



## Analysis of spatial and temporal changes in actual evapotranspiration using the SEBAL model (Case study: Khosuyeh Dam watershed)

Esmail Soheili<sup>1\*</sup>, Zahra Mohammadi<sup>2</sup>, Yaghoub Niazi<sup>3</sup>, Farid Foroughi<sup>4</sup>

1. Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran, (Corresponding author). Email: [Es.Sohaili@gmail.com](mailto:Es.Sohaili@gmail.com)

2. M.Sc. Student of Ecohydrology, Department of Range and Watershed Management, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. Email: [zahraammohammadi1377@gmail.com](mailto:zahraammohammadi1377@gmail.com)

3. Ph.D. in Watershed Management Sciences and Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. Email: [niazi8127@gmail.com](mailto:niazi8127@gmail.com)

4. Assistant Professor, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Darab, Iran. Email: [foroughi@shirazu.ac.ir](mailto:foroughi@shirazu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

Received: October 28, 2024

Received in revised form:  
November 12, 2024

Accepted: December 01, 2024

Available online: December 21,  
2024

**Keywords:**

Real evapotranspiration,  
SEBAL model,  
remote sensing,  
water resources management,  
Khosuyeh Dam watershed.

### ABSTRACT

**Objective:** Actual evapotranspiration is one of the key components of the hydrological cycle that plays a significant role in water resources management and water balance determination. The SEBAL model, using thermal and visible satellite data, allows for direct and indirect estimation of evapotranspiration, and its results are highly accurate, especially in large and remote areas.

**Method:** To analyze the temporal changes of actual evapotranspiration in the Khosuyeh Dam watershed, the SEBAL model and Landsat 7 and 8 satellite images were used.

**Results:** The results of comparing the actual evapotranspiration obtained from the SEBAL model with the potential evapotranspiration calculated from the Penman-Monteith model in 2001 and 2021 showed a positive and significant relationship between these two variables. The Pearson correlation coefficient ( $r$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ), and Wilmot index ( $d$ ) in 2021 were 0.93, 0.86, and 0.92, respectively, indicating a very strong correlation between actual and potential evapotranspiration. In contrast, in 2001, these values were 0.81, 0.65, and 0.61, respectively, indicating that the accuracy of the SEBAL model in 2021 has improved significantly compared to 2001.

**Conclusions:** The results indicate the appropriate ability of this algorithm in estimating evapotranspiration and also show that the amount of this parameter has an increasing trend and this value is about 16.5% on average. The results obtained can be used as a basis for management decisions in the field of optimizing the use of water resources and dealing with the challenges caused by climate change in arid and semi-arid regions of the country.

**Cite this article:** Soheili, E., Mohammadi, Z., Niazi, Y., Foroughi, F. (2024). Analysis of spatial and temporal changes in actual evapotranspiration using the SEBAL model (Case study: Khosuyeh Dam watershed). *Journal of Ecohydrology*, 11 (4), 527-542. <https://doi.org/10.22059/ije.2025.387267.1858>



© Esmail Soheili, Zahra Mohammadi, Yaghoub Niazi, Farid Foroughi.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2025.387267.1858>

## **Introduction**

Actual evapotranspiration is one of the key components of the hydrological cycle that plays a significant role in water resources management and water balance determination. This parameter is affected by climate changes such as increasing temperature, changes in precipitation patterns, decreasing relative humidity, and also changes in land use. Remote sensing models and satellite data analysis tools such as the SEBAL model have become one of the most important tools in actual evapotranspiration studies due to their ability to provide accurate and extensive information at different spatial and temporal scales. The SEBAL model, using thermal and visible satellite data, allows for direct and indirect estimation of evapotranspiration, and its results are highly accurate and applicable, especially in large and remote areas. In this study, the spatial and temporal changes in actual evapotranspiration in the Khosuyeh Dam watershed during the period 2001 to 2021 were investigated using the SEBAL model and remote sensing data. For this purpose, Landsat 7 and 8 satellite images, which have a high ability to estimate evapotranspiration, were used.

## **Methods**

The study area in this study is the Khosuyeh Dam watershed in Darab County, which is located in the southeast of Fars Province and is considered one of the important hubs of agriculture and agricultural and horticultural production in the province. In this study, land use changes in this area were investigated in two time periods (2001 and 2021). To analyze the spatial and temporal changes in actual evapotranspiration in the Khosuyeh Dam watershed during the period 2001 to 2021, the SEBAL model and Landsat 7 and 8 satellite images have been used. Information on precipitation and temperature in the study area was collected from meteorological stations. These data were used to analyze climatic conditions and their changes over time.

## **Results**

The SEBAL model, as a surface computational model using satellite data, has been able to predict actual evapotranspiration with considerable accuracy. The results of comparing actual evapotranspiration from the SEBAL model with potential evapotranspiration calculated from the Penman-Monteith model in 2001 and 2021 indicate a positive and significant relationship between these two variables. In 2021, the Pearson correlation coefficient ( $r$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ), and Willmott's index of agreement ( $d$ ) were 0.93, 0.86, and 0.92, respectively, indicating a very strong correlation between actual and potential evapotranspiration. In contrast, these values for 2001 were 0.81, 0.65, and 0.61, respectively, demonstrating a significant improvement in the accuracy of the SEBAL model in 2021 compared to 2001. The study of the time trend of evapotranspiration changes also indicates an average increase of 16.5% in this parameter during the study period, such that the estimated evapotranspiration rate has increased from 866 to 1008 mm per year. The results show that the highest evapotranspiration rate is related to the spring and summer seasons and the months of May and June. However, the highest change in actual evapotranspiration in two time periods, related to September and October, is an increase of 41.5 and 30.5%, respectively. This increase, in addition to land use change and increase in agricultural land area and the need to irrigate crops in these months, could be due to the impact of climatic factors such as increased temperature, decreased relative humidity, and increased solar radiation, which have been mentioned in other studies, on actual evapotranspiration in this region.

## **Conclusion**

In this study, spatial and temporal changes in actual evapotranspiration in the Khosuyeh Dam watershed were investigated using the SEBAL model and Landsat satellite data. The results indicate that this algorithm has a suitable ability to estimate evapotranspiration. On the other hand, the study of the temporal trend of evapotranspiration changes also shows that the amount of this parameter has an increasing trend and this value is about 16.5% on average. The study of land use change shows that the

area of agricultural land (irrigated agriculture) has increased, which, along with the impact of climatic factors such as increasing temperature, decreasing relative humidity, and increasing solar radiation, which has been acknowledged in other studies, could be the reason for the increase in actual evapotranspiration in this region. The results obtained can be used as a basis for management decisions in the field of optimizing the use of water resources and dealing with the challenges caused by climate change in arid and semi-arid regions of the country.

#### **Authors Contributions**

Esmail Soheili: Guidance in selecting the topic, selecting the study area, collecting the required information, conducting and writing the research, editing and reviewing the article, controlling the results

Yaqub Niazi: Guidance in conceptualization, using remote sensing, performing software/statistical analyses, editing and reviewing the article

Farid Foroughi: Guidance in reviewing and editing the article

Zahra Mohammadi: Conducting the research, analyzing the data, writing and making corrections and applying comments to the abstracted article.

#### **Data Availability Statement**

The data and results used in this study will be made available through correspondence with the corresponding author.

#### **Acknowledgments**

To my esteemed professors who guided me in writing and completing this article.

#### **Ethical considerations**

The authors avoided from data fabrication and falsification.

#### **Funding**

No fund.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

## تحلیل تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBAL (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد خسویه)

اسماعیل سهیلی،<sup>۱\*</sup> زهرا محمدی،<sup>۲</sup> یعقوب نیازی،<sup>۳</sup> فرید فروغی<sup>۴</sup>

۱. استادیار بخش مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: [Es.Sohaili@gmail.com](mailto:Es.Sohaili@gmail.com)  
 ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد اکوهیدرولوژی، بخش مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: [zahraamohammadii1377@gmail.com](mailto:zahraamohammadii1377@gmail.com)  
 ۳. دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: [niazi8127@gmail.com](mailto:niazi8127@gmail.com)  
 ۴. استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، داراب، ایران. رایانامه: [foroughi@shirazu.ac.ir](mailto:foroughi@shirazu.ac.ir)

### اطلاعات مقاله

### چکیده

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**موضوع:** تبخیر و تعرق واقعی یکی از اجزای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی است که نقش بسزایی در مدیریت منابع آب و تعیین بیلان آبی ایفا می‌کند. مدل SEBAL با بهره‌گیری از داده‌های حرارتی و مرئی ماهواره‌ای، امکان تخمین مستقیم و غیرمستقیم تبخیر و تعرق را فراهم می‌کند و نتایج آن به‌ویژه در مناطق وسیع و دور از دسترس، از دقت بالایی برخوردار است.

**هدف:** در این پژوهش به منظور برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز خسویه از مدل SEBAL برای بررسی روند زمانی تغییرات تبخیر و تعرق استفاده شد.

**روش تحقیق:** برای تحلیل تغییرات زمانی تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز سد خسویه، از مدل SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ استفاده شده است.

**یافته‌ها:** نتایج مقایسه تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SEBAL با تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه‌شده از مدل Penman-Monteith در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ نشان‌دهنده رابطه‌ای مثبت و معنادار میان این دو متغیر بوده است. ضریب همبستگی پیرسون (r)، ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) و شاخص ویلموت (d) در سال ۲۰۲۱ به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۶ و ۰/۹۲ بوده است که نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی میان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل است. در مقابل، در سال ۲۰۰۱ این مقدار به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۶۵ و ۰/۶۱ بوده که نشان می‌دهد دقت مدل SEBAL در سال ۲۰۲۱ نسبت به سال ۲۰۰۱ به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است.

**نتیجه‌گیری:** نتایج حاکی از توانایی مناسب این الگوریتم در برآورد تبخیر تعرق دارد و نیز نشان می‌دهد میزان این پارامتر روند افزایشی داشته و این مقدار به‌طور متوسط حدود ۱۶/۵ درصد است. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه بهینه‌سازی استفاده از منابع آب و مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:**  
تبخیر و تعرق واقعی،  
مدل SEBAL،  
سنجش از دور،  
مدیریت منابع آب،  
حوزه آبخیز سد  
خسویه.

**استناد:** سهیلی، اسماعیل، محمدی، زهرا، نیازی، یعقوب، فروغی، فرید. تحلیل تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBAL (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد خسویه). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱(۴)، ۵۲۷-۵۴۲.

<https://doi.org/10.22059/ije.2025.387267.1858>



© اسماعیل سهیلی، زهرا محمدی، یعقوب نیازی، فرید فروغی.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

## مقدمه

تبخیر و تعرق واقعی به‌عنوان یکی از فرایندهای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی، نقشی اساسی در تعادل آب و انرژی در سطح زمین ایفا می‌کند. این فرایند به‌طور مستقیم تحت تأثیر شرایط اقلیمی و الگوهای کاربری اراضی قرار دارد و تغییر در هریک از این عوامل می‌تواند اثرات قابل توجهی بر مدیریت منابع آب و پایداری زیست‌محیطی داشته باشد (فیشر<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷؛ دیمیتراپولوس و نیکولاکاپولوس، ۲۰۲۱). از آنجاکه مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران با محدودیت‌های شدید منابع آبی مواجه‌اند، مطالعه دقیق و جامع تبخیر و تعرق واقعی در این مناطق برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (جعفری و همکاران، ۱۳۹۰؛ نوری، همایی و بنایی، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی نظیر افزایش دما، کاهش بارش و تغییر در توزیع زمانی و مکانی آن، همراه با تغییرات کاربری اراضی ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند گسترش شهرنشینی و کشاورزی، الگوهای تبخیر و تعرق را به‌طور چشمگیری تغییر داده است. این تغییرات، به‌ویژه در مناطق حساس مانند حوزه‌های آبخیز سدها، منجر به افزایش فشار بر منابع آب شیرین و کاهش ظرفیت تأمین آب پایدار شده‌اند (پناهی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کیو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۹؛ مارتینز رتیرتا، ۲۰۲۲). مدل‌های سنجش از دور و ابزارهای تحلیل داده‌های ماهواره‌ای نظیر مدل SEBAL<sup>۳</sup> به‌دلیل توانایی در ارائه اطلاعات دقیق و گسترده در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف، به یکی از مهم‌ترین ابزارها در مطالعات تبخیر و تعرق واقعی تبدیل شده‌اند. مدل SEBAL با بهره‌گیری از داده‌های حرارتی و مرئی ماهواره‌ای، امکان تخمین مستقیم و غیرمستقیم تبخیر و تعرق را فراهم می‌کند و نتایج آن به‌ویژه در مناطق وسیع و دور از دسترس، از دقت و کاربردپذیری بالایی برخوردار است (آلن<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۰۱؛ سیلوا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). در این زمینه سوزا<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۲۳) برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی روزانه در شرق آمازون، از الگوریتم تعادل انرژی سطحی برای زمین (SEBAL) استفاده کردند که نتایج الگوریتم برای مدیریت آبیاری و کاهش هزینه‌ها و تلفات آب مثمر ثمر بوده است. همچنین وی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۲۲) برای برآورد تغییرات مکانی-زمانی در تبخیر و تعرق برنج در مناطق آب‌وهوایی نیمه‌گرمسیری دشت گانفو، جنوب چین از الگوریتم SEBAL استفاده کردند؛ نتایج حاکی از این بود که برای تخمین ET در مزارع شالیزاری در مناطق نیمه‌گرمسیری این مدل مناسب بوده و مبنا و مرجعی برای تخصیص منطقی منابع آب در مقیاس منطقه‌ای ارائه می‌کند. حوزه آبخیز سد خسویه در جنوب استان فارس، در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده است و شامل دشت داراب و جنت شهر است که به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی و تولیدات زراعی و باغی در استان قلمداد می‌شود. این منطقه مانند سایر دشت‌های کشور با چالش‌های متعدد ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی مواجه است. این حوضه در دهه‌های اخیر، تغییرات گسترده‌ای را در کاربری اراضی تجربه کرده که از گسترش مناطق شهری و اراضی کشاورزی تا کاهش مناطق طبیعی را شامل می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز سد خسویه طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱، از مدل SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ بهره برده است. این مطالعه تلاش دارد تا با تحلیل الگوهای فضایی و زمانی و شناسایی عوامل مؤثر بر تبخیر و تعرق، اطلاعاتی کاربردی و علمی برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب این حوزه ارائه دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های پایدار برای مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی و مدیریت بهتر منابع آب در مناطق مشابه نیز باشد.

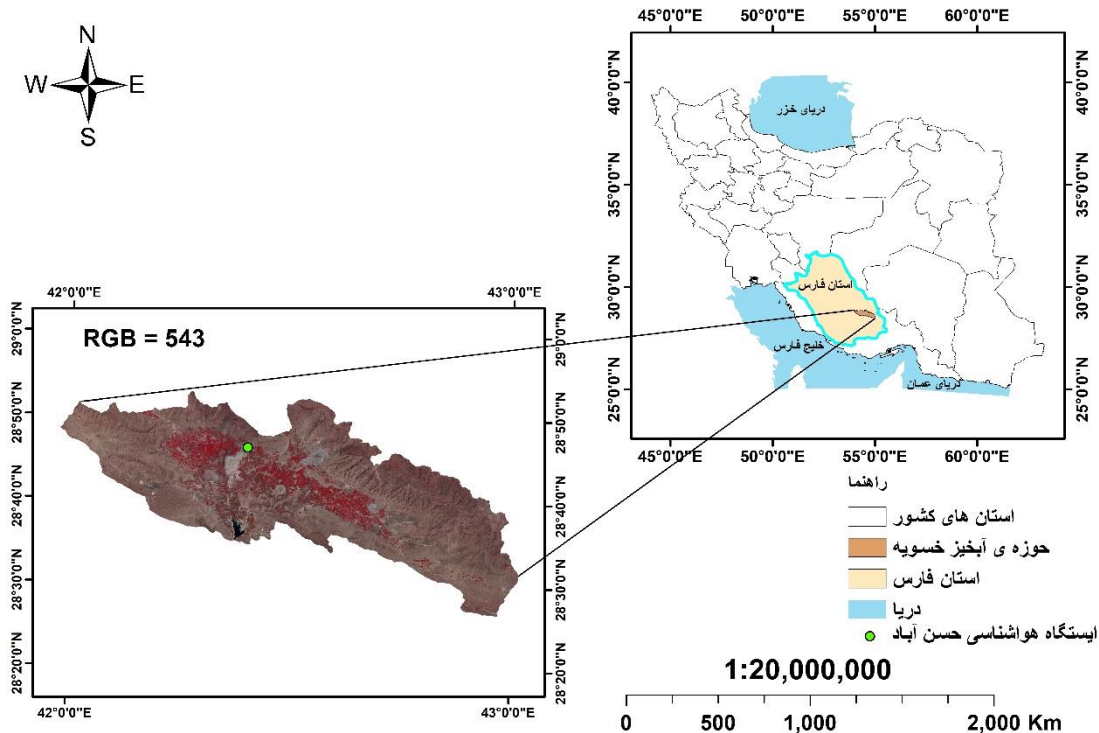
## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، حوزه آبخیز سد خسویه در شهرستان داراب است که در جنوب شرقی استان فارس واقع شده

1. Fisher
2. Dimitriadou & Nikolakopoulos
3. Qiu
4. Martínez-Retureta
5. Surface Energy Balance Algorithm for Land
6. Allen
7. Silva
8. Souza
9. Wei

است (شکل ۱). این منطقه جزو مناطق نیمه‌خشک کشور به شمار می‌رود و در راستای اهداف این تحقیق، تغییرات کاربری اراضی در این حوزه در دو بازه زمانی (۲۰۰۱ و ۲۰۲۱) بررسی شده است. موقعیت جغرافیایی این منطقه بین طول جغرافیایی  $53^{\circ} 58' 32''$  تا  $55^{\circ} 01' 06''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $28^{\circ} 25' 33''$  تا  $28^{\circ} 54' 08''$  شمالی قرار دارد و تقریباً ۲۵۰ کیلومتر از مرکز استان، شیراز فاصله دارد. مساحت کل حوزه حدود ۲۲۴۵ کیلومتر مربع و ارتفاع آن از سطح دریا تقریباً ۱۴۳۹ متر است. این منطقه دارای شرایط اقلیمی نیمه‌خشک با میانگین دمای سالانه ۲۲/۵ درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارش سالانه در این ناحیه حدود ۲۵۰ میلی‌متر و متوسط تبخیر و تعرق بالقوه سالانه به میزان ۱۸۲۱ میلی‌متر است (بهرامی، دشتبانی و بهرامی، ۱۴۰۲؛ حسنی و شمس‌نیا، ۱۴۰۲).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

### داده‌های مورد استفاده در پژوهش

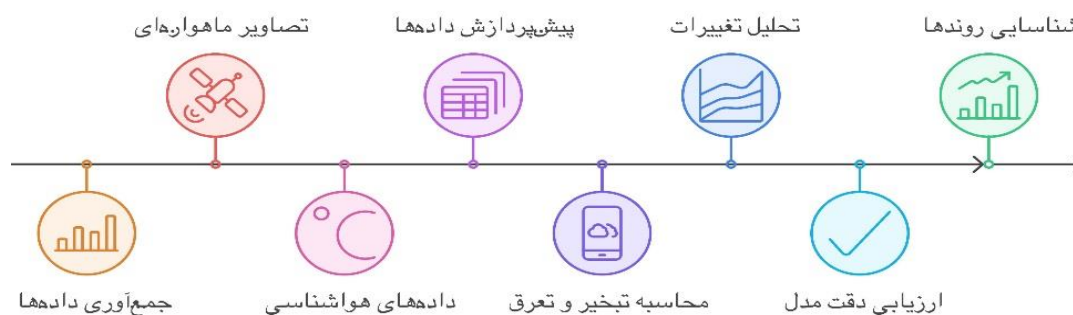
**تصاویر ماهواره‌ای:** برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SEBAL در حوزه آبخیز سد خسویه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱، داده‌های سنجنده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ و لندست ۸ به کار گرفته شدند. این داده‌ها به دلیل توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب و قابلیت استخراج اطلاعات دقیق در مورد خصوصیات سطح زمین انتخاب شده‌اند. مشخصات ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ در جدول ۱ ارائه شده است. در سال ۲۰۰۱، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ مربوط به تاریخ‌های ۲۷ آوریل، ۲۱ مه، ۶ ژوئن، ۸ ژوئیه، ۹ اوت، ۱۷ اوت، و ۱۲ اکتبر استفاده شده‌اند (فرودین تا مهر) و برای سال ۲۰۲۱، تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به تاریخ‌های ۹ مارس، ۲۵ مارس، ۱۰ آوریل، ۱۲ مه، ۲۸ مه، ۱۳ ژوئن، ۲۹ ژوئن، ۱۶ اوت، ۱ سپتامبر، ۱۷ سپتامبر، ۳ اکتبر، و ۱۹ اکتبر انتخاب شده‌اند. این تصاویر دارای شرایط هواشناسی مناسب و بدون ابر بوده‌اند.

برای تکمیل تحلیل‌ها و اجرای مدل SEBAL، داده‌های هواشناسی روزانه شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، و تابش خورشیدی از ایستگاه‌های هواشناسی همدید (سینوپتیک) واقع در حوضه که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ بر روی مدل رقومی ارتفاع منطقه نمایش داده شده، جمع‌آوری گردید. این داده‌ها برای اعتبارسنجی و تنظیم مدل استفاده شده‌اند.

این مجموعه داده‌ها با دقت و جامعیت بالا انتخاب شده‌اند تا امکان تحلیل جامع تبخیر و تعرق واقعی در دوره مورد مطالعه فراهم شود. شکل ۲ نمودار جریان‌ی کل تحقیق را ارائه می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات فنی ماهواره‌های لندست ۷ و ۸

ویژگی	لندست ۸	لندست ۷
تاریخ پرتاب	۱۱ فوریه ۲۰۱۳	۱۵ آوریل ۱۹۹۹
سنجده اصلی	OLI (تصویربرداری عملیاتی زمین) و TIRS (سنجده مادون قرمز حرارتی)	ETM <sup>+</sup> (نقشه‌برداری موضوعی پیشرفته)
تعداد باندها	۱۱ باند (شامل ۹ باند OLI و ۲ باند TIRS)	۸ باند (شامل پانکروماتیک و حرارتی)
رزولوشن مکانی	۱۵ متر (پانکروماتیک) ۳۰ متر (مرئی و مادون قرمز) ۱۰۰ متر (حرارتی)	۱۵ متر (پانکروماتیک) ۳۰ متر (مرئی و مادون قرمز) ۶۰ متر (حرارتی)
رزولوشن رادیومتریکی	۱۲ بیتی (۴۰۹۶ سطح خاکستری)	۸ بیتی (۲۵۶ سطح خاکستری)
کاربردهای کلیدی	پایش تغییرات آب‌وهوایی، کیفیت آب، تشخیص ابرهای سیروس	مطالعات شهری، کشاورزی، آتش‌سوزی، جزایر حرارتی



شکل ۲. نمودار جریان‌ی تحقیق

### پیش‌پردازش داده‌ها

برای تحلیل تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز سد خسویه با استفاده از مدل SEBAL، پیش‌پردازش دقیق داده‌ها گامی ضروری برای تضمین صحت و دقت نتایج است. مراحل پیش‌پردازش داده‌ها شامل موارد زیر است:

**تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری:** تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و لندست ۸ برای حذف اثرات ناشی از پراکندگی جوئی و بازتابش‌های ناخواسته در جو، تحت تصحیحات رادیومتریکی و اتمسفری قرار گرفتند. این عملیات با استفاده از نرم‌افزار ENVI و ابزار LEDAPS انجام شد تا داده‌های بازتاب سطحی به دست آید. این فرایند ضروری است تا اطلاعات به‌دست‌آمده از تصاویر قابل استفاده در مدل SEBAL باشد.

**برش منطقه مطالعه:** تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از مرزهای حوزه آبخیز سد خسویه، استخراج‌شده از داده‌های GIS، به منطقه مطالعه محدود شدند. این برش با نرم‌افزار ArcGIS انجام شد تا از تحلیل اطلاعات غیرمرتبط با منطقه مورد مطالعه جلوگیری شود.

**تصحیح هندسی:** تمامی تصاویر به‌صورت دقیق و براساس سیستم مختصات جهانی (WGS84) و سیستم تصویر تصحیح هندسی شدند. این مرحله با استفاده از نقاط کنترل زمینی (GCP) و روش‌های تطابق تصویر انجام شد تا انطباق دقیق تصاویر فراهم شود.

**تولید شاخص‌های طیفی:** برای استخراج اطلاعات مرتبط با پوشش گیاهی، از شاخص‌های طیفی نظیر شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی<sup>۱</sup> استفاده شد. این شاخص‌ها با بهره‌گیری از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک تصاویر محاسبه شده و به‌عنوان ورودی مدل SEBAL به کار گرفته شدند.

**استخراج داده‌های هواشناسی:** داده‌های هواشناسی شامل دما، سرعت باد، تابش خورشیدی، و رطوبت نسبی برای تاریخ‌های انتخاب شده، از نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به منطقه مطالعه که دارای آمار مناسب است، استخراج و به‌صورت میانگین روزانه وارد مدل شدند. این داده‌ها پس از پاک‌سازی خطاها و همگن‌سازی زمانی آماده استفاده در مدل گردیدند.

**یکپارچه‌سازی و همگام‌سازی داده‌ها:** داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی براساس تاریخ‌های یکسان همگام‌سازی شدند تا تطابق زمانی و مکانی برای تحلیل دقیق مدل فراهم شود.

**محاسبه پارامترهای توپوگرافی:** با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه، پارامترهای شیب، جهت شیب و ارتفاع محاسبه و به‌عنوان متغیرهای مکانی در تحلیل داده‌ها در نظر گرفته شدند.

این مراحل، به‌عنوان پیش‌نیازهای اساسی برای اجرای مدل SEBAL، زمینه‌ساز ارائه نتایج دقیق و معتبر از تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه است.

### شاخص‌های سنجش از دور

در پژوهش حاضر به منظور برآورد تبخیر و تعرق براساس الگوریتم سبال از شاخص‌های NDVI و LST<sup>۲</sup> استفاده شده است. شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، ترکیبی از فرمولاسیون اختلاف نرمال آن و استفاده از بالاترین مناطق جذب و بازتاب کلروفیل، آن را در طیف گسترده‌ای از شرایط مقاوم می‌کند و یک شاخص استاندارد برای پوشش گیاهی است که با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز براساس رابطه<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود. بازه این شاخص بین -۱ تا +۱ است:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، NIR باند مادون قرمز نزدیک و Red باند قرمز است.

دمای سطح زمین (LST)، براساس روابط (۲) و (۳) محاسبه شده است.

$$LST = \frac{BT}{1 + [L_\lambda \times \frac{BT}{\rho}] \times \ln \varepsilon_0} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$BT = \frac{K_2}{\ln \left[ \frac{K_1 + 1}{L_\lambda} \right]} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن، BT دمای روشنایی بالای اتمسفر  $(K)$ ،  $L_\lambda$ ، تابش طیفی،  $\varepsilon_0$ ، گسیلندگی سطح زمین،  $K_1$  و  $K_2$  ضرایب ثابت کالیبراسیون هستند. مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  برای ماهواره لندست به ترتیب برابر با  $1321/08 (K)$  و  $774/89 (\mu m^{-1})$  هستند. مقدار پارامتر مربوط به تابش جسم سیاه ( $\rho$ ) نیز با استفاده از ثابت پلانک ( $h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$ )، سرعت نور ( $c = 3.0 \times 10^8 m/s$ ) و ثابت بولتزمن ( $kB = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ ) براساس رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\rho = \frac{h \times c}{\sigma} = 1.43878 \times 10^{-2} \text{ km} \quad \text{رابطه (۴)}$$

### جدول ۲. گسیلندگی سطح زمین

شاخص تفاضلی نرمال شده گیاهی (NDVI)	گسیلندگی سطح زمین
$NDVI < -0/185$	۰/۹۹۵
$-0/185 \leq NDVI < 0/157$	۰/۹۷۰

1. NDVI (Normalized Difference Vegetation)

2. Land Surface Temperature



$-0.1185 \leq NDVI \leq 0.1661$	$0.47 + 1/0.094 * Ln(NDVI)$
$NDVI > 0.1661$	0.990

### الگوریتم بیان انرژی سطح (SEBAL)

روش سبال (الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین) مدلی مبتنی بر پردازش تصویر بوده که مشتمل بر ۲۵ زیر مدل برای محاسبه تبخیر و تعرق به عنوان باقی مانده بیان انرژی سطحی زمین است (باستیانسن<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۸). این مدل توسط باستیانسن در کشور هلند معرفی و همچنین برای حوضه آبریز رودخانه سنک در آیداهو نیز با تکیه بر مقادیر تبخیر و تعرق اندازه گیری شده در سطح زمین مورد بسط و توسعه واقع شده است (چودهاری، ۱۹۹۷)<sup>۲</sup>. روش سبال شامل الگوریتمی مناسب است که معادله بیان انرژی را حل می کند (جدول ۳). به منظور اطمینان از صحت داده های ورودی، تمامی تصاویر ماهواره ای تحت فرایندهای پیش پردازش شامل تصحیح هندسی، رادیومتریکی، و اتمسفری قرار گرفتند. این فرایندها با استفاده از Google Earth Engine و ENVI اجرا شدند که دقت مدل را بهبود بخشید.

### جدول ۳. محاسبات تبخیر و تعرق واقعی با مدل سبال (چنگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۷؛ آوادا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۱)

$\lambda ET$ : شار گرمای نهان $R_n$ : شار تابش خالص سطح $G$ : شار گرمای خاک $H$ : شار گرمای محسوس	$\lambda ET = R_n - G - H$	برآورد تبخیر و تعرق
$\alpha$ : بازتابش ذرات سطح (آلبیدو سطح) $R_{S\downarrow}$ : طول موج کوتاه ورودی $R_{L\downarrow}$ : طول موج بلند ورودی $R_{L\uparrow}$ : طول موج بلند خروجی $\epsilon_0$ : گسیلندگی سطح	$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0)R_{L\uparrow}$	اجزای تعادل تابش سطح
$LST$ : دمای سطح زمین (K) $NDVI$ : شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده	$G = R_n \left[ \frac{LST - 273.15}{\alpha - 0.98NDVI^4} \right] (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2) (1 - \epsilon_0)$	شار گرمای خاک
$\rho$ : چگالی هوا $C_p$ : گرمای ویژه هوا $dT$ : اختلاف دما بین دو ارتفاع $T_{ah}$ : مقاومت آیرودینامیک برای انتقال گرما	$H = \frac{\rho \times C_p \times dT}{r_{ah}}$	شار گرمای محسوس
$ET_{day}$ : تبخیر و تعرق روزانه $ET_{TrF}$ : کسر تبخیر و تعرق مرجع $ET_{r-day}$ : تبخیر و تعرق مرجع روزانه $ET_{inst}$ : تبخیر و تعرق لحظه ای $ET_{r-hr}$ : تبخیر و تعرق مرجع لحظه ای $\lambda$ : مقدار گرمای نهان تبخیر	$ET_{day} = ET_{TrF} \times ET_{r-day}$ $ET_{TrF} = \frac{ET_{inst}}{ET_{r-hr}}$ $ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda}$ $\lambda = (2.501 - 0.002361(LST - 273.15)) \times 10^6$	تبخیر و تعرق روزانه

### تبخیر و تعرق پتانسیل

در این مطالعه برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل ( $ET$ )، از مدل اصلاح شده Penman-Monteith که در محصول MOD16A2 استفاده می شود، بهره گرفته شد. این مدل برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل از چندین ورودی اصلی استفاده

1. Bastiaanssen
2. Choudhury
3. Chang
4. Awada

می‌کند که عبارت‌اند از: تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و شاخص‌های گیاهی. مدل Penman-Monteith یکی از رایج‌ترین مدل‌ها برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل است که به‌طور کلی از رابطه (۵) برای تخمین این پارامتر استفاده می‌کند (سوزا و همکاران، ۲۰۲۳):

$$ET_r = \frac{\Delta(Rn-G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + \frac{r_a}{r_s})} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن،  $ET_r$  تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در روز)،  $R_n$  تابش خالص (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $G$  تبادل حرارتی خاک (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $e_s$  فشار بخار اشباع،  $e_a$  فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)،  $r_a$  و  $r_s$  به‌ترتیب مقاومت‌های هوا و سطحی (ثانیه بر متر)،  $\rho_a$  چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $c_p$  ظرفیت حرارتی خاص هوا (مگاژول بر کیلوگرم در درجه کلوین) است. برای محاسبه تابش خورشیدی، از داده‌های ماهواره‌ای استفاده می‌شود که تابش وارده به سطح زمین و پوشش گیاهی را اندازه‌گیری می‌کند. دمای هوا به‌عنوان یکی از ورودی‌ها برای تعیین میزان انرژی موجود برای تبخیر از سطح زمین و گیاهان به کار می‌رود. این داده‌ها معمولاً از اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای یا ایستگاه‌های زمینی جمع‌آوری می‌شوند. رطوبت نسبی که نشان‌دهنده میزان بخار آب موجود در جو است، بر میزان تبخیر تأثیر زیادی دارد و داده‌های آن نیز از سنجش‌های ماهواره‌ای به دست می‌آید. سرعت باد نیز یکی از ورودی‌های حیاتی است که بر میزان انتقال بخار آب از سطح به جو تأثیر دارد و از داده‌های ایستگاهی یا ماهواره‌ای به دست می‌آید. همچنین، شاخص‌های گیاهی مانند شاخص سطح برگ (LAI) و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) وضعیت پوشش گیاهی و توانایی آن در تبخیر آب را نشان می‌دهند که این شاخص‌ها معمولاً از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شوند. مدل MOD16A2 با استفاده از این ورودی‌ها به‌طور دقیق‌تری تبخیر و تعرق پتانسیل را مدل‌سازی می‌کند و به‌ویژه در مناطق وسیع و با دسترسی محدود به داده‌های زمینی از دقت بالایی برخوردار است (وی و همکاران، ۲۰۲۲).

## ارزیابی دقت

مقایسه تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SEBAL با تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه‌شده از مدل Penman-Monteith براساس شاخص‌های آماری زیر صورت گرفته است:

### ضریب همبستگی پیرسون (Pearson Correlation Coefficient- r)

ضریب همبستگی پیرسون نشان‌دهنده رابطه خطی بین دو متغیر است. این ضریب بین -۱ تا ۱ قرار دارد:

۱  $r = 1$  همبستگی مثبت کامل

-۱  $r = -1$  همبستگی منفی کامل

۰  $r = 0$  عدم همبستگی خطی

فرمول محاسبه:

$$r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$X_i$  و  $Y_i$  داده‌های متغیرهای  $X$  و  $Y$  هستند و  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  مقادیر میانگین این متغیرها هستند.

### ضریب تعیین (Coefficient of Determination- R<sup>2</sup>)

ضریب تعیین میزان تطابق مدل با داده‌ها را نشان می‌دهد.

مقدار  $R^2$  بین ۰ تا ۱ است:

۱  $R^2 = 1$  مدل کامل داده‌ها را توضیح می‌دهد.

۰  $R^2 = 0$  مدل هیچ اطلاعاتی در مورد داده‌ها ارائه نمی‌دهد.

فرمول محاسبه:

$$R^2 = r^2$$

رابطه ۷)

۲: ضریب همبستگی پیرسون

### شاخص ویلموت (Willmott's Index of Agreement-d)

شاخص ویلموت برای ارزیابی کیفیت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده می‌شود و میزان توافق بین داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده را اندازه‌گیری می‌کند.

این شاخص بین ۰ و ۱ قرار دارد:

۱  $d = 1$  پیش‌بینی کاملاً با داده‌های واقعی تطابق دارد.

۰  $d = 0$  هیچ تطابقی وجود ندارد.

فرمول محاسبه:

$$d = 1 - \frac{\sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum(|Y_i - \bar{Y}| + |\hat{Y}_i - \bar{Y}|)^2} \quad \text{رابطه ۸)}$$

$\hat{Y}_i$  مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و  $n$  تعداد مشاهدات است.

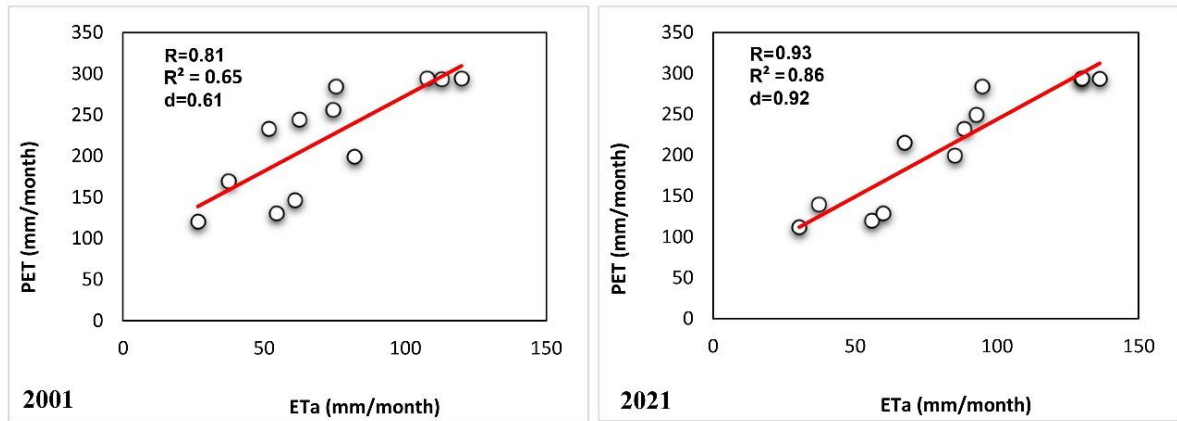
این شاخص نشان‌دهنده میزان انطباق مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهده‌ای است.

### نتایج و بحث

تبخیر و تعرق واقعی (ETA) یکی از اجزای حیاتی در چرخه هیدرولوژیکی است که نقش اساسی را در تعیین بیلان آبی و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. این پارامتر تحت تأثیر متغیرهای مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی (افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، کاهش رطوبت نسبی) و تغییرات کاربری اراضی قرار دارد. در این مطالعه، تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی در حوزه آبخیز سد خسویه طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از مدل SEBAL و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های لندست ۷ و ۸ مورد تحلیل قرار گرفت.

### ارزیابی مدل SEBAL

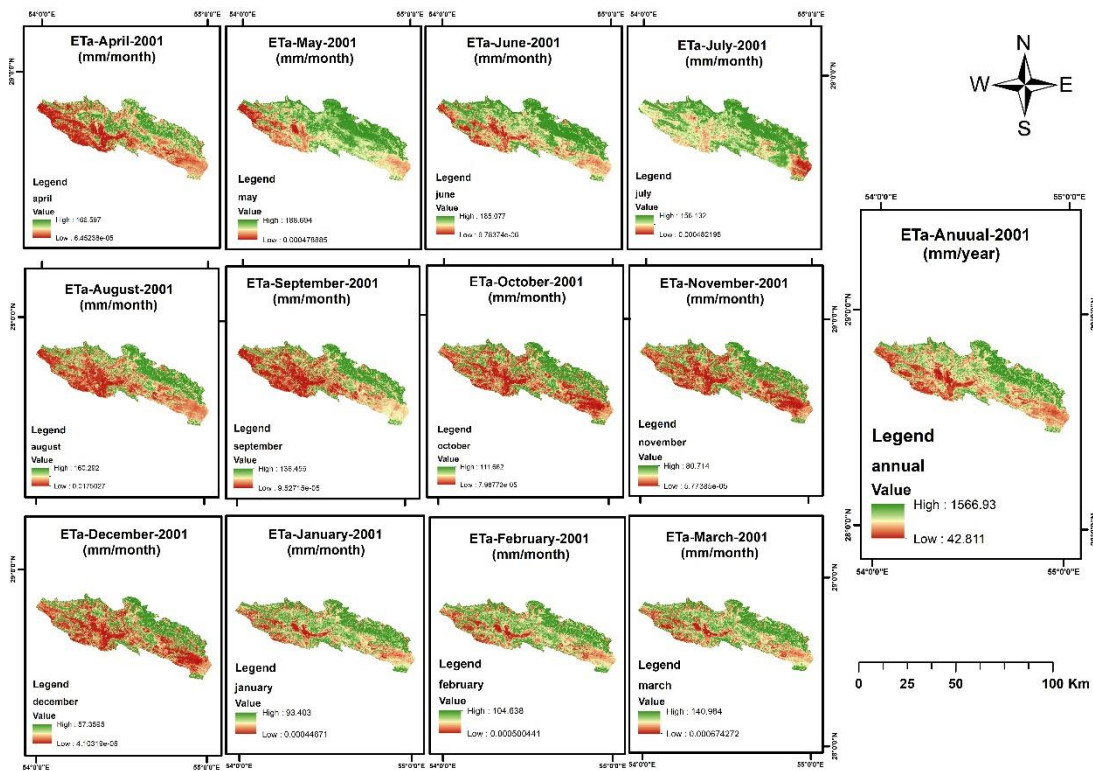
مدل SEBAL به‌عنوان یک مدل محاسباتی سطحی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، توانسته است تبخیر و تعرق واقعی را با دقت قابل توجهی پیش‌بینی کند. نتایج مقایسه تبخیر و تعرق واقعی حاصل از مدل SEBAL با تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه‌شده از مدل Penman-Monteith در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ نشان‌دهنده رابطه‌ای مثبت و معنادار میان این دو متغیر بوده است (شکل ۳). ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و شاخص ویلموت ( $d$ ) در سال ۲۰۲۱ به ترتیب برابر با ۰/۹۳، ۰/۸۶ و ۰/۹۲ بوده که نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی میان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل است. در مقابل، در سال ۲۰۰۱ این مقدار به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۶۵ و ۰/۶۱ بوده که نشان می‌دهد دقت مدل SEBAL در سال ۲۰۲۱ نسبت به سال ۲۰۰۱ به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است. این بهبود در دقت مدل SEBAL می‌تواند به عواملی چون بهبود کالیبراسیون مدل، کیفیت بالاتر داده‌های ماهواره‌ای و شرایط اقلیمی پایدارتر در سال ۲۰۲۱ نسبت داده شود.



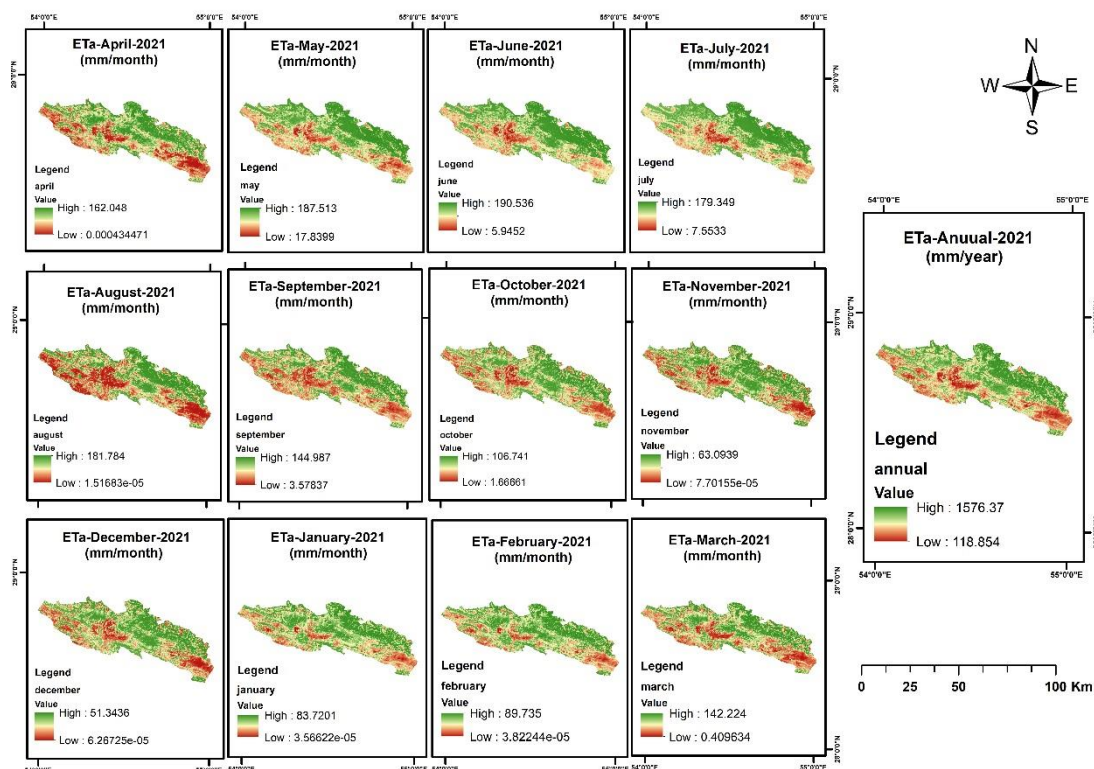
شکل ۳. مقایسه تبخیر و تعرق واقعی ماهانه حاصل از مدل SEBAL با تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده از مدل اصلاح شده Penman-Monteith در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱

**تحلیل تغییرات مکانی و زمانی**

نقشه تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل سبال در مقیاس ماهانه و سالانه برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱ تهیه شده است (شکل ۴ و ۵).



شکل ۴. نقشه تبخیر و تعرق واقعی با مدل سبال در مقیاس‌های ماهانه و سالانه (۲۰۰۱)

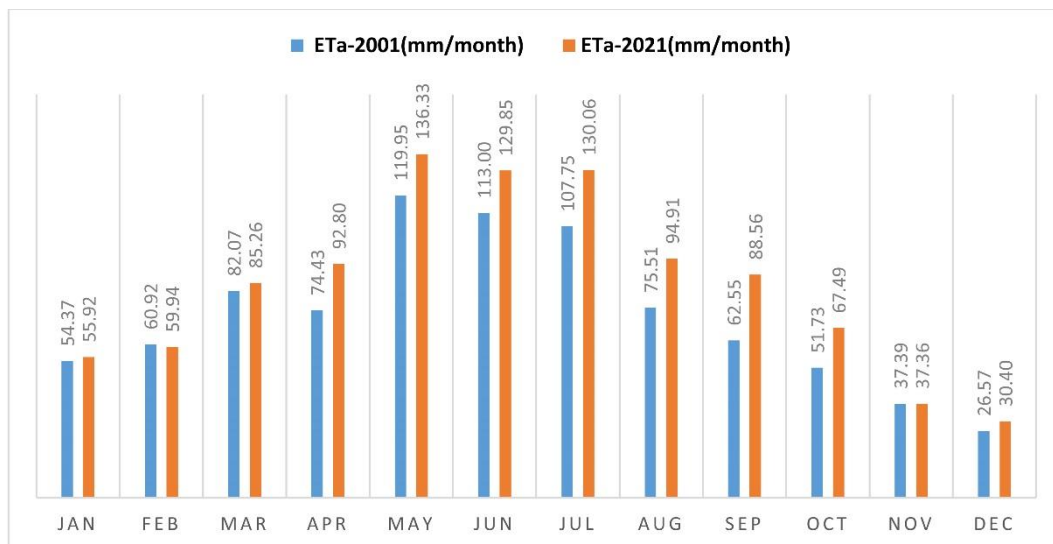


شکل ۵. نقشه تبخیر و تعرق واقعی با مدل سبال در مقیاس‌های ماهانه و سالانه (۲۰۲۱)

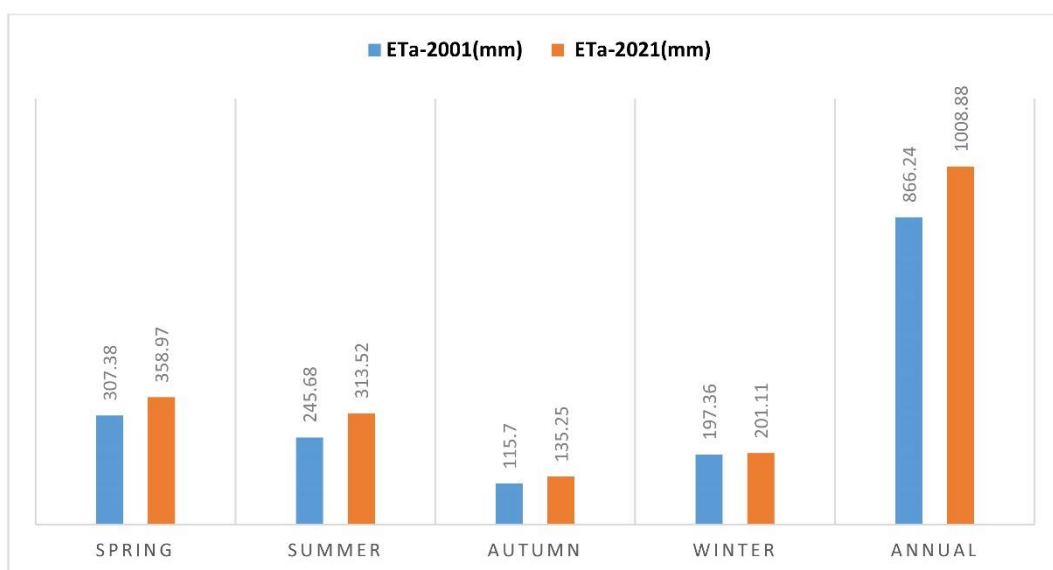
با مقایسه نقشه‌های توزیع مکانی تبخیر و تعرق واقعی (ETa) در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱، می‌توان به این نتیجه رسید که الگوهای کلی توزیع مکانی ETa در این دو سال مشابه بوده و تحت‌تأثیر عوامل مشابهی مانند پوشش گیاهی، توپوگرافی و شرایط آب‌وهوایی قرار دارند. هر دو سال، بیشترین مقدار ETa در ماه‌های گرم سال و کمترین مقدار در ماه‌های سرد سال مشاهده می‌شود. با این حال، مقایسه دقیق‌تر نشان می‌دهد که برخی تفاوت‌های جزئی در مقادیر و الگوهای توزیع مکانی ETa بین این دو سال وجود دارد. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از تغییرات در شرایط اقلیمی و یا تغییر کاربری اراضی باشد.

شکل ۶ و ۷ نیز مقادیر ماهانه، فصلی و سالانه تبخیر و تعرق واقعی با مدل سبال برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱ نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست‌آمده بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق در ماه‌های اردیبهشت (May) و خرداد (June) مشاهده می‌شود. مقدار ET در اردیبهشت از ۱۱۹/۹۵ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ به ۱۳۶/۳۳ میلی‌متر در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش ۱۳/۷ درصد در این ماه است. در خرداد نیز مقدار ET از ۱۱۳ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ به ۱۲۹/۸۵ میلی‌متر در سال ۲۰۲۱ رسیده که افزایشی معادل ۱۴/۹ درصد را نشان می‌دهد. در تیر و مرداد (July و August) نیز مقادیر ET به ترتیب از ۱۰۷/۷۵ و ۷۵/۵۱ میلی‌متر به ۱۳۰/۰۶ و ۹۴/۹۱ میلی‌متر رسیده است که نشان‌دهنده افزایش نسبی در تابستان است. این افزایش قابل توجه، تأثیر مستقیم افزایش دما و تابش خورشیدی در این فصل‌ها را نشان می‌دهد. مقادیر ET در پاییز و زمستان تغییرات کمتری داشته است. برای مثال، مقدار ET در دی (January) تنها از ۵۴/۳۷ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ به ۵۵/۹۲ میلی‌متر در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته که نشان‌دهنده یک تغییر ناچیز است. در آبان (November) نیز تقریباً هیچ تغییری مشاهده نمی‌شود. در مجموع بیشترین افزایش تبخیر و تعرق واقعی در فصل بهار و تابستان رخ داده است. این موضوع می‌تواند به دلیل ترکیب افزایش دما، کاهش رطوبت نسبی، و طولانی‌تر شدن روزها باشد. مقادیر ماه‌های پاییز و زمستان نسبت به ماه‌های دیگر کمتر تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته‌اند که می‌تواند به دلیل شدت کمتر تابش خورشیدی و دمای پایین‌تر این فصل‌ها باشد. روند افزایشی در مقادیر ET طی دو دهه اخیر با تغییرات کاربری اراضی، افزایش دمای سطح زمین و کاهش رطوبت نسبی مرتبط است. به‌ویژه تغییرات در پوشش گیاهی و فعالیت‌های کشاورزی می‌تواند به این روند کمک کرده باشند. افزایش دما و

تابش خورشیدی به همراه کاهش رطوبت نسبی از عوامل اصلی افزایش ET محسوب می‌شوند. افزایش تبخیر و تعرق واقعی در ماه‌های گرم و فصل بهار و تابستان، فشار بیشتری بر منابع آبی منطقه وارد می‌کند. این موضوع نیازمند برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای مدیریت منابع آب، استفاده بهینه از سیستم‌های آبیاری، و حفاظت از پوشش گیاهی است.



شکل ۶. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی ماهانه با مدل سبال برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱



شکل ۷. مقادیر تبخیر و تعرق واقعی فصلی و سالانه با مدل سبال برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۱

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق واقعی (ET) در حوزه آبخیز سد خسویه با استفاده از مدل SEBAL و داده‌های ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحلیل نشان‌دهنده نقش کلیدی تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی چرخه هیدرولوژیکی در پاسخ به تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی است.

مدل SEBAL به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها در تخمین تبخیر و تعرق، با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و پارامترهای فیزیکی نظیر تابش خورشیدی، دمای سطح زمین، و شاخص پوشش گیاهی، امکان تحلیل دقیق و کم‌هزینه این پارامتر را فراهم آورده است. این مدل به‌ویژه در مناطقی با دسترسی محدود به داده‌های زمینی، کاربرد گسترده‌ای دارد و توانسته است روندهای معناداری را در طول دوره مطالعه شناسایی کند. نتایج مقایسه تبخیر و تعرق واقعی پیش‌بینی‌شده با تبخیر و تعرق پتانسیل مدل Penman-Monteith در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ نشان‌دهنده افزایش دقت مدل SEBAL در طول زمان بود. مقدار ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ )، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و شاخص ویلموت (d) در سال ۲۰۰۱ به ترتیب از ۰/۸۱، ۰/۶۵ و ۰/۶۱ به ۰/۹۳، ۰/۸۶ و ۰/۹۲ در سال ۲۰۲۱ افزایش یافت. تحلیل سری‌های زمانی نشان داد که مقادیر سالانه ET از ۸۶۶/۲۴ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ به ۱۰۰۸/۸۸ میلی‌متر در سال ۲۰۲۱ افزایش یافته است (رشد حدود ۱۶/۵ درصد). این افزایش به‌ویژه در فصول بهار (۱۶/۸ درصد) و تابستان (۲۷/۶ درصد) بارزتر بوده و بیانگر تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی نظیر افزایش دما، کاهش رطوبت نسبی و افزایش شدت تابش خورشیدی بر این پارامتر است. بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق در فصل بهار (به دلیل افزایش فعالیت پوشش گیاهی و تابش خورشیدی بیشتر) و تابستان (به علت گرمای بالا و کاهش رطوبت خاک) مشاهده شد. از منظر مکانی، مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم و زمین‌های کشاورزی آبیاری‌شده بالاترین مقادیر ET را نشان دادند که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم پوشش گیاهی و مدیریت منابع آب بر بیلان تبخیر و تعرق است. گسترش زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری، الگوهای فضایی تبخیر و تعرق را تغییر داده و تأثیر محسوس بر بیلان آبی منطقه داشته است. مدل SEBAL با تکیه بر تحلیل مکانی تصاویر ماهواره‌ای، توانست این تغییرات را به‌صورت کمی و دقیق بررسی کند. این یافته‌ها با مطالعات مشابهی که در سایر مناطق توسط محققانی نظیر آوادا و همکاران (۲۰۲۱)، وی و همکاران (۲۰۲۲) و سوزا و همکاران (۲۰۲۳) انجام شده است، مطابقت دارد.

نتایج این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان کمک کند تا راهبردهایی طراحی کنند که نه تنها منابع آبی را حفظ کند، بلکه اثرات منفی فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست و منابع طبیعی را نیز کاهش دهد. برای مثال، سیاست‌های تشویقی برای استفاده بهینه از آب‌های سطحی و زیرزمینی در بخش کشاورزی می‌تواند موجب کاهش فشار بر منابع آبی و بهبود وضعیت منابع خاکی شود. همچنین، استفاده از روش‌های نوین مانند سیستم‌های آبیاری هوشمند و مدیریت پایداری اراضی می‌تواند به افزایش بهره‌وری منابع آبی کمک کند. علاوه بر این، در نظر گرفتن تأثیرات تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی در برنامه‌ریزی‌های آبی، می‌تواند به پیش‌بینی و کاهش خطرات ناشی از تغییرات نامطلوب کمک کند. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که در شرایط تغییرات اقلیمی، سیاست‌گذاران باید به الگوهای فضایی و زمانی تبخیر و تعرق به‌عنوان عاملی کلیدی در تعیین بیلان آبی توجه ویژه‌ای داشته باشند. استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از دور و ابزارهای مدل‌سازی نظیر SEBAL می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر روندها و اولویت‌بندی راهکارهای مدیریتی کمک کند.

### References

- Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., & Morse, A. (2001). *Evapotranspiration on the Watershed Scale Using the SEBAL Model and Landsat Images*.
- Awada, H., Di Prima, S., Sirca, C., Giadrossich, F., Marras, S., Spanò, D., & Pirastru, M. (2021). Daily Actual Evapotranspiration Estimation in a Mediterranean Ecosystem from Landsat Observations Using SEBAL Approach. *Forests*. <https://doi.org/10.3390/F12020189>.
- Bahrami, A., Dashtbani, Z., Bahrami, M. 2023. Evaluation of groundwater quality in the Fasarud plain (Darab county) for agricultural and drinking purposes. *Quarterly Journal of Environmental Science Studies*, 8(3), 7122-7113. (in persian)
- Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R., & Holtslag, A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)-1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212, 198–212.
- Chang, Y., Qin, D., Ding, Y., Zhao, Q., & Zhang, S. (2017). A modified MOD16 algorithm to estimate evapotranspiration over alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.03.054>.
- Choudhury, B. (1997). Global Pattern of Potential Evaporation Calculated from the Penman-Monteith Equation Using Satellite and Assimilated Data. *Remote Sensing of Environment*, 61, 64–81. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00241-6).
- Dimitriadou, S., & Nikolakopoulos, K. (2021). Evapotranspiration Trends and Interactions in Light of the Anthropogenic Footprint and the Climate Crisis: A Review. *Hydrology*.
- Fisher, J., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D., Perret, J., Lagouarde, J., Waliser, D., Purdy, A., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J., Stephens, G., & Wood, E. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53, 2618–2626. <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>.
- Hassani, M. & Shamsnia, S. A. (2023). Spatial analysis of wheat irrigation indicators using geostatistical models in the direction of sustainable environmental development (Case study: Darab Plain - Fars Province). *Environmental Science Studies*, 9(2), 8418-8428. (in persian).
- Jafari, H., Raeisi, E., Hoehn, E., & Zare, M. (2012). Hydrochemical characteristics of irrigation return flow in semi-arid regions of Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 57, 173–185. (in persian).
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N., Urrutia, R., Echeverría, C., Lagos, O., Rodríguez-López, L., Durán-Llacer, I., & Barra, R. (2022). Influence of Climate and Land Cover/Use Change on Water Balance: An Approach to Individual and Combined Effects. *Water*.
- Nouri, M., Homaeae, M., & Bannayan, M. (2018). Spatiotemporal reference evapotranspiration changes in humid and semi-arid regions of Iran: past trends and future projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 133, 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2176-8>. (in persian).
- Panahi, D., Kalantari, Z., Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S., & Destouni, G. (2020). Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64089-y>. (in persian).
- Qiu, J., Shen, Z., Leng, G., Xie, H., Hou, X., & Wei, G. (2019). Impacts of climate change on watershed systems and potential adaptation through BMPs in a drinking water source area. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.03.074>.
- Silva, B., Mercante, E., Boas, M., Wrublack, S., & Oldoni, L. (2018). Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. *Revista Ciencia Agronomica*, 49, 221–227. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180025>.
- Souza, P., Silva, E., Silva, B., Ferreira, T., Sousa, D., Da Luz, D., Adami, M., Sousa, A., Nunes, H., Fernandes, G., Pinto, J., Farias, V., Oliveira, I., Da Silva, S., Costa, J., Rua, M., Costa, D., Moura, V., Lima, M., Santos, J., Da Silva Sousa, A., & Ortega-Farías, S. (2023). Estimation of the Evapotranspiration of Irrigated Açaí (*Euterpe oleracea* M.), through the Surface Energy Balance Algorithm for Land—SEBAL, in Eastern Amazonia. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15061073>.
- Wei, G., Cao, J., Xie, H., Yang, Y., Wu, C., Cui, Y., & Luo, Y. (2022). Spatial-Temporal Variation in Paddy Evapotranspiration in Subtropical Climate Regions Based on the SEBAL Model: A Case Study of the Ganfu Plain Irrigation System, Southern China. *Remote Sensing*, 14, 1201. <https://doi.org/10.3390/rs14051201>.