

## Estimating the surface and subsurface flow of catchments using geomorphological instantaneous unit hydrograph method

Hamidreza Babaali<sup>1</sup>, Mostafa Akbari Kheirabadi<sup>2</sup> and Touraj Sabzevari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of civil Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

<sup>2</sup> Department of civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

Received: 22 July 2024

Accepted: 21 December 2024

### Extended abstract

#### Introduction

Flood estimation in ungauged watersheds is crucial for designing hydraulic structures. The total flood flow in watersheds consists of surface and subsurface flows. In highly permeable watersheds, subsurface flow significantly contributes to total runoff, yet limited studies have addressed this aspect. Runoff mechanisms in watersheds generally follow two models: the Hortonian mechanism, where the soil saturates from the top, and the Dunne mechanism, where saturation occurs from below. This study adopts the Dunne mechanism for runoff generation.

#### Materials and methods

One method for predicting surface and subsurface hydrographs in ungauged watersheds is the Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH), which utilizes geomorphological data. These data were derived using ArcGIS and hydrological extensions. The GIUH model can separate surface and subsurface flow components. While previous studies have primarily used GIUH for surface flow estimation, the model equations were expanded in this study to estimate the total watershed subsurface hydrograph. The GIUH model was applied to estimate surface and subsurface runoff in two watersheds: Kasillian in Iran and Gagas in India.

#### Results and discussion

The proposed GIUH model was used to analyze surface and subsurface flows in the Kasillian (Iran) and Gagas (India) watersheds. Simulation results for four rainfall-runoff events in each watershed demonstrated that the model effectively estimated total hydrographs and their components. A comparison of estimated and observed peak discharges in the Kasillian watershed showed that the simulated peak discharge on May 10, 1992, was 10.1 m<sup>3</sup>/s, whereas the observed value was 11.8 m<sup>3</sup>/s. The error margin across different events ranged from 3% to 16%, indicating an acceptable model accuracy in runoff estimation. In the Gagas watershed, total peak discharge varied between 44 and 110 m<sup>3</sup>/s, with subsurface flow contributing approximately 5%–6% of the total flow. In the Kasillian watershed, total discharge ranged from 1.6 to 12 m<sup>3</sup>/s, while peak subsurface discharge was estimated between 35 and 60 L/s. The relationship between rainfall and subsurface peak discharge revealed that lower rainfall led to reduced subsurface peak discharge. Sensitivity analysis showed that hydraulic conductivity was one of the most influential parameters in subsurface flow simulation. In soils with high hydraulic conductivity, subsurface flow accounted for a larger portion of total flow, and the hydrograph lag time increased. For example, reducing the hydraulic conductivity in the Kasillian watershed from 0.0025 to 0.0009 m/s increased subsurface peak discharge from 0.35 to 1.3 m<sup>3</sup>/s. Additionally, reducing the Manning's roughness coefficient from 0.2 to 0.4 resulted in a 31% decrease in flood peak discharge. These findings highlight the importance of hydrological and geomorphological characteristics in accurate runoff estimation and flood control structure design.

#### Conclusion

This study evaluated the GIUH model for estimating surface and subsurface runoff in the Kasillian (Iran) and Gagas (India) watersheds. Results showed that the model provided accurate peak discharge estimates, with estimation errors ranging from 3% to 16% in Kasillian and 1.6% to 12% in Gagas. The subsurface flow played a significant role in highly permeable watersheds, contributing 5%–6% of total runoff in the Gagas watershed. Sensitivity analysis revealed that increasing hydraulic conductivity led to higher subsurface peak discharge, whereas reducing the Manning's coefficient increased flood peaks. These

\* Corresponding author: tooraj419@yahoo.com

findings confirm the importance of geomorphological and hydrological characteristics in runoff modeling. Ultimately, the GIUH model can serve as a useful tool for flood management and watershed hydrological response assessment.

**Keywords:** Gagas, Kasillian watershed, Peak discharge, Subsurface runoff, Surface runoff

Cite this article: Babaali, H., Akbari Kheirabadi, M., Sabzevari, T., 2025. Estimating the surface and subsurface flow of catchments using geomorphological instantaneous unit hydrograph method. *Water. Eng. Manag.* 17(1), 120-139.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## تخمین جریان سطحی و زیرسطحی حوزه‌های آبخیز به روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی

حمیدرضا باباعلی<sup>۱</sup>، مصطفی اکبری خیر آبادی<sup>۲</sup> و تورج سبزواری<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی عمران، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

تخمین سیلاب حوزه‌های آبخیز بدون آمار برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت است. جریان کل سیلاب در حوزه‌های آبخیز از دو بخش جریان سطحی و زیرسطحی تشکیل شده است. در حوضه‌های با نفوذپذیری بالا جریان زیرسطحی سهم مهمی در رواناب کل حوضه دارد و در این موضوع تحقیقات کمی انجام شده است. مکانیسم رواناب در حوضه‌ها به دو شکل مکانیسم هورتونی که خاک از بالا اشباع می‌شود و مکانیسم دانی بلاک که خاک از زیر اشباع می‌شود و در این تحقیق از مکانیسم دانی بلاک استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

یکی از روش‌های پیش‌بینی هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی حوضه‌ها، استفاده از روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی بر اساس اطلاعات ژئومورفولوژیکی حوضه‌های فاقد آمار است. اطلاعات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و الحاقیه‌های هیدرولوژیکی محاسبه می‌شوند. روش GIUH، قابلیت جداسازی جریان سطحی و زیرسطحی را از کل جریان دارد. مدل GIUH در تحقیقات گذشته بیشتر برای تخمین جریان سطحی استفاده شده است، لذا معادلات این مدل گسترش یافته تا بتوان هیدروگراف جریان زیر سطحی کل حوضه را تخمین زد. در این پژوهش از مدل GIUH برای تخمین جریان سطحی و زیرسطحی دو حوضه کسلیان در ایران و حوضه گاجاس در کشور هند استفاده شد.

### نتایج و بحث

مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) ارائه شده در این پژوهش و برای تحلیل جریان سطحی و زیرسطحی دو حوضه کسلیان (ایران) و گاجاس (هند) به کار گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای چهار رویداد بارندگی-رواناب در هر دو حوضه نشان داد که مدل توانایی مناسبی در تخمین هیدروگراف کل و مؤلفه‌های آن دارد. مقایسه دبی‌های پیک برآوردی و مشاهده‌ای در حوضه کسلیان نشان داد که مقدار دبی پیک شبیه‌سازی شده در تاریخ ۱۰ می ۱۹۹۲ برابر با ۱۰/۱ مترمکعب بر ثانیه بوده، در حالی که مقدار مشاهده‌ای آن ۱۱/۸ مترمکعب بر ثانیه است. این اختلاف در دیگر رویدادها نیز در محدوده سه تا ۱۶ درصد قرار داشت که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در تخمین رواناب است. در حوضه گاجاس، مقدار حداکثر دبی کل جریان بین ۴۴ تا ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه متغیر بود و جریان زیرسطحی حدود پنج تا شش درصد از کل جریان را تشکیل می‌داد. در حوضه کسلیان، مقدار دبی کل بین ۱/۶ تا ۱۲

مترمکعب بر ثانیه و مقدار دبی پیک جریان زیرسطحی بین ۳۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه برآورد شد. بررسی ارتباط بین میزان بارندگی و دبی پیک جریان زیرسطحی نشان داد که کاهش بارندگی منجر به کاهش دبی پیک جریان زیرسطحی شده است. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که ضریب هدایت هیدرولیکی خاک یکی از مؤثرترین پارامترها بر روی شبیه‌سازی جریان زیرسطحی است. در خاک‌های با ضریب هدایت هیدرولیکی بالا، جریان زیرسطحی سهم بیشتری از کل جریان را تشکیل داده و زمان تأخیر هیدروگراف افزایش می‌یابد. برای نمونه، در صورتی که ضریب هدایت هیدرولیکی خاک حوضه کسلیان از ۰/۰۰۲۵ به ۰/۰۰۰۹ متر بر ثانیه کاهش یابد، مقدار دبی پیک جریان زیرسطحی از ۰/۳۵ به ۱/۳ مترمکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت. همچنین، بررسی تأثیر ضریب مانینگ صفحات نشان داد که کاهش مقدار این ضریب از ۰/۲ به ۰/۴، موجب کاهش ۳۱ درصدی مقدار دبی پیک سیلاب می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت ویژگی‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی حوضه در برآورد دقیق رواناب و طراحی سازه‌های کنترل سیلاب تأکید دارد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) برای تخمین رواناب سطحی و زیرسطحی در دو حوضه کسلیان (ایران) و گاجاس (هند) ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل دقت مناسبی در برآورد دبی پیک دارد، به طوری که خطای تخمین در کسلیان بین سه تا ۱۶ درصد و در گاجاس بین ۱/۶ تا ۱۲ درصد بود. همچنین، جریان زیرسطحی در حوضه‌های با نفوذپذیری بالا سهم قابل توجهی دارد و در حوضه گاجاس به طور میانگین پنج تا شش درصد از کل جریان را تشکیل داد. تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی، پیک جریان زیرسطحی را افزایش می‌دهد، در حالی که کاهش ضریب مانینگ صفحات موجب افزایش پیک سیلاب شد. این یافته‌ها اهمیت ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی را در مدل‌سازی رواناب تأیید می‌کند. در نهایت، مدل GIUH می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیریت سیلاب و ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز باشد.

### واژه‌های کلیدی: پیک جریان، حوضه کسلیان، رواناب زیرسطحی، رواناب سطحی، گاجاس

### مقدمه

اولین بار توسط Rodriguez et al., (1979) ارائه شد. آنها یک مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ارائه نمودند که مقدار زمان پیک و دبی پیک مدل تابعی از مشخصات ژئومورفولوژیکی و به ویژه ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های حوضه بود. ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌های آبخیز از طریق نرم‌افزارهایی مانند ARC/GIS و الحاقیه‌های هیدرولوژیکی مانند ArcHydro محاسبه می‌شوند. برای این منظور مدل رقومی ارتفاع حوضه مورد نیاز است. مدل GIUH توسط دانشمندان دیگر گسترش پیدا کرده و در حوضه‌های مختلف به کار گرفته شد (Gupta 1980؛ Kumar Lee et al., 1997؛ Rodriguez et al., 1982 et al., 2008).

Najafi et al., (2009) در پژوهشی از سه مدل بارندگی-رواناب شامل مدل جعبه سیاه مبتنی بر مشخصات ژئومورفولوژی<sup>۲</sup> و مدل مفهومی دو پارامتری

رواناب کل حوضه‌های آبخیز از دو جزء جریان سطحی و زیرسطحی تشکیل شده است. بارشی که روی سطح دامنه‌های حوضه می‌بارد قسمتی از آن داخل خاک نفوذ کرده و یک جریان زیرسطحی در نزدیکی سطح خاک ایجاد می‌کند که یک جریان زیرسطحی سریع نام دارد که در دامنه‌های شیب‌دار وارد نهرها می‌شود و همراه با جریان سطحی روی سطح خاک در نهرها جریان می‌یابد. نفوذ عمیق در خاک نیز جریان زیرسطحی کند نام دارد که به آب‌های زیرزمینی می‌پیوندد و جریان پایه در رودخانه از آن تشکیل می‌شود (Sabzevari, 2010).

مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی<sup>۱</sup> یکی از مدل‌هایی است که توانایی تخمین جریان زیرسطحی در بعد دامنه و حوضه را دارد. مفهوم GIUH

<sup>2</sup> Geomorphology-Based Artificial Neural Network (GANN)

<sup>1</sup> Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH)

برای محاسبه زمان پیمایش جریان زیرسطحی دامنه‌های مرکب ارائه شد.

در این پژوهش براساس نتایج تحقیقات Sabzevari (2010) معادله‌ای برای جداسازی منطقه اشباع و غیراشباع صفحات (دامنه‌های موازی-صاف) ارائه شده و همچنین برای محاسبه زمان پیمایش تأثیر اشباع‌پذیری در مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک در نظر گرفته شده است.

Sabzevari et al., (2011) در پژوهشی از مدل GIUH برای برآورد جریان سطحی حوزه‌های آبخیز استفاده نمودند. شرایط اشباع‌پذیری صفحات و تأثیر آن بر روی زمان پیمایش جریان زیرسطحی صفحات در مدل GIUH ارائه شده توسط (Lee et al., 2005) در نظر گرفته شده و مدل آنها به صورت علمی تر گسترش یافت. Lee et al., (2005) زمان پیمایش زیرسطحی را تابعی از ضریب هدایت هیدرولیکی و تخلخل خاک، طول و شیب صفحه را در نظر گرفته ولی در این پژوهش ارتباط بین پارامترهایی مانند ضخامت لایه خاک زیرسطحی و شدت نفوذ بارندگی بر روی زمان پیمایش زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفته و این دو پارامتر به عنوان پارامترهای جدید در مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک جریان سطحی و زیرسطحی حوزه‌های آبخیز وارد شد. این مدل در حوضه پسکوهک در حوضه فارس نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. Kumar et al., (2008) براساس تئوری موج سینماتیکی و مدل GIUH به تخمین رواناب حوضه رامگانجا در کشور هند پرداخت. مدل برای دو حالتی که ورودی مدل اطلاعات ژئومورفولوژیک باشد (GIUH-I) و حالتی که ضرایب درجه‌بندی آبراهه‌ها (GIUH-II) باشند، مورد استفاده قرار گرفت. زمان پیمایش آبراهه‌ها و صفحات حوضه برای دو حالت مزبور به صورت معادلات تحلیلی بر اساس سیستم درجه‌بندی آبراهه‌ها به روش هورتن-استراهلر ارائه شد.

Sallary Jazi (2009) در پژوهشی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفوکلیماتیک بر مبنای روش کلارک<sup>۲</sup> و هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک بر مبنای روش ناش (GIUH-NASH) برای حوزه آبخیز کسلیلیان

ناش و مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک که برای حوضه‌های فاقد آمار پیشنهاد شده است، برای یک حوضه متوسط استفاده شد. از این مدل‌ها برای مطالعه ده واقعه بارش-رواناب در حوضه معرف کسلیلیان واقع در ناحیه شمالی ایران استفاده شد. نتایج حاصل از مدل ژئومورفولوژی با داده‌های مشاهده‌ای و دو مدل دیگر مقایسه شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی بر پایه ژئومورفولوژی از مدل کاملاً تجربی شبکه عصبی مصنوعی هستند، برتر است. علاوه بر این می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در نظر گرفتن مشخصات ژئومورفولوژی در مدل ANN<sup>۱</sup> بر توانایی این مدل برای شبیه‌سازی رابطه بارندگی-رواناب می‌افزاید.

Lee et al., (2005) براساس مکانیسم دانی-بلاک، روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک جریان سطحی حوزه‌های آبخیز فاقد آمار را برای برآورد هیدروگراف جریان زیرسطحی حوزه‌های آبخیز گسترش داد. اساس روش پیشنهادی (Lee et al., 2005) بر مبنای جداسازی منطقه اشباع و غیراشباع دامنه‌های حوضه بود. جریان سطحی در منطقه اشباع و جریان زیرسطحی در کل صفحه در نظر گرفته شد و زمان پیمایش هر دو منطقه محاسبه شد. رابطه زمان پیمایش جریان زیرسطحی استفاده شده توسط Lee et al., (2005)، تابعی از تخلخل، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، طول و شیب کل دامنه بود و در معادله ذکر شده تأثیر شدت بارندگی یا شدت نفوذ بارندگی به لایه خاک و ضخامت خاک دیده نمی‌شود. آنها جهت جداسازی منطقه اشباع و منطقه غیراشباع از هیچ تئوری علمی استفاده ننموده و طول منطقه اشباع را درصدی از طول کل دامنه در نظر می‌گیرد که این درصد برای برای هر رویداد بارندگی-رواناب واسنجی می‌شود.

Sabzevari et al., (2010) با در نظر گرفتن شکل و هندسه دامنه‌های مرکب به بررسی میزان اشباع‌پذیری دامنه‌ها پرداختند. آنها بر اساس مدل اشباع‌پذیری زیگما ارائه شده توسط (Troch et al., 2002)، طول منطقه اشباع دامنه‌های مرکب را تعیین کردند. براساس مدل اشباع‌پذیری دامنه‌های مرکب، یک معادله تحلیلی

<sup>2</sup> Geomorphological Clark Instantaneous Unit Hydrograph (GCIUH-CLARK)

<sup>1</sup> Artificial neural network

سپس داده‌های بارش رواناب و معادلات دبی-سرعت، به دست آمد و مقادیر دبی اوج و زمان تا اوج برای پنج واقعه بارش-رواناب استخراج شد. مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای نشان می‌دهد که مقادیر دبی اوج محاسبه‌ای تقریباً به مقادیر دبی اوج مشاهده‌ای نزدیک است. تحقیق ذکرشده نشان می‌دهد که شکل‌های خاص ژئومورفولوژی مانند چاله‌ها، درز و شکاف‌های آهکی و تکتونیک، باعث کاهش سرعت و ضریب رواناب شده و بنابراین مقادیر دبی اوج و زمان اوج سیلاب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین روابط پیچیده شکل‌های کارستی با آب‌های سطحی و زیرزمینی و ویژگی‌های بارش، باعث شده است که مدل مذکور فاقد روند ثابت و مشخصی در پیش‌بینی سیلاب باشد. نتایج پژوهش همچنین نشان داد که پارامترهای دبی اوج و زمان اوج علاوه بر عوامل ژئومورفولوژی، تا حدودی از تغییرات شدت بارش در هر رگبار نیز متأثر می‌شوند.

Amini et al., (2021) پس از استخراج داده‌های مورد نیاز، صحت محاسباتی تعدادی از رابطه‌های زمان پیمایش از طریق مقایسه آماری هیدروگراف‌های پیش‌بینی شده با تعداد ۱۰ واقعه بارش-رواناب در حوضه امامه مورد آزمون قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که زمان پیمایش سطوح تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تخمین هیدروگراف حوضه نداشته است ولی تأثیر زمان پیمایش آبراهه‌ها و به‌ویژه آبراهه اصلی تعیین‌کننده بوده است. همچنین هیچ یک از روابط زمان پیمایش آبراهه‌ای قادر نبوده است تمامی وقایع را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. برخی از رابطه‌های وقایع معمول و پرتکرارتر حوضه و تعدادی دیگر از روابط وقایع شدیدتر و با دبی اوج بالاتر را بهتر تخمین زده‌اند. همچنین نوع پارامترهای به‌کار رفته در رابطه‌های در نتایج به‌دست آمده تأثیرگذار بوده‌اند. به‌کارگیری پارامتر وسعت حوزه آبرگیر در یکی از رابطه‌های میانگین نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۱۰ واقعه را بهبود بخشیده است و نیز پارامتر شدت بارش موثر در یکی دیگر از رابطه‌های باعث شده تا برخلاف سایر رابطه‌ها، هم برخی از وقایع کم شدت و پرتکرار و هم تعدادی از وقایع پرشدت و دارای دبی اوج بالاتر در بین بهترین نتایج آن قرار گیرد.

در استان مازندران در شمال ایران را به‌کار گرفت. پارامترهای ژئومورفولوژیک توسط ARCGIS استخراج شد. رواناب سطحی مستقیم با استفاده از روش‌های ترکیبی بدون نیاز به داده‌های تاریخی بارش-رواناب به دست آمد. همچنین رواناب سطحی مستقیم با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS با مدل انتقال کلارک و همچنین روش ناش محاسبه شد. از سه معیار برای مقایسه روش های کلارک و GCIUH-CLARK و همچنین روش ناش و GIUH-NASH با داده‌های مشاهداتی بهره گرفته شد. نتایج نشان دهنده کارایی نسبی روش‌های ترکیبی در برآورد هیدروگراف سیلاب بود.

Tarrahi et al., (2022) ابتدا با پردازش موجکی تصاویر شبکه آبراهه‌های حوضه و سپس استفاده از تحلیل فراکتالی، بعد فراکتالی شبکه و بعد فراکتال ابراهه اصلی حوضه محاسبه شد. برای محاسبه ضریب انشعاب حوضه از پردازش تصاویر حوضه به روش Shearlet System استفاده شد. معادلاتی جدید برای محاسبه پارامترهای مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی ناش براساس ابعاد فراکتالی شبکه و رودخانه اصلی ارائه شد. براساس روش پیشنهادی هیدروگراف‌های سیلاب در سه حوضه کسلیان، آجای و هنگ چی محاسبه شد و مدل مزبور مورد ارزیابی قرار گرفت.

Sabzevari et al., (2013) یک مدل ژئومورفولوژیکی ارائه نمودند که فرم تصحیح شده مدل ژئومورفولوژیکی ارائه شده توسط Lee et al., (2005) بود. مدل آنها قابلیت تخمین رواناب سطحی و زیرسطحی کل حوزه آبخیز را داشت. مدل مزبور بر اساس زمان پیمایش سطحی و زیرسطحی دامنه‌های حوضه ساخته شده است.

Mahmudi et al., (2007) با هدف بررسی نقش عوامل و شکل‌های ژئومورفولوژی در ویژگی‌های سیلاب، مدل GIUH در حوزه آبخیز کنگیر (ایوان غرب) را مورد ارزیابی قرار داد. مدل GIUH بر اساس عوامل ژئومورفولوژی کمی حوضه‌ها، هیدروگراف سیل را برآورد می‌کند. به‌منظور بررسی این مدل، ابتدا داده‌های ژئومورفولوژی کمی حوضه مانند نسبت انشعابات، نسبت مساحت، نسبت طول، طول آبراهه بالاترین درجه و

سینماتیک KW-GIUH پرداخته شده است. همچنین، تحلیل حساسیت عملکرد مدل KW-GIUH نسبت به روش‌های مختلف برآورد نفوذ و ضرایب زبری جریان دامنه‌ای و آبراه‌های انجام شد. نتایج حاصل از ارزیابی هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با استفاده از هر روش و داده‌های مشاهداتی در حوضه کسلیان، حاکی از عملکرد بالای روش‌های هورتون و شاخص  $\phi$  نسبت به دو روش دیگر دارد.

مدل GIUH قابلیت مناسبی در تخمین جریان سطحی حوزه‌های آبخیز دارد و این موضوع توسط دانشمندان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش مدل GIUH گسترش یافته و معادلات حاکم بر آن جهت تخمین رواناب زیرسطحی حوزه‌های آبخیز به کار گرفته شد.

مهم‌ترین نوآوری پژوهش حاضر برآورد همزمان هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی حوزه‌های آبخیز فاقد آمار بر اساس روش GIUH است. در زمینه کاربرد روش GIUH در تخمین جریان سطحی تحقیقات وسیعی در کشور ایران شده است که بعضی از مهم‌ترین آنها بیان شدند ولی تخمین جریان زیرسطحی با این روش مهم‌ترین نوآوری این پژوهش است. مهم‌ترین اهداف این پژوهش به شرح زیر است:

الف) معرفی مدل GIUH گسترش یافته در جهت تخمین رواناب سطحی و زیرسطحی حوزه‌های آبخیز  
ب) تحلیل حساسیت پارامترهای مدل GIUH و بررسی اهمیت پارامترهای مدل

ج) کاربرد مدل در حوزه آبخیز کسلیان در شمال ایران و حوضه گاجاس در کشور هند در تخمین همزمان هیدروگراف جریان سطحی و زیرسطحی

### مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز کسلیان با مختصات طول‌های جغرافیایی  $53^\circ$  و  $18'$  تا  $53^\circ$  و  $30'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $35^\circ$  و  $58'$  تا  $36^\circ$  و  $7'$  شمالی در رشته کوه‌های البرز مرکزی در شمال ایران قرار دارد. این حوضه از شمال به کوه‌های ستیک و چهار تب با  $1100$  و  $1790$  متر ارتفاع، از جنوب به کوه‌های میروزاد و گلراد با  $2700$  و  $3349$  متر ارتفاع، از غرب به کوه گتوجا با

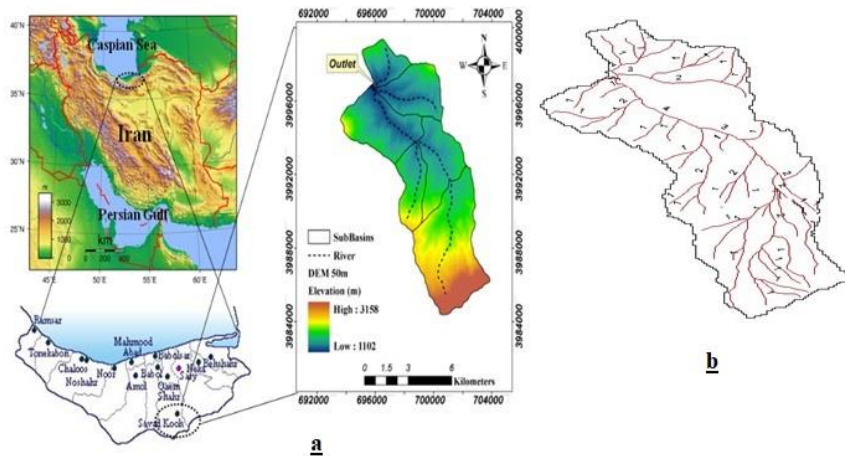
Jabbari et al., (2022) نتایج مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی در برآورد وقوع سیل در فصول زمستان و بهار، در حوزه آبخیز میناب (برنطین) مورد مقایسه قرار دادند. داده‌های پژوهش شامل حداکثر دبی ساعتی و بارش‌های متناظر آنها برای سه واقعه بهار و سه واقعه زمستان است. روش کار به این طریق است که ابتدا پارامترهای مورد نیاز مدل GIUH شامل نسبت انشعاب، نسبت طول و نسبت مساحت برای حوضه تحت مطالعه برآورد شد. سپس با اجرای مدل برای وقایع انتخابی، مقادیر دبی اوج و زمان وقوع دبی اوج محاسباتی با مقادیر مشاهده‌ای همان وقایع مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مقایسه بیانگر این است که مدل GIUH در برآورد دبی اوج و زمان وقوع اوج وقایع سیل که در زمستان رخ می‌دهد (به ترتیب با مقادیر میانگین  $20/09$  و  $45/64$  درصد) به لحاظ اینکه با داده‌های مشاهده‌ای فاصله کمتری دارد، از دقت بالاتری نسبت به وقایع بهار (به ترتیب با مقادیر میانگین  $119/7$  و  $57/3$ ) برخوردار است.

Keshtkaran et al., (2018) با ترکیب مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش و کلارک با فرض تعداد مخازن ناش برابر پنج، مقدار ضریب ذخیره ناش به صورت تابعی از زمان تمرکز ارائه داد. براساس مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش، معادله‌ای بدون بعد جهت محاسبه هیدروگراف واحد مصنوعی حوزه‌های آبخیز ارائه شد که تابعی از مساحت حوضه، زمان و زمان تمرکز حوضه است. مدل مزبور جهت تخمین هیدروگراف رواناب مستقیم دو حوزه آبخیز کسلیان در شمال ایران و آجای در هند مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس نتایج، ضریب کارایی مدل برای سه رویداد از چهار رویداد در نظر گرفته شده در حوضه کسلیان بالای  $0/82$  و برای چهار رویداد در حوضه آجای بین  $0/78$  تا  $0/89$  بود که مقادیر مناسبی هستند. میزان خطای مدل جهت تخمین پیک رواناب سطحی حوضه کسلیان بین  $5/3$  تا  $9/7$  بود. متوسط خطای پیک در چهار رویداد حوضه آجای  $7/8$  است.

Shokoohi et al., (2017) به جای ارزیابی منفرد روش‌های محاسبه نفوذ به ارزیابی چهار روش مختلف برآورد نفوذ یعنی شاخص  $\phi$ ، هورتون، گرین-امپت و SCS بر عملکرد مدل ژئومورفولوژیکی مبتنی بر موج

کسیلیان وجود دارند. ویژگی‌های فیزیوگرافی حوزه آبخیز کسیلیان در جدول ۱، نشان داده شده است.

۲۰۴۳ متر ارتفاع از شرق به کوه چهار تب با ۱۶۱۳ متر ارتفاع محدود می‌شود (شکل ۱). دو ایستگاه کلیماتولوژی و ده ایستگاه باران‌سنجی به‌علاوه یک ایستگاه هیدرومتری درحوزه آبخیز



شکل ۱- a: موقعیت حوزه کسیلیان در استان و کشور و b: شبکه آبراهه حوزه کسیلیان

Fig. 1. a: Location of the Kasilian Watershed in Mazandaran Province and Iran and b: Kesilian stream networks

های هیدرولوژیکی محاسبه شده است، به‌صورت جدول ۱، است.

مشخصات ژئومورفولوژیک حوزه که توسط الحاقیه‌های هیدرولوژیکی نرم‌افزار ARC/GIS و الحاقیه

جدول ۱- مشخصات ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز کسیلیان و گاجاس

Table 1. Geomorphological characteristics of the Kasilian and Gajas Watersheds

Watershed	i	$N_i$	$A_i(km^2)$	$L_i(km)$	$\bar{A}_i(km^2)$	$\bar{L}_i(km)$	Sci	Soi	$POA_i$
Kasilian	1	42	38.43	67.26	0.915	1.60	0.241	0.345	0.569
	2	11	52.94	19.70	4.813	1.76	0.069	0.297	0.215
	3	3	62.25	7.40	20.75	2.45	0.047	0.263	0.138
	4	1	67.80	4.65	67.89	4.65	0.008	0.261	0.077
Gajas	1	121	365.42	210	3.02	1.74	0.17	0.81	0.722
	2	23	427.34	69.8	18.58	3.03	0.14	0.655	0.122
	3	6	475.32	8.45	79.22	7.63	0.04	0.172	0.095
	4	1	5.60	40.23	5.60	23.40	0.017	0.065	0.061

$i$  شماره درجه، احتمال دامنه‌ها ( $POA_i$ )، متوسط شیب دامنه ( $Soi$ )، متوسط شیب نهر ( $Sci$ )، متوسط مساحت  $\bar{A}_i$ ، کل طول‌ها در هر درجه  $L_i$ ، کل مساحت زهکشی در هر درجه  $A_i$ ، تعداد در هر درجه  $N_i$

هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان زیرسطحی و سطحی حوزه کسیلیان مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی خاک ۰/۰۲۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است Sabzevari et al., (2013). ضخامت متوسط لایه خاک دو متر در نظر گرفته شده است. ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی رودخانه کسیلیان به نام ایستگاه ولیک بن در نزدیکی روستایی به‌همین نام در محل خروجی حوزه واقع شده است.

مشخصات آبراهه‌ها و نحوه حرکت آب در نهرها و احتمال وقوع به‌صورت جدول ۲ است.

این حوزه، معرف مناطق وسیعی از قسمت‌های کوهستانی و جنگلی شمال کوه‌های البرز است، کل سطح حوزه کسیلیان از پوشش جنگل، مرتع و زمین زراعی پوشیده شده است. ضریب مانینگ صفحات ۰/۴ و نهرها ۰/۳ در نظر گرفته شد. حوزه کسیلیان دارای خاک با نفوذپذیری کم است، جهت مدل‌سازی



حوضه ۵۰۶ کیلومترمربع است. شکل ۲ شبکه آبراهه‌های حوضه را نشان می‌دهد.

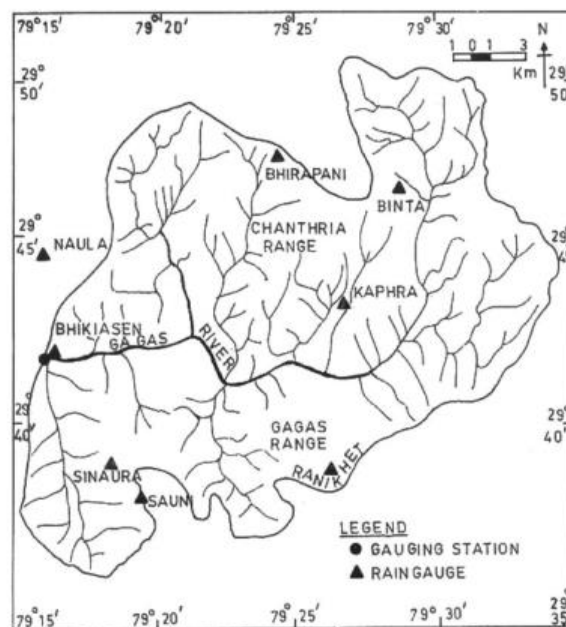
دومین حوضه که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، حوضه گاگاس در کشور هند است. طول حوضه ۲۸ کیلومتر و عرض متوسط ۱۸ کیلومتر است. مساحت

جدول ۲- اطلاعات زهکشی نهرها و احتمال وقوع آنها

Table 2. Stream drainage information and their probability of occurrence

Watershed	i	Number of streams drained into other streams				Pxixj			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Kasilian	1	42	37	2	3	1	0.88	0.05	0.70
	2	-	11	9	2	-	1	0.82	18
	3	-	-	3	3	-	-	1	1
	4	-	-	-	1	-	-	-	1
Gajas	1	121	88	22	11	1	0.73	0.18	0.09
	2	-	23	20	3	-	1	0.87	0.13
	3	-	-	6	6	-	-	1	1
	4	-	-	-	1	-	-	-	1

$$Px_1x_2=0.881; Px_1x_3=0.0476; Px_1x_4=0.0714; Px_2x_3=0.818; Px_2x_4=0.182$$



شکل ۲- شبکه آبراهه‌های حوضه گاگاس در کشور هند

Fig. 2. Stream networks of the Gajas Basin in India

اگر یک حوضه را براساس شبکه آبراهه‌ها درجه بندی شوند، می‌توان هر آبراهه و دامنه را با درجه خاصی بیان نمود.

براساس مطالعات انجام شده توسط Lee et al., (2005) جریان سطحی در دامنه‌ها در نزدیکی نهرها و در قسمت پایین دامنه در منطقه اشباع ایجاد می‌شود و جریان زیرسطحی در کل دامنه رخ می‌دهد. شکل ۴، نحوه درجه‌بندی یک حوضه درجه ۳ را نشان می‌دهد و همچنین دو منطقه جریان سطحی و زیرسطحی

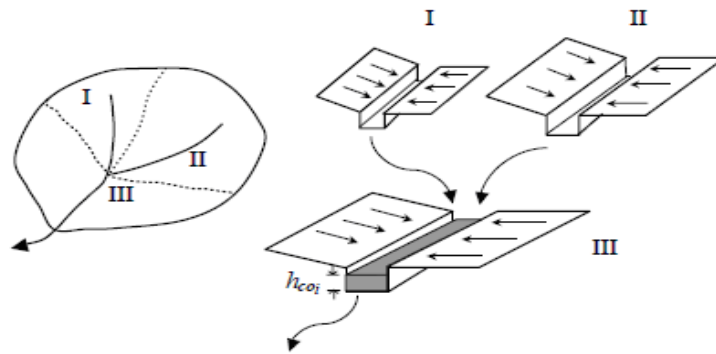
خاک این حوضه نفوذ پذیر است و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک ۰/۰۰۴ متر بر ثانیه و تخلخل مؤثر خاک ۰/۳۵ در نظر گرفته شد.

تخمین جریان سطحی و زیر سطحی به روش GIUH: حوزه‌های آبخیز از یکسری دامنه (Hillslopes) و شبکه نهرها (Streams) تشکیل شده‌اند که رواناب ناشی از دامنه‌ها توسط این شبکه به خروجی حوضه انتقال پیدا می‌کند. به‌طور کلی در محل برخورد دو دامنه یک نهر ایجاد می‌شود. شکل ۳، نحوه ایجاد یک نهر را نشان می‌دهد.

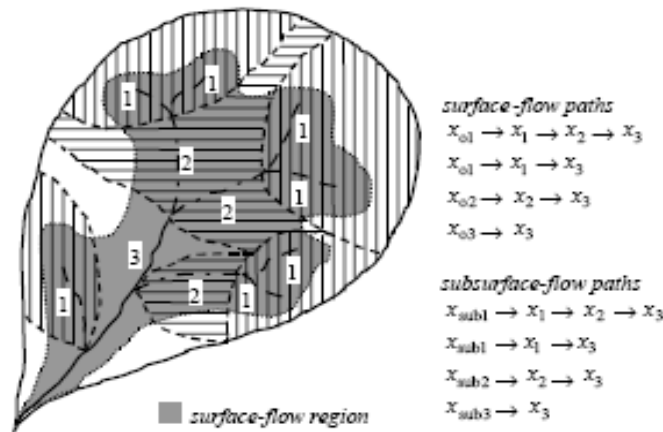
جداسازی منطقه اشباع با جریان سطحی و منطقه غیراشباع را نشان می‌دهد.

همراه با مسیرهای حرکت آب به سمت خروجی قابل مشاهده است.

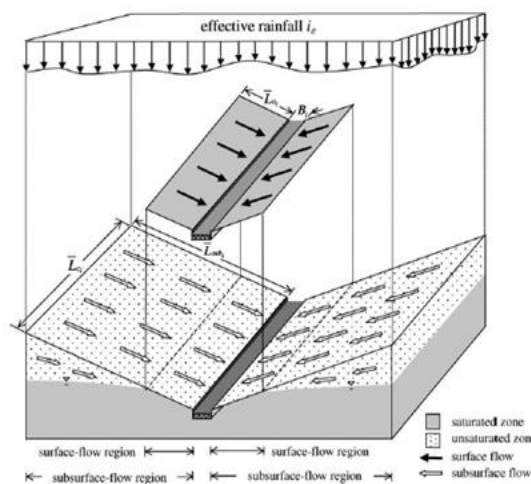
در مدل Lee et al., (2005) مسیر حرکت آب در جریان سطحی و زیرسطحی یکسان است. شکل ۵، نحوه



شکل ۳- نحوه ایجاد یک نهر و درجه‌بندی آن  
Fig. 3. How to create a stream and ordering it



شکل ۴- مسیر جریان سطحی (در منطقه اشباع) و زیرسطحی (در کل دامنه) در یک حوضه (Lee et al., 2005)  
Fig. 4. Surface (in saturated zone) and subsurface (over the entire overland) flow path in a basin (Lee et al., 2005)



شکل ۵- جداسازی منطقه جریان سطحی و منطقه جریان زیرسطحی در یک صفحه (Lee et al., 2005)

Fig. 5. Separation of surface flow region and subsurface flow region in overland (Lee et al., 2005)

حرکت رواناب را برای یک حوضه با حداکثر درجه سه را نشان می‌دهد. مسیر حرکت جریان سطحی و زیرسطحی یکسان است.

اگر  $w_s$  یک مسیر انتخابی برای جریان سطحی به صورت رابطه (۴) باشد، احتمال اینکه جریان سطحی در مسیر مزبور قرار گیرد، توسط معادله (۴) محاسبه می‌شود (Lee et al., 2005).

$$X_{oi} \rightarrow X_i \rightarrow X_j \rightarrow \dots \rightarrow X_Q \quad (4)$$

$$P(w_s) = \phi P_{OAi} \cdot P_{xoi.xi} \cdot P_{xixj} \dots \cdot P_{xkxQ}$$

$$T_{WS} = T_{xoi} + T_{xi} + T_{xj} + \dots + T_{xQ}$$

که در آن،  $P_{xoi.xi}$  احتمال انتقال جریان سطحی صفحه نام به کانال نام،  $P_{xixj}$  احتمال انتقال جریان سطحی کانال نام به کانال نام، است.

مقادیر احتمال وجود نهرها و دامنه‌ها با درجه‌بندی های مختلف بر اساس مشخصات دامنه‌ها و نهرها که توسط برنامه ARC/GIS در محیط GIS محاسبه می‌شود. ضریب درصد اشباع ( $\phi$ ) در رابطه (۴) نقش اساسی دارد. مقدار زمان پیمایش کل مسیر  $w_s$  برابر مجموع زمان پیمایش دامنه و نهرها است.

به همین طریق اگر  $w_{sub}$  مسیر حرکت جریان زیرسطحی دامنه به صورت زیر باشد، احتمال اینکه جریان زیرسطحی در مسیر  $w_{sub}$  قرار گیرد، توسط رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Lee et al., 2005).

$$X_{subi} \rightarrow X_i \rightarrow X_j \rightarrow \dots \rightarrow X_Q \quad (5)$$

$$P(w_{sub}) = (1 - \phi) P_{OAi} \cdot P_{xsubi.xi} \cdot P_{xixj} \dots \cdot P_{xkxQ}$$

$$T_{Wsub} = T_{xsubi} + T_{xi} + T_{xj} + \dots + T_{xQ}$$

هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک کل حوضه از مجموع هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک کل جریان سطحی و زیرسطحی حاصل می‌شود که پیش‌بینی آن توسط رابطه (۶) صورت می‌گیرد (Lee et al., 2005).

$$(6) u(t) = u_s(t) + u_{sub}(t) =$$

$$\sum_{w_s \in W_s} [f_{xoi}(t) * f_{xi}(t) * f_{xj}(t) * \dots * f_{xQ}(t)] w_s p(w_s) +$$

$$\sum_{w_{sub} \in W_{sub}} [f_{xsubi}(t) * f_{xi}(t) * f_{xj}(t) * \dots * f_{xQ}(t)] w_{sub}$$

علامت \* در رابطه (۶) به معنی انتگرال پیچشی است. جهت محاسبه رابطه (۶) بر اساس درجه‌بندی حوضه نیاز به یک برنامه پیچیده رایانه‌ای است.

اگر سیستم دامنه‌ها و کانال‌ها (نهرها) را به صورت مخازن خطی در نظر گرفته شود، هیدروگراف واحد

اگر به شکل ۵، توجه شود خواهید دید که جریان سطحی را در منطقه اشباع در پایین دامنه در نظر گرفته می‌شود و جریان زیرسطحی را در منطقه غیر اشباع در نظر گرفته است. (Lee et al., 2005) جهت جدا سازی منطقه اشباع و غیراشباع از هیچ تئوری علمی استفاده نکرده است و طول منطقه اشباع با جریان سطحی در یک صفحه را درصدی ( $\phi$ ) از طول کل صفحه در نظر گرفته است و مقدار  $\phi$  برابر  $0.5$  را در نظر گرفت. با توجه به شکل ۳، طول سطح اشباع از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\bar{L}_{oi} = \phi \bar{L}_{subi} \quad (1)$$

که در آن،  $\bar{L}_{oi}$  طول منطقه اشباع صفحه نام،  $\bar{L}_{subi}$  طول متوسط جریان زیرسطحی صفحه نام است (طول کل صفحه). طول متوسط جریان زیرسطحی که همان متوسط طول صفحات است از رابطه (۲) به دست می‌آید (Lee et al., 2005).

$$\bar{L}_{subi} = \frac{A P_{OAi}}{2N_i \bar{L}_{ci}} \quad (2)$$

که در آن،  $A$  مساحت کل حوضه،  $N_i$  تعداد کانال با درجه نام،  $\bar{L}_{ci}$  طول متوسط کانال با درجه نام است که این پارامترها توسط نرم‌افزار GIS برای یک حوضه دارای DEM قابل محاسبه است.  $P_{OAi}$  نسبت مساحت در هر درجه نام به مساحت کل حوضه است. با توجه به اینکه تعداد صفحات در حوزه‌های آبخیز بزرگ بسیار زیاد است، لذا از متوسط طول نهرها و صفحات در هر درجه استفاده می‌شود تا حجم محاسبات کم شود.

Sabzevari et al., (2013) رابطه (۳) را برای

جداسازی منطقه اشباع از غیر اشباع ارائه نمود.

$$\phi = 1 - \frac{kD\bar{S}}{NL} \quad (3)$$

که در آن  $k$  ضریب هدایت هیدرولیکی خاک،  $L$  طول کل صفحه،  $D$  ضخامت متوسط خاک،  $\bar{S}$  شیب صفحه و  $\bar{N}$  متوسط شدت تغذیه به لایه خاک در طول بارندگی است. رابطه (۳) با در نظر گرفتن ضخامت خاک، شدت تغذیه بارندگی به لایه خاک، شیب و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و طول صفحه قادر است، طول منطقه اشباع را محاسبه شود.

رواناب ناشی از جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌ها ( $x_{ij}$ ) وارد نهرهای مختلف در مسیر جریان شده ( $x_{ij}$ ) و بر اساس درجه‌بندی نهرها این رواناب به خروجی حوضه منتقل می‌شود. شکل ۲، مسیرهای مختلف

نهر وارد می‌شود، لذا زمان پیمایش زیرسطحی صفحات را می‌توان از رابطه (۱۱) استفاده نمود. برای محاسبه جریان کل حوضه از رابطه (۱۱) استفاده می‌شود.

$$Q = \int_0^t [u_s(t-\tau)I_e(\tau) + u_{sub}(t-\tau)N(\tau)] d\tau \quad (11)$$

که در آن،  $N(\tau)$  شدت تغذیه بارندگی،  $I_e$  بارش مازاد،  $u_s$  و  $u_{sub}$  به ترتیب هیدروگراف واحد لحظه‌ای سطحی و زیرسطحی محاسبه شده است.

برای ارزیابی دقیق‌تر نتایج هیدروگراف رواناب مستقیم دو حوضه کسلیان و گاجاس از ضریب ناش (Nash and Sutcliffe (1970) به صورت رابطه (۱۲) استفاده شد.

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_O(t) - Q_S(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_O(t) - Q_A]^2} \quad (12)$$

که در آن،  $Q_O(t)$  و  $Q_S(t)$  به ترتیب دبی مشاهداتی و دبی پیش بینی شده در زمان  $t$  و  $Q_A$  متوسط دبی‌های مشاهداتی است. مقدار CE ضریب کارایی مدل در تخمین هیدروگراف سیلاب است که هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده کارایی مناسب مدل است. مقدار ضریب کارایی ناش برای چهار رویداد مشاهداتی در دو حوضه مطابق جدول ۳ است. مقدار خطای تقریب بیک سیلاب نیز از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$EQ_p(\%) = \frac{(Q_p)_{simu} - (Q_p)_{rec}}{(Q_p)_{rec}} \quad (13)$$

مقدار خطای تقریب دبی ماکزیمم نیز مطابق جدول ۳، است.

## نتایج و بحث

**نتایج مدل:** مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی ارائه شده در این پژوهش توسط نرم افزار متلب کد نویسی شده است و خروجی کد هیدروگراف جریان کل حوضه (جریان سطحی + جریان زیرسطحی) و هیدروگراف جریان زیرسطحی حوضه است. ابتدا مدل برای چهار رویداد بارندگی رواناب در حوزه آبخیز کسلیان که آمار آن مورد تأیید قرار گرفته شده بود، به کار گرفته شد. شکل ۶، هیستوگرام بارندگی و بارش مازاد برای چهار رویداد حوضه را نشان

لحظه‌ای هر سیستم تابعی از زمان پیمایش<sup>۱</sup> در آن سیستم است. هیدروگراف واحد لحظه‌ای دامنه‌ها در جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌ها و نهرها بر اساس زمان پیمایش ( $T_{x_k}$ ) آنها از رابطه نمایی (۷) محاسبه می‌شود.

$$f_{x_k} = \frac{1}{T_{x_k}} \exp\left(\frac{-t}{T_{x_k}}\right) \quad (7)$$

**محاسبه زمان پیمایش در جریان سطحی:** محاسبه زمان پیمایش به روش‌های هیدرولیکی از جمله موج‌های سینماتیکی به صورت دقیق قابل محاسبه است. به طور مثال اگر دامنه را به صورت صفحه‌ای صاف و موازی در نظر گرفته شود، زمان تعادل جریان سطحی صفحه تابعی از شدت بارندگی مؤثر، طول صفحه (طول سطح اشباع)، شیب و ضریب مانینگ است که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود (Henderson et al., 1964).

$$T_{x_{oi}} = \left( \frac{n_0 L_{oi}}{S_{oi}^{1/2} g^{m-1}} \right)^{1/m} \quad (8)$$

که در آن،  $n_0$  ضریب مانینگ،  $S_{oi}$  شیب متوسط دامنه نام و  $g$  شدت بارندگی اضافی است.

**محاسبه زمان پیمایش در نهرها:** در مدل Lee et al. (2005) زمان پیمایش جریان در نهر نام از طریق رابطه‌های هیدرولیکی (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$T_{x_i} = \frac{B_i}{2i_e \bar{L}_{sub_i}} \left[ \left( h_{co_i}^m + \frac{2i_e n_c \bar{L}_{sub_i} \bar{L}_{c_i}}{B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2}} \right)^{1/m} - h_{co_i} \right] \quad (9)$$

$$h_{co_i} = \left[ \frac{i_e n_c (N_i \bar{A}_i - AP_{OA_i})}{N_i B_i \bar{S}_{c_i}^{1/2}} \right]^{1/m}$$

که در آن،  $A$  مساحت کل حوضه،  $B_i$  عرض نهر با درجه  $i$ ،  $h_{co_i}$  ضخامت آب در کانال نام،  $P_{OA_i}$  نسبت سطح اشباع نام به سطح کل منطقه اشباع حوضه،  $\bar{S}_{c_i}$  شیب کانال نام،  $n_c$  ضریب مانینگ نهر است.

**زمان پیمایش جریان زیرسطحی:** Lee et al. (2005) بر اساس رابطه داریسی جهت محاسبه زمان پیمایش از رابطه (۱۱) استفاده نمود.

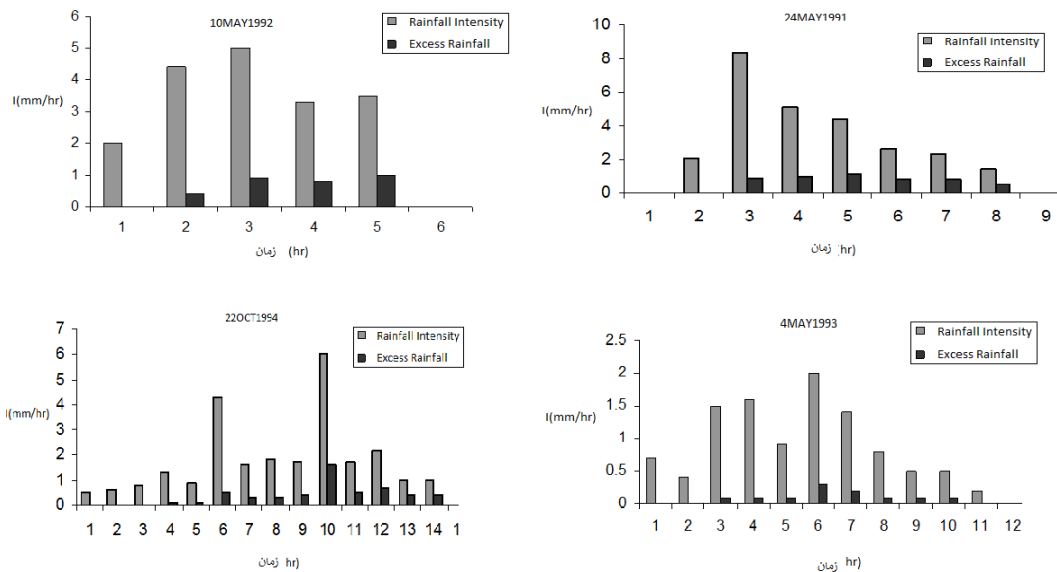
$$T_{x_{sub_i}} = \frac{\bar{L}_{sub_i}}{k \bar{S}_{oi}} \quad (10)$$

بر اساس تحقیقات (Arial et al., (2005) و Sabzevari et al., (2010) جریان زیرسطحی فقط در منطقه غیراشباع وجود دارد و وقتی جریان زیرسطحی به مرز منطقه اشباع برسد، وارد منطقه اشباع شده و به

<sup>1</sup> Travel time

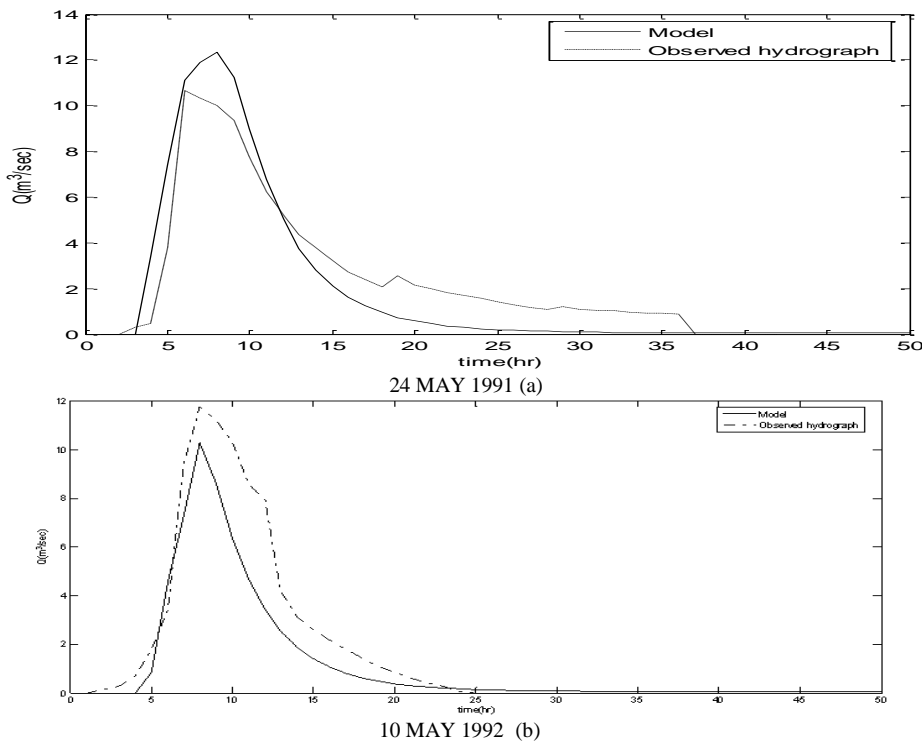
شکل ۷، هیدروگراف رواناب کل حوزه<sup>۱</sup> را برای چهار رویداد نشان می‌دهد.

می‌دهد. قابل توضیح است، بارش مازاد رویدادها براساس مدل نفوذ SCS-CN انجام گرفته است.



شکل ۶- هایتوگراف بارندگی و بارش مازاد چهار رویداد حوزه کسلیان

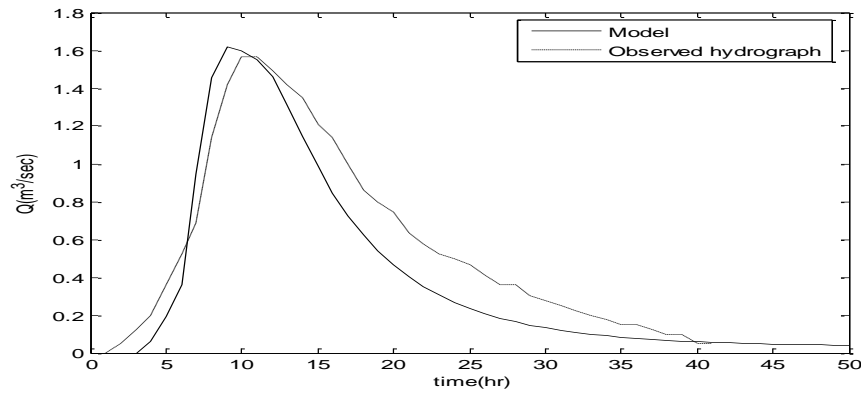
Fig. 6. Rainfall hyetograph and excess rainfall hyetograph of 4 events in the Kassilian basin



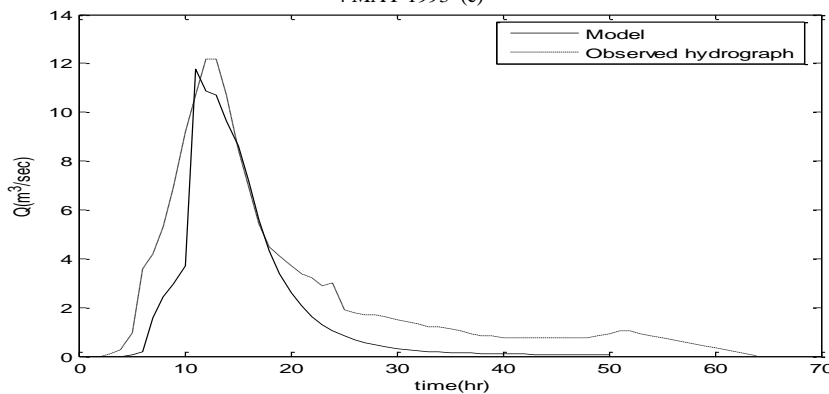
شکل ۷- هیدروگراف رواناب مستقیم کل حوزه کسلیان برای چهار رویداد

Fig. 7. Direct runoff hydrograph of the Kassilian basin for 4 events

<sup>1</sup> Direct runoff



4 MAY 1993 (c)



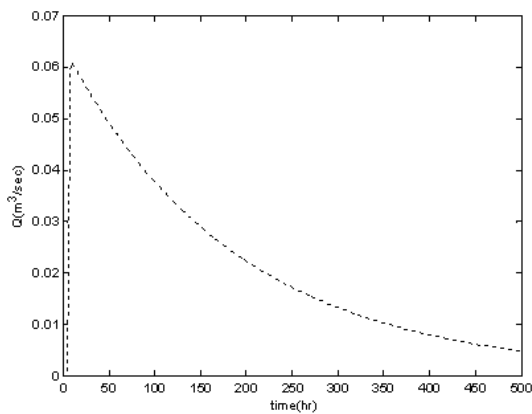
22 OCT 1994 (d)

ادامه شکل ۷

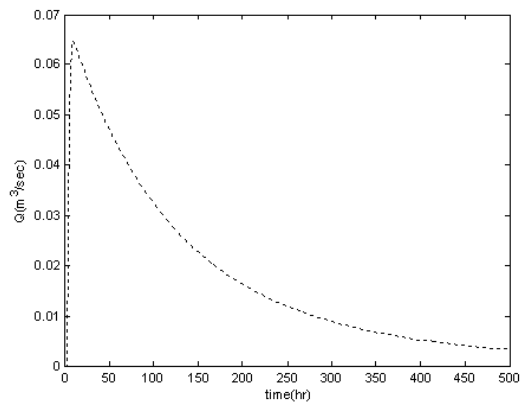
Fig. 7. Continued

بوده است. علت اصلی کاهش دبی در این رویداد نسبت به رویدادهای قبلی کاهش مقادیر بارندگی بر حوضه طبق شکل ۶، است. در تاریخ ۲۲ اکتبر ۱۹۹۴ مقدار دبی پیک برآورد شده ۱۱/۸ و دبی پیک مشاهده شده ۱۲/۱ مترمکعب بر ثانیه بوده است. شکل ۸، نتایج برآورد هیدروگراف جریان زیرسطحی برای چهار رویداد است.

مطابق شکل ۷-a، مقدار دبی پیک برآورد شده ۱۲/۵ و دبی مشاهده شده ۱۰/۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است. مقادیر ضریب کارایی مدل طبق جدول ۳، است. در تاریخ ۱۰ می ۱۹۹۲ مقدار دبی پیک برآورد شده ۱۰/۱ و دبی پیک مشاهده شده ۱۱/۸ مترمکعب بر ثانیه بوده است. در تاریخ ۴ می ۱۹۹۳ مقدار دبی پیک برآورد شده ۱/۶۲ و دبی مشاهده شده ۱/۵۸ مترمکعب بر ثانیه



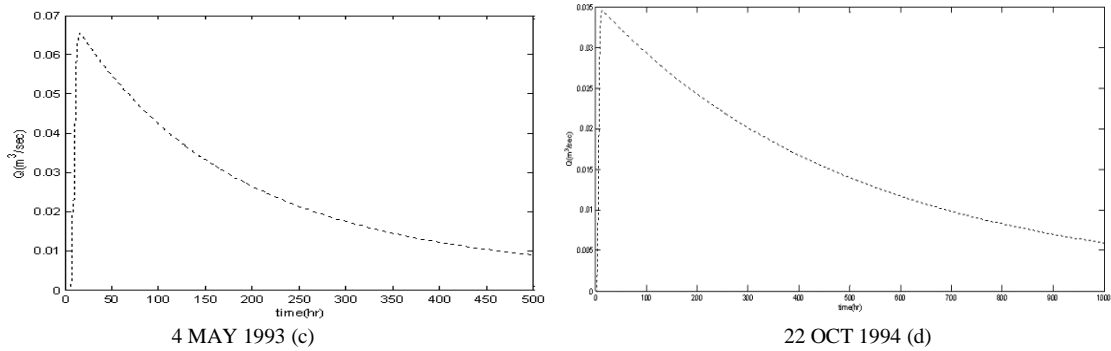
24 MAY 1991 (a)



10 MAY 1992 (b)

شکل ۸- هیدروگراف جریان زیرسطحی حوضه کسلیان

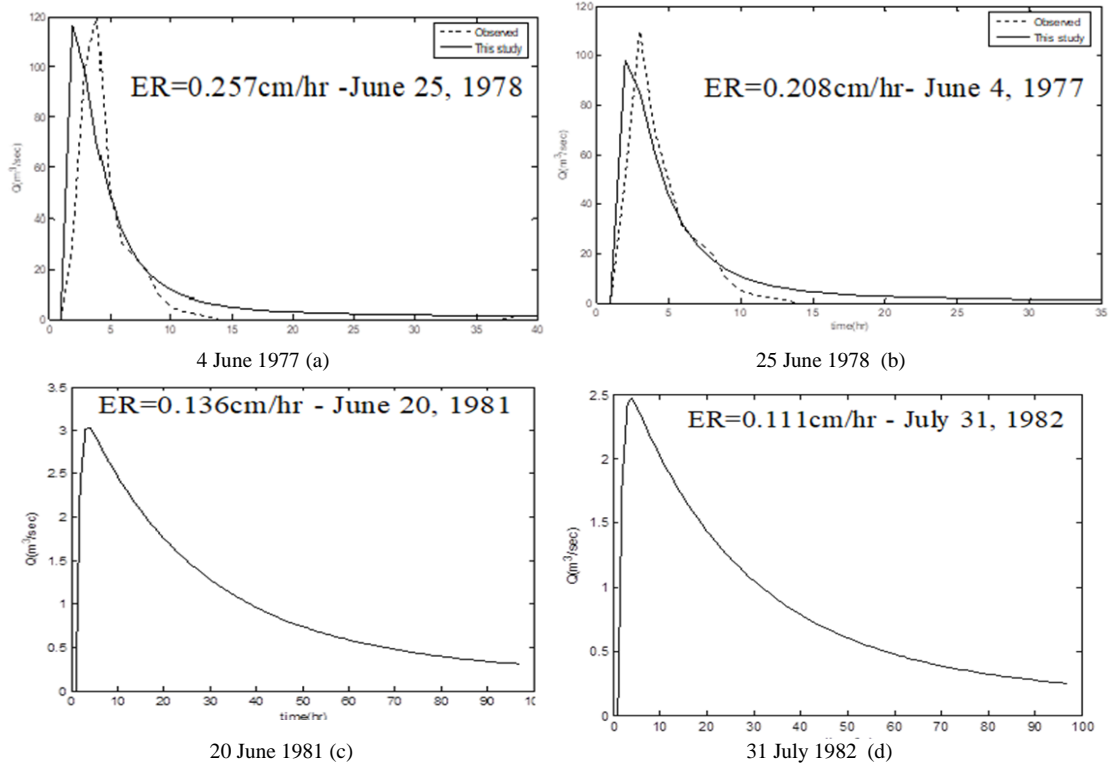
Fig. 8. Subsurface flow hydrograph of the Kassilian basin



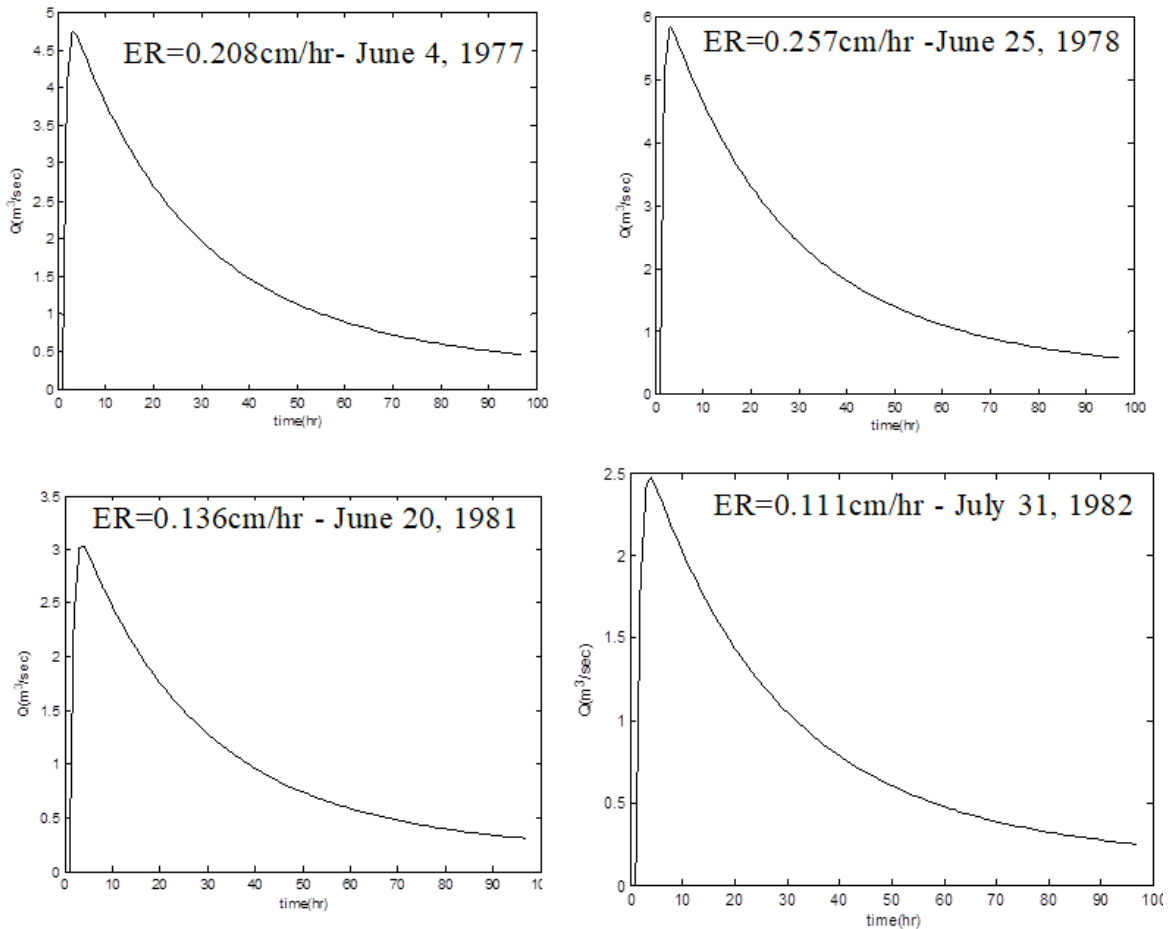
ادامه شکل ۸  
Fig. 8. Continued

روند مقادیر پیک جریان زیرسطحی با پیک جریان سطحی در چهار رویداد مطابقت دارد. برآورد رواناب حوضه گاجاس براساس مدل GIUH در این پژوهش انجام گرفت، شکل ۹ هیدروگراف رواناب کل حوضه را برای چهار رویداد مختلف حوضه نشان می‌دهد. جدول ۳ مقادیر ضریب کارایی مدل پیشنهادی برای تخمین هیدروگراف حوضه کسلیان و گاجاس را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۸-a در تاریخ ۲۴ می ۱۹۹۱ مقدار دبی پیک جریان زیرسطحی برآورد شده ۶۵ لیتر بر ثانیه بوده است. در تاریخ ۱۰ می ۱۹۹۲ مقدار دبی پیک برآورد شده ۶۰ لیتر بر ثانیه است. در تاریخ ۴ می ۱۹۹۳ مقدار دبی پیک برآورد شده ۳۵ لیتر بر ثانیه است که علت کاهش این رویداد کم شدن بارندگی و مقدار نفوذ بارندگی است (شکل ۶). در تاریخ ۲۲ اکتبر ۱۹۹۴ مقدار دبی پیک برآورد شده ۶۵ لیتر بر ثانیه بوده است. با مقایسه شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۹- هیدروگراف رواناب کل (سطحی و زیرسطحی) حوضه کاجاس  
Fig. 9. Total runoff hydrograph (surface and subsurface) of the Gajas basin



شکل ۱۰- هیدروگراف جریان زیرسطحی حوضه کاجاس  
 Fig. 10. Subsurface flow hydrograph of the Gajas basin

جدول ۳- مقادیر ضریب کارایی مدل جهت تخمین هیدروگراف کل سیلاب حوزه آبخیز کسلیان و گاجاس

Table 3. Model efficiency coefficient values for estimating the total flood hydrograph of the Kasilian and Gajas watersheds

Date	10 May 1992	24 May 1991	4 May 1993	22 Oct 1994
CE(Kasilian)	0.85	0.8	0.87	0.6
EQp(%) (Kasilian)	12.7 %	15.5 %	3.2 %	3.5 %
Date	4 June 1977	25 June 1978	20 June 1981	31 July 1982
CE(Gagas)	0.88	0.88	0.89	81
EQp(%) (Gagas)	9 %	1/6 %	8/6 %	12 %

گاجاس در چهار رویداد بین ۲/۵ تا شش مترمکعب بر ثانیه است. حداکثر دبی کل جریان در این حوضه بین ۴۴ تا ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شد که به طور متوسط براساس این چهار رویداد می توان گفت جریان زیرسطحی حدود پنج تا شش درصد هیدروگراف کل جریان است.

در حوضه کسلیان حداکثر دبی کل حوضه بین ۱/۶ تا ۱۲ مترمکعب بر ثانیه است و پیک جریان زیرسطحی حوضه ۳۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه است. دبی جریان زیرسطحی به پوشش گیاهی و جنس لایه های خاک و مشخصات خاک حوضه ارتباط دارد.

مقادیر CE بزرگتر از ۰/۸ مقادیر مناسبی هستند و هیدروگراف های پیش بینی شده در تمامی رویدادهای دو حوضه کسلیان و گاجاس از تخمین مناسبی برخوردار بوده اند. مقدار خطای تخمین پیک سیلاب که معمولاً مبنی طراحی سازه های هیدرولیکی است در حوضه کسلیان بین سه تا ۱۶ درصد بوده است و در حوضه گاجاس بین ۱/۶ تا ۱۲ درصد که مقادیر مناسبی هستند.

براساس نتایج شکل ۱۰، هرچه مقدار بارندگی کمتر شده است، پیک جریان زیرسطحی نیز کاهش یافته است. مقدار حداکثر جریان زیرسطحی در حوضه

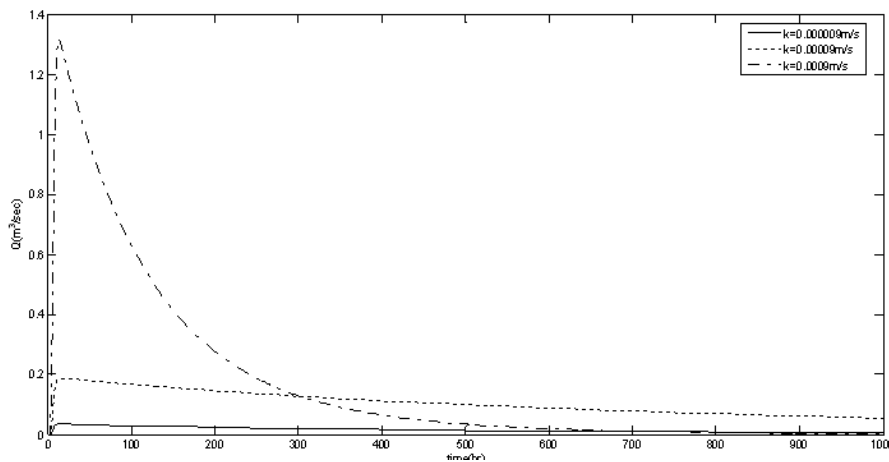


ضریب هدایت هیدرولیکی خاک یک پارامتر بسیار کلیدی در مدل‌سازی جریان زیرسطحی حوزه‌های آبخیز است. در بسیاری از حوضه‌ها با ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بالا عملاً جریان زیرسطحی نقش اساسی در هیدروگراف مستقیم خروجی را دارد و هیدروگراف جریان سطحی اثر بسیار کمی را خواهد داشت. با مشاهده هیدروگراف واحد لحظه‌ای زیرسطحی حوزه آبخیز کسلیان، مشاهده می‌شود که مقدار حداکثر آنها بسیار کم و حدود  $0/035$  تا  $0/065$  مترمکعب بر ثانیه است. علت این امر این است که ضریب هدایت هیدرولیکی خاک حوضه  $0/025$  متر بر ثانیه کم است و خاک از نوع ریزدانه است. لذا، در این حوضه جریان سطحی از اهمیت بالاتری نسبت به جریان زیرسطحی برخوردار است.

برای مثال، شکل ۱۱ تأثیر ضریب هدایت هیدرولیکی را بر روی هیدروگراف جریان زیرسطحی تاریخ ۴ می ۱۹۹۳ را نشان می‌دهد.

### تحلیل حساسیت پارامترهای مدل هیدروگراف

**واحد لحظه‌ای:** مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی ارائه شده در این پژوهش نیز مانند بسیاری از مدل‌های بارندگی-رواناب به بعضی از پارامترهای خود حساس است. پارامترهای ورودی مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی عبارت است از ضریب مانینگ صفحات و نهرها، سطح کل حوضه، عرض رودخانه خروجی، تخلخل و ضریب هدایت هیدرولیکی و ضخامت خاک و مشخصات ژئومورفولوژیکی حوزه آبخیز است. ضریب مانینگ صفحات بر اساس پوشش گیاهی صفحات حوضه تعیین می‌شود و در بسیاری از تحقیقات قسمتی از رویدادهای بارندگی-رواناب را جهت کالیبره کردن این پارامتر در نظر می‌گیرد. به طور کلی کلیه پارامترهای ورودی مدل در حوزه آبخیز از یک مکان به مکان دیگر تغییر می‌نماید و این قضیه باعث ایجاد خطا در تخمین هیدروگراف سیلاب‌ها می‌شود. در هر صورت، در این پژوهش متوسط اطلاعات مبنای معرفی به مدل بوده است.



شکل ۱۱- تأثیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بر روی هیدروگراف کل سیلاب زیرسطحی

رویداد 4 MAY 1993

Fig. 11. The effect of soil hydraulic conductivity on the subsurface hydrograph  
Event 4 MAY 1993

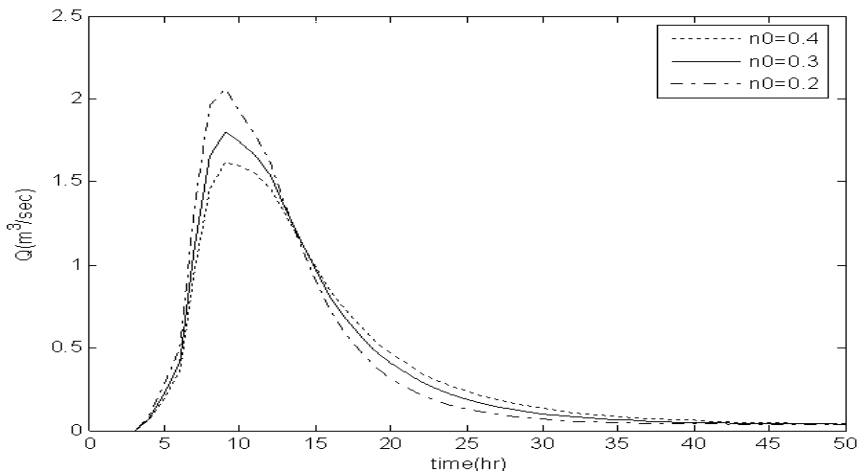
می‌رسد که به حداکثر  $1/6$  مترمکعب بر ثانیه جریان کل حوضه نزدیک می‌شود.

در یک تحلیل دیگر، تأثیر تغییرات ضریب مانینگ صفحات بر روی هیدروگراف کل حوضه مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه آن مطابق شکل ۱۲ است.

همانطور که مشاهده می‌شود، هرچه ضریب هدایت هیدرولیکی بزرگ‌تر می‌شود، مقدار پیک هیدروگراف جریان زیرسطحی نیز افزایش زیادی خواهد داشت. به طور مثال اگر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک حوضه کسلیان به  $0/0009$  متر بر ثانیه برسد پیک هیدروگراف جریان زیرسطحی به  $1/3$  مترمکعب بر ثانیه

می‌دهد که این تغییرات قابل ملاحظه است. تغییر پارامترهایی مانند تخلخل خاک و ضریب مانینگ نه‌ها بر روی سیلاب کل حوضه بسیار ناچیز است که از نمایش آن صرف نظر شد.

هرچه ضریب مانینگ صفحات کمتر شود، نشان دهنده این است که نفوذ کمتر خواهد شد. لذا، پیک سیلاب بالاتر می‌رود. تغییر ضریب مانینگ از ۰/۲ تا ۰/۴ مقدار پیک سیلاب را حدود ۳۱ درصد کاهش



شکل ۱۲- تأثیر ضریب مانینگ صفحات حوضه را بر روی هیدروگراف کل سیلاب- تاریخ 4 MAY 1993

**Fig. 12.** The effect of the Manning coefficient of the overlands on the total flood hydrograph - Date 4 MAY 1993  
 $k=0.025\text{m/s}$ ,  $n_0=0.4$ ,  $D=2\text{m}$

در این پژوهش مدل مزبور برای تخمین رواناب کل و جریان زیرسطحی به صورت هیدروگراف دو حوضه کسلیان در ایران و حوضه گاجاس در هند به کار گرفته شد. براساس نتایج مقدار خطای تخمین پیک کل جریان حوضه در حوضه کسلیان بین سه تا ۱۶ درصد بوده است و در حوضه گاجاس بین ۱/۶ تا ۱۲ درصد هستند که مقادیر مناسبی است. ماکزیمم دبی کل جریان در حوضه گاجاس بین ۴۴ تا ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه برای چهار رویداد محاسبه شد که به طور متوسط براساس این چهار رویداد می‌توان گفت جریان زیرسطحی حدود پنج تا شش درصد هیدروگراف کل جریان است. در حوضه کسلیان ماکزیمم دبی کل حوضه بین ۱/۶ تا ۱۲ مترمکعب بر ثانیه است و پیک جریان زیرسطحی حوضه ۳۵ تا ۶۰ لیتر بر ثانیه است. با تحلیل حساسیت مدل GIUH تأثیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و ضریب مانینگ صفحات بر روی دبی کل جریان مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج، هرچه ضریب مانینگ صفحات کمتر شود نشان دهنده این است که نفوذ کمتر خواهد شد. لذا، پیک سیلاب بالاتر می‌رود. تغییر ضریب مانینگ از ۰/۲ تا ۰/۴ مقدار پیک سیلاب را حدود ۳۱ درصد کاهش می‌دهد که این تغییرات قابل ملاحظه است. ضریب هدایت

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی (GIUH) جهت تخمین هیدروگراف رواناب مستقیم کل حوضه و هیدروگراف جریان زیرسطحی حوضه استفاده شد. جریان زیرسطحی در حوضه‌های جنگلی با نفوذپذیری بالا نقش مهمی در ایجاد جریان زیرسطحی دارد و با توجه با پیچیدگی‌های این جریان داخل خاک یکی از نوآوری‌های مهم این پژوهش استفاده از روش GIUH جهت تخمین جریان زیرحوضه‌ها است.

مدل GIUH به زمان پیمایش جریان سطحی و زیرسطحی دامنه‌های حوضه و نه‌ها ارتباط دارد. در این پژوهش برای جداسازی منطقه اشباع و غیراشباع دامنه‌ها از یک مدل اشباع‌پذیری استفاده شد. زمان پیمایش جریان زیرسطحی تابعی از نرخ اشباع‌پذیری دامنه‌ها، طول و شیب دامنه‌ها و مشخصات خاک است. زمان پیمایش دامنه‌ها در جریان زیرسطحی بر اساس تئوری موج سینماتیک و معادله دارسی محاسبه شد و در مدل به کار گرفته شد.

مدل GIUH ارائه شده در این پژوهش قابلیت محاسبه هیدروگراف رواناب کل حوضه، هیدروگراف رواناب سطحی و هیدروگراف رواناب زیرسطحی را دارد.

حوضه کسلیان بالای ۰/۸۲ و برای چهار رویداد در حوضه آجای بین ۰/۷۸ تا ۰/۸۹ بود که مقادیر مناسبی هستند. میزان خطای مدل جهت تخمین پیک رواناب سطحی حوضه کسلیان بین ۵/۳ تا ۹/۷ بود. متوسط خطای پیک در چهار رویداد حوضه آجای ۷/۸ است. قابل توجه است که مقادیر دبی پیک حوضه در این مطالعه با پژوهش حاضر مطابقت دارد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از همکاری همکاران مرکز تحقیقات آب دانشگاه آزاد واحد استهبان جهت تهیه اطلاعات مورد نیاز این پژوهش تشکر می‌نمایند.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

هیدرولیکی خاک یک پارامتر بسیار تأثیرگذار به‌ویژه بر روی هیدروگراف جریان زیرسطحی است که هرچه قدر خاک درشت دانه‌تر باشد، مقدار این جریان بیشتر می‌شود.

Derakhshan (2010) میزان پتانسیل سیلاب حوضه کسلیان با مدل HEC-HMS مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که زیرحوضه‌های با پوشش جنگلی دارای کمترین میزان رواناب و پتانسیل سیل‌خیزی است و بیشترین پتانسیل تولید رواناب در زیرحوضه‌هایی است که دارای اراضی وسیع زراعی و گسترش خاک‌های گروه هیدرولوژیک (C بافت سنگین) اراضی غیرقابل نفوذ هستند. این نتایج نشان‌دهنده اهمیت بالای نفوذ و جریان زیرسطحی در زیرحوضه‌های جنگلی است.

Keshtkaran et al., (2018) با استفاده روش هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش به ارزیابی رواناب حوضه کسلیان پرداخت. بر اساس نتایج، ضریب کارایی مدل برای سه رویداد از چهار رویداد در نظر گرفته شده در

### منابع مورد استفاده

- Amini, A., Hosseini, M., Mohammad Khan, S., Moghimi, E., Yamani, A., 2021. Evaluation of methods estimating overland/streamflow travel-times for predicting flood hydrograph based on PGIUH model (case study: Amameh Watershed, Tehran Province). *Quantit. Geomorphol. Res (in Persian)*.
- Aryal, S.K., O'Loughlin, E.M., Mein, R.G., 2005. A similarity approach to determine response times to steady-state saturation in landscapes. *Adv. Water Resour.* 28, 99-115.
- Chang, C.H., Lee, K.T., 2008. Analysis of geomorphologic and hydrological characteristics in watershed saturated areas using topographic-index threshold and geomorphology-based runoff model. *Hydrol. Process.* 22, 802-812.
- Derakhshan. 2010. Study of flood potential of Kasilian watershed using geographic information system. *J. Applied Res. Geograph. Sci. (in Persian)*, 16(13), 51-63.
- Gupta, V.K., Waymire, E., Wang, C.T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.* 16(5), 863-870.
- Henderson, F.M., Wooding, R.A., 1964. Overland flow and ground water flow from a steady rainfall of finite duration, *J. Geophys. Res.*, 69(7), 1531-1540.
- Jabbari, I., Asadi, M., Hesadi, H., 2023. Evaluation and comparison of GIUH model hydrograph simulation results in different rainfall seasons. *Geograph. Environ. Hazards* 12(3), 241-254 (in Persian).
- Keshtkaran, P., Sabzevari, T., Karami Moghadam, M., 2018. Estimation of runoff in ungauged catchments using the Nash non-dimensional unit hydrograph (case study: Ajay and Kasilian Catchments). *Water Resource. Eng.* 11(36), 1-10 (in Persian).
- Kumar, A., Kumar, D., 2008. Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order law ratios: case study. *Hydrol. Eng.* 13(7), 570-576.
- Lee, K.T., Chang, C.H., 2005. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. *J. Hydrol.* 311(1-4), 91-105.
- Lee, K.T., Yen, B.C., 1997. Geomorphology and kinematic-wave based hydrograph derivation. *J. Hydrol. Eng.* 123(1), 73-80.
- Mahmudi, F., Yamani, M., Bahrami, S., 2007. Evaluation of Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph Model (GIUH) in Kheez Kangir Watershed (Ivan Gharb). *Geograph. Res.* 60(39), 1-14 (in Persian).
- Najafi, M., Behbahani, S.M.R., Abdollahi, J., Hosseini, S.M., 2009. Comparative study of geomorphologic artificial intelligent model and GIUH For direct runoff computations. *Iran-Water Resour. Res.* 5(2), 10-9 (in Persian).

- Rodríguez- Iturbe, I., González- Sanabria, M., Bras, R.L., 1982. A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph. *Water Resour. Res.* 18(4), 877-886.
- Rodriguez-Iturbe, I., Valdes, J.B., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour. Res.* 15(6), 1409-1420.
- Sabzevari, T., Fattahi, M.H., Mohammadpour, R., Noroozpour, Sh., 2013. Prediction of surface and subsurface flow in catchments using the GIUH, under publication. *J. Flood Risk Manage.* 6(2), 135-145.
- Sabzevari, T., Rezaeian, M., 2011. Flood estimation of ungauged catchments by GIUH model. Research Project of Islamic Azad University, Estehban Branch and Fars Regional Water Company (in Persian).
- Sabzevari, T., Talebi, A., Ardakanian, R., Shamsai A., 2010. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 891-900.
- Sallary jazi, M., Adib, A., Mamudian Shushtari, M., Akhunali, M.A., 2009. Evaluation of GIUH-NASH and GCIUH-CLARK models in Kesilian Basin. 8th International Congress of Civil Engineering (in Persian).
- Shokoohi, A., Azizian, A., Jemaat, R., Singh, V., 2017. Sensitivity analysis of KW-GIUH rainfall runoff model with respect to infiltration methods and roughness coefficients. *Manage. Engineer. Watershed J.* 9(3), 162-175 (in Persian).
- Tarahi, M., Sabzevari, T., Fattahi, M.H., Derikvand, T., 2022. Estimating runoff in ungauged catchments by Nash-GIUH model using image processing and fractal analysis. *Stochas. Environ. Res. Risk Assess.* 36(1), 51-66.
- Troch, P.A., van Loon, A.H., Hilberts, A.G.J., 2002. Analytical solutions to a hillslope storage kinematic wave equation for subsurface flow. *Adv. Water Resour.* 25(6), 637-649.