

## شناسایی مناطق دگرسانی هیدروترمال در منطقه طارم استان زنجان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ASTER

اصغر شرقی نمین\*، سهیلا اصلانی<sup>۲</sup>، عباس بحرودی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده معدن، گروه اکتشاف

۲ و ۳- استادیار دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده معدن، گروه اکتشاف

(\*عهده دار مکاتبات - ut.sharghi@yahoo.com)

### چکیده

ناحیه مورد مطالعه بخشی از ارتفاعات واقع در بین دشت زنجان و دشت طارم را شامل می‌شود. محدوده مورد اکتشاف در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ : ۱ طارم در شمال زنجان واقع شده است سطح ناحیه عموماً پوشیده از سنگ‌های ولکانیکی می‌باشد. رسوبات ولکانیکی به صورت دو عضو کردکندی و آمند تقسیم شده و یک توده نفوذی به صورت باتولیت با ترکیب مونزونیت، کوارتز مونزونیت، گرانیت و گرانودیوریت هم‌آهنگ با روند عمومی طبقات به طور شمال‌غرب- جنوب‌شرق ناحیه را به دو بخش تقسیم کرده است. ناحیه از نظر زمین ساخت و حوزه رسوبی در البرز غربی قرار گرفته و قدیمی‌ترین رسوبات شناخته شده در آن متعلق به آئوسن و سازند کرج می‌باشد. آلتراسیون چشمگیری در دو طرف توده نفوذی باتولیتی دیده می‌شود که شامل آلتراسیون‌های سرسیتی، آرژیلیکی، آلونیتی، سیلیسی و به صورت پراکنده در اشکال بی‌نظم و کوچک در درون سنگ‌های پیروکلاستیکی و توده نفوذی دیده می‌شود. در این مقاله تکنیک‌های مختلفی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ASTER جهت شناسایی و تفکیک مناطق دگرسانی به کار گرفته شده است. این روش‌ها شامل روش ترکیب رنگی کاذب، آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی کروستا و روش نسبت باندی می‌باشند. با مقایسه روش‌های فوق با یکدیگر مشخص شد که بهترین و ساده‌ترین روش در شناسایی مناطق دگرسانی در منطقه مورد مطالعه، روش ترکیب رنگی کاذب می‌باشد. هم‌چنین با به‌کارگیری روش‌هایی مانند آنالیز مرفه-های اصلی و کروستا و بهره‌گیری از اطلاعات زمین‌شناسی استخراج شده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ : ۱ طارم، اقدام به تهیه نقشه فراوانی دگرسانی‌های شاخص منطقه شده است. انطباق نواحی امید بخش به دست آمده از روش‌های مختلف آشکارسازی با یکدیگر نشان دهنده میزان دقت و کارایی پردازش‌ها بر روی داده‌های ماهواره‌ای ASTER می‌باشد.

**واژگان کلیدی:** طارم، دگرسانی، سنجنش از دور، آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی، نسبت باندی.

### ۱- مقدمه

سنجنش از دور را علم و هنر کسب اطلاعات فیزیکی و شیمیایی از پدیده‌های زمینی و جوی از طریق ویژگی‌های امواج الکترومغناطیسی بازتابی یا منتشر شده از آن‌ها و بدون تماس مستقیم با پدیده‌های مذکور تعریف نموده‌اند. شناسایی و تعیین نواحی دارای پتانسیل معدنی یکی از کاربردهای عمده و مهم سنجنش از دور در زمینه اکتشاف کانی-ها می‌باشد. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل قابلیت پوشش چند طیفی و چند زمانی منطقه‌ای گسترده، از پتانسیل بالایی برای شناسایی مناطق دگرسان مربوط به توده‌های کانساری و در نتیجه اکتشاف ذخائر معدنی خصوصاً در نواحی خشک برخوردار می‌باشند. سنجنده ASTER دارای ۱۴ باند در محدوده‌های طیفی، مرئی و مادون قرمز نزدیک (۰/۲۵-۰/۸۶ میکرومتر)، مادون قرمز موج کوتاه (۱/۶-۲/۴۳ میکرومتر) و مادون قرمز حرارتی (۱۱/۶۵-۸/۱۲۵ میکرومتر) است که به ترتیب دارای قدرت تفکیک مکانی ۱۵، ۳۰ و ۹۰ متر می‌باشند. در این مقاله با به‌کارگیری

روش نسبت بانندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و استفاده از ترکیب‌های رنگی کاذب، توانایی داده‌های ماهواره‌ای ASTER در شناسایی و تفکیک دگرسانی‌های هیدروترمال به نمایش گذاشته شده است (زبیری و مجد، ۱۳۸۲). در این مقاله از تصویر ATER به شماره ۰۹۵۹۲۴ که در تاریخ ۲۰۰۱/۱/۲۳ برداشت شده، برای شناسایی و تفکیک کانی‌های دگرسانی هیدروترمال در ناحیه طارم استفاده شده است. این تصاویر از نظر پردازش در تراز 1B قرار دارند که معادل داده‌های رادیانس در سنجنده است. برای پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای از نرم افزار ENVI VER 4.7 استفاده شده است.

## ۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی منطقه

منطقه مورد بررسی به وسعت ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در شمال استان زنجان به مختصات جغرافیایی  $38^{\circ}$  تا  $48^{\circ}$  طول شرقی و  $30^{\circ}$  تا  $37^{\circ}$  درجه شمالی واقع است. بلندی متوسط منطقه از سطح دریا ۱۸۰۰ متر بوده و ناحیه به طور کامل کوهستانی می‌باشد که از شمال و جنوب به دو دشت طارم و زنجان محدود است. از راه‌های دسترسی منطقه می‌توان به راه‌های زنجان-تهم-زرنی و زنجان-علی‌آباد موسوی-گلیجه، زنجان-گیلوان-چورزق اشاره نمود. منطقه مورد مطالعه به علت قرارگیری در رشته کوه‌های البرز و ارتفاعات طارم دارای آب و هوای کوهستانی می‌باشد. بدین معنی که دارای تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد و پر برف می‌باشد. بدین ترتیب فصل کار منطقه از اوایل اردیبهشت تا اواسط آبان می‌باشد. لیتولوژی عمومی منطقه تناوبی از سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی می‌باشد که به علت تناوب جنس سنگ و متفاوت بودن مقاومت آن‌ها در مقابل فرسایش دیواره دره‌ها به صورت پرتگاه درآمد است (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۲).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی محدوده طارم

## ۳- موقعیت زمین‌شناسی

تشکیلات کرج در کوه‌های طارم (منطقه اکتشافی) که توسط هیرایاما و صمیمی (۱۹۶۶) مطالعه شد به دو بخش ممبر کردکند و آمند تقسیم و توصیف شده‌اند. ممبر کردکند (بخش زیرین) دارای ضخامتی حدود ۲۴۰۰ متر و ممبر آمند (بخش بالایی) دارای ضخامتی حدود ۱۳۵۰ متر است. واحدهای فوق‌الذکر به وسیله توده گرانودیوریتی و گسل‌ها از واحدهای زیرین (سازند کرج) جدا می‌شود. از لحاظ لیتولوژی شامل تناوبی از آندزیت توف ماسه‌ای توف برشی و ماسه سنگ است. توف‌های سفید رنگ آلونیتی شرق طارم متعلق به همین سازند کرج می‌باشد با این تفاوت که در منطقه مورد مطالعه این واحد آلونیتی (توف سفید رنگ) دارای ضخامت کمتری است. به این ترتیب از نظر خصوصیات لیتولوژیکی یعنی تناوب توف و آندزیت و توف سفید آلونیتی کاملاً قابل قیاس با توف‌های کرج است. سنگ‌های نفوذی در مرکز منطقه مورد مطالعه به موازات روند عمومی لایه‌های ائوسن (شمال‌غرب-جنوب‌شرق) در

داخل توف‌های ائوسن نفوذ کرده است. لیتولوژی این توده شامل گرانیات و گرانودیوریت و مونزودیوریت می‌باشد که در بعضی مناطق تا گابرو نیز تغییر می‌کند. دارای بافت دانه درشت تا دانه ریز و آپلیتی نیز می‌باشد. در بعضی از حاشیه‌های این توده نفوذی بافت آن دانه ریز گشته به طوریکه شبیه به یک سنگ ساب ولکانیکی می‌شود. به نظر می‌رسد این تفاوت بافت و ترکیب توده نفوذی بر اثر تفریق ماگما به وجود آمده است. در حاشیه توده نفوذی هاله دگرگونی ضعیفی در حدود ۲ متر بر روی توف‌های کرج قابل تشخیص می‌باشد و بر اثر دگرسانی هیدروترمال در توف‌های کرج پدیده آلتراسیون رخ داده و کانی‌هایی از قبیل آلونیت بوجود آمده است. این توده نفوذی دارای رنگ خاکستری تا خاکستری تیره با بلورهای فلدسپات همراه کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، فلدسپات پلاژیک و کوارتز می‌توان تشخیص داد که در میدان میکروسکوپ دارای بافت هیپایدیومورفیک و کانی‌های اتومورف می‌باشد. در آن پلاژیوکلاز (آلبیت-اولیگوکلاز) با بلورهای شکل‌دار آمفیبول (ترمولیت-کتینولیت) به صورت بلورهای غیر اتومورف به صورت سبز تیره، بیوتیت با بلورهای منشوری دارای چند رنگی قهوه‌ای و کانی‌های ثانوی شامل کلریت، اپیدوت، سرسیت و کانی‌های فرعی به صورت روتیل، اسفن، آپاتیت می‌باشد. از لحاظ ماگمایی گرانیتوئیدهای فوق‌الذکر کالکوآلکانل تا آلکانل می‌باشد. بر اساس رسم نمودارهای ژئوشیمیایی این گرانیتوئیدها از نوع I بوده و ماگمای اولیه در شرایطی با فوگاسیته بالای اکسیژن متبلور شده است. رگه‌های سیلیسی نشأت گرفته از گرانیتوئیدها در خود گرانیات-گرانودیوریت و درز و شکاف‌های واحدهای پیروکلاستیکی کرج باعث کانی‌سازی مس، سرب و روی، طلا شده است و در مجاورت توده نفوذی با پیروکلاستیک‌ها کانسار آهن تشکیل شده است (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۲).

#### ۴- زمین‌شناسی ساختمانی منطقه اکتشافی

از لحاظ ساختاری گسل‌ها درزه‌ها شکستگی‌ها نقش فراوانی در توزیع و جابجایی محلول‌های کانه ساز و تمرکز ماده معدنی در منطقه داشته‌اند. چین‌خوردگی‌ها با راستای شمال غربی - جنوب شرقی بهترین بستر برای تزریق محلول‌های گرمایی به داخل سازندهای ائوسن بوده است. کانی‌سازی‌های رگه‌ای اطراف محدوده آلتراسیونی آرژیلی آلونیتی سرسیتی به طور کامل از روند ساختاری اطراف خود تبعیت می‌کنند. بلندی کوه‌های طارم که ساختمان آن متأثر از بالا آمدگی‌های یک توده عظیم گرانیتوئیدی می‌باشد متشکل از برگه‌های رورانده فراوانی است که در اولیگو-میوسن با بالا آمدن آن برگه‌های برگشتی بسیاری را به صورت نابرجا په نمایش می‌گذارد (نظری ۱۳۷۷). به عقیده علوی (۱۹۶۶) موقعیت ساختمان‌ها در منطقه مورد بررسی بیانگر آن است که در طول پیدایش ساختاری این ارتفاعات همواره راستای بیشترین کوتاه شدگی و بیشترین فشار انقباضی شمال شرقی - جنوب غربی بوده است و ساختمان آنتی فرم را به صورت یک ساختمان کلی برای منطقه مورد بررسی در البرز غربی می‌توان دید. ساختمان زمین‌شناسی منطقه اکتشافی نشان می‌دهد که روند عمومی تشکیلات در شمال غرب - جنوب شرق بوده و شیب طبقات توف وزون آتره نیز عمدتاً به طرف شمال - شمال شرق می‌باشد. گسل‌های طولی و اصلی ناحیه از نوع رورانده با راستای عمومی شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. گسل‌های مذکور موجب جابجایی‌های افقی و قائم و در نهایت به هم ریختگی و خرد شدگی طبقات سنگی این زون می‌شود (امینی و امینی چهرق، ۱۳۷۲).

#### ۵- پیش پردازش داده‌ها

پیش پردازش شامل عملیاتی می‌شود که لازم است قبل از آنالیز اصلی داده‌ها و استخراج اطلاعات صورت گیرد، تصحیح رادیومتری و تصحیح هندسی و تصحیح توپوگرافی از جمله این عملیات می‌باشد. برای انجام تصحیحات رادیومتری و اتمسفریک از روش  $\log \text{residual}$  استفاده شده است. در این روش از اطلاعات آماری خود تصاویر برای کالیبراسیون استفاده می‌شود و داده‌های رادیانس نسبت به میانگین هندسی مکانی نرمال می‌شوند. با استفاده از لگاریتم میانگین هندسی طیفی (میانگین تمام باندها برای یک پیکسل) تأثیرات

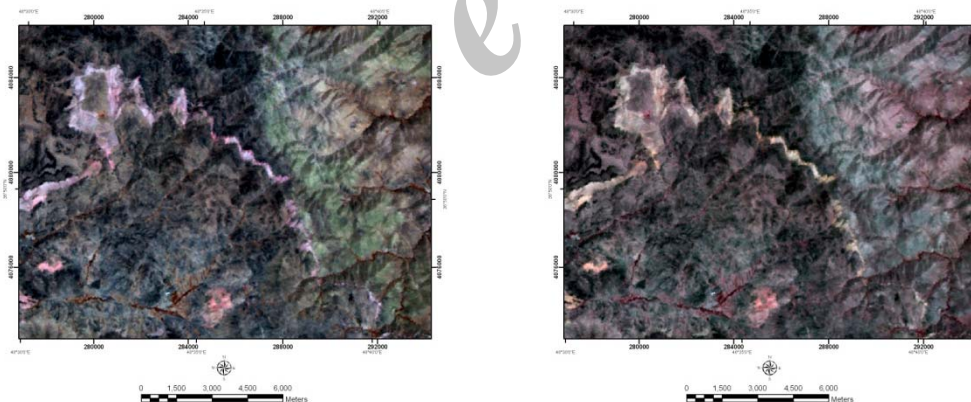
توپوگرافی حذف می‌شود و با استفاده از میانگین هندسی مکانی (میانگین تمام پیکسل‌ها برای هر یک از باندها) تأثیرات مربوط به تابش خورشید، عبورپذیری جو و نیز خطای دستگاهی حذف می‌شود (لگ، ۱۳۸۰). از پردازش‌های دیگری که در این مرحله بر روی داده‌های منطقه صورت گرفته به ترتیب شامل stack کردن لایه‌ها، Resize کردن لایه‌ها جهت هم اندازه شدن پیکسل‌های موجود در هر باند، Dark subtract، و در نهایت stretch کردن داده‌های می‌باشد.

### ۶- پردازش داده‌های ماهواره‌ای

پس از انجام مراحل پیش پردازش بر روی تصاویر ASTER، برای شناخت اولیه از منطقه و آلتراسیون از نقشه ترکیب رنگی کاذب (RGB) استفاده شد و سپس جهت تفکیک دقیق‌تر مناطق دگرسانی از روش‌های کروسا و نسبت بانندی استفاده شد.

#### ۶-۱- روش ترکیب رنگی کاذب (RGB)

تحلیل‌های تجربی نشان داده‌اند که برای مشاهده مناطق دگرسان شده، تصویری با ترکیب بانندی  $RGB=4,6,8$  مناسب‌ترین ترکیب رنگی برای شناسایی مناطق دگرسانی در اغلب کانسارها به‌ویژه مس پورفیری و طلای اپی ترمال می‌باشد. در این ترکیب بانندی کانی‌های مربوط به زون پروپلتیک (اپیدوت و کلریت) به رنگ سبز و کانی‌های رسی و یرسیت به رنگ صورتی مشاهده می‌شوند (شکل ۲). این مسئله به دلیل بازتابندگی بالای کانی‌های آلونیت، کائولینیت و موسکویت در باند ۴ نسبت به باندهای ۶ و ۸ است (Ferreir and et al., 2002).



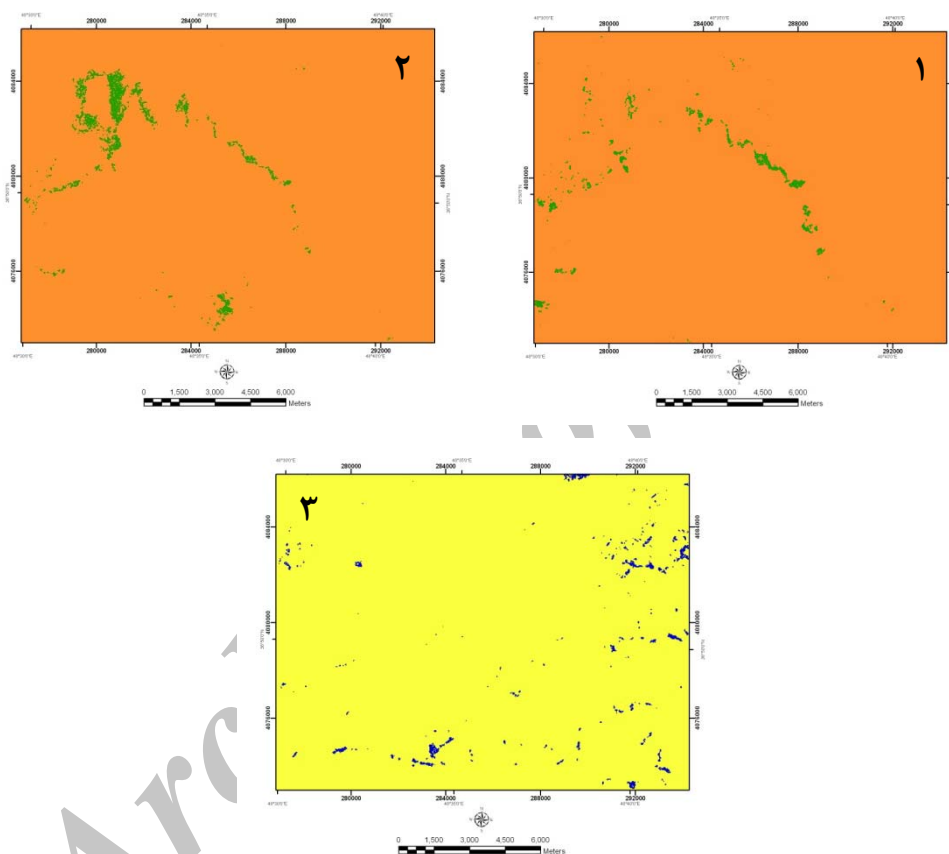
شکل ۲: ترکیب رنگی  $RGB=4,6,8$  (چپ) آلتراسیون آرژیلیکی صورتی و پروپلتیکی سبز رنگ و  $RGB=4,5,6$  (راست) آرژیلیک نارنجی

#### ۶-۲- روش نسبت‌های بانندی

تبدیلات نسبت بانندی نیز روش مفیدی برای تشخیص کانی‌های دگرسان است. این روش اثرات توپوگرافی و سایه‌ها را از بین برده و نویزها را کاهش می‌دهد. این روش اختلاف و شدت تفاوت بین مقادیر روشنایی را بالا برده و مرزها را مشخص‌تر می‌سازد. با شناخت خواص انعکاسی پدیده‌ها از روی نمودار طیفی آن‌ها می‌توان به کمک روش فوق پدیده‌های مختلف را بارز ساخت. طبق جدول زیر برای شناسایی انواع دگرسانی‌ها روش نسبت بانندی انجام شد (Ferreir and et al., 2002).

جدول ۱: نسبت‌های باندی انتخابی برای منطقه طارم

نسبت باندی انتخابی	نوع دگرسانی
۷/۵	آرژیلیک
$(۷+۵)/۶$	فیلیک
$(۶+۹)/(۷+۸)$	پروپلیتیک
۴/۵	نواحی دگرسانی



شکل ۳: انواع آلتراسیون‌های منطقه طارم استخراج شده از نسب باندی (تصویر ۱ آلتراسیون فیلیک، تصویر ۲ آلتراسیون آرژیلیک، تصویر ۳ آلتراسیون پروپلیتیک)

### ۶-۳- آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی (کروستا)

اطلاعات باندهای مختلف تصاویر چند طیفی سنجش از دور غالباً همبستگی دارند معمولاً همبستگی منفی مابین باندهای مرئی و مادون قرمز و مثبت بین باندهای مرئی بر روی پوشش‌های خاکی و سنگی وجود دارد. وجود همبستگی مابین تصاویر باندهای چند طیفی حکایت از وجود اطلاعات مشترک و یا به عبارت دیگر تکرار اطلاعات است. وجود اطلاعات مشترک در باندها بصورت همبستگی بین آنها آشکار می‌شود. بنابراین اطلاعات موجود در باندهای چندطیفی غالباً ابعادی کمتر از تعداد باندها دارند و بنابراین هدف از آنالیز مؤلفه‌های اصلی تعیین تعداد ابعاد موجود در یک مجموعه اطلاعاتی است. روش کروستا تکنیکی است بر مبنای PCA برای به نقشه در آوردن دگرسانی‌های مختلف و کانی‌های شاخص آنها. در این روش رابطه بین پاسخ‌های طیفی کانی‌های مورد نظر و مقادیر

عددی استخراج شده از ماتریس بردار ویژه برای محاسبه تصاویر مؤلفه اصلی (PC) به کار برده می‌شود. با استفاده از این رابطه، PCهایی که حاوی اطلاعات طیفی خاص از کانی‌های هدف هستند مشخص می‌شوند. شرط انتخاب PCهای مناسب این است که در ماتریس‌های بردار ویژه، باندهای مربوط به جذب و انعکاس کانی‌های هدف به طور همزمان دارای بالاترین مقادیر بوده و در ضمن این مقادیر غیر هم علامت نیز باشند ( Crosta and De souza Fliho, 2003).

جدول ۲: ضرائب مربوط به بارگذاری آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای دگرسانی آرزلیکی

Eigenvector	باند ۱	باند ۴	باند ۶	باند ۷
PC1	۰.۶۴۷۶۸۷	۰.۴۵۳۸۷۲	۰.۴۴۸۷۵۴	۰.۴۱۶۰۷۹
PC2	-۰.۷۶۱۶۸۹	-۰.۴۰۳۴۶۹	۰.۳۷۷۹۴۶	۰.۳۳۷۹۳۵
PC3	-۰.۰۱۷۵۱۹	-۰.۷۸۸۹۴۳	۰.۳۶۵۶۲۱	۰.۴۹۳۵۴۱
PC4	-۰.۰۰۵۰۲۴	۰.۰۹۳۷۱۱	-۰.۷۲۲۵۶۳	۰.۶۸۴۹۰۵

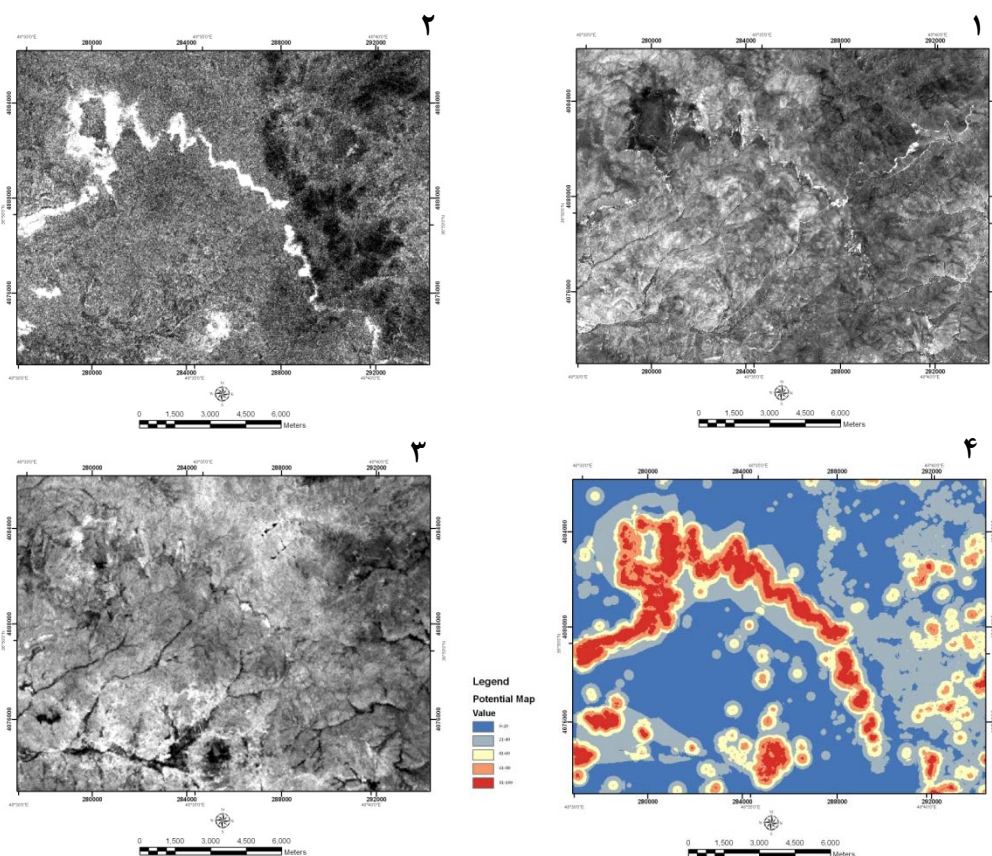
جدول ۳: ضرائب مربوط به بارگذاری آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای دگرسانی فیلیک

Eigenvector	باند ۱	باند ۶	باند ۷	باند ۹
PC1	۰.۶۵۸۳۲۰	۰.۴۵۵۸۵۲	۰.۴۲۲۷۱۳	۰.۴۲۴۵۵۴
PC2	۰.۷۵۱۹۷۰	-۰.۳۸۳۳۲۰	-۰.۳۴۶۲۲۸	-۰.۴۰۹۵۵۳
PC3	۰.۰۳۵۲۷۸	-۰.۴۳۸۹۷۹	-۰.۳۹۲۵۳۵	۰.۸۰۵۴۷۵
PC4	-۰.۰۰۵۴۶۳	-۰.۶۷۲۷۴۰	۰.۰۷۳۹۸۳	-۰.۰۰۵۸۲۲

جدول ۴: ضرائب مربوط به بارگذاری آنالیز مولفه‌های اصلی انتخابی برای دگرسانی پروپلیتیک

Eigenvector	باند ۱	باند ۴	باند ۵	باند ۸
PC1	۰.۶۵۰۳۳۵	۰.۴۵۵۶۱۱	۰.۴۲۹۰۲۱	۰.۴۳۰۶۰۹
PC2	۰.۴۶۲۵۸۷	-۰.۳۹۴۶۱۰	-۰.۳۶۳۹۷۵	۰.۷۵۹۶۳۴
PC3	-۰.۰۰۳۷۶۶	-۰.۷۵۱۹۰۰	-۰.۱۶۳۰۶۶	۰.۶۳۸۷۸۱
PC4	-۰.۰۰۲۳۵۱	-۰.۲۶۷۱۰۹	۰.۸۱۰۴۷۷	-۰.۰۵۲۱۳۲





شکل ۴: انواع آلتراسیون‌های منطقه طارم استخراج شده از آنالیز مولفه اصلی (شکل ۱ آلتراسیون فیلیک، شکل ۲ آلتراسیون آرژیلیک، شکل ۳ آلتراسیون پروپیلیتیکی، شکل ۴ مناطق امید بخش برای پراکندگی انواع آلتراسیون‌ها در منطقه طارم)

## ۷- بحث و نتیجه‌گیری

تهیه نقشه مناطق دگرسانی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای روشی سریع و مطمئن می‌باشد که با توجه به پیشرفت روزافزون دانش سنجش از دور و بالا رفتن قدرت تفکیک سنجنده‌ها، این روش می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای تکنیک‌های قدیمی از جمله عکس‌های هوایی قرار گیرد. داده‌های ماهواره‌ای ASTER محدوده اکتشافی طارم با استفاده از روش‌های پردازشی از قبیل ترکیب رنگی کاذب، کروستا و نسبت بانندی مورد پردازش قرار گرفتند. نتایج و تصاویر به‌دست آمده بیانگر این مسئله است که این روش‌ها در تعیین و تفکیک نواحی دگرسان شده در محدوده اکتشافی طارم نتایج قابل قبولی را دارا می‌باشند.

## ۸- منابع

۱. زبیری، م. و مجد، ع.، ۱۳۸۲، آشنایی با فن سنجش از دور و کاربرد در منابع طبیعی (اطلاعات ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، فضایی)، دانشگاه تهران، تهران.
۲. امینی، ب. و امینی چهرق، م.ر.، ۱۳۷۹، برگه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ طارم، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
۳. لگ، ک.، ترجمه فرهنگ جاه، ۱۳۸۰، دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نیروهای مسلح.

4. Ferreir, G.; White, K.; Griffiths, G.; Bryant, R. and Stefofuli, M., 2002, The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Levos, Greece using an integrated remote sensing dataset, International Journal of Remote Sensing.
5. Crosta, A. and De Souza Fliho, C., 2003. Targeting key alteration minerals in epithermal deposit in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis", International Journal of Remote Sensing, Vol. 24, No.21, p.p. 4233-420.
6. Noorollahi, Y.; Itoi, R.; Fujii, H. and Tanaka, T., 2008, GIS integration model for geothermal exploration and well siting, Geothermics, Vol. 37, pp. 107-131.
7. Rown, L.C.; Goetz, A.F.H. and Ashley, R.P., 1997, Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images, Geophysics, 42, 522-535.

Archive of SID