شناسایی و تفکیک واریزه‌های آهکی از سازندهای غیرآهکی با کاربرد تلفیقی علوم دورسنجی و مشخصات لیتولوژی (مطالعهٔ موردی: منطقه بهادران در استان یزد)

سمانه پورمحمدی*؛ مؤسسه تحقیقات آب ایران، مرکز ملی تحقیقات و پژوهش‌های باروری ابرها
محمدرضا اختصاصی؛ دانشگاه یزد، دانشکدهٔ منابع طبیعی و کویرشناسی
محمدحسن رحیمیان؛ مرکز ملی تحقیقات شوری، یزد

تاریخ: دریافت ۹۱/۱۲/۱۲ **پذیرش** ۹۳/۸/۱۹

چکیده

کوهستان‌ها عموماً منشأ تشکیل بسیاری از عوارض طبیعی سطح زمین از جمله دشت‌های دامنه‌ای مجاور خود هستند. تفکیک و تعیین مرز دقیق واحدهای سنگ‌شناسی و جداسازی رخنمون واحدهای سنگ‌شناسی مناطق کوهستانی از مواد موجود در دشت‌ها که حاصل نهشته‌های تخریبی سنگ‌های کوهستانی است، دشوار می‌باشد. در تحقیق حاضر در نظر است تا با تلفیق زمین‌ریخت‌شناسی و دورسنجی ابتدا واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی کوهستانی و دشتی تفکیک شده و سپس واریزه‌های آهکی (سنگ‌های کوهستانی) از سازندهای غیرآهکی (نهشته‌های دشتی) با دقت مناسب تفکیک شوند. با انجام تحقیق حاضر به‌کمک داده‌های ماهواره‌ای لندست و تکنیک‌های مختلف پردازش تصویر نظیر نسبت‌گیری باندها، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و تجزیهٔ عاملی، مناسب‌ترین شاخص‌های تفکیک‌کننده واحدهای سنگی انتخاب و نقشهٔ شناسایی واحدهای سنگی با ضریب مقایسهٔ نقشه (کاپا) ۰/۵۱ به‌دست آمد. نهایتاً با هم‌پوشانی نقشهٔ حاصل با نقشه واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی و تفکیک مرز واریزه‌های آهکی در دشت‌ها از سازندهای غیرآهکی درکوه‌ها دقت نقشه سنگ‌شناسی به ۷۳٪ افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سازندهای آهکی، واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی، واحدهای سنگ‌شناسی، دشت، کوه، دورسنجی، لندست.

* **نویسنده مسئول** s.poormohammadi@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

مقدمه

استفاده از تکنیک سنجش از دور و کاربرد داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای، از علوم روز و تکنیک‌های جدیدی است که می‌تواند در شناخت سنگ‌ها و سازندهای زمین‌شناسی کمک شایانی کند. به‌کارگیری علم سنجش از دور به‌طور گسترده‌ای در توسعهٔ علم زمین‌شناسی نقش داشته و هنوز راه برای گشودن افق‌های جدیدتر فراهم است. از جمله موارد کاربرد تصاویر ماهواره‌ای در این زمینه می‌توان به شناسایی سازندهای زمین‌شناسی (شتسلاز ۲۰۰۰، فرزر و همکاران ۱۹۹۷)، شناسایی و تفکیک نهشته‌های آتشفشانی (گاد و کاسکی، ۲۰۰٦) ، پایش آتشفشان‌ها (بوگالتی و همکاران ۱۹۹۸، یسئو و همکاران ۱۹۹۳)، تهیهٔ نقشه ریف‌های مرجانی (لی و طالب، ۲۰۰۵)، شناسایی مکان‌های نشت طبیعی نفت و گاز (عبداسلام، ۲۰۰۳) و موضوعات مرتبط با شناسایی کانی‌ها (فریبر، ۲۰۰۲) اشاره کرد. در این میان استفاده از تکنیک‌های ترکیب تصاویر لندست مانند تغییر شکل‌های IHS[1] به‌صورت گسترده‌ای در علوم زمین‌شناسی کاربرد دارند (ریگول و چیکا، ۱۹۹۸). استفاده از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی کانی‌ها در معدن کاوی از موارد کاربردی دیگر علم سنجش از دور در علوم زمین است که با استفاده از آنالیزهای سری زمانی تصاویر لندست (TM5,ETM7) و سیستم‌های پایش ژئوشیمیایی انجام می‌شود (اسلوئتر و گلسیر،۲۰۱۱، گلسر و همکاران،۲۰۱۱). مختاری و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از داده‌های سنجده ETM اقدام به جداسازی واحدهای سنگی حساس به فرسایش مارن، شیل و نهشته‌های کواترنر از واحدهای مقاوم ماسه سنگ و سنگ آهکی کرد. گومز و همکاران (۲۰۰٤) با استفاده از تصاویر ASTER اقدام به شناسایی ۱۰ نوع سنگ آهکی و ماسه سنگ آبرفتی کردند. نینومیا (۲۰۰۵) نیز با استفاده از تکنیک سنجش از دور سه شاخص به‌منظور تفکیک و جداسازی کانی‌های کوارتزی، کانی‌های مافیک و کربنات‌ها معرفی کرد. در تحقیق دیگری که گلوگردی و همکاران (۱۳۸۸) در منطقه بهبهان انجام دادند از دو تصویر آستر و لندست برای شناسایی سازندهای گچساران و آغاجاری از ترکیب باندهای مختلف استفاده شده است.

1. Intensity, Hue, Saturation

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

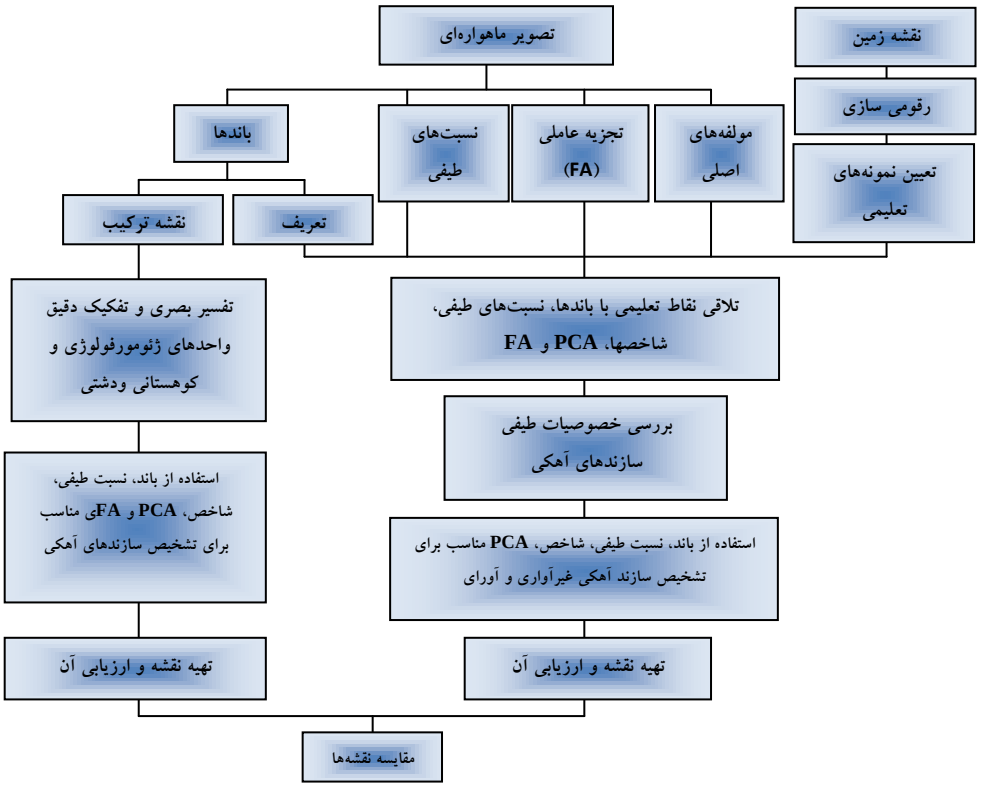
فریک و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی و مروری بر تمامی کارهای انجام شده در زمینه استفاده از سنجش از دور و اسکن‌کننده های چندطیفی (MSS) و استفاده از مؤلفه‌های اصلی و تعیین نسبت های باندهای مناسب برای تعیین ویژگی‌های سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی اقدام کرده‌اند. هانت (۱۹۷۹)، سالیبری (۱۹۸۹) و کوپر (۲۰۰۲) به بررسی طول موج‌های کوتاه مادون قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی بر روی سنگ‌ها پرداختند و شکل‌های طیفی سنگ‌ها و کانی‌ها را اندازه‌گیری کردند. واتاناب و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از تصاویر ماهواره آستر فرمولی از ترکیب باندهای مختلف برای شاخص سیلیس به‌دست آوردند. علاوه براین شاخص‌هایی برای تفکیک کانی‌های کلسیت، آلونیت، مونت موریونیت به‌دست آمد که بر اساس ترکیبات خطی باندهای ماهواره آستر در نوادا ارائه و در آن منطقه آزمون کردند. (یاماگوچی و نیاتو، ۲۰۰۳). راجنراند و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از آنالیزهای طیفی تصاویر آستر بر روی کوارتزیت آهن‌دار و گرانولیت پیروکسین‌دار، گنیس بیوتیت و هورنبلاند دار، دیونیت، آمفیبول و پگماتیت نشان دادند که ویژگی‌های جذبی این کانی‌ها در باندهای ۱، ۳، ۵ و ۷ ماهواره آستر مشخص می‌شود و نسبت‌های باندی مختلفی در این زمینه معرفی کردند. هدف از انجام تحقیق حاضر نیز بررسی و امکان‌سنجی شناسایی سازندهای آهکی به‌کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست در منطقه بهادران استان یزد است که به‌کمک تکنیک‌های مختلفی نظیر نسبت‌های باندی، تجزیه مؤلفه‌های اصلی و تجزیه عاملی انجام شده است. تحقیق حاضر سعی دارد تا علاوه بر بررسی و امکان‌سنجی شناسایی سازندهای آهکی به‌کمک تصاویر ماهواره‌ای لندست، با کمک تفسیر بصری این تصاویر و جداسازی واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی که از نظر سنگ‌شناسی یک‌سان ولی از نظر مورفولوژی متفاوتند، دقت نقشه‌های تولیدی را افزایش دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در غرب دشت بهادران در استان یزد انجام شده است. منطقه بررسی شده بین عرض جغرافیایی ۰۰ ۳۱ تا ۳۰ ۳۱ شمالی و طول جغرافیایی ۲۱ ٥٤ تا ۵۰ ٥٤ شرقی قرار گرفته است. شکل ۲ مراحل مختلف انجام این پژوهش را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

می‌شود در این پژوهش از دو منبع اصلی داده (نقشه زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای) استفاده شده است. پس از رقومی‌سازی نقشهٔ زمین‌شناسی (شکل ۳ الف)، اقدام به شناسایی انواع سازندهای موجود در منطقهٔ پژوهش شد. برای این کار از ۵۵۰ نقطه تعلیمی استفاده شد که روی یک شبکه و به‌صورت منظم انتخاب شدند. شکل ۳ ب نشان‌دهندهٔ نقاط تعلیمی انتخاب شده در این پژوهش است.

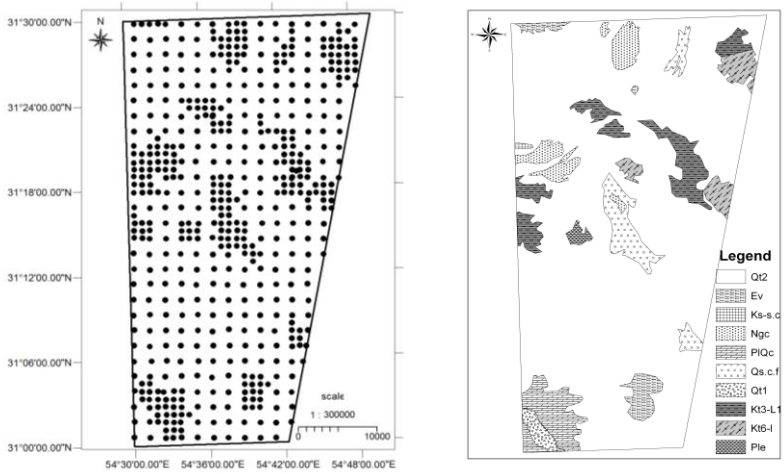


شکل ۱. مراحل مختلف انجام پژوهش

در این تحقیق، ابتدا ارتباط بین هر یک از باندهای تصویر ماهواره‌ای با سازندهای آهکی موجود در منطقهٔ پژوهش بررسی شد. بدین‌منظور نمودار امضای طیفی باندها[1] برای هر یک از سازندهای زمین‌شناسی ترسیم و تحلیل شد. به‌کمک نمودارهای حاصل باندی که نسبت به

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

سایر باندها قادر به تمایز بهتر سازندهای آهکی K^{t3-L1}، K^{t6-L} و P^{l}_{e} است، انتخاب شد. سپس اقدام به بارزسازی سازندهای آهکی روی این باند یا به‌عبارتی دیگر تهیهٔ نقشهٔ سازندهای آهکی به‌کمک باند مذکور شد. نظر به این‌که مقادیر عددی پیکسل‌های هر باند بین ۰ تا ۲۵۵ قرار دارد، از این رو، اقدام به تعریف مرزهای مختلف (مثلاً اعداد بزرگ‌تر از ۱۱۰ و کوچک‌تر از ۲۵۵، اعداد بزرگ‌تر از ۱۲۰ و کوچک‌تر از ۲۵۵ و ...) شد. سپس پیکسل‌هایی که مقادیر عددی آن‌ها در درون هر یک از محدوده‌های تعریف شده قرار داشتند، از سایر پیکسل‌ها مجزا شدند. بدین‌ترتیب نقشه‌های مختلفی با هدف تمایز سازندهای آهکی از سایر سازندها تولید و ارزیابی شدند.



ب الف

شکل ۳. الف) نقشه سازندهای منطقهٔ بررسی شده (مستخرج از نقشه زمین‌شناسی)، در این نقشه سازندهای آهکی به‌صورت تیره‌تر مشخص شده‌اند، ب) نقشه پراکنش نمونه‌های تعلیمی

علاوه بر استفاده از داده‌های تک‌باندها (DNها)، از دو روش متداول در زمینه تلفیق داده‌های تک‌باندها با یک‌دیگر (تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی[1] و تجزیهٔ عاملی[2]) استفاده شد و نتایج آن ارزیابی و مقایسه شد. هم‌چنین از نسبت‌های باندی[3] موجود در زمینهٔ شناسایی سازندهای آهکی (عسکری و همکاران، ۱۳۸۳) استفاده شد. جدول ۲ نحوهٔ محاسبهٔ هر یک از این نسبت‌ها به‌کمک باندهای تصاویر ماهواره‌ای لندست است.

1. Spectral signature

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

جدول ۱. نام و مشخصات سازندهای زمین‌شناسی موجود در منطقهٔ بررسی شده (موقعیت قرارگیری هر یک از این سازندها در شکل ۳ الف قابل مشاهده است)

نام سازند	مشخصات
Q^{t2}	دشت آبرفتی- متشکل از واریزه‌های آهکی و سازندهای غیرآهکی
Q^{t1}	پادگانه‌های قدیمی- متشکل از واریزه‌های آهکی و سازندهای غیرآهکی
$Q^{s.c.f}$	کفه‌های رسی حاوی نمک
P^{l}_{e}	سنگ آهک ضخیم لایه به رنگ سفید تا خاکستری روشن
PlQ^{c}	کنگلومرا با قطعات ولکانیکی
N_{g}^{c}	کنگلومرا با سخت‌شدگی کم
K^{t6-L}	سنگ آهک توده‌ای با رخنمون سفید تا خاکستری روشن
K^{t3-L1}	سنگ آهک اوربیتولین‌دار ضخیم لایه یا توده‌ای، با رخنمون خاکستری
$K^{s-s.c}$	تناوبی از ماسه سنگ، کنگلومرای دانه‌ریز و شیل ارغوانی
E^{V}	آندزیت تا تراکی آندزیت

جدول ۲. نسبت‌های طیفی استفاده شده برای شناسایی سازندهای آهکی در منطقهٔ پژوهش (عسکری و همکاران، ۱۳۸۳)

نام نسبت طیفی	فرمول محاسبه
R_1	$\frac{\text{Band 4/ Band 3}}{\text{Band 4 / Band 1}}$
R_2	$\frac{\text{Band 4/ Band 3}}{\text{Band 3 / Band 2}}$
R_3	$\frac{\text{Band 4/ Band 3}}{\text{Band 3 / Band 1}}$

1. Principal Component Analysis (PCA) 2. Factor Analysis (FA)
3. Band Ratio

در این تحقیق هم‌چنین اقدام به تعریف دو شاخص[1] برای شناسایی سازندهای آهکی شد. این شاخص‌ها حاصل تفسیر نمودار امضای طیفی باندها (که در قسمت نتایج به آن اشاره خواهد شد) بوده است که در این پژوهش پیشنهاد و ارزیابی شدند. شاخص‌های مذکور عبارتند از:

$$I_1 = \frac{\text{Band 5} - \text{Band 1}}{\text{Band 5} + \text{Band 1}} \quad (۱)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

$$I_2 = \frac{\text{Band 5} - \text{Band 4}}{\text{Band 5} + \text{Band 4}} \quad (۲)$$

-ارزیابی و تعیین دقت نقشه‌ها

هر کدام از روش‌های اشاره شده در فوق، منجر به تولید نقشه می‌شوند که باید دقت هر کدام ارزیابی شود. برای ارزیابی نقشه‌های مذکور از چهار شاخص به نام‌های صحت کاربر[۲] یا UA، صحت تولیدکننده[۳] یا PA، صحت کل[٤] یا OA و ضریب ضریب مقایسه نقشه[٥] یا K استفاده شده است. شاخص‌های مذکور پس از تهیه نقشه و تشکیل ماتریسی به نام ماتریس خطا[٦] محاسبه شده‌اند. از بین شاخص‌های مذکور مهم‌ترین شاخصی که در ارزیابی نقشه نهایی مورد استفاده و تأیید بسیاری از محققان است، ضریب مقایسه نقشه است که میزان تطابق بین کلاس‌های نقشه ساخته شده و مقادیر مشاهداتی (کلاس‌های واقعی) را نشان می‌دهد. این شاخص بدین‌صورت قابل محاسبه است:

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (۳)$$

که P_o نسبت مربوط به کلاس‌های درست طبقه‌بندی شده و P_e نسبت مربوط به کلاس‌های درست طبقه‌بندی شده بر اساس شانس است. مقدار عددی این ضریب بین صفر و یک است که صفر نشان‌دهندهٔ کلاسه‌بندی ضعیف و یک نشان‌دهندهٔ کلاسه‌بندی قوی است. خان و همکاران (۲۰۰٦) شاخص ضریب مقایسه نقشه را به سه دسته تقسیم‌بندی کرده‌اند.

۱. شاخص یا Index عبارت از جمع جبری باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای است که یک یا چند مشخصه زمینی را بارزتر از سایر مشخصه‌ها نشان می‌دهد.

. آن‌ها مقدار عددی ضریب مقایسه نقشهٔ بزرگ‌تر از ۰/۸ را نشان‌دهندهٔ طبقه‌بندی خوب، بین ۰/۸ و ۰/٤ متوسط و کم‌تر از ۰/٤ را ضعیف توصیف کرده‌اند.

1- User accuracy 1- Producer accuracy 1- Overall accuracy 1- Kappa coefficient

1- error matrix

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

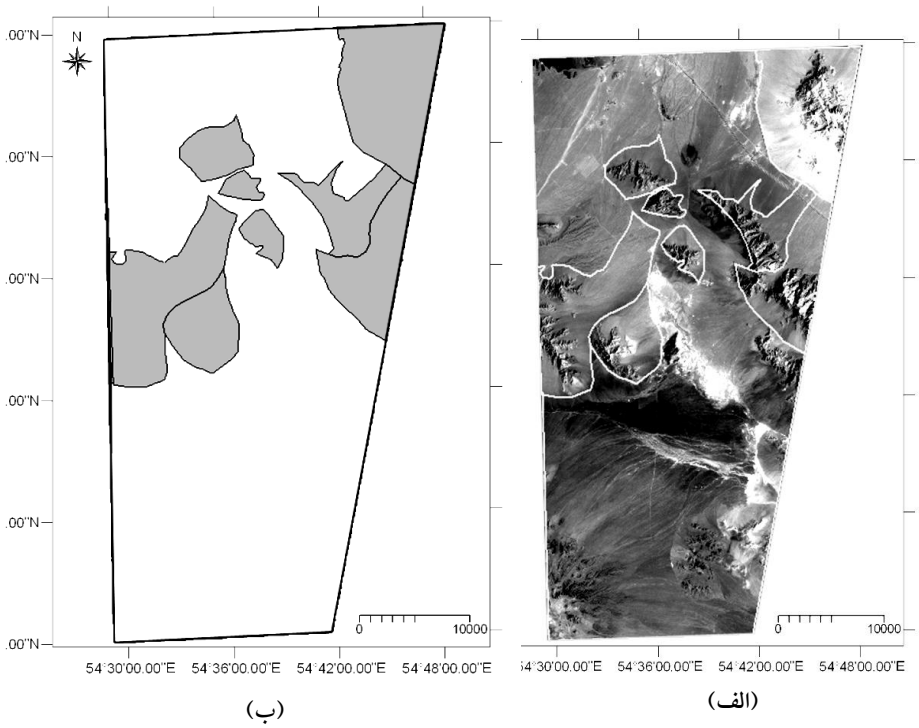
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

- شناسایی واریزه‌های آهکی واقع بر روی سازندهای غیرآهکی و ارزیابی مجدد نقشه‌ها

نظر به این‌که تکنیک سنجش از دور قادر به نمایش بازتابش‌های طیفی ساطع شده از سطح اجسام زمینی است، از این رو، در صورت قرارگیری واریزه‌های آهکی روی سایر سازندها (حتی با کم‌ترین ضخامت)، انتظار می‌رود که تصاویر ماهواره‌ای و هم‌چنین شاخص‌های تولید شده با این تصاویر، سازندهای زمین‌شناسی این مناطق را به‌عنوان سازندهای آهکی شناسایی کنند. این در حالی است که سازند اصلی زمین‌شناسی در چنین مناطقی متمایز از نوع آهکی است. همین مسئله باعث می‌شود که دقت نقشه تولیدی کاهش یافته و اساساً شناسایی سازندهای آهکی با تصاویر ماهواره‌ای با خطای فاحش مواجه شود. این خطا مربوط به پخشیدگی مواد تخریبی ساخت‌های اولیه کوهستانی و قرارگرفتن آن‌ها روی دیگر واحدهای مجاور کوهستان است. چنان‌چه بتوان با شیوه‌ای مناسب و با کمک علم زمین‌ریخت‌شناسی، واحدهای کوهستانی و دشتی مرتبط با ساختار زمین‌شناسی یک منطقه را به‌خوبی تفکیک کرد و مواد تخریبی پخش شده روی سایر سازندها (یا همان واریزه‌های آهکی) را شناسایی کرد، می‌توان انتظار داشت که دقت نقشه نهایی به بیش‌ترین سطح ممکن ارتقاء یابد. در این پژوهش ابتدا با کمک تفسیر بصری تصاویر با ترکیب رنگی کاذب (FCC) و جداسازی واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی که از نظر سنگ‌شناسی یک‌سان ولی از نظر مورفولوژی متفاوتند اقدام به تفکیک واحدهای سنگی آهکی اعم از ساخت اولیهٔ کوهستانی و یا ساخت های تخریبی با ریخت شناسی دشتی شد. شکل ٤ ب سازندهای آهکی توده‌ای و نهشته‌های با منشأ آهکی را در مجاورت یک‌دیگر نشان می‌دهد. طبیعتاً انتظار می‌رود که روش‌های دورسنجی بتوانند تمامی این مناطق را به‌عنوان سازندهای آهکی شناسایی کنند از این رو، نیاز به محاسبهٔ مجدد دقت نقشه‌های تولیدی در مرحلهٔ قبل و مقایسه آن‌ها با یک‌دیگر است. بدین‌منظور شاخص‌های ارزیابی نقشه (UA، PA، OA و K) مجدداً محاسبه و با مقادیر قبلی خود مقایسه شدند. این مقایسه نقش تفکیک دقیق واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی در شناسایی سازندهای آهکی منطقهٔ بررسی شده با عملیات دورسنجی را نمایان می‌کند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]



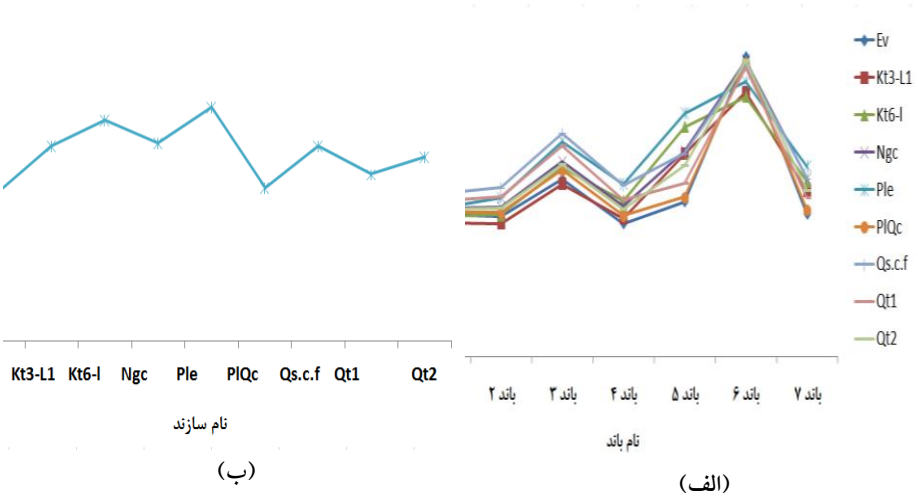
شکل ٤. الف) تفسیر ترکیب رنگی تصویر ماهواره‌ای لندست (FCC531) ، ب) تفکیک و جداسازی عرصه‌های متاثر از ساخت‌های آهکی از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی

بحث و نتیجه‌گیری

شکل ۵ الف امضای طیفی سازندهای مختلف زمین‌شناسی منطقه پژوهش را بر اساس بازتابش‌های ثبت شده با باندهای مختلف تصاویر ماهواره‌ای لندست نشان می‌دهد. این نمودار اهمیت زیادی در بررسی‌های سنجش از دور داشته و تفسیر آن کمک زیادی به شناسایی مناسب‌ترین باند(ها) برای بارزسازی پدیده‌ها و عوارض مختلف زمینی می‌کند. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، سازندهای مختلف زمین‌شناسی بازتابش‌های متفاوتی در محدوده‌های طیفی باندهای مختلف دارند. این شکل نشان می‌دهد که باند ۵ نسبت به سایر باندها قادر به تمایز بهتر سازندهای مختلف (خصوصاً سازندهای آهکی) در منطقهٔ پژوهش است. در این باند، سازندهای آهکی (K^{t3-L1}، K^{t6-L} و P^{l}_{e}) بازتابش‌های بیش‌تری نسبت به سایر سازندها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

داشته‌اند. همین نکته می‌تواند اساس تحقیقات روی مقادیر عددی این باند در شناسایی سازندهای آهکی محسوب شود. در شکل ۵ ب نیز تغییرات مقادیر عددی باند ۵ در سازندهای مختلف زمین‌شناسی نشان داده شده که در بین آن‌ها، سازندهای آهکی بیش‌ترین مقادیر DN (که مبین بازتابش‌های صورت گرفته از این سازندهاست) را دارند.



(الف) (ب)

شکل ۵. الف) امضای طیفی سازندهای مختلف زمین‌شناسی منطقهٔ بررسی شده بر اساس باندهای ماهواره لندست، ب) تغییرات مقادیر عددی باند ۵ در سازندهای مختلف

محاسبه و بررسی ماتریس هم‌بستگی بین باندهای مختلف تصویر ماهواره‌ای لندست (جدول ۲) نیز حاکی از این مطلب است که باند ۵ هم‌بستگی‌های کم‌تری با سایر باندها داشته و لذا بازتابش‌های ثبت شده در این باند از سایر باندها متمایز خواهد بود.

جدول ۲. ماتریس هم‌بستگی بین باندهای مختلف تصویر ماهواره‌ای لندست

نام باند	باند ۱	باند ۲	باند ۳	باند ٤	باند ٥	باند ٦	باند ۷
باند ۱	1.00	0.92	0.84	0.73	0.42	0.54	0.58
باند ۲		1.00	0.91	0.81	0.50	0.57	0.65
باند ۳			1.00	0.90	0.59	0.60	0.73
باند ٤				1.00	0.70	0.62	0.82
باند ٥					1.00	0.67	0.89
باند ٦						1.00	0.68
باند ۷							1.00

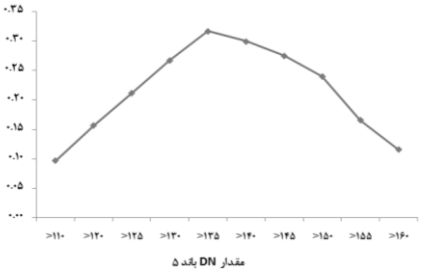
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

چنان‌که قبلاً اشاره شد، پس از شناسایی مناسب‌ترین باند اقدام به تهیه نقشه‌های مختلف برای تمایز بهتر سازندهای آهکی در منطقهٔ پژوهش شد. برای هر یک از این نقشه‌ها، ماتریس خطا تشکیل شد و شاخص‌های ارزیابی نقشه (UA، PA، OA و K) محاسبه شد. جدول ۳ یکی از این ماتریس‌های خطا و شاخص‌های ارزیابی نقشه را نشان می‌دهد

جدول ۳. ماتریس خطای مربوط به نقشه سازندهای آهکی تهیه شده توسط باند ۵ ماهواره لندست

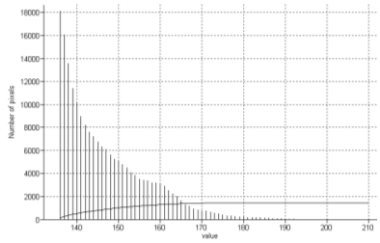
		نقشه		
	کلاس‌ها	آهکی	غیرآهکی	مجموع
مقادیر واقعی	آهکی	**9**	96	105
	غیرآهکی	4	**441**	445
	مجموع	13	537	**550**

UA=0.76, PA=0.54, OA=0.65, Kappa=0.12



(الف)

(ب)



(ج)

شکل ٦. الف) تغییرات ضریب کاپای نقشه‌های سازندهای آهکی تولید شده با مقادیر مختلف DN باند ۵ ماهواره لندست، ب) مناسب‌ترین نقشه سازندهای آهکی تهیه شده توسط باند ۵ و ج) هیستوگرام نقشه مربوط

شکل ٦ الف تغییرات ضریب مقایسه نقشه سازندهای آهکی تولید شده با مقادیر مختلف عددی (DN) باند ۵ ماهواره لندست را نشان می‌دهد. چنان‌که ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

ضریب کاپای قابل انتظار از نقشه سازندهای آهکی تولید شده با داده‌های باند ۵ (DNها)، ۰/۳۲ است که نقشه مذکور و هیستوگرام آن در شکل‌های ٦ ب و ٦ ج دیده می‌شود.

چنان‌که اشاره شد، در این تحقیق علاوه بر استفاده از مقادیر DN باند ۵، از نسبت‌های مختلف طیفی (R_1، R_2 و R_3)، تجزیهٔ مؤلفه‌های اصلی (PC_1، PC_2 و PC_3)، تجزیه عاملی (FA_1، FA_2 و FA_3) و شاخص‌ها (I_1 و I_2) برای تهیه نقشه واحدهای سنگی آهکی استفاده شده است. هر یک از این روش‌ها منجر به تولید نقشه‌های جداگانه‌ای شدند که با معیارهای UA، PA، OA و K ارزیابی شدند. جدول ٤ نشان‌دهندهٔ نتایج حاصل است.

مقایسه معیارهای ارزیابی نقشه‌ها (مشخصاً ضریب کاپا) نشان می‌دهد که یکی از شاخص‌های سنجش از دوری به‌کاربرده شده در این پژوهش (I_1) قادر به تفکیک سازندهای آهکی منطقه پژوهش از سایر سازندها است. مقادیر عددی به‌دست آمده از این شاخص بین ۱- و ۱+ است (شکل ۷ الف). با کمک تکنیک نرم‌افزاری کراسینگ[1]، مقادیر عددی این شاخص برای نقاط تعلیمی مربوط به سازندهای آهکی در منطقهٔ بررسی شده جدا شد و پس از آنالیز آماری آن‌ها مشخص شد که حد قابل قبول این شاخص برای نمایش سازندهای آهکی در منطقهٔ بررسی شده بین ۰/۲ تا ۰/۳ است. شکل ۷ ب نشان‌دهندهٔ مناطقی است که شاخص I_1 بین دو مقدار مذکور قرار دارد. بر اساس معیار ارزیابی نقشه‌ها کاپا (K)، این نقشه به‌عنوان نقشهٔ قابل قبول تفکیک سازندهای آهکی از غیرآهکی در منطقهٔ بررسی شده شناخته می‌شود.

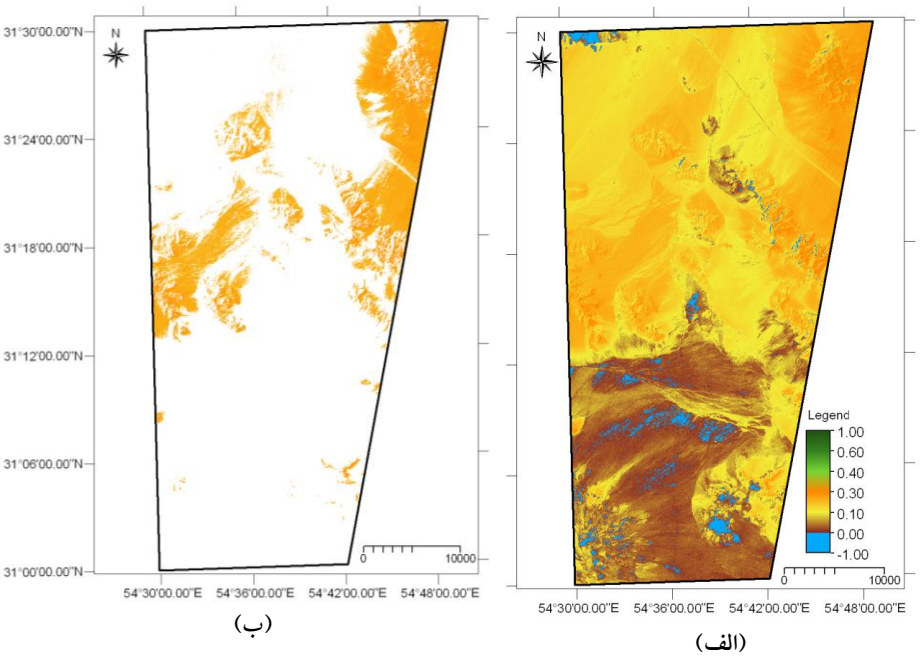
شاخص I_1 از تلفیق باندهای ۱ و ۵ ماهواره لندست حاصل شده است (فرمول ۲). با مراجعه مجدد به نمودار امضای طیفی سازندها (شکل ٤ الف)، مشاهده می‌شود که بازتابش‌های ثبت شده با باندهای ۱ و ۵ این ماهواره اختلاف معنی‌داری نسبت به هم‌دیگر دارند که همین تفاوت منجر به تمایز سازندهای آهکی از غیرآهکی در این شاخص شده است. چنان‌که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از کاربردهای نمودار امضای طیفی، شناسایی باند یا باندهای مناسب برای بارزسازی پدیدهٔ بررسی شده است که در این پژوهش نیز در قالب معرفی شاخص I_1 محقق شد.

1 .Crossing

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

جدول ٤. نتایج ارزیابی نقشه‌های مناطق آهکی تهیه شده به‌کمک باند ۵ تصویر ماهواره‌ای لندست، نسبت‌های مختلف طیفی (R_1، R_2 و R_3)، تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PC_1، PC_2 و PC_3)، تجزیهٔ عاملی (FA_1، FA_2 و FA_3) و شاخص‌های سنجش از دوری معرفی شده در این پژوهش (I_1 و I_2)

روش استفاده شده برای تهیه نقشه	معیار ارزیابی نقشه			
	صحت تولیدکننده (**PA**)	صحت کاربر (**UA**)	صحت کل (**TA**)	کاپا (**K**)
باند ۵	0.64	0.68	0.66	0.32
R_1	0.57	0.56	0.56	0.13
R_2	0.70	0.69	0.70	0.40
R_3	0.65	0.64	0.64	0.29
PC_1	0.60	0.70	0.65	0.26
PC_2	0.31	0.38	0.35	0.24
PC_3	0.70	0.74	0.72	0.43
FA_1	0.50	0.51	0.50	0.01
FA_2	0.32	0.38	0.35	0.25
FA_3	0.73	0.73	0.73	0.46
I_1	0.77	0.74	0.75	**0.51**
I_2	0.71	0.74	0.73	0.45



شکل ۷. الف) نقشه شاخص I_1، ب) نقشه سازندهای آهکی مستخرج از شاخص I_1

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

-شناسایی واریزه‌های آهکی و ارتقای معیارهای ارزیابی

چنان‌که اشاره شد پخشیدگی مواد تخریبی ساخت‌های اولیه کوهستانی و قرارگرفتن آن‌ها در واحدهای دیگر مجاور کوهستان می‌تواند منجر به ایجاد خطا در شناسایی سازندهای آهکی شود. برای جلوگیری از بروز چنین خطایی اقدام به جداسازی واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی و تعیین مناطق آهکی جدید (واریزه های آهکی) (شکل ٤ ب) شد از این رو، شاخص‌های ارزیابی تمامی نقشه‌های تولیدی در مرحله قبل (UA، PA، OA و K) مجدداً محاسبه شدند. جدول ۵ نتایج ارزیابی این نقشه‌ها با در نظر گرفتن واریزه‌های آهکی تشکیل شده در اطراف سازندهای آهکی را نشان می‌دهد. مقایسهٔ نتایج حاصل از این اقدام با نتایج قبلی (جدول ٤) بیان‌گر این مطلب است که در صورت تفکیک دقیق واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی و شناسایی واریزه‌های موجود در اطراف سازندهای آهکی، می‌توان دقت نقشه‌های مذکور را به مقدار چشم‌گیری ارتقاء داد. به‌عنوان مثال در مورد شاخص I_1 - که بهترین نتایج را در بین روش‌های مختلف استفاده شده در این پژوهش داشته است - معیار ارزیابی ضریب مقایسه نقشه (K) از ۰/۵۱ به ۰/۷۳ افزایش یافته که گویای نقش و اهمیت معنی‌دار تفکیک واحدهای زمین‌ریخت‌شناسی در پژوهش‌های سنجش از دور سنگ‌شناسی است.

جدول ۵. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف با در نظر گرفتن واریزه‌های آهکی تشکیل شده در اطراف سازندهای آهکی

روش استفاده شده برای تهیه نقشه	معیار ارزیابی نقشه			
	صحت تولیدکننده (**PA**)	صحت کاربر (**UA**)	صحت کل (**TA**)	ضریب مقایسه نقشه (**K**)
باند ۵	0.71	0.83	0.77	0.48
R_1	0.60	0.63	0.62	0.23
R_2	0.74	0.73	0.73	0.47
R_3	0.60	0.60	0.60	0.21
PC_1	0.55	0.65	0.60	0.13
PC_2	0.25	0.28	0.26	0.45
PC_3	0.71	0.79	0.75	0.47
FA_1	0.55	0.59	0.57	0.12
FA_2	0.25	0.28	0.27	0.44
FA_3	0.80	0.79	0.80	0.59
I_1	0.85	0.88	0.87	**0.73**
I_2	0.78	0.81	0.80	0.59

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

در این پژوهش یک شاخص سنجش از دور جدید برای تفکیک سازندهای آهکی از سایر سازندها معرفی شد که می‌تواند راهنمایی برای بررسی‌ها و تحقیقات بعدی در این زمینه باشد. به‌کارگیری شاخص مذکور در سایر مناطق و ارزیابی مجدد آن می‌تواند کارآیی آن را بیش‌تر به اثبات برساند. هم‌چنین استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سایر سنجنده‌ها، انجام عملیات داده‌برداری زمینی، توسعه و تکرار روش ارائه شده در این پژوهش برای سایر مناطق کشور می‌تواند اقداماتی عملی برای حصول نتایج بهتر در زمینه شناسایی سازندهای آهکی با تکنیک دورسنجی باشد.

در این پژوهش هم‌چنین مشخص شد که در صورت تفکیک دقیق واحدهای زمین ریخت‌شناسی و شناسایی واریزه‌های موجود در اطراف سازندهای آهکی امکان افزایش دقت نقشه زمین‌شناسی با استفاده از روش‌های دورسنجی وجود دارد. در نظر گرفتن این مسئله می‌تواند از بروز خطای فاحش در فرآیند به‌کارگیری تکنیک سنجش از دور ماهواره‌ای برای جداسازی واحدهای سنگ‌شناسی جلوگیری کند و نقشهٔ نهایی را با واقعیات زمینی منطبق سازد. بنا بر این توصیه می‌شود که در تفسیر نتایج حاصل در این زمینه، صرفاً به نقشه‌های زمین‌شناسی اتکا نشود و از دیدگاه‌های زمین‌ریخت‌شناسی نیز برای شناسایی و جداسازی واحدهای سنگ شناسی استفاده شود.

قدردانی

بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقای مرتضی اشرفیان، کارشناس ارشد زمین‌شناسی برای ارائه نظرات و پیشنهادات تخصصی خود اعلام می‌کنند.

منابع

۱. مختاری ا.، غیومیان ج.، فیض نیا س.، شیروانی ک.، *تفکیک واحدهای سنگی حساس به فرسایش با استفاده از تحلیل‌های هم‌بستگی غیرخطی داده‌های ماهواره‌ای سنجده ETM*، مجله آب و آبخیزدار، جلد۲، شماره ۱ (۱۳۸۵).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

۲. عسکری م.، قاسمی ع.، چراغی س.، ناظم الرعایا ب.، عسکری ج.، *کاربرد منطق فازی در اکتشاف کانسارهای سرب ورودی کربناته با استفاده از پردازش داده‌های رقومی ماهواره‌ای در استان اصفهان*، کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۳).

۳. هاشم گلوگردی س.، فلاح س. ر.، کمپانی زارع م.، مسعودی م.، متشفع ب.، ۸۸ *استفاده از تصاویر خام و پردازش شده سنجده‌های ETM و ASTER در تعیین واحدهای سنگی سازندهای گچساران و آغاجاری در شهرستان بهبهان*، همایش ژئوماتیک ۸۸ (۱۳۸۳).

4. Abdelsalam M.G., Stern R.J., Berhane W.G., "Mapping gossans in arid regions with landsat TM and SIR-C images: the Beddaho Alteration Zone in northern Eritrea", Journal of African Earth Sciences 30 (2000) 903-916.
5. Boccaletti M., Bonini M., Mazzuoli R., Abebe B., Piccardi L., Tortorici L., "Quaternary oblique extensional tectonics in the Ethiopian Rift (Horn of Africa)", Tectonophysics 287 (1998) 97-116.
6. Boudewijn J. de Smeth, Tsehaie Woldai, "Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 14 (2012) 112-128 .
7. Cooper B.L., Salisbury J.W., Killen R.M., Potter A.E., "Midinfrared spectral features of rocks and their powders", Journal of Geophysical Research-Planets (2002).
8. Ferrier G., White K., Griffiths G., Bryant R., Stefouli M., "The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Lesvos, Greece using an integrated remote sensing dataset", International Journal of Remote Sensing 23 (2002) 341-356.
9. Freek D., Wim H., Bakker, Marleen F., Noomen, Mark van der Meijde E., John M., Carranza, "Multi-and hyperspectral geologic remote sensing:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

A review", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 14 (2012) 112-128.

10. Fraser A., Huggins P., Rees J., Cleverly P., "A satellite remote sensing technique for geological structure horizon mapping", International Journal of Remote Sensing 18 (1997) 1607-1615.
11. Gad S., Kusky T., "Lithological mapping in the Eastern Desert of Egypt, the Barramiya area, using Landsat thematic mapper (TM)", Journal of African Earth Sciences 44 (2006) 196-202.
12. Gomez C., Delacourt C., Allemand P., Wackerle R., "Using ASTER remote sensing for geological", mapping in aminbia journal of physics and chemistry of earth, part A/B/C: 30 (2004) 97-108.
13. Hunt G.R., "Spectral signatures of particulate minerals in the visible and nearinfrared", Geophysics 42 (1977) 501-513.
14. Khan S.D., "Mapping of Muslim Bagh Ophiolite complex (Pakistan) using new remote sensing, and field observation", *Journal of Asian Earth sciences*. Vol. 44 (2006) 333-343.
15. Lee S., Talib J.A., "Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis", Environmental Geology 47 (2005) 982-990.
16. Macdonald I.R., Guinasso N.L., Ackleson S.G., Amos J.F., Duckworth R., Sassen R.,Brooks J.M., "Natural oil-slicks in the Gulf-of-Mexico visible from space", Journal of Geophysical Research-Oceans 98 (1993) 16351-16364.
17. Ninomiya Y., Fu B., "Detecting Lithology with Advanced Spaceborne thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor”data", *Journal of Remote sensing of Enviroment*., Vol. 99 (2005) 127-139.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]

18. Rajendran S., Thirunavukkarasu A., Balamurugan G., Shankar K., "Discrimination of iron ore deposits of granulite terrain of Southern Peninsular India using ASTER data", Journal of Asian Earth Sciences 41 (2011) 99-106.
19. Rigol J.P., Chica-Olmo M., "Merging remote-sensing images for geologicalenvironmental mapping: application to the Cabo de Gata-Nijar Natural Park, Spain", Environmental Geology 34 (1998) 194-202.
20. Salisbury J.W., Walter L.S., "Thermal infrared (2.5-13.5 MU-M) spectroscopic remote sensing of igneous rock types on particulate planetary surfaces", Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets 94 (1989) 9192-9202.
21. Schetselaar E.M., Chung C.J.F., Kim K.E., "Integration of Landsat TM, gammaray, magnetic, and field data to discriminate lithological units in vegetated granite-gneiss terrain", Remote Sensing of Environment 71 (2000) 89-105.
22. Watanabe H., "Rock type classification by multi-band TIR of ASTER", In: Annual General Meeting of the Geological Remote Sensing Group ‘ASTER Unveiled’, Burlington House, Piccadilly, London, UK (2002).
23. Yamaguchi Y., Naito C., "Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands", International Journal of Remote Sensing 24 (2003) 4311-4323.
24. Yesou H., Besnus Y., Rolet J., "Extraction of spectral information from Landsat-TM data and merger with SPOT panchromatic imagery-a contribution to the study of geological structures", Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 48 (1993) 23-36.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.4.3.2]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.4.3113]