

Accuracy Improvement of Land Surface Temperature Extracted from Thermal Bands of Landsat Satellite using Linear Regression and Ground Observations

Nooshin Pahlevanzadeh¹, Milad Janalipour², Nadia Abbaszadeh Tehrani³, Farinaz Farhanj⁴

¹ B.A. Graduate of Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

³ Assistant Professor, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

⁴ Remote Sensing Expert, Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Monitoring the changes in land surface temperature (LST) caused by seasonal and non-seasonal fluctuations is essential due to its profound impact on the human and natural environment. The use of remote sensing satellite imagery has been extensively considered for the continuous monitoring of LST with its low cost and high speed. In this research, first, three conventional temperature extraction approaches based on Plank's law were used to extract LST of surrounded areas of Lake Urmia. Then, using a linear regression and observations of the temperature in meteorological stations, LST maps extracted from conventional methods were modified. The results showed that conventional temperature extraction approaches for TM and TIRS sensors of Landsat Satellite had an accuracy of about 4 °C and 8 °C, respectively. After modifying LST maps using the linear regression, this accuracy reduced to 1 °C and 0.5 °C for TM and TIRS sensors, respectively. This indicated the proper performance of the regression approach presented in this study for temperature modification.

Key words: Land Surface Temperature, Linear Regression, Satellite Images, Meteorological Stations.

* milad_janalipour@ari.ac.ir



بهبود صحت استخراج دمای سطح زمین از باندهای حرارتی ماهواره لندست با استفاده از رگرسیون خطی و مشاهدات زمینی

نوشین پهلوان‌زاده، دانش‌آموخته کارشناسی نقشه‌برداری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
میلاد جانعلی‌پور^{*}، استادیار، گروه کاربرد هوافضا در محیط زیست، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران
نادیا عباس‌زاده طهرانی، استادیار، گروه کاربرد هوافضا در محیط زیست، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران
فریناز فرهنگ، کارشناس ارشد، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

وصول: ۱۳۹۸/۰۵/۰۱ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۴، صص ۷۸-۵۹

چکیده

پایش تغییرات دمای سطح زمین حاصل از نوسانات فصلی و غیرفصلی به دلیل تأثیر بسیار آن بر محیط‌زیست انسانی و طبیعی، امری ضروری است. به‌منظور پایش پیوسته دمای سطح زمین با هزینه‌اندک و سرعت زیاد، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنش از دور استفاده می‌شود. در این پژوهش، نخست با بهره‌گیری از سه روش متداول استخراج دما مبتنی بر رابطه پلانک، دمای سطح زمین در محدوده دریاچه ارومیه از تصاویر ماهواره لندست استخراج شد؛ سپس با استفاده از رابطه رگرسیون خطی و مشاهدات دمای ایستگاه‌های هواشناسی، نقشه‌های دمای استخراج‌شده از روش‌های متداول اصلاح شدند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد روش‌های متداول استخراج دما برای سنجنده‌های TM و TIRS ماهواره لندست، صحتی تقریباً برابر با ۴ و ۸ درجه سانتی‌گراد دارند. پس از اصلاح نقشه‌های دما با استفاده از روش رگرسیون خطی، این مقدار صحت برای سنجنده‌های TM و TIRS تقریباً به ترتیب به ۱ و ۰/۵ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. این موضوع، کارایی مناسب روش رگرسیون ارائه‌شده در این پژوهش را برای اصلاح دما نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین، رگرسیون خطی، تصاویر ماهواره‌ای، ایستگاه‌های هواشناسی.

مقدمه

شرایط جوی در نزدیکی سطح زمین تأثیرگذار است (Mallick et al., 2008: 131). در دست داشتن دمای سطح زمین و تغییرات مکانی آن برای شناسایی مناطقی که افزایش دما داشته و یافتن راه‌حلی برای مقابله با آنها، مهم و ضروری است.

استفاده از باندهای مادون قرمز حرارتی، روشی بهینه برای محاسبه LST در مقیاس‌های بزرگ مکانی است (Dash et al., 2002: 2). با باندهای حرارتی و اندازه‌گیری تابش مادون قرمز حرارتی گسیل شده از سطح اجسام، برآورد دمای آنها امکان‌پذیر می‌شود (Brandt et al., 2008: 731; Nunack et al., 2015: 323). اطلاعات زیادی برای تخمین ضریب گسیل سطح در دسترس نیست؛ بنابراین در سال‌های اخیر پژوهشگران سعی کرده‌اند با استفاده از شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی^۲ (NDVI)، ضریب گسیل سطح را تخمین بزنند (Van De Griend et al., 1993: 1122). برخی پژوهشگران استخراج ضریب گسیل سطح را از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و MODIS پیشنهاد داده‌اند (Ma et al., 2002: 910).

ضریب گسیل سطح^۳ (LSE)، متغیری برای بیان ویژگی‌های ذاتی اجسام و مواد طبیعی است. ضریب گسیل با زاویه دید و زبری سطح تغییر می‌کند، ولی به‌مثابه معیاری برای شناسایی ترکیبات مواد به‌ویژه مواد معدنی سیلیکاتی کاربرد دارد (Sobrino et al., 2001: 256; Li et al., 2013: 308). LSE برای مطالعات مربوط به خاک، فرسایش، تخمین میزان پراکندگی پوشش‌های گیاهی و تغییرات آن، نگاهت بستر سنگ‌ها، اکتشاف منابع معدنی و تخمین دقیق

دمای سطح زمین^۱ (LST)، دمای بالاترین لایه سطح زمین است و به ضریب گسیل سطح، پوشش گیاهی و انواع پوشش‌های زمینی وابسته است. LST، اطلاعات مهمی را درباره ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین از مقیاس‌های محلی تا جهانی، در اختیار قرار می‌دهد و نقش مهمی در بسیاری از کاربردها دارد. از LST برای مطالعه انرژی زمین‌گرمایی، مدیریت منابع آب، خشکسالی، کشاورزی، پردازش‌های ژئوشیمی محیطی، پژوهش‌های هواشناسی، تغییرات جهانی دمای سطح زمین، پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا، هیدرولوژی، اکولوژی، بررسی وضعیت گیاهان، آب‌وهوای شهری، مطالعات محیط‌زیستی، برآورد متغیرهای ژئوفیزیکی مانند تبخیر-تعرق و رطوبت خاک استفاده می‌شود (Farhanj & Akhoondzadeh, 2017: 5769; Rozenstein et al., 2014: 186). دلیل آنکه رفتارهای تابشی مواد اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های آنها ارائه می‌کنند و همچنین میزان انرژی بازتاب‌یافته از هر ماده، تابعی از دمای سطحی آن است، مطالعه دمای سطح اجسام اطلاعات سودمندی از وضعیت پدیده‌ها ارائه می‌دهد (Farhanj & Akhoondzadeh, 2017: 186; Liu et al., 2011: 94).

دمای سطح زمین در بسیاری از شهرها با تغییر پوشش‌های زمینی و فعالیت‌های انسانی در حال افزایش است. یکی از دلایل آن، کاهش مناطق سبز و پوشش‌های گیاهی در شهرهاست. این تغییرات بر تابش خورشیدی جذب‌شده، دمای سطح زمین، میزان تبخیر و تعرق، گرمای ذخیره‌شده، باد و در نتیجه تغییر

² Normalized Difference Vegetation Index

³ Land Surface Emissivity

¹ Land Surface Temperature

Li et al., 2011: 1116)، روش فیزیکی چند زمانی ()
 3)، روش فیزیکی فیلتر کالمن (Masiello et al.,)
 3617: 2013) و روش بازیابی دومرحله‌ای (Ma et
 910: 2002: al.,)

روش تک‌کاناله نیازمند اطلاعات دقیقی از ضریب
 گسیل سطح در کانال استفاده‌شده و پروفایل‌های جوئی
 و روش پنجره دوگانه نیازمند اطلاعات دقیقی از
 محتوای بخار آب جو و LSE است. استفاده از
 کانال‌های چندگانه به دلیل نبود قطعیت زیاد مقادیر
 LSE برای دو کانال مادون قرمز میانی (سه تا شش
 میکرومتر) نسبت به کانال‌های مادون قرمز با مرکزیت
 طول موجی ۱۰ تا ۱۲ میکرومتر محدود شده است. از
 معایب روش مبتنی بر زوایای دید چندگانه، وابستگی
 زیاد مقادیر LSE به زوایای دید است. روش عملیاتی
 روز/ شب مبتنی بر فیزیک نیازمند اطلاعات دقیقی از
 مقادیر ضریب گسیل سطح، تصحیحات جوئی صحیح
 و انطباق هندسی کامل باندهاست (Li & Becker,)
 84: 1993). روش‌های TES، فیزیکی چندزمانی و
 فیلتر کالمن نیازمند تصحیحات جوئی صحیح هستند
 1: 2016: Zhong et al.,)

داده‌های مادون قرمز حرارتی فراطیفی به‌دست‌آمده
 از سنجنده‌هایی نظیر IASI^۶ و CrIS^۷ با داشتن هزاران
 باند، اطلاعات ارزشمندی را برای محاسبه LST در
 اختیار ما قرار می‌دهند. روش‌های بازیابی LST از
 داده‌های مادون قرمز حرارتی فراطیفی به دو دسته
 تجربی و فیزیکی تقسیم می‌شود. روش‌های فیزیکی به
 دلیل پیچیدگی‌های ذاتی محاسبات پیچیده‌ای دارند و
 نیازمند پروفایل‌های دقیق جوئی هستند. روش تجربی

بودجه‌های (تولید و مصرف) انرژی سطح به کار
 می‌رود (Gillespie et al., 1998: 1113). مقدار
 ضریب گسیل سطح در تخمین دقیق دما نقشی اساسی
 دارد. ضریب گسیل سطح به عوامل بسیاری نظیر دما،
 زبری سطح، طول موج و زاویه دید وابسته است (Jin
 & Liang, 2006: 2867).

تأثیرات اصلی جو بر تابش خورشیدی منتشرشده،
 جذب آن، بازتاب رو به بالای تابش با جو و تابندگی
 رو به پایین آن و بازتاب‌شده از سطح زمین است
 (Mallick et al., 2008: 132)؛ بنابراین نیاز است
 پارامترهای جوئی اعم از ضریب عبوری جو^۱، تابندگی
 رو به بالا^۲ و تابندگی رو به پایین^۳ در نظر گرفته شوند
 (Sun et al., 2003: 7; Lorenz, 1966: 428). در نتیجه
 برای تفسیر باندهای حرارتی به تصحیح تأثیرات جوئی
 و سپس بازیابی مقادیر ضریب گسیل سطح و
 محاسبه دما نیاز است. این پردازش را جداسازی
 ضریب گسیل سطح/ دما^۴ (TES) می‌نامند (Borel,)
 1: 2003).

روش‌های مختلف برای بازیابی LST از تصاویر
 ماهواره‌ای عبارت‌اند از: روش تک‌کاناله (Hook et
 al., 1992: 125)، روش پنجره دوگانه^۵ (تفاضل دو
 باند حرارتی مجاور برای کاهش آثار جو) (Xia et al.,)
 21389: 2014)، روش چندکاناله (Sun et al., 2007:)
 5257)، روش مبتنی بر زوایای دید چندگانه (Chedin
 et al., 1982: 613)، روش عملیاتی روز/ شب مبتنی
 بر فیزیک (Wan & Li, 1997: 3)، روش جداسازی
 گسیلندگی و دما (TES) (Gillespie et al., 1998:)

¹ Atmospheric Transmission

² Upwelling Radiance

³ Downwelling Radiance

⁴ Temperature/ Emissivity Separation

⁵ Split Window

⁶ Infrared Atmospheric Sounding Interferometer

⁷ Cross-Track Infrared Sounder

آنها، تولید نقشه ضریب گسیل سطح با استفاده از باندهای حرارتی ASTER بود. آنها الگوریتم TES را روی هر پنج باند حرارتی این ماهواره اعمال کردند و نتیجه گرفتند الگوریتم TES در تمامی پنج باند حرارتی، دما را بیشتر از مقدار واقعی خود و مقادیر ضریب گسیل سطح را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد. دلیل اختلاف، نبود کالیبراسیون دقیق باندهای حرارتی، تصحیحات جوی نادرست، وجود نویزهای رادیومتریکی در محاسبه ضریب گسیل و وجود پوشش‌های مخلوط در یک پیکسل به دلیل توان تفکیک مکانی کم ASTER است. آنها برای غلبه بر این مشکل، روش بهبودیافته TES یعنی ITES را معرفی کردند. با اعمال الگوریتم ITES، میانگین مربعات خطای^۵ (RMSE) مقادیر ضریب گسیل در مقایسه با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای نواحی با پوشش کامل گیاهی کمتر از ۰/۰۱۵ و برای نواحی با پوشش گیاهی پراکنده، خاک و سطح آب دریا کمتر از ۰/۰۱ گزارش شد؛ سپس با استفاده از باندهای حرارتی ASTER، LST را محاسبه کردند. در نهایت دریافتند با محاسبه دقیق نقشه ضریب گسیل سطح، نقشه دمای سطح زمین با دقت بیشتر و پذیرفته‌تری تولید می‌شود. رزنستین و همکاران^۶ (۲۰۱۴) با استفاده از دو باند حرارتی لندست ۸ و به‌کارگیری الگوریتم پنجره دوگانه و محاسبه ضریب عبوری جو و ضریب گسیل سطح، LST را تخمین زدند. آنها توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر باندهای حرارتی این ماهواره را برای اندازه‌گیری زوال آب در زمین‌های آبیاری شده مناسب

که شامل استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون مؤلفه‌های اصلی است، مبتنی بر یافتن ارتباط خطی یا غیرخطی تجربی میان مؤلفه‌های اصلی دمای روشنایی^۱ (BT) در بالای جو^۲ (TOA) و دمای سطح LST است؛ اما روش‌های شبکه عصبی و رگرسیون سریع نیازمند هزاران باند هستند که این هزاران باند به دلیل آسیب داده‌ها در طول موج‌های خاصی در دسترس نیستند. دقت مورد انتظار محاسبه LST از باندهای TIR، کمتر از یک کلون است (Becker & Li, 1990: 390).

پیشینه پژوهش

ملک و همکاران^۳ (۲۰۰۸) نقشه دمای سطح زمین را در Delhi با استفاده از تصاویر لندست ۷ به دست آوردند. آنها با استفاده از باندهای مرئی و حرارتی این ماهواره، نقشه پوشش‌های زمینی را در منطقه پژوهش طبقه‌بندی کردند. ضریب گسیل سطح با توجه به رابطه خطی آن با شاخص گیاهی NDVI، محاسبه و همبستگی زیادی میان دمای سطح زمین محاسبه شده و مقادیر NDVI در پوشش‌های مختلف زمینی مشاهده شد؛ به همین دلیل آنها نتیجه گرفتند دمای سطح زمین مستقیماً با مقادیر NDVI قابل تخمین است. روش پیشنهادی آنها در محاسبه مقادیر ضریب گسیل سطح، NDVI و دمای سطح زمین در مناطق شهری با دقت پذیرفته کاراست.

پهلوانی و مباشری^۴ (۲۰۰۹) از تصاویر ASTER LIB برای محاسبه LST استفاده کردند. هدف اصلی

¹ Brightness Temperature

² Top of Atmosphere

³ Mallick et al

⁴ Pahlevani & Mobasheri

⁵ Root Mean Square Error

⁶ Rozenstein et al

باندهای حرارتی با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر را تولید و سپس LST را محاسبه کردند. باند حرارتی شماره ۱۱ به دلیل حساسیت زیاد به خطای پروفایل‌های جوئی و خطای کالیبراسیون زیاد در محاسبات آورده نشده است. این ادغام پس از ثبت متقابل باندهای مرئی قرمز (شماره ۴) و حرارتی شماره ۱۰ با استفاده از روش کانتورلت صورت پذیرفت. در نهایت آنها با اعمال تصحیحات جوئی و استفاده از روش تک‌کاناله و در نظر گرفتن رابطه خطی میان مقادیر NDVI و LSE (روش آستانه شاخص پوشش گیاهی)، LST با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر را تولید کردند. منطقه مطالعه شده استان ایلام، در جنوب غرب ایران واقع بود.

ناجی دومیرانی و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از باندهای حرارتی شماره ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ با روش پنجره مجزا، نقشه دمای سطح زمین را به دست آوردند. منطقه پژوهش شهرستان نهاوند در استان همدان بود. پس از اعمال تصحیحات لازم، با داشتن ضریب انتشار خاک، ضریب انتشار پوشش گیاهی و محاسبه نسبت پوشش گیاهی، LSE را محاسبه کردند. روش پنجره مجزا برای کاهش آثار جوئی به کار گرفته شد. ضرایب ثابت این الگوریتم با شبیه‌سازی با اعداد مختلف از شرایط جوئی به دست آمد. ظرفیت بخار آب جوئی نیز با استفاده از رابطه تجربی آن با میانگین دماهای روشنایی محاسبه شد. اختلاف دمای میان LST محاسبه شده و داده‌های ایستگاههای هواشناسی کمتر از ۲ درجه گزارش شد.

محمدی‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) با تلفیق تصاویر لندست (تصاویر با توان تفکیک مکانی زیاد) و مادیس (تصاویر با توان تفکیک زمانی زیاد)، تصاویر روزانه

و کافی دانستند. RMSE دمایی محاسبه شده، ۰/۹۳ کلون گزارش شده است.

ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۶) با روش چندکاناله از داده‌های مادون قرمز حرارتی سنجنده IASI برای بازیابی LST استفاده کردند. اعتبارسنجی آنها با داده‌های شبیه‌سازی صورت گرفت. RMSE دمایی محاسبه شده، ۰/۹ کلون به دست آمد. آنها دریافتند مقادیر ضریب گسیل محاسبه شده در محاسبه LST تأثیرگذار است.

کیان و همکاران^۲ (۲۰۱۶) با استفاده از روش پنجره دوگانه و دو باند مادون قرمز میانی و مادون قرمز حرارتی به دست آمده از اسکنر چند طیفی هوایی^۳ و با اعمال تصحیحات جوئی، LST را محاسبه کردند. RMSE نتایج دمای استخراج شده از روش پیشنهادی، کمتر از ۱/۵ کلون گزارش شد (Qian et al., 2016: 1). ابراهیمی هروی و همکاران (۱۳۹۵) چند روش محاسبه LST را با هم مقایسه کردند. از جمله روش‌های به کار گرفته شده برای محاسبه دما، توازن انرژی برای سطح زمین سبال^۴ (SEBAL)، استفان - بولتزمن، تک‌کانالی و پنجره مجزا بود. آنها بدین منظور از باندهای حرارتی ماهواره لندست ۸ در شهر کرج استفاده کردند و دریافتند LST به دست آمده از روش سبال و پس از آن پنجره مجزا به داده‌های زمینی نزدیک‌تر است. از نظر زمانی نیز، فصول سرد سال نتایج نزدیک‌تری به داده‌های هواشناسی داشته است.

فرهنج و آخوندزاده^۵ (۲۰۱۷) نخست با ادغام باندهای مرئی و حرارتی ماهواره 8 LANDSAT

¹ Zhong et al

² Qian et al

³ Airborne Multispectral Scanner

⁴ Surface Energy Balance Algorithms for Land

⁵ Farhanj & Akhoondzadeh

از آن، تصحیحات هندسی و جوئی را با استفاده از نرم‌افزار ENVI 5.1 روی تصاویر اعمال کردند. در ادامه با استفاده از رابطه پلانک، دمای روشنایی باندهای حرارتی را به دست آوردند. دمای سطح زمین با الگوریتم سبال بازیابی شد. بدین ترتیب که نخست NDVI و نسبت پوشش گیاهی و پس از آن با توجه به رابطه ضریب گسیل سطح و شاخص پوشش گیاهی، ضریب گسیل را محاسبه کردند و در نهایت LST را به دست آوردند. آنها با مقایسه LST سال‌های ۱۹۸۴، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۷ دریافتند دما روند افزایشی داشته و به دلیل افزایش نواحی مسکونی، پوشش گیاهی کاهش یافته و زمین‌های کشاورزی به زمین بایر تبدیل شده است که این خود دلیلی بر افزایش دما در سال ۲۰۱۷ بوده است.

هدف پژوهش

همان‌طور که مشاهده شد، عمده سنجنده‌های سنجش از دور از یک باند حرارتی برای پایش دمای سطح زمین بهره می‌برند. پایش دمای استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده از روش‌های متداول، قطعیت کافی ندارد؛ بنابراین هدف این مقاله، ارائه یک روش پس‌پردازش جدید برای استخراج دقیق و درست دمای سطح زمین از سه روش متداول استخراج دماست.

روش‌شناسی پژوهش

داده‌های استفاده شده و منطقه پژوهش

منطقه مدنظر در این پژوهش، ناحیه اطراف دریاچه ارومیه است. به دلیل تغییرات شدید کاربری و پوششی آن ناحیه، پایش دمای سطح زمین در

دمای سطح زمین را با توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر به دست آوردند. منطقه پژوهش سلمان فارسی در استان خوزستان بود. در این پژوهش از تصاویر ماهواره لندست ۸ (توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر برای باندهای حرارتی)، محصول انعکاس روزانه مادیس (با توان تفکیک ۵۰۰ متر) و محصول دمای روزانه سطح زمین مادیس (با توان تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر) استفاده شد. تصاویر با بهره‌گیری از مدل FLAASH، تصحیح جوئی شد. نخست تمامی تصاویر را کالیبراسیون رادیومتریکی و سپس باند حرارتی لندست را با استفاده از روش تک‌کانال به LST تبدیل کردند. آنها با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی، رابطه میان LST به دست آمده از لندست (۱۰۰ متری) و محصول دمای روزانه سطح زمین مادیس (۱۰۰۰ متری) را یافتند و بدین ترتیب دمای سطح زمین را به صورت روزانه با توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر پیش‌بینی کردند. از محدودیت‌های این روش، مشابه بودن شرایط زمانی دو تصویر ورودی مادیس و لندست است که با توجه به پوشش‌های زیاد ابر در مناطق، فراهم کردن این تصاویر دشوار است. درصد زیاد پوشش گیاهی منطقه سبب افزایش دقت در پیش‌بینی دمای روزانه با توان تفکیک مکانی زیاد می‌شود.

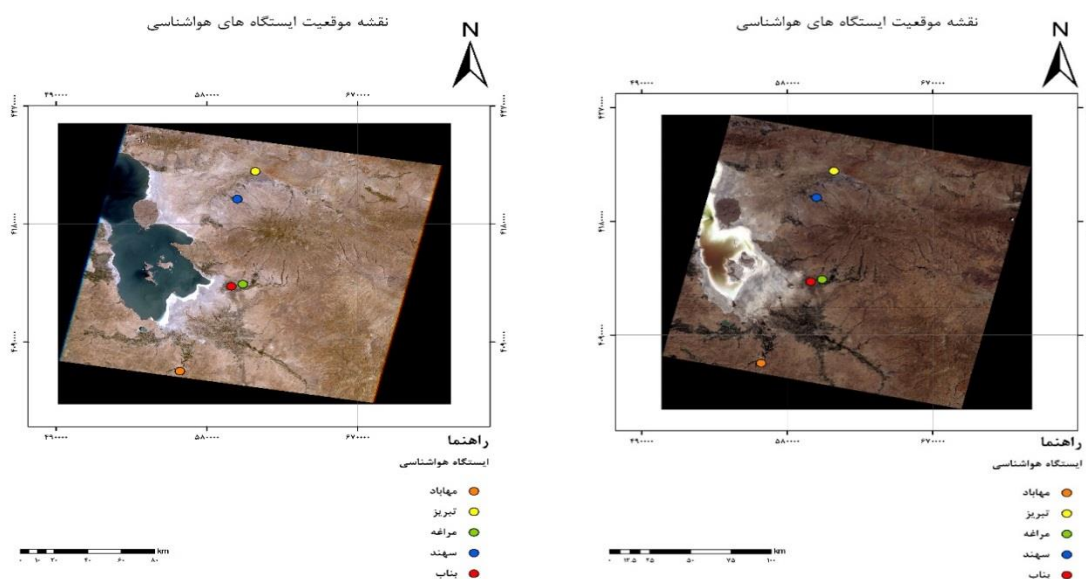
درویشی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از باند حرارتی ماهواره لندست ۵ و ۷ (باند شماره ۶) به ترتیب برای سال‌های ۱۹۸۴ و ۲۰۰۰ و باند حرارتی ماهواره لندست ۸ (باند شماره ۱۰) برای سال ۲۰۱۷، LST را تهیه و پس از آن ارتباط میان تغییرات کاربری اراضی را با دمای سطح زمین بررسی کردند. آنها نخست با استفاده از کالیبراسیون رادیومتریکی، مقادیر رقومی باندهای لندست را به تابش طیفی تبدیل و پس

از سوی دیگر مشاهدات دمای اندازه‌گیری شده با ایستگاه‌های هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. تقریباً حدود ۹ ایستگاه در منطقه پژوهش وجود دارد که مشاهدات آنها ۸ بار در روز انجام می‌شود. مشاهدات متعددی نظیر فشار، بارش، سرعت و جهت باد در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند که یکی از آنها دماست. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه پژوهش در شکل (۱) نمایش داده شده است.

اطراف آن اهمیت بسیاری دارد؛ از این رو در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای آن ناحیه استفاده می‌شود. به منظور تعیین دمای سطح زمین (LST) از داده‌های ماهواره لندست ۵ و لندست ۸ استفاده می‌شود. سنجنده TM، یک باند حرارتی با توان تفکیک مکانی ۱۲۰ متر و سنجنده TIRS، یک باند حرارتی با توان تفکیک مکانی ۱۰۰ متر دارد که در این پژوهش از آنها استفاده شده است. جدول (۱) مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای پژوهش

سنجنده	تاریخ دریافت تصویر (میلادی)	تاریخ دریافت تصویر (شمسی)	ساعت تقریبی تصویربرداری (به وقت محلی)	زاویه آزیموت خورشیدی (درجه)
TM	۰۹-۰۷-۲۰۰۱	۱۳۸۰/۰۴/۱۸	۹:۴۵	۶۲/۳۶
TM	۲۵-۰۷-۲۰۰۱	۱۳۸۰/۰۵/۰۳	۹:۴۵	۶۰/۳۴
TM	۱۰-۰۸-۲۰۰۱	۱۳۸۰/۰۵/۱۹	۹:۴۵	۵۷/۶۱
TM	۱۰-۰۴-۲۰۰۹	۱۳۸۷/۰۱/۲۱	۹:۴۵	۵۳/۳۳
OLI/TIRS	۲۲-۰۸-۲۰۱۷	۱۳۹۶/۰۵/۳۱	۹:۴۵	۵۷/۹۲
OLI/TIRS	۲۵-۰۸-۲۰۱۸	۱۳۹۷/۰۶/۰۳	۹:۴۵	۵۷/۱۵



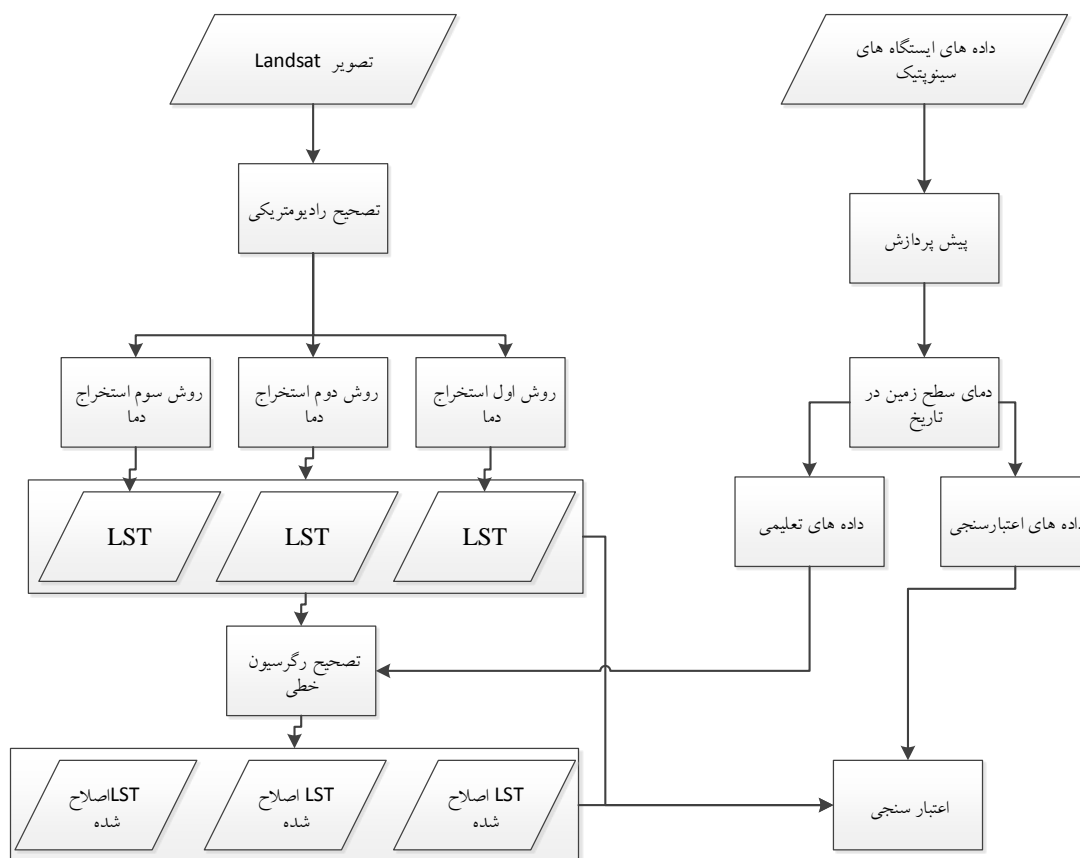
شکل ۱. نقشه تعیین موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در محدوده انتخاب شده

تصویر لندست ۸ (سمت راست) و تصویر لندست ۵ (سمت چپ)

روش پژوهش

روش پیشنهادی مطابق مدل مفهومی شکل (۲) پیاده‌سازی خواهد شد. براساس این شکل، نخست تصاویر ماهواره‌ای استفاده‌شده پیش‌پردازش می‌شوند؛ سپس با سه روش، دمای سطح زمین استخراج می‌شود؛ از سوی دیگر مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی پیش‌پردازش و برای بهبود

نتایج روش‌های استخراج دما با استفاده از رگرسیون خطی استفاده خواهند شد. پس از اصلاح نتایج روش‌های استخراج دما، نتایج با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی اعتبارسنجی و نقشه نهایی تغییرات دما ارائه خواهد شد. مفاهیم مربوط به هریک از بخش‌ها در ادامه به تفصیل خواهد آمد.



شکل ۲. مراحل استخراج دمای سطح زمین

پیش‌پردازش

پیش از اجرای روش‌های استخراج دما از باندهای حرارتی، باندها باید پیش‌پردازش شوند. یکی از پیش‌پردازش‌های متداول، کالیبراسیون رادیومتریکی

است. در کالیبراسیون رادیومتریکی، مقادیر رقومی^۱ ثبت‌شده با سنجنده به تابش طیفی تبدیل می‌شود. به‌منظور تبدیل درجات خاکستری به تابش طیفی از رابطه^۱ استفاده می‌شود (Alipour et al., 2003: 2).

^۱ Digital Number

روش‌های استخراج توان تشعشعی، استفاده از شاخص گیاهی NDVI برای تفکیک کلاس‌ها از یکدیگر است. در این روش ضریبی با عنوان توان تشعشعی (ε) تعریف می‌شود که برای هر جسم مقدار مشخصی دارد. به دلیل تنوع زیاد اجسام در هر تصویر سه مقدار مختلف برای (ε) در نظر گرفته می‌شود که این بازه‌بندی براساس شاخص NDVI تعیین می‌شود. جدول (۲)، این بازه‌بندی را نشان می‌دهد. رابطه استفاده شده در این روش به صورت زیر است (جهانبخش و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۵):

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1 \times \varepsilon}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، ε ضریبی است که سه حد آستانه برای آن در نظر گرفته می‌شود و در جدول (۲) حدود آن مشخص شده است. این ضریب با شاخص NDVI تعیین می‌شود (Maimaitiyiming et al., 2014: 3).

جدول ۲. حد آستانه مدنظر برای تعیین ε

NDVI > ۰/۵	$\varepsilon = ۰/۹۹$
NDVI < ۰/۲	$\varepsilon = ۰/۹۷$
$۰/۲ < \text{NDVI} < ۰/۵$	$\varepsilon = 0.004 * \left(\frac{\text{NDVI} - 0.2}{0.5 - 0.2}\right)^2 + 0.986$

روش سوم استخراج دما

روش سبال^۱ در مقایسه با سایر روش‌های استخراج دما از ورودی‌های کمتری استفاده می‌کند و صحت بیشتر و خطای کمتری دارد؛ به همین علت از میان روش‌های استخراج دما، روش سبال به‌مثابه روش سوم استخراج دما انتخاب شد. در این روش پس از اعمال کالیبراسیون رادیومتریکی روی تمامی

$$L\lambda = M_L \times Q_{cat} + A_L \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، $L\lambda$ تابش طیفی در بالای جو^۲ M_L ، A_L و Q_{cat} (TOA) عامل مقیاس‌سازی و Q_{cat} عدد رقومی در باند مدنظر است.

روش اول استخراج دما

بر مبنای قانون پلانک، دمای فیزیکی جسم، طول موج و سرعت نور در خلأ بر گسیل انرژی از یک جسم سیاه تأثیرگذار است؛ در نتیجه امکان برقراری ارتباط خطی میان دمای جسم و گسیلندگی آن با دمای ثبت شده در سنجنده فراهم می‌شود. در رابطه پلانک (رابطه ۲) برای جسم سیاه فرض بر این است که تمام اشیای سطح زمین، ضریب گسیلی برابر با جسم سیاه یعنی یک دارند (Giannini et al., 2015: 3).

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه، T دمای درخشندگی برحسب کلوین، $L\lambda$ تابش طیفی و \ln لگاریتم نپرین است. $K1$ و $K2$ ، ثابت‌های کالیبراسیون سنجنده اخذ شده از فایل مرجع تصاویرند.

روش دوم استخراج دما

در روش اول استخراج دما، فرض شد تمامی اجسام موجود در تصویر، ضریب گسیل یکسان دارند و یک مقدار توان تشعشعی برای هر پیکسل در نظر گرفته شد؛ در حالی که این فرض به علت تفاوت توان تشعشعی عوارض و پیکسل‌ها درست نیست؛ از این رو روش‌های متعددی برای استخراج توان تشعشعی از مشاهدات سنجنده‌های حرارتی وجود دارد. یکی از

^۱ SEBAL

با استفاده از مقدار میانگین SAVI، تعیین شاخص سطح برگ LAI^۳ مطابق جدول (۳) امکان‌پذیر است.

جدول ۳. تعیین LAI براساس میانگین SAVI

$SAVI \leq 0.817$	$LAI = 11 * SAVI^3$
$SAVI > 0.817$	$LAI = 6$

گسیل‌مندی ضریب گسیل سطح (ε) در حالتی که $NDVI > 0$ و $LAI < 3$ باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱).

$$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.0033 \times LAI \quad \text{رابطه ۹}$$

سپس تابش حرارتی تصحیح می‌شود. تابش تصحیح‌شده در واقع تابش واقعی گسیل‌شده از سطح زمین است (ابراهیمی هروی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰).

$$R_C = \frac{L_{NB} - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB}) \times R_{sky} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این رابطه، L_{NB} تابش باند حرارتی، R_p تابش مسیر در باند حرارتی، τ_{NB} ضریب عبور جوی در باند حرارتی و R_{sky} تابش آسمان صاف در باند حرارتی است. در صورت دسترسی‌نداشتن به مقدار متغیرهای R_p ، τ_{NB} و R_{sky} به ترتیب مقادیر پیش‌فرض ۱۰، ۰ و ۰ به کار می‌رود. با توجه به اینکه در روش پیشنهادی از پس‌پردازش برای کاهش یا حذف اثر جو استفاده می‌شود، مقادیر پیش‌فرض به کار می‌روند. در نهایت با رابطه زیر به دمای سطح زمین می‌رسیم.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1 \times \epsilon_{NB}}{R_C} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

باندها، شاخص NDVI را به دست می‌آوریم (Tran & Ha, 2008: 3).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه بالا، NIR باند مادون قرمز نزدیک (باند شماره ۴ لندست ۵ و باند شماره ۵ لندست ۸) و RED باند قرمز (باند شماره ۳ و ۴ لندست ۵ و ۸) است. پس از محاسبه NDVI باید شاخص اختلاف پوشش گیاهی وزن داده‌شده (WDVI)^۱ محاسبه شود. رابطه استفاده‌شده در زیر آمده است (Wu, 2014: 3).

$$WDVI = NIR - a \times RED \quad \text{رابطه ۵}$$

در آن ضریب a مربوط به شیب خط خاک است. برای به‌دست‌آوردن این ضریب مقادیر رقومی یک نمونه 20×20 از باند NIR و RED را برمی‌داریم و a را طوری تعیین می‌کنیم که در رابطه ۵ صدق کند.

$$NIR = a \times RED + b \quad \text{رابطه ۶}$$

دو شاخص پیشین استخراج‌شده برای تولید شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌شده SAVI^۲ مطابق با رابطه زیر استفاده می‌شوند (Rozenstein et al., 2018: 5).

$$SAVI = \frac{(NIR - RED) \times (1 + L)}{(NIR + RED + L)} \quad \text{رابطه ۷}$$

در این معادله، L فاکتور تصحیح آثار خاک است که دامنه آن از صفر تا یک تعریف می‌شود.

$$L = 1 - 2 \times 1.6 - NDVI \times WDVI \quad \text{رابطه ۸}$$

^۳ Leaf Area Index

^۱ Weighted Difference Vegetation Index

^۲ Soil-Adjusted Vegetation Index

پیش پردازش داده‌های هواشناسی

تمامی داده‌های هواشناسی موجود در سایت هواشناسی هر سه ساعت از جمله ۹ و ۱۲ صبح ثبت شده‌اند. از سوی دیگر تصاویر ماهواره‌ای در زمان خاصی از روز در هر منطقه ثبت می‌شوند. تصاویر سنجنده TM و OLI/TIRS تقریباً در ساعت ۹:۴۵ به وقت محلی از مناطق برداشت می‌شوند؛ بنابراین نیاز است برای استفاده از مشاهدات دمای ایستگاه‌های هواشناسی، ساعت ثبت تصویر تخمین زده شود. به‌منظور به‌دست‌آوردن مقادیر در ساعت ۹:۴۵، یک رگرسیون خطی به آن برازش داده و مقادیر دما در این ساعت محاسبه می‌شود. جدول (۴) نحوه محاسبه خط مربوط را نمایش می‌دهد.

جدول ۴. محاسبه شیب و معادله خط برازش داده‌شده برای محاسبه دمای ساعت اخذ تصویر

معادله خط	شیب خط	مقدار دما در ساعت اخذ	ساعت
$((b-a)/(12-9)) \times (9.75-9) + a$	$(b-a)/(12-9)$	a	۹
		b	۱۲

مشاهده‌شده با سنجنده به مقدار واقعی آن نزدیک‌تر شود؛ پس از به‌دست‌آوردن مقادیر واقعی دما در ایستگاه‌ها و دمای به‌دست‌آمده از سه روش یادشده، خطی به آن برازش داده می‌شود. شیب (a) و عرض از مبدأ (b) خط با قراردادن مقادیر در رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_i^A = a \times T_i^O + b \quad \text{رابطه ۱۲}$$

مقادیر دما در ایستگاه‌های هواشناسی: T_i^A

مقادیر محاسبه‌شده دما در هر یک از روش‌ها: T_i^O

با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های تعلیمی رابطه

بالا به‌صورت ماتریسی نمایش داده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} T_1^A \\ T_2^A \\ \vdots \\ T_n^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^O & 1 \\ T_2^O & 1 \\ \vdots & \vdots \\ T_n^O & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \leftrightarrow L \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$= A \times X$$

شیب و عرض از مبدأ خط با استفاده از رابطه ۱۴ محاسبه می‌شود. با قراردادن مقادیر محاسبه‌شده و دمای هر پیکسل در رابطه ۱۲، مقدار تصحیح‌شده دما محاسبه خواهد شد.

$$X = (A^T \times A)^{-1} \times A^T \times L \quad \text{رابطه ۱۴}$$

اعتبارسنجی

در تاریخ‌های مربوط به اخذ تصاویر، مقادیر موجود در ایستگاه‌های هواشناسی استخراج و سپس همان‌طور که در بخش پیش‌پردازش داده‌های هواشناسی اشاره شد، مقادیر دقیقاً در ساعت اخذ تصویر محاسبه و سپس با مقادیر به‌دست‌آمده در روش‌ها مقایسه می‌شوند. بدین منظور از شاخص RMSE استفاده می‌شود (Chai & Draxler, 2014: 2).

اصلاح رگرسیون دما

ممکن است دمای اندازه‌گیری‌شده با ایستگاه‌های هواشناسی با تصاویر مشابه ماهواره‌ای متفاوت باشد؛ زیرا دمای ثبت‌شده با ماهواره، حاصل تلفیق انرژی سطح زمین و جو است و همچنین مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی در یک نقطه ثبت می‌شوند؛ در حالی که سنجنده ماهواره‌ای TM، دمای محدوده‌ای به مساحت ۱۴۴۰۰ مترمربع را اندازه‌گیری می‌کند؛ بنابراین سعی می‌شود با به‌دست‌آوردن یک اصلاح خطی با ایستگاه‌های هواشناسی، مقادیر دمای

پیکسلی که ایستگاه هواشناسی در آن واقع شده است، از سه روش استخراج شدند تا با آنها اعتبارسنجی نتایج انجام شود.

صحت نتایج روش‌های استخراج دما از باند حرارتی لندست ۵ با استفاده از دمای ایستگاه‌های هواشناسی و معیار RMSE ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهند در تاریخ ۱۳۸۰/۰۵/۰۳ مقدار RMSE برای روش‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۴/۵۲، ۶/۷۲ و ۶/۳۹ بوده است. با مقایسه مقدار RMSE در تصاویر دیگر می‌توان نتیجه گرفت روش نخست از دو روش دیگر در استخراج دما بهتر است و با دقت بیشتری عمل می‌کند؛ اما خطای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد برای برآورد دما بسیار زیاد است. این خطا به علت اثر جوئی، کالیبراسیون، مشاهده نقطه‌ای دما در ایستگاه هواشناسی و مشاهده دمای یک سطح حدود ۱۴۴۰۰ مترمربع (توان تفکیک مکانی ۱۲۰ متر) با سنجنده TM ممکن است رخ دهد. مقدار RMSE سه روش استخراج دما، پیش از اعمال پس‌پردازش برای تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۰۳ سنجنده TIRS، به ترتیب ۸/۹۵، ۷/۰۸ و ۶/۹۶ محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند روش‌های متداول استخراج دما از تصاویر لندست ۸، حدود ۷ درجه سانتی‌گراد خطا دارند. کمترین مقدار خطا به روش سوم مربوط است. به‌طور کلی براساس نتایج به‌دست‌آمده، خطای سنجنده حرارتی لندست ۵ در محاسبه دما کمتر از باند ۱۰ لندست ۸ است.

پس از اعمال روش پس‌پردازش ارائه‌شده در این پژوهش، نقشه دمای سه روش متداول به‌نگام شد. جداول (۶)، (۷) و (۸) مقادیر پیش و پس از تصحیح و نیز مقدار RMSE با ایستگاه‌های تعلیمی را در سه روش اعمال‌شده نشان می‌دهند. همان‌طور که دیده

$$\text{رابطه ۱۵} \quad \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (A_t - F_t)^2}{n}}$$

در آن A_t مقدار دما در ایستگاه‌های هواشناسی و F_t مقدار محاسبه‌شده در هریک از روش‌هاست. RMSE در دو مرحله برای ایستگاه‌های هواشناسی تعلیمی و ارزیابی محاسبه می‌شود. جدول (۵)، اسامی ایستگاه‌های تعلیمی و ارزیابی را نشان می‌دهد.

جدول ۵. نام و نوع ایستگاه‌های هواشناسی استفاده‌شده

نوع استفاده	نام ایستگاه
تعلیمی	تبریز
تعلیمی	مهاباد
تعلیمی	مراغه
تعلیمی	میانه
تعلیمی	سراب
ارزیابی	بناب
ارزیابی	بستان‌آباد
ارزیابی	سهند
ارزیابی	ملکان

یافته‌های پژوهش

نقشه‌های دمای استخراج‌شده از سه روش یادشده در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. مشاهدات بصری نشان می‌دهند کمترین مقدار دما به بدنه آبی دریاچه ارومیه مربوط است و سایر مناطق خشک، دمایی بیش از بدنه آبی دارند. با توجه به محل قرارگیری ایستگاه‌های هواشناسی، دما در مناطق شهری در دسته سوم تقسیم‌بندی یعنی در بازه ۲۹ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد.

مقادیر واقعی دما از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه استخراج شدند و تعدادی از این ایستگاه‌ها به‌مثابه ایستگاه تعلیمی انتخاب و بقیه آنها به‌مثابه ایستگاه ارزیابی در نظر گرفته شدند. مقادیر دما در

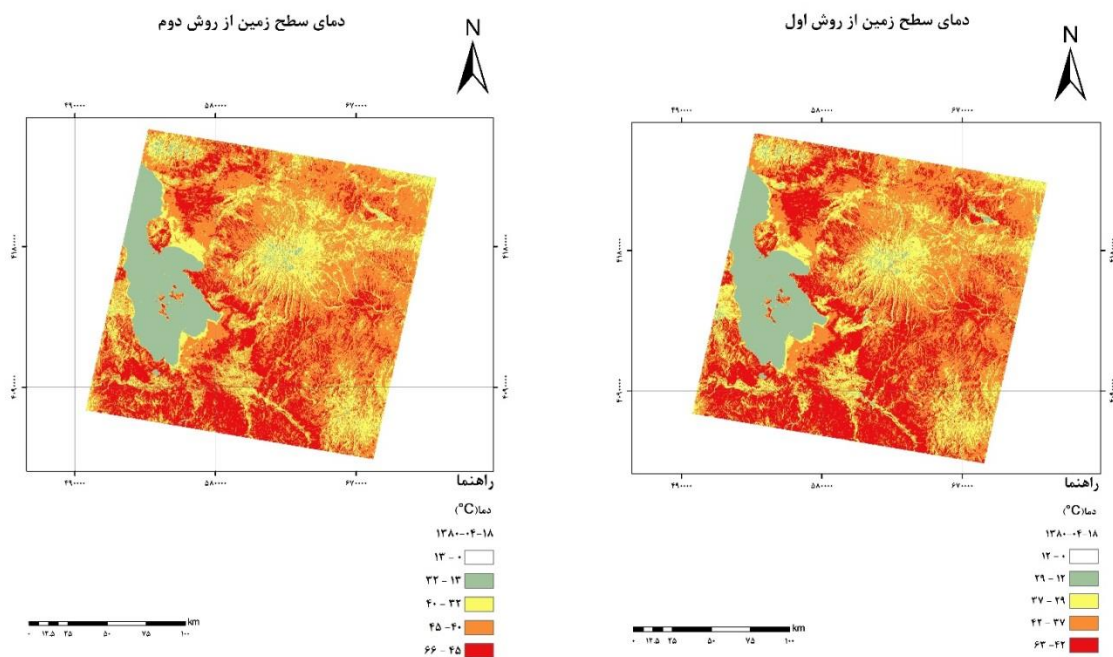
واقعی بوده است. با توجه به اینکه میزان انرژی تابشی اندازه‌گیری شده با سنجنده‌های ماهواره‌ای بخشی از سطح زمین و بخشی دیگر از جوّ حاصل می‌شود، به نظر می‌رسد این برآورد بیشتر از مقدار واقعی به سبب سهم شار تابشی جوّ است؛ به بیان دیگر، عمده افزایش دمای اندازه‌گیری شده با روش‌های متداول به دلیل بازتابش رخ داده از جوّ است؛ از این رو پیشنهاد می‌شود از روش‌های تصحیح اتمسفری دقیق یا روش‌های پس‌پردازش مناسب نظیر این پژوهش در پژوهش‌های آتی استفاده شود.

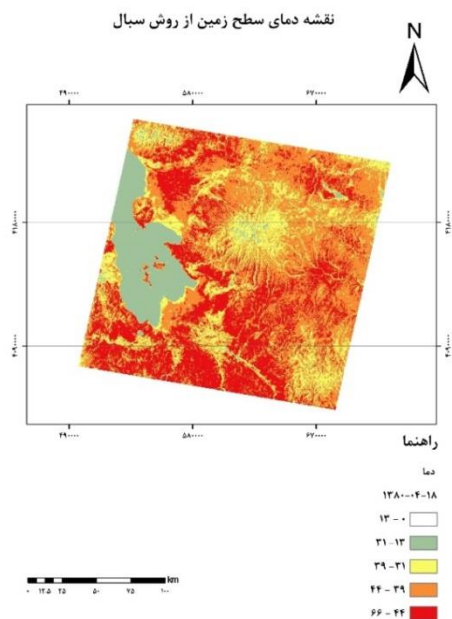
ضرایب برآورد شده A و B عمدتاً در سه روش پیشنهادی نزدیک به یکدیگرند. این موضوع به دلیل نزدیکی دمای برآورد شده ایستگاه‌های تعلیمی در سه روش متداول استخراج دماست که به نوعی مقادیر نزدیک معیار RMSE را برای آن سه روش تأیید می‌کند.

می‌شود، مقدار RMSE روش‌ها نسبت به گذشته کاهش یافته است؛ برای نمونه مقدار RMSE در روش اول در تاریخ ۱۳۸۰/۰۵/۰۳ از ۴/۵۲ به ۰/۶۵ کاهش یافته که نشان می‌دهد روش پس‌پردازش موفق بوده و در تمامی روش‌ها با کاهش مقدار RMSE، دقت را افزایش داده است.

در بهترین حالت مقدار RMSE از میانگین ۱۳/۲ به ۰/۸ رسیده که این مقدار به تصویر موجود در تاریخ ۱۳۸۰/۰۴/۱۴ مربوط است و اختلاف دمایی حدود ۱۲ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌کند. کمترین تغییر در اختلاف RMSE در پیش و پس از تصحیح به تاریخ ۱۳۸۰/۰۵/۰۳ مربوط است که از میانگین ۵/۸۷ به ۰/۶۵ رسیده است و باز هم شاهد تفاوت زیادی از تغییر در تصحیح دما در روش پیشنهادی هستیم.

براساس جداول زیر، برآورد هر سه روش متداول استخراج دما از دمای سطح زمین بیشتر از مقدار





شکل ۳. نقشه دمای سطح زمین به دست آمده با روش‌های اول، دوم و سوم محاسبه دما

جدول ۶. مقادیر پیش و پس از تصحیح دما و RMSE به دست آمده از ایستگاه‌های تعلیمی با روش اول محاسبه دما

تاریخ اخذ تصویر	مقادیر واقعی دما	دمای محاسبه شده پیش از تصحیح	RMSE پیش از تصحیح	مقادیر A و B	دمای محاسبه شده پس از تصحیح	RMSE پس از تصحیح
۱۸-۰۴-۱۳۸۰	۳۲/۲۵	۴۳/۰۶	۱۲/۳۸	A = -۰/۸۳ B = ۶۷/۳۵	۳۱/۲۷	۰/۷۰
	۲۹/۷	۴۴/۵۵			۳۰/۰۳	
	۳۱/۲۵	۴۲/۳۱			۳۱/۹۰	
۰۳-۰۵-۱۳۸۰	۳۲/۶۵	۳۸/۸۹	۴/۵۲	A = -۰/۰۱ B = ۳۳/۸۶	۳۳/۴۰	۰/۶۵
	۳۳/۳۵	۳۵/۳۹			۳۳/۴۴	
	۳۴/۲۵	۳۸/۵۱			۳۳/۴۰	
۱۹-۰۵-۱۳۸۰	۳۳/۳۵	۳۹/۲۸	۴/۷۶	A = ۰/۴۵ B = ۱۵/۳۵	۳۳/۳۴	۰/۳۶
	۳۲/۲	۳۵/۷۸			۳۱/۷۴	
	۳۱/۳	۳۵/۷۸			۳۱/۷۴	
۲۱-۰۱-۱۳۸۸	۱۲/۲	۱۲/۶۲	۸/۵	A = -۰/۳۸ B = ۱۷/۵۴	۱۲/۷۴	۲/۷۹
	۱۵/۰۵	۱۶/۸۰			۱۱/۵۵	
	۶/۷	۱۸/۱۶			۱۰/۶۳	
۳۱-۰۵-۱۳۹۶	۹/۷	۲۲/۱۴	۵/۹۳	A = -۰/۱۱ B = ۴۰/۰۴	۹/۱۲	۰/۴۵
	۳۵/۸۲	۴۰/۴۴			۳۵/۲۱	
	۳۴/۸۵	۴۲/۴۸			۳۴/۹۷	
۰۳-۰۶-۱۳۹۷	۳۴/۸	۳۹/۹۱	۸/۹۵	A = ۰/۱۶ B = ۲۴/۹۸	۳۵/۲۸	۰/۳۵
	۲۹/۸	۳۲/۹۱			۳۰/۳۷	
	۳۱/۵۵	۳۷/۷۵			۳۱/۱۶	
	۲۸/۴	۱۹/۹۸			۲۸/۲۵	
	۳۰/۶۵	۳۴/۴۱			۳۰/۶۱	

جدول ۷. مقادیر پیش و پس از تصحیح دما و RMSE به دست آمده از ایستگاه‌های تعلیمی با روش دوم محاسبه دما

تاریخ اخذ تصویر	مقادیر واقعی دما	دمای محاسبه شده پیش از تصحیح	RMSE پیش از تصحیح	مقادیر A و B	دمای محاسبه شده پس از تصحیح	RMSE
۱۸-۰۴-۱۳۸۰	۳۲/۲۵	۴۵/۴۵	۱۴/۷۵	A = -۰/۸۲ B = ۶۸/۸	۳۱/۲۷	۰/۷۰۳
	۲۹/۷	۴۶/۹۶			۳۰/۰۲	
	۳۱/۲۵	۴۴/۶۹			۳۱/۸۹	
۰۳-۰۵-۱۳۸۰	۳۲/۶۵	۴۱/۲۲	۶/۷۲	A = -۰/۰۱ B = ۳۳/۸۸	۳۳/۳۹	۰/۶۵
	۳۳/۳۵	۳۷/۶۷			۳۳/۴۴	
	۳۴/۲۵	۴۰/۸۳			۳۳/۴۰	
۱۹-۰۵-۱۳۸۰	۳۳/۳۵	۴۱/۶۱	۷/۰۳	A = ۰/۴۵ B = ۱۴/۵۶	۳۳/۳۵	۰/۳۶
	۳۲/۲	۳۸/۰۷			۳۱/۷۵	
	۳۱/۳	۳۸/۰۷			۳۱/۷۵	
۲۱-۰۱-۱۳۸۸	۱۲/۲	۱۴/۵۸	۱۰/۱۶	A = -۰/۳۷ B = ۱۸/۲۱	۱۲/۷۴	۲/۷۹
	۱۵/۰۵	۱۸/۸۲			۱۱/۱۵	
	۶/۷	۲۰/۱۹			۱۰/۶۳	
۳۱-۰۵-۱۳۹۶	۹/۷	۲۴/۲۴	۸/۳۶	A = -۰/۱۱ B = ۴۰/۲۵	۹/۱۲	۰/۴۵
	۳۵/۸۲	۴۲/۸۹			۳۵/۲۱	
	۳۴/۸۵	۴۴/۹۷			۳۴/۹۷	
۰۳-۰۶-۱۳۹۷	۳۴/۸	۴۲/۳۶	۷/۰۸	A = ۰/۱۵ B = ۲۴/۹	۳۵/۲۷	۰/۴۵
	۲۹/۸	۳۶/۸۶			۳۰/۵۳	
	۳۱/۵۵	۴۰/۱۷			۳۱/۰۴	
	۲۸/۴	۲۲/۱۴			۲۸/۲۸	
	۳۰/۶۵	۳۶/۷۸			۳۰/۵۲	

جدول ۸. مقادیر پیش و پس از تصحیح دما و RMSE به دست آمده از ایستگاه‌های تعلیمی با روش سبال

تاریخ اخذ تصویر	مقادیر واقعی دما	دمای محاسبه شده پیش از تصحیح	RMSE پیش از تصحیح	مقادیر A و B	دمای محاسبه شده پس از تصحیح	RMSE
۱۸-۰۴-۱۳۸۰	۳۲/۲۵	۴۵/۱۴	۱۲/۴۷	A = -۰/۰۴ B = ۳۳/۱	۳۰/۹۲	۱/۰۱
	۲۹/۷	۴۶/۶۵			۳۰/۸۵	
	۳۱/۲۵	۳۴/۸۷			۳۱/۴۲	
۰۳-۰۵-۱۳۸۰	۳۲/۶۵	۴۰/۸۸	۶/۳۹	A = -۰/۰۱ B = ۳۳/۸۷	۳۳/۳۹	۰/۶۵
	۳۳/۳۵	۳۷/۳۱			۳۳/۴۳	
	۳۴/۲۵	۴۰/۴۹			۳۳/۴۰	
۱۹-۰۵-۱۳۸۰	۳۳/۳۵	۴۱/۲۸	۶/۶۹	A = ۰/۴۴ B = ۱۴/۸۲	۳۳/۳۴	۰/۳۶
	۳۲/۲	۳۷/۷۱			۳۱/۷۴	
	۳۱/۳	۳۷/۷۱			۳۱/۷۴	
۲۱-۰۱-۱۳۸۸	۱۲/۲	۱۴/۰۵	۹/۸۱	A = -۰/۳۳ B = ۱۷/۲۷	۱۲/۵۹	۲/۸۵
	۱۵/۰۵	۱۸/۸۲			۱۱	

تاریخ اخذ تصویر	مقادیر واقعی دما	دمای محاسبه شده پیش از تصحیح	RMSE پیش از تصحیح	مقادیر A و B	دمای محاسبه شده پس از تصحیح	RMSE
۳۱-۰۵-۱۳۹۶	۶/۷	۱۹/۷۱	۸/۱۳	A = -۰/۱۱ B = ۴۰/۲۲	۱۰/۷۱	۰/۴۵
	۹/۷	۲۳/۷۸			۹/۳۵	
	۳۵/۸۲	۴۲/۶۷			۳۵/۲۱	
	۳۴/۸۵	۴۴/۷۴			۳۴/۹۷	
	۳۴/۸	۴۲/۱۳			۳۵/۲۷	
	۲۹/۸	۳۶/۶۲			۳۰/۵۴	
۰۳-۰۶-۱۳۹۷	۳۱/۵۵	۳۹/۹۴	۶/۹۶	A = ۰/۱۵ B = ۲۴/۹۵	۳۱/۰۴	۰/۴۵
	۲۸/۴	۲۱/۸۷			۲۸/۲۹	
	۳۰/۶۵	۳۶/۵۴			۳۰/۵۳	

جدول (۹) می‌توان نتیجه گرفت بهترین عملکرد روش پیشنهادی در روش سبال (روش سوم) بوده و مقدار RMSE را در بهترین حالت به ۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد رسانده است. اختلاف دمایی در حدود ۱ درجه سانتی‌گراد با دمای واقعی به دست آمده که این میزان اختلاف دما براساس مرجع پذیرفته است (Becker & Li, 1990: 1).

مقدار RMSE نقاط ارزیابی در تصاویر لندست ۸ تاریخ‌های ۱۳۹۶/۰۵/۳۱ و ۱۳۹۷/۰۶/۰۳، به ترتیب ۳ و ۲ بوده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی علاوه بر کارایی مناسب در باند حرارتی لندست ۵ در اصلاح دمای باند حرارتی لندست ۸ نیز کارآمد بوده است.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های دقیق به‌منظور افزایش صحت مشاهدات دمای اندازه‌گیری شده با سنجنده‌های ماهواره‌ای از مشاهدات زمینی استفاده شود. به‌منظور مقایسه نتایج روش پیشنهادی از محصولات ارائه شده در پژوهش پاراستاتیدیس و همکاران (۲۰۱۷) به‌مثابه روش ۴ استفاده و روی تصاویر لندست ۸ پیاده‌سازی شد. براساس نتایج

به‌منظور ارزیابی نتایج دمای محاسبه شده، مقدار RMSE با ایستگاه‌های ارزیابی محاسبه شد. جدول (۹) مقدار RMSE به دست آمده از ایستگاه‌های ارزیابی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند بیشترین میزان RMSE به تصویر اخذ شده در تاریخ ۱۳۸۸/۰۱/۲۱ مربوط است. با بررسی تصویر مشخص شد تصویر یاد شده پوشش ابر زیاد دارد و مدل در این زمینه موفق عمل نکرده است؛ زیرا مشاهدات زمینی به ایستگاه‌های هواشناسی مربوط بوده است؛ در حالی که سهم زیادی از انعکاس ثبت شده با ماهواره‌ها، بازتابندگی ابرهاست؛ بنابراین به‌مثابه یک نتیجه پیشنهاد می‌شود برای بهره‌گیری از روش پیشنهادی از تصاویر با درصد کم پوشش ابر استفاده شود.

بر مبنای جدول (۹) عملکرد روش سبال (روش سوم) در دو تصویر اخذ شده در تاریخ‌های ۱۳۸۰/۰۵/۳ و ۱۳۸۰/۰۵/۱۹ به‌طور تقریبی با روش دوم و در تصویر ۱۳۸۰/۰۵/۱۹ با روش اول یکسان بوده است. پیداست دو روش اول و دوم به‌طور تقریبی از عملکرد یکسانی برخوردارند. از مقادیر RMSE موجود در

به‌دست‌آمده، خطای روش ۴ در دو تصویر به مقدار تقریبی ۱۴ درجه سانتی‌گراد خطا بیشتر از پیاده‌سازی‌شده حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد است که روش پیشنهادی است.

جدول ۹. مقادیر RMSE به‌دست‌آمده از ایستگاه‌های اعتبارسنجی

تاریخ	۱۳۸۰/۰۴/۱۸	۱۳۸۰/۰۵/۳	۱۳۸۰/۰۵/۱۹	۱۳۸۸/۰۱/۲۱	۱۳۹۶/۰۵/۳۱	۱۳۹۷/۰۶/۰۳
روش	۱	۲	۳	۱	۲	۳
RMSE	۴/۲۶	۲/۳۵	۳/۶	۱/۲۵	۳/۷۴	۳/۷۴

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک روش پس‌پردازش برای بهبود صحت دمای سطح زمین استخراج‌شده از سه روش متداول استخراج دما ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند سه روش استخراج دما از باند حرارتی لندست ۵ تقریباً با خطای ۷ درجه سانتی‌گراد، دمای سطح زمین را برآورد می‌کنند. همچنین دمای سطح زمین از باند حرارتی لندست ۸ تقریباً با خطای ۸ درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده نبود قطعیت زیاد در استخراج دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای است. روش پس‌پردازش ارائه‌شده در این پژوهش، دمای سطح زمین را با خطای ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد برآورد کرد که در مطالعات دقیق استفاده می‌شود؛ علاوه بر این، خطای روش پیشنهادی نسبت به روش ارائه‌شده در پژوهش پاراستاتیدیس و همکاران (۲۰۱۷) تقریباً ۱۴ درجه سانتی‌گراد کمتر است که کارایی زیاد روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

براساس نتایج تاریخ ۱۳۸۸/۱/۲۱، برای رسیدن به نتایج مناسب از روش پیشنهادی، بهتر است از تصاویر با درصد کم ابر استفاده شود؛ علاوه بر این، کاهش تقریباً ۶ درجه سانتی‌گراد مقدار RMSE روش پس‌پردازش ارائه‌شده حاکی از کاهش اثر جو و سایر عوامل عدم قطعیت از نتایج است. درنهایت به نظر

می‌رسد برای استخراج دما از سنجنده‌های ماهواره‌ای در کاربردهای دقیق به اندازه‌گیری‌های زمینی دما نیاز است. پیشنهاد می‌شود روش پیشنهادی برای شناسایی جزایر گرمایی شهری به کار رود. همچنین با افزایش مشاهدات زمینی در پژوهش‌های آینده از معادلات رگرسیون غیرخطی برای نیل به نتایج دقیق و درست‌تر استفاده شود.

سپاسگزاری

از سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) و هواشناسی کشور به دلیل در اختیار گذاشتن تصاویر لندست و مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی تشکر می‌کنیم.

منابع

انتظاری، علیرضا، امیراحمدی، ابوالقاسم، علی‌آبادی، کاظم، خسروی‌ان، مریم، ابراهیمی، مجید، (۱۳۹۵). پایش دمای سطح زمین و ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی؛ مطالعه موردی: حوضه آبخیز دریاچه پریشان، هیدروژئومورفولوژی، دوره ۲، شماره ۸، ۱۱۳-۱۳۹.

موردی: شهرستان نهاوند، همایش ملی ژئوماتیک، نوع ارائه: پوستر، تهران.

Alipour, T., Sarajian, M., Esmaily, A., (2003). **Land surface temperature estimation from thermal band of landsat sensor, case study: Alashtar city**, The International Achieves of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 4, No 38.

Becker, F., Li, Z.L., (1990). **Towards a local split window method over land surfaces**, Remote Sensing, Vol 3, No 11, Pp 369-393.

Borel, C.C., (2003). **ARTEMIS—an algorithm to retrieve temperature and emissivity from hyper-spectral thermal image data**, Paper presented at the 28th Annual GOMACTech Conference, Hyperspectral Imaging Session.

Brandt, R., Bird, C., Neuer, G., (2008). **Emissivity reference paints for high temperature applications**, Measurement, Vol 7, No 41, Pp 731-736.

Chai, T., Draxler, R.R., (2014). **Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature**, Geoscientific model development, Vol 3, No 7, Pp 1247-1250.

Chedin, A., Scott, N., Berroir, A., (1982). **A single-channel, double-viewing angle method for sea surface temperature determination from coincident Meteosat and TIROS-N radiometric measurements**, Journal of Applied Meteorology, Vol 4, No 21, Pp 613-618.

Dash, P., Göttsche, F.M., Olesen, F.S., Fischer, H., (2002). **Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends**, International Journal of Remote Sensing, Vol 13, No 23, Pp 2563-2594.

Farhanj, F., Akhoondzadeh, M., (2017). **Fusion of-8 Thermal Infrared and Visible Bands with Multi-Resolution Analysis Contourlet Methods**, ISPRS-International

ابراهیمی هروی، بهروز، رنگزن، کاظم، ریاحی بختیاری، حمیدرضا، تقی‌زاده، ایوب، (۱۳۹۵).

تعیین مناسب‌ترین روش استخراج دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸ در کلان‌شهر کرج، سنجش از دور و GIS ایران، سال ۸، شماره ۳، ۷۶-۵۹.

جهانبخش، سعید، زاهدی، مجید، ولی‌زاده کامران، خلیل، (۱۳۹۰). محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از روش سبال و درخت تصمیم‌گیری در محیط RS و GIS در بخش مرکزی منطقه مراغه، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۱۶، شماره ۳۸، ۴۲-۱۹.

درویشی، شادمان، رشیدپور، مصطفی، سلیمانی، کریم، (۱۳۹۸). بررسی ارتباط تغییرات کاربری اراضی با دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای؛ مطالعه موردی: شهرستان مریوان، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۷، شماره ۵۴، ۱۶۲-۱۴۳.

محمدی‌زاده، پریسا، حمزه، سعیده، کیاورزمقدم، مجید، درویشی بلورانی، علی، (۱۳۹۷). استخراج تصاویر روزانه دمای سطح زمین با قدرت تفکیک مکانی بالا با استفاده از تلفیق تصاویر لندست و مادیس، مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، دوره ۶، شماره ۱، ۹۹-۷۷.

ناجی دومیرانی، صادق، ضیاییان، پرویز، سدیدی، جواد، رحیمی، کامران، (۱۳۹۶). محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم window split و تصاویر ماهواره‌ی لندست ۸؛ مطالعه

- Li, Z.L., Wu, H., Wang, N., Qiu, S., Sobrino, J.A., Wan, Z., Yan, G., (2013). **Land surface emissivity retrieval from satellite data**, International Journal of Remote Sensing, Vol 9-10, No 34, Pp 3084-3127.
- Liu, Z., Blasch, E., Xue, Z., Zhao, J., Laganieri, R., Wu, W., (2011). **Objective assessment of multiresolution image fusion algorithms for context enhancement in night vision: a comparative study**, IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol 1, No 34, Pp 94-109.
- Lorenz, D., (1966). **The effect of the long-wave reflectivity of natural surfaces on surface temperature measurements using radiometers**, Journal of Applied Meteorology, Vol 4, No 5, Pp 421-430.
- Ma, X.L., Wan, Z., Moeller, C.C., Menzel, W.P., Gumley, L.E., (2002). **Simultaneous retrieval of atmospheric profiles, land-surface temperature and surface emissivity from moderate-resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data: Extension of a two-step physical algorithm**, Applied Optics, Vol 5, No 41, Pp 909-924.
- Maimaitiyiming, M., Ghulam, A., Tiyp, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, Ü., Caetano, M., (2014). **Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation**, ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 89, Pp 59-66.
- Mallick, J., Kant, Y., Bharath, B., (2008). **Estimation of land surface temperature over Delhi using Landsat-7 ETM+**. J. Ind. Geophys, Union, Vol 3, No 12, Pp 131-140.
- Masiello, G., Serio, C., De Feis, I., Amoroso, M., Venafrà, S., Trigo, I., & Watts, P., (2013). **Kalman filter physical retrieval of surface emissivity and temperature from geostationary infrared radiances**, Atmospheric Measurement Techniques, Vol 12, No 6, Pp 3613-3634.
- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Pp 77-81.
- Farhanj, F., Akhoondzadeh, M., (2017). **Spatial Resolution Enhancement of Thermal Bands in Multi-Spectral Images Using Contourlet Method**, [Research], Journal of Geomatics Science and Technology, Vol 1, No 7, Pp 185-202.
- Giannini, M., Belfiore, O., Parente, C., Santamaria, R., (2015). **Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images: comparison of different methods using airborne thermal data**, Journal of Engineering Science & Technology Review, Vol 3, No 8.
- Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothorn, J.S., Hook, S., Kahle, A.B., (1998). **A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images**, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, Vol 4, No 36, Pp 1113-1126.
- Hook, S.J., Gabell, A.R., Green, A.A., Kealy, P.S., (1992). **A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies**, Remote sensing of Environment, Vol 2, No 42, Pp 123-135.
- Jin, M., Liang, S., (2006). **An improved land surface emissivity parameter for land surface models using global remote sensing observations**, Journal of Climate, Vol 12, No 19, Pp 2867-2881.
- Li, J., Li, Z., Jin, X., Schmit, T.J., Zhou, L., Goldberg, M.D., (2011). **Land surface emissivity from high temporal resolution geostationary infrared imager radiances: Methodology and simulation studies**, Journal of geophysical research: atmospheres, 116 (D1).
- Li, Z.L., Becker, F., (1993). **Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data**, Remote sensing of Environment, Vol 1, No 43, Pp 67-85.

- SEVIRI observations: Part I. Methodology**, International Journal of Remote Sensing, Vol 23, No 28, Pp 5255-5272.
- Sun, D., Pinker, R.T., (2003). **Estimation of land surface temperature from a Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-8)**, Journal of geophysical research: atmospheres, 108 (D11).
- Tran, T.V., Ha, D.X.B., (2008). **A study on urban development through land surface temperature by using remote sensing: in case of Ho Chi Minh City**.
- Van de Griend, A., Owe, M., (1993). **On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces**, International Journal of Remote Sensing, Vol 6, No 14, Pp 1119-1131.
- Wan, Z., Li, Z.L., (1997). **A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data**, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, No 35, Vol 4, Pp 980-996.
- Wu, W., (2014). **The generalized difference vegetation index (GDVI) for dryland characterization**. Remote Sensing, Vol 2, No 6, Pp 1211-1233.
- Xia, L., Mao, K., Ma, Y., Zhao, F., Jiang, L., Shen, X., Qin, Z., (2014). **An algorithm for retrieving land surface temperatures using VIIRS data in combination with multi-sensors**, Sensors, Vol 11, No 14, Pp 21385-21408.
- Zhong, X., Huo, X., Ren, C., Labed, J., Li, Z.L., (2016). **Retrieving land surface temperature from hyperspectral thermal infrared data using a multi-channel method**, Sensors, Vol 5, No 16, 687 p.
- Nunak, T., Rakrueangdet, K., Nunak, N., Suesut, T., (2015). **Thermal image resolution on angular emissivity measurements using infrared thermography**, Paper presented at the Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists.
- Pahlevani, M., Mobasheri, M., (2009). **An Improvement on Land Surface Temperature Determination by Producing Surface Emissivity Maps**, Desert, Vol 2, No 1, Pp 171-184.
- Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., Abrams, M., (2017). **Online global land surface temperature estimation from landsat**. Remote Sensing, Vol 12, No 9, 1208 p.
- Qian, Y.G., Wang, N., Ma, L.L., Liu, Y.K., Wu, H., Tang, B.H., Li, C.R., (2016). **Land surface temperature retrieved from airborne multispectral scanner mid-infrared and thermal-infrared data**, Optics express, Vol 2, No 24, Pp A257-A269.
- Rozenstein, O., Haymann, N., Kaplan, G., Tanny, J., (2018). **Estimating cotton water consumption using a time series of Sentinel-2 imagery**, Agricultural water management, Vol 207, Pp 44-52.
- Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., Karnieli, A., (2014). **Derivation of land surface temperature for Landsat-8 TIRS using a split window algorithm**, Sensors, Vol 4, No 14, Pp 5768-5780.
- Sobrino, J., Raissouni, N., Li, Z.L., (2001). **A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data**, Remote sensing of Environment, Vol 2, No 75, Pp 256-266.
- Sun, D., Pinker, R., (2007). **Retrieval of surface temperature from the MSG-**