Tarbiyat Modares University

Spring. 2025. Vol 29. Num 1

The Journal of Spatial Planning & Geomatics

Research Paper

Performance Assessment of Remote Sensing and Empirical Evaporation Models in Lake Urmia

Hadi Khaleghi[1], Majid Rahimzadegan[2]*

1. M.Sc. in Water Resources Engineering and Management, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Associate Professor in Water Resources Engineering and Management, , K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 2025/04/08
Revised: 2025/07/23
Accepted:2025/08/20

ABSTRACT

Evaporation serves as a significant factor in the hydrological deficit experienced by Lake Urmia, thereby exerting a vital influence on its overall water equilibrium. The evolution of satellite sensor technology has facilitated the acquisition of a comprehensive range of satellite imagery, underscoring the necessity for meticulous evaluation in the assessment of lake evaporation. This research endeavor is designed to quantify daily evaporation rates from Lake Urmia through the integration of Landsat 8 and 9 imagery from the year 2022, while concurrently assessing the efficacy of physical, empirical, and remote sensing methodologies. A comprehensive analysis was conducted on a total of 21 satellite images, wherein the FAO56-PM, Priestley-Taylor, and Hargreaves-Samani models, in conjunction with the remote sensing techniques of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration (METRIC), were executed within the Google Earth Engine (GEE) framework. The resultant model outputs were corroborated against pan evaporation data obtained from the Urmia meteorological station, which served as the reference ground truth dataset. The analysis indicated that SEBAL, when utilized without a correction factor, exhibited superior accuracy, achieving a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.83 mm/day and a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) value of 0.48. Upon the implementation of a correction factor, the FAO56-PM model produced optimal outcomes, with an RMSE of 1.04 mm/day and an NSE of 0.18. In summary, SEBAL surpassed the performance of the other models, attributable to its dependence on satellite-derived imagery. Moreover, the amalgamation of satellite data with empirical modeling approaches holds significant potential for enhancing water resource management strategies within the context of Lake Urmia.

Keywords: *Evaporation, Lake Urmia, Remote Sensing, Energy Balance Algorithms, Empirical Models.*

***Corresponding Author:** Associate Professor in Water Resources Engineering and Management, , K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

https://orcid.org/0000-0002-2632-4869

rahimzadegan@kntu.ac.ir

Introduction

Lake Urmia, recognized as one of the most extensive hypersaline lakes globally, has undergone a notable diminution in its water volume in recent decades, predominantly attributed to elevated evaporation rates and anthropogenic influences. The pivotal significance of evaporation within the hydrological equilibrium of this delicate ecosystem has prompted a plethora of investigations directed towards enhancing the precision of evaporation estimations. With the progressive developments in remote sensing technologies, high-resolution satellite imagery has emerged as a formidable instrument for the surveillance of environmental parameters across expansive regions. This investigation employs both remote sensing methodologies and empirical models to critically assess the efficacy of various approaches for estimating daily evaporation from the surface of Lake Urmia. The models incorporated in this analysis encompass the empirical FAO56-PM, Priestley-Taylor, and Hargreaves-Samani models, alongside remote sensing-based frameworks such as SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) and METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration). The impetus for this research is rooted in the necessity for accurate evaporation data to facilitate water resource management, inform conservation strategies, and alleviate the adverse effects of water depletion in hypersaline ecosystems. This study meticulously evaluates the advantages and limitations of each model through an exhaustive review that also considers the spatial variability of evaporation across the lake's surface, taking into account the factors that contribute to heterogeneous evaporation patterns. Ultimately, the research aspires to propose an integrated framework and identify a dependable model for the continuous monitoring of evaporation in Lake Urmia.

Research Method

The investigation conducted in this research is predicated upon a dataset that encompasses 21 satellite images obtained from Landsat 8 and Landsat 9 during the year 2022. These images underwent processing via the Google Earth Engine (GEE) platform to derive critical parameters, including land surface temperature, albedo, and net radiation, which are vital for the implementation of remote sensing-based models. Concurrently, meteorological data—comprising variables such as temperature, relative humidity, wind speed, and solar radiation—sourced from the Urmia station were utilized as input for the empirical models. The empirical models employed in this investigation consist of FAO56-PM, Priestley-Taylor, and Hargreaves-Samani, chosen for their relative simplicity across diverse climatic contexts. Conversely, the SEBAL and METRIC models, which are grounded in the principles of surface energy balance, were utilized for the estimation of evaporation. These models leverage satellite-derived variables (including albedo, vegetation indices, and emissivity) to compute energy balance components such as net radiation, sensible heat flux, and soil heat flux, thereby facilitating the estimation of instantaneous evaporation. A significant element of the methodological framework is the incorporation of a correction factor of 0.76, derived from antecedent studies, aimed at enhancing the efficacy of the empirical models. This integrative approach affords a robust framework for the cross-validation of model performance and the exploration of spatial variations in evaporation across the lake.

Results & discussion

The comparative examination of the models elucidated distinct performance attributes. The remote sensing-based SEBAL model, implemented without any correction factor, attained the highest accuracy, evidenced by an RMSE of 0.83 mm/day and an NSE of 0.48. These findings unequivocally illustrate SEBAL's proficiency in capturing the spatial

heterogeneity of evaporation by utilizing high-resolution satellite data. Subsequent to the application of the correction factor, the FAO56-PM model exhibited notable enhancement, yielding competitive outcomes with an RMSE of 1.04 mm/day and an NSE of 0.18, albeit its performance was still inferior to that of SEBAL. The Priestley-Taylor and Hargreaves-Samani models, notwithstanding their simplicity and user-friendliness, demonstrated elevated errors, suggesting that these models may be less applicable to the intricate environmental conditions of Lake Urmia. The spatial distribution maps of evaporation derived from the model outputs indicated considerable variability, demonstrating that evaporation rates fluctuate in response to alterations in water depth and other surface-affecting factors. The discussion underscores that the integration of remote sensing data with empirical models can yield satisfactory performance. The discrepancies in model efficacy are ascribed to the diverse methodologies employed in calculating energy balance components and the varying influence of meteorological conditions on each model. These results highlight the significance of selecting an appropriate model based on regional characteristics and accentuate the potential advantages of employing combined methodologies to enhance the precision of evaporation estimates.

Conclusion

This investigation presents a thorough assessment of both remote sensing-based methodologies and empirical models for quantifying evaporation from Lake Urmia. The findings suggest that the SEBAL model, which exclusively utilizes satellite data, demonstrates superior efficacy in elucidating the spatial heterogeneities in evaporation, whereas the FAO56-PM model, when adjusted with a correction factor, exhibits commendable performance. The integrative methodology that amalgamates satellite imagery with meteorological data proves to be remarkably effective in the surveillance of evaporation in extensive and intricate aquatic systems such as Lake Urmia. These results hold significant implications for water resource administrators in devising efficacious management and conservation strategies. Subsequent investigations ought to examine additional correction factors and incorporate satellite data with enhanced temporal resolution to further augment model precision.

فصلنامه آمایش فضا و ژئوماتیک
دانشگاه تربیت مدرس
دوره ۲۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

ارزیابی کارایی مدل‌های برآورد تبخیر مبتنی بر داده‌های سنجش از دور و تجربی در دریاچه ارومیه

هادی خالقی[۱]، مجید رحیم زادگان[۲*]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
۲. دانشیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹
آخرین ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹

چکیده

تبخیر یکی از عوامل اصلی هدررفت آب در دریاچه ارومیه است که نقش مهمی در بیلان آب آن دارد. با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای، تصاویر ماهواره‌ای متعددی در دسترس قرار گرفته است که استفاده از آن‌ها در برآورد تبخیر از سطح دریاچه ارومیه نیاز به بررسی دارد؛ بنابراین، هدف این پژوهش، برآورد تبخیر روزانه از سطح دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ در سال ۲۰۲۲ و مقایسه عملکرد مدل‌های فیزیکی، تجربی و سنجش از دوری است. برای این منظور، از ۲۱ تصویر ماهواره‌ای استفاده شد و مدل‌های FAO56-PM، Priestley-Taylor و Hargreaves-Samani و مدل‌های سنجش از دوری surface energy balance algorithm for land (SEBAL) و Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration (METRIC) در محیط Google Earth Engine پیاده‌سازی شدند. برای ارزیابی نتایج مدل‌ها، از اندازه‌گیری‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی ارومیه به عنوان داده زمینی استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل SEBAL بدون اعمال ضریب اصلاحی، بهترین عملکرد را با Root mean square error (RMSE) و Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) به ترتیب ۰/۸۳ میلی‌متر در روز و ۰/۴۸ نشان داد. با اعمال ضریب اصلاحی، مدل FAO56-PM با RMSE برابر با ۱/۰۴ میلی‌متر در روز و NSE معادل ۰/۱۸ بهترین نتیجه را داشت. در مجموع، مدل SEBAL به دلیل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، توانایی بهتری در برآورد تبخیر داشت. علاوه بر این، ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های تجربی، می‌تواند در مدیریت منابع آب دریاچه ارومیه مؤثر باشد.

واژگان کلیدی: *تبخیر، دریاچه ارومیه، سنجش از دور، الگوریتم‌های بیلان انرژی، مدل‌های تجربی.*

* نویسنده مسئول rahimzadegan@kntu.ac.ir

۱. مقدمه

تبخیر از سطح دریاچه‌ها یکی از عوامل کلیدی در هدررفت آب آن‌ها محسوب می‌شود (Sene et al., 1991). برای برآورد تبخیر، روش‌هایی مانند اندازه‌گیری تشت تبخیر، مدل‌های تجربی، روش گردابی کوواریانس[1]، تعادل آب و تعادل انرژی به کار گرفته می‌شوند (Drexler et al., 2004; Rosenberry et al., 2007). در دهه‌های اخیر، مدل‌های مبتنی بر تابش، دما و روش‌های ترکیبی توسعه یافته‌اند که امکان تخمین تبخیر را در مقیاس محلی فراهم می‌کنند (Jensen & Allen, 2016). دی بروین و کیجمن[2] (۱۹۷۹) مدل Priestley-Taylor را برای برآورد تبخیر از یک دریاچه کم‌عمق در هلند به کار بردند که نتایج عملکرد رضایت‌بخشی را نشان داد. وینتر[3] و همکاران (۱۹۹۵) یازده معادله را در دریاچه ویلیامز ارزیابی کرده و دریافتند که DeBruin Keijman، Priestley-Taylor و Penman اصلاح‌شده دقت بالاتری دارند. کریگ[4] (۲۰۰۶) با استفاده از معادلات Penman و FAO56-PM میزان هدررفت آب از طریق تبخیر در ذخایر آب کشاورزی را برآورد کرد. نتایج نشان داد که این دو روش همبستگی بالایی دارند و مدل FAO56-PM قادر است تبخیر از بدنه‌های آبی را با دقت مناسبی تخمین بزند. گالگو-الویرا[5] و همکاران (۲۰۱۲) با ارزیابی روش‌های مختلف دریافتند که مدل FAO56-PM با داده‌های ورودی دقیق، عملکرد بهتری نسبت به Penman در تخمین تبخیر از مخازن آب سرپوشیده دارد.

به دلیل تغییرات مکانی دمای سطح و سایر عوامل مؤثر بر تبخیر، تعمیم برآوردهای نقطه‌ای به کل دریاچه با چالش‌هایی همراه است (McJannet et al., 2012; Zamani Losgedaragh & Rahimzadegan, 2018). در این راستا، داده‌های سنجش از دور می‌تواند در تخمین تبخیر از سطح دریاچه مورد استفاده قرار گیرند (Sima et al., 2013). روش‌های مبتنی بر سنجش از دور، با حداقل داده‌های ورودی، امکان محاسبه تبخیر را فراهم کرده و درک بهتری از تغییرات مکانی-زمانی آن ارائه می‌دهند (Bastiaanssen et al., 2005; Zamani Losgedaragh & Rahimzadegan, 2018). با توجه به اهمیت تبخیر از سطح دریاچه ارومیه، ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر، به‌ویژه مدل‌های مبتنی بر سنجش از دور، اهمیت فراوانی دارد.

با پیشرفت سنجنده‌های ماهواره‌ای، الگوریتم‌های سنجش از دور متعددی برای تخمین تبخیر-تعرق (ET) توسعه یافته‌اند که امکان برآورد غیرمستقیم آن را بدون نیاز به داده‌های محیطی فراهم می‌کنند (Bastiaanssen et al., 2005). از مهم‌ترین مدل‌های تعادل انرژی مبتنی بر سنجش از دوری می‌توان به الگوریتم بیلان انرژی برای سطح زمین[6] (SEBAL)، الگوریتم تهیه نقشه تبخیر-تعرق با قدرت تفکیک بالا و واسنجی داخلی[7] (METRIC)، سیستم تعادل

[1] Eddy-Covariance Method
[2] De Bruin & Keijman
[3] Winter
[4] Craig
[5] Gallego-Elvira
[6] Surface Energy Balance Algorithm for Land
[7] Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration

انرژی سطح[1] (SEBS) و تعادل انرژی سطحی ساده شده عملیاتی[2] (SSEBop) اشاره کرد که در مطالعات گذشته استفاده شده‌اند (Ghahreman & Rahimzadegan, 2022; Zamani Losgedaragh & Rahimzadegan, 2018). مدل SEBAL ابتدا توسط باستیانس[3] و همکاران (۱۹۹۸) ارائه و سپس توسط آلن[4] و همکاران (۲۰۰۲) اصلاح شد که منجر به تدوین دستورالعملی برای کاربران شد. این مدل در شرایط اقلیمی مختلف اجرا شده و دقت آن در مقیاس مزرعه، فصلی و سالانه به ترتیب ۸۵، ۹۵ و ۹۶ درصد گزارش شده است (Bastiaanssen et al., 2005). مدل METRIC نیز توسط آلن و همکاران (۲۰۰۷) معرفی شد.

Google Earth Engine (GEE) که یک سکوی پردازش ابری در مقیاس جهانی است، در سال‌های اخیر، برای مدیریت منابع آب مورد توجه محققان قرار گرفته است (Gorelick et al., 2017). این سکو امکان اجرای مدل‌های سنجش از دوری برآورد تبخیر-تعرق مانند SEBAL و METRIC را با دقت زمانی و مکانی بالا فراهم می‌کند. در این راستا، محققان متعددی این مدل‌ها را در محیط GEE برای ارزیابی تبخیر-تعرق در اقلیم‌های مختلف پیاده‌سازی و اعتبارسنجی کردند (Allen et al., 2015; Laipelt et al., 2021; Mhawej & Faour, 2020).

مطالعات متعددی کارایی تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های تعادل انرژی مبتنی بر سنجش از دور را در برآورد تبخیر از بدنه‌های آبی ارزیابی کرده‌اند. زمانی‌لسگدراق[5] و رحیم‌زادگان (۲۰۱۸) مدل‌های SEBAL، METIC و SEBS را با ۱۶ تصویر لندست در سد امیرکبیر و زمین‌های کشاورزی اطراف آن بررسی کردند و دریافتند که مدل SEBS با ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۶۲ میلی‌متر در روز عملکرد مطلوبی دارند. فادل[6] و همکاران (۲۰۲۰) مدل METRIC را در GEE اجرا و با طبقه‌بندی حرارتی، کدورت و دمای سطح دریاچه مقایسه کردند که در میان آن‌ها بیشترین همبستگی تبخیر با کدورت با مقدار ۰/۹۱ مشاهده شد. قهرمان[7] و رحیم‌زادگان (۲۰۲۲) با ۳۳ تصویر لندست، مدل‌های SEBAL و METRIC را با FAO56-PM، Priestley-Taylor و Kimberly-Penman مقایسه کرده و دریافتند که Kimberly-Penman و FAO56-PM با کارایی نش-ساتکلیف[8] (NSE) به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۳۶ عملکرد بهتری در تبخیر از آب شیرین دارند. عبدالرضی[9] و همکاران (۲۰۱۶) با اصلاح مدل SEBS، تبخیر از دریاچه‌های ویکتوریا و تانا در آفریقا را برآورد کردند به طوریکه شار گرمای نهان محاسبه شده در این دریاچه‌ها به ترتیب دارای خطای جذر میانگین مربعات نسبی (rRMSE) ۴/۱ و ۴/۷ درصد بود. رحیم‌پور[10] و رحیم‌زادگان (۲۰۲۱) مدل‌های SEBAL و SSEBop را با استفاده از تصاویر اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت

[1] Surface Energy Balance System
[2] Operational Simplified Surface Energy Balance
[3] Bastiaanssen
[4] Allen
[5] Zamani Losgedaragh & Rahimzadegan
[6] Fadel
[7] Ghahreman & Rahimzadegan
[8] Nash-Sutcliffe Efficiency
[9] Abdelrady
[10] Rahimpour & Rahimzadegan

تفکیک متوسط (MODIS) برای سال ۲۰۰۸ در مخزن سد شهید کاظمی و دریاچه ارومیه ارزیابی کردند. مقایسه نتایج این مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای تبخیر نشان داد که مدل SEBAL دارای مقدار RMSE برابر با ۱۹/۸ میلی‌متر در ماه و ضریب همبستگی برابر ۰/۹ بود. قهرمان و رحیم‌زادگان (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر MODIS و مدل‌های مختلف، تبخیر از سطح دریاچه ارومیه را برآورد کردند و دریافتند که تبخیر در سطح دریاچه یکسان نیست. خالقی[1] و همکاران (۲۰۲۵) برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه ارومیه از تصاویر لندست ۸ و مدل‌های سنجش از دوری و تجربی مختلفی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که مدل METRIC با NSE برابر با ۰/۸۸ بهترین عملکرد را داشت.

با پرتاب ماهواره لندست ۹ و استفاده ترکیبی از داده‌های آن با لندست ۸، می‌توان فاصله زمانی تصویربرداری لندست را به ۸ روز کاهش داد (Chen et al., 2024). همان‌طور که مطالعات بررسی شده نشان می‌دهند، از این داده‌های ارزشمند برای برآورد تبخیر از دریاچه ارومیه استفاده نشده است و مطالعات پیشین نیز فقط با داده‌های لندست ۸ اجرا شده‌اند؛ بنابراین، هدف اصلی مطالعه کنونی محاسبه نرخ تبخیر روزانه از سطح دریاچه ارومیه و ارزیابی مدل‌های مختلف تجربی و سنجش از دوری مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای که با این داده‌ها پیاده‌سازی شده‌اند، است. در این راستا مدل‌های تعادل انرژی سنجش از دوری مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای SEBAL و METRIC و مدل‌های فیزیکی FAO56-PM، Priestley-Taylor و Hargreaves-Samani که به طور گسترده‌ای در پژوهش‌ها استفاده شده‌اند، پیاده‌سازی شدند. برای تحقق این هدف، مدل‌های منتخب در محیط GEE اجرا شدند. سپس از ضریب اصلاحی تبخیر پیشنهادشده برای دریاچه ارومیه استفاده شد و این اصلاح در مدل‌های انتخابی اعمال شد. در ادامه، مدل‌های اصلاح‌شده منتخب برآورد تبخیر با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تشت تبخیر مقایسه و عملکرد هر کدام از مدل‌ها مورد ارزیابی و تحلیل قرارگرفتد. نتایج نشان‌دهنده کارایی قابل‌قبول مدل‌ها با استفاده از ترکیب داده‌های لندست ۸ و ۹ برای برآورد تبخیر از دریاچه ارومیه به‌عنوان دریاچه‌ای فوق شور بود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

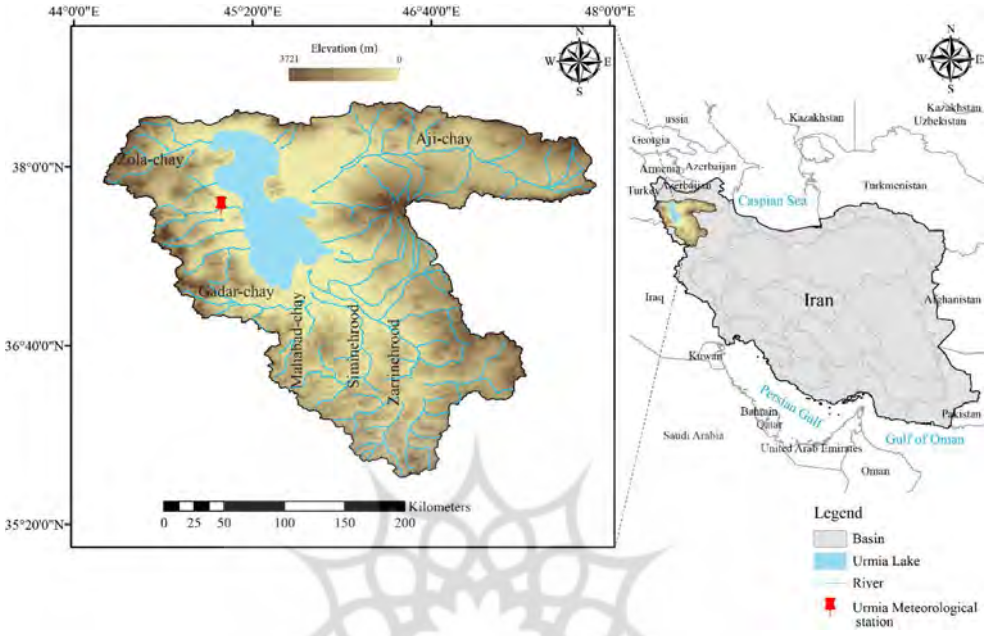
دریاچه ارومیه که در شمال غربی ایران واقع شده است، یک دریاچه کم‌عمق با عمق متوسط ۴/۹ متر و محصور در حوضه‌ای بسته است که پس از دریای مرده (Dead Sea)، دومین دریاچه فوق شور بزرگ جهان محسوب می‌شود (Sima et al., 2013). این دریاچه بین عرض‌های جغرافیایی ′۰۴ °۳۷ و ′۱۷ °۳۸ شمالی و طول‌های جغرافیایی °۴۵ و °۴۶ شرقی قرار دارد (شکل ۱). حداکثر عمق دریاچه ارومیه در بخش شمالی که عمیق‌تر از بخش جنوبی آن است، ۱۱ متر اندازه‌گیری شده است (Karimi et al., 2016). حوضه آبریز ارومیه با مساحت ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع، شامل مناطق کوهستانی در ارتفاعات تا ۳۶۰۰ متر و دریاچه‌ای در پایین‌ترین نقطه حوضه است. میانگین بارندگی سالانه در سطح دریاچه حدود ۳۵۰ میلی‌متر بوده (Sima et al., 2013) و در مناطق کوهستانی بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر متغیر است (Tasumi, 2019). ایستگاه هواشناسی ارومیه، واقع در غرب دریاچه، طی دوره مطالعاتی این پژوهش نرخ تبخیر

[1] Khaleghi

روزانه را بین ۰ تا ۱۲/۸ میلی‌متر ثبت کرده است.

شکل ۱- موقعیت دریاچه ارومیه به عنوان منطقه مطالعاتی این پژوهش

Figure 1. Location of Lake Urmia as the study area of this research



۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه، برای پیاده‌سازی مدل‌های برآورد تبخیر، داده‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی ارومیه از سازمان هواشناسی ایران (https://www.data.irimo.ir) تهیه شد. همچنین، برای ارزیابی مدل‌های منتخب، از داده‌های تشت تبخیر کلاس A استاندارد این ایستگاه در تاریخ‌های مشخص‌شده در جدول ۱ استفاده گردید. علاوه بر این، ۲۱ تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ با حداقل پوشش ابری در تاریخ‌های مشخص‌شده (جدول ۱) در GEE استفاده شده است. در این فرآیند، از میان ۴۶ تصویر لندست موجود در سال، ۲۵ تصویر به‌دلیل پوشش ابری بیش از ۱۰ درصد حذف شدند. این موضوع موجب کاهش تعداد مشاهدات در برخی بازه‌های زمانی، به‌ویژه در ماه‌های ابری‌تر سال شد. با این حال، برای کاهش اثر این محدودیت، از تصاویر هر دو ماهواره لندست ۸ و ۹ استفاده شد تا پوشش زمانی مناسب در کل سال حفظ گردد و فاصله زمانی بین دو تصویر متوالی به حدود ۸ روز کاهش یابد تا تحلیل تبخیر از مقیاس زمانی مناسبی برخوردار باشد. GEE با دسترسی به مجموعه‌داده‌هایی مانند آرشیو کامل لندست، امکان تحلیل جغرافیایی در مقیاس جهانی را با توان محاسباتی بالا فراهم می‌کند (Gorelick et al., 2017). مجموعه تصاویر استفاده‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- تاریخ تصاویر، ساعت گذر ماهواره و تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده در سال ۱۴۰۱

Table 1. Image acquisition dates, satellite overpass times, and Landsat images used in 2022

شماره تصویر	تاریخ تصویربرداری	ساعت گذر (UTC)	شماره لندست	شماره تصویر	تاریخ تصویربرداری	ساعت گذر (UTC)	شماره لندست
۱	فروردین ۱۶	۷:۳۸:۲۲	۸	۱۲	مرداد ۴	۷:۳۸:۵۸	۸
۲	فروردین ۲۴	۷:۳۸:۲۸	۹	۱۳	مرداد ۱۲	۷:۳۸:۴۲	۹
۳	اردیبهشت ۱	۷:۳۸:۲۵	۸	۱۴	مرداد ۲۰	۷:۳۹:۰۶	۸
۴	اردیبهشت ۲۵	۷:۳۸:۱۱	۹	۱۵	مرداد ۲۸	۷:۳۸:۴۹	۹
۵	خرداد ۱۰	۷:۳۸:۰۷	۹	۱۶	شهریور ۵	۷:۳۹:۰۸	۸
۶	خرداد ۱۸	۷:۳۸:۴۲	۸	۱۷	شهریور ۱۳	۷:۳۸:۵۰	۹
۷	خرداد ۲۶	۷:۳۸:۱۴	۹	۱۸	شهریور ۲۱	۷:۳۹:۱۳	۸
۸	تیر ۳	۷:۳۸:۵۰	۸	۱۹	شهریور ۲۹	۷:۳۸:۵۶	۹
۹	تیر ۱۱	۷:۳۸:۲۸	۹	۲۰	مهر ۶	۷:۳۹:۱۵	۸
۱۰	تیر ۱۹	۷:۳۸:۵۰	۸	۲۱	مهر ۱۴	۷:۳۸:۵۷	۹
۱۱	تیر ۲۷	۷:۳۸:۲۸	۹				

جدول ۲- مجموعه تصاویر مورد استفاده در این تحقیق به همراه GEE ID آن‌ها

Table 2. Satellite images used in this study along with their GEE Ids

محصول	GEE ID
بازتاب سطحی (لندست ۸)	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2
بازتاب از بالای جو (لندست ۸)	LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA
بازتاب سطحی (لندست ۹)	LANDSAT/LC09/C02/T1_L2
بازتاب از بالای جو (لندست ۹)	LANDSAT/LC09/C02/T1_TOA
ناسا[1] (۳۰ متر) SRTM مدل ارتفاع رقومی	USGS/SRTMGL1_003

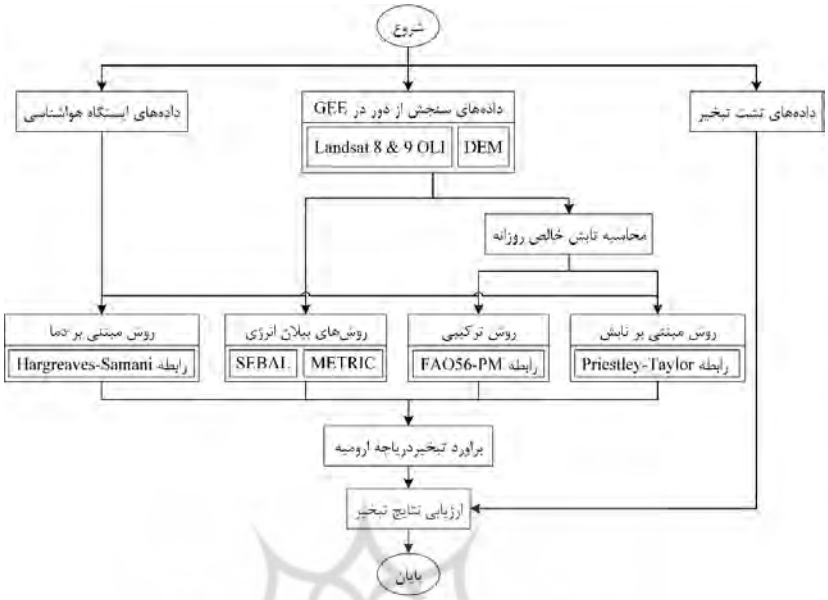
۳. روش پژوهش

روند پیاده‌سازی این پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است. در گام نخست، مدل‌های منتخب برای تخمین تبخیر دریاچه ارومیه اجرا شدند. سپس، با اعمال ضریب اصلاحی پیشنهادی، صحت آن‌ها بهبود یافته و نتایج با داده‌های تشت تبخیر صحت‌سنجی شد.

[1] NASA SRTM Digital Elevation

شکل ۲- روندنمای کلی روش‌های اجراشده در این تحقیق برای محاسبه تبخیر از دریاچه ارومیه

Figure 2. Overview of the implemented methods for estimating evaporation from Lake Urmia



۳-۱- روش‌های تعادل انرژی

الگوریتم‌های SEBAL و METRIC تبخیر را بر اساس تعادل انرژی سطحی و مجموعه‌ای از معادلات سلسله‌مراتبی در هر پیکسل محاسبه می‌کنند (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007; Bastiaanssen et al., 1998). این فرایند شامل تبدیل تابش طیفی ماهواره‌ای به ET لحظه‌ای در زمان گذر ماهواره و سپس برون‌یابی آن به مقیاس روزانه است. در این الگوریتم‌ها، شار گرمای نهان تبخیر (λET_{inst}) به‌عنوان باقی‌مانده انرژی سطحی از معادله تعادل انرژی سطحی محاسبه می‌شود (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007):

$$\lambda ET_{inst} = R_n - G - H \qquad (۱)$$

که در آن، R_n شار تابش خالص، G شار گرمای خاک (یا آب در بدنه‌های آبی) و H شار گرمای محسوس به هوا است. تمامی پارامترها برحسب W/m^2 محاسبه می‌شوند. R_n با تفاضل شارهای تابشی ورودی و خروجی از سطح محاسبه می‌شود (Allen et al., 2002):

$$R_n = (1-\alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1-\varepsilon_0)R_{L\downarrow} \qquad (۲)$$

که در آن، $R_{s\downarrow}$ تابش طول موج کوتاه ورودی (W/m^2)، $R_{L\downarrow}$ تابش طول موج بلند ورودی (W/m^2) و $R_{L\uparrow}$ تابش طول موج بلند خروجی (W/m^2)، α آلبیدو (Albedo) سطح (بدون واحد) و ε_0 گسیلمندی (Emissivity) حرارتی سطح (بدون واحد) است. آلبیدو طبق پیشنهاد آلن و همکاران (۲۰۰۲) براساس تصاویر ماهواره‌ای لندست برای سطح دریاچه ارومیه محاسبه شد و مقدار ۰/۹۸۵ نیز برای گسیلمندی در نظر گرفته شد. برای پهنه‌های آبی در این

پژوهش بر اساس رابطه پیشنهادی توسط آلن و همکاران (۲۰۰۲) برای پهنه‌های آبی، G برابر با $0/5R_n$ در نظر گرفته شده است. برای محاسبه H، اختلاف دمای سطح و هوا در ارتفاع دو متری برآورد شده و از رابطه زیر استفاده می‌شود آلن[1] و همکاران (۲۰۰۲):

$$H = \frac{\rho_a \times c_p \times dT}{r_{ah}} \quad (۳)$$

که در این رابطه، ρ_a چگالی هوا (kg/m^3)، c_p گرمای مخصوص ($1004\,J/kg.K$)، dT اختلاف دما (کلوین) و r_{ah} مقاومت آیرودینامیکی (s/m) است. از آنجایی که دمای هوا در هر پیکسل در دسترس نیست، مدل‌ها از یک رابطه خطی بین dT و دمای سطح زمین بر اساس مجموعه تصاویر Surface Reflectance موجود در GEE، استفاده می‌کنند. برای تعیین ضرایب این رابطه، دو پیکسل حدی سرد و گرم انتخاب می‌شوند. پیکسل سرد (با بیشترین تبخیر) در SEBAL از سطح آب و در METRIC از پوشش گیاهی انبوه انتخاب می‌شود. این پیکسل در مدل METRIC باید دارای دمای سطحی پایین، مقدار NDVI بالا، آلبیدوی سطحی در بازه ۲۲ تا ۲۴ درصد و شاخص سطح برگ (LAI) در بازه ۴ تا ۶ باشد. پیکسل گرم (با تبخیر صفر) نیز در زمین‌های کشاورزی بایر و بدون پوشش گیاهی مشخص می‌شود. این پیکسل باید دارای دمای سطحی بالا، آلبیدوی مشابه با سایر اراضی خشک منطقه، شاخص سطح برگ کمتر از ۰/۴ و شیب کمتر از یک درصد باشد. قرارگیری این پیکسل‌ها در نزدیکی ایستگاه هواشناسی، دقت نتایج مدل را افزایش می‌دهد. شیب مثبت رابطه خطی به دست آمده برای اختلاف دما، نشان‌دهنده آن است که با افزایش دمای سطح در پیکسل‌ها، اختلاف دمای آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. در ادامه، مقدار اولیه H با فرض شرایط جوی خنثی محاسبه شده و سپس، برای اصلاح مقاومت آیرودینامیکی، نظریه مونین-ابوخوو[2] در یک فرایند تکراری اعمال می‌شود. این فرایند تا همگرایی r_{ah} و dT ادامه یافته و در نهایت λET_{inst} در زمان گذر ماهواره تعیین می‌شود. مقدار لحظه‌ای تبخیر با تقسیم λET_{inst} بر گرمای نهان تبخیر (J/kg) محاسبه شده و سپس به مقیاس ساعتی تبدیل می‌شود (Allen et al., 2002):

$$E_{inst} = 3600\frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (۴)$$

برای تبدیل تبخیر ساعتی به مقیاس روزانه، پارامتر کسر تبخیر-تعرق مرجع (ET_rF)، به عنوان نسبت E_{inst} به تبخیر-تعرق مرجع، استفاده شده و مقدار تبخیر روزانه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_{daily} = ET_rF \times ET_{r\,24} \quad (۵)$$

که $ET_{r\,24}$ تبخیر-تعرق گیاه مرجع است که از داده‌های ایستگاه هواشناسی محاسبه می‌شود. به طور کلی، مدل METRIC مشابه SEBAL عمل کرده اما در انتخاب پیکسل سرد و برخی روابط متفاوت است (جدول ۳).

[1] Allen
[2] Monin-Obukhov

جدول ۳- روابط استفاده‌شده در مدل‌های SEBAL و METRIC

Table 3. Equations used in the SEBAL and METRIC models

Model	Parameter	Equation
SEBAL	Atmospheric transmissivity	$\tau_{SW} = 0.75 + 2\times10^{-5}\times z$
METRIC	Atmospheric transmissivity	$\tau_{SW} = 0.35 + 0.627\times\exp\left[\frac{-0.00146P}{k_t\cos\theta_{hor}} - 0.75\left(\frac{W}{\cos\theta_{hor}}\right)^{0.4}\right]$
SEBAL	Soil heat flux	$\frac{G}{R_n} = \frac{T_S}{\alpha\left(0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2\right)\left(1-0.98NDVI^4\right)}$
METRIC	Soil heat flux	$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18e^{-0.521LAI} \quad (LAI \geq 0.5)$ $\frac{G}{R_n} = 1.8\left(T_s - 273.15\right)/R_n + 0.084 \quad (LAI < 0.5)$

در روابط ارائه‌شده در جدول ۳، z ارتفاع از سطح آب‌های آزاد (m)، P فشار اتمسفری (kPa)، W آب داخل اتمسفر (mm)، θ_{hor} زاویه اوج خورشیدی روی سطح افق، k_t ضریب کدورت (بدون واحد)، T_s دمای سطح (کلوین)، $NDVI$ شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده و LAI شاخص سطح برگ است که بر اساس رابطه پیشنهادی توسط آلن و همکاران (۲۰۰۲) محاسبه شد.

۳-۲- تبخیر پتانسیل

تبخیر پتانسیل، حداکثر میزان تبخیری است که در شرایط بدون محدودیت رخ می‌دهد. برای برآورد آن، مدل‌های مختلفی شامل مدل‌های ترکیبی و مدل‌های فیزیکی، مبتنی بر دما و مبتنی بر تابش ارائه شده‌اند. مدل‌های ترکیبی مانند FAO56-PM (Allan et al., 1998)، به داده‌های گسترده هواشناسی نیاز دارند، در حالیکه مدل‌های ساده‌تر مانند مدل مبتنی بر دما Hargreaves-Samani (Hargreaves & Samani, 1985) و مدل مبتنی بر تابش Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972) با داده‌های محدودتری اجرا می‌شوند. در این مطالعه، برای اجرای مدل‌های FAO56-PM و Priestley-Taylor در دریاچه ارومیه، از مدل برآورد تابش خالص ارائه‌شده توسط (Ghahreman & Rahimzadegan, 2022) استفاده شد. این مدل، با استفاده از تصاویر لندست ۸ و ۹، تابش خالص را محاسبه کرده و به عنوان ورودی برای برآورد توزیع تبخیر پتانسیل به کار می‌گیرد. روابط مدل‌های تبخیر پتانسیل در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- روابط مدل‌های تبخیر پتانسیل استفاده‌شده در این مطالعه با منابع

Table 4. Equations for potential evaporation models used in this study with references

Developed equation	Reference
$E_0 = \dfrac{0.408(R_n - G) + \gamma \dfrac{900}{T_{mean}+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	(Allan et al., 1998)
$E_0 = 0.0023(0.408)(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}(T_{mean} + 17.8)R_a$	(Hargreaves & Samani, 1985)
$E_0 = \alpha_{PT} \dfrac{\Delta}{\Delta+\gamma} \dfrac{R_n - G}{\lambda}$	(Priestley & Taylor, 1972)

در روابط ارائه‌شده در جدول ۴، E_0 تبخیر پتانسیل (mm/day)، R_n تابش خالص روزانه ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$)، $T_{\max}$ و $T_{\min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای روزانه (°C)، T_{mean} میانگین روزانه دمای هوا (°C)، G شار گرمای آب ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$)، γ ضریب ثابت سایکرومتری ($KPa.°C^{-1}$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار ($KPa.°C^{-1}$)، R_a تابش فرازمینی ($MJ.m^{-2}.day^{-1}$)، ۰/۴۰۸ ضریبی که $MJ.m^{-2}.day^{-1}$ را به mm/day تبدیل می‌کند، α_{PT} برابر با ۱/۲۶ و λ گرمای نهان تبخیر (MJ/kg) است.

۳-۲- روش‌های ارزیابی نتایج

برای ارزیابی صحت مدل‌های برآورد تبخیر، نتایج آن‌ها با داده‌های تشت تبخیر ایستگاه هواشناسی مقایسه شد. از آنجایی که تبخیر تشت بیشتر از تبخیر سطح آب است، از ضرایب تصحیح تبخیر تشت که توسط آلن و همکاران (1998) ارائه شده، برای اصلاح داده‌های تشت استفاده شده است. همچنین، برای انطباق این داده‌ها با شرایط دریاچه فوق شور ارومیه، از ضریب اصلاحی ۰/۷۶ استفاده شد (Hashemi, 2008; WWA/Yekom, 2005). مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی پیرسون (r)، RMSE، NSE، درصد سوگیری (PBIAS) و ضریب کارایی کلینگ-گوپتا[1] (KGE) ارزیابی شدند. روابط این معیارها در جدول ۵ ارائه شده است.

[1] Kling-Gupta efficiency coefficient

جدول ۵- معیارهای ارزیابی نتایج استفاده شده در این تحقیق

Table 5. Criteria for evaluating results used in this research

Equation	Optimal Value	Equation	Optimal Value
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$	1	$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}}$	1
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}$	0	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\gamma - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$	
$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n} O_i - P_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \times 100$	0	$\gamma = \frac{CV_p}{CV_O} = \frac{\sigma_p / \bar{P}}{\sigma_O / \bar{O}}, \beta = \frac{\bar{O}}{\bar{P}}$	1

در روابط ارائه‌شده در جدول ۵، O_i و P_i به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی شده، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی شده، n تعداد داده‌ها، CV_O و CV_p ضریب تغییرات مقادیر مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده هستند.

۴. نتایج و بحث

۴-۱- برآورد روزانه تبخیر

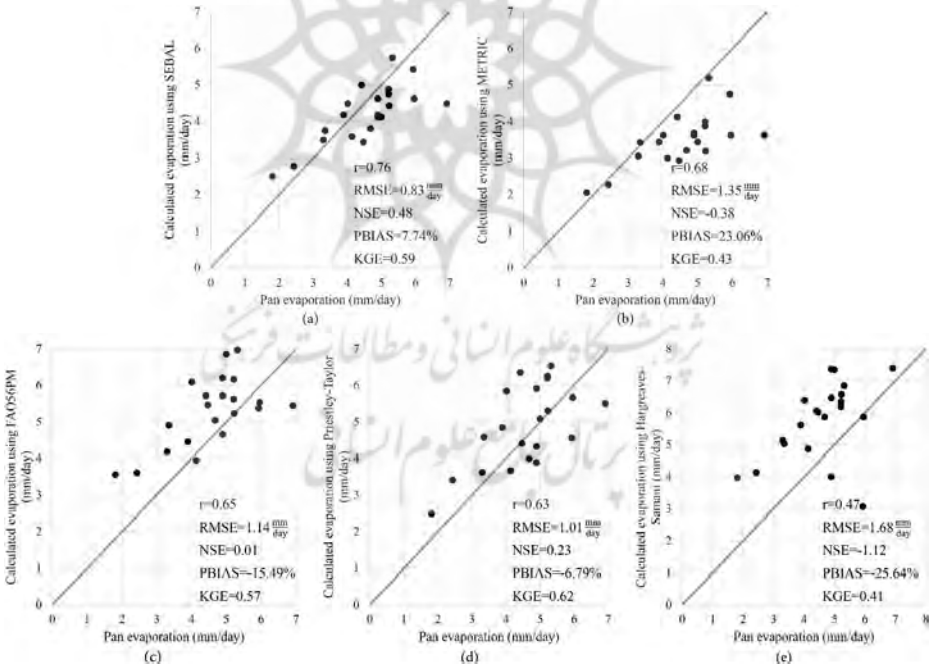
در این مطالعه، توزیع مکانی تبخیر روزانه دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر لندست ۸ و ۹ و مدل‌های SEBAL، METRIC، FAO56-PM و Priestley-Taylor محاسبه شد. سپس، مقدار تبخیر در نزدیک‌ترین پیکسل به ایستگاه هواشناسی برای مقایسه با مدل Hargreaves-Samani و داده‌های تبخیر تشت استخراج گردید. شکل ۳ مقایسه تبخیر محاسبه‌شده توسط مدل‌های منتخب و اندازه‌گیری‌های تشت را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مدل‌های تجربی مقادیر بالاتری نسبت به داده‌های مشاهداتی ارائه می‌دهند که به دلیل کاهش فشار بخار اشباع در اثر شوری آب و کاهش نرخ تبخیر دریاچه‌های شور است (Abdelrady et al., 2016).

برای ارزیابی مدل‌ها، شاخص‌های r، RMSE، NSE، PBIAS و KGE محاسبه شد (شکل ۳). مدل SEBAL با همبستگی ۰/۷۶ بهترین تطابق را با داده‌های مشاهداتی داشت و مدل‌های METRIC، FAO56-PM و Priestley-Taylor دارای همبستگی مشابه بوده و Hargreaves-Samani با r=۰/۴۷ دارای کم‌ترین همبستگی بود. مقادیر NSE برای همه مدل‌ها به جز SEBAL پایین بود که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف آن‌ها در برآورد تبخیر دریاچه ارومیه است. مدل‌های سنجش از دوری SEBAL و METRIC دقت بالاتری داشتند زیرا بر اساس مشاهدات

ارومیه اســت. مدل‌های ســنجش از دوری SEBAL و METRIC دقت بالاتری داشــتند زیرا بر اســاس مشــاهدات ماهواره‌ای و شــرایط دریاچه، پارامترهای مؤثر بر تبخیر را محاســبه می‌کنند. در مدل SEBAL، گذردهی جوی به صورت ساده و تجربی بر اساس ارتفاع از سطح دریا محاسبه می شود (Bastiaanssen et al., 1998)، در حالیکه در مدل METRIC، این پارامتر با استفاده از شاخص شفافیت جوی و موقعیت خورشیدی به صورت دقیق‌تر برآورد می‌شــود (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007). این تفاوت باعث می‌شــود که در روزهای با شــرایط جوی متغیر، تابش خالص در METRIC معمولاً کمتر از SEBAL برآورد شــود. از ســوی دیگر، مدل SEBAL در معادله شــار گرمایی خاک از معادله‌ای مبتنی بر دمای سطح، آلبیدو و NDVI استفاده می‌کند (Bastiaanssen et al., 1998)، در حالیکه در METRIC، این پارامتر بر اســاس ضــریب ثابتی از تابش خالص و با در نظر گرفتن پوشــش گیاهی و نوع سطح زمین تعیین می شود (Allen, Tasumi, & Trezza, 2007). این مو ضوع منجر به برآورد بالاتر شار گرمایی خاک در METRIC نسبت به SEBAL می‌شود که در نتیجه آن، انرژی باقی‌مانده برای تبخیر کمتر شده و مقادیر ET پایین‌تری گزارش می‌شود.

شکل ۳- مقایسه تبخیر اندازه‌گیری تشت با تبخیر محاسبه شده از مدل‌های a) SEBAL، b) METRIC، c) FAO56-PM، d) Priestley-Taylor و e) Hargreaves-Samani

Figure 3. Comparison of pan evaporation measurements with evaporation estimated by the models: a) SEBAL, b) METRIC, c) FAO56-PM, d) Priestley-Taylor, and e) Hargreaves-Samani



شاخص PBIAS منفی، بیش‌برآورد مدل‌های تجربی را نشان می‌دهد. بر اساس شاخص‌های NSE و KGE، ضعیف‌ترین عملکرد برای Hargreaves-Samani به ترتیب با مقدار ۱/۱۲- و ۰/۴۱ و بهترین عملکرد برای مدل‌های SEBAL و Priestley-Taylor به ترتیب با مقدار NSE=۰/۴۸ و KGE=۰/۶۲ ثبت شد. دلیل عملکرد ضعیف مدل‌های پتانسیل تبخیر مانند Hargreaves-Samani آن است که این مدل‌ها پارامترهای کمتری را در نظر گرفته و

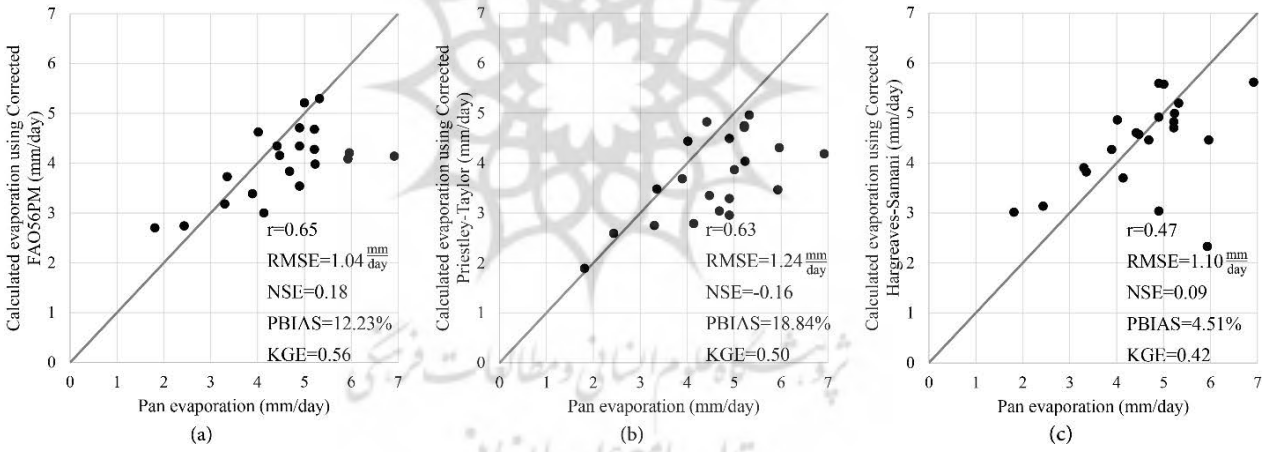
شرایط واقعی دریاچه را به‌دقت شبیه‌سازی نمی‌کنند. بیش‌برآورد مدل‌های تجربی و اختلاف آن‌ها نسبت به مقادیر مشاهداتی، در مقادیر بالای RMSE و PBIAS منفی قابل مشاهده است (شکل ۳). مدل SEBAL که دارای مقدار RMSE برابر با ۰/۸۳ میلی‌متر در روز است دارای کمترین اختلاف با مقادیر مشاهداتی بود، در حالیکه مدل Hargreaves-Samani با RMSE و PBIAS به ترتیب ۱/۶۸ میلی‌متر در روز و ٪۲۵/۶۴- بیشترین خطا را نشان داد. از آن جایی که Hargreaves-Samani فقط یک مدل مبتی بر دما است، این میزان خطا برای آن قابل پیش‌بینی بود. مقادیر PBIAS منفی نیز بر بیش‌برآورد مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر دریاچه ارومیه تاکید دارد.

۴-۲- برآورد روزانه تبخیر با اعمال ضریب اصلاحی پیشنهادی

برای برآورد دقیق‌تر تبخیر از سطح دریاچه فوق شور ارومیه، مدل‌های تجربی با استفاده از ضریب اصلاحی ۰/۷۶ که در مطالعات پیشین پیشنهاد شده است، تصحیح شدند (Hashemi, 2008; WWA/Yekom, 2005). شکل ۴ مقایسه تبخیر محاسبه‌شده توسط مدل‌های اصلاح‌شده را در برابر داده‌های تبخیر تشت نشان می‌دهد.

شکل ۴- مقایسه تبخیر اندازه‌گیری تشت با تبخیر محاسبه شده از مدل‌های اصلاح‌شده a) FAO56-PM، b) Priestley-Taylor و c) Hargreaves-Samani

Figure 4. Comparison of pan evaporation measurements with evaporation estimated by the corrected models: a) FAO56-PM, b) Priestley-Taylor, and c) Hargreaves-Samani



مقایسه شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد که اعمال ضریب اصلاحی برای تطبیق بهتر با شرایط فوق شور دریاچه ارومیه باعث کاهش مقدار تبخیر برآوردشده در مدل‌های FAO56-PM و Hargreaves-Samani و بهبود همخوانی آن‌ها با داده‌های مشاهداتی شده است. بررسی معیارهای آماری نشان داد که ضریب اصلاحی موجب بهبود RMSE، PBIAS و NSE در بیشتر مدل‌ها شده و دقت آن‌ها را افزایش داده است. در بین مدل‌های اصلاح‌شده، مدل FAO56-PM با NSE=۰/۱۸ و KGE=۰/۵۶ بهترین عملکرد را داشتند. با این حال، پس از اعمال این ضریب در عملکرد مدل Priestley-Taylor مشاهده نشد و در مجموع، تمامی مدل‌های اصلاح‌شده NSE و KGE پایینی داشتند که نشان‌دهنده

کارایی محدود آن‌ها در برآورد دقیق تبخیر دریاچه ارومیه است. اگرچه این موضوع نشان‌دهنده عملکرد محدود مدل‌ها در شرایط واقعی تبخیر از سطح آب شور است، اما مقایسه نتایج قبل و بعد از اصلاح نشان می‌دهد که در مدل‌های Hargreaves-Samani و FAO56-PM خطای RMSE کاهش یافته است. این موضوع نشان‌دهنده اثر مثبت ضریب اصلاحی بر عملکرد این مدل‌ها است، هرچند که دقت نهایی برخی مدل‌ها هنوز در سطح قابل اتکا قرار نمی‌گیرند. این موضوع می‌تواند به اثر نوسانات شوری بر تبخیر مرتبط باشد که با تغییرات سطح آب دریاچه ایجاد می‌شود (Sheibani et al., 2023). شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات سطح دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ است. ازآنجاکه شوری تأثیر مستقیمی بر تبخیر دارد، استفاده از یک ضریب اصلاحی ثابت ممکن است دقت کافی را برای برآورد روزانه تبخیر نداشته باشد. در دریاچه‌های فوق شور، شوری و تغییرات فصلی باعث نوسان در نسبت تبخیر شده و وابستگی به یک مقدار ثابت می‌تواند به خطاهای قابل‌توجهی منجر شود، برخلاف دریاچه‌هایی با شوری کم که تأثیرپذیری کمتری دارند (Oroud, 1994).

شکل ۵- ارتفاع از سطح دریا اندازه‌گیری‌شده دریاچه ارومیه در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ برگرفته از سایت ستاد احیا دریاچه ارومیه (https://www.ulrp.ir)

Figure 5. Measured lake surface elevation of Lake Urmia from 2000 to 2022, obtained from the Urmia Lake Restoration Program (https://www.ulrp.ir)

۴-۳- توزیع تبخیر در سطح دریاچه ارومیه

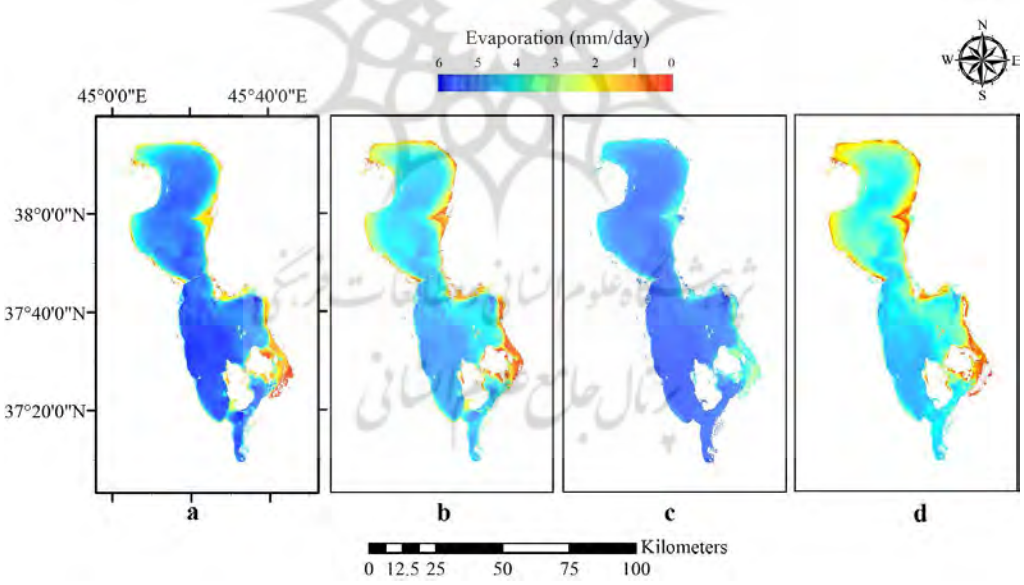
در این مطالعه، از ترکیب تصاویر لندست ۸ و ۹ برای برآورد توزیع مکانی تبخیر دریاچه ارومیه استفاده شد. برای نمونه، شکل ۶ نقشه تبخیر روزانه در ۱۳ آوریل ۲۰۲۲ را که با استفاده از مدل‌های SEBAL، METRIC، FAO56-PM و Priestley-Taylor و بر اساس تصویر لندست ۹ محاسبه شده است، نمایش می‌دهد. تشت تبخیر، تبخیر پتانسیل را اندازه‌گیری می‌کند، درحالی‌که این مدل‌ها توزیع مکانی تبخیر واقعی را در سطح دریاچه تخمین می‌زنند.

همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، تبخیر در سطح دریاچه ارومیه یکنواخت نیست و توزیع مکانی آن

تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد که در طول سال و به‌ویژه با توجه به نوسانات سطح آب، تغییر می‌کنند. به طور کلی، نرخ تبخیر در بخش‌های جنوبی دریاچه بیشتر از بخش‌های شمالی آن است که این تفاوت را می‌توان به چند عامل کلیدی نسبت داد. از عوامل مهم آن، می‌توان به عمق بیشتر قسمت‌های شمالی دریاچه نسبت به قسمت‌های جنوبی آن اشاره کرد که باعث می‌شود نرخ تبخیر در قسمت‌های کم‌عمق دریاچه بیشتر شود. علاوه بر این، دمای سطح دریاچه در قسمت‌های جنوبی دریاچه بیشتر از نواحی شمالی و عمیق‌تر دریاچه است که عامل دیگری برای افزایش نرخ تبخیر است. پارامتر دیگری که بر توزیع تبخیر اثر می گذارد، توزیع شوری در دریاچه است. شوری در قسمت شمالی دریاچه به دلیل ورودی کم‌تر آب نسبت به قسمت جنوبی آن بیشتر است (Zeinoddini et al., 2009). این افزایش شوری از طریق کاهش فعالیت آب و در نتیجه کاهش فشار بخار، به کاهش تبخیر در قسمت‌های شمال منجر می‌شود. علاوه بر این، تفاوت در آلبیدو سطحی باعث تغییر در میزان تابش خالص شده و بر نرخ تبخیر تأثیر می‌گذارد. با این حال، با توجه به نوسانات سطح آب دریاچه ارومیه در طول سال، سطح آب در قسمت‌های جنوبی بیشتر دچار کاهش می‌شود و این مناطق با محدودیت آبی بیشتری مواجه شوند. در نتیجه قسمت‌های مختلف دریاچه می‌توانند نرخ تبخیر متفاوتی نسبت به سایر قسمت‌های آن داشته باشند.

شکل ۶- نقشه توزیع تبخیر روزانه در سطح دریاچه ارومیه در ۱۳ آوریل ۲۰۲۲ محاسبه‌شده با استفاده از مدل‌های a) SEBAL، b) METRIC، c) FAO56-PM، d) Priestley-Taylor

Figure 6: Daily evaporation distribution map over Lake Urmia on April 13, 2022, estimated using the models: a) SEBAL, b) METRIC, c) FAO56-PM, and d) Priestley-Taylor



۴-۴- عدم قطعیت‌های این مطالعه

یکی از محدودیت‌های این مطالعه، نبود داده‌های هواشناسی در سطح دریاچه ارومیه است که منجر به استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی ارومیه در غرب دریاچه شد. افزایش تعداد ایستگاه‌های تبخیر تشت در سطح دریاچه می‌توانست به

صحت‌سنجی دقیق‌تر مدل‌ها کمک کند و عدم قطعیت‌های توزیع تبخیر در سطح دریاچه را کاهش دهد. تشت تبخیر به دلیل ابعاد کوچک، ظرفیت ذخیره گرمایی کمتر و تماس مستقیم دیواره‌ها با تابش خورشید، نسبت به پهنه‌های آبی وسیع نرخ تبخیر بیشتری را اندازه‌گیری می‌کند. با این حال، برای بهبود فرآیند اعتبارسنجی و در راستای کاهش عدم قطعیت، از ضرایب تصحیح تشت پیشنهاد شده توسط آلن[1] و همکاران (۱۹۹۸) برای تصحیح تشت تبخیر استفاده شده است. در مدل‌های SEBAL و METRIC، پارامتر G بر اساس مقدار پیشنهادی آلن و همکاران (۲۰۰۲) برای پهنه‌های آبی تخمین زده شد، اما برای بهبود دقت محاسبه تبخیر از سطح دریاچه ارومیه، مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. همچنین، در پیاده‌سازی مدل‌های FAO56-PM و Priestley-Taylor از رابطه‌ای برای تابش خالص روزانه در پهنه‌های آبی شیرین استفاده شد. با وجود عملکرد مناسب این روش در برآورد تبخیر در دریاچه ارومیه، تحقیقات بیشتر می‌تواند دقت آن را برای دریاچه‌های فوق شور افزایش دهد. در مطالعات پیشین، عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌های مختلف برآورد تبخیر به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان نمونه، باستیانسن[2] و همکاران (۲۰۰۵) نشان دادند که دقت مدل SEBAL به‌شدت به صحت برآورد پارامترهایی مانند آلبیدو، دمای سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی وابسته است. همچنین، آلن و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که در مدل METRIC، خطا در تعیین پیکسل‌های سرد و گرم و برآورد مقاومت آیرودینامیکی نقش مهمی در افزایش عدم قطعیت دارد. در مقابل، مدل Hargreaves-Samaniبه دلیل استفاده محدود از داده‌های دمایی، نسبت به خطاهای اندازه‌گیری دما بسیار حساس است و این امر می‌تواند باعث بیش‌برآورد یا کم‌برآورد قابل‌توجه تبخیر شود (Lindauer et al., 2023). از سوی دیگر، مدل‌هایی مانند FAO56-PM که از پارامترهای هواشناسی بیشتری استفاده می‌کنند، از دقت و پایداری بیشتری برخوردار بوده و به طور معمول، عدم قطعیت کمتری در نتایج نهایی نشان می‌دهند. گالگو-الویرا[3] و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که استفاده از داده‌های دقیق تابش و دما در مدل FAO56-PM منجر به بهبود نتایج در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

تبخیر یکی از عوامل کلیدی در مدیریت، برنامه‌ریزی و احیای دریاچه ارومیه است. در سال‌های اخیر، مدل‌های سنجش از دوری برای برآورد تبخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند، اما مطالعات محدودی به بررسی دقت مدل‌های مختلف در این زمینه پرداخته‌اند. این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی مدل‌های سنجش از دوری و تجربی در تخمین تبخیر از سطح دریاچه ارومیه، از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ استفاده کرده است. در این راستا، مدل‌های SEBAL و METRIC به عنوان روش‌های سنجش از دوری و مدل‌های FAO56-PM، Priestley-Taylor و Hargreaves-Samani مورد بررسی قرار گرفتند. برای بهبود دقت مدل‌های تجربی، ضریب اصلاحی پیشنهادی برای دریاچه ارومیه اعمال شد.

[1] Allen
[2] Bastiaanssen
[3] Gallego-Elvira

یافته‌های کلیدی این مطالعه به شرح زیر است:

۱- مدل‌های سنجش از دوری دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌های انتخاب شده داشتند، زیرا پارامترهای مؤثر بر تبخیر را از تصاویر ماهواره‌ای استخراج کرده و برآوردی نزدیک‌تر به شرایط واقعی ارائه دادند.

۲- بدون اعمال ضریب اصلاحی، مدل SEBAL با NSE و RMSE به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۸۳ میلی‌متر در روز دقیق‌ترین نتایج را ارائه کرد. پس از اعمال ضریب اصلاحی، دقت مدل‌های FAO56-PM و Hargreaves-Samani افزایش یافت و مدل اصلاح‌شده FAO56-PM با NSE و RMSE به ترتیب ۰/۱۸ و ۱/۰۴ میلی‌متر در روز بهترین عملکرد را داشت.

۳- ترکیب داده‌های لندست ۸ و ۹ در تخمین تبخیر روزانه و توزیع مکانی آن عملکرد مطلوبی نشان داد و توانست الگوهای تبخیر در سطح دریاچه را به‌خوبی نمایان کند.

نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت و احیای دریاچه ارومیه از طریق ارائه برآوردهای دقیق‌تر از تبخیر مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های سنجش از دوری و بهره‌گیری از مدل‌های برآورد تبخیر با استفاده از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و ۹ می‌تواند در تخمین تبخیر از دریاچه فوق شور ارومیه مفید واقع شود.

منابع

- قهرمان، ر.، و رحیم‌زادگان، م. (۱۴۰۱). بررسی کارایی روش‌های مختلف برآورد تبخیر با بهره‌گیری از داده های ماهواره ای در سطح آب شور (مطالعه موردی: دریاچه ارومیه). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۲)، ۱-۱۳. https://www.iwrr.ir/article_155070_a11bfacec536c63890bb1e087a864b66.pdf

- Abdelrady, A., Timmermans, J., Vekerdy, Z., & Salama, M. S. (2016). Surface energy balance of fresh and saline waters: AquaSEBS. *Remote Sensing*, 8(7), Article 583. https://doi.org/10.3390/rs8070583
- Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56) .
- Allen, R., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., & Robison, C. (2015). EEFlux: A landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. Joint ASABE/IA Irrigation Symposium 2015: Emerging Technologies for Sustainable Irrigation ,
- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., & Bastiaanssen ,W. (2002). SEBAL. Surface energy balance algorithms for land. Idaho implementation, advanced training and users manual. Version 1.0. The Idaho Department of Water Resources: Boise, ID, USA . .
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L ,.Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 395-406. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4 (۳۹۵)
- 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 (۳۸۰)

- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213(1-4), 198-212. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4
- Bastiaanssen, W. G. M., Noordman, E. J. M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson, B. P., & Allen, R. G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 85-93. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1 (۸۵)
- Chen, J., Wang, Y., Wang, J., Zhang, Y., Xu, Y., Yang, O., Zhang, R., Wang, J., Wang, Z., Lu, F & ,.Hu, Z. (2024). The Performance of Landsat-8 and Landsat-9 Data for Water Body Extraction Based on Various Water Indices: A Comparative Analysis. *Remote Sensing*, 16(11), Article 1984. https://doi.org/10.3390/rs16111984
- Craig, I. P. (2006). Comparison of precise water depth measurements on agricultural storages with open water evaporation estimates. *Agricultural Water Management*, 85(1-2), 193-200. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.04.010
- De Bruin, H. A. R., & Keijman, J. Q. (1979). The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. *Journal of Applied Meteorology*, 18(7), 898-903. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0898:TPTEMA>2.0.CO;2
- Drexler, J. Z., Snyder, R. L., Spano, D., & Paw U, K. T .(۲۰۰۴) .A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. *Hydrological Processes*, 18(11), 2071-2101. https://doi.org/10.1002/hyp.1462
- Fadel, A., Mhawej, M., Faour, G., & Slim, K. (2020). On the application of METRIC-GEE to estimate spatial and temporal evaporation rates in a mediterranean lake. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, Article 100431. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100431
- Gallego-Elvira, B., Baille, A., Martín-Gorriz, B., Maestre-Valero, J. F., & Martínez-Alvarez, V. (2012). Evaluation of evaporation estimation methods for a covered reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain). *Journal of Hydrology*, 458-459, 59-67. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.035
- Ghahreman, R., & Rahimzadegan, M. (2022). Calculating net radiation of freshwater reservoir to estimate spatial distribution of evaporation using satellite images. *Journal of Hydrology*, 605, Article 127392. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127392
- 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
- Hargreaves, G., & Samani, Z. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1. https://doi.org/10.13031/2013.26773
- Hashemi, M. (2008). *An Independent Review : The Status of Water Resources in the Lake Urmia Basin*. UNDP/GEF“ Conservation of Iranian Wetlands” Project .
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, 2016-January(70), 1-767 .
- Karimi, N., Bagheri, M. H., Hooshyaripor, F., Farokhnia, A., & Sheshangosht, S. (2016). Deriving and Evaluating Bathymetry Maps and Stage Curves for Shallow Lakes Using Remote Sensing Data. *Water Resources Management*, 30(14), 5003-5020. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1465-9

- Khaleghi, H., Rahimzadegan, M., & Ghahreman, R. (2025). Improving evaporation estimations over hypersaline water bodies using a factor based on total dissolved solids. *Journal of Hydrology*, 651, Article 132579. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132579
- Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., 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.2021.05.018
- Lindauer, J., Byers, S., Lehn, G., Evans, E., Castendyk, D., & Moravec, B. (2023). A review of methods to calculate current and future evaporation rates from pit lakes with high concentrations of total dissolved solids. Proceedings of the International Conference on Mine Closure ,
- McJannet, D. L., Webster, I. T., & Cook, F. J. (2012). An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using land-based meteorological data. *Environmental Modelling and Software*, 31, 76-83. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.017
- Mhawej, M., & Faour, G. (2020). Open-source Google Earth Engine 30-m evapotranspiration rates retrieval: The SEBALIGEE system. *Environmental Modelling and Software*, 133, Article 104845. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104845
- Oroud, I. M. (1994). Evaluation of saturation vapor pressure over hypersaline water bodies at the southern edge of the dead sea, Jordan. *Solar Energy*, 53(6), 497-503. https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90129-P
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. https://doi.org/10:۰۰۸۱>۱۰۰(۱۹۷۲)۱۵۲۰-۰۴۹۳/۱۱۷۵.OTAOSH>2.3.CO;2
- Rahimpour, M., & Rahimzadegan, M. (2021). Assessment of surface energy balance algorithm for land and operational simplified surface energy balance algorithm over freshwater and saline water bodies in Urmia Lake Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 143(3-4), 1457-1472. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03472-1
- Rosenberry, D. O., Winter, T. C., Buso, D. C., & Likens, G. E. (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), 149-166. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018
- Sene, K. J., Gash, J. H. C., & McNeil, D. D. (1991). Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. *Journal of Hydrology*, 127(1-4), 193-217. https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90115-X
- Sheibani, S., Ataie-Ashtiani, B., Safaie, A., & Mossa Hosseini, S. (2023). Coupled water and salt balance models for Lake Urmia: Salt precipitation and dissolution effects. *Journal of Great Lakes Research*, 49(3), 581-595. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.03.003
- Sima, S., Ahmadalipour, A., & Tajrishy, M. (2013). Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation. *Remote Sensing of Environment*, 136, 374-385. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.014
- 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, Article 105805. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105805
- Winter, T. C., Rosenberry, D. O., & Sturrock, A. M. (1995). Evaluation of 11 Equations for Determining Evaporation for a Small Lake in the North Central United States. *Water Resources Research*, 31(4), 983-993. https://doi.org/10.1029/94WR02537

- WWA/Yekom. (2005). The Environmental Impact Assessment and study (quality and quantity) of the Development Projects in the Lake Uromiyeh Basin, The West Azerbaijan Water Authority (WWA). In: Ministry of Energy (MoE), IR Iran.
- Zamani Losgedaragh, S., & Rahimzadegan, M. (2018). Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran). *Journal of Hydrology*, 561, 523-531. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.025
- Zeinoddini, M., Tofighi, M. A., & Vafaee, F. (2009). Evaluation of dike-type causeway impacts on the flow and salinity regimes in Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*, 35(1), 13-22. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2008.08.001