

Research Paper

Evapotranspiration Products Assessment Using FAO-Penman-Monteith Method in Zayandehrood BasinMaryam Amin Fanak¹, Ali Shamsoddini^{2*}, Seyed Majid Mirlatifi³

1. M.Sc., Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,
3. Associate Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2021/10/15
Accepted: 2022/6/14**ABSTRACT**

Evapotranspiration is one of the most important parameters of the water cycle that its correct estimation is important in water resources management, especially in arid and semi-arid climates. With the development of remote sensing, methods were developed to produce evapotranspiration products using satellite data. In this study, the output of evapotranspiration products including GLEAM, GLDAS, and MOD16A2 were compared with the evapotranspiration of the FAO-Penman-Monteith method during wet, normal, and dry years in the Zayandehrood basin. R^2 , RMSE, BIAS, and IOA statistical indices were used to evaluate the results. Also, simple Taylor skill fusion method was used to combine the products. The results showed that compared to the FAO-Penman-Monteith method MOD16A2 and GLDAS overestimated and GLEAM underestimated the rate of reference evapotranspiration during the wet, normal, and dry years. RMSE values for these products ranged from 37.4 to 47.6, from 136.2 to 141.4, and from 92.8 to 98.7 mm per month, respectively. GLEAM and GLDAS yielded lower errors in the wet years than in the dry and normal years, while the MOD16A2 product had better performance in the dry years. Also, the results of the combined product showed a better performance than individual products in the basin and in different humidity conditions.

Keywords:

GLDAS, GLEAM, MOD16A2, Remote Sensing

***Corresponding Author:** Associate Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.16059689.1401.26.2.3.7>

<https://doi.org/10.2022/hsmssp.26.2.4>

ORCID: 0000-0002-4559-7563

ali.shamsoddini@modares.ac.ir

E

Extended Abstract**Introduction**

vapotranspiration after precipitation is the main component of the hydrological cycle that determines water requirement. During the last 50 years, many experimental methods have been proposed to estimate evapotranspiration, each of which is a function of specific climatic variables. These methods fall into two main groups: direct methods and indirect methods (Sharifan et al., 2017: 284). But these methods can only determine the rate of evapotranspiration on a point-by-point basis and for specific times, and are practically unusable for wider areas. However, remote sensing methods have found a special place in estimating evapotranspiration in recent years due to continuous observations of the earth's surface by environmental and meteorological satellites, even in basins with no information. Recently, several research centers around the world have presented various evapotranspiration products, the information of which is obtained through ground-based station data, remote-sensing data, or a combination of both (Yarahmadi et al., 2019: 1025).

Methodology

Zayandehrood basin is one of the closed basins of Iran, which has an area of 41347 square kilometers. Meteorological data for synoptic stations of the Zayandehrood basin area were received from the Iran Meteorological Organization. Then, the daily reference evapotranspiration rate was calculated by the FAO-Penman-Monteith equation for all selected synoptic stations of Zayandehrood basin during wet (2004 and 2006), normal (2007 and 2011), and dry (2001 and 2008) years. Also in the present study, 288 images of MOD16A2 potential evapotranspiration product with eight-day time coverage and spatial resolution of 500 meters were used for the entire H22V05 zone during the mentioned statistical period. After performing the necessary processing, the total potential evapotranspiration was extracted for each of the stations. Then, the evapotranspiration (Potential Evaporation Rate) data from GLDAS-Noah model with a spatial resolution of 28 km were received monthly in wet, normal, and dry years for selected synoptic stations. Also in this study, GLEAM V3.2a data set with a statistical period of 38 years (1980-2018) was used and the evapotranspiration (Potential Evaporation) parameter, which is in millimeters per month, was extracted for the study area. Finally, due to uncertainty in the algorithms of each of the products, simple Taylor skill fusion method was used to produce a new product.

Results and discussion

Statistical indices between evapotranspiration from the FAO-Penman-Monteith equation and evapotranspiration products data for different years were calculated as shown in Table 1. In this study, the output of evapotranspiration products was compared with the FAO-Penman-Monteith equation in wet, normal, and dry years of the Zayandehrood basin. The results showed that compared to the FAO-Penman-Monteith method the two products of MOD16A2 and GLDAS overestimated and GLEAM underestimated the rate of reference evapotranspiration during the wet, normal, and dry years. RMSE values for these products ranged from 37.4 to 47.6, from 136.2 to 141.4, and from 92.8 to 98.7 mm per month, respectively. GLEAM and GLDAS yielded lower errors in the wet years than in the dry and normal years, while the MOD16A2 product had better performance in the dry years. The results also showed that the combined product had a higher correlation than individual products, so that the coefficients of determination for GLEAM, GLDAS, MOD16A2, and the combined product were 0.63, 0.73, 0.82, and 0.95, respectively.

Conclusion

In this study, the accuracy of GLEAM, GLDAS, and MOD16A2 evapotranspiration products was evaluated using the FAO-Penman-Monteith method in the Zayandehrood basin. The results showed that compared to the FAO-Penman-Monteith method MOD16A2 and GLDAS products overestimate the amount of reference evapotranspiration while the GLEAM product underestimate it. Also, the results showed that the combined product had a better performance than individual products.

ارزیابی عملکرد محصولات تبخیر- تعرق با استفاده از روش فائو- پنمن - مانیتیت در حوضه آبریز زاینده رود

مریم امین فنک^۱، علی شمس الدینی^{۲*}، مجید میرلطیفی^۳

۱. کارشناسی ارشد آبیاری-زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲. دانشیار گروه سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۳. دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

تبخیر-تعرق یکی از مهم ترین پارامترهای چرخه آب است که برآورد صحیح آن در مدیریت منابع آب، به ویژه در اقلیم های خشک و نیمه خشک، حائز اهمیت است. همگام با توسعه سنجش از دور، روش هایی به منظور تهیه محصولات تبخیر-تعرق با استفاده از داده های ماهواره ای توسعه یافته است. در این پژوهش، خروجی محصولات تبخیر-تعرق GLEAM، GLDAS و MOD16A2 با تبخیر-تعرق حاصل از روش فائو-پنمن-مانیتیت در طی سال های پربارش، نرمال و کم بارش در حوضه زاینده رود مقایسه شده است. شاخص های آماری R^2 ، RMSE، BIAS و IOA به منظور ارزیابی نتایج، مورد استفاده بوده است. همچنین برای ترکیب محصولات از روش ادغام مهارت ساده تیلور استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که دو محصول MOD16A2 و GLDAS میزان تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به روش فائو-پنمن-مانیتیت طی سال های پربارش، نرمال و کم بارش بیشتر و محصول GLEAM کمتر برآورد کرده است. مقادیر RMSE برای این محصولات به ترتیب از ۳۷/۴ تا ۴۷/۶، از ۱۳۶/۲ تا ۱۴۱/۴ و از ۹۲/۸ تا ۹۸/۷ میلی متر در ماه متغیر است. میزان خطای دو محصول GLEAM و GLDAS در سال های پربارش کمتر از سال های کم بارش و نرمال است؛ در حالی که محصول MOD16A2 در سال های کم بارش عملکرد بهتری داشته است. همچنین نتایج حاصل از ترکیب محصولات نشان می دهد محصول تولید شده عملکرد بهتری نسبت به سایر محصولات در سطح حوضه و در شرایط رطوبتی مختلف داشته است.

سنجش از دور، GLEAM، GLDAS، MOD16A2

واژگان کلیدی:

۱. مقدمه

افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی و وقوع خشک‌سالی‌های اخیر، مشکلات زیادی در مدیریت منابع آب به وجود آورده است؛ لذا برای خروج از بحران آب، نیاز به مدیریت صحیح کشاورزی و منابع آب است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۸۴). یکی از مهم‌ترین پارامترها در این راستا، برآورد تبخیر-تعرق^۱ است. تبخیر-تعرق بعد از بارش، اصلی‌ترین جزء چرخه هیدرولوژیکی است که به‌عنوان یک فرآیند کلیدی تعریف می‌شود (قره‌لو و قاسمی‌فر، ۱۳۹۸: ۱۹۴). طبق مطالعاتی که در مناطق اقلیمی مختلف صورت گرفته است، ۵۰ تا ۷۵ درصد بارش سالانه از طریق تبخیر-تعرق بدون هیچ تأثیر مثبتی بر روی زیست توده به اتمسفر بازمی‌گردد (فرجی و همکاران، ۱۳۹۶: ۲۸۴). در طی پنجاه سال گذشته روش‌های تجربی زیادی برای تخمین تبخیر-تعرق ارائه شده که هریک تابع متغیرهای اقلیمی خاصی است. این روش‌ها در دو گروه اصلی قرار می‌گیرد که شامل روش‌های مستقیم و غیرمستقیم (شریفان و همکاران، ۱۳۸۵: ۲۰) است. معمول‌ترین روش مستقیم برآورد تبخیر-تعرق، استفاده از لایسیمتر وزنی است. از میان روش‌های غیرمستقیم محاسبه تبخیر-تعرق گیاه نیز می‌توان به روش فائوپنمن-مانتیت اشاره کرد. این روش به‌عنوان روشی استاندارد برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع از طرف کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی^۲ (ICID) و سازمان خواربار و کشاورزی جهانی^۳ (FAO) معرفی شده است (Allen et al., 1998: 8) که طی سال‌های اخیر از طرف عدّه زیادی از متخصصان علوم کشاورزی، هواشناسی و آبیاری مورد استفاده قرار گرفته است (لشکری و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۴۹). اما این روش‌ها تنها می‌تواند میزان تبخیر-تعرق را به‌صورت نقطه‌ای و برای زمان‌های مشخصی تعیین کند و برای ناحیه‌های وسیع‌تر عملاً قابل استفاده نیست (سهیلی‌فر و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۵۳). این محدودیت‌ها موجب توسعه استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های سنجش‌ازدور در تعیین تبخیر-تعرق در سطوح وسیع می‌شود (مباشری و همکاران، ۱۳۸۶: ۱۲۲). در این روش‌ها، امکان برآورد تبخیر-تعرق واقعی و مرجع در مقیاس منطقه‌ای با قدرت تفکیک مکانی مناسب و قدرت تفکیک زمانی چند ساعت تا چند روز با هزینه و زمان کمتر قابل انجام است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۴: ۴۱). اخیراً تعدادی از مراکز پژوهشی دنیا، محصولات تبخیر-تعرق مختلفی ارائه کرده‌اند که اطلاعات این محصولات از طریق داده‌های ایستگاه‌های زمینی، داده‌های سنجش‌ازدور یا ترکیبی از هر دو حاصل می‌شود (یاراحمدی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۰۲۵). به‌منظور اعتبارسنجی این محصولات، مطالعاتی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است. دیو و سان^۴ (۲۰۱۲: ۱۷۱۸)، تبخیر-تعرق را در حوضه رودخانه تکسی^۵ در کشور چین طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ میلادی با استفاده از دو محصول MODIS و GLDAS^۶ به دست آورده‌اند. آن‌ها از داده‌های MODIS و داده‌های محصول GLDAS (شامل دمای هوا و رطوبت ویژه)

1. Evapotranspiration
2. International Commission on Irrigation and Drainage
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations
4. Du & Sun (2012)
5. Tekesi
6. Global Land Data Assimilation System

به عنوان داده های ورودی برای معادله پریستلی-تیلور استفاده کرده اند. از مقایسه نتایج معادله پریستلی-تیلور با نسبت باون^۱ ضریب تعیین ۰/۵۹ به دست آمده است. کیم و همکاران^۲ (۲۰۱۲: ۲۳۶)، عملکرد محصول MOD16 را در کاربری های اراضی مختلف در کره جنوبی مورد بررسی قرار داده اند. ایشان در این تحقیق از پارامترهای اقلیمی ۱۷ ایستگاه ادی کواریانس از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ برای اعتبارسنجی استفاده کرده اند. از این ۱۷ ایستگاه، ۱۳ ایستگاه دارای پوشش جنگلی، دو ایستگاه مرتع و دو ایستگاه دیگر زمین زراعی بوده اند. متوسط بارش در این ایستگاه ها از ۲۸۲ تا ۳۳۰۰ میلی متر در سال متغیر بوده است. نتایج نشان می دهد که بهترین عملکرد این محصول در مناطق دارای پوشش جنگلی با ضریب همبستگی بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۶ و BIAS بین ۱/۴۲- تا ۱/۹۹ میلی متر در هشت روز و RMSE بین ۱/۹۹ تا ۸/۹۶ میلی متر در هشت روز بود. مرادی و همکاران (۱۳۹۴: ۳۹) به ارزیابی صحت محصول تبخیر-تعرق MOD16A2 در دوره آماری سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ در استان زنجان پرداخته اند. ایشان مقدار تبخیر-تعرق مرجع را با گام زمانی روزانه با استفاده از روش فائوپنمن-مانیتش در چهار ایستگاه همدیدی محاسبه کرده اند. نتایج بررسی ها نشان می دهد محصول MOD16A2 میزان تبخیر-تعرق مرجع را در سه ایستگاه استان زنجان کمتر از میزان محاسبه شده توسط روش فائوپنمن-مانیتش برآورد می کند. فرجی و همکاران (۱۳۹۶: ۲۸۹) تبخیر-تعرق را در استان قزوین طی سال های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ با استفاده از داده های محصول جهانی GLDAS به دست آورده اند. ایشان همچنین مقدار تبخیر-تعرق را توسط لایسیمتر به عنوان داده های مشاهده ای محاسبه کرده اند. از مقایسه داده های تبخیر-تعرق محصول GLDAS و لایسیمتر، مقادیر $R^2 = 0.95$ و $RMSE = 0.68$ میلی متر در ماه به دست آمد. دگانو و همکاران^۳ (۲۰۱۸: ۴) نیز محصول تبخیر-تعرق مرجع MOD16 را در آرژانتین با استفاده از اندازه گیری های زمینی طی سال های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ برای ۲۴ ایستگاه مورد ارزیابی قرار داده اند. آن ها تبخیر-تعرق مرجع را با استفاده از روش فائوپنمن-مانیتش محاسبه کرده اند. محدوده BIAS بین ± 0.9 و ± 2.1 میلی متر در روز پاییز-زمستان و بین ± 1.6 و ± 2.6 میلی متر در روز بهار-تابستان به دست آمد و مقدار R^2 برای هر دو مجموعه نزدیک ۰/۷۰ بود. جیا و همکاران^۴ (۲۰۱۸: ۴۲۰) به اعتبارسنجی محصول تبخیر-تعرق واقعی MOD16 با استفاده از داده های Flux Tower در تالاب پانجین^۵ در شمال شرقی چین پرداخته اند. ایشان از داده های تبخیر-تعرق هشت روزه Flux Tower در سال ۲۰۰۵ استفاده کرده اند و آن را با خروجی محصول MOD16 مقایسه نموده اند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که در فصل بهار و پاییز، مقدار BIAS به ترتیب ۲/۲۷- و ۳/۵۳- میلی متر در هشت روز است که بیانگر برآورد کمتر تبخیر-تعرق واقعی توسط این محصول است. همچنین نتایج مربوط به BIAS در طول تابستان دارای مقدار ۱/۷۷ میلی متر در هشت روز بود که نشان دهنده برآورد بیشتر است. بای و لیو^۶ (۲۰۱۸: ۷۴۳) به مقایسه و ارزیابی محصولات تبخیر-تعرق شامل GLDAS، GLEAM^۷ و NTSG^۸ با قدرت تفکیک مکانی بالا در چین

1. Bowen Ratio

2. Kim et al. (2012)

3. Degano et al. (2018)

4. Jia et al. (2018)

5. Panjin Wetland

6. Bai and Liu (2018)

7. Global Land Evaporation Amsterdam Model

8. Numerical Terradynamic Simulation Group

پرداخته‌اند. ارزیابی‌ها در مقیاس ایستگاه به‌وسیله هشت ایستگاه هواشناسی و در مقیاس حوضه توسط ۲۲ رودخانه در دوره زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۳ انجام شده است. میانگین مقادیر R^2 برای محصولات GLEAM، GLDAS و NTSG به‌ترتیب ۰/۷۷، ۰/۵۶ و ۰/۷۷ بوده و مقادیر BIAS برای این سه محصول به‌ترتیب ۲۲/۵، ۴۳/۰ و ۲۲/۲ درصد بوده است. با توجه به عملکرد متفاوت محصولات تبخیر-تعرق در مناطق مطالعاتی مختلف و همچنین به‌دلیل ساختار متفاوت هریک از این محصولات، هنوز در شبیه‌سازی منطقه‌ای تبخیر-تعرق عدم قطعیت‌هایی وجود دارد. این مسئله با استفاده از روش‌های ترکیب محصولات تا حدودی حل شده است (Yao et al., 2017: 509). لذا در این تحقیق از روش ادغام مهارت ساده تیلور^۱ استفاده شد. یائو و همکاران^۲ (۲۰۱۷: ۵۰۸) به‌منظور ادغام داده‌های محصولات تبخیر-تعرق PT-JPL، SW^۴، RS-PM^۳، MS-PT^۵ و SIM^۶ از روش مهارت ساده تیلور استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که محصول تولیدشده با کاهش خطای میانگین مربعات به دو تا پنج وات بر متر مربع در مقایسه با هریک از محصولات اولیه بهترین عملکرد را داشته است. با توجه به اینکه بخش وسیعی از حوضه آبریز زاینده‌رود در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، برآورد تبخیر-تعرق مرجع به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم بیلان آب در این حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرفی میزان بارندگی در قسمت‌های مختلف این حوضه متغیر است، لذا هر تغییری در میزان بارش از طریق تغییر در الگوی دما می‌تواند بر فرآیند تبخیر-تعرق مرجع تأثیرگذار باشد. بنابراین هدف این مطالعه، امکان‌سنجی استفاده از مقادیر تبخیر-تعرق مرجع حاصل از محصولات GLEAM، GLDAS، MOD16A2 در نواحی موردنظری است که به‌دلیل عدم وجود ایستگاه‌های هواشناسی امکان برآورد تبخیر-تعرق مرجع آن‌ها با استفاده از روش فائوپنمن-مانتیش وجود ندارد. همچنین در این تحقیق علاوه بر تجزیه و تحلیل عملکرد هریک از این محصولات، برای اولین بار عملکرد محصول حاصل از ادغام این سه روش با استفاده از روش ادغام مهارت ساده تیلور به‌منظور تعیین تبخیر-تعرق با توجه به پارامتر بارش، موردارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

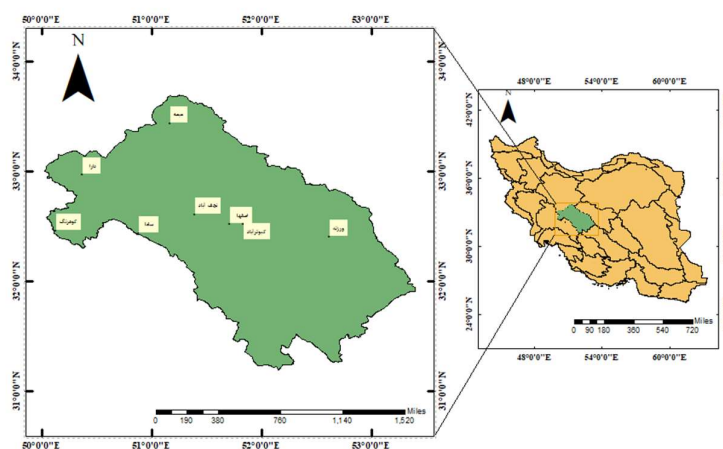
۲-۱. منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز زاینده‌رود یکی از حوضه‌های بسته ایران است که خروجی به دریا ندارد و دارای مساحتی بالغ بر ۴۱,۳۴۷ کیلومتر مربع است که ۴۰ درصد آن مناطق کوهستانی و مرتفع و ۶۰ درصد آن را کوهپایه و دشت‌ها تشکیل می‌دهد. از نظر مختصات جغرافیایی بین ۵۰° ۵۲' و ۵۳° ۲۴' طول شرقی و ۳۱° ۱۲' و ۳۳° ۴۲' عرض شمالی قرار گرفته است

-
- 1.Simple Taylor Skill Method
 - 2.Yao et al. (2017)
 - 3.Remote Sensing-Based PM
 - 4.The Shuttleworth-Wallace Dual-Source Model
 - 5.The Modified Satellite-Based PT Model
 - 6.A Simple Hybrid

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

(شکل ۱). این حوضه دربردارنده استان اصفهان و بخش‌هایی از استان‌های یزد، فارس و چهارمحال و بختیاری است. رودخانه اصلی این حوضه، رودخانه زاینده‌رود است که از ارتفاعات زاگرس و کوه‌های مرتفع زردکوه بختیاری سرچشمه می‌گیرد و به تدریج با ورود به جلگه اصفهان از شیب آن کاسته می‌شود و پس از آبیاری اراضی مستعد و دشت‌های کشاورزی، از شهرهای اژیه و ورزنه عبور می‌کند و وارد تالاب گاوخونی می‌شود (حاجیان، ۱۳۹۲: ۸). این تالاب دارای وسعتی متغیر است و در دوران پربابی به ۵۰۰ کیلومتر مربع و حتی بیشتر هم می‌رسد. ارتفاع این تالاب ۱۴۷۵ متر از سطح دریا است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های استفاده‌شده

۲-۲. محصولات تبخیر-تعرق

در این مطالعه از سه محصول مختلف تبخیر-تعرق شامل MOD16A2، GLDAS و GLEAM استفاده شده است.

۲-۲-۱. محصول تبخیر-تعرق MOD16A2

سنجنده MODIS یکی از دقیق‌ترین پروژه‌های سیستم مشاهدات زمینی سازمان ملی هوانوردی و فضا^۱ (NASA) به شمار می‌آید (مربوطه و همکاران، ۱۳۹۷: ۶۵). محصول MOD16A2 حاوی داده‌های تبخیر-تعرق است که این داده‌ها با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده توسط (Mu et al., 2011: 1781) تولید می‌شود.^۲ محاسبه تبخیر-تعرق در این محصول بر

1. The National Aeronautics and Space Administration

۲. می‌توان این داده‌ها را از سایت www.lpdaac.usgs.gov دریافت کرد.

اساس الگوریتم پنمن-مانتیت است. همچنین محصول MOD16A2 دارای قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر و قدرت تفکیک زمانی هشت‌روزه، ماهانه و سالانه است. این محصول کل جهان را پوشش می‌دهد و داده‌های آن از سال ۲۰۰۱ تاکنون در اختیار است. تصاویر محصول MOD16A2 دارای سیستم مختصات سینوسی و با فرمت HDF^۱ قابل دریافت است.

۲-۲-۲. محصول تبخیر-تعرق GLDAS

مدل جهانی همسان‌سازی داده‌های زمینی (GLDAS) به‌طور مشترک توسط دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (NASA)، مرکز پرواز فضایی گودارد^۲ (GSFC)، سازمان ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی^۳ (NOAA) و مرکز بین‌المللی پیش‌بینی محیط‌زیست^۴ (NCEP) به‌منظور برآورد پارامترهای مختلف توسعه داده شده است. محصول GLDAS از جمله پایگاه‌های اطلاعاتی است که با استفاده از روش‌های ترکیبی مدل‌سازی و استفاده از داده‌های سنجش‌ازدوری، مشاهدات ایستگاهی و میدانی اقدام به ارائه داده‌ها با دقت مکانی مناسب برای کل کره زمین می‌کند. در حال حاضر داده‌های این سیستم از چهار مدل سطحی شامل CLM^۵، Noah، Mosaic و VIC^۶ حاصل می‌شود. قدرت تفکیک مکانی این محصول ۲۸ کیلومتر ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) و قدرت تفکیک زمانی آن روزانه، ماهانه و سالانه است. این پایگاه اطلاعاتی کل جهان را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ پوشش می‌دهد.^۷

۲-۲-۳. محصول تبخیر-تعرق GLEAM

پایگاه داده GLEAM توسط دانشگاه‌های آمستردام هلند^۸، گنت^۹ بلژیک و آژانس فضایی اروپا^{۱۰} توسعه داده شده که دارای پارامترهای مختلفی از جمله تبخیر-تعرق است (جوادیان و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۳۰). محصول جهانی تبخیر سطح زمین آمستردام یک الگوریتم است که اجزای مختلف تبخیر-تعرق شامل تعرق، برگاب، تبخیر از سطح خاک خشک، تصعید برف و تبخیر از سطح آزاد آب را بر اساس داده‌های ماهواره‌ای تخمین می‌زند. خروجی‌های مدل شامل تبخیر-تعرق پتانسیل، رطوبت خاک در ناحیه ریشه و تنش تبخیری است. این پایگاه اطلاعاتی دارای دو مجموعه داده GLEAM

1. Hierarchical Data Format

2. Goddard Space Flight Center

3. The National Oceanic and Atmospheric Administration

4. The National Center for Environmental Prediction

5. Community Land Model

6. Variable Infiltration Capacity

۷. داده‌هایی که در محصول GLDAS مورد استفاده قرار می‌گیرد، از طریق تارنمای www.giovanni.gsfc.nasa.gov قابل دریافت است.

8. University of Amsterdam

9. Ghent

10. European Space Agency

GLEAM V3.2b و V3.2a است که تفاوت آن‌ها در زمان و نوع داده‌های ورودی است^۱. همچنین این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی ۲۸ کیلومتر ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) و قدرت تفکیک زمانی روزانه، ماهانه و سالانه است.

۳-۲. روش ترکیب مهارت ساده تیلور (STS)

به دلیل ساختار و الگوریتم‌های مختلفی که در تهیه محصولات تبخیر-تعرق استفاده شده است و همچنین به دلیل قدرت تفکیک مکانی‌های مختلف، این محصولات در قسمت‌های مختلف حوضه، عملکردهای متفاوتی دارد. این مسئله ممکن است با استفاده از روش ترکیب مهارت ساده تیلور تا حدودی قابل حل باشد. این روش که با استفاده از ترکیب معیارهای آماری از جمله ضریب همبستگی پیرسون^۲ (R) و انحراف معیار^۳ بین نتایج برآورد شده و مدل، محاسبه می‌شود، یک مقیاس رتبه‌بندی گسترده برای ارزیابی عملکرد مدل است. روش مهارت ساده تیلور از میانگین وزنی محصولات تبخیر-تعرق استفاده می‌کند و وزن آن‌ها را بر اساس شماره مهارت تیلور (TS) تعیین می‌کند که مقدار شماره مهارت بین صفر تا یک متغیر است (Taylor., 2001: 7191). بر این اساس ۷۰ درصد داده‌های تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش فائوپنمن-مانتیت و خروجی‌های محصولات تبخیر-تعرق به عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد باقی مانده به عنوان داده‌های تست در نظر گرفته شده است؛ سپس معیارهای ضریب همبستگی و انحراف معیار بین داده‌های روش فائوپنمن-مانتیت و خروجی هریک از محصولات محاسبه شده و با استفاده از این معیارها شماره مهارت تیلور (رابطه ۱) برای هریک از محصولات به دست آمده است. در نهایت وزن هریک از محصولات با استفاده از شماره مهارت تیلور مربوط به آن محاسبه شده است (رابطه ۲).

$$T_{si} = \frac{4(1 + R_i)^4}{(\delta_i + 1/\delta_i)^2(1 + R_{max})^4} \quad (1)$$

$$W_i = T_{si} / \sum_{i=1}^n T_{si} \quad (2)$$

$$ET_{STS} = \sum_{i=1}^n W_i \times ET_i \quad (3)$$

در رابطه ۲، W_i وزن محصول تبخیر-تعرق، T_{si} شماره مهارت تیلور برای محصول تبخیر-تعرق i و n تعداد محصولات تبخیر-تعرق مورد استفاده در تحقیق، R_i ضریب همبستگی بین خروجی‌های محصول i و داده‌های تبخیر-تعرق مرجع چمن حاصل از روش فائوپنمن-مانتیت، R_{max} حداکثر ضریب همبستگی، ET_i تبخیر-تعرق هر محصول و δ_i نسبت انحراف استاندارد خروجی‌های محصول i به انحراف استاندارد داده‌های تبخیر-تعرق مرجع چمن حاصل از روش فائو-پنمن-مانتیت است.

۱. داده‌های تبخیر-تعرق را می‌توان از طریق سایت www.Gleam.eu دریافت کرد.

2. Pearson Correlation Coefficient

3. Standard Deviation

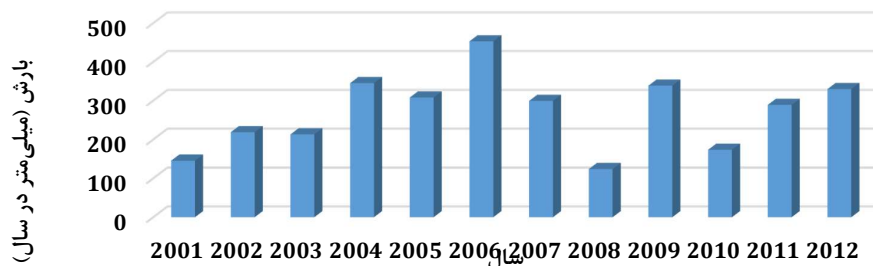
۲-۴. دریافت و پردازش داده‌ها

در این مطالعه داده‌های هواشناسی برای ایستگاه‌های همدیدی حوضه آبریز زاینده‌رود که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است، از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت شده است. این داده‌ها شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، میانگین سرعت باد، ساعت آفتابی و بارش بود که به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از معادله فائوپنمن-مانتیت به‌کار گرفته شد. از آنجا که میزان تبخیر-تعرق مرجع مستقیماً با این پارامترها در ارتباط است، انتظار می‌رود با تغییر در این متغیرهای اقلیمی به‌ویژه بارش، میزان آن نیز تغییر کند. در مناطق پربارش که دمای هوا پایین است، رطوبت بالا در هوا بدون کاهش دادن انرژی ورودی، نیاز تبخیر-تعرق را کاهش می‌دهد. در چنین مناطقی رطوبت هوا نزدیک به اشباع و ظرفیت پذیرش بخار آب پایین است؛ بنابراین در این نواحی تبخیر-تعرق مرجع کمتر از مناطق خشک و کم‌بارش است (Allen et al., 1998: 30). با توجه به این نکته، ابتدا میزان بارش سالانه بر اساس داده‌های بارش دریافت‌شده از سازمان هواشناسی کل کشور، برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ در تمامی ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز زاینده‌رود محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود حداکثر بارندگی در سال‌های زراعی ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ به‌ترتیب با میانگین بارش سالانه ۳/۳۴۵ و ۲/۴۵۳ میلی‌متر و حداقل بارندگی متعلق به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ به‌ترتیب با میانگین بارش ۵/۱۴۵ و ۹/۱۲۳ میلی‌متر در سال است. بنابراین با بررسی مقادیر بارندگی سال‌های زراعی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲، سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶ به‌عنوان سال زراعی پربارش و سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۸ به‌عنوان سال زراعی کم‌بارش با توجه به میانگین بارش در طی این سال‌ها، انتخاب شده است. همچنین سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۱ به‌ترتیب با میانگین بارش ۵/۲۹۹ و ۱/۲۸۹ میلی‌متر در سال به‌عنوان سال زراعی نرمال انتخاب شده است. بنابراین دوره آماری در این تحقیق، شش سال مذکور است. سپس بر مبنای اطلاعات اقلیمی تهیه‌شده و با استفاده از معادله فائوپنمن-مانتیت، مقادیر روزانه تبخیر-تعرق مرجع در هریک از ایستگاه‌ها طی دوره آماری برآورد شده و در نهایت به‌منظور مقایسه با داده‌های محصولات تبخیر-تعرق، به مقیاس ماهانه تبدیل شده است. مراحل انجام این تحقیق در شکل ۳ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های همدیدی حوضه آبریز زاینده‌رود

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)
کوه‌رنگ	۳۲/۴۶	۵۰/۱۳	۲۳۶۵	۱۳۰۲
سامان	۳۲/۴۴	۵۰/۸۷	۲۰۷۵	۳۰۴
داران	۳۲/۹۷	۵۰/۳۷	۲۲۹۰	۳۴۵
اصفهان	۳۲/۵۲	۵۱/۷۱	۱۵۵۱/۹	۱۴۷
کیوترآباد	۳۲/۵۲	۵۱/۸۳	۱۵۴۲/۵	۱۲۰
نجف‌آباد	۳۲/۶۰	۵۱/۳۹	۱۶۳۶/۲	۱۳۳
میمه	۳۳/۴۳	۵۱/۱۷	۱۹۸۰	۱۶۱
ورزنه	۳۲/۴۰	۵۲/۶۲	۱۴۵۰	۵۱

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا



شکل ۲. میانگین بارش سالیانه حوضه آبریز زاینده رود

در مطالعه حاضر از ۲۸۸ تصویر محصول تبخیر-تعرق پتانسیل MOD16A2 با پوشش زمانی هشت روزه و قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر برای کل زون H22V05 طی دوره آماری مذکور استفاده شده است. این تصاویر دارای فرمت HDF و سیستم مختصات آن سینوسی است که با استفاده از ابزار HEGTool^۱ به سیستم مختصات جغرافیایی و فرمت TIF تبدیل شده است. پس از انجام پردازش های لازم، خروجی های این محصول برای هریک از سال های پربارش، نرمال و کم بارش استخراج شد. سپس داده های تبخیر-تعرق از محصول Noah GLDAS- با قدرت تفکیک مکانی ۲۸ کیلومتر به صورت ماهانه طی دوره مطالعاتی دریافت شد. این تصاویر دارای فرمت NetCDF^۲ بود که با استفاده از ابزار Make NetCDF Raster Layer در محیط ArcMap نسخه ۱۰٫۴٫۱ به فرمت TIF درآمد. همچنین در این پژوهش از مجموعه داده های GLEAM V3.2a که دوره آماری آن ها ۳۸ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۰) است، استفاده شد. تصاویر محصول GLEAM با استفاده از نرم افزار Filezilla دانلود شد. این تصاویر نیز دارای فرمت NetCDF بود که با فراخوانی در نرم افزار ArcGIS به فرمت TIF تبدیل شد. سپس خروجی های این محصول نیز برای محدوده مطالعاتی طی دوره مذکور استخراج شد.



شکل ۳. نمودار جریان تحقیق

- 1.Hdf-Eos to GIS Conversion Tool
- 2.Network Common Data Form

فصلنامه برنامه ریزی و آمایش فضا

۲-۵. معیارهای آماری

به منظور ارزیابی دقت تبخیر-تعرق مرجع حاصل از محصولات مورد بررسی بر پایه خروجی‌های روش فائوپنمن-مانتیت از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریب (BIAS) و شاخص توافق (IOA) استفاده شد. با توجه به شناخته شده بودن شاخص‌های R^2 و RMSE، فقط رابطه محاسبه BIAS و IOA ارائه شده است.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (4)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

در روابط فوق O_i مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده توسط روش فائوپنمن-مانتیت، P_i خروجی محصولات تبخیر-تعرق، n تعداد مشاهدات، $\bar{O}$ میانگین مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده توسط روش فائوپنمن-مانتیت و $\bar{P}$ میانگین مقادیر خروجی محصولات تبخیر-تعرق است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. عملکرد محصولات تبخیر-تعرق

ارزیابی میزان دقت داده‌های تبخیر-تعرق مرجع برآورد شده با محصولات جهانی MOD16A2، GLEAM و GLDAS در مقایسه با خروجی روش فائوپنمن-مانتیت در سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش در مقیاس ماهانه در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نقشه‌های برآورد تبخیر-تعرق توسط این سه محصول در شکل ۵ آمده است. دامنه شاخص‌های آماری برای این محصولات در سال‌های مذکور متفاوت است. بر این اساس مقدار ضریب تعیین برای محصول MOD16A2 از ۰/۸۲ تا ۰/۸۴، برای محصول GLEAM از ۰/۶۲ تا ۰/۶۹ و برای محصول GLDAS از ۰/۷۴ تا ۰/۷۸ و مقدار RMSE برای هر کدام از این محصولات به ترتیب از ۳۷/۴ تا ۴۷/۶، ۹۲/۸ تا ۹۸/۷ و ۱۳۶/۲ تا ۱۴۱/۴ میلی متر در ماه و مقادیر BIAS نیز به ترتیب از ۱۴/۷ تا ۲۱/۹، ۷۸/۸ تا ۸۳/۹ و ۱۰۹/۴ تا ۱۱۶/۹ میلی متر در ماه و مقادیر IOA برای این محصولات به ترتیب از ۰/۹۲ تا ۰/۹۴، ۰/۵۸ تا ۰/۶۰ و ۰/۶۵ تا ۰/۶۶ متغیر است. بنابراین، محصول MOD16A2 برای سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش در مقایسه با دو محصول دیگر با نتایج روش فائوپنمن-مانتیت همبستگی بالاتری در برآورد تبخیر-تعرق مرجع حوضه آبریز زاینده رود دارد. با وجود سازگاری روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع حاصل از محصولات تبخیر-تعرق با روش فائوپنمن-مانتیت، نتایج آن‌ها دارای اختلاف زیادی است (شکل ۴). این نتایج با نتایج تحقیق ژان و همکاران^۱ (۲۰۱۹: ۲۶۹) مبنی بر متفاوت بودن عملکرد محصولات تبخیر-تعرق و بیش برآورد شدن میزان تبخیر-تعرق توسط محصولات MOD16 و GLDAS در شرایط اقلیمی متفاوت همخوانی دارد. از طرفی همبستگی بین محصولات تبخیر-تعرق با مقادیر تبخیر-تعرق مرجع به دست آمده از روش فائوپنمن-مانتیت در

1. Zhan et al (2021)

سال‌های کم‌بارش در مقایسه با سال‌های پربارش و نرمال بیشتر است. با توجه به شاخص‌های آماری دو محصول MOD16A2 و GLDAS میزان تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به روش فائوپنمن-مانتیث بیشتر و محصول GLEAM نیز میزان تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به این روش کمتر برآورد می‌کند. البته میزان بیش‌برآوردی در محصول MOD16A2 در طی سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش نسبت به محصول GLDAS کمتر بوده است. نتایج مشابهی توسط دگانو و همکاران^۱ (۲۰۱۸: ۳) گزارش شده است که در آن داده‌های تبخیر-تعرق از محصول MOD16A2 نسبت به داده‌های تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش فائوپنمن-مانتیث بیش‌برآورد شده است.

جدول ۲. عملکرد محصولات تبخیر-تعرق طی سال‌های کم‌بارش، نرمال و پربارش

سال	محصول	R ²	RMSE (mm/month)	BIAS (mm/month)	IOA
کم‌بارش	GLEAM	۰/۶۹	۹۸/۴	-۸۳/۹	۰/۵۹
	GLDAS	۰/۷۸	۱۴۱/۴	۱۱۶/۹	۰/۶۵
	MOD16	۰/۸۴	۳۷/۴	۱۴/۷	۰/۹۴
نرمال	GLEAM	۰/۶۲	۹۸/۷	-۸۱/۸	۰/۵۸
	GLDAS	۰/۷۷	۱۴۱/۱	۱۱۲/۴	۰/۶۶
	MOD16	۰/۸۲	۴۷/۶	۲۱/۹	۰/۹۲
پربارش	GLEAM	۰/۶۸	۹۲/۸	-۷۸/۸	۰/۶۰
	GLDAS	۰/۷۴	۱۳۶/۲	۱۰۹/۴	۰/۶۵
	MOD16	۰/۸۴	۴۲/۹	۱۹/۱	۰/۹۳

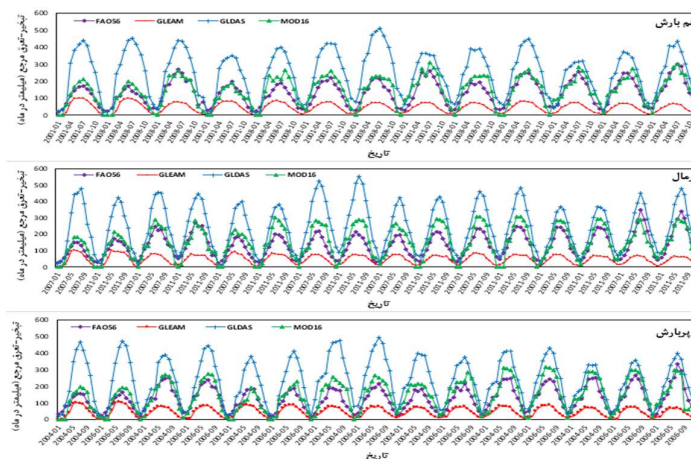
بررسی‌ها برای سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش بیانگر آن است که هرچند نتایج تبخیر-تعرق مرجع محصول GLDAS دارای ضریب تعیین بالاتری با مقادیر خروجی روش فائوپنمن-مانتیث است، اما مبتنی بر سایر شاخص‌های آماری این مدل خطای بیشتری را نسبت به دو محصول دیگر داراست. همچنین این مدل دارای عملکرد یکسانی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در منطقه مورد مطالعه برای سال‌های کم‌بارش و نرمال است؛ اما برای سال‌های پربارش دارای عملکرد بهتری نسبت به سال‌های کم‌بارش و نرمال است. این نتایج با نتایج مطالعه سان و همکاران^۲ (۲۰۲۱: ۱۵) تأیید می‌شود. تحقیق ایشان اشاره به این دارد که محصول GLDAS علی‌رغم اینکه دارای روند سازگاری با تبخیر-تعرق حاصل از روش ادی کوواریانس^۳ است، اما میزان تبخیر-تعرق را بیشتر برآورد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، محصول GLDAS میزان تبخیر-تعرق را نسبت به روش فائوپنمن-مانتیث طی شرایط رطوبتی مختلف بیشتر برآورد کرده است که این بیش‌برآورد در ماه‌هایی که نیاز آبی گیاه زیاد است، بیشتر است. در خصوص عملکرد محصول GLEAM در این سال‌ها، نتایج بیانگر آن است که بر اساس شاخص‌های آماری، این محصول میزان تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به روش فائوپنمن-مانتیث کمتر برآورد می‌کند؛ اما میزان کم‌برآورد شدن

1. Degano et al (2018)

2. Sun et al (2021)

3. Eddy Covariance

در سال‌های پربارش کمتر از سال‌های نرمال و کم‌بارش است که با نتایج مطالعات گذشته (قره‌خانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۱۹۱) مبنی بر عملکرد مناسب محصول GLEAM در اقلیم‌های بسیار مرطوب، مطابقت دارد. همچنین در سال‌های کم‌بارش که میزان تبخیر-تعرق مرجع بیشتر است، محصول MOD16A2 علی‌رغم مقداری بیش‌برآورد، دارای عملکرد بهتری نسبت به سال‌های پربارش و نرمال بوده است. اگرچه مطالعات قبلی (Wang et al., 2021: 13) نشان می‌دهد که محصول MOD16A2 در مناطق مرطوب، میزان تبخیر-تعرق را کم‌برآورد می‌کند.

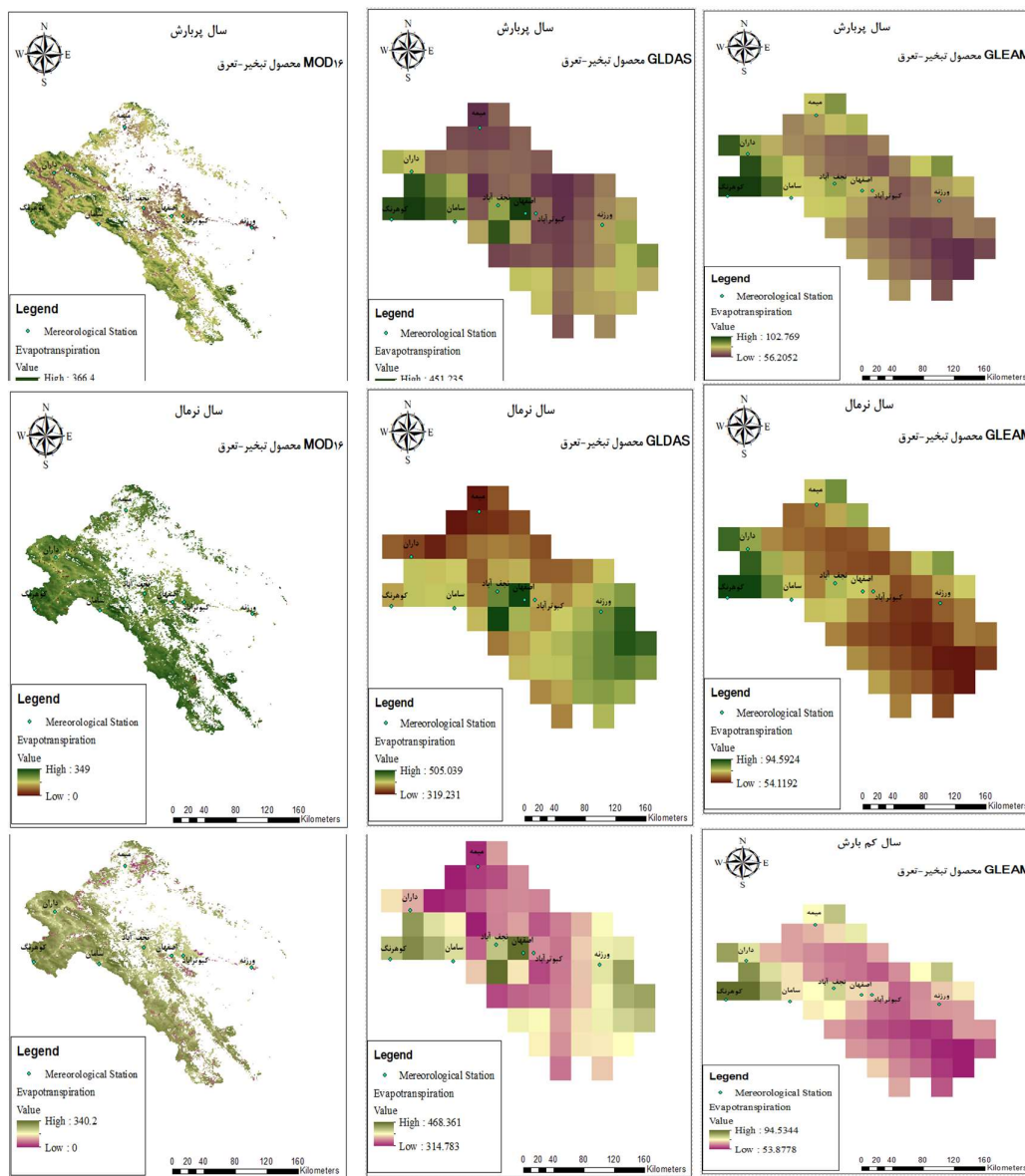


شکل ۴. سری زمانی تبخیر-تعرق حاصل از روش فائوپنمن-مانتیت و محصولات تبخیر-تعرق در شرایط رطوبتی مختلف

با توجه به ساختار متفاوت هریک از محصولات تبخیر-تعرق، نوع ورودی و عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در آن‌ها، نتایج متفاوتی از این محصولات حاصل شد. در این راستا یکی از عوامل مهم در تفاوت عملکرد و نتایج این محصولات، نحوه محاسبه تبخیر-تعرق مرجع است. در محصول MOD16A2 نحوه محاسبه تبخیر-تعرق مرجع بر اساس معادله پنمن-مانتیت است. همچنین مو و همکاران^۱ (۲۰۱۱: ۱۷۸۲) محصول تبخیر-تعرق MOD16A2 را با در نظر گرفتن تعرق شبانه، محاسبه شار گرمای خاک، جدا نمودن پوشش گیاهی خشک از مرطوب و تقسیم کردن سطح خاک به سطح اشباع و مرطوب بهبود بخشیده‌اند؛ بنابراین این عوامل ممکن است یکی از دلایل بیش‌برآورد شدن تبخیر-تعرق مرجع توسط مدل MOD16A2 باشد. مدل GLDAS نیز همانند روش فائوپنمن-مانتیت از معادله پنمن-مانتیت به منظور برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌کند با این تفاوت که در مدل GLDAS همه مقاومت‌ها به غیر از مقاومت آنرودینامیک صفر در نظر گرفته می‌شود (ALMA Standard Model Output)، در حالی که روش فائوپنمن-مانتیت مقدار مقاومت سطحی، ۷۰ ثانیه بر متر فرض می‌شود (Allen et al., 1998: 15) و ممکن است این امر یکی از دلایل بیش‌برآورد شدن تبخیر-تعرق مرجع توسط محصول GLDAS باشد. همچنین این

1. Mu et al (2011)

احتمال وجود دارد که علت کم برآورد شدن تبخیر-تعرق توسط محصول GLEAM مربوط به معادله پریستلی-تیلور باشد؛ زیرا این روش یک معادله ترکیبی مبتنی بر تابش است و فقط از تابش خالص برای تخمین تبخیر-تعرق استفاده می‌کند (مقبلی و ثنایی‌نژاد، ۱۳۹۷: ۷۳).



شکل ۵. نقشه‌های برآورد تبخیر-تعرق محصولات GLEAM، GLDAS و MOD16A2

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

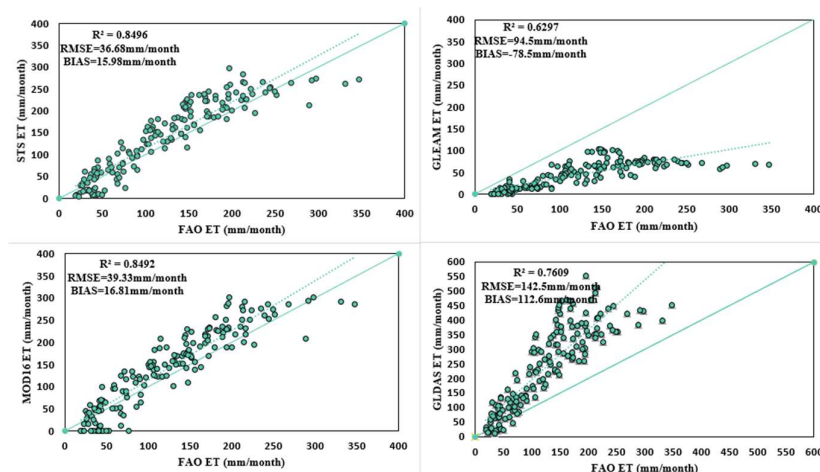
۳-۲. عملکرد روش ادغام مهارت ساده تیلور

در مطالعه حاضر علاوه بر ارزیابی دقت داده‌های تبخیر-تعرق محصولات جهانی در مقیاس ماهانه، به ادغام این محصولات با استفاده از روش مهارت ساده تیلور در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. این روش ترکیب تضمین می‌کند که محصول تبخیر-تعرق تولیدشده دارای حداکثر ضریب تعیین و حداقل انحراف معیار است. در ضمن روش ترکیب مهارت ساده تیلور در مقایسه با سایر روش‌های ترکیب پیچیدگی کمتری دارد (Taylor, 2001: 7191). در این پژوهش به منظور ادغام محصولات تبخیر-تعرق، از ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های کالیبراسیون برای تعیین وزن هریک از محصولات و برای اعتبارسنجی محصول تبخیر-تعرق تولیدشده نیز از ۳۰ درصد باقی‌مانده داده‌ها استفاده شد. بر این اساس محصولات GLEAM، MOD16A2 و GLDAS به ترتیب دارای وزن ۵۰، ۳۱ و ۱۹ درصد بود که نشان می‌دهد سهم محصول GLEAM در تخمین تبخیر-تعرق ترکیب‌شده کمتر از دو محصول دیگر است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نتایج محصول تولیدشده نسبت به سایر محصولات در حالت کلی دارای همبستگی بالاتری است؛ به طوری که مقدار ضریب تعیین برای محصول GLEAM، MOD16A2، GLDAS و محصول تولیدشده به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۷۶، ۰/۸۵ و ۰/۸۵ است. همچنین محصول تولیدی با توجه به کمتر بودن شاخص‌های ارزیابی RMSE و BIAS در حوضه مورد مطالعه نسبت به سایر محصولات عملکرد بهتری داشت که این نتایج با نتایج تحقیق انجام‌شده توسط بایک و همکاران^۱ (۲۰۱۸: ۲۷۳) مبنی بر عملکرد بهتر محصول تولیدی توسط روش ترکیب مهارت ساده تیلور هم‌خوانی دارد. از طرفی با بررسی محصول تولیدشده در سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش، نتایج نشان می‌دهد که محصول حاصل از ادغام نسبت به سایر محصولات تبخیر-تعرق عملکرد بهتری دارد و از صحت بالاتری برخوردار است (جدول ۳).

جدول ۳. عملکرد محصول تبخیر-تعرق تولیدشده با استفاده از روش STS طی سال‌های کم‌بارش، نرمال و پربارش

سال	محصول	R ²	RMSE (mm/month)	BIAS (mm/month)
کم بارش	GLEAM GLDAS MOD16 STS	۰/۶۵	۹۸	-۸۵/۴
		۰/۶۹	۱۴۸/۶	۱۲۳/۴
		۰/۸۲	۴۰/۵	۱۷/۷
		۰/۸۳	۳۵/۱	۱۴/۲
نرمال	GLEAM GLDAS MOD16 STS	۰/۶۲	۹۶/۸	-۷۹/۶
		۰/۷۸	۱۵۸/۵	۱۲۷/۴
		۰/۸۸	۵۲/۵	۳۱/۳
		۰/۸۸	۴۰/۲	۲۱/۷
پربارش	GLEAM GLDAS MOD16 STS	۰/۷۲	۸۹/۹	-۷۳/۲
		۰/۷۳	۱۲۳/۴	۹۴
		۰/۸۶	۴۰/۹	۱۶/۳
		۰/۸۵	۳۳/۲	۸/۶

1. Baik et al (2018)



شکل ۶. نمودارهای پراکندگی تبخیر-تعرق ماهانه محصولات تبخیر-تعرق و محصول تولیدشده از روش STS

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ارزیابی میزان صحت داده‌های تبخیر-تعرق مرجع محصولات جهانی MOD16A2، GLEAM و GLDAS در مقیاس ماهانه برای شرایط اقلیمی سال‌های پربارش، نرمال و کم‌بارش در حوضه آبریز زاینده‌رود صورت گرفت. به این منظور از روش فائوپنمن-مانتیث به‌عنوان مبنای ارزیابی این محصولات استفاده شد. بر این اساس یافته‌های این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- در منطقه مورد مطالعه، عملکرد محصول MOD16A2 به‌مراتب بهتر از سایر محصولات تبخیر-تعرق است که مقادیر RMSE برای این محصول طی سال‌های کم‌بارش، نرمال و پربارش به‌ترتیب ۳۷/۴، ۴۷/۶ و ۴۲/۹ میلی‌متر در ماه به دست آمد.
- دو محصول MOD16A2 و GLDAS میزان تبخیر-تعرق مرجع را نسبت به میزان تبخیر-تعرق مرجع حاصل از روش فائوپنمن-مانتیث بیشتر برآورد می‌کند و محصول GLEAM میزان تبخیر-تعرق را نسبت به این روش کمتر برآورد می‌کند که دامنه مقادیر BIAS برای این محصول از ۷۳/۲- تا ۸۵/۴- میلی‌متر در ماه متغیر است.
- میزان خطای دو محصول GLDAS و GLEAM در سال‌های پربارش کمتر از سال‌های کم‌بارش و نرمال بود؛ در حالی که محصول MOD16A2 برای سال‌های کم‌بارش دارای عملکرد بهتری نسبت به سال‌های نرمال و پربارش در منطقه مورد مطالعه بود.

نتایج حاصل از ترکیب محصولات نشان می‌دهد که محصول حاصل از روش ترکیب مهارت ساده تیلور، عملکرد بهتری نسبت به هریک از محصولات اولیه دارد؛ به طوری که میانگین مقادیر R^2 ، RMSE و BIAS به‌ترتیب ۰/۸۵، ۳۶/۱ و ۱۴/۸ میلی‌متر در ماه به دست آمد. لذا این محصول می‌تواند جایگزین مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع

فصلنامه برنامه‌ریزی و آمایش فضا

در صورت نبود داده‌های هواشناسی در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود باشد. در آخر پیشنهاد می‌شود از سایر روش‌های ترکیب برای ادغام محصولات موردنظر در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شود.

منابع

- جوادیان، مصطفی؛ کردی، فاطمه؛ تجریشی، مسعود (۱۳۹۸). بررسی و مقایسه روش‌های برآورد تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *کوهیدرولوژی*، ۶ (۱)، ۱۲۵-۱۳۰.
- حاجیان، ناصر (۱۳۹۲). برآورد نیاز زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود و تالاب گاوخونی و مقایسه آن با آب واردشده به تالاب در سنوات مختلف. *اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی*.
- سهیلی‌فر، زهرا؛ میرلطیفی، مجید؛ ناصری، عبدعلی؛ عساری، مصطفی (۱۳۹۲). برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور در اراضی کشت‌و صنعت نیشکر میرزا کوچک‌خان. *دانش آب و خاک*، ۱ (۲۳)، ۱۵۱-۱۶۳.
- شریفان، حسین؛ قهرمان، بیژن؛ علیزاده، امین؛ میرلطیفی، مجید (۱۳۸۵). مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. *علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۳ (۱)، ۱۹-۳۰.
- فرجی، زهره؛ کاویانی، عباس؛ شکیب، علی‌رضا (۱۳۹۶). ارزیابی داده‌های تبخیر-تعرق، بارش و دمای هوای حاصل از مدل سطح زمین (GLDAS) با استفاده از داده‌های مشاهداتی در استان قزوین. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳، ۲۸۳-۲۹۷.
- قره‌خانی، ابودر؛ قهرمان، نوذر؛ ایران‌نژاد، پرویز (۱۳۹۹). تحلیل عدم قطعیت برآوردهای ماهواره‌ای و مبتنی بر پایگاه داده‌های اقلیمی تبخیر-تعرق واقعی (مطالعه موردی: حوضه کرخه). *تحقیقات آب و خاک/ایران*، ۵، ۱۱۷۷-۱۱۹۳.
- قره‌لو، راحله؛ قاسمی‌فر، الهام (۱۳۹۸). تغییرپذیری فضایی تبخیر-تعرق در ارتباط با دماهای حدی در ایران. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۲۳ (۴)، ۱۹۳-۲۱۲.
- لشکری، حسن؛ کیخسروی، قاسم؛ رضایی، علی (۱۳۸۸). تحلیل میزان کارایی مدل CROPWAT در برآورد نیاز آبی محصول گندم در غرب کرمانشاه. *شهرستان‌های اسلام‌آباد غرب، سرپل زهاب و روانسر. برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۳ (۱)، ۲۴۷-۲۷۰.
- مباشری، محمدرضا؛ خاوریان، حسن؛ ضیائی، پرویز؛ کمالی، غلام‌علی (۱۳۸۶). برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره Terra سنجنده MODIS در منطقه عمومی گرگان. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، ۱۱ (۱)، ۱۲۱-۱۴۲.
- مرادی، فرزانه؛ کمالی، غلام‌علی؛ وظیفه‌دوست، مجید (۱۳۹۴). ارزیابی محصول تبخیر-تعرق پتانسیل از سنجنده MODIS با استفاده از آمار ایستگاه‌های همدیدی در استان زنجان. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۲۳، ۳۹-۴۸.

- مربوطه، بهاره؛ اشرفزاده، افشین؛ وظیفه دوست، مجید؛ خالدیان، محمدرضا (۱۳۹۷). مقایسه تبخیر-تعرق واقعی محصول MOD16A2 و شبیه سازی شده توسط مدل SWAP (مطالعه موردی: مزارع تحت کشت ذرت در استان قزوین). *تحقیقات منابع آب/ایران*، ۲، ۶۲-۷۱.
- مقبلی دامنه، مصیب؛ ثنایی نژاد، سید حسین (۱۳۹۷). برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در منطقه فریمان با استفاده از روش پریستلی-تیلور و تکنیک سنجش از دور. *نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۳(۹)، ۷۲-۸۴.
- یاراحمدی، جلال؛ میرلطیفی، مجید؛ شمس الدینی، علی؛ دلاور، مجید (۱۳۹۹). ارزیابی مکانی-زمانی داده های تبخیر-تعرق واقعی پایگاه های جهانی در حوضه آبخیز سد کرخه. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۴، ۱۰۲۴-۱۰۳۹.

Received from: <https://doi.org/10.2209/IJWMSE.2020.128485.1740>

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No.56, Rome: Food and agriculture organization of the united nation, 56 (97), 156.
- Bai, P.; Liu, X. (2018). Intercomparison and evaluation of three global high-resolution evapotranspiration products across china. *Journal of Hydrology*, 566, 743-755, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.065.
- Baik, J.; Jeong, J.; Choi, M. (2018). Estimation of the optimal evapotranspiration by using satellite-and reanalysis model-based evapotranspiration estimations. *Journal of Korea Water Resources Association*, 3, 273-280.
- Degano, M.F.; Rivas, R.E.; Sanchez, J.M.; Carmona, F.; Niclos, R. (2018). Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS product Using Ground Measurement in the Pampas. In *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, 1-5, DOI: 10.1109/ARGENCON.2018.8646143.
- Du, j. p.; Sun, R. (2012). Estimation of evapotranspiration for ungauged areas using MODIS measurements and GLDAS data. *Procedia Environmental Science*, 13, 1718-1727, DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.165.
- Faraji, Z.; Kaviani, A.; Shakiba, A. (2017). Evaluation of evapotranspiration, precipitation, and air temperature data from GLDAS model using observational data in Qazvin province. *Journal of soil and water conservation Research*, 3, 283-297, DOI: 10.22069/JWFST.2017.11535.2630. (In Persian)
- Gharehkhani, A.; Ghahreman, N.; Irannejad, P. (2020). Uncertainty Analysis of Satellite Estimates based on actual evapotranspiration climate database (case study: Karkheh basin). *Iranian Soil and Water Research*, 5, 1177-1193, DOI: 10.22059/IJSWR.2020.293401.668413. (In Persian)
- Gharehloo, R.; Ghasemi far, E. (2019). Spatial variability of evapotranspiration about limit temperature in Iran. *Planning and Arranging Space*, 23(4), 193-212. (In Persian)

- Hajian, N. (2013). Estimating the environmental needs of Zayandehrood river and Gavkhoni wetland and comparing it with water entering the wetland in different years. *The first national conference on water resources and agricultural challenges*. (In Persian)
- Javadian, M.; Kordi, F.; Tajrishi, M. (2019). Investigation and Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in the Basin area of lake urmia. *Echo Hydrology*, 6(1), 125-130. (In Persian)
- Jia, D.; Kaishan, S. (2018). Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) Using Flux Tower Data from Panjin Wetland, Northeast China. *Chinese geographical science*, 3, 420-429, DOI: 10.1007/s11769-018-0960-8.
- Kim, H.W.; Hwang, K.; Mu, Q.; Lee, S.; Choi, M. (2012). Validation of MODIS 16 Global Terrestrial Evapotranspiration Products in Various Climate and land cover types in Asia. *KSCE journal of civil Engineering*, 16, 229-238, DOI: 10.1007/s12205-012-0006-1.
- Lashkari, H.; Keykhosravi, Gh; Rezaee, A. (2009). Analysis of the efficiency of CROPWAT model in estimating the water demand of Wheat crop in the west of Kermanshah, Islamabad-e-Gharb, Sar-e-pol-e-zahab and Ravansar. *Planning and Arranging Space*, 13(1), 247-270. (In Persian)
- Marboteh, B.; Ashrafzadeh, A.; Vazifehdost, M.; Khaledian, M. (2018). Comparison of Actual evapotranspiration of MOD16A2 product and simulated by SWAP model (case study: Farms under Corn Cultivation in Qazvin province). *Iranian Water Resources Research*, 2, 62-71. (In Persian)
- Mobasheri, M.; Khavarian, H.; Ziaeyan, P.; Kamali, Gh. (2007). Estimation of evapotranspiration using MODIS sensor Terra Satellite images in Gorgan public area. *Planning and Arranging Space*, 11(1), 121-142. (In Persian)
- Moghbeli Damaneh, M.; Sanaee Nejad, H. (2019). Estimating Potential Evapotranspiration in the Fariman area using Priestly-Taylor method and remote sensing technique. *Release Sensing and Geographic information system in Natural Resources*, 9(3).72-84. (In Persian)
- Moradi, F.; Kamali, Gh.; Vazifehdost, M. (2015). Evaluation of Potential evapotranspiration product from MODIS sensor using synoptic stations statistic in Zanjan Province. *Journal of Climatological Research*, 23, 39-48. (In Persian)
- Mu, Q.; Zhao, M.; Running, S.W. (2011). Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 8, 1781-1800, DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.019.
- Sharifan, H.; Ghahreman, B.; Alizadeh, A.; Mirlatifi, M. (2005). Comparison of different methods of reference Evapotranspiration estimation (composite and temperature) with the Standard method and study of the effects of dry air on it. *Agricultural Science and Natural resources*, 13(1), 19-30. (In Persian)

- Soheili far, Z.; Mirlatifi, M.; Naseri, A.; Esari, M. (2013). Estimation of Actual Evapotranspiration using remote sensing data in mirza Kuchak khan Sugarcane Cultivation land. *Journal of soil and water Science*, 1(23), 151-163. (In Persian)
- Sun, R.; Duan, Q.; Wang, J. (2021). Understanding the spatial patterns of evapotranspiration estimates from land surface models over China. *Journal of hydrology*, 595, 126021, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126021.
- Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106, 7183-7192.
- Wang, L.; Wu, B.; Elnashar, A.; Zeng, H.; Zhu, W.; Yan, N. (2021). Synthesizing a Regional territorial evapotranspiration dataset for northern China. *Remote Sensing*, 13(6): 1076, DOI: 10.3390/rs13061076.
- Yao, Y.; Liang, Sh.; Li, X.; Zhang, Y.; Chen, J.; Jia, K.; Zhang, X.; Fisher, J. B.; Wang, X.; Zhang, L.; Xu, J.; Shao, C.; Posse, G.; Li, Y.; Magliulo, V.; Varlagin, A.; Moors, E. J.; Boike, J.; and Gielen, B. (2017). Estimation of high-resolution terrestrial evapotranspiration from Landsat data using a simple Taylor skill fusion method. *Journal of Hydrology*, 553, 508-526, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.013.
- Yarahmadi, J.; Mirlatifi, M.; Shamsodini, A.; Delavar, M. (2020). Spatial-Temporal evaluation of Actual evapotranspiration data of global bases in Karkheh dam watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 4, 1024-1039, DOI: 10.22092/IJWMSE.2020.128485.1740. (In Persian)
- Zhan, Sh.; Song, Ch.; Wang, J.; Sheng, Y.; Quan, J. (2019). A global assessment of terrestrial evapotranspiration increases due to surface water area change. *Earth's future*, 7(3), 266-282, DOI: 10.1029/2018EF001066.