



Feasibility Study of Developing a Water Balance Model Using Global Gridded Evapotranspiration Products

S.R. Mousavi^{1*}, S. Abbasi², and M. Nasseri³

Abstract

Evapotranspiration is one of the most important part of hydrologic cycle that sinks the watershed moisture as an outward flux from the existing water resource. Most of the current relationships equation for estimating actual evapotranspiration are empirical, which are based on local condition that their calibration or selection must be based on status of region of interest. The main goal of the current research is the evaluation of the effect of using global gridded evapotranspiration products on the performance of water balance model in Snow-covered region in a mountainous watershed located in western Iran; Gheshlagh watershed. To do this, three global gridded products including GLEAM, SSEbop and MODIS organized in four calibration scenarios (three scenarios using these products and reference model) are evaluated. Finally, due to the need for evaluating the interaction of using these data on structure of water balance models, the uncertainty of the model parameters has been evaluated by GLUE method. Simultaneous calibration results of evapotranspiration and runoff showed that model operation is better once using GLEAM and SSEbop products. In all scenarios, GLEAM had best function that improved runoff simulation.

Keywords: Monthly Water Balance Model, Global Gridded Evapotranspiration, Uncertainty.

Received: March 1, 2021

Accepted: September 11, 2021

امکان‌سنجی توسعه مدل بیلان آبی مبتنی بر اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی تبخیر- تعرق

سیده رحیمه موسوی^{۱*}، سعید عباسی^۲ و محسن ناصری^۳

چکیده

در چرخه هیدرولوژی یکی از مهمترین اجزاء تبخیر و تعرق واقعی است که شار رطوبتی به سمت خارج ایجاد نموده و بخشی از منابع رطوبتی را از سیستم خارج می‌نماید. عمده روابط موجود در تخمین مقدار تبخیر و تعرق واقعی، بصورت تجربی بوده و مبتنی بر مشخصات اقلیمی و محلی است که کالیبره نمودن آنها و یا انتخاب نوع رابطه متناسب با مناطق مورد بررسی در آنها الزامی است. هدف اصلی مقاله حاضر، بررسی اثر استفاده از محصولات بزرگ مقیاس تبخیر و تعرق در عملکرد مدل بیلان آب در منطقه‌ای برف‌گیر و کوهستانی در غرب ایران (محدوده مطالعاتی سد قشلاق) است. به همین منظور سه محصول بزرگ مقیاس GLEAM، SSEbop و MODIS در قالب چهار سناریو (سه سناریو استفاده از این محصولات در کنار مدل مرجع بیلان منابع آب) ارزیابی شده است. در انتها با توجه به لزوم ارزیابی اثر متقابل استفاده از این اطلاعات بر ساختار مدل بیلان، ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای مدل با روش GLUE انجام شده است. نتایج کالیبراسیون همزمان تبخیر و تعرق و جریان رودخانه، بر بهبود رفتار مدل با استفاده از محصولات ماهواره‌ای SSEbop و GLEAM صحنه می‌گذارد. در تمام سناریوهای مطرح شده محصول GLEAM بهترین عملکرد را داشته و شبیه‌سازی جریان رودخانه را بهبود داده است.

کلمات کلیدی: بیلان آب ماهانه، محصولات بزرگ مقیاس تبخیر و تعرق، عدم قطعیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۰

1- Ph.D. Student, School of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-Mail: mousavi@znu.ac.ir

2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran. E-Mail: Abbasi.Saeed@Znu.ac.ir

3- Assistant Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-Mail: mnaseri@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.2.17.0](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.2.17.0)

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

واسنجی چند هدفه (Zhang et al., 2009; Muthuwatta et al., 2009; Rientjes et al., 2013; Kunnath-Poovakka et al., 2016; Lopez et al., 2017; Pan et al., 2018; Herman et al., 2018)، و یا استفاده از این محصولات به منظور واسنجی تک هدفه است (Rientjes et al., 2013; Vervoort et al., 2014; Ha et al., 2018; Herman et al., 2018; Odusanya et al., 2019; Jiang et al., 2020). همچنین، از این اطلاعات به منظور تعیین عدم قطعیت یا محدوده اثر پارامترها و فرآیند داده‌گواری در مدل‌سازی هیدرولوژیک نیز استفاده شده است (Qin et al., 2008; Winsemius et al., 2008; Immerzeel and Droogers, 2008; Long et al., 2014; Chen et al., 2016; Tobin and Bennett, 2017; Khan et al., 2018; Odusanya et al., 2019; Moreira et al., 2019).

بیشتر تحقیقات انجام شده اذعان دارد که در مقایسه با واسنجی مدل توسط جریان رودخانه به تنهایی، واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تعرق با مقادیر زمینی و محصولات بزرگ مقیاس (به ترتیب) می‌تواند منجر به بهبود نتایج شبیه‌سازی تبخیر- تعرق و یا عملکرد مدل شود (Roy et al., 2017; Pan et al., 2018; Rajib et al., 2019; Becker et al., 2018). همچنین عملکرد جریان شبیه‌سازی رودخانه در این نوع واسنجی در اغلب تحقیقات تا حد مناسبی حفظ و یا تقویت شده است (Kunnath-Poovakka et al., 2016; Jiang et al., 2020)، اما در این میان، در برخی از تحقیقات کاهش قابل توجه کیفیت شبیه‌سازی جریان رودخانه نیز گزارش شده است (Rientjes et al., 2013; Vervoort et al., 2014; Tobin and Bennett, 2017; Lopez et al., 2017; Herman et al., 2018). این خود می‌تواند ناشی از تفاوت نتایج مدل‌سازی تبخیر- تعرق بزرگ مقیاس در قیاس با واقعیت محلی و جریان اقلیمی- هیدرولوژی در حوضه آبریز مورد بررسی بوده و یا از اثرات عدم دقت و قطعیت موجود در این اطلاعات نشأت گرفته باشد. اما از طرف دیگر، با توجه به ظرفیت استفاده از این محصولات در واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تعرق، می‌توان انتظار داشت که در فرآیند شبیه‌سازی جریان رودخانه به خصوص در حوضه‌های فاقد آمار بهبود حاصل شود (Muthuwatta et al., 2009; Zhang et al., 2009; Poméon et al., 2018).

با توجه به سوابق تحقیقات ارائه شده، نحوه نقش‌آفرینی محصولات تبخیر- تعرق در مدل‌های بیلان آب هنوز به صورت یک سؤال جدی مطرح است که در دو بخش اثرگذاری بر عدم قطعیت و نتایج واسنجی قابل پاسخگویی است. تحقیق حاضر، پتانسیل استفاده از محصولات جهانی تبخیر- تعرق را در عملکرد یک مدل بیلان آب را مورد بررسی

در حالی که مدل‌های هیدرولوژیکی بیشتر اجزای چرخه هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی می‌کنند، جریان رودخانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه اغلب تنها مؤلفه‌ای (و در صورت وجود اطلاعات آبخوان در منطقه مطالعاتی) است که به منظور واسنجی این دست از مدل‌ها استفاده می‌شود، زیرا می‌توان آن را با دقت بیشتری نسبت به بقیه اجزا اندازه‌گیری و اعمال نمود (Rabuffetti et al., 2008; Troy et al., 2008). از آنجا که در بعضی از حوضه‌ها، اندازه‌گیری جریان رودخانه تنها مؤلفه اندازه‌گیری شده بوده و یا همین مورد نیز با دقت کافی اندازه‌گیری نمی‌شود، لذا واسنجی مدل به کمک جریان مشاهداتی در رودخانه و در خروجی حوضه از ناهمگنی مشخصات داخل حوضه تا حدی چشم‌پوشی کرده و طبعاً نتایج واسنجی در این مواقع بیانگر فرآیندهای داخل حوضه نیست (Jiang et al., 2020)، از این رو به منظور تدقیق اجزاء مدل‌های هیدرولوژیکی، محققان به استفاده از سایر متغیرهای مربوطه مانند پوشش برف، رطوبت خاک و تبخیر- تعرق برای واسنجی این دست از مدل‌های هیدرولوژیکی روی آورده‌اند (Parajka and Blöschl, 2008; Immerzeel and Droogers, 2008; Shahrban, 2017; Poméon et al., 2018; Ha et al., 2018; Moreira et al., 2019).

از آنجا که در اغلب حوضه‌های آبریز اندازه‌گیری‌های زمینی برای اغلب قریب به اتفاق متغیرهای محیطی- هیدرولوژیکی وجود ندارد، سنجش از دور و اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی متکی بر آن توانسته‌اند با پوشش زمانی و مکانی گسترده اطلاعاتی (با دقت‌های مکانی و عملکردی متفاوت) از مقادیر این متغیرها فراهم آورند (Jiang and Islam, 2001; Che et al., 2004; Huffman et al., 2007; Dorigo et al., 2015). تحقیقات اخیر به بررسی پتانسیل استفاده از محصولات تبخیر- تعرق ماهواره‌ای و اثرگذاری آنها در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی و بهبود عملکرد مدل‌های بیلان آب پرداخته‌اند (Velpuri et al., 2012; Liu et al., 2016; Roy et al., 2017; Poméon et al., 2018; Herman et al., 2018; Odusanya et al., 2019; Jiang et al., 2020).

اگرچه بهترین روش به منظور تلفیق داده‌های تبخیر- تعرق بزرگ مقیاس (اعم از دورسنجی و بازتحلیل شده) در مدل‌های هیدرولوژیکی نامشخص است، اما تاکنون چندین روش به این منظور پیشنهاد شده که در ادامه به آنها اشاره شده است. یکی از این دسته روش‌ها استفاده از محصولات تبخیر- تعرق به عنوان ورودی است (Zhang et al., 2009; Vervoort et al., 2014). رویکرد دوم، استفاده از این اطلاعات در کنار جریان مشاهداتی رودخانه یا سایر متغیرهای مدل در

متوسط بارندگی سالیانه حوضه نیز ۴۵۴/۴ میلی متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۳/۳ درجه سانتی گراد است.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

۲-۲-۱- اطلاعات زمینی مورد استفاده

داده‌های زمینی از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در حوضه قشلاق جمع‌آوری شده است. این اطلاعات شامل آمار بارندگی، دبی، دما و تبخیر تشت است. اطلاعات خام اولیه معمولاً نیز به صورت روزانه ثبت شده‌اند. از آنجا که مدل بیلان در این تحقیق ماهانه است، لازم است اطلاعات اولیه در قالب ماهانه مرتب شوند. بنابراین در اولین گام کلیه اطلاعات زمینی و ماهواره‌ای به مقیاس ماهانه تبدیل شدند. در خصوص بارش، دما، تبخیر و جریان رودخانه، ابتدا مجموع اطلاعات روزانه در هر ایستگاه طی یک ماه محاسبه شد. سپس این داده‌ها بر روی شبکه محاسباتی با دقت مکانی ۱ و ۵ کیلومتری بر روی حوضه تخمین زده شده است. با توجه به مدل‌سازی یکپارچه مدنظر در این تحقیق، در نهایت کلیه داده‌های بارش، دما و تبخیر به صورت میانگین روی کل منطقه مطالعاتی به عنوان ورودی در مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

یادآوری می‌شود که به منظور تعیین توزیع مکانی بارش بر روی شبکه محاسباتی از اطلاعات ثبت شده ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو که از نظر تقسیم‌بندی زیرحوضه‌های درجه دو با حوضه مورد بررسی در یک زیرحوضه قرار دارند و روش تخمین مکانی 'MLS' (Lancaster and Salkauskas, 1981; Amini and Nasser, 2021)، استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی بارش بر روی شبکه محاسباتی، از خصوصیات جغرافیایی (ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی) و بارش ماهواره‌ای به عنوان متغیرهای مستقل و بارش زمینی در جایگاه متغیر وابسته استفاده شده است. در تحقیق حاضر از محصول بزرگ مقیاس بارش TRMM به منظور توسعه مقدار بارش بر سطح زمین از مقادیر مشاهداتی ایستگاهی استفاده شده است. یکی از علل استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در کنار بارش زمینی، عدم وجود ایستگاه ثبت داده در مناطق کوهستانی حوضه است. با استفاده از ارزیابی آماری در نقاط ایستگاهی، مشخص شد که استفاده از مقدار بارش TRMM به عنوان متغیر مستقل در کنار مشخصات جغرافیایی، تخمین مقدار بارش را با دقت بیشتری امکان‌پذیر می‌نماید. به منظور تخمین مکانی متغیرهای اقلیمی دما و تبخیر تشت نیز علاوه بر اطلاعات ایستگاه‌های وزارت نیرو، از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی بهره گرفته شده است.

قرار می‌دهد. اهداف این تحقیق در قالب تعیین عملکرد مدل بیلان آب در برابر محصولات تبخیر- تعرق، تعیین تأثیر واسنجی مؤلفه تبخیر- تعرق در شبیه‌سازی جریان رودخانه، مقایسه سه محصول جهانی تبخیر- تعرق در برآورد تبخیر واقعی در مدل بیلان آب در منطقه مورد مطالعه تعریف می‌شود. سناریوهای در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل استفاده از جریان مشاهداتی رودخانه برای واسنجی مدل، استفاده از داده‌های مختلف تبخیر- تعرق بزرگ مقیاس به عنوان ورودی مدل به جای استفاده از رابطه تبخیر- تعرق در مدل و واسنجی مدل با جریان مشاهداتی رودخانه، استفاده از داده‌های مختلف تبخیر- تعرق ماهواره‌ای با اعمال یک ضریب اصلاحی به عنوان ورودی مدل به جای استفاده از رابطه تبخیر- تعرق در مدل و واسنجی مدل با جریان مشاهداتی رودخانه و واسنجی همزمان مدل با استفاده از جریان مشاهداتی رودخانه و تبخیر- تعرق ماهواره‌ای است. در مطالعات پیشین سناریوی اول (Rientjes et al., 2013; Herman et al., 2018)، سناریوی دوم (Vervoort et al., 2014) و سناریوی چهارم (Zhang et al., 2009; Muthuwatta et al., 2009; Rientjes et al., 2013; Lopez et al., 2017; Pan et al., 2018; Herman et al., 2018) توسط محققان پیشنهاد شده بود اما سناریوی سوم مورد بررسی در مقاله حاضر که اختصاص به بررسی اثر استفاده از محصولات دورسنجی تبخیر- تعرق در رفتار غیر قطعی پارامترهای مدل هیدرولوژی مورد استفاده است، به عنوان جنبه خاص و متمایز نوآوری در مقاله حاضر است. در ادامه به بررسی مواد و روشها و همچنین نتایج پرداخته، به ترتیب، پرداخته شده است.

۲- مواد و روشها

این بخش به معرفی منطقه مطالعاتی، داده‌های زمینی و اطلاعات بزرگ مقیاس تبخیر- تعرق مورد استفاده اختصاص دارد. همچنین مدل بیلان آبی ماهانه، معرفی سناریوهای واسنجی و روش ارزیابی عدم قطعیت مورد استفاده نیز ارائه شده است.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه مد نظر در تحقیق حاضر حوضه منتهی به سد قشلاق، که از زیرحوضه‌های رودخانه مرزی غرب ایران و پایاب آن در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شهر سندرگ واقع شده است. این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه عرض شمالی جای دارد. مساحت این حوضه آبریز معادل ۱۰۶۲/۱۲ کیلومتر مربع است. بیشینه، کمینه و متوسط ارتفاع در این حوضه آبریز به ترتیب برابر با ۲۸۷۹، ۱۴۶۸ و ۱۹۶۰/۵۹ متر از سطح دریا است.

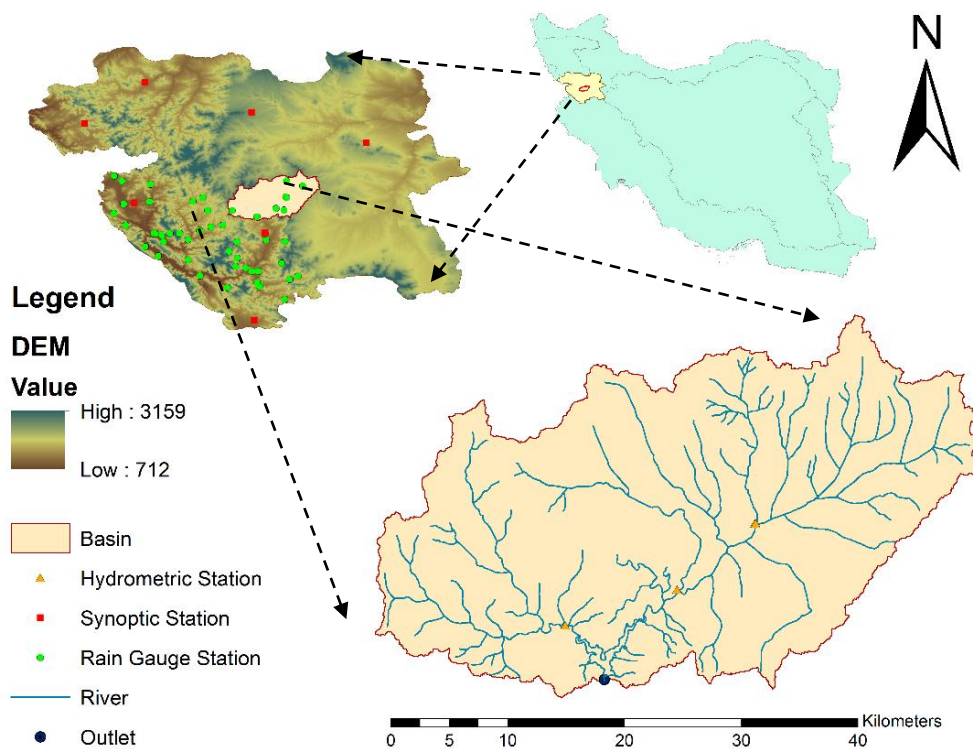


Fig. 1- Location of Gheshlagh watershed and its climatological and hydrometric stations

شکل ۱- موقعیت حوزه آبریز سد قشلاق و ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی و هیدرومتری

تبخیر پتانسیل را براساس مشاهدات تابش خالص سطح و دمای هوای نزدیک سطح محاسبه می‌کند. در نهایت، محصول تبخیر- تعرق SSEBop براساس رویکرد ساده شده بیلان انرژی سطحی (SSEB) با پارامترهای منحصر بفرد از سال ۲۰۰۳ به بعد تولید شده است. این محصول از ترکیب تبخیر- تعرق تولید شده از تصاویر حرارتی سنجنش از دور ده روزه MODIS و تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از رویکرد شاخص حرارتی به دست می‌آید. فرمول اصلی SSEB بر اساس قوانین پیکسل‌های سرد و گرم مدل‌های SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998) و METRIC (Allen et al., 2007) است.

۲-۳- مدل بیلان آبی ماهانه

با توجه به اقلیم کوهستانی منطقه مطالعاتی و برف‌گیر بودن آن و عدم تأثیر آب زیرزمینی ناشی از آبخوان آبرفتی در بیلان آبی آن، مدل منتخب باید امکان مدل‌سازی هیدرولوژی برف و جریان رودخانه ناشی از ذوب برف را داشته باشد. در اولین گام از تحقیق حاضر، نه مدل بیلان آب شامل abc (اصلاح شده با برف- ساختار بیلان برفی آن از مدل مک کیب - مارکستروم) (Vogel and Sankarasubramanian, 2003; McCabe and Markstrom,

این اطلاعات نیز در ابتدا به صورت جمع ماهانه از ایستگاه‌های سنجنش زمینی به دست آمده و سپس با روش تجربی گرادیان ارتفاعی بر روی شبکه محاسباتی یک کیلومتری تخمین زده و در نهایت بر روی کل حوزه میانگین‌گیری شده است.

۲-۲- محصولات جهانی تبخیر- تعرق

اطلاعات بزرگ مقیاس مورد استفاده در این تحقیق شامل محصولات تبخیر- تعرق از سه پایگاه اطلاعاتی است که مشخصات آن‌ها بصورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. محصول تبخیر- تعرق سنجنده MODIS با نام MOD16 در مقیاس جهانی با دقت مکانی ۵۰۰ متر و با فواصل زمانی ۸ روزه در دوره زمانی ۲۰۰۱ به بعد تولید شده است. الگوریتم مورد استفاده در جمع‌آوری داده‌های این ماهواره بر اساس منطق حاکم بر رابطه پنمن- مونتیث است که شامل ورودی‌هایی از داده‌های هواشناسی باز تحلیل شده روزانه همراه با داده‌های سنجنش از دور MODIS مانند خواص پوشش گیاهی، آلبدو و پوشش زمین است. محصول دوم GLEAM^۲ مجموعه‌ای از نتایج بزرگ مقیاس اقلیمی است که به طور جداگانه اجزای مختلف تبخیر (یا تبخیر- تعرق) را تخمین می‌زند. معادله پریستلی و تیلور مورد استفاده در GLEAM

Table 1- Description of the global scale evapotranspiration products used in this study

جدول ۱- مشخصات اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی تبخیر- تفرق مورد استفاده

| Product | Equation | Time coverage | Spatial resolution | Time resolution | Download Link |
|----------|------------------|---------------|--------------------|-----------------|---|
| MOD16 ET | Penman-Montieth | 2001 till now | 500m | 8 day | https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=C1000000524-LPDAAC_ECS |
| GLEAM | Priestley-Taylor | 2003-2015 | 25km | daily | https://www.gleam.eu/ |
| SSEBop | Penman-Montieth | 2003 till now | 1km | 10 day | https://earlywarning.usgs.gov/fews |

تجمعی از رابطه‌ی نمایشی ارائه شده توسط Guo et al. (2005) استفاده شده است.

۴-۲- سناریوهای مدل‌سازی

چهار سناریو واسنجی مدل در مقاله حاضر با هدف درک امکان و عملکرد ناشی از جایگزینی اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی شده تبخیر- تفرق در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک (بالاخص بیلان)، پتانسیل بهبود و یا حفظ سطح آماری کیفیت نتایج جریان رودخانه، امکان واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تفرق مدل به کمک اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی شده و رفتارشناسی مدل در حالت استفاده از اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی شده تبخیر- تفرق در مقایسه با یکدیگر و مدل اولیه مدنظر بوده است.

- سناریوی اول استفاده از جریان مشاهداتی رودخانه در خروجی حوضه در فرآیند واسنجی مدل با استفاده از اطلاعات اقلیمی ثبت شده،
 - سناریوی دوم استفاده از محصولات تبخیر- تفرق به عنوان ورودی (به جای استفاده از رابطه تجربی و معمول تبخیر- تفرق) مدل و واسنجی مدل توسط جریان مشاهداتی رودخانه در خروجی حوضه،
 - سناریوی سوم استفاده از مقادیر محصولات تبخیر- تفرق با اعمال ضریب اصلاحی به عنوان ورودی مدل و واسنجی مدل توسط جریان مشاهداتی رودخانه در خروجی حوضه،
 - سناریوی چهارم استفاده از محصولات ماهواره‌ای تبخیر- تفرق به منظور واسنجی مدل که در آن همزمان جریان رودخانه و مقادیر محاسبه شده تبخیر- تفرق مدل کالیبره شوند.
- جزئیات و محصولات مورد استفاده در این چهار سناریو، در جدول ۲ ارائه شده است.

سناریوی اول که به عنوان مرجع ارزیابی نیز انتخاب شده مبتنی بر واسنجی مدل بیلان منتخب به منظور تعیین پارامترهای نامعلوم بر اساس کیفیت شبیه‌سازی جریان مشاهداتی رودخانه در ورودی به سد قشلاق (انتهای حوضه مدنظر) است.

Wang (2007)، Wang بهبود یافته (Wang et al., 2013)، Guo et al. (2007)، WAsMOD (al., 2005) (Widén-Nilsson et al., 2007)، Jazim (اصلاح شده با برف- ساختار بیلان برفی آن از مدل مک کیب- مارکستروم) (McCabe and Markstrom, 2006; Jazim, 2006)، Karopouzou1&2- مدل کارپوزس در این تحقیق با دو ساختار تعیین برف مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل اول یک ضریب نرخ نمایشی برای تعیین سهم بارش تعریف می‌کند، اما مدل دوم از ساختار تعیین برف مدل راثو بدین منظور بهره می‌برد- (Karpouzou et al., 2011)، NOPEX، (Rao and Al-Wagdany, 1995) ارائه شده توسط محققان با اندکی تغییر جهت امکان مدل‌سازی بیلان برفی و یا تغییرات جزئی دیگر مورد بررسی قرار گرفته و به کمک داده‌های مشاهداتی در حوضه و استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور واسنجی، به بهینه‌سازی تک هدفه مدل‌ها پرداخته، پارامترهای آن تعیین و نتایج هر یک ارائه شده است. مدل‌های مذکور با توجه به معیارهای ارزیابی آماری همچون شاخص‌های نش- ساتکلیف (NSE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) مورد بررسی قرار گرفته و از بین آن‌ها بهترین ساختار مدل بیلان ماهانه انتخاب شده است.

با توجه به نتایج ارزیابی‌ها که در بخش ۳ آورده شده است، مدل ونگ بهبود یافته^۵ رفتار آماری مناسبتری داشته و انتخاب شده است. این مدل جزء مدل‌های مفهومی و تک لایه محسوب می‌شود، همچنین جریان رودخانه در این مدل متشکل از جریان سطحی، زیر سطحی و برف‌آب ناشی از ذوب برف است. مدل بهبود یافته ونگ (Wang et al., 2011) دارای چهار پارامتر است. در شکل ۲ ساختار مفهومی این مدل ارائه شده است. ساختار کد مربوطه در صفحه (<https://github.com/mnasserimn/Water-Balance-Method-baed-on-Wang-et-al-2014-git>) ارائه شده است. این مدل در مناطق مرتفع و سرد که به صورت کلی یا جزئی پوشیده از برف هستند، عملکرد مناسبی دارد. در این مدل بارش به صورت خطی بین دو آستانه دمایی باران و برف تقسیم می‌شود. در اجرای این مدل برای محاسبه برف

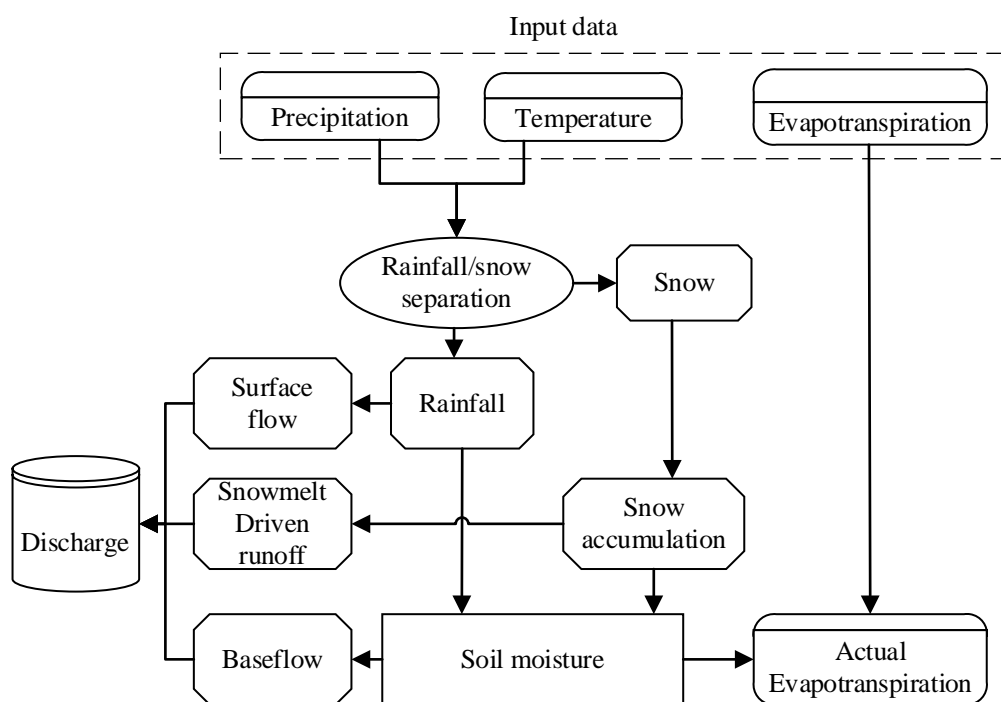


Fig. 2- Conceptual diagram of monthly water balance developed by Wang et al. (2014)
 شکل ۲- ساختار مفهومی مدل بیلان آب ماهانه ونگ (Wang et al., 2013; Wang et al., 2014)

Table 2- Description of the calibration procedures for each modelling scenarios

جدول ۲- توضیحات سناریوهای مورد استفاده در فرآیند واسنجی

| Scenarios | Description |
|-----------|--|
| S1 | Calibration based on the in-situ discharge and using observed climatological values (Base model) |
| S2 | Calibration based on the in-situ observed discharge and inserting actual evapotranspiration products as input variables |
| S3 | Calibration based on the in-situ observed discharge and inserting scaled actual evapotranspiration products as input variables |
| S4 | Calibration based on the in-situ observed discharge and actual evapotranspiration products simultaneously |

تخمین تبخیر- تعرق واقعی مبتنی بر اندازه‌گیری زمینی شاخص‌هایی همچون تبخیر از تشت و غیره بخصوص در مناطقی با عدم امکان ثبت اطلاعات زمینی، است. سناریوی آخر با هدف استفاده از الگوی حاکم بر مقادیر تبخیر- تعرق محصولات در شکل‌گیری رفتار روابط تجربی تعیین تبخیر- تعرق واقعی در منطقه مطالعاتی است. در این

در سناریوهای دوم و سوم مقادیر محصولات تبخیر- تعرق واقعی مورد نظر، جایگزین رابطه تبخیر- تعرق و مقادیر آن در مدل بیلان شده که به منظور تعیین مقادیر جدید پارامترهای بهینه مدل، مشمول بهینه‌سازی شده‌اند. هدف اصلی در تعریف این دو سناریو بررسی امکان جایگزینی مقادیر اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی شده با روابط

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$KGE = 1 - \frac{\sqrt{(R(\bar{y}_i, y_i) - 1)^2 + \left(\frac{\text{var}(\bar{y}_i)^{1/2}}{\text{var}(y_i)^{1/2}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}} - 1\right)^2}}{\dots} \quad (4)$$

در روابط فوق، y' ، y ، \bar{y}_i ، y_i به ترتیب معرف مقادیر مشاهداتی، محاسباتی، میانگین مشاهداتی و میانگین محاسباتی جریان رودخانه در زمان i است. به منظور ارزیابی نتایج عدم قطعیت از سه فاکتور AIRL^۹ که معرف پهنای باند غیر قطعی پاسخ مدل به نسبت مقادیر مشاهداتی، Plevel نسبت درصد مقادیر مشاهداتی واقع در داخل باند غیر قطعی و NUE^{۱۰} که نسبت این دو شاخص را نمایش می‌دهد، استفاده شده است (Li et al., 2010; Jin et al., 2010; Nasseri et al., 2014). در تفسیر نتایج این شاخص‌ها هرچه شاخص‌های ARIL کمتر و Plevel بیشتر باشد، اثر عدم قطعیت در رفتار مدل کمتر است. شاخص NUE نیز به منظور تجمیع دو شاخص متفاوت Plevel و ARIL تعریف شده و نمایش کلی از عملکرد شبیه‌سازی عدم قطعیت را ارائه می‌کند.

$$ARIL = \frac{1}{n} \sum \frac{UPLi_t - LOLi_t}{Q_{obs,t}} \quad (5)$$

$$P_{level} = \frac{NQ_{in}}{n} \times 100 \quad (6)$$

$$NUE = \frac{P_{level}}{w \times ARIL} \quad (7)$$

در روابط فوق UPLi و LOLi مقادیر بالا و پایین عدم قطعیت شبیه‌سازی شده، Q_{obs} جریان مشاهداتی رودخانه، NQ_{in} تعداد مشاهداتی که داخل باند عدم قطعیت قرار گرفتند، N تعداد مشاهدات و w وزن مؤثر بین AIRL و Plevel است.

آخرین معیار مورد استفاد در تحقیق حاضر، فاصله انرژی (ED) است که معرف میزان عدم تشابه دو توزیع آماری است. این شاخص توسط ریزو و سیکلی توسعه یافته و از نوع فاصله است که عدم تشابه توزیع‌های دو مجموعه از متغیرهای تصادفی را توصیف می‌کند. دو بردار توزیع آماری یکسانی دارند اگر و فقط اگر مقدار ED آنها برابر با صفر باشد. افزایش مقادیر ED دو بردار بدان معنی است که توزیع آماری آنها از یکدیگر متمایز می‌شوند (Rizzo and Székely, 2016). رابطه ۸، رابطه ریاضی این شاخص است:

$$ED^2 = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} (F_i(x) - \bar{F}_i(x))^2 dx \quad (8)$$

سناریو بصورت همزمان جریان مشاهداتی رودخانه و مقادیر تبخیر-تعرق محصولات ماهواره‌ای به عنوان اهداف بهینه‌سازی مطرح شده است.

۲-۵- ارزیابی عدم قطعیت

عدم قطعیت از سه منبع ساختار مدل، خطاهای ورودی‌های مدل و پارامترها، نشات می‌گیرند (Chen et al., 2016). به منظور ارزیابی عدم قطعیت ناشی از هر کدام از موارد فوق محققین روش‌های متنوعی پیشنهاد داده‌اند. این روش‌ها به سه گروه احتمالاتی، امکانی و تلفیقی دسته‌بندی می‌شوند (Nasseri et al., 2014). بصورت معمول روش‌های آماری همچون SUFI-2، GLUE و Monte Carlo و Markov Chain Monte Carlo در ادبیات فنی مربوط به ارزیابی عدم قطعیت مورد استقبال قرار گرفته است (Rientjes et al., 2013; Ha et al., 2018; Poméon et al., 2018). به منظور ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای مدل در تحقیق حاضر، از روش GLUE^۹ استفاده شده است. این روش که توسط Beven and Binley (1992) ابداع شد، در ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی مورد توجه قرار گرفت. پایه و اساس این روش رویکرد مونت کارلو است و در ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی در تحقیقات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است (Nasseri et al., 2014; Ahmadi et al., 2019; Ragab et al., 2020; Ahmadi and Nasseri, 2020). این روش ساختاری مبتنی بر نمونه‌گیری‌های تصادفی در دامنه تعیین شده توسط مدل تولید اعداد تصادفی و سنجش شاخص کیفیت مدل‌سازی با حد مطلوبیتی است که توسط مدل‌ساز با توجه به بهترین شاخص مطلوبیت (مدل کالیبره شده) انتخاب می‌شود. این شیوه ارزیابی عدم قطعیت محدودیتی برای تعداد پارامتر نداشته و در نهایت عدم قطعیت کلی ساختار مدل مد نظر و پارامترهای آن را ارائه می‌کند (Beven and Binley, 1992).

۲-۶- شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های ارزیابی عملکرد براساس بسیاری از تحقیقات هیدرولوژیکی در دو دسته اصلی تشابه و عدم تشابه آماری طبقه‌بندی می‌شوند. معیارهای ارزیابی عدم تشابه مورد استفاده در این مقاله میانگین مربعات خطا (MSE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^۷ است. همچنین، معیارهای تشابه نش-ساتکلیف (Nash and Gupta et al., 1970) و شاخص تشابه چند عامله KGE^۸ (Sutcliffe et al., 2009) است. روابط ریاضی هر یک از شاخص‌های فوق در ادامه ارائه شده است.

(NSE)، میانگین مربعات خطا (MSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) مورد بررسی قرار گرفته و از بین آن‌ها بهترین ساختار مدل بیلان ماهانه انتخاب شده است. در فرآیند مدل‌سازی بیلان آب دوره مدل‌سازی به دو بخش واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۰) و اعتبارسنجی (۲۰۱۱-۲۰۱۵) تقسیم شده است. مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای این مدلها در دو بازه واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۳ ارائه شده است.

با توجه به نتایج شاخص‌های ارزیابی در جدول ۳، مدل ونگ بهبود یافته که شاخص KGE آن بیشتر از سایر مدلها است و در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۶۰ است، به عنوان مدل منتخب برگزیده شد. ارزیابی و سنجش تقاطعی مقادیر سایر شاخص‌های آماری نیز موید برتری این مدل نسبت به سایر مدلها است. هفت پارامتر مهم مدل انتخاب شده و دامنه اولیه و مقدار بهینه شده آن در مدل بیلان مرجع که از این به بعد سناریوی اول نامیده می‌شود، در جدول ۴ گزارش شده است. حدود اولیه دامنه پارامترها از مقاله مدل wang استخراج شده است (Wang et al., 2013).

در رابطه فوق، \bar{F}_i ، F_i دو توزیع حاکم بر اطلاعات بوده، که با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۳- فرآیند مدل‌سازی

در این بخش به بحث و بررسی نحوه مدل‌سازی و نتایج به دست آمده برای انتخاب مدل بیلان آب، نتایج مدل‌سازی سناریوهای مطرح شده و نتایج ارزیابی عدم قطعیت اشاره شده است. به منظور واسنجی مدل بیلان از یک الگوریتم ژنتیک تک هدفه با مبنای ده-دهی استفاده شده است. همچنین در سناریوهای اول تا سوم تابع هدف به حداکثر رساندن شاخص آماری KGE بین جریان مشاهداتی و محاسباتی است. در سناریوی آخر که دو هدف بصورت همزمان مورد واسنجی هستند، تابع هدف به حداکثر رساندن جذر حاصل ضرب KGE جریان رودخانه و تبخیر-تعرق در نظر گرفته شده است. در ادامه به ترتیب به اقدامات و نتایج مدل‌سازی در این تحقیق پرداخته شده است.

۳-۱- انتخاب مدل بیلان

مدل‌های بیلان کالیبره شده مورد اشاره در بخش ۲ با توجه به شاخص‌های ارزیابی آماری همچون شاخص‌های نش-ساتکلیف

Table 3- Statistical metrics of the optimized water balance models for calibration and validation periods

| Water Balance Models | NSE | | MSE | | KGE | |
|----------------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | Calibration | Validation | Calibration | Validation | Calibration | Validation |
| Wang-revised | 0.78 | 0.30 | 12.64 | 39.26 | 0.79 | 0.60 |
| WASMOD | 0.65 | 0.35 | 19.60 | 36.43 | 0.71 | 0.56 |
| abc-revised | 0.59 | 0.37 | 23.06 | 35.22 | 0.62 | 0.58 |
| GU | 0.63 | 0.21 | 23.06 | 28.48 | 0.64 | 0.51 |
| Jazzim- revised | 0.42 | 0.31 | 40.93 | 38.37 | 0.42 | 0.4 |
| Rao | 0.29 | -0.11 | 39.97 | 61.72 | 0.46 | 0.50 |
| NOPEX | 0.39 | 0.30 | 37.85 | 39.08 | 0.42 | 0.26 |
| Karpozous | 0.56 | 0.06 | 24.62 | 52.26 | 0.63 | 0.48 |
| Karpozous-revised | 0.26 | -0.22 | 41.98 | 68.20 | 0.47 | 0.45 |

Table 4- Parameters' descriptions, their available bounds and optimum values

| Parameter | Description | Maximum | Minimum | Optimum |
|------------|--------------------------------|---------|---------|---------|
| K_s | Surface runoff coefficient | 0.6 | 0 | 0.28 |
| K_g | Sub-surface runoff coefficient | 0.6 | 0 | 0.00 |
| K_{sn} | Snow melt coefficient | 0.6 | 0 | 0.11 |
| S_{max} | Maximum soil moisture storage | 300 | 200 | 269.99 |
| T_{snow} | Snowfall threshold temperature | 0 | -12 | -10.00 |
| Train | Rainfall threshold temperature | 4 | -4 | -3.77 |
| SN(1,1) | Initial snow pack | 40 | 0 | 0.02 |

۳-۲- مدل سازی سناریوها

شاخص NSE در حالت واسنجی (با تفاوت اندک در دوره اعتبارسنجی) در محدوده قابل قبول هستند. با توجه به استفاده از شاخص KGE در واسنجی مدل و حدود بدست آمده، گویای این امر است که مدل به نحوه قابل قبولی کالیبره شده و می تواند به منظور شبیه سازی بیلان آبی محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، مقادیر دو شاخص NSE و KGE در دوره واسنجی در مقایسه با دوره اعتبارسنجی بزرگتر است، که نشان دهنده تناسب مدل بهتری در دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی است. تغییرات سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده در شکل ۳ نمایش داده شده است. به طور کلی مدل ونگ بهبود یافته تغییرات جریان جریان مشاهداتی رودخانه را نسبتاً دقیق نشان می دهد.

سناریوهای مختلف به شرحی که در بخش ۲ به آن اشاره شد، کالیبره شده و در این بخش به ارزیابی عملکرد آنها پرداخته شده است. بر این اساس مقادیر شاخص های نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) برای مقایسه جریان مشاهداتی و محاسباتی رودخانه و محصولات تبخیر-تعرق بزرگ مقیاس و شبیه سازی شده محاسبه شده است. دوره انجام پژوهش با توجه به در دسترس بودن اطلاعات زمینی و ماهواره ای از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۱۵ است. این محدوده زمانی (۱۴۹ ماه) به دو بازه زمانی واسنجی (۲۰۰۳-۲۰۱۲ و ۱۰۴ ماه) و اعتبارسنجی (۲۰۱۵-۲۰۱۲ و ۴۵ ماه) تفکیک شد.

۳-۲-۱- نتایج استفاده از محصولات تبخیر-تعرق به عنوان ورودی در مدل

این بخش از مقاله، به بررسی عملکرد مدل ونگ بهبود یافته در استفاده مستقیم از محصولات جهانی به دست آمده از سه پایگاه محصولات GLEAM و MODIS، SSEbop اختصاص دارد. سناریوهای ۲ و ۳ در جدول ۵ مقادیر شاخص های ارزیابی NSE، RMSE و KGE جریان رودخانه را در شرایطی که از محصولات تبخیر-تعرق بزرگ مقیاس به صورت جایگزین رابطه محاسبه تبخیر-تعرق در مدل استفاده شده و مدل تنها در برابر جریان مشاهداتی رودخانه کالیبره شده، نشان می دهد. در شکل ۴ مقادیر شاخص ارزیابی KGE که تابع هدف مدل سازی نیز بوده در سناریوهای مختلف نمایش داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵ و شکل ۴، به وضوح نتایج سناریوی سوم از سناریوی دوم بهتر بوده و همچنین با توجه به دامنه شاخص های KGE و NSE می توان نتیجه گرفت که S2(MOS) و S2(SSE) از منظر آماری نتایج قابل قبولی ارائه نموده است.

جدول ۵ مقادیر شاخص های نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) برای چهار سناریوی مطرح شده که شامل شانزده مدل است. در خصوص سطح قابل قبول شاخص های اطمینان، محققین نظر متفاوتی را ابراز نموده اند. موریاسی و همکاران (Moriyasi et al., 2007; Moriasi et al., 2015)، برای هر دو شاخص KGE و NSE مقدار ۰/۵ به بالا را قابل قبول دانسته و به عبارتی حد مقبولیت را در این مرز می شناسد، این دیدگاه در مطالعات هیدرولوژیک اغلب محققین مورد توجه قرار گرفته است. از طرف دیگر، در دیدگاهی موسع که توسط نوین و همکاران مطرح شده (Knoben et al., 2019)، آستانه های قابل پذیرش در دو شاخص عملکردی فوق $0 < NSE < 1$ و $0 < KGE < 1$ می شناسد.

همانطور که در جدول نشان داده شده است، شاخص KGE برای سناریوی اول که مدل مرجع است، برای دوره واسنجی و ارزیابی و

Table 5- Statistical metrics for different scenarios
جدول ۵- مقادیر شاخص های ارزیابی آماری جریان محاسباتی و مشاهداتی

| Scenarios | Statistical metrics | | | | | | |
|-----------|---------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------|
| | KGE | | RMSE | | NSE | | |
| | Calibration | Validation | Calibration | Validation | Calibration | Validation | |
| S1 | Base model | 0.83 | 0.65 | 3.97 | 3.17 | 0.70 | 0.46 |
| | S2(GLM) | 0.54 | 0.56 | 5.87 | 4.04 | 0.34 | 0.12 |
| S2 | S2(SSE) | 0.23 | 0.05 | 13.48 | 12.86 | -2.50 | -7.91 |
| | S2(MOS) | 0.23 | 0.23 | 14.05 | 8.99 | -2.80 | -3.36 |
| | S3(GLM) | 0.86 | 0.70 | 3.84 | 3.22 | 0.72 | 0.44 |
| S3 | S3(SSE) | 0.80 | 0.66 | 4.42 | 3.31 | 0.62 | 0.41 |
| | S3(MOS) | 0.70 | 0.43 | 5.60 | 2.77 | 0.40 | 0.59 |
| | S4(GLM) | 0.76 | 0.64 | 4.62 | 3.88 | 0.57 | 0.22 |
| S4 | S4(SSE) | 0.83 | 0.63 | 4.01 | 3.20 | 0.70 | 0.45 |
| | S4(MOS) | 0.27 | 0.18 | 11.65 | 9.88 | -1.61 | -4.26 |

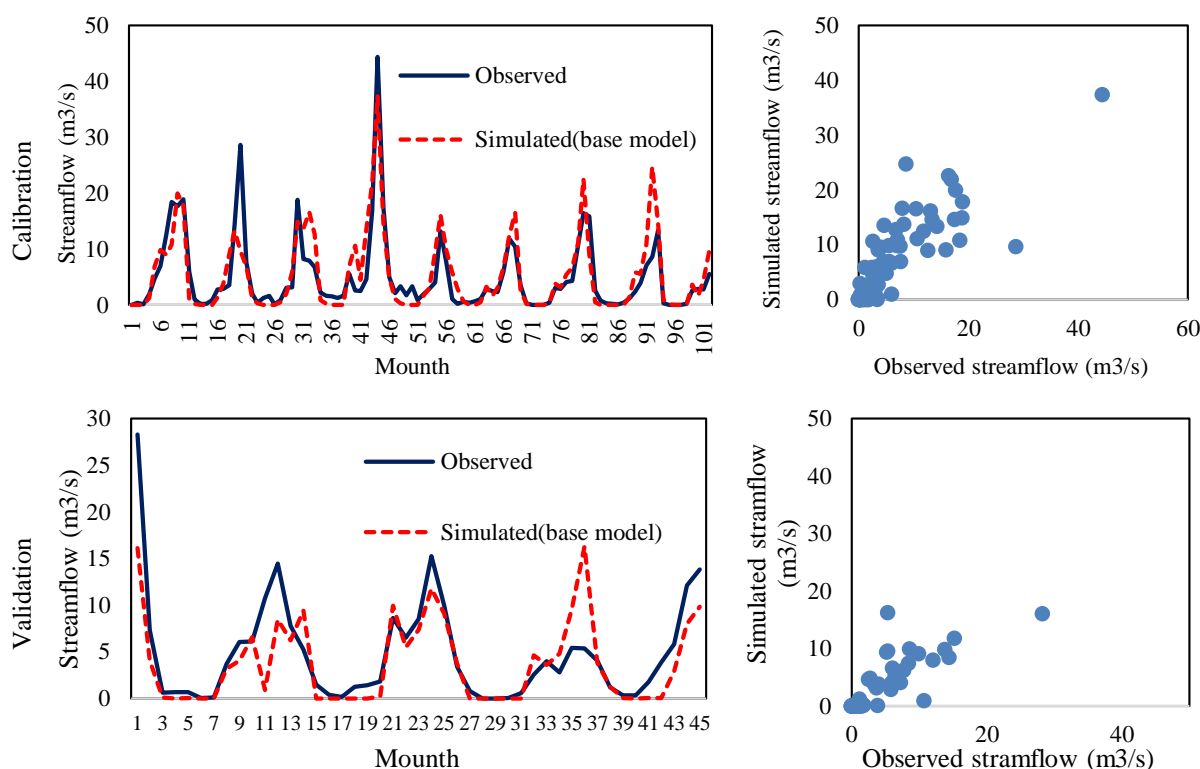


Fig. 3- Time series and scatter plots of the observed versus simulated streamflow values for the first scenario (S1) in calibration and validation periods

شکل ۳- تغییرات سری زمانی و پراکنش جریان مشاهداتی و محاسباتی رودخانه در مدل مرجع و در دو بازه زمانی واسنجی و اعتبارسنجی

واسنجی وارد شده است. مقادیر این ضریب برای محصولات GLEAM، SSEbop و MODIS به ترتیب ۱/۶۰، ۲/۱۴ و ۲/۰۰ بصورت بهینه محاسبه شده است. مقادیر این ضریب هرچه به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده تناسب محصول تبخیر- تعرق مزبور با شرایط عملکرد بیلان در مقیاس محدود مورد بررسی است و لذا در منطقه مطالعاتی ضریب مقیاس کمتری مورد نیاز است. بر این اساس (تناسب با مدل بیلان)، محصول GLEAM تبخیر- تعرق واقعی حوضه را با دقت بیشتری برآورد نموده است.

همچنین نتایج بیانگر آنست که در قیاس سناریوی سوم و اول، استفاده از محصولات GLEAM توانسته مدل سازی جریان رودخانه را در دوره واسنجی در سطح مدل مرجع حفظ کرده و حتی اندکی بهبود بخشد. به طوری که شاخص KGE در دوره واسنجی از عدد ۰/۸۳ در مدل مرجع به عدد ۰/۸۶ با استفاده از اطلاعات اصلاحی ماهواره GLEAM افزایش پیدا کرده است. در دوره اعتبارسنجی این شاخص از عدد ۰/۶۵ در مدل مرجع با اندکی افزایش به عدد ۰/۷۰ و ۰/۶۶ به ترتیب با استفاده از ماهواره های GLEAM و SSEbop رسیده است.

این نتیجه به این معناست که استفاده مستقیم از داده های تبخیر- تعرق ماهواره ای به عنوان ورودی مدل بیلان آب بجای رابطه تبخیر- تعرق بصورت مستقیم در مقابل اصلاح آن با ضریبی تعدیل کننده، رفتار آماری مناسب تری را به همراه دارد (De Vos et al., 2010). در خصوص استفاده از ضریب اصلاحی، اشاره می شود که با توجه به عدم دقت (وجود اریبی و یا مقیاس) در محصولات بزرگ مقیاس (اعم از بارش، دمای سطح و غیره) و اختلاف با مقادیر زمینی، روش های مختلفی به منظور کالیبره نمودن آن مورد استفاده بوده که استفاده از ضریب اصلاحی یکی از این موارد است، که به عنوان مثال در خصوص بارش، با توجه به مقادیر زمینی صورت می پذیرد. همچنین در مدل سازی های هیدرولوژی و یا مدل های بزرگ مقیاس بیلان رطوبت (TWS) که استفاده از محصولات بزرگ مقیاس رواج بیشتری دارد، واسنجی کلیه اجزاء دورسنجی شده در مدل بر اساس مقادیر مشاهداتی رواناب حوضه در ادبیات فنی استفاده شده که در این رویکرد، این کالیبراسیون در فقدان اطلاعات زمینی و البته در تناسب با سایر اجزاء مدل مد نظر صورت پذیرفته است (Schoups and Nasser, 2020; Giroto et al., 2021) با این توضیح، ضریب اصلاحی محصولات تبخیر و تعرق در سناریوی سوم به عنوان یک پارامتر مستقل در فرآیند

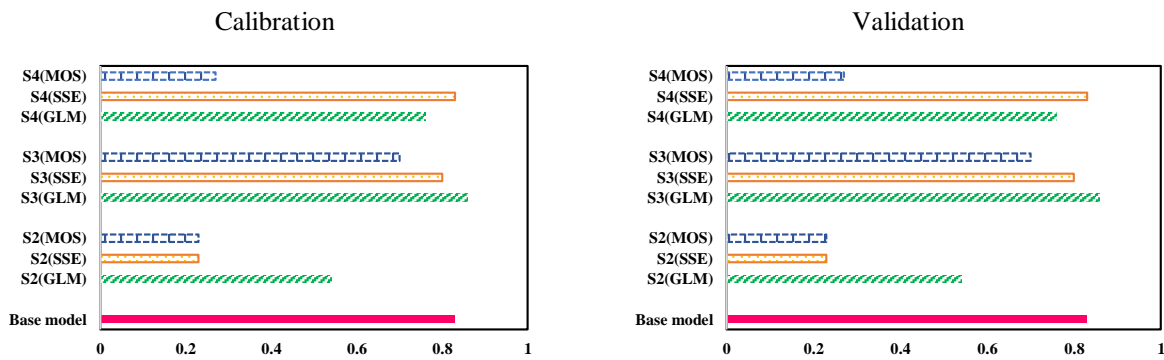


Fig. 4- KGE values of the simulated streamflow for different product-scenarios

شکل ۴- نمودار شاخص ارزیابی KGE برای جریان شبیه‌سازی شده رودخانه تحت محصول- سناریوهای مختلف

شده توسط مدل به کمک محصولات دورسنجی تبخیر- تفرق است. بر اساس نتایج تا این مرحله، افزودن واسنجی تبخیر- تفرق می‌تواند واسنجی جریان رودخانه را تا حدودی تحت تأثیر قرار دهد. در جدول ۵ مقادیر شاخص‌های NSE، RMSE و KGE برای جریان محاسباتی مدل کالیبره شده با هر کدام از محصولات تبخیر- تفرق ارائه شده است. به جز محصول تبخیر- تفرق MODIS سایرین در واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر، توانسته‌اند شبیه‌سازی مناسبی از جریان رودخانه ارائه کنند. چنانکه مقادیر هر سه شاخص ارزیابی دو محصول SSEbop و GLEAM بسیار نزدیک به مقادیر شاخص‌های مدل مرجع در سناریوی اول است. به عنوان مثال شاخص RMSE برای محصولات مزبور در دوره واسنجی به ترتیب ۴/۰۱، ۴/۶۲ به دست آمده در حالی که مقدار این شاخص در مدل مرجع ۳/۹۷ بوده که به مقادیر فوق نزدیک است. بنابراین واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر توانسته شبیه‌سازی جریان رودخانه را در سطح مطلوب و در حدود مدل مرجع حفظ کند، همچنین مقادیر شاخص‌ها برای محصول SSEbop تقریباً با مدل مرجع یکسان است. اما این شاخص برای محصول MODIS عدد ۱۱/۶۵ بدست آمده که اختلاف زیادی با سایر محصولات و مدل مرجع دارد. این امر بیانگر آنست که در منطقه مطالعاتی محصول MODIS هنگام واسنجی تبخیر- تفرق نمی‌تواند شبیه‌سازی درستی از جریان رودخانه ارائه دهد و مدل کالیبره شده به عبارتی دچار پدیده بیش‌برازش است. همچنین، بر اساس دامنه ارائه شده برای پذیرش کیفی نتایج مدل‌سازی، سناریو S4(MOS) کیفیت آماری مناسبی را ارائه نموده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در خصوص شاخص‌های آماری واسنجی تبخیر- تفرق مدل مرجع و مقادیر بزرگ مقیاس در جدول ۶ مقادیر شاخص‌های ارزیابی تبخیر- تفرق در دو مدل کالیبره شده با

در حالی که سایر محصول‌ها منجر به کاهش اندک در شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی جریان رودخانه شده‌اند. با مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی در سناریوی سوم در دوره واسنجی به ترتیب با استفاده از محصولات تبخیر- تفرق GLEAM، SSEbop و در نهایت MODIS جریان رودخانه مدل بهتر شبیه‌سازی شده است. اما در دوره اعتبارسنجی مقدار شاخص KGE در محصول GLEAM (۰/۷۰) بیشترین مقدار را دارد، در حالی که شاخص NSE به دست آمده در محصول MODIS (۰/۵۹) مقدار بیشتری را به خود اختصاص داده و مقدار خطای گزارش شده با شاخص RMSE (۲/۷۷) نیز در استفاده از محصول ماهواره MODIS کمتر است.

اما از آنجا که تابع هدف مدل‌سازی بیشینه کردن مقدار KGE است، می‌توان گفت که به ترتیب استفاده از محصولات تبخیر- تفرق ماهواره‌های GLEAM، SSEbop و MODIS با مقادیر شاخص KGE، ۰/۷۰، ۰/۶۶ و ۰/۴۳ در مدل‌سازی جریان رودخانه نتایج بهتری دربر داشته است. در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی می‌توان گفت جایگزینی تبخیر- تفرق محصول GLEAM بجای تبخیر- تفرق واقعی مدل با اعمال ضریب اصلاح مقیاس در سناریوی سوم عملکرد مدل را در سطح مدل مرجع در سناریوی اول حفظ کرده و منجر به بهبود نسبی نتایج در محدوده مطالعاتی شده است. لازم به ذکر است که دستاورد مهم ارزیابی این جایگزینی در قسمت بعد، مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۲- نتایج استفاده از محصولات تبخیر- تفرق به عنوان مرجع واسنجی

چهارمین سناریوی در نظر گرفته شده، واسنجی همزمان رواناب محاسباتی به کمک جریان مشاهداتی رودخانه و تبخیر- تفرق محاسبه

شده با محصول GLEAM به تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط مدل مرجع نزدیکتر است. البته مقادیر محاسبه شده R^2 برای تمام محصولات بجز محصول MODIS بسیار نزدیک به هم و همگی بالای ۰/۹۴ به دست آمده که توانایی همه محصولات مذکور برای واسنجی تبخیر- تعرق مدل را نشان می‌دهد.

۳-۳- نتایج ارزیابی عدم قطعیت

در این مرحله به منظور بررسی اثرگذاری استفاده از سناریوهای مورد بررسی در کالیبره نمودن مدل بیلان، به ارزیابی عدم قطعیت پارامتری آنها با استفاده از روش GLUE پرداخته شد. به این منظور با توجه به مطالب ارائه شده، آستانه حد مطلوبیت $KGE = 0.50$ برای نگهداشت اثر دسته پارامترهای تصادفی تولید شده در نظر گرفته شد. با این حد مطلوبیت تعداد ۱۰۰۰۰ نمونه تصادفی قابل قبول (KGE بیش از ۰/۵) به منظور شکل‌دهی توزیع آماری پارامترها لحاظ شد. همچنین به منظور ارزیابی اثر عدم قطعیت پارامتری در مدل‌های بیلان آبی ماهانه با بکارگیری محصولات جهانی تبخیر- تعرق در این پژوهش سناریوهای اول (مدل پایه) و سوم مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی تأثیر سناریوهای پیش فرض در عدم قطعیت پارامترهای مدل، هیستوگرام‌های یک نمونه از پارامترها (K_{SN}) در شکل ۶ ارائه شده و بقیه هیستوگرام‌ها در صفحه (<https://github.com/mnasserimn/>) (Water-Balance-Method-baed-on-Wang-et-al.-2014-.git) به منظور بررسی بیشتر بارگذاری شده است. در این خصوص، الگوی رفتاری پارامترهای مربوطه در مدل S3(MODIS) نسبت به مدل پایه و سایر رفتارهای بدست آمده متفاوت بوده که خود نشان از اثرگذاری پایه‌ای در رفتار این مدل در صورت استفاده از نتایج مدل بزرگ مقیاس MODIS در مدل بیلان مزبور است. هیستوگرام پارامترهای مدل مرجع و دو سناریو مدل‌سازی دیگر بصورت زنگوله‌ای نامتقارن است، اما هیستوگرام این متغیر در سناریو مزبور، رفتاری شبه متقارن ایجاد نموده است. نکته با اهمیت، رخ دادن مد هیستوگرام‌های مربوطه در دامنه ۰/۴ الی ۰/۶ در حالات مختلف این سناریو و مدل مرجع است.

محصولات GLEAM اعداد قابل قبولی هستند. به طوری که شاخص KGE در هر دو محصول تقریباً بزرگتر از ۰/۵، عدد ۰/۵۹ در دوره واسنجی و ۰/۶۱ در دوره اعتبارسنجی بوده و مقادیر NSE آنان نیز مقادیر مثبتی هستند (مقبول بر اساس سطح مقبولیت دیدگاه دوم و غیر مقبول بر اساس دیدگاه اول). در این سناریو نیز مانند سناریوی قبل محصول MODIS در این منطقه مطالعاتی و این مدل بیلان آب مناسب نبوده و مقادیر شاخص‌های ارزیابی KGE و NSE را کاهش داده است. با توجه به نتایج ارائه شده این سه محصول در مقایسه با یکدیگر به ترتیب GLEAM، SSEbop و MODIS در دوره واسنجی و اعتبارسنجی با در نظر گرفتن شاخص KGE و NSE در شبیه‌سازی تبخیر- تعرق عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. مقادیر شاخص RMSE در دوره واسنجی به ترتیب در محصولات GLEAM، ۲۱/۶۰، ۲۷/۰۷ و ۳۱/۶۶ خطای کمتری را ارائه کرده است. این مقادیر در دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۱۹/۲۵، ۲۵/۹۹ و ۲۸/۵۵ برای محصولات GLEAM، MODIS و SSEbop است.

علیرغم تحقیق (Herman et al. (2018) در خصوص اینکه بهینه‌ساز مورد استفاده (الگوریتم ژنتیک) در واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تعرق، تنها بر بهبود تخمین تبخیر- تعرق واقعی تمرکز می‌کند و توجهی به واسنجی جریان رودخانه ندارد، در تحقیق حاضر واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تعرق به کمک الگوریتم ژنتیک شبیه‌سازی رواناب را جز در هنگام استفاده از محصول تبخیر- تعرق MODIS دچار افت نکرده است. حتی به نظر می‌رسد تمرکز اصلی مدل بر بهبود شبیه‌سازی جریان رودخانه بوده و سپس در پرتو این هدف اصلی به واسنجی تبخیر- تعرق توجه شده است. در نتایج ارائه شده در جدول ۶، کاملاً وضوح دارد که اگرچه معیار ارزیابی KGE برای جریان رودخانه رضایت‌بخش است ولی این معیار برای تبخیر- تعرق کمتر از جریان رودخانه است. ارتباط بین تبخیر- تعرق محاسباتی در سناریوی مرجع و تبخیر- تعرق کالیبره شده با اطلاعات بزرگ مقیاس دورسنجی شده در سناریوی چهارم در شکل ۵ نمایش داده شده است. این شکل نیز مؤید این مطلب است که تبخیر- تعرق کالیبره

Table 6- Statistical metrics of the simulated evapotranspiration for the fourth scenario

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی تبخیر- تعرق ET سناریوی چهارم

| Models | Statistical metrics | | | | | |
|---------|---------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | KGE | | RMSE | | NSE | |
| | Calibration | Validation | Calibration | Validation | Calibration | Validation |
| S4(GLM) | 0.59 | 0.61 | 21.60 | 19.25 | 0.36 | 0.29 |
| S4(SSE) | 0.39 | 0.27 | 27.07 | 28.55 | -0.42 | -1.28 |
| S4(MOS) | 0.14 | 0.15 | 31.66 | 25.99 | -5.67 | -4.33 |

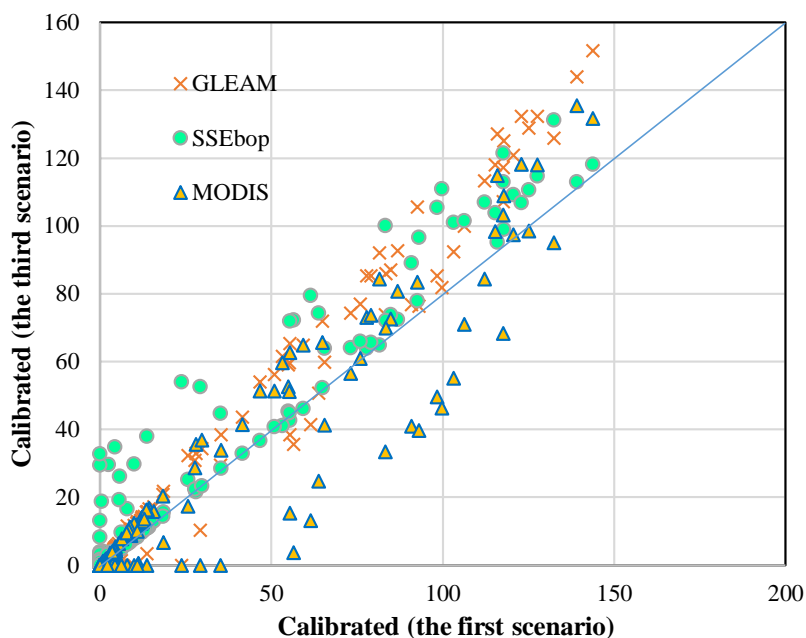


Fig. 5- Scatter plot of simulated evapotranspiration (mm) of the first scenario versus the fourth scenario
 شکل ۵- نمودار پراکنش تبخیر- تعرق محاسباتی در سناریو اول و چهارم (میلیمتر)

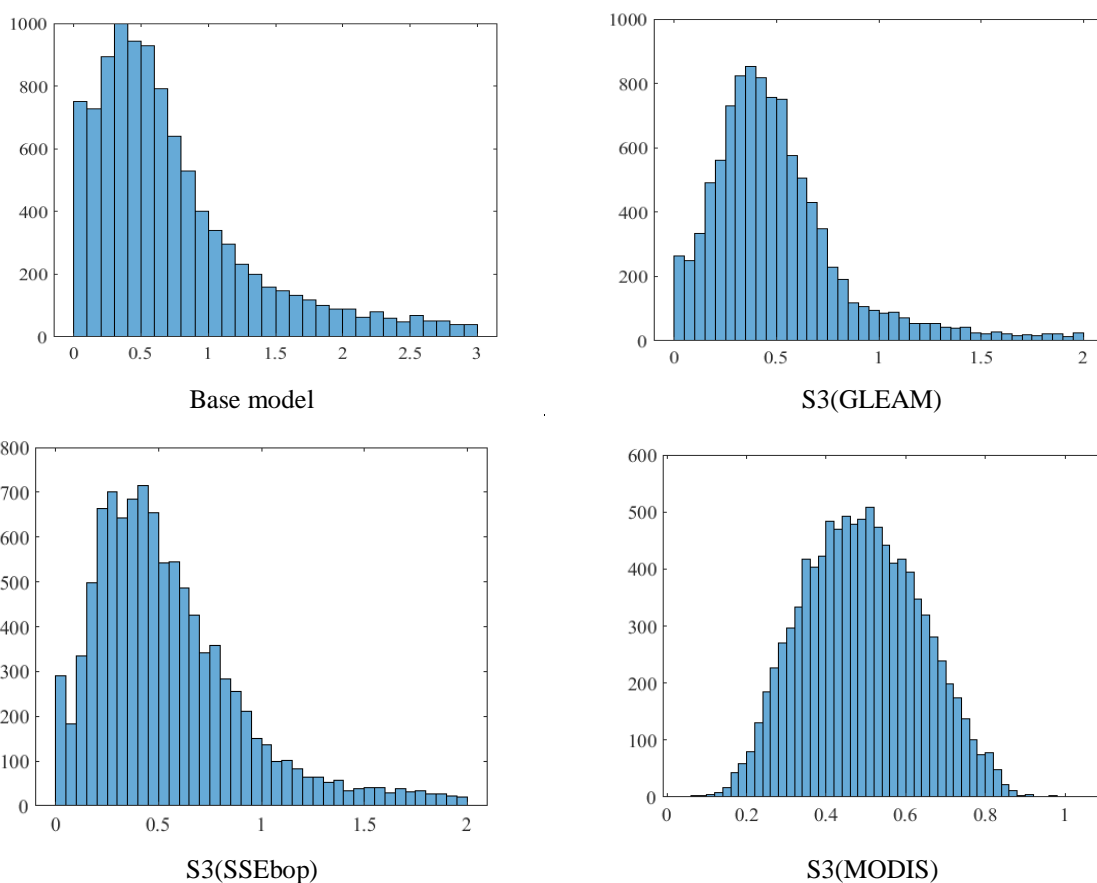


Fig. 6- Histograms of the third and first scenarios for the K_{SN} parameter
 شکل ۶- هیستوگرام مقادیر پذیرفته شده پارامتر K_{SN} در سناریو سوم و مدل مرجع

در عین حال مدل GLEAM در اکثر موارد در جایگاه دوم تشابه رفتاری بوده اما در عین حال، مدل MODIS رفتاری نامتجانس در ارزیابی عدم قطعیت از خود بروز داده است.

در ادامه ارزیابی منتهی از ارزیابی عدم قطعیت، مقادیر شاخص‌های ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های حاوی محصولات تبخیر- تعرق و مدل مرجع در جدول ۹ ارائه شده است. شاخص NUE هر چه بیشتر باشد، معرف کارایی بیشتر در مدل‌سازی عدم قطعیت است. بنابراین مطابق جدول ۹، عدم قطعیت در مدلی که محصول تبخیر- تعرق MODIS در آن به کار رفته از همه مدل‌ها کمتر است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع استفاده از محصولات تبخیر- تعرق عدم قطعیت مدل را کاهش داده‌اند. به نحوی که شاخص NUE در مدل مرجع (سناریو یک) 6.52 بوده که در مدل‌های شامل محصولات GLEAM، SSEbop و MODIS به ترتیب مقادیر ۸/۷۲، ۸/۴۲ و ۱۰/۹۷ گزارش شده و طبعاً از منظر ارزیابی رفتار غیر قطعی مدل‌ها، دو مدل اول به رفتار مدل مرجع نزدیک است.

به منظور ارزیابی دقیق‌تر این تشابه رفتار از شاخص آماری فاصله انرژی استفاده شده است (در پیوست این شاخص برای تمام پارامترهای مدل-سناریوها ارائه شده است). نتایج این شاخص برای پارامتر K_{SN} در جدول ۷ گزارش شده است. کمتر بودن این شاخص معرف نزدیکی توزیع‌های آماری به یکدیگر است. بر اساس نتایج، توزیع محصول ماهواره‌ای SSEbop به مدل مرجع نزدیکتر بوده و به همین نسبت رفتار پارامتر مربوطه در مدل-سناریو S3(MODIS) از مدل مرجع دورتر است.

در ادامه به منظور ارائه گزارشی از میزان تشابه آماری هیستوگرام‌های محاسبه شده در فرآیند ارزیابی عدم قطعیت، در جدول ۸ به ارائه اجمالی بیشترین تشابه هیستوگرام سناریو سوم با سناریو مرجع ارائه شده است (مقادیر و رفتار هیستوگرام‌ها در فایل پیوست ارائه شده است)، در این جدول رنگ تیره‌تر معرف تشابه بیشتر است. بر اساس خلاصه نتایج ارائه شده در این جدول، مدل بزرگ مقیاس SSEbop بیشترین تشابه رفتاری در پارامترهای بررسی شده با مقادیر متناظر در مدل پایه دارد.

Table 7- The third scenario's energy distance values for K_{SN} versus the first scenario

| K_{SN} | Base model | S3(GLM) | S3(SSE) | S3(MOS) |
|------------|------------|---------|---------|---------|
| Base model | 0 | 0.0401 | 0.0226 | 0.0872 |
| S3(GLM) | | 0 | 0.0033 | 0.0154 |
| S3(SSE) | | | 0 | 0.0255 |
| S3(MOS) | | | | 0 |

Table 8- The highest similarities of uncertainty results for the third scenario versus the first scenario
جدول ۸- بیشترین تشابه هیستوگرام‌های ارزیابی عدم قطعیت در سناریو سوم در قیاس با مدل مرجع (سناریو اول)

| Parameters | S3(GLM) | S3(SSE) | S3(MOS) |
|------------|---------|---------|---------|
| K_s | | | |
| K_g | | | |
| K_{sn} | | | |
| S_{max} | | | |
| T_1 | | | |
| T_h | | | |
| SN | | | |

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر سعی بر آن شده است که با استفاده از یک مدل ماهانه بیلان آب به بررسی امکان جایگزینی محصولات بزرگ مقیاس تبخیر- تعرق در مدل‌سازی هیدرولوژی بیلان، سنجش این جایگزینی در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه و همچنین بررسی رفتار پارامترهای مدل پرداخته شده است. در این هدف سعی در تناسب استفاده و عملکرد این دست از محصولات در فرآیند مدل‌سازی

Table 9- Metrics of uncertainty assessment using GLUE for the third and first scenarios

| Scenario identifier | ARIL | P_{level} | NUE |
|---------------------|---------|-------------|-------|
| S1 | 7.88 | 51.41 | 6.52 |
| S3 | S3(GLM) | 7.11 | 59.86 |
| | S3(SSE) | 5.90 | 51.41 |
| | S3(MOS) | 3.66 | 40.14 |

MODIS در شبیه‌سازی جریان رودخانه مدل بهتر شبیه‌سازی شده است. همچنین، از نتایج سناریوی آخر مشخص است که به‌جز ماهواره MODIS سایر محصولات در واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر- تعرق، نتایج آماری مناسبی از شبیه‌سازی رواناب را ارائه کرده‌اند. چنانکه مقادیر هر سه شاخص ارزیابی دو محصول SSEbop و GLEAM بسیار نزدیک به مقادیر شاخص‌های مدل مرجع در سناریوی اول است. بنابراین واسنجی همزمان جریان رودخانه و تبخیر توانسته شبیه‌سازی جریان رودخانه را در سطح مطلوب و در حدود مدل مرجع حفظ کند. در ارزیابی عدم قطعیت نتایج حاکی از آن است که در مجموع استفاده از محصولات تبخیر- تعرق عدم قطعیت مدل را کاهش داده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد محصولات تبخیر- تعرق بزرگ مقیاس هنگامی که به عنوان ورودی در مدل بیان آب مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی در مقایسه با مدل مرجع برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در محدوده مطالعاتی تولید کند. همچنین، در مجموع استفاده از محصولات تبخیر- تعرق مشخصات رفتاری مدل را از منظر ارزیابی عدم قطعیت بهبود داده است. این نتایج پتانسیل و امکان بالای استفاده از داده‌های بزرگ مقیاس تبخیر- تعرق در مطالعات هیدرولوژیکی را تقویت می‌کند. همچنین به منظور ادامه این تحقیق، امکان استفاده از سایر محصولات همچون بارش و رطوبت خاک در مدل‌سازی هیدرولوژی و بیان آبی می‌تواند راهگشای مطالعات بعدی باشد. توسعه این رویه مدل‌سازی در محدوده‌های مطالعاتی با خصوصیات هیدرولوژیک و اقلیمی دیگر به منظور ارزیابی بیشتر این فرض توصیه شده و همچنین استفاده از روش‌های سرشکنی خطا و داده‌گذاری به منظور اصلاح عملکردی این محصولات را می‌توان به عنوان گام بعدی تحقیق قلمداد نمود. ضمناً ارزیابی و ارائه راهکاری مناسب و کم خطا در استفاده از اطلاعات گرانی‌سنجی رطوبت (GRACE) در این دست از مدل‌سازی‌ها پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Moving Least Square
- 2- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- 3- Global Land Evaporation Amsterdam Model
- 4- Mean Squared Error
- 5- Improved Wang
- 6- Generalized Linear Uncertainty Estimation (GLUE)
- 7- Root Mean Squared Error
- 8- Kling-Gupta Efficiency
- 9- Average Relative Interval Length
- 10- Normalized Uncertainty Efficiency

هیدرولوژیک است و گرچه می‌توان آن را به عنوان شاهدی دال بر کیفیت اجمالی محصولات تبخیر و تعرق دانست، اما تناسب نهایی این اطلاعات و مقادیر واقعی تنها با ثبت و سنجش اطلاعات در محل امکان‌پذیر است.

با این هدف، مدل بیان مفهومی آب و یکپارچه Wang با اندکی اصلاحات در نحوه محاسبه بیان برف به کمک رابطه‌ی نمایشی ارائه شده توسط Guo et al. (2005)، به منظور شبیه‌سازی جریان در حوضه قشلاق واقع در حوضه آبریز رودخانه مرزی غرب ایران مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین پارامترهای مدل و بهبود عملکرد شبیه‌سازی جریان در حوضه، از محصولات بزرگ مقیاس تبخیر- تعرق به منظور واسنجی مدل استفاده شد. به همین منظور چهار سناریو واسنجی فقط به کمک جریان مشاهداتی رودخانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه، واسنجی مدل فقط به کمک جریان مشاهداتی رودخانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه و استفاده مستقیم از محصولات تبخیر- تعرق ماهواره‌ای به عنوان ورودی مدل، واسنجی مدل فقط به کمک جریان مشاهداتی رودخانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه و استفاده مستقیم از محصولات تبخیر- تعرق ماهواره‌ای اصلاح شده با لحاظ ضریب اصلاح مقیاس به عنوان ورودی مدل و در نهایت واسنجی همزمان جریان رودخانه محاسباتی با جریان مشاهداتی رودخانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه و تبخیر- تعرق محاسبه شده توسط مدل مفهومی (مبتنی بر روابط تجربی) به کمک محصولات تبخیر- تعرق بزرگ مقیاس، مطرح شد. در نهایت عدم قطعیت پارامتری به منظور ارزیابی رفتار پارامتری مدل در سناریو منتخب در قیاس با مدل بیان مرجع که به کمک روش GLUE مورد بررسی قرار گرفت، ارزیابی شده است.

نتایج نشان می‌دهد که در میان سناریوهای مورد بررسی، سناریوی سوم نسبت به سناریوی دوم عملکرد بهتری دارد. این به این معنی است که استفاده مستقیم از داده‌های تبخیر- تعرق ماهواره به عنوان ورودی مدل بیان آب بجای رابطه تبخیر- تعرق مدل با یک ضریب اصلاحی در این محدوده، قابل استفاده است. طبق نتایج ارائه شده محصول GLEAM با کمترین ضریب اصلاح مقیاس توانسته تبخیر- تعرق واقعی حوضه را با دقت بیشتری برآورد کند. همچنین نتایج بیانگر آنست که در مقایسه سناریوی سوم و اول، استفاده از محصولات GLEAM توانسته است مدل‌سازی جریان رودخانه را در دوره واسنجی بهبود بخشد. با مقایسه مقادیر شاخص‌های ارزیابی در سناریوی سوم در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب با استفاده از محصولات تبخیر- تعرق GLEAM، SSEbop و در نهایت

- observations to estimate precipitation fluxes: A synthetic experiment. *Remote Sensing* 13(6):1223
- Guo S, Chen H, Zhang H, Xiong L, Liu P, Pang B, Wang G, and Wang Y (2005) A semi-distributed monthly water balance model and its application in a climate change impact study in the middle and lower Yellow River basin. *Water International* 30(2):250-260
- Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K, and Martinez G F (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2): 80-91
- Ha L T, Bastiaanssen W G, Van Griensven A, Van Dijk A I, and Senay G B (2018) Calibration of spatially distributed hydrological processes and model parameters in SWAT using remote sensing data and an auto-calibration procedure: A case study in a Vietnamese river basin. *Water* 10(2):212
- Herman M R, Nejadhashemi A P, Abouali M, Hernandez-Suarez J S, Daneshvar F, Zhang Z, Anderson M C, Sadeghi A M, Hain C R, and Sharifi A.(2018) Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability. *Journal of Hydrology* 556:39-49
- Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, Wolff D B, Adler R F, Gu G, Hong Y, Bowman K P, and Stocker E F (2007) The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology* 8(1):38-55
- Immerzeel W and Droogers P (2008) Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 349(3-4):411-424
- Jazim A A (2006) A monthly six-parameter water balance model and its application at arid and semiarid low yielding catchments. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 19(1):65-81
- Jiang L and Islam S (2001) Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research* 37(2):329-340
- Jiang L, Wu H, Tao J, Kimball J S, Alfieri L, and Chen X (2020) Satellite-Based Evapotranspiration in Hydrological Model Calibration. *Remote Sensing* 12(3):428
- Jin X, Xu C Y, Zhang Q, and Singh V (2010) Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology* 383(3-4):147-155
- ۵- مراجع
- Ahmadi A and Nasser M (2020) Do direct and inverse uncertainty assessment methods present the same results?. *Journal of Hydroinformatics* 22(4):842-855
- Ahmadi A, Nasser M, and Solomatine D P (2019) Parametric uncertainty assessment of hydrological models: Coupling UNEEC-P and a fuzzy general regression neural network. *Hydrological Sciences Journal* 64(9):1080-1094
- Allen R G, Tasumi M, Morse A, Trezza R, Wright J L, Bastiaanssen W, Kramber W, Lorite I, and Robison C W (2007) Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133(4):395-406
- Amini Y and Nasser M (2021) Improving spatial estimation of hydrologic attributes via optimized moving search strategies. *Arabian Journal of Geosciences* 14(8):1-17
- Bastiaanssen W G, Menenti M, Feddes R, and Holtslag A (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212:198-212
- Becker R, Koppa A, Schulz S, Usman M, aus der Beek T and Schüth C (2019) Spatially distributed model calibration of a highly managed hydrological system using remote sensing-derived ET data. *Journal of Hydrology* 577:123944
- Beven K and Binley A (1992) The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological processes* 6(3): 279-298
- Che T, LI X, and GAO F (2004) Estimation of snow water equivalent in the Tibetan Plateau using passive microwave remote sensing data (SSM/I). *Journal of Glaciology and Geocryology* 3(3):19-368
- Chen M, Senay G B, Singh R K, and Verdin J P (2016) Uncertainty analysis of the Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model at multiple flux tower sites. *Journal of Hydrology* 536:384-399
- De Vos N, Rientjes T, and Gupta H (2010) Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. *Hydrological Processes* 24(20):2840-2850
- Dorigo W, Gruber A, De Jeu R, Wagner W, Stacke T, Loew A, Albergel C, Brocca L, Chung D, and Parinussa R (2015) Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment* 162:380-395
- Giroto M, Reichle R, Rodell M, and Maggioni V (2021) Data assimilation of terrestrial water storage

- Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, and Veith T L (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900
- Moriasi D N, Gitau M W, Pai N, and Daggupati P (2015) Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6):1763-1785
- Muthuwatta L P, Booij M J, Rientjes T H, Bos M, Gieske A, and Ahmad M u D (2009) Calibration of a semi-distributed hydrological model using discharge and remote sensing data. *IAHS Publication* 333:52
- Nash J E and Sutcliffe J V (1970) River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3):282-290
- Nasseri M, Ansari A, and Zahraie B (2014) Uncertainty assessment of hydrological models with fuzzy extension principle: Evaluation of a new arithmetic operator. *Water Resources Research* 50(2):1095-1111
- Odusanya A E, Mehdi B, Schürz C, Oke A O, Awokola O S, Awomeso J A, Adejuwon J O, and Schulz K (2019) Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria. *Hydrology & Earth System Sciences* 23(2):1113-1144
- Pan S, Liu L, Bai Z and Xu Y P (2018) Integration of remote sensing evapotranspiration into multi-objective calibration of Distributed Hydrology–Soil–Vegetation Model (DHSVM) in a humid region of China. *Water* 10(12):1841
- Parajka J and Blöschl G (2008) The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology* 358(3-4):240-258
- Poméon T, Diekkrüger B, Springer A, Kusche J, and Eicker A (2018) Multi-objective validation of SWAT for sparsely-gauged west African River Basins-A remote sensing approach. *Water* 10(4):451
- Qin C, Jia Y, Su Z, Zhou Z, Qiu Y, and Suhui S (2008) Integrating remote sensing information into a distributed hydrological model for improving water budget predictions in large-scale basins through data assimilation. *Sensors* 8(7):4441-4465
- Rabuffetti D, Ravazzani G, Corbari C, and Mancini M (2008) Verification of operational Quantitative Discharge Forecast (QDF) for a regional warning system? The AMPHORE case studies in the upper Po River. *Natural Hazards and Earth System*
- Karpouzou D, Baltas E, Kavalieratou S, and Babajimopoulos C (2011) A hydrological investigation using a lumped water balance model: The Aison River Basin case (Greece). *Water and Environment Journal* 25(3):297-307
- Khan M S, Liaqat U W, Baik J, and Choi M (2018) Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 252:256-268
- Knoben W J, Freer J E, and Woods R A (2019) Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(10):4323-4331
- Kunnath-Poovakka A, Ryu D, Renzullo L, and George B (2016) The efficacy of calibrating hydrologic model using remotely sensed evapotranspiration and soil moisture for streamflow prediction. *Journal of Hydrology* 535:509-524
- Lancaster P and Salkauskas K (1981) Surfaces generated by moving least squares methods. *Mathematics of Computation* 37(155):141-158
- Li L, Xia J, Xu C Y, and Singh V (2010) Evaluation of the subjective factors of the GLUE method and comparison with the formal Bayesian method in uncertainty assessment of hydrological models. *Journal of Hydrology* 390(3-4):210-221
- Liu W, Wang L, Zhou J, Li Y, Sun F, Fu G, Li X, and Sang Y F (2016) A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. *Journal of Hydrology* 538:82-95
- Long D, Longuevergne L, and Scanlon B R (2014) Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research* 50(2):1131-1151
- Lopez P L, Sutanudjaja E H, Schellekens J, Sterk G, and Bierkens M F (2017) Calibration of a large-scale hydrological model using satellite-based soil moisture and evapotranspiration products. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6):3125-3144
- McCabe G J and Markstrom S L (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface, US Geological Survey Reston, VA, Open-File Report 2007–1088
- Moreira A A, Ruhoff A L, Roberti D R, de Arruda Souza V, da Rocha H R, and de Paiva R C D (2019) Assessment of terrestrial water balance using remote sensing data in South America. *Journal of Hydrology* 575:131-147

- Velpuri N, Senay G, and Asante K (2012) A multi-source satellite data approach for modelling Lake Turkana water level: Calibration and validation using satellite altimetry data. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(1):1-18
- Vervoort R W, Miechels S F, van Ogtrop F F, and Guillaume J H (2014) Remotely sensed evapotranspiration to calibrate a lumped conceptual model: Pitfalls and opportunities. *Journal of hydrology* 519:3223-3236
- Vogel R M and Sankarasubramanian A (2003) Validation of a watershed model without calibration. *Water Resources Research* 39(10)
- Wang G, Zhang J, Jin J, Liu Y, He R, Bao Z, Liu C, and Li Y (2014) Regional calibration of a water balance model for estimating stream flow in ungauged areas of the Yellow River Basin. *Quaternary International* 336:65-72
- Wang G, Zhang J, Xuan Y, Liu J, Jin J, Bao Z, He R, Liu C, Liu Y, and Yan X (2013) Simulating the impact of climate change on runoff in a typical river catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrometeorology* 14(5):1553-1561
- Wang Q, Pagano T, Zhou S, Hapuarachchi H, Zhang L, and Robertson D (2011) Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of Hydrology* 404(3-4):166-175
- Widén-Nilsson E, Halldin S, and Xu C y (2007) Global water-balance modelling with WASMOD-M: Parameter estimation and regionalisation. *Journal of Hydrology* 340(1-2):105-118
- Winsemius H, Savenije H, and Bastiaanssen W (2008) Constraining model parameters on remotely sensed evaporation: justification for distribution in ungauged basins? *Hydrology & Earth System Sciences* 12(6):1403-1413
- Zhang Y, Chiew F H, Zhang L, and Li H (2009) Use of remotely sensed actual evapotranspiration to improve rainfall-runoff modeling in Southeast Australia. *Journal of Hydrometeorology* 10(4):969-980
- Sciences, Copernicus Publ., European Geosciences Union 8(1):161-173
- Ragab R, Kaelin A, Afzal M, and Panagea I (2020) Application of Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) at different temporal scales to reduce the uncertainty level in modelled river flows. *Hydrological Sciences Journal* 65(11):1856-1871
- Rajib A, Evenson G R, Golden H E, and Lane C R (2018) Hydrologic model predictability improves with spatially explicit calibration using remotely sensed evapotranspiration and biophysical parameters. *Journal of Hydrology* 567:668-683
- Rao A R and Al-Wagdany A (1995) Effects of climatic change in Wabash river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 121(2):207-215
- Rientjes T, Muthuwatta L P, Bos M, Booij M J, and Bhatti H (2013) Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 505:276-290
- Rizzo M L and Székely G J (2016) Energy distance. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 8(1):27-38
- Roy T, Gupta H V, Serrat-Capdevila A, and J B Valdes (2017) Using satellite-based evapotranspiration estimates to improve the structure of a simple conceptual rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Science* 21(2):879-896
- Schoups G and Nasser M (2020) GRACEfully closing the water balance: A data-driven probabilistic approach applied to river basins in Iran. *Water Resources Research* 57(6):e2020WR029071
- Shahrban M (2017) On the importance of soil moisture for streamflow forecasting. Ph.D. Thesis, Monash University
- Tobin K J and Bennett M E (2017) Constraining SWAT calibration with remotely sensed evapotranspiration data. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 53(3):593-604
- Troy T J, Wood E F, and Sheffield J (2008) An efficient calibration method for continental-scale land surface modeling. *Water Resources Research* 44(9)