



# سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال ششم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۳  
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol. 6, No.2, Summer 2014

۴۹-۳۱

## شناسایی منابع زمین گرمایی با داده‌های سنجش از دور مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی، فردوس

کاظم تباکی بجزستانی<sup>۱\*</sup>، سیدجمال‌الدین خواجه‌الدین<sup>۲</sup>، احمدرضا مختاری<sup>۳</sup>، رضا جعفری<sup>۴</sup>

۱. کارشناس ارشد بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴. استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۶/۱۲

### چکیده

انرژی زمین گرمایی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک محسوب می‌شود و با توجه به امتیازات آن از قبیل بی‌خطر بودن نسبی، کمک به حفظ محیط زیست، و ارزانی جایگزینی مناسب برای سوخت فسیلی به‌شمار می‌رود. در این مطالعه به‌منظور شناسایی منابع زمین گرمایی در منطقه مستعد زمین گرمایی فردوس در استان خراسان جنوبی، از داده‌های سنجنده  $ETM^+$  لندست ۷ ژئوفرانس شده به نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ شهرستان فردوس استفاده شد. رقم پیکسل باندهای حرارتی به رادیانس طیفی تبدیل گردید و سپس دمای تابشی محاسبه شد. از باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک، شاخص NDVI محاسبه و لایه توان تشعشعی محاسبه گردید. با تلفیق دو دمای تابشی و تشعشعی، دمای سطحی زمین تعیین شد. با روش برازش حداقل مربعات، لایحه نواحی مستعد اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی تولید گردید و گسل‌های منطقه از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه مشخص شد. با تلفیق لایه‌های تولیدی با روش هم‌پوشانی وزن دار، منطقه مستعد زمین گرمایی فردوس شناسایی شد. با این لایه‌های اصلی مرتبط با تشکیل ذخایر ژئوترمال، دو منبع زمین گرمایی مستعد به‌منظور بهره‌برداری از انرژی آنها مشخص شد. این دو منبع زمین گرمایی شناسایی شده با شواهد زمین گرمایی موجود - از جمله چشمه آبگرم و دو آتشفشان خاموش منطقه - همبستگی مکانی دارد. بنا به یافته‌های تحقیق حاضر، سنجش از دور روش مقرون به‌صرفه‌ای برای تشخیص ناهنجاری‌های دمای سطح زمین، ویژگی‌های زمین شناسی منطقه مانند تشخیص واحدهای سنگی و آلتراسیون‌ها است. ترکیبی از سنجش از دور حرارتی با تجزیه و تحلیل زمین شناسی و درک صحیح از سازوکارهای زمین گرمایی، رویکردی دقیق و کارآمد برای تشخیص منابع زمین گرمایی خواهد بود.

**کلیدواژه‌ها:** سنجش از دور، انرژی زمین گرمایی، درجه حرارت سطحی، لندست.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: اصفهان، بولوار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده منابع طبیعی، تلفن: ۰۹۳۸۵۸۸۴۸۴۷

## ۱- مقدمه

پیشرفت کشورها و صنعتی شدن و نیز رشد جمعیت از جمله عواملی هستند که نیاز روزافزون به منابع انرژی را افزایش می‌دهند. با گذشت زمان و کاهش ذخایر انرژی فسیلی، تعادل بین جمعیت و انرژی از بین رفت و در آینده نزدیک، جامعه جهانی با کمبود انرژی مواجه خواهد شد. جهان در تکاپوی گذر از این تنگنای انرژی، به منابع تجدیدشونده - به‌ویژه انرژی‌های نو و تجدیدپذیر - چشم دوخته است و به سرعت در مسیر تکوین و توسعه فناوری و بهره‌وری از آن گام برمی‌دارد. انرژی زمین‌گرمایی که از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌شمار می‌آید، دارای امتیازاتی از قبیل بی‌خطری نسبی، کمک به حفظ محیط‌زیست و هزینه اندک است که می‌تواند جوابگوی بخشی از تقاضای روزافزون انرژی در زمان حال و آینده باشد (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱؛ رزاقی، ۱۳۹۰؛ نظری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹).

انرژی زمین‌گرمایی بخشی از انرژی حرارتی زمین است که با سیالی مانند بخار آب یا آب‌داغ یا هر دو به سطح زمین انتقال می‌یابد. این حرارت در داخل زمین و تحت تأثیر پدیده‌های زمین‌شناسی گوناگون ایجاد می‌شود. این انرژی در امتداد مرزهای صفحات تکتونیکی در نواحی شناخته‌شده آتشفشانی و زلزله‌خیز که دارای شکستگی‌ها و گسل‌های فراوانی هستند، تمرکز بیشتری دارد (Huenges, 2009). بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی اندیشه جدیدی نیست و از ابتدای قرن بیستم میلادی تلاش‌های زیادی به‌منظور تبدیل این انرژی به برق صورت گرفته است، اما انگیزه واقعی بهره‌برداری از این انرژی به پس از سال‌های ۱۹۷۳-۱۹۷۴ برمی‌گردد (Geothermal Resources Council, 2012). با تلاش روزافزون برای یافتن منابع انرژی جایگزین، «سنجش از دور» با قدرت تفکیک مکانی و طیفی مناسب تصاویر ماهواره‌ای و همچنین امکان بررسی در مقیاس وسیع، به روشی مناسب در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی تبدیل شده است. تفاوت‌های دمایی سطح زمین شاخص مهمی برای شناسایی مناطق زمین‌گرمایی در تصاویر حرارتی است.

بنابراین، تشخیص منابع زمین‌گرمایی با داده‌های حرارتی سنجش از دور موضوع چالش‌برانگیز و در عین حال جالبی است (Qin et al., 2011) هودر<sup>۱</sup> (۱۹۷۰) با تکنیک‌های سنجش از دور در کالیفرنیا اکتشاف و توسعه انرژی زمین‌گرمایی را بررسی کرد و آن را راه‌حلی برای مشکلات عملیات شناسایی با داده‌های زمین‌شناسی معرفی کرد لی<sup>۲</sup> (۱۹۷۸) شناسایی ناهنجاری‌های زمین‌گرمایی منطقه لردزبورگ<sup>۳</sup> نیومکزیکو در ایالات متحد آمریکا را با داده‌های مادون قرمز حرارتی انجام داد. چشمه‌های آب‌گرم ژئوترمال پارک ملی یلوستون با داده‌های مادون قرمز حرارتی ASTER و تصاویر مرئی و مادون قرمز AVIRIS بررسی گردید و تغییرات حوضه از جمله میزان دگرسانی حرارتی، تغییرات محل و فراوانی مواد معدنی هیدروترمال شناسایی شدند (Ramsey & Hellman, 2004). در شرق کالیفرنیا با تصاویر مادون قرمز حرارتی ماهواره استر، اکتشاف منابع ژئوترمال منطقه انجام گرفت. دلیل استفاده از سنجش از دور در این اکتشاف مقرون‌به‌صرفه‌تر بودن و کاربردی بودن این روش در مقیاس وسیع عنوان شده است (Eneva et al., 2006). مطالعات فتوژئولوژی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی منطقه دماوند برای شناسایی مخازن زمین‌گرمایی منطقه انجام شد (ENEL, 1980). به‌دنبال آن، نورعلینی و همکاران (۲۰۱۰) پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی همان منطقه را با استفاده از تصاویر ETM<sup>+</sup> ارزیابی مجدد کردند و نشان دادند که شرایط حاکم بر مخزن زمین‌گرمایی دماوند طی ۲۷ سال گذشته تغییر محسوس نداشت است و می‌توان مطالعات اکتشافی تفصیلی را در ناحیه مستعد منطقه زمین‌گرمایی دماوند برنامه‌ریزی و اجرا کرد.

از معمول‌ترین کاربردهای سنجش از دور در زمین‌شناسی، تشخیص واحدهای سنگی و آلتراسیون‌هاست. در مناطق زمین‌گرمایی، واکنش بین سنگ‌های موجود در یک میدان آب‌گرم یا بخار آن

1. Hodder

2. Lee

3. Lordsburg

هدف مطالعه حاضر بررسی پتانسیل زمین‌گرایی منطقه فردوس در استان خراسان جنوبی و شناسایی عوامل اصلی مرتبط با تشکیل ذخایر ژئوترمال منطقه مورد مطالعه با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور داده‌های سنجنده ETM<sup>+</sup> است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این بخش با بررسی شرایط منطقه زمین‌گرایی فردوس و شناخت عوامل مؤثر بر تشکیل ذخایر ژئوترمال، لایه‌های مؤثر بر شناسایی منابع زمین‌گرایی از جمله درجه حرارت سطحی زمین، آلتراسیون‌های هیدروترمال، واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه و گسل‌ها به روش‌هایی که در ادامه می‌آیند تولید و در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به‌روش همپوشانی وزن‌دار با یکدیگر تلفیق شدند.

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بین مختصات "۷۸° ۲۰' ۵۹" متر تا "۳۸° ۵۴' ۶۱" متر شرقی و "۶۴۰۰۰ متر تا "۳۲۸' ۳۷' ۳۷" متر شمالی در سیستم مختصات UTM در ۶۴۰۰۰ هکتار در شمال شرقی شهرستان فردوس واقع شده است (شکل ۱).

بخش عمده سنگ‌های این منطقه را مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی متعلق به دوران سنوزوئیک تشکیل می‌دهند که روی رسوبات کربونیفر و ژوراسیک جریان یافته‌اند. این سنگ‌ها برجای مانده آتشفشان‌های پرشمارند که از میان شکاف‌ها یا از حفره‌ها فوران کرده‌اند. دو آتشفشان تک‌کورنگ و کفتار با ارتفاع ۱۷۸۰ متر و ۱۵۳۶ متر از این جمله‌اند. دره‌های پهن میان رشته‌کوه‌های آتشفشانی گاهی محل خروج گدازه‌اند. بیشتر این شکاف‌ها با انفجارهای پرشماری که موجب تشکیل آگلومرای فراوان شده‌اند، مسدود شده و در چهره سطوح فرسایشی به‌وسیله انباشت‌های تخریبی عهد حاضر پر شده‌اند. سنگ‌های یادشده به‌وسیله سنگ‌های آذرین گرانیته تا گرانودیوریتی طی چند مرحله دچار دگرگونی شدند (GSI, Year not recorded).

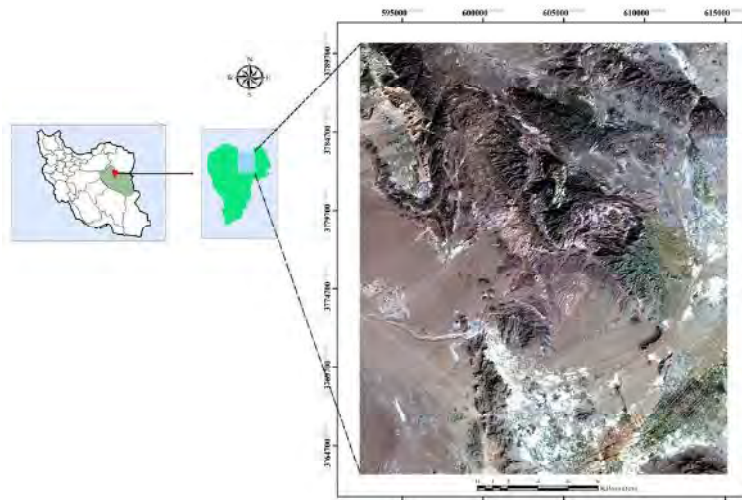
منجر به مجموعه‌ای تحولات و تغییرات نظیر تبلور مجدد، انحلال و رسوب‌گذاری در مقیاس موضعی یا ناحیه‌ای می‌شود. به این تغییرات، آلتراسیون یا دگرسانی گرمایی یا هیدروترمال اطلاق می‌شود. موقعیت مکانی منبع ژئوترمال را می‌توان با داده‌های ماهواره‌ای از طریق بررسی کانی‌های دارای بنیان OH تشخیص داد (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

یافتن این‌گونه مناطق مستعد، پس از انجام ارزیابی کلی و با حذف نواحی کم‌اهمیت در مراحل اکتشافی پی‌درپی صورت می‌گیرد. عملیات اکتشاف منابع زمین‌گرایی - از جمله اکتشاف منابع معدنی - فرایندی است گام‌به‌گام که با اتمام هر مرحله اکتشافی، محدوده مورد نظر برای اکتشاف کوچک‌تر می‌شود و عملیات مرحله بعد در مناطق با پتانسیل بالاتر و با استفاده از روش‌ها و ابزارهای دقیق‌تر انجام می‌پذیرد (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱).

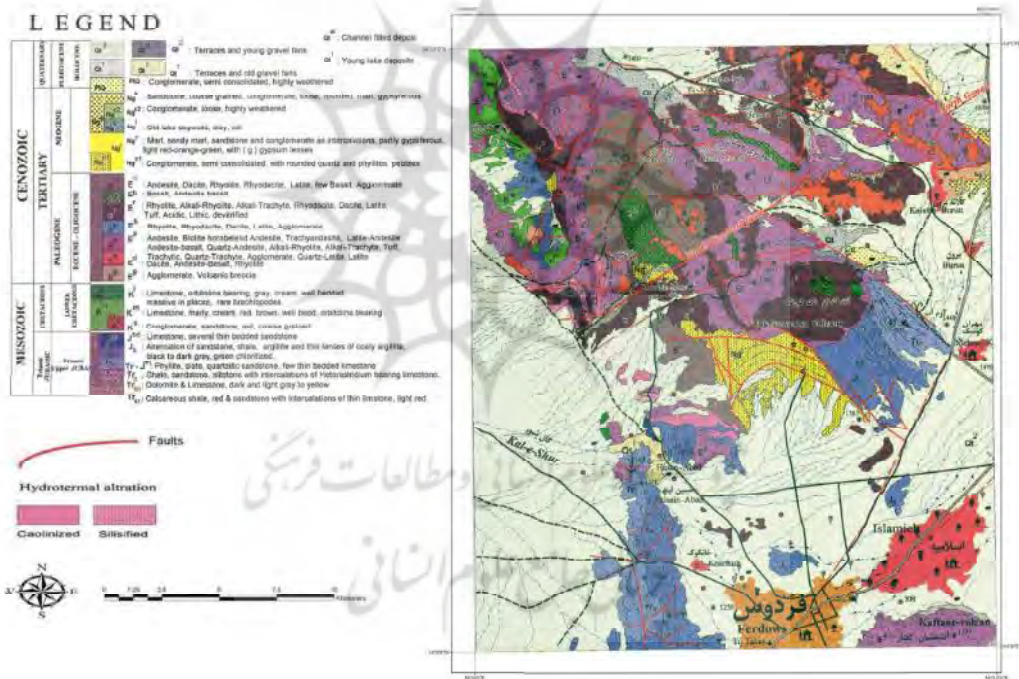
روش‌های تلفیق را می‌توان در دو دسته کلی دانش‌محور و داده‌محور دسته‌بندی کرد. روش‌های دانش‌محور برای وزن‌دهی به هر لایه اطلاعاتی متکی به نظر متخصص براساس مدل هدف اکتشافی است. روش هم‌پوشانی وزن‌دار از جمله روش‌های تلفیق دانش‌محور است. در مدل هم‌پوشانی وزن‌دار، ارزش هر پیکسل در نقطه خروجی مجموع ارزش پیکسل‌های لایه‌های ورودی در همان نقطه است که به نسبت ضریب اهمیت آن لایه افزایش یافته‌اند. حساسیت این روش از مدل بولین بیشتر است و به‌دلیل وزن‌دهی به هر لایه اطلاعاتی و هر واحد در هر نقشه، در مقایسه با مدل بولین انعطاف‌پذیری و حساسیت بیشتری دارد (Bonham-Carter, 1994).

یافتن مناطق امیدبخش از نظر زمین‌گرایی در ایران از سال ۱۳۵۴ آغاز شد و تا سال ۱۳۷۸، چهارده منطقه امیدبخش در پیوند با نقاط آتشفشانی کشف شد. پس از مطالعات دقیق‌تر در سال ۱۳۸۷، جمعاً ۱۸ نقطه در شمال‌غرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوب‌شرقی ایران به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرایی به‌منظور انجام مطالعات و بررسی‌های بیشتر به ثبت رسیدند (Yousefi et al., 2010).

کاظم تباکی بجنستانی و همکاران



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه زمین منطقه مورد مطالعه

۲-۲- داده‌های مورد استفاده  
 پژوهش حاضر با استفاده از تصویر  $ETM^+$  دریافت شده در ۱۴ ژانویه ۲۰۰۱ برابر با ۲۵ دی ۱۳۷۹ انجام شد. نقشه توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ منطقه فردوس (NCC, 2001) و نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰

۳-۲- پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای  
 بررسی تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده از نظر اشکالات اتمسفریک و تابش‌سنجی - نظیر تیرگی تصویر و کار گرفته شد (شکل ۲).

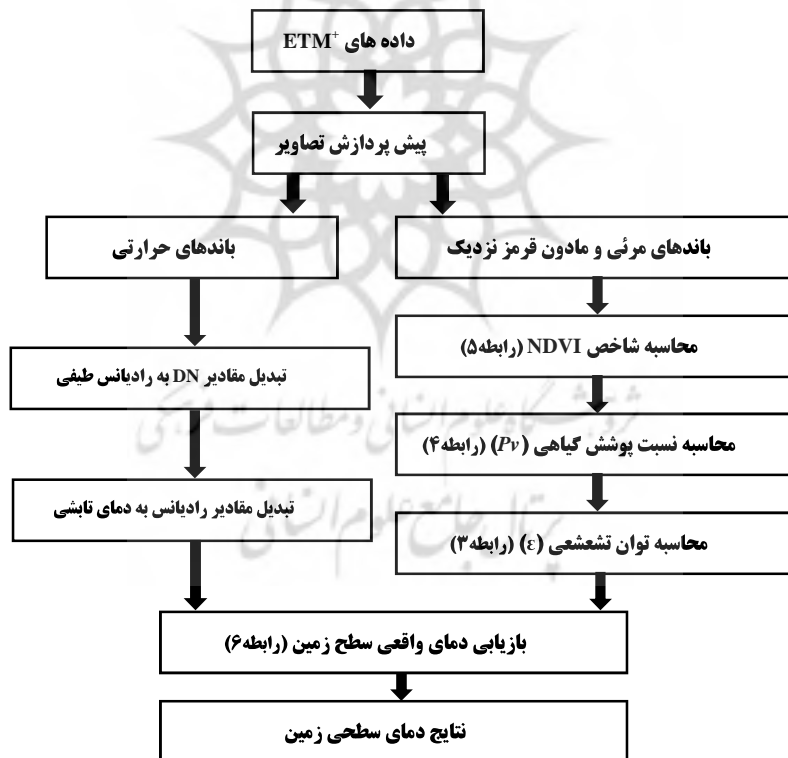
#### ۲-۴- ترکیب بانندی رنگ کاذب

برای شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین‌گرمایی در مراحل اولیه اکتشاف، از ترکیب بانندی رنگ کاذب استفاده شد. بدین ترتیب که بهترین ترکیب ۷ باند سنجنده<sup>+</sup> ETM<sup>+</sup> برای ساختن تصاویر ترکیب رنگ کاذب با شاخص مطلوبیت<sup>۱</sup> (OIF) تعیین شد. این روش در تعیین واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه نیز کاربرد دارد. جدول ۳ نتیجه شاخص مطلوبیت را نشان می‌دهد.

#### ۲-۵- بازیابی دمای سطحی زمین (LST)<sup>۲</sup>

گام‌های اصلی برای بازیابی LST در این مطالعه - شامل محاسبه توان تشعشعی و دمای تابشی - در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

نوارشدگی - نشان داد که اشکالاتی از این قبیل در آن وجود نداشت و فقط تصحیحات هندسی روی تصویر اعمال شد. برای این منظور از نقشه‌های توپوگرافی ۱/۵۰۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور (NCC, 2001) استفاده شد. تعداد ۳۰ نقطه کنترل زمینی با مختصات UTM انتخاب شد. با بررسی RMSe به دست آمده نهایتاً با ۲۵ نقطه کنترل زمینی و با اعمال روش نزدیک‌ترین همسایه و مدل هندسی چندجمله‌ای درجه ۱، باندهای ۳۰ متری با دقت ۰/۲۴ پیکسل زمین مرجع گردید. همچنین باندهای ترمال و پنکروماتیک نیز با دقت ۰/۳۷ پیکسل به باندهای ۳۰ متری زمین مرجع شدند. پس از ثبت هندسی، محدوده مورد مطالعه از تصویر برش داده شد.



شکل ۳. روندنمای بازیابی درجه حرارت سطحی

1. Optimum Index Factor
2. Land Surface Temperature

درجه بندی پیکسل (مطابق با  $L_{\min}$ ) در DN که کمیت یک استفاده شد. Qcal مقادیر DN ارزش رقومی پیکسل است.  
به منظور تبدیل مقادیر رادیانس به دمای تابشی از رابطه (۲) استفاده شد (Landsat 7 SDUH, 2000).  
رابطه (۲)

$$T_{\text{sensor}} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

در رابطه (۲)،  $T_{\text{sensor}}$ : دمای تابشی برحسب کلوین،  $K_2$ : مقدار کالیبراسیون ثابت ۲ از جدول ۲،  $K_1$ : مقدار کالیبراسیون ثابت ۱ از جدول ۲ و  $L_{\lambda}$ : رادیانس طیفی به دست آمده از رابطه (۱) است.

در مرحله نخست، مقادیر DN باند ترمال به وسیله سنسور ماهواره‌ای ( $L_{\lambda}$ ) به مقدار رادیانس طیفی دریافتی تبدیل و از رابطه (۱) محاسبه شد (Landsat 7 SDUH, 2000).  
رابطه (۱)

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}) \cdot (Q_{\text{calmax}} - Q_{\text{calmin}}) + L_{\min\lambda}}{Q_{\text{cal}} - Q_{\text{calmin}}}$$

در رابطه (۱)،  $L_{\lambda}$ : رادیانس طیفی،  $L_{\max\lambda}$ : حداکثر درخشندگی ثبت شده به وسیله سنسور،  $L_{\min\lambda}$ : حداقل درخشندگی ثبت شده به وسیله سنسور است. مقادیر  $L_{\max\lambda}$  و  $L_{\min\lambda}$  برای سنجنده ETM<sup>+</sup> در جدول ۱ آمده است.  $Q_{\text{calmax}}$ : حداکثر مقدار درجه بندی پیکسل (مطابق با  $L_{\max\lambda}$ ) در DN که برابر است با ۲۵۵ و  $Q_{\text{calmin}}$ : حداقل مقدار

جدول ۱. مقادیر  $L_{\max\lambda}$  و  $L_{\min\lambda}$  برای سنجنده ETM<sup>+</sup>

ETM <sup>+</sup> Spectral Radiance Range Watts/(meter squared*ster*μm)								
Band.No	Processed Before July 1,2000				Processed After July 1,2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax
1	-6.2	297.5	-6.2	194.3	-6.2	293.7	-6.2	191.6
2	-6.0	303.4	-6.0	202.4	-6.4	300.9	-6.4	196.5
3	-4.5	235.0	-4.5	158.6	-5.0	234.4	-5.0	152.9
4	-4.5	235.0	-4.5	157.5	-5.1	241.1	-5.1	157.4
5	-1.0	47.70	-1.0	31.76	-1.0	47.57	-1.0	31.06
6	0.0	17.04	3.2	12.65	0.0	17.4	3.2	12.65
7	-0.35	16.60	-0.35	10.932	-0.35	16.54	-0.35	10.80
8	-5.0	244.00	-5.0	158.40	-4.7	243.1	-4.7	158.3

منبع: Landsat 7 SDUH, 2000

جدول ۲. مقادیر کالیبراسیون ثابت باند ترمال سنجنده TM و ETM<sup>+</sup>

ETM <sup>+</sup> and TM Thermal Calibration Constants		
	Constant 1 - K1	Constant 2 - K2
	watts/(meter squared*ster*μm)	watts/(meter squared*ster*μm)
Landsat 7	666.09	1282.71
Landsat 5	607.76	1260.56

منبع: Landsat 7 SDUH, 2000

$\tau_\epsilon$  قابلیت انتقال اتمسفری<sup>۱</sup> است و ناسا آن را محاسبه می‌کند و مقدار آن برای تصویر به کاررفته برابر با ۰/۹۶ است (NASA, 2012). مقدار  $T_a$  از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Qin & Karnieli, 2001).

$$T_a = 16/0.110 + 0.92621T_s$$

که در آن  $T_a$ : دمای اتمسفری متوسط مؤثر<sup>۲</sup> و  $T_0$ : دمای هوا در نزدیکی سطح زمین برحسب کلوین است و ناسا مقدار آن را برای تصویر به کاررفته، ۲۸۳/۵ درجه کلوین محاسبه کرد (NASA, 2012). در نهایت برای تبدیل دمای کلوین به دمای سلسیوس مقدار ۲۷۳/۱۵ از مقادیر پیکسل‌های تصویر کم شد.

## ۲-۶- شناسایی دگرسانی‌های هیدروترمال

برای تعیین مناطق تحت تأثیر آلتراسیون هیدروترمال، روش‌های نسبت بانندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی، تکنیک کروستا و برازش حداقل مربعات روی تصویر ماهواره‌ای منطقه اعمال شد.

نسبت بانندی ۳/۱ برای شناسایی اکسید آهن محاسبه شد. برای شناسایی مناطق تحت تأثیر کانی‌های رسی از نسبت بانندی ۵/۷ استفاده شد. آنالیز مؤلفه‌های اصلی استاندارد با استفاده از تمامی باندها برای شناسایی نواحی مستعد آلتراسیون انجام شد و مؤلفه‌های مناسب برای شناسایی اکسیدهای آهن و هیدروکسیدها انتخاب شدند.

در روش مؤلفه‌های اصلی انتخابی کروستا (Crosta and Moore, 1989) برای نقشه‌برداری اکسید آهن از باندهای ۱، ۳، ۴ و ۵ برای تحلیل و نقشه‌برداری هیدروکسیدها از باندهای ۱، ۴، ۵ و ۷ سنجنده ETM استفاده شد. با بررسی نتایج، مؤلفه‌های مناسب برای شناسایی اکسیدهای آهن و هیدروکسیدها انتخاب

توان تشعشعی سطحی از رابطه (۳) محاسبه شد (Sobrino et al., 2004).

رابطه (۳)

$$\epsilon_{TM\epsilon} = 0.004P_V + 0.986$$

در رابطه (۳)،  $\epsilon$ : توان تشعشعی سطح (LSE) و  $P_V$ : نسبت پوشش گیاهی است که مقدار آن از رابطه (۴) به دست می‌آید (Sobrino et al., 2004).

رابطه (۴)

$$P_V = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2$$

در رابطه (۴)، مقادیر  $NDVI_{min}$  و  $NDVI_{max}$  به ترتیب معرف پوشش گیاهی بالا و خاک لخت در منطقه هستند. براساس رابطه (۵) برای منطقه مطالعه شده مقدار آن به ترتیب ۰/۶۱۱۹۴۰ و ۰/۱۴۵۸۳۳ به دست آمده است.

رابطه (۵)

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}}$$

در رابطه (۵)،  $NDVI$ : شاخص پوشش گیاهی،  $R_{nir}$ : بازتاب در طول موج قرمز (باند ۳ سنجنده  $ETM^+$ ) است.

برای تعیین دمای جنبشی (واقعی) از رابطه (۶) استفاده شد (Karnieli & Qin, 2001).

رابطه (۶)

$$T_s = \frac{a_\epsilon(1 - C_\epsilon - D_\epsilon) + [b_\epsilon(1 - C_\epsilon - D_\epsilon) + C_\epsilon + D_\epsilon] J_{sensor} - D_\epsilon T_a}{C_\epsilon}$$

در رابطه (۶)،  $T_s$ : دمای واقعی سطح زمین برحسب درجه کلوین، به دست آمده از رابطه (۲)،  $a_6$  و  $b_6$  مقادیر ثابت و به ترتیب برابر است با ۰/۶۷۳۵۵۳۵۱- و ۰/۴۵۸۶۰۶ برای درجه حرارت بین ۲۷۳/۵ و ۳۴۳/۵ درجه کلوین. مقادیر  $C_6$  و  $D_6$  نیز براساس روابط (۷) و (۸) به دست می‌آیند.

$$C_\epsilon = \epsilon\tau_\epsilon \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$D_\epsilon = (1 - \tau_\epsilon)[1 + (1 - \epsilon)\tau_\epsilon] \quad \text{رابطه (۸)}$$

در رابطه‌های (۷) و (۸)،  $\epsilon$ : مقدار توان تشعشعی است که با استفاده از رابطه (۳) به دست می‌آید.

1. Atmospheric transmissivity  
2. Effective Mean Atmospheric Temperature

گسل‌های منطقه استفاده شد. تأثیرپذیری هر پیکسل تصویر از گسل‌ها در شعاع ۱۰۰۰ متری تعیین شد. تصویر رستر نهایی براساس میزان تراکم گسل‌ها کلاسه‌بندی و آماده‌تلفیق شد (شکل ۹).

## ۲-۹- تلفیق لایه‌ها در محیط GIS

در این مطالعه به منظور تلفیق لایه‌های اکتشافی، از روش هم‌پوشانی وزن‌دار استفاده شد. مقیاس لایه‌های چگالی گسل، آلتراسیون‌های بنیان OH، اکسیدهای آهن و دمای سطحی منطقه مورد مطالعه نیز برای انجام تلفیق لایه‌ها بین صفر تا ۱۰ تغییر کرد و براساس اهمیت در روند شناسایی منابع زمین‌گرمایی امتیازبندی شد (جدول ۵).

## ۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج روش‌های به‌کار گرفته شده در شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی و لایه‌های مرتبط با آن از قبیل درجه حرارت سطحی زمین، آلتراسیون‌های هیدروترمال، واحدهای سنگی و گسل‌ها ارائه و بحث شده و نتایج تلفیق این لایه‌ها به روش هم‌پوشانی وزن‌دار و صحت‌سنجی نتایج نهایی در ادامه آمده است.

## ۳-۱- ترکیب‌بندی رنگ کاذب

در این پژوهش، مطالعات زیادی در زمینه انتخاب بهترین ترکیب باندها برای نمایش حداکثر اطلاعات کانی‌شناسی سطح زمین صورت گرفت. در این مطالعات، داده‌های کم‌ارزش تقریباً حذف شدند و حداکثر استفاده از اطلاعات مفید صورت گرفت. برای انتخاب نیز از روش فاکتور شاخص بهینه (OIF) استفاده شد (علوی‌پناه، ۱۳۸۷) (جدول ۳).

براساس جدول ۵، بهترین ترکیب باندی برای ساختن تصاویر کاذب رنگی، باندهای ۵، ۲-۶ و ۷ است (شکل ۴). مناطق مستعد زمین‌گرمایی از نظر حرارت و لیتولوژی در شکل ۴ به رنگ قرمز تیره مشخص است.

شدند و تصاویر F کروستا و H کروستا به ترتیب برای نواحی مستعد اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی به دست آمدند.

روش برازش حداقل مربعات برای تعیین کانی‌های رسی (هیدروکسیل‌های بنیان OH) با باندهای ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ سنجنده  $ETM^+$  براساس باند ۷ آنالیز شدند. در تصویر اولیه به دست آمده، مناطق تحت تأثیر کانی رسی با پیکسل‌های تیره مشخص شدند و با ضرب تصویر در عدد (-۱)، این مناطق به رنگ روشن نمایان شدند. با جداسازی مناطق پوشش گیاهی از این تصویر، لایه پوشش گیاهی منطقه با بهره‌گیری از شاخص NDVI تهیه شد، سپس با ماسک پوشش گیاهی، از تصاویر کانی رسی حذف گردید. اکسیدهای آهن نیز از همین طریق روی تمامی باندهای تصویر به جز باند حرارتی و براساس انتخاب باند ۳ برای مدل، شناسایی شدند (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱). مراحل فوق در نرم‌افزار ENVI 4.8 انجام گرفت.

## ۲-۷- واحدهای سنگی

با استفاده از نقشهٔ رقومی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (GSI, Year not recorded)، سنگ‌های آذرین درونی، بیرونی و سنگ‌های رسوبی منطقه، شناسایی و به صورت رستر آماده شدند. کلاس‌های لایهٔ سنگی، براساس کاهش اهمیت از تراورتن و اسیدی به حد واسط و بازیک و همچنین سن لایه‌ها (کوآترنری و پیش از آن)، بین صفر تا ۱۰ امتیازبندی (جدول ۴) و با یکدیگر تلفیق شدند و لایهٔ واحد سنگی منطقه به دست آمد (شکل ۸).

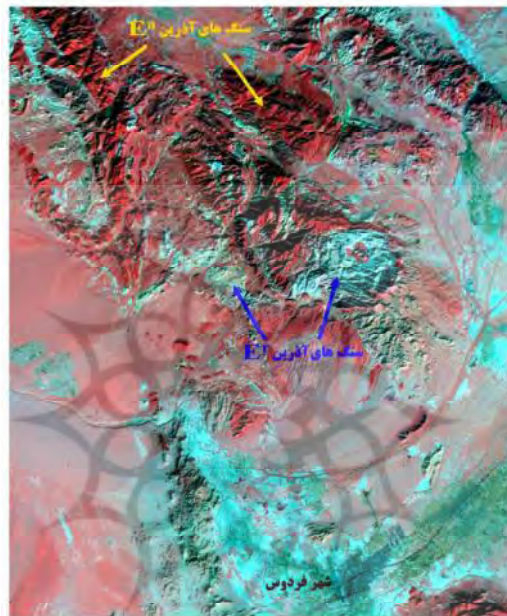
## ۲-۸- گسل‌ها

گسل‌های موجود اعم از اصلی و فرعی روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (GSI, Year not recorded) شناسایی شدند. از آنجاکه گسل‌ها به‌عنوان عامل اصلی ایجاد تخلخل و تراوایی در میدین ژئوترمال در مقیاس ناحیه‌ای اثرگذارند، از معیار تراکم و چگالی



جدول ۳. شاخص OIF برای داده‌های ETM<sup>+</sup>

ردیف	شماره باند	شاخص مطلوبیت
۱	B۷ B۶-۲ B۵	۲۶/۸
۲	B۶-۲ B۵ B۴	۲۶/۷۴
۳	B۷ B۶-۲ B۴	۲۵/۳۲
۴	B۷ B۶-۱ B۵	۲۴/۴۶
۵	B۶-۱ B۵ B۴	۲۴/۲۱
۶	B۶-۲ B۵ B۳	۲۳/۱۹

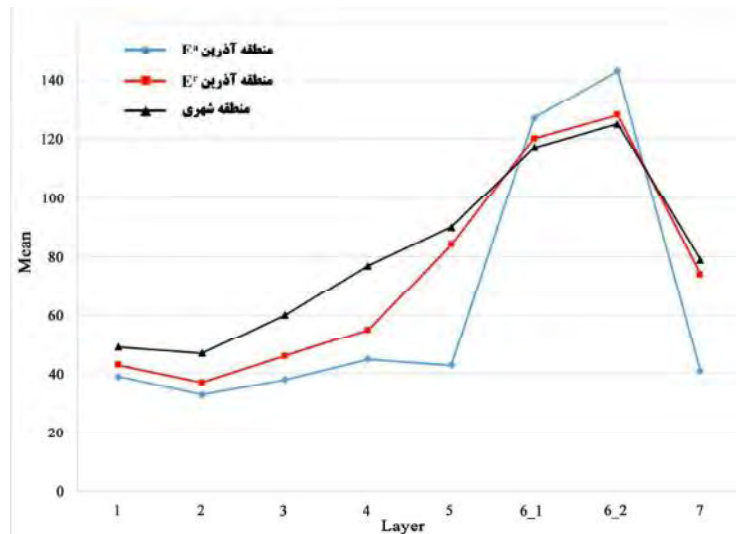


Band 6-2 Band 5 Band 7

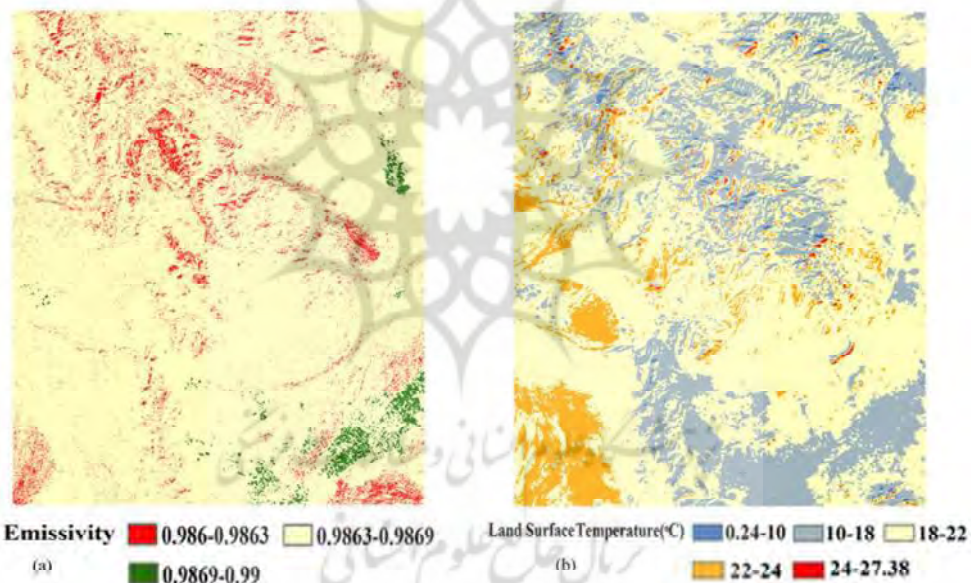
شکل ۴. ترکیب رنگی کاذب به منظور شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی

دلیل مشابهت بازتاب در باندهای ۵، ۲-۶ و ۷ تفکیک‌پذیر نیست (شکل ۵). نکته گفته‌شده می‌تواند به دلیل حرارت منطقه شهری باشد که از آسفالت خیابان‌ها، سطوح سیمانی ساختمان‌های شهری و حرارت ایجادشده از وسایل گرم‌کننده در فصل زمستان ایجاد می‌شود و باعث تداخل بازتاب با لیتولوژی سنگی می‌گردد. از این‌رو براساس این تصویر FCC نمی‌توان به‌تنهایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی را شناسایی کرد، اما به همراه نقشه زمین‌شناسی، شناسایی‌های اولیه و تعیین مناطق مستعد احتمالی این تصویر مفید است.

این مناطق با نقشه زمین‌شناسی (GSI, Year not recorded) و مناطق دارای سنگ‌های آذرین بیرونی گروه E<sup>a</sup> (آندزیت، بیوتیت هورنبلند آندزیت، تراکی آندزیت، لاتیت آندزیت، و آندزی بازالت) مطابقت دارد و این ترکیب باندی در شناسایی عوارض مناسب است و دقت آن ۷۸ درصد برآورد شده است. البته منطقه شهری با مناطق دارای پوشش سنگی آذرین گروه E<sup>f</sup> (ریولیت، آلکالی ریولیت، آلکالی تراکیت، ریوداسیت، داسیت، لاتیت و توف اسیدی) که از نظر سن زمین‌شناسی با سنگ‌های آذرین قبل متفاوت‌اند، به



شکل ۵. میانگین ارقام پیکسل در باندهای سنجنده ETM<sup>+</sup> برای مناطق سنگ‌های آذرین و شهری



شکل ۶. توان تشعشعی سطحی (LSE) منطقه فردوس (a) و دمای سطحی منطقه در تاریخ ۱۳۷۹/۱۰/۲۵ پس از کلاسه بندی (b)

### ۳-۲- درجه حرارت سطحی

درجه حرارت سطحی یکی از عوامل اصلی شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی به‌شمار می‌آید. توجه به توان تشعشعی سطحی در بازبایی درجه حرارت واقعی

یولیانگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌شان ترکیب باندی FCC(6-7)53 را به‌ترتیب در RGB قرار دادند و در رنگ قرمز از تفاضل بین دو باند ۶-۷ استفاده کردند. البته شاخص OIF این ترکیب باندی را نیز برای منطقه مطالعه حاضر معرفی کرده است ولی این ترکیب تفاوت چندانی با ترکیب FCC۶۵۷ در شناسایی مناطق مستعد ندارد.

1. Yuliang

برخی (Wu et al., 2012; Mia et al., 2012; al., 2011) پژوهشگران نیز در مطالعاتشان به تعیین توان تشعشعی و بازیابی دمای سطحی بر این اساس اشاره‌ای نکردند، که از آن میان می‌توان به جهانگیری (۲۰۱۲)، کی‌نژاد و یولیانگ (۲۰۰۹) اشاره کرد. دمای سطحی‌ای که این افراد به‌دست آوردند به‌دلیل توجه‌نداشتن آنها به توان تشعشعی اجسام، با ابهام روبه‌رو است.

بیشترین درجه حرارت منطقه با ۲۷/۳۸ درجه سلسیوس در کوه‌های اطراف شهرستان فردوس که از نظر لیتولوژی مستعد زمین‌گرمایی هستند، مشاهده شد. تصور بر این بود که دمای شهر فردوس نیز با توجه به فصل زمستان و استفاده از وسایل گرمازا و توسعه شهرنشینی بالاتر از محیط اطراف خود باشد اما مشاهده شد که مناطق مستعد زمین‌گرمایی دمایی بالاتر از منطقه شهر فردوس دارند. روند مناطق دمای سطحی بالا، با سایر شواهد از جمله وجود گدازه و سنگ‌های آتشفشانی در لایه لیتولوژی و نیز با شواهد سطحی موجود کاملاً همبسته است.

### ۳-۳- آلتراسیون‌های هیدروترمال

نتایج حاصل از هر روش، با نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه مقایسه و ارزیابی شد. به‌دلیل شباهت رفتار طیفی پوشش گیاهی و کانی‌های رسی، مناطق تحت تأثیر کانی‌های رسی با پوشش گیاهی تداخل داشتند. در طبقه‌بندی نظارت‌شده، پوشش گیاهی منطقه با اعمال ماسک از تصاویر طبقه‌بندی‌شده حذف شد. تمامی روش‌های به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق برای شناسایی مناطق تحت تأثیر آلتراسیون‌های هیدروترمال، روند یکسانی را نشان می‌دهند. اما تفاوت در مناطق مشخص‌شده در نقشه زمین‌شناسی است که

اجسام، ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. در مطالعه حاضر به‌دلیل کاهش تأثیر انرژی گرمایی خورشیدی در درجه حرارت سطحی خاک و تفکیک بهتر مناطق زمین‌گرمایی، از تصویر فصل زمستان استفاده شد. درجه حرارت سطحی منطقه مطابق با روابط بازیابی درجه حرارت سطحی - که در فصل مواد و روش‌ها (روابط ۱ تا ۹) بدان اشاره شد - محاسبه شد. در شکل ۶ توان تشعشعی سطحی منطقه و دمای منطقه برحسب درجه سلسیوس پس از کلاسه‌بندی آمده است.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت منطقه مستعد از نظر لیتولوژی زمین‌گرمایی به‌دلیل ماهیت سنگ‌های آذرین، توان تشعشعی پایین‌تری دارد و بیشترین توان تشعشعی نیز مربوط به پوشش گیاهی منطقه است، که عموماً زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها هستند. اندازه‌گیری توان تشعشعی در به‌دست‌آوردن دمای واقعی منطقه اهمیت بسیاری دارد. در مطالعه یاردانگ درخصوص بیابان لوت، در نظر گرفتن توان تابشی دقیق برای پدیده‌ها یا خاک‌های مورد مطالعه الزامی بیان شده است (علوی‌پناه، ۱۳۸۱).

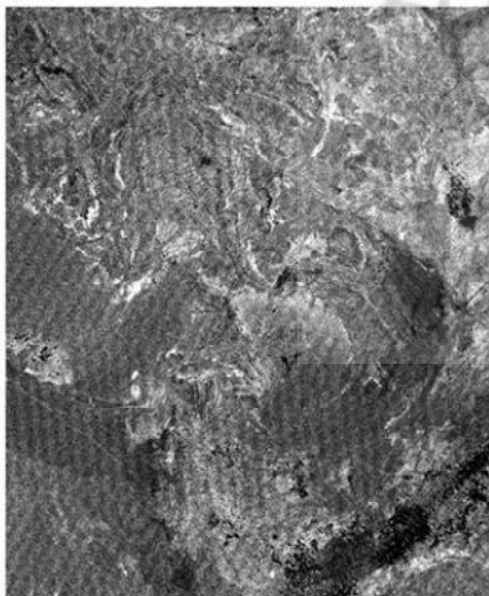
تصویر دمای سطحی یکی از مؤلفه‌های مهم تعیین مناطق مستعد زمین‌گرمایی است. اکثر دانشمندان و پژوهشگران در شناسایی منابع زمین‌گرمایی از آن بهره برده‌اند و شناسایی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین نقش بسزایی در روند مطالعات این افراد داشته است. از جمله می‌توان به این مطالعات اشاره کرد: هلمن و رامزی<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، انوا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، کین<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، وو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۲). برخی پژوهشگران برای بازیابی دمای سطحی زمین از روش NDVI به‌منظور تعیین توان تشعشعی استفاده کردند و تأثیر پوشش گیاهی را روی درجه حرارت سطحی مطالعه و نقش تعیین توان تشعشعی را در بازیابی درجه حرارت سطحی و شناسایی دقیق منابع زمین‌گرمایی مهم ارزیابی کردند. مطالعات این افراد، نتایج مطالعه حاضر را تأیید می‌کند (Qin et al., 2004; Sobrino et al., 2004).

1. Hellman & Ramsey
2. Eneva
3. Qin
4. Wu

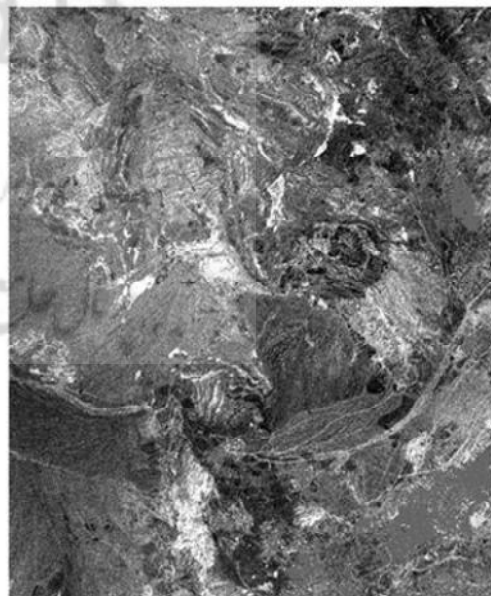
(کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۱). نتایج حاصل از این پردازش‌ها در نهایت به صورت رستر آماده و کلاسه‌بندی شدند. به این نکته باید اشاره کرد که در روش‌های به کار رفته در پژوهش حاضر، نواحی دارای واحد سنگی ماسه‌سنگ، شیل و سنگ‌آهک به صورت بسیار محدود به عنوان نواحی مستعد آلتراسیون هیدروترمال شناسایی شدند. در این میان، سهم روش کروس‌تایپ از سایر روش‌هاست و مساحت بیشتری از سنگ‌های رسوبی را به عنوان آلتراسیون معرفی می‌کند. دلیل این تداخل می‌تواند وجود رس بالا در سنگ‌های رسوبی و رفتار طیفی کاملاً مشابه سنگ‌های رسوبی همانند با واحدهای مارنی به‌ویژه رسوبات آبرفتی با سنگ‌های دگرسان‌شده باشد. در نتایج پژوهشگران دیگری چون بیاتانی و دیگران (۱۳۸۷) و متکان و دیگران (۱۳۹۱) نیز این تداخل مشاهده شد و ایشان دلیل آن را شباهت رفتار طیفی سنگ‌های رسوبی با کانی‌های رسی عنوان کردند.

به آلتراسیون‌ها مساحتی فراتر از نتایج حاصل در تمام روش‌ها را اختصاص داده است، در حالی که نواحی مستعد در تمامی روش‌ها موقعیت و مساحت تقریباً یکسانی دارند. در مقایسه با مناطق شاهد، مشخص شد که صحت روش برازش حداقل مربعات (شکل ۷) بیش از دو روش دیگر است.

تکنیک برازش کمترین مربعات از کوواریانس داده‌های ورودی برای تخمین باند انتخابی (باند شاخص آنومالی مورد نظر)، به عنوان ترکیبی خطی از باندهای تخمین‌گر برای تعیین مناطق دارای آنومالی استفاده می‌کند. تفاوت (باقی‌مانده) میان باند اصلی و باند مدل‌شده، محاسبه و به عنوان تصویر نمایش داده می‌شود. پیکسل‌های نمایشگر با بیشترین اختلاف با علامت اصلی و باند مدل‌شده، محاسبه و به عنوان تصویر نمایش داده می‌شود. پیکسل‌های نمایشگر با بیشترین اختلاف با علامت مثبت یا منفی، نشانه وجود خصوصیات پیش‌بینی‌نشده یا همان آنومالی است



(a) LS-Fit 3 Low : 0 High : 10



(b) LS-Fit 7 Low : 0 High : 10

شکل ۷. مناطق مستعد آلتراسیون هیدروترمال به روش برازش حداقل مربعات، (a) نواحی مستعد اکسیدهای آهن، (b) نواحی مستعد کانی‌های رسی و هیدروکسیل‌ها. نواحی مستعد آلتراسیون هیدروترمال در شکل به صورت پیکسل‌های سفیدرنگ مشخص هستند.

مؤلفه‌های اصلی و روش برازش حداقل مربعات انجام دادند. با بررسی و مقایسه نتایج با شواهد زمینی، روش برازش حداقل مربعات صحت بیشتری در مقایسه با دو روش دیگر دارد. وی نتایج آنالیز مؤلفه اصلی را نیز بسیار شبیه با نتایج روش برازش حداقل مربعات اعلام کرد. نتایج مطالعات این افراد مؤید نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر است.

#### ۳-۴- واحدهای سنگی

سنگ‌های آذرین به‌عنوان نشانه‌هایی از فعالیت‌های آتشفشانی و ماگمایی در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی، نقش مؤثری در اکتشافات ژئوترمال دارند. وجود سنگ‌های آتشفشانی در منطقه مورد مطالعه دلیلی بر افزایش احتمال وجود منابع زمین‌گرمایی است (Yousefi et al., 2007). نحوه امتیازدهی به لایه‌های سنگی براساس اهمیت هر لایه در شناسایی منابع زمین‌گرمایی صورت گرفت (جدول ۴) که برحسب امتیاز هر لایه در این جدول، نقشه واحد سنگی منطقه تولید شد (شکل ۸).

متکان و همکاران (۱۳۹۱) برای شناسایی نواحی دگرسانی از روش‌های ترکیب باندی، نسبت باندی و تکنیک کروستا استفاده کردند. آنها به‌دلیل شباهت رفتار طیفی پوشش گیاهی با برخی کانی‌های دگرسانی و غنی‌بودن پوشش گیاهی منطقه، روش‌های ترکیب باندی و نسبت باندی را مناسب نمی‌دانند. متکان و همکاران در تکنیک کروستا نیز از باندهای ۱، ۳، ۴ و ۵ برای اکسید آهن و ۱، ۴، ۵ و ۷ برای دگرسانی‌های رسی استفاده کردند و این روش را به‌دلیل کمینه‌کردن اثر پوشش گیاهی و تکیه بر باندهای طیفی خاص برای بارزسازی مناطق دگرسانی مناسب تشخیص دادند. اشکال این روش را نیز تشدید اثر سنگ‌های رسوبی و دگرسان‌های کم در برآیند تصویر برشمردند. بیاتانی و همکاران (۱۳۸۷) نیز تکنیک کروستا را در تعیین محدوده‌های دگرسانی غنی از اکسید آهن و کانی‌های هیدروکسیل (رسی) بسیار مؤثر دانستند اما عنوان کردند که در نقشه‌برداری تفصیلی کانی‌های دگرسان به‌طور جداگانه ناتوان است. کی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعات تعیین مناطق با پتانسیل بالای ژئوترمال در استان آذربایجان شرقی، بارزسازی آلتراسیون‌های هیدروترمال منطقه را با روش‌های نسبت باندی، آنالیز

جدول ۴. تفکیک و امتیازبندی کلاس‌های لایه سنگی براساس اهمیت از نظر بیرونی و درونی بودن سنگ‌های آذرین و سن لایه‌ها


واحد سنگی	امتیاز	دوره	دوران	جنس سنگ‌های منطقه مورد مطالعه
Sedimentary-Metamorphic	4	Triassic upper Jurassic	MESOZOIC	Alternation of sandstone, shale, argillite and thin lenses of coaly argillite, black to dark gray, green chloritized
Volcanic Rock	9	Eocene-Oligocene	CENOZOIC	Andesite, Biotite hornblende Andesite, Trachyandesite, Latite-Andesite, Andesite-basalt, Quartz-Andesite, Alkali-Rhyolite, Alkali-Trachyte, Tuff, Trachytic, Quartz-Trachyte, Agglomerate, Quartz-Latite, Latite
Volcanic Rock	9	Eocene-Oligocene	CENOZOIC	Andesite, Dacite, Rhyolite, Rhyodacite, Latite, few Basalt, Agglomerate
Volcanic Rock	9	Eocene-Oligocene	CENOZOIC	Basalt, Andesite basalt
Sedimentary 2	3	Quaternary	CENOZOIC	Channel filled deposits
Sedimentary 2	3	Neogene, Quaternary	CENOZOIC	Conglomerate, semi consolidated, highly weathered
Sedimentary 2	3	Neogene	CENOZOIC	Conglomerate, semi consolidated, with rounded quartz and phyllites pebbles
Volcanic Rock	9	Eocene-Oligocene	CENOZOIC	Dacite, Andesite-Basalt, Rhyolite

کاظم تباکی بجستانی و همکاران

ادامه جدول ۴. تفکیک و امتیازبندی کلاس‌های لایه سنگی براساس اهمیت از نظر بیرونی و درونی بودن سنگ‌های آذرین و سن لایه‌ها

واحد سنگی	امتیاز	دوره	دوران	جنس سنگ‌های منطقه مورد مطالعه
Town & Village	1			FERDOWS
Altered Silisified Rock	8			Hydrothermal alteration
Sedimentary1	2	Lower Cretaceous	MESOZOIC	Limestone, marly cream, red, brown, well bedded, orbitolina bearing
Sedimentary1	2	Lower Cretaceous	MESOZOIC	Limestone, orbitolina bearing, gray, cream, well bedded, massive in places, rare brachiopodes
Sedimentary1	2	Triassic upper Jurassic	MESOZOIC	Limestone, several thin bedded sandstone
Sedimentary2	3	Neogene	CENOZOIC	Marl, sandy marl, sandstone and conglomerate as intercalations, partly gypsiferous, light red-orange-green, with (g) gypsum lenses
Volcanic Rock	9	Eocene-Oligocene	CENOZOIC	Rhyolite, Alkali-Rhyolite, Alkali-Trachyte, Rhyodacite, Dacite, Latite, Tuff, Acidic, Lithic, Devitrified
Sedimentary2	3	Neogene	CENOZOIC	Sandstone, coarse grained, conglomerate, loose, rounded, marl, gypsiferous
Sedimentary1	2	Triassic upper Jurassic	MESOZOIC	Shale, sandstone, siltstone with intercalation of Heterastridium bearing limestone
Sedimentary2	3	Quaternary	CENOZOIC	Terraces and young gravel fans
Sedimentary2	3	Quaternary	CENOZOIC	Yong lake deposits

راهنما

	Town & Village
	Sedimentary1
	Sedimentary2
	Sedimentary-Metamorphic
	Altered Silisified Rock
	Volcanic Rock



شکل ۸. نقشه واحدهای سنگی منطقه مورد مطالعه

بهره‌برداری مورد توجه متخصصان علوم زمین قرار دارند. آگاهی از نقش گسل‌ها در کنترل جریان سیالات زیرسطحی یکی از راه‌های اصلی تشخیص مناطق دارای پتانسیل ژئوترمال است. علاوه بر نقش گسل‌ها در انتقال سیالات هیدروترمال به سطح، ارتباط مستقیم آنها با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه نیز از دیگر دلایل اهمیت ویژه گسل‌ها در اکتشافات ژئوترمال است (Qin et al., 2011).

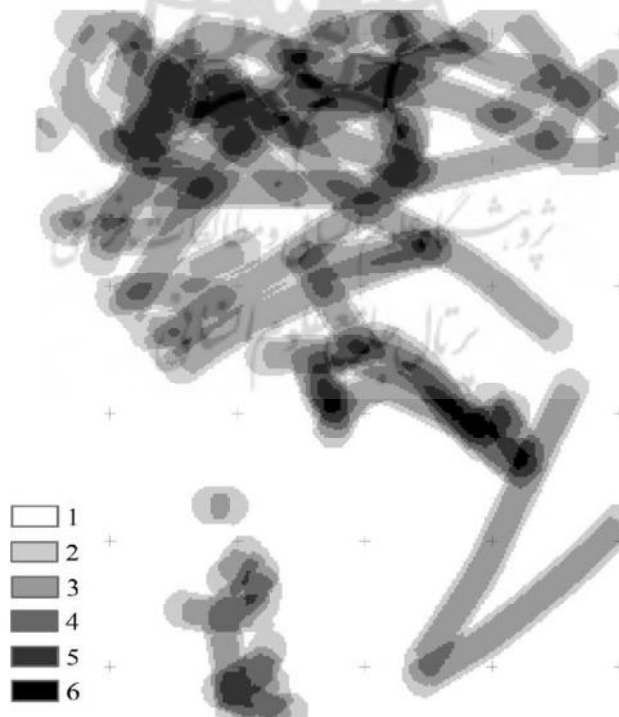
چگالی گسل منطقه با شعاع تأثیر ۱۰۰۰ متر در شکل ۹ نشان داده شده است.

تجمع گسل‌ها بیشتر در مناطق شمالی است که درجه حرارت سطحی نیز در آنجا بالاتر است. کین همکاران (۲۰۱۱) پس از بازیابی دمای سطحی، ارتباط این مناطق را با گسل‌های منطقه بررسی و در نهایت گسل‌ها را به‌عنوان کانال‌هایی برای صعود درجه حرارت منبع زمین‌گرمایی به سطح زمین معرفی کردند.

براساس نقشه زمین‌شناسی، دو مرکز آتشفشانی و یک چشمه آب‌گرم در منطقه وجود دارد (شکل ۸). انرژی زمین‌گرمایی در مناطق مرتبط با آتشفشان‌های فعال یا جوان غیرفعال که در حال از دست دادن گرمای خود در اعماق هستند، قابل دستیابی است (Yousefi, 2007). با آنکه این آتشفشان‌ها خاموش یا نیمه‌فعال‌اند ولی اتاقک ماگمایی آنها در عمق همچنان گرم و دارای درجه حرارت بالایی است. فعالیت‌های تکتونیکی، ماگمایی، فرایندهای همراه با این فعالیت‌ها و هدایت گرمایی سنگ‌های مجاور باعث گرمایش سیالات موجود در طبقات فوقانی و ایجاد مخازن زمین‌گرمایی می‌شوند (Qin et al., 2011).

### ۳-۵- گسل‌ها

گسل‌ها و شکستگی‌ها که عامل اصلی انتقال سیالات زیرسطحی هیدروترمال در میداین ژئوترمال به‌شمار می‌آیند، از مراحل اولیه اکتشاف تا آخرین مراحل



شکل ۹. چگالی گسل‌ها به‌صورت طبقه‌بندی شده

### ۳-۶- تلفیق لایه‌ها به روش هم‌پوشانی وزنی

به دلیل پراکندگی نامناسب اطلاعات زمین‌شناسی و شواهد زمین‌گرمایی در تمام بخش‌ها، در مطالعه حاضر از روش هم‌پوشانی وزن دار - که روشی دانش‌محور است- استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی به دست آمده در مراحل قبل، براساس میزان اهمیت در اکتشاف منابع ژئوترمال، به صورت جدول ۵ امتیازدهی و با یکدیگر تلفیق شدند.

با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی درجه حرارت سطحی، واحدهای سنگی منطقه، چگالی گسل، نواحی اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی، نقشه منابع

زمین‌گرمایی منطقه فردوس به دست آمد (شکل ۱۰). در این شکل، مناطق با پتانسیل بالای زمین‌گرمایی در دو ناحیه شمالی منطقه مورد مطالعه قرار دارند و بر این اساس می‌توان دو منبع اصلی زمین‌گرمایی (A و B) را در منطقه فردوس تعریف کرد.

### ۳-۷- صحت‌سنجی

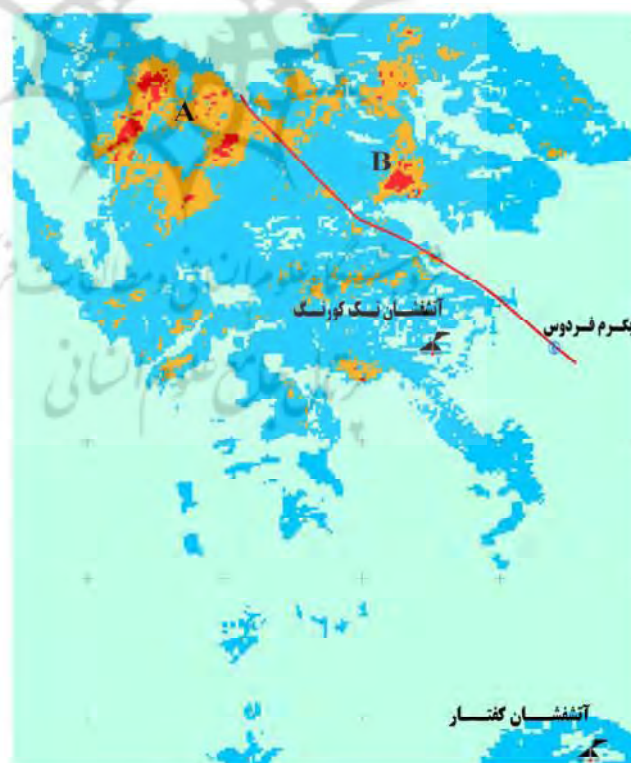
در منطقه مطالعاتی به دلیل تعداد کم شواهد میدانی برای صحت‌سنجی، با استفاده از اطلاعات موجود اقدام به بررسی صحت منابع مشخص شده به صورت کیفی و توصیفی گردید.

جدول ۵. وزن‌دهی به لایه‌ها در روش هم‌پوشانی وزن دار

لایه اطلاعاتی	آلتراسیون بنیان OH	اکسیدهای آهن	چگالی گسل	واحدهای سنگی	دمای سطحی
وزن	۲۰	۱۰	۲۰	۲۵	۲۵

### راهنما

-  بدون پتانسیل
-  پتانسیل کم
-  پتانسیل متوسط
-  پتانسیل بالا
-  آبگرم فردوس
-  آتشفشان
-  گسل



شکل ۱۰. تصویر نهایی تلفیق اطلاعات به روش هم‌پوشانی وزنی و مناطق مستعد زمین‌گرمایی



رزاقی ا.، ۱۳۹۰، انرژی زمین‌گرمایی و کاربردهای آن، نشاء علم، سال دوم، شماره اول، صص. ۳۵-۳۰.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ فردوس، شماره شیت ۷۶۵۸.

علوی‌پناه س.ک.، ۱۳۸۱، مطالعه پدیده‌های سطحی یاردانگ‌های بیابان لوت با استفاده از مطالعات میدانی و داده‌های حرارتی ماهواره، بیابان، جلد هفتم، شماره سوم، صص. ۷۹-۶۷.

علوی‌پناه س.ک.، ۱۳۸۲، کاربرد سنجش از دور در علوم زمین، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

علوی‌پناه س.ک.، ۱۳۸۷، سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

علوی‌پناه س.ک.، سراجیان، م.ر.، ۱۳۸۱، بررسی محدودیت‌های تهیه نقشه دمای سطح بیابان لوت با استفاده از داده‌های باند حرارتی ماهواره لندست، بیابان، جلد هفتم، شماره اول، صص. ۹۹-۶۵.

کی‌نژاد ص.، مختاری، ا.ر.، فتحیان‌پور، ن.، ایران‌نژادی، م.ر.، ۱۳۹۱، پتانسیل یابی منابع زمین‌گرمایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در محیط GIS، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۳، جلد ۱، صص. ۱۱۶-۱۰۵.

متکان، ع.ا.، یزدی، م.، عاشورلو، د.، ساداتی، س.ن.، ۱۳۹۱، کاربرد سنجش از دور در شناسایی گسل‌ها، دگرسانی‌ها و کشف رابطه میان لیتولوژی و پوشش گیاهی در منطقه سیاه‌بیشه (مازندران)، علوم محیطی، سال نهم، شماره چهارم، صص. ۱۳۲-۱۲۱.

نظری‌پور، ح.، فتوحی، ص.، پودینه، م.ر.، ۱۳۸۹، ضرورت تجدید نظر در منابع انرژی و جایگزینی انرژی‌های نو (انرژی زمین‌گرمایی)، چهارمین کنگره بین‌المللی جغرافی دانان جهان اسلام، زاهدان، ایران.

وجود دو آتشفشان خاموش در منطقه و در مجاورت منابع A و B، وجود چشمه آب‌گرم - که در نیمه شهر یورماه سال ۱۳۹۱ درجه حرارت آب خروجی از دهانه آن ۴۳ درجه سلسیوس برداشت شد - در پایین دست این منابع و گسلی که از مجاورت دو منبع A و B می‌گذرد و به چشمه آب‌گرم ختم می‌شود و احتمالاً آب‌گرم از مخزن زمین‌گرمایی از طریق این گسل به سطح زمین راه می‌یابد، همگی دلایلی هستند که می‌توانند درستی نقشه تولیدی را تأیید کنند. از آنچه گفته شد چنین برمی‌آید که ماگما نقش منبع حرارتی مهمی برای منطقه مورد مطالعه دارد و گسل‌ها، کانال‌های حرارتی را برای انتقال حرارت داخلی زمین به سطح زمین فراهم می‌کنند.

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که مطالعات دورسنجی با استفاده از داده‌های ماهواره لندست کارایی بالایی در اکتشاف ناحیه‌ای منابع زمین‌گرمایی دارند. منابع زمین‌گرمایی مشخص شده در این مطالعه همبستگی مکانی مناسبی با شواهد زمین‌گرمایی موجود در منطقه فردوس دارند. ترکیبی از سنجش از دور حرارتی با تجزیه و تحلیل زمین‌شناسی و درک درستی از سازوکارهای زمین‌گرمایی، رویکردی دقیق و کارآمد برای تشخیص منابع زمین‌گرمایی خواهد بود. استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و مغناطیس‌سنجی، برای شناسایی موقعیت مکانی دقیق تر منابع گرمایی در مناطق دارای اولویت بالاتر پیشنهاد می‌شود.

#### ۵- منابع

بیاتانی ع.، ضیائیان فیروزآبادی، پ.، متکان، ع.ا.، شکیبیا، ع.، ۱۳۸۷، تهیه نقشه دگرسانی گرمایی با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: مشکین‌شهر-اهر)، زمین‌شناسی ایران، سال دوم، شماره هفتم، صص. ۵۲-۳۹.

- Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A. and Alavipanah, S.K., 2009, **Spatial-temporal Dynamics of Land Surface Temperature in Relation to Fractional Vegetation Cover and Land Use/cover in the Tabriz Urban Area, Iran**, Remote Sensing of Environment, Vol. 113, PP. 2606- 2617.
- Bonham-Carter, G.F., 1994, **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**, Access Online via Elsevier.
- Crosta, A.P. and Moore, J., 1989, **Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil- A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain**, in Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology- Methods, Integration, Solutions, 7th, Calgary, Canada, PP. 1173-1187.
- ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica), 1980, **Geothermal Power Development Studies in Iran**, General Report on Damavand Zone, Appendix I, Technical Specification, General Report.
- Eneva, M., Coolbaugh, M. and Combs, J., 2006, **Application of Satellite Thermal Infrared Imagery to Geothermal Exploration in East Central California**, GRC Transactions, Vol. 30, PP. 407 - 411.
- ERDAS, 2001, **ERDAS Imagine Tour Guides**, ERDAS IMAGINE V8. 4, ERDAS, Inc., Atlanta Georgia, United States of America.
- Ferrier, G., White, K., Griffiths, G., Bryant, R. and Stefouli, M., 2002, **The Mapping of Hydrothermal Alteration Zones on the Island of Lesbos, Greece Using an Integrated Remote Sensing Dataset**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 23, No. 2, PP. 341-356.
- Geothermal Resources Council, 2012, **What is Geothermal?**, Accessed 21 July 2012, Available at URL: <http://www.geothermal.org/what.html>
- Hellman, M.J. and Ramsey, M.S., 2004, **Analysis of Hot Springs and Associated Deposits in Yellowstone National Park using ASTER and AVIRIS Remote Sensing**, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 135 (1-2), PP. 195-219.
- Hodder D.T., 1970, **Application of Remote Sensing to Geothermal Prospecting**, Geothermics, Vol. 2, PP. 368-380.
- Huenges, E., 2009, **Geothermal Energy Systems, Exploration, Development and Utilization**, WILEY-VCH, Germany.
- Irish, R., 2000, **Landsat 7 Science Data Users Handbook**, NASA Report.
- Lee, K., 1978, **Analysis of Thermal Infrared Imagery of the Black Rock Desert Geothermal Area**, Colorado School of Mines Quarterly, Vol. 4 (2), PP. 31-44.
- Mia, M.B., Bromley, C.J. and Fujimitsu, Y., 2012, **Monitoring Heat Flux Using Landsat TM/ETM+ Thermal Infrared Data- A Case Study at Karapiti ('Craters of the**

- Moon') **Thermal Area**, New Zealand, Journal of Volca Nology and Geothermal Research, Vol. 235 - 236, PP. 1- 10.
- NASA (The National Aeronautics and Space Administration), 2012, **Atmospheric Correction Parameter Calculator**, [Internet] Accessed November 2012, Available at URL: <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>.
- NCC (National Cartographic Center), 2001, **Ferdows Topographic Map 1:50,000**, Series Sheet No. 7658.
- Nouraliee, J., Porkhial, S., Tamjidi, A., 2010, **Re-evaluation of Gethermal Potential of Damavand Volcano**, Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Qin, Q., Zhang, N., Nan, P. and Chai, L., 2011, **Geothermal Area Detection Using Landsat ETM+ Thermal Infrared Data and its Mechanistic Analysis - A Case Study in Tengchong**, China, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 13, PP. 552-559
- Qin, Z. and Karnieli, A., 2001, **A Mono-window Algorithm for Retrieving Land Surface Temperature from Landsat TM Data and Its Application to the Israel-Egypt Border Region**, INT. J. REMOTE SENSING, Vol. 22, No. 18, PP. 3719 – 3746.
- Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.C., and Paolini, L., 2004, **Land Surface Temperature Retrieval from Landsat TM 5**, Remote Sensing of Environment, Vol. 90, PP. 434 – 440.
- Wu, W., Zou, L., Shen, X., Lu, S., Su, N., Kong, F. and Dong Y., 2012, **Thermal Infrared Remote-Sensing Detection of Thermal Information Associated with Faults: A Case Study in Western Sichuan Basin**, China, Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 43, PP. 110-117.
- Yousefi, H., 2007, **Geothermal Potential Site Selection Using GIS in Iran**, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Yuliang, Q., Shangmin, Z. and Yue, F., 2009, **Methodology Research in Exploring Geothermal Resources by Using Infrared Remote Sensing**, in Image and Signal Processing, CISP '09. 2nd International Congress on, PP. 1-4.
- Zhang, J., Wang, Y. and Li, Y., 2006, **A C++ Program for Retrieving Land Surface Temperature from the Data of Landsat TM/ETM+ band6**, Computers & Geosciences, Vol. 32, PP. 1796–1805.