

## Research Paper

**Comparison of Evapotranspiration Estimation Methods Based on Remote Sensing Technique and SWAT Model (Case study: Aji Chay watershed)**Farshad Fathian<sup>1\*</sup>, Hojat Ahmadzadeh<sup>2</sup>, Mohammad Hossein Bagheri Harooni<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. f.fathian@vru.ac.ir

<sup>2</sup> PhD of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. hojatahmadzadeh6@gmail.com

<sup>3</sup> PhD student, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. bagheri.mhb@gmail.com



10.22125/iwe.2024.430461.1777

Received:  
**December 13, 2023**

Accepted:  
**May 11, 2024**

Available online:  
**October 13, 2024**

**Keywords:**  
**Evapotranspiration,**  
**Hydrological-Vegetation**  
**Model,**  
**Google Earth Engine,**  
**WaPOR,**  
**MOD16,**  
**Lake Urmia**

**Abstract**

Evapotranspiration is one of the key components in calculating water balance and determining water consumption in agriculture for planning and management of water resources. Various methods have been proposed for estimating evapotranspiration so far, which depends on different algorithms and techniques governing them, their calculation process and structure are different. The purpose of this study is to compare the performance of the hydrological-vegetation SWAT model and global products of WaPOR and MOD16 based on remote sensing technique for estimating potential and actual evapotranspiration. Hence, Aji Chay watershed, including one of the important sub-basins of Lake Urmia, is selected as case study to investigate the purpose of this study. The Google Earth Engine platform is used to estimate evapotranspiration through global products, which have been developed based on different algorithms. Moreover, the SWAT model according to the streamflows data was set up, calibrated and validated ( $R = 0.4\sim 0.92$ ) for the watershed and the values of potential and actual evapotranspiration were simulated by the model for the period 2009-2019 with  $R^2 = 0.95$  and  $RMSE = 20$  mm. The results of the SWAT model showed that the average simulated actual evapotranspiration has the highest agreement with the corresponding values of the main agricultural products presented in the national water document for the main plains of the watershed. Comparison between the performance of the hydrological-vegetation model with the global databases showed that the estimated values of potential and actual evapotranspiration both on an annual and monthly scales for the WaPOR ( $R^2 = 0.51\sim 0.99$ ) have the highest agreement and consistency with the simulated values of the SWAT model compared to the MOD16 ( $R^2 = 0.03\sim 0.94$ ). However, the MOD16 database has estimated more evapotranspiration than WaPOR in most months and years of the study. Spatial analysis of actual evapotranspiration also showed that the mapping of WaPOR has more consistency with the land use map of the watershed. Therefore, it is observed that net water consumption of agriculture in both upstream and downstream regions due to the high irrigated lands in the main plains of the watershed has increased.

## Introduction

Evapotranspiration (ET) is an important component of the water cycle. Accurate estimation of ET is essential for water resources management and irrigation planning. Various methods have been proposed for estimating ET, such as ground-based measurements, physically-based models, and remote sensing products. Ground-based measurements, such as lysimeters, are accurate but limited in spatial coverage and representativeness. Physically-based models such as SWAT are based on mathematical equations that describe the physical processes of ET and require various input data, such as meteorological, soil, and crop parameters. Remote sensing products, such as WaPOR and MODIS, are based on satellite observations that provide spatially distributed and consistent information on ET. Each method has its own advantages and disadvantages, depending on the purpose, scale, and data availability of the study. Therefore, the objective of this study is to estimate and compare the performance of the hydrological-crop SWAT model and remote sensing technique for estimating potential and actual ET of the Aji Chay watershed, including one of the important sub-basins of Lake Urmia, which has been facing severe water crisis and environmental degradation in recent decades.

## Materials and Methods

The study area is the Aji Chay watershed, which covers an area of about 12600 km<sup>2</sup> and is located in the northwest of Iran. The watershed has a semi-arid climate with an average annual precipitation and temperature of about 320 mm and 11.3°C, respectively. The SWAT model was used to simulate the hydrological processes and ET of the watershed for the period 2009-2019. To set up the model, the input data, such as DEM, land use map, soil map, meteorological data, and crop data, were obtained from various sources. The model was calibrated and validated using the observed streamflow data and the NSE and R<sup>2</sup> were used as the performance criteria. The remote sensing technique was used to estimate ET using the Google Earth Engine platform, which is a cloud-based platform for geospatial analysis and visualization. Two global ET products, WaPOR and MODIS, were selected for comparison with the SWAT model. WaPOR is a product developed by the FAO and provides ET data at 250 m spatial resolution and dekadal temporal resolution for Africa and the Near East. MODIS (MOD16A2) is a product developed by the NASA and provides ET data at 500 m spatial resolution and 8-day temporal resolution for the entire globe. Both products are based on different algorithms and input data, such as land surface temperature, albedo, vegetation index, and net radiation.

## Results

The results of the SWAT model showed that the model was able to simulate the streamflow and ET of the watershed satisfactorily. The average simulated potential ET (PET) and actual ET (AET) of the watershed were 1291 and 350 mm/year, respectively, for the period 2009-2019. The average simulated AET had the highest agreement with the corresponding values of the main agricultural products presented in the national water document for the main plains of the watershed. The comparison between the performance of the hydrological-crop AET both on an annual and monthly scales for the WaPOR had the highest agreement and consistency with the simulated values of the SWAT model compared to the MODIS. The R<sup>2</sup> value for the relationship between SWAT and WaPOR at annual and monthly scales was 0.63 and 0.99 for PET and 0.51 and 0.84 for AET, respectively, while the corresponding value of R<sup>2</sup> for the relationship between SWAT and MODIS at annual and monthly scales was 0.68 and 0.94 for PET and 0.09 and 0.03 for AET, respectively. However, the MODIS database had estimated more ET than SWAT and WaPOR in most months and years of the study. The spatial analysis of AET also showed that the mapping of WaPOR had more consistency with the land use map, and net water consumption of agriculture in both upstream and downstream regions due to the high irrigated lands in the main plains of the watershed had increased.

## Discussion and Conclusion

This study compared the performance of the SWAT model and remote sensing technique for estimating ET of the watershed. The results showed that the SWAT model was able to simulate the hydrological processes and ET of the watershed satisfactorily, and the average simulated AET was in good agreement with the national water document. The results also showed that the WaPOR database had a better performance than the MODIS database in estimating ET of the watershed, both in terms of statistical metrics and spatial patterns. The WaPOR database had a higher spatial and temporal resolution, a lower

error, and a higher consistency with the SWAT model than the MODIS database. The MODIS database had a tendency to overestimate ET in months and years compared to the SWAT simulation. The findings of this study have some implications for the water resources management and planning of the watershed and the lake. The SWAT model can be used as a reliable tool for assessing the water balance and water consumption of the watershed and evaluating the impacts of different scenarios. The WaPOR and MODIS databases can be used as a complementary source of information for estimating ET of the watershed and monitoring the water productivity and water stress of the agricultural lands.

### Six important references

1)Ahmadzadeh, H., A. Fakheri Fard, M. A. Ghorbani and M. Tajrishy. 2022. Evaluation of the simultaneous effect of changes of climatic variables and land use on the actual evapotranspiration trend using the SWAT model in the Ajichi basin. *Journal of Water and Soil Science*, 26 (3), 15-34.

2)Blatchford, M. L. C. M. Mannaerts, S. M. Njuki, H. Nouri, Y. Zeng, H. Pelgrum, S. Wonink and P. Karimi. 2020. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*, 34(15), 3200–3221.

3)Dehghanisani, H., E. Asadi Oskouei and A. Taghizadehghasab. 2022. The interpretation of water consumption in the agricultural sector based on actual evapotranspiration. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(6), 1251-1262.

4)Javadian, M., A. Behrangi, M. Gholizadeh and M. Tajrishy. 2019. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: comparative analysis and composite assessment. *Water*, 11(8), 1647.

5)Javadian, M., F. Kordi and M. Tajrishy. 2019. Evaluation and comparison of estimation methods for actual evapotranspiration in the Urmia Lake basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 125-136.

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

### Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

### Acknowledgments

We are grateful to the two anonymous reviewers whose comments and suggestions helped in improving the quality of the paper.

## مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مبتنی بر فناوری سنجش از دور و مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز آجی‌چای)

فرشاد فتحیان<sup>۱</sup>، حجت احمدزاده<sup>۲</sup> و محمد حسین باقری هارونی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۲

مقاله پژوهشی

### چکیده

تبخیر و تعرق از جمله مولفه‌های کلیدی در محاسبه بیلان آبی و تعیین میزان آب مصرفی کشاورزی به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب محسوب می‌شود. روش‌های متنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق تا کنون ارائه شده‌اند که بسته به نوع الگوریتم و فناوری‌های حاکم بر آنها، فرآیند و ساختار محاسبه آنها متفاوت است. هدف از این پژوهش، مقایسه عملکرد مدل هیدرولوژیکی-گیاهی SWAT و محصولات جهانی WaPOR و MOD16 مبتنی بر فناوری سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی است. از این‌رو، حوضه آبریز آجی‌چای (از جمله زیر حوضه‌های مهم دریاچه ارومیه) به عنوان منطقه مطالعاتی برای بررسی هدف پژوهش انتخاب شده است. از پلتفرم گوگل ارث انجین برای برآورد تبخیر و تعرق از طریق محصولات جهانی که بر اساس الگوریتم‌های مختلف توسعه داده شده‌اند، استفاده شده است. همچنین، مدل SWAT بر اساس داده‌های جریان رودخانه‌ها برای حوضه آبریز تنظیم، واسنجی و صحت‌سنجی ( $R = 0.4 \sim 0.92$ ) شد و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی توسط مدل برای دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۹ با  $R^2 = 0.95$  و  $RMSE = 20$  mm شبیه‌سازی شدند. نتایج ارزیابی مدل SWAT نشان داد که میانگین تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده بیشترین تطابق را با مقادیر متناظر محصولات عمده کشاورزی ارائه شده در سند ملی آب برای دشت‌های اصلی حوضه آبریز دارد. مقایسه بین عملکرد مدل هیدرولوژیکی-گیاهی با محصولات جهانی نشان داد که مقادیر برآورد شده تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی در مقیاس‌های سالانه و ماهانه برای محصول WaPOR ( $R^2 = 0.51 \sim 0.99$ ) نسبت به MOD16 ( $R^2 = 0.03 \sim 0.94$ ) بیشترین توافق و همخوانی را با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل SWAT دارد. هرچند، محصول MOD16 برآورد تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به WaPOR در بیشتر ماه‌ها و سال‌های مورد مطالعه داشته است. تحلیل مکانی تبخیر و تعرق واقعی نیز نشان داد پهنه‌بندی محصول WaPOR تطابق بیشتری با نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز داشته است. بنابراین، مشاهده می‌شود که در بالادست و در پایین‌دست حوضه آبریز، به دلیل میزان بالای اراضی با کشت آبی در دشت‌های اصلی، مصرف خالص آب کشاورزی افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، مدل هیدرولوژیکی-گیاهی، گوگل ارث انجین، WaPOR، MOD16، دریاچه ارومیه.

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. (\*: نویسنده مسئول)، f.fathian@vru.ac.ir

<sup>۲</sup> دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. hojatahmadzadeh6@gmail.com

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. bagheri.mhb@gmail.com

## مقدمه

کمبود آب در بسیاری از مناطق ایران به دلیل رشد جمعیت، شیوه‌های مدیریت ناپایدار آب، تغییر در اقلیم و کاربری اراضی به چالش جدی تبدیل شده است. بررسی این مشکل به ویژه برای مناطقی که بخش کشاورزی مصرف‌کننده اصلی منابع آب باشد برای بهبود معیشت جمعیت ساکن در آن مناطق و حفظ امنیت غذایی و آبی، از اهمیت بسزایی برخوردار است (دهقانی سانج و همکاران، ۱۴۰۰). از سویی دیگر، بخش عمده‌ای از منابع آبی کشور از طریق تبخیر و تعرق واقعی به عنوان نماینده "آب خالص مصرفی" از حوضه‌های آبریز خارج می‌شود و امکان استفاده مجدد از آن نیست (Bagheri et al., 2017؛ باقری هارونی و فتحیان، ۱۴۰۲).

تبخیر و تعرق واقعی از جمله مولفه‌های اصلی چرخه آب در محاسبه بیلان آبی هر منطقه محسوب می‌شود. در بیلان آب، بیش از ۶۰ درصد بارندگی به صورت تبخیر و تعرق به جو باز می‌گردد، به ویژه در مناطق خشک که میزان آن به طور قابل توجهی بیشتر از بارش است. همچنین، تبخیر و تعرق جزء فرآیند اصلی تبادل انرژی سطحی است و میزان آن در یک حوضه آبریز ارتباط نزدیکی با وضعیت خاک، پوشش گیاهی، عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی، توپوگرافی و عملیات مدیریتی دارد (Chen et al., 2023). بنابراین، برآورد و پایش دقیق مصرف آب از لحاظ مکانی و زمانی، به ویژه در مقیاس حوضه آبریز، برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار سامانه‌های منابع آب بسیار حائز اهمیت است (Vörösmarty et al., 2000). علاوه بر این، بررسی تبخیر و تعرق می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد بیلان آب، کارایی آب مصرفی گیاه، برنامه‌ریزی آبیاری، پایش خشکسالی و اثر تغییر اقلیم ارائه دهد (احمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱).

روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس‌های مختلف مانند اندازه‌گیری‌های میدانی، معادلات تجربی، مدل‌های مبتنی بر فرآیندهای بیلان آب و انرژی وجود دارند. هر روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را از نظر در دسترس بودن داده‌ها، دقت، وضوح مکانی و کاربرد دارد (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۸). در میان این روش‌ها،

اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق در مقیاس حوضه آبریز، به دلایل تغییرات زمانی و مکانی آن و عدم داده‌های مشاهداتی زمینی، دشوار و هزینه‌بر است. بنابراین، اغلب پژوهشگران به مدل‌های پیچیده مبتنی بر معادلات اقلیمی-هیدرولوژیکی یا فناوری سنسجش از دور روی می‌آورند (Ferreira et al., 2021). از این رو، به علت کاربرد بیشتر و در نظر گرفتن دامنه متنوعی از داده‌های مورد نیاز، مطالعه حاضر بر روش‌های مبتنی بر فرآیند بیلان آبی (مانند مدل SWAT<sup>۱</sup>) و فرآیند بیلان انرژی (مانند محصولات جهانی استفاده شده در فناوری سنسجش از دور) برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق متمرکز شده است.

فناوری سنسجش از دور در سال‌های اخیر به دلیل توانایی آن‌ها در برآورد مقیاس مکانی و به‌هنگام تبخیر و تعرق برای مناطق بزرگ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و محصولات جهانی مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. با این حال، فناوری سنسجش از دور دارای چالش‌هایی مانند عدم کیفیت برخی داده‌ها، وجود پوشش ابری، تفکیک زمانی بالا و بستن بیلان انرژی با دقت پائین در تصاویر ماهواره‌ای است (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۸). تبخیر و تعرق به طور مستقیم توسط سنسجده‌های ماهواره‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه با استفاده از الگوریتم‌های سنسجش از دور که مبتنی بر فرآیند بیلان انرژی توسعه داده شده‌اند و متغیرهای فیزیکی در منطقه مورد نظر را محاسبه می‌کنند، برآورد انجام می‌شود (رحیم‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). از این رو، استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین می‌تواند با دسترسی آسان به داده‌های ماهواره‌ای از منابع مختلف، توانایی پردازش موازی و سریع اطلاعات مکانی و امکان استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته برای پردازش داده‌ها، تبخیر و تعرق را برآورد نماید (Abbasi et al., 2023).

از جمله مدل‌های مبتنی بر فرآیند بیلان آبی که به طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیکی-گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) است. این ابزار یک مدل فیزیکی در مقیاس حوضه رودخانه است که برای شناسایی تأثیر شیوه‌های مدیریت زمین بر کمیت و کیفیت آب توسعه یافته است. SWAT می‌تواند فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند رواناب سطحی، نفوذ، جریان آب

<sup>۱</sup> Soil and Water Assessment Tool

(رحیم‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ جوادیان و همکاران، ۱۳۹۸؛ باقری و همکاران، ۱۳۹۱؛ دهقانی سانچ و همکاران، ۱۴۰۰؛ Javadian et al., 2019؛ Bagheri et al., 2017؛ Blatchford et al., 2020؛ Chen et al., 2023). برخی مطالعات نیز با استفاده از روش‌های تجربی مبتنی بر شاخص‌های گیاهی و داده‌های ماهواره‌ای به برآورد تبخیر و تعرق پرداخته‌اند (Abbasi et al., 2021, 2023). خلاصه پیشینه مطالعات نشان می‌دهد فناوری سنجش از دور ابزاری ارزشمند برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق وسیع و شرایط مختلف است، زیرا می‌تواند داده‌های پیوسته مکانی و زمانی را ارائه دهد و بر محدودیت‌های اندازه‌گیری‌های زمینی غلبه کند. همچنین، این فناوری می‌تواند به درک اثرات متقابل و بازخوردهای بین تبخیر و تعرق و سایر مولفه‌های چرخه آب و انرژی کمک کند. با این حال، فناوری سنجش از دور هنوز با چالش‌هایی مانند دقت و سازگاری مدل‌ها و محصولات مختلف، در دسترس بودن و کیفیت داده‌های ورودی و داده‌های واسنجی/اعتبارسنجی، انتشار خطا و تحلیل عدم قطعیت مواجه است (Mukpuou et al., 2020؛ Bhattarai and Wagle, 2021؛ Barzkar et al., 2021؛ Zhang et al., 2022).

سوال اصلی مطالعه حاضر این است که عملکرد مدل SWAT و محصولات جهانی مبتنی بر فناوری سنجش از دور در پلتفرم گوگل ارث انجین برای برآورد تبخیر و تعرق در حوضه آبریز چگونه است؟ بر اساس پیشینه پژوهش، تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه به منظور بررسی و مقایسه عملکرد داده‌های ماهواره‌ای تبخیر و تعرق مبتنی بر فناوری سنجش از دور با مدل‌های فیزیکی مبتنی بر فرآیند بیلان آب در ایران انجام نشده است. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و واقعی (AET) برای حوضه آبریز با استفاده از مدل جامع هیدرولوژیکی-گیاهی SWAT و فناوری سنجش از دور بر اساس محصولات جهانی WaPOR و MOD16 توسعه یافته بر اساس الگوریتم‌های مختلف و مقایسه عملکرد آن‌ها است. همچنین، مزایا و محدودیت‌های روش‌های مورد استفاده برای پایش مصرف آب در مقیاس حوضه آبریز بیان می‌شود. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در درک بهتر فرآیندهای هیدرولوژیکی و تبخیر و تعرق مناطق مختلف

زیرزمینی، تبخیر و تعرق، رشد محصول و آبیاری را در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف شبیه‌سازی کند (Arnold and Fohrer, 2005). با این حال، اگرچه SWAT نیز دارای محدودیت‌هایی مانند نیاز به داده‌های زیاد، مشکلات واسنجی، پیچیدگی محاسباتی و تحلیل عدم قطعیت است، اما به دلایلی نظیر رایگان بودن، جامع بودن به منظور شبیه‌سازی توأم اثر متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و گیاهی در حوضه‌های پیچیده با کاربری اراضی و ویژگی‌های فیزیکی متنوع، مدل مناسبی است (Neitsch et al., 2011).

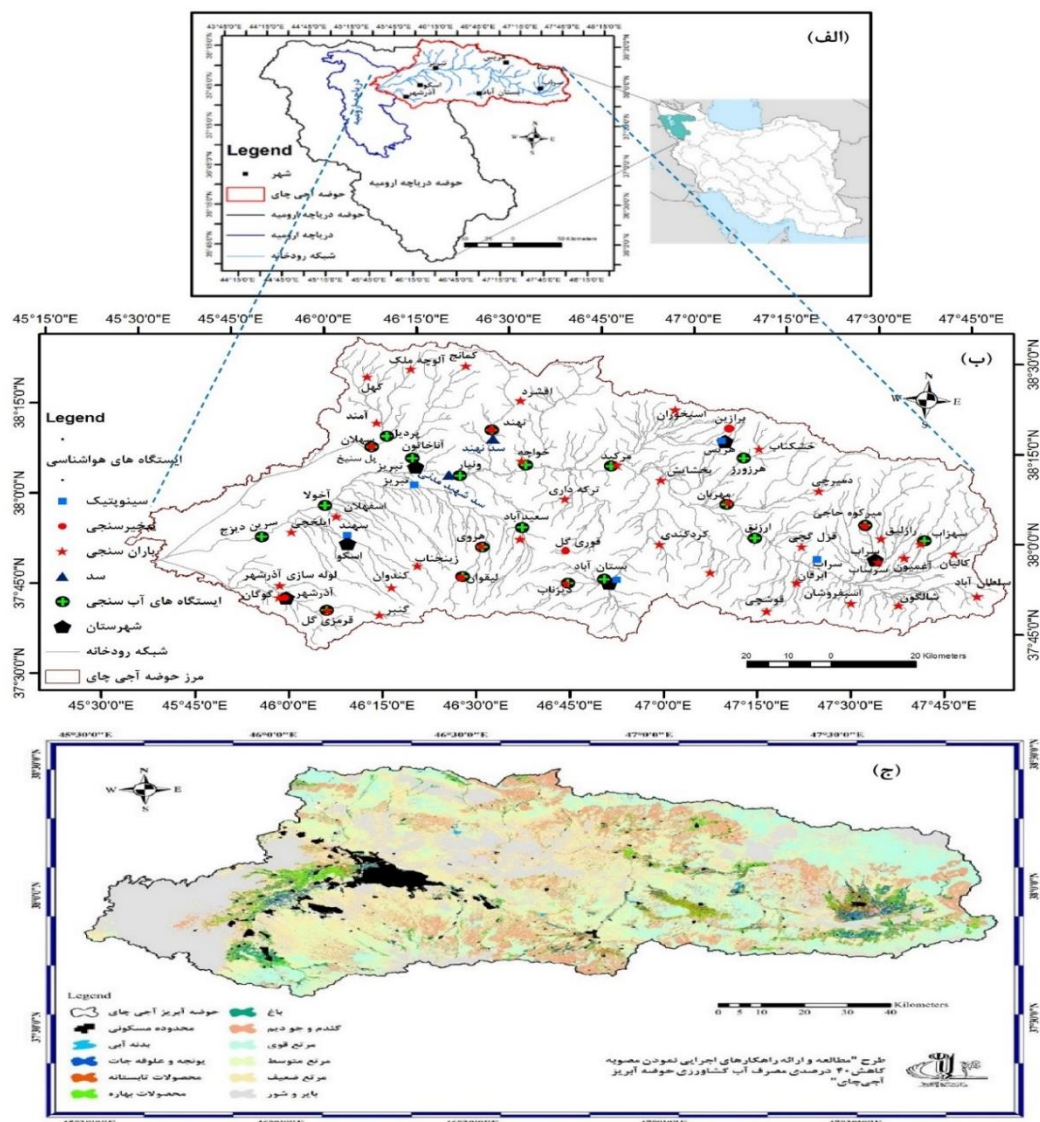
تا کنون برخی مطالعات در مورد استفاده از مدل SWAT برای برآورد تبخیر و تعرق انجام شده و عملکرد این مدل را برای حوضه‌های آبریز و اقلیم‌های مختلف بررسی کرده‌اند. برخی مطالعات تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده با این مدل را با داده‌های مشاهداتی مقایسه کرده‌اند. برخی نیز، اثر روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق یا داده‌های ورودی را بر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده با SWAT مقایسه کرده‌اند (احمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ Olchev et al., 2008؛ Ferreira et al., 2021؛ Adjei et al., 2023؛ Rane et al., 2023). جمع‌بندی پیشینه مطالعات بیان می‌کند که SWAT به طور کلی می‌تواند تبخیر و تعرق را به خوبی شبیه‌سازی کند، اما چالش‌ها و محدودیت‌هایی نیز وجود دارد. مدل SWAT ممکن است تبخیر و تعرق را در برخی از فصول یا مناطق به دلیل خطا در داده‌های ورودی یا ساختار مدل، کم‌برآورد یا بیش‌برآورد کند. همچنین، این مدل ممکن است به انتخاب روش تبخیر و تعرق پتانسیل حساس باشد که می‌تواند بر بیلان آب شبیه‌سازی شده و فرآیندهای هیدرولوژیکی تأثیر بگذارد (Rane et al., 2023؛ Adjei et al., 2023). در مورد استفاده از فناوری سنجش از دور برای برآورد تبخیر و تعرق، مطالعات مختلفی با استفاده از محصولات جهانی و الگوریتم‌های مبتنی بر بیلان انرژی انجام شده است. برخی از مطالعات از روش تک‌منبعی و با الگوریتم‌هایی نظیر SEBS، SEBAL، METRIC و SEBI و برخی نیز از روش دومنبعی با الگوریتم‌هایی شامل TSM، TSTIM، DTD و ETLook با بکارگیری تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی به برآورد تبخیر و تعرق پرداخته‌اند

را زهکشی و به دریاچه ارومیه می‌ریزد. طول رودخانه ۲۶۵ کیلومتر و مساحت حوضه آبریز بیش از ۱۲۶۰۰ کیلومتر مربع است. رودخانه آجی‌چای یک منبع آبی مهم برای کشاورزی، صنعت و توسعه شهری در این منطقه است، اما با چالش‌های زیست‌محیطی مانند آلودگی، فرسایش و کمبود آب مواجه است. شکل (۱) شمای کلی از موقعیت جغرافیایی، وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آجی‌چای (شامل ایستگاه‌های آب و هواشناسی، رودخانه‌ها و سد) و نقشه کاربری اراضی استخراج شده را نشان می‌دهد

کمک کرده و نقاط قوت و ضعف هر یک از این روش‌ها را برجسته سازد.

### منطقه مطالعاتی و داده‌ها

در مطالعه حاضر، حوضه آبریز آجی‌چای از جمله زیرحوضه‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه به عنوان منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شده است. رودخانه آجی‌چای (تلخ‌رود) بزرگترین رودخانه در منطقه آذربایجان ایران است که آب‌های منطقه وسیعی از استان آذربایجان شرقی



شکل (۱): (الف) موقعیت جغرافیایی، (ب) وضعیت هیدرولوژیکی و (ج) نقشه کاربری اراضی (احمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱) حوضه آبریز آجی‌چای

میلی‌متر و دارای اقلیم نیمه‌خشک بر اساس طبقه‌بندی دومارتن است (احمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱). داده‌های مورد

میانگین دما و بارندگی سالانه این حوضه آبریز طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۹ به ترتیب ۱۱/۳ درجه سانتیگراد و ۳۲۰



کمک شایانی به بررسی توزیع مکانی برای محاسبه تبخیر و تعرق کند (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۸). گوگل ارث انجین فناوری قدرتمندی است که امکان مشاهده زمین و محیط زیست از فضا را برای مناطق مختلف جهان با دقت بالا فراهم می‌آورد. گوگل ارث انجین از داده‌های جهانی برای انجام مطالعات در علوم زمین، کشاورزی، محیط زیست و برنامه‌ریزی شهری استفاده می‌کند. همانطور که ذکر شد، در این پژوهش از دو محصول مبتنی بر اطلاعات ماهواره‌ای تبخیر و تعرق شامل MOD16 و WaPOR استفاده و مشخصات آنها در جدول (۱) آورده شده است.

یکی از محصولات مستخرج از سنجنده MODIS، داده‌های تبخیر و تعرق واقعی است که تحت عنوان محصول MOD16 ارائه می‌شود. این محصول بخشی از پروژه NASA/EOS است که بر مبنای روش پنمن-مانتیث<sup>۲</sup> محاسبه و تولید می‌شود و با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر به صورت رایگان در دسترس همگان قرار می‌گیرد (مربوطه و همکاران، ۱۳۹۷). نسخه اولیه این محصول (MOD16) بر اساس روش ارائه شده توسط (Mu et al., 2011) است که پس از آن ارتقاء یافته است. روند کلی محاسبه تبخیر و تعرق واقعی محصول MOD16A2 مطابق شکل ۲ ارائه شده است.

محصول WaPOR اطلاعات ارائه شده توسط فائو است که در پلتفرم گوگل ارث انجین نیز قابل دریافت است. این محصول تبخیر و تعرق واقعی را بر حسب میلی‌متر برای مجموع دوره ۱۰ روزه و با دقت مکانی ۲۴۸.۲ متر ارائه می‌دهد که در آن مجموع تبخیر خاک (E)، تعرق تاج پوشش گیاهی (T) و تبخیر ناشی از بارندگی جذب شده توسط برگ‌ها (I) لحاظ شده است (FAO, 2020). این محصول بر اساس الگوریتم ETLook توسعه یافته که یکی از روش‌های دومنبعی برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی بر پایه معادله پنمن-مانتیث است و توسط Bastiaanssen et al., (2011) ارائه شده است. الگوریتم ETLook مقدار تبخیر از سطح خاک، آب و گیاه و میزان تعرق از سطح گیاه را به صورت مجزا و از طریق روابط (۱) و (۲) برآورد می‌کند (FAO 2019, 2020).

استفاده در پژوهش حاضر برای ساخت مدل SWAT در حوضه آبریز آجی‌چای شامل سری زمانی روزانه متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی (دمای کمینه، دمای بیشینه، بارندگی، رواناب)، لایه‌های مدل رقومی ارتفاع<sup>۱</sup> با دقت ۳۰ متر، خاک و کاربری اراضی است. اطلاعاتی از قبیل تقویم زراعی (تاریخ کشت و برداشت گیاه)، تقویم آبیاری، میزان کود مصرفی و الگوی کشت به تفکیک شهرستان‌های حوضه از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی گردآوری شده است. همچنین، آمار و اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی به تفکیک منابع آب سطحی (رودها و سدها) و زیرزمینی (چاه‌های مجاز و غیرمجاز) برای هر یک از رودخانه‌های حوضه آبریز از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت شده است. دوره زمانی برای ساخت مدل SWAT، واسنجی و صحت‌سنجی در حوضه مورد مطالعه از ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۹ است. علاوه بر این، برای برآورد تبخیر و تعرق طی دوره مطالعاتی در این پژوهش، از دو محصول جهانی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای به نام WaPOR و MOD16 استفاده شده است. دوره زمانی برای استفاده از داده‌های محصولات جهانی تبخیر و تعرق در حوضه مورد مطالعه از ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ است. لذا، دوره مطالعاتی مشترک برای بررسی و مقایسه بین مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده با مدل SWAT و برآورد شده با محصولات ماهواره‌ای، دوره زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۹ است. در بخش روش‌ها، بیشتر به جزئیات داده‌های ماهواره‌ای پرداخته خواهد شد.

## مواد و روشها

### شبیه‌سازی تبخیر و تعرق با فناوری سنجنش از دور

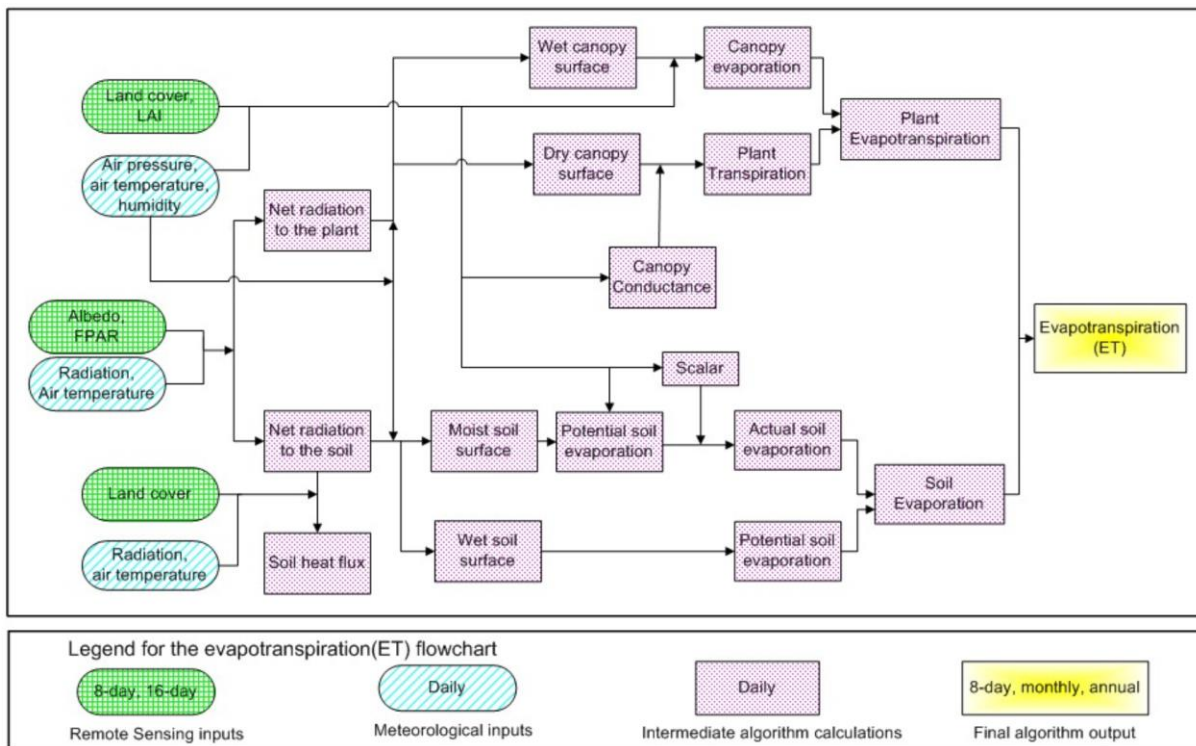
در گذشته مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده مبتنی بر روش‌های مختلف در همان مکانی که اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شد، معتبر بودند. بنابراین، پهنه‌بندی مکانی با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق در مطالعات مختلف، در نظر گرفته نمی‌شد. از اینرو، استفاده از روش‌هایی نظیر فناوری سنجنش از دور به کمک ابزارهایی مانند گوگل ارث انجین می‌تواند

<sup>2</sup> Penman-Monteith

<sup>1</sup> Digital Elevation Model (DEM)

جدول (۱): مشخصات داده‌های محصولات جهانی ماهواره‌ای تبخیر و تعرق

محصول تبخیر و تعرق	دقت مکانی (متر)	توسعه دهنده در گوگل ارث انجین	پوشش مکانی	پوشش زمانی	دقت زمانی (روز)
MOD16A2.061	۵۰۰	دانشگاه مونتانا	جهانی	۲۰۰۱ تا کنون	۸
WaPOR	۲۴۸.۲	FAO	خاورمیانه، آفریقا	۲۰۰۹ تا کنون	۱۰



شکل (۲): ساختار محاسباتی تبخیر و تعرق واقعی در محصول MOD16A2 (Running et al. 2019)

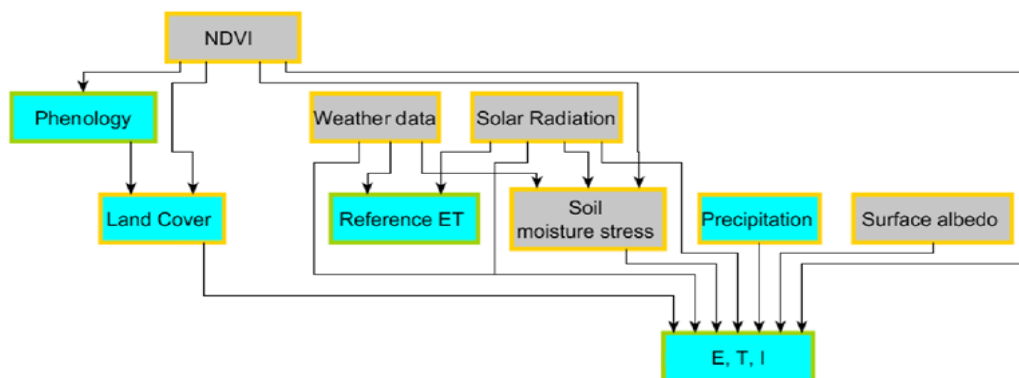
$$\lambda E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_{a,soil}}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{s,soil}}{r_{a,soil}})} \quad (1)$$

$$\lambda T = \frac{\Delta(R_{n,canopy}) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_{a,canopy}}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_{s,canopy}}{r_{a,canopy}})} \quad (2)$$

که در آن،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر  $[J kg^{-1}]$ ،  $E$  تبخیر  $[kg m^{-2} s^{-1}]$ ،  $T$  تعرق  $[kg m^{-2} s^{-1}]$ ،  $R_n$  تابش خالص  $[W m^{-2}]$ ،  $R_{n,soil}$  تابش خالص خاک و  $R_{n,canopy}$  تابش خالص گیاه،  $G$  شار گرمای خاک  $[W m^{-2}]$ ،  $\rho_a$  چگالی هوا  $[kg m^{-3}]$ ،  $c_p$  ثابت گرمای هوای خشک  $[J kg^{-1} K^{-1}]$ ،  $e_a$  فشار بخار واقعی

هوا  $[Pa]$ ،  $e_s$  فشار بخار اشباع  $[Pa]$ ،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع،  $\gamma$  ثابت سایکرومتریک  $[Pa K^{-1}]$ ،  $r_a$  مقاومت آئرودینامیک  $[s m^{-1}]$ ،  $r_{a,soil}$  مقاومت آئرودینامیک خاک و  $r_{a,canopy}$  مقاومت آئرودینامیک گیاه،  $r_s$  مقاومت سطحی خاک و  $r_{s,canopy}$  مقاومت سطحی خاک و  $r_{s,soil}$  مقاومت سطحی خاک و  $r_{s,canopy}$  مقاومت سطحی خاک

سطحی گیاه است. نحوه دقیق محاسبه پارامترهای بالا در راهنمای (FAO (2020) و مطابق با روندنمای شکل (۳) قابل مشاهده است.



شکل (۳): ساختار محصول WaPOR (FAO 2020)

مناسب داشته باشد. بنابراین، با داشتن اطلاعاتی شامل شاخص سطح برگ گیاه، عمق توسعه گیاه، موجودیت آب در خاک و نوع خاک و خصوصیات آن، مقدار کل تبخیر و تعرق واقعی از مجموع مقادیر تبخیر واقعی از خاک (یا تصعید از برف) و تعرق واقعی از گیاه به صورت شبیه‌سازی روزانه برآورد می‌شود (Neitsch et al., 2011). خوانندگان برای آگاهی از جزئیات بیشتر با ساختار و نحوه مراحل محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در مدل SWAT می‌توانند به مطالعه احمدزاده و همکاران (۱۴۰۱) مراجعه کنند.

### پیکربندی مدل SWAT

با وارد کردن لایه DEM به SWAT، منطقه مطالعاتی به ۱۴۰ زیرحوضه تقسیم شد. سپس، پیاده‌سازی الگوی کشت (نوع محصول و سطح زیرکشت آنها) برای تخصیص منابع آب موجود به محصولات کشاورزی مختلف در هر یک از زیرحوضه‌ها و همچنین شبیه‌سازی مقادیر تبخیر و تعرق در مدل SWAT انجام شد. برای این منظور، برای هر یک از شهرستان‌های واقع در حوضه آبریز، محصولات عمده کشاورزی تعیین و درصد سطح زیرکشت آنها محاسبه و بر روی نقشه‌های کاربری اراضی اعمال شدند. پس از آن، با توجه به نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و خاکشناسی،

### شبیه‌سازی تبخیر و تعرق با مدل SWAT

مدل SWAT یک ابزار پیشرفته هیدرولوژیکی-اقلیمی است که توسط مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه یافته است و برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق، رواناب، رسوب و سایر فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبی استفاده می‌شود. این مدل، اطلاعات دقیقی از ویژگی‌های اقلیمی، خاک و گیاهی منطقه را در نظر می‌گیرد و با استفاده از آن می‌توان به‌طور کامل به مطالعه منابع آبی و پیش‌بینی تغییرات آن‌ها پرداخت. مبنای شبیه‌سازی در مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب استوار است (Arnold and Fohrer, 2005). در این مطالعه، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل از روش پنمن-مانتیت در مدل SWAT برآورد می‌شود. سپس، مقدار تبخیر و تعرق واقعی بر اساس شاخص سطح برگ گیاه<sup>۱</sup>، موجودیت آب در خاک و نوع خاک و خصوصیات آن برای تمام واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی<sup>۲</sup> در سطح حوضه برآورد می‌گردد. شایان ذکر است که برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی در واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی در اراضی کشاورزی آبی و دیم، مراحل مختلف رشد هر یک از محصولات مورد کشت به مدل SWAT معرفی می‌شوند به نحوی که تغییرات زمانی شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با واقعیت همخوانی

<sup>2</sup> Hydrologic Response Units (HRUs)

<sup>1</sup> Leaf Area Index (LAI)

که  $\bar{R}_x$  فاصله متوسط حد بالا ( $x_u$ ) و حد پایین ( $x_l$ ) مربوط به باند 95 PPU،  $K$  تعداد و  $\sigma_x$  انحراف معیار داده‌های مشاهداتی هستند.

## نتایج

### ارزیابی SWAT و شبیه‌سازی تبخیر و تعرق

قبل از تنظیم مدل، ابتدا تحلیل حساسیت پارامترهای مهم تاثیرگذار بر جریان رودخانه انجام شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب پاسخ جریان پایه (ALPHA-BF) و فاکتور ذوب برف برای روز ۲۱ ماه سپتامبر (SMFMN) به ترتیب بیشترین تاثیر را در رواناب شبیه‌سازی شده حوضه آبی‌چای دارند. پس از آن، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام شد؛ به نحوی که برای واسنجی دوره ۲۰۰۳-۱۹۸۷ و برای صحت‌سنجی دوره ۲۰۱۸-۲۰۰۴ انتخاب شدند. جدول (۲) نتایج ارزیابی عملکرد مدل در دوره صحت‌سنجی برای جریان رودخانه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT در ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه آبریز آبی‌چای را بیان می‌کند. مطابق جدول مشاهده می‌شود که همبستگی و تطابق خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی جریان ماهانه رودخانه‌ها در بیشتر ایستگاه‌ها بر اساس شاخص‌های ارزیابی وجود دارد.

۷۱۰۳ HRU برای حوضه آبریز تشکیل شد؛ سپس، پارامترهای اصلی مدل شامل گیاهی (Dat)، خاکشناسی (Sol)، سدها (Res)، رودخانه (Rte) و مدیریتی (Mgt) شامل مدیریت‌های آبیاری و کشاورزی از قبیل تقویم زراعی، میزان آبیاری، دور آبیاری و کوددهی برای هر یک محصولات، بر اساس داده‌های موجود به مدل معرفی شدند. برای واسنجی مدل SWAT نیز از نرم‌افزار SWAT-CUP<sup>1</sup> استفاده شد و عملکرد مدل در واسنجی متغیرهای مدنظر از جمله جریان رودخانه با استفاده از شاخص‌های P-factor، R-factor، نش- ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) ارزیابی شدند. شاخص P-factor نشان‌دهنده درصد حضور داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) است و مقادیر آن بین صفر تا یک است. هر چقدر P-factor به عدد یک نزدیکتر باشد، تطابق بهتری بین داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی است. شاخص R-factor نشان‌دهنده ضخامت پهنای باند عدم قطعیت (95PPU) است و حالت بهینه آن زمانی است که باند عدم قطعیت که بین صفر تا بینهایت است، کمترین ضخامت را داشته باشد و میزان مطلوب آن کمتر از یک است. مقدار این شاخص توسط روابط ذیل تعیین می‌گردند:

$$\bar{R}_x = \frac{1}{K} \sum_{t=1}^k (x_u - x_l)_t \quad (3)$$

$$R - factor = \frac{\bar{R}_x}{\sigma_x} \quad (4)$$

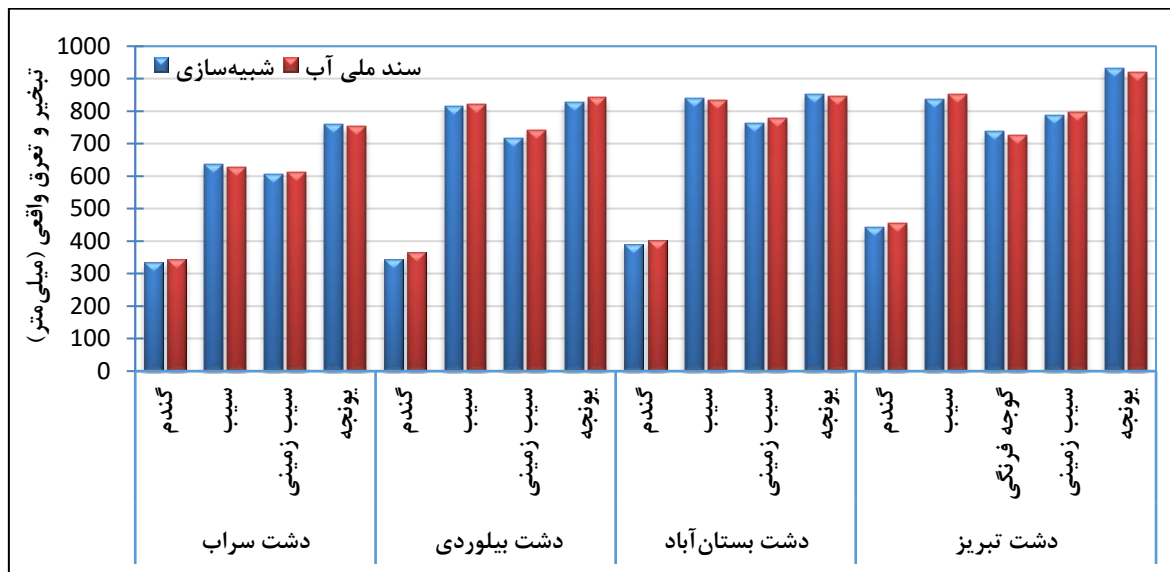
جدول (۲): نتایج واسنجی و صحت‌سنجی جریان رودخانه شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT

<sup>1</sup> SWAT-Calibration and Uncertainty Program

صحت سنجی					واسنجی					نام رودخانه	نام ایستگاه
nRMSE	R-factor	P-factor	NS	R	nRMSE	R-factor	P-factor	NS	R		
۰/۰۸	۰/۵۱	۰/۷۶	۰/۶۲	۰/۸۹	۰/۱	۰/۶۳	۰/۷۲	۰/۵۳	۰/۸۸	تاجیار	میرکوه
۰/۱۱	۰/۷۲	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۷۶	۰/۱۶	۰/۷۹	۰/۵۴	۰/۳۲	۰/۶۳	آغمیون چای	سهباب
۰/۱۳	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۴۸	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۷۴	۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۷۷	آجی چای	ارزئق
۰/۰۹	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۶۱	۰/۹۲	۰/۱۲	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۴۷	۰/۸۳	چکی چای	مهربان
۰/۱۵	۰/۸۰	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۱۹	۰/۹۵	۰/۴۲	۰/۲۹	۰/۷	هرزورز چای	هرزورز
۰/۱۴	۰/۷۹	۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۸۴	۰/۱۶	۰/۷۶	۰/۶۶	۰/۴۷	۰/۷۹	آجی چای	مرکید
۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۵۵	۰/۳	۰/۷۶	۰/۲۶	۰/۸۷	۰/۴۷	۰/۱۴	۰/۸۲	اوجان چای	دیزناب
۰/۱۷	۰/۶۹	۰/۷۴	۰/۳۸	۰/۷۱	۰/۲۳	۰/۸۵	۰/۶۹	۰/۱۹	۰/۶۸	اوجان چای	بستان آباد
۰/۱۲	۰/۶۱	۰/۷۷	۰/۶۵	۰/۸۷	۰/۱۵	۰/۴۷	۰/۸۰	۰/۴۲	۰/۸۵	لیقوان چای	لیقوان
۰/۱۰	۰/۴۸	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۹۲	۰/۱۳	۰/۴۴	۰/۷۶	۰/۴۴	۰/۸۷	لیقوان چای	هروی
۰/۳۸	۱/۳۰	۰/۴۳	۰/۰۱	۰/۵	۰/۳۲	۰/۹۸	۰/۵۲	۰/۱۵	۰/۶	پاژ چای	خواجه
۰/۱۹	۰/۷۲	۰/۷۵	۰/۴۰	۰/۷۴	۰/۱۷	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۴۷	۰/۸۳	نهند چای	سد نهند
۰/۱۶	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۵۴	۰/۸۱	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۷۷	۰/۵۰	۰/۸۶	گمناب چای	آناختون
۰/۸۸	۱/۷	۰/۱۸	۰/۰۲	۰/۴	۱/۱	۱/۳	۰/۲۱	۰/۰۷	۰/۶۳	سعیدآباد چای	سعیدآباد
۰/۱	۰/۵۵	۰/۷۹	۰/۶۷	۰/۹۳	۰/۱۳	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۴۳	۰/۸۸	آجی چای	ونیار
۰/۱۳	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۵	۰/۸۷	۰/۱۵	۰/۷۱	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۷۸	آجی چای	آخولا

سند ملی آب (در سال‌های پرباران) را نشان می‌دهد. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل SWAT عملکرد بسیار خوبی با  $R^2 = 0.95$  و  $RMSE = 20 \text{ mm}$  (احمدزاده و همکاران، ۱۴۰۱) در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی محصولات کشاورزی در طی دوره رشد آنها دارد. بنابراین، از آنجا که مدل SWAT مبتنی بر روابط فیزیکی برای فرآیندهای هیدرولوژیکی توسعه یافته است و همزمان عوامل اقلیمی، محیطی و کاربری‌های اراضی طی زمان‌های مختلف را در برمی‌گیرد، می‌تواند مدل معرف خوبی برای مقادیر شبیه‌سازی شده تبخیر و تعرق واقعی برای منطقه مطالعاتی باشد.

از آنجا که برآورد تبخیر و تعرق واقعی نماینده میزان مصرف واقعی آب در بخش کشاورزی محسوب می‌شود، بنابراین شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی محصولات کشاورزی در مدل SWAT با دقت قابل قبولی بایستی صورت گیرد. برای صحت‌سنجی مقادیر تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده در برخی از دشت‌های اصلی حوضه مورد مطالعه، این مقادیر برای هر کدام از گیاهان کشت شده در طی دوره رشد آنها (در سال‌های پرباران) با مقادیر متناظر ارائه شده در سند ملی آب مقایسه شدند (علیزاده و کمالی، ۱۳۸۷). شکل (۴) مقایسه بین مقادیر تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده محصولات طی دوره رشد آنها با مقادیر نظیر ارائه شده در

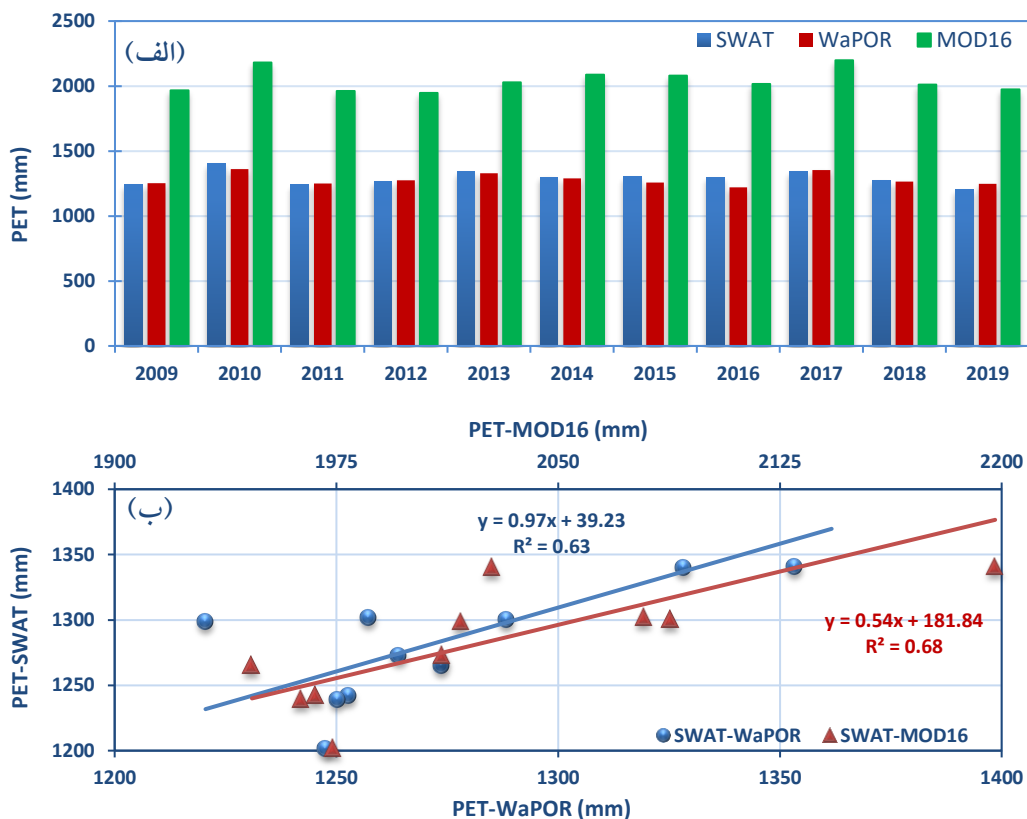


شکل (۴): میانگین تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی و ارائه شده در سند ملی آب برای محصولات کشاورزی در دشت های حوضه آبی چای

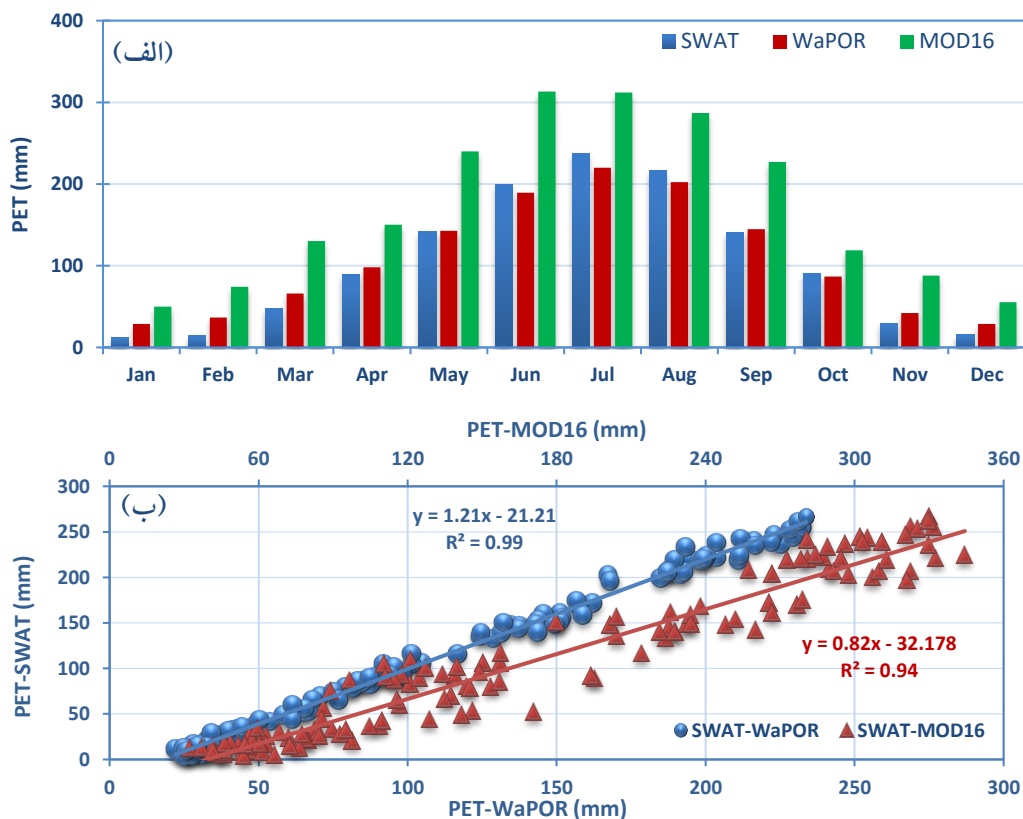
مقایسه خروجی PET محصولات جهانی با مدل SWAT. هرچند، مقادیر PET حاصل از داده MOD16 برای همه ماه ها بیش از مقادیر محصول WaPOR (حدود ۱/۴ تا ۲ برابر) و مدل SWAT (حدود ۱/۳ تا ۵ برابر) برآورد شده است. همچنین، مقایسه نتایج شکل (۶-الف) نشان می دهد که در ماه های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر، مقادیر PET محصول WaPOR بیشتر از مدل SWAT است. همچنین، در سایر ماه ها، نتایج این دو خروجی به یکدیگر نزدیک اند. شکل (۶-ب) در تائید مقایسه بین خروجی ها، رابطه همبستگی بالایی بین داده های ماهانه ماهواره ای WaPOR ( $R^2 = 0.99$ ) و MOD16 ( $R^2 = 0.94$ ) با مدل SWAT را نشان می دهد. شکل (۷) نیز سری زمانی ماهانه مقادیر PET محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک را نشان می دهد. مشاهده می شود که هر سه داده های سری زمانی رفتار نوسانی مشابهی دارند و ماه های ژوئن-جولای بیشینه و دسامبر-ژانویه کمینه مقدار PET را بیان می کنند. اگرچه مدل SWAT و محصول WaPOR دارای مقادیر نزدیک به یکدیگر طی ماه های مختلف همه سال های مورد مطالعه هستند، محصول MOD16 مقادیر بیشتری را برآورد کرده اند.

#### مقایسه خروجی PET محصولات جهانی با مدل SWAT

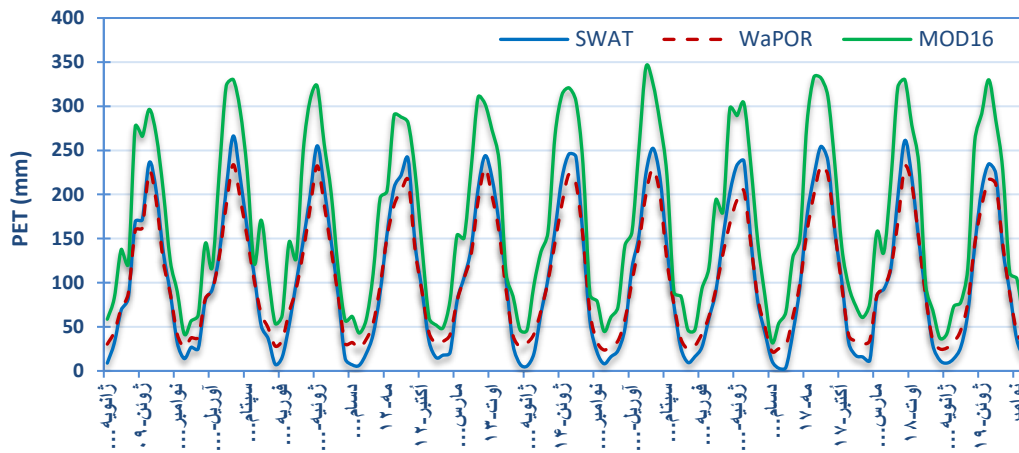
نتایج مقادیر PET سالانه و ماهانه محصولات جهانی WaPOR و MOD16 با مدل SWAT و رابطه همبستگی بین آنها طی دوره مطالعاتی مشترک (۲۰۰۹-۲۰۱۹) در حوضه آبریز آبی چای به ترتیب در شکل های (۵) و (۶) نشان داده شده است. شکل (۵-الف) نشان می دهد که مقادیر PET سالانه محصول WaPOR در طی دوره مشترک تقریباً نزدیک به مقادیر شبیه سازی شده مدل SWAT است، در حالی که مقادیر برآورده شده PET محصول MOD16 حدود ۱/۵ برابر مدل SWAT است. شکل (۵-ب) نیز رابطه همبستگی بین محصولات جهانی WaPOR ( $R^2 = 0.63$ ) و MOD16 ( $R^2 = 0.68$ ) با مدل SWAT را بیان می کند. مشاهده می شود که همبستگی بالایی بین مقادیر شبیه سازی شده با محصولات جهانی PET وجود دارد، هرچند در تائید نتایج شکل (۵-الف)، محصول MOD16 مقادیر بیشتری PET در مقایسه با محصول WaPOR و مدل SWAT برآورد می کند. مقایسه نتایج PET ماهانه مدل SWAT با محصولات ماهواره ای (شکل ۶-الف) بیان می کند که در همه ماه ها اختلاف کمی



شکل (۵): (الف) مقایسه و (ب) رابطه بین مقادیر PET سالانه محصولات جهانی با مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک



شکل (۶): (الف) مقایسه و (ب) رابطه بین مقادیر PET ماهانه محصولات جهانی با مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک

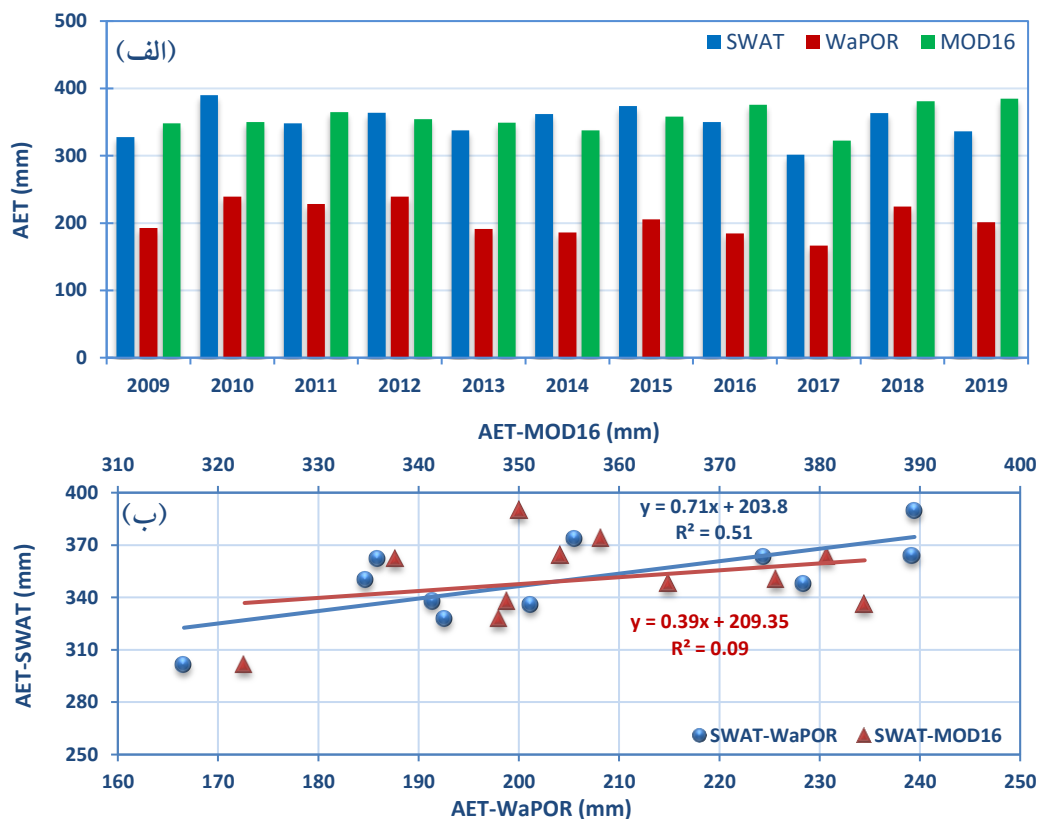


شکل (۷): مقایسه سری زمانی ماهانه مقادیر PET محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک

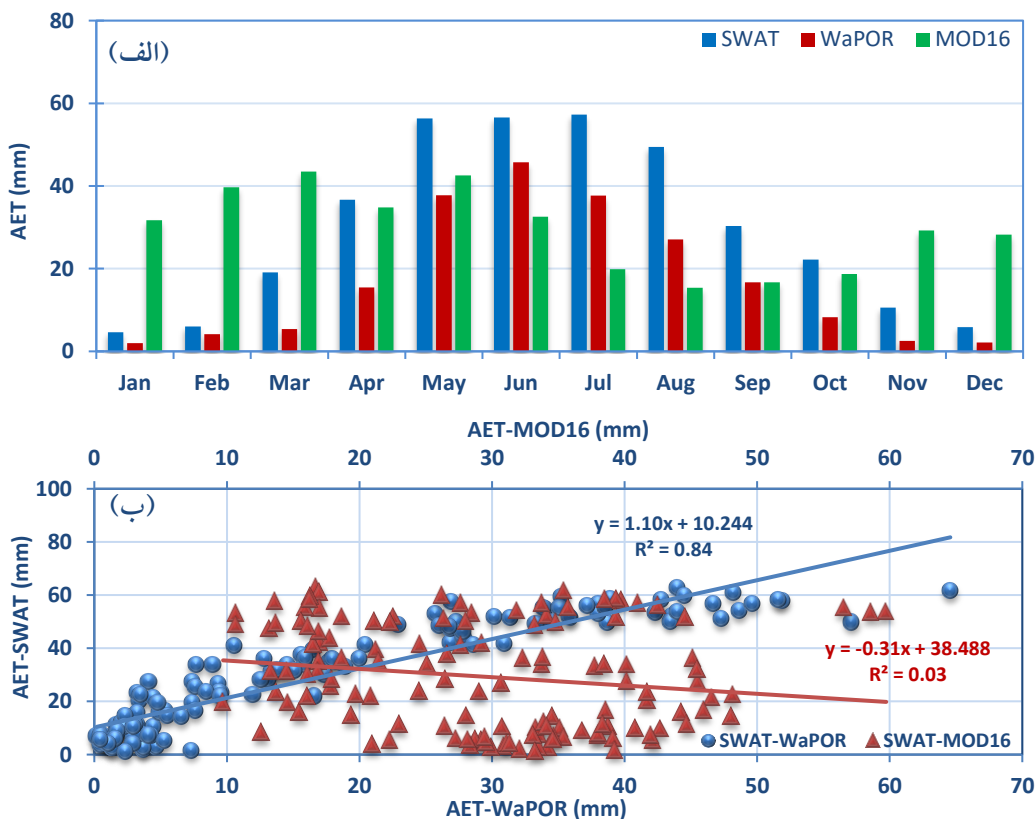
فوریه، نوامبر و دسامبر بیش از مقادیر سایر داده‌ها است، در حالی که در سایر ماه‌ها مقادیر این محصول کمتر از مدل SWAT است. علاوه بر این، مقادیر محصول WaPOR در همه ماه‌ها کمتر از مدل SWAT و در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست این مقادیر بیشتر از محصول MOD16 برآورد شده است. مقایسه نتایج شکل (۹-الف) نشان می‌دهد که مقادیر AET در ماه‌های آوریل و اکتبر برای محصول MOD16 و مدل SWAT و نیز در ماه‌های می و سپتامبر برای پایگاه‌های داده MOD16 و WaPOR به یکدیگر نزدیک‌اند. شکل (۹-ب) در تائید مقایسه بین مقادیر AET، رابطه همبستگی بالایی بین محصول WaPOR و مدل SWAT ( $R^2 = 0.84$ ) را نشان می‌دهد که نشان از همخوانی تغییرات آنها بین ماه‌های مختلف است؛ هرچند، همخوانی بین تغییرات مقادیر AET بین محصول MOD16 و مدل SWAT ( $R^2 = 0.03$ ) مشاهده نمی‌شود. شکل (۱۰) نیز سری زمانی ماهانه مقادیر AET محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بر خلاف شکل (۷) در مورد مقادیر PET، رفتار نوسانی مشابهی بین هر سه داده‌های سری زمانی وجود ندارد؛ به نحوی که بیشترین همخوانی تغییرات مقادیر ماهانه طی سال‌های مطالعاتی بین مقادیر WaPOR و SWAT وجود دارد.

### مقایسه خروجی AET محصولات جهانی با مدل SWAT

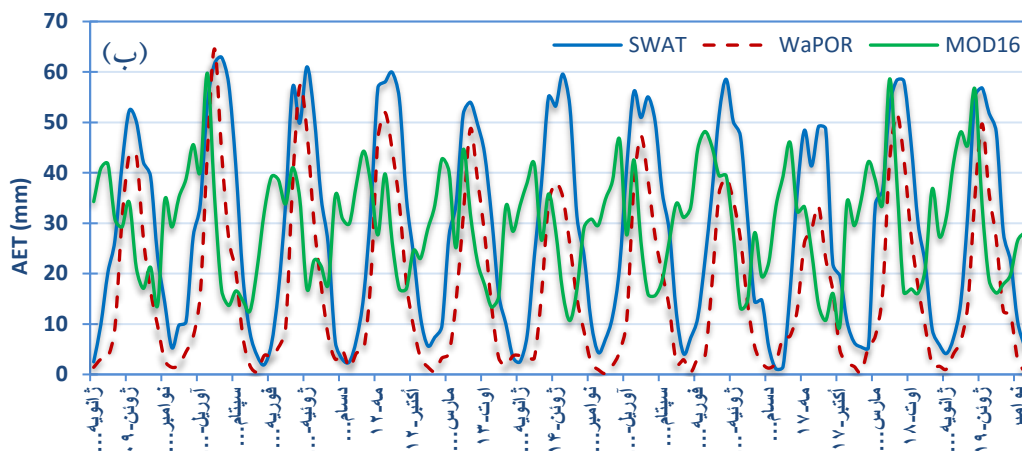
نتایج مقادیر AET سالانه و ماهانه محصولات جهانی WaPOR و MOD16 با مدل SWAT و رابطه همبستگی بین آنها طی دوره مطالعاتی مشترک (۲۰۰۹-۲۰۱۶) در حوضه آبریز آجی‌چای به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. شکل (۸-الف) بر خلاف مقادیر PET (شکل ۵) نشان می‌دهد که مقادیر AET سالانه محصول MOD16 در طی دوره مشترک تقریباً نزدیک به مقادیر شبیه‌سازی شده مدل SWAT است، در حالی که مقادیر برآورده شده AET محصول WaPOR حدود ۵۰-۶۰ درصد کمتر از مدل SWAT است. شکل (۸-ب) نیز رابطه همبستگی بین محصولات جهانی AET با مدل SWAT در مقیاس سالانه را بیان می‌کند. مشاهده می‌شود که اگرچه مقادیر WaPOR کمتر از مدل SWAT است، اما به دلیل همخوانی روند تغییرات مقادیر، همبستگی بیشتری بین آنها ( $R^2 = 0.51$ ) نسبت به رابطه بین مقادیر MOD16 ( $R^2 = 0.09$ ) با مدل SWAT وجود دارد. مقایسه نتایج AET ماهانه مدل SWAT با محصولات ماهواره‌ای (شکل ۹-الف) بیان می‌کند که در همه ماه‌ها رفتار متفاوتی بین مقادیر AET پایگاه‌های داده و مدل SWAT وجود دارد. مقادیر AET حاصل از محصول MOD16 برای ماه‌های ژانویه،



شکل (۸): (الف) مقایسه و (ب) رابطه بین مقادیر AET سالانه محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک



شکل (۹): (الف) مقایسه و (ب) رابطه بین مقادیر AET ماهانه محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک



شکل (۱۰): مقایسه سری زمانی ماهانه مقادیر AET محصولات جهانی و مدل SWAT طی دوره مطالعاتی مشترک

## بحث و نتیجه‌گیری

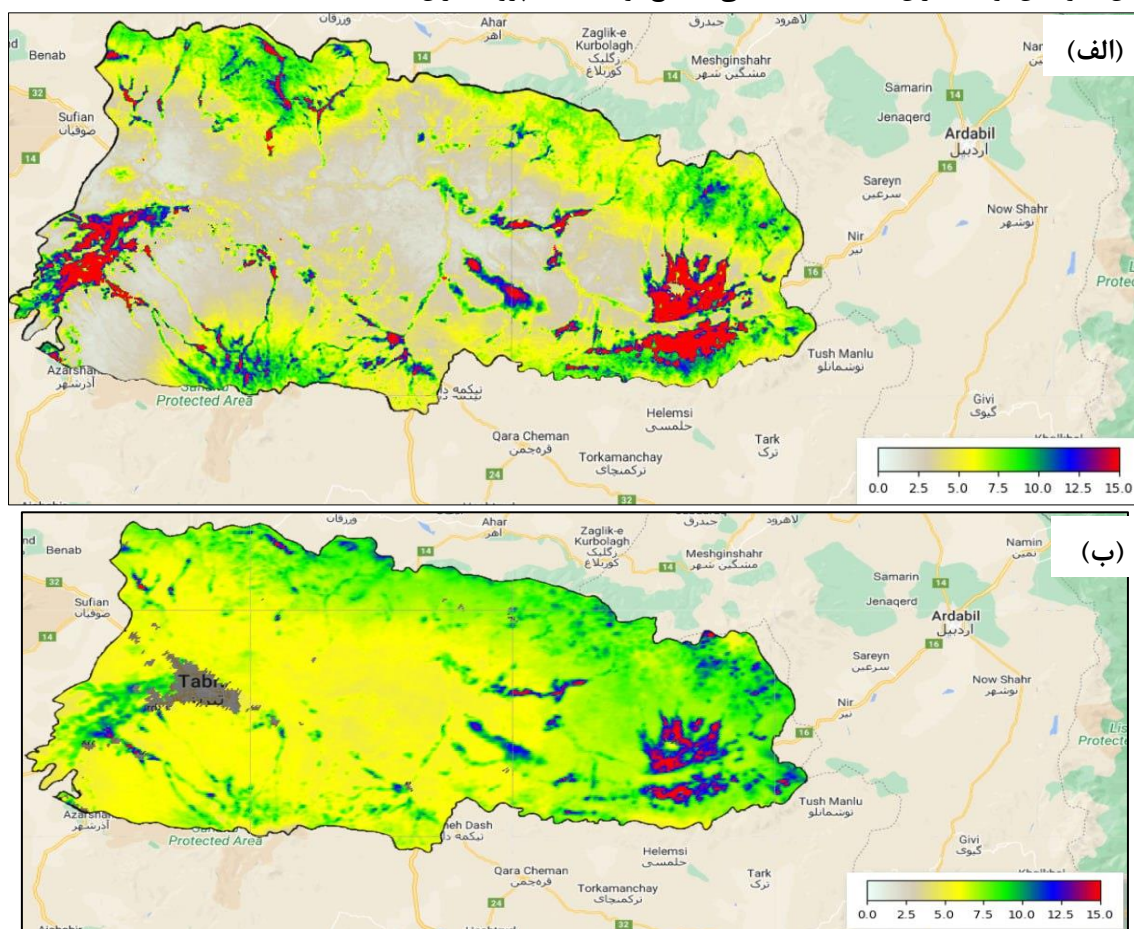
در مطالعه حاضر، برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی با استفاده از مدل SWAT و فناوری سنسجش از دور در پلتفرم گوگل ارث انجین در حوضه آبی‌چای دریاچه ارومیه بررسی و مقایسه شده است. هریک از این ابزارها دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند و استفاده از آنها می‌تواند به بهبود ارزیابی منابع آبی کمک کند. گاهی اوقات، برآورد تبخیر و تعرق توسط این ابزارها با مقادیر واقعی در حوضه‌ها دارای تفاوت‌هایی است و دلیل آن مطابق پژوهش‌های جوادیان و همکاران (۱۳۹۸) می‌تواند عواملی مانند داده‌های ورودی، مدل‌های استفاده شده و محدودیت‌های ابزارها باشد. علت این تفاوت‌ها در مقادیر تبخیر و تعرق محصولات ماهواره‌ای و مدل‌های مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی مانند SWAT این است که الگوریتم‌های حاکم بر محصولات جهانی بومی‌سازی نشده‌اند و واسنجی در مکان‌های مختلف برای آنها انجام نشده است. لذا، می‌توان با استفاده از داده‌های زمینی و مشاهده میدانی، این تفاوت‌ها را کاهش داد و به دقت برآوردها افزود. نتایج پژوهش ما نشان داد که تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی محصول جهانی WaPOR به طور کلی نسبت به MOD16 بیشترین تطابق و همخوانی را با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل هیدرولوژیکی-گیاهی SWAT دارد. همانطور که بیان شد، الگوریتم‌های مورد استفاده در محصولات جهانی بر پایه معادله بیلان انرژی استوار هستند و از آنجا که الگوریتم ETLook در محصول WaPOR

## تحلیل مکانی تبخیر و تعرق واقعی

پراکندگی مکانی میانگین تبخیر و تعرق واقعی بر حسب میلی‌متر بر روز طی دوره مطالعاتی مشترک برای محصولات جهانی (الف) WaPOR و (ب) MOD16 در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که از لحاظ مکانی نیز محصول WaPOR نسبت به MOD16، تغییرات میانگین روزانه تبخیر و تعرق واقعی را طی دوره مطالعاتی مشترک برای حوضه آبی‌چای بهتر نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، دامنه تغییرات تبخیر و تعرق واقعی برای پراکندگی مکانی محصول WaPOR (شکل ۱۱-الف) بیشترین تطابق را با نقشه کاربری اراضی (شکل ۱-ج) استخراج شده از منطقه مطالعاتی دارد. از تطابق شکل‌ها مشاهده می‌شود که اراضی با کشت آبی شامل اراضی باغی، محصولات تابستانه و بهاره، یونجه و علوفه‌جات، میزان آب خالص مصرفی آنها (بیش از ۷ میلی‌متر بر روز) بیشتر از سایر کاربری اراضی است. علاوه بر این، بر طبق شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که بیشترین مصرف آب خالص کشاورزی هم در بالادست حوضه (دشت سراب و بستان آباد) و هم در پایین‌دست حوضه (دشت تبریز) وجود دارد؛ به نحوی که در نیمه جنوبی روخانه آبی‌چای با توجه به کاربری اراضی کشاورزی آبی بیشتر، مصرف خالص آب کشاورزی بیشتر از نیمه شمالی روخانه است.

همکاران (۱۴۰۰)، Javadian et al., 2019 و مراجع‌های استناد شده در آن‌ها، می‌توان به این نکات اشاره کرد که استفاده از محصولات جهانی دارای پوشش مکانی وسیع‌تر و تفکیک زمانی بالاتر، آسان‌تر بوده و به منابع محاسباتی کمتری نسبت به مدل‌های مبتنی بر فرآیند فیزیکی نیاز دارند. اما در مقابل، محصولات جهانی دارای دقت، قابلیت اطمینان، تفکیک مکانی، انعطاف‌پذیری و عملکرد کمتری نسبت به مدل‌های مبتنی بر فرآیند فیزیکی هستند. به طور کلی می‌توان از یافته‌های این پژوهش دریافت که اگرچه محصول WaPOR نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT (که نماینده بسیار خوبی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقایسه با مقادیر ارائه شده در سند ملی آب است) برآورد کمتری دارد، اما به دلیل داشتن توزیع مکانی مناسب و در دسترس بودن داده‌ها همچنان مورد توجه پژوهشگران است.

توانسته با استفاده از نگرش‌های جدید، ضعف سایر الگوریتم‌های تک‌منبعی و دومنبعی را برطرف سازد، عملکرد بهتری از خود نشان داده است. هرچند، جوادیان و همکاران (۱۳۹۸) در ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق واقعی دریافتند با وجود آن که الگوریتم ETLook کارایی محصولات جهانی را بهبود بخشیده، اما تفاوت زیاد در برآورد تبخیر و تعرق واقعی این محصول با داده‌های زمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که استفاده از آن چندان مناسب نیست. هرچند، دهقانی سانچ و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که داده‌های محصول جهانی WaPOR می‌تواند برآورد قابل اطمینانی از میزان مصارف آب کشاورزی ارائه و نقش مهمی در مدیریت منابع آب داشته باشند. در ارزیابی مزایا و معایب مدل‌ها و روش‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، با توجه به یافته‌های پژوهش جوادیان و همکاران (۱۳۹۸)، دهقانی سانچ و



شکل (۱۱): پراکندگی مکانی میانگین تبخیر و تعرق واقعی (میلی‌متر بر روز) در حوضه آبریز آبی چای طی دوره مطالعاتی مشترک برای محصولات جهانی (الف) WaPOR و (ب) MOD16



## منابع

- احمدزاده ح.، ا. فاخری فرد، م. ع. قربانی و م. تجربی. ۱۴۰۱. ارزیابی تأثیر توأم تغییر منغیرهای اقلیمی و کاربری اراضی بر روند تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبی‌چای. نشریه علوم آب و خاک، ۲۶(۳)، ۳۴-۱۵.
- باقری هارونی، ص. ارشد، ا. مجنونی و س. مرید. ۱۳۹۱. مقایسه مدل‌های تک منبعی و دو منبعی سنجش از دور مبتنی بر شار انرژی در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در دشت تبریز. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال چهارم، شماره ۱، ص ۸۱-۹۶.
- جوادیان، م. ف. کردی و م. تجربی. ۱۳۹۸. بررسی و مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. اکوهیدرولوژی، ۶(۱)، ۱۳۶-۱۲۵.
- باقری هارونی، م. ح. و ف. فتحیان. ۱۴۰۲. پایش مصرف آب کشاورزی در حوضه‌های آبریز مشترک با سنجش از دور در پلتفرم گوگل ارث انجین (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود). شانزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، <https://civilica.com/doc/1804736>
- دهقانی سانج، ح. ا. اسعدی اسکویی و ا. تقی‌زاده قصاب. ۱۴۰۰. تحلیلی بر آب مصرفی بخش کشاورزی مبتنی بر تبخیر و تعرق واقعی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۶، جلد ۱۵، ۱۲۶۲-۱۲۵۱.
- رحیم‌پور، م. ن. کریمی، ر. روزبهانی، م. افتخاری. ۱۳۹۷. اعتبارسنجی و تصحیح محصول تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده از محصول WaPOR فائو در ایران با استفاده از داده‌های زمینی. تحقیقات منابع آب ایران(۲)، ۱۴، ۲۶۳-۲۵۴.
- علیزاده، ا. و ق. کمالی. ۱۳۸۷. نیاز آبی گیاهان در ایران. ناشر: دانشگاه امام رضا، مشهد. چاپ دوم.
- مربوطه، ب. ا. اشرف زاده، م. وظیفه دوست و م. ر. خالدیان. ۱۳۹۷. مقایسه تبخیر-تعرق واقعی محصول MOD16 و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP (مطالعه موردی: مزارع تحت کشت ذرت در استان قزوین). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲)، ۹۳-۸۱.
- Abbasi, N., H. Nouri, K. Didan, A. Barreto-Muñoz, S. Chavoshi Borujeni, H. Salemi, C. Opp, S. Siebert and P. Nagler. 2021. Estimating actual evapotranspiration over croplands using vegetation index methods and dynamic harvested area. *Remote Sensing*, 13(24), 5167, 27p.
- Abbasi, N., H. Nouri, K. Didan, A. Barreto-Muñoz, S. Chavoshi Borujeni, S., C. Opp, P. Nagler, P. S. Thenkabail, and S. Siebert. 2023. Mapping vegetation index-derived actual evapotranspiration across croplands using the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing*, 15(4), 1017.
- Adjei, F. O., E. Obuobie, K. A. Adjei and S. N. Odai. 2023. Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT in the Densu river basin in Ghana. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 921-930.
- Arnold, J. G. and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563-572.
- Bagheri, M.H., S. Morid and S. Arshad 2017. Application of remotely-sensed data to estimate a water budget for data-scarce endorheic basins: A case study of Lake Urmia basin, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 45: 101-112.
- Barzkar, A., S. Shahabi, S. Niazmradi and M.R. Madadi. 2021. A comparative study of remote sensing and gene expression programming for estimation of evapotranspiration in four distinctive climates. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35, 1437-1452.
- Bhattarai, N. and P. Wagle. 2021. Recent Advances in Remote Sensing of Evapotranspiration. *Remote Sensing*, 13(21), 4260.
- Blatchford, M. L. C. M. Mannaerts, S. M. Njuki, H. Nouri, Y. Zeng, H. Pelgrum, S. Wonink and P. Karimi. 2020. Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*, 34(15), 3200-3221.
- Chen, X., S. Yu, H. Zhang, F. Li, C. Liang and Z. Wang. 2023. Estimating the Actual Evapotranspiration Using Remote Sensing and SEBAL Model in an Arid Environment of Northwest China. *Water*, 15(8), 1555.
- Ferreira, A. D. N., A. de Almeida, S. Koide, R. T. Minoti and M. B. B. D. Siqueira. 2021. Evaluation of



- evapotranspiration in Brazilian Cerrado Biome simulated with the SWAT model. *Water*, 13(15), 2037.
- Javadian, M., A. Behrangi, M. Gholizadeh and M. Tajrishy. 2019. METRIC and WaPOR estimates of evapotranspiration over the Lake Urmia Basin: comparative analysis and composite assessment. *Water*, 11(8), 1647.
- Mu, Q., M. Zhao and S. W. Running. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781-1800.
- Mukpuou, S. M., A. Pandey and V. M. Chowdary. 2020. Reference Crop Evapotranspiration Estimation Using Remote Sensing Technique. In: Pandey A., Chowdary V.M., Mal BC. (eds) *Water Management and Water Governance*. Water Science and Technology Library, vol 96. Springer, Cham.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry and J. R. Williams. 2011. Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009). Texas Water Resource Institute Technical Report.
- Olchev, A., A. Ibrom, J. Priess, S. Erasmi, C. Leemhuis, A. Twele, K. Radler, H. Kreilein, O. Panferov, and G. Gravenhorst. 2008. Effects of land-use changes on evapotranspiration of tropical rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia): Modelling study with a regional SVAT model. *Ecological Modelling*, 212 (1-2), 131-137.
- Rane, N.L. and G. K. Jayaraj. 2023. Enhancing SWAT model predictivity using multi-objective calibration: effects of integrating remotely sensed evapotranspiration and leaf area index. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 20, 6449–6468.
- Running, S. W., Q. Mu, M. Zhao and A. Moreno. 2019. MODIS global terrestrial evapotranspiration (ET) product (MOD16A2/A3 and year-end gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (for collection 6). National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA [data set], <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2>, 6.
- Vörösmarty, C. J., P. Green, J. Salisbury and R. B. Lammers. 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science, American Association for the Advancement of Science*, 289(5477), 284–288.