



تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی مناطق نیمه خشک با استفاده توام از سنجش از دور و توابع آمار فضایی

علی ملایی، م. م. ^۱، رضائی، م. ^{۲*}، مهدوی، ر. ^۳، غلامی، ح. ^۳، کاظمی، م. ^۴

دوبافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲ / پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸ / دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

چکیده

در حال حاضر تهیه نقشه پوشش گیاهی دقیق از داده‌های اساسی و مهم در برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی و توسعه پایدار این منابع به شمار می‌آید. پژوهش حاضر با هدف پایش تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی استان فارس طی دو دهه و با استفاده از توابع آمار فضایی انجام و از شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده NDVI با فرمت HDF و در بازه زمانی ۱۶ روزه سنجنده MODIS با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر استفاده شد. پایش تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی استان فارس طی یک دوره ۲۰ ساله از دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و با استفاده از توابع آمار فضایی مورد بررسی قرار گرفت. سپس داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل‌های آمار کلاسیک و آمار فضایی قرار گرفتند.

علی ملایی، م. م. ^۱، رضائی، م. ^۲ (✉)، مهدوی، ر. ^۳، غلامی، ح. ^۳، کاظمی، م. ^۴
۱. دانشجوی دکتری مهندسی منابع طبیعی، علوم و مهندسی آبخیزداری گرایش حفاظت آب و خاک، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۳. دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه هرمزگان، هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۴. عضو هیات علمی پژوهشکده هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، هرمزگان، ایران.

DOI: 10.30495/girs.2023.1966458.2001

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: m.rezai@hormozgan.ac.ir

یافته‌ها نشان داد رگرسیون موزون جغرافیای پوشش گیاهی و گردادیان ارتفاعی فارس R^2 (۰/۹۸۶) دارای رابطه معنی دار بود. مقدار شاخص آماره موران برای ماه‌های ژانویه و دسامبر به ترتیب ۰/۱۵۹ و ۰/۱۵۶، در تحلیل پوشش گیاهی استان فارس به دست آمد. این شاخص در مورد تحلیل توزیع پوشش گیاهی در بلندمدت نیز برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ برابر با ۰/۱۵۴، ۰/۱۵۳، ۰/۱۵۵، ۰/۱۵۷ و ۰/۱۵۵ بود و نشان از الگوی خوشه‌ای در پوشش گیاهی است که نشان‌دهنده روند کاهشی سطح پوشش گیاهی در این بازه زمانی است. نتایج درونیابی فضایی نیز بیانگر عدم توزیع یکنواخت پوشش گیاهی و وجود لکه‌های پوشش گیاهی در سطح استان است. به طوری که تحلیل لکه‌های داغ در توزیع پوشش گیاهی فارس نشان‌دهنده تمرکز لکه‌های داغ با سطح اطمینان ۹۹ درصد در شهرستان‌های اقلید، سپیدان، مرودشت، شیراز، فیروزآباد، کازرون و ممسنی است. بنابراین نقشه راه می‌تواند بر مدیریت پوشش گیاهی لکه‌های داغ در شهرستان‌های ذکر شده که دارای بیشترین تغییرات پوشش گیاهی اند متمرکز شده و هدفمند از تخریب و اضمحلال آنها جلوگیری نماید.

مقدمه

شامل ۲۳ تصویر در سال و در مجموع ۴۶۰ تصویر NDVI به صورت منفرد و تک تک دانلود شدند.

آماره موران

این آماره که با عنوان خودهمبستگی فضایی نیز معروف است، یکی از کاربردی‌ترین ابزارهای تحلیلی داده‌های فضایی است (۴۸). با استفاده از این آماره درجه پراکندگی یا متمرکز بودن پوشش گیاهی اندازه‌گیری گردید. برای محاسبه روند تغییرات سالانه پارامترهای اقلیمی شاخص‌های پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه از آزمون روندیابی من‌کندال استفاده و آماره این آزمون با استفاده از رابطه‌های (۱۰ تا ۱۲) محاسبه شد (۲۳). در رابطه (۱۰) آماره آزمون من-کندال x_i مقدار داده $\bar{x}$ ، x_j مقدار داده $\bar{x}$ ، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(x_j - x_i)$ تابع علامت بود.

نتایج

تغییرات بلندمدت شاخص NDVI: شاخص NDVI در سال ۲۰۰۰ بین مقادیر ۰ تا ۰/۸۵ در سطح استان فارس متغیر بوده است. حداکثر فروانی مقدار این شاخص در این سال در محدوده ۰ تا ۰/۲ بوده و میانگین و انحراف از معیار شاخص NDVI در سال ۲۰۰۰ به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۵ می‌باشد. مقادیر شاخص NDVI در سال ۲۰۰۰ از خاک و لکه‌های پراکنده‌ای از پوشش گیاهی تنک پوشیده شده است. شاخص NDVI در سال ۲۰۰۵ بین مقادیر ۰ تا ۰/۸۴ در سطح استان فارس متغیر بوده است. حداکثر فروانی مقدار این شاخص در این سال در محدوده ۰ تا ۰/۲ بود.

پراکندگی پوشش گیاهی استان فارس به روش میانگین نزدیک‌ترین فاصله همسایگی: در تحلیل توزیع پوشش گیاهی استان فارس به روش میانگین نزدیک‌ترین فاصله همسایگی به منظور توزیع جغرافیایی پوشش گیاهی، مقدار شاخص برای ماه‌های ژانویه تا دسامبر به ترتیب ۰/۴۷، ۰/۳۲، ۰/۴۶، ۰/۴۶، ۰/۴۵، ۰/۴۴، ۰/۴۷، ۰/۴۲، ۰/۴۳، ۰/۳۹ و ۰/۴۰ به دست آمده است.

پراکندگی پوشش گیاهی استان فارس به روش خوشه‌بندی زیاد و کم: از آنجا که مقدار P-Value بسیار کوچک و مقدار Z محاسبه شده بسیار بزرگ است، می‌توان نتیجه گرفت که خوشه‌بندی فضایی بین مقادیر شاخص NDVI استان فارس وجود دارد. تحلیل پراکندگی پوشش گیاهی استان فارس در بلندمدت نشان داد توزیع پوشش گیاهی فارس دارای الگوی خوشه‌ای است.

پوشش‌های گیاهی با گذشت زمان و به دلایل گوناگون در اثر عوامل طبیعی و یا دخالت‌های انسانی دستخوش تغییر شده (۳۲) و این تغییرات شرایط و عملکرد اکوسیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۶)؛ پایش تغییر عموماً جهت ارزیابی فرآیندهای طبیعی، از قبیل اثرات بلندمدت که ناشی از علل اقلیمی است (۳۵). در چهار دهه گذشته تغییرات کاربری اراضی، پوشش گیاهی در ایران با سرعت فزاینده در بعضی جهات نامطلوب به وقوع پیوسته است (۳۲) و این باعث تشدید روند تخریب اراضی شده است (۳۶). پژوهش حاضر با هدف پایش تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی استان فارس طی دوره ۲۰ ساله از دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و با استفاده از توابع آمار فضایی به منظور تهیه نقشه راه انجام شد.

مواد و روش‌ها

استان فارس با مختصات جغرافیایی ۲۷° ۳' تا ۳۱° ۴۰' عرض شمالی و ۵۰° ۳۶' تا ۵۵° ۳۵' عرض شرقی، این استان در جنوب غرب ایران واقع شده و ۷/۵ درصد از مساحت کشور ایران را در بر گرفته است (شکل ۱). این استان با مساحتی در حدود ۱۲۲/۶۰۸ کیلومتر مربع دارای سه ناحیه آب‌وهوایی قابل تمایز است. ناحیه اول ناحیه کوهستانی شمال، شمال غرب و غرب با بارندگی حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر است. ناحیه دوم بخش مرکزی است که آب‌وهوای این ناحیه به علت کاهش نسبی ارتفاعات، نسبت به شمال و شمال غرب متفاوت است (۱۴).

روش تحقیق

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای داده‌های پوشش گیاهی در بلندمدت استخراج و پس از آماده‌سازی تغییرات بررسی شد (۴۱). همچنین داده‌ها با کمک توابع آمار فضایی، آنالیز و در نهایت نقشه راه آماده‌سازی شد. بدین ترتیب که از تصاویر سنجنده MODIS (۲۶) با تفکیک مکانی ۲۵۰ متری برای بررسی تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی (۳۷) استان فارس از داده‌های بلندمدت در بازه زمانی بیست‌ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۰) و از شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده NDVI استفاده شد (۱). از داده‌های ترکیبی ۱۶ روزه MODIS-NDVI به نام MOD13Q1 با قدرت تفکیک ۲۵۰ متر استفاده گردید (۲۳). این داده‌ها از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ از (United States Geological) LPDAAC1 USGS (Survey Land Processes Distributed Active Archive Center

پوشش گیاهی را از عوامل تأثیرگذار در بازتاب طیفی گیاهان معرفی شد (۱۲). مو و همکاران (۲۳) اظهار داشت عمده‌ترین فاکتور کنترل‌کننده پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه خشک، بارندگی و فاکتور دما در این مناطق از عوامل محدودکننده رشد و نمو گیاهان است. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان دریافت تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی روند گسترش پوشش گیاهی در مناطق مختلف را کنترل می‌کنند که با استفاده از اطلاعات حاصل از داده‌های سنجش از دور می‌توان این اثرات را به‌خوبی نشان داد.

نتیجه‌گیری

در مجموع یافته‌ها کاهش پوشش گیاهی را در استان فارس در بازه زمانی ۲۰ ساله به اثبات رسانده است. با توجه به نتایج حاصله و نظر به اینکه روند کاهشی پوشش گیاهی استان فارس مشاهده شده است، این میزان کاهش می‌تواند ناشی از افزایش تغییرات کاربری اراضی طبیعی از قبیل تبدیل مراتع و جنگل‌ها به اراضی مسکونی، جاده یا صنعتی و غیره باشد. از جمله فعالیت‌های انسانی می‌توان از جنگل‌تراشی جنگلهای بلوط و جنگلهای دیگر، چرای بی‌رویه دام، عدم مدیریت صحیح و عدم کنترل اصولی ورود و خروج دام از عرصه‌های طبیعی، آتشسوزی‌های عمدی و غیر عمدی ناشی از استفاده انسان از طبیعت نام برد. از طرف دیگر عوامل اقلیمی مانند خشکسالی، افزایش دما (وقوع آتش‌سوزی‌های ناشی از افزایش دما) و کاهش بارندگی یا عوامل بیولوژیکی طبیعی مانند شیوع بیماری و آفات بین جوامع گیاهی جنگلی و مرتعی و هجوم گونه‌های مهاجم به جوامع بومی می‌تواند از دیگر عوامل کاهش پوشش گیاهی در استان فارس باشد.

کلید واژه: اندازه‌گیری، سنجنده، آماره موران، لکه داغ، پراکندگی، زمان، فارس

پوشش گیاهی استان فارس بر اساس بهترین روش درون‌یابی فضایی: نتایج درون‌یابی پوشش گیاهی در استان فارس نیز نشان‌دهنده عدم توزیع یکنواخت پوشش گیاهی و وجود لکه‌های پوشش گیاهی در سطح استان است. توجه به نتایج مشاهده گردید که روش کریجینگ ساده دایره‌ای بهترین روش درون‌یابی پراکندگی بلندمدت پوشش گیاهی در استان فارس است.

رگرسیون موزون جغرافیای پوشش گیاهی - عوامل محیطی استان فارس:

در بررسی رابطه بین پوشش گیاهی و ارتفاع در فارس با توجه به مقدار بالای R^2 (۰/۹۸۶) رابطه معنی‌داری بین متغیر پوشش گیاهی و ارتفاع وجود دارد. تغییرات روند پوشش گیاهی با تکیه بر روش‌های آمار کلاسیک در استان فارس نشان داد که میانگین و انحراف معیار مقدار شاخص NDVI تغییر یافته است. اما نقشه‌ها به‌عنوان خروجی‌های آمار فضایی در تحلیل روند پوشش گیاهی نشان‌دهنده تغییرات وابسته به مکان نیز هستند (جدول ۱). توابع آمار فضایی نشان‌دهنده خوشه‌ای بودن پراکنش پوشش گیاهی در طول زمان است. همچنین کاهش سطح پوشش گیاهی در بازه زمانی ۲۰ ساله نیز مشهود است.

بحث

آگاهی از روند تغییرات پوشش گیاهی هر منطقه که بیشتر نمایانگر نحوه استفاده و چگونگی مدیریت عرصه‌های منابع طبیعی هست، می‌تواند به‌عنوان یک عامل مدیریتی، متصدیان امور و برنامه‌ریزان بخش‌های مختلف اجرایی را در مدیریت و توسعه همه‌جانبه یاری کند (۷ و ۳۹). در منطقه کاهش میزان پوشش گیاهی کاهش مقدار شاخص NDVI را به دنبال دارد که در پی آن میزان همبستگی بین شاخص‌های گیاهی (NDVI) و درصد تاج پوشش گیاهی نیز روندی افزایشی پیدا می‌کند (۹). در همین رابطه میزان بنیه و شادابی

مقدمه

دمای سطح زمین (LST) را می‌توان به‌عنوان دمای محسوس زمین تعریف کرد و برای محاسبه مقادیر آن که به درجه سانتی‌گراد یا کلونین اندازه‌گیری می‌شود می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای استفاده کرد (۲۰). LST بر اساس دمای نزدیک به سطح و تبادل تابش موج بلند بین جو و سطح زمین تعیین می‌شود (۲۷) و از تصاویر ماهواره‌ای مادون‌قرمز حرارتی سنجش‌ازدور مشتق می‌شود و یک متغیر مهم آب‌وهوایی برای درک تأثیرات کاربری و پوشش زمین (LULC) است (۹،۲۱). در سال‌های اخیر نیاز به داده‌های LST جهت برنامه‌ریزی و مدیریت سرزمین آن را به یکی از موضوعات علمی مهم تبدیل نموده است (۱۰).

افزایش دما در محیط‌های شهری به عنوان اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) شناخته می‌شود. پدیده جزیره حرارتی شهری زمانی رخ می‌دهد که دمای مناطق شهری بالاتر از نواحی اطراف باشد و شدت آن معمولاً بر اساس اختلاف دمای مرکز شهر با مناطق روستایی یا غیرشهری سنجیده می‌شود (۱۳). در دهه‌های اخیر، شهرنشینی و افزایش چشمگیر جمعیت شهری، اثر UHI را تشدید کرده است (۲۷). برای محاسبه جزیره گرمایی هوای شهری، از داده‌های دمای هوا که توسط ایستگاه‌های هواشناسی ثبت می‌شوند، استفاده می‌شد. این اندازه‌گیری‌ها اگرچه وضوح زمانی بالایی دارند، اما از نظر پوشش فضایی محدود هستند (۱۳). بنابراین در سال‌های اخیر محققان برای مطالعه UHI به استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور LST روی آورده‌اند (۶،۲۹،۳۰،۳۱،۳۵).

سنجش‌ازدور راهی مؤثر برای به دست آوردن LST در مقیاس جهانی و منطقه‌ای فراهم می‌نماید (۳). ماهواره‌های سنجش‌ازدور دارای مزیت پوشش گسترده و توانایی انجام بازبینی منظم یک منطقه هستند (۳۳). با این حال، تمام سکوها سنجش‌ازدور دارای باندهای حرارتی مادون‌قرمز روی سنجنده خود نیستند. برخی از سکوها با باندهای مادون‌قرمز حرارتی عبارت‌اند از سکوی سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA)، تابش‌سنج طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS)،

ماهواره زمینی (Landsat) و رادیومتر پیشرفته فضا برد بازتابی و گسیل گرمایی (ASTER) (۱۹). یک تصویر مادون‌قرمز حرارتی با توجه به منبع تصویر می‌تواند دارای وضوح فضایی بالا، متوسط یا پایین باشد، به‌عنوان مثال وضوح اطلس (ATLAS) (۵-۱۰ متر)، لندست سنجنده ETM (۶۰ متر)، سنجنده TIRS (۱۰۰ متر)، سنجنده TM (۱۲۰ متر)، Terra ASTER (۹۰ متر)، HJ-1B (۳۰۰ متر)، MODIS (۱۰۰۰ متر) و FY-2C SIVISSR (۵۰۰۰) است (۱۲).

تابش طیفی اندازه‌گیری شده توسط سنجنده‌های حرارتی ماهواره‌ها نه تنها تحت تأثیر پارامترهای سطح (تابش و دما) بلکه تحت تأثیر ترکیب و ساختار جو (عمدتاً بخار آب) نیز قرار می‌گیرد؛ بنابراین، اثرات جوی نام‌برده باید برای استفاده مناسب از داده‌های سنجش‌ازدور مادون‌قرمز حرارتی (Thermal Infrared, TIR) در برنامه‌های تحقیقاتی دما حذف شوند (۷). عدم لحاظ این عوامل می‌تواند دقت دمای سطح زمین را کاهش داده و منجر به نتایج نادرست در مطالعات محیطی و اقلیمی شود (۲۵). تصحیح اتمسفری (Atmospheric Correction) به‌طور کلی، تبدیل اندازه‌گیری‌های بالای سطح (Top Of the Atmosphere, TOA) به اندازه‌گیری‌های سطح زمین است (۷). بنابراین LST به عنوان یک متغیر پیچیده، تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد و باعث تغییرات سریع آن در سطح فضایی و زمانی می‌شود. از آنجایی که گسیلمندی و اثرات جوی دو عامل اساسی برای استخراج LST از داده‌های حرارتی هستند، بسیاری از محققان با در نظر گرفتن این عوامل رویکردها و الگوریتم‌های مختلفی را برای بازیابی LST پیشنهاد کرده‌اند. این الگوریتم‌ها با توجه به تعداد باندهای مادون‌قرمز حرارتی استفاده‌شده نام‌گذاری شده‌اند. به‌عنوان مثال، الگوریتم‌های تک کانال (SCA) یا تک پنجره‌ای (MWA) از یک باند مادون‌قرمز حرارتی استفاده می‌کنند (۱۷،۱۸)، با این حال، روش‌هایی مثل پنجره مجزا (SWA) شامل بیش از یک باند هستند (۴،۲۴).

روش‌های استخراج LST او حساسیت آن‌ها به پارامترهای مرتبط در چندین مطالعه مقایسه شده‌اند (۱،۱۱،۱۷،۲۸).

۱۵۵ متری از سطح دریا واقع است. گرگان دارای تابستان‌های گرم با دمای میانگین ۲۷.۷ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۱.۵ درصد در ماه ژانویه است و دمای میانگین سالانه‌ی آن حدود ۱۷.۲ درجه سانتی‌گراد است. بادهای غالب در این نواحی از جهت‌های غربی، جنوب غربی و شمال غربی می‌وزند که سرعت آن‌ها بین ۱۲ تا ۱۶ کیلومتر بر ساعت است و تقریباً در تمام طول سال فعال هستند. به علاوه، رشته‌کوه البرز در جنوب، جنوب شرق و شرق گرگان به عنوان یک مانع طبیعی، شدت بادهای را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد.

تصاویر لندست

ماهواره لندست با وضوح نسبی بالا یکی از طولانی‌ترین برنامه‌ها برای تحقیقات تغییرات جهانی است و برای کشاورزی، زمین‌شناسی، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و محیط‌زیست کاربرد دارد. از ۲۳ جولای ۱۹۷۲، در مجموع ۹ سری از ماهواره‌های لندست برای اهداف رصد زمین پرتاب شدند. لندست ۶ تنها ماهواره‌ای بود که توانست به مدار برسد (۲۵).

لندست ۵ با سنجنده TM و لندست ۷ با سنجنده ETM⁺ دارای شش باند بازتابی (مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز با طول موج کوتاه، تفکیک فضایی ۳۰ متر) و یک باند در منطقه مادون قرمز حرارتی (باند ۶) هستند. باندهای حرارتی دارای وضوح فضایی بومی ۱۲۰ متر و ۶۰ متر به ترتیب برای سنجنده‌های TM و ETM⁺ است که توسط USGS پس از نمونه‌برداری مجدد با روش برآورد مکعبی با وضوح ۳۰ متر تحویل داده می‌شود.

سنجنده ETM⁺ لندست ۷ دارای دو باند حرارتی است که بانام‌های ۱-۶ باند (کم‌بهره-low-gain) و ۲-۶ (با بهره بالا-high-gain) شناخته می‌شوند. باند حرارتی با بهره بالا به دلیل نزدیکی به شرایط میدان واقعی، برای به دست آوردن اطلاعات دما نسبت به باند کم‌بهره دقیق‌تر است (۱۹).

لندست ۸ در فوریه سال ۲۰۱۳ برای تداوم داده‌های سنساز دور با وضوح فضایی بالا در مأموریت تداوم داده لندست با دو سنجنده مدار زمین قرار گرفت. سنجنده

به عنوان مثال، عربی علی‌آباد و همکاران (۲۰۲۵) دقت یازده الگوریتم مختلف LST را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دماهای به دست آمده از روش‌های مختلف در یک روز حدود ۵ درجه سلسیوس اختلاف دارند، که این امر اهمیت روش‌های اعتبارسنجی موجود را نشان می‌دهد (۱). وانگ و همکاران (۲۰۱۹) سه الگوریتم MWA، SWA و SCA را از نظر پارامترهای ورودی، دقت و حساسیت مقایسه کرد. نتایج نشان داد که SWA کمترین حساسیت را نسبت به خطای پارامترهای ورودی نشان داد و روش‌های MWA و SCA به خطای پارامترهای ورودی حساس بودند (۲۸). سکرته‌کین و بونافونی (۲۰۲۰)، حساسیت و دقت بازیابی LST از تصاویر لندست را با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و مدل‌های LSE تحلیل کردند. دقت این روش‌ها برای لندست ۸ بین ۲.۱۷ تا ۵.۴۷ درجه کلین متغیر بود (۲۵).

تنوع الگوریتم‌ها و روش‌های متنوع برای به دست آوردن پارامترهای ورودی، انتخاب روش مناسب در هنگام بازیابی LST را برای محققان دشوار می‌کند. بنابراین هدف از این مطالعه ارائه یک رابط کاربری تعاملی برای بازیابی LST است که ضمن پشتیبانی از الگوریتم‌های مختلف و مأموریت‌های لندست ۵، ۷ و ۸، امکان محاسبه سریع‌تر و دقیق‌تر LST را فراهم سازد. این ابزار به کاربران کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن اثرات جوی و گسیلمندی، نتایج دقیق‌تری در تحلیل تغییرات دمایی و مطالعات محیط‌زیستی به دست آورند. همچنین، با استفاده از این رابط کاربری، محققان قادر خواهند بود انتخاب بهینه‌تری از روش‌های بازیابی LST بر اساس ویژگی‌های خاص داده‌های خود انجام دهند و اعتبارسنجی‌های دقیق‌تری برای تحقیقات خود انجام دهند.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در شهر گرگان، واقع در شمال ایران، قرار دارد که بین طول‌های جغرافیایی ۱۰°۵۴' تا ۴۵°۵۴' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶°۴۴' تا ۳۶°۵۸' شمالی، در ارتفاع

تصویربرداری عملیاتی زمین (OLI) داده‌ها را با وضوح فضایی ۳۰ متر در هشت باند در نواحی طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک (NIR) و امواج کوتاه مادون قرمز (SWIR) طیف الکترومغناطیسی و یک باند پانکروماتیک اضافی (PAN) با وضوح فضایی ۱۵ متر به دست می‌آورد. سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی (Thermal Infrared Sensor, TIRS) دارای دو باند طیفی در امواج مادون قرمز (LWIR) است. دو باند حرارتی (باند ۱۰ و باند ۱۱) دارای وضوح فضایی ۱۰۰ متری هستند که توسط USGS در ۳۰ متر نمونه‌برداری مجدد و منتشر می‌شوند. تصاویر لندست ۸ درواقع ۱۲ بیتی هستند که به صورت مصنوعی به شکل تصاویر ۱۶ بیتی ارائه می‌شوند و امکان توصیف بهتر وضعیت و شرایط پوشش زمین را فراهم می‌کنند. درمجموع وضوح فضایی اصلی باندهای حرارتی لندست از ۶۰ تا ۱۲۰ متر متغیر است، حتی اگر پیکسل‌ها در فاصله ۳۰ متری توسط USGS نمونه‌برداری مجدد شوند (۲۵). سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی جدید با داشتن دو باند حرارتی در پنجره اتمسفر بین ۱۰ تا ۱۲ میکرومتر نسبت به

سنجنده‌های قبلی TM/ETM پیشرفت کرده‌اند. تک باند حرارتی قبلی به دو باند حرارتی تقسیم می‌شود که اکنون باریک‌تر از قبلی هستند (۱۶).

داده‌های لندست به صورت رایگان در وبسایت USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) و سایر تارنماها موجود است. در این مطالعه از داده‌های سال‌های ۱۹۸۹ و ۲۰۰۱ (سنجنده TM لندست ۵)، ۲۰۰۲ (سنجنده ETM+ لندست ۷) و ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ (سنجنده OLI/TIRS لندست ۸) مربوط به شهر گرگان استفاده شده است. تاریخ و مشخصات تصاویر تهیه شده در جدول ۱ آمده است. ساعت رسمی ایران نسبت به زمان گرینویچ با توجه به تفاضل نصف النهار، به اضافه ۳:۳۰+ (یوتی‌سی (Coordinated Universal Time (UTC) ۳:۳۰+)) است که در نیمه دوم سال همین اعمال می‌شود و در نیمه اول سال خورشیدی با اعمال ساعت تابستانی یک ساعت به جلو کشیده شده و به اضافه ۴:۳۰+ (یوتی‌سی ۴:۳۰+) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- اطلاعات مربوط به داده‌های لندست و پارامترهای جوی محاسبه شده (از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۲۱)

منبع: (<https://www.ogimet.com/gsynres.phtml.en>)

Table 1. Information about Landsat data and estimated atmospheric parameters (1989 to 2021). Ref: ogmet

ارتفاع (km)	τ	UpRad	DownRad	Pres	RH (%)	T_0 (°C)	زمان و ساعت (UTC)	سنجنده
۰/۱۷۶	---	---	---	---	---	---	۱۹۸۹/۰۹/۰۷ ۰۶:۲۷:۴۳	لندست ۵
۰/۱۷۶	۰/۴۳	۴/۶۵	۶/۶۹	۱۰۰۹/۲	۶۶/۱	۲۹/۰	۲۰۰۱/۰۸/۰۷ ۰۶:۴۱:۵۰	TM
۰/۱۷۶	۰/۴۹	۴/۲۴	۶/۱۹	۱۰۰۰/۸	۷۶/۵	۲۷/۹	۲۰۰۲/۰۷/۱۷ ۰۶:۴۹:۵۱	لندست ETM+۷
۰/۱۷۶	۰/۵۶	۳/۶۶	۵/۵۴	۱۰۱۰/۳	۶۲/۶	۲۷/۰	۲۰۱۳/۰۸/۰۸ ۰۷:۰۳:۳۲	لندست TIRS/OLI۸
۰/۱۷۶	۰/۵۴	۴/۰۹	۶/۱۷	۱۰۰۸/۷	۶۲/۷	۳۲/۲	۲۰۲۱/۰۸/۱۴ ۰۷:۰۱:۴۰	

[1]
$$L_{\lambda} = \left[\frac{LMAX_{\lambda} - MIN_{\lambda}}{QCALMAX - QCALMIN} \right] \times Q_{CAL} - Q_{CALMIN} + MIN_{\lambda}$$
 که در آن: L_{λ} رادیانس طیفی بالای اتمسفر (TOA) Q_{CAL} مقدار پیکسل کالیبره شده کوانتیزه شده DN، $LMIN_{\lambda}$ (Watts/(m².srad.μm)) بر اساس فایل فراداده لندست (لندست ۵ = ۱۵/۳۰۳) و (لندست ۷ = ۱۷/۰۴۰) $LMAX_{\lambda}$ (Watts/(m².srad.μm)) بر اساس فایل فراداده لندست (لندست ۵ = ۱/۲۳۸) و (لندست ۷ = ۰) و مقادیر $LMAX$ ، $LMIN$ ، $QCALMAX$ و $QCALMIN$ از فراداده داده‌های لندست به دست می‌آیند.

مقادیر رادیانس برای لندست ۸ را می‌توان از رابطه ۲ به دست آورد (۳۴):

$$L_{\lambda} = M_L \cdot MQ_{CAL} + A_L \quad [2]$$

که در آن L رادیانس طیفی TOA برحسب (Watts/m²) $sr \mu m$ است و ML و AL از فایل فراداده لندست ۸ به دست می‌آیند.

دمای روشنایی (BT) Brightness Temperature

دمای روشنایی دمای جسم سیاهی است که مقدار یکسانی از تابش را در یک طول موج معین ساطع می‌کند و می‌توان آن را با معکوس کردن تابع پلانک محاسبه کرد. درواقع دمای روشنایی تابش الکترومغناطیسی است که از بالای جو زمین به سمت بالا حرکت می‌کند. پس از تبدیل رادیانس، تصویر دمای روشنایی را می‌توان با رابطه ۳ برای تمام مأموریت‌های لندست تولید کرد (۲۶).

$$BT = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} \quad [3]$$

BT دمای روشنایی مؤثر در سنجنده برحسب کلون، K_1 و K_2 مقادیر ثابت کالیبراسیون باندهای حرارتی برای تصاویر ماهواره‌های لندست است که از فایل فراداده لندست به دست می‌آیند (جدول ۲). L_{λ} رادیانس طیفی بالای اتمسفر (W/(m² sr μm)) است.

دمای نزدیک سطح زمین (T_0) - رطوبت نسبی (RH) - فشار (Pres) - رادیانس بالارونده (DownRad)، رادیانس پایین‌رونده (UpRad)، انتقال اتمسفر (τ) - مسیر-ردیف: ۰۳۴-۱۶۳ داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه و هاشم‌آباد گرگان در سامانه درخواست و فروش داده‌های هواشناسی سازمان وب سایت جهانی هواشناسی (<https://data.irimo.ir/withoutlogin/index.aspx>) و همچنین (<https://www.ogimet.com/gsynres.phtml.en>) برای ساعت و تاریخ‌های تصاویر اخذ شده از منطقه مورد مطالعه به دست آمد.

رابط کاربری نرم‌افزار

با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون یک رابط کاربری به‌منظور محاسبه LST برای داده‌های لندست تهیه شد. اکثر نرم‌افزارهای پردازش تصویر به مراحل پیچیده‌ای برای محاسبه LST نیاز دارند. ابزارهایی نیز پیش از این تهیه شده‌اند که به صورت افزونه یا جعبه‌ابزار تحت نرم‌افزارهای دیگری اجرا می‌شوند. در این میان می‌توان به جعبه‌ابزار متن‌باز تهیه شده در محیط Arc Map برای بازیابی LST از لندست با الگوریتم‌های بازیابی و مدل‌های انتشار مختلف (۲۵) و افزونه متن‌باز PyQGIS (۱۴) اشاره نمود. با این وجود برنامه‌ای که به‌طور مستقل در این زمینه وجود ندارد. بنابراین به‌منظور ساده‌سازی فرآیندهای عملیاتی به یک مدل مستقیم و کاربردی نیاز است. این برنامه قابلیت این را دارد که کاربر از مدل توان گسیلمندی سطح زمین (Land Surface Emissivity, LSE) خود نیز استفاده نماید.

پارامترهای مورد نیاز برای بازیابی LST

رادیانس (تابش) طیفی (Spectral Radiance)

با در نظر گرفتن داده‌های ماهواره‌ای، مقادیر پیکسل مادون‌قرمز حرارتی ابتدا از مقادیر عدد رقومی (Digital Number (DN)) به رادیانس تبدیل می‌شوند. رادیانس باند حرارتی برای لندست ۵ و ۷ ($ETM^+ - TM$) با استفاده از رابطه ۱ به دست می‌آید (۲۵):

جدول ۲ - ثابت‌های کالیبراسیون باندهای حرارتی برای تصاویر ماهواره‌های لندست (۳۴)

Table 2. Thermal band calibration constants for Landsat satellites (34)

ماهواره	K2 (Kelvin)	K1 (Watts/(m ² sr.μm))
لندست ۵ (باند ۶)	۱۲۶۰/۵۶	۶۰۷/۷۶
لندست ۷ (باند ۶)	۱۲۸۲/۷۱	۶۶۶/۰۹
لندست ۸ (باند ۱۰)	۱۳۲۱/۰۸	۷۷۴/۸۹
لندست ۸ (باند ۱۱)	۱۲۰۱/۱۴	۴۸۰/۸۹

نشان می‌دهد. در این مطالعه منطقه تابستانی عرض جغرافیایی میانی (Mid-latitude summer) برای محاسبه در نظر گرفته شد.

میانگین دمای مؤثر اتمسفر (Mean Effective Atmospheric Temperature) جدول ۳ معادلات عملی را برای محاسبه میانگین مؤثر دمای اتمسفر (Ta) با استفاده از دمای نزدیک به سطح (To) را

جدول ۳- تخمین متوسط دمای اتمسفر مؤثر (Ta) با استفاده از دمای هوای نزدیک به سطح (To) (۲۵).

Table 3. Estimating the effective mean atmospheric temperature Ta using the near surface air temperature (25).

معادلات روابط خطی	پروفیل‌های جوی
$T_a = 17.9769 + 0.9172 \times T_0$	مدل گرمسیری (Tropical model)
$T_a = 16.0110 + 0.9262 \times T_0$	تابستانی عرض جغرافیایی میانی (Mid-latitude summer)
$T_a = 19.2704 + 0.9112 \times T_0$	زمستانی عرض جغرافیایی میانی (Mid-latitude winter)

جهانی جوی مدل‌سازی شده از مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) برای تاریخ، زمان و مکان خاص به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند (۲).

مقادیر پارامترهای جوی به‌دست‌آمده برای ۵ تصویر در جدول ۱ آمده است. در این جدول، پارامترهای اتمسفر شامل رادیانس بالارونده، رادیانس پایین‌رونده، انتقال اتمسفر با استفاده از محاسبه‌گر پارامتر تصحیح اتمسفر (ACPC) برای الگوریتم‌های تک پنجره (MWA)، تک کانال (SCA) و رابطه انتقال تابشی (RTE) آمده است.

محتوای بخارآب اتمسفر (Water Vapor Content) روش‌های مختلف برای تخمین محتوای بخارآب اتمسفر (w_i) شرح داده شده است که در این مطالعه محتوای بخارآب با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، رطوبت نسبی (Relative Humidity) و دمای نزدیک به سطح (T_0) از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود (۲۵).

قابلیت انتقال یا عبور اتمسفر (Atmospheric Transmittance (τ))، رادیانس بالارونده (Up welling) و رادیانس پایین‌رونده (Down welling) (Radiance) اداره کل ملی هوانوردی و فضای آمریکا، ناسا (National Aeronautics and Space Administration (NASA)) تصحیح اتمسفر، معروف به محاسبه‌گر پارامتر تصحیح اتمسفر (Atmospheric Correction Parameter Calculator (ACPC)) ارائه نموده که قابلیت انتقال یا عبور اتمسفر، رادیانس بالارونده و رادیانس پایین‌رونده را محاسبه می‌کند. امکان دسترسی برای استفاده از این ابزار تصحیح جوی از طریق به وب سایت عمومی (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) ایجاد شده است. تصحیح اثرات اتمسفری بر روی تصاویر ماهواره‌ای برای کاربردهای سنجش‌ازدور کمی و چند زمانی ضروری است (۸). ماشین حساب پارامتر تصحیح اتمسفر از پروفایل‌های

و در حالت سوم ($NDVI > 0.5$)، پیکسل‌هایی با مقادیر شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی ($NDVI$) بالاتر از 0.5 به عنوان مناطق کاملاً پوشیده شده با گیاه در نظر گرفته می‌شوند (رابطه ۵).

$$\varepsilon_{\lambda} = \begin{cases} \varepsilon_{s\lambda}, NDVI < 0.2 \\ \varepsilon_{s\lambda} + (\varepsilon_{v\lambda} - \varepsilon_{s\lambda}) P_V, 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ \varepsilon_{v\lambda}, NDVI > 0.5 \end{cases} \quad [5]$$

ε_s و ε_v به ترتیب نشان دهنده گسیلمندی پوشش گیاهی و خاک هستند. P_V که به عنوان شاخص پوشش گیاهی سبز کسری (FVC) نیز نامیده می‌شود نسبت پوشش گیاهی است که به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$P_V = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad [6]$$

که در موقعیت جهانی $NDVI_{max} = 0.5$ و $NDVI_{min} = 0.2$ است.

تصویر توان گسیلمندی سطح زمین (LSE) برای لندست ۸ از رابطه ۷ محاسبه شد (۲۴):

$$LSE = \varepsilon_s \times (1 - FVC) + \varepsilon_v \times FVC \quad [7]$$

تخمین تصویر توان گسیلمندی سطح زمین (LSE) نیاز به مقدار گسیلمندی خاک و پوشش گیاهی باندهای حرارتی دارد و این مقادیر گسیلمندی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- مقادیر گسیلمندی برای باندهای حرارتی لندست (۲۴)

Table 4. LSE values for Landsat thermal bands (24)

باند ۱۱	باند ۱۰	باند ۶	گسیلمندی
۰/۹۷۷	۰/۹۷۱	۰/۹۹۴	گسیلمندی خاک (ε_s)
۰/۹۸۹	۰/۹۸۷	۰/۹۸۰	گسیلمندی پوشش گیاهی (ε_v)

T_s دمای سطح زمین، ε گسیلمندی سطح زمین، L_{sensor} رادیانس سنجنده برای باند حرارتی و ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 توابع جوی هستند. دو پارامتر γ و δ که وابسته به تابع پلانک هستند بر اساس معادله‌های ۹ به دست می‌آیند:

$$\gamma = \left\{ \frac{C_2 L_{sensor}}{T_{sensor}^2} \left[\frac{\lambda^4}{C_1} L_{sensor} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1}$$

$$\delta = -\gamma L_{sensor} + T_{sensor}$$

$$C_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W/m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^4 \quad [9]$$

$$\omega_i = 0.0981 \times \left\{ 10 \times 0.6108 \times \exp \left[\frac{17.27 \times (T_0 - 273.15)}{273.3 + (T_0 - 273.15)} \right] \times RH \right\} + 0.1697 \quad [4]$$

که در آن:

ω_i (g/cm^2) محتوای بخار آب و T_0 دمای نزدیک سطح بر حسب کلون است و RH (%) به رطوبت نسبی اشاره دارد (۲۵).

توان گسیلمندی سطح زمین Land Surface Emissivity (LSE)

توان گسیلمندی سطح زمین (LSE) را می‌توان از مقادیر آستانه شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی ($Normalized$ Difference Vegetation Index ($NDVI$)) با در نظر گرفتن سه مورد متفاوت از درصدها که در رابطه ۵ ارائه شده است، تخمین زد (۱۹ و ۲۴).

در حالت اول ($NDVI < 0.2$)، پیکسل به عنوان خاک برهنه در نظر گرفته می‌شود و گسیلمندی از مقادیر انعکاس در ناحیه قرمز به دست می‌آید.

در حالت دوم ($0.2 \leq NDVI \leq 0.5$) پیکسل از مخلوطی از خاک لخت و پوشش گیاهی تشکیل شده است.

روش‌های بازیابی LST

الگوریتم تک کانال Single-Channel Algorithm (SCA)

الگوریتم تک کانال (SCA) را برای بازیابی LST از داده‌های سنجنده مادون قرمز حرارتی لندست (Landsat TIR) بر اساس رابطه ۸ استفاده می‌کنند (۵):

$$T_s = \gamma [\varepsilon^{-1} (\psi L_{sensor} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad [8]$$

۱۱/۵ میکرومتر است و برای باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ به ترتیب ۱۰/۹ و ۱۲ میکرومتر است (جدول ۵).

$C_2 = 14387.7 \mu m.K$.
که در آن: T_{sensor} دمای روشنایی سنجنده بر حسب کلون،
و λ طول موج مؤثر باند مادون قرمز حرارتی مورد استفاده
است. متوسط طول موج باند ۶ لندست‌های ۵ و ۷ به میزان

جدول ۵- مرکز طول موج باندهای حرارتی لندست

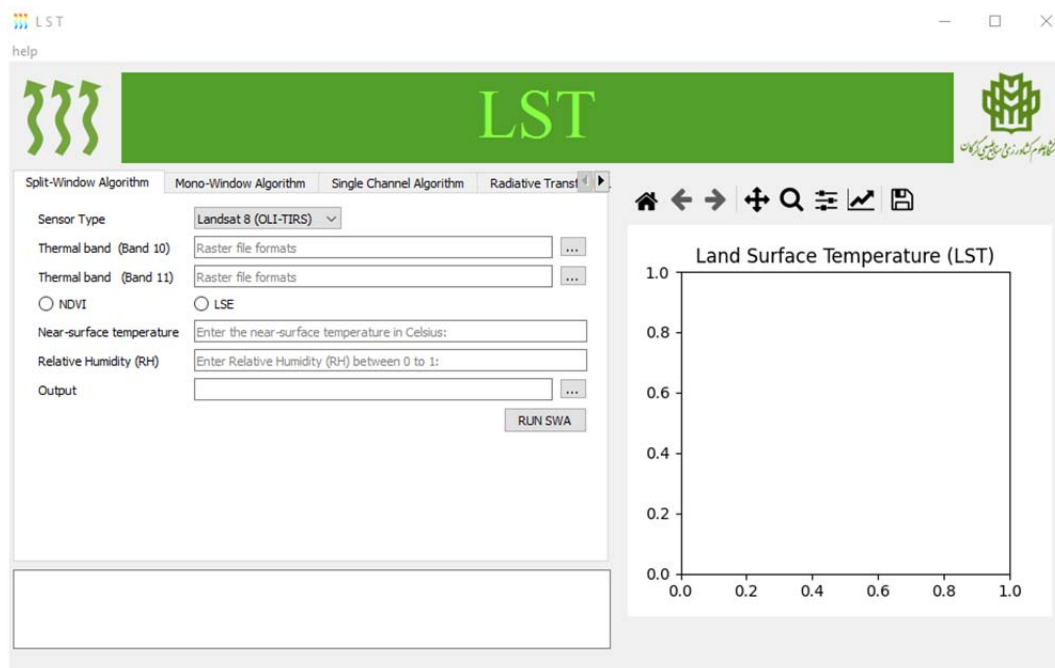
Table 5. Center wavelength of Landsat bands

ماهواره	باند	$\lambda_i (\mu m)$
لندست ۴-۵-۷	۶	۱۱/۴۵
لندست ۸	۱۰	۱۰/۸
لندست ۸	۱۱	۱۲

$$\psi_1 = 0.14714\omega^2 - 0.15583\omega + 1.1234$$

$$\psi_2 = -1.1836\omega^2 - 0.3760\omega - 0.52894 \quad [10]$$

C_1 و C_2 ثابت‌های رابطه هستند. شکل ۱ رابط کاربری برای الگوریتم $\psi_1 = 0.14714\omega^2 - 0.15583\omega + 1.1234$ و $\psi_2 = -1.1836\omega^2 - 0.3760\omega - 0.52894$ را بر اساس معادله‌های ۱۰ می‌توان تخمین زد:



شکل ۱- رابط کاربری الگوریتم تک کانال

Fig. 1. User Interface for Single-Channel Algorithm

LST را می‌توان با اتخاذ الگوریتم تک پنجره (MWA) توسعه یافته کوئین (۲۲) برای به دست آورد (۲۵):

لگوریتم تک پنجره (Mono Window Algorithm) (MWA)

$$T_s = \{a.(1 - C - D) + [b.(1 - C - D) + C + D]. T_{10} - D. T_a\} / C \quad [11]$$

ثابت‌های الگوریتم هستند (جدول ۶)، C و D پارامترهای الگوریتم محاسبه شده با استفاده از مدل LSE و انتقال اتمسفر است. شکل ۲ رابط کاربری برای الگوریتم تک پنجره را نشان می‌دهد.

$$a = -62.7182, b = 0.4339, C = \varepsilon \times \tau, D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon) \times \tau]$$

که در آن:

T_s دمای سطح زمین بر حسب کلوین، T دمای روشنایی در سنجنده بر حسب کلوین، T_a میانگین دمای مؤثر اتمسفر بر حسب کلوین، τ انتقال اتمسفر، ε گسیلمندی سطح زمین و a و

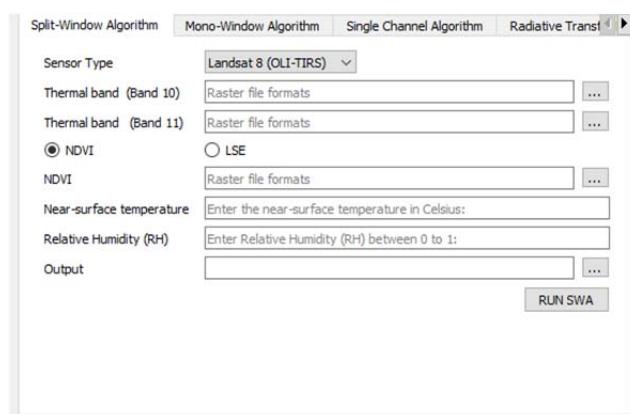
جدول ۶- ضرایب a و b الگوریتم تک پنجره (۲۵)

Table 6. Coefficients a and b Mono Window Algorithm (25)		
b (باند ۱۱)	a (باند ۱۰)	محدوده دمایی (°C)
۰/۴۵۸۱	-۷۰/۱۷۷۵	۷۰-۲۰
۰/۴۳۳۹	-۶۲/۷۱۸۲	۵۰-۰
۰/۴۰۸۶	-۵۵/۴۲۷۶	-۳۰ تا ۲۰

برای تخمین LST توسط الگوریتم تک پنجره، لازم است ضریب عبور اتمسفر τ و مقدار بخار آب اتمسفر W تعیین شود. محتوای بخار آب اتمسفر را می‌توان با توجه به رطوبت و فشار جزئی بخار آب در هوا به دست آورد (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>).

T_0 دمای هوای نزدیک به سطح است که از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیکی (<https://www.ogimet.com/gsynres.phtml.en>) به دست می‌آید. T_a میانگین دمای مؤثر اتمسفر بر حسب کلوین است که در این مطالعه بر اساس رابطه ۱۲ به دست می‌آید:

$$T_a = 16.01110 + 0.92621T_0(\text{Mid - latitude summer}) [12]$$



شکل ۲- رابط کاربری الگوریتم تک پنجره

Fig. 2. User Interface for Mono Window Algorithm (MWA)

پنجره جدیدتر که نیازی به پارامترهای جوی ندارد و از رابطه ۱۳ به دست می‌آید، استفاده شد (۲۳).

با توجه به عدم دسترسی به پارامترهای جوی مربوط به تصویر لندست ۱۹۸۹، برای بازیابی LST از یک الگوریتم تک

$\rho = \frac{hc}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} mk =$ مقدار ضریب ρ
 ۱۴۳۸۰ μmk (h ثابت پلانک، c ثابت بولتزمن، σ سرعت نور)،
 و ϵ_λ مقدار گسیلمندی است. شکل ۳ رابط کاربری برای
 الگوریتم تک پنجره را نشان می‌دهد.

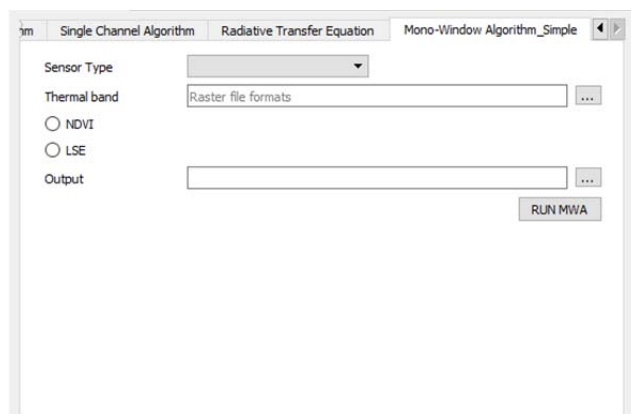
$$LST(T_s) = BT / (1 + \lambda \times \left(\frac{BT}{\rho}\right) \times \ln(\epsilon_\lambda)) \quad [13]$$

که در آن:

(T_s) دمای سطح زمین (K)،

BT دمای روشنایی دمای سطح زمین سنجنده (K)،

λ طول موج رادیانس ساطع شده (۱۱/۵ میکرومتر)،



شکل ۳- رابط کاربری الگوریتم تک پنجره جدید

Fig. 3. User Interface for new Mono Window Algorithm

حل معکوس معادله انتقال تابشی (RTE) یک روش
 مستقیم و مناسب‌ترین روش برای بازیابی LST با استفاده از
 یک باند مادون قرمز حرارتی است. محاسبه رابطه انتقال تابشی
 برای یک باند حرارتی خاص و در یک طول موج خاص (λ)
 را می‌توان بر اساس رابطه ۱۴ به دست آورد (۷):

$$[14] L_\lambda^{sen} = [\epsilon B_\lambda(T_s) + (1 - \epsilon) L_\lambda^u] \tau + L_\lambda^d$$

که در آن: L_λ^{sen} رادیانس ثبت شده در سنجنده باند حرارتی
 مربوطه (۶ و ۱۰) و B_λ رادیانس جسم سیاه است. بنابراین،
 رادیانس ساطع شده برای یک جسم سیاه در دمای T_s را
 می‌توان با وارونه کردن رابطه ۱۴ به دست آورد. بدین شکل،
 رادیانس ساطع شده برای یک جسم سیاه در دمای T_s با
 معکوس نمودن رابطه قبل و بر اساس رابطه ۱۵ به دست
 می‌آید:

$$B_\lambda(T_s) = \frac{L_\lambda^{sen} - L_\lambda^u - \tau(1 - \epsilon)L_\lambda^d}{\tau\epsilon} \quad [15]$$

و در نهایت، T_s را می‌توان با معکوس کردن قانون پلانک
 در رابطه قبل و بر اساس رابطه ۱۶ به دست آورد:

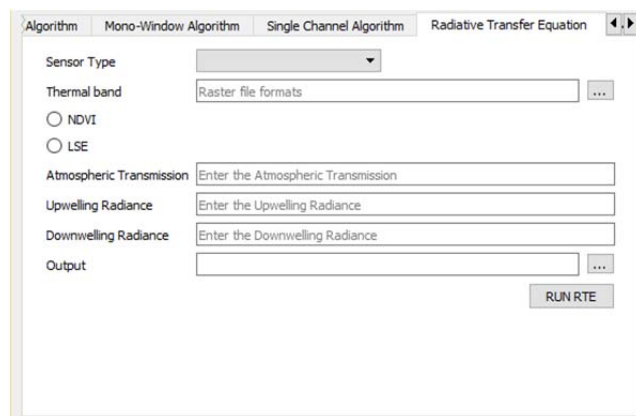
الگوریتم رابطه انتقال تابشی (Radiative Transfer Equation (RTE))

نادیده گرفتن تصحیح اتمسفری

تصحیح اثرات جوی بر روی تصاویر ماهواره‌ای نوری
 برای کاربردهای سنجش از دور کمی و چند زمانی ضروری
 است. منجر به خطاهای سیستماتیک در تخمین LST برای هر
 جوی می‌شود. یکی از روش‌های پرکاربرد برای بازیابی LST با
 تصحیح اتمسفری، روش مبتنی بر فیزیک معادله انتقال تابشی
 است. این روش شامل یک وارونگی ساده از الگوریتم رابطه
 انتقال تابشی برای یک باند خاص است و می‌تواند از لحاظ
 نظری بازیابی LST دقیقی را ارائه دهد. روش رابطه انتقال
 تابشی به اطلاعات پروفایل‌های جوی عمودی (دمای هوا،
 بخار آب و فشار) نیاز دارد. این اطلاعات در مدل انتقال تابشی
 برای محاسبه سه پارامتر اتمسفری لازم برای تصحیح اتمسفری
 شامل انتقال اتمسفر، رادیانس بالارونده اتمسفر و رادیانس
 پایین‌رونده اتمسفر معرفی می‌شود.

که در آن: K_1 و K_2 مقادیر ثابت‌های کالیبراسیون باندهای حرارتی برای تصاویر ماهواره‌های لندست است که از فایل فراداده لندست به دست می‌آیند. شکل ۴ رابط کاربری برای الگوریتم رابطه انتقال تابشی را نشان می‌دهد.

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{\frac{L_{\lambda}^{sen} - L_{\lambda}^{\uparrow} - \tau(1-\epsilon)L_{\lambda}^{\downarrow}}{\tau\epsilon}} + 1 \right)} \quad [16]$$



شکل ۴- رابط کاربری الگوریتم رابطه انتقال تابشی

Fig. 4. User Interface for RTE

T_i و T_j دمای روشنایی در سنجنده در باندهای پنجره مجزا i و j بر حسب کلونین، ϵ متوسط گسیلمندی، $\Delta\epsilon$ اختلاف گسیلمندی و w مقدار کل بخارآب اتمسفر (g/cm^2) است. C_0-C_6 ضرایب پنجره مجزا هستند که از داده‌های شبیه‌سازی شده تعیین می‌شوند. میانگین گسیلمندی و اختلاف گسیلمندی به صورت رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود:

$$\epsilon = 0.5(\epsilon_i - \epsilon_j) \text{ and } \Delta\epsilon = (\epsilon_i - \epsilon_j) \quad [18]$$

مقادیر ضرایب الگوریتم پنجره مجزا در جدول ۶ آورده شده است (۲۰). شکل ۵ رابط کاربری برای الگوریتم پنجره مجزا را نشان می‌دهد.

الگوریتم پنجره مجزا (Split-Window Algorithm (SWA)) الگوریتم پنجره مجزا از دو باند حرارتی استفاده می‌کند که معمولاً در پنجره اتمسفر بین ۱۰ تا ۱۲ میکرومتر قرار دارند (۱۵). الگوریتم پنجره مجزا اثر اتمسفر را با استفاده از تفاضل جذب اتمسفری در دو باند مادون قرمز حرارتی مجاور با مرکز ۱۱ و ۱۲ میکرومتر حذف می‌کند و در نهایت ترکیب خطی یا غیرخطی دمای روشنایی را برای محاسبه LST اعمال می‌کند ساختار الگوریتم در رابطه ۱۷ ارائه شده است (۲۰):

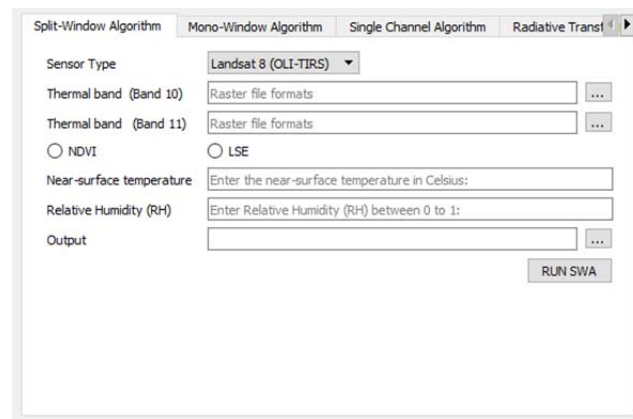
$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4w)(1 - \epsilon) + (c_5 + c_6w)\Delta\epsilon \quad [17]$$

که در آن: T_s دمای سطح زمین،

جدول ۷- ضرایب الگوریتم پنجره مجزا (۲۰)

Table 7. Split-window coefficient values (20)

ضریب	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C0
مقدار	۱۶/۴۰۰	-۱۲۹/۲۰۰	-۲/۲۳۸	۵۴/۳۰۰	۰/۱۸۳	۱/۳۷۸	-۰/۲۶۸



شکل ۵- رابط کاربری الگوریتم پنجره مجزا

Fig. 5. User Interface for SWA

بررسی دقت

به منظور مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم‌ها با داده‌های ایستگاه هواشناسی از معیار آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد. RMSE، یک معیار آماری پرکاربرد است که تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط یک مدل و مقادیر مشاهده شده را با هم مقایسه و ارزیابی می‌کند (۲۵).

در رابطه ۱۹ $T_{satellite}$ و $T_{station}$ به ترتیب LST محاسبه شده از تصاویر ماهواره‌ای و LST مبتنی بر داده‌های ایستگاه هستند و n تعداد مشاهدات را نشان می‌دهد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum [T_{satellite} - T_{station}]^2}{n}} \quad [19]$$

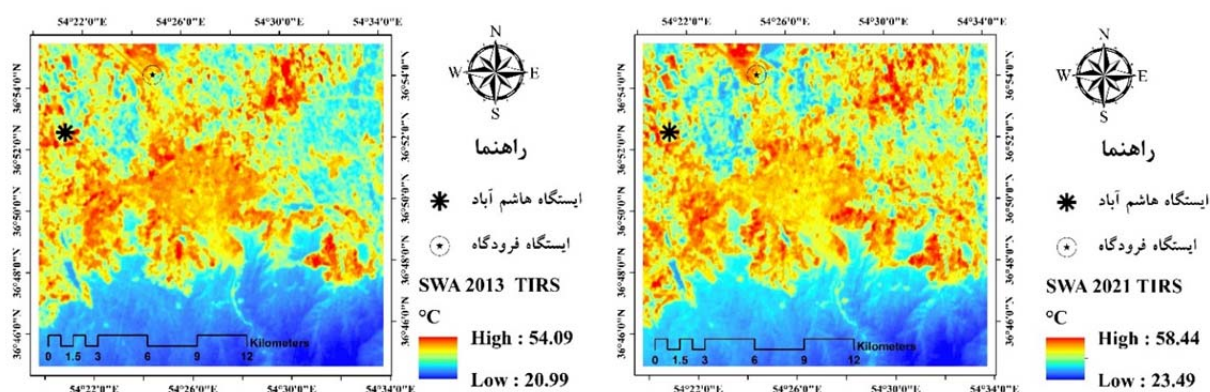
نتایج

در این مطالعه، نقشه‌های LST برای شهر گرگان، ایران با استفاده از سنجنده‌های Landsat 5 TM، Landsat 7 ETM+ و Landsat 8 TIRS از ۵ تاریخ مختلف تهیه شد. در مجموع پنج الگوریتم شامل الگوریتم‌های پنجره مجزا، تک کانال، رابطه انتقال تابشی و دو الگوریتم مختلف تک پنجره بررسی شدند.

الگوریتم‌های پنجره مجزا به دلیل نیاز به دو باند مادون‌قرمز حرارتی تنها با داده‌های لندست ۸ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ نقشه‌های LST تهیه شده با روش الگوریتم پنجره مجزا برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ نمایش می‌دهد.

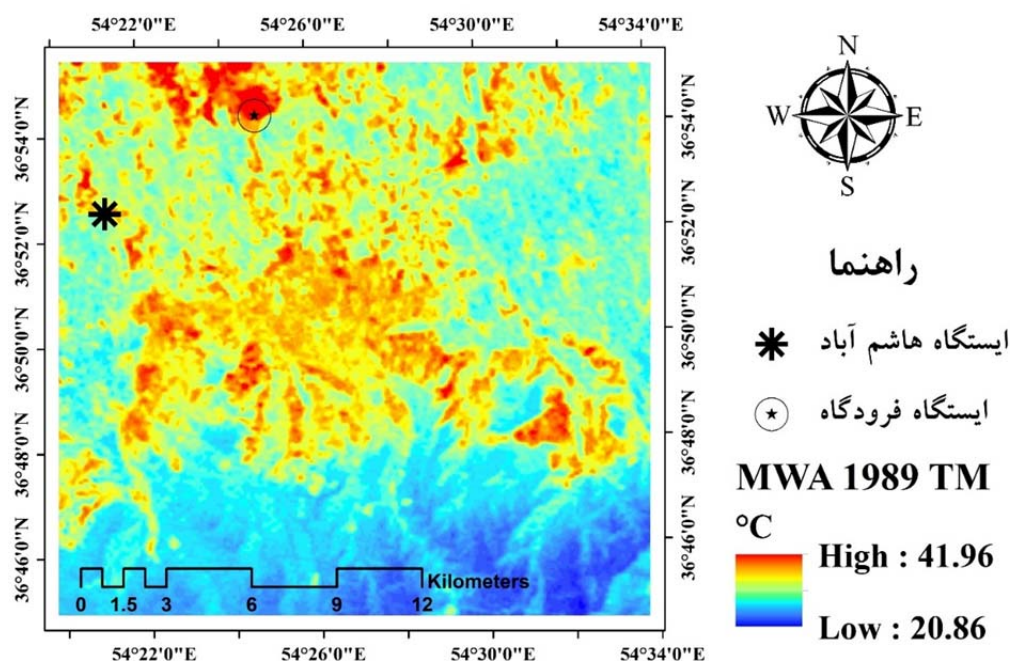
محدوده تغییرات LST الگوریتم‌های پنجره مجزا در سال ۲۰۱۳ بین حداقل ۲۰/۹۸ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد و برای سال ۲۰۲۱ بین ۲۳/۴۸ تا ۵۸/۴۳ درجه سانتی‌گراد به دست آمده است. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود بالاترین دما در محدوده شهر و زمین‌های کشاورزی یا زمین‌های بایر و مقادیر پایین در مناطق جنگلی و پوشش گیاهی انبوه ثبت شده است. بررسی دقیق‌تر نحوه توزیع مکانی و زمانی دما نیازمند مطالعه بیشتر و مقایسه با نقشه‌های کاربری و شاخص‌های طیفی مختلف است.

با توجه به اینکه اطلاعات و پارامترهای جوی برای لندست ۱۹۸۹ موجود نبود، از یک الگوریتم پنجره مجزای ساده (۲۳) که نیازی به پارامترهای جوی ندارد برای محاسبه LST تنها برای این سال استفاده شد (شکل ۷).



شکل ۶- الگوریتم پنجره مجزا سال ۲۰۱۳ (A) و ۲۰۲۱ (B) لندست ۸ سنجنده OLI/TIRS

Fig. 6. Split-Window Algorithm for 2013 (A) and 2021 (B) using Landsat 8 OLI/TIRS

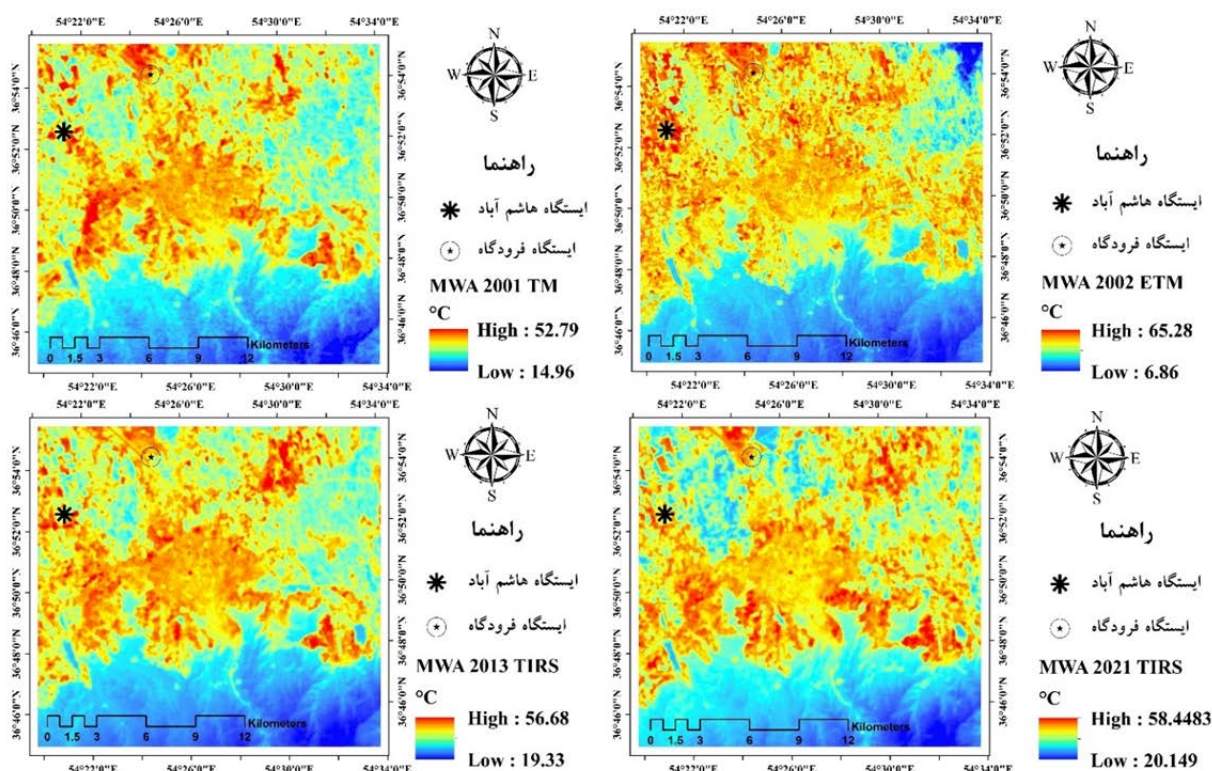


شکل ۷- LST به دست آمده از الگوریتم تک پنجره ساده- ۱۹۸۹ لندست ۵ سنجنده TM

Fig. 7. LST extracted using a simple MWA - 1989 Landsat 5 TM

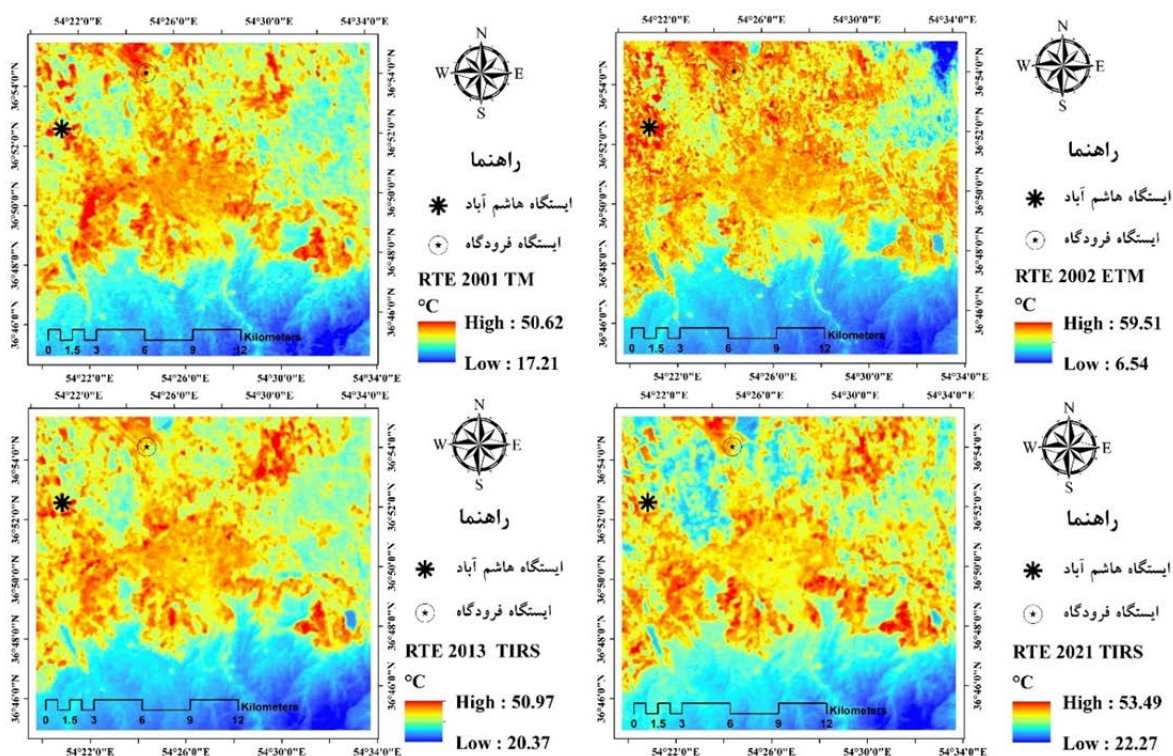
ETM و (RTE) برای تمامی تصاویر لندست سنجنده‌های TM و OLI/TIRS استفاده شدند (شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰)

سایر الگوریتم‌ها شامل الگوریتم تک کانال (SCA)، الگوریتم تک پنجره (MWA) و الگوریتم رابطه انتقال تابشی



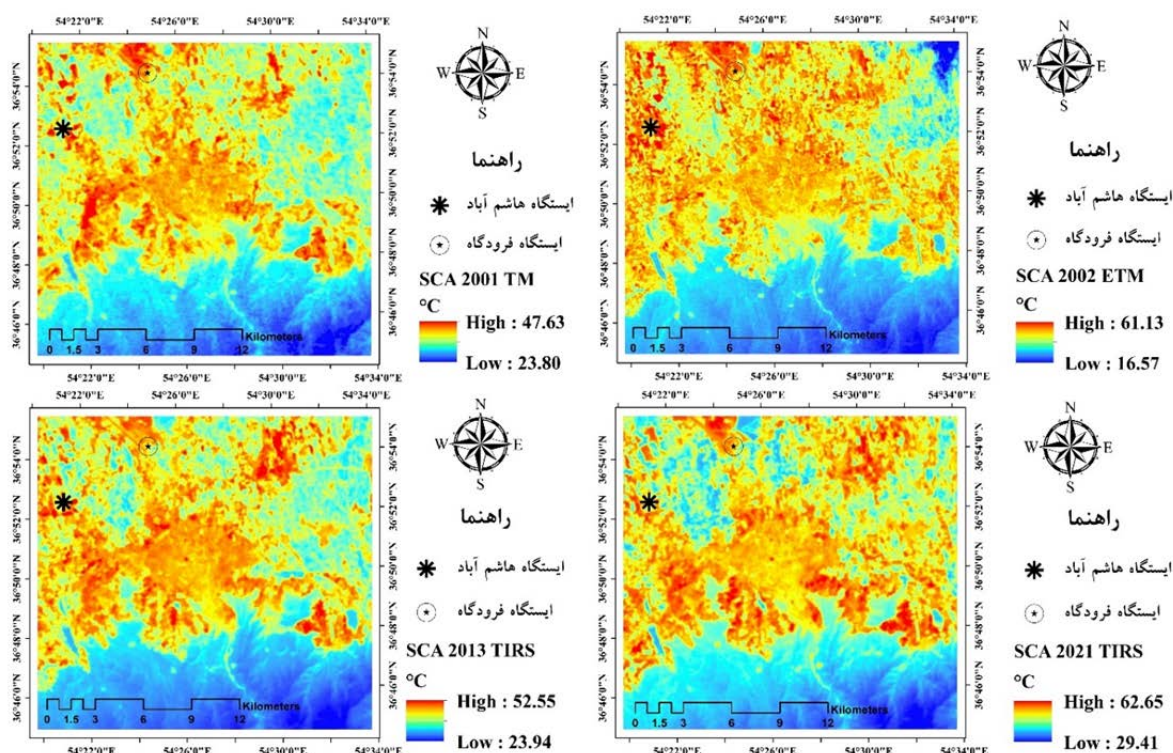
شکل ۸- LST به دست آمده از الگوریتم تک پنجره سال ۲۰۰۱ (A)، ۲۰۰۲ (B)، ۲۰۱۳ (C) و ۲۰۲۱ (D) لندست ۵، ۷ و ۸

Fig. 8. LST extracted using the MWA for 2001 (A), 2002 (B), 2013 (C) AND 2021 (D) Landsat 5,7 & 8



شکل ۹- LST به دست آمده از الگوریتم رابطه انتقال تابشی سال ۲۰۰۱ (A)، ۲۰۰۲ (B)، ۲۰۱۳ (C) و ۲۰۲۱ (D) لندست ۵، ۷ و ۸

Fig. 9. LST extracted using the RTE - 2001 (A), 2002 (B), 2013 (C) AND 2021 (D) Landsat 5,7 & 8



شکل ۱۰- LST به دست آمده از الگوریتم تک کانال سال ۲۰۰۱ (A)، ۲۰۰۲ (B)، ۲۰۱۳ (C) و ۲۰۲۱ (D) لندست ۵، ۷ و ۸

Fig. 10. LST extracted using the SCA - 2001 (A), 2002 (B), 2013 (C) AND 2021 (D) Landsat 5, 7 & 8

توپوگرافی و پوشش زمین، مختصات محدوده ایستگاه هواشناسی بعد از بررسی بر تصاویر گوگل ارث تعیین و به فایل های شیب تبدیل شد و سپس LST موجود در پیکسل هایی که محدوده ایستگاه هواشناسی قرار داشت با مقدار دمای نزدیک سطح زمین اندازه گیری شده توسط ایستگاه هواشناسی مقایسه شد.

مقادیر پارامترهای جوی و مدل مورد استفاده در روش های بازیابی LST برای ۵ تصویر در جدول ۸ مشاهده می شود. داده های هواشناسی ایستگاه های سینوپتیک فرودگاه گرگان و هاشم آباد برای ارزیابی دقت مقادیر LST به دست آمده از سنجنده ها استفاده شد (جدول ۸). به منظور کاهش خطاهای احتمالی با تغییر دما از مکانی به مکان دیگر به دلیل تغییرات

جدول ۸- مقایسه مقادیر LST به دست آمده با روش های روش رابطه انتقال تابشی (RTE)، الگوریتم پنجره مجزا، الگوریتم تک پنجره (MWA) و الگوریتم تک کانال (SCA) با داده های ایستگاه هواشناسی

Table 8. Comparison between LST values using the MWA, SCA, RTE, and SWA with synoptic station data

SWA (C°)	SCA (C°)	RTE (C°)	MWA (C°)	ایستگاه هاشم آباد WHO Index: ۹۹۲۴۱	ایستگاه فرودگاه WHO Index: ۴۰۷۳۸	تاریخ	ماهواره
–	۳۹	۴۰	۴۰	۳۴/۴		۲۰۰۱/۰۸/۰۷	لندست ۵
–	۴۶	۴۳	۴۵	۳۵/۶		۲۰۰۲/۰۷/۱۷	لندست ۷
–	۱۲/۷۸	۱۱/۶۵	۸/۷۵		RMSE		
۴۰	۴۰	۳۷	۴۱		۳۴/۰	۲۰۱۳/۰۸/۰۸	لندست ۸

۳۷	۴۰	۳۷	۴۰	۳۲/۸	۲۰۱۳/۰۸/۰۸
۴۷	۵۲	۴۲	۴۵	۳۸/۵	۲۰۲۱/۰۸/۱۴
۴۲	۴۱	۳۸	۴۰	۳۳/۸	۲۰۲۱/۰۸/۱۴
۶/۹۴	۸/۹۷	۳/۷۵	۶/۷۳	RMSE	

رشته‌های مختلف از جمله محیط‌زیست، جغرافیا و سنجش‌ازدور، مطالعات اقلیم و هواشناسی، برنامه‌ریزی شهری و سایر زمینه‌های مرتبط بتوانند LST را برای منطقه مورد مطالعه خود بدون نیاز به داشتن نرم‌افزار دیگری به دست آورند. الگوریتم‌های مختلفی در زمینه تخمین LST توسعه داده شده است و هر یک از آن‌ها برخی از پارامترهای جوی را در محاسبات در نظر گرفته‌اند. در مطالعات در مناطق مختلف گاهی ممکن است هیچ اطلاعاتی از اندازه‌گیری زمینی برای انجام تصحیحات اتمسفری تصاویر و ارزیابی دقت نتایج در دسترس نباشد. بنابراین یک الگوریتم تک پنجره (۲۳) که نیازی به پارامترهای اتمسفری برای بازیابی LST ندارد برای این موارد در رابط کاربری تعبیه شده است.

با اجرای الگوریتم‌های مختلف و بررسی نتایج با داده‌های ایستگاه هواشناسی، کاربر می‌تواند مناسب‌ترین الگوریتم برای منطقه مورد مطالعه خود انتخاب نماید. همچنین این امکان وجود دارد تا کاربر از مدل توان گسیلمندی سطح زمین خود که با روش دیگری تهیه نموده است نیز استفاده نماید. به این ترتیب می‌توان مدل‌های مختلف را بررسی نمود و مقدار خطا را تا حد ممکن کاهش داد.

اعتبارسنجی LST بازیابی شده توسط ماهواره با استفاده از داده‌های زمینی به دلیل دشواری در تطابق دادن اندازه‌گیری‌ها با مقیاس پیکسل ماهواره و همچنین تغییرات زمانی و مکانی زیاد خود LST دشوار است (۲۸). مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های ایستگاه هواشناسی گرگان نشان می‌دهد در منطقه مورد مطالعه معادله انتقال تابشی (RTE) و الگوریتم تک پنجره (MWA) نتایج نزدیک‌تری به داده‌های ایستگاه‌های انتخابی دارند. با این وجود، گفتن اینکه کدام روش در سطح جهانی

مختصات ایستگاه هواشناسی فرودگاه: $54^{\circ} - 36^{\circ} 54.294'N$ $24.792'E$ (ارتفاع ۲ متر) - مختصات ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد: $36^{\circ} 52.536'N - 54^{\circ} 21.176'E$ (ارتفاع ۱۳/۳ متر) بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی نشان داد روش رابطه انتقال تابشی با مقدار خطای ۳/۷۵ و تک کانال با ۸/۹۷ درجه سانتی‌گراد خطا به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین دقت را برای لندست ۸ داشتند که هر دو نتایج قابل قبولی به حساب می‌آیند. دو الگوریتم تک پنجره و الگوریتم پنجره مجزا نیز نتایج قابل قبولی داشتند. اما در داده‌های لندست ۵ و ۷ بهترین نتایج مربوط به روش الگوریتم تک پنجره بود. مقادیر دمایی مورد استفاده در ارزیابی دقت، دمای نزدیک به سطح زمین اندازه‌گیری شده از ایستگاه هواشناسی است و دمای واقعی زمین نیست. این دماها در ارتفاع تا دو متر از سطح زمین اندازه‌گیری می‌شوند. علاوه بر این تفاوت در نتایج ممکن است به دلیل خطاهای ناشی از شبیه‌سازی پارامترهای جوی، تخمین بخار آب اتمسفر و یا تخمین توان LSE باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

نقشه‌های LST در این مطالعه با استفاده از ۵ الگوریتم شامل الگوریتم پنجره مجزا، الگوریتم تک کانال (SCA)، رابطه انتقال تابش (RTE) و الگوریتم تک پنجره (MWA) برای تمامی سنجنده‌های تصاویر لندست در زمان‌های مختلف محاسبه شد.

یک الگوریتم تک پنجره (۲۳) نیز تنها برای سال ۱۹۸۹ استفاده شد. رابط کاربری منبع باز "LST" برای بازیابی LST با الگوریتم‌های مختلف با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده است و این امکان را فراهم می‌کند تا کاربران

عدم قطعیت بیشتری نسبت به باند ۱۰ بود، زیرا بیشتر تحت تأثیر جذب بخار آب قرار می‌گیرد و بنابراین نسبت به خطاهای پروفایل جوی حساس‌تر است (۳۶).

LST تحت تأثیر عوامل زیادی مانند ریزگردها و هواویزها، پوشش زمین و چیدمان شهر قرار دارد (۲۰). الگوریتم‌های مختلف با در نظر گرفتن دمای نزدیک به سطح و محتوای بخار آب و سایر پارامترهای جوی LST را محاسبه می‌کنند. مرور مطالعات نشان داد نمی‌توان به‌طور قطع یک روش را به عنوان بهترین روش در سطح جهان انتخاب نمود، اما می‌توان با مقایسه الگوریتم‌های مختلف در هر منطقه و نیز با استفاده از مدل‌های مختلف تخمین توان گسیلمندی سطح زمین (LSE) برای به حداقل رساندن خطاها، روش ارجح برای بازیابی LST را بسته به هدف و ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه خود انتخاب کرد. رابط کاربری ارائه شده ابزار قدرتمندی برای محققان و متخصصان دستگاه‌های اجرایی فراهم می‌کند تا در تحقیقات خود و به ویژه توسعه شهرها ابعاد تغییرات گرمای محیط را در سری‌های زمانی و بر اساس کاربری‌های مختلف با سرعت بیشتری پایش نمایند.

این مطالعه دارای برخی محدودیت‌ها بود. رابط کاربری ارائه شده تنها برای تعدادی از الگوریتم‌ها و تصاویر لندست طراحی شده است؛ بنابراین، در تحقیقات آتی می‌توان این رابط کاربری را گسترش داد و استفاده از داده‌های ترکیبی از ماهواره‌های مختلف و مدل‌های پیشرفته‌تر برای اصلاح اثرات جوی و بهبود دقت تخمین‌های LST در مناطق با شرایط متغیر اقلیمی و محیط‌زیستی بررسی شود. این اقدامات می‌توانند به تحلیل دقیق‌تر دمای سطح زمین و تأثیرات آن در محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی کمک کنند. همچنین، یکی از محدودیت‌های استفاده از این رابط کاربری، دسترسی محدود کاربران به پارامترهای جوی است. با این حال، الگوریتم تک پنجره پیشنهادی تا حدی این مشکل را کاهش می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک راه‌حل برای کاهش تأثیرات کمبود داده‌های جوی مورد استفاده قرار گیرد.

بهترین است دشوار است، زیرا دقت پارامترهای ورودی تا حد زیادی بر عملکرد روش‌ها تأثیر می‌گذارد.

مقایسه و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف در برخی مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. رونگالی و همکاران (۲۰۱۸)، نتایج دو الگوریتم پنجره مجزا و تک پنجره را بر اساس تصاویر لندست ۸ با هم مقایسه نمودند. آن‌ها محتوای بخار آب اتمسفر به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار و مهم در نتایج LST معرفی کردند. محتوای بخار آب اتمسفر یک پارامتر حساس و خاص هر منطقه است که بر آب‌وهوا و دمای بالای سطح زمین تأثیر می‌گذارد و شرایط غالب در منطقه را بهتر نشان می‌دهد (۲۴). در الگوریتم پنجره مجزا از دو باند طیفی برای محاسبه گسیلمندی و دمای روشنایی به همراه محتوای بخار آب اتمسفر در بازیابی LST استفاده می‌شوند، درحالی‌که محتوای بخار آب اتمسفر در الگوریتم تک پنجره استفاده نمی‌شود (۲۴). از این رو الگوریتم پنجره مجزا قادر است شرایط میدان را با دقت بیشتری ثبت کند و نتایج بهتری را در مقایسه با الگوریتم تک پنجره در سطوح ناهمگن منطقه مورد مطالعه آشکارتر سازد (۲۵). پرور و همکاران (۲۰۲۲) در بررسی تغییرات کاربری منطقه شهری که نیاز به دقت و جزئیات بیشتری از تغییرات دمایی داشتند، نتایج قابل قبولی از SWA به دست آوردند (۲۰). ژو و همکاران (۲۰۲۳)، برای جلوگیری از تأثیر روش‌های مختلف بازیابی LST بر روی محصولات لندست، الگوریتم‌های مختلف تک پنجره، تک کانال و معادله انتقال تابشی را در منطقه مورد مطالعه خود مقایسه نمودند و نتایج بهتری را از معادله انتقال تابشی به دست آوردند (۳۲).

در مطالعه‌ای دیگر یو و همکاران (۲۰۱۴)، نتایج سه الگوریتم روش رابطه انتقال تابشی، پنجره مجزا و الگوریتم تک کانال را برای داده‌های لندست ۸ در مناطق مختلف با هم مقایسه نمودند. روش معادله انتقال تابشی مورد استفاده در این مطالعه دارای بالاترین دقت بود، درحالی‌که الگوریتم پنجره مجزا دارای دقت متوسطی داشت (۳۶). همچنین عملکرد باند ۱۰ و ۱۱ نیز در تمام الگوریتم‌ها مقایسه شد. باند ۱۱ دارای

منابع مورد استفاده

1. Arabi Aliabad, F., Zare, M., & Ghafarian Malamiri, H. 2021. Comparison of the accuracy of daytime land surface temperature retrieval methods using Landsat 8 images in arid regions. *Infrared Physics & Technology*, 115, 103692. doi:<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103692>
2. Barsi, J. A., Schott, J. R., Hook, S. J., Raqueno, N. G., Markham, B. L., & Radocinski, R. G. 2014. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration. *Remote Sensing*, 6(11), 11607-11626. doi:10.3390/rs61111607
3. Cheng, J., Meng, X., Dong, S., & Liang, S. 2021. Generating the 30-m land surface temperature product over continental China and USA from landsat 5/7/8 data. *Science of Remote Sensing*, 4, 100032. doi:<https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100032>
4. Cheng, Y., Wu, H., Li, Z.-L., Götsche, F.-M., Zhang, X., Li, X.,... Li, Y. 2025. A robust framework for accurate land surface temperature retrieval: Integrating split-window into knowledge-guided machine learning approach. *Remote Sensing of Environment*, 318, 114609. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114609>
5. Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D., & Sobrino, J. A. 2018. An Improved Single-Channel Method to Retrieve Land Surface Temperature from the Landsat-8 Thermal Band. *Remote Sensing*, 10(3), 431. doi:10.3390/rs10030431
6. Dale, B., Dananto, M., & Kifle, B. 2025. Dynamics of land use land cover change and its effect on urban heat island in Halaba Kulito Town. *Heliyon*, 11(2), e41689. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41689>
7. Diaz, L. R., Santos, D. C., Käfer, P. S., Rocha, N. S., Costa, S. T., Kaiser, E. A., & Rolim, S. B. 2021. Land Surface Temperature Retrieval Using High-Resolution Vertical Profiles Simulated by WRF Model. *Atmosphere*, 12(11), 1436. doi:10.3390/atmos12111436
8. Doxani, G., Vermote, E. F., Roger, J.-C., Skakun, S., Gascon, F., Collison, A.,... Yin, F. 2023. Atmospheric Correction Inter-comparison eXercise, ACIX-II Land: An assessment of atmospheric correction processors for Landsat 8 and Sentinel-2 over land. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113412. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113412>
9. Ebrahimi, A., Motamedvaziri, B., Nazemosadat, S. M. J., & Ahmadi, H. 2020. Assessing the relationship between land surface temperature with vegetation and water area change in Arsanjan county, Iran. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(4), 65-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsnr.2020.11.001>
10. Fekrat, H., Asghari Saraskanrood, S., & Alavipanah, S. K. 2020. Estimation of Ardabil land surface temperature using Landsat images and accuracy assessment of land surface temperature estimation methods with ground truth data. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(4), 114-136. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsnr.2020.11.001>
11. García-Santos, V., Cuxart, J., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M. A., & Simó, G. 2018. Comparison of three methods for estimating land surface temperature from landsat 8-tirs sensor data. *Remote Sensing*, 10(9), 1450.
12. Guo, A., Yang, J., Sun, W., Xiao, X., Xia Cecilia, J., Jin, C., & Li, X. 2020. Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102443. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102443>
13. Hurdud, A., Ermida, S. L., Trigo, I. F., & DaCamara, C. C. 2024. Importance of temporal dimension and rural land cover when computing surface urban Heat Island intensity. *Urban Climate*, 56, 102013. doi:<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102013>
14. Isaya Ndossi, M., & Avdan, U. 2016. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: A PyQGIS Plugin. *Remote Sensing*, 8(5), 413. doi:10.3390/rs8050413
15. Jimenez-Munoz, J., & Sobrino, J. A. 2008. Split-Window Coefficients for Land Surface Temperature Retrieval From Low-Resolution Thermal Infrared Sensors. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(4), 806-809. doi:10.1109/LGRS.2008.2001636
16. Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Skoković, D., Mattar, C., & Cristóbal, J. 2014. Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840-1843. doi:10.1109/LGRS.2014.2312032
17. Kirner, D., Láska, K., & Stachoň, Z. 2024. Assessment and validation of Land Surface Temperature retrieval algorithms using Landsat 8 TIRS data in Antarctic ice-free areas. *Polar Science*, 42, 101127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polar.2024.101127>
18. Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K., Cook, M., & Schott, J. R. 2018. An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(1), 101-112.

- 56(10), 5717-5735.
doi:10.1109/TGRS.2018.2824828
19. Nugraha, A. S., Gunawan, T., & Kamal, M. 2019. Comparison of Land Surface Temperature Derived From Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI/TIRS for Drought Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 313, 012041. doi:10.1088/1755-1315/313/1/012041
20. Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. 2022. Effects of Land Use and Land Morphology on Land Surface Temperature: A Case Study for Bojnourd City, North Khorasan. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 118-138. doi:10.30495/girs.2022.1973023.2021. (In Persian)
21. Parvar, Z., Mohammadzadeh, M., & Saeidi, S. 2024. Enhancing decision-making for climate change mitigation and sustainable urban growth. *Urban Climate*, 58, 102223. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102223
22. Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. 2001. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719-3746. doi:10.1080/01431160010006971
23. Rongali, G., Keshari, A. K., Gosain, A., & Khosa, R. (2017). *A Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Estimation from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data* (Vol. 26).
24. 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), 1-9. doi:10.1007/s41651-018-0021-y
25. Sekertekin, A., & Bonafoni, S. 2020. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation. *Remote Sensing*, 12(2), 294. doi:10.3390/rs12020294
26. Tanjina Hasnat, G. N. 2022. Assessment of spatiotemporal distribution pattern of land surface temperature with incessant urban sprawl over Khulna and Rajshahi City Corporations. *Environmental Challenges*, 9, 100644. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100644
27. Tanoori, G., Soltani, A., & Modiri, A. 2024. Machine Learning for Urban Heat Island (UHI) Analysis: Predicting Land Surface Temperature (LST) in Urban Environments. *Urban Climate*, 55, 101962. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101962
28. Wang, M., He, G., Zhang, Z., Wang, G., Wang, Z., Yin, R.,... Cao, X. 2019. A radiance-based split-window algorithm for land surface temperature retrieval: Theory and application to MODIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 204-217.
29. Wang, Z., Zhou, R., & Yu, Y. 2025. The impact of urban morphology on land surface temperature under seasonal and diurnal variations: Marginal and interaction effects. *Building and Environment*, 272, 112673. doi:https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112673
30. Xiang, Y., Zheng, B., Bedra, K. B., Ouyang, Q., Liu, J., & Zheng, J. 2023. Spatial and seasonal differences between near surface air temperature and land surface temperature for Urban Heat Island effect assessment. *Urban Climate*, 52, 101745. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101745
31. Xu, C., Huang, Q., Haase, D., Dong, Q., Teng, Y., Su, M., & Yang, Z. 2024. Cooling Effect of Green Spaces on Urban Heat Island in a Chinese Megacity: Increasing Coverage versus Optimizing Spatial Distribution. *Environmental science & technology*, 58(13), 5811-5820.
32. Xu, X., Pei, H., Wang, C., Xu, Q., Xie, H., Jin, Y.,... Xiao, C. 2023. Long-term analysis of the urban heat island effect using multisource Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products. *Science of The Total Environment*, 858, 159777. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159777
33. Yang, J., Zhou, J., Götsche, 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, 102136. doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102136
34. Yeneneh, N., Elias, E., & Feyisa, G. L. 2022. Detection of land use/land cover and land surface temperature change in the Suha Watershed, North-Western highlands of Ethiopia. *Environmental Challenges*, 7, 100523. doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100523
35. Yu, P., Zhang, L., & Yu, P. 2024. The marginal effect of landscapes on urban land surface temperature within local climate zones based on optimal landscape scale. *Urban Climate*, 57, 102110. doi:https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102110
36. Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. 2014. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852. doi:10.3390/rs6109829



Long-term vegetation changes in semi-arid regions using remote sensing and spatial statistics functions in order to prepare a road map

Alimollai, M. M.¹, Rezai, M.^{2*}, Mahdavi, R.³, Golami, H.³, Kazemi, M.⁴

Received: 2022-09-03 / Accepted: 2023-01-18 / Published: 2025-07-22

Abstract

Currently, the preparation of an accurate vegetation map is one of the basic and important data in natural resource management programs and sustainable development of these resources. Remote sensing is a useful and valuable technology that can be used to extract different layers of information such as soil, rainfall, vegetation and so on. The goal that are used to investigate different factors of vegetation cover is that the data of various spectral bands that can

represent data such as percentage of vegetation cover, biomass and leaf area index into a single value in each pixel.

Reduce. Over time, environmental and human factors have caused positive and negative changes in the quantity and quality of vegetation; This situation will continue in the future. Temporal changes in vegetation may be in the form of increasing or decreasing trends. Recognizing these changes and determining their trends in the past and future can open the way for decision-making for the image of the land. One of the ways to study vegetation changes as the most important indicator of land degradation is remote sensing. Based on this, in this research, using the NDVI normalized vegetation difference index in HDF format and MODIS sensor with a pixel size of 250 meters in a 16-day period, monitoring the long-term changes in the vegetation cover of Fars province during a 20-year period from 2000 to 2020 and was investigated using spatial statistics functions in order to prepare a road map in the year 1400. For this purpose, using spatial statistics functions to prepare a road map. For this purpose, MADIS data has been used for a period of twenty years. Then

Alimollai, M. M.¹, Rezai, M.²(✉), Mahdavi, R.³, Golami, H.³, Kazemi, M.⁴

1. PhD student of Natural Resources Engineering, Watershed Management soil and water protection, University of Hormozgan, Hormozgan, Bandarabass, Iran.

2. Assistant Professor, Natural resources engineering group, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Hormozgan, Bandarabass, Iran.

3. Associated Professor, Natural resources engineering group, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Hormozgan, Bandarabass, Iran.

4. Academic member of Hormoz studies and research center, University of Hormozgan, Bandarabass, Iran.

DOI: 10.30495/girs.2023.1966458.2001
e-mail: m.rezai@hormozgan.ac.ir

the data were analyzed by classical statistics and spatial statistics. The results show the decreasing trend of the vegetation level in a period of 20 years, and the distribution of the vegetation over time was clustered. At the end, a roadmap for long-term vegetation monitoring in Fars province was proposed.

Introduction: Since the changes in land use and vegetation cover occur in large and extensive levels, remote sensing technology is a necessary and valuable tool in evaluating the changes due to repeated coverage of the earth (28). Nowadays, remote sensing technology is scientifically cited as a valuable solution to identify natural resources, especially in the process of preparing land use maps, in different regions of the world (7). Therefore, according to the many applications of detecting changes with the help of remote sensing technology, some of these applications include land use and land cover changes, vegetation and forest cover changes, landscape changes and urban changes, etc., are programs that are used to detect changes (5) in general. Field measurement and the use of remote sensing data are the two main methods for extracting the percentage of vegetation (25). Features such as providing a broad and integrated view of the region, repeatability, easy access to data, high accuracy of the resulting data, and saving time are among the features that make the use of such information preferable to other methods for investigating vegetation and controlling its changes. 26). According to the mentioned topics, the aim of the current research is to reveal the changes in the vegetation cover of Fars province during the long-term period from 2002 to 2020 using remote sensing (RS) and geographic information system (GIS) techniques. The NDVI index is one of the widely used indices, the normalized difference index of vegetation cover, this index also shows the amount of greenness (chlorophyll) of the vegetation cover. It has been proven that the analysis of the time cycle resulting from this type of data is useful in order to identify and monitor the reaction of the vegetation to natural or human sudden events, as well as the variability caused by the growth season and plant development (phenology) under the influence of rainfall and temperature regimes.

Purpose: The current research was conducted with the aim of monitoring the long-term changes in the

vegetation of Fars province during a 20-year period from 2000 to 2020 and using spatial statistics functions.

Methodology: Research Methods

In the present research, vegetation data was extracted in the longterm using satellite images and the changes were examined after preparation. Also, the data was analyzed with the help of spatial statistics functions and finally a road map was prepared. In this way, MODIS sensor images with a spatial resolution of 250 meters were used to investigate the long-term changes in the vegetation cover of Fars province, long-term data in the twenty-year period (2000-2020) and the normalized differential vegetation index NDVI were used. 16-day combined MODIS-NDVI data called MOD13Q1 with a resolution of 250 meters was used. These data were downloaded from LPDAAC1 USGS (United States Geological Survey Land Processes Distributed Active Archive Center) from 2000 to 2020, including 23 images per year and a total of 460 NDVI images individually. After applying atmospheric corrections, cloud removal and BRDF correction, these images were presented in level 3 with Sinusoidal projection. Maximum value combination (MVC) algorithm was used to generate 16-day composite data. This algorithm was designed with the aim of reducing the remaining atmospheric effects and selecting the best NDVI quality for the desired time period. This algorithm was designed with the aim of minimizing the remaining atmospheric effects and selecting the best NDVI quality for the desired time period. Spectral reflection data: NDVI index was used in order to express the type of vegetation cover and to investigate the trend of vegetation changes (trend). NDVI index was calculated based on reflectance in two spectral bands and using equation 1 (20). (1) $(NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red))$

Results and discussion: Long-term changes of NDVI index: The NDVI index in 2000 varied between -0.2 and 0.85 values in Fars province. The maximum value of this index in this year is in the range of 0 to 0.2, and the average and deviation from the NDVI index in 2000 are 0.12 and 0.05, respectively. NDVI index values in 2000 are covered by soil and scattered patches of thin

vegetation. The concentration of vegetation this year can be seen in parts of Sepidan, Mamsani, Morvdasht, Kazeroon and Shiraz cities. Maximum likelihood algorithm was used for classification, Alavi Panah (2), Masoud (21) and Lilsand (18) also used this algorithm. Using regression analysis, Wilens (32) concluded that the reflection of infrared electromagnetic energy by the green leaves of plants is more than that of bare soil, and there is a statistically significant correlation between the reflection of the wavelength of the red and infrared bands with the percentage of plant canopy cover. So using these bands in the regression model as an independent variable in order to calculate the functional variable of vegetation is appropriate (15). In this regard, Ino (9) by examining the factors influencing the amount and trend of changes in vegetation cover during droughts by using stepwise regression, reached the conclusion that the amount of changes in the value of NDVI index is a direct function of the amount of changes in vegetation cover.

Conclusion: Maximum likelihood algorithm was used for classification, Alavi Panah (2), Masoud (21) and Lilsand (18) also used this algorithm. Using regression analysis, Wilens (32) concluded that the reflection of infrared electromagnetic energy by the green leaves of plants is more than that of bare soil, and between the reflection of the

wavelength band, he has proved the total decrease in vegetation cover in parts of Fars province, which is likely that Part of this result is due to errors in the use of satellite data (including various types of data errors, user and operator errors, software errors, and errors caused by the locator device). Similarly, in this regard, Alavi Panah (1) stated that in the preparation of maps from Remote sensing and satellite data processing and other digital maps cannot be expected to be error-free. According to the results obtained and considering that the increasing trend of vegetation cover in Fars province has been observed, according to Bai's research (5), the observation of this increase can be caused by the increase in the use of natural lands such as pastures and forests to agricultural lands, from Other conservation activities such as grazing, managing and controlling the entry and exit of livestock, reducing the use of plants to provide thermal energy at the same time as providing fossil fuels and gas supply to rural areas and carrying out bush and tree planting operations in line with the improvement operations and Restoration of forests and pastures can be another factor in increasing vegetation.

Keywords: Remote sensing, statistical functions, vegetation, Fars