



# فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۳۰

doi 10.22077/jt.2026.11658.1227

مقاله پژوهشی

## شناسایی و بررسی انواع دگرسانی در جنوب شرقی مجموعه آذرین آساگی با استفاده از تکنیک های دورسنجی، پهنه زمین درز سیستان

محمد بامری<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا پرتایان<sup>۲</sup>، ریحانه عباسی<sup>۳</sup>

۱-استاد زمین شناسی اقتصادی، گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۲-دانشیار تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

۳-کارشناسی ارشد زمین شناسی اقتصادی، نظام مهندسی سیستان و بلوچستان، زاهدان

### چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۱

مجموعه آذرین آساگی در ۱۵۰ کیلومتری (از طریق جاده) شمال غرب شهر زاهدان و در بخش شمالی پهنه زمین درز سیستان واقع شده است. زمین شناسی محدوده مورد مطالعه شامل برونزدهای کوچکی از سنگ های اولترامافیک کرتاسه و سنگ های رسوبی فلیش گونه پالئوسن-ائوسن است که توسط سنگ های آذرین خروجیالیکوسن پوشانده و توسط سنگ های آذرین نیمه نفوذی و نفوذی الیگوسن با ترکیب حدواسط قطع شده اند. به منظور شناسایی پهنه های دگرسان شده در این محدوده، از تصاویر ماهواره ای سنجنده ASTER به همراه مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی استفاده شده است. شناسایی و تفکیک واحدهای سنگی و پهنه های دگرسانی با تکنیک های ترکیب رنگی کاذب ۴-۶-۸ و نسبت های باندی (۴/۲، ۸/۲ و ۷/۶) انجام شد. برای تفکیک دگرسانی های فیلیک، پروپیلیتیک و آرژیلیک، به ترتیب از نسبت های بانندی  $b6/(b5+b7)$ ،  $(b6+b9)/(b7+b8)$  و  $(b4+b6)/b5$  استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می دهد که بخشی از واحدهای فلیشی و سنگ های آذرین بخصوص نیمه نفوذی ها در محدوده مورد مطالعه شدیداً و به طور گسترده ای دچار دگرسانی شده اند. دگرسانی فیلیک بیشتر در بخش های مرکزی و دگرسانی های آرژیلیک و پروپیلیتیک در نواحی پیرامونی محدوده مورد مطالعه گسترش دارند. بررسی های صحرایی محدوده مورد مطالعه و مطالعات میکروسکوپی نمونه های برداشت شده از سنگ های آذرین دگرسان شده نیز وجود گسترش وسیع و شدید دگرسانی های فیلیک و پروپیلیتیک و گسترش اندک دگرسانی پتاسیک را تأیید می کند. این دگرسانی ها عمدتاً و به ترتیب با سنگ های آذرین حدواسط نظیر آندزیت، دیوریت پورفیری و کوارتز مونزونیت انطباق دارند. اگرچه طی بررسی های صحرایی شواهد مشخصی از کانی سازی مشاهده نشد، اما الگوی دگرسانی منطقه تا حدودی مشابه الگوی دگرسانی در سامانه های پورفیری است.

**کلید واژه ها:** پهنه زمین درز سیستان، آساگی، سنگ های آذرین حدواسط، استر، کانه زایی پورفیری

\*ایمیل: Boomeri@science.usb.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۵۱۴۱۲۲۳۹

## Research Paper

# Identification and investigation of alteration types in the southeast of the Asagi igneous complex using remote sensing techniques, Sistan suture zone, Iran

Mohammad Bameri<sup>\*1</sup>, Abdolreza Partabian<sup>2</sup>, Reyhaneh Abbasi<sup>3</sup>

- 1- Professor of Economic Geology, Department of Geology, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
- 2- Associate Professor of Tectonics, Department of Geology, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
- 3- M.Sc. in Economic Geology, Mining Engineering organization, Zahedan, Iran

## Abstract

The Asagi igneous complex is located 150 km (by road) northwest of Zahedan, in the northern part of the Sistan suture zone. The geology of the study area comprises small outcrops of Cretaceous ultramafic rocks and Paleocene–Eocene flysch-type sedimentary rocks, which are overlain by Oligocene extrusive rocks and intruded by Oligocene subvolcanic and intrusive igneous rocks of intermediate composition. To identify altered zones within the study area, ASTER satellite imagery was used in conjunction with field and laboratory studies. The identification and discrimination of lithological units and alteration zones were carried out using false color composite techniques (4–6–8) and band ratios (2/4, 2/8, 6/7). To discriminate phyllic, propylitic, and argillic alterations, the band ratios  $(b5+b7)/b6$ ,  $(b6+b9)/(b7+b8)$ , and  $(b4+b6)/b5$  were used, respectively. The results of these studies indicate that parts of the flysch units and igneous rocks, particularly the subvolcanic rocks, have undergone intense and widespread alteration. Phyllic alteration is mainly developed in the central parts, whereas argillic and propylitic alterations are distributed in the peripheral parts. Field investigations of the area and microscopic studies of collected samples from altered igneous rocks also confirm the extensive and intense development of phyllic and propylitic alterations, as well as the limited development of potassic alteration. These alterations predominantly correspond, respectively, to intermediate igneous rocks such as andesite, porphyritic diorite, and quartz monzonite. Although no clear evidence of mineralization was observed during field investigations, the alteration pattern of the area shows some similarities to alteration patterns observed in porphyry systems.

**Keywords:** Sistan Suture Zone, Asagi, Intermediate igneous rocks, ASTER, Porphyry mineralization

---

\*Email: Boomeri@science.usb.ac.ir  
Tel: +989151412239

## مقدمه

و طلای نوع پورفیری، اسکارن و اپی‌ترمال هستند (بومری، ۱۳۹۶). وجود دگرسانی‌های گسترده در محدوده مورد مطالعه ممکن است نشانه‌ای از وجود کانی‌سازی در اعماق باشد که با شناسایی و منطقه‌بندی دگرسانی و درک الگوی دگرسانی، شانس دستیابی به محل کانی‌سازی افزایش می‌یابد. هدف این مقاله بررسی انواع دگرسانی در جنوب مجموعه آذرین آساگی با استفاده از روش‌های دورسنجی است. پس از شناسایی انواع دگرسانی، صحت آن‌ها از طریق مطالعات میدانی و آزمایشگاهی کنترل شده است.

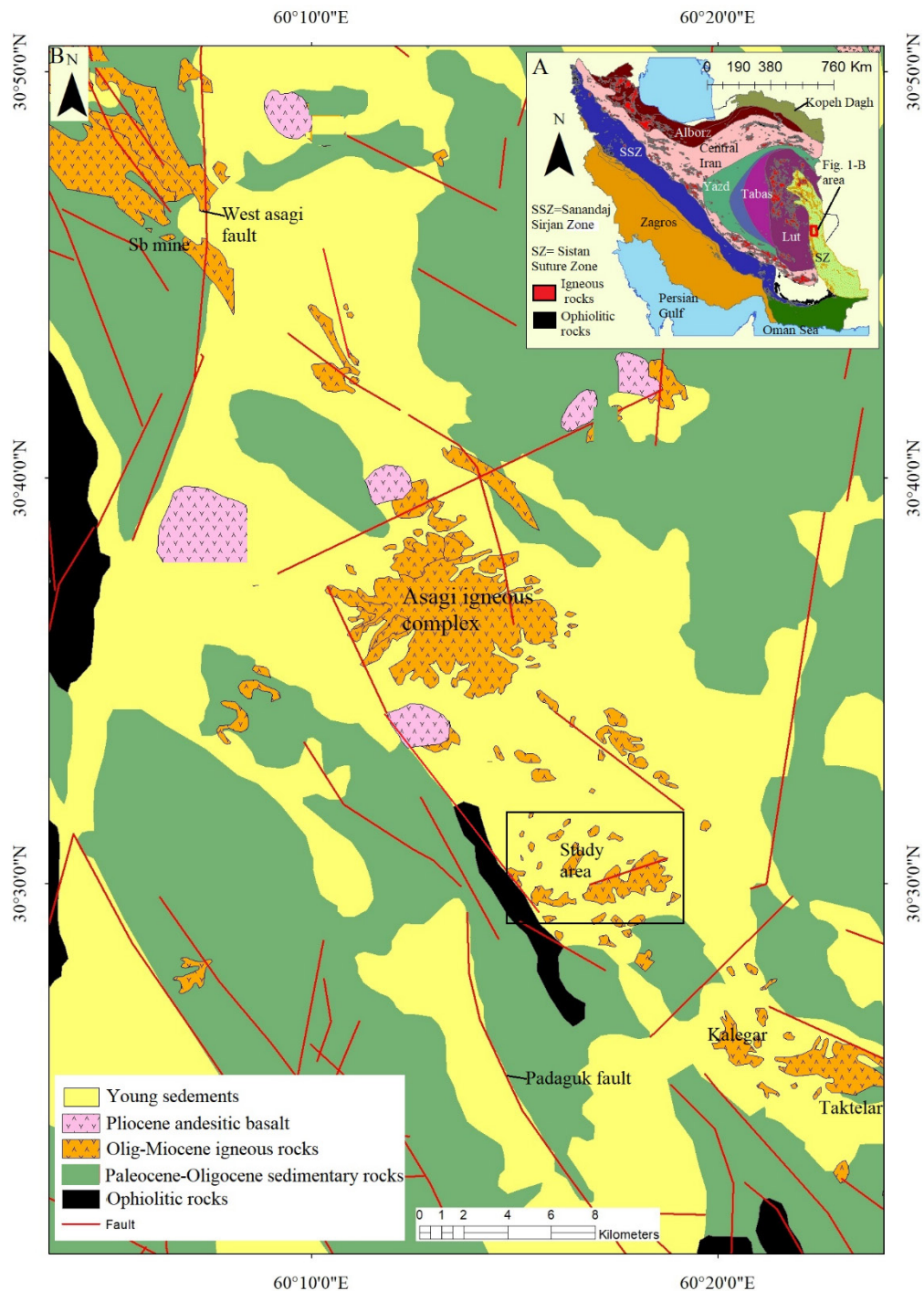
## زمین‌شناسی ناحیه ای

محدوده مورد مطالعه در پهنه زمین درز سیستان واقع شده است (شکل ۱-۱). پهنه زمین درز سیستان محل اقیانوس نئوتیتیس به موازات مرز شرقی ایران امروز بوده است که بین دو بلوک لوت در غرب و افغان در شرق واقع شده است و بیشتر شامل توالی افیولیتی کرتاسه، توالی سنگ‌های رسوبی رخساره فلیش کرتاسه بالایی و ائوسن و مولاس یا کنگلومراهای الیگوسن می‌باشد (Tirrul et al., 1983). (شکل ۱-۲). توالی فلیش شامل سنگ‌های تخریبی آواری و سنگ آهک‌های مربوط به آب‌های کم عمق تا عمیق با ضخامت زیاد شکل گرفته اند (Tirrul et al., 1983). توالی افیولیتی و توالی فلیش توسط سنگ‌های آذرین درونی و ساب ولکانیک قطع شده و توسط سنگ‌های بولکانیک اسیدی تا بازیک سنوزوئیک پوشیده شدند که نشان دهنده فازهای ماگمایی متعددی در طول دوران سنوزوئیک می‌باشند (Camp and Griffis, 1982; Mohammadi et al., 2020; Nazari et al., 2022).

## زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

در محدوده مورد مطالعه، برونزدهای کوچکی از توالی افیولیتی کرتاسه و توالی فلیش ائوسن مشاهده می‌شوند. سنگ‌های توالی افیولیتی شامل بازالت و هارزبورژیت‌های لیستونیت شده هستند که در برونزدها دارای رنگ‌های قرمز، قهوه‌ای و کرم رنگ می‌باشند. توالی فلیش بیشتر شامل شیل‌های مدادی سبز رنگ، کرم، زرد و قهوه‌ای با میان‌لایه‌هایی از مادستون

دگرسانی به تغییرات کانی‌شناسی، شیمیایی و بافتی سنگ‌ها گفته می‌شود که به وسیله محلول‌های گرمابی ایجاد می‌شود. اصولاً احتمال کانی‌سازیدر مناطق دگرسان شده بیشتر است و کانسارهای مهمی مثل کانسارهای پورفیری، مسیو سولفید، اسکارن، و اپی‌ترمال دارای هاله‌های دگرسانی نسبتاً گسترده‌ای هستند (Pirajno, 1999). شناسایی این هاله‌ها شانس شناسایی این کانسارها را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. دگرسانی‌ها رایج همراه با انواع کانسارهای فلزی شامل دگرسانی‌های آرژلیک، پروپیلیتیک، فلیک، پتاسیک، سیلیکاتی، سیلیسی و کربناتی هستند. استفاده از تصاویر و اطلاعات ماهواره‌ای در به‌روزرسانی نقشه‌های زمین‌شناسی، بهبود کیفیت نقشه‌ها و تهیه نقشه‌های موضوعی مانند واحدهای سنگی، مناطق دگرسانی، خطواره‌ها، الگوهای شکستگی، تهیه نقشه پتانسیل معدنی یک منطقه، و غیره بسیار موثر بوده و از نظر زمان و هزینه نیز بسیار مقرون به صرفه است. داده‌های چندطیفی و ابرطیفی و روش‌های مختلف پردازش طیفی، از جمله ترکیب باندی و نسبت‌های باندی، قابلیت مناسبی برای شناسایی کانی‌ها و پهنه‌های دگرسانی دارند (Lillesand and Keifer, 1987; Gupta, 1991; Mauger et al., 2007; Pour et al., 2023; Yao et al., 2023; Shebl et al., 2023). مجموعه آذرین آساگی در ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب شهر زاهدان واقع است. این مجموعه بخشی از یک کمربند ماگمایی با روند شمال غرب-جنوب شرق است که از جنوب شرق به سنگ‌های آذرین کله‌گر، تک‌تلار، چاهک، صاحب‌داد، ملک‌سیاه و کوه‌لار و از شمال غرب به سنگ‌های آذرین آب‌دوزک تا حیدرآباد منتهی می‌شود (Camp and Griffis, 1982). پیری، ۱۳۹۶، غفران ملا، ۱۳۹۶، بومری و همکاران، ۱۳۹۹، ۱۴۰۱ الف، (Moradi et al., 2016; Nazari et al. 2022). مورد مطالعه در ۱۰ کیلومتری جنوب مجموعه آذرین آساگی قرار دارد. سنگ‌های آذرین در این مناطق به شدت دگرسان شده‌اند. مجموعه‌های آذرین آساگی، سیاستراگی، کله‌گر، تک‌تلار و چاهک که در نزدیکی این محدوده قرار دارند، میزبان کانی‌سازی‌های مس



شکل ۱. A. نقشه پهنه‌های زمین‌شناسی و ساختاری ایران و موقعیت پهنه زمین‌درز سیستان (با تغییراتی از آقانا‌بی، ۱۳۸۳)؛ B. نقشه زمین‌شناسی ساده شده بخشی از شمال پهنه زمین‌درز سیستان (کادر قرمز در شکل ۱-A)، (Modified from Aghanabati, 1991a).

است (Aghanabati, 1991b; Valeh and Saidi, 1989). واحدها در شکل ۲ بیشتر بر اساس سن نسبی و روابط زمین‌شناسی از قدیم به جدید مرتب شدند. مجموعه آذرین به صورت تپه‌ماهوری و کوه‌هایی با اشکال مخروطی، گنبدی و استوک برونزد دارند و از لحاظ سنگ‌نگاری دارای تنوع زیادی بوده و شامل واحدهای

می‌باشند که در مجاورت با سنگ‌های آذرین، شدیداً متحمل دگرسانی شده‌اند. فراوانترین سنگها در محدوده مورد مطالعه سنگ‌های آذرین خروجی و نیمه‌خروجی و دایک‌هایی با سن الیگوسن می‌باشند (شکل ۲). سن واحدهای سنگی بر اساس نقشه‌های زمین‌شناسی یک صد هزار کوه سیاستراگی و چهل کوره

گنبد‌های آتشفشانی آندزیتی دیده می‌شود و در بیشتر برونزدها دارای رنگ سفید است. این رنگ ممکن است به دلیل دگرسانی و گسترش کانی‌های رسی در آن‌ها باشد. آثار کانی‌زایی در برونزدهای این واحد دیده نمی‌شود.

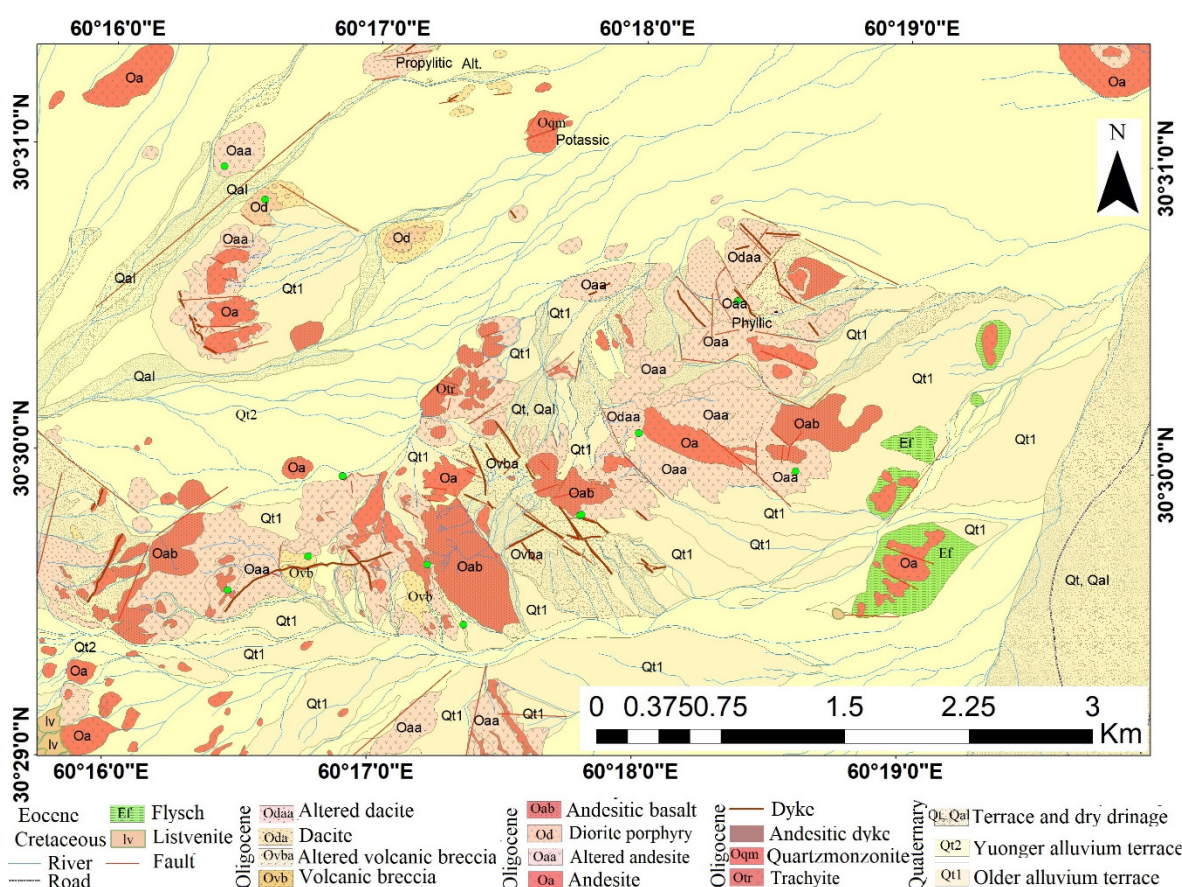
واحد بازالت آندزیتی در بخش شمال‌غربی و غرب محدوده، به صورت نواری ناپیوسته برونزد دارد. این واحد سنگی اغلب به صورت تپه‌های کم‌ارتفاع دیده می‌شود. بر روی اغلب برونزدهای دگرسان‌شده، گدازه‌های سیاه‌رنگ بازالت آندزیتی به صورت کلاهک دیده می‌شوند. این گدازه‌ها دارای بافت پورفیری هستند.

واحد تراکیتی به صورت برونزدهای کوچکی، بیشتر در بخش مرکزی محدوده مورد مطالعه، دیده می‌شود و دارای رنگ خاکستری تیره است. واحد

آندزیت، داسیت، بازالت آندزیتی، تراکیت، شوشونیت، آذرآواری، برش ولکانیکی، دیوریت پورفیری و کوارتز مونزونیت پورفیری هستند. مجموعه سنگ‌های آذرین مورد مطالعه، مرتبط با ماگماهای کالک‌آلکالن پتاسیم بالا، شوشونیتی و آداکیتی و جایگاه تکتونیکي پس‌برخوردی هستند (بامری و همکاران، ۱۴۰۴).

مجموعه آذرین و سنگ‌های میزبان آن در محدوده مورد مطالعه، به شدت و به طور گسترده دچار دگرسانی شده‌اند (شکل ۳-A و B). آندزیت گسترده‌ترین واحد آذرین در محدوده مورد مطالعه است که به شکل مخروط‌های شاخص دیده می‌شود. واحد داسیت نیز گسترش زیادی در محدوده مورد مطالعه دارد. مورفولوژی این واحد به صورت تپه‌ماهوری و به شدت دگرسان‌شده است.

واحد آذرآواری در زیر برخی از مخروط‌ها یا



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی-دگرسانی محدوده مطالعاتی که بر مبنای تصاویر ماهواره ای ساس پلانت و مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی ترسیم شده است. دایره های کوچک سبز رنگ محل نمونه های مورد بررسی است.



دیوریت پورفیری از لحاظ بافتی شبیه به آندزیت است و دارای رگچه‌های استوک‌ورکی کوارتز است. واحد کوارتز مونزونیت پورفیری در بخش شمالی محدوده، به صورت یک تپه کوچک برونزد دارد که به دلیل دگرسانی، دارای رنگ‌های زرد و صورتی است.

نهشته‌های آبرفتی کواترنری در بخش‌هایی از حاشیه رودخانه‌ها و آبراهه‌ها مشاهده می‌شوند و دارای پراکنش وسیعی در محدوده مطالعاتی هستند. این نهشته‌ها شامل تپه‌های ماسه‌ای، دشت رسی، رسوبات آبرفتی جوان، بادبزنی‌های گراولی، تراس‌های قدیمی (Qt1) و تراس‌های جوان (Qt2) هستند. دشت‌های آبرفتی به وسیله آبراهه‌های خشک متعددی بریده شده‌اند.

### زمین‌شناسی ساختاری

شاخه‌هایی از گسل نه شرقی، از جمله گسل‌های غرب آساگی و پداگوگ، در بخش‌های شمال‌غربی و غرب محدوده قرار گرفته‌اند (شکل ۱-B) و ادامه شاخه‌های گسل بز نیز در بخش‌های شمال‌شرقی و شرقی محدوده مشاهده می‌شود. از ویژگی‌های اصلی این گسل‌ها می‌توان به حرکات امتدادلغز همراه با مؤلفه قائم اشاره کرد (Bagheri and Dam-ani Gol, 2022). گسل‌ها و مجموعه درزه‌های موجود در محدوده نیز، به احتمال زیاد، با شاخه‌های فرعی این سامانه‌های گسلی مرتبط بوده ولی از نظر سنی جوان‌تر هستند.

در شمال‌غرب محدوده، در حوالی معادن آنتیموان سفیدآبه و حیدرآباد، در حدفاصل گسل نه غربی در غرب و گسل غرب آساگی در شرق، ساختارهای دوپلکس امتدادلغز فشارشی راست‌بر شکل گرفته‌اند. مرزهای این ساختارهای دوپلکس عمدتاً توسط گسل‌هایی با مؤلفه راست‌لغز قابل توجه مشخص می‌شوند که تقریباً به صورت موازی و با روند شمالی-جنوبی گسترش یافته‌اند. گسل‌های فرعی با روند شمال‌غربی نیز در میان این گسل‌ها توسعه یافته و قطعاتی با هندسه تقریباً متوازی‌الاضلاع را در ساختار دوپلکس ایجاد کرده‌اند (بومری و همکاران، ۱۴۰۱؛

کوهساری و همکاران، ۱۴۰۳). در این منطقه، گسل‌های فرعی مزدوج ریدل با روند تقریبی شرقی-غربی و جابه‌جایی محدود چپ‌بر نیز مشاهده می‌شوند که اغلب دارای مؤلفه شیب‌لغز نرمال هستند.

رخمون‌های سنگ‌های آذرین در به ویژه دای‌ک‌ها عمدتاً در امتداد گسل‌هایی با روند شمال-شمال‌غربی و مرتبط با نسل دوم ساختارها قرار گرفته‌اند که گسل‌های اصلی را قطع می‌کنند. این ارتباط فضایی می‌تواند بیانگر نقش ساختارهای گسلی در کنترل مسیر صعود و جایگیری ماگما باشد (پیری، ۱۳۹۶). در محدوده مورد مطالعه، می‌توان فرض کرد که گسل‌های اصلی امتدادلغز در ایجاد نواحی کششی و توسعه گسل‌های نرمال و برشی نسل دوم نقش داشته‌اند. گسل‌های فرعی نسل دوم نیز در حدفاصل گسل‌های اصلی و احتمالاً در ارتباط با حرکات چپ‌بر توسعه یافته‌اند. این گسل‌ها احتمالاً در کنترل نفوذ دایک‌ها و استوک‌ها نقش داشته‌اند. همچنین، به نظر می‌رسد سیالات گرمایی با استفاده از این شبکه شکستگی‌ها در دگرسانی سنگ‌ها و توسعه ریزاستوک‌ورک‌ها نقش داشته‌اند. ارتباط فضایی میان سنگ‌های آذرین، گسل‌ها و دگرسانی نشان می‌دهد که شدت دگرسانی در مجاورت گسل‌ها، پهنه‌های خردشده و شبکه شکستگی‌ها افزایش یافته است. در مناطقی که تراکم شکستگی‌ها افزایش یافته، همپوشانی مسیرهای عبور سیالات توانسته موجب توسعه دگرسانی شدیدتر شود.

شکستگی‌ها و گسل‌های مرحله سوم در حدفاصل گسل‌های مرحله دوم توسعه یافته‌اند و از نظر هندسی و نحوه شکل‌گیری، احتمالاً مشابه ساختارهای نسل دوم هستند. این ساختارها موجب ایجاد شبکه‌ای متراکم از شکستگی‌ها و ریزگسل‌ها در بخش وسیعی از سنگ‌های منطقه، از جمله استوک‌ها و دایک‌ها، شده‌اند (شکل‌های ۳-C و ۳-D). جوان‌ترین گسل‌ها نیز توسط رگه‌های کربناته و لیمونیتی پر شده‌اند (شکل ۳-B).

در پهنه زمین درز و در محدوده مطالعاتی، بیشتر گسل‌های بزرگ قابل تشخیص، دارای روند شمال‌غربی-جنوب‌شرقی هستند، هرچند گسل‌هایی

16) نصب شده بر روی ماهواره ترا استفاده شده است. این سنجنده اطلاعات طیفی منابع زمینی را در سه گروه و ۱۴ باند مجزا، سه باند در محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) (۸۶۰ - ۵۲۰ نانومتر) با تفکیک مکانی ۱۵ متر، شش باند در محدوده فروسرخ موج کوتاه (SWIR) (۲۴۳۰ - ۱۶۰۰ نانومتر) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده فروسرخ گرمایی (TIR) (۱۱۶۵۰ - ۵۱۲۵ نانومتر) با تفکیک مکانی ۹۰ متر، در اختیار کاربران قرار می‌دهد (Hook and Ramachan-dran 2002). تصویرسنجنده استر (ASTER) استفاده شده از لحاظ سطح پردازش‌های اعمال شده در سطح L1T قرار دارد. همه تصاویر با سیستم مختصات UTM (WGS84) 41N زمین مرجع شده است. قبل از پردازش تصاویر، اقدام به انجام تصحیحات رادیومتریک و سپس تصحیحات اتمسفریک بر روی آنها گردید پردازش‌های طیفی در نرم‌افزار ENVI 5.6 انجام شده است. نهایتاً برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از مطالعات دورسنجی، تعدادی نمونه از پرونده‌های پهنه‌های دگرسان شده برداشت شده که محل بعضی از آنها، در نقشه‌های ارائه شده در این مقاله با ثبت نوع دگرسانی، با دایره‌های توپر کوچک نشان داده شده است. از این نمونه‌ها تعدادی مقطع نازک نیز تهیه و با میکروسکوپ پلاریزان در دانشگاه سیستان و بلوچستان مطالعه شدند. روش بررسی توزیع گسل‌ها و شکستگی‌ها (خطواره‌ها) در بخش مربوطه شرح داده شده است.

### پردازش تصاویر ماهواره

تکنیک‌های مختلفی برای تفسیر و پردازش تصاویری ماهواره جهت شناخت واحدهای سنگی و مناطق دگرسان شده وجود دارد. در این مقاله از روش‌های ترکیب رنگی باندها و نسبت باندیاستفاده شده است.

### ترکیب رنگی باندها

ترکیب رنگی باندها یکی از روش‌های متداول در سنجش از دور است که برای تفکیک نسبی واحدهای سنگی و شناسایی نواحی دارای ویژگی‌های طیفی متفاوت، از جمله پهنه‌های دگرسان‌شده، مورد استفاده

با روندهای شمال شرقی-جنوب غربی، شمالی-جنوبی و شرقی-غربی نیز مشاهده می‌شوند (شکل B-۱ و شکل ۲). در محدوده مطالعاتی، بخشی از این گسل‌ها به وسیله آبرفت‌ها پوشیده شده‌اند و در نتیجه، تداوم آن‌ها در سطح زمین قابل ردیابی نیست. پرونده‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه به شدت خرد شده و دگرسان شده‌اند و شکستگی‌ها و ریز گسل‌های داریستی به طور گسترده در آن‌ها توسعه یافته‌اند (شکل‌های C-۳ و D-۳).

در مجموع، آرایش گسل‌های اصلی و فرعی، تغییرات روندی و وجود گسل‌های دارای مؤلفه‌های امتداد لغز و شیب لغز، نشان‌دهنده پیچیدگی ساختاری محدوده است. به نظر می‌رسد فعالیت گسل‌ها در مراحل مختلف تکامل منطقه، علاوه بر ایجاد و توسعه پهنه‌های شکستگی و نواحی کششی، در کنترل جایگیری سنگ‌های آذرین و، در مراحل پایانی، در انتقال و گردش سیالات گرمایی و توسعه دگرسانی نیز نقش داشته است.

الگوی پراکندگی دگرسانی در محدوده مورد مطالعه نشان‌دهنده ارتباط نزدیک آن با ساختارهای گسلی و شبکه شکستگی‌هاست. دگرسانی شدید عمدتاً در مجاورت پهنه‌های گسله و مناطق دارای تراکم بالای شکستگی مشاهده می‌شود. گسل‌های جوان‌تر و شاخه‌های فرعی گسل‌های اصلی، با ایجاد پهنه‌های خرد شده و افزایش نفوذپذیری سنگ‌ها، مسیرهای مناسبی برای انتقال و تمرکز سیالات گرمایی فراهم کرده‌اند. توسعه رگه‌ها و رگچه‌های گرمایی در امتداد این ساختارها نیز بر نقش کنترل‌کننده شکستگی‌ها در گردش سیالات تأکید دارد. از این رو، به نظر می‌رسد ساختارهای گسلی در مرحله پایانی تکامل منطقه، نقش مهمی در کنترل مسیر حرکت سیالات گرمایی و توزیع دگرسانی داشته‌اند.»

### روش مطالعه

در اینجا از داده‌های سنجنده استر ASTER\_ASTER\_L1T\_00306222000070512\_20150409215259\_296



شکل ۳. تصاویر صحرایی از گسترش گسل ها و شکستگی ها در محدوده مورد مطالعه؛ (A) برونزدهای خردشده و دگرسان شده؛ (B) رگه کلسیتی-لیمونیتی قطع کننده سنگ های دگرسان شده؛ (C) شکستگی های داریستی که گاهی توسط میکرو رگچه های سیلیسی پر شده اند؛ (D) سبک خردشدگی در بیشتر برونزدهای آذرین محدوده مورد مطالعه.

طیفی مرتبط با برخی کانی های رسی و میکایی، از جمله کائولینیت و سریسیت، باند ۴ به به ویژگی های طیفی مرتبط با برخی کانی های شاخص دگرسانی پتاسیک (بیوتیت و مگنتیت)، و باند ۸ به ویژگی های طیفی برخی کانی های شاخص دگرسانی پروپیلیتیک، از جمله کلریت و اپیدوت، حساسیت بیشتری نشان می دهد. بر این اساس، در تصویر حاصل، برخی نواحی با ویژگی های طیفی متناظر با دگرسانی های آرژلیک و فلیک، به صورت تهرنگ های صورتی تا

قرار می گیرد. در این مطالعه، به منظور دستیابی به دید کلی از زمین شناسی محدوده و شناسایی اولیه نواحی دارای پاسخ های طیفی متفاوت، از ترکیب رنگی کاذب استفاده شده است. از ترکیب RGB = 4-6-8 نسبتاً جواب بهتر دریافت شد. (شکل ۳). در این ترکیب، باندهای SWIR شماره ۴، ۶ و ۸ به گونه ای انتخاب شده اند که تفاوت پاسخ طیفی برخی کانی ها و مجموعه های کانی شناسی مرتبط با دگرسانی های گرمابی را بهتر نمایان کنند. باند ۶ به ویژگی های

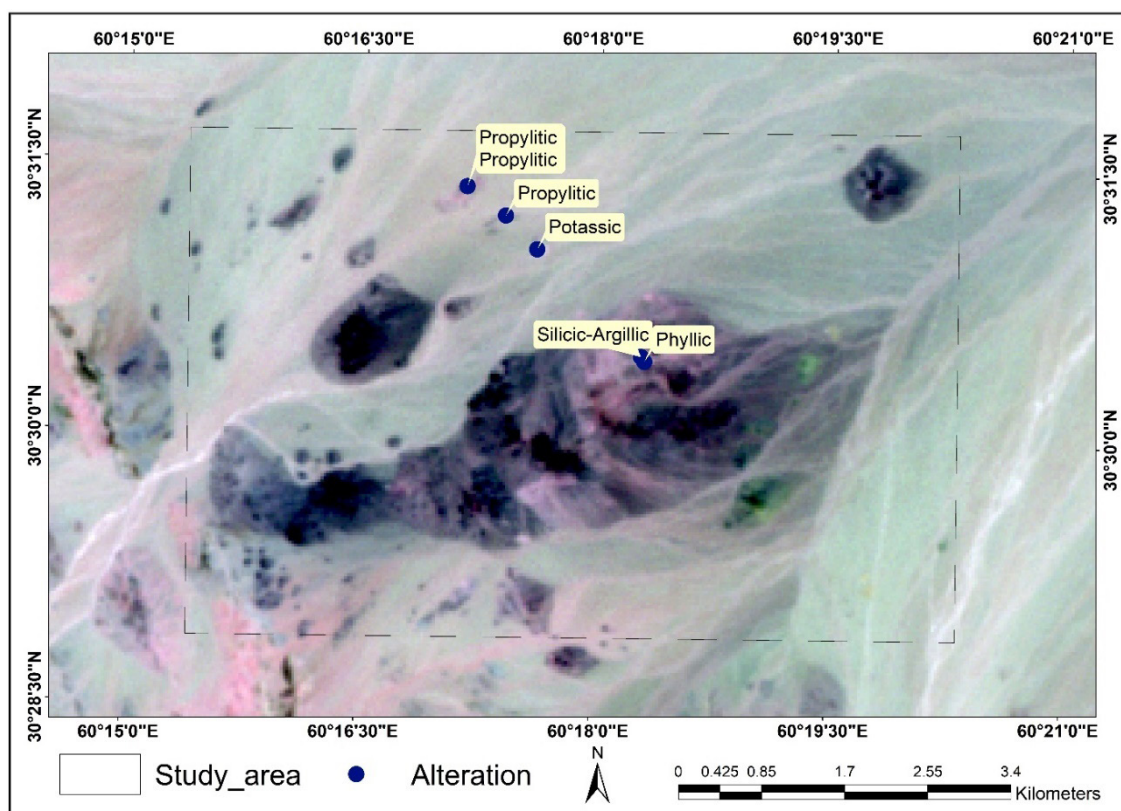
### نسبت بان‌دیو ترکیب آنها

قابلیت بالای نسبت‌گیری بان‌دی در شناسایی خواص طیفی مختلف و میزان تفاوت آنها با یکدیگر و حذف یا کاهش اثرات نامطلوب ناشی از تغییرات نوردهی، مثل اثر توپوگرافی یا تاثیر نور خورشید، این روش را مورد توجه قرار داده است (Rouskov et al., 2005).

نسبت‌گیری بان‌دی یک روش ریاضی مبتنی بر خواص طیفی پدیده‌های مختلف موجود در سطح زمینی می‌باشد (Kruse et al., 1993; Gabr et al., 2010). نسبت بان‌دی به سادگی با تقسیم DN هر پیکسل در یک بان‌د به پیکسل مشابه در بان‌د دیگر ساخته می‌شود (Rowan et al., 1977). از جمله مزیت‌های این فرایند، انتقال ویژگی‌های رنگی یا طیفی پدیده‌ها بدون توجه به تغییرات توپوگرافی و شرایط جوی است (Rouskov et al., 2005). این روش با این نحوه انتخاب، باعث بازسازی ترکیبات ژئوشیمیایی مواد زمینی در تصویر نهایی می‌شود، در

قرمز، و بخش‌هایی با پاسخ طیفی متناظر با دگرسانی پروپلیتیک و برخی واحدهای کربناته، به رنگ‌های سبز تا خاکستری مشاهده می‌شوند. همچنین، برخی نواحی تیره‌رنگ در این ترکیب بان‌دی در ارتباط با برونزدهای سنگ‌های آذرین دگرسان نشده قرار دارند (شکل ۴).

تفسیر اولیه تصویر RGB=4-6-8 نشان می‌دهد که در بخش مرکزی محدوده، به‌ویژه در پهنه‌های دارای برونزد سنگ‌های آذرین حدواسط تا اسیدی، پاسخ‌های طیفی متفاوتی مشاهده می‌شود که می‌تواند با حضور و گسترش پهنه‌های دگرسانی شامل فلیک، آرژیلیک و پتاسیک مرتبط باشد. در بخش شمالی محدوده نیز پاسخ‌های طیفی متناظر با دگرسانی پروپلیتیک و در بخش شرقی، علاوه بر برونزدهای شیلی و کربناته، نواحی کوچکی با پاسخ طیفی متناظر با دگرسانی آرژیلیک مشاهده می‌شود.



شکل ۴. تصویر کاذب‌رنگی حاصل از ترکیب بان‌دهای سنجنده استر (RGB: 4-6-8) برای شناسایی پهنه‌های دگرسانی. مناطق دارای رنگ صورتی در سنگ‌های آذرین، نشان‌دهنده شدت بیشتر دگرسانی هستند. رنگ صورتی در سنگ‌های رسوبی بخش غربی محدوده نیز به دلیل وجود کانی‌های رسی ایجاد شده است. نمونه‌های مورد مطالعه برای بررسی میکروسکوپی با دایره‌های توپر آبی مشخص شده‌اند و نوع دگرسانی آن‌ها نیز ثبت شده است.

گرفته‌اند، نسبت به سنگ‌های سالم پاسخ طیفی روشن‌تری داشته و به‌صورت ترکیبی از رنگ‌های بنفش، زرد و سبز ظاهر می‌شوند.

مناطق آبرفتی در تصویر پردازش‌شده عمدتاً با رنگ‌های سبز روشن تا زرد و آبراهه‌ها با رنگ‌های بنفش متمایز شده‌اند. بنابراین، ترکیب نسبت‌های باندی مورد استفاده، امکان تفکیک نسبی واحدهای سنگی، آبرفتی و نواحی دارای پاسخ طیفی متفاوت را فراهم کرده است.

### شناسایی منطقه دگرسانی فیلیک

به‌منظور شناسایی مناطق دارای دگرسانی فیلیک در سنگ‌های آذرین، از نسبت باندی  $(b5+b7)/b6$  (سنجده استر استفاده شده است (Rowan et al., 2006).

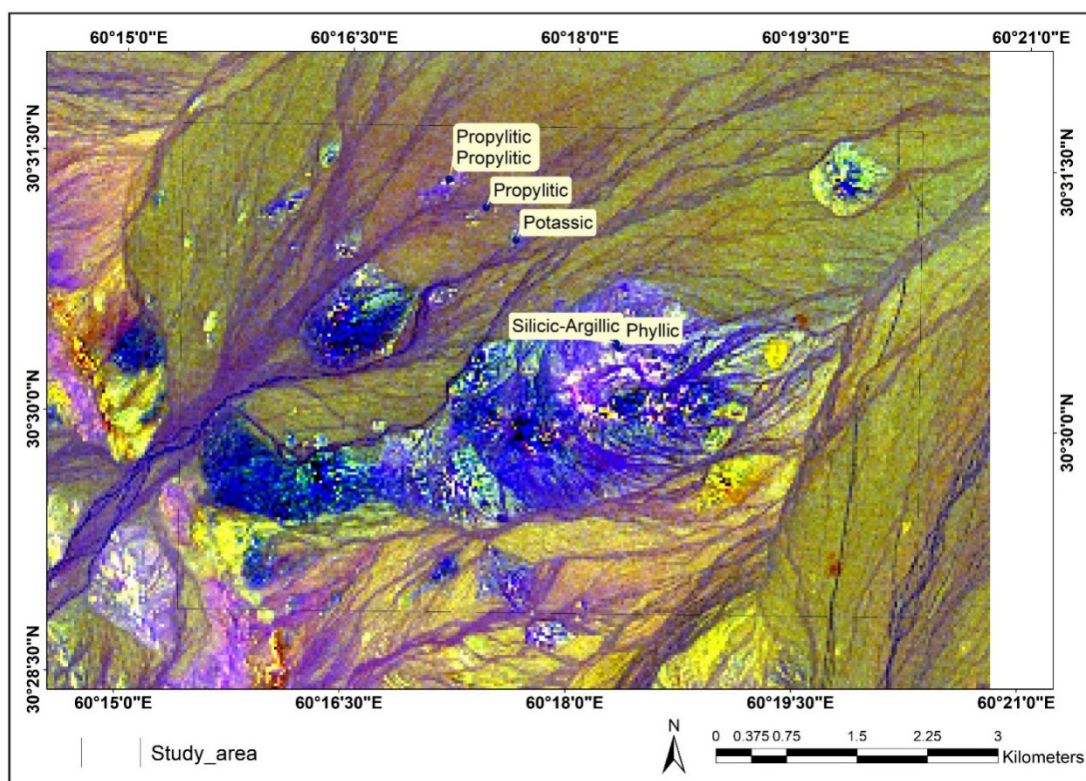
با توجه به حضور کانی سریسیت در دگرسانی فیلیک و ویژگی طیفی آن، به‌طوری‌که بیشترین بازتاب در باندهای ۵ و ۷ و بیشترین جذب در باند ۶ مشاهده می‌شود، این ترکیب باندی می‌تواند برای شناسایی این نوع

حالیکه اثر اندازه دانه، شیب توپوگرافی، موقعیت منطقه و جو پوشانده می‌شود (Yamaguchi et al., 1988).

### شناسایی واحدهای سنگی

به‌منظور شناسایی واحدهای سنگی، از ترکیب نسبت‌های باندی  $(4/2, 8/2 و 7/6)$  سنجده AS-TER استفاده شد (شکل ۵). بر اساس نتایج حاصل از کنترل‌های صحرایی در محدوده مورد مطالعه، واحدهای سنگی مختلف در تصویر پردازش‌شده دارای ویژگی‌های طیفی متفاوتی هستند.

بر این اساس، واحدهای رسوبی شامل شیل، ماسه‌سنگ، سیلتستون و واحدهای لیستونیتی که عمدتاً در بخش غربی محدوده برونزد دارند، به دلیل ویژگی‌های طیفی مرتبط با حضور کانی‌های رسی و کربناته، عمدتاً با رنگ‌های صورتی تا بنفش، زرد و قرمز متمایز می‌شوند. در مقابل، برونزدهای سنگ‌های آذرین عمدتاً با رنگ آبی تیره مشخص هستند. بخش‌هایی از واحدهای آذرین که تحت تأثیر دگرسانی قرار



شکل ۵. تصویر ترکیب رنگی مجازی حاصل از نسبت باندی:  $6/2$  (آبی) -  $8/2$  (سبز) -  $4/2$  (قرمز) برای تفکیک واحدهای سنگی و دگرسان شده

باندی می‌تواند برای شناسایی مناطق دارای دگرسانی پروپلیتیک مناسب باشد (Mars and Rowan, 2006).

تصویر حاصل از اعمال این نسبت باندی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس ویژگی طیفی مورد انتظار، کانی‌های شاخص دگرسانی پروپلیتیک در این نسبت باندی به صورت پیکسل‌های روشن ظاهر می‌شوند (شکل ۷، چپ). همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، بخش عمده پیکسل‌های روشن در محدوده آبرفت‌های گسترش‌یافته قرار گرفته‌اند، درحالی‌که مناطق دارای برونزد سنگ‌های آذرین عمدتاً به رنگ تیره دیده می‌شوند. با این حال، در بخش‌هایی از حاشیه برونزدهای آذرین، پیکسل‌های روشن به صورت پراکنده مشاهده می‌شوند که می‌تواند بیانگر گسترش دگرسانی پروپلیتیک در این نواحی باشد.

نتایج مطالعات میکروسکوپی نمونه‌های برداشت‌شده نیز نشان می‌دهد که دگرسانی پروپلیتیک در سنگ‌های آذرین، به‌ویژه در بخش‌های حاشیه‌ای آن‌ها، گسترش بیشتری دارد. به‌منظور نمایش فضایی مناطق شناسایی‌شده، پیکسل‌های روشن تصویر رستری در محیط GIS استخراج و به داده‌های وکتوری تبدیل

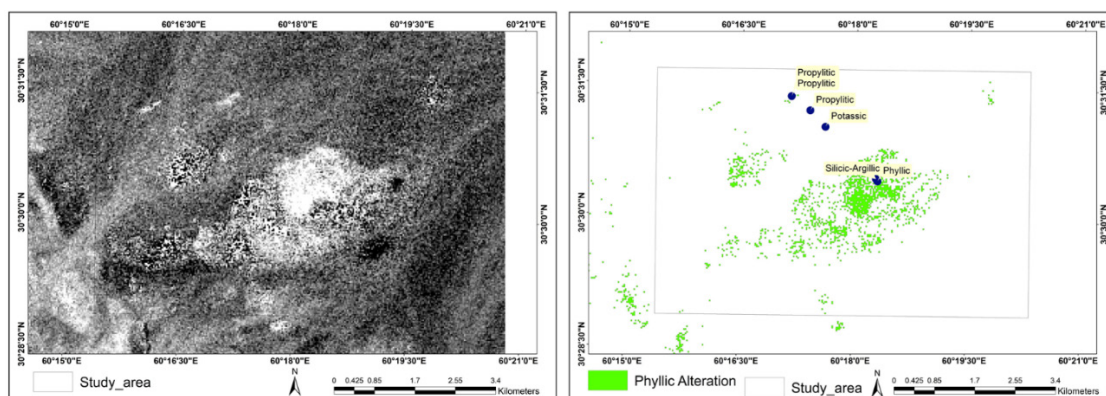
دگرسانی مناسب باشد. تصویر حاصل از پردازش این نسبت باندی در شکل ۶ نشان داده شده است.

در تصویر حاصل، پیکسل‌های روشن که با واحدهای سنگی آذرین منطبق هستند، به‌عنوان مناطق دارای دگرسانی فیلیک تفسیر شده‌اند (شکل ۶). در ادامه، پیکسل‌های روشن رستری با استفاده از نرم‌افزار GIS به داده‌های وکتوری تبدیل شده و با رنگ سبز نمایش داده شدند. تراکم بیشتر عوارض و نقاط سبز رنگ در برخی بخش‌ها نشان‌دهنده شدت و گسترش بیشتر دگرسانی فیلیک در سنگ‌های آذرین است. بنابراین، تمرکز لکه‌های سبز رنگ می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای تعیین مناطق مستعدتر از نظر شدت دگرسانی فیلیک مورد استفاده قرار گیرد.

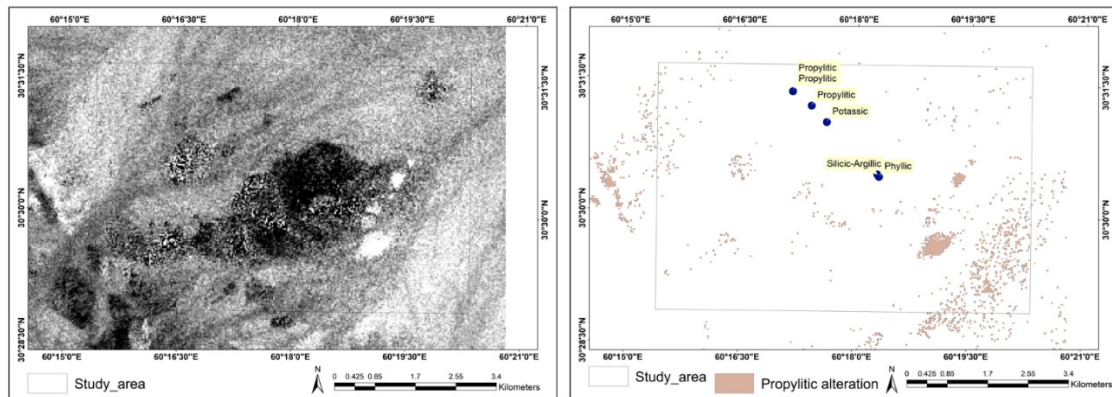
### شناسایی منطقه دگرسانی پروپلیتیک

به‌منظور شناسایی مناطق دارای دگرسانی پروپلیتیک، از نسبت باندی  $(b7+b8)/(b6+b9)$  سنجنده‌استر استفاده شد.

کانی‌های شاخص دگرسانی پروپلیتیک در باند ۶ دارای بازتاب نسبتاً بالایی هستند، در حالی که در باندهای ۷ و ۹ تغییر شیب و جابه‌جایی ناگهانی در ویژگی‌های جذبی آن‌ها مشاهده می‌شود؛ از این‌رو، این نسبت



شکل ۶. تصویر سمت راست حاصل از نسبت باندی  $b6/(b5+b7)$  سنجنده استر، با پیکسل‌های روشن متناظر با مناطق دارای B دگرسانی فیلیک، و نقشه سمت چپ، بارزسازی دگرسانی فیلیک را با رنگ سبز نشان می‌دهد. نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده محل نمونه‌برداری در محدوده مورد مطالعه هستند.



شکل ۷. تصویر مناطق دارای پروپیلیتیک و نقشه حاصل از بارزسازی آن با استفاده از روش نسبت بانندی داده‌های سنجنده استر. نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده محل نمونه‌برداری در محدوده مورد مطالعه هستند.

(al, 2006) (شکل ۸).

در شکل ۸ (چپ)، پیکسل‌های روشن نشان‌دهنده حضور کانی‌های رسی هستند. همان‌گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، در بخش‌هایی که سنگ‌های آذرین برونزد دارند و با رنگ‌های تیره‌تر مشخص شده‌اند، گسترش این کانی‌ها ناچیز است؛ در حالی که در محدوده‌های دارای رسوبات و سنگ‌های رسوبی، پیکسل‌های روشن با گسترش بیشتری مشاهده می‌شوند.

شکل ۸ (راست) تصویر حاصل از بارزسازی دگرسانی آرژیلیک را نشان می‌دهد. در این مرحله، پیکسل‌های روشن تصویر رستری با استفاده از GIS به داده‌های وکتوری تبدیل شده و محدوده‌های دارای غلظت بیشتر کانی‌های رسی با رنگ صورتی مشخص شده‌اند. بر اساس پراکنش این مناطق، کانی‌های رسی عمدتاً در واحدهای رسوبی واقع در بخش‌های جنوب‌غربی و غربی محدوده گسترش یافته‌اند. با این حال، این دگرسانی در بخش مرکزی محدوده، یعنی جایی که نمونه‌برداری نیز انجام شده است، گسترش قابل ملاحظه‌ای دارد.

در بخش مرکزی محدوده، برونزدهای سنگی از نوع سنگ‌های آذرین حدواسط هستند که به شدت دگرسان شده‌اند. بنابراین، برخلاف بخش‌های غربی و جنوب‌غربی که حضور کانی‌های رسی عمدتاً با واحدهای رسوبی ارتباط دارد، گسترش دگرسانی آرژیلیک در بخش مرکزی می‌تواند با دگرسان شدن شدید سنگ‌های آذرین حدواسط مرتبط باشد.

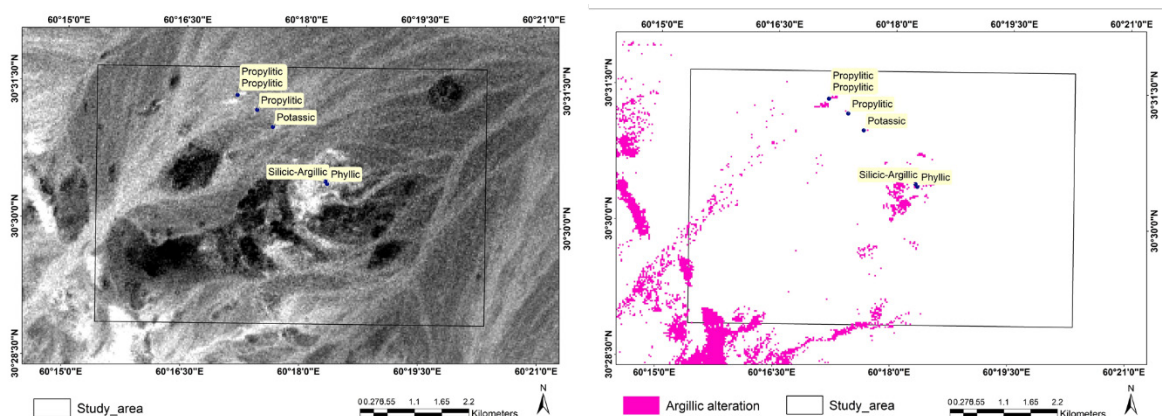
شدند و با رنگ قهوه‌ای نمایش داده شدند (شکل ۷، راست).

با مقایسه پراکنش عوارض قهوه‌ای حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای با نتایج مطالعات میکروسکوپی، مشخص شد که دگرسانی پروپیلیتیک در برخی بخش‌ها حتی در خارج از محدوده عوارض وکتوری شده نیز وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از نسبت بانندی مذکور، اگرچه در شناسایی برخی نواحی دارای دگرسانی پروپیلیتیک، به‌ویژه در حاشیه برونزدهای آذرین، مؤثر است، اما قادر به شناسایی تمام گستره این دگرسانی نیست.

### شناسایی منطقه دگرسانی آرژیلیک

دگرسانی آرژیلیک حاصل تغییرات سنگ‌ها در اثر دگرسانی و تأثیر محلول‌های گرمابی اسیدی است. کانی‌های شاخص این دگرسانی، کانی‌های رسی و کانی‌های ورقه‌ای کم‌دما هستند که در اثر فعالیت محلول‌های گرمابی، جایگزین کانی‌های اولیه سنگ می‌شوند. با توجه به حضور کانی‌های رسی اولیه در رسوبات و سنگ‌های رسوبی، شناسایی این نوع دگرسانی با استفاده از دورسنجی با دشواری همراه است و لازم است نتایج حاصل از پردازش داده‌های دورسنجی با مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی کنترل و تأیید شوند.

به‌منظور شناسایی دگرسانی آرژیلیک، به‌ویژه مجموعه کانی‌های کانولینیت، آلونیت و پیروفیلیت که از کانی‌های شاخص این نوع دگرسانی هستند، از ترکیب نسبت بانندی  $(b5)/(b4+b6)$  استفاده شده است (Rowan et



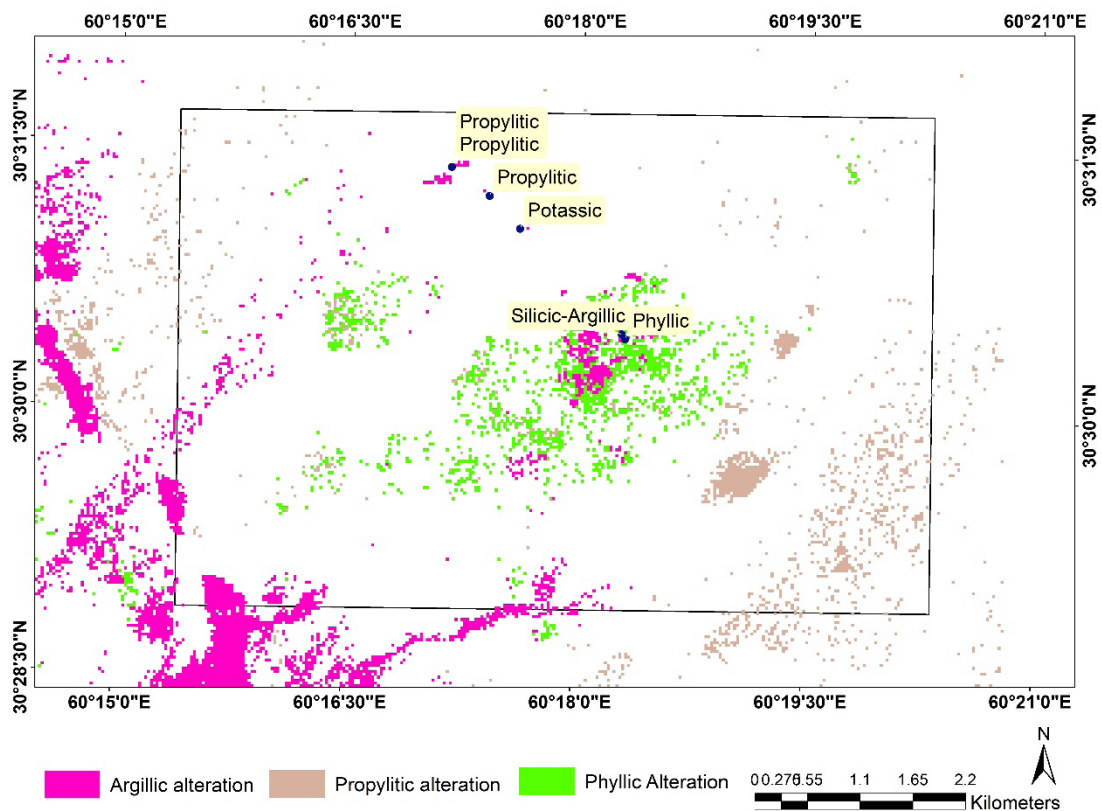
شکل ۸. تصویر مناطق دارای دگرسانی آرژیلیک و نقشه بارزسازی آن با استفاده از روش نسبت باندی (b5/b4+b6) سنجیده است. نقاط آبی رنگ نشان‌دهنده محل نمونه‌برداری در محدوده مورد مطالعه هستند.

نتایج حاصل از تفسیر سنجش از دور، به‌تنهایی مبنای تعیین نوع دگرسانی قرار نگرفته است؛ بلکه پهنه‌های شناسایی‌شده بر اساس پاسخ‌های طیفی با نتایج مشاهدات صحرایی، مطالعات پتروگرافی و میکروسکوپی و بررسی‌های آزمایشگاهی تطبیق داده شده‌اند. این تطبیق، به‌ویژه در بخش مرکزی محدوده، وجود و گسترش دگرسانی فیلیک و آرژیلیک در ارتباط با سنگ‌های آذرین را تأیید می‌کند. از این رو، تلفیق داده‌های سنجش از دور و شواهد زمینی امکان ترسیم الگوی فضایی دگرسانی‌ها و شناسایی پهنه‌های دارای بیشترین پتانسیل دگرسانی گرمابی را فراهم کرده است.

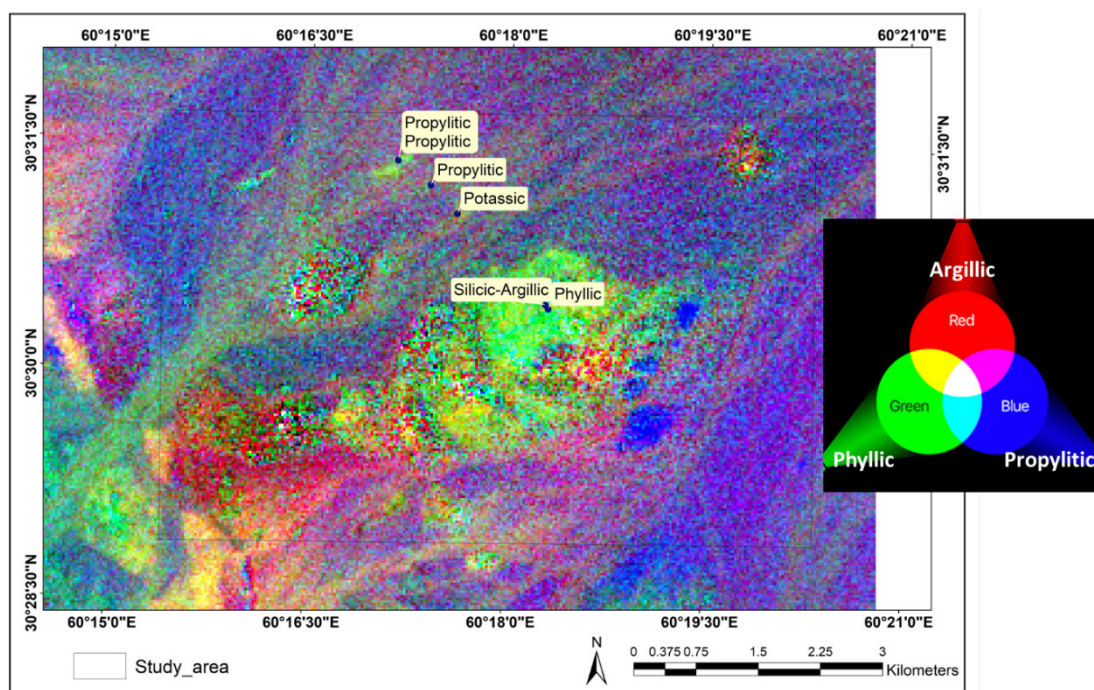
شکل ۱۰ حاصل تلفیق و پهنه‌بندی پاسخ‌های طیفی مرتبط با انواع دگرسانی در محدوده مورد مطالعه است. در این شکل، پهنه‌های دارای دگرسانی پروپیلیتیک با رنگ آبی، پهنه‌های دارای دگرسانی فیلیک با رنگ زرد و پهنه‌های دارای دگرسانی آرژیلیک با طیف رنگی زرد تا نارنجی و قرمز مشخص شده‌اند. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، دگرسانی فیلیک عمدتاً در بخش مرکزی محدوده و بر روی برونزدهای سنگ‌های آذرین گسترش یافته است، در حالی که دگرسانی آرژیلیک به‌صورت لکه‌ای و گسترده‌تر در بخش‌هایی از اطراف و در مجاورت پهنه فیلیک مشاهده می‌شود. دگرسانی پروپیلیتیک نیز عمدتاً در بخش‌های پیرامونی‌تر، به‌ویژه در حاشیه برونزدهای آذرین، توسعه یافته است.

شکل ۹ حاصل تلفیق نتایج پردازش‌های مختلف داده‌های سنجش از دور برای شناسایی و تفکیک پهنه‌های دگرسانی در محدوده مورد مطالعه است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، پهنه‌های دارای دگرسانی فیلیک با رنگ سبز عمدتاً در بخش مرکزی محدوده متمرکز شده‌اند و گسترش آن‌ها با برونزد سنگ‌های آذرین مرکزی همپوشانی فضایی قابل توجهی دارد. در داخل این پهنه، بخش‌هایی با رنگ سرخابی نیز مشاهده می‌شود که بیانگر حضور دگرسانی آرژیلیک در میان و در مجاورت پهنه فیلیک است. در قسمت پیرامونی و به‌ویژه در بخش‌های شرقی و شمالی، پراکندگی پهنه‌های قهوه‌ای رنگ متناظر با دگرسانی پروپیلیتیک بیشتر مشاهده می‌شود. همچنین، در بخش شمالی محدوده، برخی نقاط با دگرسانی‌های پروپیلیتیک و پتاسیک که در تفسیرهای قبلی مشخص شده‌اند، قابل تشخیص هستند.

از نظر فضایی، تمرکز دگرسانی فیلیک در بخش مرکزی و گسترش دگرسانی پروپیلیتیک در بخش‌های پیرامونی‌تر، همراه با حضور موضعی پهنه‌های آرژیلیک، الگویی از توزیع غیرهمگن و تا حدی زون‌بندی‌شده دگرسانی را نشان می‌دهد. با این حال، این الگو به‌صورت یک زون‌بندی کاملاً منظم و متحدالمرکز توسعه نیافته است و به‌نظر می‌رسد ساختارهای گسلی، شکستگی‌ها و هندسه برونزدهای آذرین نیز در کنترل پراکندگی پهنه‌های دگرسانی مؤثر بوده‌اند.



شکل ۹ نقشه بارزسازی پهنه‌های دارای دگرسانی آرژیلیک، فلیک و پروپلیتیک با استفاده از نسبت‌های باندی داده‌های سنجنده استر.



شکل ۱۰ ترکیب رنگی حاصل از بارزسازی پهنه‌های دگرسانی با استفاده از نسبت‌های باندی؛ قرمز: دگرسانی آرژیلیک، سبز: دگرسانی فلیک، آبی: دگرسانی پروپلیتیک، زرد: دگرسانی آرژیلیک و فلیک، فیروزه‌ای: دگرسانی فلیک و پروپلیتیک و ارغوانی: دگرسانی آرژیلیک و پروپلیتیک.

به منظور مطالعه دقیق‌تر روند این ساختارها، با استفاده از نرم افزار Arc GIS، این خطواره‌ها از هم تفکیک و سپس مختصات ابتدا و انتهای آنها استخراج گردید. سپس با استفاده از این اطلاعات آزمون آنها استخراج گردید. در ادامه رزیدیاگرام روند این خطواره‌ها استخراج و ترسیم گردید. بر این اساس، دو دسته خطواره با امتداد شمال غرب و شمال شرق در منطقه دیده می‌شود که دسته اولهم دارای تعداد فراوانتر (شکل ۱۲- A) و هم دارای طول بیشتری (شکل ۱۲- B) هستند.

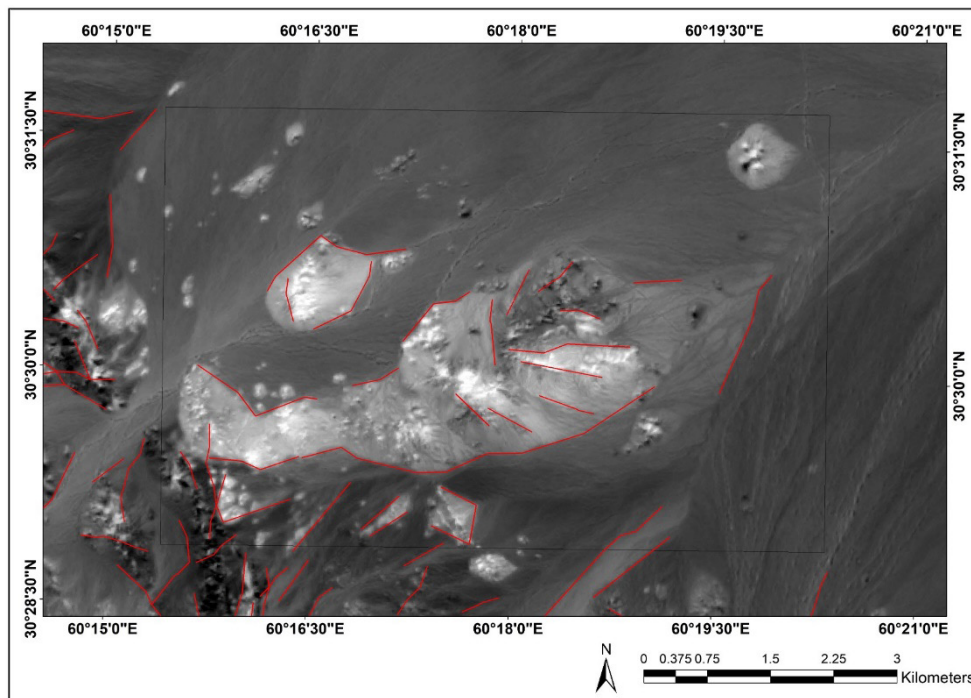
برای دید بهتر از وضعیت خطواره‌ها با استفاده از نرم افزار Arc Gis نقشه تراکم خطواره‌ها در منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل ۱۳). بر این اساس دو محدوده با تراکم بالا در مرکز و جنوب غرب مشاهده می‌شود. بیشترین تراکم در جنوب غرب محدوده مورد بررسی می‌باشد جایی که در غرب آن بیشتر سنگ‌های رسوبی و افولیت‌ها و در شرق آن سنگ‌های آذرین دگرسان شده الیگوسن برون زد دارند. در این دو محدوده شاهد تمرکز دگرسانی‌های مختلف هستیم که نشان دهنده احتمال تاثیر تمرکز شکستگی‌ها در توسعه دگرسانی‌ها می‌باشد (شکل های ۹ و ۱۰).

بررسی الگوی خطواره‌ها در این مطالعه عمدتاً با هدف شناسایی و تعیین روندهای غالب ساختاری و بررسی ارتباط فضایی آنها با رخنمون‌های آذرین و پهنه‌های دگرسانی انجام شده است. از آنجا که داده‌های حاصل از استخراج خودکار خطواره‌ها به تنهایی برای تعیین سازوکار حرکتی و سینماتیک گسل‌ها کافی نیستند، از رزیدیاگرام‌ها صرفاً برای تعیین جهت‌گیری و فراوانی نسبی مجموعه‌های خطواره‌ای استفاده شده و تفسیر سینماتیکی گسل‌ها بر اساس این داده‌ها انجام نشده است. ارتباط احتمالی این ساختارها با جایگیری سنگ‌های آذرین و کنترل مسیر گردش سیالات گرمابی نیز بر پایه همپوشانی فضایی، شواهد صحرایی و روابط زمین‌شناسی موجود ارزیابی شده است.

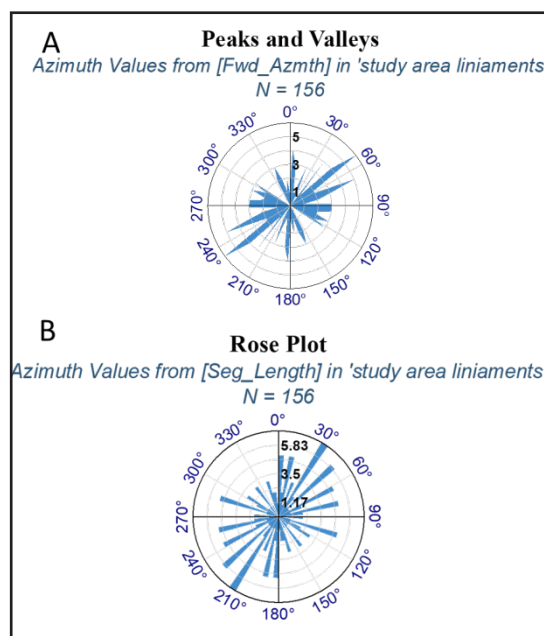
این آرایش فضایی نشان‌دهنده نوعی زون‌بندی نسبی دگرسانی است که در آن پهنه فلیک در بخش مرکزی، دگرسانی آرژیلیک در بخش‌های پیرامونی تر و دگرسانی پروپلیتیک در قسمت‌های خارجی تر تمرکز بیشتری دارد. با این حال، این زون‌بندی در همه بخش‌های محدوده کاملاً منظم و متحدالمرکز نیست و به نظر می‌رسد هندسه برونزدهای آذرین و شبکه گسل‌ها و شکستگی‌ها نیز در کنترل پراکندگی دگرسانی‌ها نقش داشته‌اند.

### توزیع گسل‌ها و شکستگی‌ها

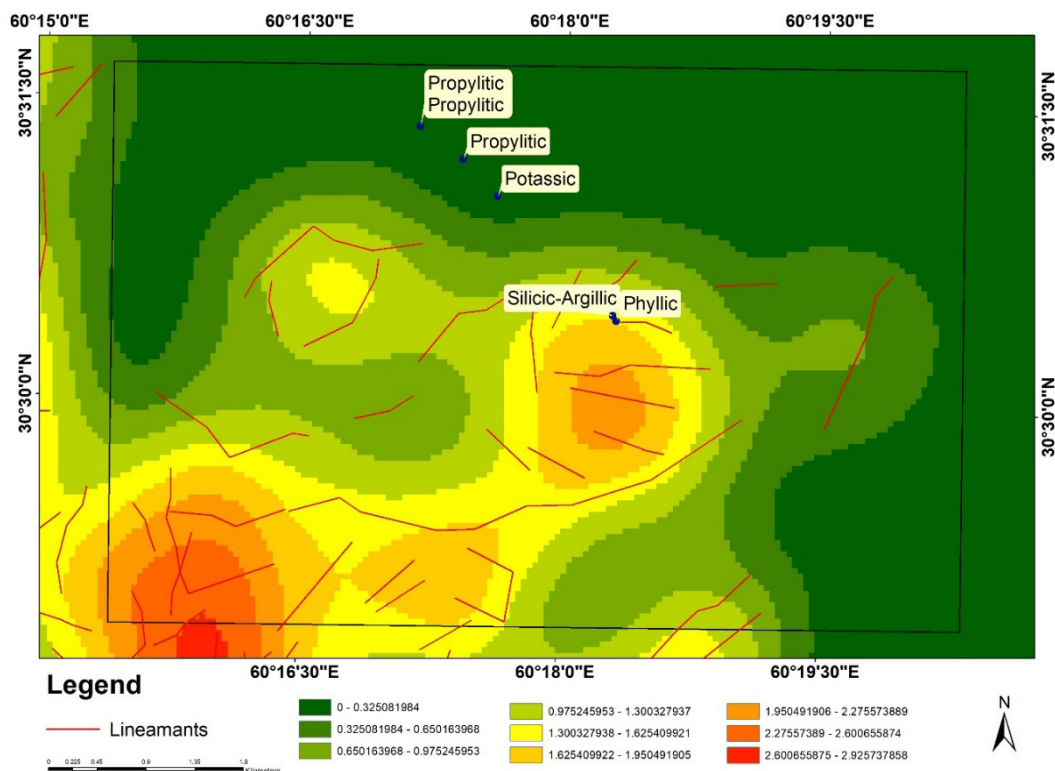
با توجه به اهمیت ساختارهای خطی و شکستگی‌ها در ایجاد نفوذپذیری و فراهم کردن مسیرهای مناسب برای گردش سیالات گرمابی، الگوی پراکندگی خطواره‌های محدوده مورد مطالعه با استفاده از داده‌های سنجنش از دور بررسی شد. بدین منظور از تصویر Lev-Collection 2، Landsat 8 OLI/TIRS با شناسه LC08\_L1TP\_158039\_20251126\_202\_02\_T1 استفاده شد. در ابتدا با استفاده از نرم افزار ENVI 5.6 بر روی مجموعه ۷ باندهای تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری اعمال شد. سپس با استفاده از دستور پان شارپینگ (pansharping) قدرت تفکیک مکانی به ۱۵ متر تنظیم شد. سپس به منظور استخراج یک تصویر رستری که دارای اطلاعات زیادی باشد با کمک الگوریتم انالیز مولفه اصلی (PCA) اطلاعات ۷ باند را به صورت متمرکز در یک باند متمرکز (PC1) و از این تصویر به عنوان تصویر مبنا جهت استخراج خطواره‌ها استفاده گردید. سپس با استفاده از نرم افزار PCI Geomatica 2017 از این تصویر خروجی استفاده شد و به صورت اتوماتیک با استفاده از الگوریتم‌های تشخیص لبه در زوایا و جهت‌های مختلف خطواره‌ها استخراج گردید. خطواره‌های ناشی از آبراهه‌ها حذف گردید و در نهایت نقشه خطواره‌های ناشی از گسل‌ها و شکستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه ترسیم گردید (شکل ۱۱). این شکل نشان می‌دهد که اغلب خطواره‌های گسلی دارای روند شمال غرب-جنوب شرق و شمال شرق-جنوب غرب یا به صورت متقاطع می‌باشند.



شکل ۱۱. تصویر مؤلفه اصلی اول (PC1) حاصل از اجرای روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر روی داده‌های لندست ۸، به همراه خطواره‌های استخراج‌شده، مورد استفاده در شناسایی و تحلیل پهنه‌های دگرسانی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۱۲. رز دیاگرام خطواره‌های محدوده مورد مطالعه؛ (A) بر اساس فراوانی امتداد و (B) بر اساس امتداد با وزندهی بر مبنای طول خطواره‌ها.



شکل ۱۳ نقشه تراکم خطواره‌ها در محدوده مورد مطالعه بر اساس روش تخمین تراکم کرنل (Kernel Density Estimation)

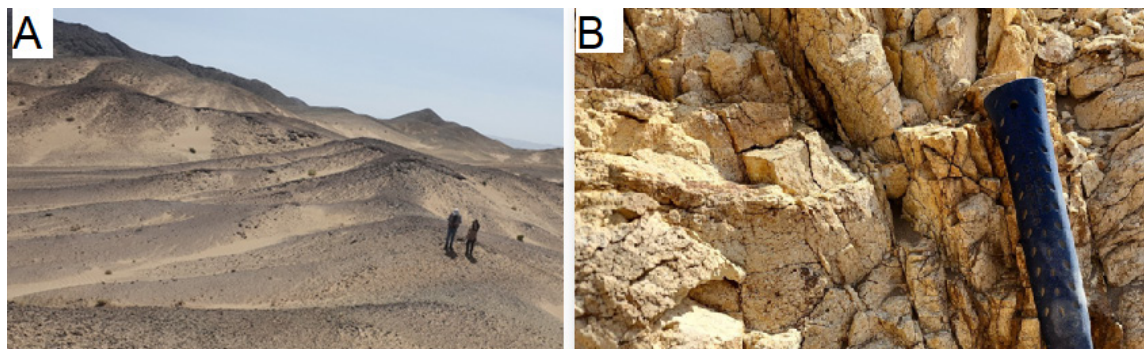
### اعتبار سنجی مطالعات دور سنجی

مطالعات صحرایی نشان می‌دهند که فعالیت‌های آذرین در فازهای متعددی صورت گرفته است؛ به‌طوری‌که در مراحل اولیه، محصولات پیروکلاستیک، مانند برش‌های ولکانیکی، تشکیل شدند و سپس گدازه‌ها روی پیروکلاستیک‌ها جاری شدند. در نهایت، دایک‌های حدواسط، سنگ‌های آذرین الیگوسن را قطع کردند. (بامری و همکاران، ۱۴۰۴).

برونزدهای سنگ‌های نفوذی نشان می‌دهند که هم‌زمان با سنگ‌های خروجی، سنگ‌های ساب‌ولکانیک و

نفوذی نیز تشکیل شده‌اند. بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، بیشتر سنگ‌های آذرین و میزبان رسوبی آن‌ها در محدوده مورد مطالعه به‌شدت دگرسان شده‌اند و فقط در قله‌ها یا در بخش‌های مرکزی برونزدهای استوک‌مانند یا گنبدی، تا حدی سالم یا کم‌دگرسان‌شده هستند.

بخش‌های سالم و کم‌دگرسان‌شده معمولاً به رنگ سیاه تا خاکستری هستند، درحالی‌که بخش‌های دگرسان‌شده به رنگ‌های روشن، مانند کرم، سفید، قهوه‌ای و قرمز، دیده می‌شوند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴. شواهد صحرایی دگرسانی‌های شناسایی شده در محدوده جنوب مجموعه کوه آساگی، مورد استفاده در صحت‌سنجی نتایج دورسنجی؛ (A) نمای دور از برونزدهای دگرسان‌شده (دید به سمت جنوب غرب)؛ (B) نمای نزدیک از برونزدهای دگرسان‌شده.



ارتوکلای می‌توانند راهنمایی برای شناسایی دگرسانی پتاسیک در این منطقه باشند.

### دگرسانی فلیک

کانی‌های شاخص دگرسانی فلیک، کوارتز، سربیت و پیریت هستند. کانی‌های فرعی شامل روتیل، لوکوسن و کانی‌های رسی هستند. در مناطق کانه‌دار، این کانی‌ها بیشتر به صورت رگچه دیده می‌شوند و معمولاً دارای کانه نیز هستند. ساخت رگچه‌ای در این نوع دگرسانی اغلب به صورت استوک‌ورکی است. استوک‌ورک‌های کوارتز-پیریت از مشخصات این دگرسانی هستند.

بیشتر کانی‌های سنگ میزبان، همچون فلدسپارها و کانی‌های آهن و منیزیم‌دار، به سربیت و کوارتز تبدیل می‌شوند. در این دگرسانی، محلول‌های گرمابی دارای طبیعت اسیدی هستند و باعث شست‌وشو و خارج‌شدن بعضی عناصر از سنگ می‌شوند. این دگرسانی از رایج‌ترین دگرسانی‌ها در کانسارهای پورفیری و اپی‌ترمال است. در سامانه‌های مس پورفیری، دگرسانی فلیک بر روی دگرسانی پتاسیک واقع شده و میزبان بخشی از کانی‌زایی است.

دگرسانی فلیک و به‌خصوص سربیتی‌شدن، به‌طور گسترده و شدید در سنگ‌های محدوده مورد مطالعه رخ داده و دارای رنگ کرم و سفید هستند. این دگرسانی در محدوده مورد مطالعه، در برونزدها، همراه با کانی‌زایی نیست. مطالعه مقاطع نازک نشان می‌دهد که سربیت ثانویه در اغلب سنگ‌های آذرین محدوده وجود دارد (شکل ۱۵-B).

ساخت استوک‌ورکی در بعضی از برونزدهای این دگرسانی دیده می‌شود (شکل ۱۵-C). استوک‌ورک‌های کوارتز بیشتر به صورت میکرو رگچه‌ای وجود دارند. پیریت‌ها هم در نمونه‌های دستی و هم در زیر میکروسکوپ قابل رؤیت‌اند و بیشتر به صورت دانه‌های شکل‌دار و پراکنده در سنگ‌ها حضور دارند و کاملاً به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند (شکل ۱۵-C).

### دگرسانی آرژیلیک

کانی‌های شاخص این دگرسانی، کانی‌های رسی

به‌منظور صحت‌سنجی پهنه‌های دگرسانی شناسایی‌شده از داده‌های دورسنجی، نمونه‌های برداشت‌شده از بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه به‌صورت میکروسکوپی بررسی شدند. شواهد کانی‌شناسی و بافتی حاصل از مطالعه مقاطع نازک، از جمله حضور کانی‌های شاخص دگرسانی‌های پتاسیک، فلیک، آرژیلیک و پروپلیتیک، با نتایج حاصل از تفسیر داده‌های دورسنجی مقایسه شدند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پهنه‌های دگرسانی تفکیک‌شده در تصاویر ماهواره‌ای با شواهد پتروگرافی موجود در نمونه‌های سطحی مطابقت خوبی دارند. در ادامه، ویژگی‌های کانی‌شناسی و پتروگرافی هر یک از پهنه‌های دگرسانی و شواهد میکروسکوپی مربوط به آن‌ها ارائه می‌شود:

### دگرسانی پتاسیک

کانی‌های شاخص این دگرسانی شامل فلدسپات پتاسیم، با یا بدون بیوتیت، هستند. کانی‌های فرعی آن عبارت‌اند از انهدریت، مگنتیت، همتایت، کلریت، کانی‌های رسی و سربیت. دگرسانی پتاسیک به دلیل افزوده‌شدن پتاسیم به سنگ‌های میزبان به‌وسیله محلول‌های گرمابی دما بالا و قلیایی ایجاد می‌شود. در مناطق کانه‌دار، این نوع دگرسانی شامل استوک‌ورک‌های کوارتز، به همراه رگچه‌های سولفیدی و اکسیدی، است. در سامانه‌های مس پورفیری، این دگرسانی در مرکز و در عمق بیشتری تشکیل می‌شود و غالباً میزبان کانی‌زایی مس است.

برونزدهای کوچکی از این دگرسانی در بخش شمالی محدوده مورد مطالعه وجود دارد که منطبق بر سنگ‌های نفوذی مونزونیتی است. به نظر می‌رسد بیشتر ارتوکلای‌های موجود در این سنگ حاصل جانشینی پلاژیوکلای توسط ارتوکلای باشند. کوارتزهای ثانویه دانه‌ریز نیز در این دگرسانی فضای بین بلورهای ارتوکلای و پلاژیوکلای را فراگرفته‌اند (شکل ۱۵-A).

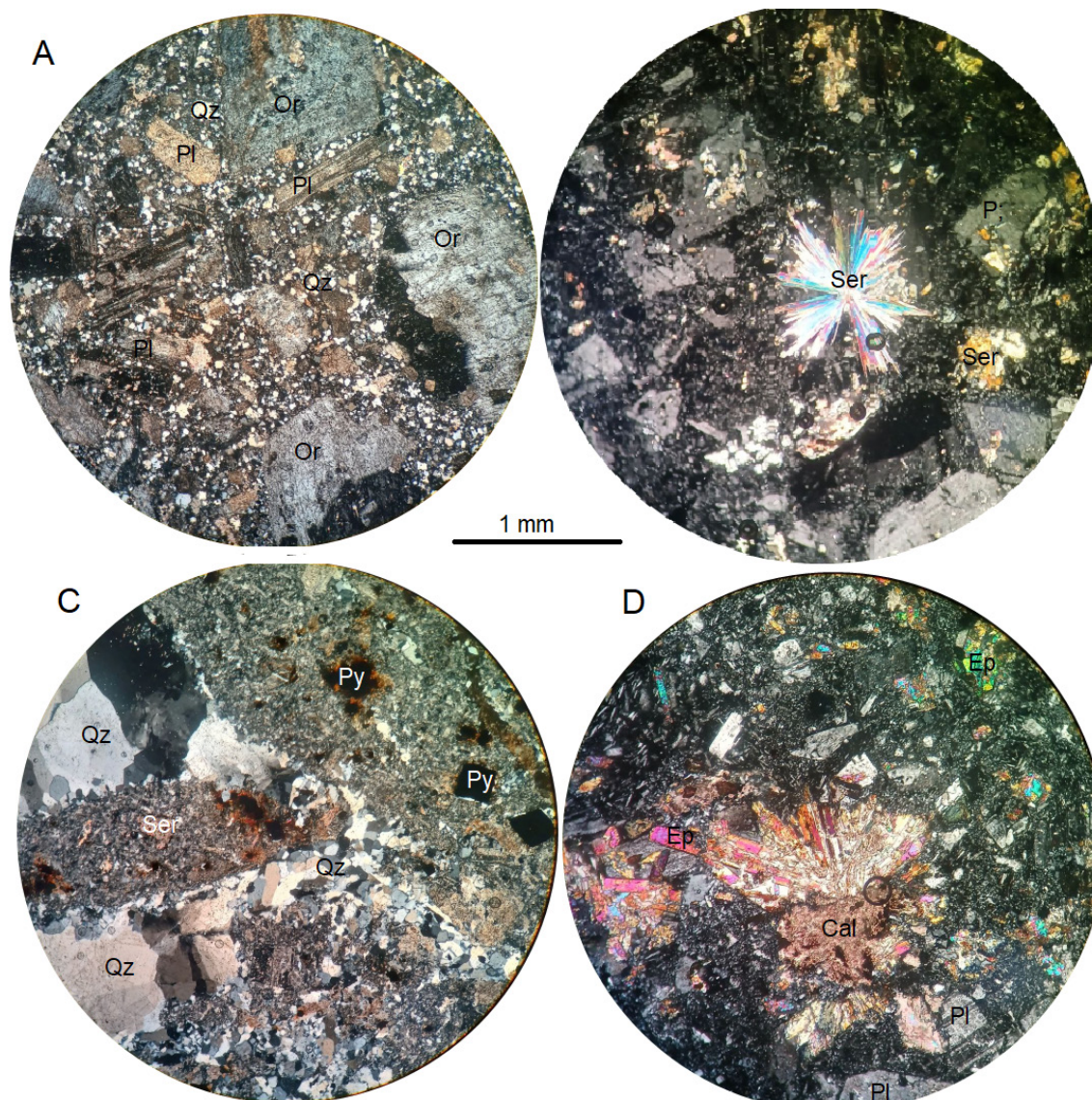
استوک‌ورک‌های کوارتز و رگچه‌های سولفیدی و اکسیدی، که معمولاً در دگرسانی پتاسیک دیده می‌شوند، در برونزدهای این زون در محدوده مورد مطالعه مشاهده نشدند. با این حال، تصاویر منعکس‌کننده

آلونیت مشخص می‌شود. کانی سولفیدی اصلی که با دگرسانی آرژیلیک یافت می‌شود، پیریت است.

کانی‌های رسی اصولاً جانشین پلاژیوکلازها و سیلیکات‌های مافیک (هورنبلند و بیوتیت) می‌شوند (Pirajno, 2009). در کانسارهای مس پورفیری، این دگرسانی به سمت داخل سامانه کانی‌سازی با منطقه دگرسانی فلیک و به طرف خارج سامانه با منطقه دگرسانی پروپلیتیک آمیخته می‌شود (Pirajno, 2009).

هستند. طی این نوع دگرسانی، بیشتر کاتیون‌های قلیایی از سنگ خارج می‌شوند و بخشی از آن‌ها صرف تشکیل کانی‌های رسی می‌شود. محلول‌های گرمابی عامل تشکیل دگرسانی آرژیلیک، اسیدی هستند و به همین دلیل باعث انحلال سنگ‌های دیواره می‌شوند.

دگرسانی آرژیلیک شامل انواع آرژیلیک، آرژیلیک حدواسط و آرژیلیک پیشرفته می‌شود. برای مثال، نوع حدواسط به وسیله مونت‌موریلونیت، ایلیت، کلریت و کائولینیت مشخص می‌شود؛ درحالی‌که دگرسانی آرژیلیک پیشرفته با دیکیت، کائولینیت، پیروفیلیت و



شکل ۱۵. شواهد میکروسکوپی دگرسانی‌های شناسایی شده در محدوده جنوب مجموعه آذرین آساگی، مورد استفاده در صحت‌سنجی نتایج دورسنجی؛ (A) کوارتز مونزونیت پورفیری متشکل از ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و کوارتز، با شواهد دگرسانی پتاسیک؛ (B) رشد ثانویه سرسیت به صورت شعاعی در یک آندزیت، به‌عنوان شاهد دگرسانی سرستی؛ (C) رگچه‌های استوکورکی و قالب پیریت‌های اکسیدشده در یک دیوریت پورفیری، مرتبط با دگرسانی فلیک؛ (D) پیدوت و کلسیت ثانویه در آندزیت، به‌عنوان کانی‌های شاخص دگرسانی پروپلیتیک



مطالعات صحرایی نشان می‌دهد که دگرسانی آرژلیک در محدوده جنوب مجموعه آذرین آساگی رخ داده است. این دگرسانی در برونزدهای محدوده دارای رنگ‌های سفید، زرد و قهوه‌ای است.

### دگرسانی پروپلیتیک

کانی‌های شاخص دگرسانی پروپلیتیک، کلریت، اپیدوت، کلسیت و آلیت هستند. کانی‌های فرعی مربوط به این نوع دگرسانی شامل سریسیت، انهیدریت، پیریت، مگنتیت و زئولیت هستند. در دگرسانی پروپلیتیک، بسیاری از عناصر فرار و عناصری مانند منیزیم، آهن، کلسیم و سیلیس از سیال به سنگ اضافه می‌شوند. آب‌های گرمابی در این دگرسانی بیشتر قلیایی و خنثی هستند. این دگرسانی در بیشتر سامانه‌های گرمابی وجود دارد و اغلب فاقد کانی‌زایی است.

کانی‌های شاخص این دگرسانی مشابه کانی‌های شاخص هواز دگی سوسوریتی و رخساره دگرگونی شیت سبز هستند. تفاوت این دگرسانی با دگرگونی و هواز دگی، داشتن آنومالی از عناصر فلزی و گوگرد است. در سامانه‌های مس پورفیری، دگرسانی پروپلیتیک خارجی‌ترین و وسیع‌ترین نوع دگرسانی است و به همین دلیل هدف اکتشافی مهمی محسوب می‌شود (Guilbert and Park, 1997).

این دگرسانی در حاشیه‌های محدوده مورد مطالعه، به‌طور شاخصی تشکیل شده است. برونزدهای این دگرسانی در محدوده مورد مطالعه دارای رنگ سبز هستند. میزان رگه و رگچه‌ها در برونزدها ناچیز است. در زیر میکروسکوپ مشخص شد که نمونه‌های متعددی از محدوده مورد مطالعه دارای اپیدوت، کلسیت، کلریت و پیریت هستند (شکل ۱۵-D). کوارتز، سریسیت و کانی‌های رسی نیز همراه این دگرسانی وجود دارند.

اپیدوت و کلسیت در این دگرسانی به‌صورت جانیشینی و رگچه‌ای و گاهی به شکل شعاعی تشکیل شده‌اند (شکل ۱۵-D). وسعت، شدت و مشخصات کانی‌شناسی این دگرسانی در محدوده مورد مطالعه، قابل مقایسه با مشخصات این دگرسانی در سامانه‌های مس و طلای پورفیری است.

در مقاطع میکروسکوپی، علاوه بر کانی‌های حاصل از دگرسانی گرمابی، شبکه‌ای از شکستگی‌ها و ریزشکستگی‌ها و همچنین رگچه‌های ثانویه مشاهده می‌شود که در برخی موارد توسط کانی‌های گرمابی و ثانویه پر شده‌اند. تمرکز کانی‌های دگرسانی و رگچه‌های ثانویه در امتداد و مجاورت این شکستگی‌ها، بیانگر نقش شکستگی‌ها در انتقال و تمرکز سیالات گرمابی است. همچنین، شواهد پرشدگی و قطع‌شدگی برخی شکستگی‌ها توسط رگچه‌های متأخر، نشان‌دهنده وجود چند مرحله فعالیت سیالات و توسعه رگچه‌ها در مقیاس میکروسکوپی است.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پردازش داده‌های سنجش از دور نشان داد که ترکیب باندی  $RGB=468$  و نسبت‌ها و ترکیب‌های باندی به‌کاررفته، امکان تفکیک نسبی سنگ‌های آذرین از واحدهای رسوبی، آبرفتی و رسوبات آبراهه‌ای و همچنین شناسایی پهنه‌های دارای پاسخ طیفی مرتبط با دگرسانی را فراهم می‌کند. در ترکیب باندی  $RGB=468$ ، رخنمون‌های آذرین عمدتاً با رنگ‌های تیره‌تر و واحدهای رسوبی، آبرفتی و رسوبات آبراهه‌ای با رنگ‌های روشن‌تر مشخص می‌شوند. گسترش رنگ صورتی در واحدهای رسوبی غرب محدوده عمدتاً با فراوانی کانی‌های ورقه‌ای اولیه در این سنگ‌ها مرتبط است، در حالی که گسترش همین رنگ در رخنمون‌های آذرین بخش مرکزی، با توجه به نتایج مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، با دگرسانی گرمابی ارتباط دارد.

نتایج حاصل از نسبت و ترکیب باندی  $(2/4, 2/8, 6/7)$  نیز تفاوت میان رخنمون‌های آذرین و واحدهای رسوبی و آبرفتی را نشان داد و لکه‌های روشن با رنگ‌های سفید، سبز و زرد در میان و مجاورت رخنمون‌های آذرین، بر اساس شواهد صحرایی و پتروگرافی، با پهنه‌های دگرسانی گرمابی انطباق دارند. همچنین، نسبت باندی  $(b5+b7)/b6$  پهنه‌های دارای پاسخ طیفی مرتبط با دگرسانی فیلیک را عمدتاً در رخنمون‌های آذرین بخش مرکزی محدوده مشخص کرد. در نسبت باندی  $(b6/b9)/(b7+b8)$  نیز پهنه‌های دارای پاسخ

## منابع

- طیفی مرتبط با دگرسانی پروپلیتیک بیشتر در حاشیه رخنمون‌های آذرین شناسایی شدند.
- سنگ‌های آذرین و بخش‌هایی از واحدهای رسوبی محدوده تحت تأثیر دگرسانی گرمابی گسترده قرار گرفته‌اند. نتایج سنجش از دور، با استفاده از ترکیب‌ها و نسبت‌های باندی مختلف، گسترش پهنه‌های دگرسانی را در محدوده مشخص کرد. بر اساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی، این نتایج عمدتاً با گسترش دگرسانی‌های فلیک، آرژلیک، سیلیسی و پتاسیک در بخش‌های مرکزی برونزدهای آذرین و توسعه بیشتر دگرسانی پروپلیتیک در حاشیه آن‌ها مطابقت دارد.
- بررسی‌های ساختاری نشان داد که گسل‌ها، شکستگی‌ها و شبکه ریزشکستگی‌ها در کنترل جایگیری بخشی از سنگ‌های آذرین و ایجاد مسیرهای مناسب برای گردش سیالات گرمابی نقش داشته‌اند. تمرکز دگرسانی در مجاورت گسل‌ها و مناطق خردشده، توسعه رگه‌ها و رگچه‌ها در امتداد شکستگی‌ها و همچنین شواهد میکروسکوپی از پرشدگی برخی شکستگی‌ها توسط کانی‌های ثانویه و گرمابی، ارتباط فضایی و فرایندی میان ساختارها و دگرسانی را نشان می‌دهد. تفاوت شدت دگرسانی در بخش‌های مختلف برونزدهای آذرین نیز می‌تواند با ناهمگنی نفوذپذیری، تراکم و پیوستگی شکستگی‌ها و میزان و مدت عبور سیالات مرتبط باشد.
- مجموعه شواهد سنگ‌شناسی، ژئوشیمیایی، ساختاری و دگرسانی، شامل حضور سنگ‌های آذرین ساب‌ولکانیک با بافت پورفیری، ماهیت کالک‌آلکالن پتاسیم‌بالا تا شوشونیتی، جایگاه تکتونیکی همگرا تا پسابرخوردی، توسعه دگرسانی‌های گرمابی و ارتباط فضایی آن‌ها با رخنمون‌های آذرین و ساختارهای گسلی، با برخی ویژگی‌های سامانه‌های گرمابی مرتبط با توده‌های پورفیری سازگاری دارد. بر این اساس، احتمال وجود یک سامانه گرمابی مرتبط با توده‌های با بافت پورفیری در محدوده مورد مطالعه مطرح می‌شود.
- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- بامری، م.، عباسی، ر.، پرتابیان، ع.، ۱۴۰۴. سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی سنگ‌های آتشفشانی و نیمه‌آتشفشانی در جنوب مجموعه آذرین آساگی، شمالباختری زاهدان، پهنه زمیندرز سیستان. پترولوژی؛ دوره ۱۶، ش ۳، ۷۵-۱۰۰.
- بومری، م.، ۱۳۹۶. کانسارهای پورفیری در پهنه جوش‌خورده سیستان، استان سیستان و بلوچستان، جنوب‌شرق ایران، نهمین همایش ملی انجمن زمین‌شناسی اقتصادی ایران، بیرجند، ایران.
- بومری، م.، پیری، ع.، نهانی‌فر، ع.، سلوکی، ح. ر.، ۱۳۹۹. کانی‌زایی مس و طلا، سنگ‌نگاری و ژئوشیمی سنگ‌های آذرین در تک‌تلار، شمال غرب زاهدان، استان سیستان و بلوچستان، پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۱۱، ش ۴، ۱۰۹-۱۲۸.
- بومری، م.، پیری، ع.، در انتقال و مهاجرت سیال کانه‌دارنهانی فر، ع.، ۱۴۰۱. دگرسانی و تعیین جرم سنگ‌های آذرین در محدوده تک‌تلار، شمال غرب زاهدان جنوب شرق ایران، زمین‌شناسی اقتصادی؛ دوره ۱۴، ش ۳، ۶۵-۹۳.
- بومری، م.، پرتابیان، ع.، حسین‌پور، م.، ۱۴۰۱. جایگاه ساختاریکانسار آنتیموان سفیدابه وحیدرآباد در پهنه زمیندرز سیستان، جنوب غرب سفیدابه، فصلنامه زمین ساخت، دور ۶، ش ۲۱، ۶۷-۷۰.
- پیری، ع.، ۱۳۹۶. زمین‌شناسی، دگرسانی و سبک کانی‌زایی مس در محدوده تکتلار، شمال غرب زاهدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- کوهساری، م.، بومری، م.، باقری، س.، ۱۴۰۳. کانی‌شناسی و خاستگاه کانیزایی آنتیموان در معادن سفیدابه و حیدرآباد، پهنه جوش‌خورده سیستان، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دوره ۳۲، شماره ۳، ۵۰۹-۵۲۴.



- and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44, 145–163.
- Mars, J. C. and Rowan, L. C., 2006- Regional mapping of phyllic and argillic altered rocks in the Zagros magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere* 2, 161- 186.
- Mauger, G. S., Wilson, M. P. and Olson, J. S., 2007. Image processing and analysis for remote sensing (4th ed.). CRC Press.
- Mohammadi, A., Burg, J.P., Bouilhol, P. and Ruh, J., 2016. U–Pb geochronology and geochemistry of Zahedan and Shah Kuh plutons, southeast Iran: Implications for closure of the south Sistan Suture Zone. *Lithos* 248–251, 293–308.
- Moradi, R., Boomeri, M., Bagheri, S. and Nakashima, K., 2016. Mineral chemistry of igneous rocks in the Lar Cu-Mo prospect, southeastern part of Iran: Implications for P, T, and  $fO_2$ . *Türk- ish Journal of Earth Sciences* 25 (5), 418-433.
- Nazari, M., Boomeri, M., Biabangard, H. and Nakashima, K., 2022. K- and Na-rich volcanic rocks of Asagi igneous complex, eastern Iran. *Araian Journal of Geosciences* 15, 1025.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal processes and mineral system. Springer Science + Business Media, Berlin, 1250 pp
- Pour, A. B., Ranjbar, H., Sekandari, M., Abd El-Wahed, M., Hossain, M. S., Hashim, M., Yousefi, M., Zoheir, B., Wambo, J. D. T. and Muslim, A. M., 2023. Remote sensing for mineral exploration. In *Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration: Remote Sensing, GIS, Geochemical, and Geophysical Applications to Mineral Resources*, 17–149. Elsevier.
- Rowan, L. C., Wetlaufer, P. H. and Goetz, A. F. H., 1977. Use of multispectral scanner imagery for lithologic discrimination and mapping of altered rocks. U.S. Geological Survey Remote Sensing Report, 1977.
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G. and Mars, J. C., 2006- Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 100, 139–152.
- غفران ملا، گ. ج.، ۱۳۹۶. مشخصات ژئوشیمیایی سنگ‌های دگرسان شده و کانی‌زایی شده در محدوده اکتشافی تکتلار در شمال غرب زاهدان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- Aghanabati, A., 1991a. Geological map of Daryacheh – ye – Hamun (1:250000), Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Aghanabati, A., 1991b. Geological map of Kuh-e-Seyasteragi (1:100000), Geological Survey of Iran, Tehran, Iran.
- Bagheri, S., and Damani Gol, S., 2020. The Eastern Iranian Orocline. *Earth-Science Reviews* 210, 103322.
- Boomeri, M., Moradi, R. and Bagheri, S., 2020. Petrology and origin of the Lar igneous complex of the Sistan suture zone, Iran. *Geologos* 26(1), 51–64. doi: <https://doi.org/10.2478/logos-2020-0004>.
- Camp, V.E. and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15(3), 221-239.
- Gabr, S., Ghulam, A. and Kusky, T., 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews* 38, 59–69.
- Guilbert, S. L. and Park, C. F., 1997. *Geology of Ore Deposits* (3rd ed.). W. H. Freeman and Company.
- Gupta, R. P., 1991. *Remote sensing geology*. Springer-Verlag.
- Hook, S. J. and Ramachandran, B., 2002. The use of thermal infrared remote sensing for surface and mineral studies. In A. N. Rencz (Ed.), *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing*. John Wiley & Sons. 3, 59–110.
- Lillesand, T. M. and Kiefer, R. W., 1987. *Remote sensing and image interpretation* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., and Goetz, A. F. H., 1993. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization



Sensing of Environment 104, 74- 87.

- Rouskov, V., Kruse, F. A. and Hanafi, H., 2005. Mapping and characterization of alteration zones using hyperspectral and multispectral data sets in the Cuprite mining district, Nevada. *International Journal of Remote Sensing* 26(10), 2161–2180.
- Shebl, A., Abdellatif, M., Badawi, M., Dawoud, M., Fahil, A. S., et al., 2023. Towards better delineation of hydrothermal alterations via multi-sensor remote sensing and airborne geophysical data. *Scientific Reports*, 13, 7406.
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E., 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran. *Geological Society of American Bulletin* 94(1), 134-150.
- Valeh, N. and Saidi, A., 1989. Geological Map of Chehelkureh. Geological Survey of Iran, Sheet 8050
- Yamaguchi, Y., 1988. Spectral indices for vegetation and rock type discrimination using the optical sensor of the Japanese ERS-1. In *Proceedings of the Sixth Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology* (pp. 97–115). Environmental Research Institute of Michigan.
- Yao, F., Liu, S., Wang, D., Geng, X., Wang, C., Jiang, N. and Wang, Y., 2023. Review on the development of multi- and hyperspectral remote sensing technology for exploration of copper–gold deposits. *Ore Geology Reviews* 162, 105732.

