

تعیین بهترین الگوریتم محاسبه دمای سطح زمین جهت شناسایی مناطق ژئوترمال

مطالعه موردی: شهرستان مشکین شهر

رضا پرهیزکار عیسی‌لو^۱

خلیل ولی‌زاده کامران^۲

بختیار فیضی‌زاده^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۲۵

چکیده

سنجش از دور حرارتی با پوشش وسیع از سطح زمین و همچنین فراهم آوردن قابلیت محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، به عنوان ابزار اقتصادی جدید نقش مهمی را در مطالعات محیط زیستی از جمله جستجوی منابع زمین گرمایی ایفا می‌کند. تهیه نقشه دمای سطح زمین، نکته کلیدی در دستیابی به ناهنجاری‌های زمین گرمایی است. در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های طیفی سنجنده OLI و داده‌های حرارتی سنجنده TIRS ماهواره لندست ۸، دمای سطح زمین با الگوریتم‌های تک بانندی و پنجره مجزای محاسبه گردیده و اطلاعات حرارتی حاصل از الگوریتم‌ها با داده‌های هواشناسی مورد ارزیابی قرار گرفت تا با استفاده از الگوریتم بهینه، نقشه دمای سطح زمین در سطح منطقه مورد مطالعه محاسبه شود. با توجه به اختلاف دمایی ۱/۶ درجه سانتی‌گراد الگوریتم پنجره مجزا در مقایسه با الگوریتم تک بانندی با اختلاف دمایی ۳ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای هوای حاصل از ایستگاه هواشناسی در لحظه تصویربرداری، از نتیجه الگوریتم پنجره مجزا جهت تهیه نقشه دمای سطح زمین استفاده گردید. اما حرارت سطحی محاسبه شده با الگوریتم پنجره مجزا در سطح منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر عواملی مثل نور خورشید، ضریب افت محیط، تبخیر و تعرق و به علاوه منابع زمین گرمایی بود که بایستی تأثیر عوامل غیر از منابع زمین گرمایی از نقشه دمای سطح زمین کم شده و به حداقل ممکن برسد. بنابراین برای نایل آمدن به این هدف از مدل حرارتی استفاده شد. این مدل حرارتی استفاده شده یک مدل خطی است و ضرایب مجهول آن با استفاده از روش سرشکنی کمترین مربعات محاسبه گردیده است. با تجزیه و تحلیل تصویر آنومالی حرارتی حاصل از مدل حرارتی، مناطقی به عنوان مناطق مستعد منابع ژئوترمال انتخاب شدند که علاوه بر اینکه نسبت به محیط اطراف خود دچار ناهنجاری شدند بلکه شواهد وجود منابع زمین گرمایی نیز در اطراف آنها موجود بود به گونه‌ای که دو منطقه با وسعت ۵/۵ و ۱۰/۰۵ هکتار در قسمت شمالی و شمال شرقی دهکده موئیل، یک ناحیه با وسعت ۴/۱ در جنوب غربی آبگرم قوطورسویی و یک ناحیه در قسمت جنوبی آبگرم قینرجه با وسعت ۱/۱ هکتار به عنوان مناطق مستعد منابع زمین گرمایی در ناحیه اطراف کوهستان سبلان شناسایی شدند که از پتانسیل بالایی جهت اکتشاف منابع ژئوترمال برخوردار بودند.

واژه‌های کلیدی: سنجش از دور حرارتی، دمای سطح زمین، ناهنجاری حرارتی، انرژی زمین گرمایی، مشکین شهر

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز rezaparhizcar@gmail.com

۲- دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) valizadeh@tabrizu.ac.ir

۳- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تبریز Feizizadeh@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

روش‌های نوین، کم‌هزینه و سریع جهت شناسایی پتانسیل زمین‌گرمایی می‌توان به فناوری سنجش از دور اشاره کرد که به علت توانایی در شناسایی پدیده‌ها و همچنین استخراج دمای سطح زمین بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده و می‌تواند برای تعیین ناهنجاری‌های حرارتی در ارتباط با ویژگی‌های ظاهری انرژی زمین‌گرمایی مورد استفاده قرار گیرد (علوی پناه و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین نیاز مبرم و اساسی به درک صحیح مکانسیم زمین‌گرمایی و بکارگیری سنجش از دور حرارتی به عنوان روشی نوین و تکنیکی مهم و مقرون به صرفه جهت شناسایی مناطق مستعد انرژی زمین‌گرمایی در سطح شهرستان مشکین شهر احساس می‌شود. تاکنون پیشرفت‌ها و تلاش‌های قابل توجهی در دهه‌های گذشته در زمینه شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی از طریق سنجش از دور حرارتی صورت گرفته است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

تیان و همکاران^۱ (۲۰۱۵) در تحقیقات خود با بهره‌گیری از سنجش از دور و ترکیب آن با درجه حرارت ورودی به شناسایی منابع ژئوترمال در هوکایدو، شمال ژاپن پرداختند؛ آن‌ها با تهیه نقشه دمای سطح زمین به این نتیجه رسیدند که بخش مرکزی هوکایدو دارای حداقل درجه حرارت بوده؛ در حالی که غرب و قسمتی از شرق این منطقه دارای گرادیان درجه حرارت بالا می‌باشد. بنابراین غرب و بخشی از شرق هوکایدو را مناسب‌ترین مناطق جهت اکتشاف نیروگاه زمین‌گرمایی معرفی نمودند. رزاستاین و همکاران^۲ (۲۰۱۵) به برآورد دمای سطح زمین با استفاده از باندهای حرارتی لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا پرداختند. آنها دمای سطح زمین را با دقت ۰/۹۳ درجه سانتی‌گراد محاسبه کرده و نتیجه را با داده‌های شبیه‌سازی شده ارزیابی کردند. توگی و همکاران^۳ (۲۰۱۶) با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به شناسایی منابع ژئوترمال

پیش رفتن کشورهای دنیا به سمت صنعتی‌شدن و نیز روند رشد جمعیت از جمله‌ی عواملی هستند که مدیران و برنامه‌ریزان بخش انرژی را بر آن داشته تا هرچه بیشتر بر ضرورت به‌کارگیری انرژی‌های نو و سازگار با محیط‌زیست تأکید ورزند چرا که با گذشت زمان و کاهش ذخایر انرژی فسیلی، تعادل بین جمعیت و انرژی از بین رفته و در آینده نزدیک جامعه جهانی با کمبود انرژی مواجه خواهد شد (تباهی، ۱۳۹۳). کشور ما نیز در تکاپوی گذر از این تنگنای انرژی، به منابع انرژی‌های نو و تجدید پذیر چشم دوخته و به سرعت در مسیر تکوین و توسعه فناوری از آن گام بر می‌دارد.

انرژی زمین‌گرمایی یکی از منابع عمده انرژی‌های نو، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست است که در صورت بهره‌برداری صحیح و مبتنی بر پارامترهای زیست محیطی، نقش مهمی را در موازنه‌ی انرژی کشور و اهداف توسعه‌ی پایدار خصوصاً در شهرستان مشکین شهر ایفا می‌کند. این شهرستان به واسطه‌ی سرمای طاقت فرسای زمستان، عدم وجود منابع انرژی نفت و گاز و وابستگی روستاییان به تأمین انرژی از منابع طبیعی دارای چالش‌های جدی در زمینه‌ی تأمین انرژی بوده و در آینده با شدت بیشتری با این چالش‌ها مواجه خواهد بود. از طرفی وجود چشمه‌های آبگرم، فعالیت‌های آتشفشانی در منطقه و سایر شواهد نشان می‌دهد این شهرستان از پتانسیل مناسبی برای استفاده از انرژی زمین‌گرمایی برخوردار می‌باشد. هرچند در سال‌های اخیر مطالعاتی جهت احداث نیروگاه زمین‌گرمایی و بهره‌برداری از این نوع انرژی انجام شده ولی به نظر می‌رسد تمامی پتانسیل‌های زمین‌گرمایی موجود در سطح شهرستان شناسایی نشده و یا شناسایی آن بر پایه‌ی روش‌های نوین و کم‌هزینه صورت نگرفته است. بنابراین نیاز به بررسی‌های مؤثر و مبتنی بر پارامترهای زیست محیطی در زمینه شناسایی، پهنه بندی و امکان توسعه‌ی مناطق بالقوه جهت بهره‌برداری بیشتر و بهتر از انرژی زمین‌گرمایی احساس می‌شود. از انواع

1- Tian & et al

2- Rozenstein & et al

3- Togi & et al

است؛ وی با استفاده از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی داده‌ها را در محیط GIS تلفیق نموده و به این نتیجه رسید که دو منطقه در شرق گلباف و اطراف محدوده جوشان دارای پتانسیل ژئوترمال می‌باشند. کاظمی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی با استفاده از داده‌های حرارتی تصاویر لندست ۸ به تحلیل ناهنجاری‌های حرارتی گسل‌ها و ارتباط آن با منابع زمین‌گرمایی در گسل‌های شهداد و نایبند پرداخته و با تجزیه و تحلیل ناهنجاری‌های دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه به این نتیجه رسیدند که در نزدیکی زون مرکزی این دو گسل عمیق و بزرگ تجمع‌های حرارتی سطحی وجود دارد که این تجمعات حرارتی با فاصله گرفتن از زون مرکزی گسل کاهش می‌یابد. بنابراین مناطق معرفی شده می‌توانند به عنوان پتانسیل اولیه وجود منابع زمین‌گرمایی مورد بررسی تفصیلی واقع شوند.

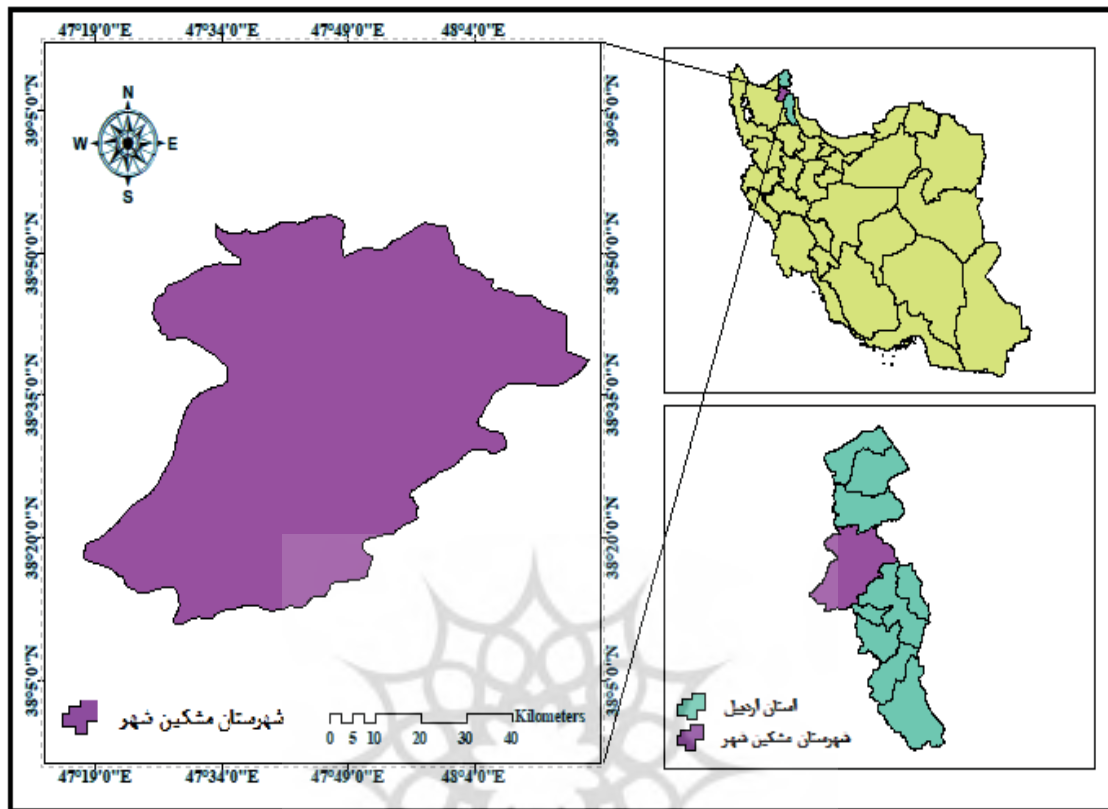
بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در زمینه شناسایی منابع زمین‌گرمایی از روش‌های GIS پایه و سنجش از دوری استفاده شده ولی این روش‌ها به تنهایی قادر به شناسایی نبوده و یا ازدقت مناسبی برخوردار نیستند. بنابراین نیاز به ارائه مدلی حرارتی است تا این مدل با تلفیق سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی بتواند ناهنجاری‌های حرارتی ناشی از انرژی زمین‌گرمایی را در سطح منطقه مورد مطالعه آشکار کند. همچنین با توجه به مطالعات پیشین مشخص می‌شود که تهیه نقشه دمای سطح زمین، نکته کلیدی در دستیابی به ناهنجاری‌های زمین‌گرمایی بوده و نقش الگوریتم‌های مختلف در برآورد دمای سطح زمین حائز اهمیت زیادی است. لذا در پژوهش حاضر سعی بر این است که در مرحله اول با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور حرارتی و سیستم اطلاعات جغرافیایی؛ نقشه دمای سطح زمین با الگوریتمی بهینه از میان الگوریتم‌های پنجره مجزا و تک بانندی محاسبه شود. سپس در مرحله بعد با تکیه بر دمای سطح حاصل از الگوریتم بهینه و مدل آنومالی حرارتی؛ مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی در سطح

در ناحیه دلک ماراوا^۱ پرداختند. آن‌ها از نرم‌افزار ArcGIS به عنوان ابزار نقشه‌برداری و همچنین از تصاویر لندست ۸ سنجنده OLI به عنوان داده ورودی به نرم‌افزار ENVI جهت پردازش استفاده نمودند تا دمای سطح زمین را که به منظور شناسایی منابع زمین‌گرمایی ضروری بود، محاسبه نمایند. در نهایت بالاترین مقدار دمای سطح را ۳۱۰ درجه کلون به دست آوردند که حاوی موقعیت پتانسیل زمین‌گرمایی بود. کونتان و همکاران^۲ (۲۰۱۷) به بازیابی دمای سطح زمین با استفاده از داده‌های لندست ۸ پرداختند. آن‌ها با استفاده از دو باند حرارتی ۱۰ و ۱۱ یک روش جدید برای بازیابی دمای سطح ارائه داده و جهت اعتبارسنجی بین دمای سطح زمین بازیابی شده و داده‌های مرجع از GSN^۳ استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که خطای دمای آب بالاتر از سایر انواع پوشش‌های زمینی است.

کسائیان (۱۳۹۳) در پایان‌نامه خود با استفاده از داده‌های حرارتی به شناسایی مناطق امیدبخش منابع زمین‌گرمایی پرداخته است. وی با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS و به روش تلفیق بولین و فازی، نقشه نهایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی را تهیه نموده و به این نتیجه رسید که مناطق مرکزی و غرب استان اردبیل (شامل مناطق اطراف کوه سبلان) از احتمال بیشتری برای وجود منابع زمین‌گرمایی برخوردارند که این موضوع در بعضی از مناطق با وجود چشمه‌های آب گرم نیز تأیید می‌گردد. فیضی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) به برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا در حوضه آبریز مهاباد پرداخته و توانستند دمای سطح زمین را با دقت معادل ۱/۴ درجه سانتی‌گراد برآورد نمایند.

فهیم (۱۳۹۶) در پژوهش خود، با استفاده از تصاویر سنجنده‌های مودیس، ETM+ و استر و داده‌های مغناطیسی هوابرد و زمینی، به بررسی نشانه‌های وجود پتانسیل منابع ژئوترمال در منطقه سیرچ-گلباف استان کرمان پرداخته

1- Dolok Marawa
2- Kuntan & et al
3- Geo Sensor Network



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی شهرستان مشکین شهر

شهرستان مشکین شهر مورد شناسایی قرار گیرند تا با توجه
و مدیریت برنامه‌ریزان زمینه برای بررسی‌های اکتشافی
بعدی فراهم شود.

نقطه آن به نام سلطان سبلان دارای ارتفاع ۴۸۱۱ متر می‌باشد
(نگاره شماره ۱).
براساس مطالعات دفتر انرژی زمین‌گرمایی سازمان
انرژی‌های نو ایران (سانا)، منطقه مشکین شهر بهترین نقطه
برای استفاده از ظرفیت انرژی زمین‌گرمایی در کشور است
به طوری که نخستین نیروگاه ژئوترمال خاورمیانه در ارتفاع
سه هزار متری کوهستان سبلان احداث گردیده و قابلیت
تولید ۵۵ مگاوات انرژی برق با استفاده از حرارت داخل
زمین را دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان مشکین شهر به‌عنوان منطقه مورد مطالعه این
پژوهش با وسعتی حدود ۳۸۰۰ کیلومترمربع بین طول‌های
جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه
شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۲ دقیقه تا
۳۸ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی در شمال غربی ایران و در
مناطق مرکزی استان اردبیل واقع شده که بیش از ۲۰ درصد
از مساحت استان را در برمی‌گیرد. مرتفع‌ترین قسمت
این شهرستان بخش جنوبی آن یعنی دامنه‌های شمالی و
شمال‌غربی توده‌های آتشفشانی سبلان است که بلندترین

۲-۲- داده و روش تحقیق

در این پژوهش به‌منظور برآورد دمای سطح زمین و
تحلیل ناهنجاری‌های حرارتی جهت شناسایی مناطق مستعد
منابع زمین‌گرمایی در شهرستان مشکین شهر به تنهایی از
تصویربرداری سنجنده OLI و TIRS ماهواره لندست ۸ استفاده

جدول ۱: ویژگی‌های تصویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق

نام سنجنده	تاریخ دریافت تصاویر		ساعت تصویربرداری (به وقت محلی)	باند	قدرت تفکیک مکانی (متر)
	شمسی	میلادی			
OLI	۱۳۹۶/۰۶/۰۹	۲۰۱۷/۰۸/۳۱	۱۰:۳۰	۴ و ۵	۳۰
TIRS	۱۳۹۶/۰۶/۰۹	۲۰۱۷/۰۸/۳۱	۱۰:۳۰	۱۰ و ۱۱	۱۰۰

مأخذ: فایل مرجع تصاویر

جدول ۲: آمار دمای هوا در ایستگاه مشکین شهر

ردیف	نام ایستگاه	تاریخ اندازه‌گیری	ساعت اندازه‌گیری به وقت گرینویچ	دمای هوا به درجه سانتی‌گراد
۱	مشکین شهر	۱۳۹۶/۰۶/۰۹	۰۷	۲۵
		۱۳۹۶/۰۶/۰۹	۰۸	۲۸

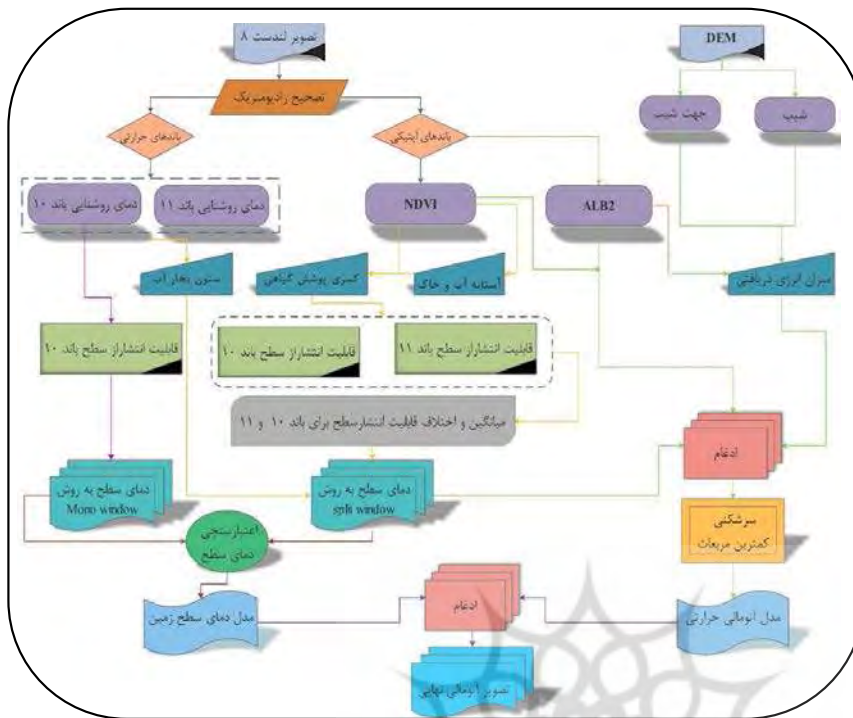
پیشنهادی بدین صورت است که برای محاسبه تصویر آنومالی حرارتی از طرفی به یک تصویر حرارتی مشاهداتی نیاز است و این تصویر در واقع همان تصویردمای سطح زمینی است که با الگوریتم‌های پنجره مجزا و تک بانندی از باند حرارتی ماهواره در لحظه تصویربرداری محاسبه شده است با این توضیح که تصویر دمای سطح زمین حاصل از الگوریتمی به عنوان تصویر حرارتی مشاهداتی استفاده می‌شود که با توجه به داده‌های ثبت شده آماری ایستگاه پایش دما در منطقه مورد مطالعه بیشترین میزان دقت را داشته باشد. از طرف دیگر، یک مدل حرارتی 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. در ادامه، فرآیند محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر سنجنده‌های OLI و TIRS و الگوریتم‌های Mono Window و Split Window و همچنین نحوه مدل‌سازی مدل آنومالی حرارتی تشریح می‌شود:

۲-۳- فرآیند محاسبه دمای سطح زمین

تهیه نقشه دمای سطح زمین نکته کلیدی در دستیابی به ناهنجاری‌های زمین‌گرایی می‌باشد (جعفری و امامی، ۱۳۹۵). در چند دهه اخیر تخمین دمای سطح زمین از

شده است چراکه فرآیند محاسباتی دمای سطح زمین متأثر از کاربری و پوشش زمین بوده و تصاویر شب در این زمینه کارایی مناسبی ندارند هرچند که این تصاویر اثرات حرارتی ناشی از انرژی خورشید در طول روز را کاهش می‌دهند ولی از لحاظ قدرت تفکیک مکانی و تأثیرات اتمسفری مناسب این نوع پژوهش نبوده و یا از دقت کافی برخوردار نیستند. جدول شماره ۱ مشخصات تصویر ماهواره‌ای استفاده شده در تحقیق را نشان می‌دهد که این تصاویر از سازمان زمین شناسی ایالات متحده درخواست و از سایت مربوط دریافت شد. همچنین برای تعیین الگوریتم بهینه جهت محاسبه دمای سطح زمین از داده‌های هواشناسی ایستگاه مشکین شهر، اخذ شده از اداره کل و مرکز تحقیقات هواشناسی استان اردبیل استفاده شده است (جدول شماره ۲). به گونه‌ای که آمار مربوط به دمای هوا برای دوره یک‌روزه (۱۳۹۶/۰۶/۰۹) می‌باشد که همان روز گذر ماهواره لندست ۸ از منطقه مورد مطالعه است.

روش پیشنهادی در نگاره شماره ۲ ارائه شده است. به طوری که این روش برای اولین بار با بهره‌گیری از دمای سطح زمین به عنوان نکته کلیدی در دستیابی به ناهنجاری‌های حرارتی و همچنین با استفاده از مدل آنومالی حرارتی به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد منابع زمین‌گرایی در سطح منطقه مورد مطالعه پرداخته است. فرآیند انجام روش



نگاره ۲: فرآیند کلی تحقیق

طریق داده‌های ماهواره‌ای پیشرفت چشمگیری داشته و الگوریتم‌های مختلف و متنوعی برای تخمین دما با سنجنده‌های مختلف ارائه گردیده است که اساس این الگوریتم بر پایه فرضیات و تقریب‌های متنوعی از معادله تشعشعی استوار است (جویباری مقدم و همکاران، ۱۳۹۴).

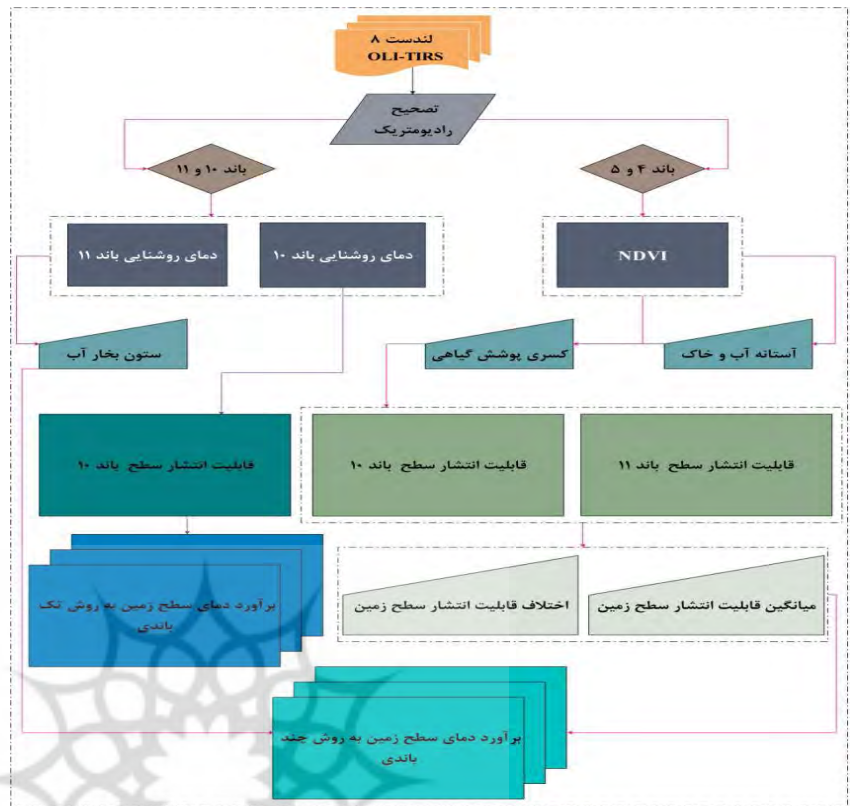
مراحل اصلی بدست آوردن دمای سطح زمین در این تحقیق شامل کالیبراسیون رادیومتریکی، تصحیح خطاهای اتمسفری، محاسبه توان تشعشعی است. روش‌های استفاده شده برای محاسبه دمای سطح زمین الگوریتم‌های Mono Window و Split Window می‌باشند که از باندهای حرارتی و اپتیکی ماهواره در لحظه تصویربرداری استفاده می‌کنند. نگاره شماره ۳ مراحل انجام روش‌های چندباندی (Split Window) و تک باندی (Mono Window) را جهت محاسبه دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در مرحله کالیبراسیون رادیومتریکی، مقادیر راقومی^۱ ثبت شده توسط سنجنده به تابش طیفی^۲ تبدیل می‌شوند که در پژوهش حاضر کالیبراسیون رادیومتریکی تصاویر مطابق با

3- Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes
 4- Emissivity
 5- Normal Differential Vegetation Index

1- Digital Number
 2- Spectral Radiance

نگاره ۳: مراحل برآورد دمای سطح زمین به دو روش تک بانندی و چند بانندی



پوشش گیاهی (FVC) محاسبه می‌شود که یک پارامتر مفید برای بسیاری از کاربردهای مربوط به محیط‌زیست و آب‌وهوا می‌باشد (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). یک رویکرد مشترک برای برآورد FVC شامل ترکیبی غیرخطی از دو عنصر طیفی در یک تصویر ماهواره‌ای شامل خاک لخت و پوشش گیاهی سبز است (ناجی‌دومیرانی و همکاران، ۱۳۹۶). شاخص FVC با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این رابطه، NDVI: شاخص پوشش گیاهی، $NDVI_s$: مناطق بدون پوشش گیاه شاخص، $NDVI_v$: مناطق پوشیده از گیاه شاخص اجسام با درجه حرارت بالاتر از صفر مطلق، تشعشعات حرارتی از خود ساطع می‌کنند که به این تشعشعات شار تابشی گفته می‌شود (سایرینو و همکاران، ۲۰۰۴). مقدار توان تشعشعی براساس مقادیر NDVI به صورت جدول شماره ۳ محاسبه می‌شود.

متفاوتی را بر دما ایجاد می‌کند در نتیجه می‌توان آن را به‌عنوان یک شاخص تأثیرگذار در محاسبه دمای سطح زمین به شمار آورد (سایرینو و همکاران، ۱، ۲۰۰۴).

شاخص NDVI فرآیند محاسباتی ساده دارد و در مقایسه با دیگر شاخص‌ها دارای بهترین توان دینامیک می‌باشد. شاخص NDVI با رابطه ۱ محاسبه می‌شود (کوگان، ۲، ۱۹۹۳). (رابطه ۱)

$$NDVI = \frac{P_{Near} - P_{Red}}{P_{Near} + P_{Red}}$$

P_{Near} مقادیر بازتاب در باند مادون قرمز (حدوداً ۰/۸۶ میکرومتر)، P_{Red} : مقادیر بازتاب در باند قرمز (حدوداً ۰/۶۵ میکرومتر) را نشان می‌دهد. محدوده این شاخص بین ۱ و -۱ است که مقادیر آن برای پوشش گیاهی متراکم بالاتر از یک می‌باشد درحالی‌که ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند. بعد از محاسبه NDVI شاخص کسری

1- Jimenez-Munoz & et al

2- Kogan

$$T = K_2 / \ln\left(\frac{k_1}{L_3} + 1\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این رابطه، T دمای تابشی به کلوین است که بر روی سطح سنجنده ثبت می‌گردد، K_1 و K_2 ثابت‌های تبدیل حرارتی باندهای حرارتی هستند که از فایل مرجع (Header File) استخراج می‌گردد و L_3 درخشندگی جو بالا می‌باشد. اما ستون بخار آب که در بهبود دقت و بازیابی دمای سطح زمین نقش مهمی را ایفا می‌کند با رابطه ۵ قابل محاسبه می‌باشد.

(رابطه ۵)

$$CVW = C_0 + C_1 A = \pi r^2 * \left(\frac{T_j}{T_i}\right) + C_2 \left(\frac{T_j}{T_i}\right)^2$$

در این رابطه C_2, C_1, C_0 ضرایب ثابت به دست آمده از داده‌های شبیه‌سازی شده و T_i و T_j میانگین دمای روشنایی هستند (ناجی دومیرانی، ۱۳۹۶).

در مرحله پایانی مقدار LST با استفاده از الگوریتم‌های چندباندی و تک‌باندی محاسبه می‌شود.

روش الگوریتم پنجره مجزا (Split Window) یکی از الگوریتم‌های چندباندی است که دمای سطح زمین را با دقت بالایی محاسبه می‌کند (ابراهیمی هروی و همکاران، ۱۳۹۵). در پژوهش حاضر جهت دست‌یافتن به این امر از رابطه ۶ که دارای معیارهای مختلفی است، استفاده شده است.

(رابطه ۶)

$$LST = TB10 + C1(TB10 - TB11) + C2(TB10 - TB11)^2 + C0 + (C3 + C4W) + (1 - m) + (C5 + C6W) \Delta m$$

در این رابطه LST بیانگر دمای سطح زمین به درجه کلوین می‌باشد. در حالیکه C_0 تا C_6 بیانگر ضرایب‌های ثابت الگوریتم پنجره مجزا هستند که با شبیه‌سازی اعداد مختلف از شرایط اتمسفر و سطح بدست آمدند (گارساهاو، ۲۰۰۵). همچنین TB10 و TB11 بیانگر دمای روشنایی باند ۱۰ و ۱۱ به درجه کلوین، ϵ بیانگر گسیل‌مندی سطحی باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱، W بیانگر ظرفیت بخار آب اتمسفری و Δm اختلاف در گسیل‌مندی سطحی باندهای ۱۰ و ۱۱ است. برخلاف روش‌های چند باندی که جهت

جدول ۳: روابط قابلیت انتشار و شاخص تفاضل گیاهی

نرمال شده

شاخص تفاضل گیاهی نرمال شده	گسیل‌مندی سطح زمین
NDVI < 0.2	$a_i \rho_{Red} + b_i$
$0.2 \leq NDVI \leq 0.5$	$\epsilon = \epsilon_{vpv} + \epsilon_s (1 - pv) + c_i$
NDVI ≥ 0.5	$\epsilon = \epsilon_v + C_i$

مأخذ: ناجی دومیرانی و همکاران، ۱۳۹۶

در ادامه فرایند محاسبه دمای سطح زمین نیاز به محاسبه قابلیت انتشار سطح زمین (LSE) می‌باشد که به صورت نسبت انرژی گرمایی تابش شده به وسیله سطح به انرژی گرمایی تابش شده به وسیله جسم سیاه در همان دما تعریف می‌شود (جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۹). این پارامتر یکی از معیارهای مهم در محاسبه دمای سطح زمین می‌باشد که به صورت جداگانه برای هر دو باند حرارتی سنجنده TIRS با رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$LSE = E_s * (1 - FVC) + E_v * FVC$$

(رابطه ۳)

در این رابطه، LSE: قابلیت انتشار سطح زمین، E_{vs} : انتشار گیاه و خاک برای باندهای حرارتی، FVC: شاخص کسری پوشش گیاهی است که در جهت محاسبه مقادیر ضریب انتشار خاک و پوشش گیاهی برای باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸ از نتایج تحقیقات پیشین استفاده شده است (فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵). بعد از محاسبه کردن LSE برای هریک از باندهای حرارتی، اختلاف و میانگین این دو باند نیز محاسبه می‌شود. همچنین در این مرحله از پژوهش نیاز به محاسبه دمای روشنایی و ستون بخار آب می‌باشد که دمای به دست آمده از زمین در ارتفاع ماهواره، دمای روشنایی نامیده می‌شود (مجرد و همکاران، ۱۳۹۴). همچنین داده‌های باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ را می‌توان به صورت جداگانه و با استفاده از ثابت حرارتی موجود در فایل متادیتا از طیف درخشندگی به دمای روشنایی (BT) تبدیل کرد که این روش با رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

مقادیر توابع اتمسفریک W_1, W_2, W_3 و از روابط (۱۰)، (۱۱ و ۱۲) محاسبه می‌شوند. برای محاسبه توابع اتمسفریک با مراجعه به وبسایت <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov> و وارد نمودن تاریخ تصاویر و مختصات منطقه مورد نظر، مقدار این پارامترها را می‌توان محاسبه نمود.

$$W_1 = \frac{1}{\tau} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$W_2 = -L^\downarrow - \frac{L^\uparrow}{\tau} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$W_3 = L^\downarrow \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در روابط بالا τ انتقال جو، L^\uparrow بالا آمدن درخشندگی جو، L^\downarrow پایین آمدن درخشندگی جو می‌باشد (والاندیر و همکاران، ۲۰۱۲).

ارزیابی دقت و اعتبارسنجی دمای حاصل از داده‌های ماهواره‌ای اغلب چالش برانگیز بوده و در دهه‌های اخیر چندین الگوریتم برای بازیابی دمای سطح از داده‌های حرارتی گسترش داده شده است، با این حال اعتبارسنجی دمای حاصل از این داده‌ها بدلیل برخی مشکلات چندان توسعه نیافته است. اما لازمه به‌کارگیری هر نوع اطلاعات موضوعی، آگاهی از میزان صحت و درستی آن است بنابراین در تحقیق حاضر با توجه به در دسترس بودن دمای هوای ساعتی ایستگاه مشکین‌شهر در هنگام عبور ماهواره، از این داده‌ها جهت ارزیابی دقت مدل استفاده شد. برای این منظور، داده‌های دمای سطح به‌دست‌آمده به روش الگوریتم پنجره مجزا (Split Window) با کمک رابطه ۱۳ و دمای سطح حاصل از روش تک بانندی (Mono Window) از طریق رابطه ۱۴ که به‌ترتیب توسط گارسیا-هارو و همکاران^۲ و رحیمیان و همکاران ارائه شده، به دمای هوا تبدیل، و سپس با داده ایستگاه مشکین‌شهر مقایسه شدند تا از بین دو الگوریتم مذکور، الگوریتم بهینه جهت محاسبه دمای سطح زمین انتخاب گردد.

محاسبه دمای سطح زمین از دو باند حرارتی سنجنده‌ها استفاده می‌کند، در روش‌های تک بانندی، هدف رسیدن به الگوهایی برای استخراج دمای سطح زمین با استفاده از یک باند حرارتی در سنجنده‌ها است (عسگرزاده و همکاران ۱۳۹۵).

در روش Mono - Window با فرض معلوم بودن ضریب گسیل و پروفیل‌های اتمسفری؛ دمای سطح زمین با رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

$$LST = y \left[\frac{1}{\varepsilon} (W_1 * L_s + W_2) + W_3 \right] + \delta \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این رابطه LST دمای سطح زمین برحسب کلونین، ε گسیل‌مندی سطح (به‌طور معمول ۰/۹۸ در نظر گرفته می‌شود)، L_s تابش طیفی، y و δ پارامترهای وابسته به رابطه پلانگ، W_1, W_2, W_3 توابع اتمسفریک می‌باشند. مقدار y و δ که پارامترهای وابسته به رابطه پلانگ هستند از روابط ۸ و ۹ به‌دست می‌آیند.

$$y = \left\{ C_2 * L_s / T_s^2 \left[\frac{y^4 * L_s}{C_0} + \frac{1}{y} \right] \right\}^{-1} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در این رابطه L_s و T_s به‌ترتیب تابش طیفی و دمای روشنایی می‌باشند. λ طول موج مؤثر تصاویر لندست ۸ برحسب میکرومتر (μm) می‌باشد که در جدول شماره ۴ مقدار آن‌ها درج شده است. C_1 و C_2 نیز ثابت‌های تابش پلانگ می‌باشند که مقدار C_1 برابر $10^8 * 1/19104$ برحسب $(\text{w} * \text{m}^{-2} * \text{sr}^{-1} * \mu\text{m}^{-1})$ و C_2 برابر $10^4 * 1/43877$ برحسب $\mu\text{m} * \text{K}$ می‌باشد (والاندیر و همکاران، ۲۰۱۲).

جدول ۴: مقدار λ برای باندهای ۱۰ و ۱۱ تصاویر ماهواره‌ای

لندست ۸		
باند ۱۱	باند ۱۰	لندست ۸
۱۲/۰۰۵	۱۰/۸۹۵	طول موج (λ)

مأخذ: شاهد، ۲۰۱۴

$$\delta = -y * L_s + T_s \quad (\text{رابطه ۹})$$

تابش خورشید، D_t : فاکتور تأخیر و Δt_t : فاصله زمانی محاسبه انرژی خورشید می‌باشد.

$$T_a = 14.6 + 0.44 * LST \quad (\text{رابطه } 13)$$

در نهایت میزان انرژی خورشیدی جذب شده با رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود (واتسون و همکاران، ۲۰۰۹).

$$T_a = 0.8158 * LST - 5.111 \quad (\text{رابطه } 14)$$

$$E_q\text{-Model} = E_q (1 - \text{Albedo}) \quad (\text{رابطه } 17)$$

برای محاسبه آلبیدو (α) از روش پیشنهاد شده توسط لیانگ استفاده می‌شود که به دلیل محدودیت تعداد صفحات در این مقاله خواننده را به مطالعه جزئیات در منبع اصلی ارجاع می‌دهیم (کینولزو و همکاران، ۲۰۰۹).

۲-۴-۲- آشکارسازی آنومالی‌های حرارتی سطح زمین
برای آشکارسازی آنومالی‌های حرارتی سطح زمین، مدل آنومالی حرارتی از تصویر دمای سطح زمین کم می‌شود و نتیجه تصویری است که تغییرات حرارتی باقی مانده ناشی از وجود منابع زمین گرمایی را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل در صورتی که در منطقه‌ای منابع زیر زمینی گرم کننده یا خنک کننده وجود نداشته باشد، تصویر آنومالی نهایی دارای واریانس صفر خواهد بود که با رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$\text{Anomaly image} = T_{\text{observed}} - T_{\text{model}} \quad (\text{رابطه } 15)$$

۲-۴-۲-۲- مدل‌سازی اثر افت محیطی
به طور کلی دمای هوا و سطح زمین با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد که به این مسئله اثر افت محیطی گویند. این اثر بیشتر در شب مشهود است و در روز به دلیل وجود نور خورشید و سایه مخدوش می‌گردد. میزان این اثر به طور میانگین کاهش دمایی در حد ۶/۵ درجه سانتی‌گراد در هر کیلومتر می‌باشد ولی برای همه مناطق و تصاویر عدد دقیقی نمی‌باشد. به منظور مدل‌سازی این اثر، رابطه بین DEM منطقه مورد مطالعه با LST به صورت یک رابطه خطی با شیب منفی در نظر گرفته می‌شود (کولبو و همکاران، ۲۰۰۷).

در این رابطه T_{observed} دمای سطح زمینی است که از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و با الگوریتم پنجره مجزا محاسبه شده و T_{model} مدل‌سازی اثر خورشید، افت محیطی و اثر تبخیر و تعرق می‌باشد. که در ادامه نحوه مدل‌سازی موارد ذکر شده توضیح داده می‌شود.

۲-۴-۳- مدل‌سازی اثر تبخیر و تعرق
برای مدل‌کردن اثر تبخیر و تعرق از شاخص‌های گیاهی استفاده می‌شود. به طوری که یک رابطه خطی منفی بین شاخص‌های گیاهی و LST وجود داد. این مسئله بدین دلیل می‌باشد 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 رابطه خطی منفی بین NDVI و LST در نظر گرفته می‌شود (هانسن و همکاران، ۲۰۱۱).

۲-۴-۱- مدل‌سازی اثر خورشیدی
با توجه به تحقیقات اخیر به منظور مدل‌سازی اثر خورشید، مدل‌های موجود بررسی شده و مدل کولبو به عنوان بهترین مدل که می‌تواند اثر خورشید را از روی تصویر دمای سطح زمین تعدیل کند انتخاب شد. در این روش، میزان اثر خورشید در گرم کردن زمین به صورت تجمعی از ساعت طلوع خورشید می‌باشد که با استفاده از رابطه ۱۶ اثر خورشید در سطح زمین را محاسبه می‌کند.

$$E_q = f S_0 \sum_t^i (M(z)_t \cos(Z_t) D_t) \Delta t_t \quad (\text{رابطه } 16)$$

در این رابطه E_q انرژی ورودی خورشید در طول زمان، S_0 ثابت انرژی خورشیدی، f : درصد پوشش ابر، $M(z)_t$: ضریب عبور اتمسفر وابسته به زاویه زینت خورشیدی، $\cos(Z_t)$: کسینوس زاویه بین نرمال بر سطح و راستای

۲۰ و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{LST} = A_0 + A_1(1 - \text{Albedo}) \sum_i (M(z)_i \cos(Z_i) D_i) \Delta t_i - A_2 \cdot H - A_3 \cdot \text{NDVI} \quad (\text{رابطه } 20)$$

۳- بحث و ارزیابی نتایج

۳-۱- بررسی دمای سطح منطقه

هدف از این پژوهش شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرایی با ترکیب دمای سطح زمین و مدل آنومالی حرارتی با استفاده از سنجش از دور حرارتی بود. جهت برآورد دمای سطح زمین از دو روش تک بانندی و چند بانندی استفاده شد تا بهترین روش برای برآورد LST انتخاب شده و در حوزه شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرایی به کار گرفته شود. برای دست‌یافتن به این امر از معیارهای مختلفی استفاده شده و نقشه هر یک از این معیارها با کاربرد روابط ریاضی مربوطه تهیه گردید (نگاره شماره ۴). سپس با توجه به پارامترهای الگوریتم پنجره مجزا (Split Window) و تک بانندی (Mono Window) نقشه دمای سطح زمین بر روی تصویر لندست ۸ از منطقه مورد مطالعه استخراج شد.

نگاره شماره ۵ نقشه‌های نهایی حاصل از الگوریتم پنجره مجزا و تک بانندی را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

با توجه به نتیجه حاصل از الگوریتم پنجره مجزا مقادیر دما در منطقه مورد مطالعه بین ۱۶/۳- تا ۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مناطق با پوشش گیاهی، ارتفاع بالا و پوشیده از آب (رودخانه) دارای حداقل مقادیر دما که بین ۱۶/۳- تا ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد در نوسان بوده و بیش‌ترین مقادیر دمایی مربوط به نواحی عاری از پوشش گیاهی و ارتفاع کم است که بین ۳۳/۳ تا ۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد در نوسان می‌باشد. اصلی‌ترین عامل این اختلاف حرارتی، مورفولوژی و ویژگی‌های متفاوت منطقه است. در الگوریتم تک بانندی جهت دستیابی به دمای سطح

۲-۴-۴- محاسبه تصویر آنومالی نهایی

جهت محاسبه تصویر آنومالی نهایی بایستی پارامترهای مجهول موجود در مدل محاسبه شوند. در نتیجه مدل محاسبه تصویر آنومالی حرارتی به صورت رابطه ۱۸ تعریف می‌شود:

(رابطه ۱۸)

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

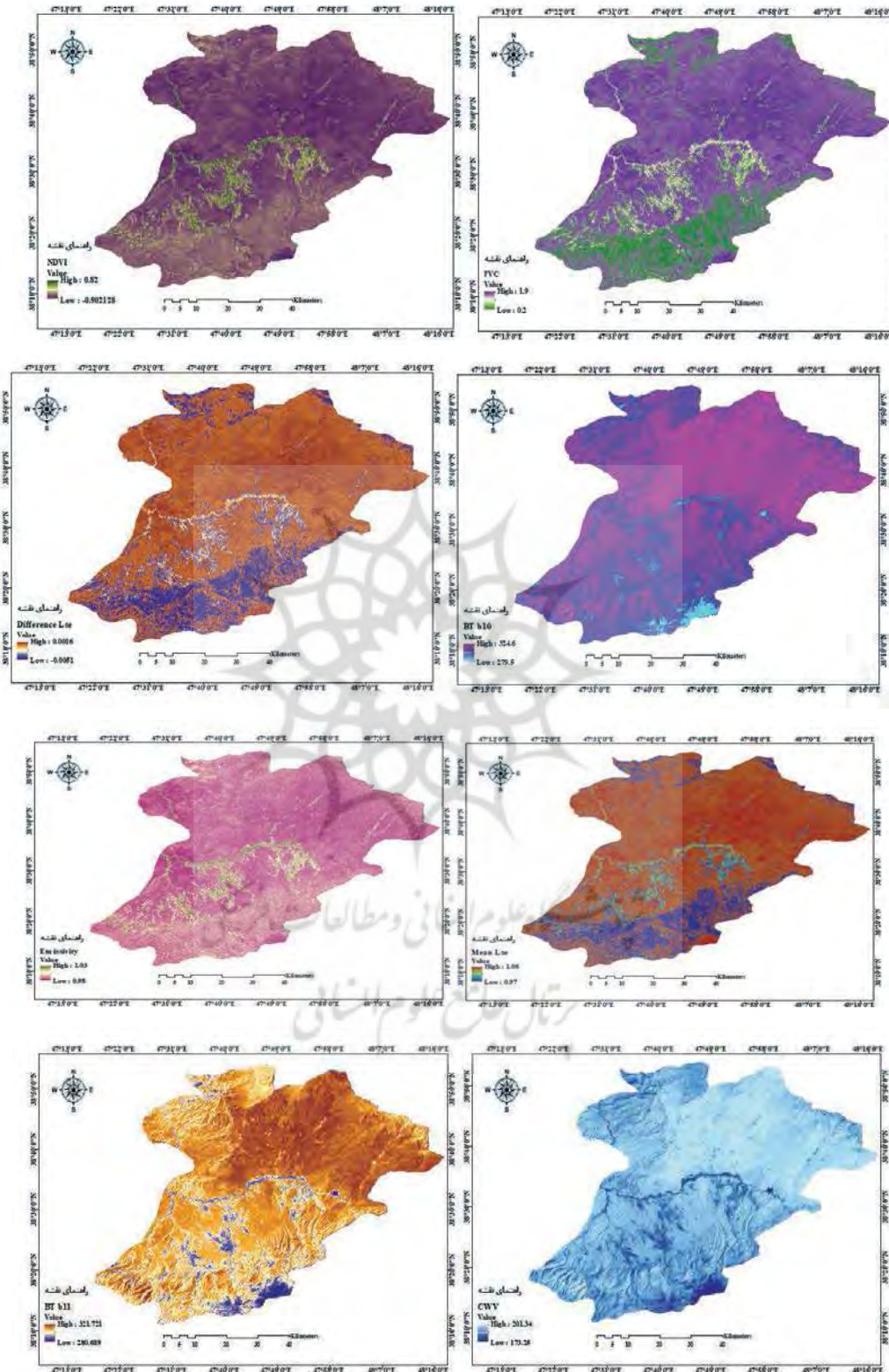
به منظور محاسبه ضرایب با شرط مینیمم کردن واریانس تصویر آنومالی بهتر است همه ضرایب باهم حل شوند. در واقع یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره است که با روش سرشکنی کمترین مربعات می‌توان ضرایب را محاسبه کرد. در این معادله چهار مجهول وجود دارد و به ازای هر پیکسل یک معادله نوشته می‌شود بنابراین فرم سرشکنی کمترین مربعات به صورت رابطه ۱۹ می‌باشد.

(رابطه ۱۹)

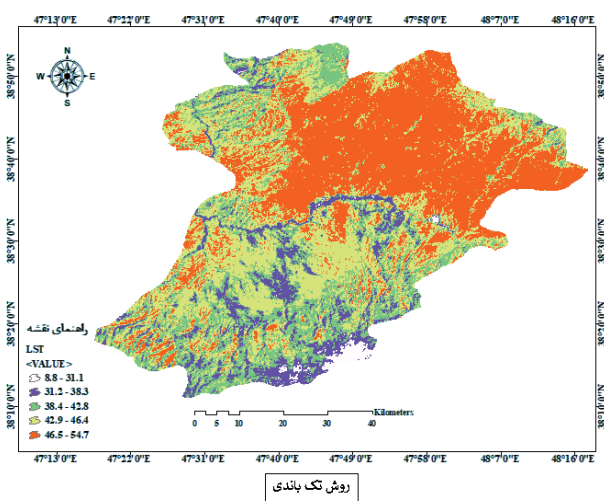
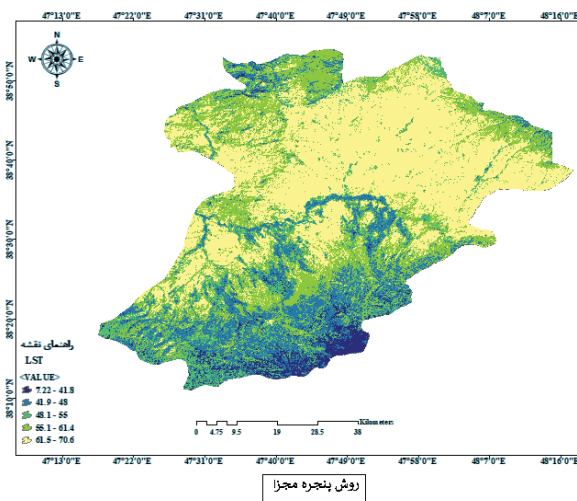
$$B = \text{LST} = A \cdot X \Rightarrow B - A \cdot X \rightarrow \text{Min} = \text{least Square Adjustment}$$

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

پس از محاسبه مجهولات، تصویر آنومالی نهایی با رابطه



نگاره ۴. نقشه‌های نهایی معیارهای مورد نظر جهت محاسبه دمای سطح زمین



نگاره ۵. نقشه‌های دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه به روش الگوریتم پنجره مجزا و تک باندی

جدول ۵: مقایسه دمای هوای محاسبه شده از تصویر ماهواره‌ای با دمای هوای ایستگاه هواشناسی

نام ایستگاه	ایستگاه مشکین‌شهر (درجه سانتی‌گراد)
دمای سطحی محاسبه شده از تصویر به روش پنجره مجزا (LST)	۲۰/۰۱
دمای هوای محاسبه شده از تصویر به روش پنجره مجزا (T_a)	۲۳/۴
دمای سطحی محاسبه شده از تصویر به روش تک باندی (LST)	۲۶/۲
دمای هوای محاسبه شده از تصویر به روش تک باندی (T_a)	۲۲
دمای هوای اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی (T_s)	۲۵

شهرستان نیز به دلیل همواری سطح، کمبود منابع آبی و فقر پوشش گیاهی انرژی بیشتری را دریافت کرده و دمای بالایی را به خود اختصاص داده‌اند.

در این تحقیق با توجه به در دسترس بودن دمای هوای ساعتی ایستگاه مشکین‌شهر در هنگام عبور ماهواره، از این داده‌ها جهت ارزیابی دقت الگوریتم‌ها استفاده شد. به گونه‌ای که داده‌های دمای سطح به دست آمده به روش‌های پنجره مجزا و تک باندی به دمای هوا تبدیل، و سپس با داده‌های دمای هوای ساعت ۱۰ صبح مربوط به روز تصویربرداری (۱۳۹۶/۰۶/۰۹) ایستگاه مشکین‌شهر مقایسه شدند. جدول شماره ۵ تفاوت بین دمای هوای محاسبه شده (T_a) به روش

زمین از باند ۱۰ ماهواره لندست ۸ استفاده شد چون در تحقیقات اخیر دقت بالای باند ۱۰ در محاسبه دمای سطح نسبت به باند ۱۱ ثابت شده بود (المدرسی و همکاران، ۱۳۹۳). نقشه نهایی حاصل از الگوریتم تک باندی حداقل و حداکثر دما را در منطقه مورد مطالعه بین ۸/۸ تا ۵۴/۷ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. بررسی بصری نقشه نهایی استخراج شده به روش تک باندی بیانگر این است که ارتفاعات بالا دارای دمای کم و ارتفاعات پایین دارای دمای زیاد می‌باشند. با توجه به رابطه معکوس بین دما و ارتفاع؛ کوهستان سبلان و صلوات‌داغ دارای ارتفاع بالا بوده و دمای پایینی را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. همچنین مناطق مرکزی

انجام روابط ریاضی بر روی دمای سطح زمین اعمال گردید.

جدول ۶: ضرایب محاسبه برای مدل‌های محاسبه تصویر آنومالی حرارتی

ضریب	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
A_0	۳۳/۲۶	۳۵/۱۱	-۴۱/۱۵
A_1	-۰/۰۹۴	-۰/۰۷۵	-۰/۰۵۰
A_2	-	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱
A_3	-	-	۴۰/۴۱

نگاره شماره ۶ تصویرهای آنومالی حرارتی را به ترتیب با اعمال مدل‌های اثر خورشید سپس اثر مدل میزان افت محیطی و در نهایت مدل تبخیر و تعرق نشان می‌دهد. به طوری که هر تصویر به روش کوانتایل و به تعداد ۵ کلاس طبقه بندی شده است.

پس از تصحیح اثر خورشید بر روی تصویر LST، تفاوت تیرگی و روشنایی در دامنه‌های دو طرف کوه‌ها کاهش یافته است. این عمل به طور واضحی نشان می‌دهد که مدل اثر خورشیدی کولبو می‌تواند در حد مطلوبی اثر خورشید را از تصویر حرارتی کم کند. در تصاویر حرارتی روز، اثر خورشید که تابعی از میزان شیب و جهت شیب و موقعیت نسبی پیکسل و خورشید است، مؤثرترین 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 بوده و در کاهش آنومالی‌های اشتباه مؤثر است. بنابراین در تصحیح یا نرمال سازی تصویر حرارتی نسبت به پدیده میزان افت محیطی، استفاده از ضریب ثابت ۶/۵ درجه سانتی گراد در کیلومتر در همه مناطق باعث افزایش واریانس تصویر حرارتی و در نتیجه ایجاد آنومالی‌های حرارتی اشتباه می‌شود که در جهت حل این موضوع یک رابطه خطی منفی بین مدل رقومی ارتفاعی منطقه و دمای سطح زمین برقرار گردید تا تأثیر این عامل نیز

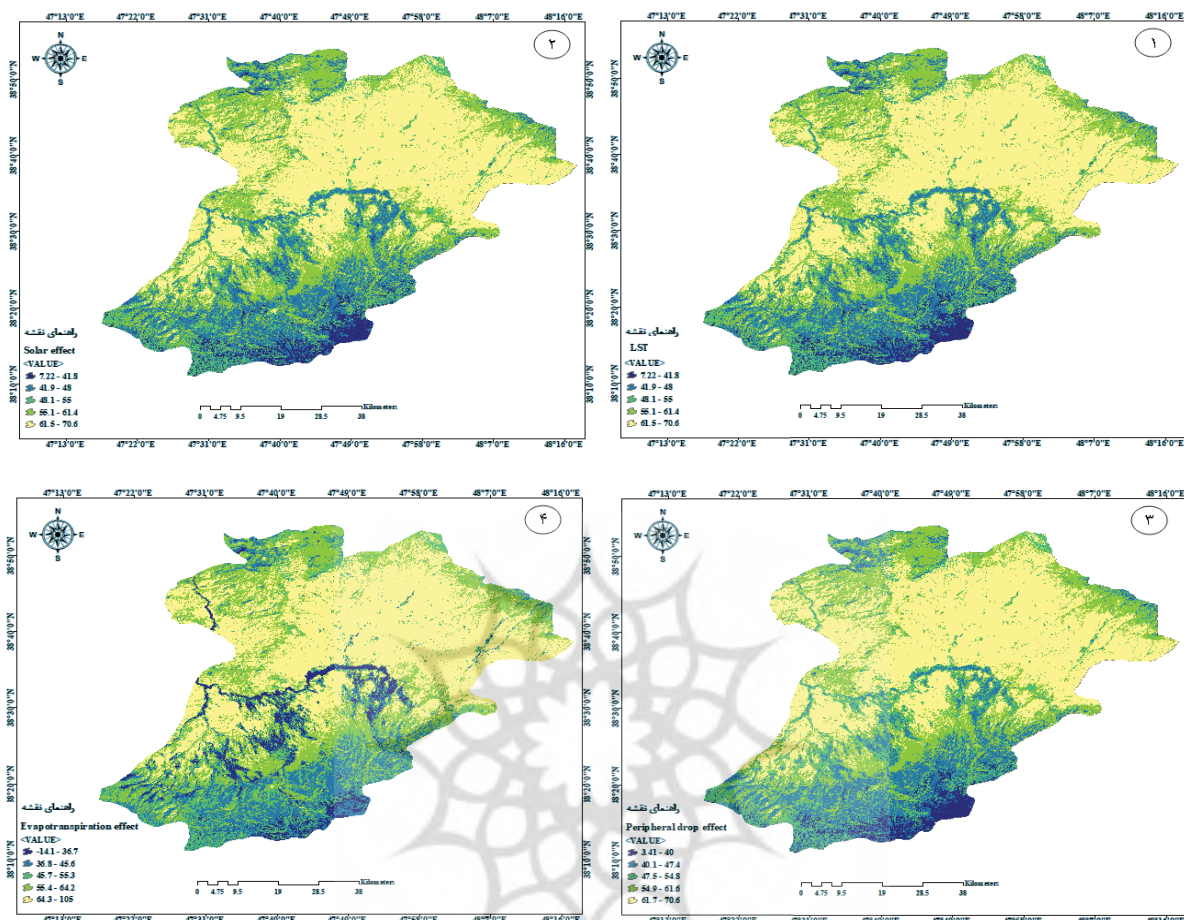
تک باندی و چند باندی از منطقه مورد مطالعه و دمای هوای ایستگاه هواشناسی (T_s) را نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که دمای هوای محاسبه شده با الگوریتم‌های پنجره مجزا و تک باندی در مقایسه با دمای محاسبه شده از ایستگاه مورد نظر به ترتیب اختلاف دمایی ۱/۶ و ۳ درجه سانتی‌گراد دارند. بنابراین می‌توان گفت که روش پنجره مجزا دارای دقت بالایی بوده و دمای به دست آمده با دمای واقعی تطابق بیشتری دارد. با توجه به این موضوع که دمای سطح محاسبه شده به روش الگوریتم پنجره مجزا می‌تواند اطلاعات مفیدی را از وضعیت دمای مناطق مختلف به خصوص مناطق صعب‌العبور و شناسایی مناطق مستعد زمین‌گرمایی در کوهستان سبلان را با دقت بالایی ارائه دهد از نقشه نهایی این الگوریتم جهت شناسایی ناهنجاری‌های حرارتی استفاده گردید تا مناطقی که دچار آنومالی حرارتی شده و مستعد منابع ژئوترمال در سطح شهرستان مشکین شهر هستند مورد شناسایی قرار گیرند.

۳-۲- آشکارسازی آنومالی حرارتی

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 کننده سطح زمین نرمال نمود. به این منظور اثر پارامترهایی مانند اثر خورشیدی، اثر ضریب افت محیطی و اثر تبخیر و تعرق بر دمای سطح زمین حاصل از الگوریتم پنجره مجزا در منطقه مورد مطالعه بررسی گردید. همچنین ضرایب مدل‌های استفاده شده در هر مرحله که با توجه به فرم سرشکنی کمترین مربعات به دست آمده بود در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

مدل تصحیح اثر خورشید به عنوان مدل شماره ۱، مدل تصحیح همزمان اثرات خورشید و میزان افت محیطی به عنوان مدل شماره ۲ و مدل تصحیح اثرات همزمان اثر خورشید، میزان افت محیطی و تبخیر و تعرق به عنوان مدل شماره ۳ در نظر گرفته شده که تأثیر هر یک از مدل‌ها با

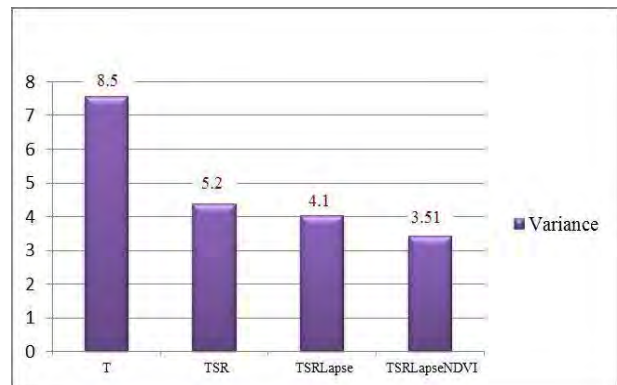


نگاره ۶. ۱) محاسبه تصویر آنومالی حرارتی از تصویر ۲) LST اعمال اثر خورشید
 ۳) میزان افت محیطی و تبخیر و تعرق (۴) تبخیر و تعرق

بنابراین پس از اعمال مدل‌های اثر خورشید و میزان افت محیطی، تصویر آنومالی تقریباً مستقل از اثرات خورشید و ارتفاع شده ولی همچنان تصویر آنومالی به صورت خطی با شیب منفی به NDVI منطقه وابسته بود که پس از اعمال مدل نهایی، 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. به طور کلی می‌توان گفت که با اعمال هر یک از مدل‌های تصحیح، میزان مساحت آنومالی حرارتی کاهش می‌یابد (نگاره شماره ۷).

تصحیح گردد. به علاوه، یکی از عواملی که باعث می‌شود یک پیکسل نسبت به پیکسل همسایه خنک‌تر نشان داده شود پدیده خنک‌شدگی از طریق تبخیر و تعرق می‌باشد. از آنجایی که وجود پوشش گیاهی باعث ایجاد چنین پدیده‌ای می‌شود، یک رابطه خطی معکوسی بین حرارت سطح زمین و شاخص پوشش گیاهی وجود دارد. پس با توجه به این مسئله، لحاظ کردن شاخص پوشش گیاهی در نرمال سازی تصویر حرارتی جهت کم کردن آنومالی‌های اشتباه به خصوص در مناطقی که پوشش گیاهی زیاد می‌باشد، مؤثر است.

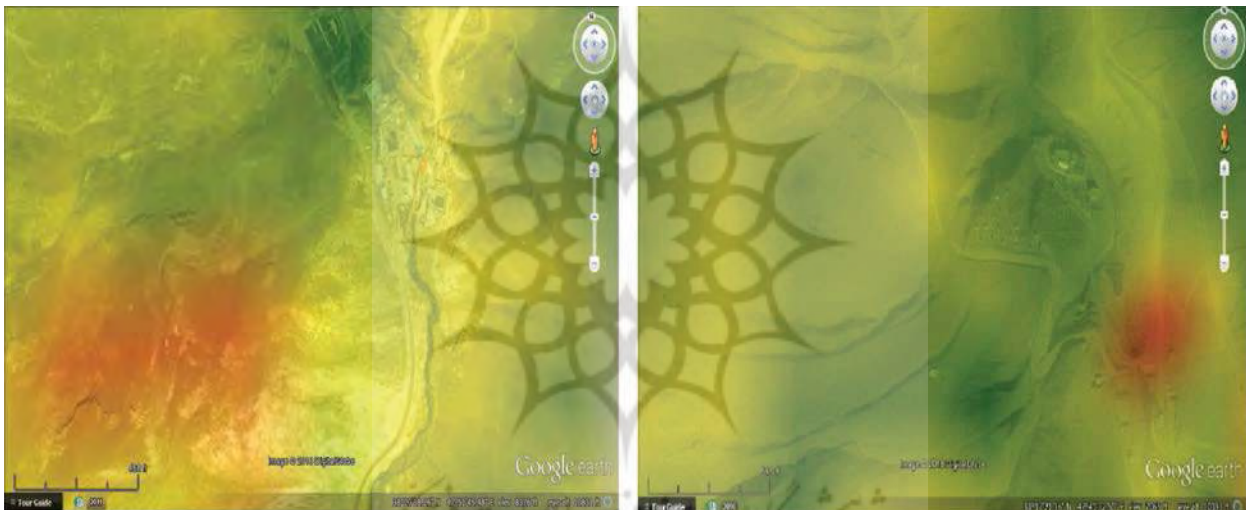
با توجه به نگاره ۷ بیشترین میزان کم شدگی پس از اعمال مدل اثر خورشید و کمترین میزان کم شدگی پس از اعمال مدل میزان افت محیطی اتفاق می‌افتد.



۳-۳- تصویر آنومالی نهایی و شناسایی مناطق مستعد ژئوترمال

در حالت کلی به دلیل وجود عوامل مختلف در تغییر حرارت سطح و به دلیل کامل نبودن مدل‌های نرمال سازی تصاویر حرارتی، بهتر است مناطقی به عنوان مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی انتخاب شوند که علاوه بر ناهنجاری حرارتی،

نگاره ۷. نمودار واریانس تصویر بعد از اعمال مدل‌های تصحیح



نگاره ۸. نمونه ای از تصویر آنومالی طبقه‌بندی شده در محیط گوگل ارث

نگاره ۹. موقعیت مناطق مستعد منابع زمین گرمایی در منطقه مورد مطالعه



جدول ۷: مساحت مناطق مستعد منابع ژئوترمال در محدوده مورد مطالعه

ردیف	نزدیکترین چشمه	مساحت (هکتار)	مساحت (درصد)
۱	موئیل	۵/۵	۲۶/۵۹
۲	موئیل	۱۰/۰۵	۴۸/۲۰
۳	قوطورسویی	۴/۱	۱۹/۸۶
۴	قینرجه	۱/۱	۵/۳۵

شواهد منابع زمین گرمایی به خصوص چشمه‌های آبگرم نیز در اطراف آن‌ها موجود باشد به گونه‌ای که کلاس‌های اول تصاویر همراه با شواهد زمین گرمایی، به عنوان نواحی آنومالی نهایی در نظر گرفته شدند (نگاره شماره ۸).

نگاره شماره ۹ نقشه نهایی مناطق مستعد منابع زمین گرمایی را به همراه موقعیت چشمه‌های آبگرم در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

با توجه به نگاره ۹ مناطقی به عنوان مناطق مستعد منابع ژئوترمال انتخاب شدند که علاوه بر اینکه نسبت به محیط اطراف خود دچار ناهنجاری حرارتی شدند بلکه شواهد وجود منابع زمین گرمایی نیز در اطراف آنها موجود است. به گونه‌ای که دو منطقه با وسعت ۵/۵ و ۱۰/۰۵ هکتار در قسمت شمالی و شمال شرقی دهکده موئیل، یک ناحیه با وسعت ۴/۱ در جنوب غربی آبگرم قوطورسویی و قسمت جنوبی آبگرم قینرجه با وسعت ۱/۱ هکتار از مناطق مستعد منابع زمین گرمایی در ناحیه اطراف کوهستان سبلان بودند که از پتانسیل بالایی جهت اکتشاف منابع ژئوترمال برخوردار بودند.

جدول شماره ۷ میزان مساحت مناطق مستعد منابع ژئوترمال در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

افزایش مشکلات محیط‌زیست ناشی از رشد روزافزون جمعیت و تقاضا برای تأمین انرژی چالشی است که امروزه بشر با آن مواجه گردیده و در این میان فکر به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی زمین گرمایی راهی برای جبران خسارات ناشی از تکیه فراوان دولت‌ها بر منابع فسیلی ارزان و در دسترس می‌باشد.

در زمینه به کارگیری انرژی‌های نو و تجدیدپذیر، استان اردبیل به خصوص شهرستان مشکین شهر با وجود چشمه‌های آبگرم، داشتن نیروگاه زمین گرمایی و سایر شواهد از سطح مناسب و مستعدی برای تولید انرژی زمین گرمایی

سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ در کرج، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۸، شماره ۳، از صفحه ۵۹ تا ۷۶.

۲. احمدی زاده، س. س. ر.، آراسته، ف.، فنایی، غ.، اشرفی، ع.، ۱۳۹۳. شناسایی پتانسیل‌های زمین‌گرمایی با استفاده از روش سنجش از دور حرارتی در خراسان جنوبی، پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۵، شماره ۱۰، از صفحه ۱۳۵ تا ۱۴۴.

۳. المدرسی، ع.، رحیم‌آبادی، ا.، خضری، ص.، ۱۳۹۳. پهنه‌بندی و مقایسه دمای سطح زمین با استفاده از دوباتد حرارتی ۱۰ و ۱۱ تصویر لندست ۸ در شهرستان بهشهر، همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و Gis) در آمایش سرزمین، یزد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد.

۴. بیات، ف.، ۱۳۹۵. بررسی و مدل سازی دمای سطح دریا با استفاده از تصاویر حرارتی لندست ۸، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- نقشه برداری - ژئودزی (هیدروگرافی)، دانشگاه تهران.

۵. پرویز، ل.، خلقی، م.، ولی زاده، خ.، عراقی نژاد، ش.، ایران نژاد، پ.، ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) از طریق پایش وضعیت پوشش گیاهی، همایش ملی ژئوماتیک ۸۹، سازمان نقشه‌برداری کشور.

۶. تباکی بجستانی، ک.، ۱۳۹۲. شناسایی منابع زمین‌گرمایی با استفاده از داده‌های حرارتی ETM+ در مناطق خشک، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته بیابان‌زدایی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۷. جعفری، ا.، امامی، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل داده‌های لندست ۸ در آشکارسازی مناطق زمین‌گرمایی با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی بخشی از آذربایجان شرقی و غربی)، دومین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی‌های پاک با محوریت مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و توسعه پایدار، تهران، شرکت کیان طرح دانش.

۸. جویباری مقدم، ی.، آخوندزاده، م.، سراجیان، م. ر.،

به عنوان یکی از منابع عمده انرژی‌های نو و سازگار با محیط‌زیست برخوردار می‌باشد، اما تاکنون مطالعات مؤثری برای شناسایی آن برپایه روش‌های نوین و کم‌هزینه از جمله سنجش از دور حرارتی صورت نگرفته است.

از این رو تحقیق حاضر، برای اولین بار با به کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور حرارتی اقدام به شناسایی مناطق مستعد استحصال انرژی پاک زمین‌گرمایی در سطح شهرستان مشکین‌شهر نموده و به این نتیجه رسید که مطالعات دورسنجی با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ کارایی بالایی در شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی دارند.

به طوری که با تکیه بر این داده‌ها و روش‌های استفاده شده دو منطقه با وسعت ۵/۵ و ۱۰/۰۵ هکتار در قسمت شمالی و شمال‌شرقی دهکده موئیل، یک ناحیه با وسعت ۴/۱ در جنوب‌غربی آبگرم قوطورسویی و یک ناحیه در قسمت جنوبی آبگرم قینرجه با وسعت ۱/۱ هکتار به عنوان مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی در ناحیه اطراف کوهستان سبلان شناسایی شدند که از پتانسیل بالایی جهت اکتشاف منابع ژئوترمال برخوردار بودند. همچنین مناطق شناسایی شده در این پژوهش، همبستگی مکانی مناسبی با شواهد زمین‌گرمایی موجود در منطقه مورد مطالعه از جمله چشمه‌های آبگرم دارند.

با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش و شناسایی مناطق مستعد منابع زمین‌گرمایی لازم است ناهنجاری‌های حرارتی، از نظر ویژگی‌های زمین‌شناسی بیشتر بررسی شوند. همچنین برای افزایش کارایی مدل نرمال‌سازی دمای سطح و بهبود دقت آن، بررسی روش‌های حل مسئله نرمال‌سازی دمای سطح به صورت بهینه‌سازی محلی و مقایسه نتایج آن با نتایج روش بهینه‌سازی سراسری پیشنهاد می‌شود.

۵- منابع و مآخذ

۱. ابراهیمی هروی، ب.، رنگرن، ک.، ریاحی، ح. ر.، تقی‌زاده، ا.، ۱۳۹۵. تعیین مناسب‌ترین روش استخراج دمای

حرارتی در استان اردبیل، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته اکتشاف معادن، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن و ژئوفیزیک.

۱۶. کی نژاد، ص.، ۱۳۹۰. بررسی پتانسیل منابع ژئوترمال استان آذربایجان شرقی با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن.

۱۷. مجرد، ف.، یوسف نژاد، م.، فتح نیا، ا.، ۱۳۹۴. تعیین الگوریتم بهینه برای پهنه‌بندی یخبندان‌های بهاره و پاییزه در استان کردستان با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره ۴۷، شماره ۴، از صفحه ۵۴۷ تا ۵۶۲.

۱۸. ناجی‌دومیرانی، ص.، ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.، سدیدی، ج.، رحیمی، ک.، ۱۳۹۶. محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم split window و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (مطالعه موردی: شهرستان نهاوند)، بیست و چهارمین همایش و نمایشگاه ملی، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران

19. Coolbaugh, M. F., Kratt, C., 2007. "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, Issue 3, PP 350-359.

20. García-Haro, J., Camacho-de Coca, F., Meliá, J., Martínez, B., 2005. "Operational Derivation of Vegetation Products in the Framework of the LSA SAF Project", EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Dubrovnik (Croatia). 19-23 Septiembre, in press.

21. Hantson, S., Chuvieco, E., 2011. "Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 13, pp 691-700.

22. Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land surface

۱۳۹۴. ارائه یک الگوریتم پنجره مجزا نوین برای تخمین دمای سطح زمین از داده‌های ماهواره لندست ۸، نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۵، شماره ۱، از صفحه ۲۱۵ تا صفحه ۲۲۶.

۹. جهانبخش، س.، رجبی، م.، ۱۳۸۹. مبانی جغرافیای طبیعی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز.

۱۰. عسگرزاده، پ.، درویشی‌بلورانی، ع.، بهرامی، ح. ع.، حمزه، س.، ۱۳۹۵. مقایسه برآورد دمای سطح زمین در روش‌های تک‌باندی و چندباندی با استفاده از تصویر لندست ۸، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۷، شماره ۳، از صفحه ۱۸ تا ۲۹.

۱۱. علوی‌پناه، س. ک.، گودرزی‌مهر، س.، خاکباز، ب.، ۱۳۹۰. فناوری سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در شناسایی پدیده‌ها، نشاء علم، دوره ۲، شماره ۱، از صفحه ۲۹ تا ۲۵.

۱۲. فهیم، م.، ۱۳۹۶. مطالعات سنجش از دور و مغناطیس‌سنجی جهت بررسی منابع ژئوترمال در منطقه سیرچ - گلباف استان کرمان، پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی معدن گرایش اکتشاف معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی مهندسی.

۱۳. فیضی‌زاده، ب.، دیده بان، خ.، غلام‌نیا، خ.، ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و الگوریتم پنجره مجزا (مطالعه موردی: حوضه آبریز مهاباد)، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۵، شماره ۹۸، از صفحه ۱۷۱ تا ۱۸۱.

۱۴. کاظمی، ی.، حمزه، س.، علوی‌پناه، ک.، بهرام بیگی، ب.، ۱۳۹۶. تحلیل ناهنجاری‌های حرارتی گسل‌ها و ارتباط آن با منابع زمین‌گرایی با استفاده از داده‌های حرارتی لندست ۸ مطالعه موردی: گسل‌های شهداد و نایبند، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۲۷، شماره ۱۰۶، تابستان ۱۳۹۷، از صفحه ۵ تا ۲۰.

۱۵. کسائی‌ان، م.، ۱۳۹۳. شناسایی مناطق امیدبخش منابع زمین‌گرایی با تعیین عمق نقطه کوری و داده‌های جریان

(IGARSS), IEEE International, pp 4371-4374.

32. Watson, F. G., Lockwood, R. E., Newman, W. B., Anderson, T. N., Garrott, R. A., 2008. "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

temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 11(10), 1840-1843

23. Kienholz, C., Prakash, A., Kolker, A., 2009. "Geothermal Exploration in Akutan, Alaska, Using Multitemporal Thermal Infrared Images", American Geophysical Union, abstract H53F-1009.

24. Kogan, F.N., 1993. "United States Droughts of Late 1980's as Seen by NOAA Polar Orbiting Satellites, International Geo science and Remote Sensing Symposium", Vol 1, pp 197-199

25. Kun, T., Zhihong, L., Peijun, D., Lixin, W., 2017. "Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Data and Validation with Geo Sensor Network", Frontiers of Earth Science, Vol 11, pp 20-34

26. Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., Karnieli, A., 2015. "Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm", Sensors (Basel), Vol 14, pp 5768-5780.

27. Shahid, L., 2014. "Land Surface Temperature Retrieval of Landsat-8 Data Using Split Window Algorithm- A Case Study of Ranchi District", International Journal of Engineering Development and Research, Vol 2, Issue 4, PP 3840-3849

28. Sobrino, J.A., Raissouni, N., Li, Z., 2001. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Remote sensing of Environment 75 (2), 256-266.

29. Tian, B., Wang, L., Kashiwaya, K., Koike, K., 2015. "Combination of Well-Logging Temperature and Thermal Remote Sensing for Characterization of Geothermal Resources in Hokkaido, Northern Japan", Remote Sens, Vol 7, pp 2647-2667.

30. Togi, T., Khiruddin, A., Lim, H. San., Jeddah, Y., 2016. "The identification of geothermal with geographic information system and remote sensing in district of Dolok Marawa", AIP Conference Proceedings, Vol 1712, Issue 1, pp 10.1063.

31. Walawender, J. P. Hajto, M. J., Iwaniuk, P., 2012. "A New ArcGIS Toolset for Automated Mapping of Land Surface Temperature with the Use of LANDSAT Satellite Data", In Geoscience and Remote Sensing Symposium