

Original Article



Comparison of Remote Sensing Methods for Estimating Actual Daily Evapotranspiration Using Landsat 8 Multispectral Images

Faezeh sadat Hashemi^{1*}, Mohammad Javad Valadan Zoej², Fahimeh Yousefi³

Affiliation

1. MSc student of Remote sensing, Department of photogrammetry and remote sensing, College of geodesy and geomatics, K.N.Toosi University, Tehran, Iran
2. Professor in Department of photogrammetry and remote sensing, College of geodesy and geomatics, K.N.Toosi University, Tehran, Iran
3. Ph.D. student of photogrammetry Department of photogrammetry and remote sensing, College of geodesy and geomatics, K.N.Toosi University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Background and Purpose: Agriculture serves as the cornerstone of the global economy, providing the main source of food and raw materials for various industries. However, the rising demand for food as a consequence of population growth represents a considerable threat to food security, particularly in light of the limited access to freshwater resources. It is noteworthy that agriculture alone consumes about 70% of the world's freshwater resources, thereby emphasizing the critical need to manage and enhance irrigation efficiency to ensure sustainable food production. Therefore, the management and enhancement of irrigation efficiency are essential. At the core of determining irrigation water requirements lies the concept of actual crop evapotranspiration (ETa), which represents the combined water loss from soil evaporation and plant transpiration. Accurate estimation of ETa is crucial in optimizing irrigation methods, maximizing crop yield, and minimizing water consumption. Various models and tools have been developed to estimate ETa, aiming to provide more user-friendly and efficient methods for farmers and researchers. Given the extensive application of ET estimation models, there is a clear need to focus on the development of accurate and efficient methods for determining this parameter. Thus, this study aims to compare user-friendly ETa estimation methods, including the EEFLUX system, the METRICTOOL tool, and the automatic hot and cold pixel selection method of the SEBAL and METRIC models.

Materials and Methods: The Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFLUX) is a version of the METRIC model that operates on the Google Earth Engine platform. METRICTOOL is a new tool in ArcGIS based on the METRIC model, offering enhanced pre-processing capabilities and automatic data identification. This tool reduces computation time by 50% and provides a user-friendly alternative to other existing METRIC model implementation platforms. The automatic hot and cold pixel selection method involves creating a binary map of eligible pixels using a rule-based classifier and a comprehensive search algorithm to identify hot and cold pixels based on defined criteria. To estimate ET using these methods, six Landsat 8 satellite images were utilized during the winter wheat crop planting period at Tehran University farms in Mohammadshahr Karaj. The evaluation of these methods was conducted using alfalfa reference evapotranspiration (ET_r) calculated with the FAO-Penman-Monteith method as reference data.

Results and Discussion: The Root Mean Square Error (RMSE) values for the EEFLUX system, METRICTOOL, SEBAL, and automatic METRIC tools were determined as 2.45, 0.33, 0.39, and 2.76, respectively. Despite numerical differences, the evaporation and transpiration product of the EEFLUX system showed significant correlations with other methods. For instance, the R² between ETa estimates from the EEFLUX system and the METRICTOOL tool was found to be 0.91. Although the data from the EEFLUX system may not be precise enough for local studies due to the use of CFSV2 global meteorological data in Iran, they yield acceptable results in large or global-scale studies. The METRICTOOL tool and automatic METRIC model exhibited the highest correlation (R²=0.99) and numerical agreement with each other, with RMSE values of 0.33 and 0.39, respectively, indicating higher accuracy compared to the automatic SEBAL model.

Conclusion: The results of the numerical analysis indicate that the automatic hot and cold pixel selection approach can achieve similar accuracy to that of the METRICTOOL tool. This automated approach enhances the efficiency of the model in terms of time and effectiveness, reducing the potential for human error in estimating evapotranspiration for new or inexperienced users, and making these models accessible to the public. Furthermore, EEFLUX data can be utilized for the implementation of management measures in large-scale studies.

Keywords: Food security, Evapotranspiration, SEBAL, METRIC, EEFLUX

Citation: Hashemi, F., Valadan Zoej, M.J., Yousefi, F., Comparison of Remote Sensing Methods for Estimating Actual Daily Evapotranspiration Using Landsat 8 Multispectral Images, Iran J Remote Sens GIS. 16(2):19-42.





مقایسه روش‌های سنجش از دور برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از تصاویر چندطیفی لندست ۸

فاطمه سادات هاشمی^{۱*}، محمدجواد ولدان‌زوج^۲، فهمیه یوسفی^۳

سمت

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۲. استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
۳. دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: کشاورزی سنگ بنای اقتصاد جهانی است و به‌مثابه منبع اصلی غذا و مواد خام برای صنایع مختلف عمل می‌کند. با این حال، تقاضای فزاینده غذا به دلیل رشد جمعیت، تهدید قابل توجهی برای امنیت غذایی است. به‌ویژه زمانی که دسترسی محدود به منابع آب شیرین را در نظر بگیریم. شایان ذکر است که کشاورزی به‌تنهایی حدود ۷۰ درصد از منابع آب شیرین جهان را مصرف می‌کند، که بر نیاز حیاتی برای مدیریت و افزایش بهره‌وری آبیاری برای تضمین تولید پایدار مواد غذایی تأکید دارد. در نتیجه مدیریت و افزایش بازده آبیاری امری ضروری است. در قلب تعیین نیاز آب آبیاری، مفهوم تبخیر و تعرق واقعی محصول (ET_a) نهفته است، که نشان‌دهنده اتلاف آب، ترکیبی از تبخیر خاک و تعرق گیاه است. برآورد دقیق ET_a در بهینه‌سازی روش‌های آبیاری، به حداکثر رساندن عملکرد محصول و به حداقل رساندن مصرف آب بسیار مهم است. برای این منظور، مدل‌ها و ابزارهای مختلفی برای تخمین ET_a با هدف ارائه روش‌های کاربرپسندتر و کارآمدتر برای کشاورزان و پژوهشگران ایجاد شده‌اند. با توجه به مطالعات انجام‌شده و کاربرد وسیع مدل‌های برآورد ET، لازم است تمرکز بر روش‌های دقیق و سریع تعیین این پارامتر افزایش یابد. لذا هدف این مطالعه مقایسه روش‌های برآورد سنجش از دوری ET_a کاربرپسندانه‌تر، از جمله سامانه EEFLUX، ابزار METRIC، و روش انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم مدل‌های SEBAL و METRIC است.

مواد و روش‌ها: Earth Engine Evapotranspiration Flux یا به اختصار EEFLUX نسخه‌ای از مدل METRIC است که بر روی سیستم موتور Google Earth کار می‌کند. METRIC، ابزاری جدید در ArcGIS براساس مدل METRIC است. این ابزار پیش‌پردازش و شناسایی خودکار کالیبراسیون بالقوه و معرفی داده‌های ورودی را تسهیل کرده، زمان محاسبات را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد و جایگزینی کاربرپسندتر از دیگر پلتفرم‌های موجود پیاده‌سازی مدل METRIC است. روش انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم شامل ایجاد یک نقشه باینری از پیکسل‌های واجد شرایط که با استفاده از یک طبقه‌بندی کننده ساده مبتنی بر قانون شناسایی می‌شوند، و استفاده از الگوریتم جست‌وجوی جامع برای شناسایی پیکسل‌های گرم و سرد، مطابق با معیارهای تعریف‌شده است. برای برآورد ET با استفاده از روش‌های نام‌برده، از ۶ تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 در طول دوره کاشت محصول گندم زمستانه مزارع دانشگاه تهران واقع در محمدشهر کرج استفاده شد. ارزیابی روش‌های مذکور با استفاده از تبخیر و تعرق مرجع یونجه (ET_r) با استفاده از روش FAO-Penman-Monteith به‌عنوان داده مرجع انجام شد.

نتایج و بحث: RMSE سامانه EEFLUX، ابزار METRIC، و SEBAL، METRIC و خودکار خودکار به ترتیب ۲.۴۵، ۰.۳۳، ۰.۳۹ و ۲.۷۶ به دست آمد. با توجه به نتایج محصول تبخیر و تعرق سامانه EEFLUX به‌رغم اختلاف عددی با دیگر روش‌ها همبستگی معناداری با آن‌ها داشت. مثلاً R² بین ET_a این سامانه و ابزار METRIC ۰.۹۱ برآورد شد. نتیجه آن است که گرچه داده‌های این سامانه به دلیل استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی CFSV2 در ایران برای مطالعات محلی از دقت کافی برخوردار نیستند، اما در مطالعات مناطق با وسعت بالا یا جهانی نتایج قابل قبولی به دست می‌دهند. ابزار METRIC و مدل METRIC خودکار بیشترین همبستگی (R²=0.99) و نزدیکی عددی را با یکدیگر داشتند و به ترتیب با RMSE ۰.۳۳ و ۰.۳۹ دقت بالاتری نسبت به مدل SEBAL خودکار دارند.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج عددی رویکرد انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم می‌تواند دقت مشابهی در مقایسه با ابزار METRIC داشته باشد. بدین ترتیب رویکرد خودکار کارایی مدل را از نظر زمان و بازده افزایش و می‌تواند خطای انسانی در تخمین تبخیر و تعرق را برای کاربران جدید یا بی‌تجربه کاهش دهد و این مدل‌ها را در دسترس عموم کاربران قرار دهد. همچنین داده‌های EEFLUX می‌توانند در مطالعات با وسعت بالا برای اقدامات مدیریتی کارایی لازم را داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، تبخیر و تعرق، سبال، متریک، سامانه EEFLUX

استناد: هاشمی، ف. و ولدان‌زوج، م.ج.، یوسفی، ف.، مقایسه روش‌های سنجش از دور برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه با استفاده از تصاویر چندطیفی لندست ۸، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳: ۱۹-۴۲.



۱- مقدمه

امنیت غذایی که یکی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل است، افزایش تولید پایدار کشاورزی و کاهش هدررفت مواد غذایی را شامل می‌شود. به دلیل افزایش جمعیت، تولید جهانی غذا باید ۵۰ درصد افزایش یابد تا پاسخگوی نیاز جمعیت جهانی تا سال ۲۰۵۰ باشد (Chakraborty & Newton, 2011). با وجود گسترش مناطق کشاورزی، به دلیل مدیریت نادرست منابع، همچنان امنیت غذایی در کشورهای در حال توسعه مشکلی جدی تلقی می‌شود (Calzadilla et al., 2013). از جمله شاخص‌های مهم در مبحث امنیت غذایی، آبیاری زمین‌های کشاورزی است. سنجش از دور امکان نظارت بر آبیاری در مقیاس‌های بزرگ را فراهم می‌آورد. خارج شدن آب بر اثر ترکیب دو فرایند مجزای تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه تبخیر و تعرق (ET)^۱ نامیده می‌شود. مدیریت صحیح آبیاری به داشتن دانش دقیق از تبخیر و تعرق واقعی محصول (ET_a) که بیانگر میزان آب مصرفی از سطح زراعی برحسب میلی‌متر است، متکی است (Allen et al., 1998). باین حال، تخمین ET_c ساده نیست و برآورد دقیق آن مستلزم روش‌های پیچیده و داده‌های آب‌وهوایی دقیق است (Thorp et al., 2019). به همین دلیل استفاده از مدل‌ها به جای اندازه‌گیری‌های میدانی، به‌ویژه در مطالعات با وسعت مکانی بالا توصیه می‌شود (Ramírez-Cuesta et al., 2020). روش تبخیر و تعرق مرجع (ET₀) FAO56-ضریب محصول (Allen et al., 1998) به دلیل سادگی یکی از پرکاربردترین مدل‌هاست. باین حال، این مدل‌ها تنوع مکانی ET_a را در نظر نمی‌گیرند و برای برآورد دقیق ET_a با چالش روبه‌رو می‌شوند. برای رفع این محدودیت، پژوهشگران روش FAO-56 را با فناوری‌های سنجش از راه دور ادغام کرده تا نقشه‌های ET با توزیع مکانی ایجاد کنند (Ramírez-Cuesta et al., 2019). برآورد ET مبتنی بر سنجش از دور از دهه ۱۹۸۰ آغاز شده و شامل مدل‌های مختلفی است که بر مبنای

مدل‌های بیلان انرژی تخمینی از ET_a را ارائه می‌دهند (Santos et al., 2008). مزیت روش بیلان انرژی این است که می‌توان از آن برای تعیین کمیت ابعاد مزارع آبیاری و آب مصرفی، بدون مراجعه به منبع آب استفاده کرد (Senay et al., 2007). ET از طریق شار گرمای نهان در معادله بیلان انرژی برآورد می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل TSEB^۲ (Norman et al., 1995)، SEBAL^۳ (Bastiaanssen et al., 1998)، S-SEBI^۴ (Roerink et al., 2000)، SEBS^۵ (Su, 2002) و METRIC^۶ (Allen et al., 2007) اشاره کرد. در برخی مطالعات به مقایسه دقت این مدل‌ها با یکدیگر پرداخته شده است (Eswar et al., 2017; Wagle et al., 2017). تاکنون از روش‌ها و سنجنده‌های مختلفی برای تخمین ET در مقیاس منطقه‌ای و جهانی استفاده شده است. انتخاب روش و نوع سنجنده به میزان داده‌های مورد نیاز، دسترسی به تصاویر سنجنده، اندازه منطقه مورد مطالعه و اهداف مطالعه بستگی دارد. با توجه به قدرت تفکیک مکانی و زمانی قابل قبول سنجنده Landsat، رایگان بودن این داده‌ها و داشتن دو باند حرارتی برخلاف سنجنده Sentinel-2 این سنجنده همچنان در تعیین ET مورد توجه مطالعات است (Wang et al., 2022; Derakhshandeh & Tombul, 2022; Mondal et al., 2021; Sobrino et al., 2021; Laipelt et al., 2021). ناپیر و همکاران (Knipper et al., 2019) بر اساس LST حاصل از تصاویر ماهواره‌های MODIS و Landsat 8 اقدام به استخراج نقشه‌های ET و عامل تنش رطوبت، یعنی نسبت ET واقعی به مرجع (fRET)، برای محاسبه آب مصرفی محصول و شناسایی تنش در باغ‌های انگور کردند. از مدل بیلان انرژی ALEXI/disALEXI بدین منظور استفاده شد.

1. Evapotranspiration

۲. بیلان انرژی دومنبعی
۳. الگوریتم بیلان انرژی سطح
۴. شاخص بیلان انرژی سطح ساده‌شده
۵. سیستم بیلان انرژی سطح
۶. نقشه‌برداری تبخیر و تعرق با کالیبراسیون درونی

و ۷ تصویر Landsat 7 در GEE¹ که در بخش مواد و روش‌ها معرفی می‌شود، استفاده شد. ارزیابی براساس اندازه‌گیری‌های شار توسط سیستم گردابی کوواریانس انجام شد. نتایج آماری مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده با مدل SEBS و METRIC-EEFlux به ترتیب ۰.۷ و ۱.۱۳ میلی‌متر در روز و ضریب همبستگی ۰.۵۹ و ۰.۶۵ به دست آمد که بیانگر توافقات معقول از نظر روند و مقادیر است. مدل QWater به خوبی عمل نکرد و ضعیف‌ترین همخوانی ($R^2 = 0.08$) را با تخمین‌های ET زمینی نشان داد. در مطالعه ساها و همکاران (Saha et al., 2022)، پیاده‌سازی خودکار مدل‌های SEBAL و METRIC با نام LandMODET mapper با استفاده از تصاویر Landsat-4-5 TM، DEM، داده‌های آب‌وهوای MERRA-2 آزمایش شده است. ET این دو مدل با مقادیر تشت تبخیر و روش Penman-Monteith مقایسه شد. نتایج حاصل از SEBAL و METRIC تفاوت‌هایی را در برآورد ET نشان می‌دهد که احتمالاً به دلیل تفاوت در محاسبه گرمای محسوس و مفروضات SEBAL و METRIC در برون‌یابی ET آبی به ET روزانه است. این مطالعه پتانسیل این دو مدل را برای تخمین ET از تصاویر Landsat و داده‌های آب‌وهوای Merra-2 نشان می‌دهد. علاوه بر مطالعات یادشده در پژوهش‌های جدید بسیاری نیز (Shamloo et al., 2021; Jawad, & Mohamed, 2020; Tian et al., 2020) روش Penman-Monteith را به‌خصوص در صورت دسترسی نداشتن به اندازه‌گیری‌های زمینی و داده‌های گران لایسیمتر برای ارزیابی ET برآوردشده، استفاده کرده‌اند.

باتوجه به کاربرد وسیع تبخیر و تعرق واقعی گیاه در مدیریت آبیاری و منابع آبی لازم است تمرکز بر روش‌های سریع و کاربرپسندانه برآورد ET_a افزایش

باند‌های حرارتی Landsat 8 با رزولوشن مکانی ۱۰۰ متر و الگوریتم DMS به رزولوشن باند‌های مرئی این سنجنده (۳۰ متر) رسید. با به‌کارگیری الگوریتم TIMESAT بر روی محصول چهارروزه MCD15A3، LAI روزانه MODIS تولید شد. به‌منظور رسیدن به رزولوشن مکانی ۳۰ متر و زمانی بالا (روزانه)، با استفاده از STARFM، نقشه‌های ET این دو سنجنده با یکدیگر تلفیق شدند. در نهایت مقایسه با داده‌های هواشناسی نشان داد که مدل از عملکردی مناسب با میانگین خطای مطلق ۰.۶ میلی‌متر در روز برخوردار است.

کمالی و نظری (Kamali & Nazari, 2018) با استفاده از تصاویر Landsat 8 و مدل SEBAL نیاز آبی ذرت استان مازندران را مطالعه کردند. برای ارزیابی مدل، ET_0 در زمان گذر ماهواره با استفاده از داده‌های اقلیمی و روش FAO-Penman-Monteith محاسبه شد. با تقسیم ET ذرت به ET_0 ، مقدار K_c ذرت به دست آمد. RMSE برای مقایسه نتایج مدل SEBAL، با مقادیر RB، NWD و FAO، به ترتیب ۰.۷۳، ۱.۳۸ و ۰.۷۴ میلی‌متر در روز به دست آمد. قادری و همکاران (Ghaderi et al., 2020) با استفاده از ۷ تصویر Landsat 8 و مدل SEBAL، ET گندم زمستانه در استان ایلام را برآورد و نیاز گیاه به آبیاری را در طول فصل رشد آن بررسی کردند. ارزیابی برآورد ET در این مدل، با روش FAO-Penman-Monteith انجام شد و نشان داد که SEBAL برای تخمین ET از دقت کافی برخوردار است. ارزیابی این مطالعه با محاسبه خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین درصد مطلق خطا (MAPE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و ضریب همبستگی انجام شد.

نیسا و همکاران (Nisa et al., 2021) سه مدل SEBS، QWaterModel و METRIC-EEFlux را برای تخمین ET روزانه در محصولات رازبانه، ذرت، علوفه و شبدر در جنوب ایتالیا به کار بردند. ۳۶ تصویر Landsat 5

1. Google Earth Engine

۱-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مزرعه آموزشی- پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با مساحت حدود ۲۰۶ هکتار واقع در مهرشهر کرج با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه شرقی با ارتفاع ۱۱۶۰ متر از سطح دریاست. با توجه به اندازه پیکسل ۳۰ متری سنجنده Landsat 8 منطقه مورد مطالعه حدود ۲۳۰۰ پیکسل از تصویر را پوشش می‌دهد. شهرستان کرج دارای آب‌وهوای نیمه‌بیابانی و خشک در تابستان و سرد در زمستان است. شکل ۲ محدوده این زمین‌ها را نشان می‌دهد. سیستم آبیاری سنتریپوت است و از مهر تا آبان ۱۴۰۰ در چند تاریخ مختلف گندم و جو کاشته شده است.

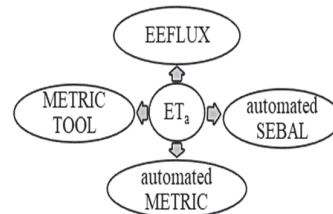
۲-۲- داده‌ها

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Landsat 8 در برآورد ET استفاده شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از تصویر Landsat 8 با رنگ واقعی را در تاریخ ۶ دی ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. این سنجنده به دلیل داشتن دو باند حرارتی برخلاف سنجنده Sentinel-2 و همچنین پیکسل ۳۰ متری، امکان نقشه‌برداری ET را در مقیاس میدانی فراهم می‌کند، به همین دلیل داده‌های Landsat به‌طور گسترده‌ای در مدیریت منابع آب استفاده می‌شود. برای رسیدن به این دقت مکانی باند حرارتی سنجنده (رزولوشن مکانی ۱۰۰ متر) با باندهای چندطیفی ۳۰ متری بازنمونه‌برداری^۱ Bilinear می‌شود. جدول ۱ شامل داده‌های سنجش از دور و توان تفکیک مکانی مورد نیاز آن‌ها برای ورود به مدل است. و از تاریخ تصاویر Landsat 8 استفاده شده است. تاریخ‌های پیاده‌سازی مربوط به طول دوره رشد گندم زمستانه است.

یابد. مثلاً با ارتقای مدل‌های خودکار، امکان پایش و مدیریت آب مصرفی مزارع توسط مسئولان و کارشناسان بدون داشتن دانش تخصصی در زمینه سنجش از دور فراهم می‌شود. در این مطالعه همچنین دقت داده‌های EEFLUX برای پایش زمین‌های کشاورزی در مناطق وسیع بررسی می‌شود. در ادامه درباره منطقه مورد مطالعه، داده‌های مورد استفاده، مفاهیم مدل‌های سنجش از دور برآورد ET_a همراه با روندنمای مراحل پیاده‌سازی بحث خواهد شد. سپس خروجی‌های هر مدل نمایش داده و ارزیابی و مقایسه خواهد شد. بخش نهایی شامل بحث و بررسی و نتیجه‌گیری است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ضمن معرفی منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده، درباره مفاهیم روش‌های سنجش از دور برآورد ET_a، یعنی سامانه EEFLUX، METRIC TOOL و روش انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم دو مدل METRIC و SEBAL بحث خواهد شد (شکل ۱). ارزیابی این مطالعه با در نظر گرفتن ET_r روش-FAO 56 به‌عنوان مرجع مقایسه با مقدار این پارامتر در روش‌های یادشده انجام خواهد شد.



شکل ۱. مفاهیم کلی تحقیق

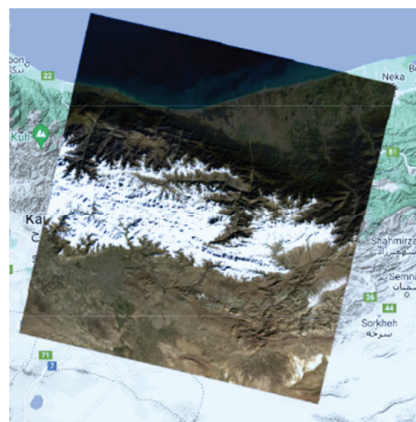
1. resample



شکل ۲. منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. داده‌های سنجش از دور مورد استفاده و تاریخ‌های پیاده‌سازی

داده سنجش از دور	Landsat 8	مدل رقومی ارتفاعی (SRTM)	نقشه کاربری زمین	ماسک ابر و سایه	نقشه خاک
قدرت تفکیک مکانی	۳۰ متر	۳۰ متر	۳۰ متر	۳۰ متر	۲۵۰ متر
تاریخ گذر ماهواره					
۱۴۰۰ دی ۶	۱۴۰۰ بهمن ۲۴	۱۴۰۰ اسفند ۱۰	۱۴۰۰ اسفند ۲۶	۱۴۰۱ فروردین ۲۹	۱۴۰۱ اردیبهشت ۳۰



شکل ۳. نمونه تصویر با رنگ واقعی Landsat 8

۲-۲-۱- داده‌های هواشناسی

برای ایجاد مدل‌ها داده‌های جدول ۲ به صورت ساعتی و روزانه مورد نیاز است. از آنجاکه داده‌های تابش ایستگاه‌های سینوپتیک ایران فقط به صورت روزانه موجود است، از داده‌های تابش ساعتی رایگان سنجنده MERRA-2 استفاده شد. عهده‌دار این پایگاه داده اداره کل ملی هوانوردی و فضا (NASA) است. MERRA-2 شامل مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکی از جمله تابش خورشیدی جهانی است. تابش خورشیدی در این سنجنده از ترکیب اندازه‌گیری‌های پیرانومتر و ادغام داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های انتقال تشعشعی ایجاد می‌شود (Razagui et al., 2021). طبق مطالعه خطی و همکاران داده‌های تابش و دمای این ماهواره با داده‌های هواشناسی زمینی همبستگی بالایی دارند (Khatibi et al., 2021). تبدیل داده‌های سه‌ساعته هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک به ساعتی با استفاده از درون‌یابی مقادیر انجام شد.

۲-۲-۲- نقشه کاربری زمین NLCD

پایگاه داده ملی پوشش زمین (NLCD)^۱، شامل محصولات پوشش زمین و تغییرات آن با وضوح مکانی ۳۰ متر ۵۰ ایالت متحده آمریکا است. آخرین نسخه آن یعنی NCLD 2019، شامل ۲۸ محصول مختلف پوشش زمین و تغییرات آن، نفوذناپذیری شهری و تغییرات، تاج پوشش و تغییرات آن، مناطق بوته‌ای و علفزار غربی ایالات متحده، یک لایه انرژی باد و یک شاخص تغییر پوشش زمین است (Wickham et al., 2013). از آنجاکه ابزار METRICTOOL طبق چارچوب NLCD نوشته

شده است، لازم است نقشه کاربری زمین ایران مطابق با کلاس‌های NLCD تولید شود. چندین الگوریتم یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی تصاویر پیشنهاد شده است. در این میان الگوریتم جنگل تصادفی (RF) و ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) به دلیل پیچیدگی محاسباتی کمتر و تفسیرپذیری بیشتر مورد توجه بوده‌اند (Sheykhmousa et al., 2020; Zagajewski et al., 2021; Dang et al., 2021; Mountrakis et al., 2011). SVM یک رویکرد ناپارامتریک جدید برای یافتن توابع متمایز خطی پیشنهاد می‌دهد و سعی می‌کند بین هر جفت از کلاس‌ها یک ابرصفحه منحصر به فرد پیدا کند. ابرصفحه بهینه فقط برای اطمینان از جداسازی بدون خطای دو نوع نمونه نیست، بلکه باید بزرگ‌ترین فاصله کلاس یا حاشیه را نیز ایجاد کند (Zhang, 2012). طبقه‌بندی‌کننده جنگل تصادفی نیز از ترکیبی از طبقه‌بندی‌کننده‌های درختی تشکیل شده است که در آن هر طبقه‌بندی‌کننده از یک بردار تصادفی که مستقل از بردار ورودی نمونه‌برداری شده، تولید می‌شود و هر درخت برای طبقه‌بندی بردار ورودی، رأی واحدی به محبوب‌ترین کلاس می‌دهد (Breiman, 1999). طراحی درخت تصمیم‌گیری مستلزم انتخاب یک معیار انتخاب ویژگی و یک روش هرس است. متداول‌ترین معیارهای انتخاب ویژگی در استنتاج درخت تصمیم‌گیری، معیار به دست آوردن اطلاعات (Quinlan, 1993) و شاخص جینی (Breiman et al., 1984) است. در این مطالعه نقشه کاربری در سامانه Google Earth Engine و با داده‌های آموزشی و تست حاصل از تصویر وضوح مکانی بالا موجود در

جدول ۲. داده‌های هواشناسی مورد استفاده

داده هواشناسی واحد	دما °C	بارش mm	سرعت باد m/s	تابش خورشیدی W/m ²	ساعت آفتابی h	رطوبت نسبی %	فشار بخار kpa	نقطه شبنم °C	ET ₀ mm/h	ET _r mm/h
--------------------	--------	---------	--------------	-------------------------------	---------------	--------------	---------------	--------------	----------------------	----------------------

1. National Land Cover Database

$$\lambda LE = (R_n - G - H) \quad (1)$$

که در آن R_n شار تابش خالص ($W m^{-2}$)، G شار حرارتی محسوس هدایت‌شده به خاک ($W m^{-2}$) و H شار حرارتی محسوس هدایت‌شده به هوا ($W m^{-2}$) است. مقادیر سمت راست معادله (1) عموماً با استفاده از ترکیبی از تصاویر حرارتی و موج کوتاه به‌راحتی تخمین زده می‌شوند. R_n نشان‌دهنده انرژی تابشی موجود برای سایر اجزای توازن انرژی است و براساس توازن بین شار تابشی ورودی و خروجی تعیین می‌شود (Allen et al., 2007a):

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

رابطه (2) $R_{L\downarrow}$ و $R_{s\downarrow}$ به ترتیب اجزای تابش موج کوتاه و بلند ورودی ($W m^{-2}$)، α آلبدوی سطح (بدون بعد)، یعنی نسبت شار تابشی منعکس‌شده به شار تابشی ورودی بر طیف خورشیدی، $R_{L\uparrow}$ تابش موج بلند خروجی ($W m^{-2}$) و ε_0 گسیلمندی حرارتی سطح (بدون بعد) است. شار حرارتی خاک G با یک تابع رابطه تجربی (Bastiansen, 2000) با تابش خالص و چند پارامتر سطحی دیگر، مانند albedo دمای سطح و شاخص گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) تعیین می‌شود:

$$R_n = \frac{T_s}{\alpha(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)}(1 - 0.98NDVI^4) \quad (3)$$

T_s دمای سطح برحسب کلوین است که از یک باند حرارتی به دست می‌آید. شار حرارتی محسوس (H) نشان‌دهنده شار حرارتی رسانا از سطح به اتمسفر است که ناشی از اختلاف دمای هوا بین دو ارتفاع مرجع نزدیک به سطح است (Brutsaert & Sugita, 1992):

$$H = \rho C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (4)$$

که ρ چگالی هوا ($kg m^{-3}$)، C_p گرمای ویژه هوا در یک فشار ثابت ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$)، r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال حرارت ($s m^{-1}$) و dT اختلاف دما (K) بین دو ارتفاع نزدیک سطح (معمولاً ۰.۱ و ۲ متر بالاتر از صفحه جابه‌جایی صفر) است.

سامانه و با استفاده از طبقه‌بندی‌کننده‌های SVM و RF تولید شد.

۲-۲-۳- سامانه Google Earth Engine

Google Earth Engine یک پلتفرم ابری ذخیره و پردازش مجموعه‌های عظیم داده (در مقیاس پتابایت) برای تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری نهایی است (Kumar & Mutanga, 2018). پس از رایگان شدن داده‌های Landsat در سال ۲۰۰۸، گوگل تمام آن‌ها را بایگانی و برای استفاده متن‌باز به موتور محاسبات ابری مرتبط کرد. آرشیو فعلی داده‌ها شامل تصاویر ماهواره‌های دیگر و همچنین داده‌های برداری مبتنی بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، آب‌وهوا، مدل‌های رقومی ارتفاعی و اقلیمی است. از جمله مزیت‌های GEE عبارت است از: دسترسی آسان و کاربرپسند و رفع نیاز به رایانه‌های با قدرت پردازش و حافظه بالا (Mutanga & Kumar, 2019).

۲-۳-۲- مفاهیم مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق

در این بخش به مفاهیم و معادلات لازم دو مدل پرکاربرد SEBAL و METRIC در برآورد تبخیر و تعرق واقعی پرداخته و همچنین تفاوت این دو الگوریتم بیان خواهد شد.

۲-۳-۱-۱- مدل SEBAL

الگوریتم توازن انرژی سطح زمین یا SEBAL یک روش تخمین ET_a مکانی مبتنی بر توازن انرژی و سنجش از دور ماهواره‌ای است که بین شار حرارتی محسوس و گرمای نهان شار تبخیر تقسیم می‌شود (Sun et al., 2011). SEBAL یک توازن کامل بین تشعشع و انرژی را همراه با مقاومت‌های حرکت، گرما و بخار آب برای هر پیکسل محاسبه می‌کند. ET برحسب شار گرمای نهان آنی، $\lambda ET (W m^{-2})$ و به‌عنوان باقی‌مانده معادله توازن انرژی سطح در لحظه عبور ماهواره به‌صورت پیکسل به پیکسل محاسبه می‌شود (Allen et al., 2007a).

۲-۳-۲- مدل METRIC

دانشگاه آیداهو ایالات متحده آمریکا براساس الگوریتم SEBAL (Bastiansen et al., 1998)، مدلی برای تخمین ET به نام METRIC ارائه کرده است (Allen et al., 2007a). در METRIC، ET توسط ماهواره Landsat از طریق محاسبه انرژی موجود با استفاده از دمای سطح زمین (T_s) حاصل از باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای، برای محدود کردن شار گرما برای یک یا چند لایه (تاج پوشش و خاک) و سپس محاسبه گرمای نهان به‌عنوان باقی‌مانده تعادل انرژی سطح محاسبه می‌شود (Zhang et al., 2015). به عبارت دیگر، انرژی استفاده‌شده در فرایند ET باقی‌مانده از معادله SEBAL در نظر گرفته می‌شود. تفاوت عمده بین این دو الگوریتم آن است که λLE در پیکسل سرد برابر با انرژی موجود در SEBAL (یا $H = 0$) است، در حالی که در METRIC پیکسل سرد ۵٪ بیشتر از ET مرجع یونجه در نظر گرفته می‌شود (Allen et al., 2007b). محاسبه λLE و R_n و H مدل METRIC مانند معادلات (۱)، (۲) و (۴) در مدل SEBAL است. G در METRIC با استفاده از معادله تجربی توسعه‌یافته در (Tasumi, 2003) محاسبه می‌شود. LAI در این معادله شاخص سطح برگ است.

$$G = R_n(0.05 + 0.18e^{-0.521LAI}) \quad LAI \geq 0.5$$

$$G = R_n \left(0.084 + \frac{1.80(T_s - 273.16)}{R_n} \right) \quad LAI \leq 0.5$$

رابطه (۸)

هنگامی که تمام اجزای معادله (۶) تعیین شود، ET در زمان اخذ تصویر ماهواره‌ای (ET_{inst}) در سطح پیکسل با تقسیم λLE از معادله (۱) بر چگالی آب ρ_w ، 1000 kg m^{-3} و گرمای نهان تبخیر (λ , J kg^{-1}) محاسبه می‌شود. ثابت ۳۶۰۰ ضریب تبدیل از ثانیه به ساعت است (Ramírez-Cuesta et al., 2020).

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad \text{رابطه (۹)}$$

ET آنی به شاخصی به نام کسر ET_r یا ET_{rf} تبدیل می‌شود. ET_{rf} امکان تبدیل اطلاعات لحظه‌ای ET را

به‌عنوان یک تابع خطی از T_s محاسبه می‌شود که باستانسن در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد کرده است (Bastiansen et al., 1998).

$$dT = a + bT_s \text{ datum} \quad \text{رابطه (۵)}$$

تعریف ضرایب a و b مستلزم انتخاب دو پیکسل بیانگر شرایط شدید دما و رطوبت است که پیکسل‌های سرد و گرم نامیده می‌شوند. پیکسل سرد سطح محصول به‌خوبی آبیاری شده با پوشش کامل و دمای سطح (T_s) نزدیک به دمای هوا (T_a) است. پیکسل گرم یک زمین کشاورزی بدون محصول و خشک است که λET صفر در نظر گرفته می‌شود. شار گرمای نهان لحظه‌ای، یعنی λET ، از باقی‌مانده معادله توازن انرژی به دست می‌آید و سپس برای محاسبه کسر تبخیری آنی Λ استفاده می‌شود (Bastiansen et al., 1998).

$$\Lambda = \frac{\lambda LE}{\lambda LE + H} = \frac{\lambda LE}{R_n - G_0} \quad \text{رابطه (۶)}$$

کسر تبخیری آنی Λ ، نسبت تبخیر واقعی به تقاضای محصول را در زمانی که رطوبت جو با رطوبت خاک در تعادل است، بیان می‌کند. چندین مطالعه (Crago, 2004; Farah, 2001; Farah et al., 1996) نشان دادند که در طول روز، مقادیر Λ تقریباً طی زمان ثابت‌اند که امکان استفاده از آن را به‌عنوان یک پارامتر با ادغام زمانی فراهم می‌کند. برای مقیاس‌های زمانی یک‌روزه یا بیشتر، می‌توان G را نادیده گرفت. بدین ترتیب انرژی خالص موجود ($R_n - G$) به تابش خالص (R_n) کاهش می‌یابد. در مقیاس زمانی روزانه، ET_{24} (میلی‌متر در روز) را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد (Bastiansen et al., 1998).

$$ET_{24} = \frac{86400 \times 10^3}{\lambda \rho_w} \Lambda R_{n24} \quad \text{رابطه (۷)}$$

R_{n24} میانگین تابش خالص ۲۴ ساعت، λ گرمای نهان تبخیر و ρ_w (kg m^{-3}) چگالی آب است.

albedo و زبری سطح استفاده می‌کند. در EEFlux، ET_r با استفاده از گیاه مرجع یونجه «بلند» مانند آنچه در معادله استاندارد ASCE Penman-Monteith تعریف شده است، محاسبه می‌شود (Allen et al., 2015).

۲-۴-۲- تعیین تبخیر و تعرق تصاویر Landsat مدل METRIC با استفاده از ابزار METRICTOOL

METRIC-GIS، یک ابزار جدید در ArcGIS براساس مدل METRIC است. این ابزار پیش‌پردازش و شناسایی خودکار کالیبراسیون بالقوه و معرفی داده‌های ورودی را تسهیل کرده، زمان محاسبات را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد و جایگزینی کاربرپسندتر از سایر پلتفرم‌های موجود پیاده‌سازی مدل METRIC است. METRIC-GIS با استفاده از زبان ArcPy ایجاد شد (Ramirez-Cuesta et al., 2020). شکل ۴ مراحل کلی کار با این ابزار را نشان می‌دهد. داده‌های هواشناسی ورودی به مدل مربوط به روز گذر ماهواره و روز قبل و به‌صورت ساعتی است. مدل درون‌یابی این داده‌ها را در زمان گذر ماهواره انجام خواهد داد. از آنجاکه METRICTOOL مطابق کلاس‌های نقشه NLCD نوشته شده، لازم است برای ایران یک نقشه کاربری مطابق کلاس‌های NLCD تولید شود.

روش خودکار انتخاب پیکسل سرد و گرم در مدل SEBAL و METRIC

تمرکز این بخش، کاربرد الگوریتم جست‌وجوی جامع (ESA) در بهینه‌سازی فرایند انتخاب پیکسل‌های عضو انتهایی مدل SEBAL و METRIC است. ESA یک روش بهینه‌سازی ساده است که در آن همه نامزدهای ممکن به‌طور نظام‌مند در نظر گرفته و بررسی می‌شوند تا مشخص شود که آیا راه‌حل تعریف‌شده برآورده شده است یا خیر (Bhattarai et al., 2017). رویکردهای ESA در طیف وسیعی از مسائل مانند توسعه یک مدل پارامترسازی استخراج ویژگی‌های حمل‌ونقل (Hodgson et al., 2004) و در یک مدل کالیبراسیون خودکار برای تشخیص تغییرات باینری (Im & Hodgson et al., 2009) کاربرد

به‌صورت روزانه یا ماهانه فراهم می‌کند. ET_rF در سنجش از دور مشابه «ضریب محصول» است که به‌طور سنتی استفاده می‌شود (Allen et al., 2007a).

$$ET_rF = \frac{ET}{ET_r} \quad (10)$$

ET_r تبخیر و تعرق مرجع یونجه است که در انجمن مهندسان عمران آمریکا تعریف و از داده‌های آب‌وهوا محاسبه شده است (Tasumi et al., 2005). ET ماهانه یا فصلی با معکوس کردن معادله (۱۰) به شکل $ET = ET_rF \times ET_r$ با درون‌یابی مقادیر ET_rF برای روزهای مابین تصاویر ماهواره‌ای و ET_r حاصل از داده‌های آب‌وهوایی تخمین زده می‌شود (Allen et al., 2007a).

۲-۴-۳- روش‌های سنجش از دوری برآورد تبخیر و تعرق

با توجه به دلایل یادشده در مقدمه، افزایش نیاز به مدیریت آبیاری کشاورزی ازسوی عموم کاربران، مستلزم تمرکز مطالعات بر الگوریتم‌ها و ابزارهای کاربرپسند و خودکار است. لذا در این بخش محصولات تبخیر و تعرق سامانه EEFLUX، ابزار METRICTOOL و روش خودکار انتخاب پیکسل‌های سرد و گرم معرفی و در بخش آتی پیاده‌سازی و بررسی می‌شود.

۲-۴-۱- محصولات تبخیر و تعرق سامانه EEFLUX

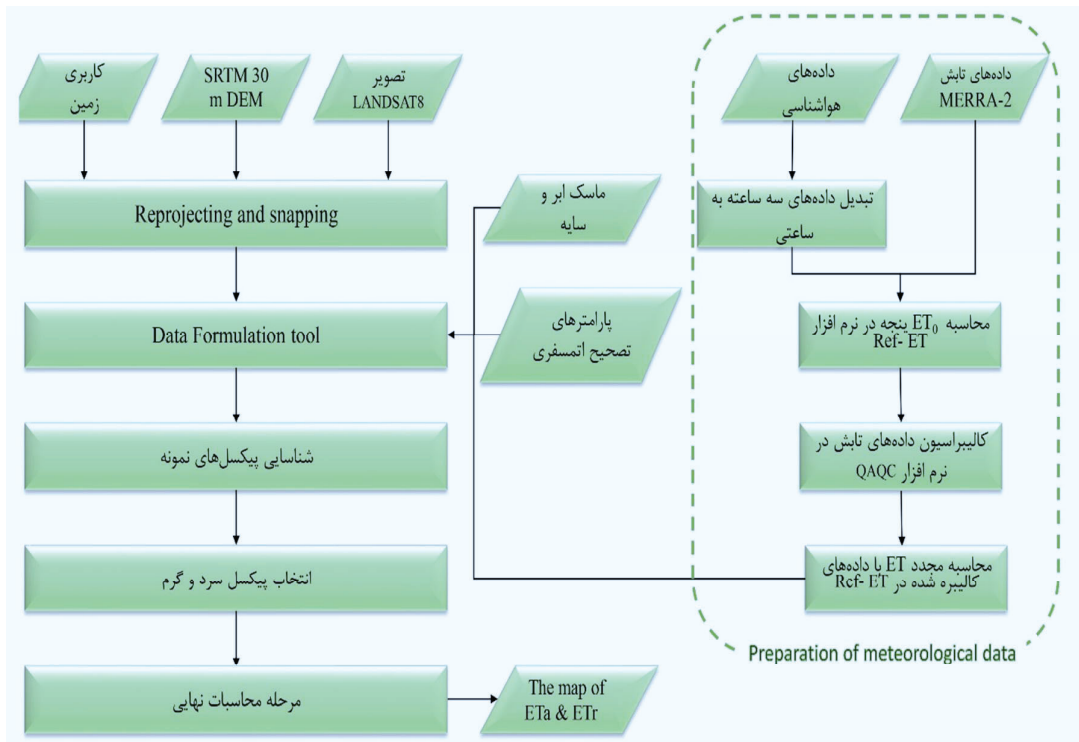
Earth Engine Evapotranspiration Flux یا به‌اختصار EEFLUX نسخه‌ای از مدل METRIC است که بر روی سیستم موتور Google Earth کار می‌کند. این سامانه در دانشگاه نبراسکا - لینکلن، مؤسسه تحقیقات دیزرت و دانشگاه آیداهو با حمایت مالی گوگل توسعه یافته است. EEFlux صحنه‌های منفرد تصاویر Landsat را از سال ۱۹۸۴ تاکنون و تقریباً برای هر منطقه روی کره زمین پردازش می‌کند. این سامانه از داده‌های آب‌وهوایی NLDAS در ایالات متحده و داده‌های CFSV2 در سطح جهانی استفاده می‌کند. ET واقعی باقی‌مانده معادله (۱) خواهد بود. EEFlux از باند حرارتی Landsat در معادله تعادل انرژی سطح و از باندهای موج کوتاه برای تخمین مقادیر پوشش گیاهی،

دارد. روش خودکار پیشنهادی (شکل ۵) دارای دو مرحله اساسی است: (۱) ایجاد یک نقشه باینری از پیکسل‌های واجد شرایط که با استفاده از یک طبقه‌بندی کننده ساده مبتنی بر قانون شناسایی می‌شوند، و (۲) استفاده از ESA برای شناسایی پیکسل‌های گرم و سرد، مطابق معیارهای تعریف شده (Bhattarai et al., 2017).

۴-۲-۴- ارزیابی دقت

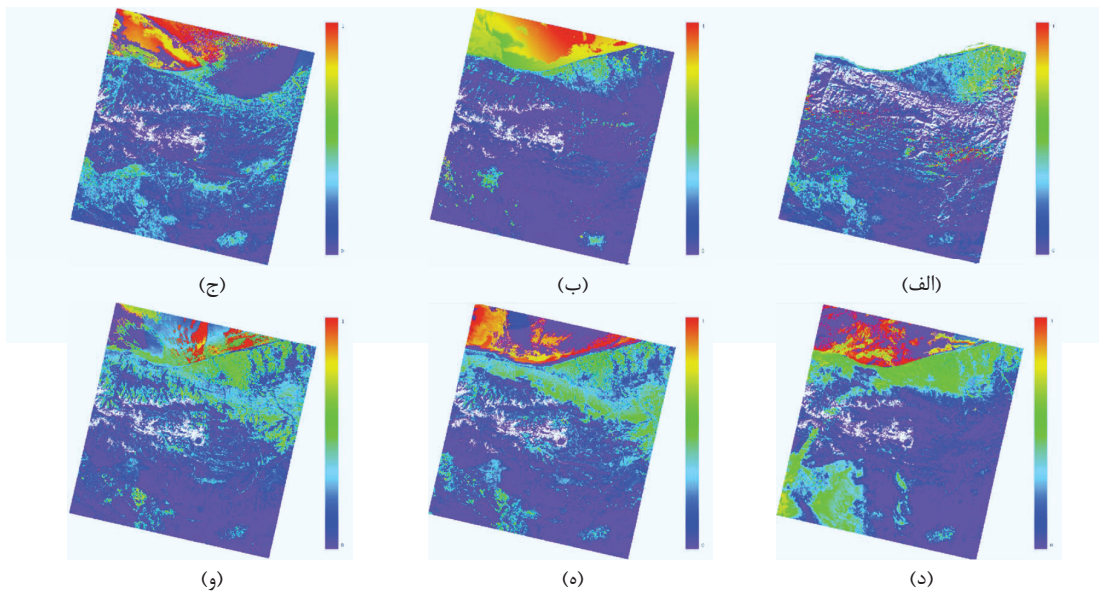
برای ارزیابی مدل از معیار آماری خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد. RMSE به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (11) \text{ رابطه}$$

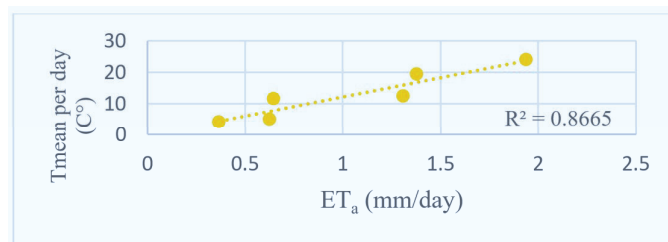


شکل ۴. روندنمای کار با ابزار METRICTOO

1. overall accuracy



شکل ۶. ET_a سامانه EEFLUX در تاریخ‌های (الف) ۶ دی ۱۴۰۰؛ (ب) ۲۴ بهمن ۱۴۰۰؛ (ج) ۱۰ اسفند ۱۴۰۰؛ (د) ۲۶ اسفند ۱۴۰۰؛ (ه) ۲۹ فروردین ۱۴۰۱؛ (و) ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱



شکل ۷. ارتباط بین ET_a و دما

با استفاده از داده‌های تست دقت کلی SVM ۰.۶۴۰۹٪ و RF ۰.۸۳۶۹٪ به دست آمد. بنابراین روش RF برای ورودی ابزار METRIC استفاده شد. تصویر DEM و نقشه طبقه‌بندی باید دارای وضوح و مشخصات مکانی یکسان با تصاویر Landsat باشند. بنابراین لازم است عملیات تبدیل سیستم مختصات شبکه‌ای^۱ این تصاویر با تصویر Landsat و یکسان‌سازی موقعیت پیکسل‌ها^۲ انجام شود. برای این منظور در تصویر DEM نمونه‌برداری Bilinear با تبدیل rigorous و برای نقشه کاربری زمین نمونه‌برداری نزدیک‌ترین همسایگی با تبدیل rigorous استفاده شد.

1. reprojection

2. snapping

۲-۳- پیاده‌سازی ابزار METRICTOOL

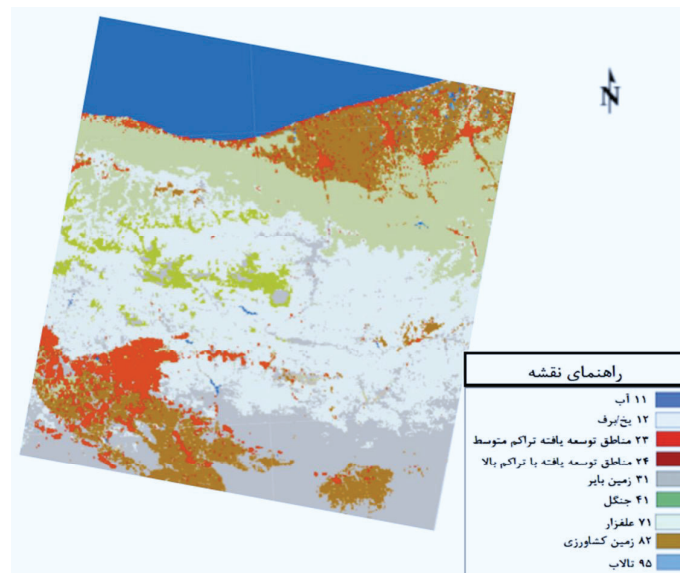
با استفاده از سامانه GEE و روش‌های SVM و RF بر تصاویر Landsat 8 در بازه زمانی مه ۲۰۲۰ تا سپتامبر ۲۰۲۱ (تصویر ۱۲۲) با درصد ابر کمتر از ۲ و ایجاد تصویر میانه، نقشه کاربری زمین ایران (شکل ۸) مطابق NLCD تولید شد. طبق جدول ۳ داده‌های آموزشی و تست با استفاده از تصویر وضوح مکانی بالا موجود در سامانه GEE تشکیل شد. جدول ۴ نیز شامل پارامترهای تعریفی برای هر یک از روش‌های SVM و RF، در سامانه GEE است.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به طبقه‌بندی مطابق نقشه NLCD

کد کلاس	۱۱	۱۲	۲۳	۲۴	۳۱	۴۱	۷۱	۸۲	۹۵
نام کلاس	آب	یخ	مناطق توسعه یافته تراکم متوسط	مناطق توسعه یافته تراکم بالا	زمین بایر	جنگل	علفزار	زمین کشاورزی	تالاب
تعداد نمونه‌های آموزشی	۱۲۳	۲۱	۲۵۰	۲۹۰	۲۷۱	۲۱۷	۱۰۵	۲۵۴	۱۲۵
تعداد نمونه‌های تست	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰

جدول ۴. پارامترهای تعریفی طبقه‌بندی SVM و RF در GEE

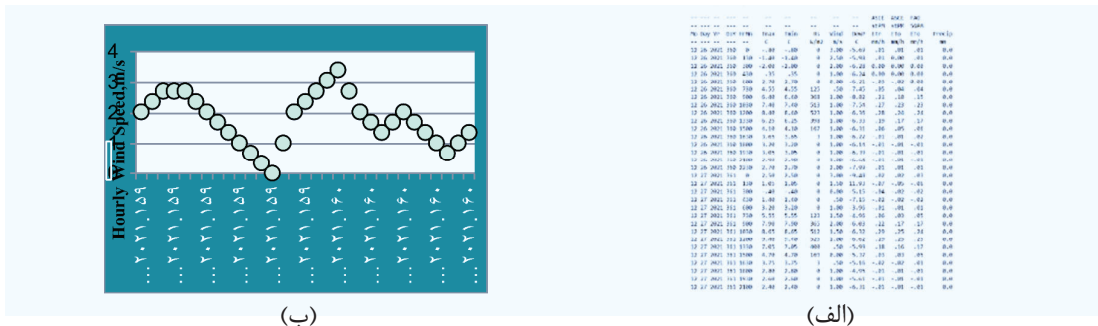
SVM	آرگومان	decisionProcedure	svmType	kernelType	shrinking
	نوع	Voting	C_SVC	LINEAR	true
RF	آرگومان	numberOfTrees	variablesPerSplit	minLeafPopulation	bagFraction
	نوع	۱۵	null	۱	۰.۵



شکل ۸. نقشه کاربری زمین ایران مطابق نقشه NLCD

تبخیر و تعرق با داده‌های سرشکن شده مجدداً در نرم‌افزار Ref-ET حساب می‌شود. شکل ۹ الف نمونه‌ای از داده‌های هواشناسی پردازش شده و آماده برای ورود به ابزار METRICTOOL را نشان می‌دهد. شکل ۹ ب نیز شامل تغییرات سرعت باد رسم شده در نرم‌افزار QAQC طی روز گذر ماهواره و روز پیش از آن را در تاریخ ۶ دی ۱۴۰۰ است.

ET_0 ساعتی با استفاده از داده‌های هواشناسی ذکر شده، به روش ASCE Penman-Monteith Standardized و در نرم‌افزار Ref-ET محاسبه شد. از آنجاکه ایستگاه هواشناسی در محدوده مورد مطالعه است، نیازی به درون‌یابی داده‌های دو ایستگاه هواشناسی نیست. ET خروجی نرم افزار Ref-ET برای سرشکنی داده‌های تابش وارد نرم‌افزار QAQC، سپس



شکل ۹. (الف) نمونه‌ای از داده‌های هواشناسی پردازش‌شده؛ (ب) تغییرات سرعت باد طی دو روز متوالی

صاف، قابلیت انتقال هوا باند باریک در محدوده طیفی باند حرارتی و پارامترهای مربوط به تعادل آب و خاک است. رسترهای خروجی این مدل فرعی عباراتند از: R_{so} ، ضریب انتقال، α ، $NDVI$ ، شاخص اختلاف نرمال‌شده آب (NDWI)، شاخص اختلاف نرمال‌شده برف (NDSI)، LAI ، T_s و ضریب G برای مواد آلی (GxOM).

مرحله دوم الف) شناسایی پیکسل‌های نمونه و ب) نمونه برداری پیکسل‌های شناسایی‌شده: شناسایی پیکسل‌ها یا نقاط پتانسیل برای نمونه برداری استخراچ مقادیر رسترهای DEM، NLCD، قابلیت انتقال، R_{so} ، α ، $NDVI$ ، LAI ، T_s و GxOM در آن نقاط در این مرحله انجام می‌شود.

مرحله سوم محاسبات نهایی: در این مرحله اجزای مختلف تعادل انرژی با استفاده از پیکسل سرد و گرم انتخاب‌شده محاسبه می‌شود. رسترهای خروجی حاصل از این مدل فرعی R_n ، G ، H ، K_c و ET_c هستند.

مرحله چهارم EF Adjustment: در نهایت یک تنظیم کسر تبخیری (EF) را با استفاده از ضرایب Slob سطح سرد و گرم در طول روز و برای دوره‌های ۲۴ ساعته (Allen et al., 2005)، ضریب وزن‌دهی مؤثر طول روز، وزنی که باید به جزء ۲۴ ساعته EF داده شود ایجاد و انجام می‌شود. شکل ۱۰ ET_a ماهواره 8 Landsat برحسب میلی‌متر در روز حاصل از ابزار METRICTOOL را در تاریخ‌های ذکر شده نشان می‌دهد. مشابه با محصول

پارامترهای تصحیح اتمسفری و ماسک ابر: با مراجعه به سایت atmcorr.gsfc.nasa.gov اطلاعات مربوط به زمان تصویر و مختصات مرکز آن وارد و سه پارامتر مقدار تابش عبوری اتمسفری، تابش آسمان رو به پایین، انتقال‌پذیری طول موج بلند در باند حرارتی تعیین می‌شود. ماسک ابر ورودی به مدل یک تصویر باینری بوده که مقادیر صفر بیانگر مناطق بدون ابر یا سایه و مقادیر یک نواحی ابر یا سایه است. با استفاده از سامانه GEE و الگوریتم FMASK ماسک ابر تولید شد. پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی اولیه مدل METRIC، مراحل پیاده‌سازی در این ابزار که شامل چهار مرحله بوده آغاز شد، که توضیحات هر مرحله در ذیل آورده شده است.

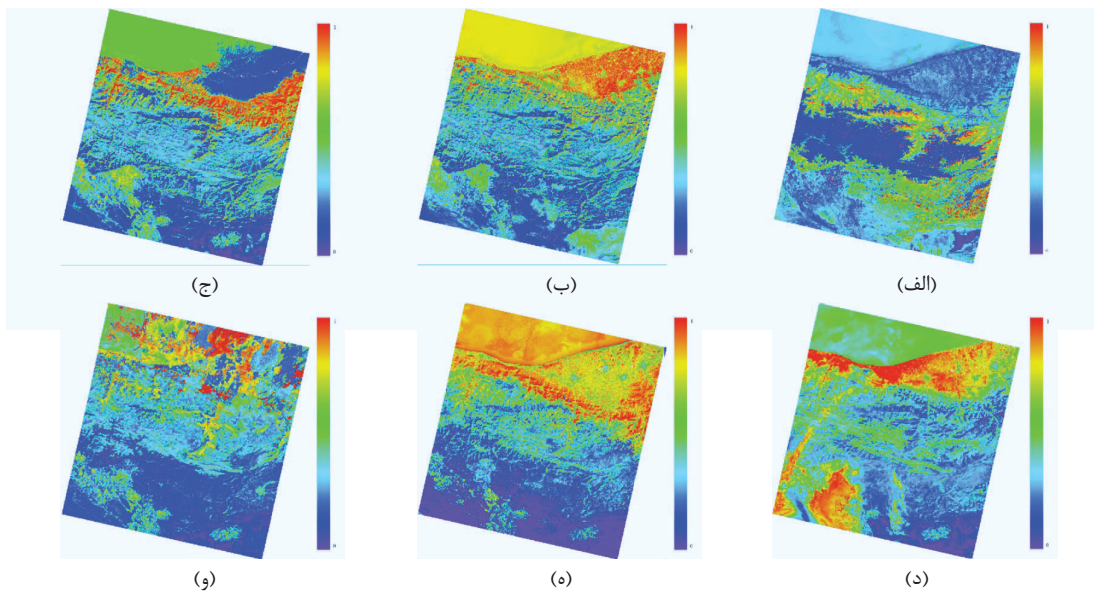
مرحله اول Data formulation: اولین مدل فرعی به نام فرمول‌بندی داده، پارامترهای مورد نیاز برای شناسایی نامزدهای انتخاب پیکسل‌های «لنگر» را محاسبه می‌کند. ورودی‌های مورد نیاز این مدل شامل تصویر Landsat، DEM ۳۰ متری، نقشه کاربری، شیپ فایل محدوده مورد مطالعه، فایل داده هواشناسی شامل داده‌های ساعتی همراه با مختصات و اطلاعات بادسنج و دماسنج ایستگاه، ماسک ابر و سایه، ضریب شفافیت اتمسفر، حداقل مقدار α هنگام دید نادیر ماهواره Landsat، نرخ گذر مسطح و کوهستانی و ارتفاع زمین در نظر گرفته‌شده برای تغییر نرخ گذر، تابش مسیر باند حرارتی، تابش حرارتی باند باریک رو به پایین از آسمان

۳-۳- مدل انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم METRIC و SEBAL

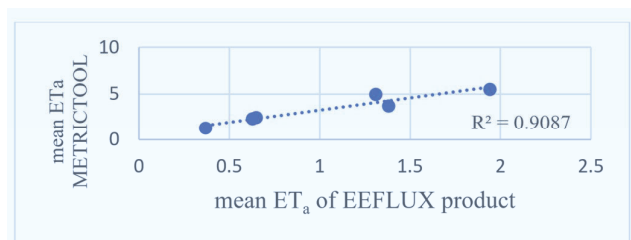
در این مقاله دو مدل SEBAL و METRIC خودکار در نرم‌افزار متلب برای کار با تصاویر حرارتی Landsat انجام شده است. برای هر یک از پارامترهای هواشناسی نقشه‌ریزی با ابعاد محدوده مورد مطالعه ساخته می‌شود. در صورت وسیع بودن منطقه لازم است درون‌یابی مقادیر در داده‌های دو یا چند ایستگاه هواشناسی انجام شود. در صورت کوچک بودن منطقه، نقشه حاصل یک مقدار ثابت در کل پیکسل‌ها، یعنی مقدار پارامتر مدنظر در ایستگاه هواشناسی خواهد داشت. از نقشه کاربری زمین برای شناسایی زمین‌های کشاورزی در تعیین پیکسل‌های واجد شرایط در انتخاب پیکسل سرد و گرم استفاده می‌شود.

سامانه EEFLUX کمترین مقدار میانگین ET_a در کل صحنه تصویر مربوط به تاریخ ۶ دی ۱۴۰۰ و بیشترین مقدار در روز در ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱ است.

شکل ۱۱ میزان همبستگی میانگین ET_a سامانه EEFLUX و ابزار METRICTOOL را با ضریب همبستگی ۰.۹۱ نشان می‌دهد. اختلاف عددی در این دو روش به دلیل تفاوت داده‌های هواشناسی ورودی به مدل (سامانه EEFLUX از داده‌های آب‌وهوایی شبکه‌بندی‌شده CFSV2 در سطح جهانی و METRICTOOL از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور استفاده می‌کنند) و پیکسل سرد و گرم انتخابی پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۱۰. ابزار METRICTOOL در تاریخ‌های (الف) ۶ دی ۱۴۰۰؛ (ب) ۲۴ بهمن ۱۴۰۰؛ (ج) ۱۰ اسفند ۱۴۰۰؛ (د) ۲۶ اسفند ۱۴۰۰؛ (ه) ۲۹ فروردین ۱۴۰۱؛ (و) ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱



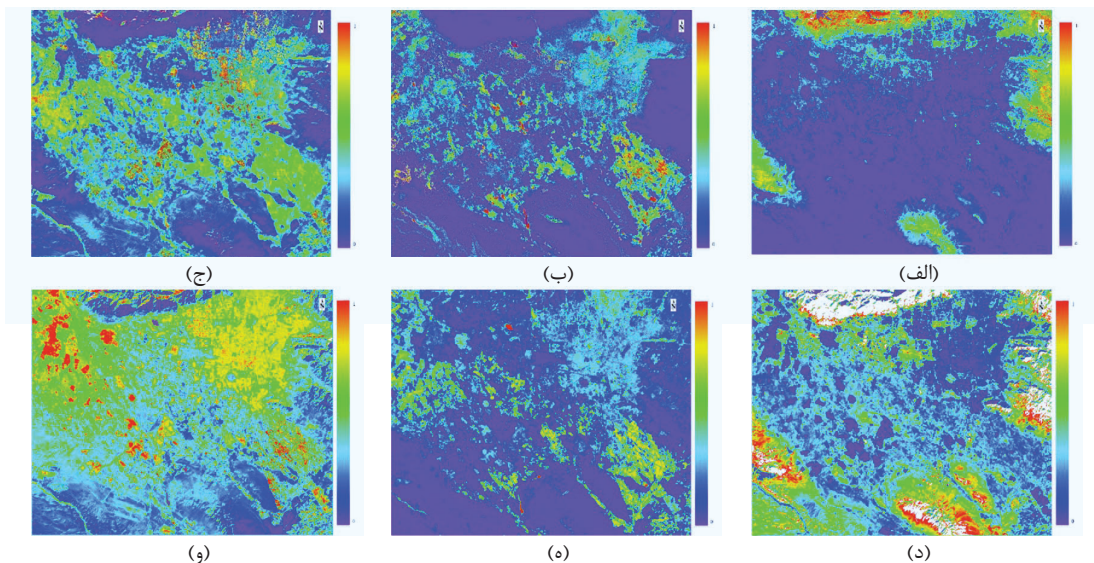
شکل ۱۱. ارتباط بین ET_a سامانه EEFLUX و ابزار METRICTOOL

پیکسل سرد در محدوده پایین هیستوگرام T_s و بالای هیستوگرام NDVI و پیکسل گرم در بالای T_s و پایین هیستوگرام NDVI قرار می‌گیرند (Allen et al., 2013). جزئیات بیشتر در روند انتخاب خودکار در (Bhattarai et al., 2017) به تفصیل بیان شده است. تعیین ET_a : پس از تعیین H ، SEBAL کسر تبخیری (A) را به عنوان نسبت گرمای نهان به انرژی موجود محاسبه می‌کند، در حالی که در ET_r ، METRIC، ET_r به عنوان نسبت ET آنی به ET مرجع محاسبه می‌شود. A و ET_r لحظه‌ای برای هر روز ثابت فرض می‌شوند. در ET_r ، METRIC و تابش خالص روزانه خورشیدی (R_{n24}) در مدل SEBAL برای تخمین ET_a در هر پیکسل استفاده شد.

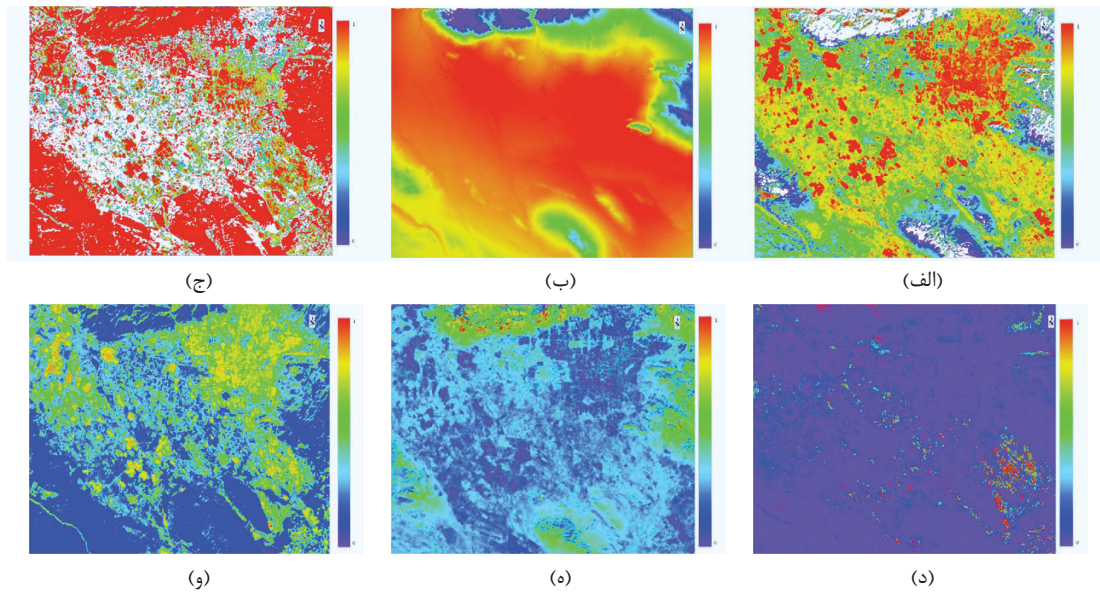
شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب نتایج مدل SEBAL و METRIC در برآورد ET_a با روش انتخاب خودکار پیکسل‌های سرد و گرم در ۶ تصویر Landsat 8 را نشان می‌دهد. به علت خطای out of memory نرم‌افزار، پنجره‌ای به ابعاد ۲۰۰۰ در ۱۸۰۰ پیکسل در محدوده ایستگاه سینوپتیک کرج در نظر گرفته شد و پیاده‌سازی مدل در این محدوده انجام شد.

مرحله (الف) انتخاب پیکسل‌های کاندید: معیار اصلی برای انتخاب پیکسل کاندید این است که آن پیکسل به گروهی از پیکسل‌ها (یعنی یک شی) تعلق داشته باشد که واجد شرایط زیر باشد: (۱) در یک زمین کشاورزی همگن قرار دارد، (۲) از نظر نوع پوشش زمین، T_s ، NDVI و α همگن است، (۳) در ابر یا سایه نیست و (۴) حاوی حداقل ۵۰ پیکسل (برای اندازه پیکسل ۳۰ متر Landsat) است که شکل خطی ندارند (یعنی زنجیره‌ای طولانی از پیکسل‌های منفرد نباشد). همگنی پوشش زمین با حذف پیکسل‌های دارای یک یا چند پیکسل غیر از زمین کشاورزی در یک پنجره 7×7 ، همگنی NDVI و α با محاسبه ضریب تغییرات (CV) در یک پنجره با همان ابعاد و رد پیکسل‌های با CV بالای ۲۵٪ و برای T_s با اعمال یک فیلتر انحراف استاندارد (7×7) و رد پیکسل‌های با مقادیر بزرگ‌تر از ۱.۵ کلون انجام شد. از توابع مورفولوژیکی در نرم‌افزار Matlab برای رد پیکسل‌هایی که متعلق به شیء کوچک‌تر از ۵۰ پیکسل و یا شکل خطی داشته باشند، استفاده می‌شود.

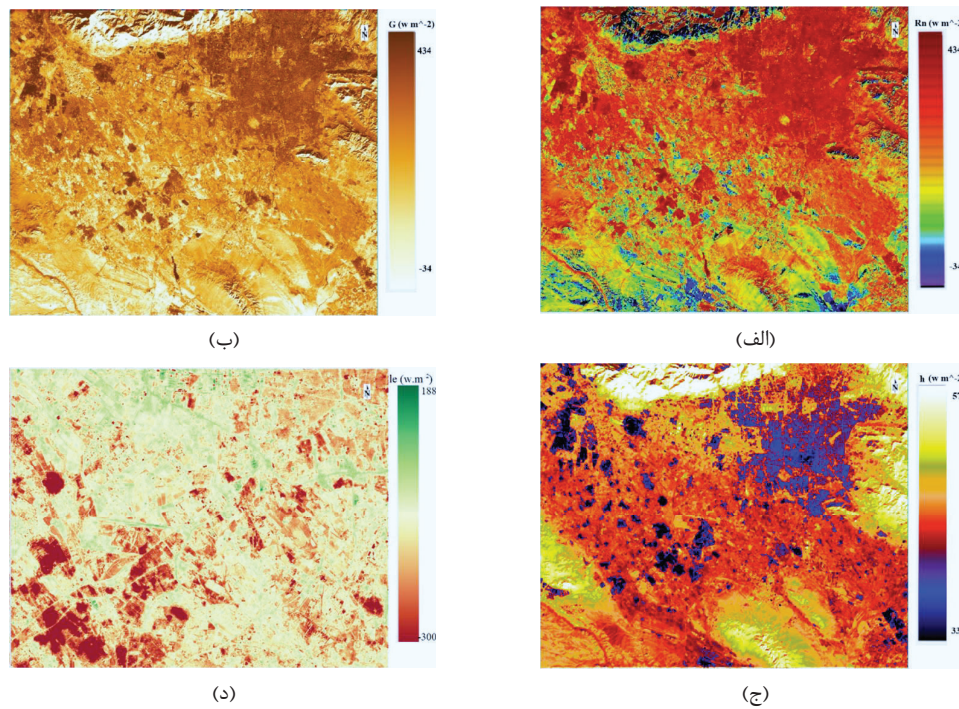
مرحله (ب) انتخاب پیکسل سرد و گرم: ابتدا هیستوگرام $NDVI$ و T_s پیکسل‌های کاندید رسم می‌شود.



شکل ۱۲. مدل ET_a METRIC خودکار در تاریخ‌های (الف) ۶ دی ۱۴۰۰، (ب) ۲۴ بهمن ۱۴۰۰، (ج) ۱۰ اسفند ۱۴۰۰، (د) ۲۶ اسفند ۱۴۰۰، (ه) ۲۹ فروردین ۱۴۰۱، (و) ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱



شکل ۱۳. ET_a مدل SEBAL خودکار در تاریخ‌های (الف) ۶ دی ۱۴۰۰؛ (ب) ۲۴ بهمن ۱۴۰۰؛ (ج) ۱۰ اسفند ۱۴۰۰؛ (د) ۲۶ اسفند ۱۴۰۰؛ (ه) ۲۹ فروردین ۱۴۰۱؛ (و) ۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱

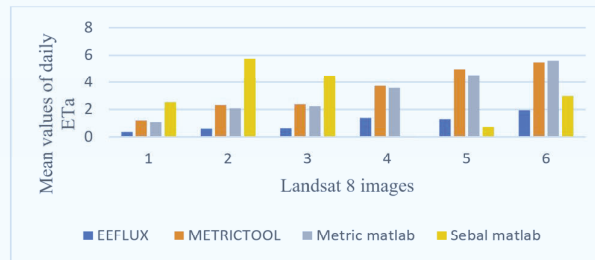


شکل ۱۴. الف) شار تابش خالص؛ (ب) شار گرمای خاک؛ (ج) شار گرمای محسوس؛ (د) شار گرمای نهان

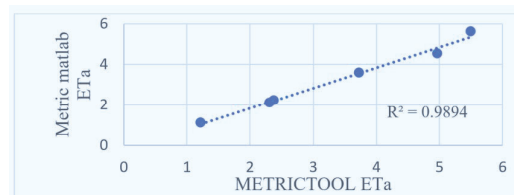
با توجه به شکل ۱۵ میانگین Et_a در محدوده مورد نظر و در مدل SEBAL اخلاف بیشتری نسبت به سه مدل METRIC دارد. مدل METRIC خودکار و ابزار METRICTOOL دارای نتایج عددی نزدیک به هم هستند. داده‌های EEFLUX نیز در این محدوده دچار تخمین کمتر از اندازه است.

Et_r هر مدل را می‌توان با Et_r معادله FAO-Penman-Monteith به‌عنوان مرجع مقایسه کرد. برای این منظور از داده‌های هواشناسی ایستگاه محمدشهر کرج در تاریخ‌های مذکور و نرم‌افزار REF-ET استفاده شد. RMSE هریک از روش‌ها در ۶ تاریخ مورد نظر به دست آمد. نتایج حاصل در جدول ۵ درج شده است. با توجه به نتایج ابزار METRICTOOL و مدل METRIC خودکار به ترتیب با RMSE ۰.۳۳ و ۰.۳۹ دقت بالاتری نسبت به مدل SEBAL دارند.

شکل ۱۴ شار تابش خالص (R_n)، گرمای خاک (G)، گرمای محسوس (h) و گرمای نهان (le) را در محدوده مورد نظر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۴ الف، بیشترین تابش در مناطق پوشش گیاهی و حداقل مقادیر در مناطق بدون پوشش گیاه رخ می‌دهد. علاوه بر این، مقادیر G در مناطق با پوشش گیاهی در محدوده ۰.۰۵ تا ۰.۱۵ است که میزان انتقال حرارت هدایتی^۱ در خاک است. مدل METRICTOOL مجدداً در ۶ تصویر Landsat در محدوده مدل SEBAL و METRIC خودکار پیاده‌سازی شد تا امکان مقایسه این دو روش فراهم شود. علت پیاده‌سازی مجدد آن است که انتخاب پیکسل سرد و گرم در این دو روش از بین داده‌های حرارتی یکسان صورت گیرد. همچنین داده‌های EEFLUX در این محدوده برش خورد.



شکل ۱۵. نمودار میانگین Et_a روش‌های ذکر شده



شکل ۱۶. ارتباط Et_a ابزار METRICTOOL و مدل METRIC خودکار

جدول ۵. ارزیابی مقادیر Et_r روش‌های مذکور

	۳۰ اردیبهشت ۱۴۰۱	۲۹ فروردین ۱۴۰۱	۲۶ اسفند ۱۴۰۰	۱۰ اسفند ۱۴۰۰	۲۴ بهمن ۱۴۰۰	۶ دی ۱۴۰۰	تاریخ اخذ تصویر
RMSE	۵.۵۱	۴.۴۳	۳.۸۳	۲.۸۳	۲.۲۲	۰.۹	FAO-Penman-Monteith
۰.۳۳	۵.۳	۴.۷۷	۳.۶۳	۲.۱۸	۲.۰۹	۱.۰۲	METRICTOOL
۰.۳۹	۵.۴۱	۴.۳۴	۳.۳۹	۲.۰۳	۱.۹۹	۰.۹۵	Automated METRIC
۲.۷۶	۲.۷۸	۰.۵۳	۰.۹	۴.۲	۵.۵۵	۲.۳۲	Automated SEBAL

1. conduction heat transfer

۴- بحث و بررسی

در این مطالعه سه روش سنجش از دور برآورد ET_a پیاده‌سازی و ارزیابی و مقایسه شد. با توجه به نتایج محصول تبخیر و تعرق سامانه EEFLUX به‌رغم اختلاف عددی با دیگر روش‌ها همبستگی معناداری با آن‌ها داشت. مثلاً R^2 بین ET_a این سامانه و ابزار METRICTOOL ۰.۹۱ برآورد شد. نتیجه آن است که گرچه داده‌های این سامانه به‌دلیل استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی CFSV2 در ایران برای مطالعات محلی از دقت کافی برخوردار نیستند، اما در مطالعات مناطق با وسعت بالا یا جهانی نتایج قابل قبولی را به دست می‌دهند. ابزار METRICTOOL و مدل METRIC خودکار بیشترین همبستگی ($R^2=0.99$) و نزدیکی عددی را با یکدیگر داشتند و به ترتیب با RMSE ۰.۳۳ و ۰.۳۹ دقت بالاتری از مدل SEBAL خودکار دارند. ارزیابی این مدل‌ها با در نظر گرفتن روش FAO-Penman-Monteith به‌عنوان مرجع و تعیین RMSE طی تاریخ‌های مورد مطالعه انجام شد. از مزیت ابزار METRICTOOL می‌توان به دقت و سرعت پردازش بالای و کاربرپسند بودن آن اشاره کرد. مزیت مدل METRIC خودکار نسبت به ابزار METRICTOOL انتخاب اتوماتیک پیکسل سرد و گرم است که بدین ترتیب می‌توان با استفاده از یک روش بهینه‌سازی ساده در قالب الگوریتم جست‌وجوی جامع (ESA) از بروز خطای انسانی در انتخاب این پیکسل‌ها جلوگیری کرد. همچنین نتایج ارزیابی نقشه تبخیر و تعرق تولیدی نشان می‌دهد که در صورت نبود داده‌های تابش ایستگاه هواشناسی، می‌توان از داده‌های Metra-2 به‌جای این داده‌ها استفاده کرد.

با توجه به نتایج عددی رویکرد خودکار می‌تواند دقت مشابهی در مقایسه با استفاده از روش‌های انتخاب پیکسل دستی داشته باشد. فرایند خودکار سازی کارایی مدل را از نظر زمان و بازده و همچنین افزایش پتانسیل برای کاربردهای عملیاتی و تولید مدل‌های جدید ET چندمدلی را بهبود می‌بخشد. علاوه‌براین، رویکرد خودکار می‌تواند خطای انسانی را در تخمین‌های ET

برای کاربران جدید یا بی‌تجربه کاهش دهد و بنابراین این مدل‌ها را در دسترس عموم کاربران قرار دهد.

۵- جمع‌بندی

با توجه به افزایش جمعیت، افزایش نیاز به غذا و مصرف درصد بالایی از منابع آب شیرین در دنیا به‌واسطه عملیات کشاورزی مدیریت آبیاری در زمین‌های کشاورزی امری ضروری است. پارامتر ET نقشی اساسی در نظارت، مدیریت و افزایش بازده مصرف آب دارد. در این راستا، مدل‌های ماهواره‌ای برآورد ET بسیاری تعریف شده است. استفاده از این الگوریتم‌ها نه تنها به تأمین امنیت غذایی کمک می‌کند، بلکه در حفظ منابع آب نیز مؤثر است. همچنین آب اضافی باعث افزایش محتوای خاک - آب و در نتیجه فشار منافذ می‌شود. آبیاری بیش از حد علاوه‌بر کاهش بازده محصول و تهدید منابع آب شیرین می‌تواند به ناپایداری خاک، ایجاد رانش زمین یا سایر پیامدهای ناخواسته منجر شود. با توجه به کاربرد وسیع مدل‌های برآورد ET و اهمیت این پارامتر، لازم است تمرکز بر روش‌های دقیق و سریع تعیین آن افزایش یابد. در این مطالعه به محصولات سامانه EEFLUX، ابزار METRICTOOL و روش انتخاب خودکار پیکسل سرد و گرم مدل‌های SEBAL و METRIC بررسی شد. طبق نتایج رویکرد خودکار کارایی مدل را از نظر زمان و بازده افزایش می‌دهد و می‌تواند خطای انسانی در تخمین تبخیر و تعرق را برای کاربران جدید یا بی‌تجربه کاهش داده، این مدل‌ها را در دسترس عموم کاربران قرار دهد. همچنین داده‌های EEFLUX می‌توانند در مطالعات با وسعت بالا کارایی لازم برای اقدامات مدیریتی را داشته باشند.

مطالعات آتی می‌توانند عملکرد مدل‌های خودکار سازی فعلی را در سراسر جهان و تحت شرایط اقلیمی مختلف و محصولات مختلف و نیز ادغام سایر الگوریتم‌ها، مانند الگوریتم‌های ژنتیک در این مدل‌ها را بررسی کنند. در حال حاضر تلاشی برای پیاده‌سازی این رویکرد خودکار در پلتفرم Google Earth Engine API در حال انجام است.

- Snyder, the ASCE standardized reference evapotranspiration equation. *Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers*, 57.
- Bastiaanssen, W. G. (2000, March). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87–100. doi:10.1016/s0022-1694(99)00202-4
- Bastiaanssen, W. G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J. F., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998, December). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213, 213–229. doi:10.1016/s0022-1694(98)00254-6
- Bhattarai, N., Quackenbush, L. J., Im, J., & Shaw, S. B. (2017, July). A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196, 178–192. doi:10.1016/j.rse.2017.05.009
- Brutsaert, W., & Sugita, M. (1992, November). Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97, 18377–18382. doi:10.1029/92jd00255
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., Betts, R., Falloon, P., Wiltshire, A., & Tol, R. S. (2013, July). Climate change impacts on global agriculture. *Climatic Change*, 120, 357–374. doi:10.1007/s10584-013-0822-4
- Chakraborty, S., & Newton, A. C. (2011, January). Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology*, 60, 2–14. doi:10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x
- Crago, R. D. (1996, May). Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*, 180, 173–194. doi:10.1016/0022-1694(95)02903-6
- Dang, C., Liu, Y., Yue, H., Qian, J., & Zhu, R. (2020, October). Autumn Crop Yield Prediction using Data-Driven Approaches: Support Vector Machines, Random Forest, and Deep Neural Network Methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 47, 162–181. doi:10.1080/07038992.2020.1833186

سپاسگزاری

از گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به‌خاطر همکاری‌های صمیمانه، به‌ویژه کارشناس محترم مزرعه جناب آقای مهندس رفیعی و آقای کلارنس رابیسون، دانشیار پژوهشی دانشگاه آیداهو کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., . . . Robison, C. (2015, November). EEFlux: A Landsat-based Evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. *2015 ASABE / IA Irrigation Symposium: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation - A Tribute to the Career of Terry Howell, Sr. Conference Proceedings*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi:10.13031/irrig.20152143511
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & others. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300, D05109.
- Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., . . . Robison, C. (2015, November).
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007, August). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, 380–394. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(380)
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., . . . Robison, C. W. (2007, August). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, 395–406. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(395)
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliott, R., Howell, R., Itenfisu, D., & Jensen, M. (2005). RL

- Derakhshandeh, M., & Tombul, M. (2021, November). Calibration of METRIC Modeling for Evapotranspiration Estimation Using Landsat 8 Imagery Data. *Water Resources Management*, 36, 315–339. doi:10.1007/s11269-021-03029-5
- Eswar, R., Sekhar, M., & Bhattacharya, B. K. (2017, December). Comparison of three remote sensing based models for the estimation of latent heat flux over India. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 2705–2719. doi:10.1080/02626667.2017.1404067
- Farah, H. O. (2001). Estimation of regional evaporation using a detailed agro-hydrological model. *Journal of Hydrology*, 229, 50–58.
- Farah, H. O., Bastiaanssen, W. G., & Feddes, R. A. (2004, May). Evaluation of the temporal variability of the evaporative fraction in a tropical watershed. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5, 129–140. doi:10.1016/j.jag.2004.01.003
- Fitzgerald, R. W., & Lees, B. G. (1994, March). Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 47, 362–368. doi:10.1016/0034-4257(94)90103-1
- Ghaderi, A., Dasimeh, M., Shokri, M., & Abraham, J. (2020, June). Estimation of Actual Evapotranspiration Using the Remote Sensing Method and SEBAL Algorithm: A Case Study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*, 7, 36. doi:10.3390/hydrology7020036
- Hodgson, M. E., Li, X., & Cheng, Y. (2004, December). A Parameterization Model for Transportation Feature Extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70, 1399–1404. doi:10.14358/pers.70.12.1399
- Im, J., & Hodgson, M. E. (2009, July). Characteristics of Search Spaces for Identifying Optimum Thresholds in Change Detection Studies. *GIScience & Remote Sensing*, 46, 249–272. doi:10.2747/1548-1603.46.3.249
- Jawad, L. A., & Mohamed, H. A. (2020). Integrative Use of Penman-Monteith Equation with Remote Sensing and Geographical Information System Techniques to Estimate Evapotranspiration Variations in Iraq. *The Iraqi Journal of Agricultural Science*, 51, 530–541.
- Kamali, M. I., & Nazari, R. (2018, October). Determination of maize water requirement using remote sensing data and SEBAL algorithm. *Agricultural Water Management*, 209, 197–205. doi:10.1016/j.agwat.2018.07.035
- Khatibi, A., & Krauter, S. (2021, February). Validation and Performance of Satellite Meteorological Dataset MERRA-2 for Solar and Wind Applications. *Energies*, 14, 882. doi:10.3390/en14040882
- Knipper, K. R., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Hain, C. R., . . . Sanchez, L. (2018, October). Evapotranspiration estimates derived using thermal-based satellite remote sensing and data fusion for irrigation management in California vineyards. *Irrigation Science*, 37, 431–449. doi:10.1007/s00271-018-0591-y
- Kumar, L., & Mutanga, O. (2018, September). Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sensing*, 10, 1509. doi:10.3390/rs10101509
- Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021, August). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81–96. doi:10.1016/j.isprs.2021.05.018
- Mondal, I., Thakur, S., De, A., & De, T. K. (2022, March). Application of the METRIC model for mapping evapotranspiration over the Sundarban Biosphere Reserve, India. *Ecological Indicators*, 136, 108553. doi:10.1016/j.ecolind.2022.108553
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011, May). Support vector machines in remote sensing:

- A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66, 247–259. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019, March). Google Earth Engine Applications. *Remote Sensing*, 11, 591. doi:10.3390/rs11050591
- Nisa, Z., Khan, M. S., Govind, A., Marchetti, M., Lasserre, B., Magliulo, E., & Manco, A. (2021, February). Evaluation of SEBS, METRIC-EEFlux, and QWaterModel Actual Evapotranspiration for a Mediterranean Cropping System in Southern Italy. *Agronomy*, 11, 345. doi:10.3390/agronomy11020345
- Norman, J. M., Kustas, W. P., & Humes, K. S. (1995, December). Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 263–293. doi:10.1016/0168-1923(95)02265-y
- Ramírez-Cuesta, J. M., Allen, R. G., Intrigliolo, D. S., Kilic, A., Robison, C. W., Trezza, R., . . . Lorite, I. J. (2020, September). METRIC-GIS: An advanced energy balance model for computing crop evapotranspiration in a GIS environment. *Environmental Modelling & Software*, 131, 104770. doi:10.1016/j.envsoft.2020.104770
- Ramírez-Cuesta, J. M., Allen, R. G., Zarco-Tejada, P. J., Kilic, A., Santos, C., & Lorite, I. J. (2019, February). Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open-canopy olive orchard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 88–102. doi:10.1016/j.jag.2018.09.001
- azagui, A., Abdeladim, K., Bouchouicha, K., Bachari, N., Semaoui, S., & Hadj Arab, A. (2021, June). A new approach to forecast solar irradiances using WRF and libRadtran models, validated with MERRA-2 reanalysis data and pyranometer measures. *Solar Energy*, 221, 148–161. doi:10.1016/j.solener.2021.04.024
- Roerink, G. J., Su, Z., & Menenti, M. (2000, January). S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25, 147–157. doi:10.1016/s1464-1909(99)00128-8
- Saha, S. K., Ahmmed, R., & Jahan, N. (2022). Actual Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing: Comparison of Sebal and Metric Models. In *Water Management: A View from Multidisciplinary Perspectives* (pp. 365–383). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-030-95722-3_18
- Santos, C., Lorite, I. J., Tasumi, M., Allen, R. G., & Fereres, E. (2007, October). Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science*, 26, 277–288. doi:10.1007/s00271-007-0093-9
- Senay, G., Budde, M., Verdin, J., & Melesse, A. (2007, June). A Coupled Remote Sensing and Simplified Surface Energy Balance Approach to Estimate Actual Evapotranspiration from Irrigated Fields. *Sensors*, 7, 979–1000. doi:10.3390/s7060979
- Shamloo, N., Taghi Sattari, M., Apaydin, H., Valizadeh Kamran, K., & Prasad, R. (2021, August). Evapotranspiration estimation using SEBAL algorithm integrated with remote sensing and experimental methods. *International Journal of Digital Earth*, 14, 1638–1658. doi:10.1080/17538947.2021.1962996
- Sheykhmousa, M., Mahdianpari, M., Ghanbari, H., Mohammadimanesh, F., Ghamisi, P., & Homayouni, S. (2020). Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 6308–6325. doi:10.1109/jstars.2020.3026724
- Sobrino, J. A., Souza da Rocha, N., Skoković, D., Suélen Käfer, P., López-Urrea, R., Jiménez-Muñoz, J. C., & Alves Rolim, S. B. (2021, September). Evapotranspiration Estimation with the S-SEBI Method from Landsat 8 Data

- against Lysimeter Measurements at the Barrax Site, Spain. *Remote Sensing*, 13, 3686. doi:10.3390/rs13183686
- Su, Z. (2002, February). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6, 85–100. doi:10.5194/hess-6-85-2002
- Sun, Z., Wei, B., Su, W., Shen, W., Wang, C., You, D., & Liu, Z. (2011, August). Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 1086–1092. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.039
- Tasumi, M. (2003). *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery*. University of Idaho.
- Tasumi, M., Trezza, R., Allen, R. G., & Wright, J. L. (2005, November). Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 355–376. doi:10.1007/s10795-005-8138-9
- Thorp, K. R., Marek, G. W., DeJonge, K. C., Evett, S. R., & Lascano, R. J. (2019, September). Novel methodology to evaluate and compare evapotranspiration algorithms in an agroecosystem model. *Environmental Modelling & Software*, 119, 214–227. doi:10.1016/j.envsoft.2019.06.007
- Tian, D., Asadi, P., Medina, H., Ortiz, B., & Kesikka, I. (2020, March). A Climate Smart Framework for Forecasting Field-level Potential Evapotranspiration and Irrigation Requirement with Numerical Weather Predictions and Satellite Remote Sensing. doi:10.5194/egusphere-egu2020-11756
- Wagle, P., Bhattarai, N., Gowda, P. H., & Kakani, V. G. (2017, June). Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 192–203. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022
- Wang, J., Li, H., & Lu, H. (2021, December). An estimation of the evapotranspiration of typical steppe areas using Landsat images and the METRIC model. *Journal of Water and Climate Change*, 13, 926–942. doi:10.2166/wcc.2021.432
- Wickham, J. D., Stehman, S. V., Gass, L., Dewitz, J., Fry, J. A., & Wade, T. G. (2013, March). Accuracy assessment of NLCD 2006 land cover and impervious surface. *Remote Sensing of Environment*, 130, 294–304. doi:10.1016/j.rse.2012.12.001
- Zagajewski, B., Kluczek, M., Raczek, E., Njegovec, A., Dabija, A., & Kycko, M. (2021, July). Comparison of Random Forest, Support Vector Machines, and Neural Networks for Post-Disaster Forest Species Mapping of the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve. *Remote Sensing*, 13, 2581. doi:10.3390/rs13132581
- Zhang, H., Anderson, R. G., & Wang, D. (2015, August). Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research*, 180, 143–154. doi:10.1016/j.fcr.2015.05.023