

Evaluation of actual evapotranspiration estimations of GLEAM model and GRACE satellite in the Gharehsu-Gorganrud basin

Amirhosein Pirmoon¹ , Nozar Ghahreman^{2*} 

¹ Department of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Tehran, Iran

² Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction

Improving water efficiency in agriculture, especially in the face of global warming, requires an accurate estimation of evapotranspiration. The Gharehsu-Gorganrud Watershed with its complex topography is located in the Golestan province, in northern Iran. Remote sensing methods can provide an acceptable estimation of ET in **large** areas with inadequate ground observations. However, these methods have lower accuracy than ground-based techniques and require regional validation using water balance or lysimeter approaches. Selecting suitable satellite datasets for water management planning in a specific study area is a fundamental challenge that needs validation through physical methods and ground data. Previous studies show that the GLEAM model, **which** is based on satellite data provides reliable outputs for the Karkheh basin, in western Iran, and can be used as an alternative to empirical and conventional methods for estimating crop water requirements. Gharekhani et al. (2020) investigated the uncertainty of actual evapotranspiration in the Gharehsu-Gorganrud basin using two climate databases and a remote sensing-based model. The study demonstrated that the ERA-Interim, GLEAM, and ETPT-JPL databases performed well in reducing uncertainty. Another study by Hafezparast et al. (2022) utilized GRACE satellite data to monitor changes in groundwater levels in the Mianrahān aquifer, revealing critical conditions in some aquifers. Overall, the research aimed to investigate the uncertainty in actual evapotranspiration estimates using GRACE satellite data and climate databases in the Gharehsu-Gorganrud Basin.

Materials and Methods

The study area is the Gharehsu-Gorganrud basin which is a sub-basin of the main Caspian Sea Basin. The meteorological data used in this study were collected from synoptic stations of Iran's meteorological organization. These data included average, minimum, and maximum temperature, relative humidity, precipitation, wind speed, and total sunshine hours. The satellite-derived data provide estimates of actual evapotranspiration, as a key variable for this study. However, to compare these estimates with the Penman-Monteith equation (FAO 56 PM) and determine the potential evapotranspiration, we need to consider the vegetation cover factor specific to the target crop of wheat. Hence, remote sensing techniques were employed to retrieve and acquire satellite images exclusively for the wheat fields, allowing us to accurately calculate the potential evapotranspiration by multiplying the actual evapotranspiration by the corresponding vegetation cover factor. The Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) is an algorithm that estimates various components of evaporation and transpiration using satellite observations. The model outputs include potential evaporation, root zone soil moisture, surface soil moisture, and evaporative stress. This model utilizes solar radiation and temperature data to calculate potential evapotranspiration and multiplies it by the evaporative stress to obtain actual evaporation. The data are available on a daily, monthly, and yearly basis, and the grids are divided into 0.25-degree geographical resolutions. GRACE satellite data is obtained from the GRACE spacecraft, measuring changes in Earth's gravity field due to water variations. These data, along with ground-based information like precipitation and runoff, enable the calculation of actual evapotranspiration. By assuming a water balance for a specific watershed and utilizing variables such as precipitation, runoff, and ΔS from GRACE, actual evapotranspiration can be determined.

Results and Discussion

Based on the comparisons, the best-performance GLEAM model was obtained at the Rezvan station, with an elevation of 1447 meters, a dominant agricultural land use pattern, with statistical metrics of RMSE=0.32, MAE=0.30, R^2 of 0.78, and MAPE =13.67. The lowest agreement was related to the "Kalaleh" station, with an elevation of 127 meters, a non-agricultural land use pattern, and statistical indices of RMSE =0.77, MAE =0.60, R^2 =0.49, and MAPE =18.05. Overall, the results indicate that estimating evapotranspiration using the Penman-Monteith FAO equation performs better in high-elevation areas with agricultural land use patterns, while it yields less reliable results in low-elevation areas with non-agricultural land use patterns. The study by Gharekhani et al.

(2020) also showed that the GLEAM model exhibits less uncertainty at elevations between 1400 and 1800 meters above sea level and in areas with agricultural land use patterns. For more precise explanations, further examination of the environment and comparison with field data are required. Based on the conducted comparisons, the best GRACE performance is associated with the "Rezvan" station, which has a drier climate compared to other stations, and statistical indices of 0.41 RMSE, 0.38 MAE, 0.66 R^2 , and 17.46 MAPE. The worst performance is related to the "Kalaleh" station, with an elevation of 127 meters, non-agricultural land use pattern, and statistical indices of 0.91 RMSE, 0.77 MAE, 0.45 R^2 , and 23.17 MAPE.

Conclusions

The use of satellite imagery can provide broader insights into various topics. In this study, the estimation of actual evapotranspiration was conducted using GRACE satellite data and the GLEAM model in the Gharehsu-Gorganrud region of Golestan province. The FAO Penman-Monteith equation was employed for evapotranspiration calculation. The results indicated that the best estimations belong to the Rezvan station, while the worst-case performance was observed at the Kalaleh station in estimating evapotranspiration based on the FAO Penman-Monteith equation and GLEAM data. More precise information on land cover maps in the region for ET estimation using vegetation cover dependent coefficients is necessary.

Keywords: GLEAM, GRACE, Evapotranspiration, Gorganrud Basin, Penman-Monteith

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Tehran for the financial and logistical supports. The authors acknowledge the assistance of the Iran Meteorological Organization in providing the necessary data for their work.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Amirhosein Pirmoon: Writing - original draft preparation

Amirhosein Pirmoon: Resources, Software, Formal analysis and investigation

Nozar Ghahreman: Visualization, Supervision, Manuscript editing, Conceptualization, Methodology

*Corresponding Author, E-mail: ngahreman@ut.ac.ir

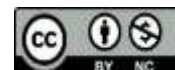
Citation: Pirmoon, A. and Ghahreman, N. (2025). Evaluation of Actual Evapotranspiration Estimations of GLEAM Model and GRACE Satellite in the Gharehsu-Gorganrud basin. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2), 107-123. doi: 10.22098/mmws.2024.15502.1482

Received: 24 July 2024, Received in revised form: 11 September 2024, Accepted: 11 September 2024, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp107-123.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author (s)



ارزیابی برآوردهای تبخیر تعرق واقعی مدل GLEAM و ماهواره GRACE در حوضه آبریز گرگان رود-قرهسو

امیرحسین پیرمون^۱، نوذر قهرمان^{۲*}

^۱ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش با هدف مقایسه برآوردهای تبخیر تعرق مدل GLEAM و ماهواره GRACE در ۸ ایستگاه حوضه آبریز گرگان رود-قرهسو با مقادیر حاصل از رابطه پنمن مانیتیت انجام شد. در این تحقیق، تبخیر تعرق واقعی محاسبه شده توسط مدل GLEAM و داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای چهار ماه گرم سال (مارس، آوریل، مه و ژوئن) که همزمان با فصل کشت گندم است، در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ با مقادیر حاصل از رابطه پنمن مانیتیت برای مناطق تحت کشت گندم مقایسه شد. شاخص آماری R^2 بین برآوردهای رابطه پنمن مانیتیت فائو (FAO 56 PM) و داده‌های مدل GLEAM برای ایستگاه‌های، رضوان، بندرترکمن، علی‌آبادکتول، گنبدکاووس، کلالة، گرگان، گرگان هاشم‌آباد و مینودشت به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۳۸، ۰/۴۰، ۰/۴۹، ۰/۵۴، ۰/۷۴، ۰/۴۶ و ۰/۶۹ به دست آمد که بالاترین همبستگی را ایستگاه رضوان داشت. همچنین ضریب تعیین مابین برآوردهای رابطه PM و داده‌های ماهواره‌ای GRACE به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۳۷، ۰/۴۱، ۰/۴۵، ۰/۳۷، ۰/۵۰، ۰/۴۴، ۰/۵۴ به دست آمد. شاخص آماری RMSE بین برآوردهای رابطه (PM) با مدل GLEAM برابر با ۰/۳۲، ۰/۵۳، ۰/۵۹، ۰/۷۷، ۰/۷۱، ۰/۵۱، ۰/۵۰، ۰/۴۲ و نسبت به داده‌های GRACE برابر با ۰/۴۱، ۰/۵۳، ۰/۶۰، ۰/۹۱، ۰/۶۲، ۰/۵۷، ۰/۶۸، ۰/۴۷ تعیین شد. نتایج نشان دادند که بالاترین همبستگی در ایستگاه رضوان و کمترین در ایستگاه کلالة وجود دارد. همچنین، همبستگی بین برآوردهای رابطه پنمن مانیتیت و داده‌های ماهواره GRACE نشان داد که بهترین همبستگی در ایستگاه رضوان و کمترین تطابق در ایستگاه گنبدکاووس بوده است. تدقیق الگوهای کاربری اراضی و ارزیابی رهیافت‌های مبتنی بر سنجش از دور در سایر مناطق کشور توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: GLEAM، GRACE، تبخیر تعرق، حوضه گرگان رود، پنمن مانیتیت

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Email: nghahreman@ut.ac.ir

استناد: پیرمون، امیرحسین، و قهرمان، نوذر (۱۴۰۴). ارزیابی برآوردهای تبخیر تعرق واقعی مدل GLEAM و ماهواره GRACE در حوضه آبریز گرگان رود-قرهسو. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*. ۵ (۲)، ۱۰۷-۱۲۳.
doi: 10.22098/mmws.2024.15502.1482



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱
مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۰۷ تا ۱۲۳.
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی به‌ویژه در شرایط گرمایش جهانی نیازمند تدقیق برآوردهای تبخیر-تعرق است. تبخیر-تعرق یکی از عوامل کلیدی در معادلات انرژی سطح زمین و توازن آب محسوب می‌شود و برآورد دقیق آن در زمینه‌های مختلف علمی از جمله هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل‌ها و مراتع و همچنین مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقدار این کمیت به میزان آب موجود در خاک و گیاه، عناصر اقلیمی، و نوع گیاه بستگی دارد که به‌صورت پیچیده‌ای بر یکدیگر اثر دارند. تخمین این کمیت به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی مدیریتی منابع آبی و تعیین نیاز آبی گیاهان اهمیت دارد. روش‌های سنجش از دور با توانایی به دست آوردن اطلاعات مستند بدون نیاز به تماس مستقیم با منطقه مورد مطالعه، به‌عنوان یک راه‌حل مناسب در برآورد تبخیر-تعرق کاربرد وسیع و مؤثری دارند. با این حال، دقت اندازه‌گیری‌های سنجش از دور نسبت به روش‌های زمینی کمتر است و به‌ویژه در شرایطی که داده‌های مشاهداتی هواشناسی به‌طور کامل در دسترس نیستند، مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق ممکن است دچار خطاهای متعددی شوند و نیاز به واسنجی منطقه‌ای با استفاده از نتایج رهیافت‌های ترازمندی آب یا لایسیمتری دارند (Sattari et al., 2014). در نهایت، ترکیب داده‌های هواشناسی با اطلاعات سنجش از دور (نظیر تصاویر ماهواره‌ای) می‌تواند دقت این روش‌ها را بهبود بخشد. داده‌های ماهواره‌ای تبخیر-تعرق از نظر ورودی مدل‌ها، پارامترسازی و الگوریتم‌ها تنوع دارند که این امر منجر به درجات مختلفی از عدم قطعیت می‌شود؛ بنابراین، انتخاب یک مجموعه داده خاص ماهواره‌ای که دقیقاً معرف شرایط اقلیمی منطقه مطالعاتی باشد؛ چالشی اساسی محسوب می‌شود و ضروری است که با استفاده از روش‌های معتبر و فیزیکی، قابل‌اتکایی داده‌ها مورد اعتبارسنجی قرار گیرد (Onnabi-Milani and Neyshabouri, 2018).

Faraji et al. (2017) مطالعه‌ای باهدف ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای GRACE در استان قزوین انجام دادند. در این مطالعه برای اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای GRACE از داده‌های مدل سطح زمین GLDAS و داده‌های مشاهداتی چاه‌ها در منطقه استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد داده‌های ماهواره‌ای GRACE به‌عنوان ماهواره‌ای ثقل‌سنج که فقط به‌منظور برآورد تغییرات ذخیره آب تولید شده است، برآورد خوبی از روند تغییرات ذخیره آب و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی در اختیار کاربران قرار می‌دهد. (Sun et al. (2018) در پژوهشی تبخیر-تعرق واقعی را در

منطقه نیمه‌خشک فلات مرکزی چین بر اساس داده‌های ماهواره‌ای GRACE برآورد کردند. در این مطالعه از داده‌های ماهواره‌ای GRACE Gravity برای تجزیه و تحلیل تغییرات در ورودی آب و ویژگی‌های ترازمندی آب استفاده شد. نتایج نشان داد کاربست این داده‌ها به‌طرز معناداری دقت برآوردها را بهبود می‌بخشد. (Pascolini-Campbell et al. (2020) برآوردهای حوضه‌ای کمیت تبخیر-تعرق ۱۱ حوضه آبریز در آمریکا توسط چند مدل سطح زمین و محصولات ماهواره‌ای را با رهیافت موازنه جرم مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای GRACE مورد ارزیابی قرار دادند، نتایج نشانگر فراب‌آوردی داده‌های ماهواره‌ای GRACE و در عین حال دقت قابل قبول آن بود.

Abdidezfuli et al. (2020) در مطالعه‌ای به بررسی دقت برآوردهای تبخیر-تعرق مدل جهانی GLEAM در شمال حوضه آبریز کرخه پرداختند. در این پژوهش، خروجی مدل GLEAM با استفاده از روش ترازمندی آب (با فرض بسته بودن حوضه) در ایستگاه‌های منتخب حوضه کرخه مقایسه شد و ضریب همبستگی میان این دو روش تعیین شد. شاخص‌های آماری بین مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست‌آمده از پایگاه‌داده‌های GLEAM و روش ترازمندی آب برای ایستگاه‌های آران غرب، پیر سلمان، نظرآباد، پل-چهر، پای پل، پل‌دختر، تنگ سازین، و پل کشکان محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خروجی‌های مدل GLEAM، که عمدتاً بر پایه داده‌های ماهواره‌ای استوارند، برای حوضه کرخه مناسب بوده و می‌توانند در صورت عدم دسترسی به داده‌های مشاهده‌ای یا کمبود آن‌ها، به‌عنوان جایگزینی برای برآوردهای حاصل از روش‌های تجربی و مرسوم به کار روند. Gharehkhani et al. (2020) مطالعه‌ای باهدف بررسی عدم قطعیت برآوردهای تبخیر-تعرق واقعی (ETA) حاصل از یک مدل مبتنی بر سنجش از دور و دو پایگاه داده‌های اقلیمی انجام دادند. برای این منظور مقادیر ET_a حاصل از مدل پریستلی-تیلور و دو پایگاه داده GLEAM و ERA-Interim برای حوضه کرخه در دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۱۷ تهیه شد. جهت تحلیل عدم قطعیت برای هر یاخته مکانی (با تفکیک $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه) در حوضه از روش TCH استفاده شد. نتایج تحلیل عدم قطعیت نشان داد که داده‌های ETERA-Interim، ETGLEAM و ETPT-JPL به ترتیب در ۳۸، ۱۳ و ۴۹ درصد یاخته‌ها دارای عدم قطعیت کمتری هستند. در پژوهشی توسط Chao et al. (2021) پنج پایگاه داده تبخیر-تعرق شامل GLEAM، مادیس^۱، P-LSH، MTE، PML با استفاده از برآوردهای GRACE و دیدبانی‌های زمینی ارزیابی شدند.

^۱ MODIS

شرایط جغرافیایی متنوع معرفی می‌کند، که می‌تواند به بهبود مدیریت منابع و بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی کمک شایانی کند. در پژوهش Talebi et al. (2023) استفاده از داده‌های سنجش از دور مانند تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مادیس برای تخمین تبخیرتغرق مرجع (ET₀) در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها به‌دلیل پوشش وسیع و دقت زمانی بالا، می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی مبتنی بر داده‌های زمینی باشند. در این مطالعه، مدل‌های یادگیری ماشین از جمله جنگل تصادفی (RF) و پرسپترون چندلایه (MLP) برای تخمین ET₀ در ایستگاه‌های اهواز و تبریز با استفاده از داده‌های دمای سطح زمین (LST) و شاخص نرمال تفاوت پوشش گیاهی^۴ از تصاویر لندست ۸ و مادیس به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها عملکرد بهتری در مقایسه با روش‌های سنتی داشته و داده‌های مادیس به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک دقت بالاتری در برآورد ET₀ دارند. این تحقیق تأیید می‌کند که ترکیب مدل‌های هوش مصنوعی با داده‌های سنجش از دور، ابزاری کارآمد برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهد.

با توجه به کمبود مطالعات پیشین با استفاده از دو رهیافت مورد استفاده در حوضه گرگان‌رود-قره‌سو و اهمیت تدقیق برآوردهای تبخیرتغرق، این پژوهش انتخاب و اجرا شد. اگرچه منطقه و ماه‌های مورد مطالعه با تحقیق Pirmoon et al. (2023) یکسان است، اما مدل‌های استفاده شده در این پژوهش متفاوت هستند که این موضوع وجه تمایز اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر در حوضه آبریز گرگان‌رود-قره‌سو صورت گرفته است. این حوضه به‌عنوان یک حوضه آبریز درجه دو محسوب می‌شود و زیرمجموعه حوضه آبریز دریای مازندران قرار دارد. مساحت این حوضه، ۱۳۰۶۱ کیلومترمربع و شامل دو رود قره‌سو و گرگان است. (Jamab Consulting Engineering Co., 2008) شکل ۱ موقعیت قرارگیری حوضه را نشان می‌دهد.

داده‌های P-LSH و GLEAM همخوانی خوبی با داده‌های بازسازی شده GRACE داشتند. داده‌های مادیس و MTE و RMSE بالاتری در مقیاس سالانه داشتند. این دو پایگاه داده به‌ترتیب دارای فرو برآورد و فرابرآورد بودند.

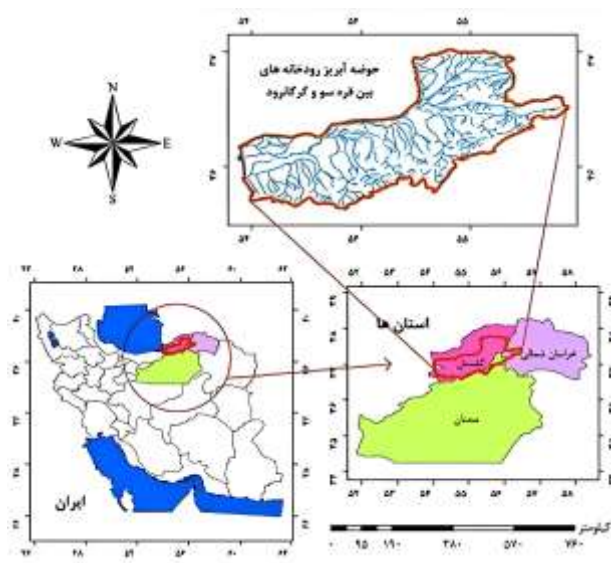
Hafezparast et al. (2022) مطالعه‌ای باهدف پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی آبخوان میانراهان با داده‌های ماهواره‌ای GRACE انجام داده است. در این پژوهش با بررسی سطح آب چاه‌های مشاهداتی آبخوان میانراهان در حوضه جامیشان کرمانشاه در دوره ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۰ و نیز پهنه‌بندی مکانی این تغییرات با به‌کارگیری روش کریجینگ در نرم‌افزار ArcGIS وضع موجود منطقه بررسی شد. نتایج نشان داد تعدادی از آبخوان‌ها از جمله حسن‌آباد-شیان و سنجابی و دینه‌ور در شرایط بحرانی هستند. Pirmoon et al. (2023) در پژوهشی به قصد مقایسه تبخیرتغرق برآورد شده از ماهواره سنتینل ۲ با مقادیر متناظر از رابطه پنمن مانتیث فائو^۱ انجام شده است. پروژه Sen-ET توسط آژانس فضایی اروپا^۲ تأمین مالی شده و هدف اصلی این پروژه توسعه یک روش بهینه برای تخمین ET با دقت بالا در مقیاس فضایی کوچک (ده‌ها متر) با به‌کارگیری ترکیب اطلاعات ماهواره‌ای سنتینل ۲ و ۳ است. شاخص آماری R² بین تبخیرتغرق پنمن مانتیث فائو و داده‌های سنتینل ۲ برای ۸ ایستگاه حوضه گرگان‌رود - قره‌سو برای ۴ ماه گرم سال (مارس، آوریل، مه و ژوئن) در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ مقایسه شد. با توجه به مقایسات انجام شده، بهترین همبستگی برای ایستگاه رضوان مشاهده شد، درحالی‌که ضعیف‌ترین همبستگی را ایستگاه گنبدکاووس داشت. در پایان، این مطالعه نشان می‌دهد که به‌کارگیری داده‌های ماهواره سنتینل ۲ در مقایسه با مدل پنمن مانتیث فائو، می‌تواند به‌عنوان یک روش دقیق و جایگزین برای تخمین تبخیرتغرق در حوضه آبخیز گرگان‌رود-قره‌سو استفاده شود. پژوهش Morshedi (2023) در دشت شهرکرد، با استفاده از الگوریتم سبال^۳ و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸، نشان داد که میانگین تبخیرتغرق واقعی گل محمدی در دوره رشد حدود ۱۰۴۳/۸ میلی‌متر بوده است. این نتایج بر کارایی بالای سبال در تخمین نیاز آبی گیاهان تأکید دارد. مزایای سبال و نتایج مثبت به‌دست‌آمده از آن، الگوریتم سبال را به‌عنوان روشی قابل اعتماد و کم‌هزینه برای تخمین تبخیرتغرق در

³ SEBAL

⁴ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

¹ Penman-Monteith FAO-56

² ESA



شکل ۱- موقعیت حوضه گرگانرود و قره‌سو
Figure 1- The Location of the Gharehsu-Gorganrud basin

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از سه دسته داده به شرح زیر استفاده شد.

الف) از میان ایستگاه همدیدی موجود در حوضه گرگانرود-قره‌سو، داده‌های هواشناسی مربوط به ۸ ایستگاه از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. این داده‌ها شامل: میانگین دما، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و مجموع ساعت آفتابی هستند. جدول ۲ طول و عرض جغرافیایی هر یک از ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

ب) تصاویر ماهواره لندست به شماره سین ۴۰، بادقت ۳۰ متر در تاریخ‌های مارس، آوریل، مه و ژوئن سال ۲۰۱۸

در این تحقیق از تصاویر ماهواره لندست ۸ از مجموعه Landsat Collection 2 Tier 1 Level 2 برای محاسبه شاخص NDVI و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی استفاده شده است. تصاویر در بازه‌های ۳۲ روزه از مارس تا ژوئن ۲۰۱۸ ترکیب شده‌اند و شاخص NDVI از باندهای نزدیک به مادون قرمز و قرمز محاسبه شده است همچنین برای تحلیل‌های دقیق، تصحیحات رادیومتریک و اتمسفری انجام شده است.

پ) اطلاعات آماری دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان شامل فایل اکسل که دارای اطلاعات زمین‌های گندم است. این اطلاعات نشان‌دهنده مختصات نقاط X و Y موقعیت زمین در سیستم مختصات یوتی‌ام^۱ است. همچنین، مختصات جغرافیایی (عرض و طول جغرافیایی)، مساحت زمین، میزان برداشت و عملکرد گندم در سال ۱۳۹۶ نیز در این فایل ذکر شده است.

برای استخراج زمین‌های کشاورزی که گندم در آن‌ها کشت شده از سنجش از دور با استفاده از تناوب زراعی گیاه و شاخص پوشش

گیاهی استفاده شد و سپس اطلاعات به دست آمده با اطلاعات آماری دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی سنجش و صحت‌سنجی شد.

در وهله اول از تصاویر لندست بادقت ۳۰ متر استفاده و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده استخراج شده است. مقدار آن بین ۱ تا ۱- واقع می‌شود که مقادیر بالای ۰/۱ نشان‌دهنده شروع پوشش گیاهی است و مقادیر منفی به میزان رطوبت و آب در منطقه اشاره می‌کند. با این روش و به‌کارگیری داده‌های سنجش از دور، می‌توان نتایج مناسبی را در مورد زمین‌های کشاورزی که گندم در آن‌ها کشت شده است، به دست آورد. البته باید توجه داشت که استفاده از داده‌های سنجش از دور ممکن است دارای خطاهای اندکی باشد که با صحت‌سنجی انجام شده به‌وسیله داده‌های زمینی می‌توان نتایج قابل قبولی را تولید کرد.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

در محیط گوگل ارث انجین، کد مربوط به استخراج شاخص پوشش گیاهی نوشته شده و با به‌کارگیری این کد، خروجی مربوط به شاخص پوشش گیاهی از تصاویر دریافت می‌شود. سپس با استفاده از دستور RECLASSIFY در نرم‌افزار GIS، این شاخص طبق بازه‌های معمول طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱).

با استفاده از این روش، می‌توان مقادیر شاخص پوشش گیاهی را به‌صورت علمی طبقه‌بندی کرد و نتایج دقیق‌تری در مورد پوشش گندم در زمین‌های کشاورزی دریافت کرد. این روش توانایی تحلیل دقیق‌تری در مورد پوشش گیاهی و تغییرات آن در زمان را فراهم می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در تحقیقات مربوط به کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی استفاده شود.

^۱ UTM

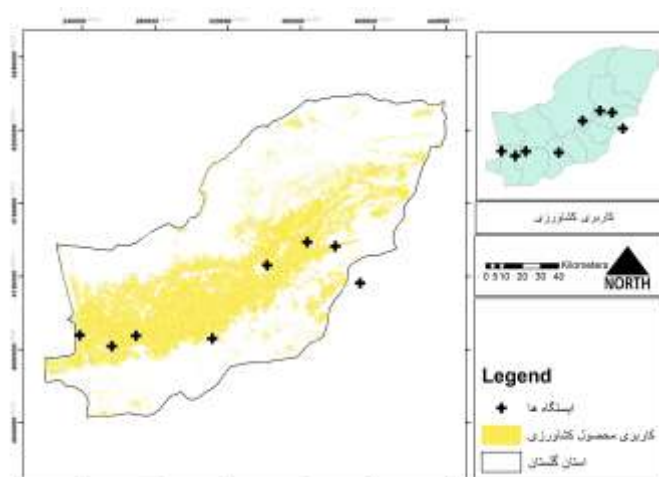
جدول ۱- طبقه‌بندی NDVI

Table 1- NDVI classification

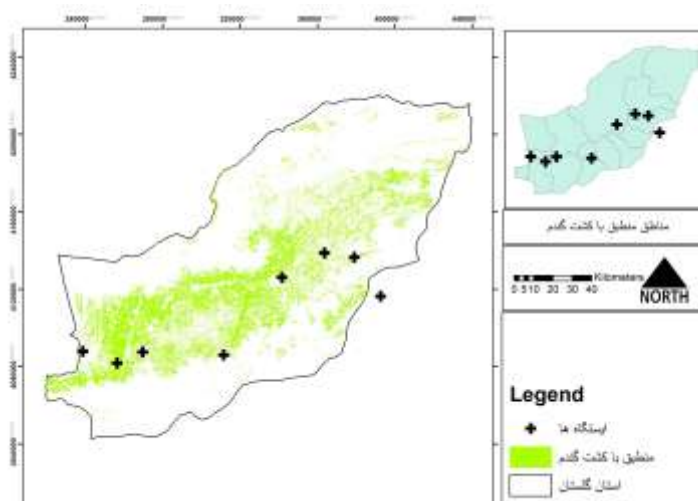
بازه	کلاس
0 تا -1	آب
0.1 تا 0	خاک
0.2 تا 0.1	مرتع کم تراکم
0.3 تا 0.2	مرتع پر تراکم
0.45 تا 0.3	پوشش کشاورزی و علف
1 تا 0.45	پوشش پر تراکم و جنگل

تعداد کلاس‌ها برای طبقه‌بندی از اهمیت بالایی برخوردار است و بدون شک، تعیین تعداد بهینه کلاس‌های طیفی دارای اهمیت ویژه‌ای است. برای انجام طبقه‌بندی نظارت شده، از دستورات موجود در نرم‌افزار ENVI استفاده و با توجه به مختصات جغرافیایی نقاط تعیین شده در مطالعات میدانی، این طبقه‌بندی صورت گرفت.

در این مرحله، از یک دیتای کاربردی با دقت ۱۰ متر از تصاویر ستینل برای کاربری اراضی استفاده می‌شود. در این دیتا، مقدار ۴ نشان‌دهنده زمین‌های کشاورزی است (شکل ۲). در فرآیند طبقه‌بندی نظارت شده، از داده‌های حاصل از مطالعات میدانی و داده‌های زمینی موجود برای انجام طبقه‌بندی استفاده می‌شود. در این روش، انتخاب



شکل ۲- شناسایی مناطق کشاورزی
Figure 2- Identifying agricultural areas



شکل ۳- مکان تعیین شده اراضی کشت گندم
Figure 3- Locating the wheat farms

استفاده از این روش، می توان مناطقی که گندم در آن ها کشت شده است را بادقت بیشتری تعیین کرد.

مطمئن تری رسید. البته باید توجه داشت که وجود خطا در استخراج نتایج را نمی توان انکار کرد که سعی شد از طریق صحت سنجی با داده های زمینی آن را کاهش داد.

نتایج حاصل از شاخص پوشش گیاهی با استفاده از دستور CLIP به نتایج کاربری به دست آمده برش می خورد تا مناطقی که بیانگر زمین کشاورزی که گندم در آن کشت می شد مشخص شود (شکل ۳). با استفاده از این شاخص ها، می توان بادقت مناسبی پوشش گیاهی را در مناطق مختلف تعیین و از آن برای استخراج اطلاعات مربوط به محصولات کشاورزی استفاده کرد. همچنین، تصاویر ماهواره ای بادقت بالای ۱۰ متر در تعیین کاربری های زمین، می توان به صحت نتایج

جدول ۲- طول و عرض جغرافیایی ایستگاه های همدیدی منتخب

Table 2- Longitude and latitude of synoptic stations in the study area

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	میانگین بلندمدت دما (درجه سانتی گراد)	میانگین بلندمدت بارش (میلی متر)
1	رضوان	37.2	55.2	11.3	590.7
2	بندر ترکمن	36.9	54.0	18.3	454.5
3	علی آبادکتول	37.1	55.7	16.0	607.6
4	کالاله	36.8	54.2	17.5	538.2
5	گرگان	37.3	55.4	15.4	531.8
6	گرگان هاشم آباد	36.9	54.4	15.6	520.5
7	گنبد کاووس	36.9	54.8	18.3	427.5
8	مینودشت	37.3	55.6	16.6	713.8

زمینی به دست آمده، در حالی که داده های بارندگی و عمق نوری گیاه به صورت ماهواره ای اندازه گیری شده اند.

۲-۳- مدل GLEAM^۱

داده های این مطالعه از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ موجود هستند و تمام پارامترهای آن ها از طریق روش های ماهواره ای استخراج و در قالب فایل های NetCDF ذخیره شده اند، به طوری که هر فایل به یک سال و یک متغیر اختصاص دارد.

۲-۴- داده های ماهواره ای GRACE^۶

با آغاز پروژه GRACE در سال ۲۰۰۲، مطالعه مسیرهای انتقال جرم در اطراف کره زمین وارد مرحله جدیدی شد. این پروژه با استفاده از داده های جاذبه سنجی ماهواره ای، اطلاعات دقیقی در مورد میزان حرکت جرم و تغییرات آن در طول زمان فراهم کرده است. هدف اولیه آن نظارت بر تغییرات جاذبه زمین در فاصله بین دو ماهواره حین چرخش آن ها به دور زمین یا به عبارتی تغییرات میدان گرانش زمین است. فضایی می دبال کننده در واقع حدود ۲۲۰ کیلومتر از فضایی اصلی فاصله دارد. GRACE با کار

مدل جهانی تبخیر از سطح زمین آمستردام (GLEAM) به برآورد اجزای مختلف تبخیر تعرق بر اساس داده های مشاهدات ماهواره ای می پردازد (Martens et al., 2006). این اجزا شامل تعرق، برگاب، تبخیر از سطح خاک خشک، تصعید برف^۲ و تبخیر از سطح آزاد آب است. خروجی این مدل شامل تبخیر تعرق پتانسیل، رطوبت خاک در ناحیه ریشه، رطوبت سطح خاک و تنش تبخیری^۳ است. تبخیر تعرق پتانسیل بر پایه مشاهدات تابش خالص^۴ و دما در نزدیکی سطح زمین^۵، با استفاده از رابطه پریستلی-تیلور محاسبه می شود. برای به دست آوردن تبخیر واقعی، تبخیر تعرق پتانسیل با تنش تبخیری ضرب می شود. شبکه های جغرافیایی با ابعاد ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه تقسیم بندی شده اند و داده ها به صورت روزانه، ماهانه، و سالانه در دسترس هستند. در مرکز پایگاه داده دو مجموعه داده موجود است که تفاوت آن ها به نوع و زمان داده های ورودی مربوط می شود. تفاوت آن ها، در زمان و نوع داده های ورودی مجموعه به شرح زیر است:

۱. GLEAM v 3.2a

دوره آماری داده ها از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ و شامل داده هایی است که تبخیر تعرق، تابش خورشیدی و دما بر اساس اندازه گیری های

^۴ Net Radiation

^۵ Near-Surface Air Temperature

^۶ Gravity Recovery and Climate Experiment

^۱ Global Land Evaporation Amsterdam Model

^۲ Snow Sublimation (E_s)

^۳ Evaporative Stress (S)

γ ثابت سایکرومتری برحسب کیلوپاسکال برحسب درجه سانتیگراد است که با محاسبه این پارامترها، می‌توان مقدار تبخیرتغرق گیاه مرجع (ET_0) را به میلی‌متر در روز به دست آورد. برای تبدیل تبخیرتغرق پتانسیل برآورد شده از رابطه پنمن مانیتیت فائو به تبخیرتغرق واقعی از ضریب گیاهی که در این مطالعه گندم است طبق رابطه ۵ استفاده شد.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (5)$$

که در آن: ET_c تبخیرتغرق گیاه برحسب میلی‌متر بر روز، K_c ضریب گیاه بدون واحد و ET_0 تبخیرتغرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز است. مقادیر اولیه K_c از نشریه فائو استخراج و ضمن مقایسه با مقادیر پیشنهاد شده محلی بر حسب اقلیم و روابط موجود در نشریه فائو ۵۶ اصلاح شد.

۲-۶- بررسی عملکرد محصولات ماهواره‌ای

برای ارزیابی محصولات ماهواره‌ای و مدل پنمن مانیتیت از شاخص‌های زیر استفاده شد. خطای جذر میانگین مربعات^۴ نشان‌دهنده اندازه میانگین انحراف معیار میان داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط یک مدل آماری است. این معیار معمولاً برای اندازه‌گیری خطای مطلق میان دو توزیع استفاده می‌شود. معمولاً از ۰ تا $+\infty$ متغیر بوده که مقادیر کوچک‌تر RMSE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}} \quad (6)$$

میانگین قدرمطلق خطا^۵ نشان‌دهنده میانگین انحراف مطلق بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط مدل است. این معیار به‌عنوان یک اندازه دقیق از خطای مدل استفاده می‌شود. معمولاً از ۰ تا $+\infty$ متغیر بوده که مقادیر کوچک‌تر MAE دارای تطابق بهتر هستند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \quad (7)$$

ضریب تعیین^۵ این ضریب بیانگر میزان تطابق بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی شده توسط یک مدل آماری است. ضریب تعیین معمولاً از $-\infty$ تا ۱ متغیر بوده و از آن برای اندازه‌گیری عملکرد مدل استفاده می‌شود. عدد ۱ نشان‌دهنده تطابق کامل بین داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی مدل است.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})(F_i - \bar{F}))^2}{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2 \times \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (8)$$

مشترک میان ناسا و DLR ساخته و در ۱۷ مارس ۲۰۰۲ ایستگاه پلستیک در روسیه^۲ به فضا پرتاب شده است. (Mo et al., 2016) با تغییرات جاذبه زمین که ناشی از تغییرات کمیت و توزیع آب و آب‌های زیرزمینی، یخچال‌ها، و ریزش‌های جوی است، می‌توان تغییرات تبخیرتغرق واقعی را نیز به‌طور غیرمستقیم محاسبه کرد. تغییرات جاذبه زمین نشان‌دهنده تغییرات ذخیره آب زیرزمینی و سطحی در نقاط مختلف زمین است. همچنین طبق ترازمندی آب که در رابطه (۲) ارائه شده است، محاسبه تبخیرتغرق واقعی، نیاز به داده‌های زمینی شامل بارش و رواناب دارد. این داده‌ها در کنار داده‌های ماهواره‌ای GRACE می‌توانند تبخیرتغرق واقعی در منطقه موردنظر را ارائه دهند. برای محاسبه تبخیرتغرق واقعی لازم است حوضه بسته فرض شود و مطابق رابطه (۳)، با داشتن متغیرهای بارش و رواناب و همچنین ΔS که ماهواره GRACE در اختیار می‌گذارد می‌توان تبخیرتغرق واقعی را محاسبه کرد.

$$P + Q_{in} = ET + \Delta S + Q_{out} + R_o \quad (2)$$

$$P - R_o - ET \pm \Delta S = 0 \quad (3)$$

که در آن، Q_{in} جریان ورودی، Q_{out} جریان خروجی، ΔS میزان تغییرات موجودی آب در خاک و رسوبات، R_o میزان رواناب، ET تبخیرتغرق و P میزان بارندگی است که در یک بازه زمانی یکساله و یا بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۵- رابطه پنمن مانیتیت فائو

برای محاسبه تبخیرتغرق مرجع با استفاده از رابطه پنمن مانیتیت فائو، از داده‌های مشاهداتی شامل میانگین دما، حداقل دما، حداکثر دما، رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعت آفتابی هستند. ET_0 طبق رابطه (۴) محاسبه شد (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

که در آن، ET_0 تبخیرتغرق پتانسیل برحسب میلی‌متر بر روز، R_n تشعشع خالص در سطح گیاه برحسب مگاژول بر مترمربع بر ساعت، G چگالی شار حرارتی خاک برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز، T متوسط درجه حرارت روزانه برحسب درجه سانتیگراد، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، e_s میانگین فشار بخار اشباع هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری برحسب کیلوپاسکال، e_a میانگین فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری برحسب کیلوپاسکال، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در میانگین درجه حرارت برحسب کیلوپاسکال بر درجه سانتیگراد و

⁴ Mean Absolute Error (MAE)

⁵ Coefficient of Determination (R^2)

¹ National Aeronautics and Space Administration

² Plesetsk Cosmodrome, Russia

³ Root Mean Square Error (RMSE)

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برآورد تبخیر تعرق با استفاده از رابطه پنمن مانیتث فائو

در پژوهش حاضر استفاده از داده های ۸ ایستگاه همدیدی در منطقه مورد مطالعه و متغیرهای مورد استفاده در رابطه پنمن مانیتث فائو، محاسبات میزان تبخیر تعرق برآورد شده برحسب میلی متر بر روز در بازه زمانی مورد مطالعه انجام شده که در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین در جدول ۴ مقدار تبخیر تعرق واقعی برای ایستگاه رضوان آمده است.

میانگین درصد مطلق خطا^۱ نشان دهنده میزان دقت یک مدل در پیش بینی درصدی است. این معیار از میانگین درصد خطای مطلق بین داده های مشاهده شده و پیش بینی شده توسط مدل محاسبه می شود که در مقایسه با MAD و MSE میزان خطا را بهتر نشان می دهد. معمولاً از ۰ تا +∞ متغیر بوده که مقادیر کوچکتر MAPE دارای تطابق بهتری هستند.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right|}{n} \times 100 \quad (9)$$

در معادلات فوق مقدار واقعی، مقدار برآورد شده و تعداد داده موجود است (Chicco et al., 2021).

جدول ۳- تبخیر تعرق برآورد شده حاصل از رابطه پنمن مانیتث فائو ایستگاه های حوضه برحسب میلی متر بر روز

Table 3- Actual evapotranspiration resulting from the FAO Penman-Monteith Equation of the study stations (mm/day)

سال	ایستگاه ماه	رضوان	بندر ترکمن	علی آبادکتول	کلاله	گرگان	گرگان هاشم آباد	گنبد کاووس	مینودشت
2016	مارس	1.7	2.4	2.2	2.6	2.5	2.0	1.9	1.4
	آوریل	2.4	3.0	2.6	3.2	3.2	2.8	2.1	2.1
	مه	2.8	3.4	3.0	3.8	3.6	3.3	2.2	2.7
	ژوئن	3.2	3.9	3.6	4.3	3.5	3.9	3.0	2.5
2017	مارس	1.2	2.5	2.3	1.8	2.8	2.1	1.8	1.5
	آوریل	2.1	2.5	3.7	3.1	3.2	2.8	2.4	2.2
	مه	2.8	3.0	3.2	3.8	3.8	3.5	3.2	2.3
	ژوئن	3.1	3.8	3.9	3.5	3.6	3.3	3.9	2.8
2018	مارس	1.6	2.5	2.4	2.6	2.6	2.3	2.1	2.6
	آوریل	2.0	3.5	2.5	3.2	3.5	3.2	2.4	2.6
	مه	2.6	3.2	3.6	3.7	3.5	3.2	2.7	3.1
	ژوئن	2.8	2.4	2.9	3.6	2.5	3.3	3.2	2.5

جدول ۴- مقدار تبخیر تعرق واقعی برحسب میلی متر بر روز برای ایستگاه رضوان

Table 4- Actual Evapotranspiration value in millimeters per day (mm/day) of the Rezvan station

سال	ماه	فائو پنمن مانیتث	GLEAM	GRACE
2016	مارس	1.7	1.9	2.0
	آوریل	2.4	2.1	2.0
	مه	2.8	2.6	2.6
	ژوئن	3.2	3.1	2.7
2017	مارس	1.2	1.5	1.6
	آوریل	2.1	2.0	2.2
	مه	2.8	2.5	2.3
	ژوئن	3.1	2.8	2.8
2018	مارس	1.6	1.3	1.1
	آوریل	2.0	1.6	1.6
	مه	2.6	2.9	2.7
	ژوئن	2.8	3.4	3.5

¹ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

۳-۲- خروجی مدل GLEAM

از اختلاف آن‌ها دارد، وجود این اختلاف می‌تواند به علت مقادیر ضریب گیاهی باشد.

نتایج بر اساس ایستگاه‌های موجود حوضه در جدول ۵، آورده شده است که در قیاس با داده‌های خروجی از مدل پنمن مانتیث نشان

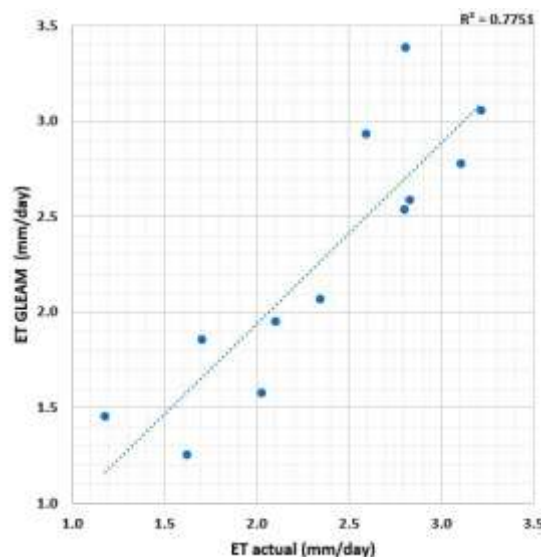
جدول ۵- تبخیر تعرق واقعی مدل GLEAM در ایستگاه‌های مطالعاتی (میلی متر در روز)

Table 5- Actual evapotranspiration of the GLEAM model at the study stations (mm/day)

سال	ایستگاه ماه	رضوان	بندر ترکمن	علی آبادکتول	کالاله	گرگان	گرگان هاشم آباد	گنبد کاووس	مینودشت
2016	مارس	1.9	2.0	1.9	1.8	1.7	1.3	1.5	1.9
	آوریل	2.1	2.4	2.3	2.4	2.9	2.2	2.6	2.1
	مه	2.6	3.0	2.4	3.7	3.0	3.5	3.1	3.3
	ژوئن	3.1	3.0	2.9	3.1	3.2	3.7	2.8	3.2
2017	مارس	1.5	3.0	2.0	1.6	2.3	1.2	1.6	1.0
	آوریل	2.0	2.2	2.2	2.2	2.4	2.5	2.7	2.2
	مه	2.5	2.5	3.0	2.2	2.6	2.8	3.8	2.1
	ژوئن	2.8	3.3	3.4	3.7	2.8	2.6	3.1	3.1
2018	مارس	1.3	2.0	2.4	2.7	1.8	2.4	1.8	2.0
	آوریل	1.6	3.0	2.7	2.4	2.5	3.7	2.6	2.8
	مه	2.9	3.1	3.2	3.4	3.2	3.5	2.7	3.4
	ژوئن	3.4	3.0	3.4	3.2	2.5	3.0	2.6	2.6

داده شده، همان طور که در شکل مشخص است مقدار $R^2 = 0.7751$ به دست آمده است.

شاخص آماری R^2 بین تبخیر تعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانتیث فائو و داده‌های مدل GLEAM برای ایستگاه‌های مختلف مقایسه شد که فقط برای یک ایستگاه رضوان در شکل ۴ نشان



شکل ۴- مقایسه تبخیر تعرق برآورد شده از داده‌های مدل GLEAM و رابطه پنمن مانتیث فائو برای ایستگاه رضوان

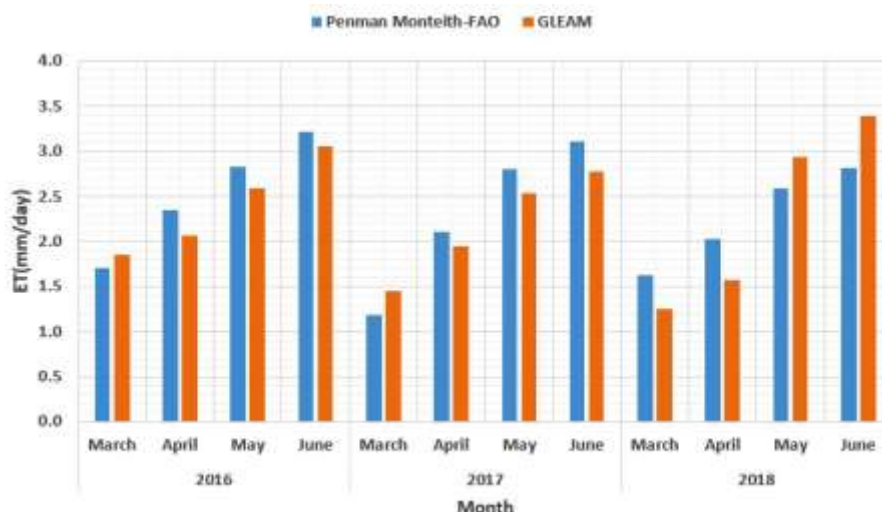
Figure 4- Comparison of estimated evapotranspiration from GLEAM model and FAO Penman-Monteith equation of the Rezvan station

و رابطه پنمن مانتیث فائو در طول ماه‌های مختلف و در سه سال مورد بررسی (۲۰۱۶-۲۰۱۸) متفاوت هستند.

در برخی از ماه‌ها مانند مارس و آوریل، مدل GLEAM مقادیر تبخیر تعرق پایین‌تری را نسبت به پنمن مانتیث فائو نشان می‌دهد. در مقابل، در ماه‌های دیگری مانند ژوئن، مقادیر GLEAM بیشتر

اعداد سایر شاخص‌های آماری GLEAM برای ایستگاه‌های مختلف به دست آورده که در جدول ۴ نشان داده شده است. شکل ۵ هم نمودار مقایسه مقادیر تبخیر تعرق محاسبه شده حاصل از مدل GLEAM و پنمن مانتیث فائو برای ایستگاه رضوان را نشان می‌دهد که مقادیر تبخیر تعرق برآورد شده توسط مدل GLEAM

است. این تفاوت‌ها می‌توانند ناشی از تفاوت در روش‌های برآورد تبخیرتعرق در هر مدل باشد. مدل GLEAM به داده‌های ماهواره‌ای متکی است، درحالی‌که پنمن مانیتث فائو بر اساس معادلات و داده‌های ورودی زمین محور است.



شکل ۵- مقایسه تغییرات تبخیرتعرق محاسبه شده حاصل از مدل GLEAM و پنمن مانیتث فائو برای ایستگاه رضوان
Figure 5- Comparison of calculated evapotranspiration changes from GLEAM Model and FAO Penman-Monteith of the Rezvan station

همبستگی مربوط به ایستگاه کلاله با ارتفاع ۱۲۷ متر و الگوی کاربری اراضی غیرکشاورزی و دارای شاخص‌های آماری $MAPE = ۱۸/۰۵$ و $R^2 = ۰/۴۹$ ، $MAE = ۰/۶۰$ ، $RMSE = ۰/۷۷$ است (جدول ۶).

طبق مقایسات انجام شده بین تبخیرتعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیتث فائو و داده‌های مدل GLEAM بهترین همبستگی مربوط به ایستگاه رضوان با ارتفاع ۱۴۴۷ متر و الگوی کاربری اراضی کشاورزی و دارای شاخص‌های آماری $MAPE = ۱۳/۶۷$ و $R^2 = ۰/۷۸$ ، $MAE = ۰/۳۰$ و $RMSE = ۰/۳۲$ ضعیف‌ترین

جدول ۶- شاخص‌های آماری مقایسه بین برآوردهای رابطه پنمن مانیتث فائو و مدل GLEAM

Table 6- Statistical indices of comparison between FAO Penman-Monteith and GLEAM model estimations

شاخص آماری	رضوان	بندرترکمن	علی‌آبادکتول	کلاله	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	گنبدکاووس	مینودشت
RMSE (mm/day)	0.32	0.53	0.59	0.77	0.71	0.51	0.50	0.42
MAE (mm/day)	0.30	0.49	0.46	0.60	0.62	0.45	0.43	0.36
R^2 (-)	0.78	0.41	0.40	0.49	0.54	0.74	0.46	0.69
MAPE (%)	13.67	16.67	14.64	18.05	19.41	16.65	17.09	16.08

این مدل‌ها با مقادیر واقعی تبخیرتعرق است. بررسی جزئی‌تر شرایط محیطی و استفاده از داده‌های میدانی بیشتر نیز ضروری است.

۳-۳- خروجی داده‌های ماهواره‌ای GRACE

باتوجه به نکات ذکر شده، امکان محاسبه تبخیرتعرق در منطقه مورد مطالعه از طریق جمع و کسر مقادیر بارش و رواناب و همچنین با استفاده از داده‌های مربوط به ترازمندی آب در حوضه آبریز گرگان‌رود-قره‌سو وجود دارد. داده‌های ماهواره‌ای GRACE که به‌طور منطقی باید مشابه با داده‌های مدل GLEAM باشند، در

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که تبخیرتعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیتث فائو در مناطق با ارتفاع بالا و الگوی کاربری اراضی کشاورزی ممکن است بهتر عمل کند. این در حالی است که در مناطق با ارتفاع پایین و الگوی کاربری اراضی غیرکشاورزی، همبستگی این روش کمتر قابل اطمینان است. Gharehkhani et al. (2020) در مطالعه‌ای نشان دادند که مدل GLEAM در ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا و یاخته‌های با الگوی کاربری اراضی کشاورزی از عدم قطعیت کمتری برخوردار است. با این حال، برای نتیجه‌گیری قطعی‌تر، نیاز به مقایسه و ارزیابی مستقیم

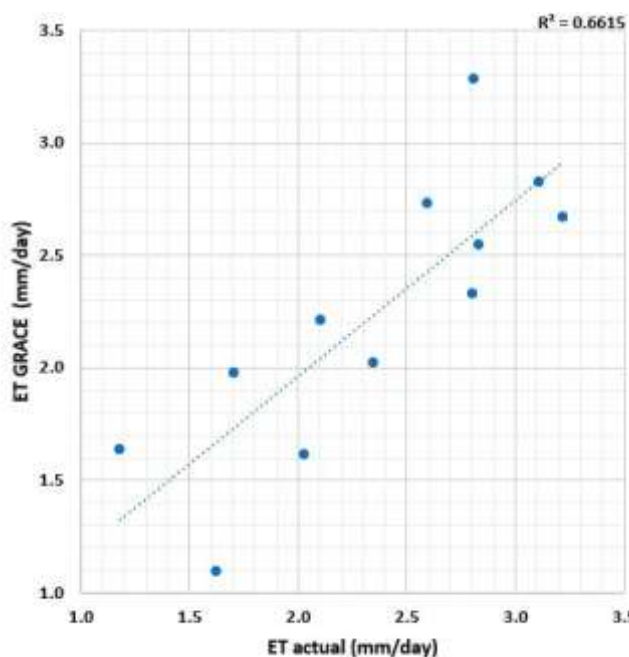
عمل نشان دهنده برآوردی بالاتر از حد انتظار بودند. در این خصوص، جدول ۷ میزان تبخیرتعرق برآورد شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE بر حسب میلی‌متر در روز، در بازه زمانی مورد نظر و بر اساس ایستگاه‌های حوضه، ارائه شده است.

جدول ۷- تبخیرتعرق واقعی برآورد شده با داده‌های ماهواره‌ای GRACE در ایستگاه‌های مطالعاتی
Table 7- Actual evapotranspiration estimated by GRACE satellite data at the study stations (mm/day)

سال	ایستگاه ماه	رضوان	بندر ترکمن	علی‌آبادکتول	کالاله	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	گنبد کاووس	مینودشت
2016	مارس	2.0	1.7	2.0	2.0	1.6	1.7	1.1	2.0
	آوریل	2.0	3.1	2.4	2.3	2.2	2.4	1.2	2.5
	مه	2.6	3.2	2.5	2.8	2.9	2.9	2.8	3.2
	ژوئن	2.7	3.6	2.9	2.6	3.5	2.9	2.8	3.0
2017	مارس	1.6	2.1	2.9	1.8	2.5	1.6	1.4	1.4
	آوریل	2.2	3.0	2.8	2.0	2.9	2.1	1.6	2.3
	مه	2.3	2.2	2.9	2.9	3.0	3.0	2.6	2.8
	ژوئن	2.8	3.1	3.7	3.1	3.0	3.8	2.8	3.4
2018	مارس	1.1	2.2	1.7	1.4	2.3	2.5	1.5	2.2
	آوریل	1.6	3.0	1.9	2.3	2.5	4.0	2.8	1.9
	مه	2.7	3.0	2.6	3.8	3.6	3.8	2.8	3.3
	ژوئن	3.5	3.3	3.4	3.7	3.0	3.7	2.1	2.9

و همچنین تلاش برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های GRACE به مقیاسی کوچک و محلی، کاهش مقدار شاخص آماری R^2 می‌تواند ناشی از قدرت تفکیک مکانی پایین و ابعاد بزرگ پیکسل‌های ماهواره و احتمال بروز خطا و پایین آمدن دقت در حین انجام ریزمقیاس‌نمایی باشد.

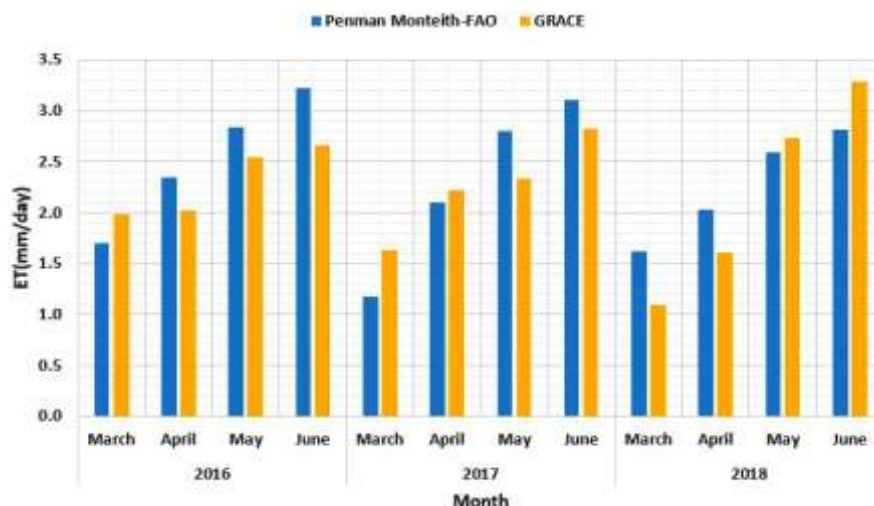
شاخص آماری R^2 بین تبخیرتعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانتیث فائو و داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای ایستگاه‌های مختلف مقایسه شد که فقط برای یک ایستگاه رضوان در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است مقدار $R^2 = 0.66$ به دست آمده است. علی‌رغم وجود پوشش وسیع مکانی



شکل ۶- مقایسه تبخیرتعرق برآورد شده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و رابطه پنمن مانتیث فائو برای ایستگاه رضوان
Figure 6- Comparison of estimated evapotranspiration from FAO penman-monteith equation and grace satellite data of the Rezvan station

ارائه می‌دهند، درحالی که در ماه‌های دیگر (مانند مارس و آوریل) مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها ممکن است به دلیل حساسیت بالای داده‌های GRACE به تغییرات جرم و آب در سطح زمین باشد که منجر به برآورد غیرمستقیم تبخیرتقرق می‌شود.

در شکل ۷، مقایسه مقادیر تبخیرتقرق برآورد شده توسط داده‌های ماهواره‌ای GRACE و رابطه پنمن مانیتث فائو برای ایستگاه رضوان نشان می‌دهد که داده‌های GRACE در برخی از ماه‌ها (مانند ژوئن) مقادیر بالاتری را نسبت به پنمن مانیتث فائو



شکل ۷- مقایسه تغییرات تبخیرتقرق محاسبه شده حاصل از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و رابطه پنمن مانیتث فائو برای ایستگاه رضوان
Figure 7- Comparison of calculated evapotranspiration changes from GRACE and FAO Penman-Monteith satellite data of the Rezvan station

اعداد سایر شاخص‌های آماری داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای ایستگاه‌های مختلف به دست آورده که در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- شاخص‌های آماری بین رابطه پنمن مانیتث فائو و داده‌های ماهواره‌ای GRACE

Table 8- Statistical indices between FAO Penman-Monteith and GRACE satellite data

شاخص آماری	رضوان	بندر ترکمن	علی‌آبادکتول	کلالة	گرگان	گرگان هاشم‌آباد	گنبد کاووس	مینودشت
RMSE (mm/day)	0.41	0.53	0.60	0.91	0.62	0.57	0.68	0.47
MAE (mm/day)	0.38	0.46	0.54	0.77	0.54	0.52	0.62	0.43
R ² (-)	0.66	0.37	0.41	0.45	0.35	0.50	0.44	0.54
MAPE (%)	17.46	16.13	17.99	23.17	17.23	17.25	24.97	18.64

همان‌طور که در مطالعه Chao et al. (2021) ذکر شده است برآورد داده‌های ماهواره‌ای GRACE به داده‌های مدل GLEAM نزدیک بوده و در منطقه‌ای نیمه‌خشک کاربست این داده‌ها باعث افزایش دقت برآوردها شده است که اقلیم نسبتاً خشک‌تر ایستگاه رضوان می‌تواند نتایج بهتر در این ایستگاه را توجیه کند. در مقابل، ایستگاه کلالة با ارتفاع ۱۲۷ متر و الگوی کاربری اراضی غیرکشاورزی، نتایج از دقت کمتری برخوردار بود. عوامل مختلفی مانند ارتفاع، میزان رطوبت هوا و نزدیکی به دریا که بر میزان تبخیرتقرق تأثیر دارند، لزوماً به صورت دقیق در تمام

طبق مقایسات انجام شده بین تبخیرتقرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیتث فائو و داده‌های ماهواره‌ای GRACE بهترین همبستگی مربوط به ایستگاه رضوان با اقلیم خشک‌تر نسبت به سایر ایستگاه‌ها و دارای شاخص‌های آماری $RMSE=0/41$ ، $MAE=0/38$ ، $R^2=0/66$ و $MAPE=17/46$ و ضعیف‌ترین همبستگی مربوط به کلالة با ارتفاع ۱۲۷ متر و الگوی کاربری اراضی غیرکشاورزی و دارای شاخص‌های آماری $RMSE=0/91$ ، $MAE=0/77$ ، $R^2=0/45$ و $MAPE=23/17$ است.

مشارکت نویسندگان

امیر حسین پیرمون: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری اماری، تحلیل نتایج، تهیه نسخه اولیه مقاله
نوذر قهرمان: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

منابع

- پیرمون، امیرحسین، قهرمان، نوذر و قمقامی، مهدی (۱۴۰۲). مقایسه برآوردهای تبخیر تعرق حاصل از ماهواره SENTINEL-2 با معادله پنمن مانیت در حوضه گرگان رود-قره‌سو. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۱۷(۶)، ۱۰۶۲-۱۰۵۳.
- حافظ پرست، مریم (۱۴۰۱). پایش سطح آب زیرزمینی با استفاده از ماهواره GRACE و GLDAS در استان کرمانشاه. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۲(۴)، ۲۳۴-۲۵۷. doi: 10.22125/iwe.2022.150736.
- ستاری، محمدتقی، احمدی‌فر، وحدت، و پاشاپور خلف انصار، رسول. (۱۳۹۳). مدل‌سازی تلفات تبخیر از مخزن سد علویان با استفاده از مدل درختی M5 و مقایسه آن با روش‌های تجربی. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۵(۱)، ۱۰۷-۱۲۱.
- شرکت مهندسی مشاور جاماب (۱۳۸۷). گزارش مطالعات حوزه آبخیز گرگانرود.
- طالبی، حامد، صمدیان‌فرد، سعید، و ولیزاده کامران، خلیل (۱۴۰۲). روش جدید مبتنی بر تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنجنده مادیس برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع ماهانه در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱۸۰-۱۹۵. doi: 10.22098/mmws.2023.12048.1198
- عبدی دزفولی، امین، قهرمان، نوذر، و قمقامی، مهدی (۱۳۹۹). ارزیابی برآوردهای تبخیر-تعرق واقعی مدل جهانی (GLEAM) در شمال حوضه کرخه. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۲)، ۳۶۶-۳۷۸. doi: 10.22098/mmws.2023.12048.1198
- عنابی میلانی، اژدر، و نیشابوری، محمدرضا (۱۳۹۷). مقایسه برخی روابط تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع برای دشت تبریز با استفاده از لایسیمتر و ارائه مدلی برای تعیین آن از روی داده‌های هواشناسی. *دانش آب و خاک*، ۲۸(۱)، ۴۱-۵۴.
- فرجی، زهره، کاویانی، عباس، و اشرف‌زاده، افشین (۱۳۹۶). ارزیابی داده‌های ماهواره GRACE در برآورد سطح آب زیرزمینی در استان قزوین. *مجله اکوهیستولوژی*، ۴(۲)، ۴۶۳-۴۷۶. doi: 10.22059/ije.2017.61482.
- قره‌خانی، ابودر، قهرمان، نوذر، و 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*، ۵۱(۵)، ۱۱۷۷-۱۱۹۳. doi: 10.22059/ijswr.2020.293401.668413.
- مرشدی، علی (۱۴۰۲). برآورد تبخیر و تعرق واقعی و نیاز آبی گل محمدی (*Rosa damascena Mill.*) با استفاده از الگوریتم سبال. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۰-۳۶.

مدل‌های برآورد این کمیت لحاظ نمی‌شوند و بررسی‌های بیشتر حسب اقلیم مناطق در واسنجی و ارزیابی مدل‌ها ضروری است.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند دید کلی و وسیعی را در رابطه با پدیده‌های سطح زمین به دست دهد. پژوهش حاضر باهدف ارزیابی و مقایسه برآوردهای تبخیر تعرق محصولات ماهواره‌ای GRACE و مدل GLEAM در حوضه آبخیز گرگان‌رود - قره‌سو در استان گلستان با نتایج روش پنمن مانیت فائو انجام شد. طبق شاخص‌های همبستگی استخراج شده بین تبخیر تعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیت فائو و داده‌های مدل GLEAM بهترین همبستگی مربوط به ایستگاه رضوان با $MAPE=۱۳/۶۷$ و $R^2=۰/۷۸$ ، $MAE=۰/۳۰$ ، $RMSE=۰/۳۲$ و ضعیف‌ترین همبستگی مربوط به ایستگاه کلاله با $MAPE=۱۸/۰۵$ و $R^2=۰/۴۹$ ، $MAE=۰/۶۰$ ، $RMSE=۰/۷۷$ است. همچنین این مقایسات بین تبخیر تعرق برآورد شده از رابطه پنمن مانیت فائو و داده‌های ماهواره‌ای GRACE نشان داد که بهترین همبستگی مربوط به ایستگاه رضوان با $RMSE=۰/۴۱$ ، $MAE=۰/۳۸$ و $R^2=۰/۶۶$ و ضعیف‌ترین همبستگی مربوط به ایستگاه کلاله با $RMSE=۰/۹۱$ ، $MAE=۰/۷۷$ و $R^2=۰/۴۵$ است. بررسی‌های انجام شده در پژوهش‌های مشابه که توسط Chao et al. (2021) نشان می‌دهد که مقدار داده‌های ماهواره‌ای GRACE در برخی موارد بیشتر از مقادیر محاسبه شده با استفاده از رابطه پنمن مانیت فائو است؛ با این حال، این نتیجه ممکن است بسته به منطقه و شرایط محلی متفاوت باشد. تهیه نقشه‌های بروز شده کاربری اراضی در منطقه جهت تدقیق مقادیر ضریب گیاهی و برآوردهای تبخیر تعرق واقعی جهت ارزیابی سایر مدل‌ها و محصولات ماهواره‌ای در این منطقه و سایر حوضه‌های آبریز کشور پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه تهران در انجام این پژوهش و نیز سازمان هواشناسی کشور برای تامین داده‌های مورد نیاز قدردانی می‌نمایند

تضاد منافع نویسندگان

هیچ تضاد منافی وجود ندارد

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

References

- Abdidezfuli, A., Ghahreman, N., and Ghamghami, M. (2020). Evaluation of evapotranspiration estimations of GLEAM model in northern part of Karkhe basin. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(2), 366-378.
- Dor:20.1001.1.20087942.1399.14.2.2.7 [in Persian].
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. p.17.
- Chao, L., Zhang, K., Wang, J., Feng, J., and Zhang, M. (2021). A comprehensive evaluation of five evapotranspiration datasets based on ground and GRACE satellite observations: implications for improvement of evapotranspiration retrieval algorithm. *remote sensing*, 13(12), 2414. <https://doi.org/10.3390/rs13122414>
- Chicco, D., Warrens, MJ and Jurman G. 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Comput Sci. Jul 5*;7:e623. doi: 10.7717/peerj-cs.623
- Faraji, Z., Kaviani, A., and Ashrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(2), 463-476. doi: 10.22059/ije.2017.61482. [in persian]
- Gharehkhani, A., Ghahreman, N., and Irannejad, P. (2020). Uncertainty Analysis of Actual Evapotranspiration estimations using satellite data and climate databases (Case study: Karkheh basin). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(5), 1177-1193. doi: 10.22059/ijswr.2020.293401.668413. [in persian]
- Hafezparast, M. (2022). Monitoring of groundwater level changes using GRACE and GLDAS satellites in Kermanshah province. *Irrigation and Water Engineering*, 12(4), 234-257. doi: 10.22125/iwe.2022.150736. [in Persian]
- Jamab Consulting Engineering Co. (2008). Gorganrood watershed. [in persian]
- Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R. A. M., Fernández-Prieto, D., Beck, H. E., Dorigo, W. A., and Verhoest, N. E. C.: GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture, *Geosci. Model Dev.*, 10, 1903–1925, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>, 2017.
- Mo, X., Wu, J. J., Wang, Q., and Zhou, H. (2016) Variations in water storage in China over recent decades from GRACE observations and GLDAS, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 469–482, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-469-2016>.
- Morshedi, A. (2023). Estimation of actual evapotranspiration and water requirement of rose (*Rosa damascena* Mill.) using SEBAL algorithm. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 20-36. doi: 10.22098/mmws.2022.11400.1127. [in persian]
- Onnabi-Milani, A., and Neyshabouri, M. (2018). Comparison of some empirical estimating methods of reference evapotranspiration in Tabriz Plain using lysimeter and proposing a model for its determination from climatic data. *Water and Soil Science*, 28(1), 41-54. [in persian]
- Pascolini - Campbell, M., Reager, J., and Fisher, J. (2020). GRACE - based mass conservation as a validation target for basin - scale evapotranspiration in the contiguous United States. *Water Resources Research*, 56. <https://doi.org/10.1029/2019WR026594>.
- Pirmoon, A., Ghahreman, N., & Ghamghami, M. (2023). Comparison of evapotranspiration estimations of SENTINEL-2 Satellite and Penman-Monteith equation in Gorganrood-Gharehsoo basin. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. [in persian]
- Sattari, M. T., Ahmadifar, V., and Pashapour Kholf Ansar, R. (2014). M5 Tree model-based modeling of evaporation losses in eleviyan reservoir and comparison with empirical equations. *Irrigation and Water Engineering*, 5(1), 107-121. [in persian]
- Sun, M., Dong, Q., Jiao, M., Zhao, X., Gao, X., Wu, P., and Wang, A. (2018). Estimation of actual evapotranspiration in a semiarid region based on GRACE Gravity satellite data—A case study in Loess Plateau. *Remote Sensing*, 10(12), 2032. <https://doi.org/10.3390/rs10122032>.
- Talebi, H., Samadianfard, S., & Valizadeh Kamran, K. (2023). A novel method based

on Landsat 8 and MODIS satellite images to estimate monthly reference evapotranspiration in arid and semi-arid climates. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 180-195. doi: 10.22098/mmws.2023.12048.1198 .[in persian]