

مقاله پژوهشی

## ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر

حمید صالحی<sup>۱</sup>، علی شمس‌الدینی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۵

### چکیده

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی راه حل مناسبی را جهت رفع مشکل عدم وجود داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا ارائه می‌دهند و می‌توان با استفاده از این روش‌ها، تاحدودی نیاز به داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی-زمانی بالا به منظور پایش پدیده‌های طبیعی مانند تبخیر-تعرق را برطرف نمود. ماهواره سنتینل-۲ در سال ۲۰۱۵ در مدار قرار گرفت و از آن تاریخ امکان دسترسی به داده‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر را برای دوره بازگشت ۵ روزه فراهم آورده است. هرچند، سنسور این ماهواره قادر به برداشت داده‌های سنجش از دور در طول موج حرارتی نیست. هدف این مطالعه تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر براساس ترکیب داده‌های مادیس و سنتینل-۲ برای اراضی کشت و صنعت امیرکبیر می‌باشد. بدین منظور از دو روش STARFM و TSHARP اصلاح شده به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مادیس به داده‌های سنتینل-۲ استفاده گردید. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش STARFM، باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک تصاویر مادیس به باندهای متناظر خود در تصاویر سنتینل-۲ ریزمقیاس‌نمایی شدند. سپس باندهای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از روش TSHARP اصلاح شده تهیه گردیدند و در پایان با استفاده از الگوریتم سیال و باندهای ریزمقیاس‌نمایی شده سنتینل-۲، نقشه‌های تبخیر-تعرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تولید شدند. مقایسه تبخیر-تعرق‌های ریزمقیاس‌نمایی شده با تبخیر-تعرق‌های بدست آمده با روش فائو-پنمن-مانیتینگ بیانگر میزان مجذور میانگین مربعات خطای ۰/۶۴ میلی‌متر در روز بود که نشان دهنده عملکرد خوب روش ارائه شده جهت تولید نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، ریزمقیاس‌نمایی، STARFM، TSHARP

### مقدمه

مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی-زمانی بالا جمع‌آوری کنند (قاسمیان و الیاسی، ۱۳۸۷). همچنین استفاده از داده‌های ماهواره‌ها به طور جداگانه برای برخی از برنامه‌ها و خدمات از جمله پایش روزانه میزان تبخیر-تعرق به دلیل تفاوت در زمان تصویربرداری آن‌ها مناسب نبوده و عدم دسترسی به باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز حرارتی در کنار هم با قدرت تفکیک مکانی-زمانی بالا مانع از تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق روزانه با صحت بالا می‌گردد (Fisher et al., 2017; He et al., 2019). لذا به منظور حل این مسئله و دستیابی به تصاویری که به صورت همزمان دارای باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و حرارتی باشند، محققین سنجش از دور، روش‌های مختلفی را جهت ترکیب تصاویر ماهواره‌ای ارائه نموده‌اند (Ha et al., 2013).

به منظور ریزمقیاس‌نمایی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا و به صورت روزانه تحقیقاتی متعددی انجام شده است. گائو و همکاران به منظور دستیابی به تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالاتر،

میزان صحت در مدیریت منابع آب براساس معادلات بیلان انرژی سطح تابعی از میزان صحت داده‌های مستخرج از تصاویر سنجش از دور می‌باشد که به نوبه خود صحت آنها وابسته به قدرت تفکیک مکانی-زمانی داده‌های اپتیکی و مادون قرمز حرارتی (TIR) می‌باشد (Bisquet et al., 2016; Guzinski et al., 2013). به دلیل محدودیت‌های فنی، اکثر سنجنده‌های موجود بر روی ماهواره‌های در مدار، قادر نیستند تا به طور همزمان داده‌های اپتیکی و

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(\*- نویسنده مسئول: Email: ali.shamsoddini@modares.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.20.1

بدست آمده از داده‌های لندست-۸ برابر ۱ درجه سانتی‌گراد عنوان کردند (Huryna et al., 2019).

از جمله داده‌هایی که امروزه به دلیل قدرت تفکیک مکانی بالا و نیز دسترسی رایگان به آن دارای کاربردهای زیادی در علوم زمین گردیده است، داده‌های سنتینل-۲ می‌باشد. اما این داده‌ها با وجود دارا بودن قدرت تفکیک مکانی بالا به منظور پایش روزانه پدیده تبخیر- تعرق دارای دو محدودیت مهم می‌باشند. محدودیت اول اینکه قدرت تفکیک زمانی این داده‌ها، ۵ روزه می‌باشد و در نتیجه برای پایش روزانه تبخیر- تعرق مناسب نیستند. همچنین این داده‌ها فاقد باند مادون قرمز حرارتی می‌باشند. در مقابل، تصاویر حاصل از ماهواره مادیس محدودیت‌های ذکر شده برای تصاویر سنتینل-۲ را ندارند ولی دارای قدرت تفکیک مکانی پایینی می‌باشند.

برای بدست آوردن تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای الگوریتم‌های متعددی ارائه شده است که از این میان می‌توان به الگوریتم سبال<sup>۵</sup> (SEBAL) (Bastiaanssen, 2000)، الگوریتم سبیس<sup>۶</sup> (SEBS) (Su, 2002)، الگوریتم متریک<sup>۷</sup> (METRIC) (Allen et al., 2007) و الگوریتم SSEBS<sup>۸</sup> (Senay et al., 2007) اشاره نمود. در میان این روش‌ها، تحقیقات متعددی، روش سبال را به عنوان یک روش متداول و نیز دارای صحت مناسب به منظور محاسبه تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مختلف معرفی نموده‌اند (Hafeez et al., 2002; Chandrapala and Wimalasuriya, 2003; Li et al., 2008; Ramosa et al., 2008). در این تحقیقات عمدتاً از مقایسه مقادیر تبخیر- تعرق حاصل از سبال با مقادیر تبخیر- تعرق بدست آمده با استفاده از معادله فائو- پنمن-ماتتیت، و یا مقادیر حاصل از دستگاه سنتیلومتر<sup>۹</sup>، استفاده شده است. با توجه به تحقیقات ارائه شده، از آنجایی که عملکرد مدل سبال به منظور تخمین تبخیر- تعرق واقعی خوب ارزیابی شده است لذا در تحقیق حاضر نیز از این مدل برای بدست آوردن تبخیر- تعرق واقعی استفاده شد. به منظور محاسبه تبخیر- تعرق واقعی با استفاده از روش سبال، علاوه بر باند مادون قرمز حرارتی، باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی نیز نیاز است. سانچز و همکاران با اصلاح روش معرفی شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) را به منظور ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲ تصاویر حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ تولید نمودند این محققان با ارزیابی تصاویر حرارتی ریزمقیاس شده نتایج را خوب ارزیابی نمودند (Sanchez et al., 2020). تحقیقات فوق نشان می‌دهند با ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل-۲

الگوریتمی را برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های ETM+ و مادیس ارائه دادند. این الگوریتم که به اختصار STARFM نام گرفت، برای پیش‌بینی باندهای بازتابندگی سنجنده ETM+ به کار گرفته شد. در این تحقیق، برای پیش‌بینی بازتابندگی باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی ETM+ در زمان ۲ (بیانگر روزی است که در آن تصویر لندست موجود نیست) از تصاویر مادیس، در زمان ۱ (بیانگر روزی است که در آن تصویر لندست موجود است) و زمان ۲ و تصویر ETM+ در زمان ۱ استفاده نمودند. ایشان با مقایسه تصاویر ریزمقیاس شده با تصاویر به دست آمده از سنجنده ETM+ نتایج را خوب ارزیابی نمودند (Gao et al., 2006). همچنین بررسی‌های کتابخانه‌ای نشان می‌دهند به منظور ریزمقیاس نمایی باندهای حرارتی، روش‌های مختلفی پیشنهاد گردیده است. این تکنیک‌ها به طور کلی بر این فرض استوار می‌باشند که دمای سطح زمین تابعی از پوشش گیاهی سطح زمین می‌باشد (Kustas, 2003; Bindhu, 2013). کاستاس و همکاران در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که این پتانسیل وجود دارد که با استفاده از رابطه بین NDVI و دمای سطح زمین می‌توان قدرت تفکیک مکانی داده دمای سطح زمین را به قدرت تفکیک مکانی NDVI تبدیل نمود. این محققان روشی به نام DisTrad برای تبدیل قدرت تفکیک مکانی TR به قدرت تفکیک مکانی NDVI ارائه نمودند (Kustas et al., 2003). آگام و همکاران توابع مبتنی بر ترکیب تصاویر به منظور اصلاح روش DisTrad برای ریزمقیاس کردن پیکسل‌های دمای سطحی در قدرت تفکیک‌های مکانی کمتر از ۱۰۰ متر را توسعه دادند و این روش را به TSHARP تغییر نام دادند. در این تحقیق تبدیل قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر تصاویر حرارتی مادیس به ۲۴۰ متر دارای مجذور میانگین مربعات خطا ۱/۳۵-۱/۶۷ درجه سانتی‌گراد بود. علاوه بر این در این تحقیق تبدیل تصاویر حرارتی بدست آمده از داده‌های لندست با قدرت تفکیک مکانی ۶۰ و ۱۲۰ متر به قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر منجر به ایجاد مجذور میانگین مربعات خطا ۲/۳۹-۱/۸۰ درجه سانتی‌گراد شد (Agam et al., 2007). هورینا و همکاران روش معرفی شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) را به منظور ترکیب تصاویر سنتینل-۲ و سنتینل-۳ بکار بردند و باند حرارتی تصویر سنتینل-۳ با قدرت تفکیک مکانی ۹۶۰ متر را به قدرت تفکیک مکانی ۶۰ متر ریزمقیاس نمودند. آن‌ها در این تحقیق میانگین خطای مطلق تصویر حرارتی ریزمقیاس شده را در مقایسه با تصویر حرارتی

- 5- surface energy balance algorithm for land
- 6- Surface Energy Balance System
- 7- mapping evapotranspiration with internalized calibration
- 8- Simplified Surface Energy Balance System
- 9- Scintillometer

- 1- Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Mode
- 2- Normalized Difference Vegetation Index
- 3- Disaggregation Procedure for Downscaling Radiometric Surface Temperature
- 4- Sharpening thermal imagery

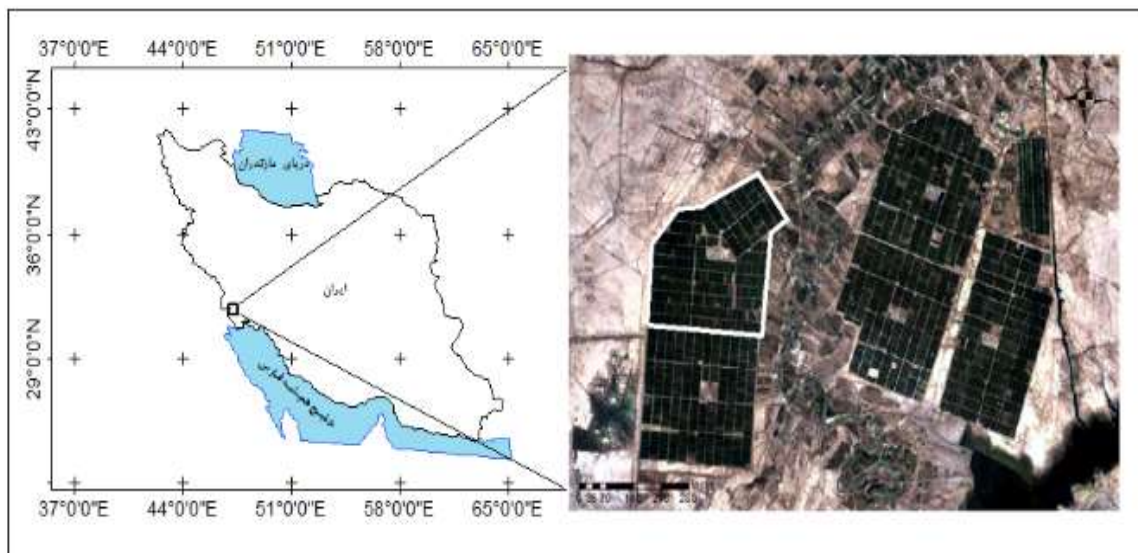
کند و سپس با استفاده از روش TSHARP اصلاح شده و بین دمای سطح زمین و NDVI دمای سطح زمین را به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر ایجاد نماید تا با استفاده از الگوریتم سبال تصاویر تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر تهیه گردد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، اراضی کشت و صنعت امیرکبیر می‌باشد. کشت و صنعت امیرکبیر و صنایع جانبی آن در جنوب استان خوزستان، در طول جغرافیایی  $49^{\circ}16'48''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $32^{\circ}2'31''$  شمالی قرار دارد.

می‌توان تصاویر مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر شبیه‌سازی نمود. هرچند همانگونه که عنوان گردید به منظور تهیه نقشه‌های تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش سبال داده‌های باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی نیز مورد نیاز می‌باشد. بررسی‌های مطالعات گذشته نشان می‌دهد که الگوریتم STARFM بر روی داده‌های مادیس و سنتینل-۲ به منظور ایجاد باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و به صورت روزانه اعمال نشده است. تحقیق حاضر در نظر دارد تا چارچوبی را به منظور تهیه نقشه تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر ارائه نماید. بدین منظور ابتدا باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک و میانی مورد نیاز الگوریتم سبال را به صورت روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر از طریق اعمال الگوریتم STARFM بر روی داده‌های مادیس و سنتینل-۲ ریزمقیاس نمایی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

گردید. همچنین به منظور تصحیح اتمسفری تصاویر سنتینل-۲ از افزونه sen2cor در نرم‌افزار SNAP استفاده شد. جدول ۱ مشخصات مربوط به باندهای سنتینل-۲ و مادیس را که در این تحقیق به منظور ریزمقیاس نمایی مورد استفاده قرار گرفته اند را نشان می‌دهد.

### ریزمقیاس نمایی باندهای بازتابندگی با استفاده از الگوریتم STARFM

در سال ۲۰۰۶، محققان، به منظور دستیابی به تصاویر با قدرت تفکیک زمانی- مکانی بالاتر، الگوریتمی را برای ترکیب تصاویر سنجنده‌های ETM+ و مادیس ابداع کردند (Gao et al., 2006). این الگوریتم به اختصار STARFM نام گرفت. در تحقیق حاضر این الگوریتم به منظور ترکیب تصاویر سنتینل-۲ و مادیس در جهت ایجاد

مساحت ناخالص اراضی این کشت و صنعت ۱۵۰۰۰ هکتار و مساحت خالص آن ۱۲۰۰۰ هکتار می‌باشد که به چندین قطعه ۲۵ هکتاری تقسیم‌بندی شده است (شکل ۱). در تحقیق حاضر مجموعه‌ای از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌های زمینی شامل داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، برداشت‌های مزرعه‌ای مانند ارتفاع گیاهی در دوره‌های مختلف و داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر مادیس در تاریخ‌های ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ و تصاویر سنتینل-۲ در تاریخ‌های ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ و ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ و تصویر لندست ۸ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ می‌باشند. در این تحقیق جهت تصحیح اثرات جوی تصاویر مادیس و لندست ۸ از روشی که توسط تاسومی و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده، استفاده

تابع وزن، از اطلاعات همسایگی برای اصلاح بازتابندگی سطح کمک گرفته می‌شود (رابطه ۲):

$$L\left(\frac{x_w}{2}, \frac{y_w}{2}, t_0\right) = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w \sum_{k=1}^n W_{ijk} \times (M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k)) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $w$  اندازه پنجره جستجوگر است و  $\left(\frac{x_w}{2}, \frac{y_w}{2}\right)$  پیکسل مرکزی این پنجره متحرک می‌باشد. برای اطمینان از اینکه در رابطه (۲) اطلاعات صحیحی قرار گرفته و پیکسل‌های همسایه همگن هستند، تنها از پیکسل‌های طیفی مشابه (که به یک کلاس طیفی تعلق دارند) استفاده می‌شود. برای این منظور یک تصویر سنتینل ۲- طبقه‌بندی شده مورد نیاز خواهد بود. در تحقیق حاضر از الگوریتم IsoData که یک روش طبقه‌بندی نظارت نشده می‌باشد، به منظور یافتن پیکسل‌های طیفی مشابه استفاده شد. وزن  $W_{ijk}$ ، میزان مشارکت پیکسل‌های همسایه مرکزی را در تخمین بازتابندگی بیان می‌کند. جهت کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با این روش به صالحی و همکاران (۱۳۹۷) مراجعه شود.

باند‌های اپتیکی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بکار گرفته شد. الگوریتم مذکور یکی از الگوریتم‌های مبنایی و مرسوم در ادغام زمانی - مکانی تصاویر ماهواره ای می‌باشد. این الگوریتم بر مبنای محاسبه وزن‌های مناسب پیکسل‌های همسایه، مقدار پیکسل مرکزی را در تصویر سنتینل ۲- در زمان دوم پیش‌بینی می‌نماید. این الگوریتم به صورت یک پنجره متحرک بر روی تصویر طبقه بندی شده سنتینل ۲- در زمان اول، حرکت کرده و با توجه به تصاویر زمان اول و دوم مادیس و تصویر طبقه بندی شده سنتینل ۲- مربوط به زمان اول، تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا در زمان دوم را ریزمقیاس می‌نماید. در ارتباط با یک پیکسل غیر همگن مادیس رابطه زیر برقرار است (Gao et al., 2006):

$$L(x_i, y_j, t_0) = M(x_i, y_j, t_0) + L(x_i, y_j, t_k) - M(x_i, y_j, t_k) \quad (1)$$

که در آن  $(x_i, y_j)$  موقعیت پیکسل داده شده برای تصاویر سنتینل ۲- و مادیس،  $t_0$  و  $t_k$  تاریخ اخذ دو تصویر مادیس و سنتینل ۲- می‌باشند. رابطه (۱) برای پیکسل‌های همگن در تصویر مادیس منطقی خواهد بود. اما باید توجه داشت که تمام پیکسل‌های مادیس همواره همگن و یکنواخت نیستند و ممکن است نوع پوشش زمین در طول دوره‌ی پیش‌بینی تغییر نماید. بدین منظور، با استفاده از یک

جدول ۱- باند‌های سنتینل ۲- و باند‌های طیفی مشابه در داده‌های مادیس استفاده شده در این تحقیق به منظور ریزمقیاس نمایی

سنتینل ۲-		مادیس	
شماره باند	پهنای باند (نانومتر)	شماره باند	پهنای باند (نانومتر)
۲	۵۲۳-۴۵۸	۳	۴۷۹-۴۵۹
۳	۵۷۸-۵۴۳	۴	۵۶۵-۵۴۵
۴	۶۸۰-۶۵۰	۱	۶۷۰-۶۲۰
۸	۹۰۰-۷۸۵	۲	۸۷۶-۸۴۱
۱۱	۱۶۵۵-۱۵۶۵	۶	۱۶۵۲-۱۶۲۸
۱۲	۲۲۸۰-۲۱۰۰	۷	۲۱۵۵-۲۱۰۵

برای بدست آوردن تصویر LST با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده نمودند. ایشان مراحل زیر را جهت اجرای این روش ارائه نمودند:

- ۱- تبدیل قدرت تفکیک مکانی NDVI بدست آمده از داده‌های سنتینل ۲- با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر و داده‌های مادیس با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر به قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر که به ترتیب با نمایه‌های NDVI<sub>MOD</sub> و NDVI<sub>S2</sub> مشخص می‌گردند.
- ۲- اصلاح اختلاف بین NDVI‌های با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر بدست آمده از داده‌های مادیس و سنتینل ۲- که ناشی از اختلاف بین قدرت تفکیک طیفی، اثر اتمسفری و زاویه دید دو ماهواره می‌باشد. این کار از طریق نرمال‌سازی NDVI بدست آمده از داده‌های سنتینل ۲- (NDVI<sub>N</sub>) انجام می‌شود.

### ریزمقیاس نمایی باند حرارتی با روش TSHARP اصلاح شده

بیسکرت<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی را با بهره‌گیری از تصاویر مادیس و لندست در منطقه باراکس<sup>۲</sup> مقایسه نمودند. در این تحقیق اصلاح شده روش ارائه شده توسط آگام و همکاران (۲۰۰۷) بهترین نتیجه را نشان داد. این روش براساس ایجاد یک رابطه خطی بین شاخص‌های NDVI و LST حاصل از تصاویر مادیس قرار دارد. سانچز و همکاران (۲۰۲۰) روش اصلاحی ارائه شده توسط بیسکرت و همکاران (۲۰۱۶) را به منظور ترکیب تصاویر مادیس و سنتینل ۲- اصلاح نمودند و از آن به عنوان روشی

1- Bisquert  
2- Barrax

از آن، الگوریتم انرژی سطح زمین با استفاده از محاسبات چند مرحله‌ای مبتنی بر روابط فیزیکی را به نام سیال ارائه دادند. روابط موجود و روند محاسباتی برای هر کدام از پارمترهای  $H$  و  $G$ ،  $R_n$ ، باستیانسن و همکاران (۲۰۰۲) بطور کامل تشریح شده‌اند. همانگونه که در بخش مقدمه عنوان گردید به دلیل کارایی روش سیال در محاسبه تبخیر-تعرق واقعی، از این روش به منظور بررسی کارایی روش‌های ریزمقیاس نمایی STARFM و TSHARP برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده گردید.

### ارزیابی صحت

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از روش STARFM، باندهای ریزمقیاس نمایی شده مادیس مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ با باندهای متناظر سنتینل-۲ که در همین تاریخ اخذ گردیده بودند، به صورت بصری و کمی مقایسه گردیدند. به منظور مقایسه کمی این داده‌ها، مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین استفاده گردید. به منظور ریزمقیاس نمایی باندهای حرارتی مادیس از روش TSHARP اصلاح شده که توسط سانچز و همکاران (۲۰۲۰) ارائه گردیده بود، استفاده شد. با توجه به اینکه هیچ رفرنسی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای ارزیابی باندهای حرارتی ریزمقیاس شده در دسترس نبود، صحت روش TSHARP اصلاح شده با استفاده از داده‌های لندست-۸ برای منطقه مورد مطالعه ارزیابی گردید. هورینا و همکاران (۲۰۱۹) نیز به منظور اثبات عملکرد مطلوب روش TSHARP در ریزمقیاس نمایی باندهای حرارتی سنتینل-۳ به قدرت تفکیک مکانی سنتینل-۲، از داده‌های لندست-۸ استفاده نمودند. پس از ریزمقیاس نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، میانی (که معادل باندهای ۲، ۳، ۴، ۸، ۱۱، و ۱۲ سنتینل-۲ می‌باشند) و باند حرارتی، تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از مدل سیال محاسبه گردید. نقشه‌های تبخیر-تعرق بدست آمده از سیال، با محاسبه تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش فائو-پنمن-مانتیت بر اساس داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت.

### نتایج و بحث

شکل ۲ باندهای اصلی و ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۲ نشان دهنده مقادیر RMSE و  $R^2$  برای باندهای ریزمقیاس شده سنتینل-۲ در مقایسه با باندهای متناظر اصلی سنتینل-۲ و نیز شکل ۳ نشان دهنده نمودارهای نقطه‌ای دویعدی آنها برای تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ می‌باشد. بدیهی است هر چه پراکندگی مقادیر پیکسل‌ها در نمودار نقطه‌ای به

۳- به منظور اصلاح رابطه بین NDVI-LST نیاز به انتخاب پیکسل‌های خالص می‌باشد. این انتخاب براساس محاسبه یک مقدار مرجع از مقایسه بین  $NDVI_{MOD}$  و  $NDVI_N$  بدست می‌آید. این مقدار مرجع بنا بر پیشنهاد کاستاس و همکاران (۲۰۰۳) از نسبت بین انحراف معیار پیکسل‌هایی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر واقع در یک پنجره  $4 \times 4$  و مقدار میانگین آن‌ها بدست می‌آید. در این مرحله پیکسل‌هایی که برای آنها مقدار این نسبت کمتر از یک چهارم مقدار مرجع باشند انتخاب می‌شوند.

۴- ایجاد یک رگرسیون خطی بین  $NDVI_{MOD}$  و  $LST_{MOD}$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر با استفاده از پیکسل‌های خالص انتخاب شده و اعمال آن به  $NDVI_N$  برای بدست آوردن یک تخمین اولیه از مقادیر  $LST$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر ( $LST_{prime}$ ).

۵- اعمال رابطه بین NDVI-LST بر روی  $NDVI_{MOD}$  تصویر  $LST$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر بدست می‌آید و با محاسبه اختلاف بین  $LST$  اصلی و پیش‌بینی شده پارامتر  $LST$  باقیمانده ( $R_{LST}$ ) بدست می‌آید. با اعمال مقادیر  $R_{LST}$  بر روی  $LST_{prime}$  تصویر  $LST$  با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر حاصل می‌شود.

### الگوریتم سیال

مبنای الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر-تعرق، معادله بیلان انرژی می‌باشد. معادله کامل بیلان انرژی به صورت ذیل بیان می‌گردد ( Bastiaanssen et al., 1998):

$$R_n = G + H + \lambda ET + \left( \text{ذخیره گرما در زیست توده گیاه} + \left( \text{فتوسنتز} \right) + \left( \text{جزء افقی گرمای آشکار و نهان} \right) \right) \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $R_n$  تابش خالص،  $G$  شار گرمای خاک،  $H$  شار گرمای محسوس و  $\lambda ET$  شار گرمای نهان بوده و تمامی واحدها بر حسب وات بر متر مربع می‌باشند. در این معادله می‌توان از دو جزء فتوسنتز و ذخیره گرما در گیاه در معادله بیلان انرژی صرف نظر کرد. زیرا بیشتر گیاهان کمتر از یک درصد تشعشع خورشیدی رسیده به آن‌ها را در طول دوره زندگی خود برای فتوسنتز استفاده می‌کنند. ذخیره حرارت در گیاهان در طول روز قابل صرف نظر می‌باشد و تنها در زمانی که تغییر درجه حرارت سریع بوده (به ویژه هنگام طلوع و غروب خورشید) و مقادیر  $R_n$ ،  $H$  و  $\lambda ET$  کوچک هستند، نسبتاً حائز اهمیت است. همچنین جزء افقی گرمای آشکار و نهان نشان دهنده میزان خالص انرژی است که گیاه در راستای افقی تبادل می‌کند. در آب و هوای خشک این جزء ممکن است مساوی با تابش خالص گردد و به رغم اهمیتی که دارد، به علت عدم وجود راه ساده‌ای برای ارزیابی آن، معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود. باستیانسن و همکاران (۱۹۹۸) با توجه به این فرضیات در معادله بیلان و حذف این سه جزء

باند‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی سنتینل-۲ می‌باشد. با توجه به نتایج مطلوب حاصل، برای بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۷/۱۰ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۵ با استفاده از باندهای معادل مادیس همان تاریخ‌ها، ریزمقیاس‌نمایی انجام شد.

شکل قطری نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده عملکرد بهتر الگوریتم بکار گرفته شده به منظور نشان دادن تغییرات مربوط به داده‌ها می‌باشد. مقایسه بصری باندهای اصلی و ریزمقیاس شده در شکل ۲ و ملاحظه مقادیر شاخص‌ها برای باندهای ریزمقیاس شده در جدول ۲ نشان دهنده صحت خوب الگوریتم STARFM در ریزمقیاس‌نمایی

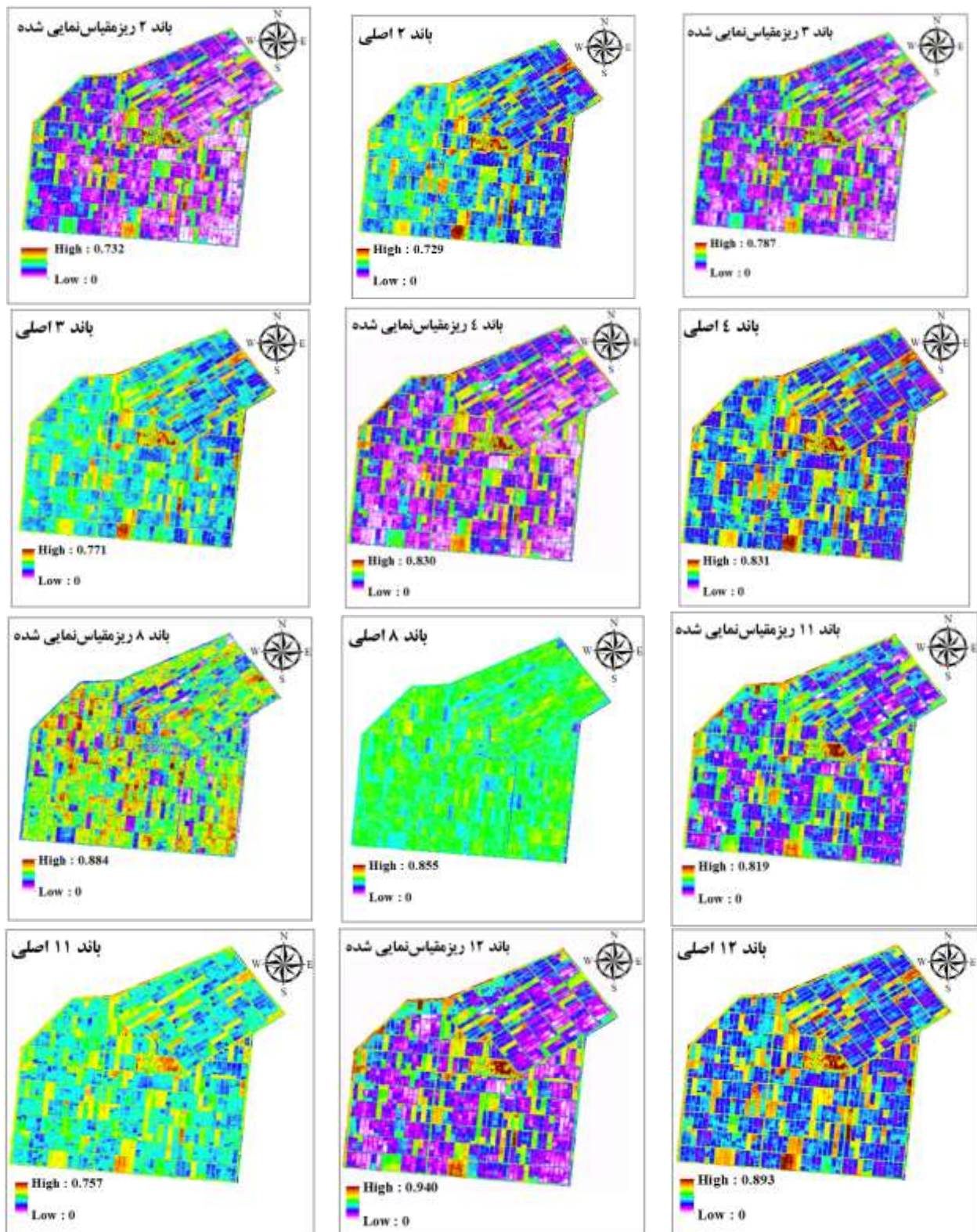
جدول ۲- مقایسه باندهای ریزمقیاس شده و باندهای اصلی سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵

شماره باند	۲	۳	۴	۸	۱۱	۱۲
مجذور میانگین مربعات خطا	۰/۰۱۸	۰/۰۲۲	۰/۰۳۳	۰/۰۳۰	۰/۰۴۰	۰/۰۴۶
ضریب تعیین	۰/۸۲	۰/۸۰	۰/۸۳	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۷۷

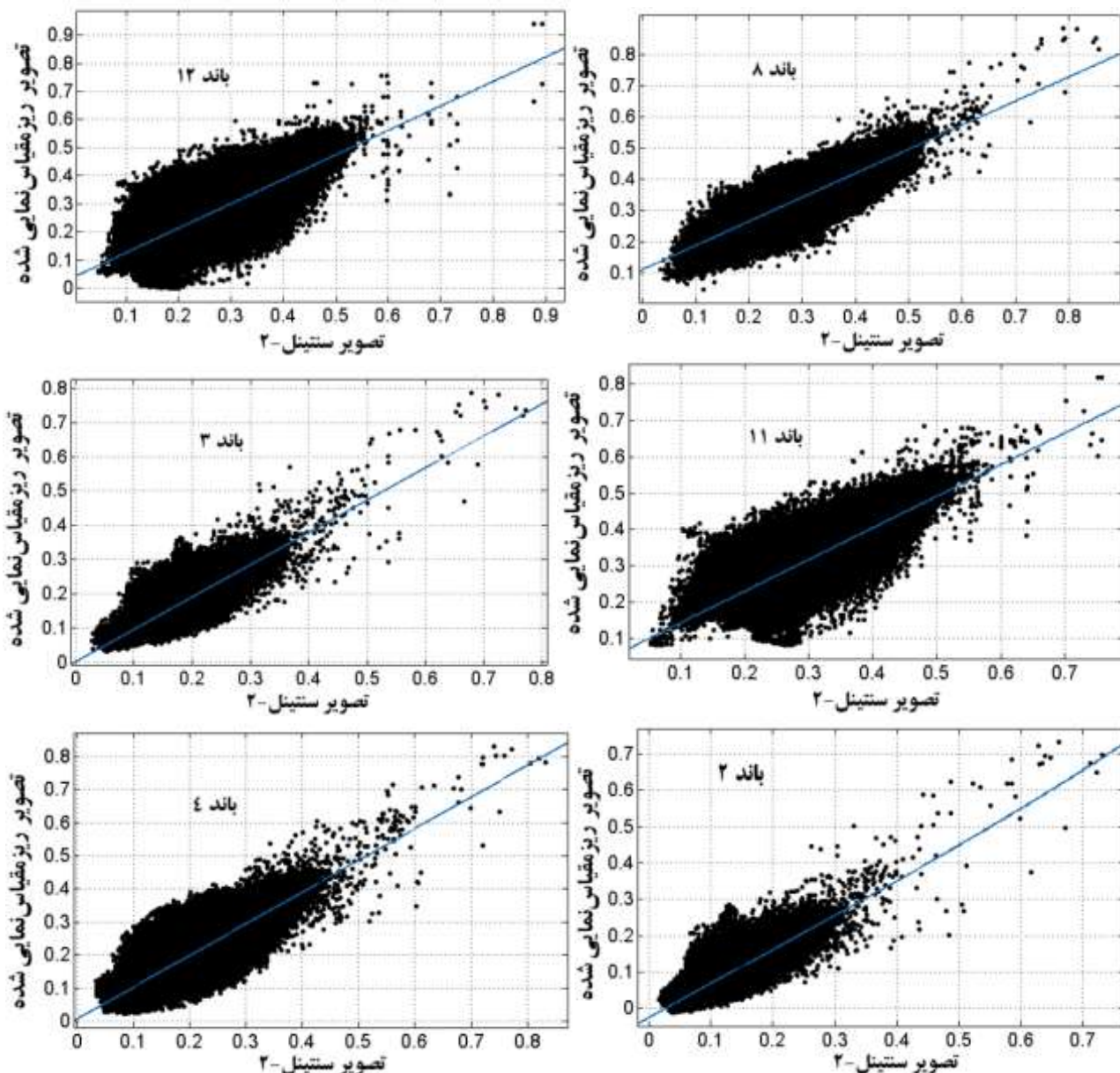
موضوع می‌تواند به حساسیت بالای باند مادون قرمز نزدیک به تغییرات گیاهی موجود در منطقه مورد مطالعه برگردد. حساسیت بالای این باند به تغییرات کلروفیل پوشش گیاهی ( Mancino et al., 2020) موجب می‌گردد تا در یک پوشش کشاورزی، پیکسل‌هایی با مقادیر متفاوت بازتابندگی در این باند خصوصاً در قدرت تفکیک مکانی بالا ایجاد شوند. این درحالیست که در باندهای دیگر خصوصاً در باندهای مرئی تغییرپذیری پیکسل‌ها کمتر بوده و لذا در زمان ریزمقیاس‌نمایی، تغییرات زیاد باند مادون قرمز نزدیک نمی‌تواند به خوبی سایر باندها که دارای تغییرپذیری کمتری در محیط پوشش گیاهی می‌باشند، در باند ریزمقیاس شده مادون قرمز نزدیک نشان داده شود. الگوریتم STARFM وابستگی زیادی به یکنواختی ناحیه مورد مطالعه دارد و عدم یکنواختی یا وجود تنوع زیاد پوشش در منطقه می‌تواند نتایج حاصل از اعمال الگوریتم را متاثر سازد (Gao et al., 2006). لذا یکی از دلایل مهم برای دستیابی به صحت مناسب باندهای ریزمقیاس شده در این تحقیق را می‌توان ناشی از یکنواختی منطقه مورد مطالعه دانست.

همانگونه که بیان گردید، به منظور ارزیابی صحت روش TSHARP، با توجه به موجود بودن تصویر لندست-۸ برای تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰، LST حاصل از باند حرارتی مادیس برای این تاریخ و با استفاده از این روش ریزمقیاس‌نمایی گردید. مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین برای این داده‌ها نسبت به LST حاصل از باند حرارتی لندست-۸ به ترتیب برابر ۲/۶۰ درجه کلوین و ۰/۶۵ بدست آمد. شکل ۴ نشان دهنده نمودار نقطه‌ای حاصل از رابطه بین پیکسل‌های LST ریزمقیاس شده و LST حاصل از داده حرارتی لندست-۸ می‌باشد. نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد خوب روش TSHARP اصلاح شده در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حرارتی مادیس می‌باشد.

با توجه به مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا و نیز ضریب تعیین ارائه شده در جدول ۲ و همچنین مشاهده نمودارهای نقطه‌ای ارائه شده در شکل ۳ می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم STARFM برای ریزمقیاس‌نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی روزانه تصویر سنتینل-۲ با استفاده از ترکیب داده‌های مادیس و سنتینل-۲ در منطقه مورد مطالعه نتایج رضایت بخشی داشته است. با مرور ادبیات انجام شده تاکنون کارایی این الگوریتم در تحقیقات گذشته به منظور برآورد باندهای اپتیکی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از داده‌های مادیس و سنتینل-۲ مورد بررسی قرار نگرفته بود. هرچند کارایی خوب این الگوریتم در ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی لندست با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در تحقیقات قبلی تایید شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات گائو و همکاران (۲۰۰۶)، هیلکر و همکاران (۲۰۰۹) و بهاندیری و همکاران (۲۰۱۲) اشاره نمود. صالحی و همکاران (۱۳۹۷) نیز کارایی الگوریتم STARFM در ریزمقیاس‌نمایی باندهای بازتابندگی لندست-۸ را تایید نمودند. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود صحت الگوریتم STARFM برای ریزمقیاس‌نمایی باندهای مختلف متفاوت است که این تفاوت می‌تواند ناشی از دلایل مختلفی باشد. دلیل اصلی آن را می‌توان ناشی از عدم همپوشانی کامل باندهای متناظر سنتینل-۲ و مادیس از نظر طول موج طیفی دانست که این عدم همپوشانی کامل می‌تواند باعث تفاوت طیفی در باندهای متناظر شود و متعاقباً بر روی نتایج ریزمقیاس‌نمایی تاثیر گذار می‌باشد (Pohl and Van der Gerden, 1998). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود کمترین مقدار همبستگی مربوط به باند ۸ (باند مادون قرمز نزدیک) سنتینل-۲ می‌باشد. در تحقیقی که توسط صالحی و همکاران (۱۳۹۷) انجام شد نیز کمترین مقدار همبستگی مربوط به باند ۵ (باند مادون قرمز نزدیک) ریزمقیاس‌نمایی شده تصویر لندست-۸ گزارش شد. اگرچه به دلیل وجود عوامل عدم قطعیت زیاد در فرایند ریزمقیاس‌نمایی یافتن علت اصلی این کاهش ضریب تعیین برای این باند مشکل است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۷)، ولی یکی از دلایل این



شکل ۲- باندهای اصلی و ریزمقیاس‌نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵



شکل ۳- مقایسه باندهای ریزمقیاس نمایی شده با باندهای تصویر سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۵

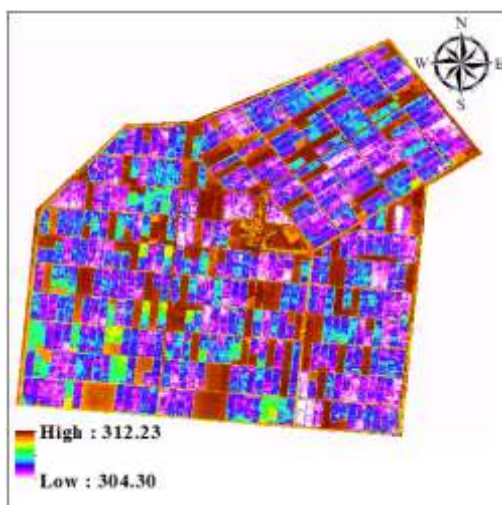
### نتیجه گیری

- در مناطق همگن دارای صحت خوبی می باشد.
- میزان صحت الگوریتم STARFM برای باندهای مختلف متفاوت است.
- روش TSHARP اصلاح شده در شبیه سازی باندهای حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از داده های مادیس و سنتینل-۲ دارای صحت خوبی می باشد.
- استفاده از الگوریتم های STARFM و TSHARP برای تولید تبخیر- تعرق های روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر برای مناطق همگن می تواند منجر به نتایج مناسبی شود.

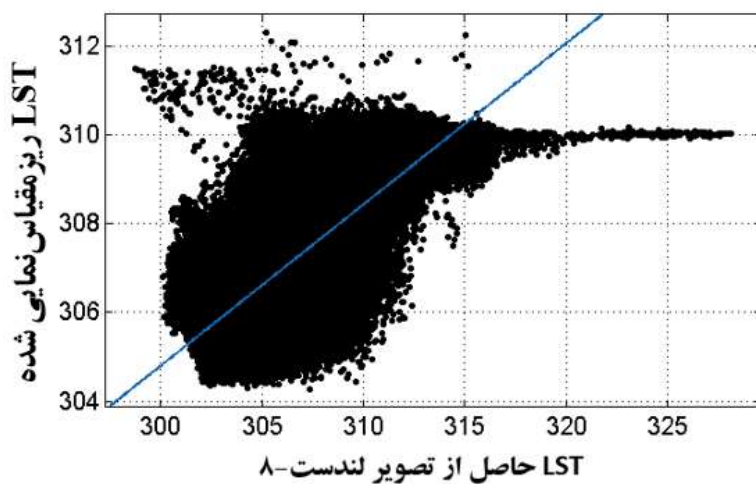
در تحقیق حاضر به منظور شبیه سازی تصاویر تبخیر- تعرق واقعی روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر با استفاده از تصاویر مادیس و سنتینل-۲ از دو الگوریتم STARFM و TSHARP به منظور شبیه سازی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک، میانی و حرارتی مورد نیاز الگوریتم سیال استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- الگوریتم STARFM در ریزمقیاس نمایی باندهای مرئی، مادون قرمز نزدیک و میانی سنتینل-۲ با استفاده از داده های مادیس

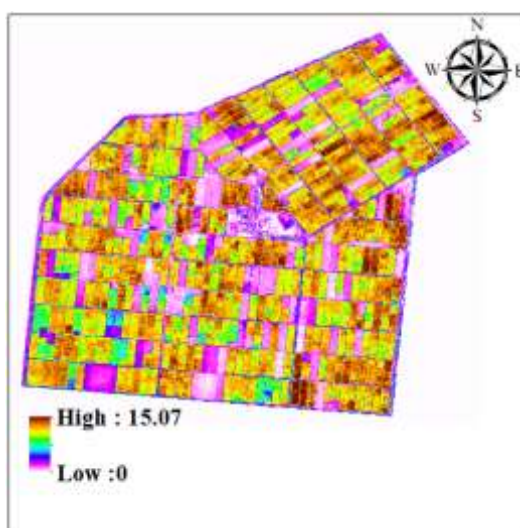




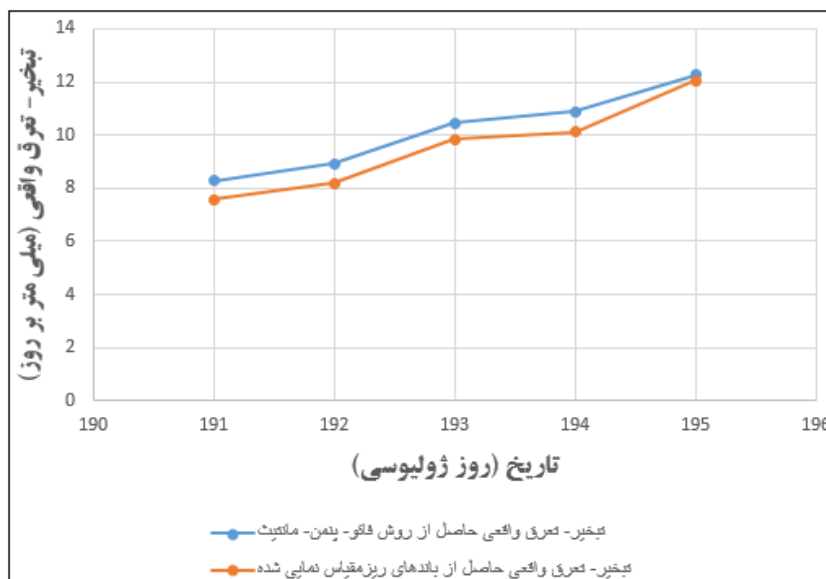
شکل ۴- مقایسه LST ریزمقیاس نمایی شده تصویر لندست-۸ با LST حاصل از تصویر لندست-۸ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ۵- تصویر LST ریزمقیاس نمایی شده با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ۶- توزیع مکانی تبخیر-تعرق روزانه حاصل از باندهای ریزمقیاس نمایی شده سنتینل-۲ در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۰



شکل ۷- مقایسه تبخیر - تفرق‌های روزانه حاصل از روش سبال با استفاده از باندهای ریزمقیاس نمایی شده (قرمز) و تبخیر - تفرق‌های حاصل از روش فائو- پنمن- مانیت

for Land. Nasa EOSDIS/Synergy Grant from the Raytheon Company through the Idaho Department of Water Resources1:1-98.

Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R., and Holtslag A. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1, Formulation, Journal of Hydrology 212:198-212.

Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology 229: 87-100.

Bhandari, S., Phinn, S., and Gill, T. 2012. Preparing aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D14): p. 16815-16830.

Bindhu, V.M., Narasimhan, B., and Sudheer, K.P. 2013. Development and Verification of a Non-Linear Disaggregation Method (NL-Distrad) to Downscale MODIS Land Surface Temperature to the Spatial Scale of Landsat Thermal Data to Estimate Evapotranspiration. Remote Sens. Environ. 135, 118-129.

Bisquert, M., Sanchez, J.M., and Caselles, V. 2016. Evaluation of Disaggregation Methods for Downscaling Modis Land Surface Temperature to Landsat Spatial Resolution in Barrax Test Site. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 9, 1430-1438.

Chandrapala, L., and Wimalasuriya, M. 2003. Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. Agricultural Water Management 58:89-107.

Fisher, J.B. 2017. The future of evapotranspiration:

در پایان توصیه می‌شود تا در تحقیقات آینده صحت الگوریتم‌های STARFM و TSHARP در مناطق غیرهمگن به منظور ایجاد نقشه‌های تبخیر- تفرق روزانه با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر نیز مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع

صالحی، ح.، شمس‌الدینی، ع.، و میرلطیفی، س.م. ۱۳۹۷. ریزمقیاس‌نمایی تصویر مادیس به منظور تهیه نقشه تبخیر- تفرق روزانه با قدرت تفکیک تصویر لندست با استفاده از الگوریتم‌های SADFAT و STARFM. سنجش از دور و GIS ایران، شماره سوم، ۱۴۱-۱۲۳.

قاسمیان یزدی، م.ح.، و الیاسی، م. ۱۳۸۷. ادغام اطلاعات مکانی تصویر ایکونوس و اطلاعات طیفی تصاویر اسپات ۴، فصل‌نامه مدرس علوم انسانی، دوره ۱۴، شماره ۱، ۸۲-۵۷.

Agam, N., Kustas, W.P., Anderson, M.C., Li, F., and Neale, C.M.U. 2007. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. Remote Sens Environ 107:545-558.

Allen R.G., Tasumi M., and Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133:380-394.

Bastiaanssen W.G.M., Waters R., Allen R.G., Tasumi M., and Terzza R. 2002. Advanced training and user's manual of surface energy balance algorithms

- Temperatures and Energy Fluxes from the Vegetation Index–Radiometric Temperature Relationship. *Remote Sens. Environ.* 85: 429–440.
- Li, H., Zheng, L., Lei, Y., Li, C., Liu, Z., and Zhang, S. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95:1271-1278.
- Mancino, G., Ferrara, A., Padula, A., and Nole, A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment, *Remote Sens.* 12(2): 291.
- Pohl, C., and Van Genderen, J.L. 1998. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications (Review Article), *International Journal of Remote Sensing* 19: 823-854.
- Ramosa J.G., Cratchley C., Kay J.A., Casterad M.A., Martinez-Cob A., and Dominguez Z. 2008. Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E, Spain. *Agricultural Water Management Journal AGWAT-2701:15-26.*
- Sanchez, J.M., Galve, J.M., Gonzalez-Piqueras, J., Lopez-Urrea, R., Niclos, R., and Calera, A. 2020. Monitoring 10-m LST from the Combination MODIS/Sentinel-2, Validation in a High Contrast Semi-Arid Agroecosystem. *Remote Sensing* 12(9):1453.
- Senay, G.B., Budde, M., Verdin, J.P., and Melesse, A.M. 2007. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. *Sensors* 7:979–1000.
- Su, Z. 2002. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 6: 85–100.
- Tasumi M., Allen R.G., and Trezza R. 2008. Atsurface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering* 13(2):51-63.
- Global Requirements for Ecosystem Functioning, Carbon and Climate Feedbacks, Agricultural Management, and Water Resources. *Water Resour. Res.* 53: 2618–2626.
- Gao, F., Masek, J., Schwaller, M., and Hall, F. 2006. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44(8): 2207- 2218.
- Guzinski, R., Anderson, M.C., Kustas, W.P., Nieto, H., and Sandholt, I. 2013. Using a Thermal Based Two Source Energy Balance Model with Time-Differencing to Estimate Surface Energy Fluxes with Day-Night MODIS Observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 2809–2825.
- Ha, W., Gowda, P., and Howell, T.A. 2013. Review of Downscaling Methods for Remote Sensing-Based Irrigation Management: Part I. *Irrig. Sci.* 31: 831–850.
- Hafeez, M., Chemin, Y., Van De Giesen, N., and Bouman, B. 2002. Field evapotranspiration estimation in central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra MODIS and ASTER. *ISPRS/CIG conference July*. P. 2002.
- He, B.J., Zhao, Z.Q., Shen, L.D., Wang, H.B., and Li, L.G. 2019. An Approach to Examining Performances of Cool/Hot Sources in Mitigating/Enhancing Land Surface Temperature under Different Temperature Backgrounds Based on Landsat 8 Image. *Sustain. Cities Soc.* 44: 416–427.
- Hilker, T., Wulder, M.A., Coops, N.C., Seitz, N., White, J.C., Feng, G., Masek, J.G., and Stenhouse, G. 2009. Generation of dense time series synthetic Landsat data through data blending with MODIS using a spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, *Remote Sensing Environment*, volume 113: 1988-1999.
- Huryna, H., Cohen, Y., Karnieli, A., Panov, N., Kustas, W.P., and Agam, N. 2019. Evaluation of Tsharp Utility for Thermal Sharpening of Sentinel-3 Satellite Images Using Sentinel-2 Visual Imagery. *Remote Sens.*, 11, 2304.
- Kustas, W.P., Norman, J.M., Anderson, M.C., and French, A.N. 2003. Estimating Subpixel Surface

## MODIS and Sentinel-2 Data Fusion For 10-m Daily Evapotranspiration mapping

H. Salehi<sup>1</sup>, A. Shamsoddini<sup>2\*</sup>

Received: Oct.31, 2020

Accepted: Dec.05, 2020

### Abstract

Downscaling methods seem to be a reasonable solution to solve the problem of having no simultaneous high spatial and temporal satellite data, and it is possible somehow to meet the requirement of having high spatial-temporal resolution satellite data for monitoring the natural phenomena such as evapotranspiration, through these methods. Sentinel-2 satellite launched in 2015 enables to provide 10-m spatial resolution data with a 5-day revisit time; however, its sensor does not acquire data in thermal infrared wavelength. This study aims to generate 10-m daily evapotranspiration maps based on Sentinel-2 and MODIS data fusion for Amir-Kabir Agroindustry farms. For this purpose, STARFM and improved TSHARP methods were applied for downscaling MODIS data to Sentinel-2 data. To achieve this goal, First, MODIS visible and near and middle infrared bands were downscaled by STARFM to 10-m spatial resolution. Then, improved TSHARP was applied for downscaling MODIS thermal band to 10-m spatial resolution and SEBAL algorithm fed by the downscaled bands, was used to produce daily evapotranspiration map with 10-m spatial resolution. Assessing downscaled evapotranspiration maps with those derived from FAO Penman-Monteith equation indicated a RMSE of 0.64 mm/day showing efficient performance of the downscaling framework proposed for 10-m daily evapotranspiration mapping in this study.

**Keywords:** Downscaling, Evapotranspiration, STARFM, TSHARP

---

1- Master of Agricultural Engineering (Irrigation), Tarbiat Modares University

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University

(\*- Corresponding Author Email: ali.shamsoddini@modares.ac.ir)