشد. بدین ترتیب ویژگی‌های ساختار

نتیجه‌گیری

همان‌طور که نتایج نشان داد رویکرد سنجش‌ازدور مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند برای شناسایی ساختارهای زمین‌شناسی و واحدهای سنگ‌شناسی مرتبط با مناطق بزرگ و غیرقابل دسترسی هم‌چون قطب جنوب که امکان

Clark, R. N., & Swayze, G. A. (1995). Mapping minerals, amorphous materials, environmental materials, vegetation, water, ice and snow, and other materials: the USGS Tricorder algorithm. In JPL, Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop.

Clark, R. N., Swayze, G. A., Gallagher, A. J., King, T. V. V., & Calvin, W. M. (1993). The US Geological Survey Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns US Geological Survey Open File Report 93-592. In RN Clark, GA Swayze, AJ Gallagher, TVV King, WM Calvin. (p. 1340).

Cox, S. C., Smith Lyttle, B., Elkind, S., Smith Siddoway, C., Morin, P., Capponi, G., & Wilson, G. (2023). A continent-wide detailed geological map dataset of Antarctica. *Scientific Data*, 10(1), 250.

Crispini, L., Federico, L., & Capponi, G. (2014). Structure of the Millen Schist Belt (Antarctica): Clues for the tectonics of northern Victoria Land along the paleo-Pacific margin of Gondwana. *Tectonics*, 33(4), 420-440.

Cui, X., Jeofry, H., Greenbaum, J. S., Guo, J., Li, L., Lindzey, L. E., & Siegert, M. J. (2020). Bed topography of princess Elizabeth land in east Antarctica. *Earth System Science Data*, 12(4), 2765-2774.

Eldosouky, A. M., Abdelkareem, M., & Elkhateeb, S. O. (2017). Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 130, 28-37.

Fieber, K. D., Mills, J. P., Miller, P. E., Clarke, L., Ireland, L., & Fox, A. J. (2018). Rigorous 3D change determination in Antarctic Peninsula glaciers from stereo WorldView-2 and archival aerial imagery. *Remote Sensing of Environment*, 205, 18-31.

Gabarró, C., Hughes, N., Wilkinson, J., Bertino, L., Bracher, A., Diehl, T., & Wagner, P. M. (2023). Improving satellite-based monitoring of the polar regions: Identification of research and capacity gaps. *Frontiers in Remote Sensing*, 4, 952091.

زمین‌شناسی و نقشه‌های سنگ‌شناسی از منطقه به تفکیک کانی‌های موجود (اکسید آهن / هیدروکسید، "Al-OH" و "Mg-O-H, Fe"، مناطق معدنی CO₃، فلسیک غنی از کوارتز، مافیک و اولترامافیک) حاصل شد. براین اساس، نتایج نشان می‌دهد که اطلاعات زمین‌شناسی به تفکیک واحدهای اصلی سنگ‌شناسی، می‌تواند در منطقه هدف با دقتی مطلوب حاصل شود.

منابع

Amer, R., El Mezayen, A., & Hasanein, M. (2016). ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 75, 239-251.

An, J., Huang, S., Chen, X., Xu, T., & Bai, Z. (2023). Research progress in geophysical exploration of the Antarctic ice sheet. *Earthquake Research Advances*, 3(3), 100203.

Asadzadeh, S., & de Souza Filho, C. R. (2016). A review on spectral processing methods for geological remote sensing. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 47, 69-90.

Baumhoer, C. A., Dietz, A., Dech, S., & Kuenzer, C. (2018). Remote Sensing of Antarctic Glacier and Ice-Shelf Front Dynamics – A Review, *Remote Sens.*, 10, 1445.

Beiranvand Pour, A., Park, Y., Park, T. Y. S., Hong, J. K., Hashim, M., Woo, J., & Ayoobi, I. (2018). Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica. *Polar Science*, 16, 23-46.

Burton-Johnson, A., & Riley, T.R. (2015). Autochthonous v. accreted terrane development of continental margins: a revised in situ tectonic history of the Antarctic Peninsula: *Journal of the Geological Society of London*.

Chen, W., Li, X., He, H., & Wang, L. (2017). A Review of Fine-Scale Land Use and Land Cover Classification in Open-Pit Mining Areas by Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 10(1), 15.



- Paul, F., Winsvold, S. H., Kääb, A., Nagler, T., & Schwaizer, G. (2016). Glacier remote sensing using Sentinel-2. Part II: Mapping glacier extents and surface facies, and comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 8(7), 575.
- Rockwell, B. W., & Hofstra, A. H. (2008). Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data—Implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere*, 4(1), 218-246.
- Safari, M., Maghsoudi, A., & Pour, A. B. (2018). Application of Landsat-8 and ASTER satellite remote sensing data for porphyry copper exploration: a case study from Shahr-e-Babak, Kerman, south of Iran. *Geocarto international*, 33(11), 1186-1201.
- Sonbul, A. R., El-Shafei, M. K., & Bishta, A. Z. (2016). Using remote sensing techniques and field-based structural analysis to explore new gold and associated mineral sites around Al-Hajar mine, Asir terrane, Arabian Shield. *Journal of African Earth Sciences*, 117, 285-302.
- Spasova, T., & Avetisyan, D. (2023). A synchronized remote sensing monitoring approach in the Livingstone island region of Antarctica. In *Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2023)*, 12786, 681-700.
- Stokes, C. R., Abram, N. J., Bentley, M. J., Edwards, T. L., England, M. H., Foppert, A., & Whitehouse, P. L. (2022). Response of the East Antarctic Ice Sheet to past and future climate change. *Nature*, 608(7922), 275-286.
- Talarico, F. M., & Kleinschmidt, G. (2008). The Antarctic continent in Gondwanaland: A tectonic review and potential research targets for future investigations. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 8, 257-308.
- Tovar-Sánchez, A., Román, A., Roque-Atienza, D., & Navarro, G. (2021). Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research. *Scientific Reports*, 11(1), 21717.
- Transon, J., d'Andrimont, R., Maignard, A., & Defourny, P. (2018). Survey of hyperspectral earth
- Han, L., Zhao, B., Wu, J. J., Zhang, S. Y., Pilz, J., & Yang, F. (2018). An integrated approach for extraction of lithology information using the SPOT 6 imagery in a heavily Quaternary-covered region—North Baoji District of China. *Geological Journal*, 53, 352-363.
- Haselwimmer, C. E., Riley, T. R., & Liu, J. G. (2010). Assessing the potential of multispectral remote sensing for lithological mapping on the Antarctic Peninsula: Case study from eastern Adelaide Island, Graham Land. *Antarctic Science*, 22(3), 299-318.
- 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(1-2), 59-72.
- Ji, F., Li, F., Gao, J. Y., Zhang, Q., & Hao, W. F. (2018). 3-D density structure of the Ross Sea basins, West Antarctica from constrained gravity inversion and their tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 215(2), 1241-1256.
- Keshri, A. K., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), 519-524.
- Li, Z., Yang, R., Dang, F., Du, P., & Zhang, X. (2014). A review on the geological applications of hyperspectral remote sensing technology. *Hyperspectral Image & Signal Processing*.
- Lythe, M. B., & Vaughan, D. G. (2001). BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B6), 11335-11351.
- Mars, J. C., & Rowan, L. C. (2011). ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonatite volcano, Afghanistan. *Geosphere*, 7(1), 276-289.
- Modabberi, S., Ahmadi, A., & Tangestani, M. H. (2017). Sub-pixel mapping of alunite and jarosite using ASTER data; a case study from north of Semnan, north central Iran. *Ore Geology Reviews*, 80, 429-436.

observation applications from space in the sentinel-2 context. *Remote Sensing*, 10(2), 157.

Wu, C., Li, X., Chen, W., & Li, X. (2020). A review of geological applications of high-spatial-resolution remote sensing data. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 29(06), 2030006.

Xu, T., Wang, F., Yi, Q., Xie, L., & Yao, X. (2022). A Bibliometric and Visualized Analysis of Research Progress and Trends in Rice Remote Sensing over the Past 42 Years (1980–2021). *Remote Sensing*, 14(15), 3607.

Yajima, T., & Yamaguchi, Y. (2013). Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared data. *Ore Geology Reviews*, 53, 134-144.

Ye, B., Tian, S., Ge, J., & Sun, Y. (2017). Assessment of WorldView-3 data for lithological mapping. *Remote Sensing*, 9(11), 1132.

Zhang, Y., Zou, C., Peng, C., Lan, X., & Zhang, H. (2023). Geophysics in Antarctic Research: A Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*, 15(16), 3928.

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 118, 83-94.

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Automated cloud, cloud shadow, and snow detection in multitemporal Landsat data: An algorithm designed specifically for monitoring land cover change. *Remote Sensing of Environment*, 152, 217-234.





Antarctica, Underwater Photo of Little Blue Penguin, 2019, Photographer: Shuxuan Cao

Geological Studies in Antarctica Using Remote Sensing Data and Satellite Imagery

Parvaneh Sobhani^{1*}, Afshin Danehkar²

1- Assistant Professor, Department of Environmental Science, Natural Resources Faculty, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2- Professor, Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

*Corresponding Author's E-mail: sobhani.pa@lu.ac.ir

Abstract

Precise geological information from Antarctica is not available due to extensive ice cover, difficult access, and poor lithology. Therefore, geological studies using remote sensing techniques and satellite images in this region are essential. Accordingly, the aim of this study is to assessment the application of multispectral satellite data from Landsat-8 and Advanced Spaceborne Thermal Radiation and Reflectance Radiometer (ASTER) for geological mapping in inaccessible areas of Antarctica. According to the results obtained, ASTER data show higher values of R ($R=0.89$) than Landsat-8 data, especially in relation to Al-OH-MI minerals, which is due to the high spectral values of SWIR in ASTER satellite. In general, ASTER satellite is more accurate in distinguishing between argillic (Alunite-Kaolinite), sericitic (Muscovite), and propylitic (Epidote-Chlorite-Calcite) alteration mineral assemblages. The results of this study showed that the remote sensing approach based on satellite images can be highly efficient for identifying geological structures and lithological units associated with large and inaccessible areas such as Antarctica, where field studies are limited. In addition, it is also possible to prepare accurate geological maps separated by the main lithological units in the target area.

Keywords: Geological sciences, Satellite remote sensing techniques, Antarctica