

مقایسه دقت داده‌های ماهواره لندست ۹ و سنتینل ۳ در برآورد دمای سطح زمین (مطالعه موردی: شهرستان اردبیل)

بتول زینالی^{۱*}، الهام ملانوری^۲، شیوا صفری^۳

۱- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۲- دانشجوی دکتری تخصصی رشته آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته سنجش از دور، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

چکیده

تخمین دقیق دمای سطح زمین مساله مهم در سنجش از دور مادون قرمز حرارتی (TIR) به‌شمار می‌رود. در طول سال‌ها دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های مختلف برآورد شده است. در مطالعه حاضر دمای سطح زمین (LST) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ با اعمال الگوریتم پنجره مجزا و سنتینل ۳ با استفاده از الگوریتم LST سنجنده SLSTR برآورد شده است. همچنین نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بر روی تصویر لندست ۹ با توجه به دقت مکانی این تصاویر با صحت کلی و ضریب کاپای به ترتیب ۹۸ و ۹۷ درصد استخراج شده است. در ادامه به بررسی نقشه‌های دما پرداخته شده و با داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی مقایسه شده است. حداقل و حداکثر دما با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا ۲۲ و ۵۱ درجه سانتیگراد و LST سنجنده SLSTR ۲۵ و ۵۲ درجه سانتیگراد به دست آمده است. طبق نتایج مطالعه حاضر دماهای حاصل از هر دو تصویر ماهواره‌ای مقادیر منطقی و هماهنگ با یکدیگر و کاربری‌های مختلف را نشان داده‌اند و با داده‌های ایستگاه هواشناسی مطابقت داشتند. با این حال تصویر لندست ۹ مقادیر نزدیکتری با داده‌های ایستگاه نشان داده است که می‌تواند به دلیل قدرت تفکیک مکانی و رادایومتری این سنجنده باشد که این نزدیکی مقادیر به ویژه در حداقل دما بیشتر قابل مشاهده است.

کلید واژه‌ها: سنتینل ۳، لندست ۹، دمای سطح زمین.

مقدمه

تغییرات آب و هوا باعث تغییر سیستم‌های طبیعی و انسانی در تمام قاره‌ها و اقیانوس‌ها شده است (اربابی سبزواری و همکاران، ۱۴۰۱). دمای سطح زمین (LST) یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیندهای فیزیکی سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است که همه تبادلات انرژی بین جو و زمین را یکپارچه می‌کند (Ni et al, 2020) (Meng et al, 2022). در واقع دمای سطح زمین (LST) یک شاخص مهم مرتبط با پدیده‌ها و فرآیندهای اقلیمی، هواشناسی، هیدرولوژیکی و محیطی بوده و به طور گسترده در بررسی تغییرات آب و هوایی، مدل سازی فرآیند هیدرولوژیکی، پایش خشکسالی و ارزیابی خطر آتش‌سوزی استفاده می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). به طور کلی سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) و بسیاری از سازمان‌های بین‌المللی دیگر، LST و گسیل پذیری را به‌عنوان رکورد داده‌های سیستم زمین و متغیر آب و هوایی ضروری شناسایی کرده‌اند (Meng et al, 2022). علاوه بر این دمای سطح زمین (LST) یکی از مهمترین منابع اطلاعات ورودی در فرآیندهای سطح زمین مانند تبخیر و تعرق واقعی و بالقوه یا تابش خالص، توسعه شاخص‌های متعدد برای ارزیابی محصولات متنوع در مناطق کشاورزی و نیز مدل‌سازی دمای هوا محسوب می‌شود (مدنیان و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های اندازه‌گیری برداشت‌های زمینی، ایستگاه‌های هواشناسی است که فقط اطلاعات دما را در نقاطی خاص اندازه می‌گیرند و به دلیل پوشش مکانی محدود، هزینه بالا و عدم دسترسی آسان به داده‌ها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (حیدری و آخوندزاده، ۱۳۹۹). در واقع دمای سطح زمین به دلیل تغییر نوع سطح و شرایط جوی، توزیع مکانی و زمانی پیچیده‌ای دارد. بنابراین، اندازه‌گیری‌های زمینی عملاً نمی‌توانند مقادیر LST را در مقیاس بزرگ ارائه دهند (Zhang et al, 2019). در طی چند دهه اخیر، تکنیک‌های بازتابی دمای سطح زمین با در دسترس بودن الگوریتم‌های بهبود یافته برای بازتابی اثرات جوی به طور قابل توجهی رشد کرده‌اند (Chatterjee et al, 2017). سنسجش از راه دور مادون قرمز حرارتی یک رویکرد کارآمد برای به دست آوردن اندازه‌گیری‌های LST در مقیاس بزرگ است و توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Ye et al, 2023).

مطالعات گوناگونی برای به دست آوردن دمای سطح زمین و رطوبت خاک با استفاده از سنسجش از دور انجام شده است. در مطالعه‌ای زارعی و همکاران (۱۳۹۹) به محاسبه و ارزیابی دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۳ در استان تهران پرداخته‌اند. این محققین از روش پنجره مجزای غیرخطی برای ارزیابی دمای فصول مختلف سال استفاده کرده‌اند؛ همچنین برای اعتبارسنجی از داده‌های میدانی و محصولات دمایی بهره برده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد داده‌های ماهواره سنتینل ۳ دارای دقت مناسبی بوده و می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ برای برآورد دما در حل بحران‌های زیست محیطی و همچنین تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد. زینالی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه‌ای به پایش دمای سطح زمین و بررسی رابطه‌ی کاربری اراضی با دمای سطح با استفاده از تصاویر سنجنده OLI و ETM+ در شهرستان پارس آباد پرداختند. طبق نتایج این محققین رابطه‌ی قوی بین دمای سطح زمین و کاربری اراضی وجود داشته و کاربری پوشش گیاهی و مناطق آبی از دمای پایین و پوشش خاکی از دمای بالایی برخوردار هستند. با این حال آن‌ها به نقش میزان تراکم و توزیع مناسب پوشش گیاهی در تعادل دما اشاره کرده‌اند. از طرفی این محققین به رابطه‌ی مستقیم دما و گسترش شهر اشاره کرده‌اند. حیدری و آخوندزاده (۱۳۹۹) در پژوهشی به توسعه یک الگوریتم پنجره مجزا برای بازتابی دمای سطح زمین پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از تصاویر سنجنده رادیومتر دمای سطح زمین و دریای ماهواره سنتینل ۳ و الگوریتم پنجره مجزا دمای سطح زمین را تخمین زده‌اند و سپس با دمای برآورده شده توسط تصاویر ماهواره‌ی استر و مودیس مقایسه کرده‌اند. طبق نتایج این محققین روش پنجره مجزا نتایج بهتری نسبت به روش‌های دیگر دارد. در پژوهشی سوبرنیو و همکاران (Sobrinho et al, 2019) از ترکیب همزمان ابزار MSI از ماهواره سنتینل 2 و ابزارهای OLCI و SLSTR از ماهواره سنتینل 3 به منظور بهبود برآورد LST که از ابزار AATSR بر روی ماهواره ENVISAT مشتق شده بودند استفاده کردند. نتایج نشان داده است که برآورد گسیلمندی مؤثر و تصحیح اتمسفری مناسب، امکان بازتابی دقیق LST را با استفاده از باندهای حرارتی SLSTR با در نظر گرفتن الگوریتم پنجره مجزای دو زاویه‌ای در ترکیب همزمان از داده‌ها را فراهم می‌کند. ژانگ و همکاران (Zhang et al, 2019) مطالعاتی در مورد بازتابی دمای سطح زمین با استفاده

تغییرات کاربری اراضی و جمعیت جهان و افزایش فعالیت‌های صنعتی تغییرات قابل ملاحظه‌ای در اقلیم کره زمین به‌ویژه افزایش متوسط دمای کره زمین بوجود آورده است (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۶). منطقه شمال غرب ایران نیز بیشترین میزان تغییرات از نظر تغییرات اقلیمی را شامل می‌شود و اقلیم نیمه بیابانی سرد به سرعت در این منطقه در حال گسترش است (رضیعی و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به اینکه شهرستان اردبیل واقع در شمال غرب کشور و دامنه کوهستان سبلان یکی از شهرهای بزرگ ایران محسوب می‌شود و تحت تاثیر تغییرات اقلیمی از جمله افزایش دما قرار دارد (ملکیان و همکاران، ۱۳۹۸) بررسی فاکتورهای اقلیمی از جمله دما در این منطقه ضروری می‌باشد. هدف از مطالعه حاضر بررسی دما در کاربری‌های مختلف توسط ماهواره‌های LANDSAT9 با اعمال الگوریتم پنجره مجزا (SW) و سنتینل ۳ با استفاده از سنجنده SLSTR و ابزار LST آن می‌باشد. بررسی دما با استفاده از دو تصویر مختلف، با اعمال الگوریتم‌های متفاوت و بررسی این دماها در کاربری‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه را می‌توان به عنوان نوآوری مطالعه حاضر مدنظر قرار داد.

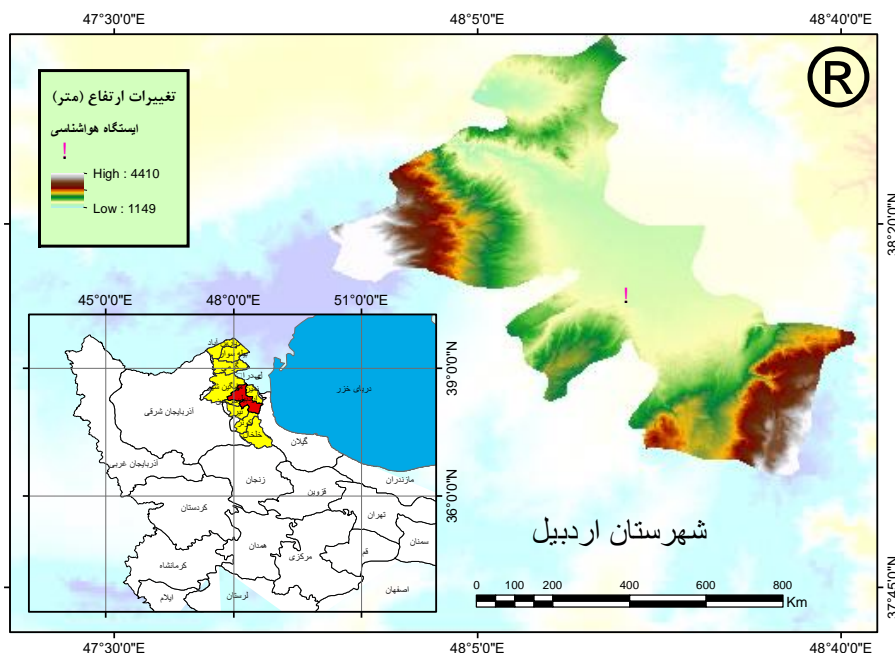
مواد و روش‌ها

شهرستان اردبیل یکی از کلان‌شهرهای ایران و مرکز استان اردبیل در شمال غربی کشور است. از نظر موقعیت جغرافیایی در ۹۲ درجه و ۱۲ دقیقه طول جغرافیایی و ۲۲ درجه و ۱۵ دقیقه عرض جغرافیایی قرار گرفته است و مساحت این شهرستان ۲۱۶۵ کیلومترمربع است. اردبیل در ۲۱۹ کیلومتری تبریز و ۵۷۸ کیلومتری تهران واقع شده است. این شهرستان از طرف شمال به شهرستان مشگین شهر، از طرف شرق به شهرستان نمین، از طرف غرب به شهرستان‌های نیر و سرعین و از طرف جنوب به شهرستان کوثر وصل است. شهر اردبیل در میان دشتی با همین نام در ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا و در شمال غرب فلات ایران جای گرفته است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شهرستان اردبیل در دامنه قله سبلان قرار دارد. در واقع از یک سو کوهستانی بودن منطقه، جهت رشته کوه‌ها، اختلاف ارتفاع و عرض جغرافیایی و وجود دریای خزر از عوامل محلی تاثیر گذار بر روی آب و هوای استان محسوب می‌شوند از سوی دیگر جریان‌ات هوایی مدیترانه‌ای، اروپای شمالی و آسیای مرکزی عوامل فرا محلی

از رادیومتر دمای سطح دریا و خشکی Sentinel-3A در شمال چین و جنوب بریتانیا انجام داده‌اند. هدف از این مطالعه توسعه یک الگوریتم پنجره مجزا (SW) برای تخمین LST از تصاویر دو کاناله مادون قرمز حرارتی و یک کانال مادون قرمز میانی در شب و روز از تصاویر SLSTR بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد الگوریتم پیشنهادی از نظر تئوری می‌تواند LST را با خطای کمتر تخمین بزند. در پژوهشی نی و همکاران، (Ni et al, 2019) به مطالعه بازیابی دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر مادون قرمز میانی و حرارتی-مادون قرمز در شب پرداخته‌اند. در این مطالعه برای بازیابی دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره سنتینل ۳ و الگوریتم سه کاناله جداسازی دما-انتشار (TES) استفاده شده است؛ که در این روش برای تخمین دمای شبانه از یک تصویر مادون قرمز میانی و دو تصویر مادون قرمز حرارتی شبانه سنتینل ۳ استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد این الگوریتم می‌تواند LST و گسیل‌پذیری را به ترتیب با خطاهای کمتر از ۰/۸ و ۰/۱۵۰ بازیابی کند. قاسم پور و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد سنجنده‌های لندست ۹ و ۸ در استخراج کاربری اراضی و بررسی دقت این دو سنجنده در برآورد دمای سطح زمین در منطقه‌ای اقلیمی ترکیه پرداخته‌اند. طبق نتایج این محققین لندست ۹ با ضریب کاپا و دقت کلی بالا نسبت به لندست ۸ در استخراج کاربری اراضی عملکرد بهتری داشته است. همچنین لندست ۹ با مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ۱.۷۷ از دقت بالاتری نسبت به لندست ۸ در برآورد LST برخوردار بوده است. فرناندس و همکاران (Fernandes et al, 2023) در مطالعه‌ای به ارزیابی جزیره حرارتی شهری (UHI) در پایتخت‌های شمال شرقی برزیل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۳ در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با اعمال شاخص‌های UTHVI و TDI پرداخته‌اند. این محققین انتخاب دقیق منطقه‌ی شهری و حومه آن جهت شناسایی جزایر حرارتی را ضروری دانسته‌اند. طبق نتایج آنها اکثر پایتخت‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن عواملی از جمله کمبود پوشش گیاهی و آب، منابع آبی تحت فشار توسط شهر، مناطق خاکی و موادی که حرارت و انرژی بیشتری را در خود نگه می‌دارند، مقادیر UHI بیشتری نسبت به اطراف خود نشان داده‌اند. این محققین پژوهش خود را جهت مطالعه در سایر شهرها در مناطق مختلف جهان البته به شرط وجود داده‌های هواشناسی دقیق قابل استفاده معرفی کرده‌اند.

سرد و تابستان‌های معتدل است. متوسط درجه حرارت آن در حدود هفت درجه سانتی‌گراد است.

مؤثر در آب‌وهوای استان به شمار می‌آیند. این شهرستان به عنوان یکی از مناطق سردسیر ایران و استان بین پنج تا هشت ماه از سال سرد است. این شهرستان دارای زمستان‌های بسیار



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

داده‌های ایستگاه هواشناسی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. موقعیت ایستگاه در شکل ۱ قابل مشاهده است. همچنین نقشه کاربری اراضی منطقه جهت تحلیل دما در کاربری‌های مسکونی و صنعتی، پوشش گیاهی، زمین زراعی، مناطق آبی، پوشش خاکی با استفاده از روش شیء‌گرا بر روی تصویر لندست ۹ استخراج شده است. جدول ۱ مشخصات تصاویر استفاده شده را نشان می‌دهد.

در مطالعه حاضر از باندهای ۱۰ و ۱۱ تصویر لندست ۹ مربوط به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۲۰ ساعت ۷:۲۵:۴۴ به وقت گرینویچ، حوالی ۱۰:۵۵ دقیقه به وقت محلی با اعمال الگوریتم پنجره مجزا (sw) و از تصویر سنتینل ۳ مربوط به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۲۰، ساعت ۷:۱۴:۵۵ به وقت گرینویچ و تقریباً ۱۰:۴۵ به وقت محلی با استفاده از سنجنده SLSTR و محصول ویژه سنجنش دمای سطح زمین (LST) این سنجنده استفاده شده است. سپس دماهای به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای

نوع ماهواره	نوع سنجنده	نوع پروداکت	تاریخ	زمان به وقت گرینویچ	زمان به وقت محلی
لندست ۹	OLI2	-	۲۰۲۲/۷/۲۰	۷:۲۵:۴۴	۱۰:۵۵
سنتینل ۳	SLSTR	SL_2_LST_S3B	۲۰۲۲/۷/۲۰	۷:۱۴:۵۵	۱۰:۴۵

لندست ۹ جمع‌آوری رکوردهای پیوسته از زمین را برای ۵ سال آینده فراهم می‌کند. طراحی لندست ۹ شبیه به لندست ۸ است و دارای دو ابزار تصویربرداری زمین عملیاتی ۲ (OLI2) و حسگر حرارتی فروسرخ ۲ (TIRS2) است که می‌تواند سطح زمین را در ارتفاع ۷۰۵ کیلومتر رصد کند. TIRS-2 به طور

لندست ۹ ماهواره‌های سری Landsat مشاهدات مادون قرمز حرارتی (TIR) سری زمانی طولانی مدت را ارائه می‌دهند و منبع داده ارزشمندی برای به دست آوردن رکوردهای LST هستند. پرتاب موفقیت‌آمیز لندست ۹ در ۲۷ سپتامبر ۲۰۲۱، امکان

جدول ۲ ضرایب الگوریتم split window

ارزش‌ها	ضرایب ثابت
-0.268	C0
1.378	C1
0.183	C2
54.300	C3
-2.238	C4
-129.200	C5
16.400	C6

قبل از اجرای رابطه (۱) مراحل زیر انجام شد:

محاسبه رادیانس

برای محاسبه دما با تصاویر لندست ۹ از باند های حرارتی ۱۰ و ۱۱ استفاده می‌شود که برای این کار ابتدا باید DN تصویر به تابندگی تبدیل شود (حسینی چمنی و همکاران، ۱۳۹۸). یعنی باید ارزش‌های عددی پیکسل‌ها را به رادیانس واقعی پدیده‌ها تبدیل کنیم (یوسف زاده و همکاران، ۱۳۹۸).

برآورد دمای روشنایی

داده های باند حرارتی را میتوان با استفاده از ثابت حرارتی موجود در فایل متادیتا از طیف درخشندگی به دمای روشنایی تبدیل کرد (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۹)، که این امر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$T = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{T} + 1\right)} \quad (2)$$

که بر طبق متادیتای تصویر K₁ ثابت کالیبراسیون برای باند ۱۰ برابر با ۷۷۴/۸۸۵۳ و برای باند ۱۱ با ۴۸۰/۸۸۸۳ برحسب (W/(m² sr μm)) مساوی است. K₂ نیز برای باند ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برابر با ۱۳۲۱/۰۷۸۹، ۱۲۰۱/۱۴۴۲ برحسب کلوین است (Arbabi et al, 2022).

برآورد قابلیت انتشار سطح زمین (LSE):

اجسام با درجه حرارت بالاتر از صفر مطلق تشعشعات در یک جسم سیاه تمام حرارت دریافت شده انعکاس می‌یابند، و قدرت انتشار انرژی یک جسم واقعی نسبت به جسم سیاه را گسیلمندی می‌گویند. به دلیل تفاوت قابلیت انتشار یک ماده واقعی در مقایسه با جسم سیاه، بسته به نوع ماده تشکیل دهنده پدیده‌های مختلف، در طول موج‌های مختلف ناحیه مادون قرمز حرارتی با یکدیگر، پدیده‌های مختلف را با وجود دمای یکسان می‌توان با استفاده از این پارامتر تشخیص داد. زمانی

پیوسته تابش TIR سطح زمین را به طور پیوسته در دو باند TIR با وضوح مکانی ۱۰۰ متر بدون مسئله‌ی نور سرگردان مربوط به لندست ۸ را آزار می‌دهد اندازه گیری می‌کند. همچنین لندست ۹ قدرت کوانتیزه ۱۴ بیتی دارد که در مقایسه با لندست ۸ که این عدد ۱۲ است، موجب بهبود سیگنال به نویز جهت شناسایی پدیده‌های تیره‌تر می‌شود (Shahfahad et al, 2020). اسکن‌های ماه در مدار نشان داد که تغییرات طراحی جدید در TIRS-2، پراکندگی کل را به ۱٪ یا کمتر کاهش داده است. (Meng et al, 2022).

الگوریتم پنجره مجزا

الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه‌ی دمای سطح وجود دارد. الگوریتم پنجره مجزا از مهم‌ترین روش‌های محاسبه دمای سطح زمین است که دقت بیشتری در تخمین دمای سطح زمین نسبت به دیگر الگوریتم‌ها دارد. این الگوریتم اولین بار توسط مک ملین (McMillin, 1975) ارائه شده است. در طول سه دهه گذشته پژوهشگران فرمول بندی‌های مختلفی از الگوریتم پنجره مجزا ارائه کرده‌اند (مدنیان و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از ویژگی‌های مهم این روش حذف اثرات جوی است. به طور کلی الگوریتم پنجره مجزا بر اساس رفتار جذب جوی مختلف دو کانال رادیومتری در ناحیه پنجره ۱۰-۱۲.۵ میکرومتر عمل می‌کند (Rongali et al, 2018). روش پنجره مجزا اطلاعات دقیق درباره پروفیل اتمسفری در زمان اخذ تصویر توسط ماهواره نیاز ندارد و به طور عمده در بازیابی دمای سطح زمین از دو سنجنده حرارتی و جند طیفی استفاده می‌کند. الگوریتم پنجره مجزا ارائه شده در این مقاله بر اساس ساختار ریاضی پیشنهادی توسط سوبرینو و همکاران (Sobrinho et al, 2019) است.

(۱)

$$LST = TB_{10} + C1(TB_{10} - TB_{11}) + C2(TB_{10} - TB_{11})^2 + C0 + (C3 + C4W)(1 - m) + (C5 + C6W)\Delta m$$

که در آن، LST دمای سطح زمین بر حسب کلوین (K)، C0 تا C6 مقادیر ضریب الگوریتم پنجره مجزا، TB₁₀ و TB₁₁ دمای روشنایی باندهای ۱۰ و ۱۱ بر حسب کلوین (K)، m میانگین LSE باندهای TIRS است. W محتوای بخار آب اتمسفر، و Δm تفاوت در LSE است. مقادیر ضرایب الگوریتم پنجره مجزا در جدول ۲ آورده شده است.

تصویر سنجنده SLSTR ماهواره سنتینل-۳ و محصول دمایی آن (LST)

Sentinel-3 جزء مهم از مجموعه ماهواره مشاهده گرزمین آژانس فضایی اروپا است (حیدری و آخوندزاده، ۱۳۹۹). و از سه ماهواره (3A، 3B، و 3C) تشکیل شده است. Sentinel-3A و Sentinel-3B به ترتیب در فوریه 2016 و آوریل 2018 با موفقیت پرتاب شدند، در حالی که پرتاب Sentinel-3C هنوز در دست برنامه‌ریزی است. ماهواره‌های Sentinel-3 دارای مدارهای همزمان با خورشید با ارتفاع مدار 814.5 کیلومتر هستند. دوره تکرار هر ماهواره 27 روز است. Sentinel-3 دارای رادیومتر دمای سطح دریا و خشکی (SLSTR) است که مانند AATSR قبلی ENVISAT دارای حالت‌های دید مایل و نزدیک به نادیر است. علاوه بر این، SLSTR دارای نوار وسیع تری است (750 کیلومتر در نمای دوگانه و 1400 کیلومتر در نمای تک)، بنابراین فرکانس مشاهده بالاتری را به دست می‌آورد. SLSTR با عرض نوار دید تکی خود، میانگین زمان بازدید مجدد پوشش جهانی در خط استوا 1 روز (یک فضاپیما) یا نیم روز (دو فضاپیما) را فراهم می‌کند. دارای شش کانال مادون قرمز مرئی/نزدیک مادون قرمز/موج کوتاه (یعنی S1 - S6؛ وضوح مکانی: 500 متر) و سه کانال TIR (یعنی S7 - S9؛ وضوح مکانی: 1 کیلومتر). طول موج مرکزی S8 و S9 به ترتیب 10.85μm و 12μm است.

نتایج و بحث

دمای کاربری‌های مختلف

شکل ۲ نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه به ترتیب با صحت کلی و ضریب کاپای ۹۸ و ۹۷ درصد در پنج طبقه را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ نیز به ترتیب نقشه‌های دمای حاصل از تصاویر لندست ۹ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و داده‌های ۱۴ بیتی و سنتینل ۳ با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر را ارائه می‌دهد. در تصویر لندست ۹ کاربری زمین زراعی با میانگین دمای ۳۵ درجه سانتیگراد حداقل دما و کاربری پوشش خاکی با دمای میانگین ۴۲ درجه سانتیگراد حداکثر دما را شامل می‌شوند. در تصویر سنتینل ۳ نیز به همین

که قابلیت انتشار انرژی از اجسام واقعی در طول موج‌های مختلف اندازه‌گیری شود، مقادیر متفاوتی حاصل خواهد شد که این امر وابسته به طول موج است (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۱). برای برآورد قابلیت انتشار سطح زمین از رابطه ۷ استفاده و این پارامتر به‌طور مجزا برای باندهای ۱۰ و ۱۱ محاسبه شد.

$$LSE = \varepsilon_s (1-FVC) + \varepsilon_v * FVC \quad (3)$$

در این رابطه، (ε_s) گسیلمندی خاک که برای باند ۱۰ برابر با ۹۷۱/۰ و باند ۱۱ برابر با ۹۷۷/۰ و (ε_v) گسیلمندی پوشش گیاهی که برای باند ۱۰ برابر با ۹۸۷/۰ و برای باند ۱۱ برابر با ۹۸۹/۰ و FVC کسر پوشش گیاهی است که از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

(۴)

$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$ پوشش گیاهی سبز جز به جز (FVC) از پارامترهای مهمی است که در بیشتر برنامه‌های تغییرات آب و هوایی و محیط‌زیست کاربرد دارد (ولیزاده کامران و همکاران، ۱۳۹۶). یک روش مشترک برای برآورد FVC در برگرفته ترکیبی غیر خطی از دو عنصر طیفی در یک تصویر ماهواره‌ای شامل: پوشش گیاهی سبز و خاک لخت است (فیضی زاده و همکاران، ۱۳۹۵).

پس از محاسبه قابلیت انتشار برای هر باند حرارتی، میانگین گسیل و تفاوت آن بین دو باند مطابق معادله ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$Mean \varepsilon = (\varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}) / 2 \quad (5)$$

$$\Delta m = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11} \quad (6)$$

تخمین مقدار بخار آب

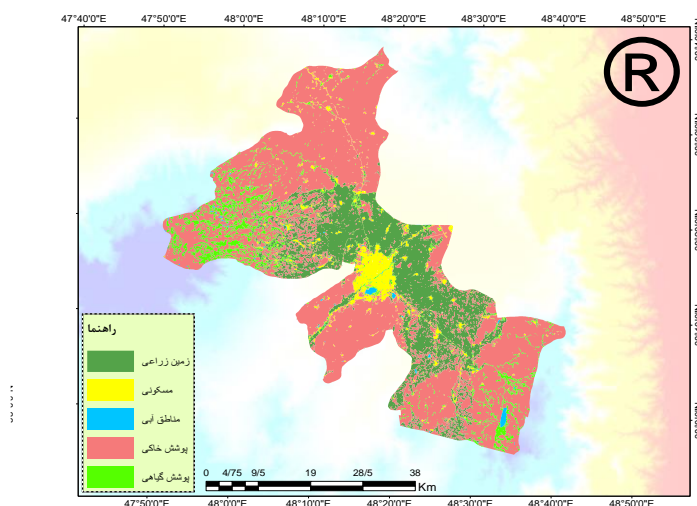
در مرحله بعد، مقدار بخار آب اتمسفر (W) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد.

$$W_i = 0.0981 * \{10 * 0.6108 * \exp[\frac{17.27 * (T_0 - 273.15)}{237.15 + (T_0 - 273.15)}] * RH\} + 0.1679$$

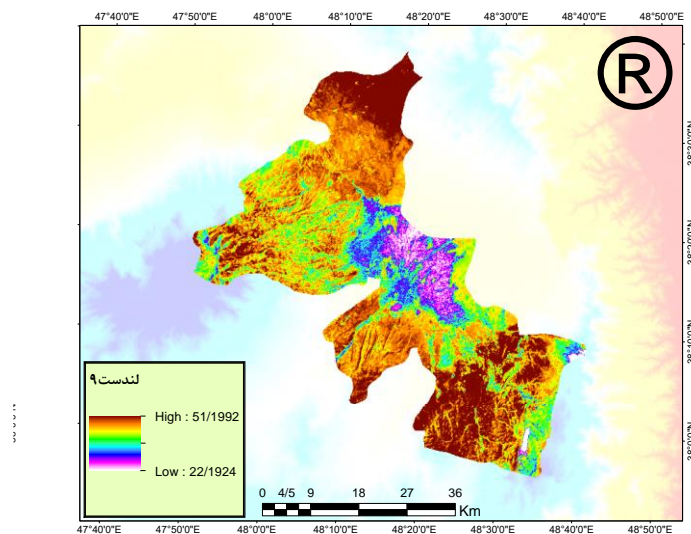
که در این معادله W_i = مقدار بخار آب موجود در اتمسفر، T_0 = دمای سطح زمین به مقدار کلون و RH = رطوبت نسبی است (Shahfahad et al, 2020).

باشد؛ البته مساله توپوگرافی و اختلاف ارتفاع کاربری پوشش گیاهی و خاکی نسبت به سایر کاربری‌ها و دریافت انرژی زیاد توسط این مناطق در بالا بودن دما بی تاثیر نبوده است. نکته‌ی قابل توجه دمای پایین مناطق شهری است. رفتار حرارتی مناطق و پدیده‌های شهری با تنش حرارتی و آلودگی هوا در ارتباط است (علوی پناه، ۱۳۹۷) همچنین پوشش گیاهی و فضای سبز، نفوذ ناپذیری مصالح، شکل هندسی ساختمان‌ها به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار در گردش هوا، منابع گرما و آلودگی در الگوی دمایی مناطق شهری موثر است (Fernandes et al, 2023)؛ بنابراین به نظر می‌رسد توزیع حرارت در مناطق مسکونی و بویژه شهر اردبیل با پوشش زمین زراعی احاطه شده در ارتباط باشد.

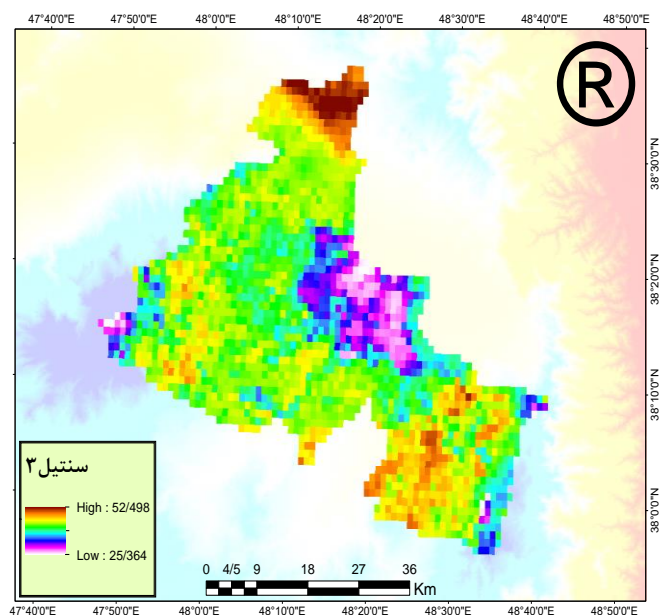
ترتیب کاربری زمین زراعی و پوشش خاکی به ترتیب با دمای ۳۷ و ۴۲ درجه سانتیگراد حداقل و حداکثر دما را به خود اختصاص داده‌اند. قابل ذکر است در هر دو تصویر عارضه آبی، حداقل میانگین دما را به خود اختصاص داده است؛ از آنجایی که تصاویر اخذ شده مربوط به صبح بوده و آب دارای ظرفیت حرارتی بالایی است، به نظر می‌رسد دلیل دمای پایین عارضه آبی همین نکته باشد (علوی پناه، ۱۳۹۷)؛ بنابراین به عنوان حداقل دما در مطالعه حاضر مدنظر قرار نگرفته است. پوشش گیاهی نیز برخلاف انتظار، بعد از پوشش خاکی از نظر حداکثر دما در رتبه دوم قرار دارد که البته پوشش گیاهی موجود در منطقه ناچیز است و در واقع به عنوان پوشش گیاهی مناطق مرتعی محسوب می‌شود و ممکن است دماهای حاصل در مورد پوشش گیاهی تحت تاثیر دمای بالای پوشش خاکی



شکل ۲: نقشه کاربری اراضی شهرستان اردبیل



شکل ۳- نقشه دما با استفاده از لندست ۹



شکل ۴- نقشه دما با استفاده از سنتینل ۳

دست آمده از ایستگاه نمی‌توان نظر قطعی داد، اما با توجه به اینکه دما در ایستگاه با مقدار ۲۳ درجه سانتیگراد، حوالی ساعت عبور سنجنده‌ها و با اختلاف ۴۵ دقیقه می‌باشد میزان نزدیکی دماها نسبت به مقادیر حداقل و حداکثر بیشتر است و احتمال می‌رود اگر ساعت دمای ایستگاه دقیقاً با ساعت عبور سنجنده‌ها یکی بود میزان مطابقت بیشتری در دماها مشاهده می‌شد. با این حال دماهای به دست آمده از سنجنده لندست ۹ با دمای ایستگاه هواشناسی اختلاف کمتری دارد و این مطابقت دما به‌ویژه در میزان حداقل دما با اختلاف ۱۰ درجه سانتیگراد بیشتر به چشم می‌خورد. قابل ذکر است موقعیت ایستگاه هواشناسی نسبت به سایر مناطق در ارتفاع ۱۳۴۹ متری قرار دارد. همچنین قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متری لندست ۹ و داده‌های ۱۴ بیتی آن و قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتری سنتینل ۳ باید مد نظر قرار گیرد.

بررسی نتایج دمای حاصل از دو سنجنده

جدول ۴ و ۵ حداقل و حداکثر و میانگین دمای کاربری‌های مختلف با استفاده از هر دو سنجنده را نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز میانگین کل حداقل و حداکثر دمای مربوط به سنجنده‌ها و دمای ایستگاه مربوط به هر دو سنجنده و همچنین دمای به دست آمده از ایستگاه هواشناسی به صورت حداقل، حداکثر و حوالی ساعت عبور سنجنده‌ها را نشان می‌دهد. میزان حداقل و حداکثر دماهای به دست آمده توسط هر دو سنجنده مقادیر نزدیک به هم با اختلاف یک درجه در حداکثر و ۳ درجه در حداقل دما را نشان می‌دهد. دمای ایستگاه مربوط به سنجنده لندست ۹ و سنتینل ۳ به ترتیب ۳۵ و ۳۶ درجه تخمین زده شده است که نزدیک به هم بوده و اختلاف یک درجه‌ای را شامل می‌شود. با توجه به کمبود ایستگاه‌های سنجنش دما و حضور یک ایستگاه در منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) در مورد دقت دمای به دست آمده از سنجنده‌ها در مقایسه دمای به

جدول ۴ مقدار دما هر کاربری با استفاده از لندست ۹

نوع کلاس	حداکثر دما	حداقل دما	میانگین دما
مسکونی	۴۷	۲۸	۳۷
زمین زراعی	۴۵	۳۰	۳۵
پوشش خاکی	۵۲	۲۴	۴۲
پوشش گیاهی	۴۶	۲۳	۳۸
مناطق آبی	۳۱	۲۲	۲۹

جدول ۵ مقدار دما هر کاربری با استفاده از سنتیل ۳

نوع کلاس	حداکثر دما	حداقل دما	میانگین ما
مسکونی	۵۱	۲۸	۳۷
زمین زراعی	۴۸	۲۷	۳۷
پوشش خاکی	۵۲	۲۵	۴۲
پوشش گیاهی	۴۹	۳۱	۴۰
مناطق آبی	۴۴	۲۷	۳۵

جدول ۶ مقدار دمای برآورد شده به وسیله ایستگاه هواشناسی و تصاویر ماهواره ای لندست ۹ و سنتیل ۳

میزان دمای برآورده شده با لندست ۹	حداکثر ما	حداقل دما	دما در ایستگاه
۹	۵۱	۲۲	۳۵
میزان دمای برآورده شده با سنتیل ۳	۵۲	۲۵	۳۶
میزان دما در ایستگاه هواشناسی دمای روزانه)	۲۹	۱۲	۲۳ (ساعت ۱۰ بچ)

نتیجه‌گیری

نقشه کاربری اراضی با دقت بالا توسط ماهواره لندست ۹ استخراج شد. به طوری که کاپو و همکاران (Coppo et al, 2016) به دقت بالای سنجنده OLI-2 ماهواره لندست ۹ در استخراج کاربری اراضی اشاره کرده‌اند و شاه فهد و همکاران (Shahfahad et al, 2020) نیز این سنجنده را جانشین عالی برای لندست ۸ معرفی کرده‌اند، قاسم پور و همکاران نیز (۲۰۲۳) سنسورهای OLI و TIR لندست ۹ را بهتر از لندست ۸ دانسته‌اند. حداقل و حداکثر دما با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا بر روی تصویر لندست ۹، ۲۲ و ۵۱ درجه سانتیگراد و با استفاده از سنجنده SLSTR تصویر سنتیل ۳، ۲۵ و ۵۲ درجه سانتیگراد برآورد شده است. دمای ایستگاه لندست ۹ و سنتیل ۳ نیز به ترتیب ۳۵ و ۳۶ درجه سانتیگراد برآورد شده است. الگوریتم پنجره مجزا از دقت و قابلیت بالایی برخوردار بوده و یکی از موثرترین و پراستفاده‌ترین الگوریتم‌ها در استخراج دمای سطح در مطالعات متعدد محسوب می‌شود، (Gerace et al, 2020)، (Eon et al, 2023)، (Zhang et al, 2019).

SLSTR نیز یک رادیومتر مادون قرمز با دقت بالا بوده و امکان اندازه‌گیری دقیق تر LST با استفاده از الگوریتم‌های رایج و همچنین توسعه الگوریتم‌های جدید را امکان پذیر می‌سازد (Coppo et al, 2016)، (Sobrin et al, 2019). دماهای به دست آمده نشان می‌دهد، مقادیر منطقی و نزدیک به هم توسط هر دو سنجنده به دست آمده و مطابق با کاربری‌های مختلف

می‌باشد. به طوری که در دو هر سنجنده حداقل دما در کاربری زمین زراعی و حداکثر دما در پوشش خاکی مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد دمای محاسبه شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای هر دو سنجنده با داده‌های اخذ شده از ایستگاه هواشناسی مطابقت دارد، با این حال دماهای به دست آمده از لندست ۹ مطابقت بیشتری را با این داده‌های اخذ شده بویژه در حداقل دما نشان می‌دهند. در مورد دمای حداکثر و دمای ایستگاه نیز اختلاف دمای لندست ۹ با دمای ایستگاه یک درجه نسبت به دمای سنتیل ۳ کمتر است. LST برای هر پیکسل در سنجنش از دور معادل میانگین دمای پوشش‌های مختلف سطح زمین است (علوی پناه، ۱۳۹۷) بنابراین به نظر می‌رسد قدرت تفکیک مکانی و رادیومتری بالای سنجنده لندست ۹ در دقت بالای مقادیر به دست آمده بی تاثیر نبوده است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از تصاویر ماهواره‌ای شبانه جهت تخمین دما در کاربری مختلف استفاده شود.

منابع

- 1- Arabi Aliabad, F., Zare, M., & Ghafarian Malamiri, H. (2021). A comparative assessment of the accuracies of split-window algorithms for retrieving of land surface temperature using Landsat 8 data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2267–2281. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01007-1>

- Use Land Cover Classification and Land Surface Temperature. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10(4/W1-2022), 221–227. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-221-2023>.
- 12- Hosseini Chamani, F., Farrokhian Firouzi, A., & Amerykhah, H. (2019). Pedotransfer Function (PTF) for Estimation Soil moisture using NDVI, land surface temperature (LST) and normalized moisture (NDMI) indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 239-254.
 - 13- Heydari M, Akhoondzadeh Hanzaei M. Development a split window algorithm to estimate land surface temperature from Sentinel -3 satellite data. *jgit 2020*; 8 (2) :93-113.
 - 14- isazade, V., asiabi, S., & isazadeh, E. (2021). Surface temperature monitoring using Landsat 8 images and single channel and separate window algorithms (Study area: Dezful city). *Geography and Human Relationships*, 3(3), 8-25.
 - 15- Malkian, A., mirdashtvan, M., & Ghadimi, M. (2019). Investigating the impacts of climate change on some hydrological characteristics of water resources in Ardebil province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(3), 695-705.
 - 16- Meng, X., Cheng, J., Guo, H., Guo, Y., & Yao, B. (2022). Accuracy Evaluation of the Landsat 9 Land Surface Temperature Product. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 8694–8703. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3212736>.
 - 17- Mahmoudzadeh, H., puyanjam, A., amanzadeh, F. (2020). Calculation of land surface temperature and thermal island extraction using Landsat 8 satellite imagery and separate window algorithm in Urmia. *Geography and Planning*, 24(73), 325-348.
 - 18- Madanian M, Soffianian A R, Soltani Koupai S, Pourmanafi S, Momeni M. Estimating Land Surface Temperature in the Central Part of Isfahan Province Based on Landsat-8 Data Using Split- Window Algorithm. *jwss 2020*; 23 (4):1-12.
 - 19- McMillin, L. M. 1975. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions. *Journal of Geophysical Research* 80: 5113-5117.
 - 20- Norouzi, A., & Norouzi, U. (2023). Application of split-window algorithm to
 - 2- Arbabi Sabzevari, A., Karami Mir Azizi, A., & Azizi, G. (2022). Synoptic patterns leading to anomalies and temperature changes in the last three decades in western and northwestern Iran. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 23-40.
 - 3- Alavi Panah, Kazem. 2017, Thermal distance measurement and its application in earth sciences, 522 pages.
 - 4- Babaeian, I., Karimian, M., Modirian, R., & Habibi- Nokhandan, M. (2007). Simulation of 1997 and 2000 Cold months Precipitations by Using Regional Climate Model (RegCM3). *Geography and Development*, 5(10), 55-72.
 - 5- Chatterjee, R. S., Singh, N., Thapa, S., Sharma, D., & Kumar, D. (2017). Retrieval of land surface temperature (LST) from landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.017>
 - 6- Coppo, P., Smith, D., & Nieke, J. (2016) Sea and Land Surface Temperature Radiometer on Sentinel-3, 702_7014.
 - 7- Eon, R., Gerace, A., Falcon, L., Poole, E., Kleynhans, T., Raqueño, N., & Bauch, T. (2023). Validation of Landsat-9 and Landsat-8 Surface Temperature and Reflectance during the Underfly Event. *Remote Sensing*, 15(13), 3370. <https://doi.org/10.3390/rs15133370>
 - 8- Fernandes, R., Ferreira, A., Nascimento, V., & Freitas, M. (2023). Assessment of Urban Heat Island in the North- Eastern State Capitals in Brazil Using Sentinel Satellite Data – 3 Slstr. April. <https://doi.org/10.20944/preprints202304.0045.v1>
 - 9- Feizizadeh, B., Didehban, K., & Gholamnia, K. (2016). Extraction of Land Surface Temperature (LST) based on Landsat Satellite Images and Split Window Algorithm Study area: Mahabad Catchment. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 25(98), 171-181.
 - 10- Gerace, A., Kleynhans, T., Eon, R., & Montanaro, M. (2020). Towards an operational, split window-derived surface temperature product for the thermal infrared sensors onboard Landsat 8 and 9. *Remote Sensing*, 12(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12020224>
 - 11- Ghasempour, F., Sekertekin, A., & Kutoglu, S. H. (2023). How Landsat 9 Is Superior To Landsat 8: Comparative Assessment of Land

- 2023, 12, 1287. <https://doi.org/10.3390/land12071287>.
- 29- Yousefzadeh, A., Zeynali, B., Valizadeh Kamran, K., Asghari Sar Easkanrood, S. (2019). The Estimation of Soil Moisture Using the New Visible Trapezoidal Model for Simineh Basin Using Images of Landsat 8 Satellite. *Hydrogeomorphology*, 6(18), 181-205.
- 30- Zenali, B., Asghari saraskanrood, S., Mohamadzadeh Shishegaran, M., & Ghale, E. (2021). Monitoring the land surface temperature and examining the relationship between land use and surface temperature using OLI and ETM+ sensor images (Case study: Cities of ParsAbad and Aslanduz). *Journal of Climate Research*, 1400(46), 101-114.
- 31- Zheng, Y., Ren, H., Guo, J., Ghent, D., Tansey, K., Hu, X., Nie, J., & Chen, S. (2019). Land Surface Temperature Retrieval from Sentinel-3A Sea and Land Surface Temperature Radiometer, Using a Split-Window Algorithm. *Remote Sensing*, 11(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs11060650>.
- study urban heat island in Yazd County. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 115-129.
- 21- Nie, J., Ren, H., Zheng, Y., Ghent, D., & Tansey, K. (2021). Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval from Nighttime Middle-Infrared and Thermal-Infrared Sentinel-3 Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(5), 915–919. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.2986326>
- 22- Raziei, T. (2017). An outlook on the Iranian Köppen-Geiger climate zones in the 21st century. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(1), 84-100.
- 23- Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A. K., & Khosa, R. (2018). Split-Window Algorithm for Retrieval of Land Surface Temperature Using Landsat 8 Thermal Infrared Data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s41651-018-0021-y>
- 24- Shahfahad, Kumari, B., Tayyab, M., Ahmed, I. A., Baig, M. R. I., Khan, M. F., & Rahman, A. (2020). Longitudinal study of land surface temperature (LST) using mono- and split-window algorithms and its relationship with NDVI and NDBI over selected metro cities of India. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06068-1>
- 25- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Soria, G., Ruescas, A. B., Danne, O., Brockmann, C., Ghent, D., Remedios, J., North, P., Merchant, C., Berger, M., Mathieu, P. P., & Göttsche, F. M. (2016). Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote Sensing of Environment*, 179, 149–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.035>.
- 26- Sobrino, J. A., Z. L. Li, M. P. Stoll and F. Becker. 1996. multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing* 17: 2089-2114.
- 27- Yang, J., Zhou, J., Göttsche, F. M., Long, Z., Ma, J., & Luo, R. (2020). Investigation and validation of algorithms for estimating land surface temperature from Sentinel-3 SLSTR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91(December 2019), 102136. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102136>
- 28- Ye, X., Liu, R., Hui, J., & Zhu, J. (2023). Land Surface Temperature Estimation from Landsat-9 Thermal Infrared Data Using Ensemble Learning Method Considering the Physical Radiance Transfer Process, *Land*