

## Research Paper

# Quality Assessment of Satellite Data for Rainfall Estimation using Streamflow Simulation in Hydrological Modeling (Case Study: the Tighsiah Catchment)

Pedram Sodagar 

M.Sc in Civil Engineering, Faculty Member of Department of Civil Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

Received: 12 March, 2024

Accepted: 15 June, 2024

### Extended Abstract

**Background:** Precipitation is one of the most critical inputs in hydrological models. Due to its significant spatiotemporal variability, high-resolution temporal and spatial data are required for accurate hydrological modeling. Precise precipitation measurements are generally obtained from conventional meteorological stations. However, sparse rain gauge stations can lead to poor spatial representation of precipitation. This spatial inaccuracy can have a significant impact on modeling results, especially in areas with significant geographic variations, such as mountainous regions. The lack of high-resolution precipitation data can result in low-quality hydrological simulations and inadequate solutions for water resource problems. In developing countries such as Iran, financial and technical limitations result in sparsely and unevenly distributed rain gauge networks, creating major challenges in water resource prediction and management. To address this gap, precipitation, temperature, and evapotranspiration data required for hydrological modeling are provided by various organizations using satellite-based remote sensing products. Gridded precipitation products on a global or quasi-global scale with various temporal and spatial resolutions have been produced in recent decades. These products are compiled from various sources and processed using complex models to generate high-accuracy precipitation maps. Therefore, evaluating the quality, suitability, and accuracy of these products in different regions is necessary before their use in hydrological modeling and water resource decision-making.

**Methods:** This study evaluates the quality of four widely used high-resolution satellite-based precipitation estimation products: CMORPH, 3B42RT, 3B42, and PERSIANN, for simulating water flow using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model in the 312 km<sup>2</sup> mountainous Tigh Siah catchment in southeastern Iran. The unique geographic and climatic features of the Tigh Siah watershed provide an appropriate environment for assessing the accuracy and efficiency of satellite data in hydrological simulations. Two different calibration approaches for the SWAT model were examined to assess the quality of satellite-based precipitation estimates. The first approach involved calibration using measured precipitation data from rain gauge stations as model inputs. These measured data served as a reference for evaluating the accuracy and precision of the satellite data. The second approach involved calibration using each of the satellite precipitation products as model inputs. In this method, satellite data were directly input into the SWAT model, and the simulated water flow results were compared with those obtained using measured data. This comparison aimed to determine the accuracy and efficiency of each satellite product in simulating water flow in the Tigh Siah watershed. The results of this study can help identify the strengths and weaknesses of each satellite-based precipitation product and provide strategies for improving the accuracy of hydrological simulations.

**Results:** The results indicate significant errors in the estimates from satellite-based precipitation data, despite variation in the performance of each satellite product. Specifically, 3B42RT and CMORPH demonstrated better quality in precipitation estimation than 3B42 and PERSIANN. These differences in the accuracy of satellite data can significantly affect hydrological simulation outcomes. The model calibrated with satellite-based precipitation estimates performed better in simulating flow than that calibrated with rain gauge station data. However, the model calibrated with satellite data led to the overestimation of the Curve Number (CN), suggesting caution when using parameter values calibrated with satellite-based inputs. To improve simulation accuracy, the error correction of satellite precipitation estimates was conducted in two stages. First, the error in each satellite data group was estimated in each pixel by dividing the monthly precipitation estimate by the corresponding rain gauge precipitation. Then, the monthly precipitation of each satellite data was multiplied by the estimated monthly error to eliminate errors in all satellite

precipitation estimates. The results showed that error correction significantly improved flow simulation using the SWAT model, indicating that satellite data with appropriate corrections can be a valuable tool for hydrological simulations, especially in areas with limited or scattered ground data. This study also emphasizes that using corrected data can enhance the accuracy and reliability of modeling results, aiding better decision-making in water resource management.

**Conclusion:** This study demonstrates that precipitation estimates from satellites, when directly converted to simulated flow by the hydrological model, result in substantial errors, which may be attributed to the small and mountainous nature of the Tigh Siah watershed. In this case, correcting the errors in satellite-based precipitation estimates significantly improved the model simulation. The findings suggest that the best model simulations are obtained using satellite precipitation inputs after error correction and recalibrating the model with corrected satellite data. These results highlight the importance of correcting satellite data before using them in hydrological models. They show that higher accuracy in predictions and water resource management decisions can be achieved with appropriate corrections.

**Keywords:** Bias correction, Calibration Approach, Satellite Rainfall Estimation Data, Streamflow Simulation

**How to Cite This Article:** Sodagar, P. (2024). Quality Assessment of Satellite Data for Rainfall Estimation using Streamflow Simulation in Hydrological Modeling (Case Study: the Tighsiah Catchment). *J Watershed Manage Res*, 15(2), 17-31. DOI: [10.61186/jwmr.15.2.17](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.17)



## مقاله پژوهشی

## ارزیابی کیفیت داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش با استفاده از شبیه‌سازی جریان در مدل‌سازی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تیغ‌سیاه)

پدرام سوداگر

کارشناسی ارشد عمران، عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، (نویسنده مسوول: pedramsodagar@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲ صفحه: ۱۷ تا ۳۱  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۲۶

## چکیده مبسوط

**مقدمه:** بارش یکی از مهم‌ترین ورودی‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی است. از آنجا که بارش از نظر مکانی و زمانی بسیار متغیر است، داده‌های با تفکیک زمانی و مکانی بالا برای مدل‌سازی دقیق هیدرولوژیکی مورد نیاز است. اندازه‌گیری دقیق بارش را می‌توان به‌طور کلی از ایستگاه‌های هواشناسی معمولی به‌دست آورد. با این حال، ایستگاه‌های باران‌سنجی پراکنده می‌توانند منجر به نمایش ضعیف بارش از نظر مکانی شوند. این کمبود در دقت مکانی می‌تواند به‌خصوص در مناطق با تغییرات جغرافیایی شدید، مانند نواحی کوهستانی، تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج مدل‌سازی داشته باشد. فقدان داده‌های بارش با وضوح بالا می‌تواند به شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی با کیفیت پایین و راه‌حل‌های نامناسب برای مشکلات منابع آب منجر شود. در کشورهای در حال توسعه، مانند ایران، کمبود منابع مالی و فنی منجر به شبکه‌های باران‌سنجی با توزیع پراکنده و غیریکنواخت می‌شود. این توزیع نابرابر می‌تواند مشکلات عمده‌ای در زمینه پیش‌بینی و مدیریت منابع آب ایجاد کند. به‌منظور پر کردن این شکاف، داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی توسط سازمان‌های مختلف با استفاده از محصولات سنجنده از راه دور مبتنی بر ماهواره ارائه شده‌اند. محصولات بارش شبکه‌ای در مقیاس جهانی یا شبه جهانی با وضوح‌های زمانی و مکانی مختلف در چند دهه اخیر تولید شده‌اند. این محصولات شامل داده‌هایی هستند که از منابع مختلف جمع‌آوری و سپس با استفاده از مدل‌های پیچیده پردازش می‌شوند تا نقشه‌های بارش با دقت بالا تولید شود. بنابراین، نیاز به ارزیابی کیفیت، تناسب و صحت این محصولات در مناطق مختلف قبل از استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری در زمینه منابع آب وجود دارد.

**مواد و روش:** این مطالعه کیفیت داده‌های چهار محصول پرکاربرد برآورد بارش ماهواره‌ای با وضوح بالا شامل: 3B42, 3B42RT, CMORPH را برای شبیه‌سازی جریان آب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) در حوضه آبخیز کوهستانی ۳۱۲ کیلومتر مربعی تیغ سیاه در جنوب شرقی ایران ارزیابی می‌کند. حوضه آبخیز تیغ سیاه به‌دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، محیط مناسبی برای بررسی دقت و کارایی داده‌های ماهواره‌ای در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی فراهم می‌آورد. در این مطالعه، دو رویکرد مختلف واسنجی مدل SWAT به‌منظور ارزیابی کیفیت داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش مورد بررسی قرار گرفت. اولین رویکرد واسنجی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌عنوان ورودی مدل انجام شد. در این رویکرد، داده‌های اندازه‌گیری شده به‌عنوان مرجع و پایه‌ای برای ارزیابی دقت و صحت داده‌های ماهواره‌ای استفاده شدند. دومین رویکرد واسنجی با هریک از محصولات بارش ماهواره‌ای به‌عنوان ورودی مدل صورت گرفت. در این روش، داده‌های ماهواره‌ای به‌طور مستقیم به مدل SWAT وارد شده و نتایج شبیه‌سازی جریان آب با استفاده از این داده‌ها با نتایج حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. این مقایسه‌ها به‌منظور تعیین دقت و کارایی هریک از محصولات ماهواره‌ای در شبیه‌سازی جریان آب در حوضه آبخیز تیغ سیاه انجام گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به شناسایی نقاط قوت و ضعف هر یک از محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش کمک کرده و راهکارهایی برای بهبود دقت شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی ارائه دهد.

**یافته‌ها:** نتایج این مطالعه نشان‌دهنده خطای قابل‌توجهی در تخمین‌های مربوط به داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش است. با این حال، عملکرد هر محصول ماهواره‌ای برآورد بارش متفاوت می‌باشد. به‌طور خاص، محصولات 3B42RT و CMORPH کیفیت بهتری در برآورد بارش نسبت به 3B42 و PERSIANN نشان دادند. این تفاوت‌ها در دقت داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی داشته باشد. مدل واسنجی شده با داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش در مقایسه با مدل واسنجی شده با داده‌های ایستگاه باران‌سنجی، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی جریان نشان داد. از طرفی، مدل واسنجی شده با داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش منجر به بیش‌برآورد شماره منحنی (CN) شد. بنابراین، هنگام استفاده از مقادیر پارامترهای واسنجی شده با ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش باید احتیاط کرد. برای بهبود دقت شبیه‌سازی‌ها، تصحیح خطای داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، در هر پیکسل تخمین، خطا در هر گروه داده ماهواره‌ای با تقسیم تخمین بارش ماهانه بر مقدار بارش باران‌سنجی مربوطه برآورد شد. سپس، مقدار بارش ماهانه هر داده ماهواره‌ای در مقدار خطای به‌دست آمده ماهانه ضرب شد تا خطا در تمامی داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش از بین برود. نتایج نشان داد که تصحیح خطای تخمین‌های حاصل از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش به‌طور قابل‌توجهی شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل SWAT را بهبود می‌بخشد. این بهبود نشان می‌دهد که با انجام تصحیحات مناسب، داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی باشند، به‌ویژه در مناطقی که داده‌های زمینی محدود یا پراکنده هستند. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که استفاده از داده‌های تصحیح شده می‌تواند دقت و قابلیت اعتماد نتایج مدل‌سازی را افزایش دهد و به تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه مدیریت منابع آب کمک کند.

**نتیجه‌گیری:** این مطالعه نشان داد که تخمین‌های حاصل از ماهواره‌های برآورد بارش هنگامی که مستقیماً توسط مدل هیدرولوژیکی به جریان شبیه‌سازی شده تبدیل می‌شوند، منجر به خطاهای زیادی می‌شوند. این خطاها ممکن است به‌دلیل وسعت کوچک و کوهستانی بودن حوضه آبخیز تیغ سیاه باشد. در این مورد، تصحیح خطای داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش به‌طور قابل‌توجهی شبیه‌سازی مدل را بهبود می‌بخشد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که بهترین شبیه‌سازی مدل بر اساس ورودی‌های بارش ماهواره‌ای پس از تصحیح خطا و واسنجی مجدد مدل با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تصحیح شده به‌دست می‌آید. این یافته‌ها بر اهمیت اصلاح داده‌های ماهواره‌ای پیش از استفاده در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی تأکید دارد و نشان می‌دهد که با انجام تصحیحات مناسب، می‌توان به دقت بالاتری در پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب دست یافت.

**واژه‌های کلیدی:** تصحیح خطا، داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش، رویکرد واسنجی، شبیه‌سازی جریان

## مقدمه

آنجایی که بارش از نظر مکانی و زمانی بسیار متغیر است، داده‌های با تفکیک زمانی و مکانی بالا برای مدل‌سازی دقیق هیدرولوژیکی مورد نیاز است (Duan & Bastiaanssen, 2011).

بارش یکی از مهم‌ترین ورودی‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی مانند SWAT است (Sorooshian et al., 2011). از

نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیکی رضایت‌بخشی را هم در مقیاس ماهانه و هم در مقیاس روزانه با استفاده از مدل SWAT تولید کردند، در حالی که داده‌های TRMM-3B42 تناسب خوبی در مقیاس ماهانه ایجاد کردند. در مطالعه‌ای وانگ و همکاران چهار محصول ماهواره‌ای برآورد بارش CMORPH، CHIRPS، TMPA و PERSIANN را در شناسایی رویدادهای حدی بارش<sup>۳</sup> شبیه‌سازی جریان با استفاده از دو مدل SWAT و VIC در یک حوضه مرطوب در چین ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که CMORPH و TMPA عملکرد بهتری در شناسایی کلاس‌های مختلف بارش‌های حدی نشان دادند. این دو محصول همچنین عملکرد بهتری در شبیه‌سازی جریان با مدل VIC نسبت به SWAT نشان دادند (Wang et al., 2021). وانگ و همکاران مقایسه جامعی از شش محصول ماهواره‌ای برآورد بارش (TMPA 3B42RT، CMORPH-RT، CMORPH CRT، TMPA 3B42V7، PERSIANN-RT و PERSIANN-CDR با مدل خینانژیانگ<sup>۴</sup> انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها عملکرد خوب TMPA 3B42V7 و CMORPH CRT در شبیه‌سازی جریان را نشان داد (Jiang et al., 2017). در ایران تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی عملکرد محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش انجام نشده است. قربانیان و همکاران توانایی شش محصول ماهواره‌ای برآورد بارش شامل ERA5، CHIRPS، PERSIANN، TMPA، GSMaP و IMERG را با داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنج در سراسر ایران در طی دو دهه گذشته، از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، مقایسه کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که GSMaP بهتر از سایر محصولات در تخمین بارش روزانه عمل می‌کند (Ghorbanian et al., 2022). در مطالعه کنترایی بروجرودی و همکاران، عملکرد چهار محصول ماهواره‌ای برآورد بارش شامل PERSIANN، PERSIANN تصحیح شده، TRMM-3B42 V6 و CMORPH با استفاده از یک شبکه باران‌سنج نسبتاً متراکم به‌عنوان مرجع ارزیابی گردیدند. مقایسه محصولات مختلف ماهواره‌ای برآورد بارش نشان داد که PERSIANN تنظیم شده و TRMM-3B42 V6 عملکرد بهتری دارند، اما CMORPH عملکرد ضعیفی در تمامی منطقه مورد بررسی و به‌ویژه در سراسر رشته کوه‌های زاگرس نشان داد (Katiraie-Boroujerdy et al., 2013). تاکنون مطالعات اندکی در ایران در زمینه شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش به‌عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی انجام شده است که صحت این داده‌ها نیاز به بررسی بیشتر در اقلیم‌های مختلف کشور دارند. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به این نتیجه‌گیری رسید که: (۱) محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش دارای کاربرد بالقوه برای کاربردهای هیدرولوژیکی هستند، (۲) عملکرد مدل بستگی به نوع محصول ماهواره، اندازه حوضه آبخیز و منطقه هیدرواقلمی دارد، و (۳) عملکرد مدل واسنجی شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش در مقایسه با واسنجی بر اساس ایستگاه‌های باران‌سنج، افزایش می‌یابد. با این حال، این مطالعات از نظر تعداد اندک هستند و به اندازه

اندازه‌گیری مستقیم و دقیق بارش را می‌توان به‌طور کلی از ایستگاه‌های هواشناسی معمولی به‌دست آورد. با این حال، ایستگاه‌های باران‌سنجی پراکنده می‌توانند منجر به نمایش ضعیف بارش از نظر مکانی شوند (Javanmard et al., 2010). فقدان داده‌های بارش با وضوح بالا (از لحاظ مکانی و زمانی) می‌تواند به شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی با کیفیت پایین (Beven & Westerberg, 2011) و راه‌حل‌های نامناسب برای مشکلات منابع آب منجر شود. در کشورهای در حال توسعه مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، کمبود منابع مالی و فنی منجر به شبکه‌های باران‌سنجی با توزیع پراکنده و غیریکنواخت می‌شود. این امر منجر به عدم وجود داده‌های دقیق بارش برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و اهداف دیگر می‌شود (Hughes, 2006). داده‌های بارش، دما و تبخیر و تعرق مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی توسط سازمان‌های مختلف با استفاده از محصولات سنجش از راه دور مبتنی بر ماهواره ارائه شده‌اند (Wood et al., 2011). محصولات بارش شبکه‌ای در مقیاس جهانی یا شبه جهانی<sup>۱</sup> با وضوح‌های زمانی و مکانی مختلف در چند دهه اخیر تولید شده‌اند (Tapiador et al., 2012). با این حال، تغییرپذیری منطقه‌ای در عملکرد محصولات بارش شبکه‌ای به دلیل (الف) خطاهای ذاتی در مجموعه داده‌های مبتنی بر ماهواره<sup>۲</sup> (Villarini et al., 2009) و (ب) عدم قطعیت‌های ناشی از تکنیک‌های نمونه‌برداری مورد استفاده (Nijssen & Lettenmaier, 2004) بسیار زیاد است. بنابراین، نیاز به ارزیابی کیفیت، تناسب و صحت این محصولات در مناطق مختلف قبل از استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری در زمینه منابع آب وجود دارد. هیدرولوژیست‌ها در مورد عدم اطمینان در برآوردهای بارش ماهواره‌ای نگران هستند، زیرا محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش حاوی اطلاعاتی در مورد میزان و بزرگی خطاهای برآورد نیستند. برخی از سؤالات پیش روی هیدرولوژیست‌ها عبارتند از: "با توجه به اینکه در حال حاضر محصولات برآورد بارش ماهواره‌ای زیادی در دسترس می‌باشند، کدام یک برای یک برنامه خاص برای دریافت بهترین نتایج استفاده شود" و سطح خطای تخمین در هر محصول ماهواره‌ای برآورد بارش چقدر است و مفهوم یک پیش‌بینی هیدرولوژیکی مشخص چیست؟ پرداختن به این سؤالات پژوهشی نیازمند تلاش‌های هماهنگ جامعه علمی در مناطق مختلف اقلیمی جهان است (Alibakhshi et al., 2020: 2020). استفاده از محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش شبکه‌ای به‌عنوان ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی خصوصاً مدل SWAT اخیراً مورد مطالعه قرار گرفته است (Tan & Duan, 2017; Tuo et al., 2016; Yang et al., 2017). لی و همکاران (Li et al., 2018) صحت دو محصول ماهواره‌ای زمان واقعی TRMM-3B42RT و TRMM-3B42 برآورد بارش را در شناسایی بارش در حوضه Tiaoxi در چین ارزیابی کردند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که داده‌های TRMM-3B42 نسبت به داده‌های TRMM-3B42RT همبستگی بهتری با داده‌های باران‌سنج داشتند. علاوه بر این، داده‌های TRMM-3B42RT

اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده از ایستگاه باران‌سنجی در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه، (ب) واسنجی مدل SWAT با استفاده از داده‌های باران‌سنج و سپس شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های باران‌سنج و داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش به‌عنوان ورودی و مقایسه شبیه‌سازی‌ها با جریان مشاهده شده، (ج) واسنجی مجدد مدل SWAT با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش و سپس شبیه‌سازی جریان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش به‌عنوان ورودی و مقایسه شبیه‌سازی‌ها با جریان مشاهده شده و (د) مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌های جریان ماهواره‌ای به‌دست‌آمده از دو رویکرد مختلف واسنجی. مراحل ۲ تا ۴ برای دو نسخه از محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش انجام شد، نسخه اصلی (خام) و نسخه‌های تصحیح شده<sup>۲</sup>.

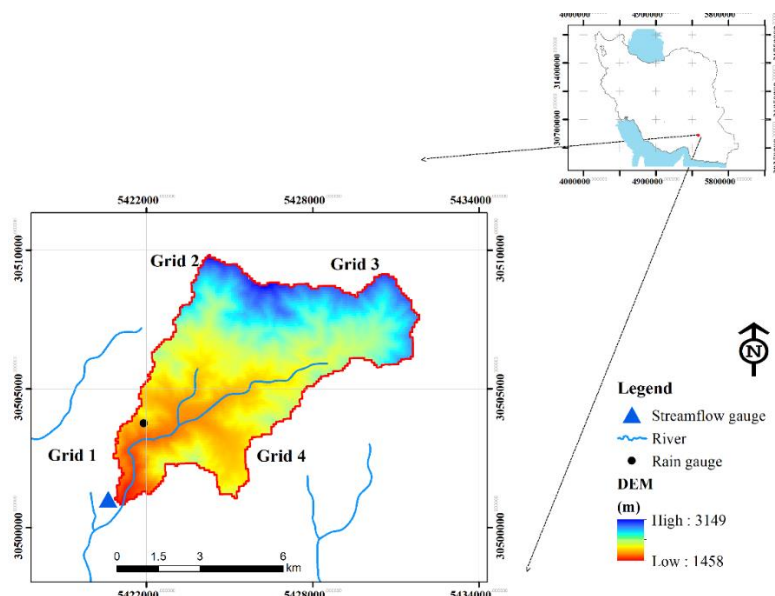
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه آبخیز تیغ‌سیاه، با مساحت ۳۱۲ کیلومتر مربع در ارتفاعات جنوب‌شرقی ایران قرار دارد (شکل ۱). این حوضه دارای توپوگرافی پیچیده با ارتفاعات از ۱۴۵۸ تا ۳۱۴۹ متر (میانگین ارتفاع برابر با ۲۲۱۴ متر) است. کاربری‌های مختلف در حوضه آبخیز عبارتند از: مرتع (۵۶٪)، زمین زراعی (۲۸٪) و جنگل و درختچه (۱۶٪) و خاک‌ها عمدتاً دارای بافت ریز تا متوسط هستند شامل: رس (۴۸٪)، لوم رسی (۳۲٪) و لوم شنی و سیلت (۲۰٪). آب و هوای نیمه‌مرطوب با میانگین بارش ۶۱۰ میلی‌متر در سال است که بیش از ۸۰ درصد آن در فصل زمستان است. این حوضه مجهز به یک باران‌سنج و یک ایستگاه آب‌سنجی (شکل ۱) می‌باشد که داده‌های آن‌ها در این مطالعه برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی از داده‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و به‌منظور اعتبارسنجی آن‌ها از داده‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۷ استفاده گردید.

کافی محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش، اندازه حوضه (به‌ویژه حوضه‌های کوچک) و مناطق هیدرواقلمی را پوشش نمی‌دهند. این مطالعه قابلیت شبیه‌سازی دبی جریان چهار محصول تخمین بارش ماهواره‌ای با وضوح مکانی مختلف در یک حوضه آبخیز کوهستانی نسبتاً کوچک (۳۱۲ کیلومتر مربع) واقع در جنوب شرق ایران را بررسی می‌کند. نتایج این مطالعه بینشی برای هیدرولوژیست‌ها در مناطق فاقد آمار ایران در مورد سطح خطای تخمین در هر محصول ماهواره‌ای برآورد بارش و پیامدهای پیش‌بینی جریان در این حوضه فراهم می‌کند. چهار محصول ماهواره‌ای برآورد بارش که در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفتند عبارتند از: الف) روش تحلیل بارش چند ماهواره (TMPA)، مأموریت اندازه‌گیری باران گرمسیری (TRMM)، محصول زمان نزدیک واقعی (3B42RT)، ب) محصول روش TMPA نسخه تحقیق پس‌زمان (3B42)، ج) محصول تکنیک شکل‌گیری مرکز پیش‌بینی آب و هوا (CMORPH)، و د) تخمین بارش از اطلاعات سنسجش از دور با استفاده از محصول شبکه‌های عصبی مصنوعی (PERSIANN). این محصولات دارای پوشش جهانی هستند و تصحیح محلی بر اساس داده‌های باران‌سنج ممکن است تخمین‌ها را بهبود بخشد (Harris et al., 2007; Immerzeel and Droogers 2008; Stisen and Sandholt 2010). همچنین اثرات تخمین‌های بارش حاصل از ماهواره‌ها در دو نسخه‌ی اصلاح خطا شده<sup>۱</sup> و نسخه خام یا اصلی<sup>۲</sup> (بدون تصحیح خطا) از طریق مقایسه در شبیه‌سازی جریان ارزیابی گردیدند. مدل هیدرولوژیکی ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) به‌دلیل قابلیت آن در شبیه‌سازی جریان و استفاده گسترده در سراسر جهان انتخاب گردید.

### مواد و روش‌ها

رویکرد مورد بررسی در این مطالعه دارای چهار مرحله اصلی می‌باشد: الف) مقایسه تخمین‌های ماهواره‌ای برآورد بارش و



شکل ۱- موقعیت قرارگیری حوضه تیغ‌سیاه، ایستگاه هیدرومتری و ایستگاه باران‌سنج در ایران  
Figure 1. Location of Tigh Siah watershed, hydrometric station and rain gauge station in Iran

### ماهواره‌ای برآورد بارش با وضوح بالا<sup>۱</sup>

الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای با وضوح بالا نقاط قوت اطلاعات مایکروویو (MW) با مادون قرمز (IR) پرتکرار را ترکیب می‌کنند. این ترکیب به روش‌های مختلفی انجام می‌گیرد که منجر به ایجاد چندین داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش می‌شود. در این مطالعه، چهار محصول ماهواره‌ای برآورد بارش با وضوح بالا (سه ساعته و با مقیاس مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه شامل TMPA 3B42, TMPA 3B42RT, CMORPH و PERSIANN) ارزیابی شدند.

TMPA (Huffman *et al.*, 2007) از ترکیب سنجنده‌های مایکروویو و مادون قرمز به‌دست آمده و با قدرت تفکیک مکانی  $0.25$  درجه و قدرت تفکیک زمانی سه ساعته و روزانه قابل دسترس می‌باشد. محصولات بارش TMPA در دو نسخه موجود می‌باشند: (۱) نسخه نزدیک زمان-واقعی<sup>۲</sup> (TMPA 3B42RT یا به اختصار 3B42RT) و (۲) نسخه تنظیم شده با ایستگاه باران‌سنج<sup>۳</sup> (TMPA 3B42) یا به اختصار 3B42. محصولات 3B42 ۱۰ تا ۱۵ روز پس از پایان هر ماه عرضه می‌شوند، در حالی که 3B42RT به‌صورت ۹ ساعته عرضه می‌شوند. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های دو نسخه، استفاده از داده‌های ماهانه باران‌سنج برای تنظیم خطا در نسخه 3B42 است. علاوه بر این، نسخه دوم از محصول ترکیبی TCI (TRMM Combined Instrument) از ماهواره‌های دیگر به‌عنوان واسنجی‌کننده تخمین‌های غیرفعال مایکروویو و مادون قرمز استفاده می‌کند، در حالی که نسخه نزدیک زمان واقعی از تخمین‌های مایکروویو غیرفعال TRMM برای واسنجی کردن سایر تخمین‌های ماهواره‌ای استفاده می‌کند. CMORPH (Joyce *et al.*, 2004) تخمین‌های بارش را از داده‌های مایکروویو به‌دست می‌آورد اما با استفاده از داده‌های مادون قرمز از یک رویکرد ردیابی برای استخراج یک میدان حرکت ابری استفاده می‌کند. PERSIANN (Sorooshian *et al.*, 2000) به‌منظور تخمین بارش با به‌کارگیری داده‌های مادون قرمز و مایکروویو، از یک رویکرد شبکه عصبی استفاده می‌کند. از دو مجموعه داده‌های ماهواره‌ای خام بارش «تصحیح نشده» و «تصحیح شده» استفاده شد. تصحیح خطا در دو مرحله انجام شد: تصحیح خطا در دو مرحله انجام شد: ابتدا در هر پیکسل تخمین، خطا در هر گروه داده ماهواره‌ای با تقسیم تخمین بارش ماهانه بر مقدار بارش باران‌سنج مربوطه برآورد شد. سپس، مقدار بارش ماهانه هر داده ماهواره‌ای در مقدار خطای به‌دست آمده ماهانه ضرب شد تا خطا در تمامی داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش از بین برود.

### مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT که توسط دپارتمان کشاورزی ایالات متحده<sup>۴</sup> توسعه یافته است (Arnold *et al.*, 1998)، یک مدل هیدرولوژیکی پیوسته و نیمه توزیعی است که در گام زمانی روزانه اجرا می‌شود. SWAT به داده‌های ورودی خاک، کاربری

زمین و ارتفاع برای استخراج جریان‌ها و روندیابی مستقیم زیرحوضه نیاز دارد. این داده‌ها به‌صورت مکانی در حوضه توزیع می‌شوند، اما مدل SWAT برای واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) پارامترها را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی با ترکیبی از پوشش زمین، خاک و شیب تعریف می‌شوند. در این مدل تمام اجزای بیلان آب را در هر HRU در مرحله زمانی روزانه بر اساس بارش روزانه، رواناب، تبخیر و تعرق، نفوذ و جریان برگشتی از جریان آب زیرسطحی و زیرزمینی محاسبه می‌کند. در این مطالعه حجم رواناب در هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی با استفاده از روش شماره منحنی حفاظت خاک (SCS) محاسبه گردید (Cronshey, 1986). این روش مقادیر عدد منحنی را به هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی بر اساس شرایط کاربری زمین، پوشش زمین، نوع خاک و شرایط رطوبت قبلی اختصاص می‌دهد و از این عدد در معادلات تجربی SCS برای محاسبه رواناب با توجه به بارش استفاده می‌کند. در این مطالعه داده‌های ارتفاعی از مجموعه داده‌های مدل رقومی ارتفاعی سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS)، بافت خاک از مجموعه داده‌های سازمان غذا و کشاورزی (FAO)، کاربری اراضی از داده‌های لندست ۸ و داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی مجاور (ایستگاه هواشناسی کهنک شیبانی) تهیه گردید. در اینجا از داده‌های بارش یک ایستگاه باران‌سنج و چهار محصول ماهواره‌ای برآورد بارش استفاده شد. ابزار استخراج خودکار حوضه در مدل SWAT برای پیش پردازش داده‌های ارتفاعی، تعیین محدوده آستانه برای زیرحوضه‌ها، و تعریف خروجی حوضه استفاده شد. ابزار توزیع ساخت واحد پاسخ هیدرولوژیکی برای تقسیم هر زیرحوضه به چندین واحد پاسخ هیدرولوژیکی بر اساس کاربری اراضی و کلاس‌های نوع خاک می‌باشد و در نهایت حوضه به ۲۵ زیرحوضه و ۱۰۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم شد که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

### مشخصات پارامترهای مدل

واسنجی خودکار تمام پارامترهای مدل SWAT می‌تواند زمان‌بر و کمتر عملی باشد (Eckhardt & Arnold, 2001). برای کاهش تعداد پارامترهای واسنجی، تجزیه و تحلیل حساسیت با استفاده از روش LH-OAT موجود در SWAT انجام گرفت.

روش LH-OAT روش نمونه‌گیری لاتین چند مکعب<sup>۵</sup> را با روش یک عامل در یک زمان<sup>۶</sup> ترکیب می‌کند (van Griensven *et al.*, 2006). بنابراین هشت پارامتر بسیار حساس مشخص شد که به‌ترتیب نزولی حساسیت آن‌ها، محدوده، نسبت حساسیت (نسبت تغییر تابع خروجی در قبال تغییر پارامترهای ورودی) و مقادیر بهینه واسنجی شده با داده‌های بارش مربوط به ایستگاه باران‌سنج، در جدول ۱ نشان داده شده است. این هشت پارامتر در مدل‌سازی SWAT در مرحله بعدی واسنجی شدند.

1- High-resolution

2- Near real time

3- Gauge-adjusted post-real-time

4- USDA

5- Latin hypercube sampling method

6- one-factor-at-a-time method

جدول ۱- آنالیز حساسیت پارامترهای مدل SWAT

Rank رتبه	نسبت حساسیت	Unit واحد	Variable متغیر	Model parameter پارامتر مدل	Parameter Type نوع پارامتر
1	۴/۲۱	mmh <sup>-1</sup>	CH_K2	Hydraulic conductivity of main channel alluvium هدایت هیدرولیکی آبرفت کانال اصلی	Routing روندبایی
2	۳/۱۲	Day <sup>-1</sup>	Alpha_BF	Base water alpha factor فاکتور آلفا آب پایه	Groundwater آب زیرزمینی
3	۲/۰۲	-	CN2	Curve Number شماره منحنی	HRU
4	۱/۱۶	-	SURLAG	Delay coefficient of surface runoff ضریب تاخیر رواناب سطحی	Watershed حوضه
5	۰/۴۱	-	CH_N2	Manning's roughness coefficient for the main channel ضریب زبری مانینگ برای کانال اصلی	Routing روندبایی
6	۰/۱۲	mm h <sup>-1</sup>	Sol_K	Soil hydraulic conductivity هدایت هیدرولیکی خاک	HRU
7	۰/۰۳	-	ESCO	Evaporation compression factor of soil فاکتور فشردگی تبخیر خاک	HRU
8	۰/۰۲	-	CANMX	Maximum plant storage حداکثر ذخیره گیرش گیاهی	HRU

که در آن‌ها n تعداد کل جفت داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده است و OBS و SIM نشان‌دهنده مقدار متوسط داده‌های مشاهده و شبیه‌سازی شده می‌باشند. NSE مقدار خطا عدم توافق بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده را اندازه‌گیری می‌کند. NSE از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقادیر بالاتر نشان دهنده توافق بهتر است (Legates & McCabe Jr, 1999) و R<sup>2</sup> میزان همبستگی بین داده‌های مشاهده و شبیه‌سازی شده را اندازه‌گیری می‌کند.

### نتایج و بحث

#### مقایسه ورودی‌های بارش

به‌منظور بررسی تاثیر ورودی‌های مختلف بارش بر نتایج مدل SWAT پنج نوع ورودی بارش (ایستگاه باران‌سنج، 3B42، 3B42RT، CMORPH و PERSIANN) به مدل‌سازی وارد گردید و نتایج آنها با هم مقایسه شد. مقایسه برای دوره جولای ۲۰۰۶، مربوط به دوره اعتبارسنجی مدل SWAT انجام شد (شکل ۱). مقایسه محصولات ماهواره‌ای با مشاهدات باران‌سنج به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی کوتاه معنی‌دار است و در برابر خطاهای بزرگ به‌عنوان دو بارش آسیب‌پذیر است زیرا دو منبع ماهواره‌ای برآورد بارش دارای اختلاف مقیاس قابل‌توجهی هستند، به‌طوری‌که باران‌سنج اساساً مقادیر نقطه‌ای را ارائه می‌دهد و داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش مقادیر میانگین بارش را در منطقه‌ای با ابعاد مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه نشان می‌دهند.

شکل ۲ نمودار پراکنش نقاط برآوردهای بارش حاصل از ایستگاه باران‌سنج و برآوردهای مختلف بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه را نشان می‌دهد. آماره‌های مقایسه (ضریب همبستگی پیرسون R<sup>2</sup>؛ نسبت خطا BR که برابر با نسبت بین میانگین دو گروه داده بارش تعریف می‌شود) در هر نمودار آورده شده است. همبستگی بین گروه‌های مختلف بارش روزانه در محدوده ۰/۴۱ و ۰/۷۶ می‌باشد که بیشترین همبستگی بین CMORPH و 3B42RT مشاهده شد که حتی از همبستگی بین 3B42 و نسخه‌های زمان واقعی (یعنی 3B42RT) بیشتر است. در مقیاس زمانی روزانه، همبستگی بین مقادیر بارش ماهواره و مقادیر باران‌سنج کم بود (در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۲۲)، همان‌طور که انتظار می‌رفت به‌دلیل اختلاف زیاد بین منطقه

### واسنجی

پس از شناسایی حساس‌ترین پارامترها، واسنجی خودکار از طریق راه‌حل‌های پارامتر (Van Griensven & Meixner, 2004) طرح واسنجی خودکار، که نسخه اصلاح‌شده‌ای از الگوریتم تکامل پیچیده مخلوط شده<sup>۲</sup> (Duan et al., 1992) است با استفاده از داده‌های سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ انجام شد. از ضریب کارایی نش- ساتکلیف به‌منظور واسنجی پارامترها و به حداقل رساندن اختلاف بین جریان روزانه شبیه‌سازی و مشاهده شده استفاده شد. واسنجی مدل ابتدا با استفاده از ورودی بارش باران‌سنج انجام شد و سپس مدل برای هر داده ماهواره‌ای برآورد بارش واسنجی گردید. این رویکردها منجر به مجموعه‌های مختلفی از مقادیر پارامترهای واسنجی شده گردید که به ما این امکان را می‌دهد تا تأثیرات انواع مختلف داده‌های بارش را بر واسنجی و اعتبارسنجی مدل بررسی کنیم. در این مطالعه، واسنجی خودکار به واسنجی دستی ترجیح داده شد تا از سازگاری (و به حداقل رساندن خطای مدل‌سازی) در بین سناریوهای واسنجی انجام‌شده برای انواع مختلف ورودی بارش اطمینان حاصل کنیم.

#### ضرایب عملکرد

ارزیابی عملکرد مدل به‌صورت بصری هیدروگراف‌های جریان شبیه‌سازی و مشاهده شده و با استفاده از مقایسه‌های آماری انجام گردید. برای مقایسه آماری بین جریان مشاهده‌شده (OBS) و جریان شبیه‌سازی شده (SIM) در مقیاس‌های زمانی روزانه و ماهانه، از درصد خطا (BIAS)، ضریب نش- ساتکلیف (NSE) و ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) بر اساس روابط زیر استفاده شد:

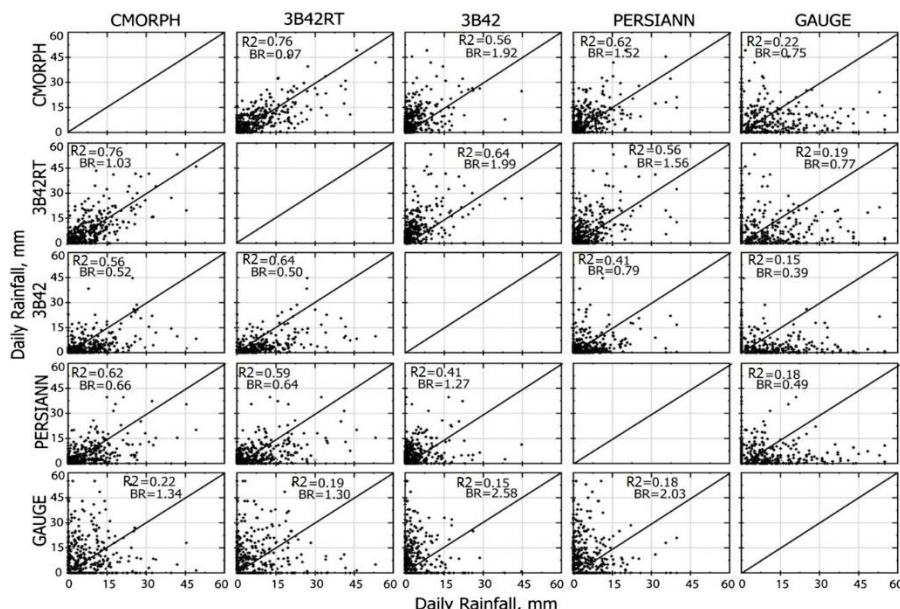
$$\% \text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{SIM}_i - \text{OBS}_i)}{\sum_{i=1}^n \text{OBS}_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{SIM}_i - \text{OBS}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{SIM}_i - \overline{\text{SIM}})(\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{SIM}_i - \overline{\text{SIM}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{OBS}_i - \overline{\text{OBS}})^2}} \quad (3)$$

کرده‌اند. تمامی ماهواره‌های برآورد بارش کاهش بارش در سال ۲۰۰۷ را نشان دادند (CMORPH: ۶۴۳ میلی‌متر در سال ۲۰۰۶ و مقدار ۲۷۸ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷، 3B42RT: ۶۷۸ میلی‌متر در سال ۲۰۰۶ و ۴۴۳ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷، PERSIANN: ۳۸۹ میلی‌متر در سال ۲۰۰۶ و ۱۵۲ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷ و 3B42: ۲۹۲ میلی‌متر در سال ۲۰۰۶ و ۱۰۷ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷). تمامی ماهواره‌های برآورد بارش میزان بارش را در اکثر ماه‌ها دست‌کم برآورد کردند. CMORPH و 3B42RT عملکردهای نسبتاً مشابهی را نشان دادند و مقدار بارش برآوردی آن‌ها علی‌رغم دست‌کم برآورد کردن، به مقدار بارش باران‌سنج نزدیک‌تر می‌باشد، در حالی که 3B42 کمترین مقدار را برآورد کرد. این یافته با یافته‌های (Hirpa et al., 2010) در اتیوپی مطابقت دارد. نسخه نزدیک زمان واقعی محصول TMPA (3B42RT) دقیق‌تر از نسخه تحقیقاتی پس از زمان واقعی<sup>۲</sup> محصول TMPA (3B42) می‌باشد که داده‌های ماهانه باران‌سنج را برای تعدیل خطا ترکیب می‌کند. ظاهراً تکنیک تعدیل خطا مبتنی بر ایستگاه باران‌سنج که در 3B42 اعمال شده است، کیفیت برآوردهای بارش را کاهش داده است. این نیاز به ارزیابی تکنیک تعدیل خطا در کشورهایی مانند ایران را نشان می‌دهد که دارای شبکه باران‌سنجی پراکنده و ضعیف است. عملکرد بهتر CMORPH و 3B42RT در مقایسه با PERSIANN نشان می‌دهد که الگوریتم‌های بازایی مبتنی بر مایکروویو عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم مبتنی بر مادون قرمز در این منطقه کوهستانی دارند. محدودیت‌های مرتبط با الگوریتم‌های مبتنی بر مادون قرمز در مناطق کوهستانی در چندین مطالعه مورد بحث قرار گرفته‌اند (Bitew & Gebremichael, 2010; Hong et al., 2007).

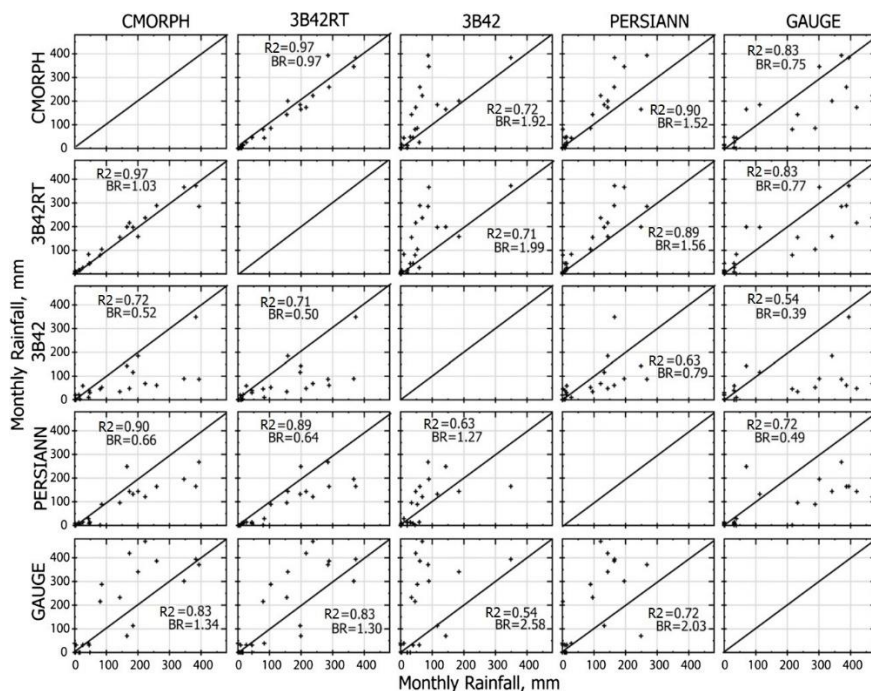
مورد پوشش ماهواره و ایستگاه باران‌سنج می‌باشد. با در نظر گرفتن مقادیر BR مشاهده می‌شود، 3B42RT و CMORPH تخمین بارش مشابهی داشتند (مقدار BR بزرگتر)، در حالی که 3B42 و PERSIANN در مقایسه با 3B42RT یا CMORPH بارش را کمتر تخمین زدند. شکل ۳ همانند شکل ۲ نمودار نقاط پراکنش بین برآوردهای مختلف بارش، اما در مقیاس ماهانه می‌باشد. همبستگی بین CMORPH و 3B42RT ( $R^2$  برابر با ۰/۹۷) بالا و بین سایر محصولات ماهواره‌ای کمتر می‌باشند. در مقیاس زمانی ماهانه، مقادیر بارش باران‌سنج بیشترین همبستگی را با مقادیر تخمین زده شده به‌وسیله CMORPH و 3B42RT ( $R^2$  برابر با ۰/۸۳)، همبستگی متوسط با PERSIANN (R برابر با ۰/۷۲) و همبستگی ضعیف با 3B42 ( $R^2$  برابر با ۰/۵۴) را نشان داد. در مقایسه با مقادیر باران‌سنج، همه محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش، مقدار بارش ماهانه را دست‌کم<sup>۱</sup> برآورد کردند: CMORPH و 3B42RT (۲۳ تا ۲۵ درصد)، PERSIANN (۵۱ درصد) و 3B42 (۶۱ درصد). سری زمانی بارش ماهانه در شکل ۴ نشان داده شده است. در این منطقه، مقادیر حداکثر دبی از مارس تا اکتبر و از ژوئن و ژوئیه اتفاق افتاده است. در مقایسه با مقادیر باران‌سنج، تغییرات فصلی باران ثبت شده توسط CMORPH و 3B42RT در مقایسه با PERSIANN و 3B42 بهتر تخمین زده شده‌اند. با این حال، تغییرات سالانه بارش ثبت شده توسط داده‌های مختلف بارش ماهواره‌ای در مقایسه با باران‌سنج دور از واقعیت می‌باشند. مقادیر بارش باران‌سنج نشان داد که بارش سالانه از سال ۲۰۰۶ (۶۶۷ میلی‌متر) تا ۲۰۰۷ (۷۸۹ میلی‌متر) افزایش یافته است، در حالی که همه ماهواره‌های مورد بررسی بارش را دست‌کم برآورد



شکل ۲- مقایسه بارش روزانه مربوط به محصولات برآورد بارش PERSIANN، TMPA 3B42RT، TMPA 3B42، CMORPH و ایستگاه باران‌سنج در حوضه تیغ‌سیاه برای دوره ژانویه ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۷

Figure 2. Comparison of daily precipitation related to PERSIANN precipitation products, TMPA 3B42RT, TMPA 3B42, CMORPH and rain gauge station within the Tigh-Sieh watershed for the period of January 2006 to December 2007

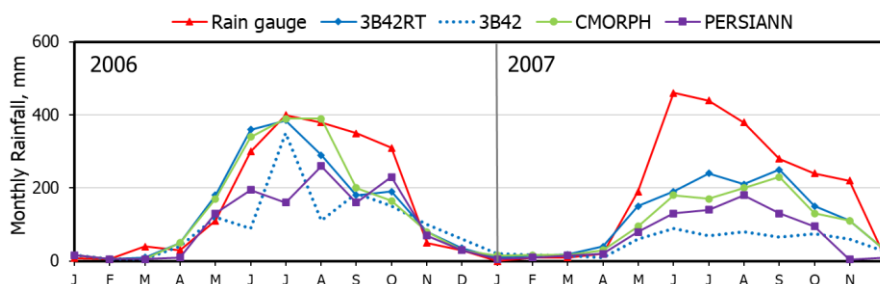




شکل ۳- مقایسه بارش ماهانه مربوط به محصولات برآورد بارش CMORPH، TPA 3B42، TPA 3B42RT، PERSIANN و GAUGE

ایستگاه باران سنج در حوضه تیغ سیاه برای دوره ژانویه ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۷

Figure 3. Comparison of monthly precipitation related to PERSIANN precipitation products, TPA 3B42RT, TPA 3B42, CMORPH and rain gauge station within the Tigh-Siah watershed for the period of January 2006 to December 2007



شکل ۴- مجموع بارش ماهانه تخمین زده شده حاصل از داده‌های باران سنج و محصولات برآورد بارش در سلول ۱ برای دوره اعتبارسنجی (ژانویه ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۷)

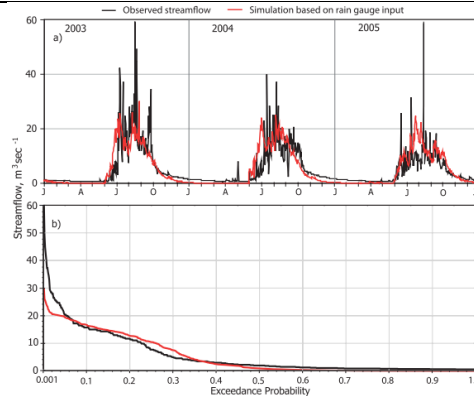
Figure 4. Total monthly rainfall in cell 1 obtained from rain gauge data and various satellite rainfall products for the validation period from January 2006 to December 2007

می‌دهد. به‌طور کلی، جریان‌های شبیه‌سازی شده پیک‌های بزرگ مشاهده شده را دست‌کم برآورد کردند، اما هیدروگراف شبیه‌سازی شده با هیدروگراف مشاهده شده مطابقت دارد. منحنی‌های شبیه‌سازی شده و احتمال تجمعی در بیشتر موارد به یکدیگر نزدیک بودند، اما نتایج شبیه‌سازی، جریان‌های پیک بزرگ با احتمال تجمعی کمتر از ۵ درصد را دست‌کم برآورد کردند. آمار عملکرد مدل (NSE برابر با ۰/۵۸،  $R^2$  برابر با ۰/۷۷ و خطای برابر با ۴/۸- درصد) نشان می‌دهد که عملکرد مدل SWAT در مقیاس زمانی روزانه رضایت‌بخش می‌باشد که با مطالعات مختلفی در این زمینه مطابقت دارد (Spruill et al., 2000; Ndomba et al., 2008; al., 2007).

**شبیه‌سازی‌های جریان در مجموعه (سناریوی) اول: واسنجی مدل SWAT با داده‌های ایستگاه باران سنج**  
هدف از این شبیه‌سازی‌ها ارزیابی اثرات تخمین‌های ماهواره‌ای برآورد بارش بر جریان می‌باشد برای زمانی که SWAT با داده‌های باران سنج واسنجی می‌شود.  
**واسنجی: (سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵)**  
پارامترهای مدل SWAT با داده‌های باران سنج برای دوره ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۵ واسنجی شد. مقادیر بهینه شده پارامترها در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۵ نمودار سری زمانی و منحنی احتمال تجمعی شبیه‌سازی‌ها به‌وسیله مدل واسنجی شده مبتنی بر باران سنج را برای دوره واسنجی نشان

جدول ۲- مقادیر پارامتر مدل SWAT با استفاده از ورودی‌های بارش از منابع مختلف برای دوره واسنجی ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۵  
Table 2. SWAT model parameter values using precipitation inputs from different sources for the calibration period from January 2003 to December 2005.

Parameter values obtained with rainfall inputs from rain gauges and original satellite rainfall products (error corrected)						Unit	Variable
3B42	PERSIANN	3B42RT	CMORPH	Raingauge station ایستگاه باران‌سنج	Range محدوده	واحد	متغیر
0.01 (1.11)	143.7 (1.11)	29.3 (1.11)	23.6 (1.11)	1.11	0-180	mmh <sup>-1</sup>	CH_K2
0.99 (0.95)	0.95 (0.28)	0.95 (0.92)	0.97 (0.95)	0.97	0-1	Day <sup>-1</sup>	Alpha_BF
52-84 (56-80)	64-90 (56-80)	60-86 (56-80)	60-86 (56-80)	56-80	30-98	-	CN2
0.001 (0.1)	8.94 (0.075)	0.001 (0.05)	0.001 (0.1)	0.001	0-10	-	SURLAG
0.016 (0.04)	0.06 (0.04)	0.01 (0.04)	0.02 (0.04)	0.04	0-0.1	-	CH_N2
0.005-0.45 (0.005-0.37)	0.0055-0.45 (0.005-0.37)	0.0045-0.365 (0.005-0.37)	0.0045-0.355 (0.005-0.37)	0.005-0.37	0.001-360	mm h <sup>-1</sup>	SoI_K
1 (0.92)	1 (0.92)	0.99 (0.92)	0.92	0.92	0-1	-	ESCO
0.39 (4.2)	1.14 (4.2)	0 (4)	1.44 (4)	2.34	0-10	-	CANMX



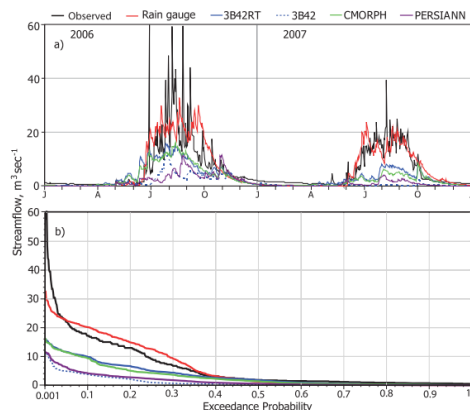
شکل ۵- مقایسه جریان شبیه‌سازی شده مدل SWAT (واسنجی شده براساس ورودی داده‌های باران‌سنج) و جریان روزانه مشاهده شده، در طول دوره واسنجی، بر حسب (a) سری زمانی و (b) احتمال تجمعی

Figure 5. Comparison of SWAT model simulated flow (based on rain gauge data input) and observed daily flow, during the calibration period, in terms of (a) time series and (b) cumulative probability

عملکرد نسبتاً ضعیف مدل می‌باشد که دلیل احتمالی آن ناتوانی ماهواره‌های برآورد بارش در ثبت این رویدادهای بارشی است. شبیه‌سازی‌های مدل مبتنی بر ورودی داده‌های باران‌سنج عملکرد بهتری نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای بارش داشتند. شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های CMORPH و 3B42RT تقریباً مشابه بوده و عملکرد بهتری نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر PERSIANN و 3B42 داشتند.

#### اثرات داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش (سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷)

مدل SWAT واسنجی شده با داده‌های بارش باران‌سنج با استفاده از داده‌های بارش مربوط به هریک از چهار ماهواره برای یک دوره دوساله (ژانویه ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۷) اعتبارسنجی گردید. شکل ۶a سری زمانی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده را نشان می‌دهد. همه شبیه‌سازی‌ها مقادیر جریان‌های پیک را کمتر برآورد کردند، که نشان‌دهنده



شکل ۶- مقایسه جریان شبیه‌سازی شده با مدل SWAT (واسنجی شده براساس داده‌های ورودی بارش از منابع مختلف) و جریان روزانه مشاهده شده، در طول دوره اعتبارسنجی (جولای ۲۰۰۶)، بر حسب (الف) سری زمانی و (ب) احتمال تجمعی. مدل با ورودی داده‌های باران‌سنج در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ واسنجی شده است

Figure 6. Comparison of simulated flow with SWAT model (based on rainfall input data from different sources) and observed daily flow, during the validation period (July 2006), in terms of (a) time series and (b) Cumulative probability. The model is calibrated with input of rain gauge data in the period 2003 to 2005

پارامترهای مدل واسنجی شده برای هر ورودی مجزا، اعتبارسنجی گردید. مقایسه بین سری زمانی هیدروگرافهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در شکل 7a نشان داده شده است. همه شبیه‌سازی‌ها نتوانستند جریان‌های پیک را به خوبی شبیه‌سازی کنند که نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً ضعیف مدل می‌باشد که دلیل احتمالی آن ناتوانی ماهواره‌های برآورد بارش در ثبت این رویدادهای بارشی است. شبیه‌سازی‌های مدل مبتنی بر ورودی داده‌های باران سنج عملکرد بهتری نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش داشتند. عملکرد شبیه‌سازی‌ها بر اساس ورودی ماهواره‌ای برآورد بارش در سال ۲۰۰۶ بهتر از شبیه‌سازی ۲۰۰۷ می‌باشد، زیرا تخمین‌های ماهواره‌ای برآورد بارش در سال ۲۰۰۷ کم برآورد شدند (مراجعه به شکل ۴). شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های اصلی CMORPH و 3B42RT تقریباً مشابه بوده و عملکرد بهتری نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر PERSIANN و 3B42 داشتند.

شکل 7b احتمال تجمعی جریان‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌های مدل، بزرگ‌ترین رویدادها را با احتمال بیش از ۵ درصد یا کمتر برای آن‌هایی که ورودی‌های بارش باران سنج دارند، ۲۵ درصد یا کمتر برای آن‌هایی که ورودی‌های بارش CMORPH و 3B42RT و PERSIANN دارند، و برای آن‌هایی که ورودی‌های بارش 3B42 دارند، ۴۵ درصد یا کمتر برآورد کردند. احتمال تجمعی شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های CMORPH و 3B42RT تقریباً یکسان بود.

مقادیر NSE برای همه شبیه‌سازی‌های ماهواره‌ای بارش مثبت می‌باشد (NSE برابر با ۰/۵۲ برای CMORPH، ۰/۵۵ برای 3B42RT، ۰/۳۸ برای PERSIANN و ۰/۲۳ برای 3B42). مقادیر NSE برای ورودی‌های CMORPH و 3B42RT نزدیک به ورودی باران سنج بود (NSE برابر با ۰/۵۷). مقادیر  $R^2$  برای ورودی‌های CMORPH (۰/۷۹) و 3B42RT (۰/۷۹) نزدیک به ورودی باران سنج (۰/۷۶) و بهتر از ورودی‌های PERSIANN (۰/۶۵) و 3B42 (۰/۵۶) بود. با این حال، در حالی که شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های باران سنج تقریباً بدون خطا (مقادیر کوچک BIAS) بودند، همه شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش مقادیر منفی BIAS بزرگی داشتند (۲۶- برای CMORPH، ۲۷- برای 3B42RT، ۲۹- برای PERSIANN و ۴۱- برای 3B42). BIAS در تخمین‌های ماهواره‌ای برآورد بارش برای CMORPH برابر ۲۵-٪، برای 3B42RT برابر ۲۳-٪، برای PERSIANN برابر ۵۱-٪ و برای 3B42 برابر ۶۱-٪ می‌باشند.

شکل ۶b احتمال تجمعی جریان‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌های مدل، بزرگ‌ترین رویدادها را با احتمال تجمعی ۵ درصد یا کمتر برای آن‌هایی که ورودی‌های بارش حاصل از باران سنج برای واسنجی مدل استفاده شدند، ۳۵ درصد یا کمتر برای آن‌هایی که از ورودی‌های بارش CMORPH و 3B42RT استفاده کردند، و ۵۰ درصد یا کمتر برای آن‌هایی که ورودی‌های بارش PERSIANN و 3B42 استفاده کردند، کمتر برآورد کرد. علاوه بر این، میزان دست‌کم برآورد کردن بزرگترین رویدادها برای ورودی‌های باران سنج نسبتاً کوچک، برای ورودی‌های CMORPH و 3B42RT متوسط و برای ورودی‌های PERSIANN و 3B42 شدید بود.

مقایسه‌های آماری نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی داده‌های باران سنج عملکرد بهتری (NSE برابر ۰/۵۷، R برابر ۰/۷۶ و خطای ناچیز) نسبت به شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش داشتند. در بین شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای بارش، آن‌هایی که از ورودی‌های CMORPH و 3B42RT استفاده کردند، مقادیر NSE مثبت (به ترتیب ۰/۳ و ۰/۴) را نشان دادند که نشان‌دهنده عملکرد بهتر آن‌ها در شبیه‌سازی است، در حالی که آن‌هایی که از ورودی‌های PERSIANN و 3B42 استفاده کردند، مقادیر NSE منفی را نشان دادند. در شبیه‌سازی‌ها با استفاده از ورودی‌های ماهواره‌ای بارش، مقادیر منفی BIAS در نتایج بعضی از ورودی‌های ماهواره‌ای بارش مشاهده شد (CMORPH برابر ۵۴-٪، 3B42RT برابر ۴۷-٪، PERSIANN برابر ۷۶-٪ و 3B42 برابر ۸۳-٪). مقدار BIAS در ورودی‌های ماهواره‌ای بارش برای CMORPH برابر ۲۵-٪، برای 3B42RT برابر ۲۳-٪، برای PERSIANN برابر ۵۱-٪ بود، و برای 3B42 برابر ۶۱-٪ می‌باشند.

#### مجموعه شبیه‌سازی دوم: مدل واسنجی شده با داده‌های ماهواره‌ای بارش

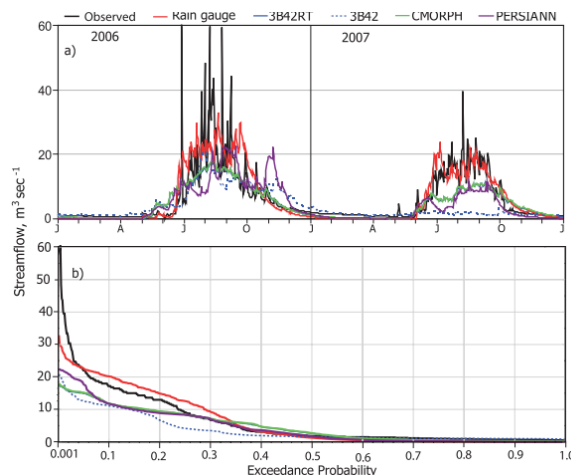
هدف از این شبیه‌سازی‌ها ارزیابی اثرات ورودی‌های ماهواره‌ای بارش بر جریان هنگامی که مدل SWAT با داده‌های ماهواره‌ای واسنجی شود، می‌باشد.

#### واسنجی (سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵)

در این قسمت پارامترهای مدل SWAT با هریک از محصولات بارش ماهواره برای دوره از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۵ مجدداً واسنجی گردید. پارامترهای تخمین زده شده در جدول ۳ آورده شده است.

#### اثرات تخمین‌های ماهواره‌ای برآورد بارش (جولای ۲۰۰۷)

در این قسمت جریان برای هر ورودی ماهواره‌ای برآورد بارش برای دوره ژانویه ۲۰۰۶ تا دسامبر ۲۰۰۷ با استفاده از



شکل ۷- مقایسه جریان شبیه‌سازی شده با مدل SWAT (واسنجی شده براساس داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش) و جریان روزانه مشاهده شده، در طول دوره اعتبارسنجی (جولای ۲۰۰۶)، بر حسب (الف) سری زمانی و (ب) احتمال تجمعی. مدل با ورودی ماهواره‌ای بارش به‌طور مجزا در دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ واسنجی شده است

Figure 7. Comparison of simulated flow with SWAT model (based on rainfall input data from different sources) and observed daily flow, during the validation period (July 2006), in terms of (a) time series and (b) Cumulative probability. The model has been calibrated with the input of satellite rainfall data separately in the period from 2003 to 2005

قابل‌توجهی بر جریان دارند. افزایش مقادیر CN2 منجر به افزایش رواناب می‌شود. مقدار متوسط CN2 واسنجی شده برای ورودی باران‌سنج برابر با ۶۵ برای ورودی CMORPH برابر با ۶۹ برای ورودی 3B42RT برابر با ۶۹ و برای ورودی 3B42 برابر با ۷۳ می‌باشد. این توالی افزایش CN2 با توالی افزایش درجه کم برآوردی بارش توسط محصولات مطابقت داشت (شکل ۴).

به‌عبارت دیگر، محصولات بارش که بیشترین مقدار منفی BIAS را در برآورد بارش داشتند، منجر به مقادیر بالاتر CN2 شدند. مقادیر CN2 تخمین زده شده توسط هر دو ورودی‌های باران‌سنج و ماهواره‌ای بارش، بالاتر از مقادیر استاندارد جدول SCS (CN2 برابر با ۵۵) می‌باشد. ماهواره‌ها در مقایسه با باران‌سنج‌ها اختلاف بیشتری بین مقادیر CN2 واسنجی شده و استاندارد نشان دادند. در میان محصولات ماهواره‌ای، بیشترین اختلاف بین مقادیر CN2 واسنجی شده و استاندارد برای محصولات که بیشترین شدت را در کمتر برآورد کردن بارش (یعنی PERSIANN و 3B42) داشتند، مشاهده گردید.

هنگام استفاده از ورودی بارش PERSIANN، مقدار پارامتر SURLAG مقدار بزرگتری محاسبه گردید که میزان بارش را در مقایسه با باران‌سنج، CMORPH و 3B42RT دست‌کم برآورد کرد. بنابراین، بهبود در شبیه‌سازی‌های جریان حاصل از ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش، زمانی که مدل با داده‌های ماهواره‌ای و نه با داده‌های باران‌سنج واسنجی شد، عمدتاً به‌دلیل تنظیمات پارامتر بود که برخی از خطاها در تخمین‌های مرتبط با ورودی‌های ماهواره‌ای را جبران کرد. با این‌حال، تنظیمات پارامتر منجر به بهبود عملکرد بعضی از داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش نگردید، به‌طوری‌که PERSIANN و 3B42 حتی زمانی که مدل با ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش واسنجی شده بود مشخص می‌باشد.

#### اثرات تصحیح خطای ماهواره‌های برآورد بارش و واسنجی

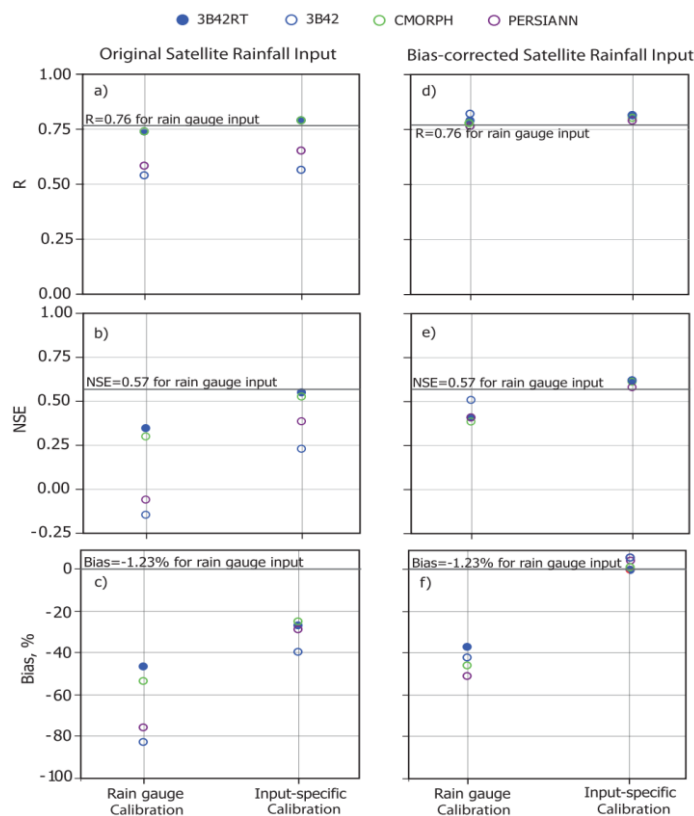
در این بخش، تاثیر تصحیح خطای داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش بر نتایج شبیه‌سازی‌های جریان در مقیاس زمانی ماهانه برای دو استراتژی مختلف واسنجی (با استفاده از بارش باران‌سنج و داده‌های ماهواره‌ای برآورد بارش) ارزیابی گردید. شکل ۸ مقایسه عملکرد شبیه‌سازی‌های جریان برای موارد مختلف واسنجی، محصول ماهواره‌ای برآورد بارش، تصحیح شده و خام (تصحیح نشده) را نشان می‌دهد. به‌طور کلی نتایج ویژگی‌های زیر را نشان می‌دهد:

اول: تصحیح خطا ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش منجر به عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی جریان در مقایسه با استفاده از ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش خام، به‌ویژه برای محصولات ماهواره‌ای برآورد بارش که با خطاهای بزرگ مشخص می‌شوند (PERSIANN و 3BRT) شد. با این‌حال، عملکرد شبیه‌سازی‌های جریان بر اساس ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش تصحیح شده همچنان پایین‌تر از عملکردهای مبتنی بر ورودی‌های داده‌های باران‌سنج می‌باشد.

دوم: دقت اعتبارسنجی‌های جریان مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش در زمانی که مدل با هریک از این ورودی‌ها واسنجی شد، بیشتر از زمانی بود که با داده‌های باران‌سنج واسنجی شد.

سوم: عملکرد شبیه‌سازی‌های جریان بر اساس ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش تصحیح شده معادل شبیه‌سازی‌های جریان مبتنی بر بارش باران‌سنج بود.

مقادیر پارامترهای تخمین زده شده مدل حاصل از ورودی‌های مختلف بارش با هم مقایسه و تمرکز بر روی پارامترهایی می‌باشد که جریان زمینی را کنترل می‌کنند. شماره منحنی SCS (CN2) و ضریب تأخیر رواناب سطحی (SURLAG) دو پارامتر حساس شناسایی شدند که تأثیر



شکل ۸- مقایسه آمار عملکرد شبیه‌سازی جریان برای ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش (چپ) داده‌های خام و (راست) با خطای تصحیح‌شده با استفاده از مدل واسنجی‌شده با دو گروه از داده‌های بارش: باران سنج (چپ)، و ماهواره‌ای (راست). معیارهای ارزیابی: (a و d) R، (b و c) NSE و (f و c) درصد خطا.

Figure 8. Comparison of flow simulation performance statistics for satellite rainfall inputs (left) raw data and (right) with error corrected using the calibrated model with two groups of rainfall data: rain gauge (left), and satellite (Right). The evaluation criteria are: (a and d) R, (b and c) NSE and (c and f) error percentage.

الگوریتم‌های مبتنی بر مادون قرمز در مناطق کوهستانی برتری دارند. توانایی شبیه‌سازی هریک از ماهواره‌های برآورد بارش با استفاده از مدل SWAT واسنجی شده در دو رویکرد مختلف مورد بررسی قرار گرفت: (الف) با بارش باران سنج به‌عنوان ورودی، و (ب) با هریک از ماهواره‌های برآورد بارش به‌عنوان ورودی. برای مدل هیدرولوژیکی واسنجی شده با ورودی داده‌های باران سنج، این نتایج به‌دست آمد: (۱) عملکرد مدل به‌طور کلی با استفاده از ورودی داده‌های باران سنج در مقایسه با ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش بهتر بود. (۲) همه خطاهای منفی در شبیه‌سازی‌های مدل مبتنی بر ورودی‌های ماهواره‌ای برآورد بارش، ناشی از خطاهای منفی این ماهواره‌ها در برآوردهای بارش بودند. (۳) شبیه‌سازی‌های مبتنی بر CMORPH و 3B42RT توانایی بالایی در تولید جریان مشاهده شده را نشان دادند، در حالی که شبیه‌سازی‌های مبتنی بر PERSIANN و 3B42 فاقد این توانایی می‌باشند و (۴) شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ماهواره‌های برآورد بارش تصحیح شده، عملکرد بالایی مدل برای همه برآوردهای این ماهواره‌ها را نشان دادند اما در مقایسه با شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ورودی‌های باران سنج، عملکرد پایین‌تری داشتند. برای یک مدل هیدرولوژیکی واسنجی‌شده با هر ماهواره برآورد بارش به‌عنوان ورودی، این نتایج به‌دست آمد: (۱) عملکرد مدل با

### نتیجه‌گیری

این مطالعه عمدتاً بر ارزیابی عملکرد ماهواره‌ای برآورد بارش با وضوح بالا (CMORPH، 3B42RT، TMPA، TMPA) به‌عنوان ورودی مدل هیدرولوژیکی SWAT برای شبیه‌سازی جریان در یک حوضه آبخیز کوهستانی ۳۱۲ کیلومتر مربعی در جنوب شرق ایران متمرکز می‌باشد. هر چهار محصول دارای خطای منفی (مقدار منفی BIAS) می‌باشند. CMORPH و 3B42RT نسبت به PERSIANN و 3B42 خطاهای کوچکتری داشتند. نسخه نزدیک زمان-واقعی (TMPA 3B42RT) دارای خطای کوچک‌تری نسبت به نسخه پس از زمان واقعی آن (TMPA 3B42) بود که از داده‌های باران سنج برای رفع خطا استفاده می‌کند. ظاهراً، تکنیک مورد استفاده در 3B42 برای ترکیب داده‌های باران سنج منجر به خطاهای بزرگی شد که نشان‌دهنده ناتوانی این تکنیک در محاسبه صحیح توپوگرافی پیچیده هنگام مواجهه با شبکه باران سنج پراکنده است. توصیه می‌گردد که توسعه دهندگان الگوریتم 3B42 این محصول را در مورد شبکه‌های باران سنج پراکنده و توپوگرافی پیچیده بررسی کنند. عملکرد بهبود یافته TMPA 3B42RT در مقایسه با PERSIANN با یافته‌های قبلی این محصول مطابقت دارد. الگوریتم‌های مبتنی بر مایکروویو به‌طور کامل بر

استفاده از ماهواره‌های برآورد بارش تصحیح شده، برای همه انواع ماهواره‌ها مشابه بود و معادل با استفاده از ورودی داده‌های باران‌سنج بود، (۲) به‌طور کلی عملکرد مدل با استفاده از ورودی ماهواره‌ای برآورد بارش تصحیح شده یا ورودی داده‌های باران‌سنج در مقایسه با ورودی بارش خام ماهواره‌ای بهتر می‌باشد، و (۳) همه شبیه‌سازی‌های داده‌های خام مبتنی بر ماهواره‌های برآورد بارش دارای خطاهای منفی ناشی از خطاهای منفی در تخمین‌های این ماهواره‌ها هستند، در حالی که همه شبیه‌سازی‌های مبتنی بر ماهواره‌های تصحیح شده تقریباً بدون خطا می‌باشند. بهبودهای قابل‌توجه در شبیه‌سازی‌های جریان ماهواره‌ای زمانی به‌دست آمد که مدل با تخمین‌های حاصل از ماهواره‌های برآورد بارش به‌جای استفاده از داده‌های باران‌سنج واسنجی شد. هنگامی که یک مدل با داده‌های باران‌سنج واسنجی و با داده‌های ماهواره‌های برآورد بارش اعتبارسنجی می‌شود، منجر به خطاهای قابل‌توجهی در شبیه‌سازی جریان می‌شود، حتی زمانی که تخمین‌های ماهواره‌های برآورد بارش تصحیح شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهبود در شبیه‌سازی‌های مدل SWAT

SWAT واسنجی‌شده با انواع ماهواره‌های برآورد بارش) به‌دلیل مقادیر بیشتر شماره منحنی نسبت به مقادیر جدول‌بندی استاندارد مورد استفاده در واسنجی با ورودی‌های بارش باران‌سنج بود، که نشان می‌دهد بهبود دقت شبیه‌سازی جریان منجر به دقت پایین شبیه‌سازی اجزای بیابان آب به‌غیر از جریان سطحی می‌شود. بنابراین، هنگام استفاده از مقادیر پارامترهای جدول استاندارد با ورودی‌های بارش ماهواره‌ای باید احتیاط کرد. یکی از دلایل خطای تخمین‌های مدل‌های هیدرولوژیکی حاصل از ماهواره‌های برآورد بارش ممکن است وسعت کوچک و کوهستانی بودن حوضه باشد. در این مورد، تصحیح خطای داده‌های بارش ماهواره‌ای به‌طور قابل‌توجهی شبیه‌سازی مدل را بهبود می‌بخشد. بنابراین قبل از استفاده از آن‌ها به‌عنوان ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی، باید اقدام به حذف خطا در تخمین‌های مربوط به ماهواره‌های برآورد بارش شود. در نهایت، روش انجام شده در این مطالعه می‌تواند برای سایر حوضه‌های دارای پراکنش متفاوت ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش استفاده شود.

## References

- Alibakhshi, S. M., Farid Hossini, F., Davari, K., Alizadeh, A., & Munya, H. (2018). Assessment of Ground Station, GPM Satellite and MERRA Precipitation Products in Kashafroud Basin. *Journal of Watershed Management Research*, 10(18), 111-122.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Beven, K., & Westerberg, I. (2011). (On red herrings and real herrings: disinformation and information in hydrological inference. *Hydrological Processes*, 25(10), 1676-1680.
- Bitew, M. M., & Gebremichael, M. (2010). Evaluation through independent measurements: Complex terrain and humid tropical region in Ethiopia. *Satellite rainfall applications for surface hydrology*, 205-214.
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds* (No. 55). US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Duan, Z., & Bastiaanssen, W. (2013). First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure. *Remote Sensing of Environment*, 131, 1-13.
- Duan, Z., Møller, N., Greenberg, J., & Weare, J. H. (1992). The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strength from 0 to 250 C and from 0 to 1600 bar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(4), 1451-1460.
- Eckhardt, K., & Arnold, J. (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 251(1-2), 103-109.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250.
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S., & Duan, Z. (2022). Performance Evaluation of Six Gridded Precipitation Products throughout Iran Using Ground Observations over the Last Two Decades (2000–2020). *Remote Sensing*, 14(15), 3783.
- Hirpa, F. A., Gebremichael, M., & Hopson, T. (2010). Evaluation of high-resolution satellite precipitation products over very complex terrain in Ethiopia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(5), 1044-1051.
- Hong, Y., Gochis, D., Cheng, J.-t., Hsu, K.-l., & Sorooshian, S. (2007). Evaluation of PERSIANN-CCS rainfall measurement using the NAME event rain gauge network. *Journal of hydrometeorology*, 8(3), 469-482.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., & 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.
- Hughes, D. (2006). Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks. *Journal of Hydrology*, 327(3-4), 399-410.

- Jahanshahi, A., S. H., Booij, M. (2024). Comparison of satellite-based and reanalysis precipitation products for hydrological modeling over a data-scarce region. *Climate dynamics*, 1-33.
- Javanmard, S., Yatagai, A., Nodzu, M. I., BodaghJamali, J., & Kawamoto, H. (2010). Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM\_3B42 over Iran. *Advances in Geosciences*, 25, 119-125.
- Jiang, S., Liu, S., Ren, L., Yong, B., Zhang, L., Wang, M., Lu, Y., & He, Y. (2017). Hydrologic evaluation of six high resolution satellite precipitation products in capturing extreme precipitation and streamflow over a medium-sized basin in China. *Water*, 10(1), 25.
- Joyce, R. J., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., & Xie, P. (2004). CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of hydrometeorology*, 5(3), 487-503.
- Katiraie-Boroujerdy, P.-S., Nasrollahi, N., Hsu, K.-l., & Sorooshian, S. (2013). Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran. *Journal of arid environments*, 97, 205-219.
- Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233-241.
- Li, X., Balkanski, Y., Wu, Z., Gasser, T., Ciais, P., Zhou, F., Li, L., Tao, S., Peng, S., & Piao, S. (2018). Analysis of slight precipitation in China during the past decades and its relationship with advanced very high radiometric resolution normalized difference vegetation index. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5563-5575.
- Ndomba, P., Mtalo, F., & Killingtveit, A. (2008). SWAT model application in a data scarce tropical complex catchment in Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(8-13), 626-632.
- Nijssen, B., & Lettenmaier, D. P. (2004). Effect of precipitation sampling error on simulated hydrological fluxes and states: Anticipating the Global Precipitation Measurement satellites. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D2).
- Sorooshian, S., AghaKouchak, A., Arkin, P., Eylander, J., Foufoula-Georgiou, E., Harmon, R., Hendrickx, J. M., Imam, B., Kuligowski, R., & Skahill, B. (2011). Advanced concepts on remote sensing of precipitation at multiple scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(10), 1353-1357.
- Sorooshian, S., Hsu, K.-L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B., & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9), 2035-2046.
- Spruill, C. A., Workman, S. R., & Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1431-1439.
- Tan, M., & Duan, Z. (2017). Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. *Remote Sens.*, 9, 720. In.
- Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., García-Ortega, E., Machado, L. A., Angelis, C. F., Salio, P., Kidd, C., & Huffman, G. J. (2012). Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 104, 70-97.
- Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., & Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of the total environment*, 573, 66-82.
- Van Griensven, A., & Meixner, T. (2004). Dealing with unidentifiable sources of uncertainty within environmental models.
- van Griensven, A. v., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 10-23.
- Villarini, G., Krajewski, W. F., & Smith, J. A. (2009). New paradigm for statistical validation of satellite precipitation estimates: Application to a large sample of the TMPA 0.25° 3-hourly estimates over Oklahoma. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D12).
- Wang, Q., Xia, J., She, D., Zhang, X., Liu, J., & Zhang, Y. (2021). Assessment of four latest long-term satellite-based precipitation products in capturing the extreme precipitation and streamflow across a humid region of southern China. *Atmospheric Research*, 257, 105554.
- Wood, E. F., Roundy, J. K., Troy, T. J., Van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F., Blyth, E., ... & Whitehead, P. (2011). Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water. *Water Resources Research*, 47(5).
- Yang, N., Zhang, K., Hong, Y., Zhao, Q., Huang, Q., Xu, Y., Xue, X., & Chen, S. (2017). Evaluation of the TRMM multisatellite precipitation analysis and its applicability in supporting reservoir operation and water resources management in Hanjiang basin, China. *Journal of Hydrology*, 549, 313-325.