

پردازش داده‌های ماهواره‌ای به منظور شناسایی ذخایر بنتونیت نوع سدیک و کلسیک در شرق ایران

محمدحسن کریم‌پور

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

آزاده ملکزاده سفارودی

گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۸

karimpur@um.ac.ir

چکیده

مجموعه فعالیت‌های آتشفشانی ترشیاری شرق ایران میزبان ذخایر متعدد بنتونیت است. کاربردهای صنعتی مختلف بنتونیت به مقدار CaO و Na_2O مونت‌موریونیت تشکیل دهنده آن بستگی دارد. در این پژوهش از پردازش تصاویر آستر به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) برای تشخیص بنتونیت سدیک از کلسیک در مناطق شناخته شده استفاده شد. معادن بنتونیت ده محمد، چاه کم و چاه کشمیر در استان خراسان جنوبی از نوع غنی از سدیم و بنتونیت خوشاب در استان خراسان رضوی از نوع غنی از کلسیم هستند. پردازش تصویر ماهواره نشان داد که طیف‌های مونت‌موریونیت (۵) و (۸) موجود در کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) در نرم افزار ENVI به ترتیب برای تشخیص بنتونیت نوع سدیک و نوع کلسیک مفید است. لذا با استفاده از آن می‌توان بنتونیت سدیک و کلسیک را در بخش‌های مختلف شرق ایران شناسایی نمود و اقدامات اکتشافی تفصیلی زمینی را برای آنها برنامه‌ریزی کرد.

کلمات کلیدی: آستر، نقشه‌برداری زاویه طیفی، بنتونیت نوع سدیک، بنتونیت نوع کلسیک، شرق ایران

مقدمه

et al., 2001 and 2004; Guyonnet et al., 2005; Suzuki et al., 2007; Brown et al., 2013

بنتونیت‌ها از دیدگاه صنعتی به انواع سدیم‌دار، کلسیم‌دار، جانشینی توسط سدیم، فعال شده توسط اسید و ارگانوفیل تقسیم می‌شوند (کریم‌پور، ۱۳۸۱). اگرچه موارد استفاده آنها با توجه به نوع مونت‌موریونیت بسیار متنوع است. برای مثال از بنتونیت سدیم‌دار به عنوان گل حفاری، در تهیه قالب‌های ریخته‌گری و صنعت گندوله آهن استفاده می‌شود. درحالی‌که از بنتونیت کلسیم‌دار در صنعت تهیه روغن دانه‌های گیاهی و پتروشیمی و به دلیل قابلیت مناسب جانشینی کاتیونی به‌منظور تصفیه و رنگ‌بری استفاده می‌شود (Abichou et al., 2000; Murry and Haydn, 2000).

بنتونیت‌ها به دو طریق گرمایی و رسوبی تشکیل می‌شوند. ذخایر بنتونیت گرمایی کوچک بوده و در شرایط خاص تشکیل می‌شوند. اما مهمترین ذخایر بنتونیت دنیا از نوع رسوبی هستند. خاکستر آتشفشان‌های اسیدی - حدواسط هنگامی که در محیط‌های دریاچه‌ای قلیایی برجای گذاشته می‌شوند، ضمن واکنش با آب، اسمکتیت و دیگر کانی‌ها را می‌توانند تشکیل دهند. عمده بنتونیت‌های رسوبی متعلق به دوران سوم زمین‌شناسی هستند (کریم‌پور، ۱۳۸۱). سنگ‌های رسوبی حاوی بنتونیت (اسمکتیت) در شرایط افزایش عمق (افزایش دما) به ایلیت تبدیل می‌شوند و عدم گزارش بنتونیت از پالئوزوئیک می‌تواند به علت تبدیل آن به ایلیت باشد (Pusch and Madsen, 1995).

دوران سوم زمین‌شناسی بخصوص ائوسن در بیشتر نقاط ایران، به‌جز کپه داغ و زاگرس، صحنه فعالیت‌های ماگماتیکی بوده است. کانسارهای بنتونیت ایران در ۶ زون سمنان - تروند، البرز - آذربایجان، شرق ایران، ایران مرکزی و تفرس - تکاب منطبق بر فعالیت‌های آتشفشانی سنوزوئیک خلاصه شده است.

ایرانیان از زمان قدیم بنتونیت را می‌شناختند و در مواردی از قبیل گل سرشو، گل رختشویی و شستشوی پشم و الیاف و مواد دارویی از آن استفاده می‌کردند. واژه بنتونیت را نخستین بار در سال ۱۸۹۸ دانشمندی به نام نایت به کار برده است. این واژه از اصطلاح محلی شیل‌های بنتون واقع در ایالت وایومینگ آمریکا گرفته شده است.

مهمترین بخش بنتونیت را کانی‌های گروه اسمکتیت تشکیل می‌دهند. اسمکتیت شامل سرپهای دی‌اکتاهدرال و تری‌اکتاهدرال است. کانی‌های سری دی‌اکتاهدرال شامل مونت‌موریونیت، بیدلیت و نانترونیت و سری تری‌اکتاهدرال شامل هکتوریت و ساپونیت است. کانی مونت‌موریونیت از جمله مهمترین کانی بنتونیت‌ها بشمار می‌رود. فرمول کلی مونت موریونیت $\text{A}_{0.3}(\text{Al}_{1/3}\text{Mg}_{0.7})[\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ است. در کانی مونت‌موریونیت، جانشینی کاتیون‌ها در موقعیت اکتاهدرال است، بدین معنی که سدیم و کلسیم جانشین یکدیگر می‌شوند (Karnland et al., 2006; Brown et al., 2013).

از خواص مهم مونت‌موریونیت، جانشینی یونی، خاصیت شکل‌پذیری، انبساط - انقباض و رنگبری است. میزان خواص نامبرده به ترکیب شیمیایی و ساختمان آنها بستگی دارد. در کانی مونت‌موریونیت سدیم‌دار، میزان شکل‌پذیری و انبساط و انقباض، از نوع کلسیم‌دار آن بیشتر است (Takagi et al., 2005). ابعاد شبکه مونت‌موریونیت - سدیم و کلسیم از ۹/۶ آنگستروم در حالت معمولی به ۲۰ آنگستروم، در صورتی که رطوبت محیط صد درصد باشد، افزایش خواهد یافت.

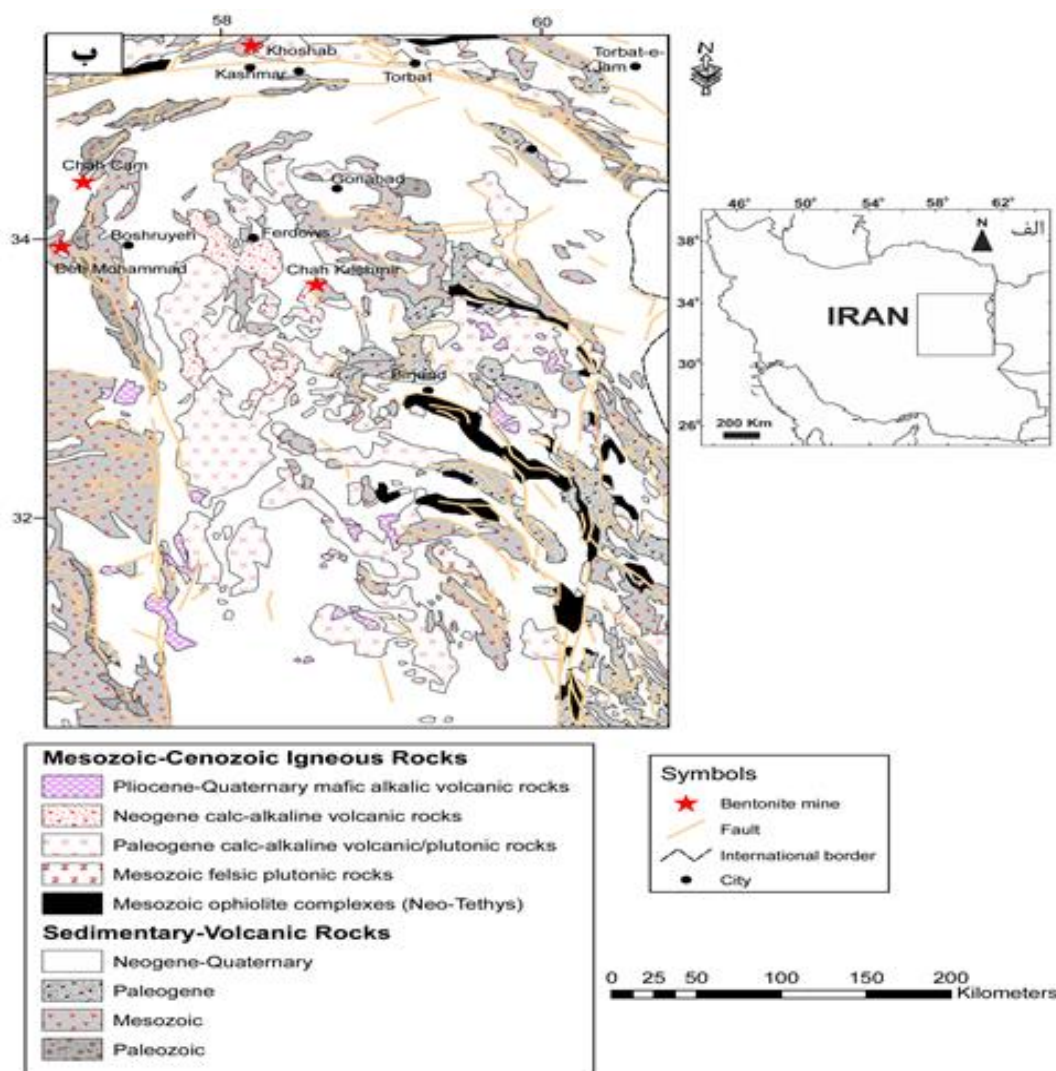
میزان جذب و تورم مونت‌موریونیت سدیم‌دار چندین برابر حجم آن است، به‌طوری که حالت ژله‌ای، پلاستیکی و چسبندگی به خود می‌گیرد (Rhodes and Brown, 1993; Komadel et al., 1996; Noble)

خراسان جنوبی واقع شده‌اند. بنتونیت‌های اطراف بیرجند، گناباد، فردوس، کاشمر، قاین و طبس نیز در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی ترشیاری تشکیل شده‌اند (حجازی و قربانی، ۱۳۷۳؛ کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ نخعی، ۱۳۸۱؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲، نماینده و همکاران، ۱۳۹۱).

در این پژوهش چهار ذخیره بنتونیت چاه کم، ده محمد، چاه کشمیر و خوشاب به عنوان هدف مطالعاتی انتخاب شده‌اند. بنتونیت ده محمد در ۵۵ کیلومتری غرب بشرویه و در مسیر جاده بشرویه به طبس، چاه کم در ۱۱۱ کیلومتری شمال شرق طبس و چاه کشمیر در ۸۳ کیلومتری جنوب شرق فردوس در استان خراسان جنوبی و خوشاب در ۳۷ کیلومتری شمال شرقی بردسکن در استان خراسان رضوی قرار گرفته‌اند (شکل ۱ ب).

هر چند که در رشته کوه‌های زاگرس نیز نشانه‌های از بنتونیت وجود دارد (حجازی و قربانی، ۱۳۷۳). شرق ایران و بویژه بلوک لوت به سبب وقوع فرورانش بلوک افغان به زیر آن، پوشیده از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی ترشیاری است (شکل ۱ الف) که منجر به تشکیل انواع کانی‌سازی‌های مس، طلا، سرب، روی، آهن و غیره شده است.

کریم‌پور و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی سن‌سنجی زیرکن به روش U-Pb و ویژگی‌های زمین‌شیمیایی گرانیتوئیدهای مرتبط با کانی‌سازی‌های ترشیاری دریافتند که بازه سنی بین ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (اوسن میانی تا الیگوسن تحتانی) مهمترین دوره فلززایی بلوک لوت است. بسیاری از ذخایر بنتونیت مهم ایران در شرق ایران و بخصوص استان



شکل ۱. الف: موقعیت بلوک لوت در شرق ایران، ب: نقشه زمین‌شناسی ساده شده بلوک لوت و موقعیت بنتونیت چاه کم، ده محمد، چاه کشمیر و خوشاب بر روی آن.

ENVI در ذخایر بنتونیت شناخته شده سدیک و کلسیک در شرق ایران، روش مناسب برای شناسایی اولیه و تفکیک انواع بنتونیت بدون بازدید صحرائی و انجام آزمایش‌های لازم پیدا شود.

روش مطالعه

ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و کاربرد بنتونیت چاه کم و ده محمد توسط کریم‌پور (۱۳۷۸) و کریم‌پور و همکاران (۱۳۸۲)، چاه کشمیر توسط

ترکیب کانی‌شناسی و شواهد زمین‌شیمیایی این معادن که در ادامه بحث شده است، نشان می‌دهد که بنتونیت ده محمد، چاه کم و چاه کشمیر از نوع سدیک و خوشاب از نوع کلسیک است. از آنجایی که کاربرد صنعتی بنتونیت به سدیم‌دار بودن یا کلسیم‌دار بودن آن بستگی دارد، سعی بر آن شد تا بتوان به کمک پردازش داده‌های آستر به روش نقشه-برداری زاویه طیفی (SAM) و با استفاده از بانک اطلاعاتی نرم افزار

سبز و توفهای سبز آهکی و کمر پایین آن را ماسه‌سنگ‌های توفی تشکیل می‌دهد. ذخیره قطعی آن بیش از ۵۰ هزار تن برآورد شده است (حجازی و قربانی، ۱۳۷۳). بنتونیت چاه کم در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ عشق آباد (Ruttner et al., 1994) واقع شده است. این کانی‌سازی در زون گسلی با امتداد شمالی- جنوبی در ریولیت‌ها و آندزیت‌ها تشکیل شده است. تناوب سنگ آهک، شیل، ماسه سنگ و کنگلومرا در زیر سنگ‌های آتشفشانی واقع شده‌اند. بنتونیت چاه کم (۱) دارای ۱۲۰۰ متر طول، ۱۵ متر عرض و ۳ متر ضخامت است. میزان ذخیره آن ۷۳۰۰۰ تن است. میزان ذخیره چاه کم (۲) ۶۲۵۰۰ تن گزارش شده است. بنتونیت ده محمد در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طبس (کریمی باوندی و حاجی حسینی، ۱۳۸۱) قرار دارد. توف‌های ائوسن در محیط دریاچه‌ای آلکالن موجب تشکیل بنتونیت گردیده است. ذخیره قطعی بنتونیت ده محمد ۳۰۰۰۰۰ تن محاسبه شده است. بنتونیت چاه کشمیر در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موسویه (روشن روان، ۱۳۸۵) واقع شده است. این معدن بنتونیت یکی از معادن بزرگ و فعال بوده و رنگ بنتونیت آن کاملاً سفید است. رخنمون معدن دارای ۲۰۰ متر طول، ۱۰۰ متر عرض و ۶ تا ۸ متر ضخامت می‌باشد. سنگ میزبان ماده معدنی داسیت تا آندزیت است. در بعضی از نقاط نیز در داخل بنتونیت قطعاتی از سنگ اولیه وجود دارد که در حال آلتزه شدن و تبدیل به کانی‌های رسی به ویژه مونت‌موریونیت می‌باشد که این موضوع از یک طرف بیانگر نقش ولکانیسم اسیدی در تشکیل بنتونیت بوده و از طرف دیگر مؤید تأثیر محلول‌های هیدروترمال بر روی سنگ‌های آتشفشانی منطقه بوده که باعث تسهیل در فرایند تشکیل بنتونیت شده است. وجود سطوح گسلی که فعالیت آنها موجب حالت برشی درون بنتونیت‌ها و سنگ مادر آنها شده است، می‌توانسته سهولت حرکت محلول‌های گرمابی فوق‌الذکر گردد. معدن چاه کشمیر براساس آمار سازمان صنعت، معدن و تجارت استان خراسان رضوی (۱۳۸۱) حدود ۸۳۴۵۸ تن ذخیره دارد.

خصوصیات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی معادن مورد مطالعه

ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت منطقه ده محمد (جدول ۱) گزارش شده است. میزان مونت‌موریونیت نمونه‌ها بین ۷۲ تا ۸۵ درصد و کریستوبالیت ۱۴ تا ۲۷ درصد است. میزان کربنات کلسیم این گروه غالباً کمتر از ۳ درصد و میزان هالیت در مجموع کمتر از ۲/۵ درصد است (جدول ۱). از خصوصیات مهم این بنتونیت بالا بودن درصد مونت‌موریونیت و غنی بودن آن از سدیم را می‌توان نام برد (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲). برای تعیین میزان درصد CaO و Na_2O دقیق مونت‌موریونیت، سهم CaO و Na_2O کانی‌های هالیت و کلسیت محاسبه شد و از مقدار CaO و Na_2O کل کسر شد تا مقدار باقی‌مانده که سهم مونت‌موریونیت است، مشخص شود. با توجه به اینکه مقدار Na_2O مونت‌موریونیت در همه نمونه‌ها از مقدار CaO بیشتر است (جدول ۱)، لذا بنتونیت ده محمد از نوع سدیک است (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲). برگزیده نمودار دیفراکسیون اشعه ایکس نمونه‌های مطالعه شده منطقه ده محمد در شکل (۲) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است پیک مونت‌موریونیت در حدود 2θ برابر با ۷/۲ ظاهر شده است.

نخعی (۱۳۸۱) و ترکیب کانی‌شناسی و زمین‌شیمی خوشاب توسط نویسندگان و حجازی و قربانی (۱۳۷۳) انجام شده است. در این مطالعات گسترده حدود ۵۰ نمونه از بنتونیت‌های مورد مطالعه به روش XRF برای اکسیدهای اصلی تجزیه شدند. شناسایی ترکیب کانی‌شناسی این نمونه‌ها نیز به روش XRD انجام شد. میزان کلر، کربنات و سولفات با استفاده از روش‌های متداول و درصد مونت‌موریونیت با استفاده از محلول متیلن آبی تعیین شد. درصد کلسیت، ژپس و هالیت با استفاده از روش‌های متداول شیمی‌تر مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ نخعی، ۱۳۸۱؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲).

پردازش تصاویر ماهواره‌ای و کاربرد آن در اکتشاف مواد معدنی امروز مورد توجه خاصی قرار گرفته است. دقت پردازش داده‌های ماهواره‌ای به حدی است که می‌تواند کانی‌هایی را که در مقاطع میکروسکوپی از یکدیگر قابل تشخیص نیستند و تنها با دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) می‌توان آنها را شناسایی کرد (مانند کانی‌های رسی)، تفکیک کند. حتی می‌توان ترکیب شیمیایی کانی‌ها را نیز تشخیص داد. این مسئله به تفاوت‌های جزئی در دامنه طیف جذبی و انعکاسی امواج الکترومغناطیس کانی‌ها برمی‌گردد. در این مطالعه داده‌های سنجنده آستر مورد استفاده قرار گرفته است. بنتونیت خوشاب در صحنه اطلاعاتی با شماره ۳۵۱، چاه کم شماره ۲-۳۴۵، ده محمد شماره ۳۴۰ و چاه کشمیر شماره ۳۳۷ قرار دارد. در پردازش تصویر آستر ابتدا باندهای ۱ تا ۹ ادغام شدند و سپس محدوده مورد مطالعه بریده شد. تصویر مذکور توسط نقشه‌های توپوگرافی و با نقاط کنترلی مانند تقاطع جاده یا آبراهه‌ها، به عنوان پیش پردازش، تصحیح هندسی شد. دیگر تصحیحات مقدماتی قبلاً بر روی تصویر اعمال شده بودند. کلیه پردازش‌ها توسط نرم‌افزار ENVI 4.7 صورت گرفته است. پردازش نهایی به روش طبقه‌بندی نظارت شده انجام شد. طبقه‌بندی نظارت شده یک روش چندطیفی برای دسته‌بندی پیکسل‌ها بر اساس خصوصیات طیفی مشابه آنهاست. در این روش اپراتور ویژگی کلاسه‌بندی را شخصاً انتخاب می‌کند (Sabins, 1999). روش نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) (Kruse et al., 1993) از جمله روش‌های مرسوم طبقه‌بندی نظارت شده است که با حداقل اختلاف زاویه طیفی پیکسل‌ها، موقعیت کانی‌ها را در تصویر مشخص می‌کند. از مزیت‌های این روش شناسایی دقیق نوع و محل کانی‌ها و گسترش و شدت آنها است.

در منطقه مورد مطالعه طیف‌های موجود در پیکسل‌های تصویر سنجنده آستر با کتابخانه طیفی دیجیتال سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) موجود در نرم‌افزار ENVI 4.7 (Clark et al., 1993) مورد مقایسه قرار گرفت. در این روش کانی مونت‌موریونیت و بعضاً ژپس بازسازی شد. برای آشکارسازی مونت‌موریونیت از انواع مختلف مونت-موریونیت موجود در کتابخانه طیفی استفاده شد تا بتوان بنتونیت نوع سدیک را از کلسیک تفکیک کرد.

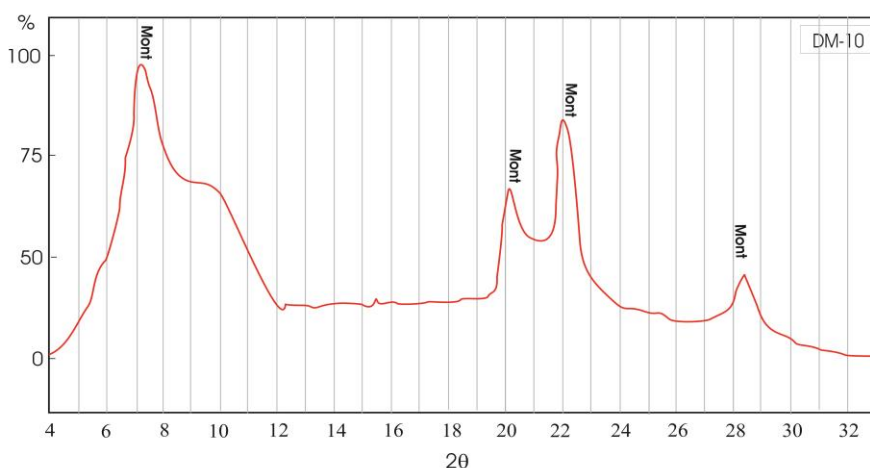
زمین‌شناسی

بنتونیت خوشاب در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشمر (طاهری و شمعیان، ۱۳۸۰) قرار دارد. سنگ‌های فراگیر منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا آندزیتی، توف سبز و توف‌های سبز آهکی و ماسه‌سنگ‌های توفی است. سنگ‌های آتشفشانی پیرامون بنتونیت بیشتر از نوع داسیت است. ماده معدنی توده‌ای شکل است و کمر بالای آن را توف

جدول ۱. مشخصات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نمونه‌های نماینده از بنتونیت ده محمد (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲)

درصد	DM-1	DM-2	DM-3	DM-6	DM-7	DM-8	DM-9	DM-10
SiO ₂	۶۳/۶۷	۶۹/۸۹	۶۹/۱۶	۶۶/۳۲	۷۲/۵۶	۶۴/۸۳	۶۷/۲۷	۶۵/۷۸
Al ₂ O ₃	۱۳	۱۳/۳۲	۱۲/۲۸	۱۱/۹۱	۱۲/۴۷	۱۱/۷۷	۱۱/۶۵	۱۴/۵۵
TiO ₂	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲۵
FeOt*	۱/۶۷	۱/۳۸	۱/۱۷	۱/۱۶	۱/۶۴	۱/۳۹	۱/۳۴	۱/۶۲
MgO	۳/۱۰	۲/۷۵	۲/۴۷	۲/۳	۲/۴۳	۲/۵۷	۳/۰۶	۳/۰۶
CaO	۰/۴۸	۰/۷۶	۰/۴۲	۲/۲۳	۰/۷۷	۰/۶۸	۲/۳	۰/۶
Na ₂ O	۳/۵۲	۲/۴۳	۲/۹۶	۲/۶۸	۳/۳	۲/۶۷	۲/۶۴	۲/۷۴
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-
L.O.I	۱۴/۳۳	۹/۲	۱۱/۲۸	۱۳/۱۵	۶/۵۱	۱۵/۸۱	۱۱/۵۱	۱۱/۳۷
مونت موریونیت	۸۵-۸۲	۷۵	۷۲	۷۲	۷۷	۸۲-۷۸	۷۶	۸۵
کریستوبالیت	۱۴	۲۶-۲۲	۲۶-۲۳	۲۵-۲۳	۲۵-۲۰	۲۰-۱۷	۲۷-۲۰	۲۰-۱۵
کلسیت	۰/۱	۰/۳۵	-	۳/۲	۰/۱	-	۳/۴	۰/۳
هالیت	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۱/۵	-	۰/۲۵	۱
میزان (CaO) (%)	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۴	۰/۴۳
مونت موریونیت								
میزان (Na ₂ O) (%)	۳	۱/۶۳	۱/۹	۰/۹۰۵	۲/۵	۲/۶۷	۲/۵	۲/۲۱
مونت موریونیت								

*FeOt=FeO+Fe₂O₃



شکل ۲. نمودار اشعه ایکس نمونه نماینده از بنتونیت ده محمد (کریم‌پور، ۱۳۷۸)

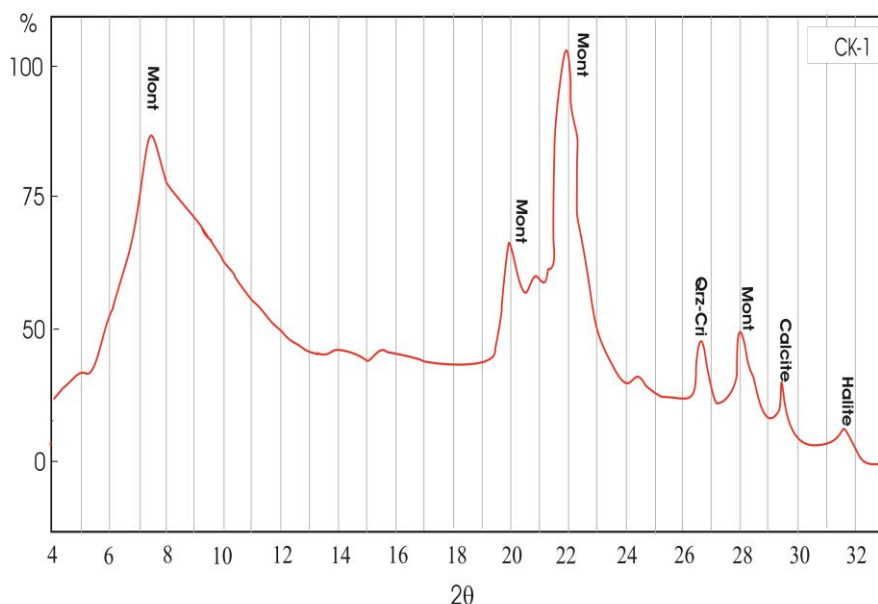
ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت منطقه چاه کشمیر در (جدول ۳) گزارش شده است. میزان مونت‌موریونیت ۳ نمونه اندازه‌گیری شده بین ۵۱ تا ۵۹ درصد و کلسیت یا وجود نداشته و یا کمتر از ۲/۳۱ درصد است. کانی‌هالیت نیز وجود ندارد یا کمتر از ۱/۲ درصد است. از ویژگی‌های بنتونیت چاه کشمیر بالا بودن مقدار ژپس است که بین ۳ تا بیش از ۵ درصد متغیر است (جدول ۳). براساس مقدار CaO (۰/۱ تا ۰/۱۱) و Na₂O (۰/۲۷ تا ۱/۳۹ درصد) محاسبه شده ۲ نمونه مونت‌موریونیت، بنتونیت چاه کشمیر از نوع سدیک است (جدول ۳) (نخعی، ۱۳۸۱). برگزیده نمودار دیفراکسیون اشعه ایکس نمونه‌های مطالعه شده منطقه چاه کشمیر در (شکل ۴) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است پیک مونت‌موریونیت در حدود 2θ برابر با ۷/۲ ظاهر شده است.

ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت منطقه چاه کم در (جدول ۲) گزارش شده است. میزان مونت‌موریونیت نمونه‌ها بین ۷۲ تا ۸۳ درصد و کریستوبالیت ۱۷ تا ۲۷ درصد است. میزان کربنات کلسیم و هالیت این گروه به ترتیب غالباً کمتر از ۵ و ۳ درصد است (جدول ۲). براساس مقدار CaO (۰/۴۶ تا ۱/۱۵ درصد) و Na₂O (۱/۷۵ تا ۲/۷۴ درصد) محاسبه شده مونت‌موریونیت، بنتونیت چاه کم از نوع سدیم‌دار است. میزان MgO نمونه‌ها بین ۱/۸ تا ۲/۵ درصد، FeOt بین ۱/۵ تا ۲/۳۵ درصد و K₂O بین ۰/۰۷ تا ۰/۲۵ درصد متغیر است (جدول ۲) (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲). برگزیده نمودار دیفراکسیون اشعه ایکس نمونه‌های مطالعه شده منطقه چاه کم در (شکل ۳) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است پیک مونت‌موریونیت در حدود 2θ برابر با ۷/۵ ظاهر شده است.

جدول ۲. مشخصات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نمونه‌های نماینده از بنتونیت چاه کم (کریم‌پور، ۱۳۷۸؛ کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۲)

در صد	CK-1	CK-2	CK-3	CK-4	CK-5	CK-6	CK-7	CK-8	CK-9	CK-10
SiO ₂	۶۸/۲۸	۶۶/۷۴	۶۴/۹۸	۶۸/۰۳	۷۰/۴۷	۶۷/۱۳	۶۷/۱۳	۶۷/۳۴	۶۵/۵۵	۶۴/۹۱
Al ₂ O ₃	۱۲/۴۱	۱۴/۹۹	۱۳/۸۲	۱۲/۴۵	۱۳/۲۵	۱۳/۲۴	۱۳/۲۴	۱۳/۵۴	۱۲/۷۷	۱۳/۷۲
TiO ₂	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۹	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۶
FeOt*	۱/۵۷	۲/۳۵	۱/۸۶	۱/۶۷	۱/۹۴	۱/۸۹	۱/۸۹	۲/۰۲	۱/۹۵	۲/۲۲
MgO	۱/۹۱	۲/۵۵	۲/۳۷	۲/۱۳	۲/۲۴	۲/۰۷	۲/۰۷	۲/۰۸	۲/۱	۱/۸۸
CaO	۱/۵۳	۱/۷۴	۱/۴۳	۱/۷۵	۲/۰۳	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۳۷	۳/۱	۲/۸۱
Na ₂ O	۲/۹۶	۳/۳۳	۳/۱۸	۳/۴۳	۲/۴۴	۲/۸۸	۲/۸۸	۲/۸۵	۲/۸	۲/۱۴
K ₂ O	۰/۲۳	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۲	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱۴	۰/۰۹
L.O.I	۱۰/۹۲	۷/۹۸	۱۲/۱۵	۱۰/۱۴	۷/۱۶	۱۱/۵۷	۱۱/۵۷	۱۰/۵۲	۱۱/۴۱	۱۲/۰۴
مونت موریونیت	۷۵	۸۳	۸۰	۷۵	۷۵	۷۵-۷۰	۷۵	۸۰	۷۲	۷۰
کریستوبالیت و کوارتز	۲۴-۲۰	۱۵-۱۳	۱۷-۱۲	۲۳-۲۰	۲۵-۲۰	۲۳-۲۰	۲۳	۲۰-۱۸	۲۷-۲۴	۲۸-۲۵
کلسیت	۱/۹	۱/۷	۵	۱/۸	۲/۲	-	۰/۵۶	۰/۸	۳/۹	۳/۵
هالیت	۱/۴	۱/۱	۱/۵	۳	۰/۴۲	۰/۵	-	۰/۵۶	۱/۴	۰/۳
میزان مونت موریونیت (%CaO)	۰/۴۶	۰/۸۴	۱/۱۵	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۹۸	۰/۶۶	۰/۸۲	۰/۹۲	۰/۸۵
میزان مونت موریونیت (%Na ₂ O)	۲/۲۳	۲/۷۴	۲/۵۴	۱/۷۵	۲/۲۳	۲/۶	۲/۷۴	۱/۷۵	۲/۰۶	۱/۹۸

*FeOt=FeO+Fe₂O₃

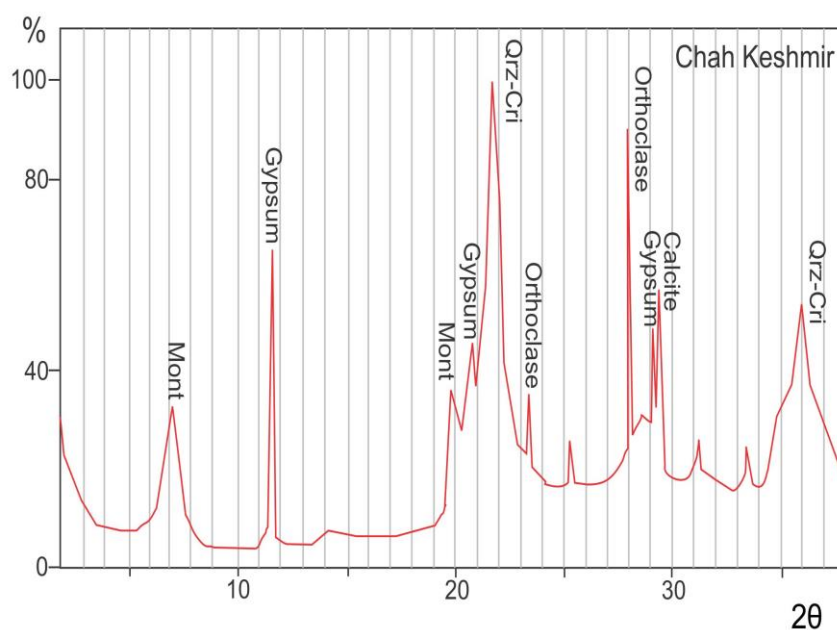


شکل ۳. نمودار اشعه ایکس نمونه نماینده از بنتونیت چاه کم (کریم‌پور، ۱۳۷۸)

جدول ۳. مشخصات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نمونه‌های نماینده از بنتونیت چاه کشمیر (نخعی، ۱۳۸۱)

درصد	CH-K1	CH-K2	CH-K3	CH-K4	CH-K5	CH-K6	CH-K8
SiO ₂	۶۹/۲۸	۶۶/۸۸	۶۹/۸۸	۷۰/۲۲	۶۸/۲۷	۶۸/۲۵	۶۳/۰۷
TiO ₂	-	-	-	-	۰/۲۴	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	۰/۲۴	-	-
FeOt*	۱	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۹۷	۱/۱۵	۰/۹۸	۰/۷۲
MgO	۱	۰/۹	۰/۸۱	۰/۹۶	۱/۱۱	۰/۹۵	۰/۷
CaO	۰/۹۳	۰/۳۸	۱/۱۴	۱/۲۵	۳/۲۹	۲/۰۵	۲/۴۴
Na ₂ O	۲/۴۷	۳/۱۴	۲/۳۷	۲/۳۹	۱/۳۹	۲/۲۸	۲/۲۴
K ₂ O	-	-	-	۰/۰۵	-	-	-
LOI	۱۳/۴۸	۱۶/۲	۱۲/۸۱	۱۲/۲۶	۱۲/۴۶	۱۳/۸۷	۱۹/۵۸
مونت موریونیت					۵۱ درصد	۵۷ درصد	۵۹ درصد
کریستوبالیت					دارد	دارد	دارد
کلسیت					۲/۳۱ درصد	ندارد	ندارد
ژئپس					۳/۸ درصد	۵/۳ درصد	۳/۱ درصد
هالیت					ندارد	۱/۱ درصد	۱/۲۷ درصد
میزان (CaO) / مونت موریونیت					۰/۵۶	۰/۱	
میزان (Na ₂ O) / مونت موریونیت					۱/۳۹	۰/۲۷	

*FeOt=FeO+Fe₂O₃



شکل ۴. نمودار اشعه ایکس نمونه نماینده از بنتونیت چاه کشمیر (نخعی، ۱۳۸۱)

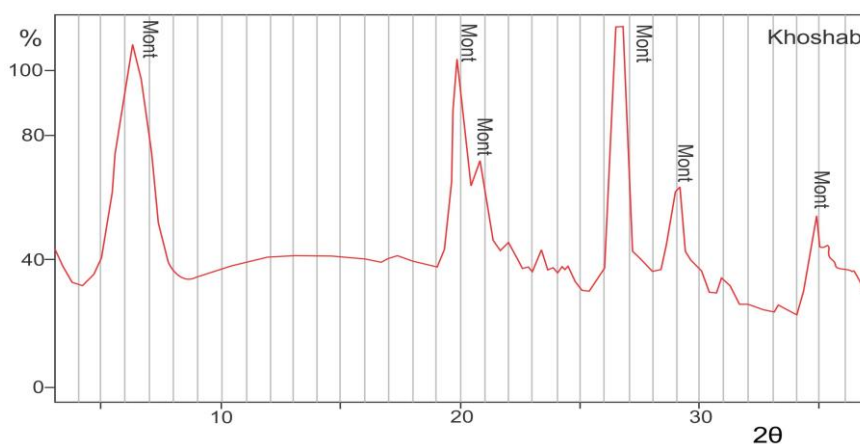
بنتونیت خوشاب از نوع کلسیم دار معرفی شده است (حجازی و قربانی، ۱۳۷۳). برگزیده نمودار دیفرانسیون اشعه ایکس نمونه‌های مطالعه شده منطقه خوشاب در (شکل ۵) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است پیک مونتموریونیت برخلاف معادن ده محمد، چاه کم و چاه کشمیر در حدود 20 برابر با ۶/۳ ظاهر شده است.

ترکیب شیمیایی نمونه بنتونیت منطقه خوشاب در (جدول ۴) گزارش شده است. همانطور که مشخص است مقدار CaO برخلاف بنتونیت دیگر ذخایر مورد مطالعه که کمتر از ۴ درصد می‌باشد، در نمونه خوشاب بیش از ۱۰ درصد است. ترکیب کانی‌شناسی بنتونیت خوشاب شامل مونتموریونیت، کلسیت و مقدار کمی کوارتز است. مونتموریونیت،

جدول ۴. مشخصات کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نمونه‌ای نماینده از بنتونیت خوشاب (حجازی و قربانی، ۱۳۷۳)

درصد	Kh-1
SiO_2	۴۱/۶
TiO_2	-
Al_2O_3	۱۴/۳۴
FeOt^*	۴/۹۵
MgO	۲/۹۷
CaO	۱۰/۵۷
Na_2O	۱/۷۸
K_2O	۰/۲۸
LOI	۲۴/۱۴

* $\text{FeOt} = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$



شکل ۵. نمودار اشعه ایکس نمونه نماینده از بنتونیت خوشاب

امواج VNIR شامل باندهای ۱، ۲ و ۳ با قدرت تفکیک ۱۵ متر؛ ۲- محدوده امواج SWIR شامل باندهای ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ با قدرت تفکیک ۳۰ متر؛ و ۳- محدوده امواج TIR شامل باندهای ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴ با قدرت تفکیک ۹۰ متر. محدوده امواج SWIR یا فرورسرخ موج کوتاه مهمترین محدوده برای شناسایی کانی‌های رسی است. یون هیدروکسیل باعث ایجاد جذب اساسی ارتعاشی در محدوده ۲/۱۶-۲/۳۶ میکرومتر و هارمونیک در ۱/۴۴ میکرومتر می‌شود. هر دو اشکال بنیادی و هارمونیک با اشکال مشاهده شده در مولکول‌های آب تداخل دارند. اما زمانی که مولکول‌های هیدروکسیل با آلومینیوم و منیزیم بصورت (Al-OH) و (Mg-OH) ترکیب شوند (رس‌ها و سیلیکات‌های آبدار)، چندین جذب شدید در محدوده ۲/۱-۲/۴ میکرومتر نشان می‌دهند. اگر گروه هیدروکسیل با آلومینیوم (Al-OH) ترکیب شود، محدوده جذب در ۲/۲ میکرومتر قرار می‌گیرد و در ترکیب با منیزیم (Mg-OH) جذب در ۲/۳

پردازش تصاویر سنجنده آستر

همانطور که در بخش مقدمه گفته شد، مهمترین بخش بنتونیت را کانی‌های رسی گروه اسمکتیت تشکیل می‌دهند. کانی‌های رسی و سیلیکات‌های صفحه‌ای به علت دارا بودن (Al-OH) و (Mg-OH) ، به راحتی توسط پردازش تصاویر چند طیفی ماهواره‌ای آشکار می‌شوند. طیف‌سنج بازتابی و گرمایی فضا برد پیشرفته (Aster) یکی از بهترین و موفقترین سنجنده‌ها برای نقشه‌برداری کانی‌های رسی و تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در سال‌های اخیر بوده است (نجفیان و همکاران، Ninomiya, 2004; Rowan et al., 2005; 2006; ۱۳۹۱ Tommaso and Rubinstein, 2007; Abdi and Karimpour, 2013; Malekzadeh Shafaroudi and Karimpour, 2013). آستر شامل ۱۴ باند است که با توجه به محدوده طول موج به سه دسته تقسیم می‌شوند (Fujisada et al., 2001) (جدول ۵): ۱- محدوده

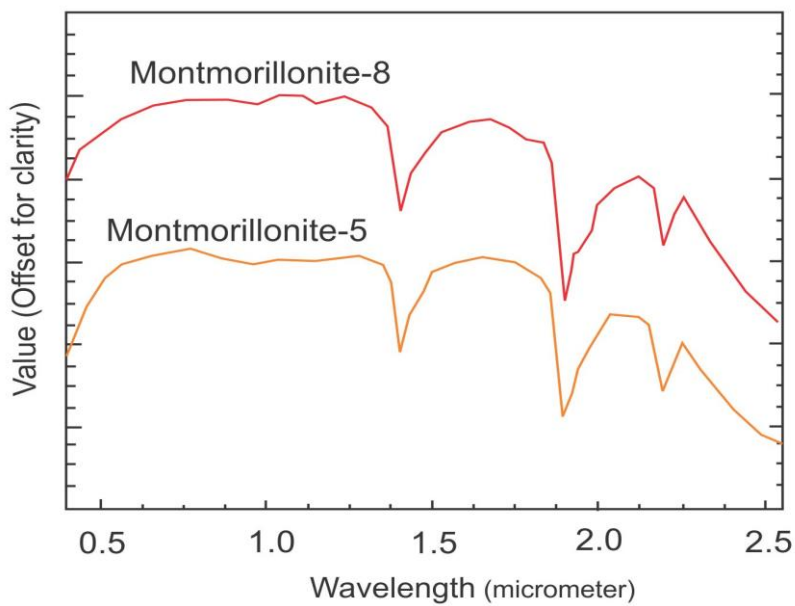
با توجه به اینکه ترکیب کانی‌شناسی مونت‌موریونیت مناطق ده محمد، چاه کم و چاه کشمیر از نوع سدیک و منطقه خوشاب از نوع کلسیک بوده است و با عنایت به گسترش و وسعت بنتونیت در محدوده‌های مورد مطالعه، از طیف‌های مختلف کانی مونت‌موریونیت در کتابخانه طیفی استفاده شد. در این بررسی مشخص شد که گسترش و موقعیت بنتونیت غنی از سدیم ده محمد، چاه کم و چاه کشمیر توسط طیف مونت‌موریونیت (۵) با کد مشخص شده *montmor5.spc Monmorillonite* (شکل ۶) و بنتونیت غنی از کلسیم خوشاب توسط طیف *montmor8.spc* (شکل ۷) و بنتونیت غنی از کلسیم خوشاب توسط طیف *montmor1.spc Monmorillonite* (شکل ۸) به بهترین شکل بارز می‌شود. تفاوت بسیار جزئی در طیف جذبی-انعکاسی مونت‌موریونیت (۵) با (۸) وجود دارد که به ترکیب شیمیایی متفاوت آن دو مربوط می‌شود (شکل ۶). وسعت و موقعیت بنتونیت آشکار شده در معادن ده محمد، چاه کم، چاه کشمیر و خوشاب به ترتیب در (شکل‌های ۷-۱۰) نشان داده شده است.

میکرومتر اتفاق می‌افتد. در کانی‌هایی مانند کائولینیت که هر دو پیوند (Al-OH) و (Mg-OH) وجود دارد، جذب شدیدی در $2/3$ میکرومتر و ضعیف‌تری در $2/2$ دیده می‌شود، ولی مونت‌موریونیت و مسکوویت به دلیل حضور (Mg-OH) فقط دارای یک باند جذب در $2/3$ میکرومتر هستند. جانشینی آهن به جای آلومینیوم و منیزیم در ساختمان رس‌ها باعث کاهش شدت باندهای (Al-OH) ($2/2$ میکرومتر) و یا (Mg-OH) ($2/3$ میکرومتر) و افزایش باندهای الکترونی آهن در محدوده $1-0/4$ میکرومتر می‌شود (Gupta, 1991).

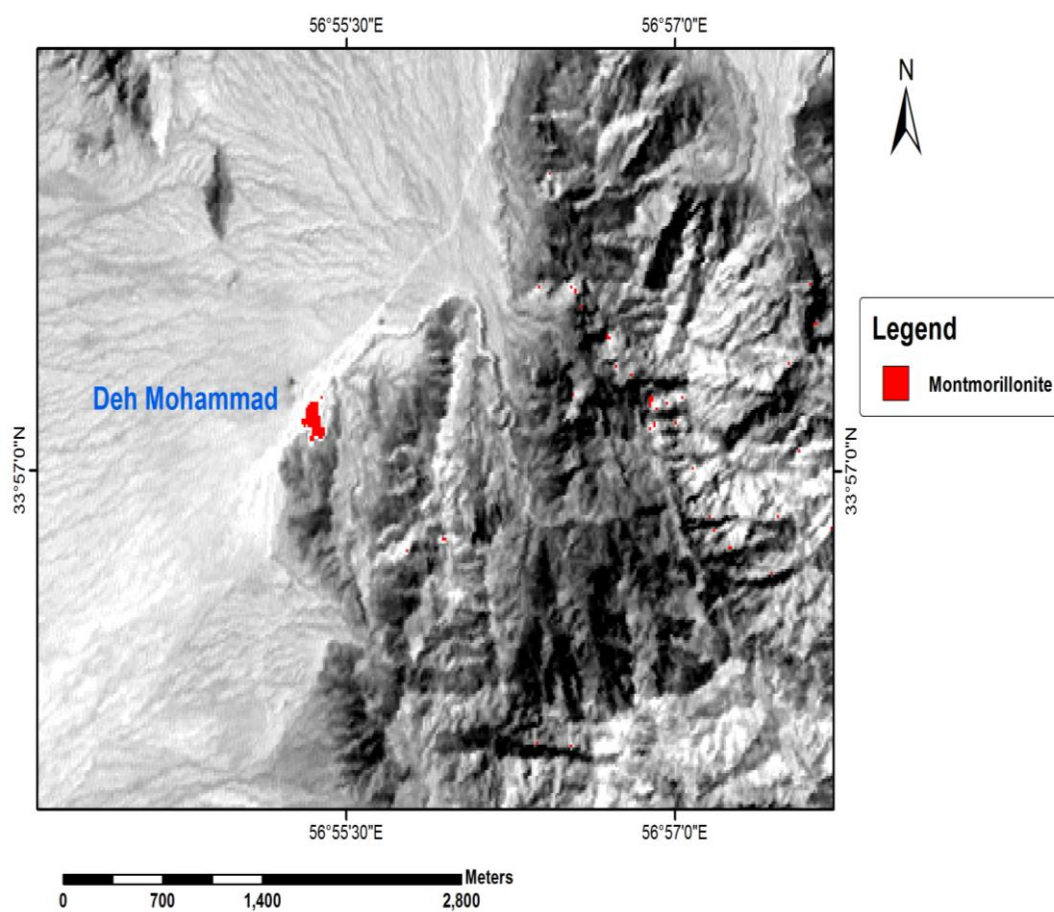
تصویر سنجنده آستر در محدوده ۴ معدن بنتونیت ده محمد، چاه کم، چاه کشمیر و خوشاب، با استفاده از طیف‌های موجود در کتابخانه طیفی دیجیتال سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) موجود در نرم‌افزار ENVI 4.7 (Clark et al., 1993) به روش SAM پردازش شد. در این روش از طیف کانی‌های مونت‌موریونیت و بعضاً ژئپس استفاده شد و حداقل اختلاف زاویه طیفی پیکسل‌های تصویر با آنها به شکل هوشمندانه و با آگاهی از زمین‌شناسی منطقه مد نظر قرار گرفت.

جدول ۵. مشخصات سنجنده آستر (Fujisada et al., 2001)

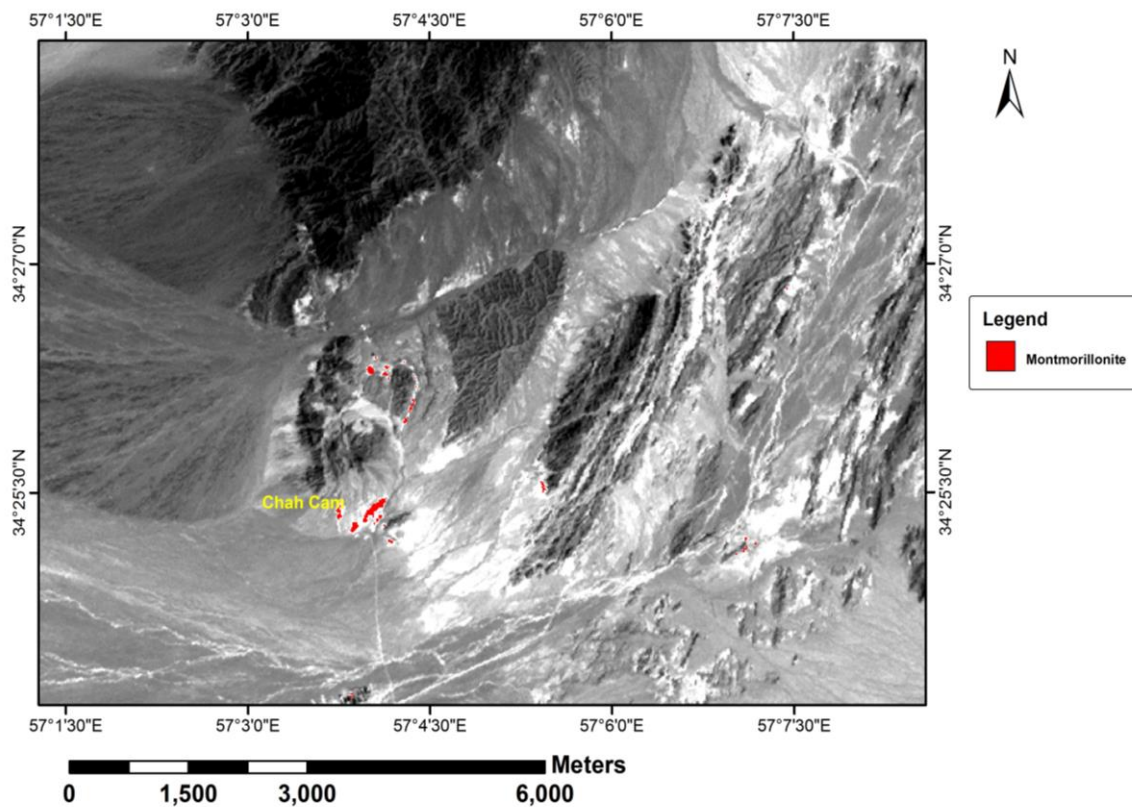
شماره باند	دامنه طول موج (μm)	قدرت تفکیک مکانی (m)
VNIR	1	۰/۵۲-۰/۶۰
	2	۰/۶۳-۰/۶۹
	3N	۰/۷۸-۰/۸۶
	3B	۰/۷۸-۰/۸۶
SWIR	4	۱/۶۰۰-۱/۷۰۰
	5	۲/۱۴۵-۲/۱۸۵
	6	۲/۱۸۵-۲/۲۲۵
	7	۲/۲۳۵-۲/۲۸۵
	8	۲/۲۹۵-۲/۳۶۵
	9	۲/۳۶۰-۲/۴۳۰
	TIR	10
11		۸/۴۷۵-۸/۸۲۵
12		۸/۹۲۵-۹/۲۷۵
13		۱۰/۲۵-۱۰/۹۵
14		۱۰/۹۵-۱۱/۶۵



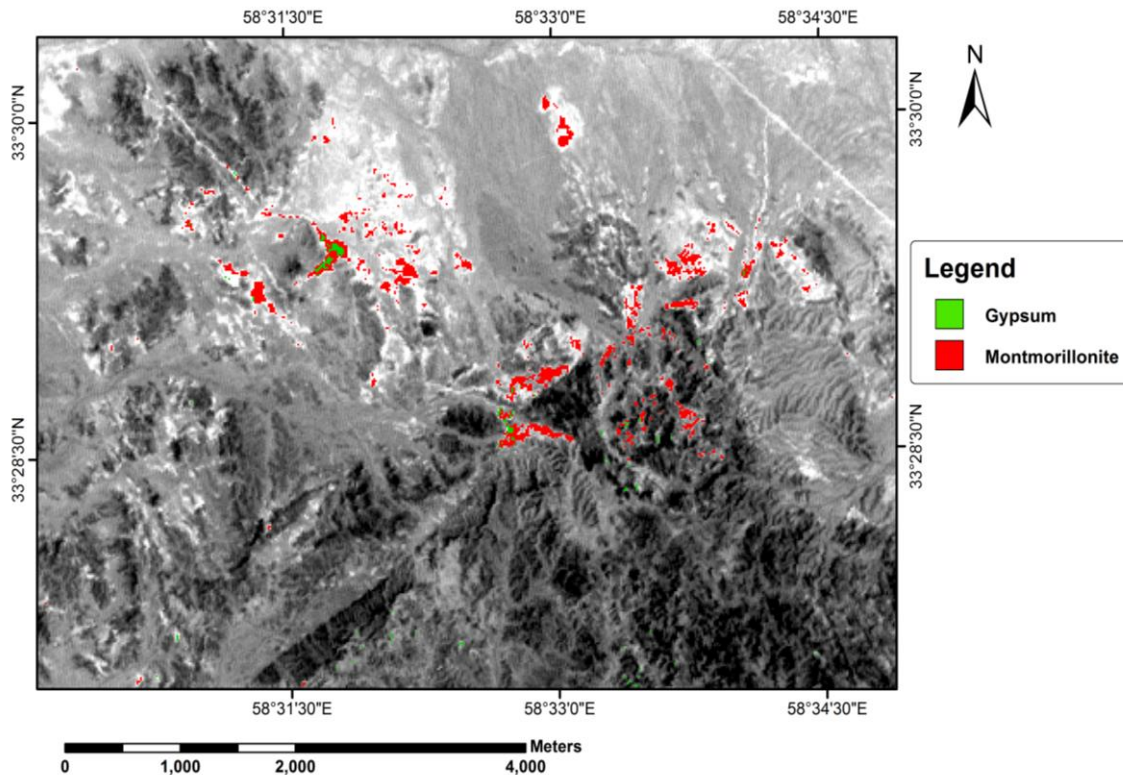
شکل ۶. طیف مونت‌موریونیت‌های استفاده شده در پردازش مناطق ده محمد، چاه کم، چاه کشمیر و خوشاب



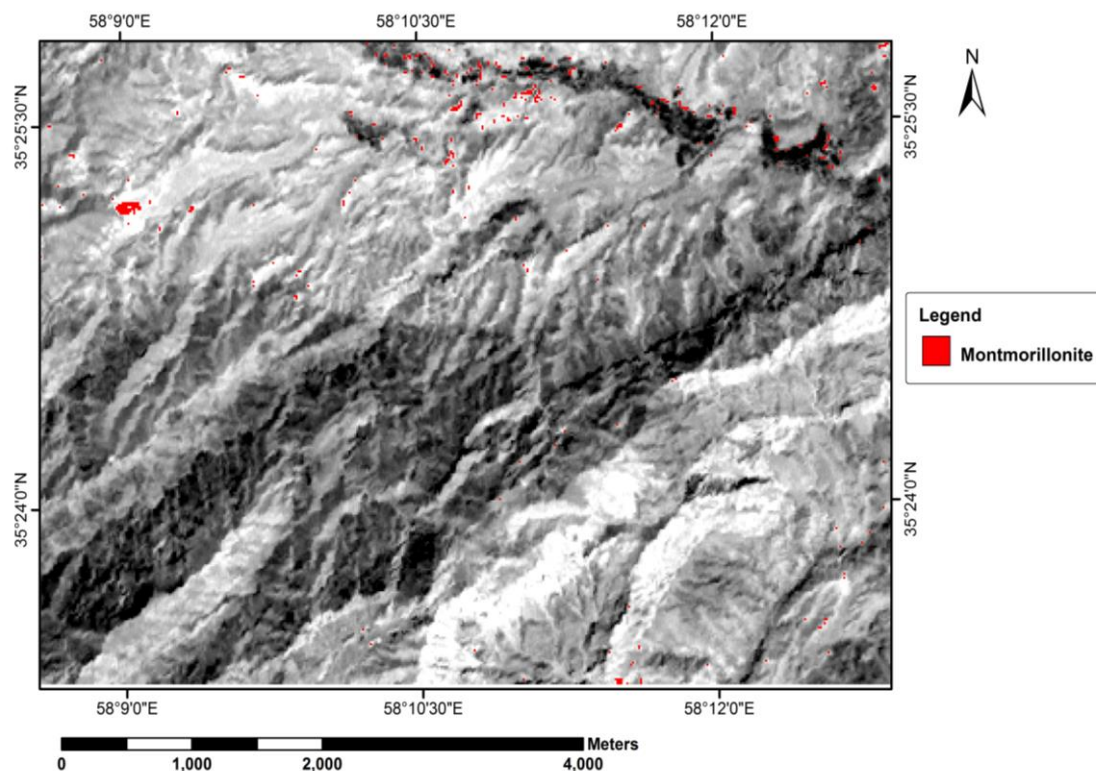
شکل ۷. پردازش تصویر آستر به روش SAM برای کانی مونت‌موریونیت (۵) در منطقه ده محمد قرار گرفته بر روی باند ۱



شکل ۸. پردازش تصویر آستر به روش SAM برای کانی مونتموریونیت (۵) در منطقه چاه کم قرار گرفته بر روی باند ۱



شکل ۹. پردازش تصویر آستر به روش SAM برای کانی‌های مونتموریونیت (۵) و ژیبس در منطقه چاه کشمیر قرار گرفته بر روی باند ۱



شکل ۱۰. پردازش تصویر آستر به روش SAM برای کانی مونت‌موریونیت (۸) در منطقه خوشاب قرار گرفته بر روی باند ۱

نتیجه‌گیری

بنتونیت‌ها بدلیل خواص نرم بودن، تورم‌پذیری، کلئیدی و خوب مخلوط شدن با آب، خمیری شدن، پلاستیک بودن، چسبندگی و چسبانندگی، جاذب بودن و... دارای مصارف پرشماری در صنایع مختلف هستند که از آن جمله می‌توان به گل‌حفاری، عامل چسباننده در ماسه‌های ریخته‌گری، عامل جلوگیری‌کننده از نفوذ آب از سدها و کانال‌ها و استخرهای آب، عامل شفاف‌کننده مایعات بخصوص آب‌میوه‌ها، زلال کردن آب و صاف کردن مایعات از جمله پارافین، گندوله کردن مواد معدنی از جمله سنگ آهن، گلوله کردن غذای دام و حیوانات اهلی، ناقل در رنگ‌ها و سایر مواد اسپری شدنی چون سموم گیاهی و حیوانی، پرکننده در خیلی از صنایع از جمله کاغذ و رنگ و غیره، صنایع پاک‌کننده و دفع آفات نباتی، صنایع داروسازی، بعنوان فیلتر، کاتالیزور، رنگبری روغن‌های صنعتی و نفتی و خوارکی، جداکردن صمغ از بنزین و لیجن‌های اسیدی از روغن‌ها، آتش‌نشانی، در معادن زغال سنگ جهت فرو نشانیدن آتش و یا برای پوشش محل‌های استخراج شده جهت ممانعت از ورود هوا و ممانعت از خود سوزی زغال اشاره نمود.

آنچه کاربرد صنعتی بنتونیت در یک ذخیره خاص را مشخص می‌کند، ترکیب شیمیایی مونت‌موریونیت تشکیل دهنده ساختار بنتونیت است که می‌تواند از نوع غنی از سدیم تا سدیم-کلسیم‌دار، کلسیم-سدیم‌دار و غنی از کلسیم تغییر کند. برای تشخیص نوع مونت‌موریونیت، آزمایش‌های XRD و XRF همراه با روش‌های تجزیه شیمی‌تر بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود تا بتوان با محاسبات لازم، مقدار CaO و Na_2O مونت‌موریونیت را محاسبه نمود. اما با بدست آوردن تجربه و محاسبات فراوان نیز بر روی

نمونه‌های مختلف می‌توان به راهکارهای ساده‌تری برای تشخیص نوع بنتونیت دست پیدا کرد. برای مثال مقدار زاویه 2θ که اولین پیک کانی مونت‌موریونیت در گراف اشعه X در آن ظاهر می‌شود، می‌تواند بازگو‌کننده مقدار Na_2O آن باشد. بطوریکه اولین پیک مونت‌موریونیت نوع سدیک معمولاً در محدوده $2\theta = 7.2-8$ دیده می‌شود، درحالیکه در مونت‌موریونیت نوع سدیک-کلسیک این اتفاق در $2\theta = 6.9-7.3$ و در نوع کلسیک-سدیک در $2\theta = 6.5-6.9$ به وقوع می‌پیوندد. اولین پیک مونت‌موریونیت نوع کلسیک در $2\theta < 6.5$ ظاهر می‌گردد (شکل ۱۱). این موضوع در گراف‌های پراش اشعه X بنتونیت‌های ده محمد، چاه کم، چاه کشمیر و خوشاب کاملاً مشخص است (شکل‌های ۲ تا ۵).

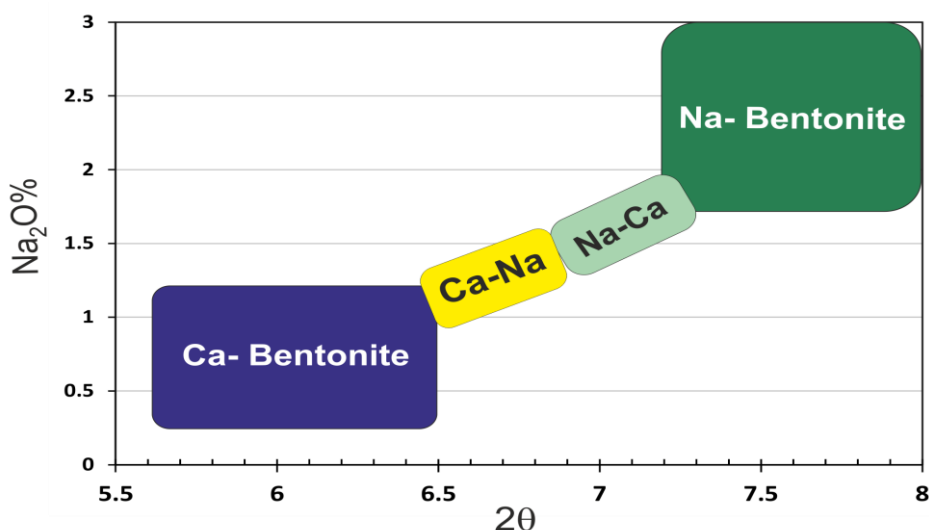
همچنین مطالعات این پروژه در بنتونیت‌های شناخته شده ده محمد، چاه کم، چاه کشمیر و خوشاب نشان داد که استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند پردازش تصاویر ماهواره به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی، بخوبی قادر است تا بدون نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر، نوع مونت‌موریونیت را مشخص کند. بر این اساس طیف مونت‌موریونیت (۵) موجود در کتابخانه طیفی دیجیتال سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) برای تشخیص بنتونیت نوع سدیک و طیف مونت‌موریونیت (۸) برای شناسایی بنتونیت نوع کلسیک مفید است.

شرق ایران به دلیل وقوع فعالیت‌های آتشفشانی عظیم که ناشی از فرورنده شدن بلوک افغان به زیر بلوک لوت در ترشیری بوده است، پتانسیل بالایی برای تشکیل ذخایر بنتونیت دارد. از طرفی آب و هوای گرم و خشک و طبیعت کوهستانی، شرایط مناسبی را برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای و اکتشاف کانسارهای مختلف در نقاط دورافتاده و کویری مهیا

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۲/۲۹۰۶۳ مورخ ۱۳۹۲/۱۰/۳ انجام شده است.

نموده است. لذا به کمک نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان بنتونیت سدیک و کلسیک را در قسمت‌هایی که فاقد راه دسترسی مناسب هستند، شناسایی نمود و اقدامات اکتشافی تفصیلی زمینی را برای آنها برنامه ریزی کرد.



شکل ۱۱. ارتباط بین مقدار Na_2O موجود در ساختار مونت‌موریونیت با مقدار زاویه 2θ که اولین پیک آن در گراف پراش اشعه X ظاهر می‌شود. نوع بنتونیت براساس زاویه 2θ مشخص می‌شود.

منابع

- حجازی. م.، قربانی. م.، ۱۳۷۳، زمین‌شناسی ایران (کانسارهای بنتونیت و زئولیت)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۰۸ صفحه.
- روشن روان. ج.، ۱۳۸۵، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موسویه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سازمان صنعت، معدن و تجارت استان خراسان رضوی، ۱۳۸۱، آمار معادن استان خراسان.
- طاهری. ج.، شمعیان. ق.، ۱۳۸۰، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کاشمر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریمی باوندی. ع.، حاجی حسینی. الف.، ۱۳۸۱، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طبس، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۷۸، کانی‌شناسی ۷۲ نمونه بنتونیت از معادن ده محمد، شیرگشت، چاه کم (۱) و چاه کم (۲)، گزارش طرح تحقیقاتی و مطالعاتی اداره کل معادن و فلزات استان خراسان، ۱۰۲ صفحه.
- کریم‌پور. م.ح.، ۱۳۸۱، کانی‌ها و سنگ‌های صنعتی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۹۶ صفحه.
- کریم‌پور. م.ح.، راشد. ع.الف.، ارتضا. ح.، ۱۳۸۲، ترکیب شیمیایی، کانی‌شناسی و کاربرد بنتونیت‌های ده محمد، چاه کم-۱، چاه کم-۲ و شیرگشت (خراسان و یزد)، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، شماره ۱ (۱۱)، ص ۱۵-۲۷.
- کریم‌پور. م.ح.، ملک‌زاده شفاوردی. الف.، فارمر. ل.، استرن. ج.، ۱۳۹۱، پتروژنز گرانیتوئیدها، سن سنجی زیرکن به روش U-Pb، ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr- Nd و رخداد مهم کانی‌سازی ترشیری در بلوک لوت، شرق ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۱ (۴)، ص ۱-۲۷.
- نجفیان. ط.، فتحیان پور. ن.، رنجبر. ح.ا.، بخش‌پور. ر.، ۱۳۹۱، شناسایی پدیده‌های طیفی ناشناخته از داده‌های تلفیقی تصاویر ماهواره‌ای ALI+ASTER و ابرطیفی Hyperion بر مبنای روش ضریب همبستگی: مطالعه موردی محدوده معدنی مس سرچشمه، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵، ص ۵۹-۶۸.
- نخعی. م.، ۱۳۸۱، ژئوشیمی و کانی‌شناسی بنتونیت‌های خراسان و مطالعه مصرف آنها در صنعت ریخته‌گری (در مناطق فردوس، بیرجند، قائنات و طبس)، پایان نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۴۵ صفحه.
- نماینده. ع.ر.، مدبری. س.، رنجبران. م.، ۱۳۹۱، بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمی معدن بنتونیت چاه گلستان سرایان، خراسان جنوبی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۵، ص ۶۹-۷۹.

- Abdi. M., Karimpour. M.H., 2013, Application of Spectral Angle Mapper classification to discriminate hydrothermal alteration in SW Birjand, Iran, using ASTER image processing, Acta Geologica Sinica, Vol. 86, No. 5, p. 1289-1296.
- Abichou. T., Benson. C., Edile. t., 2000, Foundry green sands as hydraulic barriers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 126, p. 1174-1183.
- Brown. et al., 2013, World Mineral Production 2007-11, British Geological Survey, Nottingham, England. <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>

- Clark. R.N., Swayze. G.A., Gallagher. A., King. T.V.V., Calvin. W.N., 1993, The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library, Version 1:0.2 to 3 μ m, United States Geological Survey, Open File Report 93-592. 1326 pp.
- Fujisada. H., Iwasaki. A., Hara. S., 2001, ASTER stereo system performance. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 4540, Toulouse, p. 39-49.
- Gupta. R.P., 1991, Remote sensing geology, Springer- Verlag, Heidelberg.
- Guyonnet. D., Gaucher. E., Gaboriau. H., Pons. C., Clinard. C., Norotte. V., Didier. G., 2005, Geosynthetic Clay Liner Interaction with Leachate, Correlation between Permeability, Microstructure, and Surface Chemistry, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 6, p. 740-751.
- Karnland. O., Olsson. S. Nilsson. U., 2006, Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay materials, SKB Technical Report TR-06-30, Stockholm, Sweden.
- Komadel. J., Buidak. J., Madejova. V., Elsass. F., 1996, Effects of non-swelling layers on the dissolution of reduced-charged montmorillonite in hydrochloric acid, Clay Minerals, Vol. 31, p. 333-345.
- Kruse. F.A., Lefkoff. A.B., Boardman. J.B., Heidebreicht. H.K.B., Shapiro. A.T., Barloon. P.J., Goetz. A.F.H., 1993, The Spectral Image Processing System (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data, Remote Sensing of Environment, Vol. 44, p. 145-163.
- Malekzadeh Shafaroudi. A., Karimpour. M.H., 2013, Hydrothermal alteration mapping in northern Khur, Iran, using ASTER image processing: a new insight to the type of copper mineralization in the area, Acta Geologica Sinica, Vol. 87, No. 3, p. 830-842.
- Murry. M., Haydn. H., 2000, Tradition and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite, Applied Clay Science, Vol. 17, p. 207-221.
- Noble. A.D., Ruaysoongnern. S., Penning de Vries. F.W.T., Hartmann. C., Webb. M.J., 2004, Enhancing the agronomic productivity of degraded soils in North-east Thailand through clay-based interventions. In Seng. V., Craswell. E., Fukai. S., Fischer. K., eds., Water and Agriculture, Proceedings No. 116, ACIAR, Canberra, pp. 147-160.
- Noble. A.D., Gillman. G.P., Nath. S., Srivastava. R.J., 2001, Changes in the surface charge characteristics of degraded soils in the wet tropics through the addition of beneficiated bentonite, Australian Journal of Soil Research. Vol. 39, No. 5, p. 991-998.
- Ninomiya. Y., 2004, Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data, Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 5234, p. 180-190.
- Pusch. R., Madsen. F., 1995, Aspects on the illitization of the kinnekulle bentonite, Clay and Clay Minerals, Vol. 43, p. 261-270.
- Rhodes. C.N., Brown. D.R., 1993, Surface properties and porosities of silica and acid-treated montmorillonite catalyst support: influence on activities of supported ZnCl₂ catalysts, Journal of Chemical Society, Faraday Transaction, Vol. 89, p. 1387-1391.
- Rowan. L.C., Mars. J.C., Simpson. C.J., 2005, Lithologic mapping of the Mordor, NT, Australia ultramafic complex by using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Remote Sensing of Environment, Vol. 99, p. 105-126.
- Rowan. L.C., Schmidt. R.G., 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, Vol. 104, p. 74-87.
- Ruttner. A., Nabavi. M.H., Hajian. J., Alavi Naini. M., 1994, Eshghabad Geological Quadrangle Map 1:100000, No. 7458, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Sabins. F.F., 1999, Remote sensing for mineral exploration, Ore Geology Reviews, Vol. 14, p. 157-183.
- Suzuki. S., Noble. A., Ruaysoongnern. S., Chinabut. N., 2007, Improvement in Water-Holding Capacity and Structural Stability of a Sandy Soil in Northeast Thailand, Arid Land Research and Management, Vol. 21, p. 37-50.
- Takagi. T., Koh. S.M., Song. M.S., Itoh. M., Mog. K., 2005, Geology and properties of the Kawasaki and Dobuyama bentonite deposits of Zao region in northeastern Japan, Clay Minerals, Vol. 40, p. 333-350.
- Tommaso. I.D., Rubinstein. N., 2007, Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina, Ore Geology Reviews, Vol. 32, p. 275-290.