

محاسبه و ارزیابی دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزای غیر خطی و تصاویر ماهواره سنتینل ۳ مطالعه موردی: استان تهران

ارسطو زارعی^۱

رضاشاه حسینی^۲

روناک قنبری^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

چکیده

در سال‌های اخیر دمای سطح زمین (LST) اهمیت زیادی در مطالعات علوم زمین و محیط‌زیست پیدا کرده است. فناوری سنجش‌ازدور، امکان پایش مکانی و زمانی این کمیت را در سطوح وسیع فراهم می‌آورد. این پارامتر از طریق تصاویر ماهواره‌ای با حداقل یک باند حرارتی فراهم می‌شود. در این مطالعه از روش پنجره مجزای غیرخطی توسط ماهواره سنتینل ۳ در طول فصول مختلف سال ۱۳۹۷ برای محاسبه دمای سطح زمین استفاده شد و همچنین یک روش اعتبارسنجی مستقیم و غیرمستقیم برای آن ارائه شده است. روش اعتبارسنجی بر مبنای ارزیابی قطعی این محصول با داده میدانی، و ارزیابی نسبی آن با محصولات دمای مادیس و SLSTR می‌باشد. همچنین از روش برآورد گسیلمندی بر مبنای شاخص پوشش گیاهی برای تخمین دما از روش پنجره مجزای غیرخطی با توجه به دو باند حرارتی تصاویر سنتینل ۳ استفاده شد. برای اطمینان بیشتر، محصولات دمای مادیس و SLSTR نیز به صورت مستقیم با داده میدانی ارزیابی قطعی شد. به طور کلی نتایج حاصل از محصول دمای مادیس، SLSTR و دمای برآورد شده از روش پنجره مجزای غیرخطی روندی مشابه را برای تغییرات دما در طول فصول سال نشان دادند. به طور خلاصه، با توجه به دو روش اعتبارسنجی مستقیم و غیرمستقیم برای دمای برآورد شده از روش پنجره مجزای غیرخطی، فصل تابستان با مقادیر بزرگ میانگین مربع خطاها (۲/۶۶)، و فصل زمستان با مقادیر کوچک میانگین مربع خطاها (۰/۸۶) به ترتیب کمترین و بیشترین نتایج را برای فصول در سال ۱۳۹۷ ارائه دادند. در نهایت، با توجه به نتایج به دست آمده دمای برآورد شده هم به صورت قطعی و هم به صورت نسبی نتایج مطلوبی را برای تمام فصول در مقیاس زمانی و مکانی گسترده فراهم می‌کند که می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ برای برآورد دما در حل بحران‌های زیست‌محیطی و همچنین تغییر اقلیم از آن استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: سنتینل ۳، محصول دمای مادیس، محصول دمای SLSTR، دمای سطح زمین، الگوریتم پنجره مجزا غیرخطی

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران arastou.zarei@ut.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران (نویسنده مسئول) rshahosseini@ut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان r.ghanbari@eng.basu.ac.ir

۱- مقدمه

می‌دهد. همچنین دارای دو باند اضافی برای تشخیص آتش‌سوزی است، که توان تفکیک مکانی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک ۵۰۰ متر و توان تفکیک مکانی باندهای حرارتی و تشخیص آتش‌سوزی ۱ کیلومتر است. مشخصات این ماهواره به‌طور کلی در جدول (۱) ذکر شده است (JA *Sobrino, Jiménez-Muñoz, et al., 2016*). سایر ماهواره‌های سنتینل، مجهز بودن آن به دو باند حرارتی با دقت بالا برای مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است. همین ویژگی سبب شده که الگوریتم‌های پنجره مجزا^۶ برای ماهواره سنتینل ۳ کارآمد باشد و بر همین مبنا هدف اصلی این تحقیق برآورد دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزا غیرخطی برای سنتینل ۳ و ارزیابی نتایج آن با محصول دمای سطح زمین ماهواره MODIS و محصول دمای سطح زمین SLSTR است. روش‌های مختلفی برای به‌دست آوردن دما وجود دارد: روش‌های تک باندهای^۷، پنجره مجزا و جداسازی دما و ضریب گسیل (TES)^۸ که از بقیه متداول‌تر هستند. روش پنجره مجزا بر مبنای تلفیق دو باند حرارتی استوار است. در واقع این روش با استفاده از تلفیق باندهای حرارتی مجاور سعی در کاهش تأثیرات اتمسفری دارد. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیاز به پروفیل اتمسفری دقیق و همچنین کارآمدی روش برای تمامی سنسورها با حداقل دو باند حرارتی اشاره کرد. وابستگی این روش به اطلاع از ضریب گسیل و وابستگی ضرایب هر مدل به نوع منطقه را می‌توان از محدودیت‌های این روش دانست (*Anding & Kauth, 1970; McMillin, 1975*).

مطالعات گوناگونی برای به‌دست آوردن دمای سطح زمین از باندهای حرارتی ماهواره سنتینل ۳ و نحوه به‌کارگیری آن‌ها در بازه سال ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۶ انجام شده است. در تحقیق (North et al., 2008) از پتانسیل ترکیب همزمان ابزارهای MERIS و AATSR که بر روی پردازنده ماهواره ENVISAT می‌باشند برای مدل‌سازی اثرات ابر و بازتابی ذرات معلق در

دمای سطح زمین (LST)^۱ یکی از پارامترهای کلیدی فیزیک فرآیندهای سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است که ترکیبی از نتایج همه تعاملات سطح زمین و جریان‌های انرژی بین سطح و اتمسفر است (JA *Sobrino, Jiménez-Muñoz, et al., 2016*). دما به سرعت نسبت به زمان و مکان در حال تغییر است، بنابراین توصیف کافی از توزیع LST و تکامل زمانی آن نیازمند اندازه‌گیری‌هایی با فرکانس‌های مکانی و زمانی است. در این راستا آگاهی از تغییرات مکانی دمای هوا در مقیاس‌های وسیع برای انجام مطالعات و بررسی‌های اقلیمی، هواشناسی، هیدرولوژیکی لازم به نظر می‌رسد. سری ماهواره‌های سنتینل توسط سازمان فضایی اروپا (ESA)^۲ برای پشتیبانی از خدمات عملیاتی اروپا و نیازهای برنامه Copernicus توسعه‌یافته است. اولین مأموریت‌های سنتینل برای کمک به درک سیستم زمین توسط تشخیص، نظارت و ارزیابی تغییرات در اقیانوس، یخ‌کره^۳ و دیگر مؤلفه‌های زمین برنامه‌ریزی شده است (*Berger, Moreno, Johannessen, Levelt, & Hanssen, 2012; Malenovsky et al., 2012*). به‌طور خاص، مأموریت‌های ماهواره سنتینل ۲ و ۳ برای فراهم کردن داده‌های چندطیفی با توان تفکیک مکانی بالا، متوسط و کم در نظر گرفته شدند (*Drusch et al., 2012*). ماهواره سنتینل ۳ در راستای قابلیت‌های ماهواره ENVISAT با باندهای طیفی مشابه با آن طراحی شده است. در حالی که تعدادی از محصولات مربوط به اقیانوس و زمین را نیز ارائه می‌دهد (*Donlon et al., 2012*). ابزارهای اصلی در ماهواره سنتینل ۳، تصاویری برای رنگ اقیانوس‌ها و زمین (OLCI)^۴ و رادیومتری برای تعیین دمای سطح زمین و سطح دریا (SLSTR)^۵ است. ابزار SLSTR شامل ۹ باند طیفی می‌باشد که محدوده ۰/۵ الی ۱۲ میکرومتر را پوشش

1- Land Surface Temperature

2- European Space Agency

3- Cryospher

4 Ocean and Land Color Imager

5- Sea and Land Surface Temperature Radiometer

6- Split Window

7- Single band

8- Temperature Emissivity Separation (TES)

دادند. در مطالعه دیگری (Tang, 2018) برای تخمین دمای سطح زمین و دریا از داده‌های مادون قرمز حرارتی ماهواره چینی Gaofen-5 از الگوریتم پیشنهادی DTCC-SW^۱ برای انواع مختلف سطوح با گسیلمندی مختلف استفاده کردند. نتایج نشان داد RMSE بین دماهای واقعی و پیش‌بینی شده کمتر از ۰/۷ درجه کلون بوده است، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی DTCC-SW می‌تواند دمای سطح زمین و دریا را از داده‌های حرارتی Gaofen-5 به‌طور دقیق تخمین بزند. همچنین، براساس مطالعات اخیر درمورد ارزیابی دما، (Huang et al., 2019) از داده‌های مایکروویو غیرفعال سنجنده AMSR2 برای برآورد دما براساس یک روش فیزیکی استفاده کرده‌اند و دمای محاسبه شده را در ۱۶ مکان مختلف با استفاده از محصولات دمای ماهواره مادیس برای ارزیابی نتایج مقایسه کرده‌اند. نتایج این تحقیق میزان خطا را در محدوده ۱/۴ الی ۷/۸ درجه کلون برای سایت‌هایی با پوشش‌های مختلف نشان داده است. همچنین در تحقیقی دیگر (Zheng, Y. et al., 2019) به توسعه الگوریتم پنجره مجزای سه کاناله با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل ۳ پرداختند. الگوریتم موردنظر بر روی دو سایت مطالعاتی اعمال گردید و نتایج حاصل از اعتبارسنجی این روش بر روی هفت سایت مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج دقت‌های مطلوبی برای دمای برآورد شده در شب و روز را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر (Nie, Ren, Zheng, 2020) از یک الگوریتم جداسازی دمای سه کاناله با بهره‌گیری از یک باند مادون قرمز میانی و دو باند مادون قرمز حرارتی ماهواره سنتینل ۳ برای تخمین دما و گسیلمندی در شب استفاده کردند. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که الگوریتم از نظر تئوری می‌تواند دما و گسیلمندی را با خطاهای کمتر از ۰/۸ و ۰/۱۵ به ترتیب ارزیابی کند. همچنین در مقایسه با داده میدانی نشان داده شد که خطای ارزیابی دمای شبانه در این روش در حدود ۱/۸۴ درجه کلون است. در مقاله حاضر، برای اعتبارسنجی

هوا استفاده کردند. یکی از اهداف اصلی آن‌ها توصیه‌هایی برای بهره‌برداری از ابزارهای OLCI و SLSTR ماهواره سنتینل ۳ بود که دارای طراحی باندهای طیفی بسیار مشابه با ماهواره ENVISAT می‌باشد. نتایج، دقت بهبود یافته‌ای را برای مدل‌سازی و ارزیابی ذرات معلق در هوا برای ماهواره ENVISAT و تعمیم این نتایج به ماهواره سنتینل ۳ نشان داد. در (J Sobrino et al., 2012) از ترکیب همزمان ابزار MSI از ماهواره سنتینل ۲ و ابزارهای OLCI و SLSTR از ماهواره سنتینل ۳ به منظور بهبود برآورد LST که از ابزار AATSR بر روی ماهواره ENVISAT مشتق شده بودند استفاده کردند. نتایج نشان داد که برآورد گسیلمندی مؤثر و تصحیح اتمسفری مناسب، امکان ارزیابی دقیق LST را با استفاده از باندهای حرارتی SLSTR با در نظر گرفتن الگوریتم پنجره مجزای دو زاویه‌ای^۱ در ترکیب همزمان از داده‌ها را فراهم می‌کند. در مطالعه‌ای دیگر از (Kamran, Pirnazar, & Bansouleh, 2015) دو روش مختلف پنجره مجزا و الگوریتم SEBAL را برای برآورد دما از باندهای حرارتی به کار بردند. نتایج این مقایسه برای شهر تهران نشان داد که دمای به‌دست آمده از روش پنجره مجزا دارای دقت با RMSE کمتر از ۱/۱۷ درجه سانتی‌گراد بوده است، در حالی که روش SEBAL دارای دقت ۳/۲۷ درجه بود. در نهایت آن‌ها نشان دادند که الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا روش مناسبی برای ارزیابی دما می‌باشد. همچنین (Ruescas, Danne, Fomferra, & Brockmann, 2016) با به‌کارگیری ابزارهای AATSR و MERIS در ماهواره ENVISAT که خصوصیات مشابه با ابزارهای OLCI و SLSTR از ماهواره سنتینل ۳ را دارند برای ارزیابی دمای سطح زمین تلاش کردند. نتایج نشان داد که ارزیابی LST در طول سال ۲۰۱۱ در سه سایت آزمایشی دارای دقت قابل‌قبولی است و نتایج رضایت‌بخش بود. تحقیق (Shrestha, Angal, & Xiong, 2018) به مقایسه دمای روشنایی باند ۸ و ۹ ماهواره سنتینل ۳ و باند ۳۲ و ۳۳ ماهواره مادیس پرداختند که نتایج قابل اعتمادی را نشان

بر پوشش گیاهی (NDVI-THM) برآورد شده است، (۳) پارامترهای ارائه شده توسط آقای سوپرینو در سال ۲۰۱۶ برای الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی متناسب با باندهای ماهواره سنتینل ۳ جهت برآورد دما استفاده شد، (۴) دمای برآورد شده از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی، محصول دمای ماهواره مادیس و محصول دمای SLSTR ماهواره سنتینل ۳ برای ارزیابی نسبی و در مقایسه با داده میدانی ایستگاه‌های هواشناسی به منظور ارزیابی قطعی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲- منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (نگاره ۱)، کل محدوده استان تهران است، که با یک تصویر ماهواره سنتینل-۳ پوشش داده می‌شود، این منطقه در بین عرض جغرافیایی $34^{\circ}54'34''$ شمالی و طول جغرافیایی $53^{\circ}13'56''$ شرقی قرار دارد و دارای مساحت ۱۲۹۸۱ کیلومتر مربع می‌باشد. نگاره ۱ منطقه مورد مطالعه را با استفاده از یک تصویر سنتینل-۳ نشان می‌دهد. همچنین داده میدانی دمای سطح زمین برای ۱۲ ایستگاه هواشناسی در بازه زمانی ۱۲ فروردین ۱۳۹۷ الی ۱۷ بهمن ۱۳۹۷ در تاریخ‌های مشخص جمع‌آوری شده است. ایستگاه‌های موجود بر روی نگاره ۱ قابل مشاهده است.

۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در این تحقیق از دو سری داده برای برآورد دما و ارزیابی آن استفاده شده است: (۱) داده میدانی در ایستگاه‌های هواشناسی به منظور ارزیابی قطعی دمای برآورد شده از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی. (۲) داده‌های ماهواره سنتینل ۳ و ماهواره مادیس.

۲-۲-۱- داده میدانی

دمای سطح زمین در منطقه مورد مطالعه به صورت

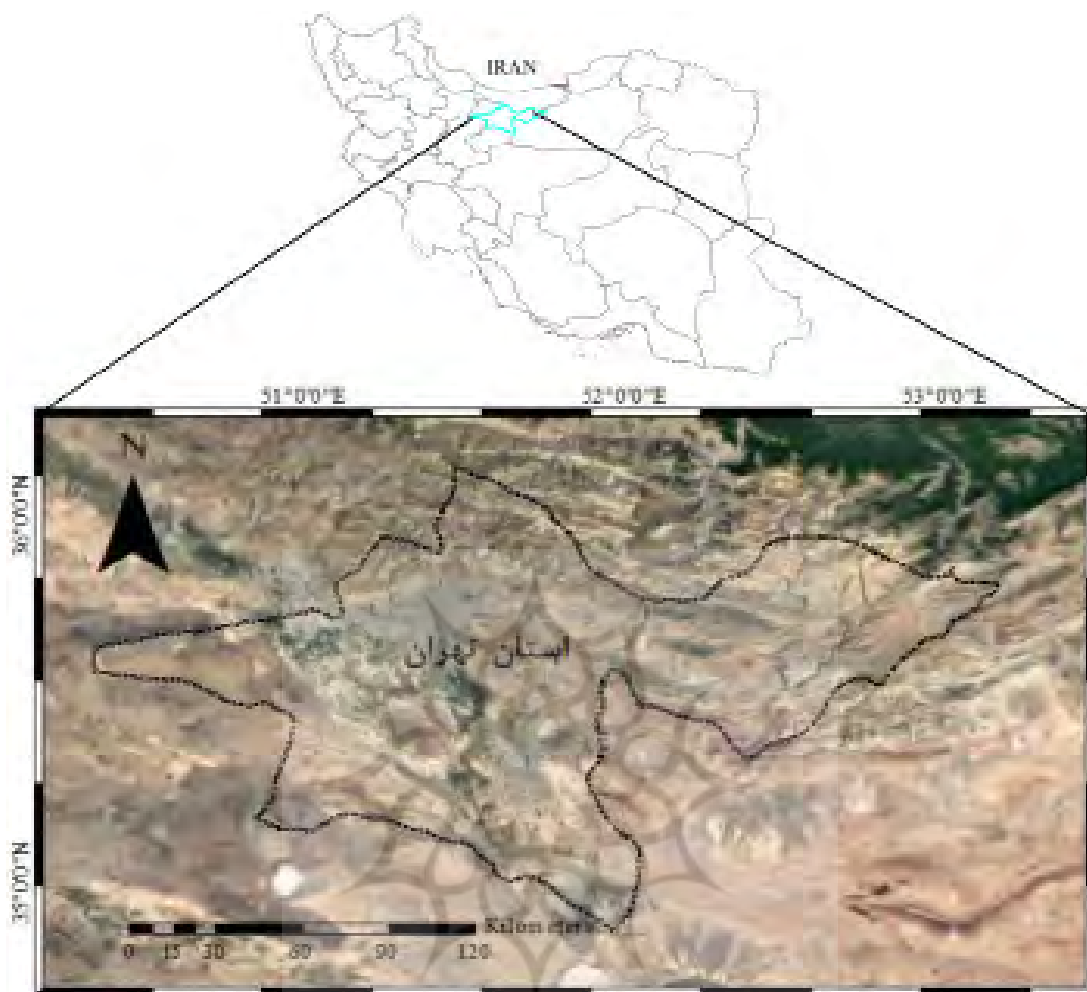
غیرمستقیم محصول دمای سنتینل ۳ از دمای برآورد شده از الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا (NSW)^۱ و تولیدات دمای سنجنده‌های مادیس^۲ در استان تهران استفاده شده است. به دلیل پوشش وسیع و برداشت دو بار در هر شبانه‌روز توسط هر یک از سنجنده‌های مادیس، محصول دمای آن به عنوان مرجع در شرایط جوی عاری از ابر انتخاب گردید. داده‌ها و محصولات سنجنده‌های مادیس به صورت مجانی و همیشه در دسترس می‌باشند و از طریق وبسایت سیستم توزیع و آرشیو مادیس^۳ قابل دسترسی است. محصول دمای مادیس در بیش از ۵۰ مورد با داده‌های محلی در رنج دمای ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و بخار آب ۰/۴ تا ۴ سانتی‌متر در مقیاس یک کیلومتر اعتبارسنجی شده و دارای دقت بهتر از یک درجه کلونین برای هر دو سنجنده مادیس است (Coll et al., 2005; Qian, Li, & Nerry, 2013; Zhengming Wan & Li, 2008; Zhang Wan, Zhang, Zhang, & Li, 2004). بیشتر مطالعات سنجنش از دور برای بازیابی LST الگوریتمی را پیشنهاد یا توسعه داده‌اند و هیچ مطالعه‌ای برای ارزیابی محصول SLSTR ماهواره Sentinel-3 وجود ندارد. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه ارزیابی دمای ماهواره Sentinel-3 در فصول مختلف براساس الگوریتم NSW می‌باشد. علت استفاده از الگوریتم غیرخطی، بروز خطاها در الگوریتم خطی موجود در محصول دمای SLSTR است که به دلیل این خطاها رخ می‌دهند: (۱) خطی بودن معادله انتقال تشعشع، (۲) برخی تقریب استفاده شده در توسعه الگوریتم پنجره مجزای خطی است. به عنوان مثال، (Li et al., 2013) نشان داد که الگوریتم پنجره مجزای خطی منجر به خطاهای قابل توجهی در برآورد LST در آب و هوای گرم و مرطوب می‌شود. ارزیابی و اعتبارسنجی محصول دمای محاسبه شده ماهواره سنتینل ۳ از پنج مرحله اصلی تشکیل شده است: (۱) تصحیح اتمسفری و هندسی بر روی تصاویر ماهواره سنتینل ۳ انجام شده است، (۲) میزان گسیلمندی در سطح زمین با استفاده از روش مبتنی

1- Nonlinear Split-Window

2- MOD11-L2 (C6)

3- Atmospheric Archive and Distribution System

4- NDVI Threshold Method



نگاره ۱: منطقه مورد مطالعه

سنجین ۳ در فصول مختلف سال ۱۳۹۷ می باشد. داده ها از سنجنده ماهواره سنجین SLSTR ماهواره سنجین ۳ از آژانس فضایی اروپا (ESA) دریافت شد که مشخصات این داده ها در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. بدیهی است قبل از محاسبه و استخراج پارامترهای فیزیکی سطح زمین نظیر دما، گسیلمندی، رادیانس انعکاسی - حرارتی سطح، آلدو سطح و نظایر آن، تصحیح رادیومتریکی تصاویر الزامی است. برای رسیدن به این هدف بایستی اثر اتمسفر، هندسه دید سنجنده، روشنایی خورشید و اثر توپوگرافی و ویژگی های سطح روی تصاویر در نظر گرفته شود و تأثیر این عوامل در تخمین پارامترهای سطح حذف شده یا به حداقل برسد

(Emami, Mojaradi, & Safari, 2016)

ساعتی در ایستگاه های هواشناسی استان تهران اندازه گیری می شود که در وبسایت <https://data.irimo.ir> این داده ها قابل دسترس می باشند. ایستگاه های هواشناسی دمای سطح زمین را در ارتفاع ۵ الی ۱۰ سانتی متر از سطح و در سطح زمین نیز ارائه می دهند که در این تحقیق از دمای سطح زمین استفاده شد. داده میدانی برای برآورد میزان خطا الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی استفاده می شود. تاریخ داده میدانی مورد استفاده همزمان با گذر ماهواره ها در جدول ۲ قابل مشاهده است.

۲-۲-۲- داده های ماهواره ای

داده های این تحقیق شامل سری زمانی از تصاویر

جدول ۱: باندهای رادیومتریکی ماهواره سنتینل ۳ (<https://sentinel.esa.int>)
 (* مورد استفاده برای برآورد شاخص NDVI، ** مورد استفاده در برآورد دما در روش پیشنهادی)

باندها	طول موج (نانومتر)	پهنای باندها (نانومتر)	کاربرد	توان تفکیک مکانی (متر)
S1	554.27	19.26	شناسایی ابر، نظارت بر پوشش گیاهی، ذرات معلق در هوا	500
*S2	659.47	19.25	NDVI، نظارت بر پوشش گیاهی و ذرات معلق در هوا	
*S3	868.00	20.60	NDVI، کاهش اثرات ابر و مرجع سازی پیکسل	
S4	1374.80	20.80	کشف سیروس بر روی زمین	
S5	1613.40	60.68	نظارت بر پوشش گیاهی، یخ و برف	
S6	2255.70	50.15	وضعیت پوشش گیاهی و از بین بردن اثرات ابر	
S7	3742.00	398.00	آتش سوزی، دمای سطح زمین، دمای سطح دریا	1000
**S8	10854.00	776.00	آتش سوزی، دمای سطح زمین، دمای سطح دریا	
**S9	12022.50	905.00	دمای سطح زمین، دمای سطح دریا	
F1	3742.00	398.00	آتش سوزی	
F2	10854.00	776.00	آتش سوزی	

جدول ۲: تاریخ اخذ داده‌های میدانی و ماهواره‌ای استفاده شده در تحقیق

فصل	تاریخ داده میدانی و ماهواره‌ای	ساعت اخذ داده سنتینل ۳	ساعت اخذ داده مادیس	داده ماهواره‌ای مورد استفاده	تعداد نمونه‌های زمینی
بهار	۱۳۹۷/۰۱/۱۲	۰۶:۴۲:۴۱	۰۶:۱۵:۰۰	Sentinel-3 (MODIS MOD11-L2) (Sentinel-3 SLSTR product)	۵۰
	۱۳۹۷/۰۱/۳۱	۰۶:۵۰:۱۸	۰۶:۴۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۲/۰۴	۰۶:۴۶:۳۴	۰۶:۲۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۲/۱۲	۰۶:۳۹:۰۵	۰۶:۳۰:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۲/۱۶	۰۶:۳۵:۲۱	۰۶:۰۵:۰۰		
تابستان	۱۳۹۷/۰۴/۱۹	۰۶:۴۹:۴۹	۰۶:۴۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۴/۲۳	۰۶:۴۶:۰۴	۰۶:۲۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۵/۰۴	۰۶:۳۴:۵۰	۰۶:۴۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۵/۰۸	۰۶:۳۱:۵۰	۰۶:۲۰:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۵/۱۱	۰۶:۵۳:۳۱	۰۶:۵۰:۰۰		
پاییز	۱۳۹۷/۰۷/۱۱	۰۶:۴۶:۰۲	۰۷:۰۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۷/۱۶	۰۶:۱۶:۰۷	۰۷:۲۰:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۷/۱۹	۰۶:۳۸:۳۴	۰۶:۱۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۷/۲۷	۰۶:۳۰:۱۰	۰۷:۰۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۰۸/۰۱	۰۶:۲۵:۰۸	۰۶:۴۰:۰۰		
زمستان	۱۳۹۷/۱۰/۱۴	۰۶:۳۵:۱۸	۰۶:۳۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۱۰/۲۱	۰۶:۱۴:۳۰	۰۶:۴۰:۰۰		
	۱۳۹۷/۱۰/۲۶	۰۶:۵۹:۲۴	۰۶:۵۵:۰۰		
	۱۳۹۷/۱۱/۰۶	۰۶:۲۵:۴۴	۰۶:۰۰:۰۰		
	۱۳۹۷/۱۱/۱۷	۰۷:۲۰:۱۳	۰۷:۲۰:۰۰		

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۸)

محاسبه و ارزیابی دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی ... / ۶۵

در این تحقیق، چون هدف برآورد دمای سطح زمین در استان تهران بود تصحیحات لازم بر روی تصاویر انجام گرفت. با تصحیح اتمسفری و هندسی تصاویر منطقه مورد مطالعه، انعکاس در سطح زمین به دست آمد و تمامی محاسبات لازم براساس آن صورت گرفت.

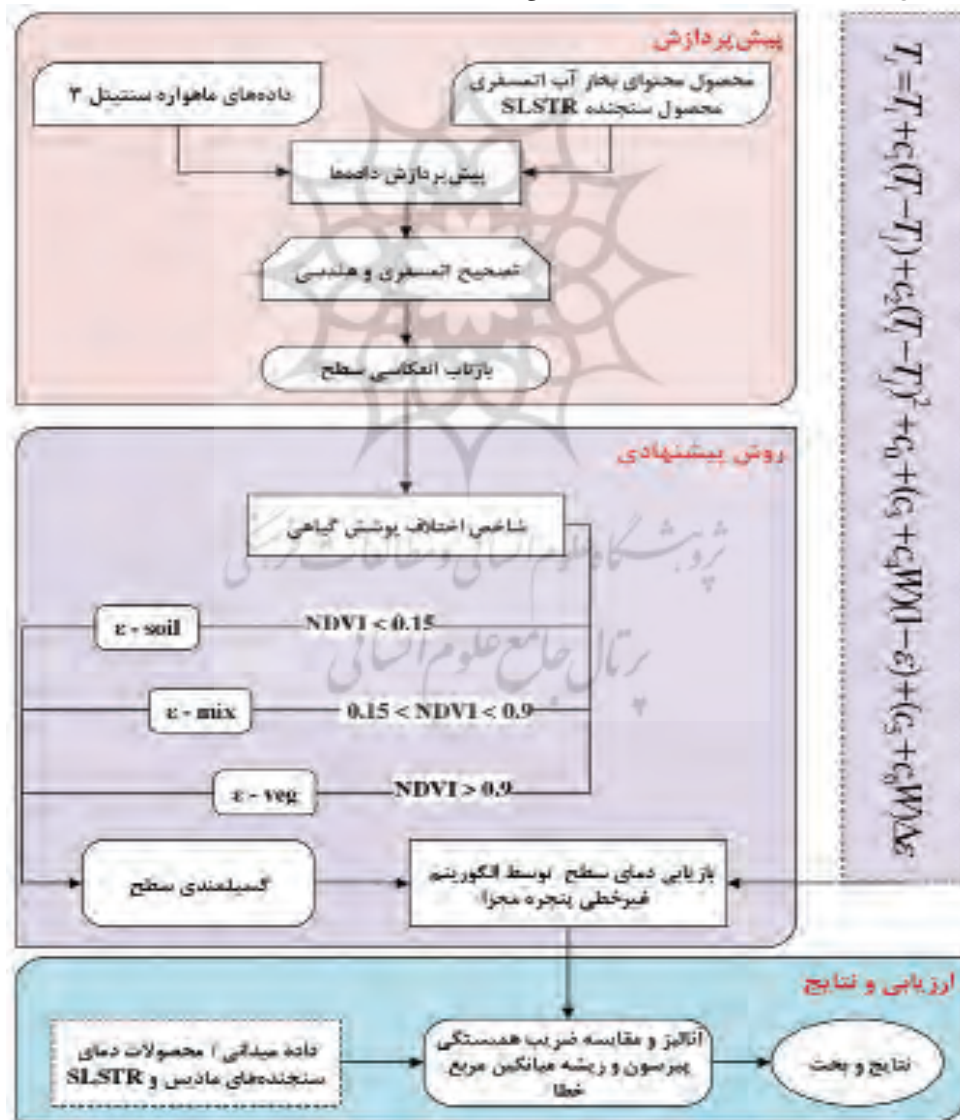
۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این تحقیق، در دو مرحله کلی اجرا شده است، در مرحله اول، برای انجام این پژوهش از تصاویر سری زمانی سنجنده SLSTR ماهواره ستینل ۳ شده است.

در این تحقیق، چون هدف برآورد دمای سطح زمین در استان تهران بود تصحیحات لازم بر روی تصاویر انجام گرفت. با تصحیح اتمسفری و هندسی تصاویر منطقه مورد مطالعه، انعکاس در سطح زمین به دست آمد و تمامی محاسبات لازم براساس آن صورت گرفت.

۳- روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در این تحقیق، در دو مرحله کلی اجرا شده است، در مرحله اول، برای انجام این پژوهش از تصاویر سری زمانی سنجنده SLSTR ماهواره ستینل ۳ شده است.



نگاره ۲: فلوچارت روش پیشنهادی

جدول ۳: ضرایب الگوریتم پنجره مجزا غیرخطی در معادله (۱) برای سنجنده SLSTR ماهواره سنتینل ۳. خطای استاندارد برآورد، r ضریب همبستگی پیرسون و u_{total} عدم اطمینان کلی برای الگوریتم پنجره مجزا غیرخطی می‌باشد

پارامتر	واحد	سنجنده SLSTR
C_0	K	$-۰/۲۶۸ \pm ۰/۰۱۴$
C_1	unitless	$۱/۰۸۴ \pm ۰/۰۱۰$
C_2	K-1	$۰/۲۷۷ \pm ۰/۰۱۷$
C_3	K	$۴۵/۱ \pm ۰/۷$
C_4	K.cm-1	$-۰/۷۳ \pm ۰/۱۹$
C_5	K	$-۰/۱۲۵ \pm ۱/۷$
C_6	K.cm-1	$۱۶/۷ \pm ۰/۵$
σ	K	$۰/۹$
r	unitless	$۰/۹۷۶$
u_{total}	K	$۱/۶$

و شب نیز کاربرد ندارد (Goita & Royer, 1997; Zhengming Wan & Li, 1997). در میان ساختارهای مختلف ریاضی برای این الگوریتم‌های پیشنهاد شده، رابطه الگوریتم پنجره مجزا غیرخطی که Sobrino آن را ارائه داده است (JA Sobrino et al., 1996) به‌طور خلاصه انتخاب شد:

$$T_s = T_i + c_1(T_i - T_j) + c_2(T_i - T_j)^2 + c_0 + (c_3 + c_4W)(1 - \varepsilon) + (c_5 + c_6W)\Delta\varepsilon$$

رابطه (۱)

در این معادله T_s ، دمای سطح زمین برحسب درجه کلوین (K)، $T_{i,j}$ دمای روشنایی (BT) در سطح سنجنده برحسب درجه کلوین، W محتوای بخار آب اتمسفر (gr/cm^2)، میانگین گسیلمندی سطح در دو باند حرارتی که برابر است با $0.5(\varepsilon_i + \varepsilon_j)$ ، اختلاف گسیلمندی سطح زمین حاصل از دو باند حرارتی که معادل است با $(\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ می‌باشد. ضرایب $c_0 - c_6$ شبیه‌سازی شده برای نمونه‌های مختلف در جدول ۳ بیان شده است.

$c_0 - c_6$ ضرایبی هستند که از رگرسیون‌های آماری بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده حاصل شده‌اند. سوپرینو و

تعیین گسیلمندی سطح و بازیابی دما سطح زمین روش پنجره مجزا براساس دیفرانسیل جذب است که در آن اثر اتمسفر بر سیگنال اندازه‌گیری شده با استفاده از اختلاف سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در دو باند حرارتی با طول موج‌های مختلف تصحیح می‌شود (McMillin, 1975). الگوریتم SW برای بازیابی دمای سطح زمین به گسیلمندی سطح زمین بستگی دارند.

صرف‌نظر از الگوریتم‌های دو زاویه‌ای و SW همچنین ممکن است دما را تنها از یک باند حرارتی تحت یک مشاهده واحد به اصطلاح Mono-Window یا الگوریتم تک کانال (SC) که عمدتاً روشی برای سری ماهواره‌های لندست است، بازیابی کرد (Jimnez-Muoz et al. 2014; Jimnez-Muoz et al. 2008).

از آنجا که سنجنده SLSTR ماهواره سنتینل ۳ فقط دارای دو باند حرارتی می‌باشد الگوریتم سه کانال به‌منظور محاسبه دما برای سنتینل ۳ حذف می‌شود. علاوه بر این به‌منظور اجازه بازیابی دما در زمان آبی و جلوگیری از وابستگی داده به اخذ آن در شب، روش‌های مبتنی بر داده‌های روز

2- Kelvin

3- Brightness Temperatures

1- Single Channel

جدول ۴: ضرایب برای رابطه خطی $\varepsilon = a + b\rho_{red}$ ، که ارتباط بین گسیلمندی سطح و بازتاب انعکاسی سطح در باند قرمز را نشان می‌دهد

p-red	slstr_b2	slstr_b2
ε -TIR	slstr_b11	slstr_b12
b	0.051 ± 0.009	0.032 ± 0.007
a	0.979 ± 0.002	0.9829 ± 0.0016
r	0.73	0.65
σ	0.003	0.003

همکاران برای شبیه‌سازی از ۱۰۸ طیف گسیلمندی موجود در کتابخانه طیفی ASTER (Baldridge, Hook, Grove, & Rivera, 2009) و ۶۱ پروفیل جوی تحت پنج درجه دمای مختلف استفاده کردند. طیف‌های گسیلمندی شامل نمونه‌های طبیعی خاک، پوشش گیاهی، آب، یخ و نمونه سنگ‌هایی با اندازه‌ای در مقیاس سنجش‌ازدور بودند (Sobrinho, Jimnez-Muoz, et al. 2016).

$$P_V = \frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S}$$

رابطه (۳)

مزیت اصلی معادله (۱) این است که این عبارت از لحاظ فیزیکی از معادله انتقال تشعشعی بعد از چندین فرضیه به صورت مستقیم حاصل می‌شود و به صراحت شامل محتوای بخار آب اتمسفر و گسیلمندی سطح می‌باشد. از لحاظ بازیابی عملیاتی، الگوریتم داده شده توسط معادله (۱) به راحتی می‌تواند منابع خارجی محتوای بخار آب اتمسفر و گسیلمندی سطح را در خود جای دهد. از این رو، هرگاه محصولات بهبود یافته W و LSE در دسترس باشد، پتانسیل LST تولید شده با این الگوریتم می‌تواند به راحتی پردازش شود. برای تعیین گسیلمندی سطح، روش مبتنی بر حد آستانه‌گیری متوسط NDVI(THM) طبق معادله (۲) استفاده شد (J. A. Sobrinho et al., 2008).

از چندین فرضیه به صورت مستقیم حاصل می‌شود و به صراحت شامل محتوای بخار آب اتمسفر و گسیلمندی سطح می‌باشد. از لحاظ بازیابی عملیاتی، الگوریتم داده شده توسط معادله (۱) به راحتی می‌تواند منابع خارجی محتوای بخار آب اتمسفر و گسیلمندی سطح را در خود جای دهد. از این رو، هرگاه محصولات بهبود یافته W و LSE در دسترس باشد، پتانسیل LST تولید شده با این الگوریتم می‌تواند به راحتی پردازش شود. برای تعیین گسیلمندی سطح، روش مبتنی بر حد آستانه‌گیری متوسط NDVI(THM) طبق معادله (۲) استفاده شد (J. A. Sobrinho et al., 2008).

میانگین مقادیر گسیلمندی برای ۲۷ نمونه خاک در باند ۱۱ میکرومتر معادل است با 0.969 ± 0.005 و برای باند ۱۲ میکرومتر برابر با 0.977 ± 0.003 می‌باشد. این مقادیر را می‌توان به عنوان مرجع برای ε_s در معادله (۲) استفاده کرد در حالی که مقدار ثابت ۰/۹۹ برای ε_V در نظر گرفته شود. ضرایب a و b در قسمت اول معادله (۲) از طریق کتابخانه طیفی ASTER^۳ برای ۲۷ نمونه خاک در جدول ۴ به دست آمده است (J. A. Sobrinho et al., 2008). داده‌های ورودی برای الگوریتم پنجره مجزا در معادله (۱) شامل دمای روشنایی باندهای ۱۱ و ۱۲ میکرومتر موجود در باندهای سنجنده

$$NDVI < NDVI_S : \varepsilon = a + b\rho_{red}$$

$$NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V : \varepsilon = \varepsilon_s (1 - P_V) + \varepsilon_V P_V + C$$

$$NDVI_V > NDVI : \varepsilon = 0.99$$

رابطه (۲)

در این معادله ρ_{red} بازتاب انعکاسی سطح در باند قرمز، ε_V و ε_S به ترتیب مقادیر مرجع گسیلمندی سطح برای

2- Fractional vegetation cover (P_V)

3- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

1- NDVI Thresholds Method

ریشه میانگین مربع خطا^۲ (Kuenzer & Dech, 2013) مطابق معادلات (۴) و (۵) به عنوان معیارهای نسبی و کمی ارزیابی در نظر گرفته شدند. ضریب همبستگی نشان دهنده این است که چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تأثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می باشد و همچنین ریشه میانگین مربع خطا بیانگر اختلاف مقدار متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل است.

$$r = \frac{\sum_1^N (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_1^N (X - \bar{X})^2 \sum_1^N (Y - \bar{Y})^2}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [(X - Y)]^2} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این معادله، X و Y هر دو در واحد درجه سانتی گراد بوده که X دمای سطح حاصل از ماهواره سنتینل ۳، Y دمای سطح حاصل از سنجنده مادیس و SLSTR در زمان عبور سنتینل ۳ در هر نقطه اعتبارسنجی متناظر، N تعداد نقاط یا پیکسل های اعتبارسنجی انتخاب شده می باشد. نتایج حاصل از این ارزیابی برای پنج تصویر از هر فصل و ایستگاه های هواشناسی موجود در نگاره ۴ نشان داده شده است. نتایج دمای سطح زمین با الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی در اردیبهشت، مرداد، آبان و دی ماه ۱۳۹۷ با استفاده از داده های ماهواره سنتینل ۳ در هفت کلاس مختلف دمایی به عنوان نمونه ای از هر فصل طبقه بندی شدند. نتایج حاصل در تحقیقات (Amanollahi, et al. 2012; M Bokaie, et al. 2019) نشان می دهند که دمای سطح زمین در استان تهران و در ماه های مختلف متغیر است. حداکثر LST در محدوده های مرکزی، جنوب، جنوب غربی و تا حدودی در شرق و جنوب شرقی شهر تهران رخ داده است. حداقل دمای سطح نیز برای مناطق شمالی و شمال غربی تهران به دست آمد. به طور کلی مناطق مرکزی، جنوب غرب و جنوب تهران بالاترین مقادیر LST را در فصل های مورد مطالعه داشتند، در حالی که مناطق شمالی کمترین مقادیر LST را به خود اختصاص

داده SLSTR، گسیلمندی سطح که از طریق معادله (۲) محاسبه شد و محتوای بخار آب اتمسفری که یکی از محصولات سنجنده SLSTR می باشد.

۴- نتایج و بحث

هدف اصلی این مقاله محاسبه و ارزیابی دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی توسط ماهواره Sentinel-3 در استان تهران بود. در این بخش از اعتبارسنجی مطلق و مقایسه ای برای ارزیابی این محصول استفاده شد. دقت مطلق الگوریتم NSW و پارامترهای مورد استفاده در این مطالعه با روش ارائه شده توسط داده های میدانی مورد بحث قرار گرفته است. سپس، دقت مطلق محصولات دمای MODIS و SLSTR با استفاده از داده های زمینی اندازه گیری شده تعیین می شود.

در بخش بعدی دمای محاسبه شده از روش NSW، محصولات دمای MODIS و SLSTR دوبه دو با همدیگر ارزیابی نسبی شده اند. سرانجام، منبع خطاها و تفاوت ها در محصولات و روش های NSW در بخش آخر بحث شده است.

۴-۱- ارزیابی مستقیم دمای محاسبه شده از روش NSW با داده میدانی

در تحقیق حاضر برای این که نتایج قابل اطمینان برای هر فصل ارائه شود با توجه به توان تفکیک زمینی ماهواره های سنتینل ۳ و مادیس در هر فصل پنج تصویر از هر سنجنده پردازش و محاسبات بر روی آنها انجام شد. دمای محاسبه شده برای چهار تصویر از چهار فصل مختلف در طول سال ۹۷ به صورت بصری در نگاره ۳ ارائه شده است. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی در تعیین اختلاف بین دمای حاصل روش NSW و محصولات دمای سنجنده مادیس و سنجنده SLSTR و همچنین داده میدانی، ضریب همبستگی پیرسون^۱ (Ahlgren, Jarneving, & Rousseau, 2003)(r) و

دلایل تفاوت در دقت فصول مختلف در بخش آخر نتایج بحث خواهد شد.

۴-۲- ارزیابی مستقیم محصولات دمای MODIS و SLSTR با داده میدانی

ارزیابی قطعی محصولات دمای MODIS و SLSTR با استفاده از داده میدانی اندازه‌گیری شده در سطح زمین برای اطمینان از دقت محصولات دما انجام شد و نتایج آن در نگاره ۵ قابل مشاهده است. با توجه به دقت‌های ارائه شده در نگاره ۵ هر دو محصول دمای MODIS و SLSTR در فصول مختلف نتایج مشابهی را ارائه داده‌اند. به عنوان مثال، هر دو محصول در فصل زمستان دقت بهتری را برای دمای سطح زمین نسبت به فصل تابستان نشان می‌دهند و فصل بهار دقت بهتری نسبت به فصل پاییز را ارائه می‌دهد. به طور کلی، محصول دمای SLSTR دقت بالاتری نسبت به محصول دمای MODIS در تمام فصول ارائه می‌دهد.

مطابق نگاره (۵ و ۶)، نتایج ارزیابی مطلق نشان می‌دهد که LST برآورد شده با روش NSW نتایج قابل اطمینان‌تر و دقت بهتری نسبت به محصولات MODIS و SLSTR ارائه می‌دهد. با توجه به استفاده از روش پنجره مجزای خطی در محصولات دمای MODIS و SLSTR، دقت پایین این دو محصول در مقایسه با روش NSW قابل توجیه است. دو دلیل اصلی خطا در روش پنجره مجزای خطی عبارتند از: (۱) خطی شدن معادله انتقال تابش و (۲) تقریب‌های استفاده شده برای مقدار بخار آب جوی.

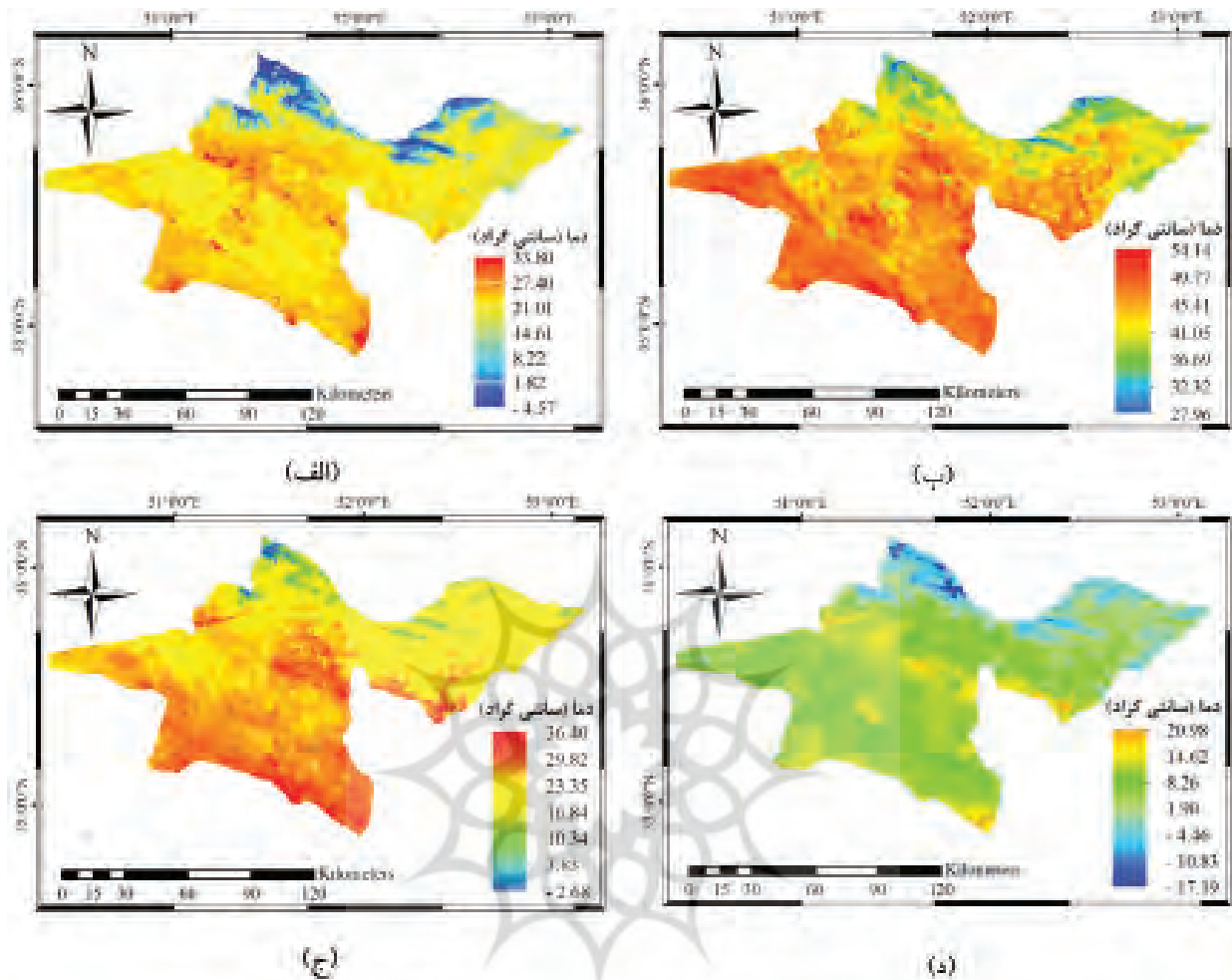
۴-۳- ارزیابی غیرمستقیم محصولات دمای MODIS و SLSTR

در مقاله حاضر، اعتبارسنجی غیرمستقیم دمای سطح زمین حاصل از روش پنجره مجزای غیرخطی با تولیدات دمای سنجنده‌های MODIS و SLSTR در استان تهران ارائه شده است. به دلیل پوشش وسیع و برداشت دوبار در هر شبانه‌روز توسط هر یک از سنجنده‌های مادیس،

دادند. این روند برای تمامی فصل‌ها به همین ترتیب بود. در حقیقت یکی از دلایل دمای بالاتر در مناطق مورد نظر می‌تواند پوشش گیاهی کمتر در این مناطق باشد. به این معنا که کاهش تراکم پوشش گیاهی منجر به افزایش دما می‌شود. پوشش گیاهی و بدنه‌های آبی مربوط به مناطق شمالی، شمال‌غربی و شمالی شرقی تهران است.

به طور کلی مناطقی که دارای پوشش گیاهی و آبی هستند، می‌توانند مقدار دمایی کمتری را نشان دهند. این مسأله با توجه به نتایج حاصل از بسیاری از مطالعات صورت گرفته در این زمینه مطابقت دارد. مناطق مرکزی، جنوبی و جنوب‌غربی دارای مقدار پوشش گیاهی کمتری نسبت به مناطق شمالی می‌باشند و بیشتر سطوح پوشیده از زمین‌های بایر و مناطق ساخته شده می‌باشد که با توجه به این موضوع دمای سطح در این مناطق بالا می‌باشد. به طور کلی افزایش دما در فصل تابستان به دلیل تغییرات ذاتی در این فصل بوده و همچنین یکی دیگر از دلایل، تأثیرات نوع کاربری اراضی در این مناطق است، که مقادیر LST بالاتر نسبت به سایر فصل‌ها به این دلایل توجیه پذیر می‌باشد. مقادیر LST در پاییز به علت کاهش تراکم پوشش گیاهی در نیمه شمالی نسبت به فصل بهار افزایش می‌یابد و در بخش‌های دیگر دمای سطح به علت شرایط اتمسفری موجود در این فصل بالا است. در فصل زمستان به علت پایین آمدن دمای هوا به طور کلی دمای سطح زمین نیز نسبت به سایر فصل‌ها کاهش یافته است.

باتوجه به نتایج به دست آمده در نگاره ۴ دمای محاسبه شده از روش پنجره مجزای غیرخطی نتایج مطلوبی را برای چهار فصل سال ارائه داده است. در مقایسه فصول با همدیگر، دمای محاسبه شده در فصل زمستان با ضریب تعیین ۰/۹۸ و میانگین مربع خطای ۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد دارای بیشترین دقت است. باتوجه به نمودار رگرسیون خطی بین دمای محاسبه شده و داده میدانی در همه فصول بایاس کمی مشاهده می‌شود که این نشان از مناسب بودن ضرایب الگوریتم NSW بر روی منطقه مورد مطالعه است.

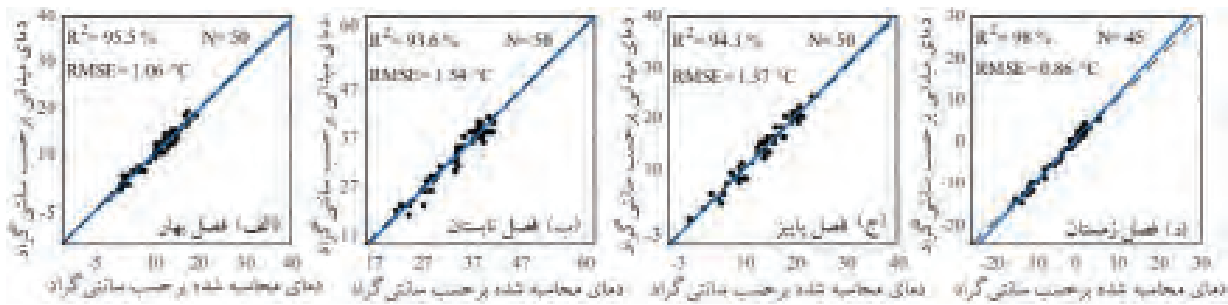


نگاره ۳: دمای سطح زمین حاصل از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی: (الف) مقدار دما در خرداد ۱۳۹۷، (ب) مقدار دما در مرداد ۱۳۹۷، (ج) مقدار دما در آبان ۱۳۹۷ و (د) مقدار دما در دی ۱۳۹۷

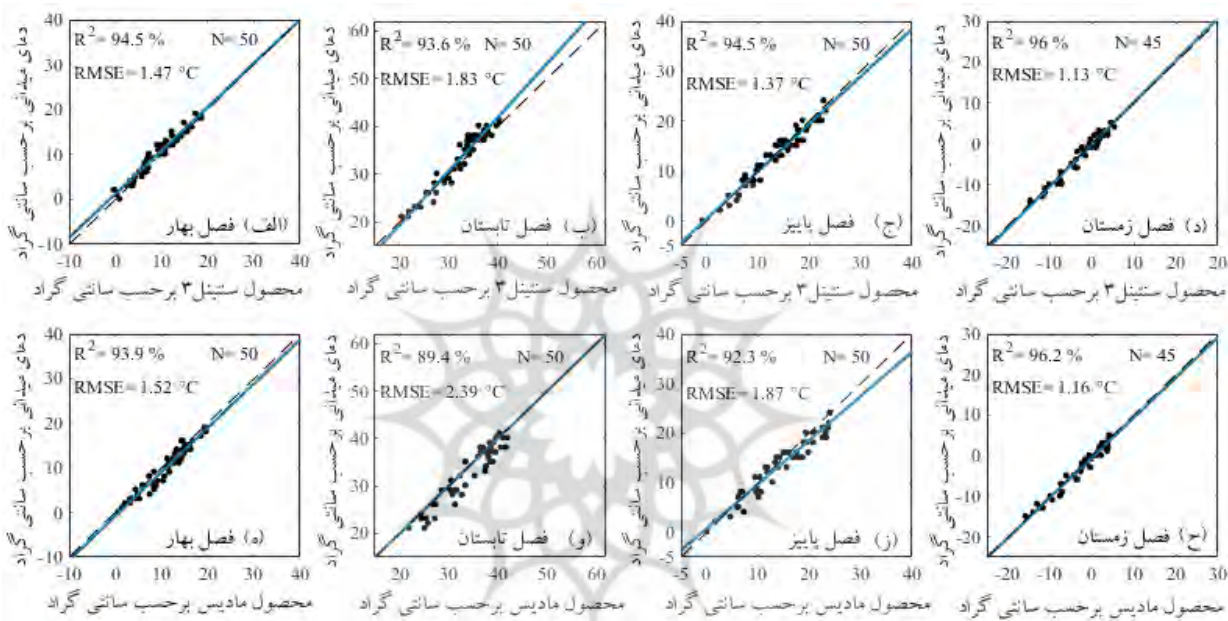
محصول دمای آن به عنوان مرجع در شرایط جوی عاری از ابر انتخاب شد. داده‌ها و محصولات سنجنده‌های مادیس به صورت در دسترس می‌باشند. محصول دمای مادیس در بیش از ۵۰ مورد با داده‌های محلی در محدوده دمای ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد و بخار آب ۰/۴ تا ۴ سانتی‌متر در مقیاس یک کیلومتر اعتبارسنجی شده و دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده مادیس است. با این‌که دمای حاصل از مادیس دارای دقت بهتر از یک درجه کلون برای هر دو سنجنده ترا و آکوا است ولی این دما، متوسط دما برای منطقه یک کیلومتر در یک کیلومتر است، بنابراین هر دمای مادیس معادل ۲ مقدار دمای سنتینل ۳ در سطح یک پیکسل مادیس است (با توجه به اختلاف قدرت تفکیک مکانی بین دو سنجنده) لذا دمای حاصل از سنتینل ۳ به مراتب دقیق‌تر از دمای مادیس در مقیاس محلی خواهد بود. همچنین محصول دمای SLSTR از الگوریتم خطی پنجره مجزا استفاده کرده و هدف این است که دقت نسبی دمای محاسبه شده از روش NSW با محصول سنجنده SLSTR برآورد شود. لذا برای ارزیابی نسبی دمای حاصل از روش پیشنهادی چهار فریم از محصول دمای MODIS و سنجنده SLSTR در ماه اردیبهشت، مرداد، آبان و دی ۱۳۹۷ از منطقه مورد مطالعه استفاده گردید که در نگاره ۶ نشان داده شده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سحر)

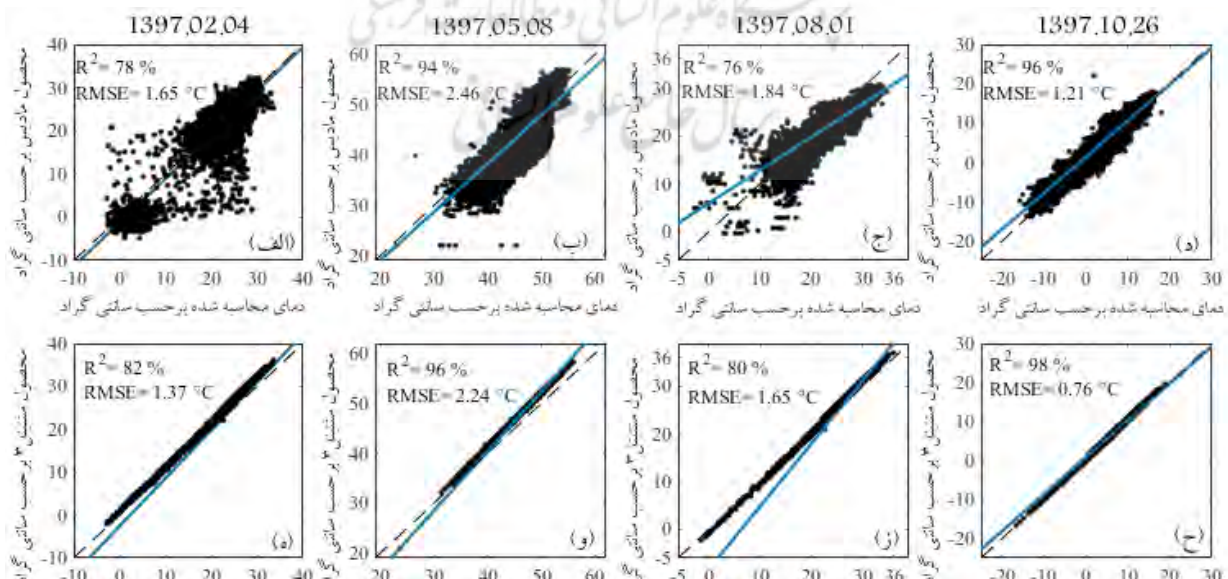
محاسبه و ارزیابی دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره مجزای غیر خطی ... / ۷۱



نگاره ۴: ارزیابی دقت قطعی دمای محاسبه شده از روش پنجره مجزای خطی با استفاده از داده میدانی در فصول مختلف سال



نگاره ۵: ارزیابی دقت قطعی محصولات دمای MODIS و SLSTR با استفاده از داده میدانی در فصول مختلف سال



نگاره ۶: ارزیابی دقت نسبی محصولات دمای MODIS و SLSTR با دمای محاسبه شده در چهار تاریخ مشخص از فصول مختلف سال

با توجه به نتایج ارائه شده در نگاره ۶ و مقایسه دمای حاصل از الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا با محصولات SLSTR و مادیس، این الگوریتم دارای ثبات نسبی برای کل فصول است.

۵- نتیجه گیری

هدف از این تحقیق، برآورد دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا توسط داده‌های سنتینل ۳ در فصول مختلف سال می‌باشد. در ارزیابی قطعی، دمای محاسبه شده نسبت به داده‌های میدانی به دست آمده در سطح زمین از ایستگاه هواشناسی اعتبارسنجی شدند. همچنین در ارزیابی نسبی، دمای محاسبه شده نسبت به محصول دمای مادیس و SLSTR ارزیابی شده است. برای اطمینان بیشتر از نتایج اعتبارسنجی غیرمستقیم، محصول دمای مادیس و SLSTR نسبت به داده میدانی ارزیابی قطعی شده‌اند و نتایج مطلوبی را ارائه دادند.

به صورت کلی تنوع قابل توجهی در اختلافات دما در طول فصول مختلف سال، به خصوص در فصل تابستان برای دمای برآورد شده از الگوریتم NSW مشاهده می‌شود، اما دمای SLSTR، محصول دمای مادیس و دمای محاسبه شده روند مشابهی از تغییرات را برای فصول بر روی منطقه مورد مطالعه ارائه داده‌اند. همچنین طبق دقت‌های به دست آمده حاصل از هر دو محصول روش الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا دقت‌های بهتری را در فصل‌های بهار و زمستان نسبت به فصول پاییز و تابستان ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در چهار فصل مختلف سال روش پیشنهادی دارای ثبات نسبی خوبی می‌باشد و می‌توان گفت که برآورد دمای سطح زمین با استفاده از روش پنجره مجزای غیرخطی توسط داده ماهواره سنتینل ۳ دارای دقت مناسبی بوده و می‌تواند در مقیاس‌های بزرگ برای برآورد دما در حل بحران‌های زیست‌محیطی و همچنین تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرد.

ارزیابی غیرمستقیم نتایج روش پیشنهادی با دو محصول دمای سنجنده MODIS و SLSTR انجام گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی طبق نگاره ۶ با توجه به دو پارامتر ضریب تعیین و ریشه میانگین مربع خطا، نشان‌دهنده نزدیک‌تر بودن نتایج روش پیشنهادی به محصول SLSTR در مقایسه با MODIS در طول دوره یک‌ساله و فصول مختلف می‌باشد. الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا و محصول مادیس دارای RMSE با دامنه ۱/۲۱ الی ۲/۴۶ بوده است که بیشترین و کمترین دقت به ترتیب مربوط به فصل‌های زمستان و تابستان می‌باشد. همچنین با مقایسه این الگوریتم با محصول RMSE.SLSTR دارای دامنه ۰/۷۶ الی ۲/۲۴ بوده است که در این مقایسه نیز بیشترین و کمترین دقت به ترتیب مربوط به فصل‌های زمستان و تابستان می‌باشد.

دلیل عملکرد مناسب الگوریتم در فصل زمستان تعادل نسبی میزان بخارآب اتمسفر نسبت به بقیه فصول بوده، که با توجه به نحوه مدل‌سازی غیرخطی میزان بخارآب اتمسفر در الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا نسبت به الگوریتم خطی موجود در محصولات SLSTR و MODIS، اختلاف دمای حاصل از الگوریتم و محصولات قابل توجهی است. در فصل تابستان نیز به دلیل نوسانات دما، نتایج روش پیشنهادی نسبت به هر دو محصول دمایی به اندازه کافی قابل اعتماد نیست. با توجه به ضریب نتایج روش پیشنهادی همبستگی بیشتری نسبت به محصول دمای سنجنده SLSTR در مقایسه با مادیس را ارائه داده است که این به دلیل استفاده از باندهای طیفی مشابه در محاسبه دمای سطح زمین در الگوریتم پیشنهادی و محصول SLSTR می‌باشد.

در مقایسه نسبی، الگوریتم غیرخطی پنجره مجزا و محصول MODIS دارای ضریب تعیین با دامنه ۰/۷۶ الی ۰/۹۶ بوده است. همچنین با مقایسه نسبی این الگوریتم با محصول SLSTR، ضریب تعیین دارای دامنه ۰/۸۰ الی ۰/۹۸ است.

Sensing, 36(4), 1113-1126.

10- Goita, K., & Royer, A. (1997). Surface temperature and emissivity separability over land surface from combined TIR and SWIR AVHRR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 718-733.

11- Gutman, G., & Ignatov, A. (1998). The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8), 1533-1543.

12- Huang, C., Duan, S.-B., Jiang, X.-G., Han, X.-J., Wu, H., Gao, M., . . . Li, Z.-L. (2019). Intercomparison of AMSR2-and MODIS-Derived Land Surface Temperature Under Clear-Sky Conditions. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 3286-3294.

13- Jiménez-Muñoz, J. C., Cristobal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2008). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 47(1), 339-349.

14- 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.

15- Kamran, K. V., Pirnazar, M., & Bansouleh, V. F. (2015). Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS: comparison between split window algorithm and SEBAL method. Paper presented at the Third International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2015).

16- Kuenzer, C., & Dech, S. (2013). Thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing and Digital Image Processing*. doi, 10(1007), 978-994.

17- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., . . . Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.

18- Malenovsky, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R., & Berger, M. (2012). Sentinels for science: Potential of Sentinel-1,-2,

۶- منابع و مأخذ

1- Ahlgren, P., Jarneving, B., & Rousseau, R. (2003). Requirements for a cocitation similarity measure, with special reference to Pearson's correlation coefficient. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 54(6), 550-560.

2- Anding, D., & Kauth, R. (1970). Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of Environment*, 1(4), 217-220.

3- Baldridge, A. M., Hook, S., Grove, C., & Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote sensing of environment*, 113(4), 711-715.

4- Berger, M., Moreno, J., Johannessen, J. A., Levelt, P. F., & Hanssen, R. F. (2012). ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote sensing of environment*, 120, 84-90.

5- Coll, C. s., Caselles, V., Galve, J. M., Valor, E., Niclos, R., Sánchez, J. M., & Rivas, R. I. (2005). Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 288-300.

6- Donlon, C., Berruti, B., Buongiorno, A., Ferreira, M.-H., Féménias, P., Frerick, J., . . . Mavrocordatos, C. (2012). The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission. *Remote sensing of environment*, 120, 37-57.

7- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S. b., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., . . . Martimort, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.

8- Emami, H., Mojaradi, B., & Safari, A. (2016). A new approach for land surface emissivity estimation using LDCM data in semi-arid areas: exploitation of the ASTER spectral library data set. *International Journal of Remote Sensing*, 37(21), 5060-5085.

9- 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*

- Ruescas, A., Danne, O., North, P., ... & Mitrika, Z. (2012, October). Land surface temperature retrieval from Sentinel 2 and 3 Missions. Paper presented at the Proceedings of the Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/ (A) ATSR Workshop, Frascati, Italy.
- 28- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Ruescas, A. B., Danne, O., Brockmann, C., ... & Berger, M. (2016). Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote Sensing of Environment*, 179, 149-161.
- 29- Sobrino, J., Li, Z., Stoll, M., & Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17(11), 2089-2114.
- 30- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., ... & Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 46(2), 316-327.
- 31- Tang, B.-H. (2018). Nonlinear split-window algorithms for estimating land and sea surface temperatures from simulated chinese gaofen-5 satellite data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11), 6280-6289.
- 32- 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*, 35(4), 980-996.
- 33- Wan, Z., & Li, Z. L. (2008). Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18), 5373-5395.
- 34- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z.-L. (2004). Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 261-274.
- 35- Zheng, Y., Ren, H., Guo, J., Ghent, D., Tansey, K., Hu, X., ... & Chen, S. (2019). Land surface temperature retrieval from sentinel-3A sea and land surface temperature radiometer, using a split-window algorithm. *Remote Sensing*, 11(6), 650.
- and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote sensing of environment*, 120, 91-101.
- 19- McMillin, L. M. (1975). Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of geophysical research*, 80(36), 5113-5117.
- 20- Nie, J., Ren, H., Zheng, Y., Ghent, D., & Tansey, K. (2020). Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval From Nighttime Middle-Infrared and Thermal-Infrared Sentinel-3 Images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- 21- North, P., Brockmann, C., Fischer, J. r., Gomez-Chova, L., Grey, W., Heckel, A., . . . Regner, P. (2008). MERIS/AATSR synergy algorithms for cloud screening, aerosol retrieval and atmospheric correction. Paper presented at the proc. 2nd meris/aatsr user workshop, esrin, frascati.
- 22- Prata, A., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J., & Otle, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 175-224.
- 23- Qian, Y.-G., Li, Z.-L., & Nerry, F. o. (2013). Evaluation of land surface temperature and emissivities retrieved from MSG/SEVIRI data with MODIS land surface temperature and emissivity products. *International journal of remote sensing*, 34(9-10), 3140-3152.
- 24- Ruescas, A., Danne, O., Fomferra, N., & Brockmann, C. (2016). The Land Surface Temperature Synergistic Processor in BEAM: A Prototype towards Sentinel-3. *Data*, 1(3), 18.
- 25- Shrestha, A., Angal, A., & Xiong, X. (2018). Evaluation of MODIS and Sentinel-3 SLSTR thermal emissive bands calibration consistency using Dome C. Paper presented at the Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXIV.
- 26- Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Sòria, G., Ruescas, A., Danne, O., Brockmann, C., . . . Merchant, C. (2016). Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data. *Remote sensing of environment*, 179, 149-161.
- 27- Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., Brockmann, C.,