



Application of the Thornthwaite Water Balance Model to Evaluate the Accuracy of Actual Evapotranspiration Data of GLEAM and GLDAS Databases in the Western Sub-basins of Lake Urmia

F. Nasiri¹, K. Zeinalzadeh^{2*}, and S. Hejabi³

Abstract

Actual evapotranspiration (AET) plays an important role in agricultural water management, drought forecasting, and climate change projection. In recent years, the use of indirect methods to estimate AET has led to the development of various databases. Various uncertainties in these data make it necessary to evaluate them for use. In this study, focusing on the historical period of climate studies (1976-2005), the estimated values of AET by the Thornthwaite water balance model were used as a basis for evaluating GLEAM and GLDAS databases, in Nazlou Chay, Rozeh Chay, Shahr Chay, and Barandouz Chay sub-basins in the west of Lake Urmia. The results showed that on an annual scale, the difference between GLEAM and GLDAS databases was not noticeable ($RMSE_{GLEAM}=0.13-0.46$ mm/day, $RMSE_{GLDAS}=0.13-0.48$ mm/day). But on a seasonal scale, the performance of GLEAM and GLDAS data differed in different seasons. Based on the evaluation criteria, the GLEAM database performed better than the GLDAS (GLEAM: $RMSE_{Winetr}=0.11-0.33$, $RMSE_{Spring}=0.25-1.15$, $RMSE_{Summer}=0.58-0.77$, $RMSE_{Autumn}=0.15-0.33$; GLDAS: $RMSE_{Winetr}=0.15-0.27$, $RMSE_{Spring}=0.32-1.14$, $RMSE_{Summer}=0.64-0.95$, $RMSE_{Autumn}=0.15-0.40$). Also, in annual and seasonal scales, GLEAM and GLDAS data were more reliable in Shahr Chay sub-basin ($RMSE_{Shahrchay}=0.12-0.58$, $RMSE_{Nazlouchay}=0.15-0.85$, $RMSE_{Rozehchay}=0.19-1.15$, $RMSE_{Barandouzchay}=0.11-0.77$). According to the results, it is not recommended to use GLEAM and GLDAS data in hydrometeorological studies in Nazlou Chay and Rozeh Chay sub-basins. The results of the present study can be used in the studies of projecting AET future changes, as a basis for evaluating the outputs of climate models as well as correcting their bias.

Keywords: Global Database, Thornthwaite Model, Validation, Water Balance.

Received: November 14, 2023

Accepted: April 3, 2024

استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت برای ارزیابی دقت داده‌های تبخیر-تعرق واقعی پایگاه‌های GLEAM و GLDAS در زیرحوضه‌های غرب دریاچه ارومیه

فاطمه نصیری^۱، کامران زینالزاده^۲ و سمیه حاجابی^{۳*}

چکیده

تبخیر-تعرق واقعی (AET) نقش مهمی در مدیریت آب کشاورزی، پیش‌بینی خشکسالی و پیش‌نگری تغییر اقلیم ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد AET، منجر به توسعه پایگاه‌های داده مختلفی شده است. وجود عدم قطعیت‌های مختلف در این داده‌ها، ارزیابی آنها را ضروری می‌سازد. در این مطالعه، با تمرکز بر دوره تاریخی مطالعات اقلیمی (۱۹۷۶-۲۰۰۵)، از مقادیر برآورد شده AET به‌وسیله مدل بیلان آب تورنت وایت، به عنوان مبنایی برای ارزیابی دو پایگاه داده GLEAM و GLDAS، در چهار زیرحوضه نازلوچای، روزه‌چای، شهرچای و باراندوزچای در غرب دریاچه ارومیه استفاده شد. نتایج نشان داد که در مقیاس سالانه، عملکرد دو پایگاه داده GLEAM و GLDAS در برآورد تبخیر-تعرق واقعی تفاوتی نداشتند ($RMSE_{GLEAM}=0.13-0.46$ mm/day، اما در مقیاس فصلی، عملکرد داده‌های GLEAM و GLDAS در فصول مختلف، متفاوت بود. بر اساس معیارهای ارزیابی، پایگاه داده GLEAM عملکرد بهتری نسبت به GLDAS داشت (GLEAM: $RMSE_{Winetr}=0.11-0.33$ ، $RMSE_{Spring}=0.25-1.15$ ، $RMSE_{Summer}=0.58-0.77$ ، $RMSE_{Autumn}=0.15-0.33$; GLDAS: $RMSE_{Winetr}=0.15-0.27$ ، $RMSE_{Spring}=0.32-1.14$ ، $RMSE_{Summer}=0.64-0.95$ ، $RMSE_{Autumn}=0.15-0.40$). همچنین، در هر دو مقیاس سالانه و فصلی، داده‌های GLEAM و GLDAS در زیرحوضه شهرچای از اعتبار بیشتری برخوردار بودند ($RMSE_{Shahrchay}=0.12-0.58$ ، $RMSE_{Nazlouchay}=0.15-0.85$ ، $RMSE_{Rozehchay}=0.19-1.15$ ، $RMSE_{Barandouzchay}=0.11-0.77$). با توجه به نتایج مطالعه حاضر، استفاده از داده‌های GLEAM و GLDAS در مطالعات هیدرومتئورولوژیکی زیرحوضه‌های نازلوچای و روزه‌چای توصیه نمی‌شود. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در مطالعات پیش‌نگری تغییرات آینده AET، به عنوان مبنایی برای ارزیابی برون‌دادهای مدل‌های اقلیمی و همچنین تصحیح ارزیابی آنها قرار گیرد.

کلمات کلیدی: اعتبارسنجی، بیلان آب، پایگاه داده جهانی، مدل تورنت وایت.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱/۵

1- M.Sc. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: temefa.nasiri74@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.hejabi@urmia.ac.ir

*- Corresponding author

Doi: [10.22034/IWRR.2024.425199.2718](https://doi.org/10.22034/IWRR.2024.425199.2718)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۳ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران است که در چند دهه اخیر، شاهد روند کاهش بارش و روند افزایشی دمای هوا و تبخیر بوده است (Delju et al., 2013; Alizadeh-Choozari et al., 2016; Bashirian et al., 2020). در کنار عوامل انسانی مانند توسعه کنترل نشده کشاورزی (Esmailnezhad et al., 2021) و عدم تأمین کامل حقبه دریاچه ارومیه، عوامل اقلیمی و دوره‌های بلندمدت خشکسالی سبب افت تراز آب دریاچه شده است (Parsinejad et al., 2022). با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک حاکم بر منطقه، به نظر می‌رسد اثر تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه در دهه‌های پیش رو به مراتب مخرب‌تر باشد. بر اساس گزارش IPCC (Douville et al., 2021) افزایش دما در آینده سبب افزایش تبخیر-تعرق و بنابراین کاهش موجودی آب خواهد شد. کاهش بارش و افزایش شدت تبخیر-تعرق هم سبب کاهش جریان‌های ورودی به دریاچه‌ها شده و هم میزان هدررفت آب از سطح دریاچه‌ها را افزایش می‌دهد.

تبخیر-تعرق واقعی^۱ (AET) نقش مهمی در کاربردهای هیدرومتئورولوژیکی و ژئوفیزیکی مانند مصرف آب، مدیریت آب کشاورزی، پیش‌بینی خشکسالی و پیش‌بینی اقلیم ایفا می‌کند (Song et al., 2019; Montano et al., 2019). این مؤلفه به دلیل عواملی مانند توپوگرافی پیچیده زمین، بازخوردهای اقلیمی، ناهمگنی سطح زمین و شرایط بسیار متغیر محیطی، تغییرات زمانی و مکانی زیادی دارد (Mohammed and Scholz, 2019; Zheng et al., 2017). اندازه‌گیری‌های مستقیم AET در مقیاس ایستگاه، از طریق روش‌هایی مانند نسبت باون، لایسیمترهای وزنی و ادی کوواریانس امکان‌پذیر است. با این وجود، به دلیل ناهمگنی مکانی سطح زمین و پیچیدگی‌های بازخورد سطح زمین و اتمسفر، اندازه‌گیری‌های AET در مقیاس یک ایستگاه، قابل برون‌یابی به مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی نیستند (Choi et al., 2009). برای رفع محدودیت‌های اندازه‌گیری‌های مختص به یک ایستگاه، در سال‌های اخیر، از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد AET استفاده شده است که با ترکیب مدل‌های متنوع سطح خشکی، بیلان انرژی و بیلان آب با رهیافت‌های فیزیکی، تجربی و نیمه‌تجربی و واداشت‌های هواشناسی مبتنی بر مشاهدات و تصاویر ماهواره‌ای مبتنی بر سنسور از دور، پایگاه‌های داده مختلفی توسعه داده‌اند که از میان آنها می‌توان به پایگاه داده مدل جهانی تبخیر خشکی آمستردام^۲ (GLEAM: Martens et al., 2017) و سامانه جهانی داده‌گواری خشکی^۳ (GLDAS; Beaudoin et al., 2020) اشاره نمود. این پایگاه‌ها

داده‌های AET را به صورت جهانی و برای دوره‌های زمانی بلندمدت فراهم می‌سازند. با این وجود، عدم قطعیت‌هایی مانند خطای ناشی از واسنجی سنجنده‌ها و تجهیزات، تفاوت با اندازه‌گیری‌های ایستگاهی، تفاوت مقیاس‌ها و پارامترسازی و فرضیات مدل‌ها قابلیت استفاده از این داده‌ها برای مطالعات کاربردی هیدرومتئورولوژیکی را مختل می‌سازد (Khan et al., 2020). بنابراین، پیش از استفاده از این پایگاه‌های داده نیاز است اعتبار این داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

یکی از راه‌های اعتبارسنجی این داده‌ها استفاده از مشاهدات ادی کوواریانس است. با این وجود، به دلیل نبود این گونه تجهیزات در اغلب کشورهای در حال توسعه، استفاده از این روش در اغلب مناطق امکان‌پذیر نیست. یکی از راه‌های غیرمستقیم برای اعتبارسنجی این داده‌ها استفاده از روش‌های بیلان آب است. از آنجا که جریان رودخانه، یک پاسخ تجمعی به فرایندهای هیدرومتئورولوژیکی درون حوضه است، یک مدل بیلان آب واسنجی و صحت‌سنجی شده بر اساس داده‌های جریان رودخانه می‌تواند برای برآورد سایر مؤلفه‌های بیلان آب، از جمله AET، استفاده شده و مقادیر برآورد شده AET به این روش می‌تواند به عنوان مبنایی برای اعتبارسنجی داده‌های جهانی AET استفاده شوند.

یکی از روش‌های برآورد AET با استفاده از متغیرهای اقلیمی، روش بیلان آب تورنت وایت (Thorntwaite, 1948) است که برای مناطق مختلف کره زمین قابل استفاده است. تورنت وایت دریافت که تبخیر-تعرق پتانسیل^۴ (PET) به عنوان تابعی از طول روز با استفاده از اطلاعات میانگین دمای ماهانه و عرض جغرافیایی منطقه قابل محاسبه است. با داشتن اطلاعات PET و بارش ماهانه، بیلان آب، از طریق محاسبه ماهانه ذخیره آب در خاک، تغییر ذخیره، مازاد و کمبود، رواناب و AET قابل برآورد است. (Hessari et al., 2010) بر اساس روش تورنت وایت-ماتر اصلاح شده، که مبتنی بر روش توزیعی در محیط GIS بود، بیلان آب ماهانه بلندمدت حوضه نازلوچای ارومیه را محاسبه نمودند. نتایج نشانگر عملکرد بهتر روش اصلاح شده، در شبیه‌سازی آبدی حوضه بود. (Delju et al., 2013) با هدف بررسی تغییرپذیری اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۴ نشان دادند که بر اساس مدل بیلان آب تورنت وایت، تفاضل بارش و تبخیر-تعرق در ماه‌های جون تا اکتبر منفی است و این شرایط، اثرات عمده‌ای بر کشاورزی و منابع آب زیرزمینی دارد. (Mohebzadeh and Fallah, 2019) از طریق ترکیب فناوری سنسور از دور و مدل بیلان آب تورنت وایت به برآورد مؤلفه‌های بیلان آب دریاچه ارومیه در سال ۲۰۰۵ پرداختند. نتایج بیانگر این بود که دریاچه ارومیه با بیلان منفی سالانه ($-3443 \text{ MCM yr}^{-1}$) همراه است. (Anayah and

ساله، شامل سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵، انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، چهار زیرحوضه شامل نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی این چهار زیرحوضه را نشان می‌دهد. زیرحوضه‌های مذکور در غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گرفته‌اند.

۲-۲- مدل بیلان آب تورنت وایت

مدل بیلان آب تورنت وایت، تخصیص آب بین مؤلفه‌های مختلف سامانه هیدرولوژیکی را با استفاده از یک رهیافت محاسباتی ماهانه، بر اساس روشی که در ابتدا توسط تورنت وایت (Thorntwaite, 1948; Mather, 1978, 1979; McCabe and Wolock, 1999; Wolock and McCabe, 1999) ارائه شد، تحلیل می‌کند. ورودی‌های مدل، میانگین ماهانه دما (T)، بر حسب درجه سلسیوس، مجموع بارش ماهانه (P، بر حسب میلی‌متر) و عرض جغرافیایی (بر حسب درجه اعشاری) است. PET ماهانه از میانگین دمای ماهانه (T) و عرض جغرافیایی به دست می‌آید و به عنوان هدررفت آب از یک ناحیه بزرگ پوشیده از گیاه همگن که کمبود آب ندارد، تعریف می‌شود (Thorntwaite, 1948; Mather, 1978). تبخیر-تعرق واقعی از تبخیر-تعرق پتانسیل، بارش، ذخیره رطوبت خاک و آب قابل برداشت از ذخیره رطوبت خاک به دست می‌آید. وقتی بارش برای یک ماه کمتر از PET باشد، AET برابر با بارش به اضافه مقداری از رطوبت خاک خواهد بود که می‌تواند از رطوبت ذخیره شده در خاک برداشت شود. آب قابل برداشت از ذخیره رطوبت خاک، به طور خطی با کاهش ذخیره رطوبت خاک کاهش می‌یابد. به طوری که هر چه خاک خشک‌تر می‌شود، خروج آب از خاک دشوارتر می‌شود و کمتر برای AET موجود خواهد بود. اگر بارش از PET بیشتر باشد، AET برابر PET در نظر گرفته می‌شود و آب مازاد بر PET به صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود. وقتی رطوبت خاک بیشتر از ظرفیت ذخیره رطوبت خاک شود، آب مازاد تبدیل به رواناب می‌شود.

۲-۳- روش مورد استفاده

روندنمای اجرای تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲، داده‌های بارش و دمای ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی پس از میانگین‌گیری برای سطح هر یک از زیرحوضه‌ها، برای اجرای مدل بیلان آب تورنت وایت در هر زیرحوضه استفاده می‌شود و داده‌های جریان رودخانه ایستگاه‌های هیدرومتری هر یک از زیرحوضه‌ها برای

Kaluvarachchi (2019) با ارائه یک روش تعدیل‌شده برای برآورد تبخیر-تعرق منطقه‌ای تحت شرایط مختلف اقلیمی و با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت نقشه‌های جهانی مازاد/کمبود آب (بارش منهای تبخیر-تعرق) ماهانه را تولید نمودند. نتایج نشان داد مدل تعدیل‌شده قادر است تبخیر-تعرق منطقه‌ای را شبیه‌سازی نماید و در نتیجه، پتانسیل زیادی برای پیش‌نگری بیلان آب تحت تغییرات اقلیمی آینده دارد. (de Oliveira Aparecido et al. (2021 اثر تغییر اقلیم بر بیلان آب اقلیمی مناطق Pantanal در برزیل را با استفاده از نسخه تعدیل‌شده مدل بیلان آب تورنت وایت-ماتر ارزیابی نمودند. نتایج این مطالعه حاکی از این بود که در برخی سناریوها، اقلیم منطقه دستخوش تغییرات شدید خواهد شد که کشت محصولات زیادی را غیر ممکن خواهد ساخت.

در خصوص اعتبارسنجی داده‌های جهانی AET، Abdi Dezfouli et al. (2020) دقت برآوردهای AET مدل GLEAM را از طریق مقایسه با روش بیلان آب در شمال حوضه کرخه تأیید کردند. همچنین، Rostami et al. (2023) با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت، کارایی پایگاه داده جهانی GLEAM و GLDAS را در برآورد AET در حوضه طشک-بختگان ارزیابی نمودند و نشان دادند که پایگاه داده GLEAM کارایی مناسب‌تری دارد.

بررسی پیشینه پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که مدل بیلان آب تورنت وایت به طور گسترده‌ای در مطالعات خارجی و داخلی مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، تاکنون مطالعه‌ای در مورد استفاده از این مدل در اعتبارسنجی AET پایگاه‌های داده جهانی، در مورد حوضه آبریز دریاچه ارومیه صورت نگرفته است و تمرکز اغلب مطالعات، بر شبیه‌های مؤلفه رواناب و تغذیه بوده است. با توجه به اینکه مؤلفه AET، به عنوان جزء مشترک بیلان آب و بیلان انرژی، نقش مهمی در برآورد سایر مؤلفه‌ها داشته و به دلیل تأثیرپذیری از عوامل مختلف اقلیمی، پتانسیل بیشتری از نظر تأثیرپذیری از تغییر اقلیم دارد، پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر این مؤلفه ضرورت دارد. با این وجود، ارزیابی پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده در مورد AET مستلزم وجود داده‌های AET برای دوره تاریخی به عنوان مبنایی برای ارزیابی برودادهای مدل‌های اقلیمی و همچنین تصحیح اریبی آنها است. لذا، هدف از این مطالعه، اعتبارسنجی دو پایگاه داده تبخیر-تعرق واقعی GLEAM و GLDAS با استفاده از روش بیلان آب تورنت وایت است. از آنجا که در مطالعات پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم نیاز به داده‌های دوره تاریخی (۱۸۵۰ تا ۲۰۰۵)، به عنوان مرجع مقایسه با پیش‌نگری‌های آینده (۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰)، است، در این مطالعه، اعتبارسنجی داده‌های جهانی AET با تمرکز بر یک دوره تاریخی ۳۰

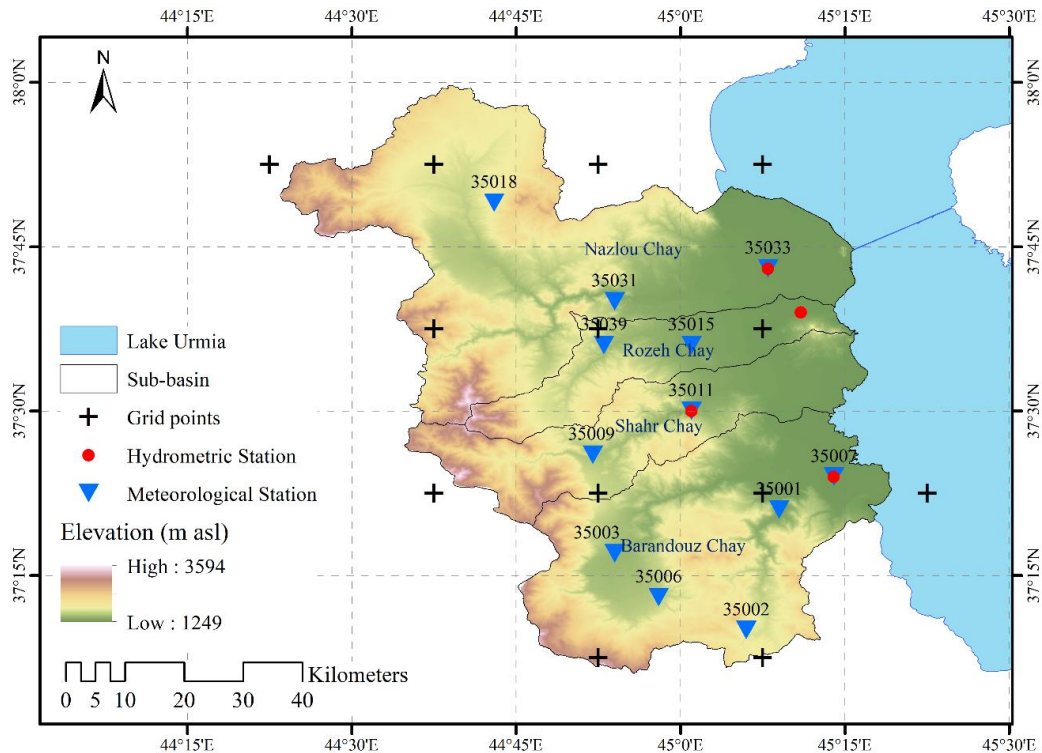


Fig. 1- Topographical map of the studied area, geographical location of Nazlou Chay, Rozeh Chay, Shahr Chay, and Barandouz Chay sub-basins, hydrometric stations (red points), meteorological stations (blue triangles), and GLEAM and GLDAS grid points (+)

شکل ۱- نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌های نازلوچای، روضه چای، شهرچای و باراندوزچای، ایستگاه‌های هیدرومتری (نقاط قرمز)، ایستگاه‌های هواشناسی (مثلث آبی) و نقاط شبکه GLEAM و GLDAS (+)

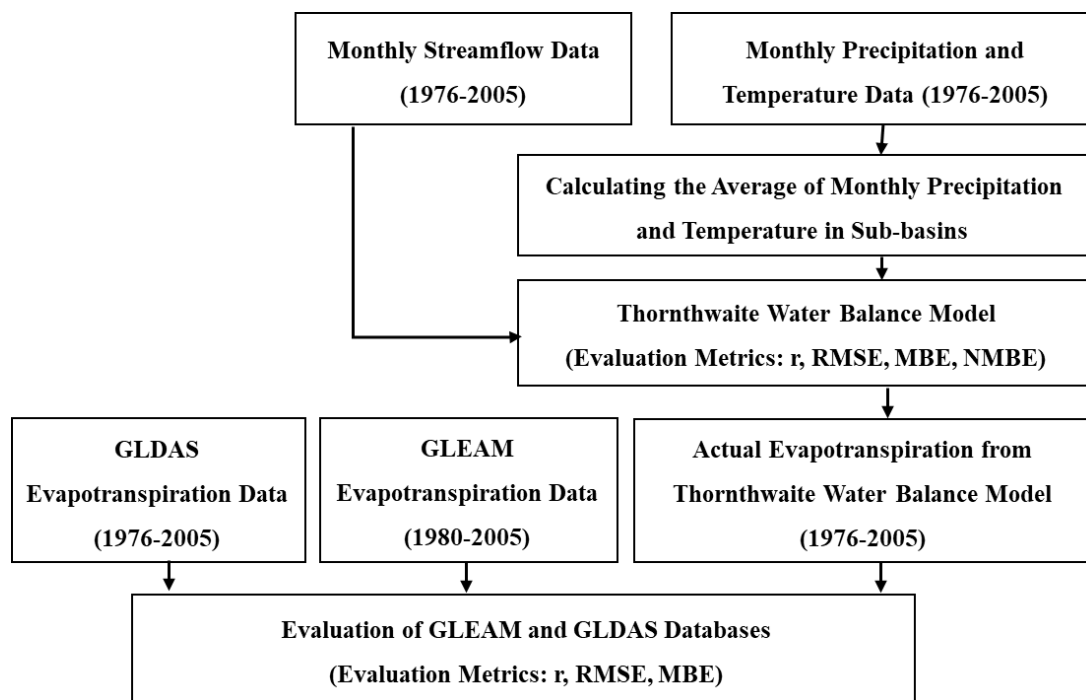


Fig. 2- Flowchart of research

شکل ۲- روندنمای اجرای تحقیق

هر زیرحوضه است. از میان ایستگاه‌های هواشناسی موجود، ایستگاه‌هایی که دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ را پوشش می‌دهند، مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی را به صورت مثلث‌های آبی رنگ نشان می‌دهد. همچنین مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای محاسبه متوسط بارش و متوسط دما در سطح هر زیرحوضه، از روش میانگین‌گیری مبتنی بر خطوط تراز استفاده شد؛ چراکه تغییرات ارتفاع در زیرحوضه‌ها زیاد بوده و استفاده از روش‌هایی مانند چندضلعی‌های تیسن مناسب نبود. در روش میانگین‌گیری مبتنی بر خطوط تراز، میانگین ارتفاع هر دو ایستگاه هم‌جوار محاسبه شده و خط تراز متناظر با آن رسم می‌شود. محدوده بین هر دو خط تراز، بیانگر محدوده متناظر با هر ایستگاه هواشناسی است. لذا مقدار بارش متوسط (یا دمای متوسط) هر زیرحوضه در هر ماه با استفاده از مساحت محدوده متناظر با هر ایستگاه به عنوان وزن، به روش میانگین‌گیری وزنی، از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\bar{P}_t = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_{i,t}}{\sum_{i=1}^k A_i} \quad (1)$$

بررسی عملکرد مدل بیلان آب تورنت وایت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گام بعد، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی حاصل از مدل بیلان آب تورنت وایت، به عنوان مبنایی برای بررسی عملکرد پایگاه‌های داده تبخیر-تعرق واقعی GLEAM و GLDAS استفاده می‌شود. جزئیات مربوط به داده‌های هواشناسی، هیدرومتری، پایگاه‌های داده تبخیر-تعرق واقعی GLEAM و GLDAS و همچنین معیارهای بررسی در بخش‌های بعد آورده شده است.

۴-۲- داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی بیلان آب

برای مدل‌سازی بیلان آب در هر یک از زیرحوضه‌ها، نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری به خروجی زیرحوضه، که داده‌های جریان رودخانه ثبت شده در آنها دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ را پوشش می‌دهند، به عنوان ایستگاه هیدرومتری مورد بررسی انتخاب شد. نقاط قرمز رنگ در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب را نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری را نشان می‌دهد.

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز برای اجرای مدل بیلان آب تورنت وایت، شامل داده‌های بارش ماهانه و دمای هوای ماهانه به صورت متوسط

Table 1- Characteristics of hydrometric stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

Sub-basin	Station code	Latitude	Longitude	Elevation (m asl)
Nazlou Chay	35033	37°43'	45°08'	1290
Roze Chay	35037	37°39'	45°11'	1290
Shahr Chay	35011	37°30'	45°01'	1450
Barandouz Chay	35007	37°24'	45°14'	1280

Table 2- Characteristics of meteorological stations

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Sub-basin	Station code	Latitude	Longitude	Elevation (m asl)
Nazlou Chay	35033	37°43'	45°08'	1290
	35031	37°40'	44°54'	1600
	35018	37°49'	44°43'	1900
Roze Chay	35015	37°36'	45°01'	1400
	35039	37°36'	44°53'	1500
Shahr Chay	35011	37°30'	45°01'	1450
	35009	37°26'	44°50'	1630
Barandouz Chay	35007	37°24'	45°14'	1280
	35006	37°13'	44°58'	1590
	35003	37°17'	44°54'	1490
	35002	37°10'	45°06'	1420
	35001	37°21'	45°09'	1340

که \bar{P}_i مقدار بارش متوسط زیرحوضه در زمان t ($t=1 \dots 360$)، i شماره ایستگاه هواشناسی، k تعداد ایستگاه‌های هواشناسی در زیرحوضه، A_i مساحت متناظر با ایستگاه هواشناسی i و $P_{i,t}$ بارش زمان t در ایستگاه i است.

دوره آماری ۱۹۹۹-۱۹۷۶ برای واسنجی و دوره آماری ۲۰۰۵-۲۰۰۰ برای صحت‌سنجی مدل بیلان آب تورنت وایت استفاده شد. آماره‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل بیلان آب، شامل آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون^۵ (r)، ریشه میانگین مربعات خطا^۶ (RMSE) و میانگین خطای اریبی^۷ (MBE) و میانگین خطای اریبی نرمال شده^۸ است (NMBE) (Krishnaiah, 1980; Pearson, 1895):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{OBS_i} - \bar{X}_{OBS})(X_{MODEL_i} - \bar{X}_{MODEL})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{OBS_i} - \bar{X}_{OBS})^2 (X_{MODEL_i} - \bar{X}_{MODEL})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{MODEL_i} - X_{OBS_i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{MODEL_i} - X_{OBS_i})}{n} \quad (4)$$

$$NMBE = \frac{n \cdot MBE}{X_{OBS_{max}} - X_{OBS_{min}}} \times 100 \quad (5)$$

که \bar{X} میانگین متغیر X (جریان رودخانه) و زیروندهای MODEL و OBS به ترتیب معرف مقادیر مدل‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده است.

۲-۵- داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی

داده‌های ماهانه AET، از پایگاه مدل جهانی تبخیر خشکی آمستردام (GLEAM, Martens et al., 2017) با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (سایت <https://www.gleam.eu/>) تهیه شد. مدل GLEAM شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها است که بر اساس مشاهدات ماهواره‌ای به برآورد جداگانه مؤلفه‌های مختلف AET شامل تعرق، تبخیر از برگ‌ها، تبخیر از خاک عریان، تصعید برف و تبخیر از سطح آب آزاد (در مناطق آبیاری شده و خطوط ساحلی) می‌پردازد. خروجی‌های میانی مدل شامل تبخیر-تعرق پتانسیل، رطوبت خاک در منطقه ریشه، رطوبت خاک سطحی و تنش تبخیری است. در این مدل، بر اساس مشاهدات تابش خالص سطحی و دمای هوای سطحی، از روش پریستلی-تیلور (Priestley and Taylor, 1972) برای برآورد PET استفاده می‌شود. برآوردهای PET، بر اساس یک فاکتور تنش تبخیری ضریبی (S)، به AET تبدیل می‌شود. محاسبه فاکتور S، بر اساس مشاهدات میکروویو عمق نوری پوشش گیاهی (به‌عنوان نماینده‌ای از محتوای آب پوشش گیاهی) و شبیه‌سازی‌های رطوبت خاک منطقه ریشه است. رطوبت خاک منطقه ریشه، با اجرای یک مدل ترازمندی آب چندلایه محاسبه

می‌شود که نفوذ آب باران به درون مقطع قائم خاک را توصیف می‌کند. به‌علاوه، مشاهدات میکروویو رطوبت خاک سطحی، برای تصحیح خطاهای واداشتی تصادفی به مقطع خاک داده‌گواری^۹ می‌شود. جزئیات بیشتر مدل GLEAM در (Miralles et al., 2011) و (Martens et al., 2017) آمده است. داده‌های نسخه GLEAM v3.7a، دوره زمانی ۱۹۸۰-۲۰۲۲ با مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه و تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه را پوشش می‌دهد و داده‌های تبخیر-تعرق، مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای عمق نوری پوشش گیاهی (Moesinger et al., 2020)، داده‌های بازتحلیل تابش و دمای هوای مدل ERA5 (ECMWF, 2019) و داده‌های بارش ترکیبی (ایستگاهی، بازتحلیل و ماهواره‌ای) مربوط به پایگاه داده جهانی بارش کلی وزنی چند منبعی^{۱۰} (MSWEP; Beck et al., 2017) است.

علاوه بر پایگاه GLEAM، داده‌های ماهانه AET سامانه جهانی داده‌گواری خشکی (GLDAS; Beaudoin et al., 2020) با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (سایت <https://disc.gsfc.nasa.gov/>) نیز مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سامانه GLDAS، با استفاده از داده‌های مشاهداتی زمینی و ماهواره‌ای و از طریق مدل‌سازی فرایندهای سطح خشکی و فناوری‌های داده‌گواری، امکان شبیه‌سازی اقلیم در مقیاس جهانی و با تفکیک مکانی ۰/۲۵ تا ۱ درجه را فراهم نموده است. جزئیات بیشتر در مورد این پایگاه داده در (Beaudoin et al., 2020) آمده است.

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی نقاط شبکه GLEAM و GLDAS با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه را در محدوده زیرحوضه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر یک از ۱۳ نقطه شبکه که با نماد (+) نمایش داده شده‌اند، سهم متفاوتی در میزان AET هر زیرحوضه دارند. لذا برای محاسبه میانگین AET در سطح هر زیرحوضه در هر ماه، از روش میانگین‌گیری وزنی (معادله ۱) استفاده شد. در اینجا مقادیر A_i مساحت متناظر با سهم هر نقطه شبکه در AET هر زیرحوضه هست. پس از بدست آوردن سری زمانی ماهانه مقادیر AET برای متوسط هر زیرحوضه، اعتبارسنجی داده‌های GLEAM و GLDAS در مقیاس زمانی فصلی و سالانه و در مقیاس هر زیرحوضه و بر اساس مقادیر AET برآوردشده به روش مدل بیلان آب تورنت وایت صورت گرفت. شایان ذکر است که دوره آماری مورد مطالعه برای داده‌های GLDAS دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ است اما در مورد GLEAM به دلیل عدم وجود داده برای ۱۹۷۹-۱۹۷۶، دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۰ بررسی شد.

آماره‌های مورد استفاده برای اعتبارسنجی داده‌ها، شامل آماره‌های ضریب همبستگی پیرسون (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

و میانگین خطای اریبی (MBE) است (معادلات ۲ تا ۴) که در اینجا \bar{X} میانگین متغیر X (تبخیر-تعرق واقعی) و زیروند MODEL، معرف داده‌های جهانی (GLEAM یا GLDAS) و زیروند OBS، معرف مقادیر مبناء تبخیر-تعرق واقعی (حاصل از مدل تورنت وایت) است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی رواناب با استفاده از مدل بیلان آب

شکل ۳، نمودار سری زمانی بارش ماهانه، رواناب ماهانه مشاهده‌شده و مدل‌سازی‌شده با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت را برای دوره‌های واسنجی (۱۹۹۹-۱۹۷۶) و صحت‌سنجی (۲۰۰۵-۲۰۰۰) در زیرحوضه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای مشاهده شده و مدل‌سازی‌شده نشان می‌دهد که در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای، نسبت به نازلوچای و روضه‌چای، مدل از عملکرد بهتری برخوردار است.

معیارهای بررسی عملکرد مدل در جدول ۳ نشان می‌دهد که در مقیاس سالانه، مقادیر ضریب همبستگی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی، به ترتیب بین ۰/۸۵-۰/۶۳ و ۰/۹۳-۰/۵۱ تغییر می‌کند. همچنین، بررسی مقادیر RMSE در دوره واسنجی نشان می‌دهد که بزرگی خطا، در مقایسه با میانگین رواناب سالانه (کمتر از ۲۵ درصد)، در زیرحوضه شهرچای و باراندوزچای مطلوب‌تر از سایر زیرحوضه‌ها است. با این وجود، خطای اریبی نرمال‌شده (NMBE) کمتر از ۲۰ درصد بوده و در دوره واسنجی بین ۷/۲۹- درصد تا ۳/۲۷ درصد و در دوره صحت-سنجی بین ۱۱/۷۲- درصد تا ۱۶/۴۶ درصد تغییر می‌کند. روی هم رفته، در مقیاس سالانه، عملکرد مدل در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای بهتر است.

در مقیاس فصلی، در زیرحوضه نازلوچای، در دوره واسنجی ضریب همبستگی بین ۰/۳۲- در زمستان تا ۰/۶۵ در بهار تغییر می‌کند. مقدار RMSE در مقایسه با میانگین در فصل بهار کمتر از سایر فصول است

و کمترین درصد اریبی نیز مربوط به بهار است. با توجه به اینکه رواناب فصل بهار بیشترین سهم را در رواناب سالانه دارد (حدود ۷۶ درصد)، عملکرد مدل در برآورد رواناب فصل بهار، بیشترین سهم را در عملکرد مدل در برآورد رواناب سالانه دارد. در زیرحوضه روضه‌چای، در دوره واسنجی ضرایب همبستگی از ۰/۲۳ در زمستان تا ۰/۷۴ در بهار تغییر می‌کند. در این زیرحوضه نیز رواناب فصل بهار، بیشترین سهم را در رواناب سالانه دارد (حدود ۴۷ درصد). کمترین نسبت RMSE به میانگین و کمترین درصد اریبی، در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، مربوط به فصل بهار است و علی‌رغم ضرایب همبستگی بالا در فصل پاییز (با سهم ۱۹ درصد در رواناب سالانه)، خطاهای نسبتاً بالا، چه از نظر نسبت RMSE به میانگین و چه اریبی، در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی مشاهده می‌شود.

در زیرحوضه شهرچای، ضرایب همبستگی در دوره واسنجی، بین ۰/۷۳ در تابستان تا ۰/۸۳ در بهار و پاییز تغییر می‌کنند. در این زیرحوضه نیز رواناب فصل بهار، با سهم ۷۲ درصد، بیشترین سهم را در رواناب سالانه دارد. در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، کمترین نسبت RMSE به میانگین، مربوط به فصل بهار است و کمترین درصد اریبی نرمال‌شده نیز مربوط به بهار و تابستان هستند. بیشترین خطاها در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی، مربوط به زمستان و پاییز هستند. فصل زمستان و پاییز، به ترتیب، ۱۱ درصد و ۸ درصد، در رواناب سالانه سهم دارند. در زیرحوضه باراندوزچای، در دوره واسنجی، ضرایب همبستگی از ۰/۳۷ در زمستان تا ۰/۸۰ در تابستان تغییر می‌کنند. رواناب فصل بهار، با سهم ۵۸ درصد، بیشترین سهم را در رواناب سالانه دارد. در این فصل، میزان RMSE در مقایسه با میانگین نسبتاً زیاد است؛ اما مقدار مطلق درصد اریبی نرمال‌شده، در دوره واسنجی کمتر از ۱۵ درصد بوده و در دوره صحت‌سنجی نیز با مقدار ۵/۰۹- درصد کمترین اریبی نرمال‌شده را نسبت به سایر فصول دارد. مقادیر نسبتاً بالای خطا، مربوط به فصل زمستان و پاییز، با سهم ۲۳ درصد و ۱۴ درصد در رواناب سالانه است.

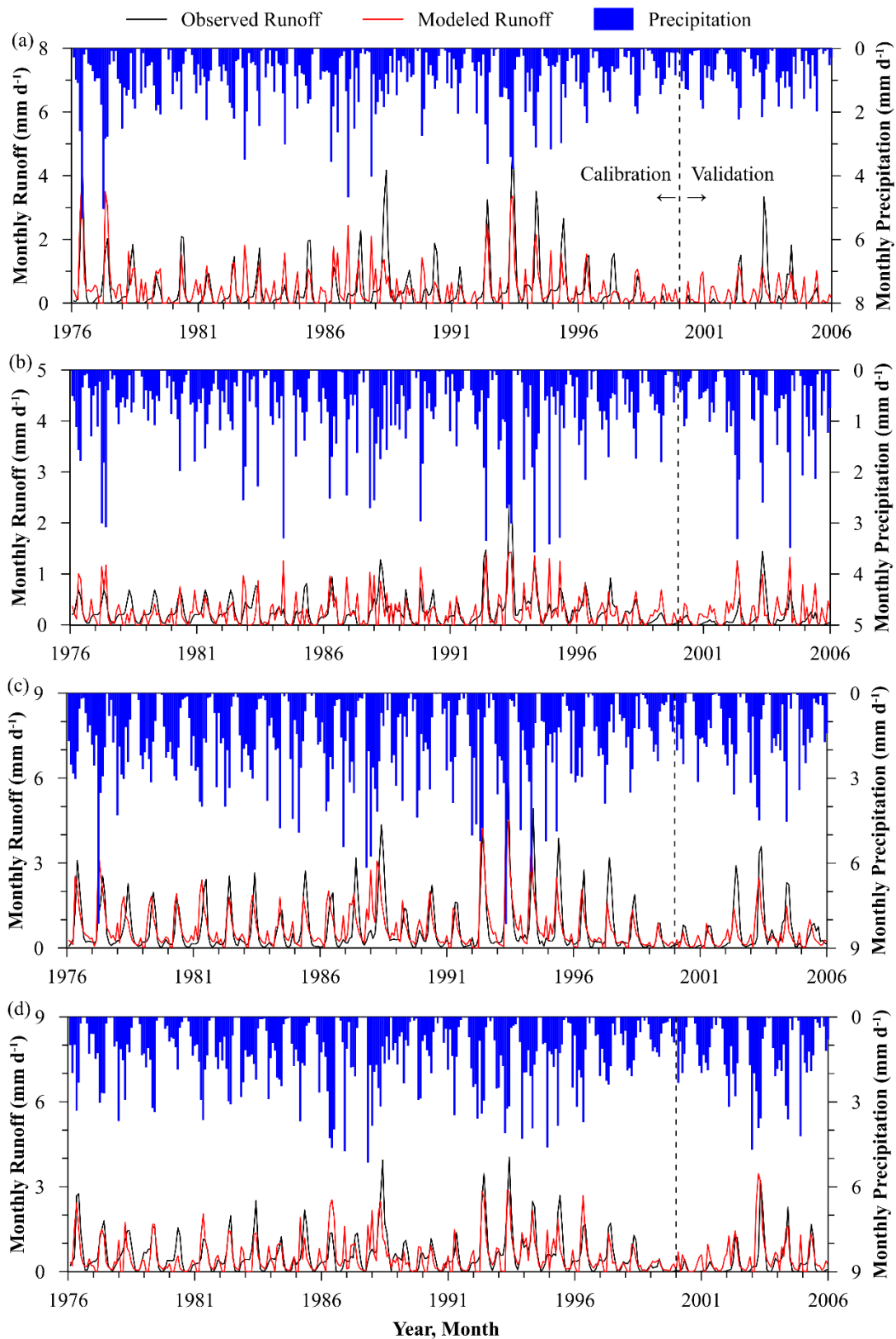


Fig. 3- Time series of monthly rainfall and the observed and modeled monthly runoff for the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d)

شکل ۳- سری زمانی بارش ماهانه و رواناب ماهانه مشاهده شده و مدل سازی شده برای زیرحوضه های نازلوچای (a)، روزه چای

(b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d)

Table 3- Evaluation criteria for the performance of the Thornthwaite water balance model in runoff modeling on annual and seasonal scale for the calibration (1976-1999) and validation periods (2000-2005)
جدول ۳- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل بیلان آب تورنت وایت در مدل سازی رواناب در مقیاس سالانه و فصلی برای دوره های واسنجی (۱۹۷۶-۱۹۹۹) و صحت سنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۵)

Sub-basin		Calibration					Validation				
		Mean mm d ⁻¹	r	RMSE mm d ⁻¹	MBE mm d ⁻¹	NMBE %	Mean mm d ⁻¹	r	RMSE mm d ⁻¹	MBE mm d ⁻¹	NMBE %
Nazlou Chay	Annual	0.45	0.63	0.22	-0.01	-1.13	0.23	0.93	0.15	0.05	4.28
	Winter	0.28	0.32	0.24	-0.13	-20.20	0.11	-0.09	0.24	0.06	10.05
	Spring	1.36	0.65	0.76	-0.35	-9.70	0.77	0.44	0.77	-0.29	-7.98
	Summer	0.03	0.41	0.14	0.10	50.80	0.00	-	0.06	0.05	23.49
	Autumn	0.12	0.48	0.41	0.33	78.13	0.02	0.66	0.41	0.38	90.19
Roze Chay	Annual	0.28	0.64	0.11	-0.03	-3.97	0.14	0.51	0.15	0.11	15.32
	Winter	0.34	0.23	0.19	-0.11	-17.05	0.17	-0.04	0.17	0.08	13.09
	Spring	0.53	0.74	0.28	-0.10	-5.14	0.34	0.44	0.31	0.09	4.61
	Summer	0.06	0.69	0.05	-0.02	-5.14	0.02	-0.10	0.07	0.02	7.05
	Autumn	0.22	0.69	0.17	0.12	29.99	0.05	0.89	0.24	0.23	59.77
Shahr Chay	Annual	0.70	0.85	0.16	0.04	3.27	0.55	0.93	0.18	-0.14	-11.72
	Winter	0.31	0.76	0.44	0.28	45.45	0.26	-0.04	0.33	0.15	24.36
	Spring	2.01	0.83	0.67	-0.49	-14.85	1.51	0.92	0.91	-0.72	-22.04
	Summer	0.29	0.73	0.22	0.13	14.78	0.28	0.70	0.17	-0.08	-9.51
	Autumn	0.21	0.83	0.34	0.23	55.56	0.16	0.61	0.15	0.11	27.28
Barandouz Chay	Annual	0.61	0.75	0.19	-0.08	-7.29	0.34	0.91	0.23	0.19	16.46
	Winter	0.55	0.37	0.31	-0.12	-14.22	0.26	0.17	0.75	0.47	54.32
	Spring	1.42	0.74	0.61	-0.39	-14.95	0.98	0.99	0.20	-0.13	-5.09
	Summer	0.12	0.80	0.10	0.04	6.61	0.01	0.82	0.15	0.13	19.26
	Autumn	0.35	0.72	0.25	0.14	17.25	0.11	0.59	0.31	0.29	37.00

جدول ۴ نشان داده شده است. علاوه بر این، مقادیر میانگین بلندمدت AET فصلی و سالانه برای خروجی مدل تورنت وایت، داده های GLEAM و داده های GLDAS برای دوره آماری مشترک ۲۰۰۵-۱۹۸۰ به صورت نمودارهای ستونی در شکل ۴ نمایش داده شده است. از آنجا که در مقیاس سالانه، میانگین بلندمدت تفاضل بارش و رواناب تقریباً با تبخیر-تعرق واقعی برابر است، این مقدار نیز، بر اساس مشاهدات ایستگاهی، محاسبه و به عنوان مقایسه در ستون آخر نشان داده شده است.

۳-۲- نتایج اعتبارسنجی داده های جهانی تبخیر-تعرق واقعی GLEAM و GLDAS

اعتبارسنجی داده های جهانی تبخیر-تعرق واقعی GLEAM برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۰ و در مورد داده های GLDAS برای دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۶ در مقایسه با مقادیر AET حاصل از خروجی مدل بیلان آب تورنت وایت صورت گرفت. معیارهای اعتبارسنجی، برای زیرحوضه های مورد مطالعه، در دو مقیاس زمانی فصلی و سالانه، در

Table 4- Evaluation criteria for GLEAM (period 1980-2005) and GLDAS (period 1976-2005) global actual evapotranspiration databases on annual and seasonal scale

جدول ۴- معیارهای ارزیابی پایگاه‌های داده جهانی تبخیر-تعرق واقعی GLEAM (دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۰) و GLDAS (دوره ۱۹۷۶-۲۰۰۵) در مقیاس سالانه و فصلی

Sub-basin		GLEAM (1980-2005)				GLDAS (1976-2005)			
		Mean mm d ⁻¹	r	RMSE mm d ⁻¹	MBE mm d ⁻¹	Mean mm d ⁻¹	r	RMSE mm d ⁻¹	MBE mm d ⁻¹
Nazlou Chay	Annual	0.90	<u>0.53</u>	<u>0.46</u>	<u>0.44</u>	0.94	<u>0.53</u>	0.48	0.47
	Winter	0.48	<u>0.45</u>	0.33	0.30	0.38	0.18	<u>0.27</u>	<u>0.19</u>
	Spring	1.99	<u>0.25</u>	<u>0.85</u>	0.79	2.03	0.09	0.86	<u>0.78</u>
	Summer	0.77	<u>0.56</u>	<u>0.74</u>	<u>0.69</u>	1.02	0.43	0.95	0.93
	Autumn	0.36	<u>0.52</u>	<u>0.15</u>	<u>0.00</u>	0.32	0.48	<u>0.15</u>	-0.02
Rozeh Chay	Annual	0.90	0.62	<u>0.46</u>	<u>0.44</u>	0.93	<u>0.68</u>	0.47	0.46
	Winter	0.55	<u>0.58</u>	0.19	0.15	0.46	0.20	<u>0.18</u>	<u>0.05</u>
	Spring	1.99	<u>0.63</u>	1.15	1.10	2.00	0.51	<u>1.14</u>	<u>1.07</u>
	Summer	0.68	<u>0.38</u>	<u>0.67</u>	<u>0.61</u>	0.95	0.22	0.92	0.88
	Autumn	0.37	0.32	<u>0.20</u>	<u>-0.10</u>	0.30	<u>0.53</u>	0.21	-0.16
Shahr Chay	Annual	0.98	<u>0.66</u>	<u>0.13</u>	0.10	0.98	0.51	<u>0.13</u>	<u>0.09</u>
	Winter	0.45	<u>0.58</u>	<u>0.12</u>	<u>-0.01</u>	0.38	0.40	0.18	-0.10
	Spring	2.15	<u>0.57</u>	<u>0.25</u>	<u>0.19</u>	2.20	0.35	0.32	0.24
	Summer	0.94	<u>0.69</u>	<u>0.58</u>	<u>0.53</u>	1.02	0.61	0.64	0.58
	Autumn	0.38	<u>0.59</u>	<u>0.33</u>	<u>-0.30</u>	0.31	0.50	0.40	-0.37
Barandouz Chay	Annual	0.98	<u>0.72</u>	0.30	0.29	0.97	0.65	<u>0.29</u>	<u>0.28</u>
	Winter	0.47	<u>0.69</u>	<u>0.11</u>	0.03	0.45	0.33	0.15	<u>0.00</u>
	Spring	2.23	<u>0.60</u>	0.65	0.59	2.18	0.40	<u>0.60</u>	<u>0.52</u>
	Summer	0.86	<u>0.60</u>	<u>0.77</u>	<u>0.72</u>	0.93	0.44	0.84	0.81
	Autumn	0.37	<u>0.64</u>	<u>0.23</u>	<u>-0.20</u>	0.33	0.53	0.26	-0.23

The best database based on each evaluation criterion is shown in underlined numbers.

کمترین مقدار، مربوط به تابستان است. زیاد بودن موجودی آب و انرژی در فصل بهار عامل وقوع بیشینه AET در این فصل است. در حالی که علی‌رغم بیشینه بودن مقدار PET (موجودی انرژی) در فصل تابستان، به دلیل عدم موجودی آب کافی، مقدار AET در این فصل کمینه است. کم بودن AET در فصل زمستان نیز به دلیل کم بودن موجودی انرژی علی‌رغم زیاد بودن موجودی آب است.

در مقیاس زمانی سالانه، در زیرحوضه نازلوچای، تفاوتی از نظر ضریب همبستگی وجود ندارد و معیارهای RMSE و MBE در مورد GLEAM با اختلاف کمی نسبت به GLDAS کمتر هستند. با توجه به شکل ۴ در مورد زیرحوضه نازلوچای، اختلاف مقادیر میانگین AET تورنت وایت و مقادیر مشاهداتی تفاضل بارش و رواناب ناچیز است؛ ولی انحراف معیار مشاهدات، بیشتر از انحراف معیار تورنت وایت است.

مقایسه تبخیر-تعرق GLEAM و GLDAS با خروجی تورنت وایت در مقیاس فصلی نشان می‌دهد که روی هم رفته داده‌های GLEAM عملکرد بهتری دارد (جدول ۴).

میانگین تبخیر-تعرق GLEAM، با اختلاف کمی نسبت به GLDAS، به مقادیر مبناء نزدیک‌تر است. با این وجود هر دو پایگاه داده، در مقیاس سالانه، بیش از ۱۰۰ درصد بیش‌برآورد دارند. در مقیاس زمانی فصلی، بیشترین میزان AET، مربوط به فصل بهار و

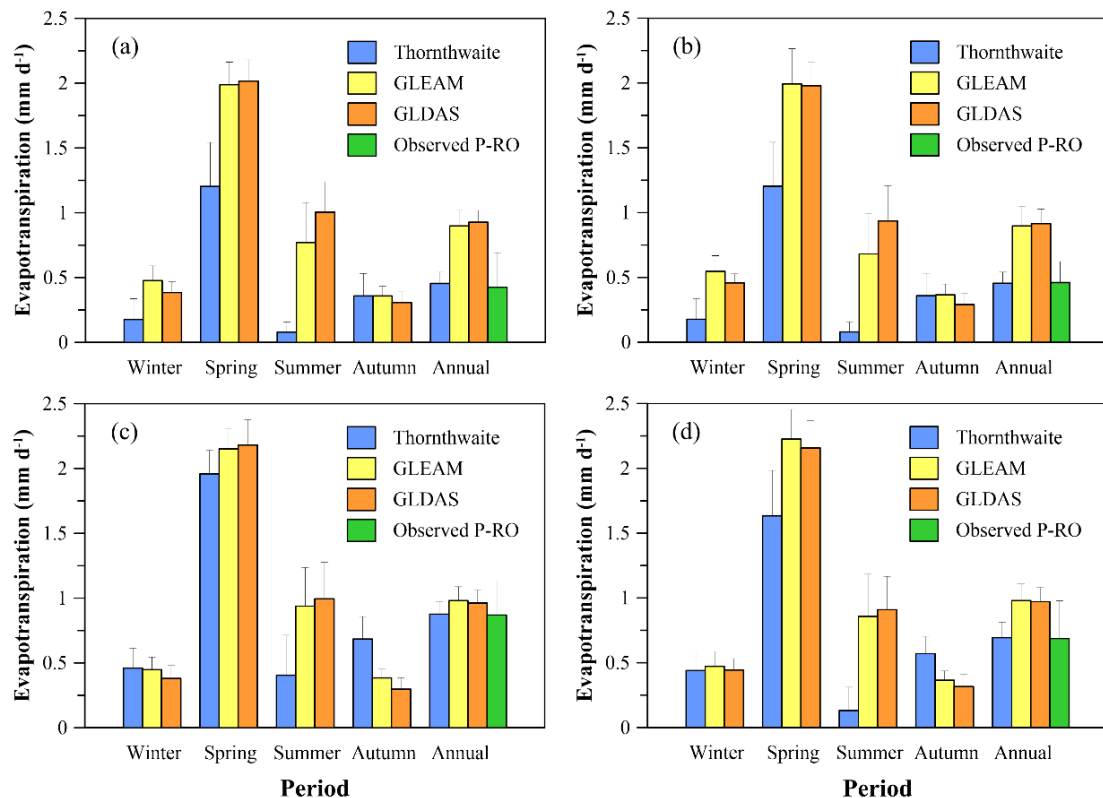


Fig. 4- Bar plots of the long-term average of actual evapotranspiration (for the period of 1980-2005) on seasonal and annual scale based on the output of the Thornthwaite model, the GLEAM database and the GLDAS database in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d). The long-term average of observed precipitation and runoff difference is also included for comparison

شکل ۴- نمودارهای ستونی میانگین بلندمدت تبخیر-تعرق واقعی (برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۰) در مقیاس فصلی و سالانه بر اساس خروجی مدل تورنت وایت، پایگاه داده GLEAM و پایگاه داده GLDAS در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روزه چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d). میانگین بلندمدت اختلاف بارش و رواناب مشاهداتی نیز برای مقایسه آورده شده است.

ضرایب همبستگی بالا در مقیاس فصلی و فصل بهار، بیش‌برآوردهای شدید در مقیاس سالانه و در فصل‌های بهار و تابستان مشهود است (شکل ۵). در زیرحوضه شهرچای، در مقیاس سالانه، هر دو پایگاه داده عملکرد خوب و تقریباً مشابهی دارند. به طوری که میزان RMSE در مورد هر دو پایگاه داده GLEAM و GLDAS برابر 0.13 mm d^{-1} و حدوداً معادل ۱۴ درصد میانگین بلندمدت AET سالانه است (جدول ۴). در مقیاس فصلی، داده‌های GLEAM، با تفاوت کمی نسبت به GLDAS، عملکرد بهتری نشان می‌دهند. مقادیر ضریب همبستگی بین 0.57 تا 0.69 در تابستان تغییر می‌کند. در فصل زمستان و بهار، مقادیر RMSE و MBE، در مقایسه با میانگین بلندمدت AET در این فصول، کمتر است. با وجود ضرایب همبستگی بالا در فصل تابستان و پاییز، کم‌برآورد و بیش‌برآورد در این دو فصل مشهود است (شکل ۵).

با این وجود در فصل بهار و به ویژه در تابستان، بیش‌برآوردهای شدیدی مشاهده می‌شود به طوری که در مورد هر دو پایگاه داده، میزان RMSE و MBE در تابستان بیش از ۹۰ درصد میانگین بلندمدت AET است. با وجود اینکه در فصل پاییز میزان آریبی در مورد هر دو پایگاه داده نزدیک به صفر است. اما مقدار RMSE بیش از ۴۵ درصد میانگین بلندمدت AET در فصل پاییز است. شکل ۵ نمودار پراکنش تبخیر-تعرق واقعی GLEAM را در برابر تبخیر-تعرق واقعی تورنت وایت، در مقیاس‌های سالانه و فصلی، نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴ و شکل ۴، عملکرد داده‌های GLEAM و GLDAS در زیرحوضه روزه‌چای، شباهت زیادی به زیرحوضه نازلوچای دارد و در این زیرحوضه نیز داده‌های GLEAM در مجموع عملکرد بهتری نسبت به داده‌های GLDAS دارند. اما علی‌رغم

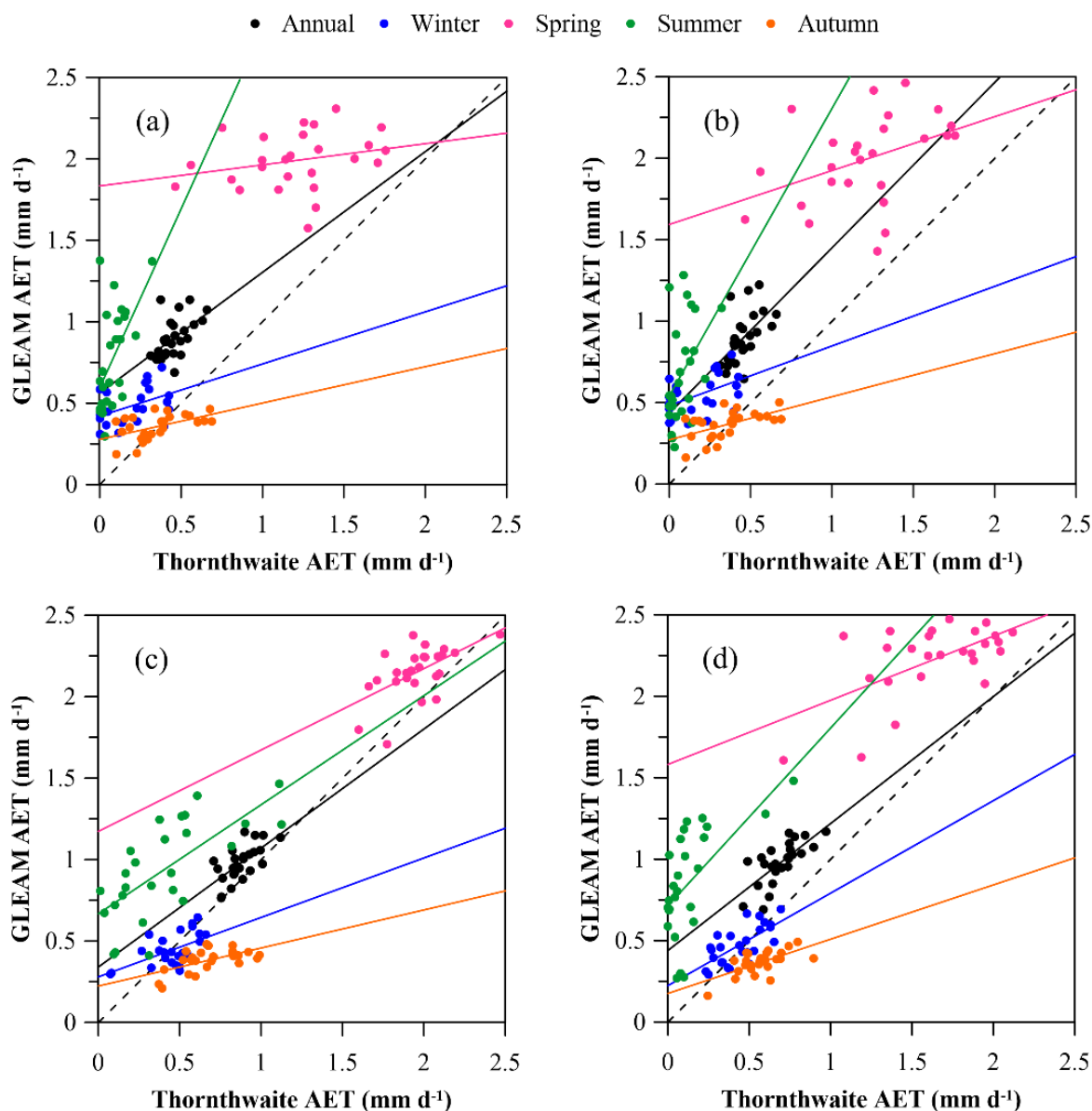


Fig. 5- Scatter plots of GLEAM actual evapotranspiration against the actual evapotranspiration by the Thornthwaite model in annual and seasonal scales in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d)

شکل ۵- نمودارهای پراکنش تبخیر-تعرق واقعی GLEAM در برابر تبخیر-تعرق واقعی مدل تورنت وایت در مقیاس‌های سالانه و فصلی در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روزه چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d)

در این فصل، اندکی بهتر از GLEAM است. بیش‌برآورد شدید در فصل تابستان و کم‌برآورد در فصل پاییز در این زیرحوضه نیز مشهود است (شکل ۵).

در زیرحوضه باراندوزچای، عملکرد دو پایگاه داده در نمایش رفتار سالانه AET، تقریباً یکسان و نسبت به زیرحوضه‌های نازلوچای و روزه‌چای بهتر اما نسبت به زیرحوضه شهرچای نامطلوب‌تر است. در مقیاس زمانی فصلی، عملکرد هر دو پایگاه داده در فصل زمستان بسیار مطلوب است؛ به طوری که میزان MBE در مورد هر دو تقریباً نزدیک به صفر است. در فصل بهار، مقادیر RMSE و MBE، در مورد هر دو پایگاه داده، در حدود ۲۵ درصد میانگین AET است و عملکرد

۴- نتیجه‌گیری

پی‌نوشت‌ها

- 1- Actual Evapotranspiration
- 2- Global Land Evaporation Amsterdam Model
- 3- Global Land Data Assimilation System
- 4- Potential Evapotranspiration
- 5- Pearson Correlation Coefficient
- 6- Root Mean Square Error
- 7- Mean Bias Error
- 8- Normalized Mean Bias Error
- 9- Data Assimilation
- 10- Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation

در این مطالعه با هدف اعتبارسنجی داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی دو پایگاه داده GLEAM و GLDAS، در چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از مدل بیلان آب تورنت وایت برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و استفاده از مؤلفه AET واقعی شبیه‌سازی شده، به عنوان مبنای ارزیابی داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی استفاده شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مدل بیلان آب تورنت وایت در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای، از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی رواناب برخوردار است و علی‌رغم یک ارزیابی خشک در رواناب سالانه و بهار، عملکرد مدل بیلان آب تورنت وایت در شبیه‌سازی رواناب سالانه و فصول پرآب سال مطلوب بوده و می‌تواند به عنوان روشی قابل قبول برای مطالعات هیدرواقلمی مورد استفاده قرار گیرد. (Hessari et al. (2010 قابلیت روش تورنت وایت-ماتر اصلاح شده را در تولید آبدهی رودخانه‌ها در حوضه نازلوچای ارومیه تأیید نمودند. لذا، با توجه به عدم توانایی کافی مدل تورنت وایت در زیرحوضه نازلوچای و روضه‌چای، استفاده از مدل‌های اصلاح‌شده در این زیرحوضه‌ها ضرورت می‌یابد. نتایج اعتبارسنجی داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی نشان داد که در مقیاس سالانه تفاوت دو پایگاه داده GLEAM و GLDAS چندانی متفاوت نبود. اما در مقیاس فصلی، عملکرد داده‌های GLEAM و GLDAS در فصول مختلف متفاوت بودند. در مجموع، بر اساس معیارهای ارزیابی، پایگاه داده GLEAM عملکرد بهتری نسبت به GLDAS داشت. (Abdi Dezfouli et al. (2020 نیز دقت برآوردهای تبخیر-تعرق مدل GLEAM را از طریق مقایسه با روش بیلان آب در حوضه کرخه تأیید کردند. (Rostami et al. (2023 با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت، نشان دادند که پایگاه داده GLEAM نسبت به GLDAS کارایی مناسب‌تری در حوضه طشک-بختگان دارد. همچنین نتایج مطالعه حاضر نشان داد که در هر دو مقیاس سالانه و فصلی، داده‌های GLEAM و GLDAS در زیرحوضه شهرچای از اعتبار بیشتری برخوردار بودند. با توجه به نتایج مطالعه حاضر، استفاده از داده‌های GLEAM و GLDAS در مطالعات هیدرومتئورولوژیکی در سایر زیرحوضه‌ها، به ویژه در زیرحوضه‌های نازلوچای و روضه‌چای، توصیه نمی‌شود. لذا، ضرورت دارد پیش از کاربست داده‌های جهانی تبخیر-تعرق واقعی در هر زیرحوضه‌ای، اعتبار داده‌ها بررسی شود.

- Abdi Dezfouli A, Ghahreman N, 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 (In Persian)
- Alizadeh-Choobari O, Ahmadi-Givi F, Mirzaei N, Ovlad E (2016) Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. *International Journal of Climatology* 36(13):4276-4286
- Anayah FM, Kaluarachchi JJ (2019) Estimating global distribution of evapotranspiration and water balance using complementary methods. *Atmosphere-Ocean* 57(4):279-294
- Bashirian F, Rahimi D, Movahedi S, Zakerinejad R (2020) Water level instability analysis of Urmia Lake Basin in the northwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13:1-14
- Beaudoin H, Rodell M (2020) GLDAS Noah land surface model L4 monthly 0.25 x 0.25 degree V2. 1. Greenbelt, Maryland
- Beck HE, van Dijk AIJM, Levizzani V, Schellekens J, Miralles DG, Martens B, de Roo A (2017) MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences* 21:589-615
- Choi M, Kustas WP, Anderson MC, Allen RG, Li F, Kjaersgaard JH (2009) An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology* 149:2082–2097
- de Oliveira Aparecido LE, Lorençone PA, Lorençone JA, de Meneses KC, da Silva Cabral de Moraes J (2021) Climate changes and their influences in water balance of Pantanal biome. *Theoretical and Applied Climatology* 143(1):659-674
- Delju AH, Ceylan A, Piguet E, Rebetez M (2013) Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 111(1):285-296
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, Allan RP, Arias PA, Barlow M, ... & Zolina O (2021) Water cycle changes climate change 2021: The physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1055–1210
- ECMWF (2019) <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- Esmailnezhad R, Zeinalzadeh K, Nazarnejad H, Mohammadpour M (2021) Assessment of agricultural development preventive policies for restoration of Urmia Lake in Barandoz Basin, Iran. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 24(3):1103-1110
- Hessari B, Nikanfar R, Khani J, Sokouti R, Najafi A (2010) The research plan for preparing soil water balance model using GIS (Case study of Nazlou Chay watershed), Agricultural Research, Education and Promotion Organization, 129 p (In Persian)
- Khan MS, Baik J, Choi M (2020) Inter-comparison of evapotranspiration datasets over heterogeneous landscapes across Australia. *Advances in Space Research* 66(3):533-545
- Krishnaiah P R (1980) A hand book of statistics (Vol. 1). Motilal Banarsidass Publishes
- Martens B, Miralles DG, Lievens H, van der Schalie R, de Jeu RAM, Fernández-Prieto D, Beck HE, Dorigo WA, Verhoest NEC (2017) GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development* 10:1903–1925
- Mather JR (1978) The climatic water balance in environmental analysis. DC Heath and Company, Lexington, Massachusetts, 239
- Mather JR (1979) Use of the climatic water budget to estimate streamflow, in Mather, J.R., ed., Use of the climatic water budget in selected environmental water problems: Elmer, N.J., C.W. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Publications in Climatology 32 (1):1–52
- McCabe GJ, Wolock DM (1999) Future snowpack conditions in the western United States derived from general circulation model climate simulations. *Journal of the American Water Resources Association* 35(6):1473-1484
- Miralles DG, Holmes TRH, De Jeu RAM, Gash JH, ... & Dolman AJ (2011) Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:453–469
- Moesinger L, Dorigo W, Jeu RD, Schalie RVD, Scanlon T, Teubner I, Forkel M (2020) The global long-term microwave vegetation optical depth climate archive (VODCA). *Earth System Science Data* 12(1):177-196
- Mohammed R, Scholz M (2019) Climate change and water resources in arid regions: uncertainty of the baseline time period. *Theoretical and Applied Climatology* 137:1365–1376

- Mohebzadeh H, Fallah M (2019) Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13:389-400
- Montano BQ, Wetterhall F, Westerberg IK, Hidalgo HG, Halldin S (2019) Characterising droughts in Central America using uncertain hydro-meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology* 137:2125–2138
- Parsinejad M, Rosenberg DE, Ghale YAG, Khazaei B, Null SE, Raja O, Safaie A, Sima S, Sorooshian A, Wurtsbaugh WA (2022) 40-years of Lake Urmia restoration research: Review, synthesis and next steps. *Science of the Total Environment* 832:155055
- Pearson K (1895) Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London* 58:240–242
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2):81-92
- Rostani S, Delavar M, Shokri Kuchak V (2023) Evaluating the efficiency of global databases in estimating water balance components in data shortage conditions. *Journal of Water and Engineering Management* 13(1):17-42 (In Persian)
- Song X, Song S, Li Z, Liu W, Li J, Kang Y, Sun W (2019) Past and future changes in regional crop water requirements in Northwest China. *Theoretical and Applied Climatology* 137:2203-2215
- Thorntwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1):55-94
- Wolock DM, McCabe GJ (1999) Effects of potential climatic change on annual runoff in the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association* 35(1):341-341
- Zheng Z, Ma Z, Li M (2017) Regional water budgets and hydroclimatic trend variations in Xinjiang from 1951 to 2000. *Climatic Change* 144:447-460