

شناسایی پتانسیل‌های زمین‌گرمایی با استفاده از روش سنجش از دور حرارتی در خراسان جنوبی

سید سعیدرضا احمدی‌زاده^۱، فاطمه آراسته^{۲*}، غلامعباس فنائی خیرآباد^۳، علی اشرفی^۴

۱ دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد ارزیابی و آمایش سرزمین، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند

۳ استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند

۴ کارشناس ارشد GIS و سنجش از دور، عضو هیئت علمی گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه بیرجند

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۲۴؛ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۰/۲۴)

چکیده

سنجش از دور حرارتی، به‌عنوان شاخه‌ای از علم سنجش از دور نقش مهمی در مطالعات محیط‌زیست ایفا می‌کند. سنجش از دور حرارتی یکی از روش‌های نوین و کم‌هزینه در مقابل پیمایش‌های زمینی، آن هم در مناطق دورافتاده است که در کوتاه‌ترین زمان اطلاعات ارزشمندی از منطقه‌ی مورد مطالعه در اختیار محققان و پژوهشگران قرار می‌دهد. تهیه‌ی نقشه‌ی دمای سطح زمین برای شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی با به‌کارگیری باند مادون قرمز حرارتی امکان‌پذیر است که زمینه را برای مطالعات اکتشافی بیش‌تر فراهم می‌آورد. در این تحقیق، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست-۷، سنجنده‌ی ETM+، نقشه‌ی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین تهیه و شش منطقه‌ی مستعد زمین‌گرمایی در استان شناسایی شد. این مناطق که از دمایی بین ۲ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین برخوردار هستند عبارتند از: شمال شهرستان فردوس، جنوب روستای نایبند، جنوب روستای گزیک، ۱۸ کیلومتری خضری دشت‌بیاض، جنوب نهبندان و جنوب‌غربی درح می‌باشند. هم‌چنین، این مناطق در ارتباط بسیار نزدیک با سایر شواهد حضور این انرژی به‌خصوص گسل‌ها و چشمه‌های آب گرم هستند. این امر، نشان‌دهنده‌ی نقش بارز گسل‌ها به‌عنوان یک مسیر حرارتی برای انتقال گرما از بخش‌های داخلی به سطح زمین و چشمه‌های آب گرم به‌عنوان مهم‌ترین جلوه‌های سطحی وجود این انرژی است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد: استان خراسان جنوبی به دلیل قرارگیری در موقعیت خاص زمین‌شناسی و جغرافیایی، از سطح مناسب و مستعدی برای تولید انرژی زمین‌گرمایی برخوردار است که با مدیریت صحیح و امکان توجه برنامه‌ریزان، قابلیت استفاده‌ی مستقیم و کاربردهای صنعتی این انرژی پاک و سازگار با محیط‌زیست در منطقه فراهم می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور حرارتی، انرژی زمین‌گرمایی، باند مادون قرمز حرارتی، نقشه‌ی دمای سطح زمین

سراغاز

بدون تردید، یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های امنیت ملی تمام کشورها، دسترسی به انرژی مورد نیاز است. به‌همین دلیل، کشورها تنوع‌بخشی به منابع انرژی را جزو اصلی‌ترین راهبردهای خود قرار می‌دهند تا از وابستگی به یک یا دو نوع انرژی به‌شدت احتراز کرده و آسیب‌پذیری خود را به حداقل ممکن کاهش دهند (سانا، ۱۳۹۰). از طرفی، عواملی همچون کاهش طول عمر منابع فسیلی در کنار افزایش جمعیت و رشد اقتصادی، افزایش آلودگی هوا و محیط‌زیست، لزوم استفاده از منابع انرژی‌های نو و تجدیدپذیر را با توجه به توجیه اقتصادی آن‌ها ضروری می‌سازد (نظری‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). در این میان، انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع عمده‌ی انرژی‌های نو و سازگار با محیط‌زیست است که در صورت بهره‌برداری صحیح و مبتنی بر پارامترهای محیط‌زیستی، نقش مهمی را در موازنه‌ی انرژی کشور و اهداف توسعه‌ی پایدار ایفا می‌کند. اما، آنچه که می‌تواند راهگشای برنامه‌ریزان و متولیان امر انرژی باشد شناسایی و اکتشاف آن با استفاده از روش‌های نوین و کم‌هزینه در مقابل پیمایش‌های زمینی آن هم در مناطق دورافتاده است.

تلاش‌های متخصصان فن‌آوری‌های فضایی و سنجش از دور موجب شده است که با استفاده از اطلاعات و داده‌های ماهواره‌ای بتوان در جهت اعمال مدیریت صحیح و مبتنی بر دانش روز گام‌هایی برداشت. امروزه، شناسایی و مطالعه‌ی اجسام و پدیده‌ها با استفاده از سنجنده‌های حرارتی موجب تحول در سنجش از دور شده و با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور حرارتی ممکن است بتوان با کم‌ترین هزینه و کوتاه‌ترین زمان، پروژه‌های زیادی در سطح جهانی، منطقه‌ای، ملی، استانی و محلی اجرا کرد (علوی‌پناه، ۱۳۸۳). داده‌های سنجش از دور مادون‌قرمز حرارتی می‌تواند، برای نقشه‌برداری و تعیین ناهنجاری‌های حرارتی در ارتباط با ویژگی‌های ظاهری انرژی زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد، سال‌های زیادی است که به‌عنوان یک ابزار مقرون‌به‌صرفه برای اکتشاف انرژی زمین‌گرمایی در سراسر مناطق بزرگ استفاده شده و امکان انتخاب گزینه‌ها برای اکتشافات مجدد با استفاده از پیمایش‌های زمینی هزینه‌بر را فراهم نموده است (Haselwimmer & Prakash, 2012). سنجش از دور مادون‌قرمز حرارتی، روشی مؤثر برای شناسایی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین است که ترکیب آن با

تحلیل‌های زمین‌شناسی و درک سازوکار زمین‌گرمایی، رویکردی صحیح و کارآمد در اکتشاف مناطق زمین‌گرمایی می‌باشد (Qin et al., 2011).

(Yamaguchi et al., 1992) نقش سنجش از دور برای کاربردهای زمین‌گرمایی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که سنجش از دور می‌تواند در مطالعات و اکتشافات انرژی زمین‌گرمایی با شناسایی ناهنجاری حرارتی سطح زمین با استفاده از تصاویر مادون‌قرمز حرارتی، نقشه‌برداری خطواره‌هایی که مسیرهایی برای عبور سیالات زمین‌گرمایی هستند و مشخص کردن مناطق دگرسان‌شده‌ی گرمایی با استفاده از الگوهای طیفی در بخش‌های مادون‌قرمز با طول موج کوتاه، سهمی داشته باشد. (Coolbaugh et al., 2007) به شناسایی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین در ارتباط با منابع زمین‌گرمایی با استفاده از تصاویر مادون‌قرمز حرارتی ماهواره‌ی ASTER^(۱) در چشمه‌های آب گرم نوادا پرداختند. (Kienholz et al., 2009) با استفاده از تصاویر مادون‌قرمز حرارتی چندطیفی اقدام به اکتشاف انرژی زمین‌گرمایی در آکوتا، آلاسکا نمودند. آن‌ها از تصاویر مادون‌قرمز حرارتی بدون پوشش ابر و مربوط به ماه‌های تابستان برای تخمین دمای سطح زمین و شناسایی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین و تولید نقشه‌ی جلوه‌های سطحی در ارتباط با انرژی زمین‌گرمایی از جمله چشمه‌های آب گرم، آبفشان‌ها و دودخان‌ها استفاده نمودند. (Qin et al., 2011) با استفاده از داده‌های سنجش از دور مادون‌قرمز حرارتی، از سنجنده‌ی ETM+^(۲) به بررسی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین در رابطه با انرژی زمین‌گرمایی در منطقه‌ی تنگ‌چانگ در چین پرداختند و چهار منطقه‌ی زمین‌گرمایی را معرفی نمودند. (Siahaan et al., 2011) به بررسی پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی با استفاده از روش سنجش از دور در منطقه‌ی پاتوها در جاوه‌ی غربی پرداخته‌اند و نقطه‌ی تمرکز مطالعه‌ی آن‌ها دست‌یابی به دمای سطح زمین بود. (Sumintadireja et al., 2011) به شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی با استفاده از باند مادون‌قرمز حرارتی و روش مگنتوتلوریک برای شبیه‌سازی یک مکان‌یابی زمین‌گرمایی در کوه سری‌مایبی در اندونزی پرداختند. (Wu et al., 2012) در چین، با استفاده از سنجش از دور مادون‌قرمز حرارتی و تهیه‌ی نقشه‌ی دمای سطح زمین به شناسایی اطلاعات حرارتی در ارتباط با گسل‌ها پرداختند.

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \quad (2)$$

λ_m طول موج حداکثر انرژی ساطع شده (μm).
 A ثابت وین ($2898 \mu\text{mK}$).
 T دمای جسم برحسب درجه‌ی کلونین ($^{\circ}\text{K}$).

سازوکار ناهنجاری زمین‌گرمایی

دمای سطح زمین حاصل تابش خورشید و گرمای داخلی کوهی زمین است. درک توازن انرژی سطح زمین و انتقال حرارت زیر زمین منجر به شناسایی مناطق زمین‌گرمایی ایجاد شده توسط حرارت داخل زمین می‌شود (Qin et al., 2011). در سطح زمین، دما نتیجه‌ی تابش انرژی متوازن برای سطح زمین می‌باشد (Zhang, 1999; Qin et al., 2011). به‌طور کلی، توازن انرژی سطح زمین مطابق معادله‌ی ۳ بیان می‌شود (Monteith, 1973; Qin et al., 2011):

$$Q_d = H + \lambda E + G \quad (3)$$

Q_d تابش خالص دریافتی توسط سطح زمین

H شار گرمای محسوس میان سطح زمین و اتمسفر پایینی

λE بیانگر شار گرمای نهان در مرحله انتقال آب بین سطح زیرین و اتمسفر

G شار گرمای خاک (توصیف‌کننده‌ی تبادل حرارت میان اعماق مختلف خاک)

برای منطقه‌ی محلی شار گرمای محسوس (H) و شار گرمای نهان (λE) می‌تواند ثابت فرض شود، آن‌گاه شار گرمایی خاک (G) یک فاکتور اصلی تأثیرگذار بر تعادل انرژی سطحی است (Guo & Sun, 2002; Qin et al., 2011).

در سنگ‌کره، گرما اساساً به‌صورت هدایت حرارتی انتقال یافته است (Rudnick, 1998; Zang et al., 2002; Qin et al., 2011). این فرآیند با معادله‌ی ۴ تشریح می‌شود:

$$\nabla(K\nabla T) = -A \quad (4)$$

T دما

K بیانگر ضریب انتشار حرارتی سنگ

A محصول گرمای ایجاد شده در اثر تشعشع از سنگ‌ها

برای یک محل، شار حرارتی با ضریب انتشار حرارتی سنگ (K) کنترل شده است که بیش‌تر متأثر از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی سنگ است (Li, 1992; Ou et al., 2004; Xiong et al., 1994; Qin et al., 2011).

هدایت حرارتی، شکل مهم دیگری از انتقال گرمای زیر زمین

از میان پتانسیل‌های متعدد کشور در زمینه‌ی انرژی زمین‌گرمایی، استان خراسان جنوبی با توجه به حضور شواهد منابع زمین‌گرمایی از سطح مناسب و مستعدی برای تولید این انرژی برخوردار است که با مدیریت صحیح و امکان توجه برنامه‌ریزان می‌باید زمینه‌ی اکتشاف و مکان‌یابی آن با ابزارهای نوین و مقرون به‌صرفه در بررسی‌های بزرگ مقیاس فراهم شود. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف به‌کارگیری باند مادون‌قرمز حرارتی و تهیه‌ی نقشه‌ی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین به شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی در سطح استان خراسان جنوبی پرداخته و زمینه را برای بررسی‌های اکتشافی بعدی فراهم نموده است.

سنجش از دور حرارتی

حداکثر انرژی ساطع‌شده از سطح زمین در طول موج حدود ۹/۷ میکرومتر روی می‌دهد و چون این تابش ناشی از گرمای زمین است، بنابراین به آن انرژی مادون‌قرمز حرارتی می‌گویند. این انرژی قابل عکس‌برداری نیست، اما سنجنده‌های حرارتی مانند رادیومترها و اسکنرها نسبت به آن حساس هستند. سنجش از دور حرارتی شاخه‌ای از سنجش از دور محسوب می‌شود که در مورد پردازش و تفسیر داده‌های به‌دست آمده در ناحیه‌ی مادون‌قرمز حرارتی^(۳) طیف الکترومغناطیسی بحث می‌کند. تمامی مواد در درجه‌حرارت بالاتر از صفر مطلق امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند. میزان انرژی ساطع‌شده از هر ماده، تابعی از دمای سطحی ماده است. این ویژگی توسط قانون استفان-بولتزمن بیان شده است که عبارت است از (علوی‌پناه، ۱۳۸۵):

$$W = \delta T^4 \quad (1)$$

W کل تابش ساطع‌شده از سطح ماده بر حسب Wm^{-2} .

δ ثابت استفان-بولتزمن که برابر با $5/6697 \times 10^{-8} \text{K}^{-4} \text{Wm}^{-2}$ است.

T دمای مطلق ماده‌ی ساطع‌کننده بر حسب درجه‌ی کلونین ($^{\circ}\text{K}$).

معادله‌ی بالا، برای شرایطی صادق است که ماده به‌عنوان جسم سیاه (جسمی فرضی است که تمام انرژی تابیده شده به آن را جذب و کل آن را ساطع می‌نماید) رفتار کند. طول موجی که در آن تشعشعات جسم سیاه به حداکثر می‌رسد، مرتبط با درجه حرارت آن جسم است که توسط قانون جابه‌جایی وین محاسبه می‌شود (علوی‌پناه، ۱۳۸۵):

روش و فرایند دستیابی به دمای سطح زمین

تهیه‌ی نقشه‌ی دمای سطح زمین، نکته‌ی کلیدی در دستیابی به ناهنجاری‌های زمین‌گرایی می‌باشد. این فرآیند شامل سه مرحله‌ی اساسی است که در نمودار گردش‌ی شکل (۲)، نشان داده شده است: ۱. محاسبه‌ی توان تشعشعی^(۴)، ۲. محاسبه‌ی تابش طیفی باند حرارتی و اعمال تصحیح اتمسفری و ۳. محاسبه‌ی دمای سطح زمین.

محاسبه‌ی توان تشعشعی

محاسبه‌ی توان تشعشعی مرحله‌ی مهمی در تهیه‌ی نقشه‌ی دمای سطح زمین است. بدین منظور، از روش آستانه‌گذاری شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)^(۵) استفاده شده است (Sobrino et al., 2004). ابتدا NDVI بر اساس معادله‌ی (۵) محاسبه شد (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (5)$$

ρ_4 بازتابندگی اندازه‌گیری شده در باند مادون قرمز نزدیک.

ρ_3 بازتابندگی اندازه‌گیری شده در باند قرمز.

برای دستیابی به بازتابندگی بالای اتمسفر (TOA)^(۶) برای باندهای ۳ (قرمز) و ۴ (مادون قرمز نزدیک)، کالیبراسیون رادیومتریک گامی ضروری است. کالیبراسیون رادیومتریک تبدیل DN یا ارزش رقومی باند مورد نظر به تابش طیفی می‌باشد. معادله‌ی ۶ جهت محاسبه‌ی تابش طیفی باندهای ۳ و ۴ استفاده شد (Chander et al., 2009):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min} \quad (6)$$

L_{λ} تابش طیفی باند مورد نظر ($Wm^{-2} Sr^{-1} \mu m^{-1}$).

L_{min} تابش طیفی حداقل ($Wm^{-2} Sr^{-1} \mu m^{-1}$).

L_{max} تابش طیفی حداکثر ($Wm^{-2} Sr^{-1} \mu m^{-1}$).

Q_{cal} ارزش پیکسل یا DN

Q_{calmax} حداکثر ارزش پیکسل

Q_{calmin} حداقل ارزش پیکسل

مقادیر L_{max} و L_{min} از متادیتای تصویر استخراج شد. در نهایت برای دستیابی به بازتابندگی بالای اتمسفر معادله‌ی ۷ اعمال شد (Chander et al., 2009):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s} \quad (7)$$

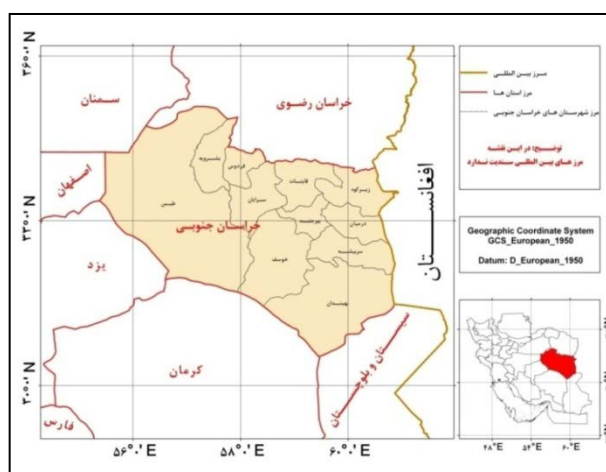
ρ_{λ} بازتابندگی بالای اتمسفر برای باند مورد نظر

است که در جریان‌های بالاروی مواد حرارتی زیر زمین مانند آب گرم، گازهای گرم‌شده و حتی موج بالاروی ماگما در امتداد شکاف‌های سنگ، موجود می‌باشد. در نتیجه، گرمای درونی از طریق هدایت و همرفت حرارتی به سطح زمین انتقال می‌یابد که در طول فرایند تغییرات شار گرمای خاک، توازن انرژی سطح زمین را شکسته و ناهنجاری‌های زمین‌گرایی را سبب می‌شود. بنابراین، منبع گرمای زیرزمین و مسیرهای حرارتی در دسترس، دو عامل مهم جهت تعیین مناطق زمین‌گرایی هستند (Qin et al., 2011).

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

استان خراسان جنوبی با الحاق شهرستان طبس وسعتی معادل ۱۵۰۸۴۹ کیلومترمربع دارد که در عرض جغرافیایی $30^{\circ} 30' N$ تا $34^{\circ} 53' N$ و طول جغرافیایی $55^{\circ} 20' E$ تا $57^{\circ} 57' E$ واقع شده است شکل (۱).



شکل (۱): موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

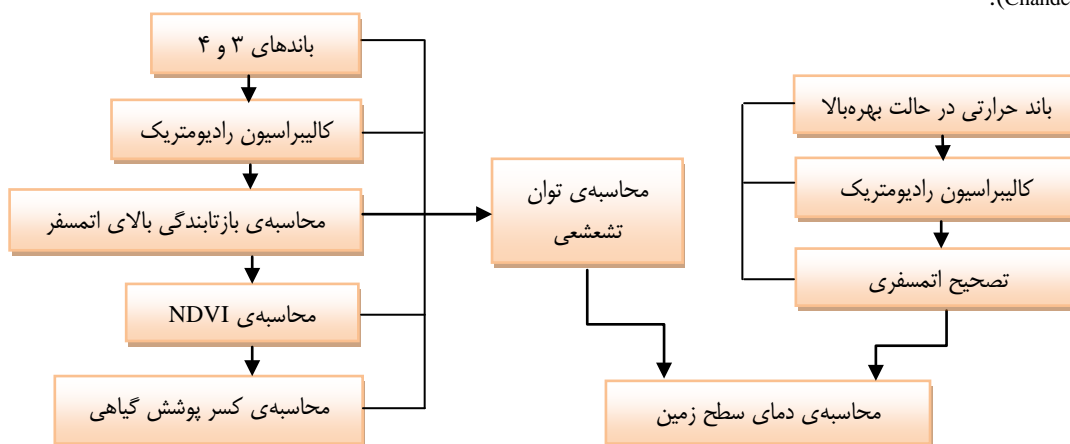
تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این پژوهش، برای دستیابی به ناهنجاری‌های حرارتی مرتبط با منابع زمین‌گرایی، از دو سری تصاویر ماهواره‌ای پوشش‌دهنده‌ی استان (۱۶ تصویر)، لندست ۷ سنجنده‌ی ETM+ به دلیل قدرت تفکیک مکانی مناسب باند حرارتی (۶۰×۶۰ متر) و بدون پوشش ابر استفاده شده است. همچنین، از نرم‌افزار ENVI 4.7 به عنوان نرم‌افزار اصلی پردازش تصاویر و از نرم‌افزار ArcGIS 9.3 برای تهیه‌ی نقشه‌های خروجی استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات تصاویر مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات تصاویر ماهواره لندست ۷، سنجنده‌ی ETM+ مورد استفاده در تحقیق

تاریخ برداشت		باند‌های مورد استفاده	(ردیف/گذر)
۲۰۰۱-۶-۲۵	۲۰۰۲-۷-۱۴	۳L ⁽⁴⁾ -۴L-۶H ⁽⁵⁾	۱۵۸/۳۷
۲۰۰۱-۶-۲۵	۲۰۰۲-۷-۱۴	۳L-۴L-۶H	۱۵۸/۳۸
۲۰۰۱-۵-۸	۲۰۰۲-۷-۱۴	۳L-۴L-۶H	۱۵۸/۳۹
۲۰۰۱-۵-۱۵	۲۰۰۲-۸-۶	۳L-۴L-۶H	۱۵۹/۳۶
۲۰۰۱-۵-۱۵	۲۰۰۲-۸-۶	۳L-۴L-۶H	۱۵۹/۳۷
۲۰۰۰-۹-۱۷	۲۰۰۲-۸-۶	۳L-۴L-۶H	۱۵۹/۳۸
۲۰۰۰-۹-۸	۲۰۰۲-۷-۱۲	۳L-۴L-۶H	۱۶۰/۳۶
۲۰۰۰-۹-۸	۲۰۰۲-۷-۱۲	۳L-۴L-۶H	۱۶۰/۳۷
۲۰۰۰-۸-۷	۲۰۰۲-۷-۱۲	۳L-۴L-۶H	۱۶۰/۳۸

تصاویر ETM+ در دو حالت Highgain (بهره‌بالا) و Lowgain (بهره‌پایین) برداشت شده‌اند. هدف این دو برداشت، به حداکثر رساندن قدرت تفکیک رادیومتریک ۸ بیتی سنجنده‌ها است. برای همه‌ی باندها محدوده‌ی پویایی در حالت Low gain یک‌نیم برابر حالت High gain است. بنابراین حالت Low gain برای سطوح تصویر با روشنایی بالا (محدوده‌ی پویایی بالاتر اما حساسیت کمتر) و حالت High gain برای سطوح تصویر با روشنایی پایین (محدوده‌ی پویایی کمتر اما حساسیت بالاتر) استفاده شده است (Chander et al., 2009).



شکل (۲): نمودار گردش فرآیند دستیابی به دمای سطح زمین

اگر $NDVI < 0.2$ باشد، در این مورد پیکسل به‌عنوان خاک لخت در نظر گرفته می‌شود و توان تشعشعی میانگین، 0.97 می‌باشد.

اگر $NDVI > 0.5$ باشد، در این مورد پیکسل‌ها با پوشش گیاهی کامل در نظر گرفته می‌شوند و توان تشعشعی برابر با ارزش ثابت 0.99 است.

اگر $0.2 < NDVI < 0.5$ باشد، در این مورد پیکسل مخلوطی از خاک لخت و پوشش گیاهی است و توان تشعشعی بر اساس معادله‌ی (۸) محاسبه شد:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon \quad (8)$$

ε_v توان تشعشعی پوشش گیاهی برابر با 0.99

π برابر با 3.14159

L_{λ} تابش طیفی باند مورد نظر حاصل از مرحله‌ی قبل $(Wm^{-2} Sr^{-1} \mu m^{-1})$

d فاصله‌ی خورشید تا زمین (واحد‌های نجومی)

$ESUN_{\lambda}$ روشنایی لایه‌های بالای جو $(Wm^{-2} \mu m^{-1})$

θ تابش خورشیدی نسبت به زاویه‌ی تابش قائم (درجه)

کسینوس زاویه‌ی تابش خورشیدی نسبت به زاویه‌ی تابش قائم برابر است با سینوس زاویه‌ی ارتفاع خورشید که از متادیتای تصویر استخراج می‌شود (Chander et al., 2009). مقادیر $ESUN_{\lambda}$ و d نیز از (Chander et al., 2009) استخراج شد.

پس از محاسبه‌ی NDVI، توان تشعشعی مطابق (Sobrino et

al., 2004) مورد محاسبه قرار گرفت:

$$T = \left[\frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_T + 1} \right)} \right] - 273 \quad (12)$$

T دمای سطح زمین به درجه‌ی سانتی‌گراد.

K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون باند حرارتی هستند که برای سنجنده‌ی ETM+ به ترتیب برابر با $1 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ و $666/0.93$ و $1282/710.8 \text{ K}$ می‌باشند.

L_T تابش طیفی باند حرارتی حاصل از تصحیح اتمسفری.

در نهایت، پس از پردازش دو سری تصاویر ماهواره‌ای و تهیه‌ی نقشه‌ی دمای سطح زمین، با توجه به این‌که هر تصویر متناسب با ماه برداشت و منطقه‌ی تحت پوشش، از یک میانگین دمای زمینه برخوردار می‌باشد (میانگین دما در تصویر، پس از محاسبه‌ی دمای سطح زمین توسط خود نرم‌افزار محاسبه می‌شود)، با کسر این میانگین دمای زمینه از تصویر مربوطه، ناهنجاری‌های حرارتی مثبت در منطقه‌ی مورد مطالعه در دو تاریخ برداشت متفاوت در هر گذر مشخص شد (شکل‌های ۳ تا ۸). این امر، به‌منظور بررسی صحت وجود یک ناهنجاری حرارتی به‌عنوان ناهنجاری زمین‌گرایی انجام شد.

یافته‌ها

نکته‌ی قابل توجه در تفسیر ناهنجاری‌های دمای سطح زمین، توجه به کاربری اراضی و سایر شواهد وجود منابع زمین‌گرایی در سطح منطقه است. پس از بررسی دقیق ناهنجاری‌های دمای سطح زمین در دو برداشت متفاوت و ارتباط آن با محیط اطراف و سایر شواهد حضور منابع زمین‌گرایی، مناطق زیر به‌عنوان مناطق مستعد و دارای پتانسیل انرژی زمین‌گرایی معرفی می‌شوند: در شمال شهرستان فردوس و در حوالی چشمه‌ی آب گرم معدنی این شهرستان، یک ناهنجاری حرارتی با دمایی بین ۲ تا ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود (شکل ۳). وجود گسل فردوس، و چندین کانون زمین‌لرزه در اطراف این ناهنجاری که بزرگترین آن ۶/۴ ریشتر (سال ۱۳۴۷) می‌باشد، مؤید وجود یک منبع زمین‌گرایی در این منطقه خواهد بود. دمای آب این چشمه به ۴۵/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌رسد که گدازه‌های آتشفشانی عامل افزایش دمای آب این چشمه می‌باشد. به‌علاوه وجود ماگماتیسم جوان نیز استعداد وجود منابع زمین‌گرایی را در این منطقه افزایش داده است.

در جنوب روستای نایبند و در امتداد گسل نایبند، در فاصله‌ای کم‌تر از ۳ کیلومتری چشمه‌های آب گرم دیگر رستم که از

ϵ_s توان تشعشی خاک برابر با ۰/۹۷

P_v کسر پوشش گیاهی است که مطابق معادله‌ی ۹ محاسبه شد (Carlson & Ripley, 1997; Sobrino et al., 2004):

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (9)$$

$NDVI_{min}$ برابر با ۰/۲ و $NDVI_{max}$ برابر با ۰/۵ است.

$$d\epsilon = (1 - \epsilon_s)(1 - P_v)F\epsilon_v \quad (10)$$

F یک ضریب شکلی است که مقدار میانگین آن با فرض توزیعات هندسی متفاوت سطوح ۰/۵۵ می‌باشد (Sobrino et al., 2004). به‌علاوه توان تشعشی حاصل از باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک (۳۰ متر)، از نظر قدرت تفکیک مکانی با باند حرارتی (۶۰ متر) برای محاسبات بعدی دمای سطح زمین یکسان شد (Qin et al., 2011).

محاسبه‌ی تابش طیفی باند حرارتی و انجام تصحیح اتمسفری

تابش طیفی باند حرارتی نیز در حالت بهره‌بالاتر محاسبه شد. برای مطالعات دمای مطلق، حذف اثرات اتمسفر برای استفاده از تصاویر باند حرارتی مرحله‌ای ضروری می‌باشد که با استفاده از معادله‌ی ۱۱ مورد محاسبه قرار گرفت (Barsi et al., 2005):

$$L_T = \frac{L_\lambda - L_\mu - \tau(1 - \epsilon)L_d}{\tau\epsilon} \quad (11)$$

L_T مقادیر ارزشی حاصل از تصحیح اتمسفری به صورت تابش طیفی

L_λ تابش طیفی باند حرارتی

L_μ و L_d به‌ترتیب مقادیر تابش در اتمسفر^(۷) و تابش در فضای خارج جو^(۸)

τ قابلیت انتقال اتمسفر

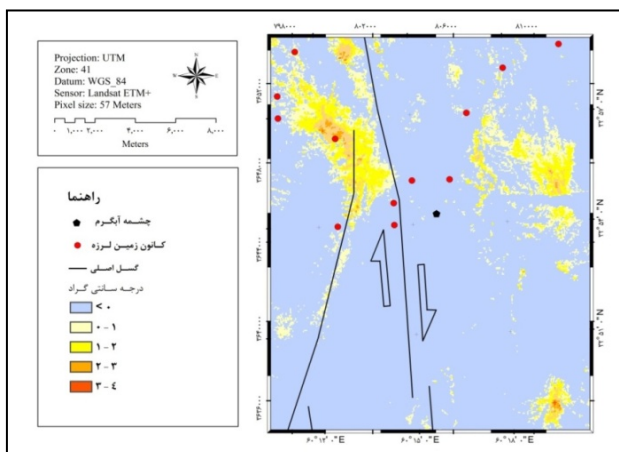
ϵ توان تشعشی

پارامترهای L_λ ، L_μ و L_d با استفاده از نرم‌افزار MODTRAN که توسط (Barsi et al., 2005) طراحی شده است محاسبه شد (Barsi et al., 2005; Yuan & Bauer, 2007).

نرم‌افزار فوق به‌صورت برخط در دسترس می‌باشد (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>).

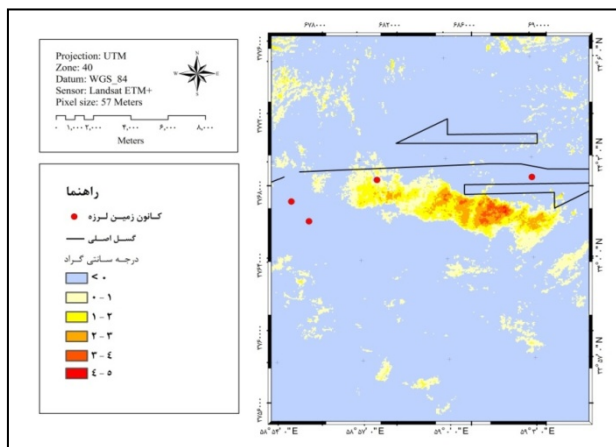
محاسبه‌ی دمای سطح زمین

با استفاده از معادله‌ی (۱۲) دمای سطح زمین محاسبه شد (Sumintadireja et al., 2011):



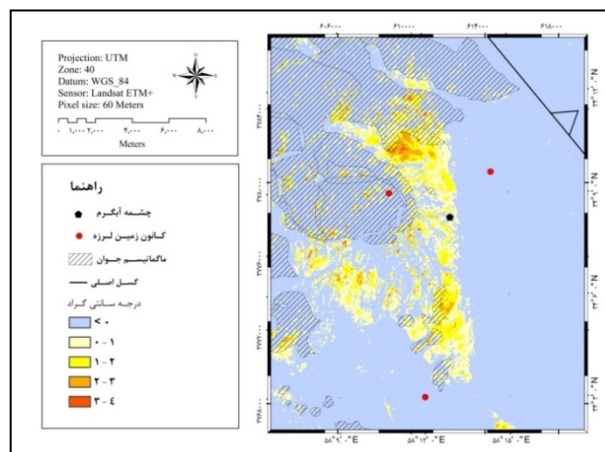
شکل (۵): منطقه‌ی زمین‌گرمایی مستعد در جنوب روستای گزیک

پس از پردازش دو سری تصاویر ماهواره‌ای، در ۱۸ کیلومتری خضری دشت‌بیاض و در فاصله‌ای کمتر از ۳ کیلومتری گسل دشت‌بیاض که مسبب زمین‌لرزه‌ی تاریخی ۷/۴ ریشتری سال ۱۳۴۷ در آن منطقه بوده است، یک ناهنجاری حرارتی با دمایی بین ۲ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود که نشان از وجود یک منبع زمین‌گرمایی در عمق است (شکل ۶).



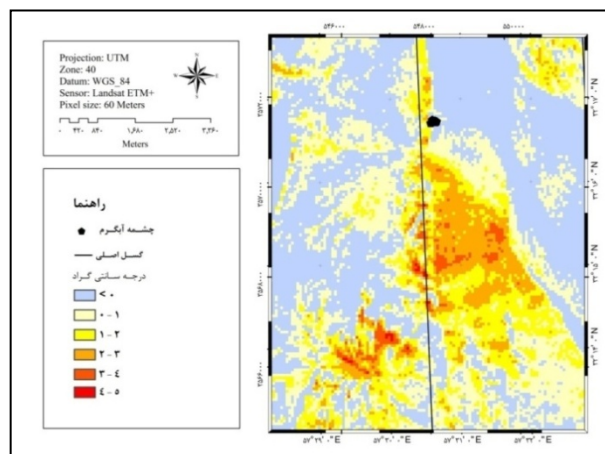
شکل (۶): منطقه‌ی زمین‌گرمایی مستعد در ۱۸ کیلومتری خضری دشت‌بیاض

در مجموعه‌ی گسلی نه‌بندان، در فواصل مختلف از گسل خاور «نه» در جنوب‌شرقی نه‌بندان، چندین ناهنجاری حرارتی با دمایی بین ۴ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود (شکل ۷). علاوه بر وجود این گسل، پراکنش سنگ‌های آتشفشانی جوان در اطراف این ناهنجاری‌ها که از عمده‌ترین منابع تامین‌کننده‌ی حرارت مخازن زمین‌گرمایی هستند می‌تواند دال بر وجود یک مخزن زمین‌گرمایی در این منطقه باشد.



شکل (۳): منطقه‌ی زمین‌گرمایی مستعد در شمال شهرستان فردوس

دمایی بین ۶۵ تا ۷۵ درجه‌ی سانتی‌گراد برخوردارند، ناهنجاری‌های حرارتی با دمایی بین ۲ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود (شکل ۴). همچنین، وجود چشمه‌ی آب گرم زردگاه با دمایی حدود ۳۶/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در ۱ کیلومتری شمال‌غرب نایبند مؤید پتانسیل بالای انرژی زمین‌گرمایی در این منطقه است.

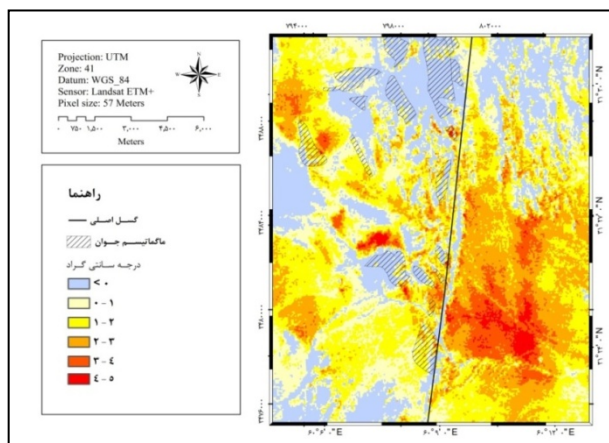


شکل (۴): منطقه‌ی زمین‌گرمایی مستعد در جنوب روستای نایبند

آب گرم گزیک در روستای آب گرم بخش گزیک شهرستان درمیان واقع شده است. در اطراف این آب گرم به فواصل مختلف چندین ناهنجاری حرارتی با دمایی بین ۲ تا ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود که وجود دو گسل آب گرم و طبس مسینا و چندین کانون زمین‌لرزه در مسیر این ناهنجاری‌ها می‌تواند تأییدی بر حضور منابع زمین‌گرمایی در این منطقه باشد (شکل ۵).

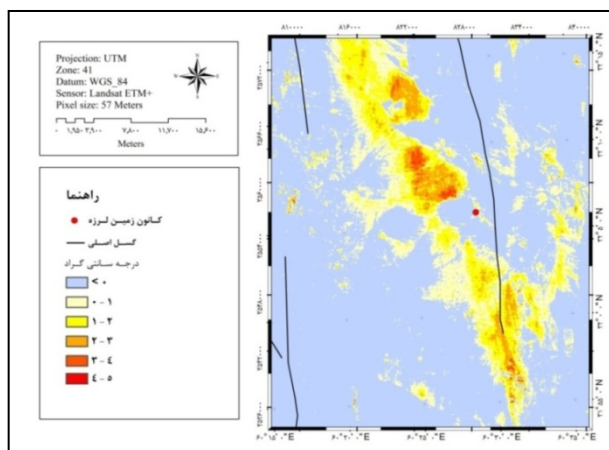
افزایش آلودگی‌های محیط‌زیست، سیاست‌گذاران بخش انرژی کشور را بر آن داشته تا هر چه بیش‌تر بر ضرورت به‌کارگیری انرژی‌های نو و سازگار با محیط‌زیست تاکید ورزند. پژوهش حاضر نیز با هدف شناسایی پتانسیل‌های انرژی پاک زمین‌گرمایی با استفاده از روش سنجش از دور حرارتی در استان خراسان جنوبی انجام گرفت که منجر به شناسایی شش منطقه‌ی مستعد زمین‌گرمایی شد. این مناطق که از دمایی بین ۲ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین برخوردار هستند عبارت از: شمال شهرستان فردوس، جنوب روستای نایبند، جنوب روستای گزیک، ۱۸ کیلومتری خضری دشت بیاض، جنوب نهبندان و جنوب غربی درح می‌باشند. هم‌چنین، نتایج نشان داد، توزیع مکانی مناطق مستعد زمین‌گرمایی معرفی شده که دارای ناهنجاری حرارتی مثبت نسبت به اطراف خود هستند در ارتباط بسیار نزدیک با سایر شواهد حضور منابع زمین‌گرمایی به‌ویژه چشمه‌های آب گرم و گسل‌ها می‌باشد. این امر، نشان‌دهنده‌ی نقش بارز گسل‌ها به عنوان یک مسیر حرارتی برای انتقال گرما از بخش‌های داخلی به سطح زمین و چشمه‌های آب گرم به‌عنوان مهم‌ترین جلوه‌های سطحی وجود این انرژی است.

پیش از این، تنها (نورعلی‌بی و لاری، ۱۳۸۱) از سازمان انرژی‌های نو، مستعدترین محدوده از حیث انرژی زمین‌گرمایی را در حوالی روستای نایبند و شهرستان‌های فردوس و بیرجند در استان خراسان بزرگ شناسایی نمودند. در شمال فردوس درون سنگ‌های آتشفشانی دوران سوم آثار دگرسانی به چشم می‌خورد که حضور چشمه‌ی آب گرم احتمال وجود انرژی زمین‌گرمایی را در این منطقه افزایش می‌دهد. هم‌چنین، محدوده‌ی به نسبت کوچکی با ناهنجاری مغناطیسی منفی در این منطقه مشاهده می‌شود که توسط سنگ‌های دارای شدت مغناطیسی بالا احاطه شده است؛ در یک محیط آتشفشانی معمول، چرخش سیالات گرمایی سبب تغییراتی در سنگ شده که این تغییرات، کاهش مغناطیس‌پذیری سنگ را به‌دنبال دارد. این کاهش که نتیجه‌ی نابودی محتوای مگنتیت موجود در سنگ است، به طور معمول به‌وسیله‌ی سیالاتی با دمای بالا به‌وجود می‌آیند که ممکن است در ارتباط با یک مخزن زمین‌گرمایی و ساختارهایی مثل گسل‌ها باشند که به سیال اجازه‌ی چرخش می‌دهند (Huenges, 2010). در جنوب روستای گزیک واقع در شرق بیرجند، توده‌ی وسیعی از نواحی دگرسان‌شده در سنگ‌های افیولیتی و توده‌های دگرگون‌شده وجود دارد. درجه‌ی دگرسانی در این نواحی شدید



شکل (۷): منطقه‌ی زمین‌گرمایی مستعد در جنوب نهبندان

در جنوب غربی درح، بین دو گسل درح و چاه پنجسر و منتهی‌الیه گسل درح ناهنجاری‌های حرارتی با دمایی بین ۲ تا ۵ درجه‌ی سانتی‌گراد بالاتر از میانگین دیده می‌شود (شکل (۸)). علاوه بر این دو گسل، چند کانون زمین‌لرزه در اطراف این ناهنجاری نیز دیده می‌شود. هم‌چنین، در اطراف این ناهنجاری سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی نیز پراکنش دارند. اما، انجام بررسی‌ها و اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر ژئوفیزیکی برای تایید وجود یک مخزن زمین‌گرمایی در عمق ضروری به‌نظر می‌رسد.



شکل (۸): منطقه‌ی زمین‌گرمایی احتمالی در جنوب غربی درح

بحث و نتیجه‌گیری

دستیابی به توسعه‌ی پایدار محیط‌زیستی به‌ویژه در بخش انرژی کشور، موضوعی است که امروزه بیش‌ازپیش مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان محیط‌زیست قرار گرفته است. افزایش روزافزون جمعیت و به‌دنبال آن افزایش تقاضا برای انرژی، از طرفی کاهش منابع فسیلی و مهم‌تر از همه مساله‌ی نگران‌کننده‌ی

مگنتوتلوریک به کار گرفته شده در مجاورت آتشفشان سبلان در استان اردبیل (Fanaee Kheirabad & Oskooi, 2011)، فراهم می‌آورد؛ زیرا، در اکثر موارد پیمایش‌های زمینی هزینه‌بر بوده و برای تمام نقاط به‌علت دسترسی دشوار و زمان‌بر بودن امکان‌پذیر نمی‌باشد. از این‌رو، باید با به‌کارگیری این روش نقاط امیدبخش زمین‌گرمایی را دقیق‌تر شناسایی و سپس میان آن‌ها با سایر شواهد زمین‌شناسی و ژئوشیمی ارتباطی منطقی برقرار نمود تا سایر مناطق مستعد این انرژی از نظر دور نماند. استان خراسان جنوبی به دلیل قرارگیری در موقعیت خاص زمین‌شناسی و جغرافیایی، از پتانسیل بالایی جهت بهره‌برداری صنعتی و استفاده‌های مستقیم از انرژی زمین‌گرمایی برخوردار می‌باشد. در این میان، نقش مهم مدیران و برنامه‌ریزان محیط‌زیست ایجاب می‌کند تا با برنامه‌ریزی زمینه‌ی به‌کارگیری این انرژی پاک و سازگار با محیط‌زیست را در کشور فراهم آورند تا در آینده‌ای نزدیک راه رسیدن به توسعه‌ی پایدار و تولید ثروت ملی هموار شود.

یادداشت‌ها

1. Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflectance Radiometer
2. Enhanced Thematic Mapper Plus
3. Thermal Infrared
4. Emissivity
5. Normalized Difference Vegetation Index
6. Top of Atmosphere reflectance
7. Upwelling
8. Downwelling

بوده و به دلیل وجود چشمه‌ی آب گرم گزیک از نقطه نظر منابع زمین‌گرمایی حائز اهمیت است. هم‌چنین، در جنوب شرقی بیرجند یک ناهنجاری مغناطیسی منفی با روندی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی وجود داشته که در مجاورت چشمه‌های گندگان، سربیشه و گزیک می‌باشد که همگی در مجاورت توده‌های آتشفشانی کواترنر واقع شده‌اند و به احتمال زیاد، حرارت خود را از این توده‌ها دریافت می‌کنند. در جنوب روستای نایبند نیز درون سنگ‌های رسوبی (شیلی) تریاس، آثار دگرسانی به چشم می‌خورد. در این محدوده، تعداد پنج چشمه‌ی آب گرم با درجه حرارت‌های بیش از ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد وجود دارد که وجود آن‌ها اهمیت این ناحیه را بسیار افزایش داده است. هم‌چنین، در این منطقه محدوده‌ی بسیار وسیعی از ناهنجاری مغناطیسی منفی وجود دارد (نورعلی‌ئی و لاری، ۱۳۸۱).

پژوهش حاضر، ضمن تایید مناطق معرفی شده از سوی سازمان انرژی‌های نو به‌عنوان پتانسیل‌های زمین‌گرمایی، موقعیت مناطق دارای ناهنجاری حرارتی مثبت را در این نواحی با استفاده از روش سنجش از دور حرارتی شناسایی کرده و سه منطقه‌ی مستعد دیگر را نیز با این روش معرفی نموده است. بنابراین، می‌توان گفت تهیه‌ی نقشه‌ی ناهنجاری‌های دمای سطح زمین، شیوه‌ای نوین و یک ابزار مقرون‌به‌صرفه برای یافتن مناطق مستعد زمین‌گرمایی در بررسی‌های بزرگ مقیاس می‌باشد که در کوتاه‌ترین زمان زمینه را برای بررسی‌های اکتشافی تکمیلی ژئوفیزیک و روش‌هایی که کاربرد آن‌ها در تشخیص تباين مقاومت ویژه در مناطق زمین‌گرمایی به اثبات رسیده است، مانند روش

فهرست منابع

- سازمان انرژی‌های نو، نشریه‌ی پیام سانا. ۱۳۹۰. سال پنجم، (۲۵): ۱۲ ص.
- علوی‌پناه، س. ک. ۱۳۸۵. کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- علوی‌پناه، س. ک. ۱۳۸۳. کاربرد سنجش حرارتی از دور در مطالعات محیط‌زیست، مجله محیط‌شناسی، (۳۴): ۲۹ - ۳۸.
- نظری‌پور، ح.؛ فتوحی، ص. و پودینه، م. ر. ۱۳۸۹. ضرورت تجدیدنظر در منابع انرژی و جایگزینی انرژی‌های نو (انرژی زمین‌گرمایی)، چهارمین کنگره‌ی بین‌المللی جغرافیادانان جهان اسلام، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- نورعلی‌ئی، ج. و لاری، ح. ر. ۱۳۸۱. اکتشاف اولیه‌ی انرژی زمین‌گرمایی در استان خراسان، هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو.

Barsi, J. A.; Schott, J. R.; Palluconi, F. D. & Hook, S. J. 2005. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. Proceedings, SPIE, vol. 5882. (SPIE, Bellingham, WA. 2005), Proc of. SPIE 58820E-1. 7 pp.

Carlson, T. N. & Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 62: 241-252.

- Chander, G.; Markham, B. L. & Denis, L. H. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment* 113: 893–903.
- Coolbaugh, M.F.; Kratt, C.; Fallacaro, A.; Calvin, W.M. & Taranik, J.V. 2007. Detection of geothermal anomalies using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) thermal infrared images at Brady's Hot Springs, Nevada, USA. *Remote Sensing of Environment*, 106: 350–359.
- Fanaee Kheirabad, Gh. A. & Oskooi, B. 2011. Magnetotelluric interpretation of the Sabalan geothermal field in the northwest of Iran, *Journal of the Earth & Space Physics*. 37 (3): 1-11.
- Guo, W. & Sun, S. 2002. Preliminary study on the effects of soil thermal anomaly on land surface energy budget, *Acta Meteorologica Sinica*, 60 (6): 706–714 (in Chinese with English abstract).
- Haselwimmer, Ch. & Prakash, A., 2012. *Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems* (Chapter 7).
- Huenges, E. 2010. *Geothermal Energy Systems*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Kienholz, C.; Prakash, A. & Kolker, A. 2009. Geothermal Exploration in Akutan, Alaska, Using Multitemporal Thermal Infrared Images, American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, abstract H53F-1009
- Li, G. 1992. Characteristics of the Qaidam Basin heat flow and analysis on its crustal thermal structure. Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Monteith, J.L. 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, United Kingdom.
- Ou, X.; Jin, Z.; Wang, L.; Xu, H. & Jin, S. 2004. Thermal conductivity and its anisotropy of rocks from the depth of 100–2000 m mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling: revelations to the study on thermal structure of subduction zone. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (1): 109–118 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Q.; Zhang, N.; Nan, P. & 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*, 13: 552–559.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. & Deering, D.W. 1973. "Monitoring Vegetation Systems in the Great plains with ERTS." Third ERTS Symposium, NASA SP-351, pp. 309-317.
- Rudnick, R.L.; McDonough, W.F. & O'Connell, R.J. 1998. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*, 145 (3–4): 395–411.
- Siahaan, M.N.; Soebandrio, A. & Wikantika, K. 2011. Geothermal potential exploration using remote sensing technique (case study: Patuha area, west Java), Proceeding of 10th annual Asian conference and exhibition on "Geospatial Information Technology and Application", Jakarta, Indonesia, Asia Geospatial Forum.
- Sobrino, J. A.; Jimenez-Munoz, J. C. & Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5, *Remote Sensing of Environment*, 90: 434–440.
- Sumintadireja, P.; Saepuloh, A.; Irawan, D. & Junursyah, L. 2011. Temporal analysis of visible-thermal infrared band and magnetotelluric method to simulate a geothermal sitting at MT. Ciremal, west Java, Indonesia, Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-191.
- Wu, W.; Zou, L.; Shen, X.; Lu, Sh.; Kong, F. & 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*, 43: 110-117.
- Xiong, L.; Hu, S. & Wang, J. 1994. Analysis on the thermal conductivity of rocks from SE China. *Acta Petrologica Sinica*. 10 (3): 323–329 (in Chinese with English abstract).
- Yamaguchi, Y.; Hase, H. & Ogawa, K. 1992. Remote sensing for geothermal applications. *Episodes*. 15 (1): 62-67.
- Yuan, F. & Bauer, M. E. 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 106: 375–38.
- Zang, S.; Liu, Y. & Ning, J. 2002. Thermal structure of the lithosphere in north China, *Chinese Journal of Geophysics*, 45 (1): 56–67 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. 1999. Some thinking on quantitative thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1: 1–6 (in Chinese with English abstract) <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>.