



ارزیابی انواع الگوریتم‌های پنجره مجزاء برای محاسبه دمای سطح زمین جهت تعیین بهترین الگوریتم برای تصاویر سنجنده مودیس

محمد کاظمی قراچه، بهنام سلیمانی، بختیار فیضی زاده

دریافت: ۹ اسفند ۱۳۹۷ / پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۹

دسترسی اینترنتی: ۱۵ تیر ۱۳۹۹

چکیده

پیشینه و هدف در سال‌های اخیر مطالعه تغییرات اقلیمی و همچنین تاثیرات آن‌ها تبدیل به یک موضوع ثابت در عرصه‌های علمی بسیاری از کشورها شده است. یکی از ویژگی‌های اصلی این تغییرات، افزایش دمای هوا در طی ۵ دهه اخیر نسبت به ۵۰۰ سال گذشته است. به طوری که آمارها بیانگر افزایش یک درجه سانتی‌گراد در دمای هوا در طی ۵ دهه اخیر هستند. به دمای تابشی پوسته زمین و به مقدار خالص انرژی که تحت شرایط اقلیمی در سطح زمین به توازن رسیده و به مقدار انرژی رسیده، گسیلمندی سطح، رطوبت و جریان هوای اتمسفر بستگی دارد، دمای سطح زمین می‌گویند. دمای سطح زمین به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مطالعات اقلیمی و محیطی سطح زمین محسوب می‌شود. همچنین از پارامترهای اساسی در خصوصیات فیزیک سطح زمین در همه مقیاس‌ها از محلی تا جهانی است.

در حال حاضر مهم‌ترین منبع داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشند و این ایستگاه‌ها آمار اقلیمی نقاط خاصی را ارائه می‌دهند در حالی که دما ممکن است در فواصل مختلف از این ایستگاه‌ها متحرک بوده و نسبت به ایستگاه مورد نظر کاهش یا افزایش داشته باشد. از این رو نیاز به تکنولوژی‌ای که بتواند کاستی‌های ایستگاه‌های هواشناسی را در محاسبه دما در فواصل نمونه‌برداری و در مکان‌های صعب العبور که امکان احداث ایستگاه هواشناسی وجود ندارد برطرف کند ضروری است. در سال‌های اخیر علوم جدیدی مانند سنجش از دور روش‌های جدیدی را برای نظارت بر محیط و کسب، ارزیابی و تجزیه و تحلیل داده‌های محیطی فراهم آورده است و قابلیت ارائه طیف وسیعی از پارامترهای مربوط به محیط را دارا می‌باشد.

این تکنولوژی به عنوان یک منبع مهم و فزاینده از اطلاعات برای مطالعه تغییرات اقلیمی که بر میزان دمای سطح زمین تأثیر مستقیم دارد مطرح می‌شود. در طی دو دهه گذشته برای محاسبه دمای سطح زمین ۱۸ الگوریتم توسعه داده شده است که این الگوریتم‌ها در چهار دسته؛ مدل‌های وابسته به گسیلمندی، مدل‌های دو فاکتوره، مدل‌های پیچیده و مدل‌های بر مبنای رادیانس قرار دارند.

بررسی نتایج مقایسه‌های انجام گرفته بین الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مختلف عملکرد متفاوتی را در موقعیت‌های مختلف با آب و هوای متفاوت جغرافیایی دارند. هدف از این تحقیق مقایسه انواع الگوریتم‌های محاسبه LST برای تصاویر سنجنده MODIS و تعیین بهترین الگوریتم برای استان

محمد کاظمی قراچه (✉)، بهنام سلیمانی^۱، بختیار فیضی زاده^۲

۱. کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. دانشیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: kazemi20.0432@gmail.com

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad [۸]$$

نتایج و بحث در بین ۱۸ الگوریتم محاسبه دمای سطح زمین برای تصاویر سنجنده MODIS به ترتیب؛ الگوریتم سوپرینو با مقدار RMSE ۱/۷۹، بیشترین دقت، الگوریتم کول کاسلیس و پراتا با مقدار RMSE ۲/۵۸، در جایگاه دوم و همچنین الگوریتم های سالیسبوری و سوپرینو با مقدار RMSE ۲/۷۹، جایگاه سوم را برای محاسبه LST در بین سایر الگوریتم ها دارا می‌باشند. الگوریتم کین با مقدار RMSE ۵/۲۸، کمترین دقت را برای محاسبه LST به خود اختصاص داده است.

نتیجه‌گیری بررسی اطلاعات بدست آمده از مقایسه الگوریتم‌های پنجره مجزاء بیانگر تبعیت کلی دماهای محاسبه شده از شرایط توپوگرافی منطقه است، به طوری که تقریباً کمترین مقادیر درجه حرارت در تمام الگوریتم‌ها مربوط به قسمت‌های با ارتفاع بیشتر (کوهستانی) و پوشش سبز منطقه است و مقادیر دما در نواحی دارای ارتفاع پایین و فاقد پوشش گیاهی متراکم افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین (LST)، الگوریتم‌های پنجره مجزاء (SW)، سنجنده مودیس، استان آذربایجان شرقی

آذربایجان شرقی می‌باشد.

مواد و روش‌ها برای تبدیل ارزش های رقومی به تابش طیفی برای باندهای حرارتی تصاویر سنجنده MODIS استفاده قرار گرفت.

$$L_{\lambda} = \frac{[L_{max} - L_{min}]}{[(QCal_{max} - QCal_{min}) \times QCal] + L_{min}} \quad [۱]$$

تبدیل تابش طیفی به بازتاب طیفی با استفاده از رابطه پلانک، داده‌های حرارتی سنجنده MODIS، زمانی که توان تشعشعی آنها حداکثر یک در نظر گرفته شوند، قابلیت تبدیل از تابش طیفی به بازتاب طیفی را دارند. که با استفاده از رابطه ۲ تعیین شد.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad [۲]$$

در برآورد گسیلمندی سطحی از روش آستانه گذاری شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI استفاده شد.

جهت مشخص نمودن ویژگی‌های خاک در هر پیکسل و محاسبه میزان گسیلمندی و اختلاف گسیلمندی، توان تشعشعی به سه دسته تقسیم گردید؛ $NDVI < 0.2$ به عنوان خاک خشک در نظر گرفته شده و توان تشعشعی برای آن معادل 0.978 لحاظ می‌گردد. $NDVI > 0.5$ به پیکسل‌هایی با تراکم پوشش گیاهی بالاتر مربوط شده و توان تشعشعی برای آن 0.985 در نظر گرفته می‌شود. $0.2 < NDVI < 0.5$ براساس ترکیبی از پیکسل‌های مربوط به پوشش گیاهی و خاک می‌باشد و توان تشعشعی برای آنها با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه گردید.

$$\varepsilon = \varepsilon_{veg} P_v + \varepsilon_{Soil} (1 - P_v) \quad [۳]$$

در این رابطه؛ P_v نسبت پوشش گیاهی می باشد که مقدار آن با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad [۴]$$

ارزش هر یافته علمی به دقت و صحت آن می باشد، براین اساس برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های محاسبه دمای سطح زمین با دماهای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی از رابطه‌های ۵ تا ۸ استفاده شد.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad [۵]$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad [۶]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad [۷]$$

جهت کلیه فرآیندهای فیزیک خاک به‌طور مستقیم وابسته به دما است. علاوه بر تبخیر و تعرق، جوانه‌زنی، تهویه خاک، رشد گیاه، فعالیت ریشه و میکروارگانیزم‌های خاک تابع دمای آن است (۳ و ۲۶). در حال حاضر مهم‌ترین منبع داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی می‌باشند و این ایستگاه‌ها آمار اقلیمی نقاط خاصی را ارائه می‌دهند درحالی‌که دما ممکن است در فواصل مختلف از این ایستگاه‌ها متحرک بوده و نسبت به ایستگاه موردنظر کاهش یا افزایش داشته باشد. برای حل این مشکل تاکنون روش‌های مختلفی مانند رگرسیون با ارتفاع، روش‌های درونیابی میانگین وزنی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting) و کریجینگ برای محاسبه حدفاصل ایستگاه‌های هواشناسی پیشنهاد شده است (۴۱). اما این روش‌ها به دلیل اینکه دارای کاربردهای خاصی می‌باشند، برای محاسبه دمای سطح زمین بین ایستگاه‌های هواشناسی کارایی لازم را ندارند، به‌عنوان نمونه روش رگرسیون با ارتفاع تنها برای مناطق کوچک کوهستانی و روش‌های درونیابی برای مناطق یکنواخت مناسب هستند. از این‌رو نیاز به تکنولوژی که بتواند کاستی‌های ایستگاه‌های هواشناسی را در محاسبه دما در فواصل نمونه‌برداری و در مکان‌های صعب‌العبور که امکان احداث ایستگاه هواشناسی وجود ندارد برطرف کند ضروری است (۸ و ۲۳). در سال‌های اخیر علوم جدیدی مانند سنجنش‌ازدور روش‌های جدیدی را برای نظارت بر محیط و کسب، ارزیابی و تجزیه و تحلیل داده‌های محیطی فراهم آورده است و قابلیت ارائه طیف وسیعی از پارامترهای مربوط به محیط را دارا است (۳۱ و ۳۹). این تکنولوژی به‌عنوان یک منبع مهم و فزاینده از اطلاعات برای مطالعه تغییرات اقلیمی که بر میزان دمای سطح زمین تأثیر مستقیم دارد مطرح می‌شود (۱ و ۴۲). اولین تلاش‌ها برای محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از تکنولوژی سنجنش‌ازدور مربوط به اوایل دهه ۱۹۸۰ است. بعدازآن با راه‌اندازی سنجنده MODIS انقلابی در محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از تکنولوژی سنجنش‌ازدور اتفاق افتاد. سنجنده‌های جدید مشکلات سنجنده‌های قبلی مانند جابجایی مدار، مشکل ابر، ارزیابی انتشار و قدرت تفکیک کم را که

در سال‌های اخیر مطالعه تغییرات اقلیمی و همچنین تأثیرات آن‌ها تبدیل به یک موضوع ثابت در عرصه‌های علمی بسیاری از کشورها شده است (۴۰). یکی از ویژگی‌های اصلی این تغییرات، افزایش دمای هوا در طی ۵ دهه اخیر نسبت به ۵۰۰ سال گذشته است. به‌طوری‌که آمارها بیانگر افزایش یک درجه سانتی‌گراد در دمای هوا در طی ۵ دهه اخیر هستند (۲۷). دمای هوا از نقطه‌نظر فیزیکی با دمای سطح زمین متفاوت است (۲۲). دمای هوا معمولاً در ارتفاع ۱/۵ متری بالای سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود (۲۹). اما دمای سطح زمین را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند دماسنج تابشی دستی یا با استفاده از تکنولوژی ماهواره‌ای اندازه‌گیری کرد. دمای سطح زمین یک مفهوم مبهم است و ممکن است به درجه حرارت پوسته زمین (یا دمای سطح رادیومتری)، دمای هوا در سطح، درجه حرارت آئرودینامیکی اشاره کند (۲۰). درجه حرارت آئرودینامیکی نمی‌تواند به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری شود و معمولاً با دمای سطح زمین ارتباط دارد (۱۰). از این‌رو ارزیابی آب‌وهوا بر اساس دمای هوا و دمای سطح زمین (Land Surface Temperature) صورت می‌گیرد (۲۴). به دمای تابشی پوسته زمین و به مقدار خالص انرژی که تحت شرایط اقلیمی در سطح زمین به توازن رسیده و به مقدار انرژی رسیده، گسیلمندی سطح، رطوبت و جریان هوای اتمسفر بستگی دارد دمای سطح زمین می‌گویند (۴۱). دمای سطح زمین به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی در مطالعات اقلیمی و محیطی سطح زمین محسوب می‌شود (۱۳). همچنین از پارامترهای اساسی در خصوصیات فیزیک سطح زمین در همه مقیاس‌ها از محلی تا جهانی است (۱۱ و ۲۱). به‌طوری‌که در بحث تکامل خاک، حرارت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل اقلیمی دخالت داشته و سرعت واکنش‌ها را کنترل می‌کند و بر اساس قانون وانتهوف در هر درجه افزایش دما، سرعت فعل و انفعالات شیمیایی ۲ الی ۳ برابر می‌شود. دمای خاک و چگونگی تغییرات آن نسبت به زمان و مکان یکی از مهم‌ترین عواملی است که نه‌تنها تبادل ماده و انرژی را در خاک تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه میزان و

ناهمخوانی حدود ۳ درجه کلون را، که بین ASTER و MODIS بود، به شکل مؤثری کاهش دادند. مقادیر RMSE نیز، از مقدار K ۳/۰۲ تا K ۲/۴۴، به ترتیب به مقادیر K ۱/۹۲ تا K ۱/۸۷، ۱/۷۴ K تا ۱/۵۸ K و ۱/۳۹ K تا ۱/۳۴ K در سه روش مذکور کاهش یافت. کول و همکاران (۱۱)، کر و همکاران (۲۸) و یولیویری و همکاران (۶) برای محاسبه دمای سطح زمین پرداختند. بختیاری و همکاران (۴) ۱۰ الگوریتم پنجره مجزا را برای برآورد دمای سطح زمین در دشت کرمان مورد مقایسه قراردادند. نتایج حاصل از این مقایسه نشان‌دهنده دقت بالای مدل کول و کاسیلیس برای محاسبه دمای سطح زمین بود.

بررسی پیشینه تحقیق بیانگر آن است که در بیشتر مقالات کارشده در زمینه محاسبه LST به بررسی و اعتبار سنجی و مقایسه تعدادی از الگوریتم‌های محاسبه LST با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS پرداخته‌اند و در زمینه ارزیابی و محاسبه دقت تمام الگوریتم‌های محاسبه دمای سطح زمین برای تصاویر سنجنده MODIS کار خاصی انجام نگرفته است، همچنین استفاده از محصولات دمای سطح زمین سنجنده مودیس (MOD11) به دلیل به کار بردن ضرایب تصحیحی، ممکن است در ایران کارایی لازم را نداشته باشد (۳۸). به طوری که سبزی پرور و همکاران (۳۸) در مطالعه‌ای محصولات دمای سطح زمین سنجنده مودیس و دمای سطح محاسبه شده با استفاده از سنجنده لندست ۵ و دمای سطح به دست آمده از سه الگوریتم پنجره مجزا بکر و لی، پرایس و یولیویری را مورد مقایسه قراردادند. نتایج پژوهش آن‌ها بیانگر آن بود که دمای سطح زمین تخمین زده شده به وسیله ماهواره لندست مقدار RMSE (۴/۴) پایینی را نسبت به سنجنده مودیس با مقدار RMSE ۷/۱ به خود اختصاص داده است. همچنین مقدار RMSE دمای سطح تخمین زده شده با استفاده از الگوریتم‌های پنجره مجزا بین ۳/۵ تا ۳/۹ درجه سلسیوس برآورد گردیده است. امامی و همکاران (۱۵) جهت اعتبارسنجی دمای سطح زمین حاصل از سنجنده لندست ۸ از محصولات دمای سطح سنجنده مودیس استفاده کردند.

باعث بروز خطا در برآورد دمای سطح زمین می‌شدند را برطرف کرده و باعث افزایش دقت روش‌های محاسبه LST شدند (۳). از دهه ۸۰ به بعد به دلیل یکنواختی سطح آب از نظر کیفیت، پستی و بلندی، روش‌های جدید و قابل قبولی برای اندازه‌گیری دمای سطح دریا (Sea Surface Temperature) و اقیانوس‌ها وجود داشته است (۴۹). این درحالی‌که است که برای محاسبه دمای سطح زمین روش‌های دقیق و کاملی وجود ندارند. به طور کلی دو روش برای محاسبه LST با استفاده از باندهای حرارتی سنجنده‌ها ارائه شده است؛ روش اول بر مبنای دو پنجره مجزای طیفی (Split window) که اندازه‌گیری LST در محدوده مادون قرمز حرارتی است. روش دوم از تعداد بیشتری باندهای مادون قرمز حرارتی برای محاسبه LST در دو زمان روز و شب استفاده می‌کند (۵۲). الگوریتم پنجره مجزا (SW) یکی از کارآمدترین الگوریتم‌ها برای محاسبه LST است، این الگوریتم که بر پایه تحلیل‌های ریاضی قرار دارد از اطلاعات زمینی، دمای روشنایی باندهای حرارتی، قابلیت انتشار سطح زمین (Land Surface Emissivity) و عامل پوشش گیاهی جز به جز به دست آمده از باندهای چندطیفی برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده می‌کند (۲۳). در روش الگوریتم پنجره مجزا از دو باند طیف الکترومغناطیسی برای محاسبه LST استفاده می‌شود. استفاده از دو یا چند تصویر هم‌زمان یا به کارگیری دو یا چند باند حرارتی از یک تصویر برای محاسبه دمای سطح زمین، از تصویربرداری هم‌زمان از یک منطقه استفاده شد. پژوهش‌های متعددی به منظور محاسبه دمای سطح زمین در نقاط مختلف جهان انجام شده است؛ مائو و همکاران (۳۰)، روت (۳۷)، وان و همکاران (۵۰)، زائو و همکاران (۵۲) با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا دمای سطح زمین را برای تصاویر سنجنده MODIS با خطای جذر میانگین مربعات RMSE کمتر از ۰/۱ محاسبه کردند. همچنین در مطالعه‌ای لیو و همکاران (۲۵)، با استفاده هم‌زمان از تصاویر سنجنده‌های ASTER و MODIS، دمای سطح زمین را محاسبه کردند. آن‌ها سه روش وان و همکاران (۵۰) و روش عمومی دو پنجره‌ای را بررسی کردند و هر سه رویکرد

تصاویر سری ماهواره‌های لندست به علت نیاز به انجام موزاییک تصاویر استفاده نشد.

مواد و روش‌ها

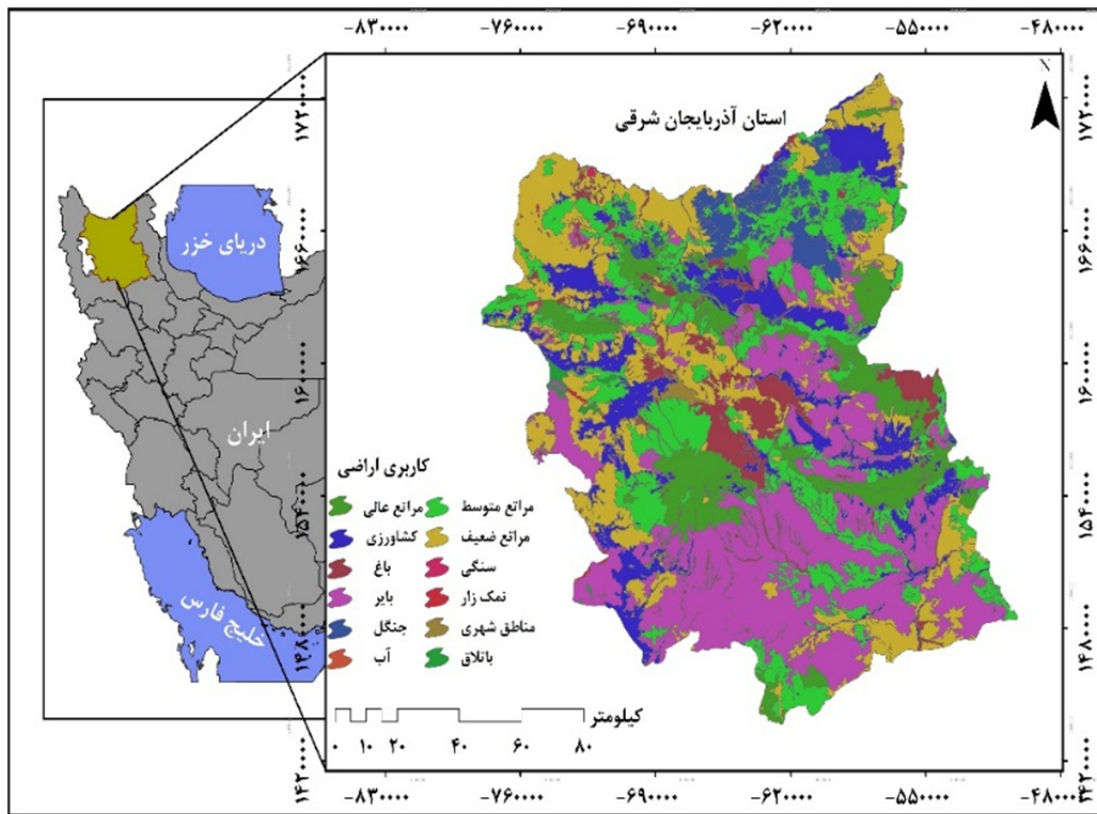
محدوده مورد مطالعه

استان آذربایجان شرقی در شمال غربی ایران واقع شده است. این استان دارای ۴۵/۶۵۰ کیلومتر مربع مساحت، و در حدود ۳۹۰۹۶۵۲ نفر جمعیت است. اقلیم این استان به‌طور کلی سرد و خشک است و در طول سال تابستان‌های گرم و زمستان‌های سردی را تجربه می‌کند و میانگین دمای سالانه آن ۱۰/۹ درجه سانتی‌گراد است. همچنین میانگین بارش سالانه آن در حدود ۲۸۷/۹ میلی‌متر است که بیشتر در فصل زمستان و بهار است. استان آذربایجان شرقی از نظر فعالیت‌های کشاورزی دارای پتانسیل‌های مناسبی است به‌طوری‌که ۱۹/۲ درصد از کل وسعت جغرافیایی استان به اراضی زیر کشت محصولات کشاورزی تعلق دارد (۲). در سال‌های اخیر افزایش سرسام‌آور ساخت‌وسازهای شهری و استعمار بیشتر از زمین‌های کشاورزی باعث افزایش فرسایش و از بین رفتن اراضی مستعد کشاورزی شده است. همچنین روند خشک شدن دریاچه ارومیه علاوه بر تأثیر روی حیات گیاهی و جانوری پیرامون خود بر روی تغییرات جمعیتی و بروز مشکلات و بحران‌های اجتماعی منطقه اطراف خود اعم از شهری یا روستایی تأثیرگذار بوده و به یک منبع فعال نمک و گردوغبار برای مناطق حاشیه خود تبدیل شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده محدوده مورد مطالعه در شمال غرب ایران است.

منطقه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی ۰' ۳۷° تا ۰' ۳۹° عرض شمالی و ۰' ۴۵° تا ۰' ۴۸° طول شرقی قرار دارد (شکل ۲).

به‌منظور انجام این فرآیند تطبیق زمان داده‌ها، زاویه دید، قدرت تفکیک طیفی و مکانی بین دمای سطح حاصل از سنجنده مودیس و محصولات دمای سطح سنجنده مودیس انجام شد. نتایج بیانگر آن است که دقت دمای محاسباتی در مناطق با همگنی بالا (۰/۹۰ تا ۱/۰۰) با پارامتر میانگین اختلاف‌ها به ترتیب دارای دقت ۰/۶ و ۰/۹۴ درجه کلون در تصویربرداری اول و دوم لندست است که در بازه خطای زیر یک درجه کلون دمای سنجنده مودیس است. همچنین دقت دمای محاسباتی در مناطق با همگنی بالا با پارامتر ریشه میانگین مربع خطابه ترتیب دارای دقت ۱/۶۳ و ۱/۲۷ درجه کلون در تصویربرداری اول و دوم لندست ۸ بود. با توجه به این‌که دمای سطح حاصل از مودیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است ولی این دما، متوسط دما برای یک منطقه یک کیلومتر در یک کیلومتر است، از این‌رو هر دمای سطح مودیس برابر با ۱۰۰ مقدار دمای لندست ۸ در سطح یک پیکسل مودیس است که این امر نتیجه اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده است. بنابراین دمای سطح حاصل از سنجنده لندست ۸ دقیق‌تر از دمای سنجنده مودیس در مقیاس محلی است. در طی دو دهه گذشته برای محاسبه دمای سطح زمین ۱۸ الگوریتم توسعه داده شده است که این الگوریتم‌ها در چهار دسته: مدل‌های وابسته به گسیلمندی، مدل‌های دو فاکتوره، مدل‌های پیچیده و مدل‌های بر مبنای رادیانس قرار دارند. بررسی نتایج مقایسه‌های انجام‌گرفته بین الگوریتم‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مختلف عملکرد متفاوتی را در موقعیت‌های مختلف با آب‌وهوای متفاوت جغرافیایی دارند (۳۵).

پژوهش حاضر مقایسه انواع الگوریتم‌های محاسبه LST برای تصاویر سنجنده MODIS و تعیین بهترین الگوریتم برای استان آذربایجان شرقی است که تصاویر این سنجنده به دلیل وسعت بالای منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت و از



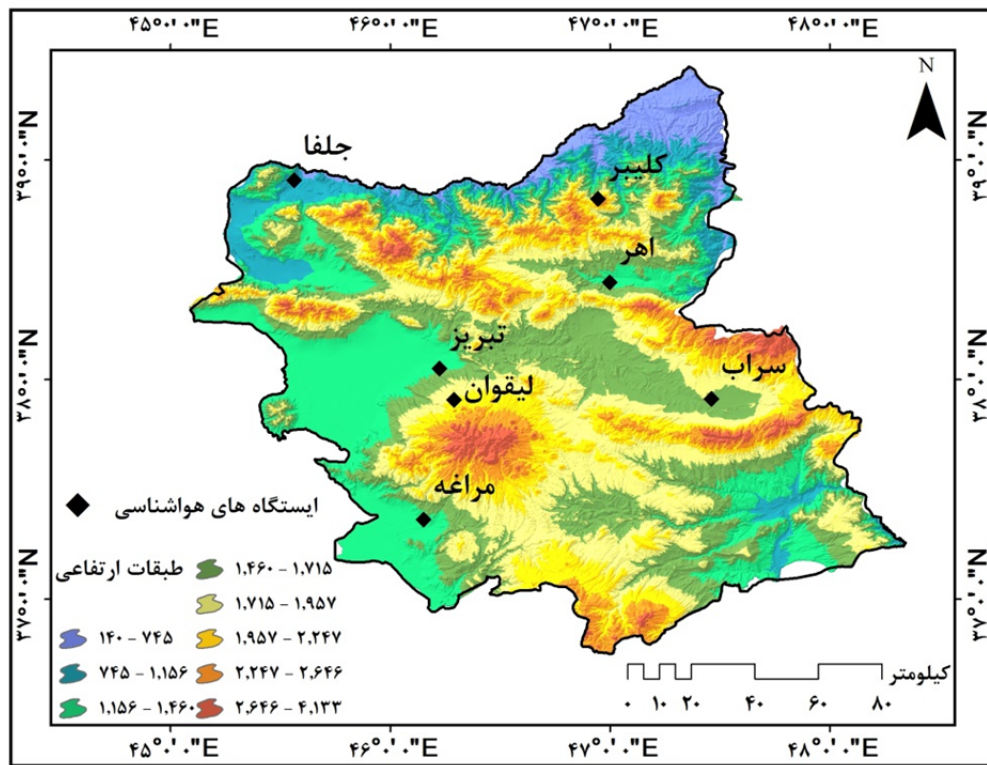
شکل ۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به دو بخش ماهواره‌ای و زمینی تقسیم می‌شود. در این میان، تصویر سنجنده MODIS به‌عنوان داده ماهواره‌ای برای منطقه مورد مطالعه برای روز ۷ ژوئن سال ۲۰۱۸ مصادف با ۱۷ خرداد ۱۳۹۷ تهیه شد. پس از تهیه تصویر، انواع تصحیحات هندسی و

رادیومتریک بر روی تصویر مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار ENVI انجام شد. همچنین از داده‌های زمینی مقادیر درجه حرارت در عمق ۵ سانتی‌متری خاک از ۶ ایستگاه هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه برای یک دوره سه‌ماهه از سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی برای ارزیابی دقت نتایج به‌دست آمده تهیه شد.



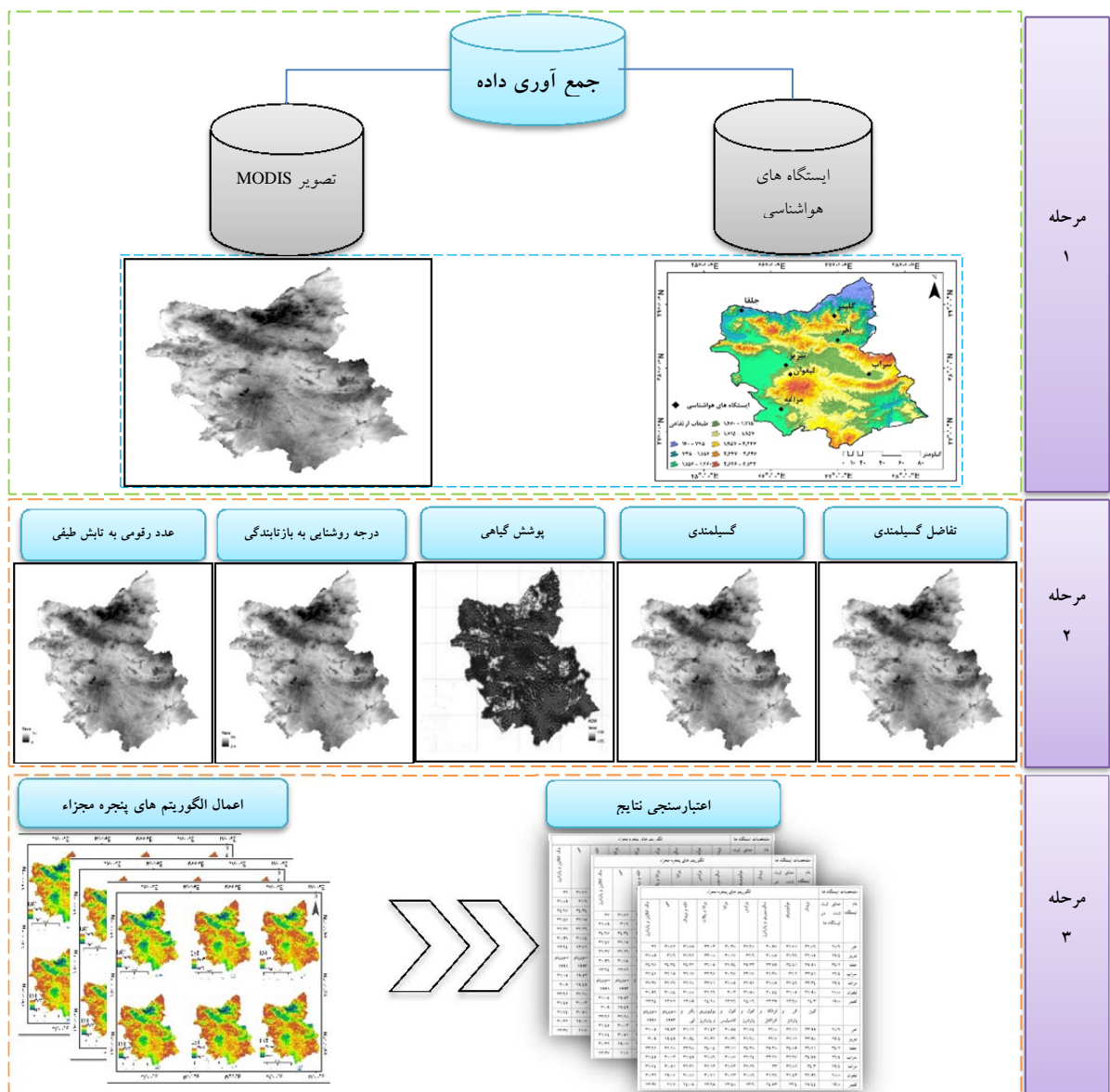
شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

Fig 2. Location of meteorological stations in the study area

سنجده مودیس است. از این رو ۱۸ الگوریتم پنجره مجزاء برای محاسبه دمای سطح زمین مورد استفاده قرار گرفتند. مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. جدول‌های ۱ و ۲ نشان‌دهنده انواع الگوریتم‌ها و ضرایب مورد استفاده آن‌ها است.

روش تحقیق

پژوهش‌های متعددی برای توسعه الگوریتم‌های محاسبه دمای سطح زمین LST انجام شده و منجر به ارائه الگوریتم‌های متفاوتی گردیده است (۶، ۱۲، ۴۶). هدف پژوهش حاضر تعیین بهترین الگوریتم محاسبه دمای سطح زمین برای تصاویر



شکل ۳. مروری بر روش تحقیق
Fig 3. Overview of the methodology

جدول ۱. نام روش، آیتم‌های مورد ارزیابی و سال ارائه

Table 1. Method name, items evaluated and year of presentation

نام روش	آیتم‌های مورد ارزیابی
(۳۴)	$\Delta\varepsilon =$ اختلاف گسیلمندی بین باندهای ۳۱ و ۳۲ T_{31} = دمای روشنایی باند ۳۱ ε = گسیلمندی سطح
(۳۴)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۷)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۳۳)	$T_0 = 273/16$ $T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ $\varepsilon_{32} - \varepsilon_{31}$ = میانگین گسیلمندی سطح برای هر دو باند حرارتی
(۴۴)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۵۰)	$\Delta\varepsilon =$ اختلاف گسیلمندی بین باندهای ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح
(۳۲)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ $a_0 - a_1 - a_2$ = ضرایب ثابت
(۳۶)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۲۵)	P_v = درصد پوشش گیاهی $T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۳۳)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۴۵)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ $\varepsilon_{32} - \varepsilon_{31}$ = میانگین گسیلمندی سطح برای هر دو باند حرارتی
(۴۶)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح
(۱۲)	$\Delta\varepsilon =$ اختلاف گسیلمندی بین باندهای ۳۱ و ۳۲ $T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح
(۱۸)	$\Delta\varepsilon =$ اختلاف گسیلمندی بین باندهای ۳۱ و ۳۲ $T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۶)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح
(۳۶)	$\Delta\varepsilon =$ اختلاف گسیلمندی بین باندهای ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح t_{31} (ضریب عبور) = ۰/۸۵۷۲۳۷ t_{32} (ضریب عبور) = ۰/۷۷۸۰۵۸
(۴۸)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ $\varepsilon_{32} - \varepsilon_{31}$ = میانگین گسیلمندی سطح برای هر دو باند حرارتی
(۱۲)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲
(۳۶)	$T_{32} - T_{31}$ = دمای روشنایی باند ۳۱ و ۳۲ ε = گسیلمندی سطح

عدم قطعیت در نتایج به شمار می‌آید (۴۷). برای حل این مشکل می‌توان مناطقی که از پوشش گیاهی یکنواختی برخوردارند را دسته‌بندی نموده و یک کلاس مشخصی به آن اختصاص داد و سپس ارتباط این مقادیر و دمای سطح را مورد بررسی قرار داد. به منظور نشان دادن مناطقی که دارای پوشش گیاهی یکنواخت‌اند شاخص کسری پوشش گیاهی استفاده می‌شود که با استفاده از نرمال‌سازی مقادیر NDVI می‌توان به این شاخص دست‌یافت (۹). در مناطق با پوشش گیاهی زیاد و متنوع، حداکثر مقدار NDVI با سطوح دارای ۱۰۰٪ پوشش گیاهی در ارتباط است و مناطقی که دارای پوشش گیاهی کمتری می‌باشند، مقادیر کمتری را به خود اختصاص داده و مقدار کسری پوشش گیاهی آن‌ها نیز کمتر از ۱ است (۱۴) و (۱۹). در برآورد گسیلمندی سطحی از روش آستانه گذاری شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index) جهت مشخص نمودن ویژگی‌های خاک در هر پیکسل و محاسبه میزان گسیلمندی و اختلاف گسیلمندی، توان تشعشعی به سه دسته تقسیم می‌شوند (۴۳). $NDVI < 0.2$ به عنوان خاک خشک در نظر گرفته شده و توان تشعشعی برای آن معادل 0.978 لحاظ می‌گردد. $NDVI > 0.5$ به پیکسل‌هایی با تراکم پوشش گیاهی بالاتر مربوط شده و توان تشعشعی برای آن 0.985 در نظر گرفته می‌شود. $0.2 < NDVI < 0.5$ بر اساس ترکیبی از پیکسل‌های مربوط به پوشش گیاهی و خاک است و توان تشعشعی برای آن‌ها با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه گردید.

$$\varepsilon = \varepsilon_{Veg} P_V + \varepsilon_{Soil} (1 - P_V) \quad [3]$$

در رابطه ۳، P_V نسبت پوشش گیاهی است که مقدار آن با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردید.

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad [4]$$

$$NDVI_{max} = 0.5$$

$$NDVI_{min} = 0.2$$

شاخص NDVI از طریق نسبت گیری باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به دست می‌آید که رابطه آن برای سنجنده

تبدیل ارزش‌های رقومی (DN) به تابش طیفی

برای تبدیل ارزش‌های رقومی به تابش طیفی برای باندهای حرارتی تصاویر سنجنده MODIS رابطه زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$L_\lambda = \frac{[(L_{max} - L_{min})]}{[(QCal_{max} - QCal_{min}) \times QCal]} + L_{min} \quad [1]$$

در این رابطه؛ $QCal$ مقدار ارزش رقومی تصویر، $QCal_{min}$ کمترین مقدار درجه خاکستری و $QCal_{max}$ بیشترین مقدار درجه خاکستری است. همچنین L_{max} و L_{min} تابش طیفی مرجع باند ۳۱ و ۳۲ در DN به ترتیب معادل صفر و ۲۵۵ برحسب $(Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m^{-1})$ است. مقادیر L_{min} و L_{max} در Header file تصاویر موجود هستند.

تبدیل تابش طیفی به بازتاب طیفی

با استفاده از رابطه پلانک، داده‌های حرارتی سنجنده MODIS، زمانی که توان تشعشعی آن‌ها حداکثر یک در نظر گرفته شوند قابلیت تبدیل از تابش طیفی به بازتاب طیفی را دارند. که با استفاده از رابطه زیر این کار انجام شد.

$$TB = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{I_\lambda} + 1 \right)} \quad [2]$$

در این رابطه؛ جایی که T_b مقدار دمای مؤثر در ماهواره بر حسب درجه کلونین، $L_\lambda = (Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m^{-1})$ رادیانس طیفی و K_1 and $K_2 = (Wm^{-2}Sr^{-1}\mu m^{-1})$ ضرایب کالیبراسیون ثابت برحسب نانومتر.

محاسبه گسیلمندی سطح

نسبت بین گسیل از یک شی به گسیل از جسم سیاه در دمای ثابت را گسیلمندی می‌گویند. از موارد بسیار مهم و ضروری برای تبدیل دمای روشنایی به دمای جنبشی سطح، مقدار گسیلمندی است. یکی از روش‌های برآورد گسیلمندی، روش آستانه گذاری شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) است. پوشش گیاهی از لحاظ حجم پوشش متنوع است، از این رو تغییرات دمایی آن نیز متفاوت بوده و از عوامل

خورشیدی اگرواتمسفریک و θ زاویه زینتی خورشید به درجه است که مقدار آن در هدر فایل تصاویر موجود است (۵۱). همه ثابت‌های فوق از MODIS Project (Science Office, 2002) قابل استخراج هستند به‌جز دلتا که از هدر فایل مربوط به تصاویر MODIS به دست آمد. در این مرحله نسبت به جایگذاری ضرایب به‌دست‌آمده در بالا، در الگوریتم‌های محاسبه LST در جدول ۲ در نرم‌افزار ArcGIS اقدام شد.

MODIS طبق رابطه ۵ است.

$$NDVI = \frac{\rho(\text{Band}2) - \rho(\text{Band}1)}{\rho(\text{Band}2) + \rho(\text{Band}1)} \quad [5]$$

در این رابطه؛ ρ ضریب انعکاس باندهای چندطیفی است و مقدار آن با استفاده از رابطه ۶ قابل محاسبه است.

$$\rho = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \theta_s} \quad [6]$$

در این رابطه؛ ρ ضریب انعکاس باندهای رادیانس طیفی، L_{λ} فاصله زمین تا خورشید، $ESUN_{\lambda}$ میانگین بازتابندگی

جدول ۲. انواع الگوریتم‌های محاسبه دمای سطح زمین

Table 2. Various types of algorithms for land surface temperature calculation

الگوریتم‌های پنجره مجزاء	
$TS = T_{31} + 3.33(T_{31} - T_{32}) \times \frac{5.5 - \epsilon_{31}}{4.5} + 0.75T_{31} \times \Delta\epsilon$	(۳۴)
$TS = 1.035T_{31} + 3.046 * (T_{31} - T_{32}) - 283.93 + 273$	(۳۴)
$TS = 1.274 + P \times \frac{T_{31} - T_{32}}{2} + M \times (T_{31} - T_{32})/2$	(۷)
$T_s = 3.45 \times \frac{T_{31} - T_0}{\epsilon_{31}} - 2.45 \times \frac{T_{32} - T_0}{\epsilon_{32}} + 40 \times (1 - \epsilon_{31})/\epsilon_{31} + T_0$	(۳۳)
$T_s = T_{31} + 1.76 \times (T_{31} - T_{32})$	(۴۴)
$T_s = 3.78T_{31} - 2.78T_{32} + 50 \times \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right) - 300 \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$	(۵۰)
$T_s = a_0 + a_1 \times T_{31} + a_2 \times T_{32}$	(۳۲)
$T_s = 1.0162T_{31} + 2.657 \times (T_{31} - T_{32}) + 0.5265 \times (\cos\theta - 1) \times (T_{31} - T_{32}) - 4.58$	(۳۶)
$TS = (0.5P_V + 3.1) \times T_{31} + (-0.5P_V - 2.1) \times T_{32} + 3.1 - 5.5P_V$	(۲۵)
$T_s = bT_{31} + cT_{32} + d$	(۳۳)
$T_s = T_{31} + 1.06 \times (T_{31} - T_{32}) + 0.46 \times (T_{31} - T_{32})^2 + 53 \times (1 - \epsilon_{31}) - 53 \times (\epsilon_{31} - \epsilon_{32})$	(۴۵)
$T_s = T_{31} + 1.06 \times (T_{31} - T_{32}) + 0.46 \times (T_{31} - T_{31})^2 + 53(1 - \epsilon) - 53\Delta\epsilon$	(۴۶)
$T_s = T_{31} + 1 + 0.58 \times (T_{31} - T_{32}) \times (T_{31} - T_{32}) + 40 \times (1 - \epsilon) - 75\Delta\epsilon$	(۱۲)
$T_s = T_{31} + A(T_{31} - T_{32}) + B$	(۱۸)
$TS = T_{31} + 1.8 \times (T_{31} - T_{32}) + 48 \times (1 - \epsilon) - 75\Delta\epsilon$	(۶)
$T_s = T_{31} + 1.8 \times (T_{31} - T_{32}) + 48 \times (1 - \epsilon) - 75 \times (\epsilon_{31} - \epsilon_{32})$	(۴۸)
$T_s = 0.39T_{31}^2 + 2.34T_{31} - 0.78T_{31}T_{32} - 1.34T_{32} + 0.39T_{32}^2 + 0.56$	(۱۲)
$LST = \frac{C_{32}(B_{31} - D_{31}) - C_{31}(B_{32} + D_{32})}{C_{32}A_{31} - C_{31}A_{32}}$	(۳۶)

اختلاف گسیلمندی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS است.

$$\epsilon_{31} = 0.9897 + 0.029\ln(NDVI) \quad [V]$$

$$\epsilon_{32} = 0.97951 + 0.01556\ln(NDVI) \quad [A]$$

$$\Delta\epsilon = 0.01019 + 0.01344 \ln(NDVI) \quad [9]$$

در تمامی رابطه‌های جدول ۲، پارامترهای T_{31} و T_{32} به ترتیب دمای روشنایی باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده مودیس می‌باشند. همچنین ρ_v معرف درصد پوشش گیاهی است که مقدار آن از رابطه ۴ به دست می‌آید. ϵ میانگین گسیلمندی سطح برای باندهای ۳۱ و ۳۲ سنجنده MODIS است. $\Delta\epsilon$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad [14]$$

جایی که A_t مقدار واقعی دما در ایستگاه‌های هواشناسی، F_t مقدار پیش‌بینی شده و به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های پنجره مجزا، N تعداد کل ایستگاه‌های هواشناسی است.

نتایج

نتایج جدول ۴ بیانگر آن است که در بین ۱۸ الگوریتم محاسبه دمای سطح زمین برای تصاویر سنجنده MODIS به ترتیب الگوریتم سوپرینو با مقدار RMSE، ۱/۷۹ بیشترین دقت، الگوریتم کول کاسلیس و پراتا با مقدار RMSE، ۲/۵۸ در جایگاه دوم و همچنین الگوریتم‌های سالیسبوری و سوپرینو با مقدار RMSE، ۲/۷۹ جایگاه سوم را برای محاسبه LST در بین سایر الگوریتم‌ها دارا می‌باشند. الگوریتم کیین با مقدار RMSE، ۵/۲۸ کم‌ترین دقت را برای محاسبه LST به خود اختصاص داده است.

در این مرحله دمای محاسبه‌شده با استفاده از الگوریتم‌های فوق بر اساس درجه کلون است که برای اعتبارسنجی آن با ایستگاه‌های هواشناسی نیاز به مقدار دمای سطح زمین بر حسب درجه سانتی‌گراد است که تبدیل فوق‌الذکر با استفاده از رابطه ۷ انجام شد.

$$LST^\circ = LST^k - 273.15 \quad [7]$$

ارزش هر یافته علمی به‌دقت و صحت آن است، بر این اساس برای مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌های محاسبه دمای سطح زمین با دماهای ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی از رابطه‌های ۱۱ تا ۱۴ استفاده شد.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad [11]$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad [12]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad [13]$$

جدول ۳. دماهای ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی و دماهای به‌دست‌آمده با استفاده از الگوریتم‌های پنجره مجزا در هر یک از ایستگاه‌ها

Table 3. The recorded temperatures at meteorological stations and the obtained temperatures using split-window algorithms

الگوریتم‌های پنجره مجزا									مشخصات ایستگاه‌ها	
(۳۴)	(۳۶)	(۳۲)	(۳۳)	(۳۳)	(۳۴)	(۴۶)	(۴۸)	(۵۰)	دمای ثبت‌شده در ایستگاه‌ها	نام ایستگاه
۳۲	۳۱/۷۲	۳۱/۷۵	۳۳/۰۳	۳۰/۳۸	۳۲/۶۱	۳۰/۹۷	۳۱/۷۱	۳۲/۸۶	۲۸/۶	اهر
۳۱/۸۹	۳۱/۶	۳۱/۶۲	۳۳/۰۸	۳۰/۱۷	۳۲/۶	۳۰/۸۵	۳۱/۶۶	۳۲/۸۵	۲۹/۴	تبریز
۳۴/۶۷	۳۴/۳۴	۳۴/۳۲	۳۶/۰۵	۳۲/۹۴	۳۵/۳۳	۳۳/۵۹	۳۴/۴۱	۳۵/۵۸	۳۴/۲	جلفا
۳۲/۴۷	۳۲/۱۵	۳۲/۱۷	۳۳/۶۷	۳۰/۶۷	۳۳/۱۷	۳۱/۳۸	۳۲/۲	۳۳/۴۱	۲۶/۴	سراب
۳۲/۳۷	۳۲/۲۶	۳۲/۲۸	۳۳/۷۱	۳۱/۸۵	۳۲/۹۲	۳۱/۸۹	۳۲/۴۶	۳۳/۳۴	۲۹/۴	مراغه
۳۰/۹۶	۳۰/۸۴	۳۰/۸۸	۳۲/۲۶	۳۰/۳	۳۱/۵۸	۳۰/۴۴	۳۱/۰۵	۳۱/۹۸	۲۸/۸	لیقوان
۲۳/۶۴	۲۳/۷۲	۲۳/۸۹	۲۴/۲۸	۲۳/۶۶	۲۴/۰۶	۲۳/۳۹	۲۳/۶۸	۲۴/۳	۱۹/۸	کلپیر
(۳۵)	(۵۲)	(۷)	(۶)	(۱۲)	(۱۲)	(۱۸)	(۲۵)	(۳۶)	دمای ثبت‌شده در ایستگاه‌ها	نام ایستگاه
۳۱/۰۵	۲۹/۵۳	۳۱/۱۲	۳۱/۴۳	۳۰/۵۵	۳۱/۷۴	۳۲/۸	۳۲/۱۱	۳۳/۹۹	۲۸/۶	اهر
۳۰/۹	۲۹/۴۹	۳۰/۹۴	۳۱/۳۲	۳۰/۳۶	۳۱/۶۸	۳۲/۷	۳۲/۱۲	۳۳/۹۸	۲۹/۴	تبریز
۳۳/۶۲	۳۲/۲۸	۳۳/۶۸	۳۴/۰۴	۳۳/۱۱	۳۴/۳۸	۳۵/۳۸	۳۴/۸۹	۳۶/۷۱	۳۴/۲	جلفا
۳۱/۴۵	۳۰/۰۳	۳۱/۴۵	۳۱/۸۶	۳۰/۸۷	۳۲/۲۴	۳۳/۲۷	۳۲/۶۷	۳۴/۵۵	۲۶/۴	سراب
۳۱/۷۴	۳۰/۵۱	۳۲/۳۱	۳۲/۱۳	۳۱/۷۳	۳۲/۲۶	۳۳	۳۲/۸۲	۳۴/۳	۲۹/۴	مراغه
۳۰/۳۲	۲۹/۰۷	۳۰/۸۱	۳۰/۷۱	۳۰/۲۳	۳۰/۸۶	۳۱/۶۶	۳۱/۴۳	۳۲/۹۶	۲۸/۸	لیقوان
۲۳/۳۷	۲۱/۷	۲۴/۰۵	۲۳/۶۵	۲۳/۴۸	۲۳/۶	۲۴/۵۳	۲۳/۴	۲۵/۴۴	۱۹/۸	کلپیر

جدول ۴. نتایج حاصل از ارزیابی دقت برای هر یک از الگوریتم‌ها
 Table 4. The results of the accuracy assessment for each algorithms

ردیف	نام الگوریتم	MAD	MSE	RMSE	MAPE
۱	(۵۰)	۳/۹۶	۱۸/۱۴	۴/۲۵	۱۴/۹۱
۲	(۴۸)	۲/۹۳	۱۱/۱۳	۳/۳۳	۱۱/۲۸
۳	(۴۶)	۲/۴۴	۷/۸۰	۲/۷۹	۹/۴۵
۴	(۳۴)	۳/۶۶	۱۵/۹۵	۳/۹۹	۱۳/۸۵
۵	(۳۳)	۲/۲۷	۶/۶۷	۲/۵۸	۸/۸۱
۶	(۳۳)	۴/۲۱	۲۰/۰۰	۴/۴۷	۱۵/۷۵
۷	(۳۲)	۲/۹۰	۱۱/۰۷	۳/۳۲	۱۱/۲۰
۸	(۳۶)	۲/۸۶	۱۰/۷۶	۳/۲۸	۱۱/۰۲
۹	(۳۴)	۳/۰۵	۱۱/۸۶	۳/۴۴	۱۱/۶۷
۱۰	(۳۶)	۵/۰۴	۲۷/۹۸	۵/۲۸	۱۸/۸۹
۱۱	(۲۵)	۳/۲۶	۱۳/۰۱	۳/۶۰	۱۲/۳۱
۱۲	(۱۸)	۳/۸۲	۱۷/۲۳	۴/۱۵	۱۴/۴۹
۱۳	(۱۲)	۲/۸۸	۱۰/۸۶	۳/۲۹	۱۱/۰۶
۱۴	(۱۲)	۲/۲۷	۶/۷۰	۲/۵۸	۸/۸۱
۱۵	(۶)	۲/۶۹	۹/۶۳	۳/۱۰	۱۰/۴۱
۱۶	(۷)	۲/۶۵	۹/۲۹	۳/۰۴	۱۰/۴۳
۱۷	(۵۲)	۱/۴۰	۳/۲۳	۱/۷۹	۵/۳۱
۱۸	(۳۵)	۲/۴۳	۷/۸۰	۲/۷۹	۹/۳۹

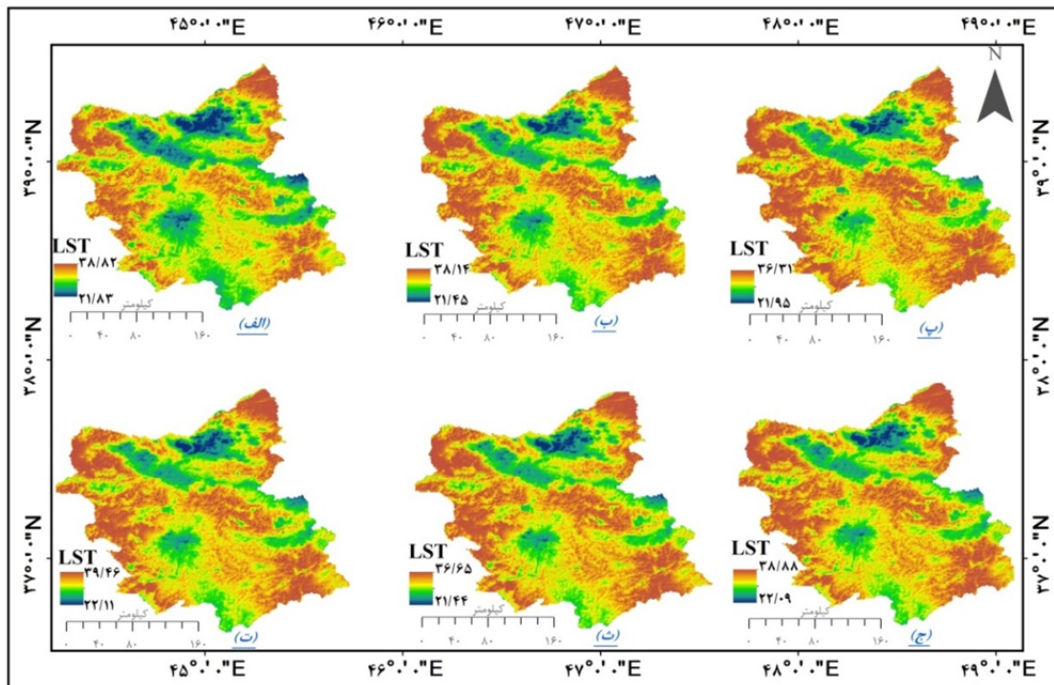
الگوریتم کین و همکاران (۳۶) با مقدار RMSE ۵/۳۹ برای ایستگاه اهر، با مقدار RMSE ۴/۵۸ برای ایستگاه تبریز، با مقدار RMSE ۲/۵۲ برای ایستگاه جلفا، با مقدار RMSE ۸/۱۵ برای ایستگاه سراب، با مقدار RMSE ۴/۹ برای ایستگاه مراغه، با مقدار RMSE ۴/۱۶ برای ایستگاه ليقوان، با مقدار RMSE ۵/۶۴ برای ایستگاه کلیبر پایین‌ترین مقدار دقت را برای محاسبه دمای سطح زمین به خود اختصاص داده است. به علت وجود تنوع اقلیمی در منطقه مورد مطالعه کمترین مقادیر درجه حرارت در تمامی الگوریتم‌ها مربوط به قسمت‌هایی است که دارای ارتفاع بالا و پوشش گیاهی متراکم هستند، برخلاف مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و نقاط با ارتفاع زیاد مقدار دمای سطح در نواحی با ارتفاع پایین و فاقد پوشش گیاهی متراکم رو به افزایش است.

همچنین به علت وجود تنوع اقلیمی در منطقه مورد مطالعه مقدار میانگین RMSE برای هر یک از ایستگاه‌ها نیز به‌طور جداگانه محاسبه شد تا کارایی هر یک از الگوریتم‌ها در اقلیم‌های متفاوت نیز سنجیده شود، که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. طبق نتایج حاصل از آنالیز آماره‌های استفاده شده در این مطالعه، همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، الگوریتم سوبرینو (۴۵) با مقدار خطای جذر میانگین مربعات RMSE ۰/۹۳ برای ایستگاه اهر، با مقدار RMSE ۰/۰۹ برای ایستگاه تبریز، با مقدار RMSE ۳/۶۳ برای ایستگاه سراب، با مقدار RMSE ۱/۱۱ برای ایستگاه مراغه، با مقدار RMSE ۰/۲۷ برای ایستگاه ليقوان، با مقدار RMSE ۱/۹ برای ایستگاه کلیبر، الگوریتم اولته و ویدال با مقدار RMSE ۰/۱۲ برای ایستگاه جلفا، نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارای دقت بیشتری برای محاسبه دمای سطح زمین می‌باشند. همچنین

جدول ۵. مقدار خطای جذر میانگین مربعات برای هر الگوریتم در تمام ایستگاهها

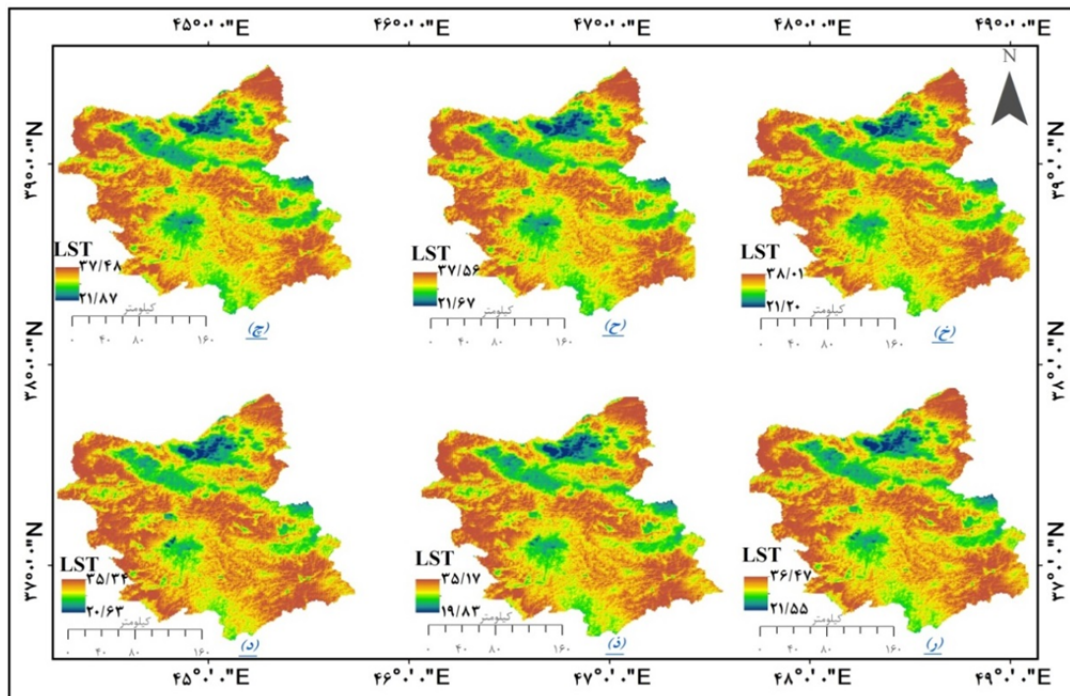
Table 5. The Root-mean-square deviation (RMSE) value for each algorithm at all stations

ردیف	نام ایستگاهها نام الگوریتم	اهر	تبریز	جلفا	سراب	مراغه	لیقوان	کلبر
۱	(۵۰)	۴/۲۶	۳/۴۵	۱/۳۸	۷/۰۱	۳/۹۴	۳/۱۸	۴/۵
۲	(۴۸)	۳/۱۱	۲/۲۶	۰/۲۱	۵/۸	۳/۰۶	۲/۲۵	۳/۸۸
۳	(۴۶)	۲/۳۷	۱/۴۵	۰/۶۱	۴/۹۸	۲/۴۹	۱/۶۴	۳/۵۹
۴	(۳۴)	۴/۰۱	۳/۲	۱/۱۳	۶/۷۷	۳/۵۲	۲/۷۸	۴/۲۶
۵	(۳۳)	۱/۷۸	۰/۷۷	۱/۲۶	۴/۲۷	۲/۴۵	۱/۵	۳/۸۶
۶	(۳۳)	۴/۴۳	۳/۶۸	۱/۸۵	۷/۲۷	۴/۳۱	۳/۴۶	۴/۴۸
۷	(۳۲)	۳/۱۵	۲/۲۲	۰/۱۲	۵/۷۷	۲/۸۸	۲/۰۸	۴/۰۹
۸	(۳۶)	۳/۱۲	۲/۲	۰/۱۴	۲/۸۶	۲/۸۶	۲/۰۴	۳/۹۲
۹	(۳۴)	۳/۴	۲/۴۹	۰/۴۷	۶/۰۷	۲/۹۷	۲/۱۶	۳/۸۴
۱۰	(۳۶)	۵/۳۹	۴/۵۸	۲/۵۱	۸/۱۵	۴/۹	۴/۱۶	۵/۶۴
۱۱	(۲۵)	۳/۵۱	۲/۷۲	۰/۶۹	۶/۲۷	۳/۴۲	۲/۶۳	۳/۶
۱۲	(۱۸)	۴/۲	۳/۳	۱/۱۸	۶/۸۷	۳/۶	۲/۸۶	۴/۷۳
۱۳	(۱۲)	۳/۱۴	۲/۲۸	۰/۱۸	۵/۸۴	۲/۸۶	۲/۰۶	۳/۸
۱۴	(۱۲)	۱/۹۵	۰/۹۶	۱/۰۹	۴/۴۷	۲/۳۳	۱/۴۳	۳/۶۸
۱۵	(۶)	۲/۸۳	۱/۹۲	۰/۱۶	۵/۴۶	۲/۷۳	۱/۹۱	۳/۸۵
۱۶	(۷)	۲/۵۲	۱/۵۴	۰/۵۲	۵/۰۵	۲/۹۱	۲/۰۱	۴/۲۵
۱۷	(۵۲)	۰/۹۳	۰/۰۹	۱/۹۲	۳/۶۳	۱/۱۱	۰/۲۷	۱/۹
۱۸	(۳۵)	۲/۴۵	۱/۵	۰/۵۸	۵/۰۵	۲/۳۴	۱/۵۲	۳/۵۷



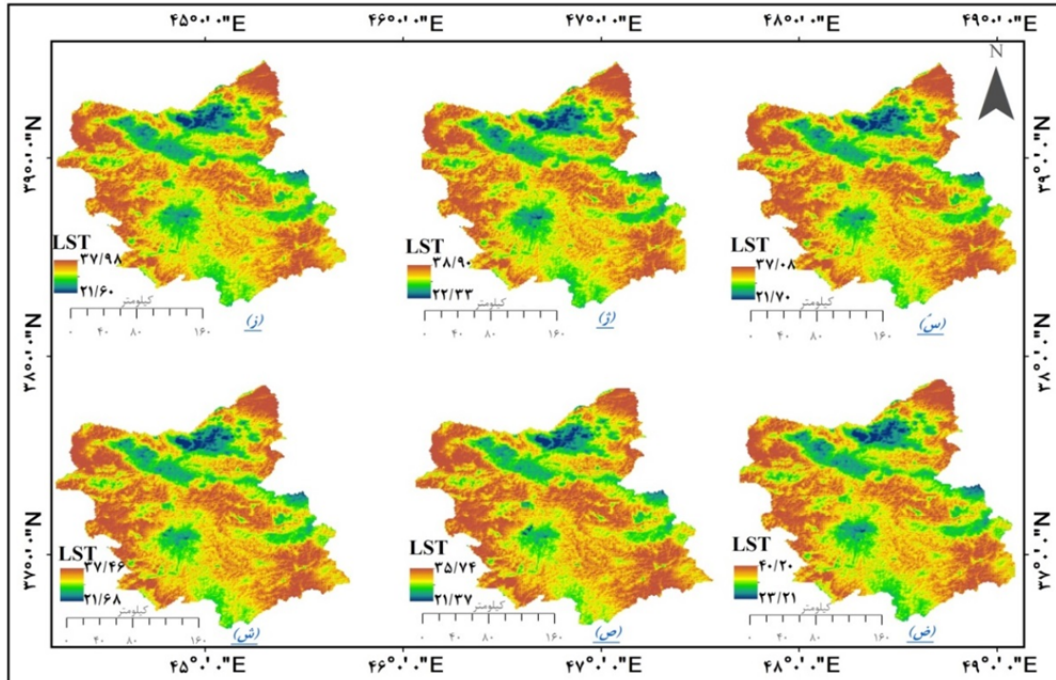
شکل ۴. مقدار دمای سطح زمین برای الگوریتم؛ (الف) پرایس، (ب) مکالین و پارتنرز، (پ) بکر و لی، (ت) پراتا، (ث) سوبرینو، (ج) ویدال

Fig 4. Land surface temperature (LST) value for each algorithm; (A) Price, (B) Mc Calin and Partners, (C) Becker and Lee, (D) Prata, (E) Sobrino, (F) Vidal



شکل ۵. مقدار دمای سطح زمین برای الگوریتم؛ (چ) اوتله و ویدال، (ح) می کر و پارتنرز، (د) پراتا، (ذ) سورینو، (ز) سالیسبوری و پارتنرز

Fig 5. Land surface temperature (LST) value for each algorithm; (G) Oettle and Vidal, (H) May, (I) Kerr and Partners, (J) Prata, (K) Sorino, (L) Salisbury and Partners



شکل ۶. مقدار دمای سطح زمین برای الگوریتم؛ (ز) کول و پارتنرز، (ژ) فرانکا و کراکلند، (س) بولیووری و پارتنرز، (ش) یولیویری، (ص) کول و کاسیلیس، (ض) کین

Fig 6. Land surface temperature (LST) value for each algorithm; (M) Cole and Partners, (N) Franca and Cracknell, (O) Bulivoury and Partners, (P) Ulivieri, (Q) Cole and Kasilis, (R) Qin

بحث و نتیجه گیری

استفاده از ایستگاه‌های زمینی برای محاسبه و بررسی شاخص‌های اقلیمی مانند دما علیرغم دقت مناسب آن‌ها، دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. از جمله مهم‌ترین این محدودیت‌ها می‌توان به گسسته بودن این اطلاعات اشاره کرد که باعث می‌شود در محاسبه دما خطای درونیابی برای بخش‌هایی از سطح زمین که با ایستگاه هواشناسی فاصله دارند به بیش از ۵ درجه سانتی‌گراد برسد. علاوه بر این امکان احداث ایستگاه‌های هواشناسی به دلیل شرایط توپوگرافی و صعب‌العبور بودن در بخش‌های زیادی از سطح زمین وجود ندارد یا دسترسی به داده‌های این ایستگاه‌ها به راحتی امکان‌پذیر نخواهد بود (۵). از این رو به‌کارگیری تکنولوژی سنجش‌از‌دور می‌تواند راهگشای بسیاری از مشکلات در این زمینه باشد. این تکنولوژی ابزارها و امکانات بسیاری را برای تخمین پارامترهای مربوط به هواشناسی در بخش‌های عظیمی از سطح زمین فراهم می‌کند و در طولانی‌مدت می‌تواند نیاز به داده‌های زمینی را بسیار کاهش دهد. در این مطالعه از ۱۸ الگوریتم پنجره مجزا برای محاسبه دمای سطح زمین و باهدف تعیین بهترین الگوریتم محاسبه LST برای تصاویر سنجنده MODIS استفاده شد. بررسی اطلاعات به‌دست‌آمده از مقایسه الگوریتم‌های پنجره مجزا (شکل‌های ۴، ۵ و ۶) بیانگر تبعیت کلی دماهای محاسبه‌شده از شرایط توپوگرافی منطقه است، به طوری که تقریباً کمترین مقادیر درجه حرارت در تمام الگوریتم‌ها مربوط به قسمت‌های با ارتفاع بیشتر (کوهستانی) و پوشش سبز منطقه است و مقادیر دما در نواحی دارای ارتفاع پایین و فاقد پوشش گیاهی متراکم افزایش یافته است. تنوع اقلیمی موجود در استان آذربایجان شرقی باعث شده است تا هرکدام از الگوریتم‌ها کارایی خاصی در نقاط اقلیمی متفاوت داشته باشند. به طوری که برای شهرستان اهر که دارای اقلیم سرد و کوهستانی است و مشخصه اصلی آن رشته‌کوه قارداغ است الگوریتم سوبرینو و همکاران (۴۵) با میانگین RMSE ۰/۹۳ برای محاسبه LST انتخاب شد. همچنین این الگوریتم برای شهرستان تبریز که به‌مانند شهرستان اهر از اقلیم سرد و

کوهستانی برخوردار است و از سمت شمال، جنوب و شرق به کوهستان و از سمت غرب به زمین‌های هموار و شورزار آجی چای محدود می‌شود و به شکل یک چاله نسبتاً بزرگ و یا یک جلگه بین کوهی درآمده‌است و دارای زمستان‌های بسیار سرد و تابستان‌های گرم و خشک است با RMSE ۰/۰۹ برای محاسبه دمای سطح زمین مناسب تشخیص داده شد. برای شهرستان جلفا که از نظر ارتفاع در بین سایر شهرستان‌های استان آذربایجان شرقی کمترین ارتفاع را به خود اختصاص داده است و از اقلیم نیمه‌خشک و سرد برخوردار بوده و دارای نوسان درجه حرارت زیاد و زمستان‌های سخت و شدید است الگوریتم اتله و ویدال با RMSE ۰/۱۲ برای این ایستگاه انتخاب شد. الگوریتم می با میانگین RMSE ۲/۸۶ برای ایستگاه سراب برای محاسبه LST منتخب گردید که به دلیل قرار گرفتن در بین رشته‌کوه بزقوش در جنوب و ارتفاعات سبلان در شمال، دارای اقلیم سرد و کوهستانی است. مجاورت شهرستان مراغه از سمت غرب با دریاچه ارومیه، از شمال با قله سه‌سهند باعث شده است این شهرستان از نظر اقلیمی به صورت اقلیم معتدل و نسبتاً مرطوب درآید و الگوریتم سوبرینو با مقدار RMSE ۱/۱۱ به‌عنوان برترین الگوریتم برای این اقلیم برگزیده شد. همچنین این الگوریتم برای ایستگاه لیقوان نیز که دارای آب‌وهوای کوهستانی و معتدل می‌باشد با RMSE ۰/۲۷ برای محاسبه LST انتخاب شد. برای ایستگاه کلپیر که دارای اقلیم معتدل کوهستانی است و سراسر منطقه دارای جنگل‌های زیبا و مراتع سرسبز است الگوریتم سوبرینو و همکاران (۴۳ و ۴۵) با مقدار RMSE ۱/۹ بهترین الگوریتم برای محاسبه دمای سطح زمین تشخیص داده شد. همچنین الگوریتم مذکور برای کل استان آذربایجان شرقی که به‌طور کلی دارای اقلیم سرد و خشک است برای محاسبه LST با RMSE ۱/۷۹ به‌عنوان برترین الگوریتم شناخته شد. این استان همواره تحت تأثیر بادهای سرد شمالی و سیبری و بادهای مرطوب دریای سیاه و مدیترانه و اقیانوس اطلس قرار گرفته است. علاوه بر این بادهای محلی نیز تحت تأثیر شرایط طبیعی استان از سوی کوهستان‌های بلند و دریاچه‌های ارومیه و خزر

دمای محاسبه شده با استفاده از الگوریتم‌های پنجره مجزا و ایستگاه‌های هواشناسی، تصاویر حرارتی سنجنده‌های می‌تواند منبع مهمی برای محاسبه دمای سطح زمین در مناطق فاقد ایستگاه هواشناسی باشند.

بهرتر است در تحقیقات پیش رو برای محاسبه LST با دقت بالا پارامترهایی مانند درجه حرارت هوا، رطوبت خاک، زبری و صافی، شرایط اتمسفری، زاویه تابش خورشید، جهت باد نیز مدنظر قرار گیرند.

References

1. Alsdorf DE, Rodríguez E, Lettenmaier DP. 2007. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, 45(2): 1-24. doi:https://doi.org/10.1029/2006RG000197.
2. Asadzadeh A, Faith H, Shawl M. 2015. Spatial Inequalities in the Development of the Agricultural Sector of East Azerbaijan Province. *Journal of Space Economics and Rural Development*, 4(2): 41-45. (In Persian)
3. Alavi Panah SK. 2016. *Thermal Remote Sensing and its Application in Earth Sciences*, Third Edition, University of Tehran Press, 666 p. (In Persian)
4. Bakhtiari B, Delgarm S, Rezazadeh M. 2016. Selecting the most appropriate split-window algorithm for land surface temperature estimation using MODIS sensor (Case study: Kerman plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2): 81-98. (In Persian)
5. Benali A, Carvalho AC, Nunes JP, Carvalhais N, Santos A. 2012. Estimating air surface temperature in Portugal using MODIS LST data. *Remote Sensing of Environment*, 124: 108-121. doi:https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.024.
6. Bulivoury RE, Hartford RA, Eidenshink JC. 1993. Using NDVI to assess departure from average greenness and its relation to the fire business. *Intermountain Research Station: USDA Forest Service*, 8: 121-137.
7. Becker F, Li Z-L. 1990. Towards a local split window method over land surfaces. *Remote Sensing*, 11(3): 369-393. doi:https://doi.org/10.1080/01431169008955028.
8. Cao L, Li P, Zhang L, Chen T. 2008. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and vegetation fraction. Paper presented at the The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, 1379-1384.
9. Carlson TN, Ripley DA. 1997. On the relation

به‌سوی دشت‌ها و جلگه‌ها می‌وزند. استان آذربایجان شرقی از لحاظ تقسیم‌بندی اقلیمی جزو مناطق نیمه‌خشک به حساب می‌آید و میانگین بارندگی سالانه ۲۵۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر است. در سال‌های اخیر به دلیل افزایش دمای سطح زمین در این استان روند کاهش در میزان محصولات کشاورزی، کاهش بارش، کاهش سطح آب‌های سطحی و... رخ داده است. از این رو محاسبه دمای سطح زمین با دقت بالا توسط تکنولوژی سنجنش‌ازدور می‌تواند به‌عنوان سیستم پشتیبان برای اجرای برنامه‌ها و هدف‌های برنامه ریزان و مدیران برای مقابله و اندیشیدن راه‌حل برای این مشکلات باشد. مقایسه نتایج پژوهش‌های انجام‌شده جهت محاسبه دمای سطح زمین در اقلیم سرد و کوهستانی (۱۷)، که از تصویر لندست ۸ برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده کرده‌اند بیانگر آن است که مقدار RMSE محاسبه‌شده در تحقیقات آن‌ها به ترتیب برابر ۲ و ۲/۲ درجه است که مقدار بیشتری از RMSE به‌دست‌آمده در این تحقیق برای ایستگاه اهر (۰/۹۳)، برای ایستگاه تبریز (۰/۹۰) و مقدار کمتری از RMSE محاسبه‌شده برای ایستگاه سراب (۲/۸۶) است. همچنین تحقیق انجام‌شده در اقلیم معتدل و کوهستانی (۱۶)، برای محاسبه دمای سطح زمین نشان‌دهنده مقدار RMSE برابر ۱/۶۹ درجه است که نسبت به نتایج پژوهش حاضر مقدار بالاتری را نسبت به ایستگاه مراغه (۱/۱۱)، ایستگاه لیقوان (۰/۲۷) و مقدار کمتری را نسبت به ایستگاه کلیبر (۱/۹) به خود اختصاص داده است. نتایج پژوهش انجام‌شده توسط بختیاری و همکاران (۴)، که از ۱۰ الگوریتم پنجره مجزا به‌منظور محاسبه دمای سطح زمین برای دشت شهرستان کرمان که جزو اقلیم نیمه‌خشک محسوب می‌شود استفاده کرده‌اند بیانگر آن است که الگوریتم کول و کاسیلیس با مقدار MAE ۴/۷۶ بهترین دقت را در بین سایر الگوریتم‌ها دارا است، در حالی که در این پژوهش مقدار RMSE ۰/۱۲ برای ایستگاه جلفا با استفاده از الگوریتم اتله و ویدال (۳۲) به‌دست‌آمده است که نشان‌دهنده دقت بالای این الگوریتم در این اقلیم است.

با توجه به پایین بودن مقدار RMSE محاسبه‌شده بین

10. between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3): 241-252. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).
11. Chehbouni A, Lo Seen D, Njoku EG, Monteny BM. 1996. Examination of the difference between radiative and aerodynamic surface temperatures over sparsely vegetated surfaces. *Remote Sensing of Environment*, 58(2): 177-186. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00037-5).
12. Cole A, Menenti M, Feddes R, Holtslag A. 1994. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1 Formulation. *Journal of Hydrology*, 212(3): 198-212.
13. Coll C, Caselles V, Sobrino JA, Valor E. 1994. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature. *Remote Sensing*, 15(1): 105-122. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169408954054>.
14. Eleftheriou D, Kiachidis K, Kalmintzis G, Kalea A, Bantasis C, Koumadoraki P, Spathara ME, Tsolaki A, Tzampazidou MI, Gemitzi A. 2018. Determination of annual and seasonal daytime and nighttime trends of MODIS LST over Greece - climate change implications. *Science of The Total Environment*, 616-617: 937-947. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.22>.
15. Eskandari S. 2019. Comparison of different algorithms for preparing land cover map in sensitive habitats of Zagros using Sentinel 2 satellite image (Case study: part of Ilam province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(1): 72-87. (In Persian)
16. Emami H, Mojarradi B, Safari A. 2016. Presenting a method for assessing the accuracy and validation of land surface temperature from remote sensing data: a case study of Fars province. *Journal of Mapping Science and Technology*, 6(1): 1-17. (In Persian)
17. Feizizadeh B, Blaschke T, Nazmfar H, Akbari E, Kohbanani HR. 2013. Monitoring land surface temperature relationship to land use/land cover from satellite imagery in Maraqeh County, Iran. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(9): 1290-1315. doi:<https://doi.org/10.1080/09640568.2012.71788>.
18. Faizizadeh B, Dideban Kh, Gholamnia Kh. 2016. Estimation of land surface temperature using Landsat 8 satellite images and a split-window algorithm (Case study: Mahabad basin). *Journal of Sepehr*, 25(98): 171-181. (In Persian)
19. Franc G, Cracknell A. 1994. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR-data in north-eastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 15(8): 1695-1712. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169408954201>.
20. Gillies RR, Carlson TN. 1995. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *Journal of Applied Meteorology*, 34(4): 745-756. doi:<https://doi.org/10.1175/1520-0450>.
21. Ghaffarian Malmiri H, Zareh Khormizi H. 2016. Highlighting the time series of satellite data Earth surface temperature using time series harmonic analysis algorithm (HANTS) algorithm. *RS and GIS for Natural Resources*, 8(3): 37-55. (In Persian)
22. Hashemi Darreh Badami S, Nouraei Sefat A, Karimi S, Nazari S. 2015. Analysis of the development process of urban thermal islands in relation to land use /cover change using Landsat image time series. *RS and GIS for Natural Resources*, 6(3): 15-28. (In Persian)
23. Jin M, Dickinson RE. 2010. Land surface skin temperature climatology: Benefitting from the strengths of satellite observations. *Environmental Research Letters*, 5(4): 044004.
24. Kou X, Jiang L, Bo Y, Yan S, Chai L. 2016. Estimation of land surface temperature through blending MODIS and AMSR-E data with the Bayesian maximum entropy method. *Remote Sensing*, 8(2): 105. doi:<https://doi.org/10.3390/rs8020105>.
25. Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, Grosjean M, Wanner H. 2004. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 303(5663): 1499-1503. doi:<https://doi.org/10.1126/science.1093877>.
26. Liu Y, Yamaguchi Y, Ke C. 2007. Reducing the discrepancy between ASTER and MODIS land surface temperature products. *Sensors*, 7(12): 3043-3057. doi:<https://doi.org/10.3390/s7123043>.
27. Latif MS. 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*, 2(4): 2840-3849.
28. Khorchani M, Vicente-Serrano SM, Azorin-Molina C, Garcia M, Martin-Hernandez N, Peña-Gallardo M, El Kenawy A, Domínguez-Castro F. 2018. Trends in LST over the peninsular Spain as derived from the AVHRR imagery data. *Global and Planetary Change*, 166: 75-93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.04.006>.
29. Kerr YH, Lagouarde JP, Imbernon J. 1992. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 41(2): 197-209. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90078-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90078-X).
30. Mildrexler DJ, Zhao M, Running SW. 2011. A global comparison between station air temperatures and MODIS land surface

- temperatures reveals the cooling role of forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G3). doi:<https://doi.org/10.1029/2010JG001486>.
31. Mao K, Qin Z, Shi J, Gong P. 2005. A practical split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(15): 3181-3204. doi:<https://doi.org/10.1080/01431160500044713>.
 32. Neteler M. 2010. Estimating daily land surface temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data. *Remote sensing*, 2(1): 333-351. doi:<https://doi.org/10.3390/rs1020333>.
 33. Ottlé C, Vidal-Madjar D. 1992. Estimation of land surface temperature with NOAA 9 data. *Remote Sensing of Environment*, 40(1): 27-41.
 34. Prata AJ. 1993. Land surface temperature from the advanced very high resolution radiometer and the along-track scanning radiometer. *Journal of Geophysical Research*. 98: 16689-16702.
 35. Price JC. 1984. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*. 89 (D5): 7231-7237.
 36. Qin Z, Li W, Chen Z, Tang H. 2004. Land surface emissivity estimation for LST retrieval from Landsat TM6 data. *Remote Sensing for Land and Resources*, 3: 28-32.
 37. Qin Z, Dall'Olmo G, Karnieli A, Berliner P. 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D19): 22655-22670. doi:<https://doi.org/10.1029/2000JD900452>.
 38. Rott H. 2000. Physical principles and technical aspects of remote sensing. In: *Remote sensing in hydrology and water management*. Springer, pp 15-39. https://doi.org/10.1007/1978-1003-1642-59583-59587_59582.
 39. Sabziparvar A, Fakhari-zadeh Shirazi A, Nazem Sadat S, Rezaei Y. 2016. Land surface temperature validation obtained from satellite images of MODIS and Landsat-5 (Case study: wheat fields of Marvdasht plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2): 21-43. (In Persian)
 40. Salehi N, Ekhtesasi MR, Talebi A. 2019. Predicting the trend of land use change using the Markov chain model (Case study: Ramsar Saffarude). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(1): 106-121. (In Persian)
 41. Santamouris M. 2013. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: 224-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>.
 42. Sun YJ, Wang JF, Zhang RH, Gillies RR, Xue Y, Bo YC. 2005. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology*, 80(1): 37-48. doi:[10.1007/s00704-004-0079-y](https://doi.org/10.1007/s00704-004-0079-y).
 43. Sun AY. 2013. Predicting groundwater level changes using GRACE data. *Water Resources Research*, 49(9): 5900-5912. doi:<https://doi.org/10.1002/wrcr.20421>.
 44. Sobrino JA, Raissouni N, Li Z-L. 2001. A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2): 256-266. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1).
 45. Sobrino J, Caselles V. 1991. A methodology for obtaining the crop temperature from NOAA-9 AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 12(12): 2461-2475. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169108955280>.
 46. Sobrino J, Coll C, Caselles V. 1991. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. *Remote Sensing of Environment*, 38(1): 19-34. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90069-I](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90069-I).
 47. Salisbury CM. 1997. Retrieving land-surface temperature from satellites. UCSB MODIS LST Group mom page. Retrieved from: http://www.icess.ucsb.edu/esrg/sum97/studentEss.1997/cleo_Salisbury/cleo_final_paper.html.
 48. Tang B-H, Shao K, Li Z-L, Wu H, Tang R. 2015. An improved NDVI-based threshold method for estimating land surface emissivity using MODIS satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(19-20): 4864-4878. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1040132>.
 49. Ulivieri C, Castronuovo MM, Francioni R, Cardillo A. 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in Space Research*, 14(3): 59-65. doi:[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90193-7](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90193-7).
 50. Williamson SN, Hik DS, Gamon JA, Jarosch AH, Anslow FS, Clarke GKC, Scott Rupp T. 2017. Spring and summer monthly MODIS LST is inherently biased compared to air temperature in snow covered sub-Arctic mountains. *Remote Sensing of Environment*, 189: 14-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.009>.
 51. Wan Z, Zhang Y, Zhang Q, Li Z-L. 2002. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1): 163-180. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7).

52. Valizadeh Kh, Gholamnia Kh, Einali G, Mousavi M. 2016. Estimation of land surface temperature and extraction of thermal islands using split-window algorithm and multivariate regression analysis (case study of Zanzan city). *Journal of Urban Research and Planning*, 8(31): 35-50. (In Persion)
53. Zhao S, Qin Q, Yang Y, Xiong Y, Qiu G. 2009. Comparison of two split-window methods for retrieving land surface temperature from MODIS data. *Journal of Earth System Science*, 118(4): 345. doi:10.1007/s12040-009-0027-4.



Evaluating the types of split window algorithms for calculating the land surface temperature to determine the best algorithm for MODIS sensor images

Mohammad Kazemi Garajeh, Behnam Salmani, Bakhtiar Feizizadeh

Received: 28 February 2019/ Accepted: 17 May 2020
Available online 5 July 2020

Abstract

Background and Objective In recent years, the study of climate changes as well as their effects, has become a constant topic in the scientific fields of many countries. One of the main features of these changes is the increase in air temperature over the last 5 decades compared to the last 500 years. Statistics show an increase of one degree centigrade in air temperature over the last 5 decades. The land surface temperature means the radiant temperature of the earth's crust and the amount of pure energy that is balanced on the earth's surface under climatic conditions and depends on the reached the amount of energy, surface emissivity, humidity and atmospheric airflow. Land surface temperature is considered as one of the key variables in climate and environmental studies of the Earth's surface. It is also one of the basic parameters in the physical features of the earth's surface at all scales from local to global.

Currently, the most important sources of climatic data are meteorological stations, and these stations provide climatic statistics for certain points, while the temperature may alter at different intervals stations and decrease or increase compared to the desired station. Therefore, it is necessary to have a technology that can eliminate the shortcomings of meteorological stations in calculating the temperature at sampling intervals and in impassable places where it is not possible to build a meteorological station. In recent years, new sciences such as remote sensing have provided new ways to monitor the environment and acquire, evaluate, and analyze environmental data, and can provide a wide range of parameters relating to the environment. This technology is considered as an important and increasing source of information for studying climate change that has a direct impact on global warming. Over the past two decades, 18 algorithms have been developed to calculate the land surface temperature. These algorithms fall into four categories: emissivity-dependent models, two-factor models, complex models, and radio-based models. The results of the comparisons between different algorithms shows that different algorithms perform differently in different situations with different geographical climates. Therefore, the present study aims to compare the types of LST calculation algorithms for MODIS sensor images and determine the best algorithm for East Azarbaijan province.

M. Kazemi Garajeh¹, B. Salmani¹, B. Feizizadeh²

1. MSc of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
e-mail: kazemi20.0432@gmail.com

Materials and Methods Convert digital numbers (DN) to spectral radiation. The following equation was used to convert the numerical values to spectral radiation for thermal bands of MODIS sensor images.

$$L_{\lambda} = \frac{[L_{\max} - L_{\min}]}{[(QCal_{\max} - QCal_{\min}) \times QCal] + L_{\min}} \quad [1]$$

Planck's equation was used to convert spectral radiation to spectral reflection when the radiant power of thermak data of MODIS sensor is considered to be a maximum of one.

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{\lambda} + 1\right)} \quad [2]$$

In order to estimate the surface emissivity, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) thresholding method is used. The radiant power is divided into three categories to determine the soil characteristics in each pixel and to calculate the emissivity rate and emissivity difference; $0.2 > NDVI$, it is considered as dry soil and its radiant power is considered to be equal to 0.978. $0.5 > NDVI$, it is related to pixels with higher vegetation density and its radiant power is considered 0.985. $0.5 > NDVI < 0.2$, it is based on a combination of pixels relating to vegetation and soil and the radiant power for them can be calculated using the following equations.

$$\varepsilon = \varepsilon_{veg} P_v + \varepsilon_{soil} (1 - P_v) \quad [3]$$

In this equation; P_v is the vegetation ratio, that its value can be calculated using the following formula.

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right) \quad [4]$$

The value of each scientific finding depends on its accuracy. Thus equations 5 to 8 were used to compare the obtained results from the algorithms used to calculate the land surface temperature with the recorded temperature in meteorological station.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad [5]$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad [6]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad [7]$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad [8]$$

Results and Discussion The results of the present study show that among the 18 algorithms for the land surface temperature estimation for MODIS sensor images, the Sobrino algorithm with RMSE value of 1.79 has the highest accuracy, Cole Casillas and Prata algorithm with RMSE value of 2.85 is in the second position, and also the Salisbury and Sobrino algorithms with RMSE values of 2.39 have the third place for LST calculation among the other algorithms. The Qin algorithm with a RMSE value of 5.28 has the lowest accuracy for LST estimation.

Conclusion A review of the data obtained from comparing split-window algorithms shows the overall compliance of the calculated temperatures with the topographic conditions of the region, so that almost the lowest temperature values in all algorithms are related to the parts having more height (mountainous) and green cover of the region and also, temperature values have risen in low-lying areas lacking dense vegetation.

Keywords Land surface temperature (LST), Split window algorithms (SW), MODIS sensor, East Azarbaijan province