



سنگش از دور

و

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS  
سال دوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۹  
Vol.2, No.4, Winter 2011  
۰۷-۷۰

## شناسایی پلی مورف‌های آلومینوسیلیکات ( $Al_2SiO_5$ ) با استفاده از طیف‌سنج Field Spec®3 در منطقه همدان

کاظم رنگزن\*<sup>۱</sup>، عادل ساکی<sup>۲</sup>، عظیم صابری<sup>۳</sup>، حسین حسن‌شاهی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار دورسنجی کاربردی، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲. استادیار پترولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید چمران اهواز
۳. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، مربی گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز
۴. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۵/۱۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۹/۸

### چکیده

مطالعه آلومینوسیلیکات ( $Al_2SiO_5$ ) آندالوزیت، کیانیت و سیلیمانیت، از جنبه‌های اقتصادی و همچنین شرایط تشکیل آنها اهمیت دارد. به منظور مطالعه طیف مربوط به این پلی مورف‌ها، منطقه دگرگونی هاله الوند همدان و رگه‌های سیلیسی دارای این آلومینوسیلیکات‌ها انتخاب شده است. برای نیل به این هدف پس از مطالعات صحرائی و پتروگرافی نمونه‌ها، آنالیز طیف‌سنجی با دستگاه Field Spec®3 صورت گرفت و براساس نتایج به دست آمده، به طبقه‌بندی و آنالیز داده‌ها پرداخته شد. بر این اساس، پلی مورف‌های آلومینوسیلیکات با توجه به ترکیب شیمیایی یکسان، دارای باندهای جذبی مشابه‌اند ولی عمق جذبی متفاوتی در محدوده مادون قرمز دارند و ضمناً میزان بازتابندگی (Reflectance) آنها نیز متفاوت است. با توجه به اینکه هر یک از این سه پلی مورف در شرایط خاص دما و فشار به وجود می‌آیند و ساختار فیزیکی خاص خود را دارند، این تفاوت موجود در میزان بازتاب با ساختار فیزیکی این پلی مورف‌ها مستقیماً مرتبط است. در این زمینه، میزان بازتاب سیلیمانیت بیشتر از کیانیت است، و میزان بازتاب کیانیت هم بیشتر از آندالوزیت. همچنین این سه پلی مورف از نظر مقدار عمق جذب در محدوده باندهای جذبی‌شان مورد بررسی قرار گرفتند، که مقدار عمق جذب کیانیت کمتر از سیلیمانیت و آندالوزیت بوده و مقدار عمق جذب سیلیمانیت تنها در ۹۵۰ و ۱۴۰۴ نانومتر کمتر از آندالوزیت بوده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، علت وجود هر یک از باندهای جذب در این سه پلی مورف، وجود عناصر و ترکیبات خاص در ترکیب کانی‌شناسی آنها بوده است. در پایان نیز برای بررسی امکان تفکیک اهداف مورد نظر، طیف‌های نماینده با باندهای سنجنده فرایطیفی Hyperion و سنجنده چندطیفی Aster شبیه‌سازی شدند.

**کلیدواژه‌ها:** آلومینوسیلیکات، طیف‌سنجی، شبیه‌سازی، بازتاب طیفی.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین، گروه سنجش از دور و GIS - تلفن: ۰۹۱۶۳۱۳۰۷۹۰

## ۱- مقدمه

به منظور شناسایی و تفکیک پدیده‌ها در داده‌های سنجش از دور، درک صحیح از چگونگی رفتار پدیده‌های مختلف در طول موج‌های متفاوت در طیف‌سنجی بازتابی، می‌تواند به عنوان ابزاری سودمند مورد استفاده قرار گیرد. تحقیقات زیادی در زمینه طیف‌سنجی، به منظور ثبت پدیده‌های مختلف در طول موج‌های محدوده مرئی مادون قرمز و به خصوص سنگ‌ها و کانی‌ها و آنالیز دقیق این طیف‌ها - که نماینده منحصر به فرد اشیا و پدیده‌های مختلف است - صورت گرفته است. این تحقیقات زمینه لازم را فراهم ساختند تا با استفاده از این اطلاعات طیف‌سنجی زمینی و داده‌های سنجش از دور (تصاویر ماهواره‌ای و هوایی)، بتوان به شناسایی و اکتشاف بعدی پدیده‌های مختلف پرداخت، از آن جمله‌اند تحقیقات انجام شده Clark et al. (1999)، Kruse et al. (1985)، و Salvi et al. (2001). برخی از این افراد با تشکیل کتابخانه طیفی، نتایج و داده‌های حاصل از طیف‌سنجی‌شان را برای به‌کارگیری در مطالعات دورسنجی در معرض استفاده عموم قرار داده‌اند (مانند کتابخانه طیفی سازمان زمین‌شناسی آمریکا در <http://speclab.cr.usgs.gov/>). اصول استفاده شده در تحقیق حاضر براساس کار تحقیقاتی Longhi et al. (2001) و Hasanshahi, et al. (2010) صورت گرفته است. در این تحقیقات با جمع‌آوری و طیف‌سنجی نمونه سنگ‌های منطقه مورد مطالعه و طبقه‌بندی طیفی و بررسی الگوهای جذبی آنها، امکان آشکارسازی و تفکیک سنگ‌ها با استفاده از سنجنده‌های فراطیفی (Hyper Spectral) و چندطیفی (Multi Spectral) شبیه‌سازی گردید. سرانجام چنین نتیجه‌گیری شد که داده‌های با قدرت تفکیک طیفی بالا قابلیت بسیار خوبی در تفکیک سنگ‌های منطقه مورد مطالعه دارند. در ادامه نیز از داده‌های بانک اطلاعاتی موجود در سایت USGS، که حاصل کارهای Clark et al. (2003) است استفاده گردید. در بانک اطلاعاتی مذکور طیف کانی‌ها و سنگ‌های مختلف با شرحی از ویژگی‌ها یا خصوصیات آنها درج شده است.

هدف از این تحقیق مقایسه سه طیف مربوط به پلی‌مورف‌های آلومینوسیلیکات ( $Al_2SiO_5$ ) (در سنگ‌های دگرگونی و رگه‌های سیلیسی منطقه همدان) - شامل آندالوزیت، کیانیت و سیلیمانیت - در شناسایی هر یک از این سه کانی و تأثیر ساختار بلوری بر طیف الکترومغناطیس آنهاست. در این مطالعه تأثیر ترکیب شیمیایی این کانی‌ها و ساختار بلوری آنها بر روی طیف الکترومغناطیس، مقایسه و مطالعه می‌شود.

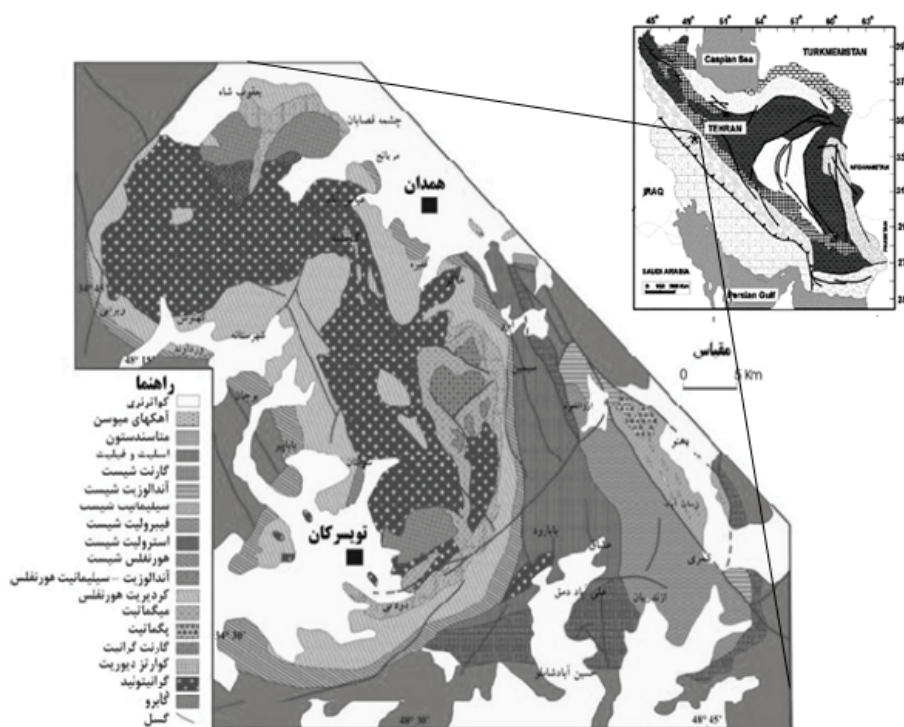
در این تحقیق ابتدا به معرفی پلی‌مورف‌های آلومینوسیلیکات پرداخته می‌شود و ویژگی‌ها و ترکیبات شیمیایی این سه پلی‌مورف بررسی می‌گردد و در ادامه طیف سه کانی مورد نظر با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی Field Spec®3 برداشته و به تفسیر ویژگی‌های طیفی‌شان پرداخته می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

#### مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از نوار دگرگونی موسوم به زون سنندج - سیرجان (واقع در کمر بند کوه‌زایی زاگرس) است که به صورت نوار طولی در امتداد و به موازات رورانگی زاگرس، از ارومیه و سنندج در شمال غربی کشور تا سیرجان و اسفندقه در جنوب شرقی ایران، گسترش دارد. زون سنندج - سیرجان جزئی از کوه‌زاد زاگرس (شکل ۱ الف) و زون زاگرس فلس‌مانند است (Alavi, 2004). برطبق نظر Mohajjel et al. (2003) منطقه مورد مطالعه احتمالاً در زیرپهنه با دگرشکلی پیچیده قرار دارد که شامل سنگ‌های آذرین و دگرگونی است. سنگ‌ها و واحدهای رسوبی منطقه در طی بسته شدن اقیانوس نئوتتیس و برخورد قاره اوراسیا و گندوانا تحت تأثیر فعالیت‌های موجود در حاشیه قاره دچار دگرگونی شده‌اند. افزایش فشار و گرما در منطقه باعث رخداد نوعی دگرگونی دیناموترمال در منطقه شده است که سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای را ایجاد کرده‌اند. ادامه روند برخورد قاره‌ای و تکامل فرایند کوه‌زایی باعث شروع فعالیت‌های پلوتونیسم و ایجاد باتولیت الوند شده است (شکل ۱ الف).



شکل ۱. موقعیت زون سنندج - سیرجان و منطقه مورد مطالعه و نقشه زمین‌شناسی کمپلکس الوند و هاله دگرگونی اطراف آن (Bahari far, 2004). سنگ‌های کالک - سیلیکاته در قسمت شمال شرقی توده الوند رخمون دارند.

پالئوژئیک تا اوایل ژوراسیک، قدیمی‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی منطقه را تشکیل داده‌اند که اغلب شامل اسلیت، فیلیت و انواع شیست‌ها هستند. دگرگونی ناحیه‌ای همدان، از نوع دما و فشار متوسط، تیپ باروین (کیانیت - سیلیمانیت) است (Sadeghian, 1994). بهاری فر نوع دگرگونی ناحیه‌ای سنگ‌های منطقه همدان را فشار پایین - دمای بالا و مربوط به قوسی ماگمایی می‌داند (Baharifar, 2004).

**سنگ‌های دگرگونی مجاورتی:** این سنگ‌ها شامل انواع شیست‌های لکه‌دار و هورنفلس‌هاست که در اطراف توده نفوذی الوند قرار دارند. هورنفلس‌ها شیست‌ها و هورنفلس‌ها بسیار متنوع‌اند و از تأثیر دگرگونی مجاورتی بر سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای حاصل شده‌اند. این سنگ‌ها در نتیجه تأثیر حرارتی توده‌های بازیک و اسیدی بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر به وجود آمده‌اند. بهاری فر و سپاهی حداکثر فشار برای تشکیل سنگ‌های سیلیکات آلومین‌دار را در حدود ۴ کیلوبار،

انتشار گرمای ماگما سبب گردیده است که سنگ‌های دگرگونی پیشین دچار تغییر و تحول شوند و سنگ‌های دگرگونی مجاورتی در منطقه تشکیل گردند.

## ۲-۲- سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

به‌طور کلی سه دسته اصلی سنگ در منطقه همدان وجود دارد. سنگ‌های آذرین این مجموعه شامل سنگ‌های مافیک (گابرو، الیوین گابرو، گابرونوریت، دولریت)، حد واسط (دیوریت، کوارتز دیوریت، میکرودیوریت)، فلسیک (گرانیت‌ها، گرانودیوریت، تونالیت، پگماتیت و آپلیت) و تعدادی دایک‌های دولریتی و کوارتز دلریتی است که سن آنها به ترتیب از ۱۸۰ تا ۶۰ میلیون سال قبل در نظر گرفته شده است (Sepahi, 1999).

سنگ‌های مجموعه دگرگونی همدان در مراحل مختلف دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی تشکیل شده‌اند. سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای: این سنگ‌ها به سن

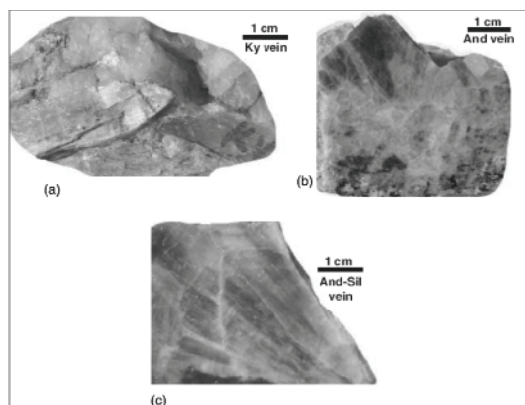
## ۲-۳- اندازه‌گیری داده‌های طیفی

پس از انتقال نمونه‌های جمع‌آوری شده از عملیات صحرائی به آزمایشگاه سنگ‌شناسی و طیف‌سنجی گروه سنجش از دور دانشگاه شهید چمران اهواز، مقاطع نازک نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین نمونه‌های درشت در حد چند سانتی‌متر از سه پلی‌مورف آندالوزیت و کیانیت و سیلیمانیت، پس از آماده‌سازی تحت آنالیز طیف‌سنجی با استفاده از دستگاه Field Spec®3 قرار گرفتند.

بازتابندگی نمونه پلی‌مورف‌های ذکر شده (آندالوزیت، کیانیت و سیلیمانیت) در محدوده طیفی مادون قرمز کوتاه (طول موج‌های ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و فاصله طول موج ۱۰ نانومتر) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج Field Spec®3 و نرم‌افزار RS<sup>3</sup> و دستگاه Contact Probe در محیط آزمایشگاهی اندازه‌گیری و ثبت گردید.

Contact Probe یک منبع نور ثابت دارد که به وسیله پایه‌ای به کابل نوری اسپکترورادیومتر متصل می‌شود. منبع نورانی Contact Probe در زاویه ۲۳ درجه نسبت به بدنه Probe تنظیم شده است و با این زاویه روشنایی ثابت، از مشکلات مختلف روشنایی ناشی از توپوگرافی سطحی جلوگیری می‌کند و امکان اجرای این عمل (طیف‌سنجی) را در همه ساعات روز فراهم می‌سازد (Painter et al., 2007) (شکل ۳).

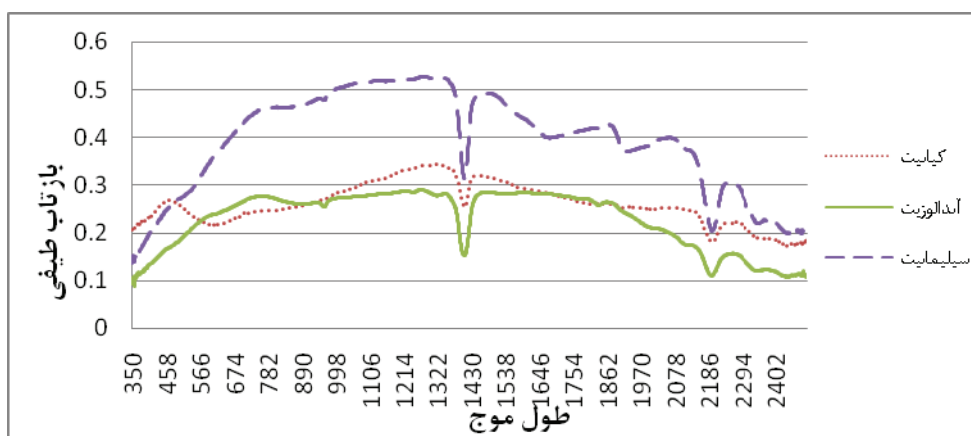
دما را در حدود ۶۰۶ درجه سانتی‌گراد، و متوسط گرادین زمین‌گرمایی را در منطقه حدود ۴۹ درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر برآورد کرده‌اند (Baharifar, 2004). کانی‌های آندالوزیت، کیانیت و سیلیمانیت به وفور در سنگ‌های دگرگونی منطقه همدان دیده می‌شوند. این کانی‌ها هم در شیست‌ها و هورنفلس‌های مجاور باتولیت الوند و هم در رگه‌های کوارتزی وجود دارند. این سه پلی‌مورف در منطقه همدان به صورت‌های مختلفی دیده می‌شوند؛ و مثلاً در برخی از سنگ‌ها هر کدام به تنهایی به چشم می‌خورند و در برخی دیگر ممکن است دو یا هر سه پلی‌مورف با هم مشاهده شوند (شکل ۲).



شکل ۲. کانی‌های کیانیت Ky، آندالوزیت And و سیلیمانیت Sil در مقیاس نمونه دستی در رگه‌های کوارتزی منطقه همدان



شکل ۳. دستگاه فیلداسپیک ۳ (سمت راست) و ابزار تکمیلی Contact probe (سمت چپ) (ابزار طیف‌سنجی موجود در گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه شهید چمران اهواز)



شکل ۴. مقایسه طیف کانی‌های آلومینوسیلیکات (آندالوزیت، کینایت و سیلیمانیت) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج Field Spec @3 در محیط آزمایشگاه

۱- محل طول موج کمترین میزان بازتاب در باندهای جذبی؛

۲- عمق، عرض، مساحت و عدم تقارن باندهای جذبی؛ و

۳- محل تغییرات شیب و نقاط پرش در منحنی. پارامترهای مذکور به عنوان «ساختارهای جذب» در نظر گرفته می‌شوند.

ساختارهای جذبی مشخص و یا گروه‌هایی از این ساختارها که به‌طور سیستماتیک در طیف‌ها اتفاق می‌افتند، در اینجا الگوهای جذب نامیده می‌شوند. این الگوها ممکن است از یک باند جذب تشکیل شده باشد (مانند FE) و یا اغلب اوقات از گروه‌هایی از باندها - و هر کدام از آنها مختص محل و عمق خود - تشکیل شوند (مانند HF) (شکل ۵). اهمیت و کشف این الگوها براساس مطالعات طیف‌سنجی صورت‌گرفته روی کانی‌ها و تلفیق این مطالعات با آنالیزهای پتروگرافی و شیمیایی بنا شده است. در نتیجه هر الگو به فرایند فیزیکی خاص در یون، مولکول، یا گروه عناصر در کانی‌های مشخص مربوط می‌شود. جدول ۱ فرایندهای مولکولی و الکترونی را که عامل الگوهای جذب مشاهده شده در طیف‌های سنگ‌ها در محدوده بازتاب به‌شمار می‌آیند، به اختصار ارائه می‌کند (Longhi et al., 2001).

به‌منظور طیف‌سنجی دقیق نمونه‌ها، سعی گردید تا از نمونه‌های هوازده و حتی‌الامکان بدون حضور سنگ میزبان (نمونه‌های خالص) استفاده گردد. این موضوع (تشابه و خلوص نمونه‌ها) زمانی اهمیت می‌یابد که از این طیف‌های برداشت شده به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای برای پی‌جویی و اکتشاف مواد معدنی استفاده شود.

عدم پیوستگی در طیف‌ها به خاطر نویز حاصل از گذار از آشکارگرهای بخش VNIR به SWIR1 و SWIR2 در طول موج‌های ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ نانومتر اتفاق افتاد که به‌وسیله نرم‌افزار SAMS نسخه ۲، ۳ اصلاح شد. برای پردازش، مقایسه سریع و تبدیل طیف‌ها از نرم‌افزار View Spec Pro نسخه ۵ استفاده شد. نرم‌افزار Excel 2007 و همچنین SAMS برای محاسبات آماری طیف‌ها به کار رفتند (شکل ۴).

### ۳- بحث و نتیجه‌گیری

#### ۳-۱- آنالیز و طبقه‌بندی طیف پلی‌مورف‌های

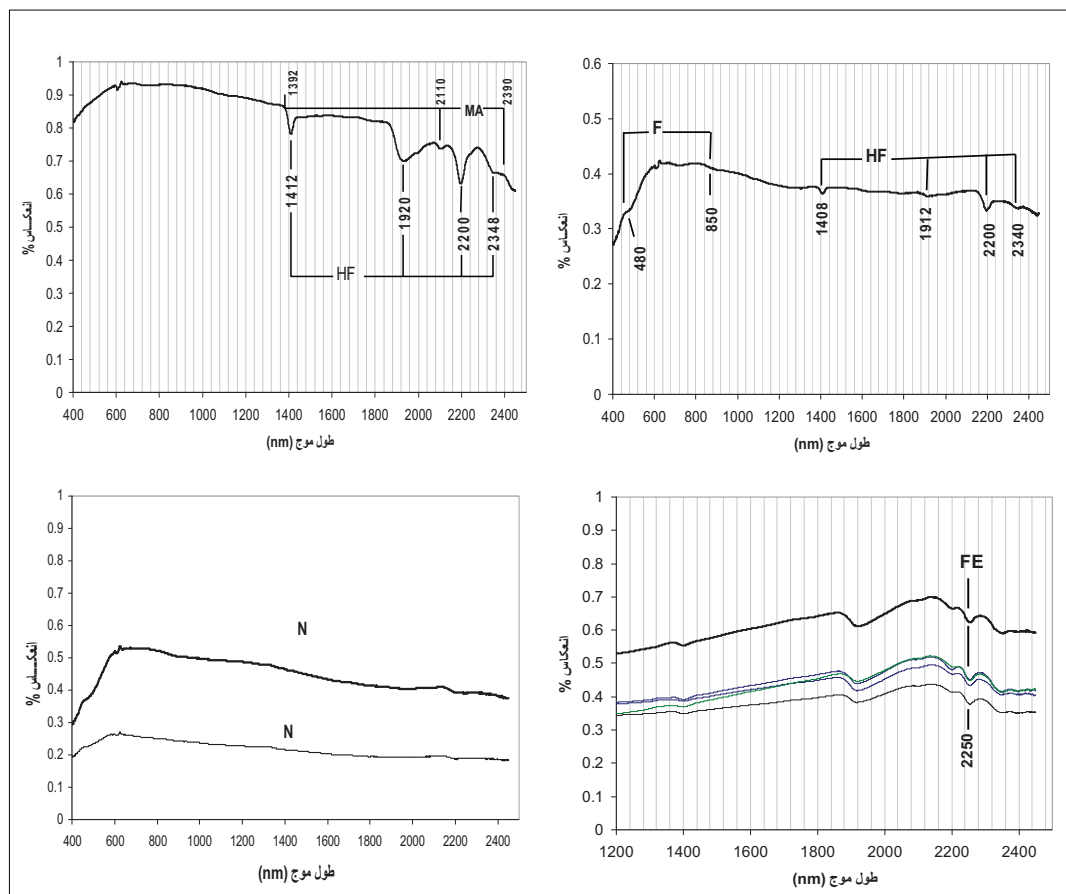
#### آلومینوسیلیکات

مطابق تحقیقات (Grove et al., 1992)، تحلیل و توصیف منحنی‌های طیفی براساس این پارامترها صورت می‌گیرد:

استفاده از طیف الکترومغناطیسی‌ای که از این کانی‌ها یا سنگ‌ها برداشته می‌شود می‌توان تا حدودی به ماهیت شیمیایی‌شان پی برد.

الگوهای جذب معمولاً با هم ترکیب می‌شوند تا ویژگی‌ها و مشخصه‌های گروه‌های نمونه را با دقت و تفکیک ارائه دهند. در آنالیز و بررسی نمودارها از این ترکیبات با عنوان گونه‌های طیفی یا الگوهای طیفی نهایی یاد می‌شود.

همچنین در جدول ۱ تفسیر هر یک از الگوهای جذب نشان داده شده است. این جدول براساس تحقیقات Longhi et al. (2001) تهیه شده و برای گونه‌های متفاوت سنگی، دارای میزان مشخصی است. این الگوهای جذبی، با ترکیب شیمیایی موجود در سنگ‌ها و کانی‌های متفاوت در ارتباط مستقیم است. در واقع کانی‌ها و سنگ‌های مختلف با توجه به ترکیب شیمیایی موجود در آنها، دارای باندهای جذبی در محدوده‌های معرفی شده در جدول ۱ هستند و با



شکل ۵. نمونه‌هایی از الگوهای جذبی مشخص و مشاهده شده در طیف‌های انعکاسی سنگ‌ها (Longhi et al., 2001).



جدول ۱. الگوهای جذب طیفی و فرایندهای فعل و انفعالی در طول موج‌های مرئی - مادون قرمز کوتاه

الگوی جذب	طول موج‌های جذبی	فرایندهای فعل و انفعالی مؤثر بر روی طول موج‌های جذبی
F	۶۸۰/۶۵۰ - ۴۸۰/۵۰۰ - ۴۲۰/۴۳۰	تأثیرات میدان بلور $Fe^{+3}/Fe^{+2}$ در اکسیدها و هیدروکسیدها
HF	۲۴۳۲ - ۲۳۴۰ - ۲۲۰۰ - ۱۴۰۸ - ۱۹۱۲	ارتعاش $H_2O$ و $OH^-$ در فلدسپات‌ها
MA	(۲۴۶۸) - ۲۱۱۶ - ۱۳۹۲ - ۲۳۸۸ - ۲۳۰۸	ارتعاش $Mg-OH$ در آمفیبول‌ها
FE	۲۲۵۰	ارتعاش $FE-OH$ در اپیدوت‌ها، بیوتیت، تورمالین، کلرایت و فلوگوپیت
N		طیف صاف و تقریباً بدون جذب
AM	۲۲۰۰ - ۱۴۰۴ - ۲۳۴۴ - ۲۴۲۸	ارتعاش $Al-OH$ و $OH^-$ در مسکویت

منبع: Longhi et al., 2001

جذبی در محدوده‌هایی بین ۸۵۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر، در نزدیکی ۱۴۰۴، ۱۹۰۴، ۲۲۰۰، ۲۳۴۴ و ۲۴۲۸ نانومتر هستند (در این تحقیق به باندهای جذبی در محدوده ۸۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر پرداخته شده است). بر این اساس تأثیرات نسبت  $Fe^{+3}/Fe^{+2}$  در اکسیدها و هیدروکسیدها باعث به وجود آمدن باند جذبی در محدوده ۸۵۰ تا ۱۲۰۰ نانومتر می‌گردد؛ که در پلی مورف‌های آلومینوسیلیکات مطالعه شده، این باند جذب در ۹۵۰ نانومتر مشاهده گردید. همچنین جذب موجود در ۱۴۰۴ و ۲۲۰۰ نانومتر به علت یون  $OH^-$  موجود در ساختار پلی مورف‌هاست. باند جذبی موجود در محدوده ۱۹۰۴ نانومتر نیز در اثر  $H_2O$  (جذب شده، تبدیل آلومینوسیلیکات‌ها به مونت‌موریونیت و کائولینیت) موجود در ساختار شیمیایی این ترکیبات است. البته باند جذبی در محدوده ۲۲۰۰ نانومتر احتمالاً به سبب ترکیب  $Al-OH$  در ساختمان بلوری این سه پلی مورف است؛ و در نهایت باند جذبی ۲۳۴۴ و ۲۴۲۸ نانومتر نیز بر اثر ارتعاشات  $H_2O$  و  $OH^-$  موجود در ساختار شیمیایی پلی مورف است (Clark et al., 2003) (شکل ۶).

در این تحقیق از مدل‌های ارائه شده Longhi et al. (2001) و همچنین از اطلاعات و آمار موجود در بانک اطلاعاتی USGS که Clark et al. (2003) ارائه کردند، استفاده شده است.

ساختارهای جذب در طیف نمونه پلی مورف‌ها، به وسیله نرم افزار SAMS نسخه ۳/۲ مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. در ابتدای کار سعی گردید تا با استفاده از این نرم افزار، عدم پیوستگی در طیف‌ها، که به خاطر نویز حاصل از گذار از آشکارگرهای بخش VNIR به SWIR1 و SWIR2 در طول موج‌های ۱۰۰۰ و ۱۸۰۰ نانومتر رخ می‌دهد، برطرف گردد. در ادامه از ۱۶ نمونه از سه پلی مورف موجود که Sepahi et al. (2004) به صورت آنالیز نقطه‌ای، در مایکروپروب تجزیه شیمیایی کرده‌اند، استفاده گردید که ترکیبات شیمیایی آنها در جدول ۲ درج شده است.

سپس به بررسی طیف این سه پلی مورف از نظر باندهای جذبی و میزان کلی بازتاب آنها پرداخته شد تا با استفاده از ویژگی‌های مورد بحث معیارهایی به منظور شناسایی و تمایز هر یک از این سه پلی مورف معرفی گردد. در بررسی‌های صورت گرفته بر روی طیف، این نتیجه به دست آمد که هر سه پلی مورف دارای باندهای

کاظم رنگزن و همکاران

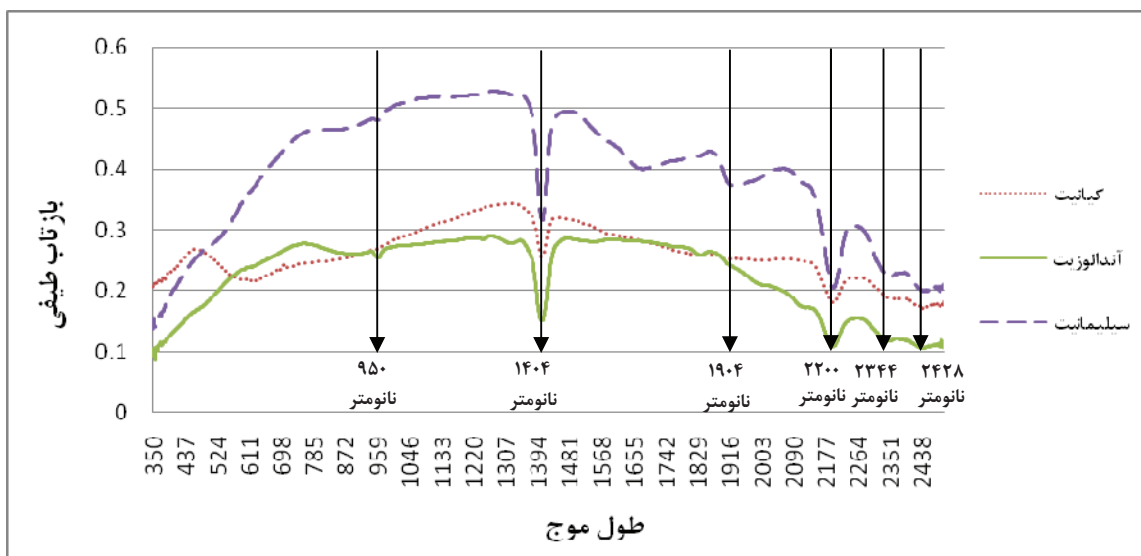
جدول ۲. نتایج حاصل از تجزیه مایکروپروب آلومینوسیلیکات‌های منطقه همدان

	Schist ASVH		ASKV		vein	schist	vein	vein
	And	And	Sil	Ky	KSV Ky	KSVH Ky	KV Ky	SV Sil
SiO <sub>2</sub>	۳۷/۱۳	۳۷/۷۳	۳۶/۹۲	۳۷/۷۴	۳۷/۰۲	۳۷/۰۶	۳۷/۲۲	۳۶/۴۷
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۱	۰/۰۱	----	----	۰/۰۶	----	----	----
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶۳/۰۳	۶۲/۳۶	۶۲/۹۷	۶۲/۱۸	۶۳/۴۷	۶۳/۰۲	۶۲/۸۸	۶۲/۸۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۲۴	۰/۴۴	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۱۶
MnO	----	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۲	----	----	۰/۰۶	----
MgO	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱	----	----	----	۰/۰۲	----
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۳	----	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳
Total	۱۰۰/۵۲	۱۰۰/۶۱	۱۰۰/۰۸	۱۰۰/۱۲	۱۰۰/۶۵	۱۰۰/۳۰	۱۰۰/۵۱	۹۹/۴۹
Mol%Fe	۰/۱۶	۰/۳۰	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۱۱

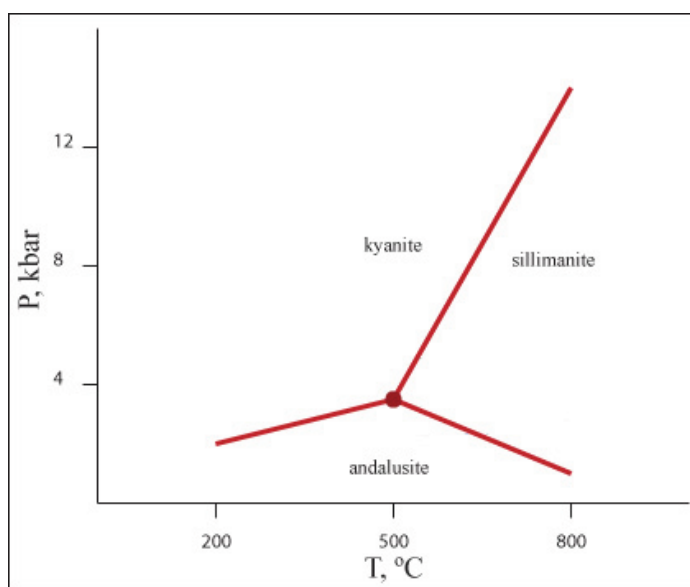
	And schist	And Vein	And Vein	And vien/margin AV2		And-Sil vein ASV		And-Sil Schist ASVH
	AVH And	AV1 And-white	AV1 And-pink	And Core	And rim	And	Sil**	Sil**
SiO <sub>2</sub>	۳۶/۹۳	۳۷/۰۹	۳۷/۲۳	۳۶/۵۴	۳۷/۳۶	۳۶/۷۰	۳۷/۰۹	۳۶/۸۵
TiO <sub>2</sub>	----	----	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۱	----
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۶۳/۱۱	۶۳/۱۸	۶۳/۳۱	۶۲/۰۶	۶۳/۴۸	۶۳/۱۳	۶۳/۵۶	۶۲/۸۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۱۵	۰/۱۳	۰/۲۲	۰/۷۳	۰/۲۰	۰/۵۵	۰/۱۱	۰/۱۰
MnO	----	----	----	۰/۰۱	----	----	----	----
MgO	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۰۲	۰/۱۱	----	۰/۰۲
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۰۷	----	----	۰/۰۸	----	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۵
Total	۱۰۰/۲۸	۱۰۰/۴۳	۱۰۰/۷۹	۹۹/۶۳	۱۰۱/۰۸	۱۰۰/۶۲	۱۰۰/۸۳	۹۹/۸۵
Mol%Fe	۰/۰۱	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۵۰	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۰۷	۰/۰۷

منبع: Sepahi et al., 2004





شکل ۶. مقایسه باندهای جذبی طیف سه پلی مورف آلومینوسیلیکات و میزان بازتاب کلی هر یک از آنها



شکل ۷. نمودار حرارت - فشار (P-T) که شرایط متفاوت را برای تشکیل سه کانی کینایت، سیلیمانیت و آندالوزیت نشان می‌دهد. کینایت در فشار بالا، آندالوزیت در فشار کم و سیلیمانیت در دمای بالا پایدار است (Spear, 1993)

شناسایی ترکیب شیمیایی هر یک از این سه کانی، این نتیجه به دست آمد که باندهای جذبی موجود در ساختار این طیف‌ها مستقیماً با ترکیبات شیمیایی آنها ارتباط دارند و تنها اختلاف عمده در این سه پلی مورف، میزان بازتاب این ترکیبات است. این اختلاف، به میزان بازتاب مربوط به ساختار فیزیکی این سه پلی مورف

با توجه به الگوهای جذب، مشخص گردید که این طیف‌ها از الگوی طیفی AM و F - که در جدول ۱ به آن اشاره گردید - پیروی می‌کند و اینها در محدوده‌های مشترکی دارای باند جذبی یکسان‌اند. و از لحاظ روند کلی نیز طیف‌ها همبستگی بالایی دارند. با توجه به آنالیز شیمیایی نمونه‌های آزمایش‌شده و

شکل ۸ نمایش داده شده است، ابتدا طول موجی را که در بازه‌های معین شده حداکثر انعکاس در آنها اتفاق می‌افتد مشخص می‌سازد ((wp) در [b,c] و wq در [d,e])، و سرانجام میزان جذب را با استفاده از معادله‌ای که در پی می‌آید، محاسبه می‌کند ( Longhi et al., 2001):

### فرمول ۱:

مساحت زیر پاره‌خطی که ماکزیمم را به هم وصل می‌کند / مساحت زیر نمودار در  $[W_p, W_q]$   $A_i = 1 - [W_p, W_q]$

$W_p$  حداکثر بازتاب در بازه [b,c]

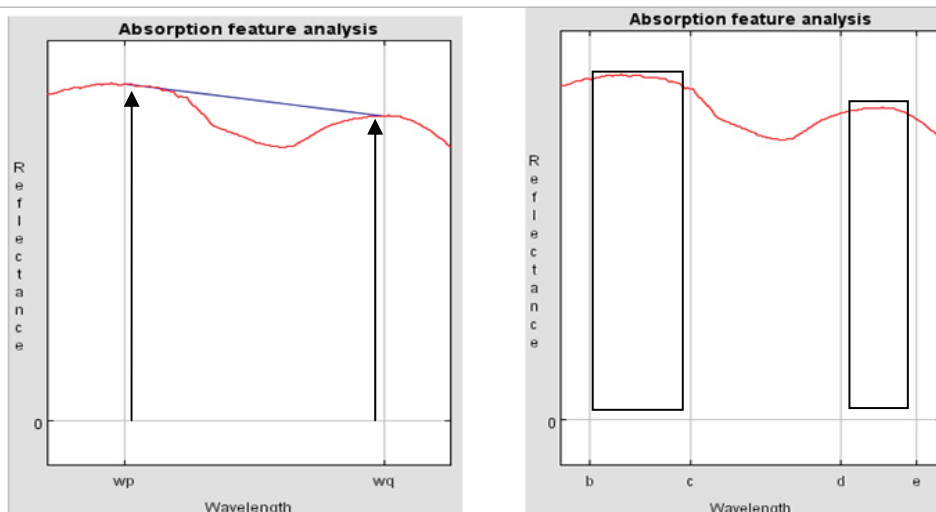
$W_q$  حداکثر بازتاب در بازه [d,e]

بدین منظور طیف پلی‌مورف‌های برداشته‌شده به محیط نرم‌افزار انتقال داده شد و سپس این آنالیز بر روی آنها در محدوده‌هایی که دارای باند جذبی‌اند، اعمال گردید. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، مقدار جذب در این سه پلی‌مورف متفاوت است و در شناسایی و تمایز این سه پلی‌مورف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

بازمی‌گردد. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، هر یک از این سه پلی‌مورف آلومینوسیلیکات در شرایط فشار و دمای خاصی به وجود آمده و دارای ساختار بلوری مربوط و خاص خود است؛ هر چند که از نظر ترکیب شیمیایی اینها تقریباً مشابه‌اند.

میزان بازتاب کلی طیف‌ها از حداقل صفر درصد و حداکثر ۱۰۰ درصد بازتاب برای هر یک از پلی‌مورف‌ها محاسبه گردید. همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده است، میزان بازتاب آندالوزیت کمترین مقدار را دارد و میزان میانگین آن ۰/۲۳۱۱۵ است. بعد از آندالوزیت میزان بازتاب کیانیت است که میانگین بازتاب آن از آندالوزیت بیشتر است و از سیلیمانیت کمتر و در حدود ۰/۲۶۶۶۳ است، در نهایت بازتاب سیلیمانیت دارای بیشترین میزان بازتاب طیفی در این سه پلی‌مورف به میزان ۰/۴۰۸۶ است.

از دیگر کارهای صورت گرفته در این تحقیق، آنالیز اشکال جذب است که به وسیله نرم‌افزار SAMS صورت گرفت. با استفاده از الگوریتم آنالیز اشکال جذب در نرم‌افزار SAMS، میزان جذب در طول موج خاصی در یک طیف محاسبه می‌شود. این الگوریتم با مشخص بودن دو بازه طول موج [b,c] و [d,e]، همان‌طور که در



شکل ۸. نحوه محاسبه میزان جذب طیفی در نواحی دارای جذب طیف الکترومغناطیسی

منبع: Carlos et al., 2003

جدول ۳. نمایش مقدار جذب ( $A_p$ ) در محدوده‌های جذبی طیف سه پلی مورف آلومینوسیلیکات

نام	طول موج جذب					
	۹۵۰ نانومتر	۱۴۰۴ نانومتر	۱۹۰۴ نانومتر	۲۲۰۰ نانومتر	۲۳۴۴ نانومتر	۲۴۲۸ نانومتر
کیانیت	۰/۰۰۲۶۸	۰/۰۶۰۱۶	۰/۰۱۳۳۰	۰/۰۸۱۰۷	۰/۰۰۹۳۳	۰/۰۲۳۷۹
سیلیمانیت	۰/۰۰۵۹۶	۰/۱۰۰۵۲	۰/۰۵۶۸۴	۰/۱۴۳۶۸	۰/۰۴۳۴۸	۰/۰۴۰۳۱
آندالوزیت	۰/۰۱۵۲۵	۰/۱۵۱۴۷	۰/۰۱۰۷۴	۰/۱۱۶۰۲	۰/۰۳۵۰۱	۰/۰۳۷۱۸

الگوهای طیفی اصلی که در این مطالعه مشخص شد در تصاویر فراطیفی و چندطیفی ارزیابی شود. شکل ۶ نمودارهای طیفی سه پلی مورف آلومینوسیلیکات را نشان می‌دهد که به وسیله طیف‌سنجی Field Spec@3 با فواصل باندهی ۱ نانومتر برداشته شده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ قابلیت‌سنجنده Hyperion و Aster را در بارسازی الگوهای جذبی غالب چند نوع سنگ مشخص می‌سازد. همان‌گونه که در منحنی طیفی مشخص شده است، الگوی جذبی مربوط به این سه پلی مورف، بر روی داده‌های سنجنده‌های فراطیفی و چندطیفی نیز قابل مشاهده است.

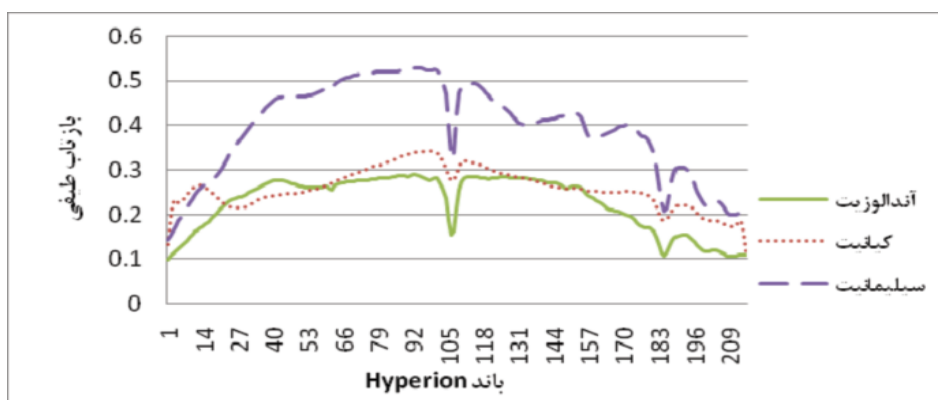
در شکل ۸ که به شبیه‌سازی طیف این سه پلی مورف به سنجنده Hyperion مربوط می‌شود، طول موج‌های جذب، الگوی مرتبط را در ۹۵۰، ۱۴۰۴، ۲۲۰۰، ۲۳۴۴ و ۲۴۲۸ نانومتر نشان می‌دهند.

همان‌گونه که مشخص است، باندهای جذبی این سه پلی مورف به وضوح نسبتاً زیادی بر روی طیف شبیه‌سازی شده سنجنده Hyperion نشان داده می‌شوند؛ در حالی که باندهای جذبی این سه پلی مورف بر روی طیف شبیه‌سازی شده از تصویر Aster به صورت نامفهوم نمایان می‌گردد، و این خود به علت عریض بودن باندهای سنجنده Aster در برابر Hyperion و همچنین طیف‌سنج Field Spec@3 است.

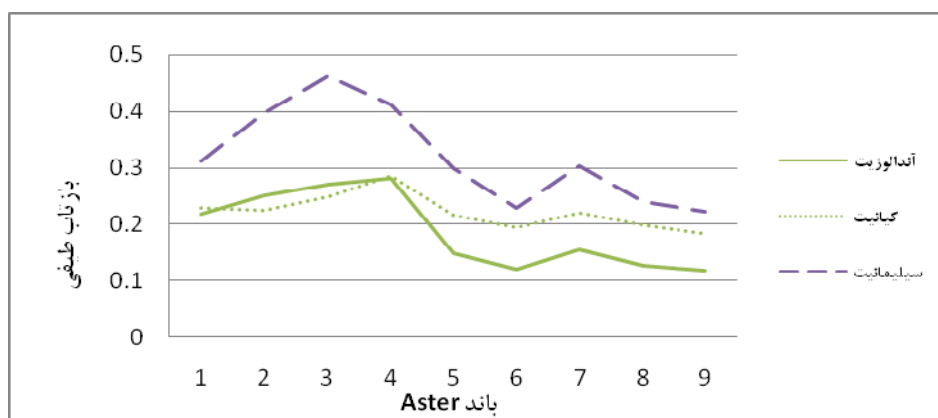
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد، در همه طول موج‌های جذبی این سه پلی مورف، مقدار جذب سیلیمانیت و آندالوزیت بیشتر از کیانیت است. همچنین در مقایسه دو پلی مورف سیلیمانیت و آندالوزیت، تنها در دو محدوده ۹۵۰ و ۱۴۰۸ نانومتر، مقدار جذب آندالوزیت بیشتر است.

### ۳-۲- ارتباط بین الگوهای طیفی و شبیه‌سازی طیف‌ها بر اساس باندهای سنجنده‌های فراطیفی و چندطیفی

طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس الگوهای طیفی، ویژگی‌های طیفی غالب در یک نوع سنگ یا گروهی از سنگ‌ها را مشخص می‌کند. چنین تقسیم‌بندی طیفی‌ای با طبیعت سنجنده‌های سنجش از دوری سازگاری دارد و می‌تواند با پیش‌بینی واکنش آشکارگرهای طیف‌سنجی، اساس امکان‌سنجی تفکیک در پردازش داده‌های سنجش از دور قرار گیرد (Longhi et al., 2001). برای دستیابی به این مقصود، داده‌های طیفی ثبت شده به وسیله طیف‌سنجی آزمایشگاهی بر اساس عملکرد آشکارگرهای دوسنجنده - یکی با قدرت تفکیک طیفی بالا و دیگری با قدرت تفکیک طیفی پایین - شبیه‌سازی شد. این شبیه‌سازی بدین منظور صورت گرفت تا امکان شناسایی و تفکیک سنگ‌ها بر اساس



شکل ۹. شبیه‌سازی پلی‌مورف‌های آلومینوسیلیکات بر روی سنجنده Hyperion



شکل ۱۰. شبیه‌سازی پلی‌مورف‌های آلومینوسیلیکات بر روی سنجنده Aster

#### ۴- نتایج

بلوری مشخص و ویژه‌ای هستند.

بر این اساس، نحوه تبلور و نوع ساختارهای بلوری در پلی‌مورف‌ها می‌تواند در میزان بازتاب آنها تأثیر نهد و این خود موجب شناسایی و تمایز پلی‌مورف‌ها خواهد شد.

از دیگر نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، می‌توان به مقدار جذب این سه پلی‌مورف در محدوده باندهای جذبی‌شان اشاره کرد، که با توجه به جدول ۳ می‌تواند در شناسایی آنها مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، مقدار جذب سیلیمانیت و آندالوزیت بیشتر از کینایت است. همچنین در مقایسه دو پلی‌مورف سیلیمانیت و آندالوزیت، تنها در دو محدوده ۹۵۰ و ۱۴۰۸ نانومتر،

نتایج نشان از آن دارند که آلومینوسیلیکات دارای بازتاب طیفی تقریباً مشابهی در محدوده مادون قرمز کوتاه‌اند و باندهای جذبی تقریباً مشابهی در طول طیف الکترومغناطیس دارند. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته، این نتیجه به دست آمد که ترکیب شیمیایی این سه پلی‌مورف یکسان است؛ و این خود باعث به وجود آمدن باندهای جذبی تقریباً مشابهی در طیف بازتابی آنها می‌گردد. از محدود تفاوت‌های این سه پلی‌مورف در میزان بازتاب آنها، به علت ساختار فیزیکی است. هر یک از این پلی‌مورف‌ها در شرایط دما و فشار خاص خود به وجود آمده‌اند و در نتیجه دارای ساختار

Carlos A.R., Anne F. W., 2003, **SAMS: Spectral Analysis and Management System**, Version 2.0, User's Manual, Center for Spatial Technologies and Remote Sensing Department of Land, Air, and Water Resources. University of California, Davis.

Clark, R.N., 1999, **Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy**, Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, 3- 58.

Clark, R. N., Swayze, G. A., Wise, R., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Kokaly, R. F., & Sutley, S.J., 2003, **Usgs Spectral Library**, Speclab.cr.usgs.gov.

Grove, C.I., Hook, S. J., & Paylor, E. D., 1992, **Laboratory Reflectance Spectra of 160 Minerals, 0.4 to 2.0 Micrometers**, JPL Publication, (Pasadena, California: Jet propulsion Laboratory), pages 92-2.

Hassanshahi, H., Rangzan, K. & Saki, A., 2010, **Application of Reflectance Spectroscopy (350-2500nm) in Rocks Classification and Analysis for Remote Sensing Studies. (Case study: Igneous and metamorphic rocks of Alvand region of Hamedan)**, 17th Geomatics symposium of Iran, 10 pages.

Hassanshahi, H., Rangzan, K. & Saki, A., 2010, **Spectral Analysis and Simulation of Rocks Using Field Spec@3, in Hamedan Region; a tool for Remote Sensing Study**. National Conference reviews gains of Earth Sciences researchers, Iran, page 102.

مقدار جذب آندالوزیت بیشتر است. این پدیده نیز به ساختار بلوری مشخص و ویژه هر یک از این پلی مورف‌ها مربوط می‌شود.

دیگر اینکه، در این مطالعه به بررسی و مقایسه الگوها و روابط طیفی پلی مورف‌های آلومینوسیلیکات منطقه همدان، با استفاده از دستگاه Field Spec@3 به منظور تفکیک این عوارض در داده‌های ماهواره‌ای، پرداخته شد. با تفسیر نمودارهای طیفی پلی مورف‌ها و الگوهای جذب در ناحیه طول موج مادون قرمز کوتاه و ارتباط دادن باندهای جذب به ساختار و ترکیبات سنگ، نمودار طیفی آنها با هم مقایسه شدند و با شبیه‌سازی داده‌ها براساس دو سنجنده فراطیفی و چندطیفی، قابلیت آن دو مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاکی از حفظ الگوهای جذب به خاطر باندهای باریک و حفظ الگوی نهایی طیفی در سنجنده‌های با قدرت طیفی بالا - مانند Hyperion - است، که قطعاً توان آشکارسازی و شناسایی پلی مورف‌ها را به وسیله تشخیص محل دقیق طول موج‌ها فراهم می‌سازد. در مقابل، سنجنده Aster به خاطر باندهای عریض - و در نتیجه قدرت تفکیک طیفی بسیار کم در مقایسه با نوع قبلی - شکل باندهای جذب را به درستی حفظ نکرد و الگوهای جذب در طیف نهایی محو شدند. به هر حال محدودیت اصلی در استفاده از تصاویر Aster، بارزسازی محدود گروه‌های کلی سنگ است و تمایز جزئیات به وسیله تشخیص محل دقیق طول موج‌ها و باندهای جذب‌شدنی نیست.

#### ۷- منابع

Alavi, M., 2004, **Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-thrust Belt of Iran and Its Pro Foreland Evolution**, American Journal of Science 3004, 1-20.

Baharifar, A., 2004, **Petrology of the Metamorphic Rocks from Hamadan Area**, Ph.D. thesis, Tarbiat Moallem University.

- Kruse, F.A., Raines, G.L. and Watson, K., 1985, **Analytical Techniques for Extracting Geologic Information from Multichannel Airborne Spectroradiometer and Airborne Imaging Spectrometer Data: in Proceedings**, International Symposium on Remote Sensing of Environment, Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 4th Thematic Conference, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, 309-324.
- Longhi, I., Sgavetti, M., Chiari, R. & Mazzaoli, C., 2001, **Spectral Analysis and Classification of Metamorphic Rocks from Laboratory Reflectance Spectra in the 0.4-2.5  $\mu\text{m}$  interval: a tool for hyperspectral data interpretation**, INT. J. REMOTE SENSING, VOL.22, NO.18, Taylor & Francis Ltd, 3763-3782.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., Sahandi, M.R., 2003, **Cretaceous-Tertiary Convergence and Continental Collision, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran**, Journal of Asian Earth Science., 21, 397-412.
- Painter, H.T., Molotch, P.N., Cassidy, M., Flanner, M., Steffen, K., 2007, **Instruments and Methods, Contact Spectroscopy for Determination of Stratigraphy of Snow Optical Grain Size**. Journal of glaciology, Vol. 53, No.180, 121-127
- Sadeghian, M., 1994, **Study of Igneous and Metamorphic Petrology from Cheshmeh Ghasaban Area, Hamadan**, M.Sc. thesis, Tehran University.
- Salvi, S., Mazzarini, F., & Doumaz, F., 2001, **Spectral Reflectance Measurements of Geological Materials in Northern Victoria Land**, Antarctica, AIT Informa, Rivista Italiana di Telerilevamento, No. 23, 45-54.
- Sepahi, A. A., 1999, **Petrology of the Alvand Complex with Respect to Granitoids**, Ph.D. thesis, Tarbiat Moallem University.
- Sepahi, A. A., Whitney, D. L. & Baharifar, A. A., 2004, **Petrogenesis of And-Ky-Sil Veins and Host Rocks, Sanandaj-Sirjan Metamorphic Belt, Hamadan, Iran**, Journal of Metamorphic Geology 22(2), 119-134.
- Spear, F.S., 1993, **Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths**, Monograph 1. Mineralogical Society of America: Washington, DC, p. 799.