Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Spatio–temporal Estimation of Actual Evapotranspiration in the Hirmand River Basin Using the SEBAL Algorithm and Remote Sensing Data

Mahboubeh Ebrahimian [1]✉ | Ali Khosravanizadeh[2] | Somayeh Mirshekri[3]

1. Corresponding Author, Department of Water Resources, Hamoun International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol. Iran. E-mail: mebrahimian@rizabol.ac.ir
2. Department of Aquatic science, Hamoun International Wetland Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: akhosravanizadeh@rizabol.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran. E-mail: smirshekari@rizabol.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: June. 15, 2026

Revised: July. 13, 2026

Accepted: Aug. 8, 2026

Published online: Nov. 23, 2026

Keywords:
Actual evapotranspiration,
SEBAL algorithm,
MODIS,
Google Earth Engine,
Surface energy balance

ABSTRACT

Actual evapotranspiration (ETa) is the important component of the water balance in arid and semi-arid basins, and its quantitative estimation is essential for sustainable water resources management. In this study, the spatiotemporal distribution of ETa across the Hirmand (Helmand) River Basin (~280,000 km²) was estimated for 2023 using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) implemented within the Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform. Input datasets comprised MODIS surface reflectance (MOD09GA), land surface temperature (MOD11A1), and ERA5-Land atmospheric reanalysis products. Mean annual ETa across the basin was estimated at 670 mm/year, following a clear decreasing gradient from the mountainous headwaters (>1,100 mm/year) to the arid lowland plains (<100 mm/year). Seasonal ETa peaked in spring (745 mm/season) and approached zero in winter. Correlation analysis revealed that net radiation (R = +0.703) and land surface temperature (R = −0.933) exhibited the strongest positive and negative associations with ETa, respectively, while NDVI (R = +0.372) and surface albedo (R = −0.053) showed comparatively weaker relationships. Validation against the MOD16A2GF product yielded a correlation of r = 0.858 and a coefficient of determination of R^2 = 0.736, confirming the reliability of the spatial distribution pattern. The systematic overestimation of SEBAL relative to MOD16 (PBIAS = +283.9%) is attributed to differences in the computational approaches of the two models and to the well-documented tendency of MOD16 to underestimate ETa in arid environments. The findings of study provide a robust quantitative framework for water resources management and transboundary water diplomacy in the Hirmand Basin.

Cite this article: Ebrahimian, M., Khosravanizadeh, A., & Mirshekari, S. (2026). Spatio-temporal Estimation of Actual Evapotranspiration in the Hirmand River Basin Using the SEBAL Algorithm and Remote Sensing Data. Iranian Journal of Soil and Water Research, 57 (9), 2229-2248. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.416500.670158

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.416500.670158

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Actual evapotranspiration (ETa) is a key component of the hydrological cycle and water balance, particularly in arid and semi-arid regions where water resources are severely limited. Accurate estimation of ETa is essential for sustainable water resources management, agricultural planning, drought assessment, and environmental monitoring. Traditional field-based methods are often constrained by sparse observation networks and limited spatial coverage, especially in large transboundary basins. Advances in remote sensing and cloud-computing platforms have enabled regional-scale estimation of ETa through surface energy balance models. Among these approaches, the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) has been widely applied due to its strong physical basis and minimal dependence on ground observations. Despite the strategic importance of the Helmand River Basin, comprehensive basin-scale assessments of ETa using SEBAL remain limited. Therefore, this study aimed to estimate the spatiotemporal distribution of ETa across the Helmand Basin during 2023 using MODIS remote sensing products and meteorological data within the Google Earth Engine (GEE) environment.

Methodology

The study was conducted over the Helmand River Basin, a transboundary watershed covering approximately 280,000 km² across Afghanistan, Iran, and a small part of Pakistan. MODIS surface reflectance (MOD09GA) and land surface temperature (MOD11A1) products were used to derive biophysical parameters including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), surface albedo, fractional vegetation cover, and surface emissivity. Meteorological variables required for energy balance calculations were obtained from the ERA5-Land reanalysis dataset. The SEBAL algorithm was implemented in Google Earth Engine to estimate latent heat flux and actual evapotranspiration based on the surface energy balance equation. Net radiation (Rn), soil heat flux (G), and sensible heat flux (H) were calculated for each pixel, and ETa was derived as the residual energy component. Hot and cold pixels were selected using a combined NDVI–LST approach to account for the heterogeneous environmental conditions of the basin. Annual and seasonal ETa maps were generated for 2023. Validation was performed through pixel-wise comparison with the MOD16 evapotranspiration product using statistical indicators including Pearson correlation coefficient (R), coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and percent bias (PBIAS).

Results and Discussion

The annual mean ETa of the Helmand Basin was estimated at approximately 670 mm $year^{-1}$. Spatial analysis revealed a clear decreasing gradient from the mountainous upstream regions to the arid downstream areas. The highest ETa values (>1100 mm $year^{-1}$) occurred in high-altitude regions and irrigated agricultural lands, whereas the lowest values (<100 mm $year^{-1}$) were observed in barren lands and desert areas of the Sistan Plain. Seasonal variations showed maximum ETa during spring, reaching about 745 mm $year^{-1}$, and minimum values during winter, approaching zero. This pattern reflects the combined influence of snowmelt, vegetation growth, solar radiation, and seasonal climatic conditions. Correlation analysis indicated that net radiation exhibited the strongest positive relationship with ETa (R = +0.703), highlighting the dominant role of available energy in evapotranspiration processes. Conversely, land surface temperature showed a very strong negative correlation (R = −0.933), reflecting the cooling effect of evapotranspiration in vegetated and irrigated areas. NDVI displayed a weak positive correlation (R = +0.372), while albedo showed a negligible negative relationship (R = −0.053). Validation against the MOD16 product demonstrated a strong spatial agreement, with R = 0.858 and R^2 = 0.736. However, SEBAL systematically overestimated ETa relative to MOD16 (PBIAS = +283.9%). This discrepancy is attributed to differences in model structure, the tendency of MOD16 to underestimate ETa in arid environments, and uncertainties associated with coarse-resolution meteorological inputs.

Conclusion

This study successfully mapped the spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration across the Helmand River Basin using the SEBAL algorithm and remotely sensed data within the Google Earth Engine platform. Results demonstrated substantial spatial variability in ETa, controlled primarily by topography, land cover, water availability, and energy inputs. Net radiation and land surface temperature were identified as the most influential factors governing ETa variability. Although validation results confirmed the capability of SEBAL to reproduce spatial ETa patterns, further improvement of absolute estimates requires local calibration

using field observations such as flux towers or lysimeter measurements. The generated ETa dataset provides valuable information for water resources planning, agricultural management, and transboundary water governance in the Helmand Basin.

Funding

This manuscript is part of the research project (Project Code: PR-RIOZ-1404-5091-1). The authors would like to thank the Research Institute of Zabol for its research and organizational support

Authorship contribution

Conceptualization, Ebrahimian, M. and Khosravanizadeh, A.; methodology, Ebrahimian, M.; software, Ebrahimian, M.; validation, Ebrahimian, M., Khosravanizadeh, A. and Mirshekari, S.; data curation and analysis, Ebrahimian, M., Khosravanizadeh, A. and Mirshekari, S.; writing—original draft preparation, Ebrahimian, M.; writing—review and editing, Khosravanizadeh, A. and Mirshekari, S.; project administration, Ebrahimian, M.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this work, the authors used DeepSeek to improve the language quality of the extended abstract. After using the tool, the authors carefully reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

The data from the present study are available upon written request from the authors.

Acknowledgements

This manuscript is part of the research project (Project Code: PR-RIOZ-1404-5091-1). The authors would like to express their sincere appreciation to the Research Institute of Zabol for its research and organizational support.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of Research Institute of Zabol The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

برآورد زمانی-مکانی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبریز هیرمند با استفاده از الگوریتم سبال (SEBAL) و داده‌های سنجش از دور

محبوبه ابراهیمیان [۱]✉ | علی خسروانی‌زاده[۲]| سمیه میرشکاری[۳]

۱. نویسنده مسئول، گروه منابع آب، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل. رایانامه: mebrahimian@rizabol.ac.ir

۲. گروه شیلات، پژوهشکده تالاب بین المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل. رایانامه: akhosravanizadeh@rizabol.ac.ir

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل .رایانامه: smirshekari@rizabol.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
تبخیر و تعرق واقعی،
الگوریتم سبال،
مودیس،
گوگل ارث انجین،
بیلان انرژی سطحی

چکیده

تبخیروتعرق واقعی (ETa)مهم‌ترین جزء بیلان آب در حوزه‌های خشک و نیمه‌خشک است که تعیین کمّی آن برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است. در این پژوهش، توزیع زمانی-مکانی ETa حوزه آبریز هیرمند (مساحت حدود ۲۸۰ هزار کیلومتر مربع) در سال ۲۰۲۳ با اجرای الگوریتم بیلان انرژی سطحی (SEBAL)در بستر پلتفرم گوگل ارث انجین (GEE)برآورد شد. داده‌های ورودی شامل بازتاب سطحی (MOD09GA)، دمای سطح زمین (MOD11A1)و پارامترهای جوی ERA5-Land بودند. میانگین ETa سالانه حوزه ۶۷۰ میلی‌متر در سال برآورد شد که از الگوی کاهشی مشخص از بالادست کوهستانی (بیش از ۱۱۰۰ میلی‌متر در سال) به پایین‌دست بیابانی (کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال) پیروی می‌کند. بیشینه فصلی در بهار (۷۴۵ میلی‌متر بر فصل) و کمینه در زمستان (نزدیک به صفر) مشاهده شد. تحلیل همبستگی نشان داد که تابش خالص (R = +0.703)و دمای سطح زمین (R = −0.933) =به‌ترتیب قوی‌ترین همبستگی مثبت و منفی را با ETa دارند، در حالی که NDVI (R = +0.372) و آلبدو (R = −0.053)همبستگی ضعیف‌تری نشان دادند. اعتبارسنجی در مقایسه با محصول MOD16 ضریب همبستگی R = 0.858 و ضریب تعیین $R^2 = 0.736$ را نشان داد که الگوی مکانی مناسبی را تأیید می‌کند. بیش‌برآورد سیستماتیک SEBAL نسبت به MOD16 (PBIAS = +283.9%) به تفاوت رویکرد محاسباتی دو مدل و کم‌برآورد شناخته‌شده MOD16 در مناطق خشک نسبت داده می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوب کمّی مناسبی برای مدیریت منابع آب حوزه فرامرزی هیرمند فراهم کند.

استناد: ابراهیمیان، محبوبه؛ خسروانی‌زاده، علی؛ و میرشکاری، سمیه (۱۴۰۵). برآورد زمانی-مکانی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبریز هیرمند با استفاده از الگوریتم سبال(SEBAL) و داده‌های سنجش از دور، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۹)، ۲۲۴۸-۲۲۲۹.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.416500.670158

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.416500.670158

مقدمه

مدیریت منابع آب، به‌ویژه در حوزه‌های فاقد آمار، نیازمند شناخت مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیکی است. تبخیر و تعرق واقعی (ETa) به‌عنوان دومین مؤلفه مهم پس از بارش، نقش اساسی در بیلان آب، مدیریت منابع، کشاورزی و ارزیابی خشکسالی و تغییرات اقلیمی دارد (آرتیمانی و همکاران، ۱۴۰۳؛ ضیایی و همکاران، ۱۳۹۷؛ فخار و کاویانی، ۱۴۰۳). این مؤلفه حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد بارش سالانه در مقیاس جهانی و در برخی مناطق خشک بیش از ۹۵ درصد آن را به اتمسفر بازمی‌گرداند (Jung et al., 2010؛ Oki & Kanae, 2006)؛ بنابراین، برآورد و پایش آن برای مدیریت و تخصیص بهینه آب ضروری است (پریداد و همکاران، ۱۳۹۰). تبخیر و تعرق تحت تأثیر توپوگرافی، اقلیم، پوشش و کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک و شرایط محیطی و مدیریتی بوده و به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود. روش‌های مستقیم مانند لایسیمتر، تورنت‌وایت و بلانی–کریدل، به‌رغم دقت بالا، به‌دلیل هزینه، پیچیدگی و ماهیت نقطه‌ای، در مقیاس‌های وسیع و حوزه‌های فاقد شبکه پایش کافی محدودیت دارند (Kang & Cho, 2021; Sahil & Akhtar, 2024). در مقابل، روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر سنجش از دور با پوشش وسیع، هزینه کمتر و قابلیت درنظرگرفتن ناهمگنی سطح، برای برآورد ETa در مقیاس منطقه‌ای و حوزه‌ای مناسب بوده و عمدتاً در چهار دسته آیرودینامیکی، بیلان انرژی، ترکیبی و تجربی طبقه‌بندی می‌شوند (Allen et al., 2007; Anderson, 2007). در این میان، روش‌های بیلان انرژی به‌دلیل مبنای فیزیکی قوی و پوشش فضایی گسترده، کاربرد بیشتری یافته‌اند (Stisen et al., 2021; Suwanlertcharoen et al., 2023). از مهم‌ترین الگوریتم‌های این رویکرد می‌توان به SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998)، SEBS (Su, 2002)، S-SEBI (Roerink et al., 2000) و METRIC (Allen et al., 2007) اشاره کرد. در میان این الگوریتم‌ها، الگوریتم بیلان انرژی سطح زمین (SEBAL) به دلیل اتکا بر معادلات فیزیکی، نیاز کمتر به داده‌های زمینی و قابلیت کاربرد در مناطق فاقد آمار، به‌طور گسترده برای برآورد تبخیر و تعرق منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Fawzy et al., 2021؛ Matarrese et al., 2012). مطالعات متعددی کارایی بالای این الگوریتم را در شرایط اقلیمی مختلف تایید کرده‌اند. برای مثال، در دلتای رود نیل با استفاده از تصاویر Landsat 8 و الگوریتمSEBAL ، دقت مناسبی در برآورد تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی گزارش شده است (Fawzy et al., 2021). همچنین بهمن‌آبادی و کاویانی (۱۳۹۸) در مقایسه سه مدل SEBAL، SSEB و TSEB با تصاویر MODIS و +ETM در اراک، کمترین خطا را برای SEBAL گزارش کردند. ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۰) نیز با استفاده از داده‌هایMODIS در منطقه مشهد نشان دادند که بیشترین تبخیر و تعرق در نواحی دارای پوشش گیاهی متراکم و کمترین مقدار آن در مناطق فاقد پوشش گیاهی رخ می‌دهد. علاوه بر این، محمدابراهیم و همکاران (۱۳۹۶) در دشت سیستان، نظری و کاویانی (۱۳۹۵) در دشت قزوین، زمانی و رحیم‌زاده (۱۳۹۵) در حوزه آبریز سد امیرکبیر و رائینی سرجاز و رستمی (۱۳۹۵) در دشت اهر نیز کارایی مناسب الگوریتم SEBAL را در شرایط اقلیمی و کاربری اراضی متفاوت مناطق مختلف ایران تأیید کرده‌اند.

علاوه بر عوامل اقلیمی، نوع کاربری و پوشش اراضی نیز از عوامل مهم کنترل‌کننده تبخیر و تعرق است. شاخص‌های بیوفیزیکی شاملNDVI ، آلبدو، دمای سطح زمین (LST) و تابش خالص (Rn) با شدت تبخیر و تعرق ارتباط دارند. مطالعات Chen et al. (2022) و Ablikim et al. (2023) بیشترین تبخیر و تعرق را در اراضی کشاورزی و پهنه‌های آبی و کمترین آن را در اراضی بایر و فاقد پوشش گیاهی گزارش کردند. همچنین امیدوار و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر معنی‌دار کاربری اراضی بر تبخیر و تعرق برآوردشده با الگوریتم SEBAL را در سه منطقه کشاورزی خراسان رضوی تأیید کردند. پیشرفت سامانه‌های پردازش ابری، به‌ویژه Google Earth Engine (GEE)، امکان پردازش حجم بزرگی از داده‌های ماهواره‌ای و اجرای عملیاتی الگوریتم‌های بیلان انرژی را در مقیاس‌های وسیع فراهم کرده است. توسعه مدل geeSEBAL توسط Laipelt et al. (2021) و نسخه geeSEBAL-MODIS توسط Andrade et al. (2022) نشان داد که برآورد بلندمدت تبخیر و تعرق در مقیاس‌های حوضه‌ای و قاره‌ای با دقت قابل قبول امکان‌پذیر است. همچنین Bruno Comini de Andrade et al. (2022) نیز با توسعه geeSEBAL-MODIS ، این قابلیت را به مقیاس قاره‌ای گسترش دادند. در همین راستا، Chen et al. (2025) با اصلاح روابط بین دمای سطح زمین و پوشش گیاهی (LST-NDVI) در الگوریتم SEBAL ، دقت برآورد تبخیر و تعرق محصولات کشاورزی را در حوضه Yellow River افزایش دادند. این پیشرفت‌ها نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم SEBAL با داده‌های MODIS و پلتفرم‌های ابری، ابزاری قدرتمند برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس‌های حوضه‌ای و منطقه‌ای فراهم کرده است.

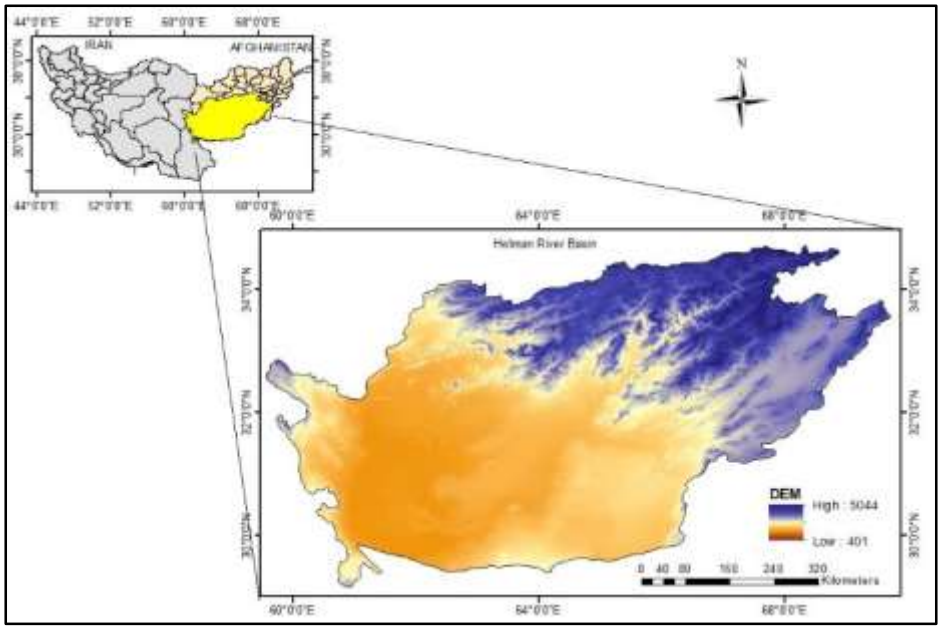
کاربرد روش‌های سنجش از دور در حوزه‌های فرامرزی خشک، از جمله حوضه هیرمند، همچنان محدود است. Akbari & Torabi Haghighi (2022) افزایش چشمگیر مصرف آب کشاورزی طی دو دهه اخیر را گزارش کردند و Wali et al. (2024) قابلیت الگوریتم

GCOM-C را در برآورد تبخیر و تعرق در شرایط کمبود داده تأیید نمودند. همچنین محمدابراهیم و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از SEBS و تصاویر MODIS در دشت سیستان، بیشترین تبخیر و تعرق را در پیکره‌های آبی، از جمله تالاب هامون و چاه‌نیمه‌ها، نشان دادند. با این حال، برآورد یکپارچه تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس کل حوضه هیرمند با رویکرد بیلان انرژی سطحی تاکنون انجام نشده است؛ خلأیی که با توجه به اهمیت راهبردی حوضه و نیاز به داده‌های پایه مدیریت منابع آب، ضرورت پژوهش حاضر را توجیه می‌کند (آرتیمانی و همکاران، ۱۴۰۳؛ شکری و همکاران، ۱۴۰۱؛ اکبرزاده‌مقدم سه‌قلعه و همکاران، ۱۳۹۴). پژوهش حاضر با هدف برآورد زمانی و مکانی تبخیر و تعرق واقعی حوضه هیرمند با استفاده از الگوریتم SEBAL، داده‌های MODIS و ERA5-Land در بستر Google Earth Engine طی سال ۲۰۲۳ و بررسی ارتباط آن با NDVI، Albedo، LST و Rn و کاربری‌های مختلف اراضی انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبریز هیرمند یکی از مهم‌ترین حوزه‌های فرامرزی جنوب‌غرب آسیا است که در محدوده جغرافیایی افغانستان، ایران و بخش کوچکی از پاکستان قرار دارد. این حوضه با مساحت حدود ۲۸۰ هزار کیلومتر مربع، بزرگ‌ترین حوضه آبریز شرق فلات ایران محسوب می‌شود که حدود ۸۵ درصد آن در افغانستان و بخش پایانی آن در ایران واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز هیرمند

رودخانه هیرمند به‌عنوان مهم‌ترین شریان آبی حوضه، از ارتفاعات مرکزی افغانستان سرچشمه گرفته و پس از طی بیش از ۱۱۰۰ کیلومتر، وارد دشت سیستان و تالاب بین‌المللی هامون می‌شود. ارتفاع حوضه از حدود ۴۰۰ متر در پایین‌دست تا ۵۰۰۰ متر در مناطق کوهستانی متغیر است که موجب شکل‌گیری شرایط متنوع اقلیمی و هیدرولوژیکی شده است. اقلیم حوضه عمدتاً خشک و نیمه‌خشک بوده و میانگین بارندگی سالانه آن ۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر است، درحالی‌که تبخیر بالقوه در دشت سیستان به بیش از ۴۰۰۰ میلی‌متر می‌رسد (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱). این شرایط، همراه با تنوع پوشش و کاربری اراضی و محدودیت شبکه‌های اندازه‌گیری زمینی، ضرورت و ظرفیت استفاده از روش‌های سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق در حوضه هیرمند را نشان می‌دهد.

روش کار

در مرحله نخست، داده‌های MODIS شامل بازتاب سطحی و دمای سطح زمین و همچنین داده‌های ERA5-Land به عنوان ورودی مدل تهیه شدند. در مرحله دوم، شاخص‌های بیوفیزیکی شامل NDVI، آلبدو، کسر پوشش گیاهی، گسیلندگی سطح و تابش خالص

استخراج شدند. در مرحله سوم، اجزای مختلف بیلان انرژی شامل شار تابشی خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس محاسبه و از طریق الگوریتم SEBAL تبخیر و تعرق واقعی برآورد شد. در نهایت، رابطه تبخیر و تعرق با شاخص‌های بیوفیزیکی و کلاس‌های مختلف کاربری اراضی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج با محصول MOD16 اعتبارسنجی شدند.

داده‌های مورد استفاده

اجرای الگوریتم SEBAL به داده‌های بیوفیزیکی سطح، دمای سطح، پارامترهای جوی و تابشی نیاز دارد. با توجه به محدودیت داده‌های زمینی در حوزه هیرمند، داده‌های موردنیاز از محصولات MODIS و بازتحلیل ERA5-Land استخراج و نقشه کاربری اراضی ۲۰۲۳ نیز برای تحلیل مکانی نتایج استفاده شد. تمامی داده‌ها در محیط Google Earth Engine (GEE) پردازش شدند (Gorelick et al., 2017) و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات داده‌های استفاده شده در برآورد تبخیر و تعرق در حوزه آبریز هیرمند

داده	محصول	قدرت تفکیک	تناوب زمانی	کاربرد
بازتاب سطحی	**MOD09GA**	**۵۰۰ m**	روزانه	**NDVIوAlbedo**
دمای سطح زمین	**MOD11A1**	**۱ km**	روزانه	**LST**
تبخیر و تعرق واقعی	**MOD16A2**	**۵۰۰ m**	۸ روزه	اعتبارسنجی
داده‌های هواشناسی	**ERA5-Land**	**۹ km**	روزانه	**Rn** و باد و دما
مدل رقومی ارتفاعی	**DEM**	**۳۰ m**	ثابت	توپوگرافی
نقشه کاربری اراضی	طبقه‌بندی‌شده	**۳۰ m**	سالانه	تحلیل مکانی

برای استخراج شاخص‌های پوشش گیاهی و آلبدو از محصول MOD09GA با بازتاب سطحی تصحیح‌شده اتمسفری، تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تناوب روزانه استفاده شد (Vermote et al., 2016) . داده‌های خام پس از اعمال ضریب مقیاس ۰/۰۰۰۱ به بازتاب واقعی تبدیل و با میانه‌گیری زمانی، کامپوزیت‌های ماهانه تهیه شدند. این رویکرد بر این اصل استوار است که پیکسل‌های ابری، بازتاب سطحی را به‌طور ناگهانی افزایش می‌دهند و به‌صورت مقادیر پرت در سری زمانی ظاهر می‌شوند؛ در حالیکه میانه، برخلاف میانگین، نسبت به این مقادیر پرت مقاوم است و بنابراین در صورتی که اکثریت روزهای هر ماه دارای پوشش نسبتاً صاف باشند (که در اقلیم خشک و کم‌ابر حوزه هیرمند مفروض است)، میانه ماهانه به‌طور مؤثر بدون نیاز به ماسک ابر، بازتاب سطحی واقعی را به‌طور مؤثر بازتولید می‌کند (Mateo-García et al., 2018). دمای سطح زمین نیز از محصول MOD11A1 با تفکیک مکانی یک کیلومتر و تناوب روزانه استخراج شد (Wan, 2014).

برای اعتبارسنجی، از محصول MOD16A2 استفاده شد. الگوریتم این محصول بر پایه منطق معادله پنمن–مانتیث بنا شده است (Mu et al., 2011) که در آن تبخیرتعرق کل به‌صورت مجموع سه مؤلفه محاسبه می‌شود: تبخیر از خاک مرطوب/اشباع، تبخیر از سطح مرطوب تاج پوشش، و تعرق از طریق روزنه‌های تاج پوشش خشک. ورودی‌های این الگوریتم شامل داده‌های بازتحلیل هواشناسی روزانه به همراه محصولات سنجش‌ازدور MODIS است (Mu et al., 2011). این محصول دارای تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و تفکیک زمانی ترکیبی ۸ روزه است. مقادیر خام این باند به‌صورت اعداد صحیح مقیاس‌شده ذخیره می‌شوند و واحد آن‌ها $kg/m^2/8day$ (معادل $mm/8day$) است؛ از این رو برای تبدیل مقادیر دیجیتال ذخیره‌شده به مقدار واقعی تبخیرتعرق بر حسب میلی‌متر، لازم است مقدار هر پیکسل در ضریب مقیاس (scale factor) برابر ۰/۱ ضرب شود (Running et al., 2019; Mu et al., 2007). پارامترهای جوی مورد نیاز الگوریتم شامل دما، تابش خالص، سرعت باد و متغیرهای کمکی از مجموعه داده ERA5-Land استخراج شدند. این مجموعه داده با قدرت تفکیک مکانی حدود ۹ کیلومتر و گام زمانی روزانه در مطالعات هیدرولوژیکی و تبخیر–تعرق کاربرد گسترده‌ای دارد (Muñoz-Sabater et al., 2021).

الگوریتم بیلان انرژی سطح برای خشکی (Surface Energy Balance Algorithm for Land; SEBAL)

مدل SEBAL با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و حداقل داده‌های زمینی، تبخیر و تعرق واقعی (ETa) را بر پایه معادله بیلان انرژی سطح زمین برآورد می‌کند. در این روش، شار گرمای نهان (λET) که بیانگر انرژی مصرف‌شده در فرآیند تبخیر و تعرق است، برای هر پیکسل و در زمان تصویربرداری ماهواره به‌صورت باقیمانده بیلان انرژی سطح محاسبه می‌شود (ثنایی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۰). معادله بیلان انرژی

سطح زمین در SEBAL به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود.

$$\lambda ET = R_n - G - H$$ رابطه ۱)

که در آن R_n تابش خالص سطح (W/ m²)، G شار گرمای خاک (W/ m²) ، H شار گرمای محسوس هوا(W/ m²) ، λET شار گرمای نهان تبخیر (W/ m²) است. λET حاصل معادله بیلان انرژی بوده و با تبدیل انرژی روزانه و تقسیم بر گرمای نهان تبخیر آب، به عمق تبخیر روزانه بر حسب میلی‌متر تبدیل شد (Bastiaanssen et al., 1998).

پارامترهای بیوفیزیکی سطح

استخراج پارامترهای بیوفیزیکی سطح، نخستین گام اجرای SEBAL است. این پارامترها از داده‌های بازتاب سطحی MODIS استخراج و به‌عنوان ورودی محاسبات بیلان انرژی استفاده می‌شوند. در این مرحله، سه پارامتر اصلی شامل NDVI ، آلبدو و گسیلندگی سطح محاسبه شد. شاخص NDVI نیز از بازتاب باندهای قرمز (B1) و مادون‌قرمز نزدیک (B2) محصول MOD09GA به‌دست آمد (رابطه ۲).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$ رابطه ۲)

این شاخص به عنوان نماینده تراکم و سلامت پوشش گیاهی در محاسبات بعدی و به‌عنوان معیار کمکی در انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر این شاخص در بازه (۱− تا ۱) می‌باشند. آلبدوی سطحی از ترکیب خطی باندهای MODIS و ضرایب پیشنهادی Liang (2001) و Allen et al. (2007) محاسبه شد. مقادیر این شاخص در بازه (۰ تا ۱) متغیرند (رابطه ۳).

$$\alpha = 0.160B1 + 0.291B2 + 0.243B3 + 0.116B4 + 0.112B5 + 0.081B7 - 0.0015$$ رابطه ۳)

کسر پوشش گیاهی (FVC) نشان‌دهنده نسبت سطحی است که توسط پوشش گیاهی پوشانده شده و به‌صورت خطی از NDVI مشتق می‌شود که از رابطه (۴) و با در نظر گرفتن NDVImin = 0.05 و NDVImax = 0.3 محاسبه شد (رابطه ۵). این مقادیر، به‌جای مقادیر متداول NDVImin = 0.2 ، NDVImax = 0.5 که برای مناطق با پوشش گیاهی متراکم‌تر مناسب‌اند، با توجه به دامنه محدود و پایین NDVI در این حوضه خشک انتخاب شدند (Jiapaer et al., 2011) .

$$FVC = \frac{NDVI - NDVImin}{NDVImax - NDVImin}$$ رابطه ۴)

$$FVC = \frac{NDVI - 0.05}{0.3 - 0.05}$$ رابطه ۵)

مقادیر FVC در بازه (۰، ۱) می باشند. بدین معنا که مقادیر کمتر از صفر (خاک لخت) صفر و مقادیر بیشتر از یک (پوشش گیاهی کامل) یک در نظر گرفته شدند. این پارامتر نقش کلیدی در محاسبه هر دو گسیلندگی سطح و نسبت G/Rn ایفا می‌کند. گسیلندگی سطح (Surface Emissivity; ε) کارایی یک سطح در گسیل تابش حرارتی نسبت به یک جسم سیاه ایده‌آل است و در محاسبه تابش بلندموج خروجی سطح اهمیت اساسی دارد. در این پژوهش، گسیلندگی پهن‌باند سطح از ترکیب خطی گسیلندگی پوشش گیاهی و خاک لخت بر اساس FVC محاسبه شد (معادله ۶) (Sobrino et al., 2004) .

$$\varepsilon = 0.985 \times FVC + 0.96 \times (1 - FVC)$$ رابطه ۶)

که در آن مقدار ε در بازه (0.96، 0.98) متغیر خواهد بود. خاک کاملاً لخت (FVC=0): ε = 0.96، پوشش گیاهی کامل (FVC=1): ε = 0.985، حالت میانه (FVC=0.5): ε = 0.9725. دمای سطح زمین (LST) از محصول MOD11A1 باند LST_Day_1km استخراج و با ضریب ۰/۰۲ به کلوین تبدیل شد (Wan et al., 2015; El-Shirbeny, 2026) و به عنوان مهم‌ترین پارامتر حرارتی در محاسبات شار گرمای محسوس مورد استفاده قرار گرفت. میانگین زمانی ماهانه به عنوان مقدار نماینده هر ماه در نظر گرفته شد.

تابش خالص سطح (R_n)

تابش خالص (R_n) از مجموع تابش خالص کوتاه‌موج و بلندموج محصول ERA5-Land محاسبه و با تبدیل واحد از ژول بر مترمربع در روز به وات بر مترمربع تبدیل شدند. سپس برای برآورد Rn ساعات روشنایی، مقدار روزانه R_n در ضریب ۰/۲ ضرب و مقادیر منفی صفر در نظر گرفته شدند (رابطه ۷).

$$Rn = \max\left(0, \frac{Rn_SW + Rn_LW}{86400} \times 2.0\right)$$ رابطه ۷)

شار گرمای خاک

شار گرمای خاک (G) به‌صورت کسری از Rn بر اساس کسر پوشش گیاهی با استفاده از رابطه ۸ برآورد شد:

$$G = Rn \times [0.05 \times FVC + 0.30 \times (1 - FVC)]$$ رابطه ۸)

این رابطه نسبت G/Rn را از ۰/۰۵ برای سطوح کاملاً پوشیده تا ۰/۳ برای خاک لخت تغییر می‌دهد که با شرایط خشک و نیمه‌خشک سازگار است (Bastiaanssen, 1998). با توجه به دامنه محدود NDVI در حوزه هیرمند، انتخاب پیکسل‌های گرم و سرد بر اساس معیار ترکیبی LST–NDVI انجام شد. پیکسل گرم شامل LST در صدک بالای ۸۰ و همزمان NDVI ≤ ۰/۲۵، نماینده اراضی لخت و خشک بخش پایین‌دست حوزه و پیکسل سرد شامل LST در صدک پایین۲۰، LST ≤ ۲۷۳ کلوین و NDVI≥ ۰/۰۵ نماینده اراضی پوشیده و آبیاری‌شده بخش میانی و بالادست (Bhattarai et al., 2017; Saboori et al., 2021) .

شار گرمای محسوس (H)

اختلاف دمای نزدیک سطح (dT) به‌صورت تابعی خطی از دمای سطح زمین و با استفاده از شرایط مرزی پیکسل‌های گرم و سرد محاسبه شد (Bastiaanssen et al., 1998) . مقدار dT_hot به‌صورت ماهانه و متناسب با تغییرات فصلی، از حدود ۸ کلوین در زمستان تا ۳۵ کلوین در تابستان، تعیین شد؛ به‌طوری‌که در پیکسل گرم با فرض تبخیر ناچیز، H_hot برابر (Rn−G) و dT_hot از تقسیم H_hot بر مقاومت آیرودینامیکی به‌دست آمد (رابطه ۹). مقاومت آیرودینامیکی (r_ah) نیز با فرض پروفیل لگاریتمی باد در شرایط پایداری خنثی محاسبه و به ۱ تا ۵۰۰ ثانیه بر متر محدود شد. در نهایت، با استفاده از رابطه ۸ برای تعیین ضرایب رابطه خطی و محاسبه dT برای تمامی پیکسل‌ها، شار گرمای محسوس (H) در هر پیکسل از رابطه ۱۰ برآورد شد:

$$dT_hot = (H_hot \times r_ah) / (\rho_air \times C_p)$$ رابطه ۹)

$$H = \frac{\rho_{air} \times C_p \times dT}{r_{ah}}$$ رابطه ۱۰)

که در آن H شار گرمای محسوس ($W\ m^{-2}$)، ρ_{air} چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب، kg/m^3)، C_pگرمای ویژه هوا (ژول بر کیلوگرم–کلوین، $J/(kg\cdot K)$)، dT اختلاف دما (کلوین، K) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی در برابر انتقال گرما (ثانیه بر متر، s/m) است.

اعتبارسنجی

با توجه به نبود ایستگاه‌های مستقیم اندازه‌گیری ETa در منطقه، اعتبارسنجی نتایج SEBAL با محصولMOD16 ، به‌عنوان روشی جایگزین و متداول در مناطق خشک و نیمه‌خشک فاقد داده زمینی، انجام شد (Karimi & Bastiaanssen, 2013; Bezerra et al., 2015). بدین منظور، ۴۶ تصویر هشت‌روزه MOD16 در سال ۲۰۲۳ پس از اعمال ضریب مقیاس ۰/۱، به مقادیر واقعی ET تبدیل و مجموع سالانه آن محاسبه شد (Running et al., 2019). سپس مقایسه پیکسل‌به‌پیکسل دو محصول با استفاده از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۱۴)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) (رابطه ۱۱)، ضریب تعیین (R^2) (رابطه ۱۲)، و درصد اریبی (PBias) (رابطه ۱۳) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) (رابطه ۱۴) برای این مقایسه محاسبه شدند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}$$ رابطه ۱۴)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{ETa(MOD16)} \times 100$$ رابطه ۱۱)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$$ رابطه ۱۲)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \times 100$$ رابطه ۱۳)

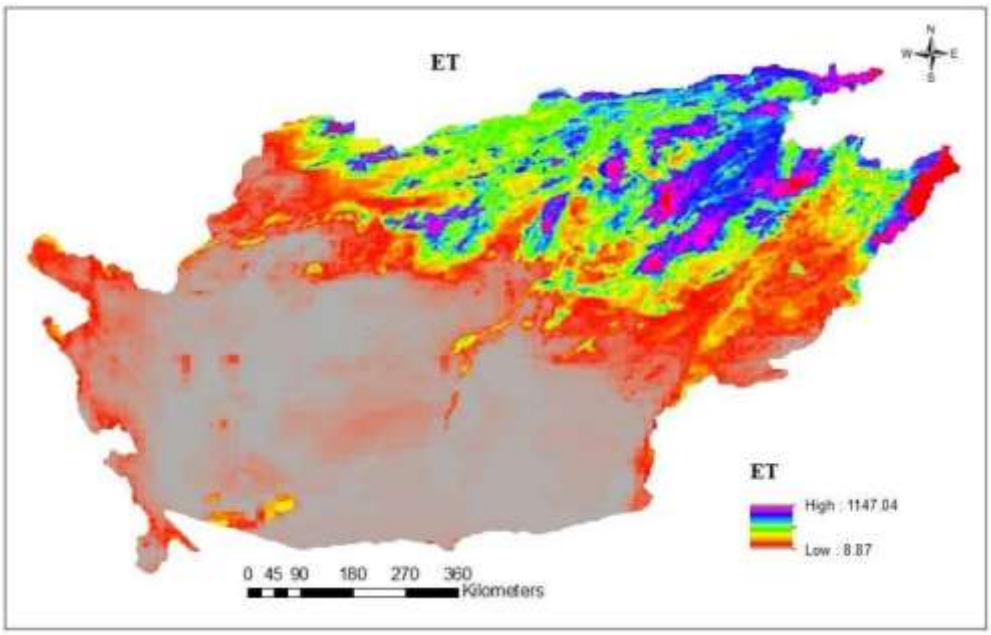
رابطه ۱۴)
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} | P_i - O_i |}{n}$$

که در آن P_i و O_i به‌ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده (SEBAL) و مشاهده‌شده (MOD16) هستند.

نتایج و بحث

توزیع مکانی تبخیر و تعرق سالانه

نقشه توزیع مکانی ETa سالانه حوزه هیرمند در سال ۲۰۲۳ در شکل (۲) ارائه شده است. توزیع مکانی ETa الگوی واضحی از کاهش تبخیر و تعرق از بالادست به پایین‌دست را نشان می‌دهد که با تغییر شرایط اقلیمی، ارتفاعی و کاربری اراضی حوزه سازگار است. بالاترین مقادیر ETa (بیش از ۱۱۰۰ میلی‌متر در سال) در اراضی کشاورزی و همچنین نواحی کوهستانی بالادست با ارتفاع بیش از ۳۰۰۰ متر مشاهده شد. این مقادیر بالا عمدتاً از دوره فصل رشد (بهار و اوایل تابستان، پس از ذوب پوشش برفی زمستانه) انباشته شده و منعکس‌کننده ترکیبی از تبخیر و تعرق پوشش گیاهی متراکم مرتعی/جنگلی و عمق رطوبت خاک بالاتر ناشی از آب ذوب برف است. لازم به ذکر است که الگوریتم SEBAL در این پژوهش به‌طور اختصاصی برای تفکیک تصعید برف/یخ از تبخیرتعرق پوشش گیاهی طراحی نشده است؛ بنابراین بخشی از مقدار ETa در پیکسل‌های دارای پوشش برفی موقت (به‌ویژه طی دوره ذوب) می‌تواند شامل سهمی از تصعید مستقیم برف نیز باشد که به‌عنوان یکی از محدودیت‌های این پژوهش شناسایی و برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود. بخش میانی حوزه، که عمدتاً از مراتع فقیر و زمین‌های کشاورزی تشکیل شده، مقادیر متوسط ETa (۴۰۰–۱۵۰ میلی‌متر در سال) را نشان داد. پایین‌ترین مقادیر (کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال) در اراضی بایر و بیابانی بخش پایین‌دست و در دشت سیستان مشاهده گردید. لازم به ذکر است که این مقدار ETa، هرچند نزدیک به میانگین بارش محلی سالانه (۵۰ تا ۶۰ میلی‌متر)، الزاماً محدود به بارش مستقیم نیست؛ در حوزه‌های بسته مانند دشت سیستان، رطوبت مورد نیاز ETa می‌تواند از منابع تکمیلی دیگری نیز تأمین شود، از جمله صعود موئینه از سفره آب زیرزمینی/زیرسطحی کم‌عمق، جریان ورودی رودخانه هیرمند، و آب آبیاری از اراضی کشاورزی؛ پدیده‌ای که در سایر حوزه‌های بسته و خشک جهان نیز به‌طور مشابه مستند شده است (Lobos-Roco et al., 2022).



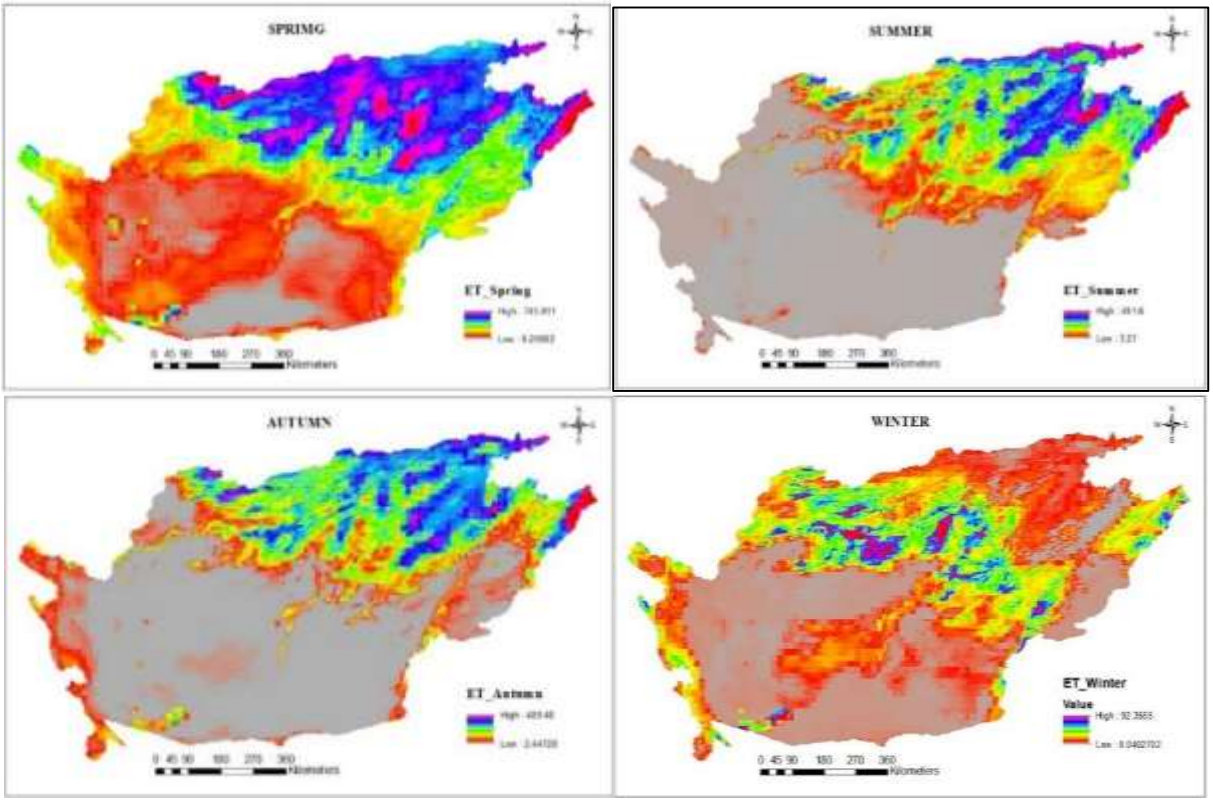
شکل ۲. توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی (ETa) سالانه در حوزه آبریز هیرمند

الگوی کاهشی ETa از بالادست کوهستانی به پایین‌دست بیابانی، بازتاب مستقیمی از ساختار هیدرولوژیکی و اقلیمی حوزه هیرمند است. در بالادست با ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متر، ترکیب سه عامل بارش بیشتر (تا ۴۰۰ میلی‌متر در سال)، پوشش گیاهی نسبتاً متراکم‌تر و ذوب پوشش برفی موجب مقادیر ETa بالاتری می‌شود. محمدابراهیم و همکاران (۱۳۹۶) نیز در بخش پایین‌دست حوزه هیرمند، بیشترین تبخیر و تعرق را در پیکره‌های آبی گزارش کردند که با یافته‌های حاضر هم‌راستا است. در پایین‌دست حوزه، دشت سیستان با میانگین بارش

سالانه حدود ۵۰ میلی‌متر و تبخیر بالقوه بیش از ۴۰۰۰ میلی‌متر در سال، شدیدترین کسری رطوبت را در حوزه تجربه می‌کند. در این شرایط، ETa نمی‌تواند از رطوبت خاک موجود فراتر رود و مقادیر زیر ۱۰۰ میلی‌متر در سال منطقی هستند. این یافته با اصل حاکمیت محدودیت رطوبتی بر ETa در مناطق خشک (Mu et al., 2011) که بیش از ۹۰ درصد بارش سالانه را صرف ETa می‌دانند، سازگار است. در مقیاس جهانی، میانگین نسبت ETa به بارش در سطح خشکی‌ها حدود ۶۰ تا ۶۵ درصد است، اما در اقلیم‌های خشک این نسبت می‌تواند به بیش از ۹۵ درصد برسد (Jung et al., 2010؛ Oki & Kanae, 2006). با توجه به ماهیت حوزه و کسری شدید رطوبتی دشت سیستان، نتایج این پژوهش (ETa زیر ۱۰۰ میلی‌متر در برابر بارش تقریبی ۵۰ میلی‌متر) با این الگوی شناخته‌شده در حوزه‌های فوق‌خشک همخوانی دارد. مقادیر متوسط ETa در بخش میانی حوزه با آبیاری گسترده اراضی کشاورزی این ناحیه ارتباط دارد. Akbari & Torabi Haghighi (2022) نشان دادند که توسعه کشاورزی آبی در دهه‌های اخیر در این ناحیه افزایش داشته که با رفتار ETa مشاهده‌ای انطباق دارد.

تغییرات فصلی تبخیر و تعرق

الگوی فصلی ETa حوزه آبریز هیرمند در شکل (۳) ارائه شده است. بیشترین تبخیر و تعرق در فصل بهار (فروردین) و کمترین آن در زمستان (دی) مشاهده شد. این الگوی فصلی با الگوی تابش خورشیدی، دمای هوا، فنولوژی پوشش گیاهی و ذوب برف در بالادست حوزه (مناطق کوهستانی) سازگار است.



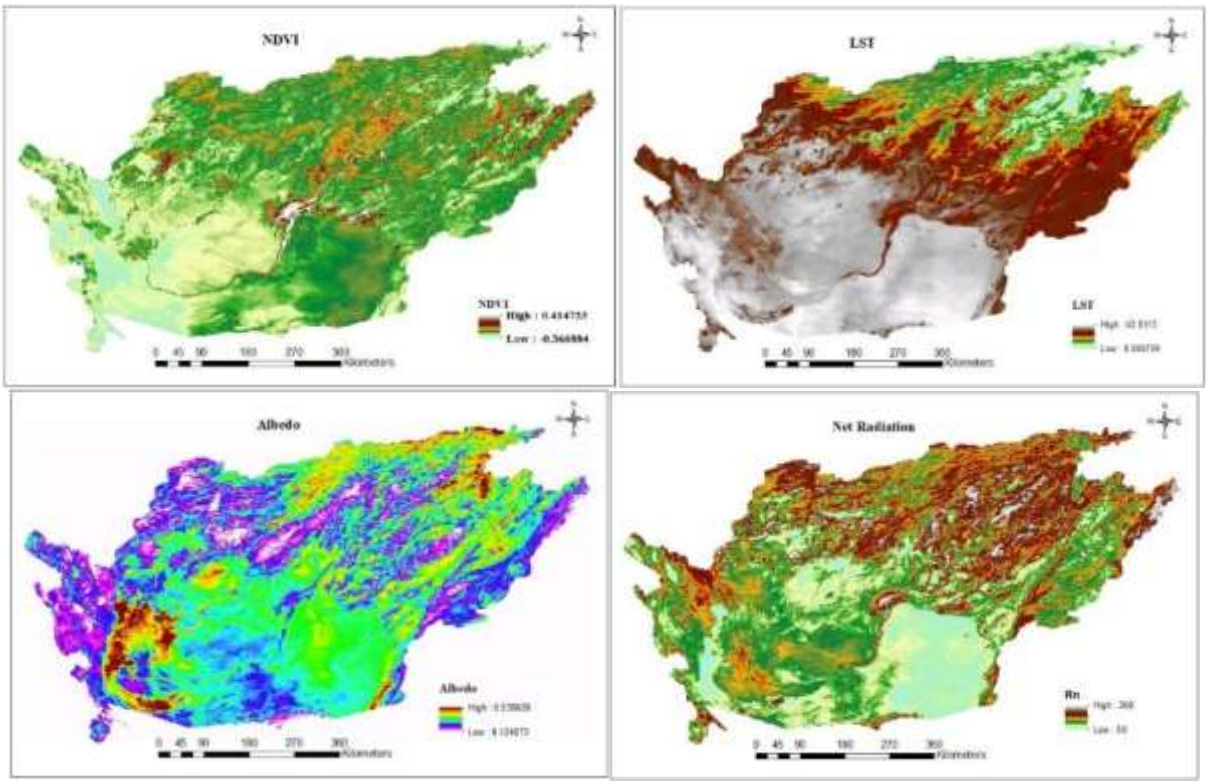
شکل ۳. الگوی تغییرات فصلی ETa در حوزه آبریز هیرمند

در فصل بهار، همزمانی سه عامل فیزیکی، افزایش تابش خورشیدی و طول روز، اوج فعالیت رشد و فتوسنتز پوشش گیاهی، و ذوب پوشش برفی ارتفاعات بالادست که رطوبت موقت اما قابل‌توجهی فراهم می‌کند، شرایط بهینه‌ای برای رسیدن ETa به بیشینه سالانه (۷۴۵ میلی‌متر) ایجاد می‌کند. در مقابل، در ماه‌های زمستان، دمای پایین انرژی لازم برای تبخیر را به‌شدت محدود می‌کند و همزمان پوشش گیاهی غیرزنده، سهم تعرق را نیز حذف می‌کند؛ برآیند این دو محدودیت، ETa ماهانه را به نزدیک صفر می‌رساند. این الگوی فصلی با یافته‌های Chen et al. (2022) در مناطق خشک چین و Ablikim et al. (2023) مطابقت دارد.

توزیع مکانی شاخص‌های بیوفیزیکی

نقشه‌های توزیع مکانی NDVI، LST، آلبدو و Rn در شکل (۴) و همبستگی میان ETa با شاخص‌های بیوفیزیکی در شکل (۵) ارائه شده

است. میانگین NDVI سالانه حوضه ۰/۱۱ بود که بیانگر پوشش گیاهی اندک است. بالاترین مقادیر NDVI (بیش از ۰/۳) در اراضی کشاورزی بخش میانی مشاهده شد. میانگین سالانه LST بین ۱۰/۵ تا ۴۳/۶ درجه سانتیگراد متغیر بود. لازم به ذکر است که این بازه نشان‌دهنده میانگین سالانه است؛ کامپوزیت‌های ماهانه زمستان در ارتفاعات کوهستانی بالادست به‌طور جداگانه مقادیر منفی (زیر صفر درجه سانتی‌گراد) نشان می‌دهند که با شرایط اقلیمی کوهستانی زمستانه سازگار است. نواحی کوهستانی بالادست کمترین و اراضی بایر و شوره‌زار پایین‌دست حوزه، بالاترین دمای سطح را نشان دادند. آلبدو سطحی در محدوده ۰/۰۹ تا ۰/۵۴ قرار داشت؛ با مقادیر بالا در اراضی برفی و شوره‌زار و مقادیر پایین در اراضی کشاورزی آبی. تابش خالص (Rn) از ۶۵ تا ۲۷۵ وات بر مترمربع تغییر کرد.

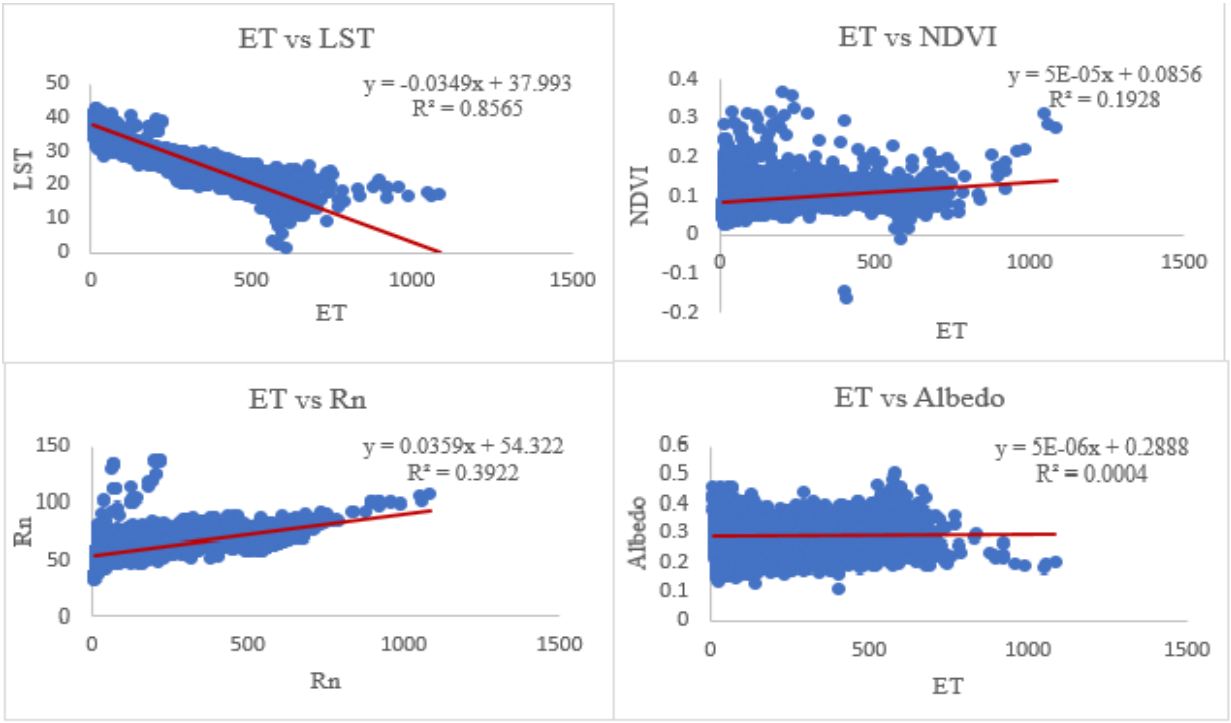


شکل ۴. نقشه‌های NDVI، LST، Albedo و Rn

شکل (۵) نشان می‌دهد که رابطه قوی منفی ETa با LST ($r = -0.933$) از منظر هیدرولوژیک حوضه هیرمند توجیه فیزیکی روشنی دارد. در این حوضه، LST بالا معرaف پیکسل‌های گرم با آب موجود اندک در پایین‌دست حوزه و دشت‌های بایر است که ETa پایین دارند. در مقابل، مناطق پوشش گیاهی متراکم و آبیاری‌شده با ETa بالا به دلیل اثر تبخیری و سایه‌اندازی پوشش گیاهی، دمای سطح پایین‌تری نشان می‌دهند و همبستگی منفی قوی بین ETa و LST را توضیح می‌دهد (Ablikim et al., 2023). البته باید توجه داشت که دمای سطح به‌تنهایی علت این رابطه نیست، بلکه نشانه‌ای از چند عامل است که با هم رخ می‌دهند. بر اساس چارچوب شناخته‌شده فضای LST-NDVI (Bhattarai et al., 2017; Saboori et al., 2021 ؛Sandholt et al., 2002)، دمای سطح هر پیکسل هم‌زمان به سه عامل بستگی دارد: میزان رطوبت خاک و آب در دسترس، درصد پوشش گیاهی، و مقدار تابش رسیده به سطح.

در پایین‌دست حوزه هیرمند، دمای سطح بالا به این دلیل با ETa پایین همراه است که این مناطق هم‌زمان دارای هر سه ویژگی زیر هستند: رطوبت کافی برای خنک شدن سطح از طریق تبخیر وجود ندارد، پوشش گیاهی از بین رفته ($NDVI \leq 0.25$)، و خاک لخت در برابر تابش خورشیدی به‌سرعت گرم می‌شود. بنابراین دمای سطح بالا در این مناطق، نتیجه هم‌زمانِ این سه عامل است، نه علت مستقل کاهش ETa. این تفسیر با ساختار خود مدل SEBAL نیز هماهنگ است. در این مدل، شار گرمای محسوس (H) که مستقیماً از دمای سطح محاسبه می‌شود، با استفاده از پیکسل‌های گرم و سرد کالیبره می‌گردد که خود بر اساس ترکیب دما و NDVI انتخاب شده‌اند. بنابراین اطلاعات مربوط به رطوبت و پوشش گیاهی نیز به‌طور غیرمستقیم در محاسبات دخیل است. رابطه مثبت قوی ETa با Rn ($r = 0.0703+$) انرژی تابشی را بر ETa تأیید می‌کند و با اصل بنیادی روش‌های بیلان انرژی همسو است. در محیط‌های خشک که آب عامل محدودکننده اصلی است؛ در نواحی با دسترسی به آب آبیاری (کشاورزی) ETa عمدتاً توسط انرژی موجود کنترل می‌شود (Bastiaanssen

et al., 1998). این یافته با نتایج Laipelt et al. (2021) که رابطه قوی بین ETa و Rn را در مناطق آبیاری‌شده تأیید کردند، سازگار است. همبستگی ضعیف ETa با NDVI (r = +0.372) به دوگانگی رفتار حوزه در ۳ کلاس غالب کاربری اراضی مربوط می‌شود. در مناطق کوهستانی بالادست (مراتع متراکم)، NDVI بالا همراه با ETa بالا است. اما در بخش میانی با کشاورزی آبی، ETa بالا با NDVIمتوسط همراه است و این رابطه ضعیف یا حتی نامنظم می‌شود، زیرا آبیاری در دوره‌هایی اتفاق می‌افتد که پوشش گیاهی کامل نیست. بنابراین در مراحل ابتدایی رشد، آبیاری خاک را مرطوب می‌کند و تبخیر مستقیم از سطح خاک را افزایش می‌دهد، در حالی که پوشش گیاهی هنوز کامل نشده است؛ این پدیده در چارچوب روش ضریب گیاهی دوگانه FAO-56 (Allen et al., 1998) شناخته‌شده است و باعث جدایی موقت بین ETa و NDVI می‌شود. در کلاس اراضی بایر/ بیابانی پایین‌دست، هم NDVI و هم ETa پایین هستند. این رابطه غیرخطی موجب ضعیف شدن ضریب همبستگی کلی می‌شود که با نتایج مطالعات در مناطق خشک مشابه (Mu et al., 2011) هم‌راستاست. همبستگی ناچیز میان آلبدو و Eta، (r = −0.053)، با ساختار خود معادله بیلان انرژی سازگار است. آلبدو در این پژوهش از بازتاب سطحی تصحیح‌شده اتمسفری محصول MOD09GA محاسبه شد (Vermote et al., 2016)، بنابراین این ضعف همبستگی ناشی از خطای استخراج داده نیست. در مدل SEBAL، آلبدو به‌صورت غیرمستقیم و از طریق تابش خالص (Rn) بر ETa اثر می‌گذارد و Rn نیز عمدتاً تحت تأثیر دمای سطح قرار دارد. ازاین‌رو، سهم آماری آلبدو در ETa محدود است، هرچند نقش فیزیکی آن در بیلان انرژی حفظ می‌شود. این رابطه غیرمستقیم و غیرخطی در مناطق خشک و ناهمگن نیز گزارش شده است (Wang et al., 2009؛ Mariotto & Gutschick, 2010).



شکل ۵. نمودار پراکنش بین ETa و شاخص‌های بیوفیزیکی سطحی در حوزه آبریز هیرمند

همبستگی در سطح کل حوضه

نتایج همبستگی ETa با شاخص‌های بیوفیزیکی در جدول (۲) ارائه شد. برای ارزیابی استحکام روابط، ضرایب Pearson و Spearman به‌ترتیب برای سنجش روابط خطی و یکنوای غیرخطی محاسبه شدند (Hauke & Kossowski, 2011). با توجه به ناهمگنی حوضه هیرمند و رابطه غیرخطی مشاهده‌شده بین NDVI و ETa، هر دو ضریب به‌کار گرفته شدند.

جدول ۲. ضرایب همبستگی Pearson و Spearman بین ETa و شاخص‌های بیوفیزیکی در سطح کل حوزه آبریز هیرمند

متغیر	Pearson *r*	*P*-value	Spearman ρ	*P*-value	شدت
NDVI	۰/۳۷۱۶	۰/۰۰۱	۰/۴۶۱۷	۰/۰۰۱	**Weak**
LST	−۰/۹۳۳۴	۰/۰۰۱	−۰/۸۹۲۸	۰/۰۰۱	**Strong**
Albedo	−۰/۰۵۳۳	۰/۰۰۱	−۰/۱۱۸۲	۰/۰۰۱	**Negligible**
Rn	۰/۷۰۲۷	۰/۰۰۱	۰/۷۵۳۰	۰/۰۰۱	**Strong**

تابش خالص (Rn) با ضریب همبستگی $r = +0.703$ قوی‌ترین همبستگی مثبت را با ETa نشان داد. دمای سطح زمین (LST) با $r = -0.933$ قوی‌ترین همبستگی منفی را داشت. NDVI همبستگی ضعیف مثبت ($r = +0.372$) و آلبدو همبستگی ناچیز منفی ($r = -0.053$) نشان دادند. کلیه روابط از نظر آماری معنادار بودند ($P < 0.001$).

اعتبارسنجی

نتایج مقایسه ETa سالانه الگوریتم SEBAL با محصول MOD16 در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. شاخص‌های آماری اعتبارسنجی SEBAL در مقایسه با MOD16 برای حوزه آبریز هیرمند در سال ۲۰۲۳

شاخص آماری	مقدار	دامنه قابل قبول	ارزیابی
ضریب تعیین (R^2)	۰/۷۳۶	>۰/۵	قابل قبول
ضریب همبستگی پیرسون (r)	۰/۸۵۸	>۰/۷	خوب
MAE (mm/year)	۳۵۳/۶	–	متوسط
RMSE (mm/year)	۵۰۵/۵	–	بالا
NRMSE (%)	۲۸۹/۷	–	بالا
PBIAS (%)	+۲۸۳/۹	<±۲۵٪	بیش‌برآورد

ضریب همبستگی بالا ($r = 0.858$) و ضریب تعیین ($R^2 = 0.736$) بیانگر همبستگی قابل قبول بین الگوی مکانی توزیع ETa برآوردشده توسط SEBAL و محصول MOD16 است. این امر نشان می‌دهد که الگوریتم SEBAL مناطق با ETa بالا (مراتع متراکم، جنگل، اراضی کشاورزی و منابع آبی) و مناطق با ETa پایین (اراضی بایر و بیابانی) را به‌درستی از یکدیگر تفکیک کرده است. این امر برای کاربردهای مدیریت منابع آب که نیازمند شناسایی مناطق با نیاز آبی بالا و پایین هستند، از اهمیت اساسی برخوردار است. با این حال، از آنجا که ضریب تعیین در داده‌های مکانی می‌تواند به دلیل خودهمبستگی فضایی ذاتی تصاویر ماهواره‌ای تا حدی گمراه‌کننده باشد، شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) نیز محاسبه شد. با نرمال‌سازی RMSE (۵۰۵/۵ میلی‌متر در سال) نسبت به میانگین ETa سالانه محصول MOD16 (۱۷۴/۵ میلی‌متر در سال)، مقدار NRMSE برابر با ۲۸۹/۷ درصد به دست آمد. تجزیه این خطا به دو مؤلفه اریبی سیستماتیک و پراکندگی تصادفی نشان می‌دهد که بیش از ۹۶ درصد از مقدار RMSE ناشی از اختلاف نظام‌مند میانگین دو مدل است، نه پراکندگی تصادفی پیکسل‌به‌پیکسل؛ به بیان دیگر، پس از کنار گذاشتن این اریبی مقیاسی، خطای واقعی ناشی از عدم تطابق مکانی دو نقشه نسبتاً کوچک (در حدود ۱۰۰ میلی‌متر) است. این یافته با ضریب تعیین نسبتاً بالای مکانی ($R^2 = 0.736$) کاملاً سازگار است و تأیید می‌کند که اختلاف اصلی بین دو مدل در مقیاس مطلق برآوردنهفته است، نه در الگوی نسبی توزیع مکانی ETa؛ نکته‌ای که برای کاربردهای مدیریتی مبتنی بر اولویت‌بندی مکانی نیاز آبی (نه مقدار مطلق آن)، اهمیت روش‌شناختی ویژه‌ای دارد.

بیش‌برآورد سیستماتیک SEBAL نسبت به MOD16 (PBIAS = +283.9%) را می‌توان به سه عامل اصلی نسبت داد. بیشترین سهم به کم‌برآوردی ساختاری شناخته‌شده MOD16 مربوط می‌شود که ناشی از اتکای این مدل بر کمبود فشار بخار جو، نه رطوبت خاک مستقیم، برای بازنمایی تنش آبی گیاه است (Biederman et al., 2017). به عبارت دیگر، MOD16 خود در مناطق خشک تمایل به کم‌برآوردی دارد. دلیل این موضوع آن است که این مدل، تنش آبی گیاه را مستقیماً از رطوبت خاک به دست نمی‌آورد، بلکه آن را از طریق کمبود فشار بخار هوا تخمین می‌زند؛ این روش در شرایط خشکی شدید نمی‌تواند کمبود واقعی آب را به‌طور کامل نشان دهد. مطالعات متعدد این کم‌برآوردی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید کرده‌اند (Mu et al., 2011; Karimi et al., 2013; Biederman et

al., 2017). دوم تفاوت در نحوه محاسبه است. SEBAL تبخیرتعرق را به‌صورت باقیمانده معادله بیلان انرژی سطحی ($LE = Rn - G - H$) محاسبه می‌کند و اگرچه مقاومت آیرودینامیکی را در محاسبه شار گرمای محسوس در نظر می‌گیرد، برخلاف MOD16 مقاومت سطحی/روزنه‌ای گیاه را به‌صورت صریح و مستقیم وارد محاسبات نمی‌کند. در مقابل، MOD16 از معادله پنمن–مانتیث با مقاومت روزنه‌ای استفاده می‌کند که مستقیماً به تنش آبی (از طریق کمبود فشار بخار و دمای حداقل هوا) پاسخ می‌دهد و در شرایط خشکی مقادیر پایین‌تری برآورد می‌نماید (Mu et al., 2011). بنابراین بخشی از اختلاف مشاهده‌شده از محدودیت‌های مرجع اعتبارسنجی ناشی می‌شود نه صرفاً از خطای SEBAL. سوم، قدرت تفکیک مکانی ۹ کیلومتری ERA5 در محاسبه Rn در منطقه‌ای با تنوع بالای پوشش زمین منجر به عدم قطعیت در پارامتر کلیدی انرژی ورودی می‌شود (Allen et al., 2007).

این الگوی بیش‌برآورد با یافته‌های Bezerra et al. (2015) در مناطق نیمه‌خشک برزیل و Karimi et al. (2013) در ایران سازگار است که تفاوت‌های مشابهی را بین SEBAL و MOD16 گزارش کردند. در مقایسه نقطه‌ای در موقعیت دشت سیستان، مقدار ETa سالانه برآوردشده توسط SEBAL و MOD16 هر دو در محدوده منطقی برای اراضی بایر منطقه قرار دارند. در مجموع، SEBAL دقت مکانی قابل قبولی در تفکیک مناطق با ETa بالا و پایین دارد. هرچند کالیبراسیون محلی برای بهبود دقت مقادیر مطلق ضروری است. در مجموع، با توجه به فقدان داده‌های اندازه‌گیری مستقیم (Lysimeter یا Flux Tower) در منطقه مطالعاتی، عدم دسترسی به بخش عمده حوزه و همچنین محدودیت‌های ذاتی هر دو روش در مناطق خشک، نتایج این مطالعه از دقت قابل قبولی در توصیف الگوی مکانی توزیع تبخیر و تعرق برخوردار است. هرچند بهبود دقت مقادیر مطلق مستلزم کالیبراسیون محلی پارامترهای الگوریتم با استفاده از داده‌های زمینی است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، توزیع زمانی–مکانی تبخیر و تعرق واقعی حوزه آبریز هیرمند در سال ۲۰۲۳ با الگوریتم SEBAL و داده‌های MODIS در محیط GEE برآورد شد. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر است: میانگین ETa سالانه حوضه ۶۷۰ میلی‌متر برآورد شد (میانگین وزن‌دهی‌شده بر اساس مساحت کل حوضه) که الگوی کاهشی از بالادست کوهستانی به پایین‌دست کویری و بیابانی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این مقدار از میانگین بارش مستقیم محلی حوضه فراتر می‌رود، که با ماهیت هیدرولوژیک این حوضه فرامرزی قابل تبیین است. بخش قابل‌توجهی از رطوبت مصرفی در ETa مناطق میانی و پایین‌دست از رودخانه هیرمند (تغذیه‌شده از بارش و ذوب برف ارتفاعات افغانستان) و آب آبیاری تأمین می‌شود، نه صرفاً بارش موضعی؛ علاوه بر این، بالاترین مقادیر ETa در سهم مساحتی محدودی از حوضه (اراضی کشاورزی و کوهستانی) متمرکز است. حداکثر ETa در بهار (۷۴۵ میلی‌متر) و حداقل آن در زمستان (نزدیک به صفر) مشاهده شد؛ الگویی که با برهم‌کنش تابش خورشیدی، فنولوژی پوشش گیاهی، و ذوب برف بالادست قابل تبیین است. دمای سطح زمین قوی‌ترین همبستگی منفی ($r = -0.933$) و تابش خالص قوی‌ترین همبستگی مثبت ($r = +0.703$) را با ETa نشان دادند. این الگوی همبستگی بیانگر تسلط مکانیسم خنک‌شدگی تبخیری و کنترل انرژی تابشی بر توزیع مکانی ETa در این حوزه خشک و نیمه‌خشک است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که الگوریتم SEBAL الگوی مکانی توزیع ETa را با ضریب همبستگی $r = 0.858$ و $R^2 = 0.736$ به‌درستی بازتولید می‌کند، هرچند بیش‌برآورد سیستماتیک در مقابل MOD16 وجود دارد که عمدتاً به تفاوت رویکرد محاسباتی دو روش و تمایل شناخته‌شده MOD16به کم‌برآورد در مناطق خشک نسبت داده می‌شود (Mu et al., 2011; Biederman et al., 2017; Karimi et al., 2013). یافته‌های این پژوهش چارچوب کمّی مناسبی برای مدیریت منابع‌آب در حوضه هیرمند فراهم می‌کند. برای بهبود دقت برآوردها در مطالعات آینده، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالاتر، مانند Landsat و Sentinel-2، به‌منظور افزایش دقت تفکیک ناهمگنی‌های سطح زمین، کالیبراسیون محلی پارامترهای الگوریتم با استفاده از داده‌های Flux Tower یا Lysimeter و اعمال تصحیح پایداری اتمسفری در محاسبه مقاومت آیرودینامیکی استفاده شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی با کد PR-RIOZ-1404-5091-1 است که با حمایت پژوهشگاه زابل انجام شده است. نویسندگان از حمایت و پشتیبانی پژوهشگاه زابل در انجام این پژوهش صمیمانه قدردانی می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

طراحی و مفهوم‌پردازی پژوهش، ابراهیمیان، م. و خسروانی‌زاده، ع.؛ روش‌شناسی، ابراهیمیان، م.؛ نرم‌افزار، ابراهیمیان، م.؛ اعتبارسنجی، ابراهیمیان، م.، خسروانی‌زاده، ع. و میرشکاری، س.؛ سامان‌دهی و تحلیل داده‌ها، ابراهیمیان، م.، خسروانی‌زاده، ع. و میرشکاری، س.؛ نگارش – تهیه پیش‌نویس اصلی، ابراهیمیان، م.؛ نگارش – بررسی و ویرایش، خسروانی‌زاده، ع. و میرشکاری، س.؛ مدیریت پروژه، ابراهیمیان، م. تمامی نویسندگان نسخه نهایی مقاله را مطالعه و تأیید کرده‌اند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در طول آماده‌سازی این اثر، نویسندگان از DeepSeek به‌صورت محدود و صرفاً برای بهبود کیفیت زبانی چکیده مبسوط استفاده کردند. پس از استفاده از این ابزار، نویسندگان محتوا را با دقت بررسی و در صورت نیاز ویرایش کردند و مسئولیت کامل محتوای منتشرشده را بر عهده دارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست کتبی از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی با کد PR-RIOZ-1404-5091-1 است. نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از پژوهشگاه زابل به‌خاطر حمایت و پشتیبانی پژوهشی و سازمانی در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

آرتیمانی، محمدمهدی؛ زینی‌وند، حسین و طهماسبی‌پور، ناصر (۱۴۰۳). شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی TOPKAPI-X (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کشکان). *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵(۴)، ۶۳۷–۶۵۱.

اکبرزاده‌مقدم سه‌قلعه، هادی؛ حقیقت‌جو، پرویز و باقری، محمدحسین (۱۳۹۴). برآورد تبخیر از سطح پیکره‌های آبی با الگوریتم SEBAL با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: مخازن آب شیرین چاه‌نیمه سیستان). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۳)، ۵۱۱–۵۲۲.

امیدوار، جواد؛ داوری، کامران؛ ارشد، صالح؛ موسوی‌بایگی، محمد؛ اکبری، مرتضی و فریدحسینی، علیرضا (۱۳۹۱). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده ASTER و مدل METRIC. *مجله علوم آب و خاک*، ۱۶(۶۰)، ۱–۱۴.

بهمن‌آبادی، بهاره و کاویانی، عباس (۱۳۹۸). تخمین تبخیر–تعرق واقعی با استفاده از تصاویر سنجنده‌های MODIS و ETM+ در اراک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۱(۳)، ۶۹۷–۷۱۲.

پریداد، پریوش؛ داوری، کامران؛ فرید حسینی، علیرضا و مجیدی، میثم (۱۳۹۰). آب وهواشناسی: تبخیر ـ تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز: بررسی روش‌های موجود مبتنی بر داده‌های سنجش از دور. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۳)، ۶۵-۷۹.

ثنایی‌نژاد، سیدحسین؛ نوری، سمیرا و هاشمی‌نیا، سیدمجید (۱۳۹۰). برآورد تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در منطقه مشهد. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۲۵(۶)، ۵۴۰–۵۴۷.

رائینی سرجاز, محمود و رستمی, امین (۱۳۹۵). دورسنجی تبخیر–تعرق واقعی و ضریب گیاهی سیب با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس و مدل سبال (مطالعه موردی: دشت اهر، ایران). *هواشناسی کشاورزی*, ۴(۱)، ۳۲-۴۳.

ضیایی، روح‌الله؛ مقدسی، مهرنوش؛ پایمزد، شهلا و باقری، محمدحسین (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی الگوریتم‌های سنجش از دور SEBS و SEBAL در برآورد تبخیر و بررسی اثر شوری در پیکره‌های آبی. *علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۲(۴)، ۳۱۷–۳۲۹.

زمانی، سعیده و رحیم‌زادگان، مجید (۱۳۹۵). محاسبه و ارزیابی تبخیر در دریاچه پشت سدها با استفاده از مدل تبخیر–تعرق SEBAL (مطالعه موردی: سد امیرکبیر). *فصلنامه علمی–پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر*، ۲۷(۱۰۶)، ۵۷–۶۹. DOI:

شکری، علی؛ مفتخری حسین و حسینی، میرهادی (۱۴۰۱). مسئله تاریخی هیرمند و راهکارهای کاهش چالش‌های ناشی از آن. *نشریه پژوهش‌های*

تاریخی ایران و اسلام، ۱۶(۳۰)، ۲۹۳–۳۲۰.

فخار، محدثه‌السادات و کاویانی، عباس (۱۴۰۳). برآورد تبخیر–تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش از دور به منظور بهبود مدیریت آب. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۴(۳)، ۶۲۹–۶۴۸ https://doi.org/10.22059/jwim.2024.367891.910

محمدابراهیم، مسعود؛ محمدرضاپور، امالبنین و اکبرزاده‌مقدم سه‌قلعه، هادی (۱۳۹۶). ارزیابی مدل SEBS در برآورد تبخیر–تعرق واقعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS در مقیاس منطقه‌ای (مطالعه موردی: دشت سیستان). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۴(۴)، ۱۱۴۱–۱۱۵۰.

محمدی, مجتبی؛ فروزان‌فرد، معصومه و غلامی، حمید (۱۴۰۱). پیش‌بینی تبخیر از تشت با استفاده از مدل‌های محاسبات نرم در اقلیم فراخشک (مطالعهٔ موردی: دشت سیستان، سیستان و بلوچستان). *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۱(۳۶)، ۷۱–۸۲.

نظری، رستا، و کاویانی، عباس (۱۳۹۵). بررسی نتایج تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از مدل های متریک و سبال در دشت قزوین. *پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)*، ۳۰(۲ (ب))، ۱۸۷–۱۹۹.

REFERENCES

Ablikim, K., Yang, H., & Mamattursun, A. (2023). Spatiotemporal Variation of Evapotranspiration and Its Driving Factors in the Urumqi River Basin. *Sustainability*, 15(18), 13904. https://doi.org/10.3390/su151813904.

Akbarzadeh Moghadam Seghaleh, H., Haghighatjoo, P., & Bagheri, M. H. (2015). Estimation of evaporation from water bodies using the SEBAL algorithm and remote sensing techniques (Case study: Chahnimeh reservoirs, Sistan). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 9(3), 511–522. https://doi.org/10.30495/ijid.2015.12345. (In Persian)

Akbari, M., Torabi Haghighi, A. (2022). Agricultural water consumption trend in the Hirmand Basin over two decades. *Remote Sensing letters*, 13(12), 1236-1248. https://doi.org/10.1080/2150704X.2022.2133210.

Artimani, M. M., Zeinivand, H., & Tahmasbipour, N. (2024). Simulation of water balance components using the distributed hydrological model TOPKAPI-X (Case study: Karkheh-Kashkan watershed). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55(4), 637–651. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2024.368575.669616. (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*. FAO, Rome. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00054-5.

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).

Andrade, B.C., et al. (2022). geeSEBAL-MODIS: Continental-scale evapotranspiration based on the surface energy balance for South America. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 192, 170–185. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.08.012.

Anderson, M.C. (2007). A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 60(2), 195–216. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-0.

Bahmanabadi. B., & Kaviani, A. (2019). Actual Evapotranspiration Estimation Using MODIS and ETM+ Imageries (Case Study: Arak). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 697-712. https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.273547.668077. (In Persian)

Biederman, J. A., Scott, R. L., Bell, T. W., Bowling, D. R., Dore, S., Garatuza Payan, J., & Goulden, M. L. (2017). CO2 exchange and evapotranspiration across dryland ecosystems of southwestern North America. *Global Change Biology*, 23(10), 4204-4221. https://doi.org/10.1111/gcb.13686.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–229. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4.

Bezerra, B.G., da Silva, B.B., dos Santos, C.A., & Bezerra, J.R. (2015). Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: comparison of SEBAL and SSEB approaches. *Advances in Remote Sensing*, 4(3), 234-247. https://doi.org/10.4236/ars.2015.43019.

Bhattarai, N., Quackenbush, L.J., Im, J., & Shaw, S.B. (2017). A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. *Remote Sensing of Environment*, 196, 178–192. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.009.

Chen, Y., Zhang, S., & Wang, Y. (2022). Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Potential Evapotranspiration in Akmola Oblast, Kazakhstan, and the Driving Factors. *Remote Sensing*, 14(21), 5311. https://doi.org/10.3390/rs14215311.

Chen, X., Huang, Y., Liu, M., Ren, D., Li, Y., & Huang, Q. (2025). Improving crop evapotranspiration estimation in the Yellow River Basin: A modified SEBAL model approach and spatiotemporal trend analysis. *Agricultural Water Management*, 319, 109771. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109771.

El-Shirbeny, M. (2026). Validation of a simple MODIS Land Surface Temperature-Based model for potential Evapotranspiration (PET) using long-term Global Dataset. *Journal of Agrometeorology*, 28(1), 71-79. https://doi.org/10.54386/jam.v28i1.1234.

Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2024). Estimation of actual evapotranspiration using remote sensing data for improving water management. *Water and Irrigation Management*, 14(3), 629–648. https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374521.1090. (In Persian)

Fawzy, H.E.D., Sakr, A., El-Enany, M., & Moghazy, H.M. (2021). Spatiotemporal assessment of actual evapotranspiration using satellite remote sensing technique in the Nile Delta. *Egyptian Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 1421-1432. https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.066.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

Hauke, J., & Kossowski, T. (2011). Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. *Quaestiones geographicae*, 30(2), 87-93. https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1.

Jiapaer, G., Chen, X., & Bao, A. (2011). A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1698-1710. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.004.

Kang, M., & Cho, S. (2021). Progress in water and energy flux studies in Asia: A review focused on eddy covariance measurements. *Journal of Agricultural Meteorology*, 77, 2-23. https://doi.org/10.2480/agrmet.D-20-00035.

Karimi, P., & Bastiaanssen, W.G.M. (2013). Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting—Part 2: Sources, validation and application. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2315–2328. https://doi.org/10.5194/hess-17-2315-2013.

Laipelt, L., Kayser, R. H.B., Fleischmann, A.S., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). 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. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.006.

Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote sensing of environment*, 76(2), 213-238. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4.

Lobos-Roco, F., Hartogensis, O., Suárez, F., Huerta-Viso, A., Benedict, I., de la Fuente, A., & Vilà-Guerau de Arellano, J. (2022). Multi-scale temporal analysis of evaporation on a saline lake in the Atacama Desert, *Hydrology and Earth System Sciiences*, 26, 3709–3729. https://doi.org/10.5194/hess-26-3709-2022.

Mariotto, I., & Gutschick, V.P. (2010). Non-lambertian corrected albedo and vegetation index for estimating land evapotranspiration in a heterogeneous semi-arid landscape. *Remote Sensing*, 2(4), 926-938. https://doi.org/10.3390/rs2040926.

Matarrese, R., Portoghese, I., Vurro, M., & Soldo, P. (2012). Estimation of Evapotranspiration by use of Remote sensing techniques. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (IGARSS), 6689–6692. https://doi.org/10.13140/2.1.2780.1609.

Mateo-García, G., Gómez-Chova, L., Amorós-López, J., Muñoz-Marí, J., & Camps-Valls, G. (2018). Multitemporal Cloud Masking in the Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(7), 1079. https://doi.org/10.3390/rs10071079.

Mohammad Ebrahim, M., Mohammadrezapour, O., & Akbarzadeh seghaleh, H. (2017). Evaluating SEBES Model to Estimate Actual Evapotranspiration using MODIS Sensor Data in Regional Scale (Case Study: Sistan Plain). *Journal of Ecohydrology*, 4(4), 1141-1150. DOI: 10.22059/ije.2017.63243. (In Persian)

Mohammadi, M., Forozanfard, M., & Gholami, H. (2022). Predicting Pan Evaporation in a Hyper-Arid Climate Using Soft Computing Models: A Case Study of Sistan Plain, Sistan-Baluchistan, Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 11(36), 71–82. https://doi.org/10.22052/deej.2021.11.36.43. (In Persian)

Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., & Running, S.W. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 519–536. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015.

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.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, 13(9), 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021.

Nazari, R., & Kaviani, A. (2016). Comparing the estimates of reference crop evapotranspiration in Qazvin plain using SEBAL and METRIC models. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(2), 187-199. DOI: 10.22092/JWRA.2016.106643 (In Persian)

Omidvar, J., Davari, K., Arshad, S., Mousavi-Baygi, M., Akbari, M., & Farid-Hosseini, A. (2012). Estimation of actual evapotranspiration using ASTER imagery and the METRIC model. *Journal of Water and Soil Science*, 16(60), 1–14. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.12345. (In Persian)

Paridad, P., Davari, K., Farid-Hosseini, A., & Majidi, M. (2011). Actual evapotranspiration at watershed scale: A review of existing remote sensing-based methods. *Iranian Water Resources Research*, 12(3), 65–79. https://doi.org/10.22092/ijwrr.2011.102345. (In Persian)

Raeini-Sarjaz, M., & Rostami, A. (2016). Remotely sensed measurements of apple orchard actual evapotranspiration and plant coefficient using MODIS images and SEBAL algorithm (Case study: Ahar plain, Iran). *Journal of Agricultural Meteorology*, 4(1), 32-43. https://doi.org/10.22125/jam.2016.123456. (In Persian)

Roerink, G.J., Su, Z., & Menenti, M. (2000). 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. https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8.

Running, S. W., Mu, Q., Zhao, M., & Moreno, A. (2019). MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (MOD16A2/A3 and year-end gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (for collection 6). National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA [data set]. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.

Saboori, M., Mokhtari, A., Afrasiabian, Y., Daccache, A., Alaghmand, S., & Mousivand, Y. (2021). Automatically selecting hot and cold pixels for satellite actual evapotranspiration estimation under different topographic and climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 248, 106763. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106763. (In Persian)

Sahil, S., & Akhtar, F. (2024). Estimation of the Reference Evapotranspiration across the Helmand River Basin, Afghanistan. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 14(4), April 2024 ISSN 2250-3153. DOI: 10.29322/IJSRP.14.04.2024.p14804.

Sanaeinejad, S.H., Nouri, S., & Hasheminia, S.M. (2011). Estimation of actual evapotranspiration using satellite imagery in the Mashhad region. *Journal of Water and Soil Science*, 25(6), 540–547. https://doi.org/10.22067/jsw.v25i6.12345. (In Persian)

Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of environment*, 79(2-3), 213-224. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7.

Shokri, A., Moftakhari, H., & Hosseini, M. (2022). The historical Helmand issue and strategies for reducing its challenges. *Iranian and Islamic Historical Research*, 16(30), 293–320. https://doi.org/10.30495/iihr.2022.123456. (In Persian)

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.2004.02.003.

Stisen, S., Soltani, M., Mendiguren, G., Langkilde, H., Garcia, M., & Koch, J. (2021). Spatial patterns in actual evapotranspiration climatologies for Europe. *Remote Sensing*, 13(12), 2410. https://doi.org/10.3390/rs13122410.

Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and earth system sciences*, 6(1), 85-100. https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002.

Suwanlertcharoen, T., Chaturabul, T., Supriyasilp, T., & Pongput, K. (2023). Estimation of actual evapotranspiration using satellite-based surface energy balance derived from Landsat imagery in Northern Thailand. *Water*, 15(3), 450. https://doi.org/10.3390/w15030450.

Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., & Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote sensing of environment*, 185, 46-56. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.008.

Wali, E., Tasumi, M., & Klemm, O. (2024). Estimation of Evapotranspiration in South Eastern Afghanistan Using the GCOM-C Algorithm on the Basis of Landsat Satellite Imagery. *Hydrology*, 11(7), 95. https://doi.org/10.3390/hydrology11070095.

Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface

temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36–45. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027.

Wan, Z., Hook, S., & Hulley, G. (2015). MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid, Version 6. NASA LP DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.006.

Wang, J., Sammis, T. W., Gutschick, V. P., Gebremichael, M., & Miller, D. R. (2009). Sensitivity analysis of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Transactions of the ASABE*, *52*(3), 801-811. DOI: 10.13031/2013.27401.

Zamani, S., & Rahimzadegan, M. (2016). Calculation and evaluation of reservoir evaporation using the SEBAL evapotranspiration model (Case study: Amir Kabir Dam). *Sepehr Journal of Geographical Information*, 27(106), 57–69. DOI: 10.22131/sepehr.2018.32332. (In Persian)

Ziaei, R., Moghaddasi, M., Paymazd, S., & Bagheri, M. H. (2018). Evaluation of SEBS and SEBAL remote sensing algorithms for evaporation estimation and salinity effects on water bodies. *Water and Soil Science*, 22(4), 317–329. DOI: 10.29252/jstnar.22.4.317. (In Persian)