

Original Article



Iranian Remote Sensing GIS
Journal of Sensing

Effect of Digital Elevation Models Spatial Resolutions on Nash and Rosso Instantaneous Unit Hydrograph Performance (Case Study: Kasilian Watershed)

Fariba Esmaili, Mehdi Vafakhah*, Vahid Moosavi

Affiliation

*Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

ABSTRACT

Introduction and Goal: The use of digital elevation model (DEM) enables the extraction of physiographic characteristics used in Nash and Rosso instantaneous unit hydrograph (IUH) models. Therefore, the spatial resolution of the DEM is effective on the performance of Nash and Rosso IUH models. Therefore, the current research aims to evaluate the impact of DEMs including ALOS PALSAR, ASTER, SRTM and GTOPO with a spatial resolution of 12.5, 30, 90 and 1000 meters respectively and the DEM obtained from the topographic map (TOPO) of the Iran Geological Organization with a scale of 1:25000 and a spatial resolution of 10 meters was done in Nash and Rosso models in Kasilian watershed.

Material and Methods: Kasilian Watershed, with an area of about 66.43 km², is located in the north latitude of 35°58'30" to of 36°07'15" and east longitude of 53°08'44" to of 53°15'42". The watershed has a humid climate based on Domarten climatic classification and average annual rainfall of 783.4 mm. Physiographic characteristics including Horton ratios were calculated for each of the DEMs. Finally, IUH dimensions were estimated based on Nash and Rosso models for 64 rainfall-runoff events and five different DEMs.

Results and Discussion: The results showed that by reducing the spatial resolution of DEM, the evolution of the drainage network is lost, so that the maximum rank of the streamflow in TOPO and PALSAR ALOS DEMs is equal to six, and in ASTER its number is reduced to five. Only in SRTM and GTOPO, the number of streamflow ranks was significantly reduced to three. The parameters n and k are effective components in Nash and Rosso models, and in the Nash model, the amount of n was not significantly different in different DEMs. But the value of k has increased from 1.35 to 1.64 with the decrease of DEM spatial resolution. In the estimation of parameter n by Rosso's method, a constant trend is not seen in DEMs, so that in TOPO, ALOS PALSAR and ASTER, it was about six. While in SRTM, three and in GTOPO, four were estimated and the k parameter was different for each event and its value was different in different DEMs. The Nash method, the lowest and highest average relative error (RE) are related to the TOPO and GTOPO DEMs with values of 10.72% and 11.01% in the estimated runoff volume, respectively. The Rosso method, the average value of RE in the three TOPO, ALOSPALSAR and ASTER DEMs is almost similar in the estimated runoff volume. While the amount of RE in SRTM and GTOPO is higher than other DEMs. In fact, the results are close to each other due to the similar ability to extract the physiographic characteristics of the basin from these three models. Of course, it should be stated that with a small difference, the lowest amount of RE in estimating the runoff volume is related to the TOPO DEMs.

Conclusion: ASTER DEMs with lower spatial resolution compared to TOPO and PALSAR ALOS has provided an acceptable stream network. However, SRTM and GTOPO have not provided a suitable stream network. In general, with the increase in the spatial resolution of the DEM, drainage density developed more dense and real, but main stream is somewhat developed in DEMs with lower spatial resolution. Different methods have been presented to estimate the values of n and k, and in this research, in order to investigate the effect of different DEMs in the Nash method, among the different methods of estimating its parameters, the experimental method has been used. In the experimental method, the physiographic characteristics of the watershed, such as the slope, the length of the main river and the area of the basin, play the main role in estimating the peak discharge. In relation to the peak flow estimation, the Nash model performed better and in estimating the runoff volume, the Rosso model performed better using the TOPO DEMs. In fact, it can be stated that the estimation of the peak discharge in the Nash method based on the experimental method has provided acceptable results in this watershed. according to the necessity of estimating the peak discharge in determining the dimensions of the IUH in the watershed to accurately simulate and control future floods, using the results of the present study can be of great help.

Keywords: Flood, Mazandaran, Peak discharge, Spatial resolution, Spatial scale.

Citation:

Esmaili, F., Vafakhah, M., Moosavi, V., *Effect of Digital Elevation Models Spatial Resolutions on Nash and Rosso Instantaneous Unit Hydrograph Performance (Case Study: Kasilian Watershed)*, Iran J Remote Sens GIS. 17(3): 55-74.





تأثیر دقت مکانی مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) در عملکرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش و روسو (مطالعه موردی: حوضه آبخیز معرف کسلیان)

فریبا اسماعیلی، مهدی وفاخواه^۱، وحید موسوی

سمت

*گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

چکیده

سابقه و هدف: استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج ویژگی‌های فیزیوگرافی مورد استفاده در مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش و روسو را میسر می‌سازد؛ بنابراین دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع در عملکرد مدل‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش و روسو مؤثر است. از این رو پژوهش حاضر، با هدف ارزیابی تأثیر مدل‌های رقومی ارتفاع، شامل ASTER، ALOS PALSAR، SRTM و GTOPO، به ترتیب با دقت ۱/۲، ۳۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متر و مدل رقومی ارتفاع حاصل از نقشه توپوگرافی (TOPO) سازمان زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و دقت ۱۰ متر در مدل‌های نش و روسو، در حوضه آبخیز کسلیان انجام شد.

مواد و روش‌ها: حوضه آبخیز کسلیان، با مساحت حدود ۶۶/۴۳ کیلومتر مربع، در جنوب شرقی استان مازندران و در عرض شمالی ۳۰° ۳۵' ۵۸" تا ۳۶° ۰۷' ۱۵" و طول شرقی ۴۴° ۰۸' ۴۴" تا ۵۳° ۱۵' ۴۲" قرار دارد. این حوضه، بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، آب‌وهوایی مرطوب دارد و بارندگی متوسط آن ۷۸۳/۴ میلی‌متر است. به منظور دستیابی به هدف پژوهش، ویژگی‌های فیزیوگرافی، شامل نسبت‌های هورتونی، برای هر DEM محاسبه شد. در نهایت، ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای بر اساس مدل‌های نش و روسو، برای ۶۴ واقعه بارش-رواناب و پنج DEM متفاوت، تخمین زده شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد، با کاهش دقت DEM، تکامل شبکه آبراهه از دست می‌رود؛ به گونه‌ای که حداکثر رتبه آبراهه در مدل‌های TOPO و ALOS PALSAR برابر با ۶ شد و در ASTER، تعداد آن به ۵ کاهش یافت. فقط در SRTM و GTOPO تعداد رتبه‌های آبراهه تقلیلی چشمگیر داشت و به ۳ رسید. پارامترهای k و n مؤلفه‌های مؤثر در مدل‌های نش و روسو هستند؛ در مدل نش، میزان n در DEM‌های متفاوت اختلاف معنی‌داری نداشت اما مقدار k ، با کاهش دقت DEM، از ۱/۳۵ به ۱/۶۴ افزایش یافت. در برآورد پارامتر n به روش روسو، روند ثابتی در مدل‌های رقومی ارتفاع دیده نشد؛ به طوری که در TOPO، ALOS PALSAR و ASTER حدود ۶ به دست آمد اما این مقدارها، در SRTM، ۳ و در GTOPO، ۴ برآورد شد و پارامتر k برای هر رویداد متفاوت و مقدار آن، در DEM‌های گوناگون، متفاوت بود. در حجم رواناب برآوردی روش نش، کمترین و بیشترین متوسط درصد خطای نسبی به ترتیب به مدل‌های TOPO و GTOPO، با مقادیر ۱۰/۷۲ و ۱۱/۰۱٪، اختصاص دارد. در مورد حجم رواناب تخمینی با استفاده از روش روسو، مقدار متوسط درصد خطای نسبی در سه مدل TOPO، ALOS PALSAR و ASTER تقریباً مشابه به دست آمده؛ در حالی که میزان خطا در SRTM و GTOPO بیشتر از سایر مدل‌های رقومی ارتفاع برآورد شده است. در واقع، به دلیل توانایی مشابه استخراج ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه از این سه مدل، نتایج نزدیک‌به‌هم به دست آمده است. البته باید بیان کرد که با تفاوت کم، کمترین میزان خطا در تخمین حجم رواناب با استفاده از مدل TOPO حاصل شده است.

نتیجه‌گیری: مدل رقومی ارتفاع ASTER با دقت پایین‌تر، در قیاس با TOPO و ALOS PALSAR، شبکه آبراهه مورد قبولی نتیجه داده؛ در صورتی که SRTM و GTOPO شبکه آبراهه مطلوبی به دست ندادند. به طور کلی، با افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM، تراکم شبکه آبراهه مطلوب‌تر می‌شود اما آبراهه اصلی در DEM‌های با دقت کمتر تاحدودی توسعه یافته است. با تخمین صحیح مقادیر k و n از طریق روش نش و روسو، می‌توان کارایی هر دو روش را در مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب افزایش داد. روش‌های متفاوتی برای تخمین مقادیر k و n مطرح شده است؛ در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر مدل‌های رقومی ارتفاع گوناگون در روش نش، روش تجربی تخمین پارامترها از بین شیوه‌های متفاوت انتخاب شد. در روش تجربی، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبخیز، از جمله شیب و طول آبراهه اصلی و مساحت حوضه، نقش اصلی را در تخمین دبی اوج دارند. در مورد تخمین دبی اوج، مدل نش و در تخمین حجم رواناب، مدل روسو با استفاده از مدل TOPO عملکرد بهتری داشت. در واقع، می‌توان بیان کرد تخمین دبی اوج در روش نش بر اساس روش تجربی، در این حوضه آبخیز، نتایج مورد قبولی دربر داشته است. با توجه به ضرورت برآورد دبی اوج در تعیین ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای در حوضه آبخیز، به منظور شبیه‌سازی دقیق و کنترل سیلاب‌های آتی، استفاده از نتایج پژوهش حاضر می‌تواند کمک شایانی کند.

واژه‌های کلیدی: دبی اوج، سیلاب، قدرت تفکیک مکانی، مازندران، مقیاس مکانی.

استناد:

اسماعیلی، ف.، وفاخواه، م.، موسوی، و.، تأثیر دقت مکانی مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) در عملکرد هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش و روسو (مطالعه موردی: حوضه آبخیز معرف کسلیان)، نشریه سنجش از دور و GIS ایران، سال ۱۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴: ۵۵-۷۴.



۱- مقدمه

سیلاب یکی از پدیده‌های طبیعی است که در طول سال‌های اخیر، خسارات جانی و مالی فراوانی را در بسیاری از کشورها بر جای گذاشته است. با افزایش ارتفاع سیل در خلال وقوع آن، سطح تأثیر و میزان خسارت سیل افزایش می‌یابد. اولین مؤلفه‌ای که در بررسی سیل مدنظر قرار می‌گیرد دبی حداکثر سیلاب است (Vafakhah & Moghadamia, 2017) و برای این منظور، هیدروگراف‌ها توسعه یافتند. یکی از روش‌های متداول، در پیش‌بینی هیدروگراف سیل ناشی از بارش‌های مشخص در حوضه آبخیز، استفاده از هیدروگراف واحد است. استفاده از هیدروگراف واحد را اولین بار شرمن^۱ (۱۹۳۲) پیشنهاد کرد. تهیه هیدروگراف واحد حوضه آبخیز، برای تداوم‌های گوناگون، از اقدامات اساسی در هیدرولوژی محسوب می‌شود. نظریه هیدروگراف واحد لحظه‌ای را کمیته مهندسی بوستون (۱۹۳۰) مطرح کرد؛ این نظریه بیانگر توزیع رواناب سطحی حاصل از یک واحد بارش مازاد است که به صورت آنی و لحظه‌ای در حوضه آبخیز اتفاق افتاده باشد. این هیدروگراف تک‌اوجی است و مقدار آن، برای هر حوضه آبخیز، واحد است (Ramirez, 2000; Alizadeh, 2014). هیدروگراف واحد لحظه‌ای برای هر حوضه آبخیز منحصر به فرد است و شناسنامه آن حوضه محسوب می‌شود. این هیدروگراف فقط با داشتن ویژگی‌های فیزیوگرافی و ژئومورفولوژیکی حوضه (بدون نیاز به اطلاعات درباره بارندگی و مستقل از زمان) به دست می‌آید و با کمترین داده، قادر به پیش‌بینی هیدروگراف سیل با دقت مورد قبول است (Alizadeh, 2014). نبود هیدروگراف واحد و دسترسی نداشتن به آن، به دلیل نبود و یا کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری در مناطق سیل‌خیز ایران و جهان، یکی از معضلات اساسی در مدیریت و کنترل سیلاب شمرده می‌شود. مدل رقمی ارتفاع نمایش گرافیکی از توپوگرافی حوضه آبخیز است (Zheng et al., 2018). توانایی مدل‌های هیدرولوژیکی در ارائه و برآورد فرایندها و متغیرهای هیدرولوژیکی، مانند رواناب،

معمولاً به دقت مکانی داده‌های ورودی مدل بستگی دارد و هیدرولوژیست‌ها اغلب سعی دارند تأثیر DEM را در مدل‌های هیدرولوژیکی ارزیابی کنند (Xu et al., 2021; Reddy & Reddy, 2015). باین حال پژوهش‌های انجام‌شده به‌ندرت مقیاس مکانی داده‌های ورودی را در شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی، مورد توجه قرار داده‌اند؛ در حالی که توجه به این موضوع، در پژوهش‌های گوناگون و شرایط متفاوت هیدرولوژیکی، ضرورت دارد (Chaubey et al., 2005; Chaplot, 2005). درحقیقت، داده‌های ورودی مدل منابع اولیه خطا در برآورد متغیرهای هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند (Shen et al., 2013). مدل‌های متعددی در زمینه هیدروگراف واحد لحظه‌ای توسعه پیدا کرده‌اند. برخی از این روش‌ها مبتنی بر ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبخیزند و از DEM تأثیری غیرمستقیم می‌پذیرند (De Moura et al., 2021). از جمله این مدل‌ها، می‌توان به روش‌های نش و روسو^۲ اشاره کرد. نش (۱۹۵۷)، براساس مفهوم هیدروگراف واحد لحظه‌ای، روشی پیشنهاد کرد که به نام روش مخزن خطی شناخته شده است. در این روش، حوضه آبخیز به منزله سیستمی با n منبع خطی سری، با مشخصات ذخیره S و ثابت ذخیره k معرفی می‌شود. روسو (۱۹۸۴) نیز پارامترهای مدل گامای دوپارامتری نش (۱۹۵۴) را به صورت تابعی از نسبت‌های هورتون معرفی و تابع هیدروگراف واحد لحظه‌ای روسو (گاما) را مطرح کرد؛ وی، برای این کار، مقادیر دبی و زمان اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک را با توزیع گاما برازش داد. در پژوهش‌های گوناگون، به‌منظور محاسبه ضرایب k و n در مدل نش، از روش‌های متعددی استفاده شده است؛ مانند روش ممان‌ها (Singh & Singh, 1988)، زمان تا اوج- زمان تا عطف،

1. Sherman

2. Nash & Rosso

نش و روسو، پژوهش‌های اندکی انجام شده است؛ در صورتی که پارامترهای این دو هیدروگراف به DEM وابسته است و می‌توان آنها را به‌منزله منابع اولیه خطا، در برآورد متغیرهای هیدرولوژیکی استفاده کرد. بنابراین هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر دقت مدل رقومی ارتفاع، شامل SRTM، ALOS PALSAR، ASTER و GTOPO به ترتیب، با دقت ۱۲/۵، ۳۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متر و مدل رقومی ارتفاع حاصل از نقشه توپوگرافی (TOPO) با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و دقت ۱۰ متر در هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای نش و روسو است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز کسلیان با مساحت حدود ۶۶/۴۳ کیلومترمربع در جنوب‌شرق استان مازندران، در عرض شمالی ۳۰' ۵۸' ۳۵" تا ۱۵' ۰۷' ۳۶" و طول شرقی ۴۴' ۰۸' ۵۳" تا ۴۲' ۱۵' ۵۳"، در شهرستان سوادکوه واقع شده است. حداکثر، حداقل و ارتفاع متوسط حوضه به ترتیب، ۳۱۷۴، ۱۱۰۰ و ۱۶۷۲ متر است. متوسط شیب حوضه ۱۵/۸٪، متوسط شیب آبراهه اصلی ۱۳٪ و طول آبراهه اصلی ۱۶/۵ کیلومتر است. این حوضه، براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، آب‌وهوایی مرطوب دارد و بارندگی متوسط در آن ۷۸۳/۴ میلی‌متر است. دو ایستگاه کليما تولوژی و ده ایستگاه باران‌سنجی، به‌علاوه یک ایستگاه هیدرومتری، در حوضه آبخیز کسلیان وجود دارد (Janizadeh & Vafakhah, 2021).

۲-۲- گردآوری اطلاعات پایه

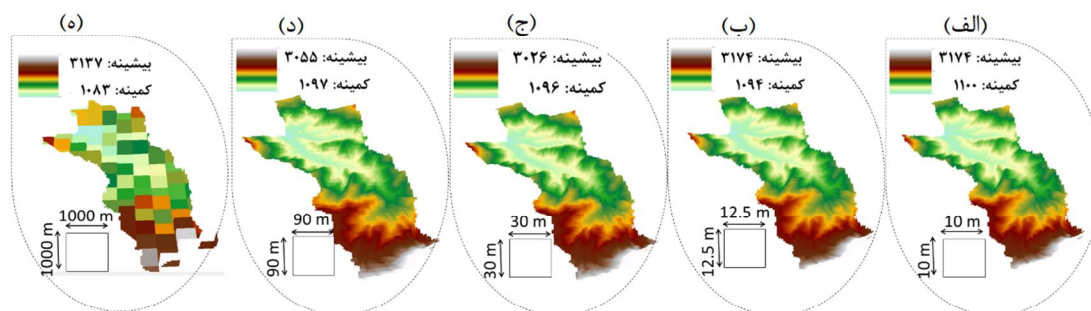
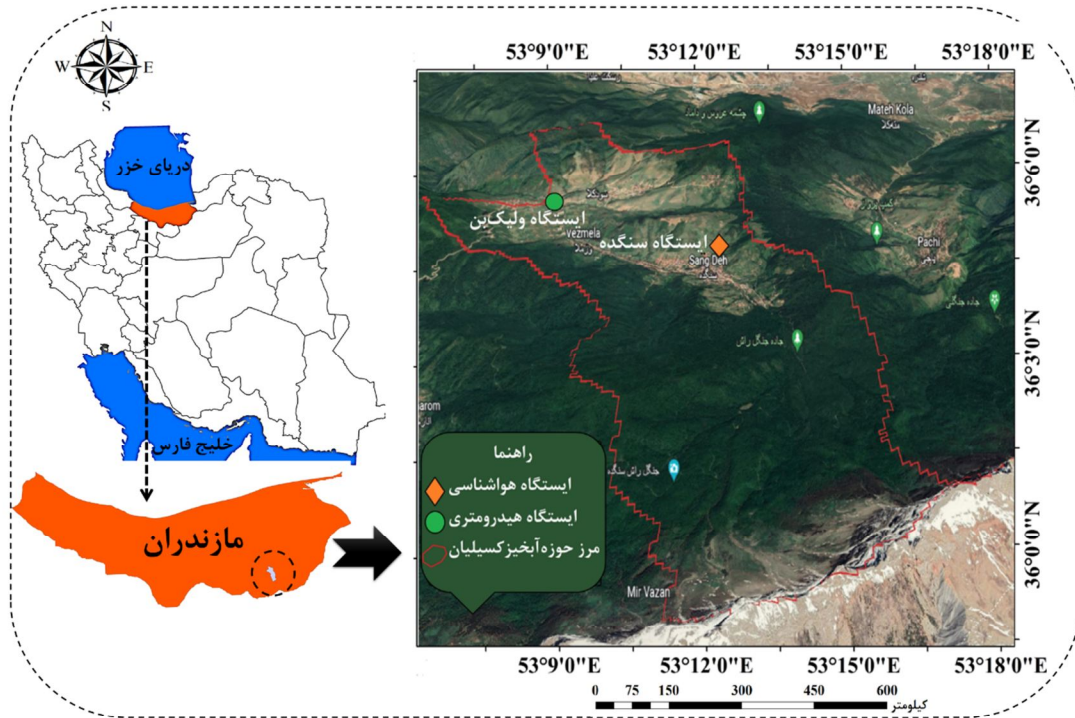
نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (دارای دقت ۱۰×۱۰ متر) از سازمان نقشه‌برداری کشور دریافت و DEM حاصل از آن استخراج شد (TOPO). مدل‌های

روش بونیا^۱ و همکاران (۲۰۰۴)، روش ترسیمی هان^۲ (۱۹۹۴) و روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی (Ahmad, 2010). استفاده از روش تجربی نش (Khanmohammadi & Behmanesh, 2020)، برای محاسبه این ضرایب، در پژوهشی مشاهده نشده است. به‌طور کلی، ارزیابی مدل نش و روسو برای تخمین هیدروگراف سیل در مناطق متفاوت ایران کارآیی مطلوبی داشته است (Zakizadeh et al., 2015). مطالعات دیگر روی این دو مدل، برای بررسی برخی دقت‌های مدل رقومی ارتفاع، نشان می‌دهد که در صورت بزرگ نبودن ابعاد پیکسل‌های DEM، این مدل‌ها نتایج مطلوبی خواهند داشت (Yao et al., 2022; De Moura et al., 2021). در این زمینه، اسماعیلی^۳ و همکاران (۲۰۲۳b) مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک را تحت تأثیر مدل‌های گوناگون DEM، در حوضه آبخیز امامه، ارزیابی کردند. نتایج نشان داد استفاده از مدل TOPO در هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک نتایج مطلوبی دارد. این محققان اثر DEM را در عملکرد هیدروگراف‌های ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک نیز بررسی کردند. طبق نتایج پژوهش آنها، هر دو هیدروگراف با مدل‌های TOPO و GTOPO به ترتیب، بهترین و بدترین کارایی را داشتند. گنیه^۴ و همکاران (۲۰۲۳) مدل‌های SRTM، ASTER و CARTOSAT در تولید پروفیل طولی رودخانه را مقایسه کردند. نتایج این تحقیق گویای کارایی بیشتر مدل‌های ASTER و SRTM بود. بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، با گسترش فنون سنجش از دور، نسخه‌های متنوعی از DEM در مقیاس‌های جهانی و محلی توسعه یافته‌اند. از دیگر سو حساسیت بالای بسیاری از مدل‌های شبیه‌ساز و پیش‌بینی‌کننده متغیرهای محیطی، از جمله متغیرهای هیدرولوژیک، در برابر لایه DEM به‌منزله متغیر ورودی اصلی، ضرورت بررسی این ورودی مهم و پژوهش درباره آن را دوچندان می‌کند. این درحالی است که ظاهراً، در مورد تأثیر مقیاس‌های گوناگون مدل رقومی ارتفاعی در روش‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای

1. Bhunya
2. Haan
3. Esmaeili
4. Ganie

ایستگاه‌های مورد نظر و همچنین داده‌ها، در زمینه سیلاب و رگبار حوضه آبخیز کسلیان، از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان مازندران دریافت شد.

رقومی ارتفاع ALOS PALSAR^۱ (با دقت مکانی ۳۰×۳۰ متر)، ASTER^۲ (با دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر)، SRTM^۳ (دارای دقت مکانی ۹۰×۹۰ متر)،



شکل ۱. موقعیت مکانی حوضه آبخیز کسلیان در ایران و مدل‌های رقومی ارتفاع متفاوت

1. <https://search.asf.alaska.edu>
2. <https://earthexplorer.usgs.gov>
3. <https://srtm.csi.cgiar.org>

در این معادله، n تعداد مخازن، k ضریب ذخیره در هر مخزن (برحسب زمان)، q عمق رواناب در واحد زمان در واحد باران مؤثر (با بعد عکس زمان)، $\Gamma(n)$ تابع گاما و t زمان است.

برای تخمین مقادیر n و k در مدل نش، پژوهشگران شیوه‌های گوناگونی را پیشنهاد کرده‌اند؛ در این پژوهش، به منظور بررسی تأثیر DEM در هیدروگراف سیلاب، روش تجربی نش به کار رفته است. روش تجربی نش: این محقق، براساس مطالعاتی در برخی حوضه‌های آبخیز انگلستان، معادلاتی را پیشنهاد کرد. در این شیوه، پارامترهای n و k با استفاده از ویژگی‌های حوضه آبخیز، طبق روابط (۲) و (۳) برآورد می‌شود (Safavi, 2006).

$$n = 2.29L^{0.1} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$k = \frac{1.2A^{0.3}}{L^{0.1}S^{0.3}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در معادلات (۲) و (۳)، L طول آبراهه اصلی (کیلومتر)، A مساحت حوضه (کیلومتر مربع) و S شیب حوضه است.

۲-۶- هیدروگراف واحد لحظه‌ای روسو

روسو (۱۹۸۴) پارامترهای مدل گامای دوپارامتری نش (۱۹۵۴) را طبق روابط (۴) تا (۶) مطرح کرد.

$$h_t = \frac{1}{k\Gamma(\alpha)} \left(\frac{t}{k}\right)^{\alpha-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$K = 0.7 \left(\frac{R_B}{R_B - R_L}\right)^{0.48} \cdot L \cdot \Omega \cdot V^{-1} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$N = 3.29 \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.78} \cdot R_L^{0.07} \quad \text{رابطه (۶)}$$

در این سه معادله، h_t مؤلفه آب‌نمود واحد لحظه‌ای گاما (بر ساعت)، K پارامتر مقیاس (ساعت)، α پارامتر شکل، R_B نسبت انشعاب، R_A نسبت مساحت، R_L نسبت طول و V پارامتر سرعت است.

۲-۷- ارزیابی کارایی مدل نش و روسو

برای مقایسه و ارزیابی کارایی مدل نش و روسو در DEMهای متفاوت، شاخص‌های آماری خطا، شامل

۲-۳- تعیین نسبت‌های ژئومورفولوژیکی هورتون

پس از استخراج شبکه آبراهه از مدل‌های رقومی ارتفاع، براساس سیستم استرال شبکه آبراهه‌ها رتبه‌بندی شد و سپس، به منظور محاسبه مساحت تحت پوشش آبراهه‌های هر رتبه، از افزونه ArcHydro در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. پس از آن، تعداد و طول و مساحت آبراهه‌های هر رده، برای محاسبه نسبت‌های هورتونی مانند نسبت مساحت، نسبت انشعاب و نسبت طول در هریک از دقت‌ها و مقیاس محاسبه شد.

۲-۴- استخراج هیدروگراف سیلاب

داده‌های سیلاب و رگبار مختص حوضه آبخیز کسلیان (از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۹۹) بررسی شد. برای انتخاب هیدروگراف‌های سیلاب، هیدروگراف‌های سیلاب منفرد (دارای بارش متناظر) که دقت و صحتی بیشتر از دیگر سیلاب‌ها داشتند و در شرایط برفی نبودند، مدنظر قرار گرفت؛ در نهایت، ۶۴ رویداد انتخاب شد. سپس مقدار بارندگی (میلی‌متر)، مدت بارندگی (ساعت)، شاخص فی (ϕ)، مقدار بارندگی مؤثر (میلی‌متر)، مدت زمان بارندگی مؤثر (ساعت)، زمان تا اوج (ساعت)، حجم رواناب (مترمکعب) و دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه) برای رویدادهای انتخابی محاسبه شد. همچنین دبی پایه هیدروگراف‌های سیلاب به روش خط مستقیم، مطابق با پژوهش وفاخواه^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، جدا شد. سپس ارتفاع رواناب مستقیم و هایتوگراف بارش مؤثر متناظر هر هیدروگراف سیلاب تعیین شد. برای تعیین هایتوگراف بارش مؤثر، از شاخص فی به روش سعی و خطا استفاده شد.

۲-۵- هیدروگراف واحد لحظه‌ای نش

نش هیدروگراف واحد لحظه‌ای را براساس روندیابی لحظه‌ای جریان ورودی در مخازن خطی فرضی، به صورت رابطه (۱) مطرح کرد (Nash, 1957).

$$q_n = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

1. Vafakhah

هیدروگراف واحد لحظه‌ای به‌روش‌های نش و روسو، ابتدا شبکه آبراهه حوضه آبخیز کسلیان با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.7، برای هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاع، ترسیم و براساس روش استرالر شبکه آبراهه رتبه‌بندی شد. در نهایت، مساحت آبخیز بالادست هر یک از آبراهه‌ها در هر DEM به دست آمد (شکل ۲) و شاخص‌های توپوگرافی و پس از آن، نسبت‌های هورتونی برای هر یک از DEM‌ها، مطابق جدول ۱، استخراج شد. در شکل ۲ نیز مشخص است که حداکثر رتبه آبراهه در DEM‌های TOPO و ALOS PALSAR برابر با ۶ شده و تعداد آن، در ASTER، به ۵ کاهش یافته است. تعداد رتبه‌های آبراهه صرفاً در SRTM و GTOPO تقلیل شایان ملاحظه‌ای یافته و به ۳ رسیده است. به‌طور کلی، با افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM، تراکم شبکه آبراهه مطلوب‌تر می‌شود؛ این نکته با نتایج پژوهش کاویان و محمدی^۱ (۲۰۱۹) نیز هم‌خوانی دارد.

درصد خطای نسبی (%RE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) به کار رفت (روابط (۷) تا (۹)).

$$R^2 = \left(\frac{\sum (X_i - \bar{X})(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})^2}} \right)^2 \quad \text{رابطه (۷)}$$

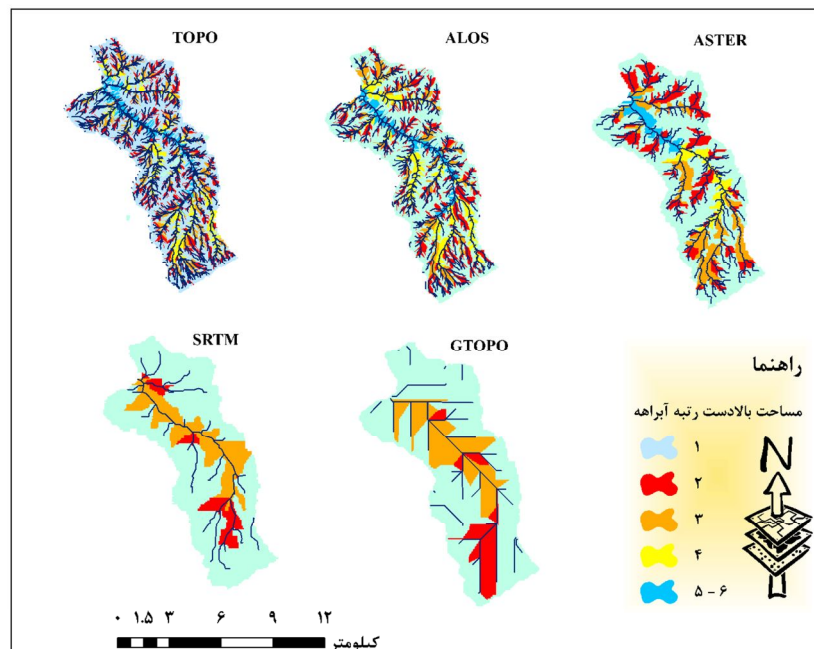
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X}_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\%RE = \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right| \times 100 \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این معادلات، X_i سری داده‌های مشاهداتی، \bar{X} میانگین سری داده‌های مشاهداتی، \hat{X}_i سری داده‌های تخمینی، $\bar{\hat{X}}$ میانگین سری داده‌های تخمینی، N تعداد داده‌ها و i متغیر آم است.

۳- نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، با هدف اجرای مدل‌های نش و روسو، از ۶۴ واقعه بارش-رواناب در حوضه آبخیز کسلیان استفاده شد. به‌منظور محاسبه ابعاد



شکل ۲. مساحت تحت پوشش آبراهه‌های هر رتبه در مدل‌های رقومی ارتفاع متفاوت در حوضه آبخیز کسلیان

جدول ۱. شاخص‌های توپوگرافی و نسبت‌های هورتونی شبکه آبراهه حاصل از پنج مدل رقومی ارتفاع، در حوضه آبخیز کسلیان

مدل رقومی ارتفاع	رتبه آبراهه	تعداد آبراهه‌ها	طول آبراهه (km)	متوسط طول آبراهه (km)	مساحت آبخیز بالادست (km ²)	متوسط مساحت آبخیز بالادست (km ²)	نسبت انشعاب	نسبت طول	نسبت مساحت
TOPO	۱	۱۱۱۳	۲۱۳/۶	۰/۱۹	۴۱/۸۹	۰/۰۴			
	۲	۲۱۲	۸۷/۳۶	۰/۴۱	۱۰/۹۲	۰/۰۵			
	۳	۴۳	۴۱/۰۱	۰/۹۵	۵/۸۹	۰/۱۴	۴/۱۶	۱/۹۶	۲/۱۹
	۴	۱۳	۳۲/۸۴	۲/۵۳	۵/۸۲	۰/۴۵			
	۵	۳	۹/۵۲	۳/۱۷	۱/۵۹	۰/۵۳			
	۶	۱	۴/۵۵	۴/۵۵	۱/۳۲	۱/۳۲			
ALOS PALSAR	۱	۶۰۹	۱۵۰/۵۲	۰/۲۴	۴۰/۱۴	۰/۰۷			
	۲	۱۳۵	۶۸/۶۶	۰/۵۱	۱۱/۵۷	۰/۰۹			
	۳	۲۷	۳۰/۹۴	۱/۱۴	۶/۲۳	۰/۲۳	۳/۸۴	۱/۸۵	۲
	۴	۱۰	۲۳/۲۶	۲/۳۳	۶/۳۵	۰/۶۴			
	۵	۲	۷/۴۱	۳/۷۱	۱/۵۵	۰/۷۸			
	۶	۱	۴/۸۷	۴/۸۷	۱/۵۹	۱/۵۹			
ASTER	۱	۱۴۷	۸۵/۶۹	۰/۵۸	۴۱/۷۹	۰/۲۷			
	۲	۳۰	۳۱/۵۴	۱/۰۵	۱۰/۸۹	۰/۳۶			
	۳	۹	۲۵/۳۷	۲/۸۲	۹/۱۳	۱/۰۱	۳/۶۸	۱/۷۹	۱/۸۰
	۴	۲	۸/۲	۴/۱	۳/۱۴	۱/۵۷			
	۵	۱	۴/۹۶	۴/۹۶	۲/۴۸	۲/۴۸			
SRTM	۱	۱۸	۳۱/۸۳	۱/۷۷	۵۱/۱۴	۲/۸۴			
	۲	۵	۶/۷۴	۱/۳۵	۴/۵۸	۰/۹۲	۴/۳	۴/۱۷	۶/۵۵
	۳	۱	۱۰/۲۱	۱۰/۲۱	۱۱/۷۱	۱۱/۷۱			
GTOPO	۱	۲۵	۴۰/۶۸	۱/۶۳	۴۷/۷۲	۱/۹۱	۵/۱۲	۲/۹۲	۴/۱۷
	۲	۴	۷/۶	۱/۹	۶/۸۹	۱/۷۲			
	۳	۱	۸/۸۷	۸/۸۷	۱۲/۸۲	۱۲/۸۲			

نتایج روش نش نیز نشان می‌دهد در مقدار n تغییر معنی‌داری مشاهده نشد و در مورد پارامتر k ، باید بیان کرد که با کاهش دقت مدل رقومی ارتفاع، مقدار آن از $۱/۳۵$ به $۱/۶۴$ ساعت افزایش یافته است. این بدان معنی است که زمان ذخیره در مخزن افزایش پیدا کرده و در مسیر حرکت آب، تأخیر رخ داده است. در روش روسو، پارامتر n در TOPO، ALOS PALSAR و ASTER حدود ۶ به دست آمد؛ این مقدار در SRTM، ۳ و در GTOPO، ۴ برآورد شده است (جدول ۲). از آنجاکه تراکم شبکه آبراهه در TOPO، ALOS

را می‌توان به خوبی تشخیص داد، در برآورد پارامتر n ، روند ثابتی در DEM دیده نمی‌شود؛ بنابراین نسبت‌های هورتونی نزدیک به هم محاسبه شده و همین نکته سبب تخمین مشابه مقادیر پارامتر n شده است. همچنین با توجه به اینکه پارامتر n متأثر از نسبت‌های هورتونی است، مقدار k در DEM‌های گوناگون تفاوت دارد زیرا، در این روش، مقدار k از سرعت آب در رودخانه تأثیر می‌پذیرد و به‌طبیع، در رویدادهای گوناگون، متفاوت است.

متوسط درصد خطای نسبی در سه مدل TOPO، ALOSPALSAR و ASTER تقریباً مشابه به دست آمد؛ در صورتی که میزان خطا در SRTM و GTOPO بیشتر از سایر مدل‌های رقومی ارتفاع برآورد شد. در واقع، به دلیل توانایی مشابه استخراج ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه از این سه مدل، نتایج به هم نزدیک بود. البته باید بیان کرد که با تفاوت اندک، کمترین میزان خطا در تخمین حجم رواناب به مدل TOPO تعلق دارد.

در جدول‌های ۳ تا ۶، حجم رواناب تخمینی و درصد خطای نسبی آن با استفاده از روش نش و روسو مشاهده می‌شود؛ در مورد حجم رواناب برآوردی با روش نش، کمترین و بیشترین متوسط درصد خطای نسبی به ترتیب، به مدل‌های TOPO و GTOPO با مقادیر ۱۰/۷۲ و ۱۱/۰۱٪ اختصاص دارد و اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۳) نیز به نتایجی مشابه دست یافته‌اند. در مورد حجم رواناب تخمینی با روش روسو، مقدار

جدول ۲. متوسط مقادیر n و k در حوضه آبخیز کسلیان

GTOPO		SRTM		ASTER		ALOS PALSAR		TOPO		Dem
k	n	k	n	k	n	k	n	k	n	پارامتر
۱/۶۴	۳	۱/۴۲	۳	۱/۳۶	۳/۰۴	۱/۳۶	۳/۰۲	۱/۳۵	۳/۰۳	نش
۱/۶۵	۴/۱۶	۲/۷۴	۲/۶۲	۰/۵۹	۵/۹۶	۰/۶۲	۵/۷۱	۰/۶	۵/۶۹	روسو

جدول ۳. حجم رواناب تخمینی (هزار مترمکعب) در مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع حاصل از روش نش

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
33/61	33/61	33/61	33/61	33/61	1
53/80	53/79	53/78	53/78	53/78	2
33/63	33/62	33/61	33/61	33/61	3
60/44	60/49	60/49	60/48	60/48	4
53/81	53/79	53/78	53/78	53/78	5
22/42	22/97	23/09	23/11	23/12	6
29/35	29/84	29/94	29/95	29/96	7
59/16	61/31	61/81	61/87	61/92	8
147/98	147/92	147/89	147/89	147/89	9
40/48	41/95	42/29	42/33	42/37	10
201/59	201/66	201/64	201/64	201/64	11
80/96	83/90	84/58	84/66	84/73	12
26/90	26/89	26/89	26/89	26/89	13
33/61	33/61	33/61	33/61	33/61	14
16/76	17/97	18/30	18/34	18/37	15
73/99	73/96	73/95	73/94	73/94	16
53/81	53/79	53/78	53/78	53/78	17
60/54	60/51	60/50	60/50	60/50	18
161/43	161/37	161/34	161/33	161/33	19
228/70	228/61	228/56	228/56	228/55	20
443/95	443/76	443/68	443/67	443/66	21
60/54	60/51	60/50	60/50	60/50	22
248/88	248/78	248/73	248/72	248/72	23
322/87	322/74	322/68	322/67	322/66	24
127/80	127/75	127/73	127/72	127/72	25
121/08	121/03	121/00	121/00	121/00	26
241/75	241/95	241/94	241/94	241/94	27
147/98	147/92	147/89	147/89	147/89	28
174/89	174/82	174/78	174/78	174/77	29
396/86	396/70	396/62	396/61	396/60	30
87/44	87/41	87/39	87/39	87/39	31
221/96	221/88	221/84	221/83	221/83	32
302/69	302/57	302/51	302/50	302/49	33
87/44	87/41	87/39	87/39	87/39	34
53/72	53/77	53/76	53/76	53/76	35
67/26	67/24	67/22	67/22	67/22	36

ادامه جدول ۳

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
26/90	26/89	26/89	26/89	26/89	37
195/07	194/99	194/95	194/95	194/94	38
94/17	94/13	94/11	94/11	94/11	39
854/26	853/91	853/75	853/73	853/71	40
80/72	80/68	80/67	80/67	80/67	41
739/91	739/61	739/47	739/45	739/43	42
329/60	329/46	329/40	329/39	329/38	43
174/89	174/82	174/78	174/78	174/77	44
46/41	46/39	46/38	46/38	46/38	45
376/68	376/53	376/46	376/45	376/44	46
94/17	94/13	94/11	94/11	94/11	47
363/23	363/08	363/01	363/00	362/99	48
20/12	20/15	20/16	20/16	20/16	49
127/80	127/75	127/73	127/72	127/72	50
151/75	153/41	153/71	153/75	153/78	51
517/94	517/72	517/63	517/61	517/60	52
1278/03	1277/50	1277/27	1277/23	1277/20	53
195/07	194/99	194/95	194/95	194/94	54
121/08	121/03	121/00	121/00	121/00	55
672/65	672/37	672/24	672/23	672/21	56
221/95	221/88	221/84	221/83	221/83	57
67/26	67/24	67/22	67/22	67/22	58
672/64	672/37	672/24	672/23	672/21	59
228/70	228/61	228/56	228/56	228/55	60
390/13	389/97	389/90	389/89	389/88	61
531/39	531/17	531/07	531/06	531/05	62
739/91	739/61	739/47	739/45	739/43	63
329/60	329/46	329/40	329/39	329/38	64

جدول ۴. درصد خطای نسبی حجم رواناب تخمینی در مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع حاصل از روش نش

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
8/05	8/04	8/06	8/06	8/06	1
7/62	7/64	7/65	7/66	7/66	2
7/13	7/15	7/16	7/17	7/17	3
5/59	4/56	4/37	4/35	4/33	4
50/77	50/73	50/73	50/73	50/73	5
54/55	53/42	53/18	53/14	53/12	6
50/31	50/33	50/34	50/34	50/34	7
55/83	55/09	54/94	54/93	54/91	8
54/53	52/88	52/50	52/45	52/41	9
0/90	0/86	0/84	0/84	0/83	10
54/33	52/67	52/29	52/24	52/20	11
50/27	50/25	50/26	50/26	50/26	12
12/83	9/67	8/94	8/85	8/77	13
5/87	5/91	5/93	5/93	5/93	14
1/13	1/09	1/07	1/07	1/07	15
0/81	0/77	0/75	0/75	0/75	16
2/81	2/85	2/87	2/87	2/87	17
13/10	13/13	13/15	13/15	13/15	18
15/99	9/88	8/26	8/05	7/88	19
11/00	10/99	11/00	11/01	11/01	20
0/59	0/63	0/65	0/65	0/65	21
1/19	1/23	1/25	1/25	1/26	22
2/86	2/89	2/91	2/92	2/92	23
1/20	1/24	1/26	1/26	1/26	24
1/19	1/23	1/25	1/25	1/25	25
0/27	0/31	0/32	0/33	0/33	26
0/57	0/61	0/63	0/63	0/63	27
1/42	1/34	1/34	1/34	1/34	28
1/73	1/77	1/79	1/79	1/79	29
9/43	9/47	9/49	9/49	9/49	30

ادامهٔ جدول ۴

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
0/06	0/02	0/00	0/00	0/00	31
5/00	5/04	5/06	5/06	5/06	32
0/80	0/84	0/86	0/86	0/87	33
0/85	0/89	0/90	0/91	0/91	34
0/51	0/55	0/57	0/57	0/58	35
6/18	6/10	6/10	6/10	6/10	36
4/19	4/22	4/24	4/24	4/24	37
1/05	1/09	1/11	1/11	1/12	38
7/03	7/07	7/09	7/09	7/09	39
0/49	0/53	0/55	0/56	0/56	40
0/28	0/32	0/34	0/34	0/34	41
6/98	7/02	7/03	7/04	7/04	42
0/20	0/24	0/26	0/26	0/26	43
3/41	3/37	3/35	3/35	3/35	44
0/45	0/49	0/51	0/51	0/51	45
2/47	2/51	2/53	2/53	2/53	46
0/27	0/23	0/21	0/21	0/21	47
3/65	3/69	3/71	3/71	3/72	48
0/32	0/28	0/26	0/26	0/26	49
1/99	2/03	2/04	2/05	2/05	50
9/25	9/11	9/11	9/11	9/11	51
92/96	92/96	92/96	92/96	92/96	52
1/44	1/47	1/49	1/49	1/50	53
29/10	29/13	29/14	29/14	29/14	54
14/79	14/82	14/84	14/84	14/84	55
0/75	0/79	0/81	0/81	0/82	56
1/83	1/87	1/89	1/89	1/90	57
1/18	1/22	1/23	1/24	1/24	58
16/37	16/32	16/30	16/30	16/30	59
1/07	1/11	1/13	1/13	1/13	60
0/92	0/96	0/97	0/98	0/98	61
2/60	2/56	2/54	2/54	2/54	62
1/18	1/22	1/23	1/24	1/24	63
1/47	1/51	1/53	1/53	1/53	64
0/06	0/02	0/00	0/00	0/00	حداقل
92/96	92/96	92/96	92/96	92/96	حداکثر
11/01	10/78	10/74	10/73	10/72	میانگین

جدول ۵. حجم رواناب تخمینی (هزار مترمکعب) در مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع حاصل از روش روسو

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
27/39	22/29	33/53	33/49	33/53	1
28/54	23/60	33/56	33/54	33/56	2
50/87	45/10	53/74	53/74	53/74	3
152/61	143/76	154/64	154/59	154/64	4
59/23	54/92	60/45	60/45	60/45	5
14/81	11/46	23/01	22/82	23/00	6
53/69	52/54	53/74	53/74	53/74	7
24/39	19/80	30/16	30/17	30/16	8
56/81	48/17	63/81	63/76	63/81	9
148/01	147/98	147/80	147/81	147/80	10
36/43	29/95	43/23	43/56	43/60	11
202/07	201/66	203/95	203/35	203/92	12
77/66	65/80	87/31	87/28	87/31	13
73/99	73/77	73/89	73/89	73/89	14
53/39	51/09	53/74	53/74	53/74	15
60/24	58/25	60/46	60/46	60/46	16
161/46	161/40	161/24	161/22	161/24	17
25/89	23/41	26/87	26/87	26/87	18
10/65	8/16	19/08	18/77	19/06	19

ادامه جدول ۵

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
32/66	29/91	33/59	33/59	33/59	20
228/74	228/80	228/43	228/41	228/43	21
444/67	443/80	450/29	448/67	450/21	22
60/34	58/75	60/45	60/46	60/46	23
248/91	249/00	248/56	248/55	248/56	24
323/10	322/93	323/62	323/27	323/61	25
127/81	127/82	127/63	127/63	127/63	26
121/09	121/07	120/91	120/91	120/91	27
242/63	241/94	246/93	245/82	246/88	28
173/24	154/97	165/60	150/54	151/56	29
174/93	174/96	174/70	174/68	174/70	30
397/54	396/71	403/07	401/53	403/00	31
87/44	87/44	87/32	87/32	87/32	32
303/07	302/66	305/31	304/54	305/27	33
222/35	221/89	225/40	224/55	225/36	34
72/44	78/15	79/07	80/09	81/07	35
53/84	53/55	53/89	53/84	53/89	36
26/55	25/05	26/87	26/87	26/87	37
67/21	66/46	67/17	67/17	67/17	38
195/09	195/16	194/81	194/80	194/81	39
856/61	853/30	882/91	877/39	882/67	40
94/17	94/16	94/04	94/04	94/04	41
87/41	87/25	87/27	87/28	87/27	42
46/14	46/34	46/35	46/35	46/35	43
741/13	739/65	750/75	748/01	750/63	44
329/90	329/62	331/02	330/50	331/00	45
174/90	174/97	174/65	174/65	174/65	46
377/00	376/72	378/07	377/54	378/04	47
94/17	94/22	94/04	94/04	94/04	48
363/81	363/11	368/28	366/99	368/22	49
127/82	2/13	127/64	127/63	127/63	50
19/48	17/69	20/15	20/15	20/15	51
670/36	670/25	880/01	879/81	901/01	52
222/07	221/79	222/01	221/90	222/01	53
674/32	672/02	692/14	688/15	691/96	54
674/60	671/81	697/06	692/51	696/86	55
518/08	518/15	517/50	517/39	517/49	56
121/08	121/11	120/91	120/91	120/91	57
195/10	195/08	194/84	194/82	194/84	58
1283/18	1275/15	1348/84	1338/99	1348/43	59
228/78	228/78	228/59	228/52	228/59	60
329/72	329/71	329/50	329/38	329/49	61
739/86	739/42	738/92	738/92	738/92	62
391/09	389/78	401/19	398/91	401/09	63
531/72	531/51	532/18	511/72	532/16	64

جدول ۶. درصد خطای نسبی حجم رواناب تخمینی در مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع حاصل از روش روسو

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
25/07	39/03	8/28	8/38	8/29	1
21/58	35/17	7/80	7/86	7/80	2
12/19	22/15	7/24	7/24	7/24	3
5/06	10/56	3/80	3/83	3/80	4
51/76	55/27	50/75	50/75	50/75	5
69/96	76/76	53/35	53/73	53/36	6
50/42	51/49	50/38	50/38	50/38	7
63/29	70/20	54/61	54/59	54/61	8
56/34	62/98	50/96	51/00	50/96	9
0/92	0/90	0/78	0/78	0/78	10

ادامهٔ جدول ۶. درصد خطای نسبی حجم رواناب تخمینی در مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع حاصل از روش روسو

GTOPO	SRTM	ASTER	ALOS PALSAR	TOPO	رویداد
58/90	66/21	51/23	50/85	50/81	11
50/15	50/25	49/69	49/83	49/69	12
16/39	29/16	5/99	6/03	6/00	13
5/87	6/15	6/00	6/00	6/00	14
0/34	3/97	1/00	1/00	1/00	15
0/32	2/99	0/67	0/68	0/67	16
2/80	2/83	2/93	2/94	2/93	17
16/39	24/39	13/21	13/21	13/21	18
46/59	59/07	4/35	5/90	4/41	19
13/53	20/80	11/07	11/07	11/07	20
0/57	0/54	0/70	0/71	0/71	21
1/03	1/22	0/22	0/14	0/20	22
3/17	5/72	2/99	2/99	2/99	23
1/18	1/15	1/32	1/33	1/32	24
1/12	1/17	0/96	1/07	0/96	25
0/26	0/26	0/40	0/40	0/40	26
0/56	0/58	0/70	0/71	0/70	27
1/06	1/34	0/69	0/24	0/67	28
12/21	14/20	10/02	10/21	10/00	29
9/41	9/39	9/53	9/54	9/53	30
0/23	0/02	1/63	1/24	1/61	31
5/00	5/01	5/13	5/13	5/13	32
0/68	0/81	0/06	0/19	0/04	33
0/68	0/88	0/69	0/30	0/67	34
3/55	5/81	1/41	1/39	1/28	35
5/98	6/48	5/89	5/97	5/89	36
5/45	10/80	4/31	4/31	4/31	37
1/13	2/24	1/19	1/19	1/19	38
7/02	6/99	7/15	7/16	7/15	39
0/22	0/60	2/84	2/20	2/82	40
0/28	0/28	0/41	0/41	0/41	41
0/74	0/55	0/58	0/59	0/58	42
0/78	4/40	0/33	0/33	0/33	43
3/58	3/38	4/93	4/54	4/91	44
0/36	0/44	0/02	0/17	0/02	45
2/46	2/42	2/60	2/60	2/60	46
0/36	0/28	0/64	0/50	0/63	47
3/65	3/61	3/79	3/79	3/79	48
0/48	0/29	1/72	1/36	1/70	49
1/97	1/94	2/11	2/12	2/11	50
12/17	20/21	9/13	9/13	9/13	51
3/77	4/71	2/89	2/78	2/68	52
1/39	1/51	1/41	1/47	1/42	53
28/92	29/16	27/04	27/46	27/06	54
14/54	14/89	11/70	12/27	11/72	55
0/72	0/71	0/84	0/86	0/84	56
1/83	1/80	1/97	1/97	1/97	57
1/16	1/17	1/29	1/30	1/29	58
16/84	16/11	22/82	21/92	22/78	59
1/03	1/03	1/12	1/15	1/12	60
0/88	0/88	0/94	0/98	0/95	61
2/60	2/53	2/46	2/46	2/46	62
0/93	1/26	1/62	1/05	1/60	63
1/40	1/44	1/32	1/41	1/32	64
0/22	0/02	0/02	0/14	0/02	حداقل
69/96	76/76	54/61	54/59	54/61	حداکثر
11/42	13/76	9/31	9/30	9/29	میانگین

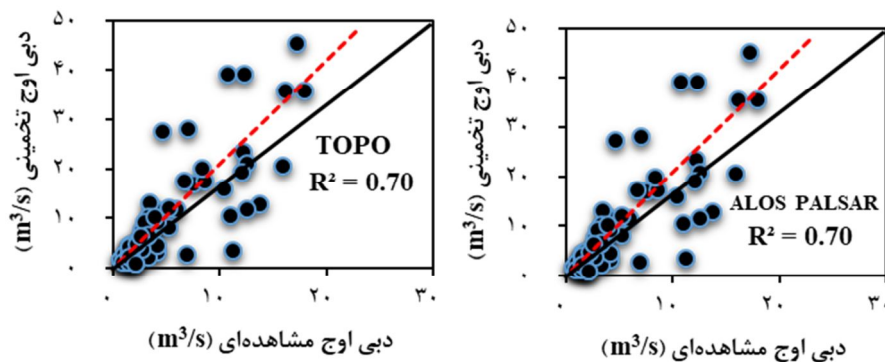
مدل رقومی ارتفاع SRTM، با مقدار خطای ۱۰/۵۸ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. به‌همین صورت متوسط RE، با کاهش دقت DEM، دچار کاهش شده و بدین‌گونه، حداکثر و حداقل خطا در TOPO و SRTM به ترتیب، برابر با ۱۵۳/۰۵ و ۳۷/۳۶٪ برآورد شده است. اما در GTOPO این روند صدق نمی‌کند و اتفاقاً در این DEM، خطا نیز افزایش یافته است.

در شکل‌های ۳ و ۴، نمودار پراکنش مقادیر دبی اوج تخمینی و مشاهده‌ای به‌روشنش و روسو ارائه شده است. در شکل‌های ۵ و ۶ نیز، نمونه‌ای از هیدروگراف تخمینی به‌روشنش و روسو را می‌توان مشاهده کرد.

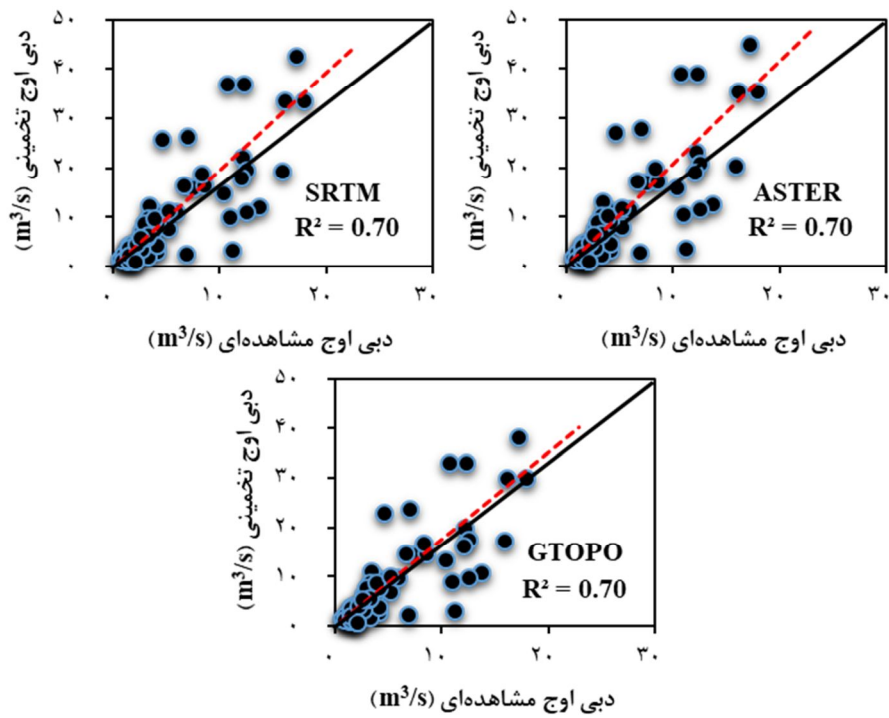
به‌منظور ارزیابی روش نش و روسو در تخمین دبی اوج، شاخص‌های آماری خطا برای هریک از مدل‌های رقومی ارتفاع مورد استفاده، مطابق جدول ۷ است. در مورد دبی اوج برآوردی حاصل از روش نش، با افزایش دقت DEM، مقدار RMSE افزایش یافته؛ مقدار متوسط خطای نسبی نیز از ۹۱/۷۴٪ در TOPO به ۶۸/۲۵٪ در GTOPO کاهش یافته است که علت آن را می‌توان ناشی از شرایط توپوگرافی و مساحت حوضه آبخیز کسلیان دانست. بررسی دبی اوج برآوردی روش روسو نیز نشان می‌دهد، با افزایش دقت مدل رقومی ارتفاع، مقدار RMSE افزایش یافته و در نتیجه، بهترین دبی اوج در

جدول ۷. شاخص‌های خطا در برآورد دبی اوج

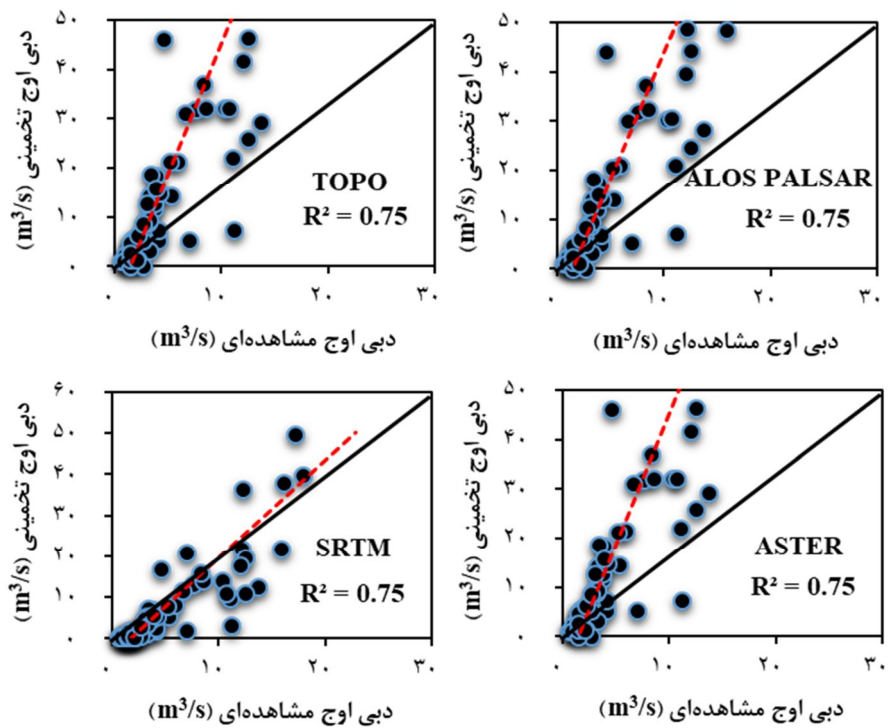
روش	مدل رقومی ارتفاع	RMSE (m ³ /s)	خطای نسبی دبی اوج (%)		
			حداقل	حداکثر	میانگین
نش	TOPO	۸/۲۳	۲	۱۹۸/۶۲	۹۱/۷۴
	ALOS PALSAR	۸/۱۶	۲/۵۶	۱۹۶/۹۱	۹۰/۹۰
	ASTER	۸/۰۷	۳/۲۶	۱۹۴/۷۸	۸۹/۸۶
	SRTM	۷/۳۸	۷/۳۵	۱۷۹/۵۰	۸۲/۳۷
	GTOPO	۶/۲۳	۱/۵۰	۱۵۰/۳۲	۶۸/۲۵
روسو	TOPO	۳۱/۶۲	۰/۰۷	۳۳۰/۷۴	۱۵۳/۰۵
	ALOS PALSAR	۳۰/۵۶	۰/۹۲	۳۲۴/۰۴	۱۴۵/۷۵
	ASTER	۳۱/۶۶	۲/۳۷	۳۳۰/۹۹	۱۵۳/۳۹
	SRTM	۱۰/۵۸	۰/۰۴	۷۹/۴۷	۳۷/۳۶
	GTOPO	۱۵/۵۱	۱۲/۹۷	۱۴۳/۸۳	۵۳/۴۷



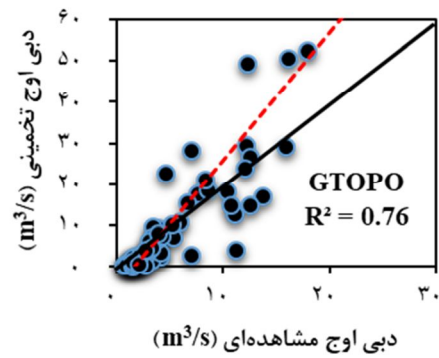
شکل ۳. مقایسه مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای دبی اوج به‌روشنش، با استفاده از مدل‌های متفاوت رقومی ارتفاع. خط مشکی بیانگر خط ۱:۱ و خط چین قرمز خط رگرسیون است



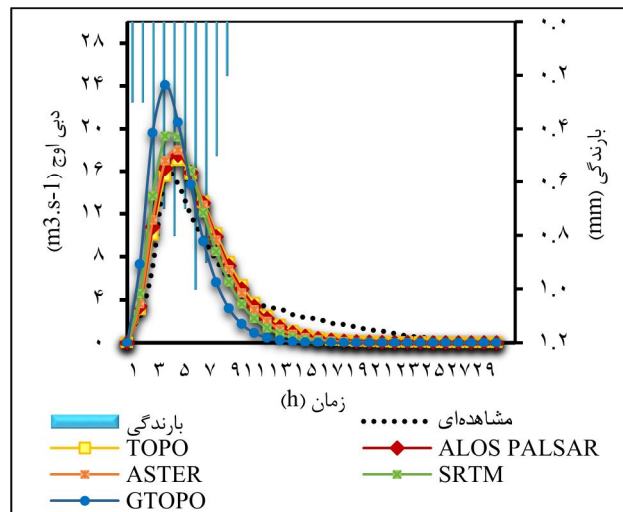
ادامه شکل ۳



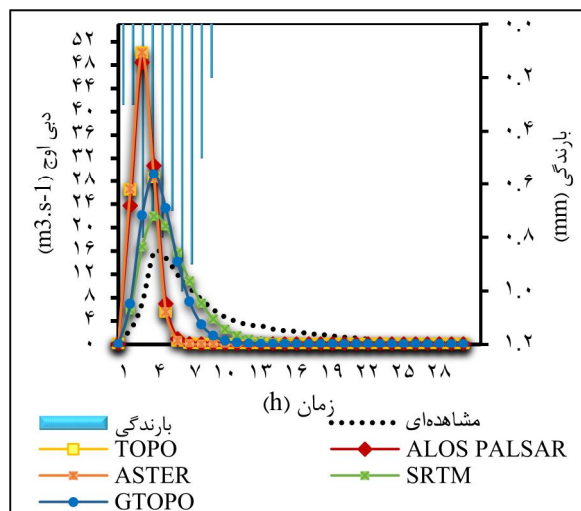
شکل ۴. مقایسه مقادیر برآوردی و مشاهده‌ای دبی اوج به روش روسو، با استفاده از مدل‌های متفاوت رقمی ارتفاع. خط مشکی بیانگر خط ۱:۱ و خط چین قرمز خط رگرسیون است



ادامه شکل ۴



شکل ۵. نمونه‌ای از هیدروگراف تخمینی به‌روش نش، در حوضه آبخیز کسلیان



شکل ۶. نمونه‌ای از هیدروگراف تخمینی به‌روش رسو، در حوضه آبخیز کسلیان

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط همگن حوضه آبخیز کسلیان، مدل رقومی ارتفاع ASTER با دقتی کمتر از TOPO و ALOS PALSAR، شبکه آبراهه مورد قبولی استخراج شده است؛ هرچند SRTM و GTOPO شبکه آبراهه مطلوبی به دست نداده‌اند. به‌طور کلی، با افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM، تراکم شبکه آبراهه مطلوب‌تر می‌شود اما آبراهه اصلی، در DEM‌های با دقت کمتر، تاحدودی توسعه یافته است. در مورد حجم رواناب برآوردی، متوسط درصد خطای نسبی این متغیر نشان می‌دهد که با افزایش دقت مدل رقومی ارتفاع، درصد خطای نسبی از ۱۱/۴۲٪ به ۹/۲۹٪ کاهش داشته؛ هرچند این اختلاف (۲/۱۳ درصد) درخور توجه نیست. با تخمین صحیح مقادیر n و k در روش نش و روسو، می‌توان کارایی هر دو روش را در مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب، افزایش داد. روش‌های متفاوتی برای تخمین مقادیر n و k مطرح شده است و در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی اثر مدل‌های رقومی ارتفاع گوناگون در روش نش، روش تجربی تخمین پارامترها به کار رفته است. طبق روش تجربی، ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبخیز، از جمله شیب و طول آبراهه اصلی و مساحت حوضه، نقش اصلی را در تخمین دبی اوج بر عهده دارند. در واقع، می‌توان بیان کرد که تخمین دبی اوج در روش نش، براساس روش تجربی، در این حوضه آبخیز نتایج مورد قبولی داشته است. در مدل‌های TOPO، ALOS PALSAR و ASTER روش روسو، طول آبراهه با رتبه بالاتر ($L\Omega$) بسیار اندک تخمین زده شده که در شکل ۲ کاملاً مشهود است. همین مسئله سبب خطای بالا در تخمین دبی اوج شده است. در صورتی که مقدار پارامتر $L\Omega$ در مدل‌های GTOPO و SRTM، بیشتر برآورد شده و سبب مطابقت بالای دبی اوج برآوردی با مقادیر مشاهده‌ای شده است. مقایسه مقادیر دبی اوج تخمینی و مشاهده‌ای نشان می‌دهد که به‌طور کلی، در تمامی مدل‌های رقومی ارتفاع، بین داده‌های تخمینی و

مشاهده‌ای مطابقت مطلوبی با مقدار ضریب تبیین ۰/۷۵ وجود داشته است. درگُل، می‌توان گفت طی تخمین دبی اوج، مدل نش و هنگام تخمین حجم رواناب، مدل روسو با استفاده از مدل TOPO عملکرد بهتری داشت. همچنین با توجه به تأثیر شایان توجه دقت مدل‌های رقومی ارتفاع، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، روش‌های متفاوت هیدروگراف واحد لحظه‌ای با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع که دقتشان کمتر از ده متر است و نتیجه نقشه‌برداری با پدیداندن، نیز ارزیابی و با نتایج این پژوهش مقایسه شوند.

۵- منابع

- Ahmad, M., Ghumman, A.R., Ahmad, S. & Hashmi, H.N., 2010, **Estimation of a Unique Pair of Nash Model Parameters: An Optimization Approach**, Water Resources Management, 24, PP. 2971-2989, <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9590-3>.
- Alizadeh, A., 2014, **Principles of Applied Hydrology**, Emam Reza University Press (In Persian).
- Bhunya, P., Mishra, S.K., Ojha, C. & Berndtsson, R., 2004, **Parameter Estimation of Beta Distribution for Unit Hydrograph Derivation**, Journal of Hydrologic Engineering, 9, PP. 325-332, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:4\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:4(325)).
- Chaplot, V., 2005, **Impact of DEM Mesh Size and Soil Map Scale on SWAT Runoff, Sediment, and NO3CN Loads Predictions**, Journal of Hydrology, 312(5), PP. 207-222, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.017>.
- Chaubey, I., Cotter, A., Costello, T. & Soerens, T., 2005, **Effect of DEM Data Resolution on SWAT Output Uncertainty**, Hydrological Processes, 19, PP. 621-628, <https://doi.org/10.1002/hyp.5607>.
- De Moura, M.M., Beskow, S., da Silva Terra, F., de Mello, C.R., da Cunha, Z.A. & Cassalho, F., 2021, **Evaluation of Geomorphological Approaches Combined with Digital Elevation Models for the Nash's Instantaneous Unit Hydrograph**, Journal of South American Earth Sciences, 107, PP. 103-153, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103153>.

- Esmaeili, F., Vafakhah, M. & Moosavi, V., 2023a, **Effect of Spatial Resolution of Digital Elevation Model on the Estimation of Geomorphological and Geomorphoclimatic Unit Hydrographs in Amameh Watershed, Iran**, JWSS-Isfahan University of Technology, 27(1), PP. 287-301, <https://doi.org/10.47176/jwss.27.1.218811>.
- Esmaeili, F., Vafakhah, M. & Moosavi, V., 2023b, **The Effectiveness of Clark's Instantaneous Unit Hydrograph Model (IUH) Accuracy from the Spatial Resolution of Different Digital Elevation Models**, Journal of Range and Watershed Management, 75(4), PP. 661-674, <https://doi.org/10.22059/jrwm.2023.351357.1683>.
- Ganie, P.A., Posti, R., Aswal, A.S., Bharti, V.S., Sehgal, V.K., Sarma, D. & Pandey, P.K., 2023, **A Comparative Analysis of the Vertical Accuracy of Multiple Open-Source Digital Elevation Models for the Mountainous Terrain of the North-Western Himalaya**, Modeling Earth Systems and Environment, 9(2), PP. 2723-2743, <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01641-x>.
- Haan, C.T., Barfield, B.J. & Hayes, J.C., 1994, **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**, Academic Press, San Diego, CA.
- Janizadeh, S. & Vafakhah, M., 2021, **Flood Hydrograph Modeling Using Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based on Rainfall Components**, Arabian Journal of Geosciences, 14(5), P. 344, <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06683-6>.
- Kavian, A. & Mohammadi, M., 2019, **Effects of Digital Elevation Models (DEM) Spatial Resolution on Hydrological Simulation**, jwmr., 10(19), PP. 36-45, <https://doi.org/10.29252/jwmr.10.19.36>.
- Khanmohammadi, N. & Behmanesh, J., 2020, **Comparison of Different Methods Efficiency for Estimation of Nash Instantaneous Unit Hydrograph Parameters in Flood Simulation (Case Study: Aland-Chay, Gara-Chay, Mahabad-Chay and Zab Rivers)**, Irrigation Sciences and Engineering, 43, PP. 15-28, <https://doi.org/10.22055/jise.2017.18316.1330>.
- Nash, J.E., 1957, **The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph**, Journal of Iash, 72, PP. 114-118, <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/508550>.
- Ramírez, J.A., 2000, **Prediction and Modelling of Flood Hydrology and Hydraulics**, Ellen Wohl Cambridge University Press.
- Reddy, A.S. & Reddy, M.J., 2015, **Evaluating the Influence of Spatial Resolutions of DEM on Watershed Runoff and Sediment Yield Using SWAT**, Indian Academy of Sciences, 124(7), PP. 1517-1529, <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0617-2>.
- Rosso, R., 1984, **Nash Model Relation to Horton Order Ratios**, Water Resources Research, 20(7), PP. 914-920, <https://doi.org/10.1029/WR020i007p00914>.
- Safavi, H.R., 2006, **Applied Hydrology**, 1st Ed, Arkan Press, Iran.
- Shen, Z., Chen, L. & Chen, T., 2013, **The Influence of Parameter Distribution Uncertainty on Hydrological and Sediment Modelling: A Case Study of SWAT Model Applied to the Daning Watershed of the Three Gorges Reservoir Region, China**, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 27(16), PP. 235-251, <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20193227363>.
- Sherman, L.K., 1932, **The Relation of Hydrographs of Runoff to Size and Character of Drainage-Basins**, Eos, Transactions American Geophysical Union, 13(1), PP. 332-339, <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00332>.
- Singh, V.P. & Singh, K., 1988, **Parameter Estimation for Log-Pearson Type III Distribution by POME**, Journal of Hydraulic Engineering, 114, PP. 112-122, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(112\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(112)).
- Vafakhah, M. & Moghadamnia, A.R., 2017, **Flood Management and Control**, Publications of Tarbiat Modarres University (First Edition).
- Vafakhah, M., Fakher Nikche, A. & Sadeghi, S.H.R., 2018, **Comparative Effectiveness of Different Infiltration Models in Estimation of Watershed Flood Hydrograph**, Paddy and Water Environment, 16(3), PP. 411-424, <https://doi.org/10.1007/s10333-018-0635-1>.
- Walega, A., 2014, **The Importance of the Objective Functions and Flexibility on Calibration of Parameters of Clark Instantaneous Unit Hydrograph**, Geomatics, Land Management and Landscape, 2, PP. 75-85, <https://doi.org/10.15576/GLL/2014.2.75>.

- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C. & Liu, M., 2021, **The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai**, International Journal of Disaster Risk Science, 12(6), PP. 890-902, <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00377-z>.
- Yannopoulos, S., Christidis, Ch., Loukas, A. & Giannopoulou, I., 2013, **A Sensitivity Analysis on the Parameters of Clark Instantaneous Unit Hydrograph**, In Proceedings of the 8th International Conference of EWRA (European Water Resources Association) Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context, Porto, Portugal, PP. 26-29.
- Yao, C., Li, Z.J., Zhang, K., Huang, Y.C., Wang, J.F. & Bastola, S., 2022, **Evaluating Performance Dependency of a Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph-Based Hydrological Model on DEM Resolution**, Water Science and Engineering, 15(3), PP. 179-188, <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.04.002>.
- Zakizadeh, F., Malekinezhad, H. & Ekhtesasi, M., 2015, **Comparison of Geomorphologic, Geomorphoclimatic and Nash Instantaneous Unit Hydrograph in Estimating Outlet Runoff Hydrograph Characteristics (Case Study: Manshad Watershed)**, Watershed Management Research Journal, 28(107), PP. 2-11, <https://www.sid.ir/paper/200704/fa>.
- Zheng, M., Tang, W., Lan, Y., Zhao, X., Jia, M., Allan, C. & Trettin, C., 2018, **Parallel Generation of Very High Resolution Digital Elevation Models: High-Performance Computing for Big Spatial Data Analysis**, In Big Data in Engineering Applications, PP. 21-39, https://doi.org/10.1007/978-981-10-8476-8_2.

This Page is Intentionally Left Blank