

# آشکار سازی آنومالی های حرارتی سطح زمین بر مبنای نرمال سازی باندهای حرارتی تصاویر ماهواره ای

مجید کیاورز مقدم

استادیار گروه سنجش از دور و سیستم های اطلاعات مکانی - دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران  
kiavarzmajid@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۵، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۵)

## چکیده

سنجش از دور حرارتی با پوشش وسیع از سطح زمین، به عنوان ابزاری اقتصادی در جستجوی منابع زمین گرمایی جدید و پایش این منابع مطرح می باشد. با استفاده از سنجش از دور حرارتی، می توان به تهیه نقشه و کمی سازی حرارتی مظاهر حرارتی سطحی مثل چشمه های آب گرم، گاز فشان ها و نقاط آتش فشانی که نشانه ای بر وجود منابع زمین گرمایی می باشند، پرداخت. بدین منظور، بایستی حرارت سطح زمین را توسط باند حرارتی تصاویر ماهواره ای محاسبه کرد. حرارت سطحی محاسبه شده تحت تاثیر عواملی مثل خورشید، ضریب افت محیط و تبخیر و تعرق و به علاوه منابع زمین گرمایی می باشد. هدف از این مطالعه، ارائه مدل حرارتی غیر از منابع زمین گرمایی و کاهش اثر آنها از تصویر حرارتی ماهواره ای لندست در سطح زمین می باشد. مدل ارائه شده یک مدل خطی می باشد که ضرایب مدل مذکور با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات محاسبه می شود. تصویر آنومالی حرارتی حاصل از مدل ارائه شده با نقشه ی مظاهر حرارتی سطحی موجود در منطقه مقایسه شدند و ۶۲٪ عوارض حرارتی بر هم منطبق می باشند.

**واژگان کلیدی:** سنجش از دور حرارتی، آنومالی حرارتی، زمین گرمایی

## ۱- مقدمه

منابع زمین گرمایی از جمله منابع انرژی‌های نو می‌باشند که از حبس آب یا گاز داغ در زیر زمین تشکیل می‌شوند و معمولاً در نواحی با جریان حرارتی<sup>۱</sup> بالا بوجود می‌آیند، به طوری که چنین جریان حرارتی‌ای ممکن است به وجود سنگ‌های آذرین جوان<sup>۲</sup> یا سنگ‌های داغ در محل مربوط باشد [۱، ۲]. وجود گسل و شکستگی‌ها که نشان دهنده‌ی میزان نفوذپذیری یک منطقه می‌باشد باعث چرخش آب در این نوع از منابع می‌شوند تا دما به صورت همرفتی به سطح زمین انتقال پیدا کند [۳، ۴] و باعث ایجاد مظاهر سطحی حرارتی مثل چشمه‌های آب گرم، آیفشان‌ها و گازفشان‌ها در سطح زمین می‌شوند [۵]. شناسایی مظاهر حرارتی سطحی به عنوان نشانه‌های سطحی بر وجود منابع زمین گرمایی در شناسایی منابع جدید و پایش آنها در طول بهره برداری بسیار مهم می‌باشد [۵، ۶]. سنجش از دور به دلیل توانایی پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به عنوان ابزاری مفید و مقرون به صرفه در جستجوی منابع زمین گرمایی شناخته شده است [۷]. در مطالعات مربوط به جستجوی منابع زمین گرمایی از سنجش از دور به منظور شناسایی آنومالی حرارتی، گسل و شکستگی‌ها، نقاط آتشفشانی و نواحی دگرسانی استفاده می‌شود [۸]. هدف از این تحقیق شناسایی مظاهر حرارتی سطحی مربوط به منابع زمین گرمایی مثل چشمه‌های آب گرم، گازفشان و نقاط آتشفشانی می‌باشد. حرارت سطحی<sup>۳</sup> قابل محاسبه از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای تحت تاثیر عواملی مثل خورشید، ضریب افت محیط<sup>۴</sup> و تبخیر و تعرق<sup>۵</sup> می‌باشد [۹]. بنابراین، نرمال سازی تصویر حرارت سطح زمین نسبت عوامل غیر از منابع زمین گرمایی جهت تشخیص منابع زمین گرمایی ضروری است. در حال حاضر این مسئله یکی از چالش‌های تحقیقاتی در شناسایی دقیق مظاهر حرارتی سطحی مربوط به منابع زمین گرمایی می‌باشد [۱۰].

## ۲- مروری بر تحقیقات

هودر در تحقیقی از تصویر حرارتی قبل از طلوع آفتاب برای شناسایی چشمه‌های آب گرم و مناطق با آنومالی

حرارتی در ناحیه‌ای در کالیفرنیا استفاده کرد. در این تحقیق از روش آنالیز چشمی و استفاده از روش حد آستانه در استفاده شد [۱۱]. سیلستاد و همکاران از تصاویر چند طیفی مادون قرمز میانی و مادون قرمز بلند برای شناسایی چشمه‌های آب گرم و آب فشان‌ها در منطقه‌ای در پارک یلواستون استفاده کردند. این تصاویر دارای قدرت تفکیک یک تا سه متر بودند و به صورت روز و شب اخذ شدند. [۱۲].

کینهولز و همکاران از تصاویر لندست در مدت زمان سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۸ در منطقه‌ای در آلاسکا استفاده کردند. پس از محاسبه حرارت از باند حرارتی، آنومالی حرارتی، به شرط انتخاب ده درصد از گرم‌ترین نقاط، انتخاب شد. آنومالی‌های حرارتی که حداقل در سه تصویر به عنوان آنومالی شناخته شده بودند به عنوان آنومالی حرارتی نهایی انتخاب شدند که نشان دهنده چشمه‌های آب گرم و گاز فشان‌های کشف نشده بودند [۱۳]. وستون و همکاران در سال ۲۰۰۸ از تصاویر لندست ۷ در ناحیه پارک ملی یلداستون نواحی شمالی کوه‌های راکی در آمریکا جهت شناسایی نواحی با آنومالی حرارتی استفاده کردند. در این کار ابتدا میزان شار حرارتی خورشید محاسبه می‌شود و سپس به منظور در نظر گرفتن میزان انعکاس و جذب انرژی رسیده در سطوح مختلف میزان آلبيدو از باندهای مرئی با روش لیانگ [۱۴] تخمین زده شد. در این تحقیق، اثرات اتمسفری و خورشید به عنوان تصحیحات باند حرارتی در نظر گرفته شد [۱۵]. کین و همکاران در سال ۲۰۱۱ از تصاویر لندست در منطقه‌ای در چین برای شناسایی آنومالی حرارتی سطحی استفاده کردند. در این تحقیق پس از تصحیحات رادیومتریکی، محاسبه ضریب گسیلمندی و تصحیحات اتمسفری از یک روش تک بانده برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده شد. دمای بالاتر از ۴ تا ۱۰ کلوین نسبت به پس‌زمینه به عنوان آنومالی حرارتی شناخته شد و نشان داده شد که محل این آنومالی‌ها منطبق بر فعالیت گسل‌ها بود [۱۰].

پنگ و همکاران نیز از روش مشابهی در منطقه‌ای در شمال شرقی چین استفاده کردند با این تفاوت که از حد آستانه ۳۵ درجه سانتی‌گراد برای شناسایی آنومالی حرارتی استفاده کردند [۷]. کولبو و همکاران در سال ۲۰۰۷ از تصاویر روز/شب استر که در یک تاریخ گرفته شده بودند، استفاده کردند تا اثر اینرسی حرارتی را کاهش دهند. در

<sup>۱</sup> Heat flow

<sup>۲</sup> Young igneous bodies

<sup>۳</sup> Land Surface Temperature (LST)

<sup>۴</sup> Lapse rate

<sup>۵</sup> Evapotranspiration

شناسایی مظاهر سطحی حرارتی منابع زمین‌گرایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. برای محاسبه تصویر آنومالی حرارتی از طرفی یک تصویر حرارتی مشاهداتی نیاز خواهیم داشت که در واقع همان تصویر حرارتی محاسبه شده از باند حرارتی ماهواره در لحظه‌ی تصویربرداری می‌باشد. از طرف دیگر، یک مدل حرارتی نیز تعریف می‌شود تا به نوعی عوامل تغییر حرارت از پیکسلی به پیکسل دیگر را مدل کند. پس از محاسبه این دو تصویر، حاصل تفریق آنها، تصویر آنومالی حرارتی خواهد بود. به منظور محاسبه تصویر حرارتی مرحله‌ی چون تبدیل عدد پیکسل<sup>۱</sup> به رادیانس، تصحیحات اتمسفری، محاسبه NDVI<sup>۲</sup>، ضریب گسیل‌مندی مورد نیاز می‌باشد. در ادامه چگونگی محاسبه این مراحل توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- روش پیشنهادی محاسبه تصویر آنومالی حرارتی

در ابتدا عدد پیکسل در باند حرارتی تبدیل به رادیانس-سنجنده<sup>۳</sup> می‌شود [۱۸] که در واقع همان رادیانس بالای اتمسفر (LTOA) می‌باشد. سپس از مدل MODTRAN برای محاسبه پارامترهای اتمسفری استفاده می‌شود. در استفاده از باندهای غیر حرارتی، از نرم افزار ATCOR پیاده سازی شده در نرم افزار ERDAS استفاده

این تحقیق، اثرات آلبیدو، شیب و اینرسی حرارتی بر اساس یک مدل انرژی حرارتی ارائه شد. تصویر آنومالی نهایی نشان داد که تا ۵۰٪ از نواحی آنومالی اشتباه از بین رفته و آنومالی‌های حرارتی مربوط به نواحی زمین‌گرایی باقی ماندند [۱۶]. انوا و همکاران نیز در سال ۲۰۰۷ از مدل شرح داده شده توسط کولبو نیز برای شناسایی نواحی آنومالی حرارتی در منطقه‌ای در کالیفرنیا آمریکا استفاده کردند ولی در این کار از اندازه‌گیری‌های زمینی استفاده نکردند و توانستند آنومالی‌های مربوط به نواحی زمین-گرایی را شناسایی کنند [۹]. در حالی که مدل ارائه شده توسط کولبو در شناسایی و بارزسازی آنومالی حرارتی مربوط به نواحی زمین‌گرایی موفق بود اما، این مدل دارای محدودیت‌ها و نقصان‌هایی نیز می‌باشد. در این مدل، فرض بر این است که عامل اصلی خروج حرارت از زمین، خروج انرژی حرارتی از طریق تابش می‌باشد و اثر خروج انرژی از طریق انتقالی توسط اتمسفر و همرفتی از طریق بخار آب ناچیز می‌باشد. این فرض برای مناطق خشکی که خالی از پوشش گیاهی می‌باشند مثل حوزه گریت در غرب آمریکا، کارا می‌باشد، ولی برای مناطقی که دارای رطوبت است و یا دارای پوشش گیاهی است، خروج انرژی حرارتی از طریق تبخیر و تعرق عامل مهمی می‌باشد [۱۶]. انوا و کولبو در سال ۲۰۰۹ در تحقیقی نشان دادند که چگونه ارتفاع و پدیده حرارت معکوس بر روی میزان حرارت محاسبه شده از باندهای حرارتی استر اثر می‌گذارد [۱۷]. گوتیز و همکاران در سال ۲۰۱۲ در تحقیقی در ادامه توسعه مدل شناسایی آنومالی حرارتی در نواحی با تغییرات ارتفاعی زیاد، مدل خطی را برای فاکتور ارتفاع ارائه دادند به طوری که ضریب این فاکتور طوری تعیین می‌شود که حداقل واریانس برای تصویر تصحیح شده باقی بماند و بدین صورت اثر ارتفاعی را در کاهش آنومالی اشتباه لحاظ کردند [۱۸].

### ۳- روش پیشنهادی

بر اساس تحقیقات انجام شده، تصاویر ماهواره‌های لندست و استر به عنوان تصاویر فضایی برای شناسایی مظاهر سطحی منابع زمین‌گرایی استفاده شده‌اند و نتایج قابل قبولی هم در بعضی از نواحی حاصل شده است. در این تحقیق، تصاویر لندست ۷ و سنجنده ETM+ برای

<sup>۱</sup> Digital number  
<sup>۲</sup> Normalized Difference Vegetation Index  
<sup>۳</sup> At-sensor spectral radiance

مدل کم می‌شود. در تصویر حاصل شده، تغییرات حرارتی باقی‌مانده ناشی از وجود منابع زمین‌گرمایی در نزدیک سطح زمین و عوامل موثر مدل نشده و یا عواملی که به صورت کامل در تصویر حرارتی مدل، مدل سازی نشده اند می‌باشند. به عبارت دیگر هرچه عوامل بیشتری در تصویر حرارتی مدل، لحاظ شوند و مدل دقیق‌تر باشد، واریانس تصویر حاصل شده کمتر خواهد بود و در حالت ایده‌آل در صورتی که در منطقه‌ای منابع زیر زمینی گرم کننده یا خنک کننده وجود نداشته باشد و تصویر حرارتی مدل به طور ایده‌آل باشد، تصویر آنومالی نهایی دارای واریانس صفر خواهد بود که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Anomaly image} = T_{\text{Observed}} - T_{\text{Model}} \quad (6)$$

$T_{\text{Observed}}$  در واقع LST محاسبه شده از تصویر ماهواره‌ای بوده  $T_{\text{Model}}$  مدل سازی اثر خورشید، ضریب افت محیط و اثر تبخیر و تعرق می‌باشد که در ادامه نحوه‌ی مدل سازی موارد ذکر شده توضیح داده می‌شود. به منظور مدل سازی اثر خورشید مدل‌های موجود بررسی شد و دو مدل سویچ<sup>۱</sup> و کولبو<sup>۲</sup> موجود می‌باشند که به صورت زیر اثر خورشید در سطح زمین را محاسبه می‌کنند:

**روش سویچ:** در این روش، جهت محاسبه میزان انرژی خورشیدی رسیده به زمین از رابطه Potential annual direction incident solar radiation یا SR استفاده می‌شود [۲۲، ۲۳]:

$$\begin{aligned} SR &= 0.339 + 0.808 (\cos L \cos S) - 0.19 (\sin L \sin S) - 0.482 (\cos A \sin S) \\ A &= |\pi - \text{aspect} - (5\pi/4)| \end{aligned} \quad (7)$$

$L$ : عرض جغرافیایی (رادیان)،  $S$ : شیب (رادیان)،  $A$ : جهت شیب میزان انرژی جذب شده توسط خورشید را با استفاده از قانون کریشهف می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد به طوری که بدین ترتیب اثر آلبیدو را نیز در این مدل لحاظ کرد [۲۲].

$$SR_{\text{model}} = SR (1 - \text{Albedo}) \quad (8)$$

**روش کولبو:** در این روش میزان اثر خورشید در گرم کردن زمین به صورت تجمعی از ساعت طلوع خورشید می‌باشد و به صورت رابطه (۹) قابل محاسبه می‌باشد:

می‌شود اما، پس از محاسبه پارامترهای اتمسفری توسط مدل MODTRAN به منظور تصحیح اتمسفری در باند حرارتی و تبدیل رادیانس بالای اتمسفر به رادیانس روی زمین از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۱۹]:

$$L_{\text{Terrestrial}} = \frac{L_{\text{TOA}} - L_U - \tau(1 - \varepsilon) \times L_D}{\tau \times \varepsilon} \quad (1)$$

$L_{\text{Terrestrial}}$ : رادیانس جسم سیاه در سطح زمین در حرارت  $T$  برحسب کلونین،  $L_U$ : رادیانس طیفی بالا رو به بالا سطح بین سطح و سنجنده ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )،  $L_D$ : رادیانس طیفی رو به پایین از آسمان ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ )،  $\tau$ : ضریب شفافیت اتمسفر،  $\varepsilon$ : ضریب گسیلمندی

به منظور محاسبه‌ی حرارت از رابطه پلانک برای تصاویر ماهواره‌ی لندست با فرض انجام تصحیحات اتمسفری به صورت زیر استفاده می‌شود [۲۰]:

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1+1}{L}\right)} \quad (2)$$

$$K1 = 666.093 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}, K2 = 1282.7108 \text{ K}$$

در رابطه‌ی (۱) نیاز به محاسبه‌ی ضریب گسیلمندی می‌باشد. در این تحقیق از نتیجه‌ی تحقیقات پیشین استفاده شده و از روش نسبت پوشش گیاهی به خاک به عنوان روش مناسب‌تر نسبت به سایر روش‌ها استفاده می‌شود که در ادامه نحوه‌ی محاسبه توضیح داده می‌شود [۲۱]:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_g (1 - P_v) + 4 < d\varepsilon > P_v (1 - P_v) \quad (3)$$

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_g}{NDVI_v - NDVI_g} \quad (4)$$

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_g) (1 - P_v) F \varepsilon_v \quad (5)$$

$F$ : ضریب ثابت =  $0.55$ ،  $\varepsilon_v$ : ضریب گسیلمندی مناطق با پوشش گیاهی صرف =  $0.99$ ،  $\varepsilon_g$ : ضریب گسیلمندی مناطق خاک لخت =  $0.97$

$NDVI_v$ : شاخص گیاهی مناطق با پوشش گیاهی صرف،

$NDVI_g$ : شاخص گیاهی مناطق خاک لخت

همانطور که توضیح داده شد، برای محاسبه‌ی تصویر آنومالی حرارتی تصویر حرارت سطح زمین از تصویر حرارتی

<sup>۱</sup> Savage

<sup>۲</sup> Coolbaugh

$$\text{Anomaly}_{\text{Coolbaugh}} = \text{LST} - (A_0 + A_1(1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_i - A_2 \cdot h - A_3 \text{NDVI}) \quad (11)$$

به منظور محاسبه ضرایب با شرط مینیمم کردن واریانس تصویر آنومالی بهتر است همه ضرایب با هم حل شوند و در واقع یک مسئله بهینه سازی چند معیاره بوده و که با روش سرشکنی کمترین مربعات می توان ضرایب را محاسبه کرد. در این معادله چهار مجهول وجود دارد و به ازای هر پیکسل یک معادله نوشته می شود. رابطه زیر فرم سرشکنی کمترین مربعات را نشان می دهد:

$$B = A \cdot X \Rightarrow (B - A \cdot X) \rightarrow \min = \text{Least Square Adjustment}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,1} & -h_{i,1} - \text{NDVI}_{i,1} \\ 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,j} & h_{i,j} - \text{NDVI}_{i,j} \\ 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,m,n} & h_{m,n} - \text{NDVI}_{m,n} \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$(\text{LST} - \begin{bmatrix} 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,1} & -h_{i,1} - \text{NDVI}_{i,1} \\ 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,j} & h_{i,j} - \text{NDVI}_{i,j} \\ 1 & (1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_{i,m,n} & h_{m,n} - \text{NDVI}_{m,n} \end{bmatrix}) \times \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \rightarrow \min$$

پس از محاسبه مجهولات، تصویر آنومالی نهایی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{Anomaly}_{\text{Coolbaugh}} = (\text{LST} - A_0 + A_1(1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_i - A_2 \cdot h - A_3 \text{NDVI})$$

#### ۴- نتایج و پیشنهادات

##### ۴-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

مناطق که دارای منابع زمین گرمایی باشند به وفور در کشور ژاپن یافت می شوند. اکثر منابع در حال استفاده در این کشور، در نواحی آتشفشانی کوارترنری قرار داده شده- اند [۲۷]. بنا بر مطالعات زمین شناسی، آندزیک یا داسیدیک آتشفشانی کوارترنری و پلوتونیوم به عنوان عامل گرمایی منابع زمین گرمایی این منطقه تشخیص داده شده است.

$$E_q = f S_0 \sum_i (M(z)_i \cos(Z'_i) D_i) \Delta t_i \quad (9)$$

$E_q$ : انرژی ورودی خورشید در طول زمان،  $S_0$ : ثابت انرژی خورشیدی =  $1367 \text{ W/m}^2$ ;  $f$ : درصد پوشش ابر،  $M(z)$ : ضریب عبور اتمسفر =  $1 - [0.2 / (\cos z)]^{1/2}$ ،  $z$ : زاویه زینت خورشید،  $\cos Z' = \cos$  کسینوس زاویه‌ی بین نرمال بر سطح و راستای تابش خورشید،  $D_i$ : فاکتور تاخیر،  $\Delta t$ : فاصله‌ی زمانی محاسبه انرژی خورشیدی = ۱ ساعت

در نهایت میزان انرژی خورشیدی جذب شده به صورت زیر محاسبه می شود [۱۵]:

$$E_{q-\text{Model}} = E_q (1 - \text{Albedo}) \quad (10)$$

برای محاسبه‌ی آلبیدو از روش پیشنهاد شده توسط لیانگ استفاده می شود که به دلیل محدودیت تعداد صفحات در این مقاله خواننده را جهت مطالعه‌ی جزئیات به منبع اصلی ارجاع می دهیم [۱۳]. همچنین، قبل از محاسبه‌ی آلبیدو باندهای انعکاسی بایستی نسبت به اثر توپوگرافی نرمال شوند. بدین منظور نیز از روش توسعه یافته تصحیح کسینوس استفاده می شود [۲۴].

به طور کلی دمای هوا و سطح زمین با افزایش ارتفاع کاهش می یابد که به این مسئله اثر افت محیط گویند. این اثر بیشتر در شب مشهود است و در روز به دلیل وجود نور خورشید و سایه مخدوش می گردد. میزان این اثر به طور میانگین کاهش دمایی در حد  $6/5$  درجه‌ی سانتی گراد در هر کیلومتر می باشد. ولی برای همه‌ی مناطق و تصاویر عدد دقیقی نمی باشد. به منظور مدل سازی این اثر، رابطه‌ی بین DEM منطقه و LST به صورت یک رابطه‌ی خطی با شیب منفی در نظر گرفته می شود [۱۶، ۱۷].

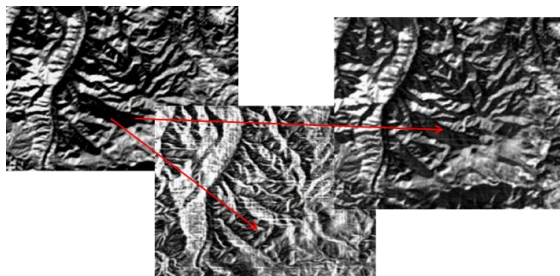
همچنین برای مدل کردن اثر تبخیر و تعرق از شاخص-های گیاهی استفاده می شود. به طوری که یک رابطه‌ی خطی منفی بین شاخص‌های گیاهی و LST وجود داد. این مسئله بدین دلیل می باشد که افزایش تاج پوشش گیاهان ارتباط مستقیمی در افزایش تبخیر و تعرق منطقه و در نتیجه کاهش دمای سطح دارد. در نتیجه مدل حرارتی اثر تبخیر و تعرق به صورت یک رابطه‌ی خطی منفی در نظر گرفته می شود [۲۵، ۲۶].

در نتیجه مدل محاسبه‌ی تصویر آنومالی حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

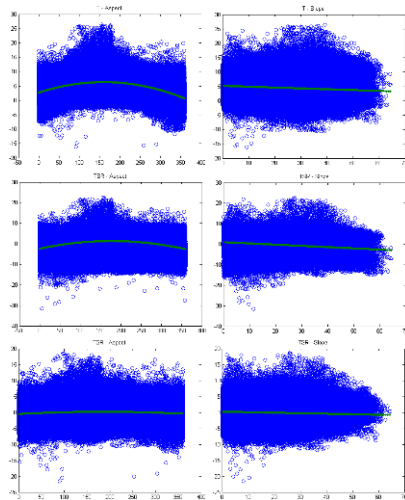
در این تحقیق از DTM تولید شده از سنجنده استر که با قدرت تفکیک ۳۰ متر می‌باشد استفاده شد و میانگین ارتفاع منطقه ۴۸۰ متر اندازه‌گیری شده است.

#### ۴-۲- مقایسه‌ی مدل‌های اثر خورشید

در این بخش، میزان تاثیر اثر خورشید که به عواملی مثل شیب، جهت شیب، آلبیدو و عرض جغرافیایی بستگی دارد، مدل می‌شوند. میزان انرژی خورشید در سطح زمین بر اساس مدل‌های محاسباتی که در روابط (۸) و (۱۰) بیان شده‌اند قابل محاسبه می‌باشند. در ابتدا اثر خورشید با دو روش سویچ و کولبو در نواحی که تغییرات ارتفاعی زیاد می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد.



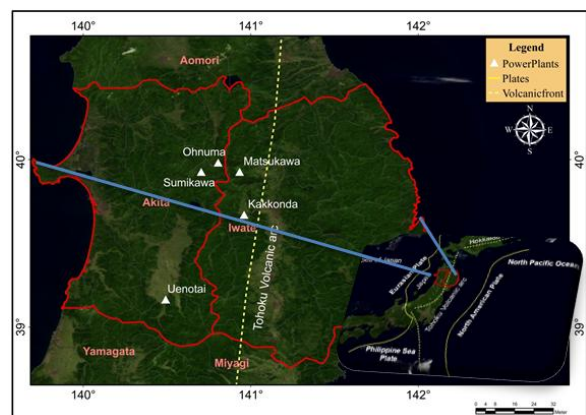
شکل ۴- مقایسه تصحیح اثر خورشید بروی باند حرارتی با دو مدل کولبو و سویچ. الف- تصویر حرارتی ب- تصحیح با مدل سویچ ج- تصحیح با مدل کولبو



شکل ۵- نحوه پراکندگی تصاویر آنومالی با عوامل تغییر دهنده حرارت برای تصویر سال ۲۰۰۱ (محور افقی مرحله تصحیح و محور عمودی باقی مانده‌ی تفاوت حرارت می‌باشند).

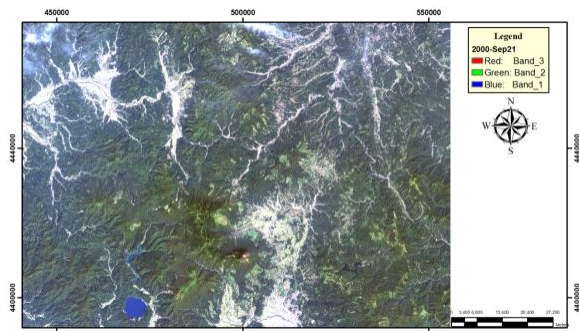
همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، پس از تصحیح اثر خورشید بروی تصویر LST، واریانس یا تفاوت تیرگی و روشنایی در دامنه‌های دو طرف کوه‌ها کاهش

علاوه بر این، وجود تعداد زیادی از چشمه‌های آب گرم و گاز فشان‌ها در محل نواحی آتشفشانی کوارترنری ثابت می‌کند که ماگمای موجود در کوه‌های آتشفشانی جوان، نقش منبع حرارتی را برای منابع زمین‌گرمایی موجود در این منطقه بازی می‌کند. بنابراین، این مناطق به نظر می‌رسد پتانسیل بالایی در وجود منابع زمین‌گرمایی دارند [۲۷]. شکل ۲ منطقه مورد مطالعه در این مطالعه که در دو استان Iwate و Akita که در قوس آتشفشانی توکیو در شمال ژاپن قرار دارند، را نشان می‌دهد.

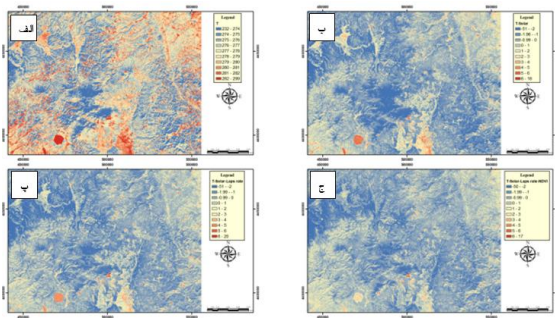


شکل ۲- منطقه مورد مطالعه و وضعیت صفحات تکتونیکی در برابر نیروگاه‌های تولید انرژی از منابع زمین‌گرمایی

برای انتخاب تصویر از منطقه مورد نظر، تصاویر لندست ۷ از سال ۱۹۹۹ تا می ۲۰۰۳ مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر موجود بعد از تاریخ می ۲۰۰۳ در باندهای انعکاسی دچار مشکل شده‌اند و به همین دلیل از تصاویر قبل از این تاریخ استفاده شده است. در بین تصاویر موجود سه تصویر که کمترین میزان ابر و پوشش گیاهی را داشتند برای تصویر روز انتخاب شدند که در تاریخ‌های سپتامبر سال ۲۰۰۰، نوامبر سال ۲۰۰۱ و ژوئن سال ۲۰۰۲ می‌باشند. شکل ۳ تصویر نوامبر ۲۰۰۱ از منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر سنجنده ETM+ در تاریخ نوامبر ۲۰۰۱



شکل ۶- محاسبه تصویر آنومالی حرارتی از تصویر LST الف- با اعمال مدل های به ترتیب ب- اثر خورشید پ- اثر میزان افت ج- تبخیر و تعرق با استفاده از تصویر نوامبر ۲۰۰۱

ضرایب مدل های استفاده شده در هر مرحله در جدول (۱) آمده است. مدل تصحیح اثر خورشید به عنوان مدل شماره ۱، مدل تصحیح همزمان اثرات خورشید و میزان افت به عنوان مدل شماره ۲ و مدل تصحیح اثرات همزمان اثر خورشید، میزان افت و تبخیر و تعرق به عنوان مدل شماره ۳ در نظر گرفته شده است. به طور کلی می توان گفت که با اعمال هر یک از مدل های تصحیح، میزان مساحت آنومالی حرارتی کاهش می یابد (جدول ۲).

جدول ۱- ضرایب محاسبه برای مدل های محاسبه تصاویر آنومالی حرارتی در تصویر نوامبر ۲۰۰۱

ضریب	۱	۲	۳
$A_0$	۲۷۴/۱۵	۲۷۵/۲۱	۲۷۸/۳۵
$A_1$	۷/۶۸	۷/۶۱	۶/۸۲
$A_2$	-	۲/۱۳	۱/۹۳
$A_3$	-	-	۴/۰۴

جدول ۲- میزان مساحت نواحی آنومالی در اعمال مدل های تصحیح خورشیدی، میزان افت و تبخیر و تعرق با استفاده از تصویر نوامبر ۲۰۰۱

تصویر آنومالی	کلاس ۱ (۱۰٪)	کلاس ۲ (۲۰٪)	کلاس ۳ (۳۰٪)
T	۳/۱۴	۶/۸۳	۱۳/۰۹
TSR	۰/۰۸	۰/۴۴	۱/۲۰
TSRLaps	۰/۰۷۵	۰/۲۶	۰/۹۸
TSRLapsNDVI	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۴۸

همچنین به منظور اثبات محاسبه ضرایب صحیح در استفاده از مدل (۱۲) واریانس تصاویر آنومالی پس از اعمال هر یک از محاسبه شده و در شکل (۷) به صورت نمودار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، با اعمال هر یک از اثرات، واریانس تصویر کم می شود به

می یابد اما، این کاهش در استفاده از مدل سویچ محسوس نمی باشد و مدل کولبو به مراتب بهتر از مدل سویچ توانسته است اثر خورشید را از تصویر LST بردارد. نحوه تصحیح اثر خورشیدی با استفاده از روش سویچ به صورت پراکندگی تصویر حرارتی و تصویر آنومالی در مقابل عوامل شیب و جهت شیب در شکل (۵) نیز ترسیم شده است. ردیف دوم از این شکل در مقابل ردیف سوم که مدل سویچ را در مقابل مدل کولبو نشان می دهد، به طور واضحی نشان می دهد که مدل اثر خورشید سویچ نمی تواند در حد خوبی اثر خورشید را از تصویر حرارتی کم کند. به همین دلیل، در ادامه از روش کولبو جهت تصحیح اثر خورشید استفاده می شود.

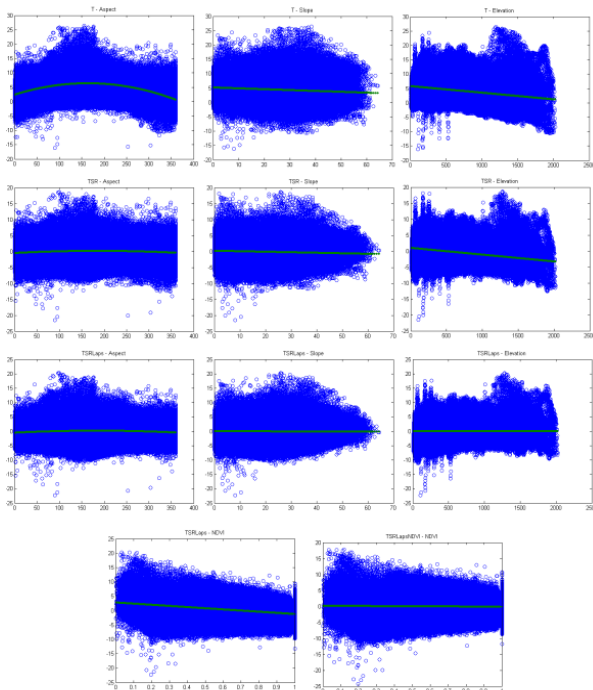
#### ۴-۳- بررسی اثر میزان افت محیطی

جهت مقایسه مدل سازی این اثر با ضریب ثابت ۶/۵ درجه سانتی گراد در کیلومتر و ضریبی که واریانس تصویر را کمینه کند، هر دو مدل بروی تصویر LST نوامبر ۲۰۰۱ اعمال شدند. واریانس تصویر LST مقدار ۵/۷۷ می باشد به طوری که با اعمال تصحیح اثر خورشید با مدل کولبو واریانس تصویر به ۴/۳۸ کاهش می یابد. سپس تصحیح میزان افت یکبار با ضریب ثابت ۶/۵ و یکبار با ضریب افتی که واریانس تصویر کمینه شود انجام شد که در این حالت این ضریب ۲/۱۳ می باشد، محاسبه شد. واریانس های حاصل شده به ترتیب ۵/۵۵ و ۴/۰۲ می باشند. همانطور که مشاهده می شود در حالتی که با ضریب ثابت ۶/۵ تصحیح میزان افت اعمال می شود واریانس تصویر نسبت به مرحله قبلی افزایش می یابد و در نتیجه می توان گفت ضریب ثابت ۶/۵ برای تصحیح میزان افت عدد مناسبی برای همه مناطق نمی باشد.

#### ۴-۴- بررسی اثر خورشید، میزان افت و تبخیر و تعرق

در این مرحله مدل کلی که در واقع مدل کل اثرهای ذکر شده بروی LST منطقه می باشد استفاده می شود. شکل (۶) تصویرهای آنومالی حرارتی نوامبر ۲۰۰۱ را نشان می دهد که به ترتیب با اعمال مدل های اثر خورشید سپس اثر مدل میزان افت و در نهایت مدل تبخیر و تعرق محاسبه شده اند را نشان می دهد به طوری که هر تصویر با روش کوانتایل و با تعداد ده کلاس طبقه بندی شده است.

می‌شود که همچنان تصویر آنومالی به صورت خطی با شیب منفی وابسته به NDVI منطقه می‌باشد و پس از اعمال مدل کامل، یعنی مدلی که تاثیر NDVI به همراه دیگر عوامل تغییر حرارت پیکسل‌ها، تصویر آنومالی مستقل از NDVI شده است و یا به عبارتی اثر تبخیر و تعرق یا خنک‌کنندگی ناشی از تبخیر و تعرق در محل پوشش گیاهی نیز از تصویر آنومالی حرارتی برداشته شده است. کلیه مراحل محاسباتی و تحلیل نتایج خروجی برای تصاویر اخذ شده در تاریخ‌های سپتامبر ۲۰۰۰ و ژوئن ۲۰۰۲ نیز انجام می‌شود و نتایج مشابهی گرفته شد.

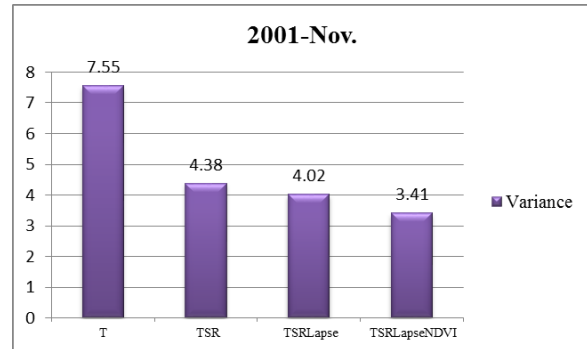


شکل ۸- نحوه پراکندگی تصاویر آنومالی با عوامل تغییر دهنده حرارت برای تصویر سال ۲۰۰۱- محور افقی پارامتر سمت چپ و محور عمودی پارامتر سمت راست توشته شده در بالای هر نمودار می‌باشد. (محور افقی مرحله تصحیح و محور عمودی باقی مانده تفاوت حرارت می‌باشند).

#### ۴-۵- تصویر آنومالی نهایی

در نهایت کلاس‌های اول تصاویر به عنوان نواحی آنومالی نهایی در نظر گرفته شدند و پیکسل‌هایی که در همه نرمال شده، به عنوان آنومالی می‌باشند در تصویر آنومالی نهایی به عنوان پیکسل آنومالی در نظر گرفته شدند. شکل (۹) تصویر آنومالی حرارتی نهایی را نشان می‌دهد. از آنجایی که انتظار می‌رود مظاهر حرارتی سطحی مثل چشمه‌های آب گرم، گاز فشان‌ها و نقاط آتش فشانی در تصویر آنومالی حرارتی شناسایی شده باشند،

طوری که بیشترین میزان کم‌شدگی پس از اعمال مدل اثر خورشید اتفاق می‌افتد و این مسئله نشان می‌دهد که در تصاویر روز بیشترین اثر را در تغییر حرارت پیکسل‌ها خورشید و به تبع آن شیب و جهت شیب دارند.



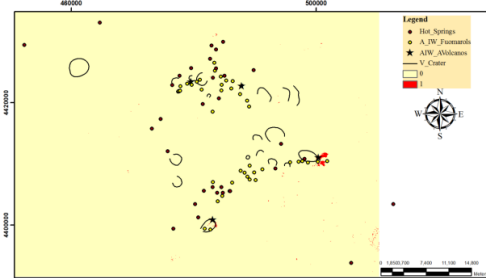
شکل ۷- تغییرات واریانس تصویر آنومالی پس از اعمال هر یک از مدل‌های تصحیح پروی تصویر سال ۲۰۰۱

کمترین میزان کم‌شدگی پس از اعمال مدل میزان افت اتفاق می‌افتد و بدین دلیل می‌باشد که میزان افت بیشتر در تصاویر شب موثر است و در تصاویر روز نسبت به سایر عوامل موثر در تغییر حرارت، نقش کمتری دارد. به منظور بررسی رابطه و پراکندگی بین تصاویر آنومالی و هر یک از عوامل تغییر حرارت نمودار پراکندگی LST اولیه با سه عامل شیب، جهت شیب و ارتفاع همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است ترسیم شدند. سپس با تصحیح هر یک از عوامل، نمودار پراکندگی تصویر آنومالی جدید نیز ترسیم شده است. به ترتیب ابتدا مدل اثر خورشید و سپس اثر میزان افت و در نهایت اثر تبخیر و تعرق ترسیم شده‌اند. معمولاً رابطه LST با شیب یک رابطه خطی، با جهت شیب درجه دو یا سه و با ارتفاع و NDVI نیز به صورت خطی می‌باشد. به همین منظور قبل و بعد از اعمال هر یک از مدل‌ها، رابطه‌های خطی و درجه دو به پراکندگی‌های ترسیم شده برآزنده شده تا اینکه میزان وابستگی قبل از تصحیح و بعد از تصحیح به صورت بصری قابل تحلیل باشد. در سطر اول شکل (۸) نمودارهای برآزنده شده نشان می‌دهد که همانطور که انتظار می‌رفت LST با جهت شیب به صورت یک تابع درجه دوم می‌باشد و همچنین مشاهده می‌شود که رابطه LST با شیب به صورت خطی و شیب منفی می‌باشد. در سطرهای دوم و سوم مشاهده می‌شود که پس از اعمال مدل‌های اثر خورشید و میزان افت، تصویر آنومالی تقریباً مستقل از اثرات خورشید و ارتفاع شده است و در سطر سوم مشاهده



دسترسی رایگان در محدودهٔ حرارتی ۱۰/۵-۱۲/۵ میکرومتر، در زمان‌های مختلف، تصاویر بسیار مناسبی برای شناسایی این مظاهر سطحی می‌باشند. برای رسیدن به آنومالی حرارتی که ناشی از عوامل زیرزمینی در گرم کردن سطح زمین باشد، بایستی تصویر حرارتی را نسبت به سایر عوامل خنک کننده و گرم کنندهٔ سطح زمین نرمال کرد. در این تحقیق ثابت شد که برای تصاویر حرارتی روز، اثر خورشید که تابعی از میزان شیب و جهت شیب و موقعیت نسبی پیکسل و خورشید می‌باشد، موثرترین عامل تغییر حرارت سطح پیکسل‌ها نسبت به هم می‌باشند. همچنین، در مناطقی که تغییرات ارتفاعی زیاد می‌باشد، مدل کردن اثر میزان افت محیط نیز ضروری می‌باشد و در کاهش آنومالی‌های اشتباه موثر است. در تصحیح یا نرمال سازی تصویر حرارتی نسبت به پدیدهٔ میزان افت استفاده از ضریب ثابت  $6/5$  درجهٔ سانتی گراد در کیلومتر در همهٔ مناطق باعث افزایش واریانس تصویر حرارتی و در نتیجه ایجاد آنومالی‌های حرارتی اشتباه می‌شود. به علاوه، یکی از عواملی که باعث می‌شود یک پیکسل نسبت به پیکسل همسایه خنک‌تر نشان داده شود پدیدهٔ خنک شدگی از طریق تبخیر و تعرق می‌باشد. از آنجایی که وجود پوشش گیاهی باعث ایجاد چنین پدیده‌ای می‌شود، در نتیجه، رابطهٔ خطی معکوسی بین حرارت سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی وجود دارد. با توجه به این مسئله، لحاظ کردن شاخص پوشش گیاهی در نرمال سازی تصویر حرارتی در کم کردن آنومالی‌های اشتباه به خصوص در مناطقی که پوشش گیاهی زیاد می‌باشد، موثر است. به طور کلی، ضریب مشارکت کلیهٔ عوامل در تصاویر روز طوری تعیین می‌شود که واریانس تصویر کمینه شود. در این تحقیق، با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات ضرایب مشارکت هر عامل طوری تعیین می‌شود که واریانس تصویر کمینه شود. همچنین به دلیل وجود عوامل مختلف در تغییر حرارت پیکسل‌ها و به دلیل کامل نبودن مدل‌های نرمال سازی تصاویر حرارتی، بهتر است پیکسل‌هایی به عنوان پیکسل آنومالی حرارتی در نظر گرفته شوند که در چند تصویر به عنوان آنومالی بوده باشند. در نتیجه می‌توان گفت، استفاده از تصاویر به صورت زمانمند، در شناسایی پیکسل‌های آنومالی پایدار، بسیار مفید می‌باشد. در نهایت پیکسل‌هایی که همه تصاویر به عنوان پیکسل‌های آنومالی حرارتی می‌بودند، به عنوان پیکسل آنومالی نهایی شناخته شدند.

نقشه‌ی موجود از این عوارض بروی تصویر آنومالی حرارتی انداخته شده است. در بعضی از نواحی در نزدیکی عوارض آتشفشانی، چشمه‌های آب گرم و گاز فشان‌ها آنومالی حرارتی در تصویر آنومالی دیده می‌شود، اما در مناطقی هم آنومالی حرارتی در تصویر آنومالی وجود دارد که عوارضی از مظاهر حرارتی در دادهٔ برداری وجود ندارد.



شکل ۹- تصویر آنومالی حرارتی نهایی در مقایسه با نقشه‌ی واقعیت زمینی مظاهر حرارتی

#### ۴-۶- ارزیابی تصویر آنومالی حرارتی

به منظور ارزیابی تصویر آنومالی نهایی، نقشه‌ی چشمه‌های آب گرم، گاز فشان‌ها و نقاط آتشفشانی بر تصویر آنومالی منطبق شده و موارد انطباق و عدم انطباق مورد بررسی قرار گرفت به طوری ۶۲٪ نقاط بر هم منطبق بودند. در واقع، پیکسل‌های آنومالی، بایستی بروی زمین بررسی شوند تا دلیل ظاهر شدن آنها به عنوان نقاط آنومالی حرارتی تحلیل شود. این نقاط می‌توانند مظاهر حرارتی سطحی‌ای باشند که کشف نشده‌اند و در نتیجه در نقشه وجود ندارند و یا نقاط آنومالی اشتباهی باشند که به دلیل عدم کامل بودن مدل‌ها و یا باقی ماندن اثراتی مثل اینرسی حرارتی در تصویر آنومالی ظاهر شده‌اند. همچنین در نواحی‌ای از محل چشمه‌های آب گرم و گاز فشان‌ها، پیکسل آنومالی حرارتی در تصویر آنومالی دیده نمی‌شود. دلیل این امر می‌تواند مسئلهٔ قدرت تفکیک باشد که اندازهٔ این عوارض از اندازهٔ پیکسل حرارتی که به ابعاد  $60 \times 60$  متر می‌باشد کوچکتر است و یا بازهم به دلیل کامل نبودن مدل‌های ارائه شده، آنومالی موجود شناسایی نشده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

استفاده از باند حرارتی تصاویر سنجندهٔ ETM+ ماهوارهٔ لندست ۷ به دلیل تفکیک مکانی بهتر نسبت به سایر سنجنده‌های موجود حاوی باندهای حرارتی و به دلیل

استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای توانایی شناسایی ۶۲٪ از  
مظاهر حرارتی سطحی منطقه را دارند.

نهایت با انطباق نقشه‌ی مظاهر سطحی با تصویر آنومالی  
حرارتی نهایی نشان داده شد که ۶۲٪ انطباق وجود داشته و  
نشان دهنده‌ی این مسئله است که نواحی آنومالی حرارتی

## مراجع

- [1] R. DiPippo, *Geothermal power plants: principles, applications, case studies and environmental impact*: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] G. Ranalli and L. Rybach, "Heat flow, heat transfer and lithosphere rheology in geothermal areas: Features and examples", *Journal of volcanology and geothermal research*, vol. 148, pp. 3-19, 2005.
- [3] M. K. Moghaddam, Y. Noorollahi, F. Samadzadegan, M. A. Sharifi, and R. Itoi, "Spatial data analysis for exploration of regional scale geothermal resources", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 266, pp. 69-83, 2013.
- [4] M. K. Moghaddam, F. Samadzadegan, Y. Noorollahi, M. A. Sharifi, and R. Itoi, "Spatial analysis and multi-criteria decision making for regional-scale geothermal favorability map", *Geothermics*, vol. 50, pp. 189-201, 2014.
- [5] H. P. Heasler, C. Jaworowski, and D. Foley, "Geothermal systems and monitoring hydrothermal features", *Geological Monitoring*, pp. 105-140, 2009.
- [6] C. Haselwimmer and A. Prakash, "Thermal Infrared Remote Sensing of Geothermal Systems", in *Thermal Infrared Remote Sensing*, ed: Springer, 2013, pp. 453-473.
- [7] F. Peng, Y. Z. Xiong, Y. X. Cheng, Q. C. Fan, and S. P. Huang, "Towards Application of Remote Sensing Technology in Geothermal Prospecting in Xilingol in Eastern Inner Mongolia, NE China", *Advanced Materials Research*, vol. 610, pp. 3628-3631, 2013.
- [8] Y. Yamaguchi, H. Hase, and K. Ogawa, "Remote sensing for geothermal applications", *Episodes*, vol. 15, pp. 62-67, 1992.
- [9] M. Eneva, M. Coolbaugh, S. C. Bjornstad, and J. Combs, "In search for thermal anomalies in the coso geothermal field (California) using remote sensing and field data", in *Thirty-second workshop on geothermal reservoir engineering*. Stanford University, Stanford, 2007.
- [10] Q. Qin, N. Zhang, P. Nan, and L. Chai, "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, 2011.
- [11] D. Hodder, "Application of remote sensing to geothermal prospectin", *Geothermics*, vol. 2, pp. 368-380, 1970.
- [12] C. Seielstad and L. Queen, "Thermal remote monitoring of the Norris Geyser Basin, Yellowstone National Park", vol. H1200040001, F. r. f. t. N. P. S. C. E. S. Unit, Ed., ed, 2009, p. 32.
- [13] Kienholz, C., Prakash, A. and Kolker, A., 2009. Geothermal exploration in Akutan, Alaska, using multitemporal thermal infrared images, *AGU Fall Meeting Abstracts*, pp. 1009.
- [14] S. Liang, "Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms", *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, pp. 213-238, 2001.
- [15] F. G. Watson, R. E. Lockwood, W. B. Newman, T. N. Anderson ,and R. A. Garrott, "Development and comparison of Landsat radiometric and snowpack model inversion techniques for estimating geothermal heat flux", *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, pp. 471-481, 2008.
- [16] M. Coolbaugh, C. Kratt, A. Fallacaro, W. Calvin, and J. Taranik, "Detection of geothermal anomalies using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) thermal infrared images at Bradys Hot Springs, Nevada, USA", *Remote Sensing of Environment*, vol. 106, pp. 350-359, 2007.
- [17] M. Eneva and M. Coolbaugh, "Importance of elevation and temperature inversions for the interpretation of thermal infrared satellite images used in geothermal exploration", *GRC Transactions*, vol. 33, pp. 467-470, 2009.
- [18] F. J. Gutiérrez, M. Lemus ,M. A. Parada, O. M. Benavente, and F. A. Aguilera, "Contribution of ground surface altitude difference to thermal anomaly detection using satellite images: Application to volcanic/geothermal complexes in the Andes of Central Chile", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 237, pp. 69-80, 2012.
- [19] G. Chander, B. L. Markham, and D. L. Helder, "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors", *Remote sensing of environment*, vol. 113, pp. 893-903, 2009.

- [20] K. B. G. RAJ and K. FLEMING, "Surface Temperature Estimation from Landsat ETM Data for a part of the Baspa Basin, NW Himalaya, India", *Bulletin of Glaciological Research*, vol. 25, pp. 19-26, 2008.
- [21] C. Coll, J. M. Galve, J. M. Sanchez, and V. Caselles, "Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements", *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 547-555, 2010.
- [22] J. Zhang, Y. Wang, and Y. Li, "A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6", *Computers & geosciences*, vol. 32, pp. 1796-1805, 2006.
- [23] S. L. Savage, R. L. Lawrence, S. G. Custer, J. T. Jewett, S. L. Powell, and J. A. Shaw, "Review of alternative methods for estimating terrestrial emittance and geothermal heat flux for Yellowstone National Park using landsat imagery", *GIScience & Remote Sensing*, vol. 47, pp. 460-479, 2010.
- [24] B. McCune and D. Keon, "Equations for potential annual direct incident radiation and heat load", *Journal of vegetation science*, vol. 13, pp. 603-606, 2002.
- [25] S. Hantson and E. Chuvieco, "Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, pp. 691-700, 2011.
- [26] A. Higuchi, T. Hiyama, Y. Fukuta, R. Suzuki, and Y. Fukushima, "The behaviour of a surface temperature/vegetation index (TVX) matrix derived from 10-day composite AVHRR images over monsoon Asia", *Hydrological processes*, vol. 21, pp. 1157-1166, 2007.
- [27] E. Lambin and D. Ehrlich, "The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis", *International journal of remote sensing*, vol. 17, pp. 463-487, 1996.
- [28] S. Tamanyu, M. Takahashi, Y. Murata, K. Kimbara, M. Kawamura, T. Matsunami, et al., "An updated geothermal resources map of the Tohoku volcanic arc, Japan", in *World Geothermal Congress, Beppu - Morioka, Japan, 2000*, pp. 1817-1822