



Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model

S. Pourentezari¹, K. Esmaili^{2*}, A. Faridhosseini³, E. Ghafari⁴

Received: 29-01-2022

Revised: 06-07-2022

Accepted: 08-08-2022

Available Online: 20-11-2022

How to cite this article:

Pourentezari, S., Esmaili, K., Faridhosseini, A., & Ghafari, E. (2022). Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model. *Journal of Water and Soil* 36(4): 525-539. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74417.1129](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74417.1129)

Introduction

Precipitation is one of the most important input parameters of the hydrological models for rainfall-runoff simulation, which due to the lack of proper dispersion of rain gauge stations and the newly established some of these stations in most basins of the country, the use of these precipitation data faces serious challenges. Therefore, the use of remote-sensing methods is one of the ways that can be used for the streamflow simulation using hydrological models. Runoff is also one of the most important hydrological variables and rainfall-runoff modeling is one of the key items in hydrological sciences to estimate runoff characteristics such as volume, peak flow and arrival time to peak flow. In the present study, we used reanalyzed precipitation data and then evaluated the simulated streamflow using this precipitation data in the Zoshk subbasin. The precipitation data was validated with in situ data, of Kashafrood basin.

Materials and Methods

The reanalysis precipitation data was selected from the ERA5 precipitation data, and the HEC-HMS was used for the rainfall-runoff simulation. The basin parameters were calculated by the GIS menu. This menu is the newest option in the HEC-HMS software that needs only the DEM basin for calculating the basin parameters. In the present study, we should validate the ERA5 reanalysis precipitation data with in situ data, so we did that in the Kashafrood basin. The number of the rain gauge stations were 34, but some of the stations didn't have complete data and omitted them from the list of the rain gauge stations. For the validation ERA5 reanalysis precipitation data was used from the R, NSE, RMSE, Bias, FAR, POD and TS statistical indicators. These indicators were calculated by programming in EXCEL Visual Basic. The ERA5 precipitation data was evaluated for the Kashafrood basin at daily and monthly time steps. The DEM Zoshk was downloaded with the spatial resolution of 12.5 meters from ALOS-PALSAR satellite and then the basin parameters were calculated by the GIS menu. The SCS curve number was selected as a loss method. In this method, the calculations related to the percentage of impermeability and the average curve number of each sub-basin were obtained through land use and curve number layers, respectively. The SCS unit hydrograph was selected as a transform method. The recession method was selected as a base flow method. NSE and PBias were used for the calibration and validation events in HEC-HMS. In this way, at first the HEC-HMS model was calibrated by tow in situ rainfall-runoff events (91/1/11 and 91/2/6), and then validated by one in situ rainfall-runoff event (99/1/23). For validation streamflow of the ERA5 reanalysis precipitation data, the event on 99/1/23 was used and their streamflow hydrographs were evaluated with each other in Zoshk station.

Results and Discussion

The results showed that the reanalysis precipitation data of ERA5 had underestimation in daily and monthly time steps. Also in monthly time step, the accuracy of these precipitation dataset in detecting precipitation events (in terms of FAR, TS, and POD indices) was higher than a daily one. In addition, in monthly time steps it had

1, 2, 3 and 4- M.Sc. Student, Associate Professors and Ph.D. Graduate of Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: esmaili@um.ac.ir)

worse accuracy in summer months than the rest of the year in detecting precipitation events (in terms of FAR, TS, and POD indices). For streamflow evaluation, in the calibration phase both NSE was in very good and good ranges, and PBias was in very good, good and acceptable ranges. In addition, the model underestimated the observational one. Finally the ERA5 reanalysis precipitation data was compared by 99/1/23 hydrograph event. The streamflow hydrograph from the ERA5 reanalysis precipitation data was underestimated due to ERA5 underestimation of the precipitation at the Zoshk rain gauge on the days corresponding to the 23/6/99 incident. The ERA5 reanalyzed precipitation data with NSE and Bias percentage coefficients in unacceptable range ($NSE \leq 0.5$ and $PBias \leq \pm 25$), compared to flow hydrograph obtained from Zoshk station precipitation data, the efficiency of this precipitation dataset is low. The range of the streamflow hydrograph from the ERA5 precipitation data was unsatisfactory in compared to the observational hydrograph ($NSE = -0.47$ and $PBias = -55.16$).

Conclusion

In general, the accuracy of the flow hydrograph of this product compared to the flow hydrograph of the precipitation data of Zoshk station ($NSE = 0.64$ and $PBias = -15.82$), cannot be a relatively reliable source instead of in situ rainfall data in hydrological simulation. The suggestion for future studies is to evaluate other rainfall data based on remote sensing methods in hydrological modeling.

Keywords: ERA5, GIS Menu, HEC-HMS, Streamflow hydrograph estimation, Zoshk river

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۵۲۵-۵۳۹

ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS

سعیده پورانتظاری^۱ - کاظم اسماعیلی^{۲*} - علیرضا فریدحسینی^۳ - الهه غفاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

چکیده:

بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های بارانسنجی و تازه تأسیس بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از این داده‌های بارش با چالشی جدی روبروست. از این رو استفاده از روش‌های سنجش از دوری می‌تواند یکی از گزینه‌های مورد استفاده در زمینه شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی باشد. در پژوهش حاضر، داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 برای حوضه آبریز کشف‌رود در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک و پارامترهای مربوط به حوضه آبخیز زشک در نرم‌افزار HEC-HMS، هیدروگراف جریان آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های بارش ERA5 در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه دارای کم‌برآوردی می‌باشند و نیز در گام زمانی ماهانه دقت این داده‌های بارش در تشخیص وقایع بارشی (از نظر شاخص‌های TS، FAR و POD) بالاتر از گام زمانی روزانه بود. همچنین داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در گام زمانی ماهانه، در ماه‌های گرم تابستان دقت پایین‌تری در تشخیص وقایع بارش نسبت به بقیه ماه‌های سال داشتند. هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 نسبت به هیدروگراف مشاهداتی دارای کم‌برآوردی بود که علت آن کم‌برآورد کردن میزان بارش در موقعیت ایستگاه زشک در محدوده روزهای متناظر با واقعه ۹۹/۱/۲۳ توسط ERA5 بود. همچنین هیدروگراف یادشده در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی در محدوده غیر قابل قبول ($NSE \leq 0.5$ و $PBias \leq \pm 25$) بود. به طور کلی دقت هیدروگراف جریان حاصل از این محصول نسبت به هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک، نمی‌تواند منبع مورد اعتمادی در مدلسازی هیدرولوژیکی باشد.

واژه‌های کلیدی: زشک، مدل‌سازی بارش-رواناب، منوی GIS، ERA5، HEC-HMS

مقدمه

توسعه یافته‌اند که دارای توانایی‌های مناسب در بعد مکانی و زمانی هستند (Azari et al., 2009). داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 پنجمین نسل از داده‌های پایگاه مرکز پیش‌بینی وضع آب و هوای اروپا (ECMWF^۵) هستند که از ۱ ژانویه ۱۹۷۹، کل کره زمین را پوشش می‌دهند و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی به ترتیب $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ و ۱ ساعت می‌باشند (Sabah et al., 2021). داده‌های بازتحلیل شده از ترکیب نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت

بارش مؤلفه اصلی بیلان آب و پارامتر کلیدی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که نوسانات زمانی و مکانی آن، اندازه‌گیری نقطه‌ای داده‌ها و نیز نبود شبکه متراکم برداشت داده، سبب شده است که اطلاعات برداشت شده نماینده خوبی برای تخمین میزان بارش در کل منطقه نباشند. در طی زمان، مدل‌های پیشرفته‌ای جهت برآورد خصوصیات بارش با استفاده از سنجش از دور و پدیده‌های هواشناسی

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیاران و دانش‌آموخته گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

(Email: esmaili@um.ac.ir)

*) نویسنده مسئول:

کشور (مانند (Izadi et al., 2021)) صورت گرفته است اما در زمینه استفاده از این داده‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی به‌ویژه در نرم‌افزار HEC-HMS، تحقیقات کمی (از جمله (Shayeghi et al., 2019)) انجام شده است. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: (۱) ارزیابی دقت داده‌های بارش یادشده در حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و (۲) بررسی دقت داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS جهت برآورد هیدروگراف جریان در حوضه آبخیز زشک-ابرده؛ در راستای اهداف مورد نظر تاکنون مطالعه‌ای در حوضه‌های به‌ترتیب کشف‌رود و زشک-ابرده صورت نگرفته است. همچنین جهت شبیه‌سازی مشخصات حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS از ابزارهای موجود در منوی GIS استفاده شد که آوریل ۲۰۲۱ به این نرم‌افزار افزوده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبخیز زشک-ابرده (یا حوضه زشک) در موقعیت جغرافیایی $36^{\circ}41'16''$ تا $59^{\circ}41'13''$ طول شرقی و $36^{\circ}23'12''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه دارای مساحت حدود $9227,7$ هکتار، محیط $57,9$ کیلومتر، ارتفاع متوسط در حدود $2234,6$ متر، ارتفاع حداقل 1429 و حداکثر 3261 متر و شیب متوسط حدود $37,7$ درصد در حوضه آبریز کشف‌رود و از نظر سیاسی در محدوده شهرستان طرجه-شاندیز واقع شده است. طول حوضه $21,5$ کیلومتر بوده و تمامی رواناب این حوضه از طریق رودخانه زشک-ابرده عبور نموده و وارد دشت مشهد می‌شود. بارش متوسط حوضه حدود 404 میلی‌متر و بیشترین بارندگی ماهانه به‌ترتیب با 71 و 65 میلی‌متر در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد که هر کدام حدود 18 و 16 درصد از کل بارش را به خود اختصاص می‌دهند و ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور نیز خشک‌ترین ماه‌های سال می‌باشند. درجه حرارت متوسط این حوضه حدود $8,7$ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت سالیانه به‌ترتیب $2,8$ و $14,2$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در پژوهش حاضر لایه‌های مورد نیاز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی و داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد که به علت نقص در داده‌های ایستگاه‌های حصار-دهبار، حرکت، دولت‌آباد خرم‌دره، شریف‌آباد کشف‌رود، شغل‌آباد و مزدوران، این ایستگاه‌ها از مراحل

مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با انواع داده‌های محاسباتی و مشاهداتی از سنجنده‌های مختلف به‌دست می‌آیند (Karimi et al., 2021). رواناب نیز از مهم‌ترین متغیرهای هیدرولوژیکی است و مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از موارد کلیدی در علوم هیدرولوژی برای دستیابی به مشخصات رواناب از قبیل میزان حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج جریان به شمار می‌رود. HEC-HMS یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه هیدرولوژی است که فرآیندهای بارش-رواناب حوضه‌های آبریز را شبیه‌سازی می‌کند و برای حل گسترده‌ترین مسائل از قبیل هیدرولوژی سیل، تأمین آب حوضه رودخانه‌های بزرگ و رواناب حوضه‌های طبیعی یا کوچک شهری طراحی شده است (USACE, 2021). محققان مختلفی در تحقیقات خود از داده‌های بارش ماهواره‌ای جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرده‌اند. زو و همکاران (Xu et al., 2022) در حوضه دریاچه‌های بزرگ Laurentian واقع در آمریکای شمالی از داده‌های بارش ERA5 و MERRA-2^۱ جهت شبیه‌سازی جریان در مدل هیدرولوژیکی MESH^۲ استفاده کردند. نتایج نشان داد که داده‌های بارش ERA5 عملکرد بهتری نسبت به داده‌های بارش MERRA-2 داشت. نذیر و همکاران (Nazeer et al., 2022) از دو محصول ERA5-Land و JRA-55^۳ برای شبیه‌سازی ذوب برف/یخچال و رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی DDD^۴ در حوضه Gilgit در شمال پاکستان استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی روزانه رواناب نشان داد که محصول ERA5 عملکرد بهتری نسبت به JRA-55 دارد. چامپین و همکاران (Champagne et al., 2021) از داده‌های بارش ERA5 در حوضه‌های آبخیز خلیج هادسون، کانادا در مدل هیدرولوژیکی MESH استفاده نمودند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل (با توجه به مطالعه موربایی و همکاران (Moriassi et al., 2015) از لحاظ راندمان نش ساتکلیف ($NSE < 0,7$) و درصد اریبی ($PBias > 12$) بود. Lorenzo و همکاران (Lorenzo et al., 2020) از داده‌های بارش ERA5 در سطح جهان در مدل هیدرولوژیکی GloFAS^۵ استفاده کردند. نتایج دقت مدل با $R = KGE = 0.67$ و $R = 0.8$ مناسب ارزیابی شد. در بررسی‌های صورت‌گرفته در پژوهش‌های پیشین، مطالعات متعددی در زمینه اعتبارسنجی داده‌های بازتحلیل شده ERA5 در سراسر جهان (مانند (Hwang et al., 2019))، (Singh et al., 2021)، (Voropay et al., 2021) و (Yuan et al., 2021)) و نیز در مناطق مختلف کشور در محدوده‌های استانی (مانند (ErfaniRahmatnia et al., 2018))، حوضه‌ای (مانند (Shayeghi et al., 2019)) و کل

3- Japanese 55-year Reanalysis

4- Distance Distribution Dynamics

5- Global Flood Awareness System

6- Kling-Gupta Efficiency

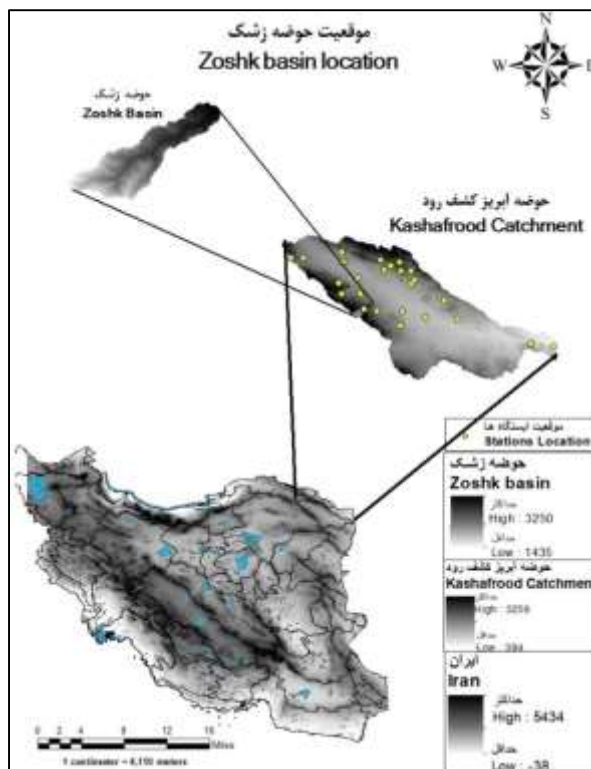
1- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

2- Modélisation Environnementale Communautaire-Surface and Hydrology

بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های بارانسنجی و تازه تأسیس بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از این داده‌های بارش با چالشی جدی روبروست. از این رو استفاده از روش‌های دورسنجی یکی از گزینه‌های مورد استفاده در زمینه مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی می‌باشد.

انجام پژوهش حذف گردیدند. همچنین داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 نیز از پایگاه <https://cds.climate.copernicus.eu> دریافت گردید. **جدول ۱** و **۲** به ترتیب خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک و مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود را نشان می‌دهند.

روش پژوهش



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز زشک-ابرده
Figure 1- Location of Zoshk-Abardeh Basin

جدول ۱- خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک-ابرده (مأخذ: مهندسین مشاور آبخیز گستر شرق)

Table 1- Physiographic characteristics of Zoshk-Abardeh basin (Source: East Watershed Consulting Engineers)

نام حوضه Basin Name	مساحت (km^2) Area	محیط (km) Perimeter	شیب متوسط (%) Mean Slope	طول حوضه (km) Basin Length	ارتفاع حداکثر (m) Maximum Elevation	ارتفاع حداقل (m) Minimum Elevation	ارتفاع میانه (m) Medium Elevation	ارتفاع متوسط (m) Mean Elevation
زشک Zoshk	92.28	57.89	52.46	21.53	3261	1429	2238	2234.61

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود (مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی)
Table 2- Geographical location of Kashfarrood catchment rain gauge stations (Source: Khorasan Razavi Regional Water Company)

نام ایستگاه Station	طول Longitude	عرض Latitude	ارتفاع (m) Elevation
آبقد ارداک (Abqad Ardak)	59.46	36.76	1505
آبقد فریزی (Abqad Ferizi)	58.96	36.49	1390
اداره مشهد (Edareh Mashhad)	59.57	36.31	1018
ارداک بند ساروج (Ardak Band Sarooj)	59.39	36.72	1320
آق دربند (Aq Darband)	60.85	35.99	602
آل (Al)	59.66	36.71	1464
امامزاده رادکان (Emamzadeh Radkan)	59	36.8	1214
امامزاده میامی (Emamzadeh Maimey)	60.126	36.23	1039
اندرخ (Andarokh)	59.66	36.58	1207
اولنگ اسدی (Oolang Asadi)	59.8	36.25	912
بلغور (Balqoor)	58.59	36.84	1941
بهمن جان علیا (Bahmanjan Olia)	58.97	36.9	1371
پل خاتون (Pol Khatoon)	61.07	35.96	410
تلغور (Talqoor)	59.36	36.82	1563
جاغرق (Jaqarq)	59.32	36.31	1434
چکنه علیا (Chakaneh Olia)	58.47	36.84	1704
چناران (Chenaran)	59.13	36.64	1186
دهانه اخلمد (Dahaneh Akhlamad)	58.94	36.59	1467
زشک خراسان (Zoshk Khorasan)	59.19	36.33	1832
سد طرُق (Toroq Dam)	59.55	36.17	1242
سدکارده (Kardeh Dam)	59.69	36.62	1279
فریزی (Ferizi)	58.97	36.48	1631
قدیرآباد (Qadir Abad)	58.97	36.8	1195
گلمکان (Golmakan)	59.156	36.48	1440
گوش بالا (Gooshbala)	59.56	36.71	1569
مارشک (Marshk)	59.54	36.8	1830
هندل آباد (Handel Abad)	59.99	36.42	1206

$$RMSE^r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

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

$$FAR^r = \frac{F}{H+F} \quad (5)$$

$$POD^a = \frac{H}{H+M} \quad (6)$$

$$TS^r = \frac{H}{H+F+M} \quad (7)$$

که O_i داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{O} متوسط داده‌های مشاهداتی، H تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده

در پژوهش حاضر، داده‌های بارش ERA5 پس از دانلود در گام زمانی روزانه و دقت تفکیک $1^\circ \times 1^\circ \times 0.1^\circ$ برای سال‌های آبی ۹۶-۱۳۹۵ تا ۹۹-۱۳۹۸ در فرمت NetCDF^۱ از سایت یادشده در بخش قبل، با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و شاخص‌های آماری به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (1)$$

$$NSE^r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

- 4- False Alarm Ratio
- 5- Probability of Detection
- 6- Threat Score

- 1- Network Common Data Form
- 2- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 3- Root-Mean-Square Error

SCS استفاده شد. در این روش، زمان تأخیر زیرحوضه‌ها از طریق زمان تمرکز محاسبه شده توسط نرم‌افزار (رابطه ۱۱) تعیین شد.

$$T_c = 2.2 \times \left(\frac{L \times I_c}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0.3} \quad (11)$$

که در آن T_c زمان تمرکز (hr)، L طولانی‌ترین مسیر جریان (m)، I_c طول مسیر جریان از مرکز ثقل تا خروجی حوضه (m)، $Slope_{10-85}$ شیب متوسط ۱۰-۸۵٪ طولانی‌ترین مسیر جریان ($\frac{m}{m}$) می‌باشند. پس از معرفی مدل حوضه، مدل هواشناسی، مشخصه کنترل و ورود داده‌های بارش و دبی مشاهداتی به نرم‌افزار، برای دستیابی به بهترین برازش بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهده شده حوضه، اقدام به واسنجی مدل شد. بدین منظور پس از بررسی وقایع متعدد بارش و رواناب در نهایت دو واقعه مربوط به ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ جهت واسنجی و یک واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ جهت اعتبارسنجی مدل انتخاب شدند. برای ارزیابی مدل نیز شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و درصد اریبی استفاده گردیدند. موریاسی و همکاران (Moriasi et al., 2015) در مطالعه‌ای، عملکرد شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی برای مدل‌های حوضه آبریز را ارائه داده‌اند که مبنای سنجش شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش قرار گرفتند.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در حوضه آبریز کشف‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس، نرم‌افزار HEC-HMS با دو واقعه جریان مربوط به تاریخ‌های ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ برای واسنجی و یک واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ برای صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک اجرا شد و در نهایت داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در موقعیت ایستگاه زشک مربوط به تاریخ ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج مربوط به هیدروگراف خروجی آن با نتایج مربوط به ایستگاه زشک مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج مربوط به هر بخش به صورت جداگانه آمده‌است.

ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل شده ERA5 در گام زمانی روزانه

در راستای ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی، شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آمده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر

موفقیت‌آمیز توسط یک محصول بارشی معین، F تعداد موارد غیرواقعی که به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند و M تعداد رویدادهای واقعی که از دست رفته‌اند. شاخص FAR نسبت هشدار اشتباه که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده نادرست به تعداد کل رویدادهای پیش‌بینی شده است و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر می‌باشد و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر ماهواره است. POD احتمال تشخیص که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده درست به کل بارندگی‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌ها است و مقدار یک بیانگر آنست که ماهواره همه رویدادهای بارندگی را به درستی پیش‌بینی کرده‌است. TS امتیاز تهدید که اندازه‌گیری یکپارچه‌ای از عملکرد کلی را ارائه می‌دهد و مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده مطابقت کامل رویدادهای شبیه‌سازی شده با رویدادهای مشاهداتی است. پس از اعتبارسنجی داده‌های بارش ERA5، در مرحله بعد لایه مدل رقوم ارتفاعی (DEM^۱) با توان تفکیک مکانی ۱۲٫۵ متر ماهواره ALOS-PALSAR^۲ برای حوضه زشک از وبسایت vertex.daac.asf.alaska.edu دریافت گردید و سپس در نرم‌افزار HEC-HMS فراخوانی شد و با استفاده از فرامین موجود در منوی GIS پارامترهای حوضه محاسبه شدند. در ادامه جهت محاسبه میزان تلفات نفوذ از روش شماره منحنی SCS استفاده شد. در استفاده از این روش، درصد نفوذناپذیری، شماره منحنی و تلفات اولیه زیرحوضه‌ها بایستی به مدل معرفی شوند. در این راستا محاسبات مربوط به درصد نفوذناپذیری و متوسط شماره منحنی هر یک از زیرحوضه‌ها به ترتیب از طریق لایه‌های کاربری اراضی و شماره منحنی بدست آمدند. شکل‌های ۲-الف تا ج به ترتیب لایه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی و شماره منحنی را نشان می‌دهند. شایان ذکر است که میانگین شماره منحنی هر زیرحوضه از لایه شماره منحنی ساخته شده با استفاده از لایه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی محاسبه شد. در روش شماره منحنی SCS میزان بارش مازاد تجمعی در زمان t برابر است با:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (8)$$

S نگهداشت سطحی در سطح حوضه نیز از رابطه زیر قابل

محاسبه است:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{سیستم متریک}) \quad (9)$$

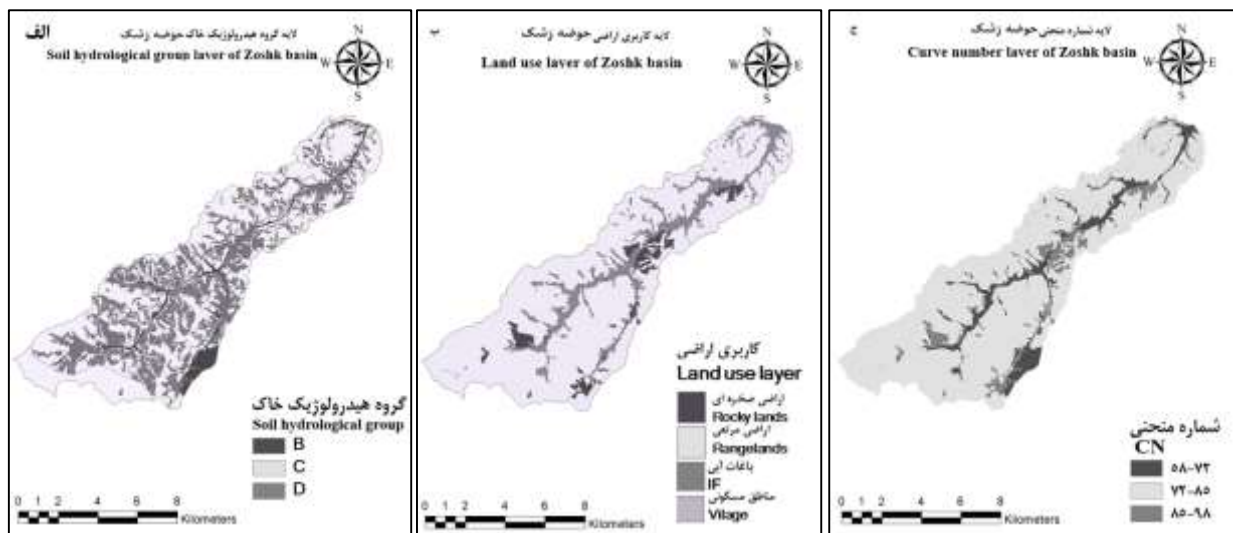
که P_e بارش مازاد تجمعی در زمان t (mm) و P بارش تجمعی در زمان t (mm) می‌باشند. تلفات اولیه I_a (mm) نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I_a = 0.2S \quad (10)$$

به منظور تبدیل بارش به رواناب نیز از روش هیدروگراف واحد

ایستگاه هندل‌آباد با ۰٫۸۲ (حداقل کارایی) بدست آمد؛ همچنین برای شاخص TS که نشان‌دهنده مطابقت رویدادهای شبیه‌سازی شده با رویدادهای واقعی بارش است، حداقل و حداکثر مقدار آن در این پژوهش مربوط به ایستگاه‌های به ترتیب هندل‌آباد و بهمن‌جان علیا بود؛ همچنین در مورد POD حداقل و حداکثر تعداد رویدادهایی که به درستی به عنوان واقعه بارش، پیش‌بینی شده، مربوط به ایستگاه‌های به ترتیب هندل‌آباد و چکنه علیا بود. به طور کلی این محصول در تخمین بارش‌های شدید دارای کم‌برآوردی بود که این نتیجه در مطالعه سینق و همکاران (Singh et al., 2021) نیز مشاهده شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند که مؤید نتایج بدست آمده از جدول ۳ می‌باشند.

NSE در محدوده کلی (۱-∞) بدست آمده و حداقل مقدار آن مربوط به ایستگاه بلغور و حداکثر مقدار آن مربوط به ایستگاه اولنگ اسدی بود. دامنه تغییرات Bias نیز نشان‌دهنده آنست که به طور کلی این محصول دارای کم‌برآوردی بوده و حداقل مقدار آن مربوط به ایستگاه چکنه علیا و حداکثر مقدار آن مربوط به ایستگاه آبقد ارداک بود. همچنین حداقل و حداکثر مقدار RMSE به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اندرخ و چکنه علیا بود. در محاسبه ضریب همبستگی نیز حداقل و حداکثر مقدار به ترتیب برای ایستگاه‌های امامزاده رادکان و پل خاتون بدست آمد. بر طبق شاخص FAR و نتایج حاصل از این جدول، محصول ERA5 حداقل تعداد وقایعی که به اشتباه، واقعه بارش پیش‌بینی کرده مربوط به ارداک بند ساروج با ۰٫۳۵ بود (حداکثر کارایی) و بیشترین تعداد وقایع به اشتباه پیش‌بینی شده مربوط به



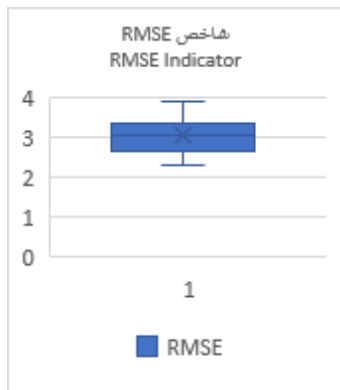
شکل ۲- الف- لایه گروه هیدرولوژیک خاک حوضه زشک؛ ب- لایه کاربری اراضی حوضه زشک؛ ج- لایه شماره منحنی حوضه زشک (دریافتی از اداره کل منابع طبیعی و آب‌خیزداری استان خراسان رضوی)

Figure 2- A- Soil hydrological group layer of Zashk basin; B- Land use layer of Zashk basin; C- Curve number layer of Zashk basin (received from the General Department of Natural Resources and Watershed Management of Khorasan Razavi Province)

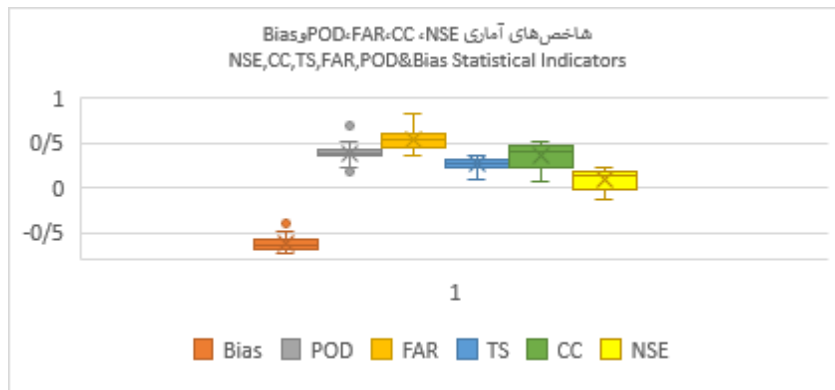
جدول ۳- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه

Table 3- Table of values of statistical indicators to evaluate ERA5 precipitation data in daily time step

	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میان Median	میانگین Mean
Bias	-0.393	-0.741	-0.646	-0.627
RMSE	2.286	3.899	3.063	3.037
POD	0.177	0.686	0.384	0.386
FAR	0.35	0.821	0.535	0.539
TS	0.098	0.352	0.281	0.263
CC	0.081	0.517	0.411	0.363
NSE	-0.132	0.232	0.142	0.097



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای شاخص RMSE
Figure 4- Box plot of RMSE indicator



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های Bias و TS، FAR، POD، NSE، CC
Figure 3- Box plot of CC, NSE, POD, FAR, TS & Bias indicators

ماه‌های آبان تا اردیبهشت بود؛ در نهایت براساس شاخص POD حداقل مقادیر بدست‌آمده مربوط به شهریور و حداکثر مقدار آن مربوط به ماه‌های مهر تا خرداد بود. شکل‌های ۵ و ۶ نیز نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند. نتایج بدست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد نامناسب داده‌های ERA5 در تشخیص وقایع بارش در ماه‌های گرم و خشک (فصل تابستان) بود و در بقیه سال عملکرد مناسب‌تری داشت. به طور کلی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی ماهانه دقت بالاتری نسبت به گام زمانی روزانه داشت.

ارزیابی هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5

پس از اعتبارسنجی داده‌های بارش ERA5، نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک در وقایع ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ مورد واسنجی و با استفاده از واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه در موقعیت ایستگاه زشک مربوط برای واقعه ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج آن با استفاده از شاخص‌های آماری NSE و PBias مورد ارزیابی قرار گرفت.

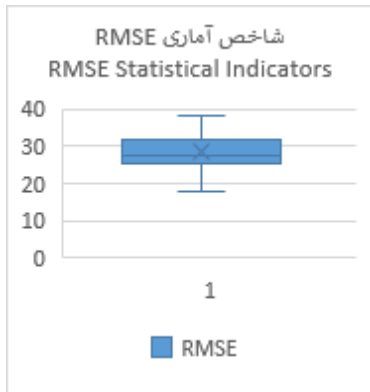
ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 در گام زمانی ماهانه

در ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی، شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ آمده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر شاخص‌های ارزیابی به مقدار ایده‌آل خود نسبت به گام زمانی روزانه، نزدیکتر شده‌اند. در ارتباط بین شاخص‌های آماری و هر یک از ماه‌ها، حداکثر مقدار شاخص NSE برای شهریور ماه بدست آمده و حداقل مقدار آن مربوط به فروردین ماه بود. حداقل مقدار Bias نیز مربوط به مردادماه و حداکثر مقدار آن مربوط به مهرماه بود. همچنین حداقل و حداکثر مقدار RMSE به ترتیب برای شهریورماه و فروردین‌ماه بدست آمد. در محاسبه ضریب همبستگی نیز حداقل و حداکثر مقدار به ترتیب مربوط به مهرماه و خردادماه بود. براساس شاخص FAR و بنابر این جدول، محصول ERA5 حداقل تعداد وقایعی که به اشتباه، بارش پیش‌بینی کرده مربوط به ماه‌های آبان تا اردیبهشت (حداکثر کارایی) و بیشترین تعداد وقایع به اشتباه پیش‌بینی شده، مربوط به شهریورماه (حداقل کارایی) بود؛ همچنین در مورد شاخص TS حداقل مقادیر بدست‌آمده برای آن مربوط به ماه‌های شهریور و حداکثر مقدار آن مربوط به

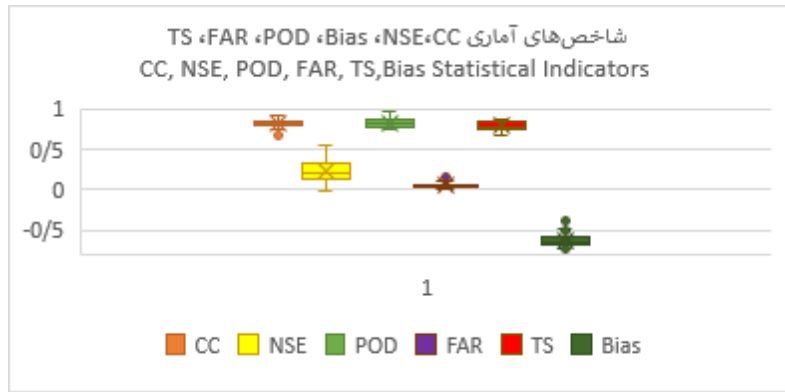
جدول ۴- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی ماهانه

Table 4- Table of values of statistical indicators to evaluate ERA5 precipitation data in monthly time step

	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میان Median	میانگین Mean
Bias	-0.39	-0.74	-0.63	-0.65
RMSE	17.85	38.27	28.37	27.67
POD	0.74	0.97	0.83	0.82
FAR	0	0.16	0.06	0.06
TS	0.68	0.88	0.79	0.78
CC	0.68	0.92	0.82	0.82
NSE	-0.02	0.55	0.23	0.2



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای شاخص RMSE
Figure 6- Box plot of RMSE indicator



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های CC, NSE, POD, FAR, TS & Bias
Figure 5- Box plot of CC, NSE, POD, FAR, TS & Bias indicators



شکل ۷- شمایی از مدل حوضه ساخته شده در HEC-HMS از حوضه آبخیز زشک
Figure 3- Scheme of basin model made in HEC-HMS from Zashk watershed

جدول ۵- جدول برخی از پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS
Table 5- Table of some parameters calculated by HEC-HMS software

نام زیرحوضه Subbasin name	مساحت (km ²) Area	طولانی‌ترین مسیر جریان (km) Longest flow path	شیب زیرحوضه Basin Slope	طولانی‌ترین مسیر ۱۰-۸۵٪ جریان Length flow path 10-85%	طولانی‌ترین مسیر جریان از مرکز ثقل تا خروجی زیرحوضه‌ها (km) Centroidal flow path length	طولانی‌ترین شیب مسیر Longest flow path slope	تراکم زهکشی Drainage density	ضریب کشیدگی Drainage coefficient
Z1	14.5	7.16	0.46	5.37	3.51	0.16	0.58	0.59
Z2	6.96	4.25	0.46	3.18	2.04	0.2	0.57	0.7
Z'1	15.83	6.12	0.49	4.59	1.86	0.17	0.72	0.73
Z3	12.02	8.68	0.5	6.51	4.44	0.13	0.62	0.45
Z'2	6.71	4.36	0.51	3.27	1.57	0.18	0.5	0.67
Z'3	8.39	4.3	0.41	3.23	1.15	0.13	0.74	0.76
Z4	9.42	6.51	0.42	4.88	2.6	0.09	0.65	0.53
Z4	2.99	3.42	0.38	2.56	1.53	0.17	0.74	0.57
Z'5	3.97	5.4	0.3	4.05	3.19	0.08	0.96	0.42
Z'5	10.13	6.72	0.35	5.04	2.96	0.09	0.72	0.53

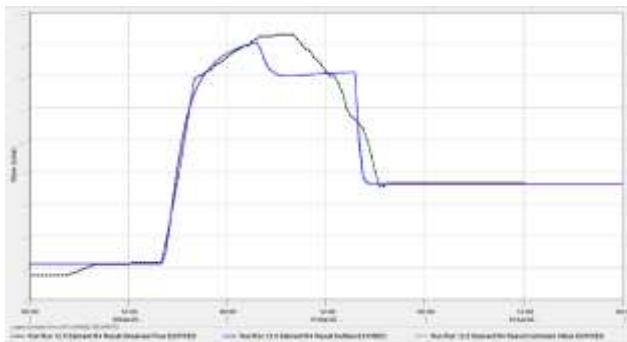
واسنجی در جدول ۶ آمده است. به منظور مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در موقعیت ایستگاه زشک، شکل‌های ۸ تا ۱۰ در ادامه ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مدل در پیش‌بینی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف، دقت کمتری داشته‌است که این مسئله به علت ورود داده‌های بارش در گام زمانی روزانه بود که به تبع آن، دقت هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی که در گام زمانی ساعتی وارد شده، کمتر بوده‌است. علت استفاده از داده‌های بارش در گام زمانی روزانه، عدم وجود بارانسنج ثابت در حوضه زشک بوده‌است. مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج نسبت به هیدروگراف مشاهداتی با اختلاف برآورد شده‌است؛ همچنین سطح زیر منحنی که نشان‌دهنده حجم می‌باشد با دقت کمتری برآورد گردیده‌است که این مسئله با نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۷ مطابقت دارد.

در این مطالعه همانطور که قبلاً بیان شد جهت محاسبه پارامترهای حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS، از منوی GIS استفاده شد. شکل ۷ شمایی از مدل حوضه ساخته‌شده در نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از منوی GIS را نشان می‌دهد. جدول ۵ نیز برخی از پارامترهای محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS را نشان می‌دهد.

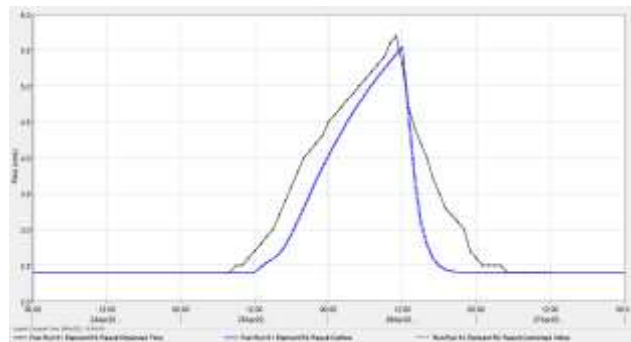
در مرحله واسنجی، دو واقعه انتخاب‌شده جهت واسنجی مدل ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ بودند که شرایط رطوبتی اولیه برای این دو واقعه به ترتیب خشک و مرطوب بود و بنابراین میزان شماره منحنی با استفاده از جدول تبدیل شماره منحنی از شرایط رطوبتی متوسط به حالت خشک یا مرطوب تغییر کردند. پس از واسنجی مدل به صورت دستی با توجه به اینکه واقعه انتخاب‌شده جهت اعتبارسنجی دارای شرایط رطوبتی اولیه مرطوب بود مقادیر شماره منحنی بهینه‌شده در حالت مرطوب برای آن به مدل وارد شد. مقادیر CN پیش و پس از

جدول ۶- مقادیر CN پیش و پس از واسنجی
Table 6- CN values before and after calibration

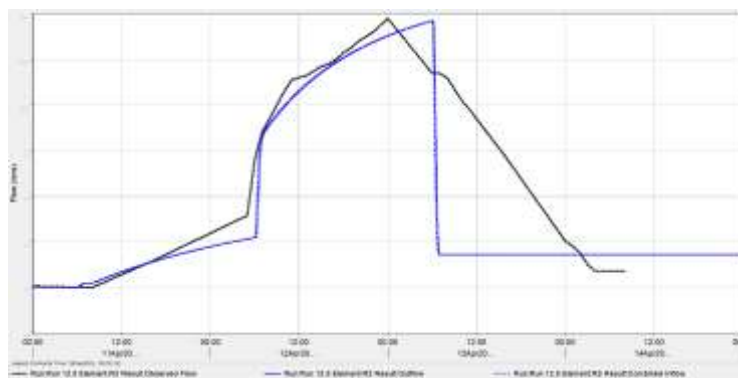
زیرحوضه Subbasin	درصد تغییرات CN			درصد تغییرات CN		
	مقادیر CN پیش از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN values before calibration for 91/1/11	مقادیر CN پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN values after calibration for 91/1/11	پیش و پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN changes Percentage before and after calibration for 91/1/11	مقادیر CN پیش از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN values before calibration for 91/2/6	مقادیر CN پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN values after calibration for 91/2/6	پیش و پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN changes Percentage before and after calibration for 91/2/6
Z1	61.5	56.5	8.13	91	87	4.4
Z2	60	55	8.33	94	90	4.2
Z1	70	65	7.14	92	88	4.3
Z3	70	65	7.14	93.5	86.5	7.4
Z'2	72	67	6.94	90.5	86.5	4
Z'3	66	61	7.57	90	86	4
Z4	64.5	64.5	0	89	81	8.9
Z4	56.5	56.5	0	93.5	75.6	19
Z'5	61.5	58	5.69	89.5	76	15



شکل ۹- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۱/۱۱ پس از واسنجی
Figure 5- Event Hydrograph 11/1/1391 Post-Calibration



شکل ۸- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۲/۶ پس از واسنجی
Figure 4- Event Hydrograph 6/2/1391 Post-Calibration



شکل ۱۰- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۹/۱/۲۳

Figure 6- Event Hydrograph 23/1/1399

جدول ۷- مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها

Table 7- Volume values and peak flow of observational and computational hydrographs with difference and percentage difference between them

	6/2/91 ۹۱/۲/۶			11/1/91 ۹۱/۱/۱۱			23/1/99 ۹۹/۱/۲۳		
	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume
هیدروگراف محاسباتی Computational hydrograph	17.62	5.6	12:00,7/2/91	76.02	16.1	7:00,12/1/91	33.22	13.7	06:00,8/1/99
هیدروگراف مشاهداتی Observational hydrograph	12.19	5.7	11:00,7/2/91	66.02	16.6	12:00,12/1/91	35.27	13.8	00:00,8/1/99
اختلاف Difference	5.43	-0.1	1	10	-0.5	5	-2.05	-0.1	6
درصد اختلاف Percentage difference	0.31	-0.02	-	0.13	-0.03	-	-0.06	-0.007	-

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی برای وقایع ۹۱/۱/۱۱، ۹۱/۲/۶ و ۹۹/۱/۲۳

Table 8- The values of Nash Sutcliffe efficiency coefficient and bias percentage for the events of 11/1/91, 2/6/91 and 23/1/99

شاخص‌های آماری Statistical indicators	۹۱/۱/۱۱ 11/1/91	۹۱/۲/۶ 6/2/91	۹۹/۱/۲۳ 23/1/999
نش ساتکلیف (NSE)	0.802	0.966	0.644
درصد اریبی (PBias)	-9.75	-1.88	-15.82

از بین پارامترهای آماری سنجش خطا نیز در این پژوهش از ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی استفاده شد که نتایج آن در جدول ۸ آمده است. طبق مطالعه موریاسی و همکاران (Moriassi *et al.*, 2015) در مورد رتبه‌بندی عملکرد شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های حوضه آبریز، نتایج مشروحه در جدول ۸ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند زیرا شاخص‌های NSE در محدوده بسیار خوب (۰٫۸-۱) و خوب (۰٫۶-۰٫۸) و PBias در محدوده بسیار خوب (PBias ≤ ±5) و خوب (±5 ≤ PBias ≤ ±10) و قابل قبول (±10 ≤ PBias ≤ ±25) قرار گرفتند. در همین جدول مقادیر منفی درصد اریبی نشان می‌دهند که مقادیر جریان شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده است که این مسئله در پژوهش خضریان نژاد و همکاران (Khezriannejad *et al.*, 2013) نیز مشاهده شده بود.

از بین پارامترهای آماری سنجش خطا نیز در این پژوهش از ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی استفاده شد که نتایج آن در جدول ۸ آمده است. طبق مطالعه موریاسی و همکاران (Moriassi *et al.*, 2015) در مورد رتبه‌بندی عملکرد شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های حوضه آبریز، نتایج مشروحه در جدول ۸ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند زیرا شاخص‌های NSE در محدوده بسیار خوب (۰٫۸-۱) و خوب (۰٫۶-۰٫۸) و PBias در محدوده بسیار خوب (PBias ≤ ±5) و خوب (±5 ≤ PBias ≤ ±10) و قابل قبول (±10 ≤ PBias ≤ ±25) قرار گرفتند. در همین جدول مقادیر منفی درصد اریبی نشان می‌دهند که مقادیر جریان شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده است که این مسئله در پژوهش خضریان نژاد و همکاران (Khezriannejad *et al.*, 2013) نیز مشاهده شده بود.

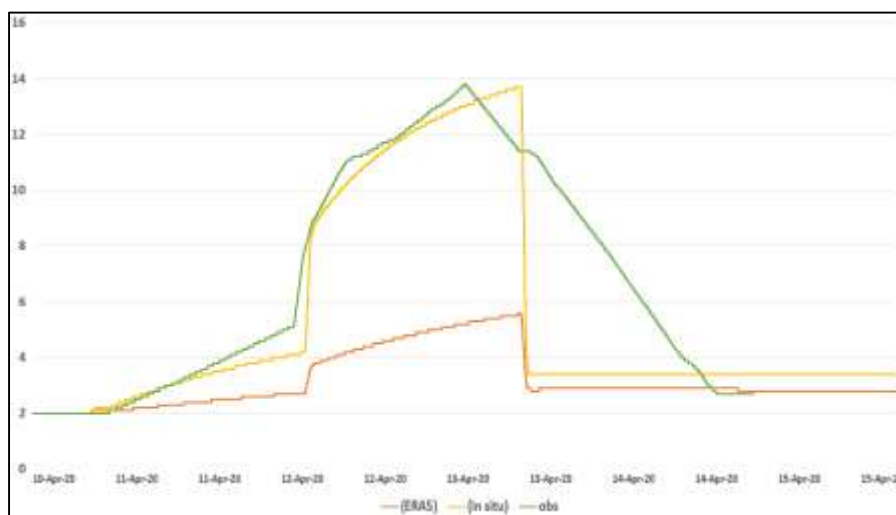
غیر قابل قبول ($NSE \leq 0.5$ و $PBias \leq \pm 25$)، نسبت به هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک، کارایی این منبع بارشی پایین می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۱۰ به دلیل کم‌برآوردی داده بارش توسط این محصول، در نرم‌افزار HEC-HMS نیز میزان دبی پیک به مقدار کمتری محاسبه شده‌است.

در پژوهش حاضر به بررسی دقت داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در حوضه زشک پرداخته شد که بدین منظور ابتدا نیاز به اعتبارسنجی داده‌های بارش این محصول در حوضه آبریز کشف‌رود بود. عملکرد این محصول در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه دارای کم‌برآوردی بود که همراستا با مطالعه ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2021) می‌باشد اما در مطالعه امجد و همکاران (Amjad et al., 2020) به طور کلی این محصول بیش‌برآوردی داشت. در نهایت دقت این محصول در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نسبت به هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک رضایت بخش نبود اما در مطالعات چامپین و همکاران (Champagne et al., 2021)، لورنزو و همکاران (Lorenzo et al., 2020)، یین و همکاران (Yin et al., 2020) و زو و همکاران (Xu et al., 2022) عملکرد این محصول قابل قبول بود. به طور کلی کم‌برآوردی این محصول در مدلسازی هیدرولوژیکی همراستا با مطالعه زو و همکاران (Xu et al., 2022) می‌باشد. مطالعات آینده می‌توانند در خصوص ارزیابی داده‌های بارش محصولات مختلف در نرم‌افزار HEC-HMS باشند. همچنین در جهت افزایش دقت این محصولات، با ترکیب آن‌ها با یکدیگر (Amjad et al., 2020) می‌توان به این مهم دست یافت.

ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5

در نهایت دقت هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۱ هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (هیدروگراف مشاهداتی)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (داده‌های بارش زمینی) و هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد. طبق این شکل، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 دارای کم‌برآوردی می‌باشد که علت آن کم‌برآورد کردن میزان بارش توسط ERA5 بوده‌است. زمان رسیدن به دبی پیک در هیدروگراف مربوط به داده‌های بارش ایستگاه زشک (زرد) و هیدروگراف مربوط به داده‌های بارش ERA5 (قرمز) با تأخیر ۶ ساعت نسبت به هیدروگراف مشاهداتی (سبز) اتفاق افتاد که علت آن می‌تواند به دلیل دقت کم داده‌های بارش باشد. عدم تطابق بازوی پایین رونده هیدروگراف‌های داده‌های بارش ایستگاه زشک و ERA5 را نشان می‌دهد. عدم برابری گام‌های زمانی داده‌های دبی و بارش بود که در بخش قبل توضیح داده شد. جدول ۹ مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالعه Moriasi و همکاران (Moriasi et al., 2015) و شاخص‌های NSE و PBias در جدول ۱۰، داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 با دارا بودن ضریب NSE و PBias در محدوده



شکل ۱۱- هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (منحنی سبز)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (منحنی زرد)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 (منحنی قرمز)

Figure 7- Flow hydrograph of flow data of hydrometric station (green lines), hydrograph of flow of precipitation data of Zoshk station (yellow lines), hydrograph of flow of precipitation data of ERA5 (red lines)

جدول ۹- مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

Table 9- Peak volume and flow values of observational and computational hydrographs with difference and percentage difference between them for observational hydrograph and simulated hydrograph from ERA5 precipitation data

	مشاهداتی Observational flow hydrograph 99/1/23			ERA5 بارش ۹۹/۱/۲۳ ERA5 rainfall 99/1/23		
	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M3 / S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ / S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume
هیدروگراف محاسباتی Computational hydrograph	33.22	13.7	06:00,25/1/99	17.87	5.6	06:00,25/1/99
هیدروگراف مشاهداتی Observational hydrograph	35.27	13.8	00:00,25/1/99	35.27	13.8	00:00,25/1/99
اختلاف Difference	-2.05	-0.1	6	17.4	-7.8	6
درصد اختلاف Percentage difference	-0.06	-0.007	-	-0.97	-1.46	-

جدول ۱۰- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

Table 10- The values of Nash Sutcliffe efficiency coefficient and bias percentage for observational hydrographs and hydrographs obtained from ERA5 precipitation data

شاخص‌های آماری Statistical indicators	هیدروگراف جریان مشاهداتی Observational flow hydrograph 23/1/99	ERA5 بارش ۹۹/۱/۲۳ ERA5 rainfall 23/1/99
کارایی نش ساتکلیف (NSE)	0.644	-0.47
درصد اریبی (PBias)	-15.82	-55.16

منابع

- Amjad, M., Yilmaz, M., Yucel, I., & Yilmaz, K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology* 584: 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>.
- Azari, H., Matkan, A.A., Shakibaa, A., & Pourali, S.H. (2009). Simulation and flood warning with hydrology models in gis and precipitation estimation through remote sensing. *Iranian Journal of Geology* 3: 39-51.
- Champagne, O., Arain, M., Wang, S., Leduc, M., & Russell, H. (2021). Interdecadal variability of streamflow in the hudson bay lowlands watersheds driven by atmospheric circulation. *Journal of Hydrology Regional Studies* 36: 100868. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100868>.
- ErfaniRahmatnia, A., Babaian, I., & Entezari, A. (2018). *Efficiency of era-interim retrieval data in simulating the observed rainfall of khorasan razavi meteorological stations*. p. 5. The Second National Conference on Meteorology of Iran, 9 May. Mashhad Ferdowsi University. (In Persian with English abstract)
- Gorjizade, A., Akhondali, A., Shahbazi, A., & Moridi, A. (2019). Comparison and evaluation of precipitation estimated by era-interim, persiann-cdr and chirps models at the upstream of maroon dam. *Iran Water Resources Research* 15: 267-279. (In Persian with English abstract)
- Hwang, S.-O., Park, J., & Kim, H.M. (2019). Effect of hydrometeor species on very-short-range simulations of precipitation using era5. *Atmospheric Research* 218: 245-256. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.008>.
- Izadi, N., Ghasemi, E., Ranjbar, A., Shamsipour, A., Fattahi, E., & Habibi, M. (2021). Evaluation of era5 precipitation accuracy based on various time scales over iran during 2000–2018. *Water* 13: 2538. <https://doi.org/10.3390/w13182538>.
- Karimi, M., Heidari, S., & Rafati, S. (2021). The trend of atmospheric water cycle components (precipitation and precipitable water) in catchments of iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 8: 33-54. (In Persian)

- 9- Khezriannejad, N., Hajjam, S., Amirhossein, M., & Ibrahim, M. (2013). Real time runoff forecasting of tire basin using quantitative precipitation forecasting of wrf model. *Journal of Climate Research* 3: 53-66. (In Persian)
- 10- Lorenzo, A., Lorini, V., Hirpa, F.A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2020). A global streamflow reanalysis for 1980–2018. *Journal of Hydrology X* 6: 100049. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>.
- 11- Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 58: 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- 12- Nazeer, A., Maskey, S., Skaugen, T., & McClain, M.E. (2022). Simulating the hydrological regime of the snow fed and glacierised gilgit basin in the upper indus using global precipitation products and a data parsimonious precipitation-runoff model. *Science of The Total Environment* 802: 149872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149872>.
- 13- Sabah, P., Junaid Nazir, K., Rohitashw, K., & Saqib Parvaze, A. (2021). Flood forecasting in the sparsely gauged jhelum river basin of greater himalayas using integrated hydrological and hydraulic modelling approach. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-461873/v1>.
- 14- Shayeghi, A., Azizian, A., & Brocca, L. (2019). The reliability of reanalysis and remotely sensed precipitation products for hydrological simulation over the sefidrood river basin in iran. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1691217>.
- 15- Singh, T., Saha, U., Prasad, V.S., & Gupta, M.D. (2021). Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (imdaa, ngfs and era5) against rainfall observations for indian region. *Atmospheric Research* 259: 105679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679>.
- 16- USACE, Hydrologic modeling system hec-hms, user's manual, technical reference manual, Washington, DC: United States Army Corps of Engineers, 2021, p. 676. [Online]. Available.
- 17- Voropay, N., Ryazanova, A., & Dyukarev, E. (2021). High-resolution bias-corrected precipitation data over south Siberia, Russia. *Atmospheric Research* 254: 105528. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>.
- 18- Xu, X., Frey, S.K., & Ma, D. (2022). Hydrological performance of era5 and merra-2 precipitation products over the great lakes basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 39: 100982. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100982>.
- 19- Yin, J., Guo, S., gu, L., Zeng, Z., Liu, D., Chen, J., Shen, Y., & Xu, C.-Y. (2020). Blending multi-satellite, atmospheric reanalysis and gauge precipitation products to facilitate hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 593. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125878>.
- 20- Yuan, X., Yang, K., Lu, H., He, J., Sun, J., & Wang, Y. (2021). Characterizing the features of precipitation for the tibetan plateau among four gridded datasets: Detection accuracy and spatio-temporal variabilities. *Atmospheric Research* 264: 105875. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105875>.