

توسعه یک الگوریتم پنجره مجزا برای بازیابی دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳

مسعود حیدری^{*}، مهدی آخوندزاده هنزائی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴

چکیده

دمای سطح زمین، شاخص مهمی در مطالعه مدل‌های تعادل انرژی در سطح زمین و فعل و انفعالات بین زمین و اتمسفر در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است. در چند دهه اخیر الگوریتم‌های مختلف و متنوعی برای تعیین دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف ارائه گردیده است. در این پژوهش یک روش پنجره‌مجزای جدید برای بازیابی دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر سنجنده رادیومتر دمای سطح زمین و دریا (SLSTR)، ماهواره سنتینل-۳A، ارائه شده است. مزیت روش پیشنهادی دخیل کردن بخار آب موجود در اتمسفر در الگوریتم پنجره‌مجزا می‌باشد که نقش مهمی را در بازیابی دمای سطح زمین ایفا می‌کند. دمای سطح زمین با روش پیشنهادی و با سه الگوریتم پنجره‌مجزای موجود دیگر بازیابی شد؛ سپس نتایج حاصل از روش پیشنهادی و سه الگوریتم پنجره‌مجزای موجود با محصولات دمایی سنجنده‌های استر، مادیس و سنتینل-۳ مقایسه گردید. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) روش پیشنهادی برای منطقه مورد مطالعه شرق تهران در مقایسه با محصولات دمایی استر، مادیس و سنتینل-۳ به ترتیب ۳/۴۹، ۱/۲۲ و ۱/۲۶ کلوین به دست آمد که مقدار کمتری نسبت به RMSE به دست آمده از سایر الگوریتم‌های پنجره‌مجزا را دارد. همچنین روش پیشنهادی و سه الگوریتم پنجره‌مجزای دیگر برای منطقه‌های شمال غرب اصفهان و کرمانشاه پیاده‌سازی شد. برای منطقه مورد مطالعه کرمانشاه نتایجی به مراتب بهتر از دو منطقه دیگر و سایر روش‌ها مشاهده گردید به طوری که RMSE روش پیشنهادی ۱/۰۵ کلوین محاسبه گردید، در حالی که مقدار RMSE سایر روش‌ها ۱/۱۹، ۱/۲۸ و ۱/۵۶ کلوین به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: دمای سطح زمین، الگوریتم پنجره مجزا، ماهواره سنتینل-۳، رادیومتر دمای سطح زمین و دریا (SLSTR).

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان کارگر شمالی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی.

۱- مقدمه

دمای سطح زمین (LST ^۱) یکی از پارامترهای کلیدی در فیزیک فرآیندهای سطح زمین، از مقیاس محلی تا جهانی است [۱]. دمای سطح زمین به طور گسترده در بسیاری از مطالعات شامل تبخیر و تعرق، مدیریت منابع آب، چرخه‌های هیدرولوژیکی، پایش وضعیت سلامت گیاه در مطالعات خشکسالی، آب و هوای شهری و مطالعات زیست‌محیطی استفاده می‌شود [۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷]. همچنین دمای سطح زمین برای بررسی بهداشت محیط، آسیب‌پذیری انسان به تنش‌های گرمایی و شیوع و انتشار بیماری‌ها به کار می‌رود. بنابراین تخمین دمای سطح زمین نه تنها برای درک فرایندهای محیطی نیاز است بلکه در ارتباط با سلامت انسان نیز می‌باشد [۸]. به دلیل اهمیت و کاربرد دمای سطح زمین، پایش منطقه‌ای و جهانی آن در دهه های اخیر مورد مطالعه و پژوهش بسیاری از دانشمندان علوم مختلف قرار گرفته است.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری LST استفاده از برداشت‌های زمینی و ایستگاه‌های هواشناسی است که فقط اطلاعات دما را برای نقاطی خاص اندازه می‌گیرند و به دلیل پوشش مکانی محدود، هزینه بالا و عدم دسترسی آسان به داده‌ها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند در حالی که تصاویر ماهواره‌ای، پوشش مکانی وسیعی را فراهم می‌کند و به آسانی و هزینه‌ای پایین (بعضا بدون هزینه) در دسترس می‌باشند، بنابراین تصاویر ماهواره‌ای منبع اطلاعاتی مناسبی به منظور تهیه نقشه‌های حرارتی سطح آب و خشکی می‌باشند. با استفاده از محدوده مادون قرمز حرارتی تصاویر و تکنیک‌های سنجنش از دوری، دمای سطح زمین قابل بازیابی است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳^۲ و روش پنجره مجزای پیشنهادی، برای تهیه نقشه دمای سطح زمین استفاده شده است.

۱-۱- نوآوری و اهداف تحقیق

در این تحقیق یک الگوریتم پنجره مجزای^۳ جدید برای بازیابی دمای سطح زمین ارائه شده است که پارامترهای ضریب گسیل و بخار آب موجود در اتمسفر در آن دخیل شده است. همچنین برای بازیابی دمای سطح زمین از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده $SLSTR$ ^۴، ماهواره سنتینل-۳^۵، استفاده شده است. چون تاریخ پرتاب ماهواره سنتینل-۳^۵، ۱۶ فوریه ۲۰۱۶ می‌باشد بنابراین در حال حاضر تصاویر این ماهواره، تصاویر جدیدی محسوب می‌شود و تاکنون تحقیق و پژوهشی در این زمینه در داخل کشور مشاهده نشده است. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، شرق استان تهران می‌باشد که الگوریتم پنجره مجزای پیشنهادی برای این منطقه پیاده سازی شده است و علاوه بر شرق تهران، روش پیشنهادی بر روی منطقه‌های شمال غرب اصفهان و کرمانشاه نیز اعمال گردیده است.

۱-۲- مرور تحقیقات

در چند دهه اخیر، تخمین دمای سطح زمین از سنجنده‌های مختلف ماهواره‌ای پیشرفت‌های چشمگیری داشته است و الگوریتم‌های مختلف و متنوعی برای بازیابی دمای سطح زمین ارائه گردیده است که اساسا این الگوریتم‌ها بر پایه فرضیات و تقریب‌های متنوعی از معادله تشعشعی استوار است [۱]. این الگوریتم‌ها را می‌توان به سه دسته کلی روش‌های تک‌کاناله یا تک‌باندی، روش‌های چندکاناله یا چند-باندی و روش‌های چندزاویه‌ای تقسیم‌بندی نمود که الگوریتم پنجره مجزا جز روش‌های چندکاناله است. تاکنون پیشرفت‌ها و تلاش‌های قابل توجهی در دهه‌های گذشته برای بازیابی LST از طریق سنجنش از دور حرارتی صورت گرفته است که در این میان، کین و همکاران با استفاده از باند حرارتی سنجنده TM ^۵

^۳ Split Window^۴ Sea and Land Surface Temperature Radiometer^۵ Thematic Mapper^۱ Land Surface Temperature^۲ Sentinel-3A

متداول ترین آن‌ها، همان الگوریتم پنجره مجزا است و دلیل آن دقت و سادگی آن است. الگوریتم پنجره مجزا توسط پژوهشگران زیاد و برای ماهواره‌های گوناگون ارائه و تصحیح شده است. الگوریتم های پنجره مجزای موجود در جدول (۱) آورده شده است.

از آنجایی که ماهواره سنتینل-۳A در سال ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شد در حال حاضر ماهواره‌ای جدید محسوب می‌شود و تاکنون تحقیقاتی به این صورت در این زمینه انجام نشده است که از تصاویر این ماهواره برای بازیابی دمای سطح زمین استفاده کرده باشند. تعداد مقالاتی که در این زمینه به چاپ رسیده‌اند اندک هستند. همه الگوریتم‌های پنجره مجزایی که در تحقیق-های گذشته برای تصاویر سنتینل-۳A (سنجنده *SLSTR*) و تصاویر مشابه آن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در جدول (۲) نشان داده شده است.

۲- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده به صورت جداگانه در پایین توضیح داده شده است.

۲-۱- منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه، قسمتی از شرق استان تهران به ابعاد 50×50 کیلومتر است. این منطقه در بین طول جغرافیایی $51^{\circ}32'02''$ و $52^{\circ}04'34''$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ}34'26''$ و $36^{\circ}00'56''$ شمالی قرار دارد. شکل (۱) محدوده منطقه مورد مطالعه به همراه دو باند ۸ و ۹ تصویر سنتینل ۳ را نشان می‌دهد. تصاویر سنتینل ۳ و همچنین محصولات دمایی مادیس، استر و سنتینل ۳ در تاریخ ۵ آگوست ۲۰۱۸ این منطقه را تحت پوشش قرار می‌دهند. در جدول (۳) تاریخ و زمان تصاویر آورده شده‌است.

ماهواره لندست ۵^۱، روش تک‌باندی را معرفی کرد که با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، نیاز به پروفایل اتمسفری برای تصحیح اتمسفری را کاهش داد [۹]. اعتبارسنجی این روش میزان اختلافی کمتر از 0.4°C درجه سانتی‌گراد، بین شرایط شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده را نشان داد. در روش تک‌باندی، هدف رسیدن به الگوهایی برای استخراج دمای سطح زمین با استفاده از یک باند حرارتی در سنجنده‌ها است.

یو و همکاران در روش تک‌باندی دقتی کمتر نسبت به روش‌های چند باندی با استفاده از لندست ۵ را نتیجه گرفت [۱۰]. در مقابل روش‌های تک‌باندی، روش‌های چندباندی (منحصر به سنجنده‌هایی مانند مادیس (*MODIS*)^۳، استر (*ASTER*)^۴، *AVHRR*^۵ و ... که دارای بیش از یک باند حرارتی هستند) نیز توسعه داده شده‌اند [۱۱، ۱۲].

جیمنز و همکاران با پیاده‌سازی روش چندباندی و تک‌باندی بر روی باندهای حرارتی لندست ۵ و با شبیه‌سازی داده‌ها توسط پروفایل اتمسفری و استفاده از کتابخانه‌های طیفی، به متوسط خطای 1.5°C درجه رسید که در روش چندباندی دقتی به مراتب بهتر نسبت به روش تک‌باندی به هنگام افزایش میزان آب موجود در اتمسفر برآورد شد. نتایج تحقیق بیانگر این مطلب بود که تخمین دما در روش‌های تک‌باندی روشی وابسته به آب موجود در اتمسفر است و میزان خطا در برآورد این متغیر بر نتیجه نهایی اثر می‌گذارد. همچنین با افزایش آب موجود در اتمسفر دقت روش‌های چندباندی نسبت به تک‌باندی افزایش می‌یابد [۱۳].

در سال‌های اخیر الگوریتم‌های زیادی برای استخراج دما از تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است که

¹ Landsat 5

² Landsat 8

³ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

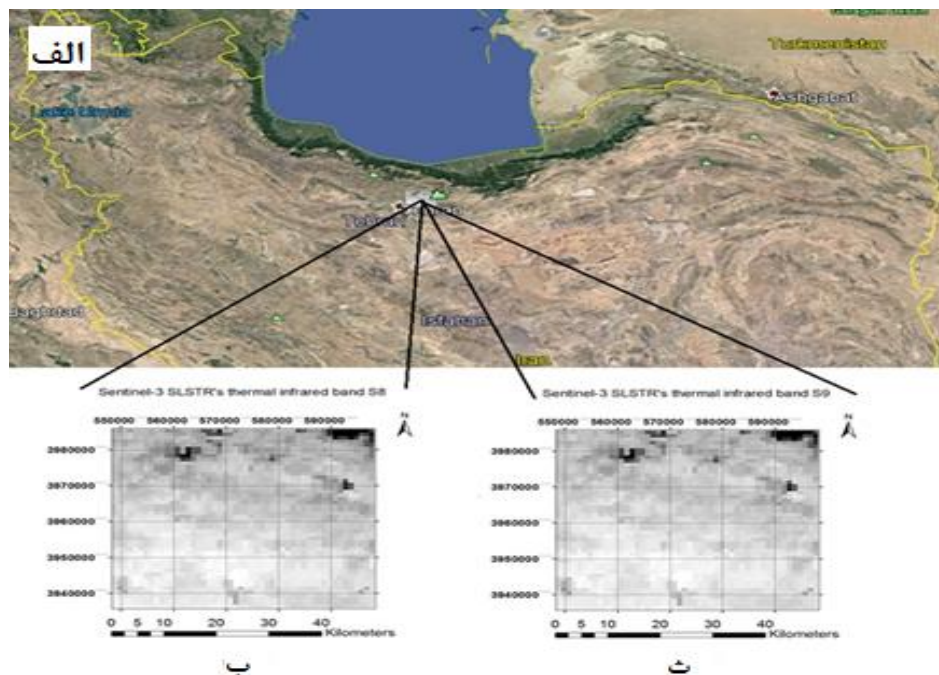
⁴ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

⁵ Advanced Very-High-Resolution Radiometer

جدول ۱: الگوریتم‌های پنجره مجزای موجود

شماره	الگوریتم پنجره مجزا	نویسندگان
۱	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 T_{11} \varepsilon_{11} + \alpha_4 (T_{11} - T_{12}) (1 - \varepsilon_{11}) + \alpha_5 T_{12} \Delta \varepsilon$	پرایس، ۱۹۸۴
۲	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (T_{11} - T_{12}) \varepsilon_{11} + \alpha_4 T_{12} \Delta \varepsilon + \alpha_5 (T_{11} - T_{12}) (\sec \theta - 1)$	پرایس، ۱۹۸۴
۳	$LST = [T_{11} + 3.33(T_{11} - T_{12})] \frac{5.5 - \varepsilon_{11}}{4.5} + 0.75 T_{12} \Delta \varepsilon$	پرایس، ۱۹۸۴
۴	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (1 - \varepsilon)$	اولیوری و کانیزارو، ۱۹۸۵
۵	$LST = 1.035 T_{11} + 3.046 (T_{11} - T_{12}) - 283.93 + 273$	مک کلین، ۱۹۸۵
۶	$LST = 1.274 + \left[3.63 - 2.068 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + 18.924 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right] T_{11} + \left[-2.63 - 1.912 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + 19.406 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right] T_{12}$	۱۹۹۰ A بکرو لی،
۷	$LST = \alpha_0 + \left[\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right] (T_{11} + T_{12}) + \left[\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} \right] (T_{11} - T_{12})$	۱۹۹۰ بکرو لی،
۸	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 \frac{T_{11} - T_0}{\varepsilon_{11}} + \alpha_2 \frac{T_{12} - T_0}{\varepsilon_{12}} + \alpha_3 \frac{1 - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}} + T_0$ $T_0 = 273.15 K$	پراتا و پلات، ۱۹۹۱
۹	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_4 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$	ویدال، ۱۹۹۱
۱۰	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_4 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_5 (T_{11} - T_{12}) (\sec \theta - 1)$	ویدال، ۱۹۹۱
۱۱	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + [\alpha_2 W + \alpha_3 + (\alpha_4 W + \alpha_5)(1 - \varepsilon_{11}) + (\alpha_6 W + \alpha_7) \Delta \varepsilon] (T_{11} - T_{12}) + \frac{1 - \varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}} T_{11} [\alpha_8 W + \alpha_9 + (\alpha_{10} W + \alpha_{11}) \Delta \varepsilon] - \frac{1 - \varepsilon_{12}}{\varepsilon_{12}} T_{12} [\alpha_{12} W + \alpha_{13} + (\alpha_{14} W + \alpha_{15}) \Delta \varepsilon]$	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۱
۱۲	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12})$	اوتل و ویدال، ۱۹۹۲
۱۳	$LST = C T_v (1 - C) T_{bs}$ $T_v = -2.4 + 3.6 T_{11} - 2.6 T_{12}$ & $T_{bs} = 3.1 + 3.1 T_{11} - 2.1 T_{12}$ C: پوشش گیاهی، T_v : دمای گیاه، T_{bs} : دمای خاک، واحد دما بر حسب °C	کر و همکاران، ۱۹۹۲
۱۴	$LST = T_{11} (0.5 P_v + 3.1) + T_{12} (-0.5 P_v - 2.1) - 5.5 P_v + 3.1$	کر و همکاران، ۱۹۹۲
۱۵	$LST = T_{11} + [1.06 + 0.46 (T_{11} - T_{12})] (T_{11} - T_{12}) + 53 (1 - \varepsilon_{11}) - 53 \Delta \varepsilon$	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۳
۱۶	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (1 - \varepsilon) + \alpha_4 \Delta \varepsilon$	اولیوری و همکاران، ۱۹۹۴
۱۷	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + (\alpha_2 W + \alpha_3) (T_{11} - T_{12}) + (\alpha_4 W + \alpha_5) (1 - \varepsilon) + (\alpha_6 W + \alpha_7) \Delta \varepsilon$	اولیوری و همکاران، ۱۹۹۴
۱۸	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (T_{11} - T_{12})^2 + [(\alpha_4 W + \alpha_5) T_{11} + (\alpha_6 W + \alpha_7)] (1 - \varepsilon) - [(\alpha_8 W + \alpha_9) T_{11} + (\alpha_{10} W + \alpha_{11})] \Delta \varepsilon$	کول و همکاران، ۱۹۹۴
۱۹	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 W + [\alpha_2 + (\alpha_3 W \cos \theta + \alpha_4) (1 - \varepsilon_{11}) - (\alpha_5 W + \alpha_6) \Delta \varepsilon] (T_{11} + T_{12}) + [\alpha_7 + \alpha_8 W (\alpha_9 + \alpha_{10} W) (1 - \varepsilon_{11}) - (\alpha_{11} W + \alpha_{12}) \Delta \varepsilon] (T_{11} - T_{12})$	۱۹۹۵ بکرو لی،
۲۰	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) (T_{11} + T_{12}) + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) (T_{11} - T_{12})$	وان و دوزیر، ۱۹۹۶
۲۱	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) (T_{11} + T_{12}) + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) (T_{11} - T_{12}) + \alpha_7 (T_{11} - T_{12}) (\sec \theta - 1)$	وان و دوزیر، ۱۹۹۶
۲۲	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (T_{11} - T_{12})^2$	فرانسوا و اوتل، ۱۹۹۶
۲۳	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 W + \alpha_2 W^2 + \alpha_3) T_{11} + (\alpha_4 W + \alpha_5 W^2 + \alpha_6) T_{12} + \alpha_7 W + \alpha_8 W^2$	فرانسوا و اوتل، ۱۹۹۶

سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۷	$LST = 0.83 + T_{11} + 1.40(T_{11} - T_{12}) + 0.32(T_{11} - T_{12})^2 + (57 - 5W)(1 - \varepsilon) - (161 - 30W)\Delta\varepsilon$	۲۴
کاسلز و همکاران، ۱۹۹۷	$LST = T_{11} + [1 + 0.58(T_{11} - T_{12})](T_{11} - T_{12}) + C(1 - \varepsilon) - D\Delta\varepsilon + 0.51$ $C = (0.190W - 0.103)T_{11} - 67W + 107$ $D = (0.100W - 1.118)T_{11} - 68W - 163$	۲۵
کول و والر، ۱۹۹۷	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (1 - \varepsilon_{11}) + \alpha_4 \Delta\varepsilon + \alpha_5 (T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)$	۲۶
کول و کاسلز، ۱۹۹۷	$LST = 0.39T_{11}^2 + 2.3T_{11} - 0.78T_{11}T_{12} - 1.34T_{12} + 0.39T_{12}^2 + 0.56$	۲۷
سوبرینو و رایسیون، ۲۰۰۰	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (T_{11} - T_{12})^2 + (\alpha_4 W + \alpha_5)(1 - \varepsilon) - (\alpha_6 W + \alpha_7)\Delta\varepsilon$	۲۸
ما، ۲۰۰۳	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 T_{11} + \alpha_2 (T_{11} - T_{12}) + \alpha_3 (T_{11} - T_{12})^2 + (\alpha_4 W + \alpha_5)(1 - \varepsilon)$	۲۹



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه (الف) موقعیت منطقه (ب) باند ۸ تصویر سنتینل-۳ (ث) باند ۹ تصویر سنتینل-۳

جدول ۲: همه الگوریتم‌های پنجره‌مجازی مورد استفاده برای ماهواره سنتینل-۳A (سنجنده SLSTR) و داده‌های مشابه

شماره	نویسندگان	مرجع	الگوریتم پنجره مجزا	ماهواره
۱	سوبرینو و همکاران، ۲۰۱۲ [۱۴]	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	ماهواره ENVISAT (سنجنده AATSR)
		استخراج شده از سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_{8n} + \alpha_1(T_{8n} - T_{9n}) + \alpha_2(T_{8n} - T_{9n})^2 + \alpha_0 + \alpha_3(T_{8n} - T_{8o}) + \alpha_4(T_{8n} - T_{8o})^2 + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_7 + \alpha_8 W)(\Delta \varepsilon)$ O: دید مایل / N: دید قائم	ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR) به عنوان تقریبی از
۲	سوبرینو و همکاران، ۲۰۱۵ [۱۵]	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	ماهواره ENVISAT (سنجنده AATSR) به عنوان تقریبی از ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR)
۳	سوبرینو و همکاران، ۲۰۱۶ [۱۶]	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	ماهواره ENVISAT (سنجنده AATSR) به عنوان تقریبی از ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR)
۴	روزکاس و همکاران، ۲۰۱۶ [۱۷]	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	ماهواره ENVISAT (سنجنده AATSR) به عنوان تقریبی از ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR)
۵	جیمنز و همکاران، ۲۰۱۸ [۱۸]	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶	$LST = T_i + \alpha_1(T_i - T_j) + \alpha_2(T_i - T_j)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR)
۶	یتونگ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۹ [۱۹]	استخراج شده از وان، ۲۰۱۴	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon_{89}}{\varepsilon_{89}} + \alpha_3 \frac{\Delta \varepsilon_{89}}{\varepsilon_{89}^2}) \frac{(T_8 + T_9)}{2} + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1 - \varepsilon_{89}}{\varepsilon_{89}} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon_{89}}{\varepsilon_{89}^2}) \frac{(T_8 - T_9)}{2} + \alpha_7 (T_8 - T_9)^2 + (\alpha_8 \frac{1 - \varepsilon_{78}}{\varepsilon_{78}} + \alpha_9 \frac{\Delta \varepsilon_{78}}{\varepsilon_{78}^2}) \frac{(T_7 - T_8)}{2} + \alpha_{10} (T_7 - T_8)^2 + (\alpha_{11} \frac{1 - \varepsilon_{79}}{\varepsilon_{79}} + \alpha_{12} \frac{\Delta \varepsilon_{79}}{\varepsilon_{79}^2}) \frac{(T_7 - T_9)}{2} + \alpha_{13} (T_7 - T_9)^2$	ماهواره Sentinel-3 (سنجنده SLSTR)

جدول ۳: تاریخ و زمان تصاویر و محصولات دمایی

تاریخ تصویربرداری	زمان تصویربرداری	تصویر
۵ آگوست ۲۰۱۸ میلادی	۷:۱۶:۲۶ AM	سنجنده <i>SLSTR</i> ماهواره سنتینل-۳
۵ آگوست ۲۰۱۸ میلادی	۷:۰۲:۴۱ AM	محصول <i>LST</i> ماهواره سنتینل-۳
۵ آگوست ۲۰۱۸ میلادی	۱۰:۵۴:۰۰ AM	محصول <i>LST</i> سنجنده مادیس
۵ آگوست ۲۰۱۸ میلادی	۷:۲۷:۰۷ AM	محصول <i>LST</i> سنجنده استر

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳ (سنجنده *SLSTR*)، محصول دمایی آن و همچنین محصولات دمایی مادیس و استر مورد استفاده قرار می‌گیرند. که هر کدام از آن‌ها در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۲-۱- تصویر سنجنده *SLSTR* ماهواره

سنتینل-۳ و محصول دمایی آن

سنتینل-۳ نام یک مجموعه ماهواره مشاهده‌گر زمین است که توسط آژانس فضایی اروپا به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک توسعه یافته است. هدف اصلی مأموریت سنتینل-۳ اندازه‌گیری توپوگرافی سطح اقیانوس، دمای سطح زمین و دریا، اندازه‌گیری رنگ سطح زمین و اقیانوس با دقت مورد نیاز است تا برای سامانه‌های پیش‌بینی وضعیت اقیانوس‌ها و پایش‌های زیست‌محیطی و اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. ماهواره سنتینل-۳A در ۱۶ فوریه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شد و در ارتفاع ۸۱۴/۵ کیلومتر، نزدیک قطب با مدار خورشید آهنگ (تقاطع گرہ نزولی در ساعت ۱۰ میانگین زمان خورشیدی محلی) حرکت می‌کند [۲۰]. همچنین ماهواره سنتینل-۳B نیز در ۲۵ آوریل ۲۰۱۸ به فضا پرتاب شد و دارای ویژگی‌هایی مشابه ماهواره سنتینل-۳A است. ماهواره سنتینل-۳A دارای سه سنجنده *OLCI*^۱، *SLSTR* و *SRAL*^۲ می‌باشد. که سنجنده *SLSTR* برای به‌دست‌آوردن دمای سطح زمین

(*LST*) و دمای سطح دریا (*SST*^۳) کاربرد دارد. سنجنده *SLSTR* روی ماهواره سنتینل-۳ از نظر ویژگی و کاربرد در اندازه‌گیری دمای سطح زمین شبیه سنجنده *ATSR-1*^۴ روی ماهواره *ERS-1*^۵، سنجنده *ATSR-2* روی ماهواره *ERS-2* و سنجنده *AATSR*^۶ روی ماهواره *ENVISAT*^۷ است. سنجنده *SLSTR* در ۹ باند سطح جهانی را به صورت روزانه پوشش می‌دهد. باند-های رادیومتریکی سنجنده *SLSTR* به همراه طول موج، توان تفکیک و کاربردها در جدول (۴) ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود ماهواره سنتینل-۳ دارای دو دوربین می‌باشد که یک دوربین به صورت قائم و دوربین دیگر به صورت مایل (در جهت عقب) با زاویه زینتی ۵۵ درجه تصویربرداری می‌کند [۲۱]. پهنای باند مربوط به دوربین قائم ۱۴۰۰ کیلومتر و پهنای باند مربوط به دوربین مایل ۷۴۰ کیلومتر است. تصاویر ماهواره سنتینل-۳ و همچنین محصول دمای سطح زمین (*LST*) آن به صورت رایگان قابل دانلود می‌باشند.^۸

³ Sea Surface Temperature

⁴ Along Track Scanning Radiometer

⁵ European Remote-Sensing Satellite

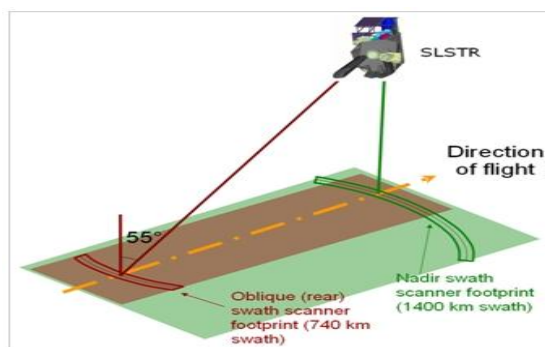
⁶ Advanced Along-Track Scanning Radiometer

⁷ Environmental Satellite

⁸ <https://scihub.copernicus.eu/>

¹ Ocean and Land Colour Instrument

² Synthetic Aperture Radar (SAR) Altimeter



شکل ۲: دوربین‌های قائم و مایل سنجنده SLSTR، ماهواره سنتینل-۳

جدول ۴: باندهای سنجنده SLSTR به همراه طول موج و توان تفکیک و کاربردها

باند	طول موج مرکزی (نانومتر)	پهنای باند (نانومتر)	کاربرد	توضیحات		قدرت تفکیک مکانی (متر)
S1	۵۵۴٫۲۷	۱۹٫۲۶	غربالگری ابر، پایش پوشش گیاهی، آبروسل	باندهای بازتابی خورشیدی	مرئی و مادون قرمز نزدیک	۵۰۰
S2	۶۵۹٫۴۷	۱۹٫۲۵	NDVI، پایش پوشش گیاهی، آبروسل			
S3	۸۶۸٫۰۰	۲۰٫۶۰	NDVI، مشخص سازی ابر، هم مرجع سازی پیکسل			
S4	۱۳۷۴٫۸۰	۲۰٫۸۰	تشخیص ابر سیروس بر روی زمین		مادون قرمز موج کوتاه	
S5	۱۶۱۳٫۴۰	۶۰٫۶۸	حذف ابر، پایش پوشش گیاهی، برف و یخ			
S6	۲۲۵۵٫۷۰	۵۰٫۱۵	وضعیت پایش پوشش گیاهی و حذف ابر			
S7	۳۷۴۲٫۰۰	۳۹۸٫۰۰	LST، SST، آتش سوزی فعال	باندهای مادون قرمز حرارتی محیطی (۲۰۰K-۳۲۰K)	۱۰۰۰	
S8	۱۰۸۵۴٫۰۰	۷۷۶٫۰۰	LST، SST، آتش سوزی فعال			
S9	۱۲۰۲۲٫۵۰	۹۰۵٫۰۰	LST، SST			
F1	۳۷۴۲٫۰۰	۳۹۸٫۰۰	آتش سوزی فعال	باندهای مادون قرمز حرارتی گسیل آتش	۱۰۰۰	
F2	۱۰۸۵۴٫۰۰	۷۷۶٫۰۰	آتش سوزی فعال			

۲-۲-۲- تصویر محصول دمای سطح زمین

سنجنده استر

رادیومتر پیشرفته فضا برد بازتابی و گسیل گرمایی که به اختصار استر (ASTER) نامیده می‌شود، یکی از

پنج ابزار سنجش از دور نصب شده بر روی ماهواره تراس^۱ است که در سال ۱۹۹۹ توسط ناسا در مدار زمین

^۱ Terra

که به صورت رایگان قابل دانلود می‌باشد.^۳ توان تفکیک مکانی محصول دمای سطح زمین سنجنده مادیس ۱ کیلومتر و توان تفکیک زمانی آن ۱ تا ۲ روز می‌باشد.

۳-روش‌شناسی

در این قسمت، روش پیشنهادی تحقیق برای بازیابی دمای سطح زمین و همچنین نحوه بازیابی ضریب گسیل سطح زمین توضیح داده شده است.

۳-۱-بازیابی دمای سطح زمین (LST)

طی چند دهه گذشته، برآورد دمای سطح زمین (LST) از اندازه‌گیری‌های مادون قرمز حرارتی ماهواره‌ها به طور قابل توجهی توسعه یافته است. الگوریتم‌های زیادی برای استفاده از ویژگی‌های سنسورهای مختلف روی ماهواره‌های متفاوت و استفاده از فرضیات و تقریب‌های مختلف برای معادله انتقال تابشی و ضریب گسیل سطح زمین پیشنهاد شده است.

در تحقیقات انجام شده برای برآورد دمای سطح زمین از روش‌های مختلفی استفاده شده است که می‌توان گفت روش پنجره مجزا نسبت به روش‌های دیگر جهت برآورد دمای سطح زمین برتری دارد و بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین در این پژوهش نیز از الگوریتم پنجره مجزای غیرخطی پیشنهادی استفاده شده است که هم ضریب گسیل و هم محتوای بخار آب موجود در اتمسفر در آن دخیل شده است. چون ضریب گسیل از قبل معلوم نیست، باید بازیابی شود که در این تحقیق از روش مبتنی بر NDVI (NBEM)^۴ استفاده شده است.

۳-۱-۱-روش پنجره مجزا

از میان همه روش‌های موجود برای اندازه‌گیری دمای سطح زمین، الگوریتم پنجره مجزا معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد. زیرا اثرات اتمسفری را حذف و دمای سطح زمین را با استفاده از ترکیبات خطی و غیر خطی دمای ظاهری دو باند مجاور به مرکزیت طول-

قرار گرفت. این سنجنده از فوریه ۲۰۰۰ به گردآوری داده‌های سطحی از زمین مشغول است. سنجنده استر تصاویر ماهواره‌ای از زمین را با توان تفکیک بالا و در ۱۴ باند مختلف از طیف الکترومغناطیسی در بازه طیف مرئی تا مادون قرمز حرارتی را تهیه می‌کند. توان تفکیک تصاویر استر از ۱۵ تا ۹۰ متر است. داده‌های سنجنده استر در تولید نقشه‌های تفصیلی دمای سطح زمین، تابندگی، بازتابندگی و ارتفاع از سطح دریا به کار می‌رود. این سنجنده دارای توان تفکیک زمانی ۱۶ روز است. در این تحقیق از محصول دمای سطح زمین (LST) سنجنده استر، تحت عنوان AST08، استفاده شده است که به صورت رایگان قابل دانلود می‌باشد.^۱ توان تفکیک مکانی محصول دمای سطح زمین سنجنده استر ۹۰ متر و توان تفکیک زمانی آن ۱۶ روز می‌باشد.

۳-۲-۲-تصویر محصول دمای سطح زمین

سنجنده مادیس

تابش سنج طیفی تصویربرداری با وضوح متوسط که به اختصار مادیس (MODIS) نامیده می‌شود، یکی از ابزارهای علمی است که توسط ناسا بر روی ماهواره ترا در سال ۱۹۹۹ و بر روی ماهواره آکوا^۲ در سال ۲۰۰۲ در مدار قرار گرفت. مادیس دارای ۳۶ باند در محدوده ۴۰۰ تا ۱۴۰۴ میکرومتر طیف الکترومغناطیس است، که ۲۰ باند آن در محدوده مرئی و ۱۶ باند آن در ناحیه حرارتی است [۲۲]. توان تفکیک مکانی برای باندهای ۱ و ۲، ۲۵۰ متر، برای باندهای ۳ تا ۷، ۵۰۰ متر و برای باندهای ۸ تا ۳۶، یک کیلومتر است. داده‌های مادیس در مطالعات تخصصی خشکی‌ها، اقیانوس‌ها و جو کاربردهای زیادی دارد. این سنجنده دارای توان تفکیک زمانی ۱ تا ۲ روز است. همچنین در این تحقیق از محصول دمای سطح زمین (LST) سنجنده مادیس، تحت عنوان MOD11A1، استفاده شده است

^۳ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

^۴ NDVI-Based Emissivity Method (NBEM)

^۱ <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

^۲ Aqua

و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۳] نیز مورد استفاده قرار گرفت) میباشد، که بخار آب موجود در اتمسفر نیز در آن دخیل شده است.

وان و دوزیر در سال ۱۹۹۶ الگوریتمی را به صورت رابطه (۱) برای بازیابی دمای سطح زمین ارائه کردند.

سپس وان در سال ۲۰۱۴ با اضافه کردن مربع اختلاف دمای ظاهری دو باند $(T_i - T_j)^2$ به الگوریتم وان و دوزیر که در سال ۱۹۹۶ ارائه شده بود، الگوریتم پنجره‌مجزایی را به صورت رابطه (۲) ارائه کرد.

در این پژوهش، با دخیل کردن بخار آب $(1 - W)$ «در الگوریتم وان که در سال ۲۰۱۴ ارائه شده بود، الگوریتم پنجره‌مجزای پیشنهادی به صورت رابطه (۳) ارائه گردید.

در رابطه (۳)، α_0 تا α_9 ضرایب الگوریتم هستند. T_i و T_j به ترتیب دمای روشنایی بالای اتمسفر بر حسب کلون در دو باند i و j هستند. W محتوای بخار آب موجود در اتمسفر بر حسب g/cm^2 است. ε میانگین ضریب گسیل سطح زمین در دو باند i و j است ($\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j}{2}$). $\Delta\varepsilon$ اختلاف ضریب گسیل در دو باند i و j است $(\varepsilon_i - \varepsilon_j)$.

$$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i + T_j)}{2} + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i - T_j)}{2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i + T_j)}{2} + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i - T_j)}{2} + \alpha_7 (T_i - T_j)^2 \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 (1 - W) + \alpha_3 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_4 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i + T_j)}{2} + (\alpha_5 + \alpha_6 (1 - W) + \alpha_7 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_8 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_i - T_j)}{2} + \alpha_9 (T_i - T_j)^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

بخار آب (پارامتر W) در الگوریتم مورد نظر از محصول بخار آب اتمسفر تحت عنوان $TCWV$ ^۱، که همراه با محصول دمایی سنتینل ۳ می باشد، استفاده شد. ضرایب الگوریتم پنجره‌مجزا با استفاده از روش کمترین

موج‌های ۱۱ و ۱۲ میکرومتر به دست می‌آورد [۲۳]. این الگوریتم نسبت به سایر روش‌ها از دقت بهتری برای محاسبه دمای سطح زمین برخوردار می‌باشد. مبنای الگوریتم پنجره‌مجزا تفاوت جذب در دو باند مختلف در روزنه جوی است. با اجرای این روش، اثر اتمسفر از اندازه‌گیری‌ها حذف می شود و دما محاسبه می گردد.

۳-۱-۲- روش پیشنهادی

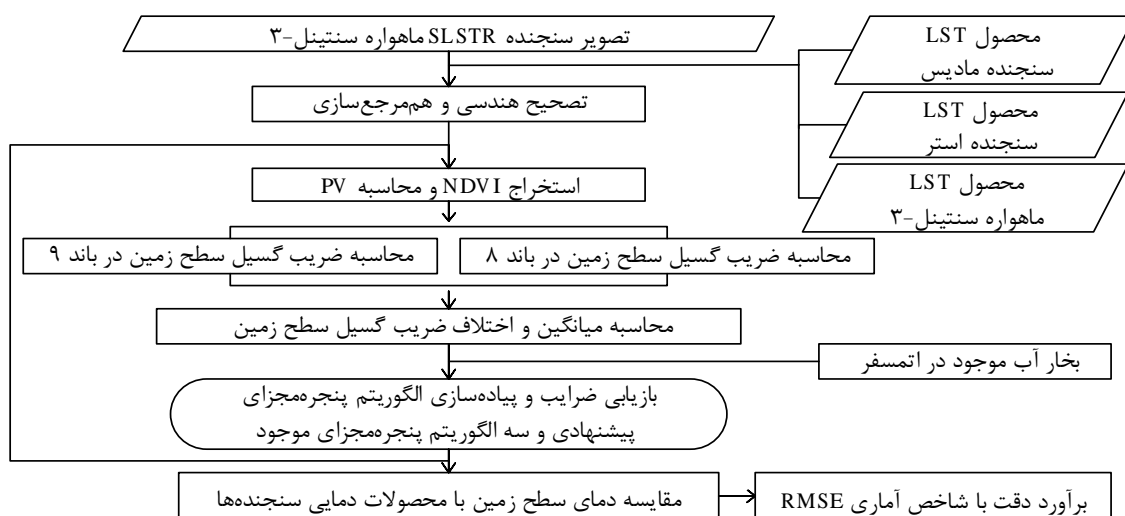
عواملی چون ضریب گسیل سطح، بخار آب موجود در اتمسفر و زاویه زینتی دیدماهواره در مقدار انرژی ثبت شده به وسیله سنجنده‌ها تاثیر می‌گذارد. بنابراین برای مدل سازی محاسبه دمای سطح زمین، باید تاثیر این عوامل بر روی داده‌های ماهواره‌ای در نظر گرفته شود. اعمال بخار آب موجود در اتمسفر در الگوریتم پنجره‌مجزا می تواند باعث افزایش دقت در بازیابی دمای سطح زمین شود [۲۴]. در این تحقیق الگوریتم پنجره-مجزای جدیدی با استفاده از ترکیب غیرخطی دمای روشنایی بالای اتمسفر مربوط به دو باند ۸ و ۹ سنجنده $SLSTR$ ، ماهواره سنتینل-۳A، پیشنهاد شد. الگوریتم پنجره‌مجزای پیشنهادی در این تحقیق توسعه یافته الگوریتم‌های ارائه شده توسط وان و دوزیر در سال ۱۹۹۶ [۲۵] و وان در سال ۲۰۱۴ [۲۶] (توسط چن دو

مقادیر باندهای ۸ و ۹ سنجنده $SLSTR$ ، دمای ظاهری بالای اتمسفر است و طول موج مرکزی این باندها به ترتیب ۱۰/۸ و ۱۲ میکرومتر می‌باشند که در محدوده مادون قرمز حرارتی و پنجره اتمسفری (۸-۱۴ میکرومتر) قرار دارند. بنابراین در رابطه (۳) به جای باندهای i و j باندهای ۸ و ۹ قرار می‌گیرند. همچنین برای وارد کردن

¹ Total Column Water Vapour

محاسبه گردید. فلوچارت کلی این پژوهش به صورت شکل (۳) است. الگوریتم پنجره مجزای پیشنهادی و سه الگوریتم پنجره مجزای موجود دیگر که بر روی مناطق مورد مطالعه پیاده سازی شده اند در جدول (۵) نشان داده شده است.

مربعات محاسبه گردید؛ بدین صورت که ابتدا با استفاده از ۷۰ درصد پیکسل های مشترک بین تصویر سنتینل ۳ و محصولات دمایی مادیس، استر و سنتینل-۳ ضرایب محاسبه شد و سپس با استفاده از ۳۰ درصد باقیمانده پیکسل ها اعتبارسنجی صورت گرفت و مقادیر $RMSE$



شکل ۳: فلوچارت کلی پژوهش

جدول ۵: الگوریتم پنجره مجزای پیشنهادی و سه الگوریتم پنجره مجزای موجود دیگر پیاده سازی شده

شماره	الگوریتم پنجره مجزا	مرجع
۱	$LST = T_8 + \alpha_1(T_8 - T_9) + \alpha_2(T_8 - T_9)^2 + \alpha_0 + (\alpha_3 + \alpha_4 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(\Delta \varepsilon)$	سوبرینو و همکاران، ۱۹۹۶
۲	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_3 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 + T_9)}{2} + (\alpha_4 + \alpha_5 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 - T_9)}{2} + \alpha_7 (T_8 - T_9)^2$	وان، ۲۰۱۴
۳	$LST = \alpha_0 + \alpha_1 W + (\alpha_2 + \alpha_3 W + \alpha_4 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_5 W \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_6 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} + \alpha_6 W \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 + T_9)}{2} + (\alpha_8 + \alpha_9 W + \alpha_{10} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_{11} W \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_{12} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2} + \alpha_{13} W \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 - T_9)}{2}$	سوبرینو و همکاران، ۲۰۰۳
۴	$LST = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2(1 - W) + \alpha_3 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_4 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 + T_9)}{2} + (\alpha_5 + \alpha_6(1 - W) + \alpha_7 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + \alpha_8 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}) \frac{(T_8 - T_9)}{2} + \alpha_9 (T_8 - T_9)^2$	الگوریتم پیشنهادی این تحقیق

علاوه بر الگوریتم های بالا الگوریتم دیگری نیز که توسط سوبرینو و همکاران در سال ۲۰۱۲ ارائه

دمای روشنایی بالای اتمسفر بر حسب کلون در باند ۸ دید نادیر، باند ۹ دید نادیر و باند ۸ دید مایل هستند. W بخار آب موجود در اتمسفر بر حسب g/cm^2 است. ε و $\Delta\varepsilon$ به ترتیب میانگین $(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j}{2})$ و اختلاف $(\varepsilon_i - \varepsilon_j)$ ضریب گسیل سطح زمین در دو باند ۸ و ۹ هستند.

$$LST = T_{8n} + \alpha_1(T_{8n} - T_{9n}) + \alpha_2(T_{8n} - T_{9n})^2 + \alpha_0 + \alpha_3(T_{8n} - T_{80}) + \alpha_4(T_{8n} - T_{80})^2 + (\alpha_5 + \alpha_6 W)(1 - \varepsilon) + (\alpha_7 + \alpha_8 W)(\Delta\varepsilon) \quad \text{رابطه (۴)}$$

گویند. ضریب گسیل سطح زمین، به صورت نسبت انرژی گرمایی تابیده شده از سطح زمین به انرژی گرمایی تابیده شده توسط جسم سیاه در همان دما تعریف می‌شود.

۳-۲-۲- شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI)^۲

شاخص $NDVI$ ، یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در محاسبه دمای سطح زمین (LST) به حساب می‌آید. این شاخص از متداول‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌هایی است که در زمینه مطالعات پوشش گیاهی شناخته شده است [۳۲]. فرمول محاسبه شاخص پوشش گیاهی به صورت رابطه (۵) است که در آن، R_{NIR} بازتابندگی یا درخشایی در باند مادون قرمز نزدیک و R_{RED} بازتابندگی یا درخشایی در باند قرمز می‌باشد. شاخص $NDVI$ نمادی از شدت و ضعف پوشش گیاهی در منطقه است [۳۳].

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

۳-۲-۳- کسر پوشش گیاهی (PV)^۳

کسر پوشش گیاهی (PV) یکی از پارامترهای مفید در بسیاری از کاربردهای محیط‌زیستی و اقلیمی است [۳۴] و از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

گردید [۱۴]، بر روی منطقه مورد مطالعه کرمانشاه پیاده‌سازی شد. سوپرینو و همکاران در سال ۲۰۱۲ به این نتیجه رسید که اگر از دو باند و دو زاویه مختلف، تواما استفاده گردد دقت نتایج افزایش پیدا می‌کند [۱۴]، بنابراین الگوریتمی را به صورت رابطه (۴) که توسعه یافته روش ۱ است، ارائه کرد. در رابطه (۴) α_0 تا α_8 ضرایب الگوریتم هستند. T_{80} ، T_{9n} و T_{8n} به ترتیب

۳-۲-۲- بازایی ضریب گسیل سطح زمین (LSE)^۱

LSE حاوی اطلاعاتی در مورد ساختار و ترکیب سطح زمین است و به زبری و پارامترهای فیزیکی سطح همچون محتوای رطوبت بستگی دارد. LSE توانایی سطح زمین برای انتقال انرژی به جو را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، به طور کلی ضریب گسیل با تغییر طول موج برای سطوح طبیعی متفاوت خواهد بود [۲۷]. در اغلب مطالعات دمای سطح زمین، با توجه به پوشش غالب منطقه، مقدار ثابتی برای ضریب گسیل (ε) در نظر گرفته می‌شود. در نظر نگرفتن ضریب گسیل دقیق، باعث بروز خطا در نتایج می‌شود، به طوری که به ازای یک درصد خطا در مقدار ضریب گسیل، خطایی بزرگ‌تر از ۱/۶ درجه کلون در محاسبه دمای سطح به وجود می‌آید [۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱]. در این پژوهش از روش مبتنی بر شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی، برای بازایی ضریب گسیل سطح زمین استفاده شده است.

۳-۲-۱- ضریب گسیل (ε)

اجسام با درجه حرارت بالاتر از صفر مطلق، تشعشعات الکترومغناطیسی از خود ساطع می‌کنند. قدرت گسیل انرژی یک ماده واقعی نسبت به یک جسم سیاه را ضریب گسیل، گسیلمندی یا توان تشعشعی می‌-

^۲ Normalized Difference Vegetation Index

^۳ Proportion of Vegetation

^۱ Land Surface Emissivity

با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تعیین کرد، اما با توجه به اینکه مقدار ضریب گسیل تابعی از تراکم پوشش گیاهی است، می‌توان مقدار آن را به طور غیر مستقیم با تعیین شاخص های پوشش گیاهی از اطلاعات ماهواره ای برآورد کرد. از جمله شاخص های گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده است که به وسیله باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک برآورد می‌شود. این روش مقادیر ضریب گسیل را از $NDVI$ با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف به صورت رابطه (۷) بدست می‌آورد:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} a_i + b_i \rho_{red} & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{vi} P_v + \varepsilon_{si} (1 - P_v) + d_i & NDVI_s < NDVI < NDVI_v \\ \varepsilon_{vi} + d_i & NDVI > NDVI_v \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

یکنواخت کردن تأثیر این دو پارامتر، ضریب گسیل از فرمول میانی رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۳۶]. روسکاس و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۷]، از رابطه (۹) و رابطه (۱۰) برای محاسبه ضریب گسیل سطح زمین استفاده کرد. این فرمول‌ها از همان روش حدآستانه‌گذاری $NDVI$ به دست آمده‌اند. i و z دو باند مورد استفاده برای الگوریتم پنجره مجزا است که در این تحقیق باندهای ۸ و ۹ سنجنده $SLSTR$ می‌باشند.

$$\varepsilon_i = 0.982P_v + 0.970(1.0 - P_v) + C_i \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$\varepsilon_j = 0.984P_v + 0.977(1.0 - P_v) + C_j \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

C_i و C_j ، پارامتر حفره، مربوط به باندهای i و j هستند که در این تحقیق مساوی صفر در نظر گرفته شده‌اند. P_v نیز کسر پوشش گیاهی است و از رابطه (۶) محاسبه می‌شود. مقدار ضریب گسیل برای باندهای ۸ و ۹ سنجنده $SLSTR$ به ترتیب از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه می‌گردد. مقدار ضریب گسیل سطح زمین بین ۰/۹۵۰ و ۰/۹۹۰ متغیر است [۳۷].

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۶)}$$

در رابطه (۶)، $NDVI$ ، مقدار فعلی و $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ مقادیر مستقیم $NDVI$ برای سطوح خاک بایر و گیاه کامل است. مقادیر ۰/۱۵ برای $NDVI_{min}$ و ۰/۹۹ برای $NDVI_{max}$ در نظر گرفته می‌شود که نماینده‌ای از شرایط جهانی است [۳۵].

۳-۲-۴- محاسبه LSE با روش مبتنی بر $NDVI$

برای برآورد دمای سطح زمین لازم است تغییرات ضریب گسیل سطح زمین مد نظر قرار گیرد. در عمل ضریب گسیل سطح زمین را نمی‌توان به طور مستقیم

در رابطه (۷) a_i و b_i ضرایب هستند. $NDVI_s$ و $NDVI_v$ به ترتیب مقادیر $NDVI$ برای خاک بایر و گیاه کامل می‌باشند. ε_i ضریب گسیل پیکسل برای باند مادون قرمز حرارتی i است. ρ_{red} بازتاب خاک بایر برای باند قرمز است. ε_{vi} و ε_{si} به ترتیب ضریب گسیل خاک بایر و گیاه برای باند مادون قرمز حرارتی i است. P_v کسر پوشش گیاهی است که از رابطه (۵) به دست می‌آید. d_i به ناهمواری‌های زمین بستگی دارد و برای توپوگرافی مسطح، صفر در نظر گرفته می‌شود. پارامتر d_i از رابطه (۸) محاسبه می‌گردد. F در رابطه (۸)، عامل شکل است و معمولاً ۰/۵۵ در نظر گرفته می‌شود.

$$d_i = (1 - \varepsilon_{si}) \varepsilon_{vi} F (1 - P_v) \quad \text{رابطه (۸)}$$

با توجه به روابط بالا، در نواحی که شاخص پوشش گیاهی کمتر از ۰/۲ است خاک بدون پوشش گیاهی می‌شود و بازتاب باند مادون قرمز نشان‌دهنده ضریب گسیل سطح است. از سوئی زمانی که شاخص پوشش گیاهی بیشتر از ۰/۵ باشد، کل سطح را پوشش کامل در نظر گرفته اما در حالتی که شاخص پوشش گیاهی بین ۰/۲ و ۰/۵ قرار دارد، باید ضریب گسیل خاک و پوشش گیاهی با هم در نظر گرفته شود و به منظور

۴- نتایج

$RMSE$ در روش پیشنهادی (روش ۴) از مقدار $RMSE$ حاصل از روش‌های دیگر کمتر بود. طبق تحقیقی که توسط سوپرینو و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شد، می‌توان به جای استفاده از دو باند مختلف در روش پنجره مجزا از یک باند با دو زاویه مختلف (دید مایل و دید قائم) استفاده کرد (روش دو زاویه) [۱۴]. بنابراین در منطقه مورد مطالعه کرمانشاه از ترکیبات مختلف باندها شامل دید قائم و دید مایل استفاده گردید که نتایج آن در جدول (۷) مشاهده می‌شود.

با بررسی نتایج در منطقه مورد مطالعه شرق تهران، که در جدول (۶) نشان داده شده است، روش پیشنهادی (روش ۴) بطور میانگین $RMSE$ پایینی را به خود اختصاص داده است. در منطقه شمال غرب اصفهان نیز نتایج مشابه شرق تهران به دست آمد، اما با بررسی $RMSE$ در منطقه مورد مطالعه کرمانشاه، که در جدول (۷) نشان داده شده است، نتایجی به مراتب بهتر نسبت به دو منطقه دیگر حاصل گردید و مقدار

جدول ۶: مقادیر $RMSE$ به دست آمده از محصولات دمای سطح زمین مادیس، استر و سنتینل-۳ برای منطقه شرق تهران

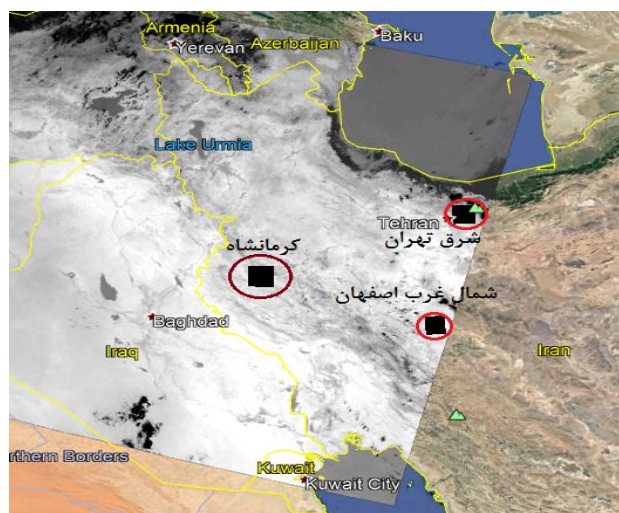
شماره	از محصول مادیس $RMSE(K)$	از محصول استر $RMSE(K)$	از محصول سنتینل-۳ $RMSE(K)$
۱	۱,۰۵۸۵	۳,۵۹۱۸	۱,۴۳۲۳
۲	۱,۹۷۶۴	۴,۰۱۲۴	۱,۱۸۲۷
۳	۱,۲۲۵۲	۳,۴۹۶۴	۱,۲۶۱۸
۴	۱,۲۲۷۶	۳,۴۹۲۷	۱,۲۶۶۹

جدول ۷: مقادیر $RMSE$ به دست آمده با ترکیبات مختلف باندها شامل دید قائم (in) و دید مایل (io) برای منطقه کرمانشاه

شماره	$RMSE(K)$ ($S8io/S9io$)	$RMSE(K)$ ($S9in/S9io$)	$RMSE(K)$ ($S8in/S8io$)	$RMSE(K)$ ($S8in/S9in$)
۱	۱,۵۷۹۷	۱,۳۴۹۸	۱,۲۴۹۸	۱,۵۶۴۱
۲	۱,۳۳۰۶	۱,۳۴۸۶	۱,۱۶۰۹	۱,۲۸۹۶
۳	۱,۵۷۹۲	۱,۴۳۳۴	۱,۲۶۷۸	۱,۱۹۳۱
۴	۱,۴۱۳۳	۱,۳۰۷۲	۱,۱۴۵۲	۱,۰۵۹۳

اصفهان در حاشیه‌های کناری تصویر قرار دارند منجر به خطای بیشتر در بازیابی دمای سطح زمین گردید که دلیل این امر وجود خطای بیشتر برای مناطق دورتر از مرکز تصویر به واسطه اعوجاج، کروییت زمین، خطاهای آشکارسازها و ... است. در حالی که در منطقه مورد مطالعه کرمانشاه خطای بازیابی دمای سطح زمین کمتر است که دلیل آن قرار داشتن منطقه کرمانشاه در مناطق میانی تصویر می‌باشد. در شکل (۴) موقعیت سه منطقه مورد مطالعه و تصویر سنجنده $SLSTR$ ماهواره سنتینل-۳A نشان داده شده است.

در این پژوهش همچنین الگوریتم ذکر شده در رابطه (۴)، برای منطقه مورد مطالعه کرمانشاه پیاده‌سازی شد و مقدار $RMSE$ برابر ۱,۴۴۰۵ کلوین محاسبه گردید، که مقدار کمتری را نسبت به روش ۱ (با $RMSE$ برابر ۱,۵۶۴۱ کلوین) دارد. اما روش پیشنهادی این پژوهش مقدار $RMSE$ به مراتب پایین‌تری ($RMSE$ برابر ۱,۰۵۹۳ کلوین) را نسبت به هر دو روش دارد. این نتیجه نشان‌دهنده دقت بالای الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش‌های مختلف است. چون دو منطقه مورد مطالعه شرق تهران و شمال غرب

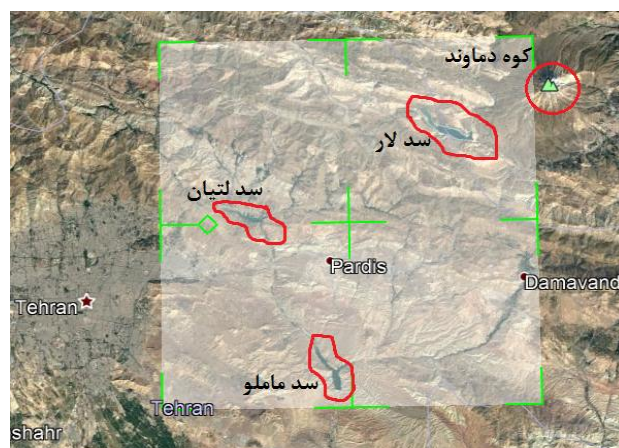


شکل ۴: موقعیت سه منطقه مورد مطالعه و تصویر سنجنده SLSTR ماهواره سنتینل-۳A

۴-۱- نتایج منطقه مورد مطالعه تهران

در منطقه مورد مطالعه شرق تهران مشاهده می-گردد که با نزدیک شدن به قسمت‌های شمال و شمال شرقی منطقه دمای سطح زمین کاهش پیدا می‌کند که دلیل آن افزایش ارتفاع در همان راستا به دلیل وجود رشته کوه‌های شمالی و کوه دماوند در آن منطقه است.

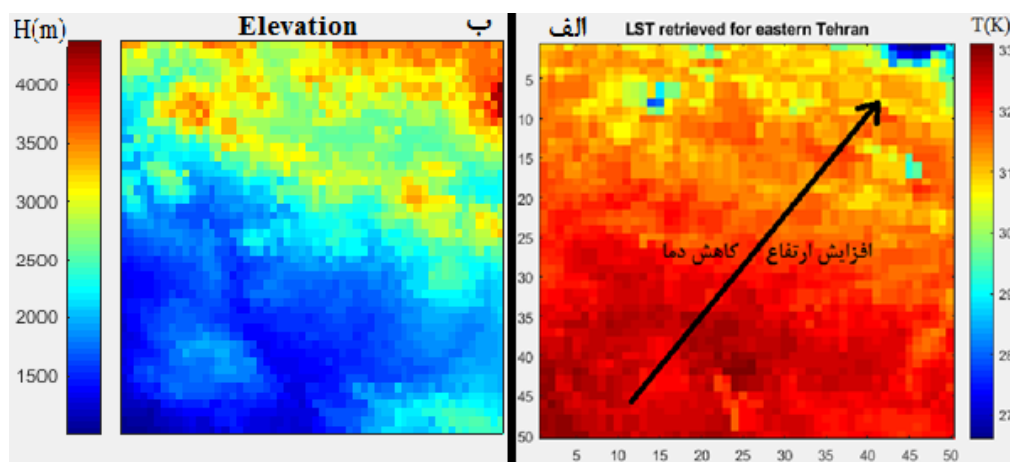
همچنین مناطق اطراف سدهای موجود در منطقه (سد لار، سد لتیان و سد ماملو) از دمای پایین‌تری برخوردار هستند. در شکل (۵) موقعیت کوه دماوند در نزدیکی قسمت شمال شرقی تصویر و موقعیت سدهای منطقه نشان داده شده است.



شکل ۵: موقعیت کوه دماوند و سدهای موجود در منطقه در تصویر سنجنده SLSTR ماهواره سنتینل-۳A

در شکل (۶) نقشه ارتفاع منطقه قابل مشاهده است. مناطق آبی ارتفاع کمتر و مناطق قرمز ارتفاع بیشتری دارند. همانطور که دیده می‌شود با حرکت از جنوب غربی به سمت شمال و شمال شرقی، ارتفاع

منطقه بیشتر می‌شود. به طوری که کمترین ارتفاع منطقه ۱۰۰۱ متر است و در جنوب غربی قرار دارد و بیشترین ارتفاع منطقه ۴۳۸۱ متر و در شمال غربی واقع شده است.

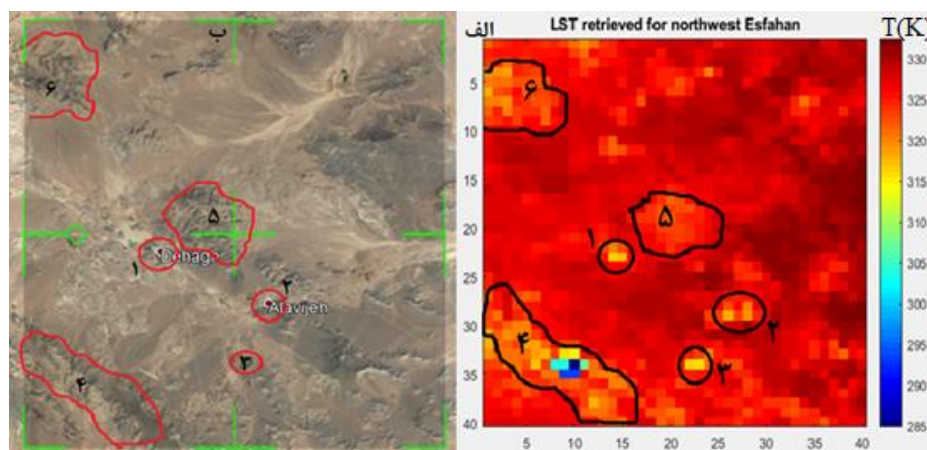


شکل ۶: نقشه LST و ارتفاع منطقه مورد مطالعه شرق تهران (الف) نقشه LST (ب) نقشه ارتفاع منطقه

۲-۴- نتایج منطقه مورد مطالعه اصفهان

در شکل (۷) منطقه مورد مطالعه شمال غرب اصفهان دیده می‌شود که مناطق شهری و روستایی (۱)، ۲ و ۳) دمای پایین‌تری نسبت به مناطق اطراف، که

خاک بایر است، دارد. همچنین بعضی قسمت‌های منطقه مورد مطالعه (۴، ۵ و ۶) تپه‌های موجود در منطقه می‌باشند که به واسطه ارتفاع بیشتر نسبت به مناطق اطراف دمای کمتری دارند.



شکل ۷: نقشه LST و تصویر گوگل ارث منطقه مورد مطالعه شمال غرب اصفهان (الف) نقشه LST (ب) تصویر گوگل ارث منطقه

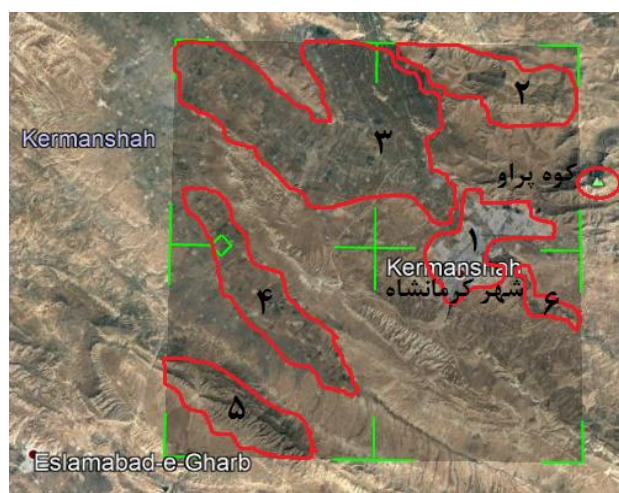
۳-۴- نتایج منطقه مورد مطالعه کرمانشاه

در منطقه کرمانشاه نیز مشاهده می‌گردد که در قسمت شمال منطقه مقدار دما کم‌تر است که دلیل آن ارتفاع زیاد آن قسمت به دلیل وجود کوه‌های شمال کرمانشاه می‌باشد. همچنین دلیل پایین بودن دمای برخی قسمت‌های دیگر تراکم پوشش گیاهی بیش‌تر در

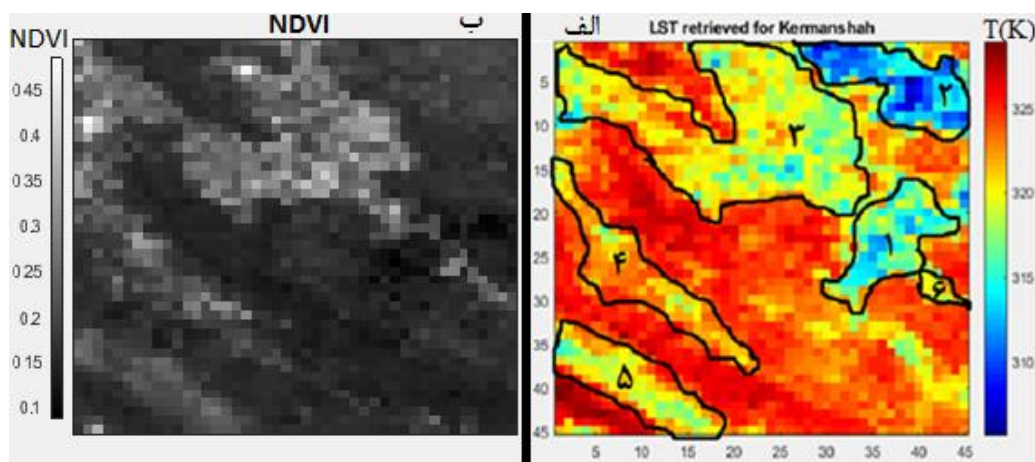
این محدوده می‌باشد. از مقایسه نقشه دمایی به دست آمده با نقشه NDVI مشاهده می‌شود که مناطق با پوشش گیاهی بیش‌تر نسبت به سایر مناطق دارای متوسط دمای به مراتب پایین‌تری هستند. دلایل پایین بودن دما در اراضی پوشش گیاهی می‌تواند ناشی از بالا بودن میزان رطوبت در این اراضی به دلیل آبیاری و

۳ و ۴ مناطق کشاورزی و مزارع منطقه می‌باشند که به واسطه داشتن پوشش گیاهی بیشتر دمای پایینی دارند. شماره ۵ تپه و کوه‌های منطقه است که به دلیل ارتفاع بیشتر نسبت به مناطق اطراف دمای کمتری دارد. شماره ۶ امتداد رودخانه قره‌سو است که به دلیل وجود رودخانه و پوشش گیاهی بیشتر دمای پایین‌تری دارد. در شکل (۹) نقشه $NDVI$ مربوط به منطقه مورد مطالعه کرمانشاه آورده شده است. مناطق روشن دارای $NDVI$ یا پوشش گیاهی بیشتر و مناطق تاریک دارای $NDVI$ یا پوشش گیاهی کمتر است

همچنین فعالیت‌های بیولوژیکی پوشش گیاهی باشد. در شکل (۸) منطقه مورد مطالعه کرمانشاه و قسمت‌های مختلف آن شماره‌گذاری شده‌اند. شماره ۱ شهر کرمانشاه است و همانطور که دیده می‌شود دمای آن قسمت به دلیل فضای سبز شهری به نسبت پایین‌تر از مناطق اطرافش می‌باشد همچنین در امتداد رسیدن به قله پراو که در قسمت شمال شرقی شهر کرمانشاه قرار دارد دمای سطح زمین کاهش پیدا می‌کند. شماره ۲ کوه‌های شمال شهر کرمانشاه و شمال شرقی منطقه را نشان می‌دهد که به واسطه ارتفاع بیشتر نسبت به مناطق اطراف از دمای پایینی برخوردار هستند. شماره



شکل ۸: قسمت‌های مختلف منطقه مورد مطالعه کرمانشاه



شکل ۹: نقشه $NDVI$ و LST منطقه مورد مطالعه کرمانشاه (الف) نقشه LST (ب) نقشه $NDVI$

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳A جهت تخمین دمای سطح زمین استفاده گردید. با تطبیق و مقایسه نقشه دمای بازیابی شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳A با محصولات دمای سطح زمین مادیس، استر و سنتینل-۳ و بررسی آن، نتایج قابل قبولی به دست آمد. با توجه به نتایج، الگوریتم پیشنهادی این پژوهش نتیجه بهتری را نسبت به الگوریتم‌های موجود داشته است. خطای $RMSE$ دمای بازیابی شده توسط الگوریتم پیشنهادی ۱/۵ درجه کلون است که این عدد با میزان خطای اندازه‌گیری دما توسط سنجش از دور همخوانی دارد. مزیت روش پیشنهادی، استفاده از محتوای بخار آب موجود در اتمسفر است که نقش مهمی در بهبود دقت برآورد دمای سطح زمین (LST) ایفا می‌کند.

مناطق با پوشش گیاهی زیاد و پوشیده از آب (سد) دمای کم، و مناطق با پوشش گیاهی کم و خاک بایر، دمای بالایی را نشان می‌دهند. همچنین مناطق مرتفع-تر دمای پایین‌تری را نسبت به مناطق کم ارتفاع دارند. بنابراین این عوامل در تغییرات دمای سطح منطقه مورد مطالعه مؤثر می‌باشند. از این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که با به کارگیری الگوریتم پنجره مجزای پیشنهادی در این پژوهش و استفاده از تصاویر سنجنده $SLSTR$ ماهواره سنتینل-۳A، دمای سطح زمین (LST) با $RMSE$ ۱/۵ کلون قابل بازیابی است و الگوریتم پنجره مجزای پیشنهادی نتایج قابل اعتماد و مطمئنی را در برآورد دمای سطح زمین ارائه می‌دهد که می‌تواند در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار گیرد. این تحقیق می‌تواند یک مرجع برای بازیابی دمای سطح زمین با

مراجع

استفاده از الگوریتم پنجره‌مجزا در مطالعات آینده باشد.

۶- پیشنهادات برای تحقیقات آینده

شرایط متفاوت مناطق مختلف از نظر پوشش منطقه، توپوگرافی، ارتفاع و بخار آب موجود در اتمسفر در نتایج اثرگذار است. استفاده از مناطق مورد مطالعه بیشتر جهت پیاده‌سازی روش پیشنهادی و ارزیابی نتایج در شرایط مختلف برای تخمین LST با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳ پیشنهاد می‌گردد. همچنین پیشنهادات زیر در تحقیقات بعدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد:

- استفاده از روش طبقه‌بندی مبنا برای محاسبه ضریب گسیل سطح زمین.
- استفاده از سنجنده $SLSTR$ ماهواره سنتینل-۳B که دارای باندها و خصوصیات مشابه سنتینل-۳A می‌باشد.
- استفاده از داده‌های زمینی و میدانی جهت اعتبار-سنجی بیشتر روش پیشنهادی در این تحقیق.
- دخیل کردن زاویه‌زینتی دید ماهواره در الگوریتم پنجره‌مجزای پیشنهادی در این تحقیق.
- استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق برای ماهواره‌های دیگر مانند لندست و ...
- استفاده از الگوریتم پنجره‌مجزای پیشنهادی برای مناطق آبی و دریایی جهت محاسبه SST .

تشکر و قدردانی

از آژانس فضایی اروپا (ESA) به دلیل در اختیار قرار دادن تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۳ به صورت رایگان قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

W. P. Kustas, "Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources," *Remote Sensing of Environment*, vol. 122, pp. 50-65, 2012.

[۱] Z.-L. Li et al., "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives," *Remote sensing of environment*, vol. 131, pp. 14-37, 2013.

[۲] M. C. Anderson, R. G. Allen, A. Morse, and

- [۳] L. S. Bernstein, X. Jin, B. Gregor, and S. M. Adler-Golden, "Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades," *Optical engineering*, vol. 51, no. 11, p. 111719, 2012.
- [۴] C. Quintano, A. Fernández-Manso, L. Calvo, E. Marcos, and L. Valbuena, "Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 36, pp. 1-12, 2015.
- [۵] G. B. Senay et al., "Operational evapotranspiration mapping using remote sensing and weather datasets: A new parameterization for the SSEB approach," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 49, no. 3, pp. 577-591, 2013.
- [۶] L. Wang, T. Koike, K. Yang, and P. J.-F. Yeh, "Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflow and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin," *Journal of Hydrology*, vol. 377, no. 1-2, pp. 21-34, 2009.
- [۷] J. Yang, M. S. Wong, M. Menenti, and J. Nichol, "Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment," *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 109, pp. 77-87, 2015.
- [۸] Q. Weng, P. Fu, and F. Gao, "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data," *Remote sensing of environment*, vol. 145, pp. 55-67, 2014.
- [۹] Z. Qin, A. Karnieli, and P. Berliner, "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*, vol. 22, no. 18, pp. 3719-3746, 2001.
- [۱۰] X. Yu, X. Guo, and Z. Wu, "Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method," *Remote Sensing*, vol. 6, no. 10, pp. 9829-9852, 2014.
- [۱۱] M. Wu, H. Li, W. Huang, Z. Niu, and C. Wang, "Generating daily high spatial land surface temperatures by combining ASTER and MODIS land surface temperature products for environmental process monitoring," *Environmental Science: Processes & Impacts*, vol. 17, no. 8, pp. 1396.۲۰۱۵, ۱۴۰۴-
- [۱۲] B. Y. Yıldız, M. Şahin, O. Şenkal, V. Peştimalcı, and K. Tepecik, "Determination of land surface temperature using precipitable water based Split-Window and Artificial Neural Network in Turkey," *Advances in Space Research*, vol. 54, no. 8, pp. 1544-1551, 2014.
- [۱۳] J. C. Jiménez-Muñoz, J. A. Sobrino, D. Skoković, C. Mattar, and J. Cristóbal, "Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data," *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, vol. 11, no. 10, pp. 1840-1843, 2014.
- [۱۴] J. Sobrino et al., "Land surface temperature retrieval from Sentinel 2 and 3 Missions," in *Proceedings of the Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/(A) ATSR Workshop, Frascati, Italy, 2012*, pp. 15-19.
- [۱۵] J. A. Sobrino et al., "A Prototype Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Sentinel-3 Mission," in *Sentinel-3 for Science Workshop, 2015*, vol. 734.

- [۱۶] J. Sobrino et al., "Synergistic use of MERIS and AATSR as a proxy for estimating Land Surface Temperature from Sentinel-3 data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 179, pp. 149-161, 2016.
- [۱۷] A. Ruescas, O. Danne, N. Fomferra, and C. Brockmann, "The Land Surface Temperature Synergistic Processor in BEAM: A Prototype towards Sentinel-3," *Data*, vol. 1, no. 3, p. 1.۲۰.۱۶, ۲۰۱۸.
- [۱۸] J. C. Jimenez et al., "Sentinel 2 and 3 for Temperature Monitoring Over the Amazon," in *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: IEEE*, pp. 5925-5928.
- [۱۹] Y. Zheng et al., "Land Surface Temperature Retrieval from Sentinel-3A Sea and Land Surface Temperature Radiometer, Using a Split-Window Algorithm," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 6, p. 650, 2019.
- [۲۰] C. Donlon et al., "The global monitoring for environment and security (GMES) sentinel-3 mission," *Remote Sensing of Environment*, vol. 120, pp. 37-57, 2012.
- [۲۱] J. Nieke and C. Mavrocordatos, "Sentinel-3a: commissioning phase results of its optical payload," in *International Conference on Space Optics—ICSO 2016, 2017*, vol. 10562: International Society for Optics and Photonics, p. 105620C.
- [۲۲] R. A. Frey et al., "Cloud detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS cloud mask for collection 5," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1057-1072, 2008.
- [۲۳] C. Du, H. Ren, Q. Qin, J. Meng, and S. Zhao, "A practical split-window algorithm for estimating land surface temperature from Landsat 8 data," *Remote Sensing*, vol. 7, no. 1, pp. 647-665, 2015.
- [۲۴] J. A. Sobrino, Z.-L. Li, and M. P. Stoll, "Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperatures," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, no. 5, pp. 946-952, 1993.
- [۲۵] Z. Wan and J. Dozier, "A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 34, no. 4, pp. 892-905, 1996.
- [۲۶] Z. Wan, "New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product," *Remote sensing of Environment*, vol. 140, pp. 36-45, 2014.
- [۲۷] T. Schmugge, A. French, J. C. Ritchie, A. Rango, and H. Pelgrum, "Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations," *Remote Sensing of Environment*, vol. 79, no. 2-3, pp. 189-198, 2002.
- [۲۸] Z.-L. Li and F. Becker, "Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data," *Remote sensing of Environment*, vol. 43, no. 1, pp. 67-85, 1993.
- [۲۹] W. Miller and E. Millis, "ESTIMATING EVAPORATION FROM UTAH'S GREAT SALT LAKE USING THERMAL INFRARED SATELLITE IMAGERY 1," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 25, no. 3, pp. 541-550, 1989.
- [۳۰] S.-S. Peng et al., "Afforestation in China cools local land surface temperature," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111, no. 8, pp. 2915-2919,

- 2014.
- [۳۱] F. Petitcolin and E. Vermote, "Land surface reflectance, emissivity and temperature from MODIS middle and thermal infrared data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, no. 1-2, pp. 112-134, 2002.
- [۳۲] A. Kassa, "Drought risk monitoring for Sudan using NDVI," *Master's thesis, University College London*, 1999 .
- [۳۳] I. Pôças, M. Cunha, L. S. Pereira, and R. G. Allen, "Using remote sensing energy balance and evapotranspiration to characterize montane landscape vegetation with focus on grass and pasture lands," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 21, pp. 159-172, 2013.
- [۳۴] B. Johnson, R. Tateishi, and T. Kobayashi, "Remote sensing of fractional green vegetation cover using spatially-interpolated endmembers," *Remote Sensing*, vol. 4, no. 9, pp. 2619-2634, 2012.
- [۳۵] J. Jiménez-Muñoz, J. Sobrino, A. Plaza, L. Guanter, J. Moreno, and P. Martínez, "Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area," *Sensors*, vol. 9, no. 2, pp. 768-793, 2009.
- [۳۶] D. W. Bolgrien, N. G. Granin, and L. Levin, "Surface Temperature Dynamics of Lake Baikal Observed from AVHRR Images," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 61, no. 2, 1995.
- [37] W. C. Snyder, Z. Wan, Y. Zhang, and Y.-Z. Feng, "Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, no. 14, pp. 2753-2774, 1998.



The development of a split window algorithm to estimate land surface temperature using Sentinel -3 satellite data

Masoud Heydari ¹, Mehdi Akhoondzadeh Hanzaei ^{2*}

1- MSc student of remote sensing in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Assistant professor in School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Land Surface Temperature (LST) is an important indicator of the study of energy balance models at the earth's surface and the interactions between the Earth and the atmosphere on a regional and global scale. In the last few decades, different algorithms have been developed to determine the land surface temperature using various satellite images. In this study, a new split window method for estimating the land surface temperature using Sentinel-3A Satellite Radiometer (SLSTR) images is presented. The advantage of the proposed method is the introduction of atmospheric water vapor into the split window algorithm, plays an important role in estimating the LST. The LST was calculated by using the proposed method and the split window three algorithms. Then the results of the proposed method and three split window algorithms were compared with the ASTER, MODIS and Sentinel-3 LST products. The RMSE values of the proposed method for the study area of East Tehran were 3.49, 1.22 and 1.26 K, respectively, compared to the ASTER, MODIS and Sentinel-3 LST products which is lower than the RMSE obtained from other split window algorithms. Also the proposed method and three split window algorithms were implemented for northwest of Isfahan and Kermanshah. For Kermanshah study area the results were much better than the other two cases and the other methods so the RMSE of the proposed method was calculated to be 1.05 Kelvin while the RMSE of the other methods was 1.19, 1.28 and 1.56 Kelvin.

Key words : Land Surface Temperature (LST), Split-Window Algorithm, Sentinel-3, SLSTR.