



Evaluation of the METRIC Model for Estimating Actual Evapotranspiration in the Chahandab Plain, Varamin, Using Remote Sensing Data

Rahman Sharifi¹ | Fatemeh Barzegari Banadkooki^{2*} | Mojtaba Pakparvar³

1. Soil Conservation and Watershed Management Department, Tehran Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Tehran, Iran.

2. Engineering Department, Payame Noor University, Tehran, Iran.

3. Soil Conservation and Watershed Management Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Shiraz, Iran.

Correspond E-mail: barzegari@2pnu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 27 Dec. 2025

Revised: 14 Mar. 2026

Accepted: 07 Apr. 2026

Published online: 01 Oct. 2026

Keywords:

Agricultural hydrology,

Arid regions,

Artificial groundwater recharge,

NDVI,

Satellite imagery,

Surface energy balance.

Abstract

Due to the increasing water stress in arid and semi-arid regions of Iran, the need for accurate, non-destructive, and cost-effective methods to estimate vegetation water consumption has become increasingly critical. The METRIC model (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration), as an advanced remote sensing-based approach, has recently gained significant attention for estimating actual evapotranspiration (ETA) across diverse landscapes. This study aimed to evaluate the accuracy and reliability of the METRIC model in estimating ETA in the arid region of the Chahandab Plain, Varamin, using Landsat 8 Level-2 satellite imagery in combination with in-situ meteorological observations. After performing radiometric and atmospheric corrections, surface energy balance components were derived with careful consideration of local climatic conditions and land surface characteristics. The model outputs were compared with the standard FAO Penman-Monteith model due to the unavailability of data from weighing lysimeters. The results demonstrated high accuracy and strong applicability of the METRIC model under Iranian climatic conditions. The mean coefficient of determination (R^2) exceeded 0.90, while the root mean square error (RMSE) remained below 0.52 mm/day, confirming the robustness of the model and its potential for use in operational water management. Furthermore, a strong correlation between ETo and ETA emphasized the critical role of vegetation density and health in regulating the evapotranspiration process, particularly in arid environments where water availability is highly variable.

Cite this article: Sharifi, R., Barzegari Banadkooki, F., Pakparvar, M. (2026). Evaluation of the METRIC Model for Estimating Actual Evapotranspiration in the Chahandab Plain, Varamin, Using Remote Sensing Data. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (3), 329-343. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2026.406812.1857>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Accurate estimation of actual evapotranspiration (ETa) plays a fundamental role in sustainable water resources management, especially in arid and semi-arid regions where water scarcity is a growing concern. In countries such as Iran, where more than 90 percent of total water withdrawals are allocated to agriculture, traditional point-based measurements (e.g., lysimeters) fail to capture the spatial heterogeneity of water consumption across agricultural fields. Remote sensing-based energy-balance models have addressed this limitation by enabling spatially distributed monitoring of ETa at field, district, and basin scales using thermal and optical satellite data. The METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) model, an advanced development of the SEBAL algorithm, has demonstrated promising results in various climates due to its internal calibration approach based on cold and hot reference pixels extracted directly from each satellite scene. However, challenges remain regarding model calibration, atmospheric corrections, and wind parameterization, especially in dry regions where strong advection and large temperature gradients occur.

This study aims to evaluate the performance of the METRIC model in the Chahndab Plain of Varamin—an arid agricultural region influenced by flood-spreading schemes and groundwater depletion. By integrating Level-2 Landsat-8 imagery, meteorological data, and two independent calibration methods, this research assesses the capability of METRIC to accurately estimate ETa and spatial water consumption patterns. The findings provide a scientific basis for improved irrigation planning and water allocation in dryland agricultural systems.

Materials and Methods: This study utilized atmospherically and radiometrically corrected Level-2 Landsat-8 OLI/TIRS images to estimate ETa through the METRIC energy-balance framework. The workflow consisted of radiometric calibration, atmospheric correction, land surface temperature retrieval, vegetation index generation, and surface energy-balance component derivation. Key parameters—including net radiation, soil heat flux, and sensible heat flux—were calculated following the standard METRIC procedures. The model's internal calibration was performed using two reference pixels: a cold/wet pixel representing maximum ET conditions and a hot/dry pixel representing minimal ET.

A major methodological innovation of this study was the integration of two independent calibration approaches: (1) water-body calibration, ensuring an upper boundary for ET through near-zero sensible heat flux over deep water surfaces, and (2) soil-water balance calibration, conducted using field-based crop and soil moisture observations. This dual-calibration strategy was implemented to enhance model robustness under the heterogeneous agricultural conditions of the study area. Meteorological inputs—including air temperature, humidity, solar radiation, and wind speed—were obtained from a local synoptic station. Instead of using instantaneous wind speed at satellite overpass time, the model applied daily maximum wind speed (u_{max}) to better represent advective conditions typical of arid environments. NDVI thresholds and land-cover masks were locally adjusted using field surveys to improve crop type separation.

Model outputs were validated using lysimeter measurements and ET estimates derived from the FAO Penman–Monteith method. Statistical performance was evaluated using R^2 , RMSE, and relative error metrics.

Results and Discussion: The METRIC model demonstrated high capability in estimating spatial and temporal patterns of ETa in the Chahndab Plain after applying dual calibration and improved input parameterization. The model achieved R^2 values exceeding 0.90 when compared with lysimeter data, while RMSE remained below 0.52 mm/day, indicating strong agreement between modeled and observed ETa. Relative errors were consistently below 12 percent across the evaluated dates, confirming the robustness of the calibrated model.

The dual-calibration approach proved particularly effective: water-body calibration ensured a reliable upper boundary for ET fluxes, while soil-water balance calibration improved accuracy in cultivated fields with diverse irrigation regimes. The strong convergence between both calibration techniques significantly enhanced the model's reliability compared with studies employing a single calibration approach.

Introducing daily maximum wind speed (u_{max}) instead of instantaneous overpass wind significantly improved estimation accuracy—by approximately 15 percent—highlighting the critical role of advective processes in dry regions. This modification aligns with earlier theoretical findings but had not been systematically implemented within METRIC using Level-2 Landsat data.

Spatial analysis illustrated that the highest ETa values corresponded to dense agricultural vegetation and areas benefiting from flood-spreading practices, whereas sparsely vegetated and water-limited fields exhibited lower ETa. A strong relationship between NDVI and ETa reaffirmed the influence of vegetation status on water consumption patterns. Conversion of ETa to total annual water use provided actionable insights for irrigation management and groundwater recharge assessment. Overall, the results confirm METRIC's suitability for high-resolution water use monitoring in arid agricultural systems.

Conclusion: The findings demonstrate that the METRIC model, when supported by Level-2 Landsat-8 imagery, dual-calibration techniques, and improved wind parameterization, can accurately estimate ETa in complex dryland environments. The study confirms key principles: (1) integrated calibration enhances model stability, (2) atmospheric and radiometric corrections substantially reduce energy-balance uncertainties, and (3) advective climatic conditions must be properly represented to avoid ET underestimation. No major inconsistencies were observed, although further refinement may be required in fields with mixed land cover or rapidly changing soil moisture.

Practically, the results offer a robust framework for operational water accounting, irrigation scheduling, and evaluation of flood-spreading impacts on agricultural water use. The demonstrated capacity to convert METRIC outputs into annual volumetric water consumption provides decision makers with a powerful tool for optimizing water allocation in water-scarce regions. Overall, this extended approach can be recommended as a reliable methodology for hydrological monitoring, agricultural water management, and climate-resilient planning in arid and semi-arid areas.

Keywords: Surface energy balance, Vegetation Indices, Satellite Imagery, Agricultural Hydrology, Artificial Groundwater Recharge, Arid Regions.

Article Type: Research Article

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۹ (۳)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



ارزیابی مدل METRIC در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در دشت چنخاب ورامین با استفاده از داده‌های سنجش از دور

رحمان شریفی^۱ | فاطمه برزگری بنادکویی^{۲*} | مجتبی پاک پرور^۳

۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان تهران، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، ورامین، ایران.

۲. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات و آموزش و ترویج کشاورزی (تات)، شیراز، ایران.

رایانامه: barzegari@pnu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

با توجه به افزایش تنش‌های خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نیاز به روش‌هایی دقیق، غیرمخرب و کم‌هزینه برای برآورد مصرف آب پوشش‌های گیاهی اهمیت ویژه‌ای یافته است. مدل METRIC به‌عنوان یکی از مدل‌های پیشرفته مبتنی بر سنجش از دور، در سال‌های اخیر برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی (ETa) مورد توجه قرار گرفته است. تحقیق حاضر با هدف ارزیابی دقت مدل METRIC در برآورد ETa در منطقه خشک و اراضی پخش سیلاب دشت چنخاب ورامین، بر پایه تصاویر ماهواره‌ای سطح ۲ لندست ۸ در بازه زمانی پاییز ۱۳۹۷ تا زمستان ۱۴۰۰ و داده‌های هواشناسی میدانی انجام شد. پس از انجام پردازش‌های رادیومتریک و اتمسفری تصاویر، پارامترهای بیلان انرژی استخراج گردید و کیفیت نتایج با رویکردی جامع و چندمنبعی بررسی شد تا قابلیت اعتماد مدل افزایش یابد. نتایج حاصل از مدل به دلیل عدم دسترسی به داده‌های لایسیمتر وزنی با مدل استاندارد FAO Penman-Monteith مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده دقت بالا و قابلیت کاربرد مدل در دشت‌های حاشیه کویر مانند چنخاب ایران است. میانگین ضریب تعیین (R^2) بالاتر از ۰/۹ و خطای ریشه میانگین مربعات RMSE کمتر از ۰/۵۲ میلی‌متر بر روز، گواهی بر صحت بالای مدل دارند. همچنین، ارتباط قوی بین شاخص ETa و ETc به‌خوبی بیانگر تاثیر و نقش پوشش گیاهی در فرآیند تبخیر-تعرق و پویایی مکانی آن است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

کلیدواژه‌ها:

بیان انرژی سطحی،
شاخص پوشش گیاهی نرمال شده،
تصاویر ماهواره‌ای،
هیدرولوژی کشاورزی،
تغذیه مصنوعی آبخوان،
مناطق خشک.

استناد: شریفی؛ رحمان، برزگری بنادکویی؛ فاطمه، پاک‌پرور؛ مجتبی (۱۴۰۵). ارزیابی مدل METRIC در برآورد تبخیر-تعرق واقعی در دشت چنخاب ورامین با استفاده از داده‌های سنجش از دور. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۳)، ۳۳۳-۳۲۹.

DOI: <http://doi.org/0.22059/jrwm.2026.406812.1857>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

تغییر اقلیم و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر، دشت‌های فلات مرکزی ایران، به‌ویژه دشت ورامین را با چالش‌های جدی نظیر فرونشست و افت تراز آبخوان مواجه کرده است. در این میان، طرح‌های تغذیه مصنوعی و پخش سیلاب در مناطقی مانند «چناب»، به عنوان راهکاری کلیدی برای بازگرداندن تعادل هیدرولوژیکی اتخاذ شده‌اند (Madani et al., 2016). با این وجود، موفقیت این طرح‌ها در گرو پایش دقیق بیلان آب و به‌ویژه مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی (Eta) به‌عنوان بزرگترین مؤلفه خروجی بیلان آب است. اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر در مناطق پخش سیلاب به دلیل وسعت اراضی و ماهیت متغیر رطوبت خاک، با روش‌های سنتی نظیر لایسیمتر و تشت تبخیر عملاً غیرممکن یا با خطای پتانسیل ضریب تشتک^۱ همراه است (Pareeth & Karimi, 2023).

بهره‌گیری از الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی ماهواره‌ای، به‌ویژه مدل METRIC^۲، در سال‌های اخیر تحولی در برآورد مصرف آب کاربری‌های مختلف ایجاد کرده است. مدل METRIC که نخستین‌بار توسط Allen و همکاران (۲۰۰۷) معرفی شد، به‌عنوان نسخه‌ی ارتقایافته‌ی از مدل SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) شناخته می‌شود. نقطه قوت این مدل در بهره‌گیری از «کالیبراسیون داخلی» است؛ به‌گونه‌ای که با انتخاب دو پیکسل مرجع — یکی کاملاً مرطوب و سرد و دیگری خشک و گرم — از درون همان تصویر ماهواره‌ای، یک رابطه‌ی خطی برای تصحیح شار حرارتی محسوس برقرار می‌سازد (Allen et al., 2007). این رویکرد نه تنها خطاهای ناشی از ناپایداری در پارامترهای جوی و تصحیحات اتمسفری را کاهش می‌دهد، بلکه نیاز به داده‌های میدانی گسترده را نیز به حداقل می‌رساند (Allen et al., 2007; Hong et al., 2014; Cammalleri et al., 2024). از این‌رو، METRIC به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت داده مانند بسیاری از دشت‌های نیمه‌خشک ایران، گزینه‌ای مناسب برای پایش Eta محسوب می‌شود (Tasumi, 2019; Ghisi et al., 2024).

مطالعات متعددی بر کارایی این مدل در محیط‌های کشاورزی همگن تأکید داشته‌اند (Liu et al., 2025; Cammalleri et al., 2024; Angelini et al., 2021; Oumou et al., 2025; Zhang et al., 2024). با این حال، مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که دو شکاف اساسی همچنان باقی مانده است: نخست، عدم قطعیت بالای مدل در مناطق حاشیه کویر که تحت تأثیر شدید پدیده «فرارفت»^۳ قرار دارند (Mokhtari et al., 2013; Pakparvar et al., 2014)؛ و دوم، کمبود مطالعاتی که کارایی این مدل را در زون‌های حساس پخش سیلاب با پوشش گیاهی غیریکنواخت و نوسانات سریع رطوبتی بررسی کرده باشند.

در پاسخ به این چالش‌ها، پژوهش حاضر یک چارچوب نوآورانه برای اجرای METRIC در مناطق خشک ایران ارائه می‌دهد، به این صورت که مدل مذکور در زون پخش سیلاب که دارای رفتار هیدرولوژیکی پیچیده‌تر نسبت به مزارع کلاسیک هست به کار رفته است. همچنین در این مطالعه بومی‌سازی پارامترهای آیرودینامیکی مدل با توجه به پدیده فرارفت در دشت‌های حاشیه کویر (ورامین) انجام می‌شود. در نهایت این بررسی منجر به ارائه یک چارچوب اعتبارسنجی ترکیبی (بیلان آب خاک + پیکسل‌های شاهد آبی) خواهد شد که ضریب اطمینان برآوردها را در مناطق فاقد لایسیمتر افزایش می‌دهد.

در این مطالعه، ارزیابی و واسنجی مدل METRIC با استفاده از تصاویر سطح ۲ ماهواره لندست ۸ و داده‌های میدانی، و تحلیل مکانی — زمانی مصرف آب در اراضی کشاورزی دشت چناب، در محدوده پخش سیلاب انجام شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌طور مستقیم در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای بهینه‌سازی تخصیص آب و پایش بهره‌وری آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد. دشت چناب ورامین، به‌عنوان یکی از مناطق مهم کشاورزی کشور، در مجاورت کلان‌شهر تهران قرار گرفته و طی سال‌های اخیر با بحران فزاینده منابع آب مواجه شده است. این دشت با اتکا به منابع آب زیرزمینی، در معرض افت سطح سفره‌های آب و افزایش شوری خاک قرار دارد (WRMRC, 2019). ازجمله اقدامات انجام‌شده برای مقابله با این بحران، اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها از طریق پخش سیلاب است که با هدف احیای منابع آب زیرزمینی و بهبود بهره‌وری آبی صورت گرفته‌اند (Madani et al., 2016).

¹ Pan Coefficient error

² Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration

³ Advection

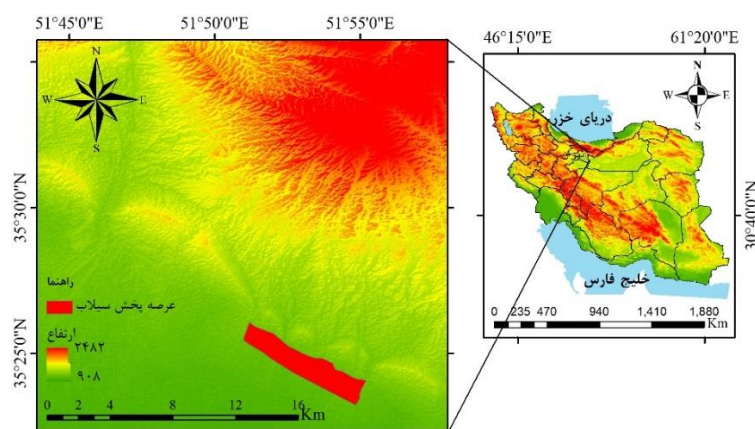
با توجه به تنوع رخساره‌های موجود و تنوع کاربری اراضی موجود در این دشت، ارزیابی دقیق و فضایی الگوی مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، ضرورتی انکارناپذیر است. بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر ماهواره‌ای لندست با قدرت تفکیک مکانی مناسب، این امکان را فراهم می‌سازد تا میزان تبخیر-تعرق در سطح مزرعه با دقت بالا و هزینه پایین برآورد گردد (Mu et al., 2011; Anderson et al., 2012; Li et al., 2020).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی جامع عملکرد مدل METRIC در شرایط اقلیمی، مدیریتی و کشاورزی دشت چن‌داب ورامین و بررسی توزیع مکانی تبخیر و تعرق طراحی گردیده است. انجام این پژوهش، ضمن فراهم آوردن زمینه برای اعتبارسنجی مدل METRIC در شرایط نیمه‌خشک، می‌تواند در جهت بهینه‌سازی نظام آبیاری، تدوین الگوهای کشت سازگار با منابع موجود و ارزیابی دقیق ثمربخشی پروژه‌های احیای آبخوان‌ها در مناطق مشابه مؤثر واقع شود (Karimi & Bastiaanssen, 2015).

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

ایستگاه پخش سیلاب چن‌داب با موقعیت جغرافیایی $47^{\circ} 51'$ تا $55^{\circ} 51'$ طول شرقی و $22^{\circ} 35'$ تا $29^{\circ} 35'$ عرض شمالی، در شرق شهرستان پاکدشت قرار گرفته است (شکل ۱). این آبخوان در مساحتی حدود ۲۰۰۰ هکتار بر روی مخروط افکنه‌ای با رسوبات درشت دانه باقیمانده از جریان‌ات رودخانه‌ای دوران چهارم تشکیل شده است. حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز ۲۶۲۰ متر و حداقل ارتفاع در محل خروجی ۸۸۰ متر از سطح دریا است. ارتفاع متوسط حوضه ۱۴۸۸ متر است. بارش متوسط سالانه ۱۸۷ میلی‌متر و متوسط تبخیر ۲۵۰۰ میلی‌متر است. حداقل متوسط دما ۲- و حداکثر ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد و متوسط شیب منطقه ۵ درصد است. حوزه آبخیز چن‌داب از شمال به حوضه ایوانکی و از غرب به حوضه امامک محدود شده است. در حالت وسیع‌تر، منطقه از لحاظ توپوگرافی در عرصه دشتی وسیع که متصل به کویر مرکزی است واقع شده و به همین لحاظ می‌توان آن را به‌عنوان دروازه ورود به کویر محسوب نمود. ایستگاه هواشناسی تبخیرسنجی در داخل محدوده پخش سیلاب قرار دارد و برخی اطلاعات مورد نیاز دیگر از ایستگاه سینوپتیک تهران که در ۷۳ کیلومتری آن قرار دارد اخذ شده است (Pareeth & Karimi, 2023). مزرعه تحقیقاتی در منطقه کهریزک واقع در جنوب غربی سایت پخش سیلاب برای محاسبات بیلان آبی جهت اعتبارسنجی مدل متریک انتخاب شد. خاک سطحی مزرعه زراعی دارای بافت رسی با وزن مخصوص ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. برای دستیابی به اهداف تحقیق، یک چارچوب روش‌شناسی دقیق شامل جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز و اجرای گام‌به‌گام مدل METRIC تدوین گردید.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان تهران

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱. داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی روزانه شامل دمای بیشینه و کمینه ($T_{\max}$, $T_{\min}$)، رطوبت نسبی میانگین، سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (u_2) و ساعات آفتابی از سه ایستگاه سینوپتیک ورامین، ایستگاه اقلیم‌شناسی ایوانکی و سینوپتیک مهرآباد برای دوره آماری سال ۱۴۰۱ (منطبق بر تاریخ تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده) دریافت گردید. این داده‌ها برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع (ET_r^1) به روش استاندارد پنمن-مانتیت فائو-۵۶ به کار رفتند (Allen et al., 1998).

۲-۲-۲. داده‌های سنجش از دور

برای پایش پوشش گیاهی و پارامترهای سطحی، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با دو سنجنده OLI^2 و $TIRS^3$ انتخاب شدند. سه تاریخ کلیدی اردیبهشت، تیر و شهریور ۱۴۰۱ به ترتیب به عنوان مراحل آغازین رشد، اوج رشد و پایان فصل رشد گیاهان غالب در نظر گرفته شد. محصولات پردازش‌شده سطح ۲ که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) ارائه می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفتند. این محصولات شامل بازتاب سطحی و دمای سطح زمین هستند که در ابتدا مورد تصحیحات هندسی، رادیومتریکی و اتمسفری قرار گرفته‌اند (Roy et al., 2016; USGS, 2021).

۲-۲-۳. داده‌های صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مدل METRIC و ارزیابی دقت مطلق آن، داده‌های تبخیر-تعرق روزانه حاصل از روش مرجع فائو-پن من-مانتیت در مزرعه تحقیقاتی منطقه مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها به عنوان داده‌های مرجع^۴ برای مقایسه با برآوردهای مدل در دوره‌های مختلف فصل رشد به کار گرفته شد (Wang et al., 2021; Evett et al., 2012).

۲-۳. روش‌شناسی اجرای مدل METRIC

مدل METRIC یک مدل نیمه تجربی مبتنی بر بیلان انرژی سطح زمین است که برای هر پیکسل تصویر ماهواره‌ای، مقادیر مؤلفه‌های انرژی را محاسبه کرده و در نهایت تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) را برآورد می‌کند (Allen et al., 2007). معادله پایه توازن انرژی سطح در مدل به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\lambda_E = R_n - G - H \quad (1)$$

که در آن λ_E شار نهان تبخیر ($W \cdot m^{-2}$)، R_n تابش خالص سطح زمین ($W \cdot m^{-2}$)، G شار گرمایی نفوذی به خاک ($W \cdot m^{-2}$) و H شار گرمای محسوس ($W \cdot m^{-2}$) می‌باشد. پارامترهای این معادله براساس روابط موجود در محاسبه می‌شوند:

۱- مؤلفه‌های تابش خالص (R_n) و شار گرمایی نفوذی به خاک (G)

تابش تابش خالص از ترکیب تابش‌های موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی حاصل شده و شار گرمایی نفوذی به خاک با استفاده از روابط تجربی مبتنی بر دمای سطح، آلبیدو و شاخص پوشش گیاهی برآورد می‌گردد (Bastiaanssen et al., 1998). جزئیات محاسباتی این پارامترها و ضرایب گسیلندگی در منابع معتبر (Sobrino et al., 2004) به تفصیل ارائه شده است.

۲- شار گرمای محسوس H

شار گرمای محسوس با استفاده از معادله آیرودینامیکی (رابطه ۲) محاسبه می‌شود:

¹ Reference Evapotranspiration

² Operational Land Imager

³ Thermal Infrared Sensor

⁴ Truth Data

$$H = \rho \times C_p \times \frac{dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

که در آن: ρ چگالی هوا ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)، C_p ظرفیت گرمایی ویژه هوا ($\approx 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)، dT اختلاف دمای بین سطح و جو r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) است.

پس از محاسبه مؤلفه‌های H ، G ، R_n ، مقدار شار نهان به صورت باقی‌مانده براساس رابطه توازن انرژی (معادله ۱) به دست می‌آید.

۳- محاسبه تبخیر و تعرق

سپس، تبخیر-تعرق لحظه‌ای بر حسب میلی‌متر در ساعت از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (3)$$

که در آن: λ گرمای نهان تبخیر ($\approx 2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) و ρ_w چگالی آب ($\approx 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) است. در نهایت با استفاده از ضریب $ET_r F$ (رابطه ۴) و جایگذاری مقادیر در رابطه (۵)، مقدار ET روزانه برآورد می‌شود:

$$ET_r F = \frac{ET_{r inst}}{ET_r} \quad (4)$$

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_{r_24} \quad (5)$$

که ET_{r_inst} و ET_{r_24} به ترتیب تبخیر-تعرق مرجع لحظه‌ای و روزانه هستند که با استفاده از روش پنمن-مانتیت $FAO-56$ محاسبه می‌شوند (Allen et al., 1998).

۲-۴. واسنجی مدل با استفاده از پیکره‌های آبی

در شرایط ایده‌آل، واسنجی مدل نیازمند داده‌های دقیق لایسیمتری است. با توجه به نبود لایسیمتر وزنی در منطقه، از روش مقایسه ET_a مدل در پیکسل‌های واقع در پیکره‌های آبی با تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) استفاده شد. این رویکرد مبتنی بر این فرض است که در سطح پیکره‌های آبی، مقدار تبخیر مستقیم (E) با ET_a معادل بوده و با ET_o محاسبه شده از معادله فائو پنمن-مانتیت (Allen et al., 1998) قابل مقایسه است. به پیروی از آلن^۱ و همکاران (۱۹۹۸) و پاک‌پرور^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، ضریب $1/0.5$ برای معادل‌سازی ET_a و ET_o اعمال گردید.

نتایج اولیه نشان داد که در روزهای بادخیز، انحراف مدل بیشتر است. از آنجا که در مناطق خشک بیشترین اثر باد بر تبخیر-تعرق در طرف بعد از ظهر رخ می‌دهد، پارامتر سرعت باد در مدل با رابطه تعدیل شده پاک‌پرور و همکاران (۲۰۱۴)، به روز شد (رابطه ۶):

$$\frac{max^u}{inst^u} + inst^u = adj^u \quad (6)$$

که در آن adj^u سرعت باد تصحیح شده، $inst^u$ سرعت باد در زمان عبور ماهواره و max^u بیشینه روزانه باد است.

۲-۵. اعتبارسنجی مدل با بیلان آب خاک

برای اعتبارسنجی نتایج، از معادله بیلان آب خاک استفاده شد (رابطه ۷):

$$\Delta S = P + I - Ro - RF - ET_a \quad (7)$$

که در آن ΔS تغییر در ذخیره رطوبت خاک، P مقدار بارندگی، I مقدار آبیاری، Ro مقدار رواناب خروجی از مزرعه، RF مقدار آب برگشتی کشاورزی و ET_a مقدار تبخیر-تعرق واقعی است، واحد همگی به m^3/ha . مقدار ET_a حاصل از این معادله، واقعیت زمینی در نظر

¹ Allen

² Pakparvar

گرفته شده و مبنایی برای مقایسه با مقدار برآوردی مدل قرار گرفت.

در یک بازه زمانی فصل کشت مقدار تغییر در ذخیره رطوبت خاک (ΔS) ناچیز فرض شده و برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. رواناب خروجی نیز به دلیل بسته بودن پایانه کرت‌های آبیاری عملاً صفر خواهد بود. در مزارع نمونه مقادیر ورودی آبیاری که از قبل اندازه‌گیری شده باشد در اینجا مورد استفاده قرار گرفت. مقدار بارش مؤثر با رابطه (۸) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

$$P_{eff} = 125 \frac{(125 - 0.2P)}{125} \quad \text{for } P \leq 250 \quad (8)$$

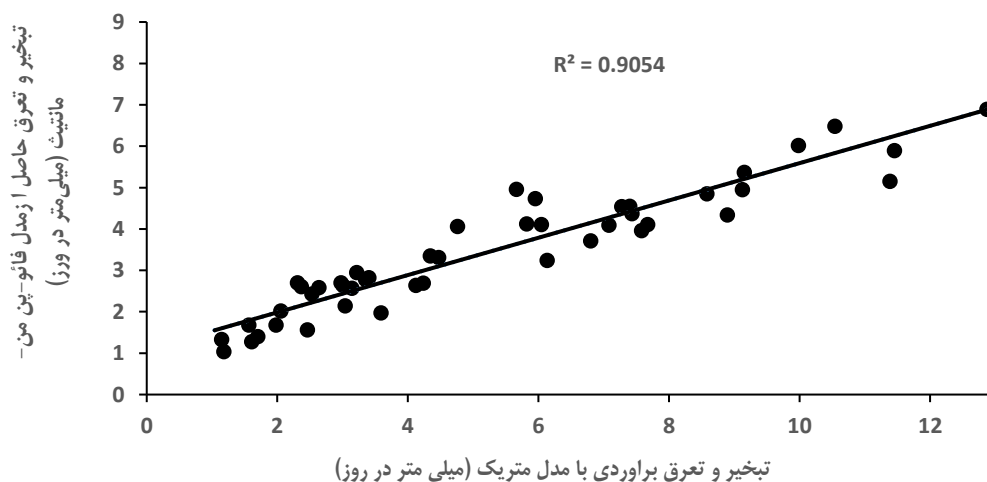
$$P_{eff} = 125 + 0.1P \quad \text{for } P \geq 250$$

که در آن P_{eff} باران مؤثر و P مقدار باران ثبت شده در فصل کشت می‌باشد. همچنین برای مقدار آب برگشتی (RF) مقدار آب برگشتی (RF)، از گزارش‌های ترازنامه آب کشور (وزارت نیرو، ۱۳۹۵) استفاده شد که بر اساس بافت خاک و راندمان آبیاری منطقه، این مقدار بین ۱۵ تا ۳۰ درصد حجم آب تأمین شده برآورد می‌گردد.

۳. نتایج

۳-۱. اجرای مدل و واسنجی

مدل متریک بر اساس تصاویر سطح ۲ ماهواره لندست ۸ در بازه زمانی پاییز ۱۳۹۷ تا پایان ۱۴۰۰ اجرا و واسنجی شد. هدف از واسنجی، دستیابی به حداکثر انطباق بین مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده (ETa) برای پیکسل‌های دارای پیکره آبی و مقادیر برآوردی تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ETo) با استفاده از معادله استاندارد فائو پنمن-مانتیت بود. ضریب گیاهی Kc برای محدوده‌های آبی برابر ۱/۰۵ در نظر گرفته شد (Allen et al., 1998) و هرگونه انحراف از این مقدار به عنوان نشانه ضعف مدل تلقی گردید.



شکل ۲- ارتباط ET_a فائو پنمن-مانتیت با ET_c مدل متریک واسنجی شده در دشت چناب تهران.

نتایج مقایسه مقادیر ET_a استخراج شده از مدل METRIC با داده‌های محاسبه‌شده بر اساس معادله مرجع فائو-پنمن-مانتیت (شکل ۲) نشان داد که این مدل از دقت بسیار بالایی برخوردار است ($R^2=0.91$). این میزان همبستگی بالا بیانگر توانایی METRIC در بازسازی تغییرات روزانه تبخیر-تعرق و انطباق آن با واقعیت‌های هیدرولوژیک و اقلیمی منطقه است. اگرچه در مقادیر بالای ET_a اندکی پراکندگی مشاهده می‌شود، اما الگوی کلی همخوانی قابل قبولی داشته و استفاده از METRIC را به عنوان ابزاری کارآمد در برآورد نیاز آبی گیاهان و مدیریت منابع آب منطقه تأیید می‌کند.

۲-۳. بیلان آب در خاک و مقایسه با واقعیت میدانی

برای صحت‌سنجی نتایج مدل، بیلان آب خاک در مزرعه مرجع با داده‌های کامل برداشت شد. در دوره مطالعاتی، تغییر ذخیره رطوبت خاک (ΔS) و رواناب خروجی (R_o) ناچیز فرض شد و مقادیر بارش مؤثر (P_{eff}) و آبیاری (I) بر اساس داده‌های ثبت‌شده تعیین گردید. نتایج نشان داد که حجم سالانه ETa محاسبه‌شده توسط مدل متریک در مزرعه مرجع برابر با 32090 متر مکعب و در روش بیلان آب خاک برابر با 45197 مترمکعب بود که معادل درصد خطای 29 درصد در برآورد مدل است. ارزیابی عملکرد مدل بر پایه سه شاخص آماری استاندارد شامل ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ضریب تعیین (R^2) صورت گرفت که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج حاصل از ارزیابی دقت و صحت سنجی مدل METRIC

شاخص آماری	اردیبهشت	تیر	شهریور	میانگین فصلی
$RMSE$ (mm/day)	۰/۴۷	۰/۵۱	۰/۴۲	۰/۴۷
MAE (mm/day)	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۳۶	۰/۴
R^2 ضریب تعیین	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۱

نتایج حاکی از آنست که مدل METRIC در سه بازه زمانی مختلف عملکردی بسیار دقیق و پایدار داشته است. مقدار متوسط $RMSE$ معادل $0/47$ میلی متر در روز، بیانگر خطای اندک مدل در بازسازی مصرف آب روزانه در مقیاس پیکسل است. افزون بر آن، مقدار بالای ضریب تعیین ($R^2 = 0.91$) مؤید توانایی مدل در بازتولید دینامیک تبخیر-تعرق در پاسخ به شرایط محیطی است.

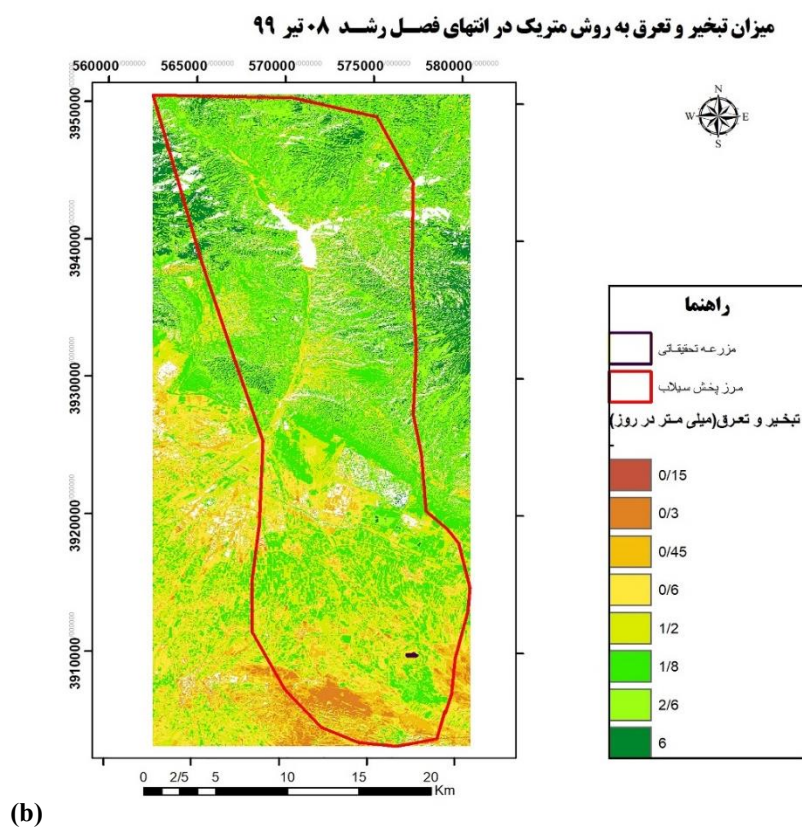
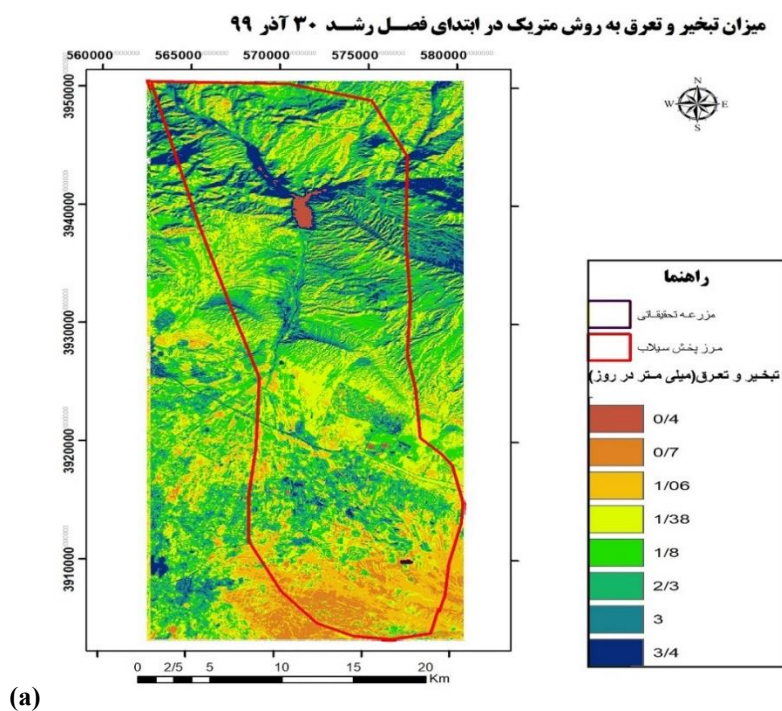
۳-۳. تحلیل زمانی تغییرات تبخیر-تعرق

به‌منظور تحلیل روند زمانی ETa در طول فصل زراعی، میانگین مقادیر حاصل از مدل برای کلیه اراضی کشاورزی در سه بازه‌ی اردیبهشت، تیر و شهریور محاسبه شده و با مقادیر تبخیر-تعرق مرجع (ET_r) مبتنی بر معادله پنمن-مانیتث FAO56 مقایسه گردید (Allen et al., 1998). الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد که هر دو متغیر دارای رفتار فصلی مشابهی هستند، بدین صورت که از بهار تا تابستان داراری روند افزایشی می‌باشند. سپس در با رسیدن به اوج در میانه تابستان، روند کاهشی را آغاز می‌کنند. این روند منعکس‌کننده افزایش تابش، دما و فتوسنتز در تابستان است که هم بر تعرق گیاهان و هم بر تبخیر سطح خاک مؤثر است.

با وجود هم‌راستایی در الگو، مقدار ETa به‌طور سیستماتیک کمتر از ET_r باقی مانده است. این اختلاف از نظر نظری نیز کاملاً منطقی است، چراکه ET_r مبنای پتانسیلی برای یک سطح چمن مرجع با شرایط بدون تنش است، در حالی که براساس نظر آلن و همکاران در سال ۱۹۸۸ نیز ETa بیانگر میزان واقعی مصرف آب تحت تأثیر محدودیت‌های آبی، مدیریت زراعی، و نوع پوشش گیاهی است. بنابراین، اختلاف مشاهده‌شده نه تنها نقص مدل محسوب نمی‌شود بلکه نشان‌دهنده دقت و واقع‌گرایی مدل METRIC در بازتاب شرایط هیدرولوژیکی میدانی و محدودیت‌های آبی دشت است (Cammalleri et al., 2024).

۴-۳. تحلیل مکانی توزیع تبخیر-تعرق

از جمله مزایای قابل توجه مدل METRIC، قابلیت آن در تولید نقشه‌های مکانی با دقت بالا از ETa است که امکان پایش دقیق مصرف آب را در سطح پیکسل فراهم می‌سازد. در شکل ۳، نقشه‌های توزیع مکانی ETa برای ابتدا و انتهای فصل رشد در سال ۱۳۹۹ ارائه شده‌اند. چنانچه مشخص است، این نقشه‌ها بیانگر ناهمگونی شدید در الگوی مصرف آب در دشت مورد مطالعه هستند.



شکل ۳- نقشه‌های تبخیر و تعرق در ابتدا و انتهای فصل رشد حاصل از مدل متریک.

۳-۴-۱. الگوی مکانی تبخیر-تعرق در ابتدای فصل رشد

همان گونه که در شکل ۳ (قسمت a) مشاهده می شود، در بازه زمانی ابتدای فصل رشد مربوط به داده های ۳۰ آذر ۱۳۹۹، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی در سطح منطقه به دلیل قرارگیری در فصل سرد، نسبتاً پایین است. با این حال، تحلیل دقیق نقشه نشان دهنده یک تضاد مکانی معنادار میان زون های پخش سیلاب و اراضی مجاور است. بخش اعظم اراضی در محدوده رنگ های سبز روشن تا سبز تیره قرار دارند که معرف مقادیر ۱/۸ تا ۳ میلی متر در روز می باشند. این در حالی است که نواحی جنوبی و خارج از محدوده طرح (مناطق با رنگ نارنجی و قرمز)، کمترین میزان تبخیر (۰/۴ تا ۰/۷ میلی متر در روز) را به ثبت رسانده اند. این اختلاف در مقادیر ETa، نشان دهنده پایداری رطوبت در محدوده پخش سیلاب حتی در ماه های سرد سال است. در واقع، نفوذ سیلاب های فصلی به لایه های زیرین و حفظ رطوبت در پروفیل خاک، منجر به تداوم تبادل رطوبتی در این زون ها شده است. تنها بخش های محدودی از اراضی زراعی با پوشش گیاهی متراکم تر دارای تبخیر-تعرق بالاتر (نزدیک به ۳/۴ میلی متر در روز) هستند که به رنگ آبی تیره مشخص شده اند. این وضعیت تایید می کند که مدل METRIC به خوبی توانسته است تمایز میان «رطوبت ناشی از مدیریت پخش سیلاب» و «خشکی اراضی بایر حاشیه دشت» را در این مقطع زمانی بازسازی کند. همچنین، در نواحی مرتفع شمال منطقه، مقادیر متوسط تبخیر مشاهده می شود که بیانگر اثر بارش های آذرماه و کاهش نیاز آبی ناشی از دمای پایین سطح در این ارتفاعات است.

۳-۴-۲. الگوی مکانی تبخیر-تعرق در انتهای فصل رشد

نقشه مربوط به تیرماه ۱۳۹۹ (شکل ۳-b) نشان می دهد که هم زمان با تکمیل فنولوژی گیاهی و افزایش شدید دمای هوا، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی به طور چشمگیری جهش یافته است. در این بازه، بخش اعظم اراضی داخل مرز پخش سیلاب و مزارع آبی شمال منطقه در محدوده رنگ های سبز روشن تا سبز تیره قرار دارند که معرف مقادیر ۱/۸ تا ۶ میلی متر در روز می باشند. نواحی دارای بیشترین تراکم گیاهی و باغات، با رنگ سبز پررنگ مشخص شده اند که تبخیر-تعرق روزانه ۶ میلی متر را نشان می دهند؛ این امر بیانگر مرحله اوج رشد گیاهان و تبدیل حداکثری انرژی تابشی به شار گرمای نهان در پاسخ به پتانسیل بالای اتمسفر است. در مقابل، اراضی حاشیه ای و نواحی جنوبی خارج از محدوده طرح، افت شدید ETa را نشان می دهند؛ به طوری که مقادیر در این بخش ها به محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی متر در روز (رنگ های قهوه ای و نارنجی) رسیده است. این تضاد شدید مکانی میان زون های تحت مدیریت و اراضی بایر، نشان دهنده وقوع پدیده «اثر واحه» و همچنین کارایی مدل METRIC در تفکیک پیکسل های با محدودیت شدید رطوبتی از پیکسل های دارای دسترسی به آب آبیاری یا رطوبت زیرسطحی است (Cammalleri et al., 2024; Oumou et al., 2025).

۳-۴-۳. مقایسه دو بازه زمانی

در ابتدای فصل رشد، تبخیر-تعرق عمدتاً پایین بوده و تنوع مکانی زیادی ندارد، که دلیل آن پوشش گیاهی اندک، دمای پایین تر و غالب بودن رطوبت زمستانی خاک است. در انتهای فصل رشد، میزان تبخیر-تعرق نه تنها افزایش یافته بلکه ناهمگنی مکانی نیز بیشتر شده است، زیرا اختلاف نوع کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی نقش پررنگ تری در تعیین الگوهای تبخیر-تعرق پیدا می کند. بیشینه ETa در تیرماه (۶ میلی متر) تقریباً ۱/۸ برابر بیشینه مقادیر در آذرماه (۳/۴ میلی متر) است. این جهش مقادیر در کنار کاهش شدید ETa در اراضی غیرکشت شده (تا ۰/۱۵ میلی متر)، اهمیت مدیریت دقیق منابع آب و نقش طرح های تغذیه مصنوعی در تعدیل تنش های هیدرولوژیکی را به خوبی نشان می دهد. این نتایج با یافته های آلن و همکاران در سال ۲۰۰۷ مبنی بر واقع گرایی مدل های بیلان انرژی در بازتاب محدودیت های محیطی و مدیریت زراعی کاملاً همخوانی دارد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش تایید کرد که مدل METRIC، پس از واسنجی^۱ دقیق با استفاده از تصاویر سطح ۲ لندست ۸، قابلیت بالایی در بازسازی الگوهای مکانی و زمانی تبخیر-تعرق واقعی (Eta) در یک اقلیم خشک دارد. دستیابی به خطای نسبی کمتر از ۱۲ درصد و ضریب تبیین بالاتر از ۰/۹، نشان‌دهنده انطباق نیرومند خروجی‌های مدل با واقعیت‌های زمینی است. استفاده هم‌زمان از دو روش واسنجی — شامل پیکره‌های آبی و بیلان آب خاک — یکی از نوآوری‌های کلیدی این تحقیق است که موجب افزایش اعتبار نتایج شد. بسیاری از مطالعات پیشین METRIC تنها یکی از این روش‌ها را به کار برده‌اند که از میان آن‌ها می‌توان به مطالعات اومو^۲ و همکاران (۲۰۲۵)، لیو^۳ و همکاران (۲۰۲۴) و تاسومی^۴ و همکاران (۲۰۱۹) اشاره کرد. در پژوهش حاضر این ترکیب دوسویه به‌طور هم‌زمان و بر روی یک منطقه خشک اجرا شد و هم‌خوانی بالای نتایج هر دو روش، اعتمادپذیری مدل را تقویت کرد.

رویکرد دیگر به کار گرفته شده در این مطالعه، اصلاح ورودی باد با استفاده از حداکثر سرعت روزانه (u_{max}) به جای سرعت لحظه‌ای عبور ماهواره است. این اصلاح در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که تحت تأثیر فرارفت و نوسانات شدید دمای روزانه هستند، منجر به بهبود دقت مدل شد. مشابه این ایده در مطالعات مختاری (۲۰۱۳) و پاک پرور (۲۰۱۴) مطرح شده است، اما این پژوهش آن را در چارچوب METRIC و با داده‌های سطح ۲ پیاده‌سازی و ارزیابی کرده است.

همچنین، به‌کارگیری داده‌های سطح ۲ لندست ۸ همراه با تصحیحات محلی و بومی‌سازی ورودی‌ها، عملکرد مدل را بهبود بخشید. این داده‌ها که از پیش دارای تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی استاندارد هستند، عدم‌قطعیت محاسبات بیلان انرژی را کاهش داده و با گزارش‌های اخیر آنجلینی^۵ و همکاران (۲۰۲۱) و اومو و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد. این موضوع نشان می‌دهد استفاده از داده‌های سطح دو دقت بازتاب سطح و دمای سطح را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (USGS, 2024; Roy et al., 2016). در این مطالعه، علاوه بر استفاده از این داده‌ها، آستانه‌ی NDVI نیز بر اساس بازدید میدانی و شناخت محلی از انواع محصولات تعیین شد که موجب جداسازی دقیق‌تر اراضی تحت کشت گردید.

یکپارچه‌سازی خروجی مدل با برآورد آب مصرفی واقعی در مقیاس مزرعه و دشت از نوآوری‌های دیگر این پژوهش است. بسیاری از مطالعات پیشین صرفاً Eta را برآورد می‌کنند، اما در این پژوهش خروجی‌های مدل به حجم آب مصرفی در واحد متر مکعب تبدیل و در بازه سالانه برای کل محدوده تحت تأثیر پخش سیلاب محاسبه شد. این رویکرد امکان مقایسه مستقیم نتایج مدل با داده‌های برداشت آبیاری را فراهم کرد و ابزار تصمیم‌گیری بهتری برای مدیریت منابع آب در اختیار قرار داد.

در نهایت، تمرکز این تحقیق بر مناطق تحت مدیریت پخش سیلاب، بسیار مهم و راهگشا است که در ادبیات جهانی کمتر بررسی شده است. مطالعات اخیر عمدتاً بر مزارع آبیاری کلاسیک تمرکز دارند (Madugundu et al., 2017; Büyükcangaz et al., 2017)، در حالی که این پژوهش نشان داد METRIC می‌تواند برای ارزیابی اثرات پخش سیلاب بر الگوهای مکانی و زمانی Eta نیز به کار رود. این نتایج نه‌تنها قابلیت مدل METRIC را برای پایش دقیق مصرف آب در مقیاس مزرعه و دشت تأیید می‌کند، بلکه اهمیت آن را در برنامه‌ریزی و تخصیص بهینه منابع آبی مناطق خشک و نیمه‌خشک برجسته می‌سازد.

با وجود این که نتایج به‌دست‌آمده بیانگر عملکرد مناسب مدل متریک در منطقه مطالعاتی می‌باشد، محدودیت‌هایی نیز در این پژوهش مشاهده شد که در صورت برطرف شدن آن‌ها در تحقیقات بعدی می‌توان انتظار عملکرد بهتری از مدل مذکور داشت. این محدودیت‌ها شامل پدیده تغییرات سریع رطوبت خاک در فواصل بین گذر ماهواره لندست، حساسیت مدل به مؤلفه‌های اتمسفری در مناطق خشک و

¹ Calibration

² Oumou

³ Liu

⁴ Tasumi

⁵ Angelini

عدم دسترسی به سنسورهای پایش برخط جهت کالیبراسیون دقیق تر پارامترهای بیلان انرژی می باشد. لذا می توان جهت برطرف ساختن محدودیت های ذکر شده در تحقیقات آتی از تصاویر ماهواره های با تناوب زمانی کمتر مانند سنتینل و همچنین تجهیز مناطق مطالعاتی به سنسورهای پایش برخط رطوبت و دما استفاده نمود.

References

- Aghanabati, A. (2004). *Geology of Iran*. Tehran: Geological Survey of Iran. (In Persian).
- Alijani, B. (2002). *Climatology of Iran*. Tehran: University Press. (In Persian).
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Rome: FAO.
- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Anderson, M. C., Norman, J. M., Diak, G. R., Kustas, W. P., & Mecikalski, J. R. (2012). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 123, 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
- Angelini, L. P., Biudes, M. S., Machado, N. G., Geli, H. M. E., & Vourlitis, G. L. (2021). Surface Albedo and Temperature Models for Surface Energy Balance Fluxes and Evapotranspiration Using SEBAL and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. *Sensors*, 21(21), 7196. <https://doi.org/10.3390/s21217196>
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G. J., & van der Wal, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1: Formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Büyükcangaz, H., Steele, D. D., Tuscherer, S. R., Hopkins, D. G., & Jia, X. (2017). Evapotranspiration mapping using METRIC in flooded agricultural lands (Devils Lake Basin, North Dakota). *Transactions of the ASABE*, 60(5), 1575–1591. <https://doi.org/10.13031/trans.12149>
- Cammalleri, C., Anderson, M. C., Bambach, N. E., McElrone, A. J., Knipper, K., Roby, M. C., Ciraolo, G., DeCaro, D., Ippolito, M., Corbari, C., Ceppi, A., Mancini, M., & Kustas, W. P. (2024). A fully remote sensing-based implementation of the two-source energy balance model: An application over Mediterranean crops. *Agricultural Water Management*, 306, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109207>
- Domarten, J. F. (1942). *Climatic classification*. New York: McGraw-Hill.
- Evelt, S. R., Kustas, W. P., Gowda, P. H., Anderson, M. C., Prueger, J. H., & Howell, T. A. (2012). Overview of the Bushland Evapotranspiration and Agricultural Remote sensing EXperiment 2008 (BEAREX08): A field experiment evaluating methods for quantifying ET at multiple scales. *Advances in Water Resources*, 50, 4–19. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.010>
- Ghisi, T., Fischer, M., Nieto, H., Kowalska, N., Jocher, G., Homolová, L., Burchard-Levine, V., Žalud, Z., & Trnka, M. (2024). Evaluation of the METRIC and TSEB remote sensing evapotranspiration models in the floodplain area of the Thaya and Morava Rivers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101785. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101785>
- Hong, S.-H., Hendrickx, J. M. H., Kleissl, J., Gomez-Velez, J. D., Fregre-Duque, J., Vega, D., Moreno-Ramirez, H., & Ogden, F. (2014). Mapping energy balance fluxes in arid riparian areas. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(11), 13479–13539. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-13479-2014>
- Iran Meteorological Organization. (2022). *Climatic data of Tehran province*. Tehran: IMO. (In Persian).
- Karandish, F., & Hoekstra, A. Y. (2017). Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. *Water*, 9(11), 831. <https://doi.org/10.3390/w9110831>
- Karimi, P., & Bastiaanssen, W. G. M. (2015). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting – Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 507–532. <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>
- Li, Z., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C. (2020). Evapotranspiration estimation using remote sensing: Past, present and future. *Remote Sensing of Environment*, 247, 111935. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111935>
- Liou, K. N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation* (2nd ed.). Academic Press.

- Liu, Y., Ortega-Farías, S., Fan, Y., Hou, Y., Wang, S., Yang, W., Li, S., & Tian, F. (2024). Comparison of differences in actual cropland evapotranspiration under two irrigation methods using satellite-based model. *Remote Sensing*, 16(1), 175. <https://doi.org/10.3390/rs16010175>
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286>
- Madugundu, R., Al-Gaadi, K. A., Tola, E., Hassaballa, A. A., & Patil, V. C. (2017). Performance of the METRIC model in estimating evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia using Landsat-8 images. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 6135–6151. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6135-2017>
- Ministry of Energy, Iran. (2016). Guidelines for determining water balance in study areas. *Water and Wastewater Deputy*, Iran Water Resources Management Company. (In Persian).
- Mokhtari, M. H., Ahmad, B., Hoveidi, H., & Busu, I. (2013). Sensitivity analysis of METRIC-based evapotranspiration algorithm. *International Journal of Environmental Research*, 7(2), 407–422.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781–1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Oumou, A., Essahlaoui, A., Hafyani, M. E., Alitane, A., Essahlaoui, N., Khrabcha, A., Van Griensven, A., Van Rompaey, A., & Gobin, A. (2025). Crop Evapotranspiration Dynamics in Morocco's Climate-Vulnerable Saiss Plain. *Remote Sensing*, 17(14), 2412. <https://doi.org/10.3390/rs17142412>
- Pakparvar, M., Alizadeh, A., & Kamali, G. A. (2014). Calibration of SEBAL and METRIC algorithms for estimating actual evapotranspiration in an arid region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(2), 243–257. (In Persian).
- Pareeth, S., & Karimi, P. (2023). Evapotranspiration estimation using Surface Energy Balance Model and medium resolution satellite data: An operational approach for continuous monitoring. *Scientific Reports*, 13(1), 12026. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38563-2>
- Roy, D. P., Kovalskyy, V., Zhang, H. K., Vermote, E. F., Yan, L., Kumar, S. S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sensing of Environment*, 185, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.005>
- Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water management*, 226, 105805. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105805>
- USGS. (2021). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. U.S. Department of the Interior. Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- USGS. (2024). _Landsat Next: Future of Land Imaging and Enhanced Temporal Resolution for Water Management_. U.S. Geological Survey Fact Sheet. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Wang, T., Melton, F. S., Pôças, I., Johnson, L. F., Thao, T., Post, K., & Cassel-Sharma, F. (2021). Evaluation of crop coefficient and evapotranspiration data for sugar beets from landsat surface reflectances using micrometeorological measurements and weighing lysimetry. *Agricultural Water Management*, 244, 106533. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106533>
- Water Resources Management Research Center (WRMRC). (2019). *Water resources management report: Varamin plain*. Tehran, Iran: WRMRC. (In Persian).
- Zhang, X. N., Shen, Y. J., Li, H. J., Zhang, X. L., Li, Q. Y., & Wang, Y. X. (2024). Estimation of evapotranspiration in agricultural areas of Pakistan based on the METRIC model. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 32(11), 1927–1939. <https://doi.org/10.12357/cjca.20240163>