

نقشه برداری پیشرفته انواع مختلف کانی سازی های آهن، اندواسکارن و اگزواسکارن در کانسار آهن سنگان خواف، استان خراسان رضوی با استفاده از داده های سنجنده استر

نازی مظهري

دانشجوی دکتری زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

آزاده ملکزاده شفارودی

استادیار گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

مجید قادری

دانشیار گروه زمین شناسی اقتصادی دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۲/۷/۲۲

nazimzi@yahoo.com

چکیده

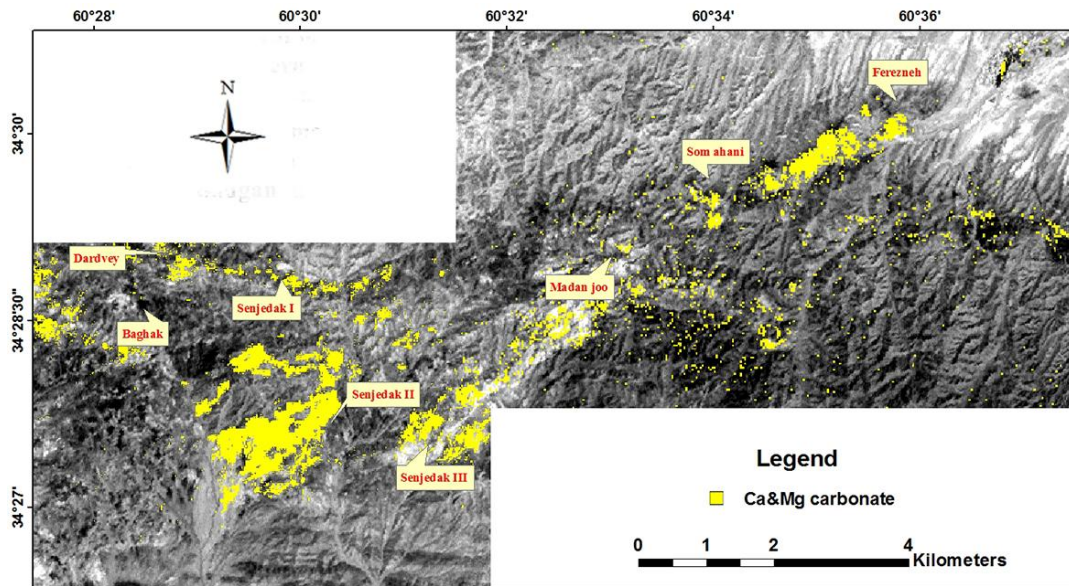
معدن سنگان یک ذخیره بارزش و بزرگ اسکارن آهن است که در شرق کمربند ولکانیکی- پلوتونیک خواف- کاشمر- بردسکن قرار دارد. این کمربند با گسترش شرقی- غربی در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) واقع و به عنوان یک خاستگاه کانی سازی تیپ اکسید آهن در ایران معرفی شده است. در این تحقیق، از توانایی داده های سنجنده استر و رفتار طیفی آهن فریک، آهن فرو و کربنات ها در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک (VNIR) و فرورسرخ میانی (SWIR) و فرورسرخ گرمایی (TIR) طیف الکترومغناطیس، برای نقشه برداری و بارزش سازی کانی سازی های آهن و همچنین رخنمون های کربنات در آنومالی های مرکزی و شرقی معدن سنگان بهره گرفته شد. نسبت گیری از باندهای فرورسرخ گرمایی و ایجاد تصاویر ترکیب رنگی، با توجه به ویژگی های طیفی کانی های موجود در زون های اسکارنی، جداسازی و تفکیک واحدهای کربنات، اندواسکارن و اگزواسکارن را از دیگر رخنمون های سنگی و نقشه برداری آنها را میسر ساخت. همچنین اجرای فن نقشه برداری زوایای طیفی (SAM) و ناآمیختگی طیفی خطی (LSU) نقشه برداری انواع مختلف کانی سازی های آهن (مگنتیتی، هماتیتی، گوتیتی و لیمونیتی) و بارزش سازی واحدهای کربنات مرتبط با کانی سازی ها را در آنومالی های مرکزی و شرقی منطقه سنگان به دنبال داشت.

کلمات کلیدی: سنگان، اسکارن آهن، اندواسکارن، اگزواسکارن، آنومالی های شرقی و مرکزی، کمربند خواف- کاشمر- بردسکن، نقشه برداری.

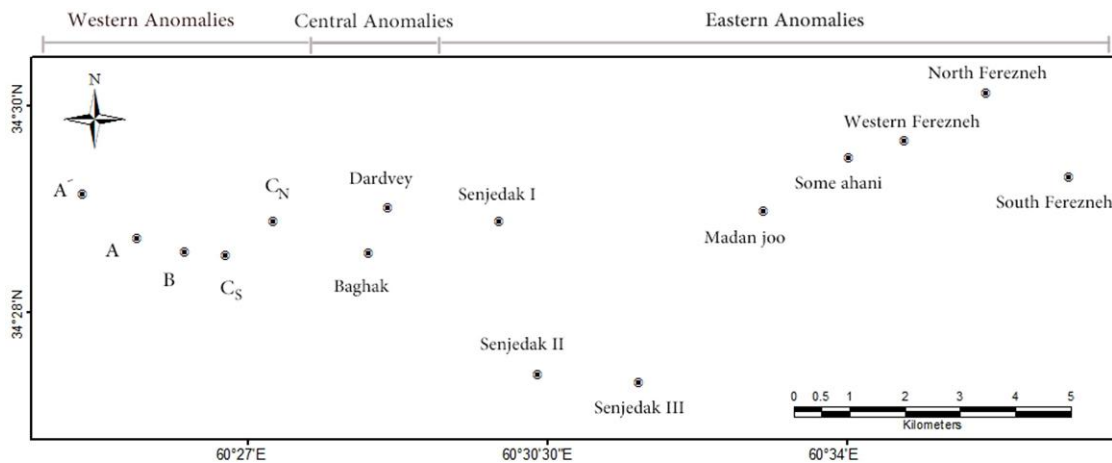
مقدمه

محدوده مورد مطالعه، آنومالی های مرکزی و شرقی کانسار سنگ آهن سنگان است که در ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف در استان خراسان رضوی بین طول های جغرافیایی $24^{\circ} 45' - 24^{\circ} 45'$ و عرض های جغرافیایی $34^{\circ} 26' - 34^{\circ} 33'$ قرار دارد. معدن سنگان، یک ذخیره بزرگ و بارزش اسکارن آهن است و جزئی از کمربند ولکانیکی- پلوتونیک خواف- کاشمر- بردسکن به شمار می رود (کریم پور، ۱۳۸۱؛ کریم پور و همکاران، ۱۳۸۲). چنانچه ادامه کمربند ماگمایی خواف- درونه تا افغانستان از یک سو و بیارجمند از سوی دیگر را در نظر بگیریم، طولی بیش از ۳۵۰ کیلومتر و پهنای متغیر از ۱۵ تا ۸۰ کیلومتر دارد. این کمربند با گسترش شرقی- غربی و خمیدگی به سوی شمال، در شمال گسل درونه (گسل بزرگ کویر) واقع شده و عمدتاً از سنگ های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و بعضاً مافیک با سن ترشیری تشکیل شده است. این سنگ ها شامل داسیت، ریوداسیت، آندزیت، پیروکسن آندزیت، آندزیت- بازالت، لاتیت، تراکی آندزیت، توف، لاپیلی توف و آگلومراست (شکل ۱). توده های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت، گرانودیوریت، دیوریت و آلکالی فلدسپار گرانیت در سنگ های آتشفشانی نفوذ نموده اند (کریم پور، ۱۳۸۱؛ کریم پور و همکاران، ۱۳۸۲). کریم پور (۱۳۸۱) و کریم پور و همکاران (۱۳۸۲)، کمربند خواف- کاشمر- بردسکن را به عنوان کمربند کانی سازی تیپ اکسید آهن در ایران معرفی کردند. از جمله کانسارهای اکسید آهن موجود در این ناحیه می توان به طلا- اسپیکولاریت کوه زر، شهرک، تنورچه و معدن سنگان خواف اشاره کرد. مجموعه کانسارهای سنگ آهن سنگان در محدوده ای به شکل مستطیل (شرقی-

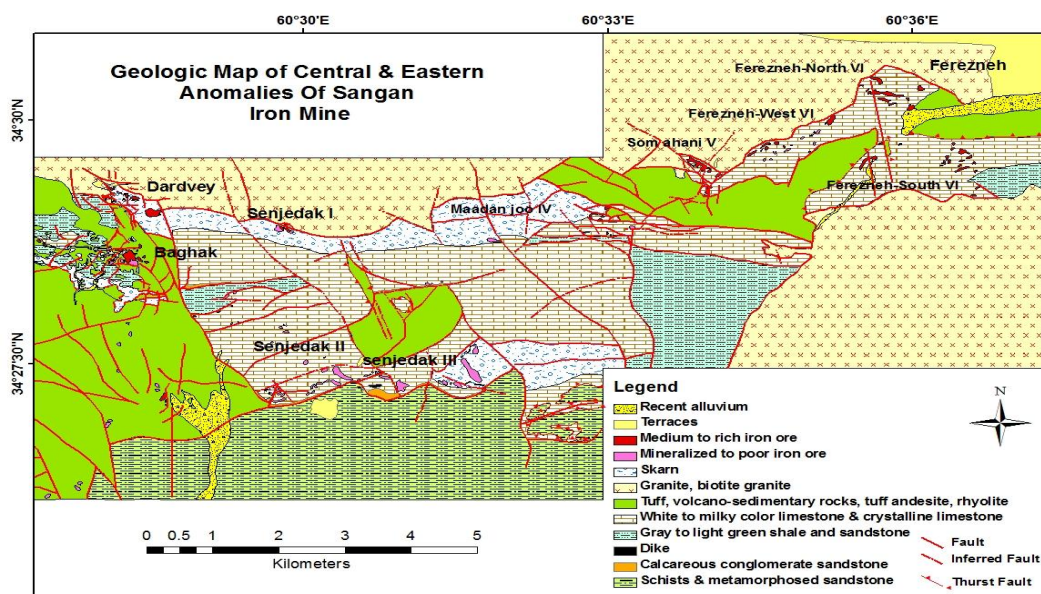
غربی) به طول ۲۶ کیلومتر و عرض ۸ کیلومتر قرار دارد. همان گونه که در (شکل ۲) مشاهده می شود این منطقه به سه ناحیه شرقی، مرکزی و غربی تقسیم شده است و هر ناحیه خود شامل چند کانسار می شود. کانسارهای شناسایی شده در ناحیه غربی شامل ۵ کانسار A، A'، B، C شمالی و C جنوبی می باشند. در ناحیه مرکزی، دو کانسار مهم به نام های درودی و باغک قرار گرفته است. کانسارهای ناحیه شرقی نیز شامل ۶ آنومالی رخنمون دار سنجدک ۱، سنجدک ۲، سنجدک ۳، معدن جو، سم آهنی و فرزانه است که مراحل اکتشاف مقدماتی را می گذراند (شکل ۳). نقشه برداری پیشرفته انواع مختلف سنگ ها با استفاده از داده های دورسنجی، یکی از مهمترین هدف های پژوهش در زمین شناسی است. زمین شناسان اکتشافی از اوایل دهه ۱۹۸۰ به طور گسترده از این داده ها برای شناسایی منابع معدنی استفاده کرده اند (بمانی و انصاری، ۱۳۸۹؛ تنگستانی و مظهري، ۱۳۸۴؛ رنجبر، ۱۳۷۷؛ معصومی و رنجبر، ۱۳۸۹؛ ملک زاده و کریم پور، ۱۳۹۰؛ هنرمند و رنجبر، ۱۳۸۴؛ Crosta and Moore 1989; Loughlin 1991; Mars and Moore et al., 2008; Ranjbar et al., Rowan, 2006; 2004; Rowan et al., 2006; Tangestani and Moore 2000; Tangestani and Moore, 2001; Tangestani et al., 2008). نقش سنجش از دور در اکتشاف ذخایر معدنی از یک طرف کاهش هزینه های اکتشاف و ریسک اقتصادی پی جویی ذخایر ناشناخته و از طرف دیگر تعمیم نتایج حاصل از دور سنجی به منطقه ای بزرگ است که به زمین شناس اجازه می دهد جزئیات منطقه مورد نظر را بررسی کند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در کمربند ولکانیکی - پلوتونیک خواف - کاشمر - بردسکن (Malekzadeh Shafaroudi et al., 2013).



شکل ۲. نواحی سه گانه اکتشافی سنگان، ناحیه غربی (۵ آنومالی)، مرکزی (۲ آنومالی) و شرقی (۶ آنومالی).



شکل ۳. نقشه زمین شناسی آنومالی های مرکزی و شرقی معدن سنگان (معدنکاو، ۱۳۸۶، با تغییرات توسط نویسندگان).

ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده پرکامبرین پوشیده می‌شوند. سنگ‌های متعلق به پرکامبرین عمدتاً در نزدیکی و مجاورت جاده خواف- تایباد به صورت تپه‌های تیره رنگ با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و غربی- شرقی به طول ۵ کیلومتر و عرض حداکثر یک کیلومتر برونزد دارند. به سمت شرق و جنوب‌شرق، گرانت سرنوسر در این واحدها نفوذ و آنها را قطع کرده است. مرز بخش‌های شمالی این واحد با رسوبات نئوژن گسل خورده و در سمت غرب به‌طور دگرشیب با رسوبات پروتروزوئیک پسین پوشیده شده‌اند (شکل ۳). کنگلومرای آهکی کرتاسه پایینی به‌صورت نازک لایه در بین توالی شیل و آهک و نیز بین سنگ‌های ولکانیکی قرار دارد که از ضخامت چندانی برخوردار نیست. در زیر آن شیل ماسه‌سنگی به‌صورت گسله قرار گرفته است. رخنمون سنگ‌های ولکانیکی و پیروکلاستیک بر روی سنگ‌های آهکی قرار گرفته و به جز آبرفت‌های کنار رودخانه، تقریباً هیچ پوشش سنگی دیگری بر روی آنها وجود ندارد. از نظر ظاهری، این سنگ‌ها دارای رنگ سبز روشن تا تیره می‌باشند و لایه ریولیتی به رنگ سفید در میان آنها یافت می‌شود. سنگ‌های آهکی اصلی و لنزهای آهن‌دار دارای پراکندگی زیاد در منطقه می‌باشد. آهک‌ها در مجاورت گرانتیت‌ها به‌شدت بلورین و مرمری گردیده است. در مکان‌هایی که لایه‌بندی و تکتونیک شرایط را مهیا ساخته‌اند، کانی‌سازی آهن نیز مشاهده می‌شود که بیشتر از سطوح لایه‌بندی پیروی می‌کند. دامنه‌ها و آبراه‌های منطقه دارای شیب ملایمی هستند و اکثراً از نهشته‌های دوران چهارم پوشیده شده‌اند. در منطقه، تحولات ساختاری بسیاری به چشم می‌خورد که اساسی‌ترین عامل این تحولات، نفوذ توده‌های بزرگ گرانتیتی سرنوسر و برمانی به‌ترتیب در شمال و جنوب منطقه می‌باشد که با فشارهای حاصل از نفوذ، باعث ساخت‌های مهم تکتونیک در منطقه گشته‌اند. اکثر گسل‌های مهم منطقه در قسمت شرقی، روند شمالی- جنوبی به خود گرفته‌اند و دلیل آن فشارهای ناشی از تزریق توده‌های نفوذی بوده که باعث جابجایی شده‌است (شکل ۳) (معدنکو، ۱۳۸۵).

کانی‌سازی معدن سنگان از نوع اسکارن است. در منطقه مرکزی، زون‌بندی اسکارن به خوبی دیده می‌شود. اسکارن‌های سنگان، طی دو مرحله اولیه دما بالا یا پیشرونده (I و II) و دو مرحله دماپایین‌تر یا پسرونده (III و IV) به وجود آمده است. در مرحله I سنگ‌آهک کلسیتی توسط اسکارن مجاورتی جایگزین شده که این مرحله با گارنت آندرادیتی فراوان مشخص می‌شود. مرحله II با مجموعه آندرادیتی- هیدرنگیتی، مرحله III به‌طور عمده با آمفیبول غنی از آلومینیم (هاستینگزیت) و مرحله IV با آمفیبول کم‌آلومینیم (فرواکتینولیت، کلریت و مگنتیت) از یکدیگر متمایز می‌شوند (مظاهری، ۱۳۷۷). در منطقه درودی، پاراژنز کانی‌سازی مگنتیت عبارت است از: فلوگوپیت، آندرادیت و کربنات. این توده به‌دلیل بالا بودن عیار آهن و ذخیره و ناچیز بودن میزان S و P، به عنوان بارزش‌ترین توده در این منطقه شناخته شده است (Mazaheri, 1995). در منطقه باغک، مگنتیت به‌صورت لایه‌ای همراه با دولومیت یافت می‌شود. پاراژنز کانی‌سازی مگنتیت شامل دولومیت، کلینوکلر، فورستریت، آمفیبول و فلوگوپیت است (کریم‌پور و ملک‌زاده، ۱۳۸۶).

کانسارهای ناحیه شرقی، شامل ۶ آنومالی رخنمون‌دار است که مراحل اکتشاف مقدماتی را می‌گذرانند. این آنومالی‌ها در حال اکتشاف سطحی است و براساس کارهای نقشه‌برداری سطحی و ژئوفیزیک اولیه، منابع قابل توجهی از سنگ آهن را نشان می‌دهد. در سنجدک ۱، کانی‌زایی بیشتر به شکل مگنتیت است که به‌صورت توده‌ای و چینه‌کران در دو طرف یک زبانه گرانتیتی وجود دارد. کلریت، سرپانتین، فلوگوپیت و آمفیبول در بین کانی‌های دگرسانی دیده می‌شوند. همچنین مگنتیت، کانه اصلی را در آنومالی معدن جو تشکیل می‌دهد و سنگ میزبان آن، آهک‌ها و آهک‌های دولومیتی دگرگون شده است. شکل کلی توده کانسار را می‌توان به‌صورت چینه‌کران در نظر گرفت، که در یک سمت آن، اسکارن‌های گارنت- پیروکسن- اسکاوپولیت جانشین آهک میزبان شده و لایه‌بندی آن را به‌طور کامل از بین برده و در سمت دیگر آن، آهک تبلور مجدد یافته‌ای دیده می‌شود که

در مقایسه با سنجنده‌های ماهواره‌های لندست، نسل جدیدی از سنجنده‌ها با پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی و طیفی بالا برای مشاهده جزئیات بیشتر زمین شناسی و شناخت حوادثی از قبیل فعالیت‌های آتشفشانی طراحی شده است. طیف سنج بازتابی و گرمایی فضابرد پیشرفته، استر، (Advanced Space-born Thermal Emission and Reflection Radiometer) اولین سنجنده از پروژه EOS بوده که بر ماهواره TERRA تعبیه شده است و در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. این سنجنده، اطلاعات طیفی منابع زمینی را در ۱۴ باند مجزا، سه باند در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک (۰/۸۶-۰/۵۲ میکرومتر) با تفکیک مکانی ۱۵ متر و با قابلیت فراهم ساختن دید سه‌بعدی با استفاده از دو مؤلفه nadir و backward در باند سوم، شش باند در محدوده فرورسرخ موج کوتاه (۲/۴۳-۱/۶) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و پنج باند در محدوده فرورسرخ گرمایی (۵/۱۲۵-۱۱/۶۵۰) با تفکیک مکانی ۹۰ متر، در اختیار کاربران قرار می‌دهد. داده‌های فرورسرخ موج کوتاه سنجنده استر در محدوده باند ۷ سنجنده ETM⁺ ماهواره لندست قرار می‌گیرد، با این تفاوت که در طیف‌سنج استر، ۶ باند پیوسته، توان تفکیک طیفی بزرگتری را نسبت به لندست ETM⁺ در این محدوده طیفی به نمایش می‌گذارد. محدوده فرورسرخ موج کوتاه دارای بیشترین پتانسیل برای بررسی ترکیب شیمیایی مواد زمینی است (ASTER User Guide, 2001).

انجام هریک از تکنیک‌های پیشرفته پردازش داده‌های ابرطیفی، مستلزم شناخت رفتار طیفی کانی‌های موجود در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مواد زمینی دارای سیماهای طیفی خاصی در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک، فرورسرخ میانی و فرورسرخ گرمایی طیف الکترومغناطیس هستند (شکل ۴). آهن‌های فریک و فرو در کانی‌های حاوی اکسید آهن دارای سیماهای طیفی منحصر به فردی در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک و در نزدیکی طول موج ۱ میکرومتر هستند. یون آهن فریک، اشکال جذبی در ۰/۴، ۰/۵، ۰/۷ و ۰/۸ میکرومتر نشان می‌دهد و یون آهن فرو در ۰/۴۳، ۰/۵۷، ۰/۸۵، ۱ و ۲-۱/۸ میکرومتر سیماهای طیفی ایجاد می‌کند. کربنات‌ها، سولفات‌ها، رس‌ها و دیگر کانی‌های حاوی یون OH از قبیل کلسیت، ژاروسیت، کائولینیت، مونتموریلونیت، کلریت و اپیدوت دارای سیماهای ترکیبی و هارمونیک در بخش فرورسرخ میانی طیف الکترومغناطیس در محدوده ۲/۴-۲/۱ به علت وجود بنیان‌های CO₃، Si-OH، Mg-OH، Al-OH و SO₄ هستند (Gupta, 1991). سیماهای جذبی در گرانتیت‌ها، گنیس‌ها و آمفیبولیت مربوط به Fe و Mg-OH در بیوتیت، هورنبلند، کلریت و اپیدوت است (Rowan et al., 2005). سیماهای جذب بسیاری از اجزای تشکیل‌دهنده سنگ مانند سیلیکات‌ها، کربنات‌ها، اکسیدها، فسفات‌ها، سولفیدها، نیترات‌ها و هیدروکسید در ناحیه فرورسرخ گرمایی وجود دارد (شکل ۴). سیماهای ارتعاشی اساسی که ناشی از شبکه بلوری و ترکیب آنیونی است در این ناحیه یافت می‌شود. کربنات‌ها به‌دلیل ارتعاش یون کربنات در نزدیکی ۷ میکرومتر، جذب نشان می‌دهند که خارج از روزه جوی است و در سنجش از دور قابل استفاده نیست، اما سیما ضعیفی در نزدیکی ۱۱/۳ میکرومتر به سختی قابل تشخیص است.

سولفات‌ها در ۹ و ۱۶ میکرومتر، فسفات‌ها در ۱۰/۳ و ۹/۲۵ میکرومتر، هیدروکسید در ۱۱ میکرومتر و اکسیدهای سیلیس در ۸-۱۲ میکرومتر دارای سیماهای طیفی هستند (Gupta, 1991). در این تحقیق نقشه‌برداری کانی‌سازی‌های آهن و بارزسازی رخنمون‌های کربنات، اندواسکارن و اگزواسکارن در آنومالی‌های مرکزی و شرقی معدن سنگان، با استفاده از قابلیت‌های داده‌های سنجنده استر و رفتار طیفی آهن فریک، آهن فرو و کربنات‌ها در محدوده مرئی و فرورسرخ نزدیک (VNIR) و فرورسرخ میانی (SWIR) و فرورسرخ گرمایی (TIR) طیف الکترومغناطیس مورد بررسی قرار گرفت.

زمین‌شناسی - کانی‌سازی

قدیمی‌ترین واحدهای موجود در منطقه سنگان، کنگلومرای برشی هستند که سن آنها به پیش از پرکامبرین نسبت داده شده است که به‌وسیله شیب‌ها و

(Collwell, 1983). یک راه معمول برای برآورد نسبت سیگنال به نوفه داده‌های دورسنجی، استفاده از روش میانگین/ انحراف معیار است (Green et al., 2003; Green et al., 1999). این روش نیازمند تعیین یک ناحیه طیفی همگن، محاسبه میانگین طیفی منطقه و تعیین انحراف معیار طیفی برای طیف میانگین است. برای مثال، محاسبه نسبت سیگنال به نوفه داده‌های فرسوخ میانی سنجنده Hyperion که در تابستان بیشترین مقدار و در زمستان کمترین مقدار است، اثر مستقیم روی نقشه برداری طیفی کانی‌ها خواهد داشت و SNR کمتر موجب استخراج جزئیات کمتر در نتایج خواهد شد (Kruse et al., 2001; Kruse et al., 2002; Kruse et al., 2003). البته توجه به این نکته برای نقشه برداری‌های زمین‌شناسی و کانی‌ها مهم است، چون مقدار زیادتر نسبت سیگنال به نوفه، جدایش کانی‌هایی چون کلسیت و دولومیت و یا کائولینیت و دیکیت را راحت‌تر می‌کند (Kruse et al., 1999). همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در این تحقیق، داده‌های سطح LIB استر به داده‌های بازتابش سطح تبدیل شده است و این امر بدون داشتن نقاط کنترل زمینی برای برطرف کردن خطاهای ثبت زمینی و بازتابش‌های حاصل از طیف‌سنجی‌های صحرایی برای تعیین ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگ‌ها، مواد سنگی غیرمتراکم، خاک، گیاه، مصنوعات ساخت بشر و همچنین عدم امکان کالیبراسیون به‌وسیله بازتابش‌های سنجنده‌های ابرطیفی برای افزایش توان تفکیک مکانی و نسبت سیگنال به نوفه (برای مثال سنجنده Hymap با پیکسل‌های ۴/۵ متری و نسبت سیگنال به نوفه ۲۱۰۰-۴۵۰ نانومتر در مقایسه با داده‌های استر ۲۰۰ نانومتری) صورت گرفته است (Kruse et al., 1999). با توجه به این شرایط و خطای جوی و کالیبراسیونی دستگاهی، دقت و اعتبار استفاده از طیف تصویر استر مورد تردید بوده و بنابراین پردازش‌ها براساس طیف‌های آزمایشگاهی صورت می‌گیرد.

نقشه‌برداری مواد زمینی با استفاده از داده‌های سنجنده‌های ابر طیفی از مهمترین اهدافی است که در سال‌های اخیر در دورسنجی زمین‌شناختی به آن پرداخته می‌شود. از جمله تکنیک‌های پیشرفته پردازش این نوع داده‌های ماهواره ای که با هدف فوق به کار می‌روند، اندیس خلوص پیکسل (Pixel Purity Index)، فیلترگذاری تطبیقی (Matched Filtering)، دخالت کمترین نوفه (Minimum Noise Fraction)، و تطبیق سیمای طیفی (Spectral Feature Fitting) را می‌توان نام برد.

نسبت گیری باندها (Band Ratioing)

در دورسنجی زمین‌شناختی، تصاویر نسبت برای نمایش کنتراست طیفی سیماهای طیفی خاصی به کار گرفته می‌شود (Rowan et al., 1977). بیشترین استفاده تصاویر نسبت در آشکارسازی ترکیب شیمیایی مواد زمینی است. در این تصاویر اثر اندازه دانه‌ها، شیب، موقعیت خورشید و جو به حداقل می‌رسد. علاوه بر آن، وضوح این تصاویر، نسبت به تصاویر باندهای مجزا بیشتر است، زیرا نسبت‌گیری اثر تفاوت در منبع روشنایی را از بین می‌برد (Vincent, 1997).

انعکاس طیفی برای آهن فریک از باند ۲ به باند ۱ کاهش می‌یابد و در باند ۳ افتادگی خفیفی را نشان می‌دهد. بر همین اساس می‌توان از نسبت ۲/۱ برای بارزسازی آهن فریک بهره گرفت. فقدان باند طیفی در محدوده ۱ میکرومتر، موجب ایجاد محدودیت برای آشکارسازی آهن فرو شده است. سیمای جذبی آهن فرو در بعضی ترکیبات مثل آمفیبول دارای انعکاس پایین در باندهای مرئی و فرسوخ نزدیک و افزایش به‌طرف باندهای ۴ و ۵ است و می‌توان از نسبت ۵/۳ برای آشکارسازی استفاده کرد (شکل ۵) (Rowan et al., 2005). در این تصویر، علاوه بر مناطق آهن‌دار رخمون‌های کربناته و اسکارن‌ها نیز بارز شده است، ولی با توجه به درجه روشنایی تصویر و همچنین همراهی این واحدها با کانی‌سازی آهن، امکان رهنمون به مناطق آهن‌دار فراهم شده است.

لایه‌بندی خود را به‌طور کامل حفظ کرده است. در سنجدک ۲ و ۳ و آنومالی سم آهنی، رگچه‌های اکسید آهن (پولک‌های اسپیکولاریت)، هماتیت و گوتیت در آهک‌ها، شیل‌ها و سنگ‌های سیلتی منطقه دیده می‌شود. واحدهای ماسه‌سنگی و کنگلومرایی در سنجدک ۲، توسط گسل، از بخش آهکی که حاوی توده‌های کوچک و بزرگی از هماتیت، گوتیت و باریت است، جدا می‌شوند و در آنومالی سم آهنی، آمفیبول و پیروکسن-اسکاپولیت با مرز مشخصی از گرانیب سرنوسر جدا می‌شود. هماتیت، گوتیت و لیمونیت به اشکال لایه‌ای، عدسی بزرگ، توده‌ای، رگه‌ای و رگچه‌ای، عمدتاً به حالت پودری در منطقه فرزنه دیده می‌شود. این کانه‌ها، شکل بلوری خاصی ندارند و فقط بافت گل‌کلمی در بعضی از گوتیت‌ها مشاهده گردید (یزدی و همکاران، ۱۳۸۸؛ حاج‌علی، ۱۳۸۶).

داده‌ها و روش تحقیق

پردازش داده‌های ماهواره ای

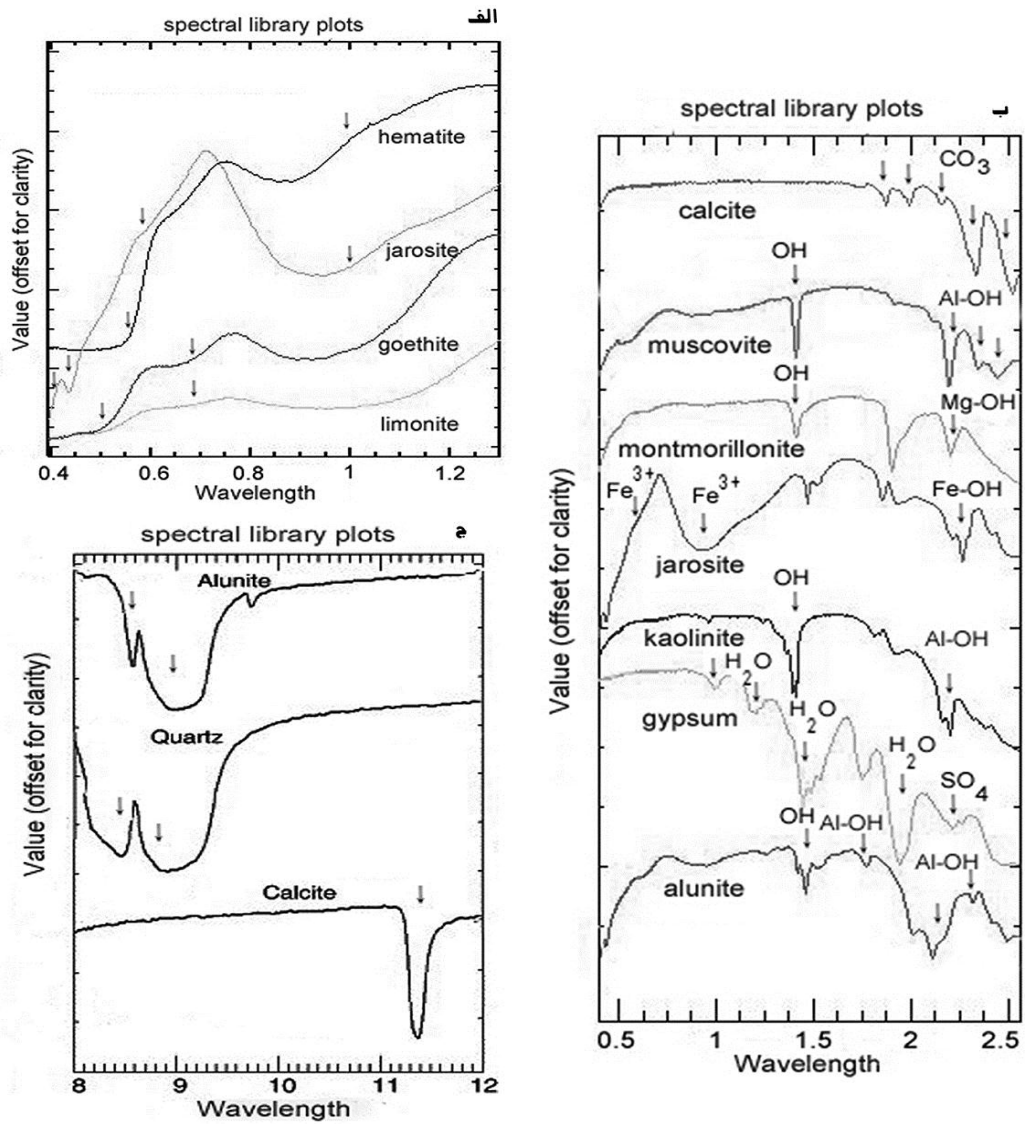
داده‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای سطح پیش پردازش LIB است. داده‌های LIB مربوط به سطح یک تولیدات استر بوده و حاصل تابش ثبت شده در سنجنده هستند و تنها تصحیحات تابش‌سنجی (radiometric) و هندسی بر روی آنها صورت گرفته است. دو کالیبراسیون برای بهنجارسازی داده‌های LIB و تبدیل آنها به داده‌های بازتاب سطحی صورت گرفت که عبارتند از: روشنایی عرض مسیر (Cross-track Illumination) و میانگین بازتاب نسبی درونی (Internal Average Relative Reflectance (IARR)).

روشنایی عرض مسیر برای از بین بردن اثرات سایه‌روشن‌های تدریجی در تصویر، اثر دستگاه‌های روبشگر و روشنایی‌های غیریکنواخت در تصویر، مورد استفاده قرار گرفت. میانگین بازتاب نسبی درونی (IARR) روش کالیبره‌ای است که برای بهنجارسازی تصاویر، نسبت به طیف میانگین صحنه صورت می‌گیرد. این روش، مؤثرترین فن برای بهنجارسازی داده‌های طیف‌سنجی تصویر در منطقه‌ای که اندازه‌گیری‌های زمینی وجود ندارد یا اطلاعات کمی از صحنه موجود است، می‌باشد (Kruse et al., 1985; Kruse, 1988).

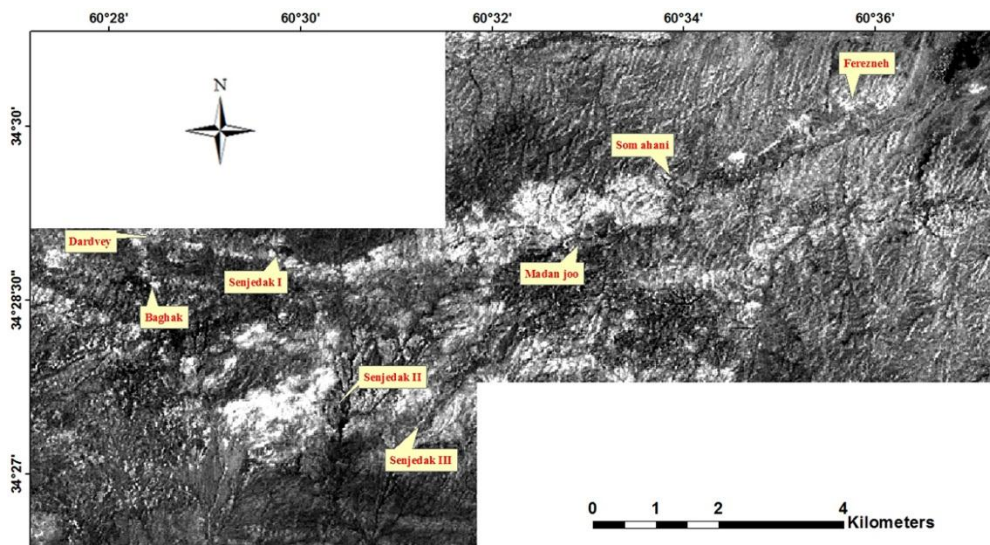
همچنین طیف عضوهای انتهایی از منابع مختلفی مانند آزمایشگاه‌های طیفی از قبیل سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، طیف‌های استخراجی از پیکسل‌های خالص، طیف‌سنجی‌های تصویری و طیف‌های حاصل از طیف‌سنج‌های زمینی تأمین می‌شود. فرآیند استخراج طیف عضوهای انتهایی در تصاویر استر شامل دخالت کمترین نوفه (Minimum Noise Fraction (MNF)) به‌منظور به حداقل رساندن نوفه و تعیین ابعاد اصلی داده‌ها، اندیس خلوص پیکسل (Pixel Purity Index (PPI)) جهت استخراج خالص‌ترین پیکسل‌ها از لحاظ طیفی، نمودار پراکندگی n-بندی برای استخراج طیف‌های انتهایی و نظارت بصری برای مشخص کردن طیف‌های انتهایی و مقایسه آنها با طیف‌های آزمایشگاهی می‌باشد (Boardman et al., 1994; Boardman et al., 1995; Kruse et al., 1993a; Kruse et al., 1993b).

توجه به این نکته مهم است که طیف‌های انتهایی باید از داده‌های با کیفیت بالا استخراج شوند. کیفیت داده‌های دورسنجی رقمی، رابطه مستقیم با میزان نوفه سیستم نسبت به شدت سیگنال دارد. این نسبت عددی بدون بعد است، با عنوان نسبت سیگنال به نوفه (Signal-to-Noise Ratio (SNR)) بیان می‌شود و دقت رادیومتری کلی سیستم را توضیح می‌دهد (Collwell, 1983).

نوفه سیستم به طراحی گیرنده و فاکتورهای دیگر از قبیل عملکرد/ حساسیت آشکارگر، توان تفکیک مکانی/ طیفی و نوفه سیستم الکترونیکی مربوط می‌شود. به هر حال، میزان نوفه برای سنجنده معمولاً ثابت است. برای دریافت داده‌های دورسنجی، سیگنال، به‌وسیله دیگر فاکتورهای خارجی از قبیل زاویه سمت‌الرأس خورشیدی (فصل تابستان یا زمستان)، پخش و تضعیف جوی و بازتابش سطحی که سیگنال قابل دسترس سنجنده را تشکیل می‌دهد، تحت تأثیر قرار می‌گیرد



شکل ۴. طیف‌های آزمایشگاهی کانی‌ها. الف: محدوده مرئی و فروسرخ نزدیک. ب: فروسرخ میانی ج: فروسرخ گرمایی (Clark et al., 1993).



شکل ۵. تصویر نسبت گیری باند ۵/۳

نقشه برداری زوایه طیفی (Spectral Angle Mapping) (SAM)

نقشه برداری زوایه طیفی (SAM) براساس رده بندی طیفی بنا نهاده شده است (Kruse et al., 1993). در این روش، شباهت بین طیف مرجع و طیف پیکسل به وسیله محاسبه زاویه بین طیفها به این ترتیب که آنها را بردارهایی در یک فضای چند بعدی (که ابعاد فضا بستگی به تعداد باندها دارد) تصور می کنند، تعیین می گردد. این فن هنگامی که بر روی داده های بازتابندگی کالیبره شده اجرا شود، نسبت به اثرات سپیدایی و روشنایی بی تفاوت خواهد بود. پیکسل های روشن، کمترین جورشدگی و پیکسل های با درجه روشنایی کمتر، بیشترین جورشدگی را با طیف مرجع نشان می دهد (CSES, 1992).

فن نقشه برداری زوایای طیفی بر روی پنجره های انتخابی و با استفاده از طیف آزمایشگاه سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) انجام گرفت. اجرای این فن در منطقه، موجب بارزسازی کانی های مگنتیت، هماتیت، گوتیت و لیمونیت شد. کانی سازی ها در آنومالی های مرکزی (باغک و دردوی) مگنتیتی است (شکل ۱۱). در آنومالی های شرقی، سنجدک ۲ و سنجدک ۳ (شکل ۱۱)، کانی سازی ها بیشتر هماتیتی و کمتر مگنتیتی و مگنتیت کانی غالب در سنجدک ۱ می باشد. کانی سازی در آنومالی معدن جو بیشتر مگنتیتی (شکل ۱۱)، و در آنومالی فرزنه و آنومالی سم آهنی، هماتیت، گوتیت و لیمونیت غالب است. همان طور که در شکل (۱۱) دیده می شود، روند کانی سازی در بخش شرقی آنومالی های شرقی (معدن جو، سم آهنی و فرزنه) بیشتر شرقی- غربی و در بخش مرکزی و غرب آنومالی های شرقی (سنجدک ۱ و ۲ و ۳) شمال شرقی- جنوب غرب است (معدنکاو، ۱۳۸۵). همچنین بارزسازی واحدهای کربنات کلسیم و منیزیم در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. واحدهای آهکی، قسمتی از اسکارن و بخش هایی از شیل ها و ماسه سنگ های کربناتی دگرگون شده در تصویر بارز شده است.

نآمیختگی طیفی خطی (Linear Spectral Unmixing) (LSU)

این روش برای نمایش فراوانی نسبی مواد با توجه به خصوصیات طیفی آنها مورد استفاده قرار می گیرد و درصد فراوانی هر یک از عضوهای انتهایی را در یک پیکسل واحد محاسبه می کند. این روش به شدت تحت تأثیر عضو انتهایی قرار داشته و هر گونه تغییری در عضو انتهایی، موجب تغییر در نتایج می شود. مخلوط شدگی طیفی، زمانی رخ می دهد که موادی با خصوصیات طیفی متفاوت با یک پیکسل واحد نشان داده شوند. میزان بازتابش هر پیکسل در تصویر، ترکیبی از بازتابش همه عضوهای انتهایی موجود در آن پیکسل است. اگر مقیاس مخلوط شدگی بزرگ باشد، مخلوط شدگی به شکل خطی است. دو روش کاملاً مختلف در تکنیک نآمیختگی استفاده می شود: عضوهای انتهایی شناخته شده (براساس طیف تصویر یا طیف های آزمایشگاهی) و عضوهای انتهایی ناشناخته (براساس استخراج عضوهای انتهایی از داده های طیف سنج تصویری).

از آنجا که در این تحقیق، عضوهای انتهایی، شناخته شده هستند و با روش های مختلف پردازش، بارزسازی آنها صورت گرفته است، لذا از روش عضوهای انتهایی شناخته شده و با استفاده از طیف های آزمایشگاهی تکنیک تجزیه طیفی به کار گرفته شد. نتایج حاصل از پردازش تجزیه طیفی برای بارزسازی کانی سازی های آهن (شکل ۱۳) و واحدهای کربناتی (شکل ۱۴) با نتایج حاصل از اجرای فن نقشه برداری زوایای طیفی مشابهت زیادی دارد و تنها تفاوت آنها در فراوانی پیکسل های بارز شده است. تصاویر حاصل از پردازش با مطالعات پیشین توسط مظاهری (۱۳۷۷)، معدنکاو (۱۳۸۵)، کریم پور و ملک زاده (۱۳۸۶)، حاج علی (۱۳۸۶) و یزدی و همکاران (۱۳۸۸) مطابقت دارد.

باندهای ۱۰-۱۴ استر برای آشکارسازی کوارتز و کربنات مفید هستند (Yamaguchi et al., 2001; Ninomiya, 2003; Rowan and Mars, 2003). کوارتز از جمله کانی هایی است که فاقد سیمای طیفی در محدوده مرئی، فرورسرخ نزدیک و فرورسرخ میانی است. کانی های مافیک مانند بیوتیت، اپیدوت و هورنبلند دارای سیماهای جذبی در باند ۱۳ و کوارتز، میکا و میکروکلین، دارای سیماهای طیفی در باند ۱۱ و ۱۲ است که به دلیل جایجایی باند رستشترالین به طرف طول موج های بلندتر در نتیجه تغییر در ترکیب مافیکی ایجاد می شوند.

نسبت ۱۴/۱۲ برای بارزسازی سیلیس مورد استفاده قرار گرفت. در (شکل ۶)، پیکسل های روشن مربوط به بارزسازی سیلیس است. در جنوب تصویر، تجمع پیکسل های سفید مربوط به بارزسازی واحد کوارتزیت و در سایر مناطق، پیکسل های روشن مربوط به بارزسازی گرانیت های سرنوسر و برمانی و همچنین بارزسازی واحدهای شیل و ماسه سنگ و توف های محتوی کوارتز و ترکیبات سیلیسی است.

آنومالی های آهن دار در این تصویر با پیکسل های سیاه رنگ قابل مشاهده است. کربنات ها از جمله کلسیت و دولومیت دارای باند جذبی در باند ۱۴ و بازتابش در باند ۱۳ استر هستند و از نسبت ۱۳/۱۴ برای بارزسازی کربنات و همچنین واحدهای آگزواسکارن (کلسیت و دولومیت) می توان بهره گرفت (شکل ۷). آهک ها و سنگ های کربناته دولومیتی و کلسیتی با پیکسل های روشن در تصویر دیده می شوند و واحد سنگ آهکی در مرکز تصویر به راحتی از دیگر واحدها قابل تفکیک است.

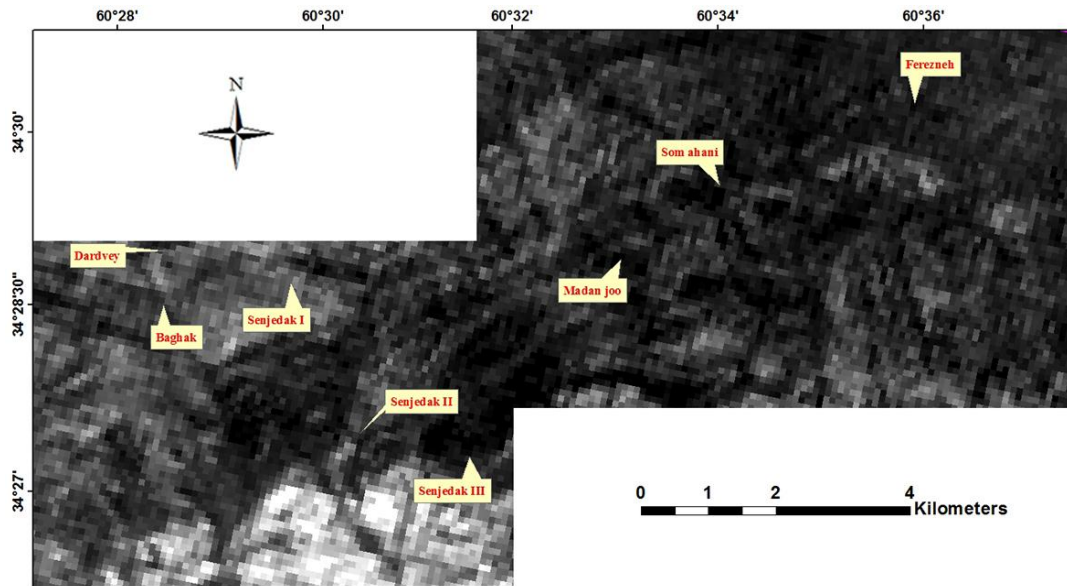
از نسبت ۱۲/۱۳ برای بارزسازی واحدهای اندواسکارنی و کانی هایی مثل اپیدوت، گارنت و پیروکسن می توان استفاده کرد (شکل ۸). واحدهای اسکارنی در این تصویر با پیکسل های سفید ظاهر شده اند. واحدهای کوارتزیت با پیکسل های سیاه و دیگر واحدها با پیکسل های خاکستری از اسکارن متمایز می شود.

به منظور ایجاد دید بهتر از تصاویر نسبت، از نسبت های ۱۳/۱۴، ۱۴/۱۲ و باند ۶ تصویر ترکیب رنگی تهیه شد (شکل ۹). در این تصویر، واحدهای اسکارنی با رنگ آبی تیره، گرانیت های سرنوسر و برمانی با پیکسل های سبز-آبی، کوارتزیت ها به رنگ سبز روشن، توف ها با پیکسل های سبز تیره، شیل و ماسه سنگ ها با پیکسل های قرمز تیره و کربنات ها با پیکسل های سرخابی و بنفش، قابل نقشه برداری هستند.

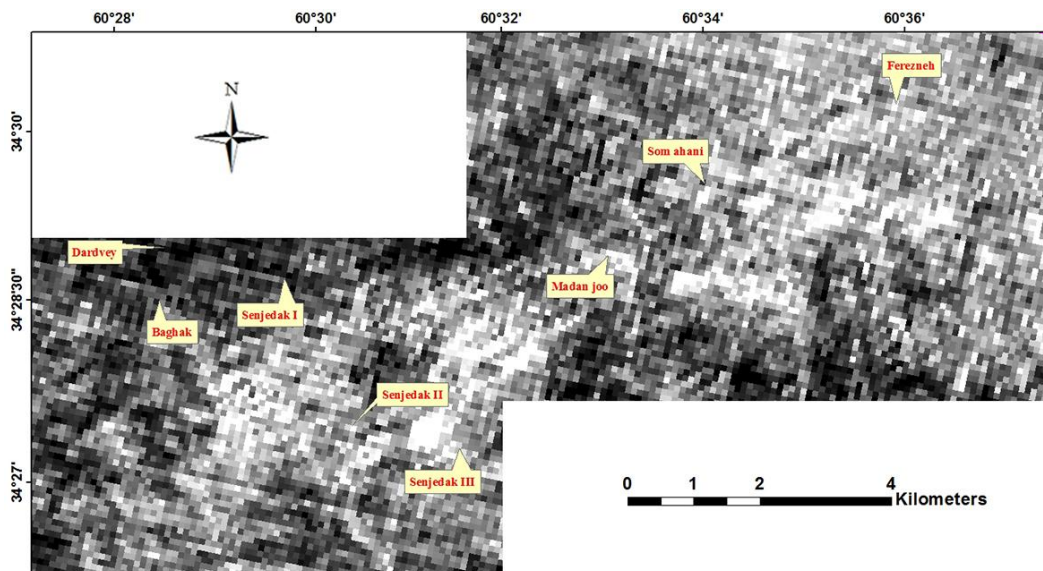
تصویر برداری باند جذب نسبی (Relative Absorption Band Depth)

کراولی و همکاران (Crowley et al., 1989) تصاویر نسبت ویژه ای را برای نمایش کنتراست طیفی سیماهای جذبی به کار گرفتند. در روش تصویر برداری باند جذب نسبی (Relative Absorption Band Depth) برای نمایش هر سیمای جذبی مخرج کسر باندی است که نزدیک ترین موقعیت به بیشترین جذب را اشغال کرده (Band 2) و صورت کسر مجموع دو باند بازتابی مجاور آن می باشد.

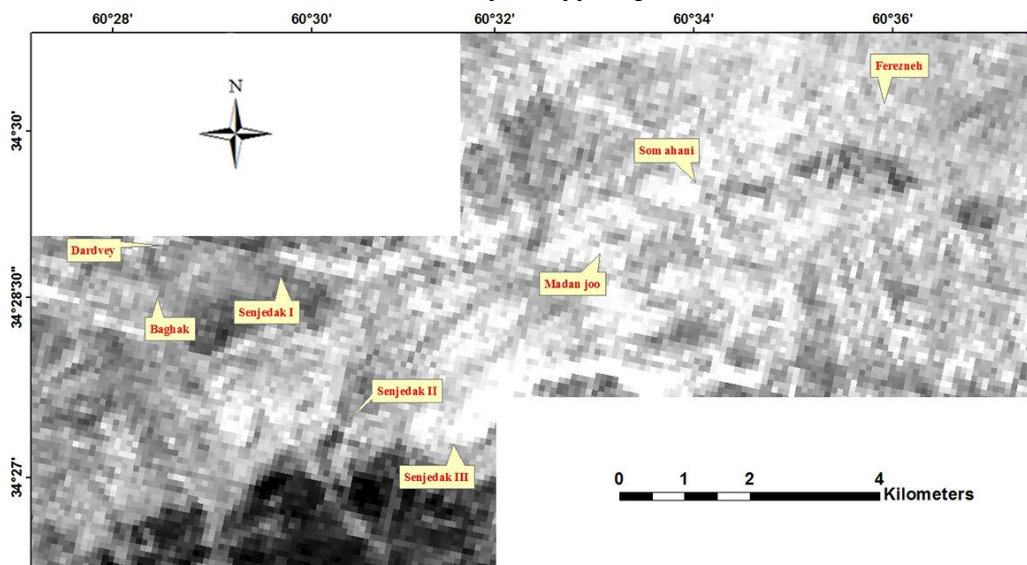
بر همین اساس و با استفاده از رفتار طیفی مواد زمینی در بخش های مختلف از طیف الکترومغناطیسی، نسبت $6+9/7+8$ برای بارزسازی اندواسکارن (کلریت، اپیدوت و آمفیبول)، نسبت $7+9/8$ برای بارزسازی ترکیبات کربنات کلسیمی از جمله آهکی و نسبت $6+8/7$ برای بارزسازی دولومیت مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از نسبت های $7+9/8$ و $6+8/7$ همراه با باند ۱ (قرمز: باند ۱، سبز: $7+9/8$ ، آبی: $6+8/7$) بارزسازی واحدهای کربناتی را به دنبال داشت (شکل ۱۰). در این تصویر، کربنات ها اعم از واحدهای آهکی و در بعضی جاها واحدهای رسوبی دگرگون شده با رنگ های سبز، آبی، سبز-آبی و بعضاً زرد قابل مشاهده است. سایر رخنمون ها با رنگ های بنفش و سرخابی قابل تمایز هستند.



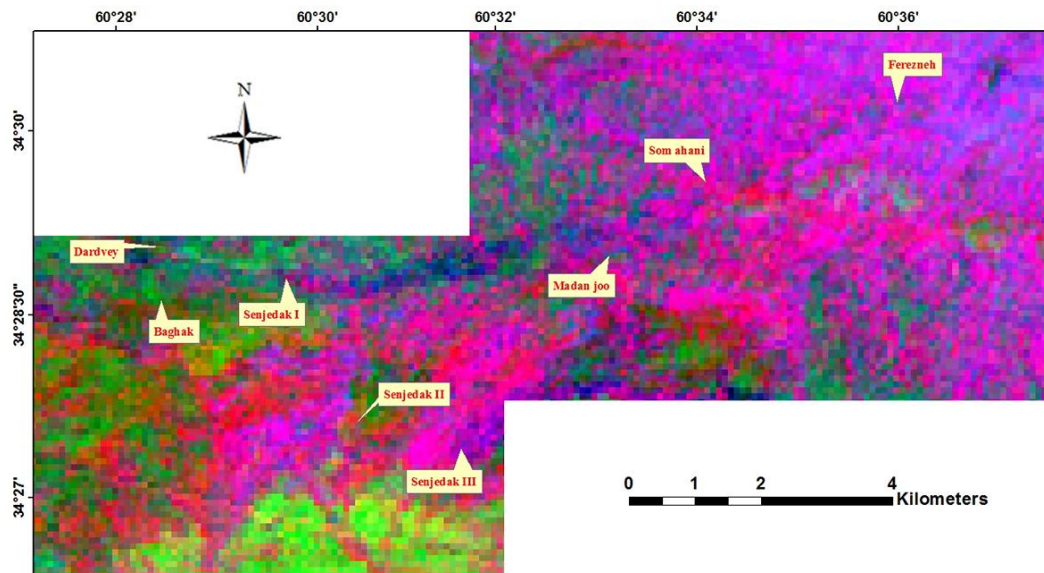
شکل ۶. تصویر نسبت گیری باند ۱۴/۱۲



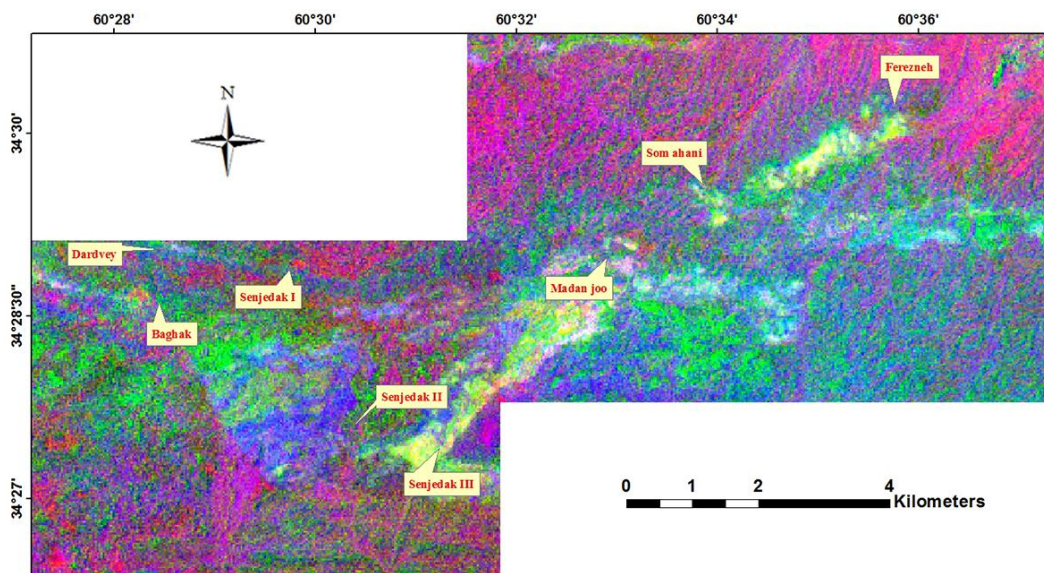
شکل ۷. تصویر نسبت گیری باند ۱۳/۱۴



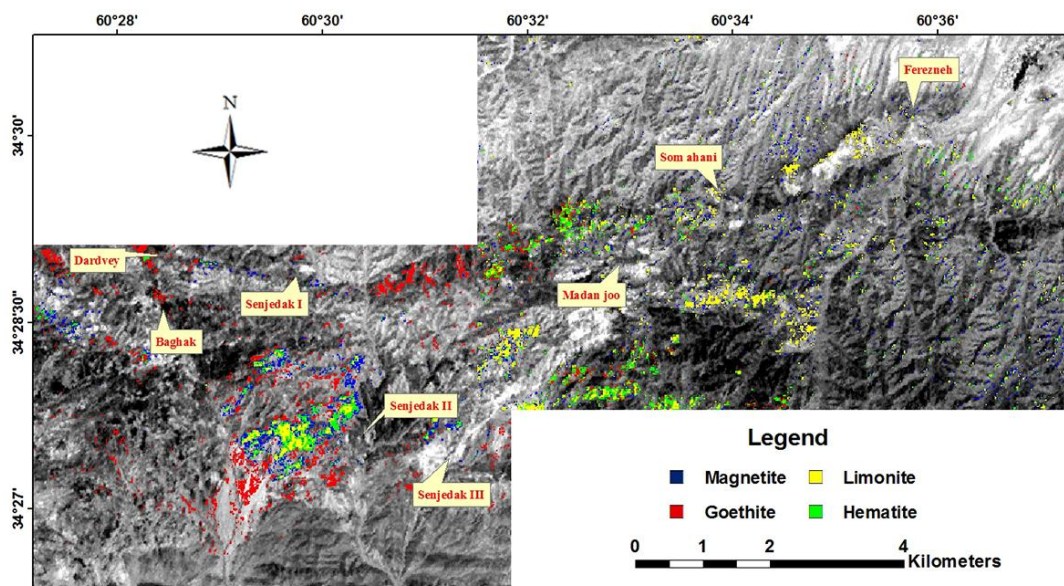
شکل ۸. تصویر نسبت گیری باند ۱۲/۱۳



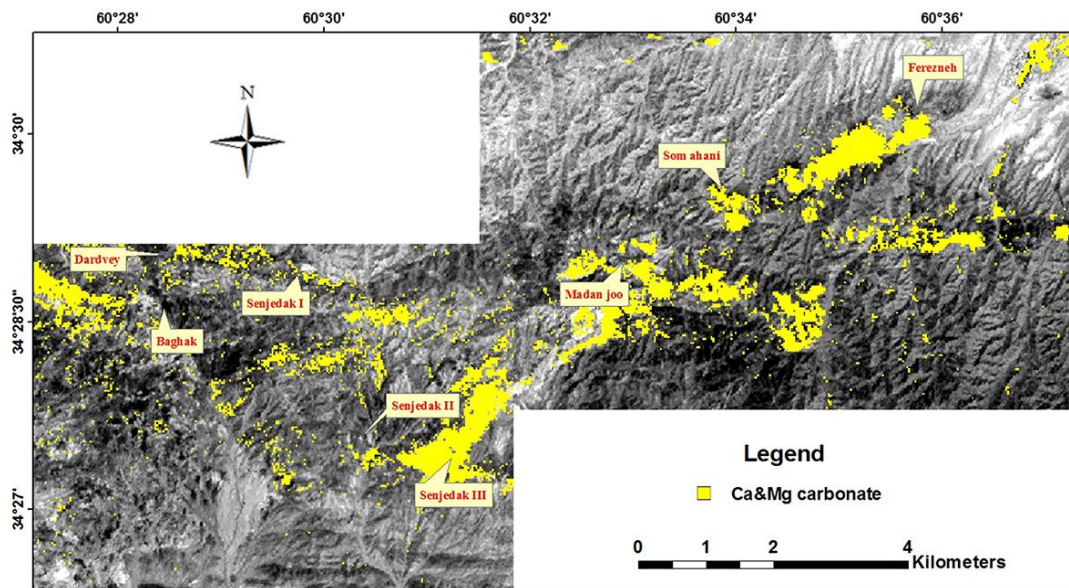
شکل ۹. ترکیب رنگی کاذب نسبت‌های ۱۴/۱۲، ۱۳/۱۴ و باند ۶



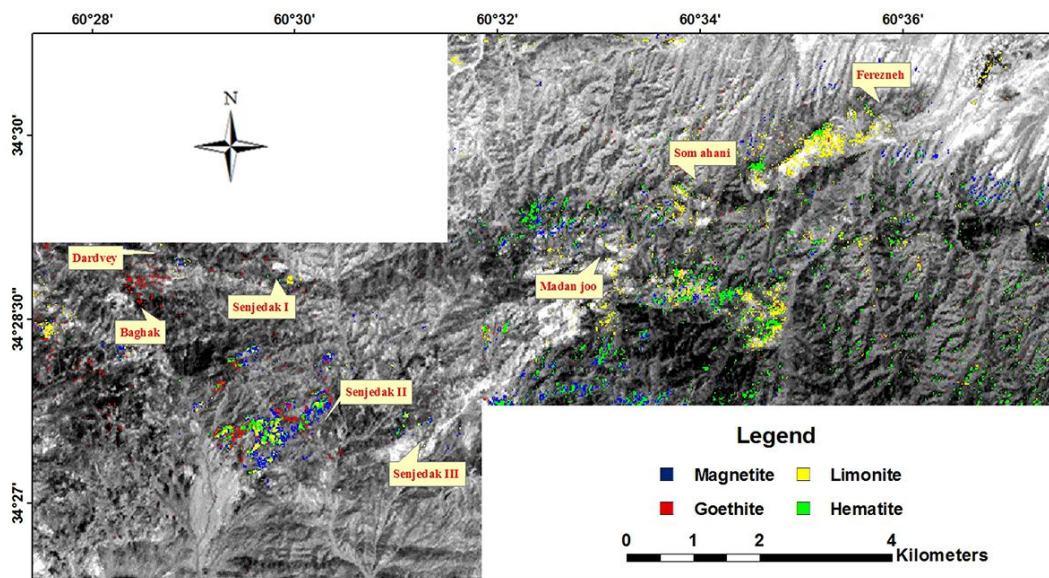
شکل ۱۰. ترکیب رنگی کاذب نسبت‌های ۷+۹/۸ و ۶+۸/۷ و باند ۱



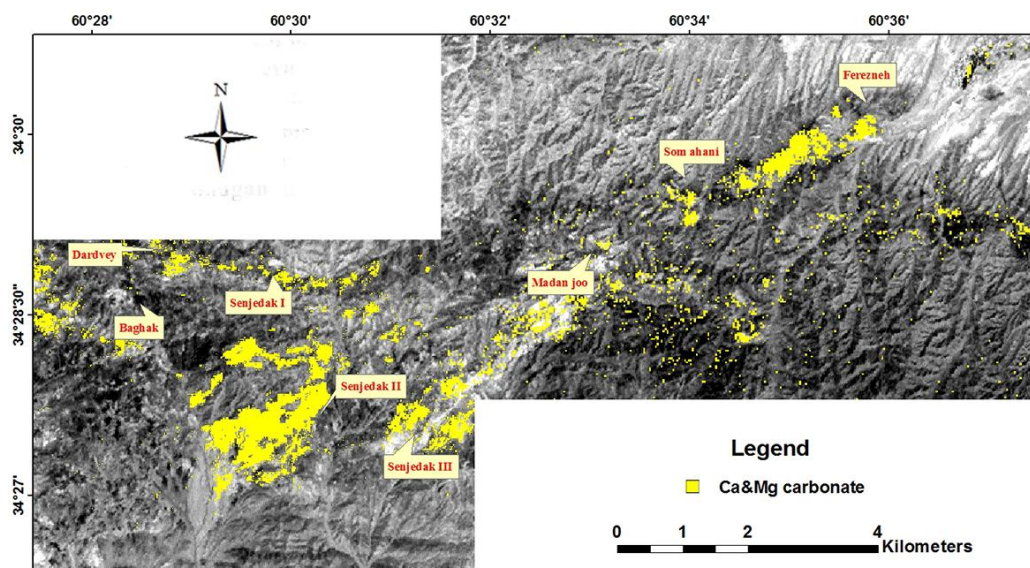
شکل ۱۱. نقشه‌برداری کانی‌سازی‌های آهن با استفاده از فن نقشه‌برداری زوایای طیفی.



شکل ۱۲. بارزسازی واحدهای کربنات کلسیم و منیزیم با استفاده از فن نقشه برداری زوایای طیفی.



شکل ۱۳. نقشه برداری کانی سازی های آهن با استفاده از فن تجزیه طیفی خطی.



شکل ۱۴. بارزسازی واحدهای کربنات کلسیم و منیزیم با استفاده از فن تجزیه طیفی خطی

واحدهای کربناتی مرتبط با کانی سازی ها، بارزسازی شد. نتایج خروجی از پردازش داده های ماهواره ای در این تحقیق با مطالعات پیشین انجام شده در منطقه مطابقت داشته و نتایج به برخی پارامترها از قبیل: زاویه آستانه، طیف نمونه های دستی و آشنایی با عضوهای انتهایی و ترکیب شیمیایی آنها وابسته است. مطمئناً در پردازش داده ها، حضور برخی از عضوهای انتهایی ممکن است نادیده انگاشته شود، اما در مجموع می توان گفت دورسنجی یک روش قابل اعتماد برای هدایت زمین شناس به مناطق اکتشافی و کسب دیگر اطلاعات مفید از قبیل تشخیص اولیه نوع کانی سازی ها می باشد و استفاده از داده های با توان تفکیک طیفی بالاتر، نتایج بهتر و موثرتری را در نقشه برداری های زمین شناختی به دنبال خواهد داشت، هرچند که اظهار نظر قطعی در مورد کانی سازی ها نیازمند بازدیدهای صحرایی و مطالعات دقیق تر است.

تشکر و قدردانی

این مقاله مربوط به طرح شماره ۳، به شماره ۲۷۱۱۸/۳ مورخ ۹۲/۲/۲۰، دانشگاه فردوسی مشهد می باشد.

نقشه برداری پیشرفته انواع مختلف سنگ ها با استفاده از داده های دورسنجی، یکی از مهمترین هدف های پژوهش و تحقیق در زمین شناسی است. در این تحقیق، پردازش های ساده و پیشرفته داده های مرئی و فرورسرخ نزدیک، فرورسرخ میانی و فرورسرخ گرمایی سنجنده استر با به کارگیری طیف های آزمایشگاهی به منظور ایجاد دید کلی از آنومالی ها، بارزسازی و نقشه برداری کانی سازی ها و همچنین دستیابی به مناطق امیدبخش، موفقیت آمیز بود. از آنجا که در کانی سازی های مرتبط با اسکارن، شناسایی و تمیز کربنات ها از گام های اولیه در دستیابی به مناطق امیدبخش و پتانسیل های معدنی محسوب می شود، نسبت گیری و ایجاد تصاویر ترکیب رنگی با استفاده از باندهای فرورسرخ گرمایی به ویژه با توجه به ویژگی های طیفی کانی های موجود در زون های اسکارنی، جداسازی و تفکیک واحدهای کربناته، اندواسکارن و اگزواسکارن را از دیگر رخنمون های سنگی و نقشه برداری آنها را میسر ساخت. با اجرای فن نقشه برداری زوایای طیفی و ناآمیختگی طیفی خطی به کمک طیف های آزمایشگاهی، انواع کانی سازی های آهن مگنتیتی، هماتیتی، گوتیتی و لیمونیتی در منطقه سنگان نقشه برداری و از یکدیگر تفکیک و

منابع

- بمانی، م.، انصاری، ع. ح.، ۱۳۸۹. تلفیق نتایج بررسی های دورسنجی و مطالعات ژئوفیزیک هوایی در بررسی پتانسیل معدنی محدوده ۱:۲۵۰۰۰۰ انارک، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، مقالات پوستری، دورسنجی، ص ۳۰۲.
- حاج علی، م.، ۱۳۸۶. کانی شناسی، ژئوشیمی و وزن کانسار آهن سنگان (آنومالی شرقی) خواف، خراسان رضوی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۵۰ ص. رنجبر، ح.ا.، ۱۳۷۷. آنالیز داده های دورسنجی و ژئوفیزیک هوایی در سامانه اطلاعات جغرافیایی. دومین همایش انجمن زمین شناسی ایران.
- کریم پور، م. ح.، ۱۳۸۲. کانی شناسی، آلتراسیون سنگ و مثال هایی از IOCG منشأ و محیط تکتونیکی کانسارهای ایران، مجموعه مقالات یازدهمین کنفرانس بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه یزد، ص ۱۸۹-۱۸۴.
- کریم پور، م. ح.، سعادت، س.، و ملک زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۸۱. شناسایی و معرفی کانی سازی نوع Fe-Oxides Cu-Au و مگنتیت مرتبط با کمر بند ولکانیکی- پلوتونیک خواف- کاشمر- برد سکن، بیست و یکمین گردهمایی علوم زمین.
- کریم پور، م. ح.، ملک زاده شفاوردی، آ.، ۱۳۸۶. ژئوشیمی - کانی شناسی زون های اسکارنی و پترولوژی سنگ منشأ کانسار سنگ آهن سنگان خراسان رضوی، فصلنامه علوم زمین، سال ۱۷، ش. ۶۵، ص ۱۱۴-۱۰۸.
- مظاهری، س.ا.، ۱۳۷۷. مطالعه شیمی کانی ها در اسکارن های آهن دار سنگان خراسان، خلاصه مقالات هفدهمین گردهمایی علوم زمین، ص ۱۹۶-۱۸۹.
- مظاهری، س.ا.، ۱۳۷۹. معرفی آمفیبول های ناحیه سنگان خواف، هشتمین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ص ۱۶۸-۱۶۴.
- معدنکاو، ۱۳۸۵. گزارش نقشه ۱:۲۰۰۰ و ۱:۵۰۰۰، کانسارهای آهن محدوده شرق سنگان.
- معدنکاو، ۱۳۸۶. نقشه زمین شناسی ۱:۲۰۰۰ آنومالی های شرقی سنگان.
- معصومی، ف.ا.، رنجبر، ح.ا.، ۱۳۸۵. استفاده از منطق فازی دانش پایه جهت نقشه برداری از پتانسیل های معدنی- مطالعه موردی شمال شهرستان بافت، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین.
- ملک زاده شفاوردی، آ.، کریم پور، م. ح.، ۱۳۹۰. پردازش داده های سنجنده استر به روش نقشه برداری زاویه طیفی و تلفیق آن با اطلاعات زمین شناسی و ژئوشیمی رسوبات رودخانه ای برای پتانسیل یابی مناطق مستعد کانی سازی، شمال شرقی بیرجند، دومین همایش ملی انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران.
- هاشمی تنگستانی، م.، مظهری، ن.، ۱۳۸۴. پردازش طیفی پیشرفته داده های سنجنده استر در نقشه برداری زون های دگرسانی ذخایر مس پرفیری، مجموعه مقالات نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، ص ۱۸۶-۱۹۵.
- هنرمند، م.، رنجبر، ح.ا.، ۱۳۸۴. کاربرد روش های مختلف پردازش تصویر داده های ETM+ به منظور اکتشاف کانسارهای مس نوع پورفیری و رگه ای در منطقه کوه ممزار- کوه چنچ در استان کرمان. فصلنامه علمی و پژوهشی علوم زمین، ص ۱۰-۱۲۷.
- یزدی، م.، بهزادی، م.، حاجی علی، م.، ۱۳۸۸. کانی سازی آهن در آنومالی شرقی سنگان، شمال شرق ایران، فصلنامه علمی- پژوهشی زمین شناسی و محیط زیست، سال ۳، ش. ۱.

Aster User Guide, 2001, V. 3, 1.

Boardman, J.W., Kruse, F.A., 1994. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, orthern Grapevine Mountains, Nevada. Proceedings Tenth Thematic Conf., Geologic Remote Sensing: San Antonio, Texas, 9-12 May 1994, I-407-I-418. ERIM.

Boardman, J.W., Kruse, F.A., Green, R.O., 1995. Mapping Target Signatures via Partial Unmixing of AVIRIS Data, Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, 1. JPL Publication, Washington, D. C., p: 23-26.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J. King, T.V.V., Calvin, W.M., 1993. The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library, 1, 0.2 to 3.0 microns, U.S. Geological Survey Open File Report, Vol:1340, p:93-592.

- Collwell, R.N. (ed.), 1983. Manual of Remote Sensing, 2nd edition. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 344-363, and 1196.
- Crosta, A.P., Sabine, C. and Tarani, J.V., 1998. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using AVIRIS hyperspectral data. Remote Sensing of Environment, Vol:65, p: 309-319.
- Crowley, J.K., Brickey, D.W., Rowan, L.C., 1989. Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: mineral discrimination using relative absorption band-depth images. Remote Sensing of Environment, Vol:29, p:121-134.
- CSES (Center for the Study of Earth from Space), 1992. SIPS User's Guide - The Spectral Image Processing System, 1.1, University of Colorado, Boulder, 74p.
- Green, R.O., Chrien, T.G., Pavri, B., 2003. On-orbit determination of the radiometric and spectral calibration of Hyperion using ground, atmospheric and AVIRIS underflight measurements. TGARS Special Issue on EO-1.
- Green, R.O., Pavri, B., Faust, J., Williams, O., 1999. AVIRIS radiometric laboratory calibration, inflight validation, and a focused sensitivity analysis in 1998. 8th JPL Airborne Earth Science Workshop, Jet Propulsion Laboratory Publication, p:99-17, 161-175.
- Gupta, R., 1991. Remote Sensing Geology. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Kruse, F. A., and Lefkoff, A. B., 1993. Knowledge-based geologic mapping with imaging spectrometers: Remote Sensing Reviews, Special Issue on NASA Innovative Research Program (IRP) results, Vol: 8, p: 3 - 28.
- Kruse, F.A., Raines, G.I., Watson, K. 1985. Analytical techniques for extracting geologic information from multichannel airborne spectroradiometer and airborne imaging spectrometer data. Proceedings of the 4th thematic conference on remote sensing for exploration geology. Ann Arbor, MI.
- Kruse, F.A., 1988, Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California. Remote Sensing of Environment, Vol: 24, p: 31-51.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H., 1993a. The Spectral Image Processing System (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment, Vol: 44, p: 144-163.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Dietz, J.B., 1993b. Expert system-based mineral mapping in northern Death Valley, California/Nevada using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, Vol: 44, p: 309-336.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 1999. Fifteen Years of Hyperspectral Data, northern Grapevine Mountains, Nevada. 8th JPL Airborne Earth Science Workshop, Jet Propulsion Laboratory Publication, JPL Publication, p: 99-17, 247-258.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 2001. Progress Report: Geologic Validation of EO-1 Hyperion. 10th JPL Airborne Earth Science Workshop, Jet Propulsion Laboratory Publication, Vol: 02-1, p: 253-265.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., 2002. Comparison of EO-1 Hyperion and Airborne Hyperspectral Remote Sensing Data for Geologic Applications. SPIE Aerospace Conference, 9-16 March 2002, Big Sky, Montana, published on CD-ROM, IEEE Catalog Number 02TH8593C, Paper #6.0102, 12 p.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., Huntington, J.F., Mason, P., Quigley, M.A., 2003. Evaluation and Validation of EO-1 Hyperion for Geologic Mapping. Special Issue, TGARSS, IEEE.
- Loughlin, W., 1991. Principal component analysis for alteration mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol:57, p: 1163-1169.
- Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M.H., Golmohammadi, A. 2013. Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangan iron mine, NE Iran. Journal of Asian Earth Sciences, Vol: 64 , p:256-271.
- Mars, J.C., 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, Vol: 2 (3), p: 161-186.
- Mazaheri, S.A. 1995. Petrological Studies of Skarns from Marulan South, New South Wales, Australia and Sangan, Khorasan, Iran. Ph.D. thesis, University of Wollongong, New South Wales, Australia.
- Moore, F., Rastmanesh, F., Asady, H., Modabberi, S., 2008. Mapping mineralogical alteration using principal component analysis and matched filter processing in Takab area, north-west Iran, from ASTER data. Int. J. Remote Sens. 29 (10), p:2851-2867.
- Ninomiya, Y., 2003. Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared ASTER data: case studies. PSPIE, Vol:4886, p: 123-132.
- Ranjbar, H., Honarmand, M., and Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian Volcanic Sedimentary Belt. Asian Journal of Earth sciences, Vol:24 , p: 237-243.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H., Ashiely, R.P., 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in the visible and near infrared multispectral images. Geophysics, Vol:42, p: 522-535.
- Rowan, L.C., Mars, J.C., 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. Remote Sens. Environ. Vol:84, p:350-366.
- 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: 105-116.

- Rowan, L.C., Robert, G.S., John, C., 2006. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sens. Environ.* Vol:104, p: 74–87.
- Tangestani, M.H. and Moore, F., 2000. Iron oxide and hydroxyl enhancement using the Crosta method: a case study from the Zagros Belt, Fars Province, Iran. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol: 2, p: 140–146.
- Tangestani, M.H. and Moore, F., 2001. Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: a case study, Meiduk area, Kerman, Iran. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol: 27, p: 176–182.
- Tangestani, M.H. and Moore, F., 2002. Porphyry copper alteration mapping at the Meiduk area, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, Vol: 23, p: 4815–4825.
- Tangestani, M.H., Mazhari, N., Ager, B., Moore, F., 2008. Evaluating advance spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data for alteration zone enhancement in a semi-arid area, northern shahr-e- Babak, SE Iran. *Int. J. Remote Sens.* Vol: 29 (10), p:2833–2850.
- Vincent, R.K., 1997. *Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 366 p.
- Yamaguchi, S., Kamiya, Y., and Sun, T.-p., 2001. Distinct cell-specific expression patterns of early and late gibberellin biosynthetic genes during Arabidopsis seed germination. *Plant J.* Vol: 28, p: 443–453.