

Research Paper



Evaluation of the fractal dimension flood hydrograph and WinTR-55, NRCS, HEC-HMS models of the Malayer Kalan Dam Basin



Parisa Shahsavand¹, Alireza Ildormi^{2*}, Hamid Nouri³

1-Graduated with a Master's Degree in natural Engineering, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer Iran. parisa.shahsavand1994@gmail.com

2- Professor, Department of Natur Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran. ildoromi@gmail.com

3- Associate Professor Department of Natur Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Iran. climatologyHnouri52@gmail.com

Keywords

drainage density, geomorphological hydrograph, triangular hydrograph, fractal hydrograph, flood, Kalandam, Hamean, Iran.

Receive: 2025/07/26

Accepted: 2026/02/07

Published: 2026/04/12

ABSTRACT

Introduction

Currently, the most important problem in estimating floods is the lack of sufficient statistics and, as a result, the lack of proper assessment of flow rates. One of the methods for estimating floods in these basins is the use of hydrological modeling. Vakili et al. (2022). On the other hand, the use of high-precision methods in calculating precipitation and curve numbers and their application in hydrological models has also reduced model input errors and increased simulation accuracy. Sepehvand et al. (2023). Currently, accurate flood prediction is of great importance, especially in arid regions where floods are more irregular and severe. In addition to the lack of hydrometric stations in these regions of our country, the important advantage of the Geomorphological Hydrograph (GIUH) model, which allows for the simulation of precipitation-runoff of a basin with minimal data, can be a useful and efficient tool (Asadi et al., 2022).

Heidari Chenari et al. (2022) showed that the simulated data have a high correlation with the observational data in the calibration and evaluation of the parameters of the HEC-HMS hydrological model in simulating individual rainfall runoff events in the Tajan watershed. Esfandiari et al. (2022) compared the methods of converting effective precipitation into surface runoff in simulating the flood hydrograph of the Nanekaran basin, Ardabil province, and showed that the SCS method had the highest discharge and the shortest time to peak, and the triangular method had the lowest peak discharge. Sepehvand et al. (2023) showed in flood estimation based on precipitation estimation with fractal theory and application of CN in the HEC-HMS model of the Tirah Borujerd-Durood watershed that in the precipitation-runoff simulation section using the HEC-HMS model, there is a good fit between the simulated and observed values. Darji et al. (2019) In the precipitation-runoff modeling of the Machu River basin using the

*Correspondin Author: Alireza Ildormi
ildoromi@gmail.com

How to cite this article: Shahsavand, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2025). Title of paper in lower case letters (except for initial letter of first word, initial of first word after a colon, and proper nouns).Hydrogeomorphology, 13(46): 92 – 116.

DOI: 10.22034/hyd.2025.68216.1803



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

HEC-HMS model, they showed that there is a good correlation between observed precipitation and runoff amount, and the model performance indicates a very good correlation between the observed and simulated runoff amount, and the model is suitable for analyzing the frequency of floods in the watershed. Aliya et al. (2020) studied two hydrological models, (SWAT) and (HEC-HMS), to predict river flow in the Katar Basin, Ethiopia, and showed that both models can simulate river flow well. However, in river flow simulation, the results of the HEC-HMS model are more satisfactory than the SWAT model. Tarahi et al. (2022) estimated runoff in watersheds using the GIUH-Nash model and fractal analysis and concluded that the peak discharge estimation errors were within acceptable limits, so the model showed good performance.

Methodology

The present study aims to find relationships for the concentration time based on fractal dimension in order to generate a triangular unit hydrograph. In addition, in this study, the efficiency of the WinTR-55 model in analyzing and calculating the maximum flood discharge in different return periods according to the parameters entered into the model, along with the efficiency of the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) model and the role of geomorphological parameters in estimating the peak hydrograph discharge, have also been investigated. Therefore, in this study, out of the 8 sub-basins of the Malayer Kalan Dam, only two sub-basins were selected and examined based on their conditions in terms of similarities and differences such as slope, drainage density, slope, and land use. In order to investigate the hydrograph of the fractal unit with other hydrogeomorphological parameters such as the basin shape coefficient, and to verify the accuracy of two sub-basins, Ah upstream and Ac at the outlet of the basin, the large dam was selected and investigated with the WinTR-55 hydrological model and (GIUH) the HEC-HMS hydrograph. Therefore, the following data and software were used to conduct this research:

- Observational flow data and 24-hour rainfall for the available statistical period
- GIS (Geographic Information System) software to prepare the required maps
- Geomorphological parameters of the watershed, including: branching ratios (RB), length (RL), area (RA), watershed length (Km), watercourse density (Km/KM²), weighted average slope of the basin (%), Horton and Gravelius shape coefficients
- WinTR-55 and (GIUH) NRCS hydrological models, and HEC-HMS hydrograph generation.

Results and Discussion

The study shows that in the Ac sub-basin there is an acceptable agreement between the NRCS unit hydrographs and the fractal dimension unit, and the HEC-HMS model output also indicates that there is an acceptable agreement between the observational data and the model output in the Ac sub-basin, which is observed in the fractal dimension and the HEC-HMS output as a single NRCS hydrograph. The results of calculating peak discharge using the Geomorphology Unit Hydrograph method, despite the small size and small changes in the basin's geomorphological parameters, show that the peak discharge values estimated in the GIUH method differ little from the observed and calculated discharges using the WinTR-55 model, which means that geomorphological parameters play an important and effective role in estimating peak discharge. Studies have shown that the WinTR-55 model hydrographs provide acceptable measurements of observational data in return periods of less than 5 years, and the longer the return period, the less accurate the model. In addition, the model is more sensitive to the CN curve number values, indicating that the model provides acceptable results for small sub-basins and is not suitable for large basins. The results show that the greater the height difference, the less consistent the NRCS unit hydrograph and the triangular unit hydrograph. But the important point that can be deduced from fractal hydrographs is that the time of concentration has been corrected relative to the hydrographic drainage network in both sub-basins, which is visible in the Ah hydrographs.

Conclusions

The results of hydrographs extracted from the HCE-HMS and WinTR-55 models show that the fractal dimension has modified the hydrographs. According to the results presented, the fractal dimension calculated for the river network shows an increasing trend from upstream to the outlet of the basin. and it represents the surface filled with the fractal curve under study. In the case of the river network, this situation indicates the extent of the spread of the waterways in the basin and the extent to which the basin surface is covered by the drainage network. The closer this number is to 2, the more surface of the basin is drained by the drainage network. So that the number 2 indicates that the entire basin surface is covered by drainage network. In fact, the increase in fractal dimension obtained from this method from the

highest point towards the outlet indicates that as the watershed outlet gets closer, a greater number of drainage network become effective in draining the basin surface. The results of calculating the peak discharge in the basin using the Geomorphology Unit Hydrograph method, considering the small size of the basin and the small changes in geomorphology parameters at the basin level, indicate that the peak discharge values estimated in the GIUH method have a small difference with the observed discharges as well as the discharges calculated by the WinTR-55 model, which means that geomorphology parameters play an important and effective role in estimating the peak discharge. An examination of the WinTR-55 model and the fractal dimension shows that for small basins, with a maximum area of 65 square kilometers (25 square miles), this model can provide acceptable simulations and, in other words, can be used at the sub-basin level. In addition, this model provides better results in areas where the concentration time is between 0.1 and 10 hours. It is recommended to use the WinTR-55 model and the fractal dimension in such areas.



ارزیابی هیدروگراف سیل بعد فراکتال و مدل‌های HEC-NRCS، WinTR-55 و HMS حوضه سد کلان ملایر



پریسا شاهشوند^۱، علیرضا ایلدرمی^{۲*}، حمید نوری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. parisa.shahsavand1994@gmail.com

۲- استادگروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. ildoromi@gmail.com

۳- دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. climatologyHnouri52@gmail.com

چکیده

در حال حاضر مهم‌ترین مشکل در برآورد سیلاب‌ها، نبود آمار کافی و عدم ارزیابی مناسب مقدار جریان می‌باشد. یکی از روش‌های برآورد سیلاب در این حوضه‌ها، استفاده از روش مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. هدف از این بررسی تحلیل دبی حداکثر سیلابی بعد فراکتال و مدل‌های HEC-HMS، NRCS، WinTR-55 در دو زیرحوضه سد کلان ملایر همدان با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی است. بررسی نشان می‌دهد که در زیرحوضه Ac بین هیدروگراف‌های واحد NRCS و واحد بعد فراکتال تطابق قابل قبولی وجود دارد و خروجی مدل HEC-HMS نیز بیانگر این است که بین داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل نیز در زیر حوضه Ac انطباق قابل قبولی وجود دارد که در بعد فراکتال و خروجی HEC-HMS بصورت یک هیدروگراف واحد NRCS مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که هر چه اختلاف ارتفاع بیشتر باشد تطابق هیدروگراف واحد NRCS و واحد بعد فراکتال کمتر است. نتایج محاسبه دبی اوج با استفاده از روش هیدروگراف واحد ژئومورفولوژی علیرغم وسعت کم و تغییرات کم پارامترهای ژئومورفولوژی حوضه نشان می‌دهد که مقادیر دبی اوج محاسباتی در روش GIUH و مدل WinTR-55 با دبی‌های مشاهداتی اختلاف کمی دارند و به معنای آن است که پارامترهای ژئومورفولوژی نقش مهم و مؤثری در برآورد دبی اوج ایفا می‌کنند. بعلاوه نتایج نشان داد که مدل به مقادیر شماره منحنی CN حساسیت بیشتری نشان می‌دهد. و بیانگر این است که تغییر کاربری اراضی نقش مهمی در دبی پیک سیلاب دارد. نتایج نشان داد که هیدروگراف‌های فراکتال زمان تمرکز را نسبت به شبکه هیدروگرافی در هر دو زیرحوضه اصلاح نموده، که این موضوع در هیدروگراف‌های زیر حوضه Ah قابل مشاهده است. بررسی نتایج مدل WinTR-55 و بعد فراکتال نشان می‌دهد که مدل از کارایی بالا برخوردار بوده و می‌توان نتایج حاصله را به اکثر آبریزهای مجاور و مشابه آن تعمیم داد که این مسأله از لحاظ کاربردی حائز اهمیت فراوان است.

کلیدواژه‌ها

تراکم زهشکی، هیدروگراف
ژئومورفولوژی، هیدروگراف
مثلی، هیدروگراف فراکتالی،
سد کلان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

*نویسنده مسئول علیرضا ایلدرمی
ایمانه: ildoromi@gmail.com
ارجاع به این مقاله: پریسا شاهشوند^۱، علیرضا ایلدرمی^{۲*}، حمید نوری^۳ (۱۴۰۵). ارزیابی هیدروگراف سیل بعد فراکتال و مدل‌های HEC-HMS، NRCS، WinTR-55 حوضه سد کلان ملایر. هیدروژئومورفولوژی، ۱۳(۴۶). 92-116

شناسه دیجیتال مقاله: 10.22034/hyd.2025.68216.1803



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

در حال حاضر مهم‌ترین مشکل در تخمین و برآورد سیلاب‌ها، فقدان آمار کافی و در نتیجه عدم ارزیابی مناسب مقدار جریان آب در رودخانه‌ها می‌باشد که استفاده از روش مدل‌سازی هیدرولوژیکی یکی از ابزارهای مهم در جهت حل این مشکل است (وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱:۳۷). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌هایی با دقت بالا و با نتایج قابل قبول در محاسبه بارش و شماره منحنی و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی، نیز باعث کاهش خطاهای ورودی مدل و افزایش دقت شبیه‌سازی رواناب و هیدروگراف‌های سیلاب شده است (سپه‌وند و همکاران، ۱۴۰۲:۹۷). بعلاوه در دهه اخیر بررسی رخداد سیل در مناطق خشک کشور با توجه به نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری حجم آب با به‌کارگیری مدل (GIUH) جهت شبیه‌سازی جریان رواناب و سیلاب نتایج قابل قبولی ارائه داده است (اسدی و همکاران، ۱۴۰۱:۱۲۲). بروز خشکسالی در دهه‌های اخیر در دنیا و به‌ویژه در ایران بررسی و تحلیل دوره‌های خشک و مرطوب در یک منطقه با توجه به وجود ویژگی‌های خود تشابهی در متغیرهای اقلیمی هم‌چون بارش، امکان استفاده از روش‌های نوین از جمله بعد فراکتالی را فراهم نموده است. این امر منجر به پیش‌بینی خصوصیات و رفتارسنجی بارش در منطقه شده و امکان تحلیل و مدیریت آن را فراهم خواهد نمود. هندسه فراکتالی به توصیف اشیایی می‌پردازد که خود متشابه یا متقارن هستند، این بدان معنا است که وقتی این اشیاء بزرگنمایی شوند، به‌نظر می‌رسد که بین اجزای آن‌ها تشابه دقیقی برقرار است و این شباهت جزء‌به‌جزء تا بی‌نهایت ادامه می‌یابد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶:۴۴). در تحقیقات انجام شده از قبیل ارزیابی کارآمدی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه آبریز و مؤلفه‌های هیدروگراف و بررسی کارایی مدل HEC-HMS با روش SCS-CN در تلفات، روش هیدروگراف واحد SCS در تبدیل بارش - رواناب و روش ماسکینگام در روندیابی، همگی در جهت شناسایی و کارایی و توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی هیدروگراف است. که امروزه مورد دقت و توجه علوم مهندسی هیدرولوژی و آبخیزداری و منابع آب قرار گرفته است. اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که اغلب مدل‌ها توانایی و کارایی محدود و یا گاهی از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند (غلامیان و همکاران، ۱۳۹۸:۱۲۷). چنانچه در شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب مستقیم با مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک نتایج نشان داده شد که مدل کلارک فقط پارامتر زمان تا اوج و دبی اوج را با دقت قابل قبولی برآورد نموده و در شبیه‌سازی سایر مولفه‌های هیدروگراف سیل موفق نبوده است (مصطفی‌زاده، و همکاران، ۱۳۸۸:۱۰۸).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که ابعاد هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک برای هر واقعه بارش - رواناب و به تفکیک DEM با کاهش طول آبراهه اصلی به دنبال کاهش دقت DEM، کاسته می‌شود (اسماعیلی و همکاران، ۱۴۰۱:۶۶۲). همچنین در ارزیابی کارایی مدل بارش - رواناب GR4J نتایج شبیه‌سازی و برآورد شده دبی در حد متوسط و قابل قبولی بوده و می‌تواند برای حوزه‌هایی مشابه از نظر اقلیمی، فیزیوگرافی و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گیرد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰:۸۹). بعلاوه ارزیابی مدل بارش - رواناب - نگهداشت (RM3) نشان داد که با توجه به شاخص‌های ارزیابی مدل برای پیش‌بینی رواناب و نگهداشت واقعی از توانایی قابل قبولی برخوردار است (ایزدی و همکاران، ۱۴۰۱:۳۰۹). در یک بررسی دیگر ارزیابی کارایی روش دیسکین به‌منظور استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای نشان داد که روش دیسکین با دقت مناسبی توانایی استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای از هیدروگراف رواناب مستقیم را دارد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴:۱۴۱). و در یک ارزیابی دیگر آنالیز حساسیت مولفه‌های هیدروگراف جریان به تغییر در پارامترهای روش زمان - مساحت کلارک نتایج نشان داد که دقت مدل مذکور در شبیه‌سازی هیدروگراف واحد جریان ۷۱ درصد است (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷:۹۱). مرور منابع نشان می‌دهد که بررسی تخمین پارامترهای مدل بارش - رواناب در حوضه‌های آبریز فاقد آمار از اهمیت بالایی برخوردار است. در این رابطه مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی نش (NGIUH) به‌طور گسترده برای پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های آبریز فاقد آمار استفاده می‌شود. (طراحی و همکاران، ۲۰۲۰:۶۳). اما با توجه به رخداد سیلاب در دهه‌های اخیر محققین علوم مهندسی هیدرولوژی همواره روش‌های مختلفی در جهت شناخت بزرگی و زمان وقوع سیل و برآورد ارتفاع رواناب ارائه کرده‌اند. که در این رابطه

1. Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH)

می‌توان به مدل‌های بارش رواناب که از ابزارهای کاربردی و توانمند در دستیابی به خصوصیات سیلاب می‌باشند اشاره نمود که بسیار مورد توجه کاربران زیادی قرار گرفته است (حیدری چناری و همکاران، ۱۴۰۱: ۷۸). در سال‌های اخیر تعدادی از مدل‌های فیزیکی و توزیعی برای مدل‌سازی هیدرولوژی ارائه، اصلاح و یا روبه توسعه داده شده‌اند. اما انتخاب مناسب‌ترین مدل هیدرولوژیکی برای دستیابی به نتایج شبیه‌سازی جریان رواناب و سیلاب و هیدروگراف‌ها قابل قبول ضروری است (الیه و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۰۵). بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از موضوعات مهم در جهت مدیریت پایدار منابع آب و بهره‌وری مناسب از آن در حوضه‌های آبریز در برابر بارش‌های شدید و اجتناب از بروز سیلاب‌ها تولید هیدروگراف واحد سیل است، در این رابطه می‌توان در بسیاری از حوضه‌های ایران که با فقدان یا کمبود داده‌های هیدرولوژیکی به دلیل نبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری حجم رواناب و جریان آب روبرو هستند، با ارزیابی رابطه داده‌های ژئومورفولوژی و هیدرولوژیکی و تولید هیدروگراف‌های بی‌بعد، فراکتال، هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (GIUH)، WinTR-55 و NRCS پیش‌بینی وقوع سیلاب را حتی المقدور برای زیرحوضه‌های کوچک انجام داده و با مقایسه داده‌های محاسباتی این حوضه‌ها با داده‌های مشاهداتی حوضه‌های مشابه دارای آمار و در صورت نتایج قابل قبول، نتایج را به حوضه‌های مشابه دیگر تعمیم داد. در این رابطه می‌توان به تحقیقات (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۸۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹: ۵۳۸؛ ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۰؛ محمدی و همکاران، ۲۰۲۴: ۳۶؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۹۱؛ ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۷۳؛ ثانی‌خانی و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۸۶) اشاره نمود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوی شبکه زهکشی جزء شاخص‌ترین چشم‌اندازهای سطح زمین بوده، که تحت تاثیر بسیاری از مدل‌های هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی است. لذا با توجه به خصوصیات ژئومورفولوژیکی منطقه، هر کدام از شبکه‌های زهکشی ویژگی‌های فراکتالی از خود نشان می‌دهند که به صورت کد یا عدد بدون بعد نشان داده می‌شود که قابل ارزیابی است (محمدی و همکاران، ۲۰۲۴: ۳۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که هندسه فراکتال نه تنها در هیدرولوژی بلکه در سایر علوم مختلف کاربردهای گسترده‌ای پیدا کرده و اغلب نتایج قابل قبولی ارائه نموده است. تحقیقاتی چون (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۹۱؛ ایلدرمی، ۱۴۰۲: ۱۸؛ باباعلی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰۹۷؛ برزگری دهج و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۰؛ سپهر و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۷؛ سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸: ۹۱؛ ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۰؛ نظری صارم و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۵۹؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۹۱)، از جمله موارد کاربرد متنوع بعد فراکتال در زمینه‌های مختلف است. همچنین می‌توان به بررسی و برآورد سیلاب طرح حوضه‌های آبریز با به‌کارگیری تئوری فراکتال و مدل بارش-رواناب HEC-HMS (باباعلی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۰۹۷). هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (GIUH) (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۹). مدل‌سازی سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS (اسدی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۷). برآورد دبی حداکثر سیلاب، ظرفیت انتقال و رسوب با استفاده از دو مدل GIUH و WinTR-55. غلامیان و همکاران (۱۳۹۹: ۱)، بررسی مقایسه‌ای مدل بارش-رواناب HEC-HMS با روش‌های تجربی مختلف برآورد سیلاب (وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱: ۳۲). شبیه‌سازی رواناب شریفی و همکاران (۱۴۰۲: ۳۳) اشاره نمود که نشان می‌دهند مدل‌های بکار گرفته شده توسط محققین از کارایی بالایی برخوردار بوده‌اند. اما نکته مهم در واسنجی و ارزیابی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی وقایع بارش رواناب حوضه آبریز است که می‌بایست داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای، همبستگی بالایی داشته باشند. در این رابطه بررسی‌های (حیدری چناری و همکاران، ۱۴۰۱: ۶۹؛ اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۰؛ علیمرادی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۹؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲: ۸۴؛ سپهوند و همکاران، ۱۴۰۲: ۸۷؛ ثانی‌خانی و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۸۶؛ ایلدرمی، ۱۴۰۲: ۱۸؛ صادق‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳: ۱۷؛ یاراحمدی و همکاران، ۱۴۰۳: ۵۸) نشان می‌دهد که می‌توان با استفاده از ارتباط بین بعد فراکتال شبکه زهکشی و مراحل تکاملی حوضه و با مقادیر فراکتالی شبکه زهکشی و مقادیر تحویل رسوب و رواناب حوضه رابطه‌ای مثبت و خطی برقرار نمود و ارزیابی خوبی از مدل‌های هیدرولوژیکی به دست آورد.

در این رابطه هوی^۱ و همکاران (۲۰۱۷: ۱۶۵) در شبیه‌سازی رواناب در منطقه نیمه‌خشک با مدل‌سازی هیدرولوژیکی (HEC-HMS) درودور^۲ و همکاران (۲۰۱۸: ۴۵) در بررسی و پیش‌بینی سیل با استفاده از مدل HEC-HMS، هایبو^۳ و همکاران (۲۰۱۸: ۷). ساهو^۴ و همکاران (۲۰۲۰: ۳۴۴۰) بیان نمودند که مدل HEC-HMS توانایی، دقت و کارآمدی لازم را در شبیه‌سازی رواناب حوضه‌های رودخانه‌ای

را دارد و بیان شده که مدل می‌تواند برای شبیه‌سازی رواناب در یک حوضه بدون آمار مورد استفاده قرار گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که همبستگی بسیار خوبی بین مقدار رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب و بعد فراکتال شبکه زهکشی وجود دارد و نشان می‌دهد که برای تجزیه و تحلیل فراوانی سیل حوضه آبریز مناسب هستند. در این رابطه در سال‌های اخیر محققینی چون درجی^۱ و همکاران (۲۰۱۹:۲۲۶)، دوکوسو^۲ و همکاران (۲۰۱۹:۱۱۷)، الیه^۳ و همکاران (۲۰۲۰:۱۰۵)، باموفلح^۴ و همکاران (۲۰۲۰:۱۶۹۷)، زاخارووت^۵ و همکاران (۲۰۲۰:۵۲۶)، طراحی^۶ و همکاران (۲۰۲۲:۵۱)، کوساکت^۷ و همکاران (۲۰۲۲:۳۵۷)، مارتینز^۸ و همکاران (۲۰۲۲:۳۰۱)، طراحی^۹ و همکاران (۲۰۲۰:۵۴)، جوکیم^{۱۰} (۲۰۲۲:۹)، محمدی خشویی^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۴:۳۵) دونگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۴:۲۰۶)، نیری^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۵:۵۱۳) با بررسی و مطالعات انجام شده بر روی مدل‌های بارش-رواناب و بعد فراکتال این موضوع را به خوبی ثابت نموده‌اند که می‌توان به این مدل اعتماد نمود.

با بررسی و مرور منابع استنباط می‌شود که استفاده از مدل خاص در یک تحقیق رایج بوده و بکارگیری از چند مدل و مقایسه دقت آن‌ها در برآورد دبی حداکثر سیلاب در تحقیقات سال‌های اخیر مورد توجه نبوده است. لذا هدف از این تحقیق بررسی و تحلیل دبی حداکثر سیلابی بعد فراکتال با مدل‌های WinTR-55، NRCS، HEC-HMS در دو زیرحوضه سد کلان ملایر همدان با استفاده از داده‌های ژئومورلژی است. به گونه‌ای که بتوان بعد فراکتال حوضه آبریز را به منظور تولید هیدروگراف استخراج کرد و پس از یافتن ارتباط بین ویژگی‌های فراکتال حوضه و خصوصیات هیدروگراف به روابطی به منظور تولید هیدروگراف واحد مصنوعی بر پایه بعد فراکتال دست یافت و با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS مقایسه و ارزیابی دقت نمود تا شناخت دقیقی از حوضه به منظور انجام عملیات آبریزداری جهت کنترل سیلاب ارائه شود.

مواد و روش‌ها

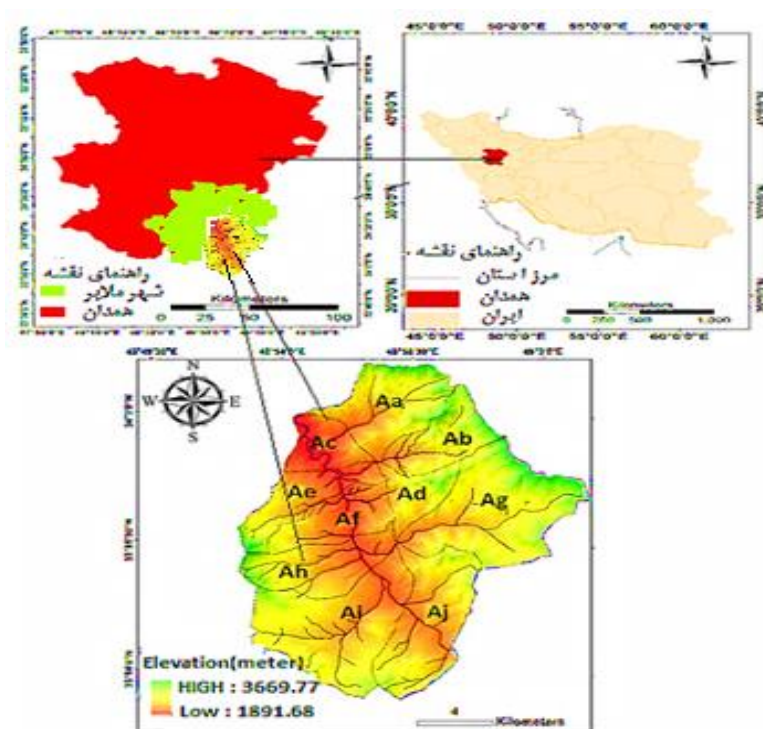
موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی سدکلان در موقعیت جغرافیایی $48^{\circ} 50' 40''$ تا $49^{\circ} 06' 23''$ طول شرقی و $33^{\circ} 29' 48''$ تا $34^{\circ} 04' 48''$ عرض شمالی در حوضه کرخه واقع شده و از سرشاخه‌های رودخانه گاماسیاب می‌باشد و در محدوده شهر ملایر دارای وسعتی برابر $289/65$ کیلومتر مربع است. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا 1780 متر، متوسط بارندگی سالیانه در قسمت‌های پست و کم ارتفاع $242/2$ میلی‌متر، میانگین درجه حرارت سالانه $13/44$ درجه سانتی‌گراد است. لذا از نظر اقلیمی این منطقه براساس طبقه بندی آمبرژه در بخش اقلیمی نیمه‌خشک سرد و قسمت‌های مرتفع و کوهستانی حوضه با متوسط بارش 315 میلی‌متر و متوسط درجه حرارت $12/6$ دارای آب و هوای متعادل کوهستانی می‌باشد (شکل ۱).

1 . Darji
2 . Dokusu
3 . Aliye
4 . Bamuflesh
5 . Zakharov

6 . Tarahi
7 . Kusaket
8 . Martinez
9 . Tarahi
10 . Jo Kim

11 . Mohammadi Khoshoui
12 . dong
13 . Nayyeri



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure (1): Geographical location of the study area

روش تحقیق

تحقیق حاضر با هدف یافتن روابطی برای زمان تمرکز بر اساس بعد فراکتال به منظور تولید هیدروگراف واحد مثلی انجام شده است. بعلاوه دقت مدل های WinTR-55 و GIUH) در برآورد و شبیه سازی حداکثر دبی سیلاب نیز بررسی و نقش عوامل موثر در هیدروگراف سیل ارزیابی گردیده است. لذا در این تحقیق از ۸ زیر حوضه آبریز سدکلان ملایر دو زیرحوضه با توجه به شرایط آن‌ها از لحاظ تشابهات و تفاوت‌هایی از قبیل شیب، تراکم زهکشی، شیب و کاربری اراضی و موقعیت انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است.

داده‌ها و ابزار مورد نیاز

به منظور بررسی هیدروگراف واحد فراکتالی با پارامترهای ژئومورفولوژیکی مانند ضریب شکل حوضه و صحت‌سنجی دو زیر حوضه Ah در بالادست و Ac در خروجی حوضه سد کلان انتخاب و با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی WinTR-55 و GIUH) هیدروگراف HEC-HMS نیز خروجی‌ها تهیه و با یکدیگر مقایسه و ارزیابی شده‌اند. لذا جهت انجام این تحقیق داده‌های دبی مشاهداتی و بارندگی ۲۴ ساعته دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۴۰۱) موجود در سازمان آب منطقه‌ای، داده‌های ژئومورفولوژیکی حوضه از قبیل: ضریب دوشاخه شدن آبراهه، طول جریان سطحی، وسعت، طول حداکثر حوضه، تراکم زهکشی، درصد شیب متوسط وزنی، ضریب فشردگی حوضه مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز، بعلاوه اختلاف ارتفاع، شیب حوضه، لایه‌های جهت جریان، جهت جریان تجمعی، لایه‌های طول جریان سطحی و رده‌های آبراهه‌ها و با استفاده از نقشه آبراهه‌ها، طول آبراهه اصلی با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، DEM، (۳۰ متر) و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای دو زیر حوضه با استفاده از نقشه‌های موجود در سازمان آب منطقه‌ای و اداره کل منابع طبیعی استان همدان استخراج و تهیه شد. بعلاوه با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی WinTR-55 و GIUH) و پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز و سرعت اوج جریان، مقادیر دبی حداکثر و زمان اوج در حوضه محاسبه می‌شود. در این مدل بین دبی اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و زمان اوج (tp) با سرعت جریان به ترتیب رابطه مستقیم و معکوس وجود دارد.

پارامترهای فیزیوگرافی حوضه در مدل WinTR-55 و مدل GIUH بطور مشترک قابل استفاده هستند. لذا مدل‌های WinTR-55 (GIUH) و پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز می‌توان مقادیر دبی حداکثر و زمان اوج هیدروگراف سیلاب را محاسبه نمود.

معرفی مدل ژئومورفولوژیکی (GIUH)

مدل ژئومورفولوژیکی (GIUH) یکی از مدل‌سازی‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای است که از شبکه آبراه‌های حوضه و قوانین هورتون استفاده می‌کند. این مدل برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوضه‌هایی که فاقد داده‌های آماری هستند، به کار می‌رود. به دلیل استفاده از پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه، نتایج آن نسبت به سایر مدل‌های موجود دقت بیشتری دارد. در این مدل می‌توان بین دبی حداکثر سیلاب و زمان پایه سیلاب با سرعت رواناب روابط ریاضی برقرار کرد (روابط ۱ و ۲). غلامیان و همکاران (۱۳۹۹)، اسدی و همکاران (۱۴۰۱)، اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۱) نکته مهم در این مدل این است که داده‌های مربوط به خصوصیات مورفولوژیکی حوضه را می‌توان در مدل WinTR-55 نیز استفاده نمود (روابط ۳ تا ۴).

$$q_p = \frac{1.31 R_L^{0.43}}{L_\Omega} (V) \quad (1)$$

$$t_p = 0.44 L_\Omega \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} V^{-1} \quad (2)$$

$$V_\Omega = 0.665 \alpha_\Omega^{0.6} (i_r A)^{0.4} \quad (3)$$

$$\alpha_\Omega = S_\Omega^{0.5} / n B^{2/3} \quad (4)$$

در این روابط: در این رابطه V_Ω سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه، i_r شدت بارش برحسب سانتی‌متر بر ساعت، A مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع، S_Ω شیب آبراه اصلی به متر بر متر در خروجی حوضه، n ضریب زبری مانینگ، B عرض جریان در خروجی حوضه برحسب متر و a_Ω پارامتر موج جنبشی می‌باشد. q_p دبی اوج t_p : زمان اوج L_Ω : طول رودخانه (کیلومتر)، V : سرعت اوج جریان R_B و R_A و R_L به ترتیب ضریب انشعاب، وسعت و نسبت طول، V_Ω : سرعت جریان، i_r : شدت بارش A : مساحت حوضه S_Ω : شیب آبراه اصلی، n : ضریب زبری مانینگ، B : عرض جریان و a_Ω : موج جنبشی می‌باشند.

تولید هیدروگراف NRCS

در این بررسی جهت تولید هیدروگراف فراکتال ابتدا اقدام به تولید هیدروگراف مثلثی NRCS شده است. این مدل در طرح‌های مطالعات آبخیزداری و حوضه رودخانه‌ای کوچک‌تر از ۲۵۰ کیلومتر مربع کاربرد فراوان دارد. در این بررسی دو زیر حوضه Ac با مساحتی معادل ۱۱۹/۰۶ و زیرحوضه Ah با وسعتی برابر ۱۷۰/۵۹ کیلومتر مربع ارزیابی شده و فرض براین است که بارشی در زمانی به مقدار t ساعت در یک حوضه بارش نماید مقدار جریان بوجد آمده هیدروگرافی را تولید می‌نماید که پس از گذر زمانی به مقدار $T1$ ساعت از شروع بارش به زمان حداکثر می‌رسد و با گذشت زمان، شروع به کاهش و پس از $T2$ ساعت جریان به صفر خواهد رسید. زمان پایه هیدروگراف (Tb) نیز حاصل جمع $T1$ و $T2$ است. ملکی و همکاران (۱۳۹۸)، اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۱)، باموفلج و همکاران (۲۰۲۰)، اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۱)، ایزدی و همکاران (۱۴۰۱).

روابط $T1$ و Tb نیز بر حسب ساعت به صورت زیر می‌باشد:

$$Tb = 1.34t + 1.6t_c \quad (5)$$

$$T1 = 0.5t + 0.6t_c \quad (6)$$

چنانچه مساحت حوضه رودخانه‌ای برابر A مایل مربع و رواناب برابر یک اینچ باشد، مقدار دبی بر حسب فوت مکعب بر ثانیه برابر است با:

$$384AR / (0.5t + 0.6tc) = Q_{PK} \quad (7)$$

که در آن :

Q_{PK} = مقدار دبی پیک بر حسب فوت مکعب در ثانیه، A = مساحت حوضه رودخانه‌ای بر حسب مایل مربع، R = رواناب برابر یک اینچ، t = ۵ ساعت یا ۲۴ ساعت

تولید هیدروگراف واحد بعد فراکتال

جهت استخراج هیدروگراف واحد در حوضه آبریز سد کلان ابتدا پارامترهای ژئومورفولوژیکی نظیر طول آبراهه اصلی (Km)، اختلاف ارتفاع و طول جریان (Km)، تراکم و رده آبراهه‌ها (Km/Km²)، شیب متوسط وزنی حوضه (/)، مساحت، ضریب شکل هورتون، زمان تمرکز و ضریب گراولپوس و جهت جریان تجمعی محاسبه شد. سپس دبی اوج و زمان تمرکز جهت تولید هیدروگراف مثلثی یا NRCS بر پایه این خصوصیات محاسبه شده است. (مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۸؛ ثانی‌خانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) به منظور برآورد زمان تمرکز در این بررسی از روش متداول کر پیچ که برای حوضه‌های کوچک (زیر حوضه‌های مورد مطالعه در این بررسی دو زیر حوضه Ac با مساحتی معادل ۱۱۹/۰۶ و زیرحوضه Ah با وسعتی برابر ۱۷۰/۵۹ کیلومتر مربع) کاربرد و قابلیت خوبی دارد، استفاده شده است رابطه (۸).

$$tc = 0.494 (L^3 / H) 0.385 \quad (8)$$

که در آن :

T_c = زمان تمرکز بر حسب ساعت، L = طول مسیر آبراهه اصلی بر حسب کیلومتر، H = اختلاف ارتفاع بلندترین و پایین‌ترین نقطه حوضه رودخانه‌ای بر حسب متر

محاسبه بعد فراکتال شبکه زهکشی و ضریب فشردگی:

برخی از پارامترهای هیدروژئولوژیکی و مورفومتری حوضه‌های آبریز که دارای شکل هندسی خاصی می‌باشند، با هندسه فراکتالی با دقت بیشتری قابل بررسی است و می‌توان با محاسبه بعد فراکتال هریک از خصوصیات حوضه رودخانه‌ای و بررسی آن‌ها با روش‌های پیشرفته آماری (تجزیه عاملی، خوشه‌بندی، رگرسیون‌های چندگانه و ...) پارامترهای جدیدی برای حوضه‌های آبریز تهیه نمود که قادر به تبیین خصوصیات بیشتری از حوضه‌های آبریز از لحاظ سیل‌خیزی، فرسایش‌پذیری، برآورد رواناب و رسوب باشد (ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۷). یک فراکتال به‌عنوان فرمی هندسی دارای اشکال نامنظم است، اما در بطن این تصاویر بی‌قاعده و نامنظم، نظم پنهان وجود دارد، که این بی‌نظمی در تمامی مقیاس‌های کوچک و بزرگ در ساختار فراکتال‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات آن‌ها دیده می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). در بررسی ارتباط بین ضریب فشردگی حوضه آبریز با ویژگی‌های فراکتال آن بیان داشتند که هر چه ضریب فشردگی به ۱/۵ نزدیک‌تر باشد هیدروگراف‌ها تطابق بیشتری دارند و روش ابداعی هیدروگراف فراکتالی از دقت خوبی برخوردار است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶).

محاسبه بعد فراکتال شبکه زهکشی و ضریب فشردگی از طریق محاسبات زهکشی هورتون انجام می‌شود و از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید: $R_B =$ $C = 0.28 / \sqrt{A}$ ، که به ترتیب ضرایب هورتون برای تعداد انشعاب، طول انشعاب و مساحت یک شبکه رودخانه ای و ضریب شکل است. با توجه به روابط فوق ابعاد فراکتال مساحت و انشعاب رودخانه‌ای از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$D_a = \ln R_B / \ln R \quad (9)$$

$$D_b = \ln R_B / \ln R A \quad (10)$$

که در این رابطه D_a و D_b به ترتیب بعد فراکتالی انشعاب رودخانه و مساحت حوضه رودخانه‌ای می‌باشند.

یکی از روش‌های کمی و تجربی که در دهه‌های اخیر در بررسی اشکال مربوط به شبکه زهکشی رودخانه‌ها مورد استفاده محققین ژئومورفولوژی و آبخیزداری قرار گرفته تحلیل‌های فراکتالی رودخانه و کاربرد آن در بررسی رواناب، فرسایش و رسوب است (ایلدرمی و همکاران، ۱۳۹۷). در بسیاری از پدیده‌های ژئومورفولوژیکی هم‌چون شبکه‌های رودخانه‌ای خود همانندی فراکتال قابل مشاهده است. به این معنی که هرچه با دقت بیشتری به تصویر فراکتال شبکه‌ی رودخانه‌ای نگاه شود، مورفولوژی آن در یک مقیاس مشخص در جزئیات شبیه شکل‌های دیگر در یک مقیاس دیگر است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از رایج‌ترین روش‌هایی که برای محاسبه تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود، استفاده از روش شمارش پیکسلی (جعبه‌ای) است. در این روش محدوده عارضه مورد نظر را بر روی یک شبکه پیکسلی قرار می‌دهند و با تغییر اندازه پیکسل‌ها (E)، تعداد پیکسل‌هایی که در آن عارضه مورد نظر دیده می‌شود (N)، شمارش می‌شود و در نهایت با محاسبه شیب تغییرات دو پارامتر (N) و (E)، عدد مربوط به بعد فراکتال محاسبه می‌شود. در این روش، مجموعه از نقاط روی یک منحنی یا یک سطح با مربعاتی (همان جعبه‌ها) به طول و ضلع E پوشانده می‌شود. در واقع، کل فضای مورد نظر با استفاده از این روش شبکه‌بندی می‌شود. تعداد مربعاتی که هر قسمت از منحنی مورد نظر را می‌پوشاند محاسبه می‌شود. این کار برای مربعات با طول اضلاع مختلف تکرار می‌شود. حد نهایی این قسمت زمانی است که E به صفر میل نماید. کدر این صورت با استفاده از رابطه $L = N \cdot E$ طول محاسبه شده به طول واقعی بسیار نزدیک می‌شود.

اگر اندازه خطی یک پدیده را در نظر بگیرید و آن را در هر جهت فضایی به مقدار E کاهش دهید، می‌توان (E) N جسم خود همانند را دید، که تمام جسم اولیه را می‌پوشاند. یعنی (E) N تعداد ساختارهای خود همانند با اندازه خطی E است که تمام ساختار را می‌پوشاند و از رابطه (۱۳) به دست می‌آید

(لی^۱ و همکاران ۲۰۰۹؛ محمدی خشویی و همکاران، ۱۳۹۸؛ ایلدرمی، ۱۴۰۲؛ بابا علی و همکاران، ۱۳۹۷؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ مارتینز و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمدی خشویی و همکاران، ۲۰۲۴).

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \log N(\epsilon) / \log 1/\epsilon \quad (11)$$

$D =$ هندسه فراکتال و N، تعداد سلول‌های رستری که شبکه هیدروگرافی در آن قرار گرفته است با توجه به اعداد به دست آمده، در مرحله بعد با استفاده از یک گراف لگاریتمی که محور X به مقادیر $\log 1/\epsilon$ و محور Y آن به $N(\epsilon)$ log تعلق دارد مقدار شیب خط در منحنی ترسیمی هندسه فراکتال (d) از رابطه (۱۲) برآورد شد. هرچه قدر این مقدار بیشتر باشد نشانه بی‌نظمی بیشتر است. ثانی‌خانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ صادق‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳؛ زاخارووت^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ محمدی خشویی و همکاران، ۲۰۲۴؛ یانگ دونگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ نظری صارم و همکاران، ۱۳۹۹).

$$N = \epsilon^d + c \quad (12)$$

$N =$ تعداد مربعاتی که شبکه رودخانه‌ای در آن واقع شده، $\epsilon =$ اندازه هر سلول، $C =$ مقدار ثابت در نهایت به منظور ارزیابی ارتباط همبستگی دقیق‌تر بین مقادیر هندسه فراکتال شبکه رودخانه‌ای و فراکتال لگاریتمی ترسیمی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد که میزان خطا را که بین -۱ تا ۱ تغییر می‌کند، ارائه می‌دهد.

روش (WinTR-55)

مدل WinTR-55 یک روش و ابزار هیدرولوژیکی است که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا^۳ (SCS) ارائه شده که جهت برآورد و شبیه‌سازی جریان حاصل از بارش در حوضه‌های آبریز کوچک که معمولاً کمتر از ۶۴ کیلومتر مربع یا در در حوضه‌هایی که زمان تمرکز آن‌ها بین ۰/۱ تا ۱۰ ساعت می‌باشد، طراحی شده است. مدل WinTR-55 با استفاده از شمارش تعداد منحنی (CN) و محاسبه زمان

1. Li

2. Zakharoot

1. Soil Conservation Service

تمرکز، دبی حداکثر هیدروگراف سیلاب را محاسبه می نماید. داده‌های ورودی مدل، WinTR-55 جهت برآورد جریان و دبی حداکثر سیلاب مشخصات و پارامترهای فیزیوگرافی و پوشش گیاهی حوضه می‌باشد. بعلاوه شیب و سرعت جریان طول جریان سطحی، مقدار جریان سطحی به شکل ورقه‌ای و متمرکز، ارتفاع آب در مسیر جریان رواناب، ضریب مانینگ و بارندگی ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال از دیگر پارامترهای محاسباتی و داده‌های ورودی مدل است (غلامیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ باموفلج و همکاران، ۲۰۲۰؛ تازاهی و همکاران، ۲۰۲۲؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰).

این مدل با استفاده از داده‌هایی چون مساحت، پوشش گیاهی و CN هر قسمت از حوضه، طول، جنس، عرض مقاطع، شیب کناره و شیب بستر کانال‌ها و بارندگی ۲۴ ساعته حوضه، مقادیر رواناب (دبی و سرعت) حاصله در هر ساعت پس از شروع بارندگی را محاسبه می‌نماید. جهت محاسبه زمان تمرکز هر زیر حوضه در مدل Win TR-55 باید پارامترهای شیب جریان، سرعت جریان، زمان طی مسیر^۱ برای جریان ورقه‌ای و جریان متمرکز عمق و جریان کانال در آبراهه، توسط مدل محاسبه گردد. این پارامترها به ترتیب از طریق رابطه (۱۳) تا (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$Slope = \frac{H_2 - H_1}{L} \quad (13)$$

$$V = \frac{1/49 \times R^{2/3} \times \sqrt{S}}{n} \quad (14)$$

$$T_t = \frac{0/007 \times (nL)^{0/8}}{\sqrt{p_2} \times S^{0/4}} \quad (15)$$

$$V_{(unpaved)} = 16/134\sqrt{S} \quad (16)$$

$$T_t = \frac{L}{V \times 3600} \quad (17)$$

در رابطه بالا به ترتیب H_1 ارتفاع نقطه ابتدایی مسیر جریان، H_2 ارتفاع نقطه پایانی مسیر جریان، L طول مسیر جریان یا طول آبراهه به متر؛ V سرعت متوسط جریان بر حسب فوت، R شعاع هیدرولیکی بر حسب فوت، S شیب آبراهه، n ضریب مانینگ؛ T_t زمان طی مسیر، P_2 بارندگی ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال بر حسب اینچ می‌باشد. این مدل با استفاده از پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز و سرعت اوج جریان، مقادیر دبی حداکثر و زمان اوج در حوضه را محاسبه می‌کند. در این مدل بین دبی اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی و زمان اوج (t_p) با سرعت جریان به ترتیب رابطه مستقیم و معکوس وجود دارد. پارامترهای فیزیوگرافی حوضه در مدل WinTR-55 و مدل GIUH بطور مشترک قابل استفاده هستند. مدل‌های WinTR-55، (GIUH) و پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوضه آبریز می‌توان مقادیر دبی حداکثر و زمان اوج هیدروگراف سیلاب را محاسبه نمود. این پارامترها به ترتیب از طریق رابطه‌های (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند.

$$q_p = \frac{1.31 R_L^{0.43}}{L_\Omega} (V) \quad (18)$$

$$t_p = 0.44 L_\Omega \left(\frac{R_B}{R_A} \right)^{0.55} R_L^{-0.38} V^{-1} \quad (19)$$

در رابطه‌های فوق q_p دبی اوج (برساعت)، t_p زمان اوج (ساعت)، L_Ω طول رودخانه با بیشترین رتبه در حوضه آبریز (کیلومتر)، V سرعت اوج جریان (متر بر ثانیه)، R_B و R_A و R_L به ترتیب نسبت انشعاب، نسبت مساحت و نسبت طول می‌باشند. با توجه به درجه اهمیت سرعت جریان در برآورد دبی و زمان اوج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی، از رابطه‌های (۲۰) و (۲۱) و پارامتر موج جنبشی جهت محاسبه سرعت جریان استفاده شده است.

$$V_\Omega = 0.665 \alpha_\Omega^{0.6} (i_r A)^{0.4} \quad (20)$$

$$\alpha_\Omega = S_\Omega^{0.5} / n B^{2/3} \quad (21)$$

در این رابطه V_{Ω} سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه، I_r شدت بارش برحسب سانتی متر بر ساعت، A مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع، S_{Ω} شیب آبراهه اصلی به متر بر متر در خروجی حوضه، n ضریب زبری مانینگ، B عرض جریان در خروجی حوضه برحسب متر و a_{Ω} پارامتر موج جنبشی می‌باشد.

مدل (HEC-HMS)

یک مدل ریاضی است که می‌تواند حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب را به وسیله شبیه‌سازی رفتار حوضه بازسازی کند. از مزایای این برنامه آن است که در حوضه‌ها با اندازه، شکل و پارامترهای مختلف قابلیت کاربرد دارد. اساس کار مدل‌های هیدرولوژیک بر پایه روابط بین بارش- رواناب استوار است و به این منظور در این مدل‌ها از معادله‌های ریاضی و همچنین خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز استفاده می‌شود. مدل HEC-HMS یک خروجی (عامل نامعلوم) را از یک یا چند ورودی (عامل معلوم) استخراج می‌نماید. در مدل HEC-HMS، عامل معلوم بارش و عامل نامعلوم رواناب است یا به عبارت دیگر، عامل معلوم جریان بالادست و عامل نامعلوم جریان پایین دست است. مدل HEC-HMS یک مدل ریاضی است که می‌تواند حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب را به وسیله‌ی شبیه‌سازی رفتار حوضه بازسازی کند. از مزایای این برنامه آن است که می‌تواند هیدروگراف‌های ترسیم شده توسط نرم‌افزار را به‌طور مستقیم یا به کمک سایر نرم‌افزارها استفاده نماید (اسدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ بابا علی و همکاران، ۱۳۹۷؛ سپه‌وند و همکاران، ۱۴۰۲؛ ساهو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ درودور^۲ و همکاران، ۲۰۱۸).

تحلیل هیدروگراف‌ها

در این تحقیق نتایج حاصل از بعد فراکتال به روش شمارش جعبه‌ای، هیدروگراف واحد مصنوعی NRCS، هیدروگراف واحد فراکتالی، نتایج حاصل از مقایسه‌ی هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی در دو زیر حوضه سدکلان ملایر، با مدل (HEC-HMS) صحت‌سنجی شده و ارتباط بین زمان تمرکز حوضه رودخانه‌ای با ویژگی‌های فراکتال آن ارزیابی و بر اساس خطای محاسباتی شامل درصد خطای دبی پیک (CFS)، درصد خطای زمان اوج (Hr)، درصد خطای زمان پایه (Hr) هیدروگراف زیرحوضه‌ها اصلاح شده است (بابا علی و همکاران، ۱۳۹۷؛ غلامیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ باموفلج و همکاران، ۲۰۲۰).

مراحل ترسیم هیدروگراف واحد NRCS و فراکتالی

زمان تمرکز یکی از اصلی‌ترین مباحث در مطالعات هیدرولوژی حوضه‌ی رودخانه‌ای است و تأثیر نسبتاً زیادی در محاسبه دیگر پارامترهای هیدرولوژی، خصوصاً دبی اوج سیلاب و در نهایت استخراج هیدروگراف واحد حوضه رودخانه‌ای دارد. برای رسم هیدروگراف واحد NRCS ابتدا اختلاف ارتفاع، مساحت و طول بلندترین آبراهه با استفاده از نرم‌افزار GIS از نقشه‌ی حوضه استخراج، شد. پس از محاسبه پارامترهای ژئومورفولوژیکی، هیدروگراف واحد NRCS ۵ ساعته برای تک‌تک زیرحوضه‌ی رودخانه‌ای رسم گردید. پس از محاسبه‌ی زمان تمرکز به روش کریپیج و رسم هیدروگراف واحد NRCS، زمان تمرکزهای تمام زیرحوضه رودخانه‌ای در مقابل ابعاد فراکتالشان قرار داده شد و منحنی‌های برازش یافته با عدد رگرسیون ۰/۸۹ رسم و با استفاده از معادله (۲۲) زمان تمرکز جدید محاسبه شد، که در آن x بعد فراکتال مربوط به هر زیر حوضه رودخانه‌ای است:

$$tc = 103.09 x - 341.02x + 283.23$$

(۲۲)

معیار ارزیابی فراکتال محاسباتی و فراکتال ترسیمی

برای ارزیابی بعد فراکتال به عنوان یک فرمول تجربی با فراکتال ترسیمی، عمدتاً از ضریب همبستگی استفاده می‌شود. در مباحث آماری، ضریب همبستگی پیرسون میزان همبستگی خطی بین دو متغیر تصادفی را می‌سنجد. مقدار این ضریب بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند که «۱» به معنای همبستگی مثبت کامل «۰» به معنی نبود همبستگی و «-۱» به معنی همبستگی منفی کامل است (فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶).

تحلیل هیدروگراف‌ها با استفاده از بعد فراکتال شبکه‌ی زهکشی

زمان تمرکز یکی از اصلی‌ترین مباحث در مطالعات هیدرولوژی حوضه رودخانه‌ای است و تأثیر نسبتاً زیادی در محاسبه دیگر پارامترهای هیدرولوژی، خصوصاً دبی اوج سیلاب و در نهایت استخراج هیدروگراف واحد حوضه رودخانه‌ای دارد. مهم‌ترین ویژگی فراکتالی که در مورد شبکه‌ی رودخانه‌ای تحلیل می‌شود، بعد فراکتال آن است که اهمیت زیادی در شناخت رفتار و پیش‌بینی تغییرات رودخانه دارد. لذا یافتن روابطی برای زمان تمرکز بر اساس بعد فراکتال و تولید هیدروگراف واحد مثلثی فراکتالی در تمام زیرحوضه‌های رودخانه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق نتایج حاصل از بعد فراکتال به روش شمارش جعبه‌ای، نتایج حاصل از رسم هیدروگراف واحد مصنوعی NRCS نتایج حاصل از رسم هیدروگراف واحد فراکتالی، نتایج حاصل از مقایسه‌ی هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی و مشاهداتی مثلثی با استفاده از تحلیل آماری مقادیر RMSE و R^2 در تمام دو زیر حوضه کلان ملایر، صحت‌سنجی شده (روابط ۲۳ و ۲۴) و ارتباط بین زمان تمرکز حوضه رودخانه‌ای با ویژگی‌های فراکتال آن ارزیابی و بر اساس خطای محاسباتی شامل درصد خطا دبی پیک (CFS)، درصد خطا زمان اوج (Hr)، درصد خطا زمان پایه (Hr) هیدروگراف زیرحوضه اصلاح شده است.

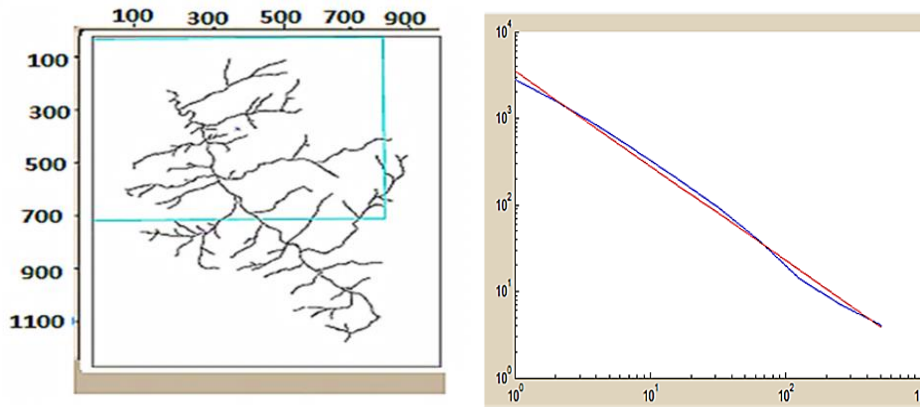
$$RMSE = \sqrt{\sum(Q_{oi} - Q_{si})^2/n} \quad (23)$$

$$\%R.E_i = \left| \frac{Y_o - Y_c}{Y_o} \right| \times 100 \quad (24)$$

که در آن Q_{si} ، مقادیر دبی شبیه‌سازی شده، Q_{oi} مقادیر دبی مشاهداتی و Y_s و Y_o ، به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دبی اوج و حجم سیلاب و n تعداد دفعات مقادیر برآورد شده دبی می‌باشد (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸).

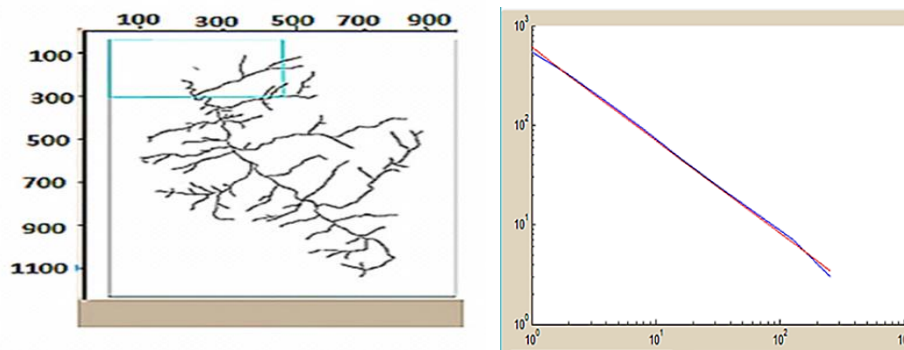
بحث

با در نظر گرفتن پنجره‌هایی با ابعاد مختلف، بعد فراکتال محدود به هر پنجره با روش جعبه شماری که در متلب کدنویسی شده، محاسبه گردید. پنجره‌های انتخاب شده با ابعادی با روند افزایشی از بالادست حوضه به سمت خروجی در نظر گرفته شده‌اند، به گونه‌ای که آخرین پنجره کل محدوده حوضه را در بر دارد، با افزایش ابعاد پنجره انتخابی، بعد فراکتال محاسبه شده افزایش یافته و در نهایت به سمت مقداری ثابت میل می‌کند (شکل‌های ۳ و ۲).



شکل (۲): بعد فراکتال محدود به هر پنجره با روش جعبه شماری در زیر حوضه Ah

Figure (2): Fractal dimension limited to each window by box counting method in the Ah sub-basin



شکل (۳): بعد فراکتال محدود به هر پنجره با روش جعبه شماری در زیر حوضه Ac

Figure (3): Fractal dimension limited to each window by box counting method in the Ac sub-basin

ترسیم هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی

برای رسم هیدروگراف واحد NRCS ابتدا اختلاف ارتفاع مساحت و طول بلندترین آبراهه را با استفاده از نرم افزار ArcGIS 9.3 استخراج و سپس زمان تمرکز به روش کریپیج محاسبه شد که نتایج آن در جداول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای هیدروگراف واحد مثلثی NRCS مربوط به حوضه Ah, Ac

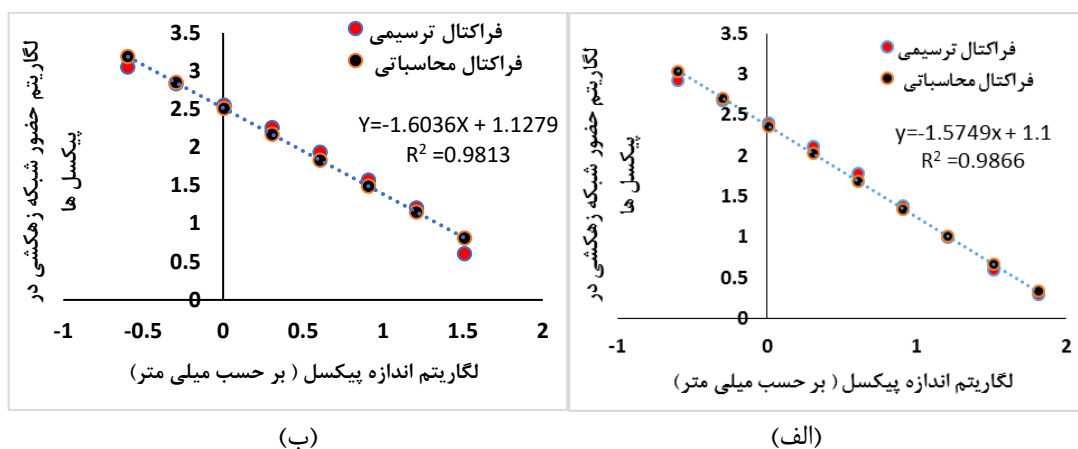
Table (1): NRCS triangular unit hydrograph parameters for the Ac and Ah basins

مقدار	L(Km)	Max	Min	max-min=h(m)	Tc(hr)	A(mile ²)	T(hr)	Tl(hr)	Tb(hr)	Qpk(sfc)	Tp(hr)
Ac	۳/۱	۱۳۳۱/۴۵	۱۰۴۴/۴۵	۲۸۷	۰/۳۵۵	۲/۳	۵	۲/۷۱۳	۷/۲۶۸	۴۱۰/۳۲	۰/۸۰
Ah	۴/۸۵	۱۱۹۰/۹۵	۱۰۵۹/۱۵	۱۳۱/۸	۰/۸۵	۳/۲۹۵	۵	۳/۰۱	۸/۰۶	۵۲۹/۸۶	۱/۴۳

پس از محاسبه داده های ژئومورفولوژیکی در دو زیرحوضه Ah, Ac، هیدروگراف واحد بعد فراکتال و NRCS ۵ ساعته برای دو زیرحوضه رسم شد. اشکال شماره (۶ و ۷) پس از محاسبه زمان تمرکز به روش کریپیج و رسم هیدروگراف واحد NRCS، زمان تمرکزهای دو زیر حوضه در مقابل ابعاد فراکتال هر یک قرار داده شد و منحنی برازش رسم گردید (اشکال (۵ و ۴) و با توجه به عدد رگرسیون معادل ۰/۹۸ و رابطه (۲۴) زمان تمرکز جدید بدست آمد که در آن x بعد فراکتال مربوط به دو زیرحوضه مطالعاتی است (جدول ۲). سپس زمان تمرکز و هندسه فراکتال شبکه زهکشی رودخانه حوضه سد کلان محاسبه و دبی حداکثر سیلاب برآورد شد. لازم به ذکر است که در این بررسی دو زیر حوضه Ac با مساحتی معادل ۱۱۹/۰۶ و زیرحوضه Ah با وسعتی برابر ۱۷۰/۵۹ کیلومتر مربع ارزیابی شده است.

$$tc = 103.09x - 341.02x + 283.23$$

(۲۴)



شکل (۴): الف) تصویر شبکه زهکشی و محاسبه بعد فراکتال حوضه Ac
 Figure (4): A) Image of the drainage network and calculation of the fractal dimension of the Ac basin
 شکل (۵): ب) تصویر شبکه زهکشی و محاسبه بعد فراکتال حوضه Ah
 Figure (5): B) Image of drainage network and calculation of the fractal dimension of the Ah basin

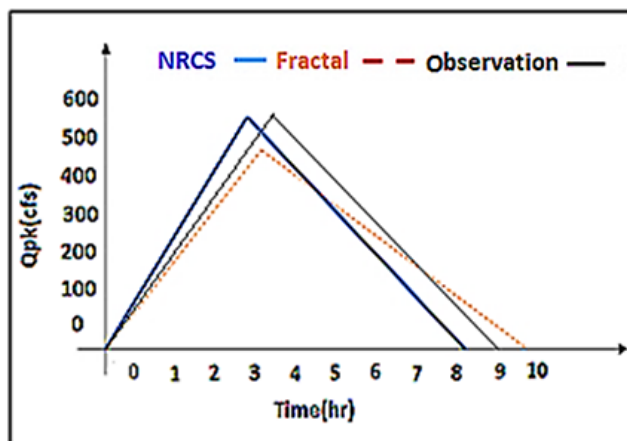
جدول (۲): پارامترهای هیدروگراف فراکتالی مربوط به حوضه Ac, Ah

Table (2): Fractal hydrograph parameters for the Ac and Ah basins

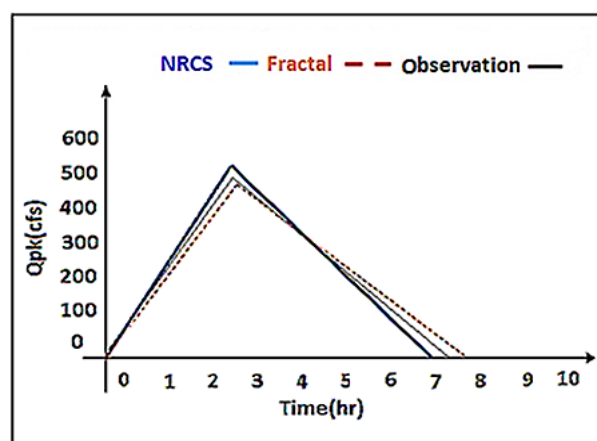
مقدار	L(Km)	Max	Min	max-min=h(m)	Tc(hr)	A(mile ²)	T(hr)	Tl(hr)	Tb(hr)	Qpk(sfc)	Tp(hr)	Df بعد فراکتال
Ac	۳/۱	۱۳۳۱/۴۵	۱۰۴۴/۴۵	۲۸۷	۰/۹۱	۲/۳	۵	۳/۰۴۶	۸/۱۵۶	۳۶۵/۴۶	۱/۵۰	۱/۵۸
Ah	۴/۸۵	۱۱۹۰/۹۵	۱۰۵۹/۹۵	۱۳۱/۸	۱/۸۵	۳/۲۹۵	۵	۳/۶۱	۹/۶۶	۴۴۱/۷۶	۲/۴۷	۱/۵۷۴۹

بررسی شبیه‌سازی رواناب هندسه فراکتال و مدل NRCS

پس از محاسبه پارامترهای جدید در رابطه با زمان تمرکز و بعد فراکتال دو زیرحوضه، با استفاده از رابطه به دست آمده هیدروگراف مثلثی جدید بر پایه بعد فراکتال رسم شد. پس از رسم هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی در دو زیر حوضه به همراه هیدروگراف فراکتالی تولید شده مربوط به هر زیرحوضه مقایسه انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که زیرحوضه Ac به دلیل اینکه رده آبراهه پایینی دارد هیدروگراف‌ها انطباق خوبی با هم دارند به صورتی که در زیرحوضه Ac نمودارها کاملاً منطبق هستند و نشان می‌دهد که هیدروگراف‌های فراکتال زمان تمرکز را نسبت به شبکه هیدروگرافی اصلاح نموده است و بیانگر این است که در زیرحوضه Ac بین هیدروگراف‌های بعد فراکتال و NRCS تطابق قابل قبولی وجود دارد (اشکال ۶ و ۷). لازم به ذکر است که در نمودارهای اشکال (۶ و ۷) مقدار دبی به میزان یک فوت مکعب بر ثانیه (cfs) برابر با ۰/۲۸۳ متر مکعب بر ثانیه است، بنابراین حداکثر مقدار دبی در محور (Y) ۶۰۰ (cfs) فوت مکعب بر ثانیه برابر با ۱۶/۹۸ متر مکعب بر ثانیه است.



(ب)



(الف)

شکل (۶): نمودار مقایسه هیدروگراف NRCS و فراکتالی زیرحوضه Ac

Figure (6): Comparison chart of NRCS hydrograph and fractal for Ac sub-basin

شکل (۷): نمودار مقایسه هیدروگراف NRCS و فراکتالی زیرحوضه Ah

Figure (7): Comparison chart of NRCS hydrograph and sub-basin fractal Ah

اما با توجه به هیدروگراف مربوط به زیرحوضه (Ah) می‌توان نتیجه گرفت که هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی تطابق خوبی با هم ندارند این موضوع می‌تواند به دلیل پایین بودن رده آبراهه و یا حتی می‌تواند به این دلیل اختلاف ارتفاع بیشتر زیر حوضه Ac نسبت به زیرحوضه Ah و یا تفاوت در کاربری اراضی باشد و بیانگر این است که تغییر کاربری اراضی نقش مهمی در دبی پیک سیلاب دارد. لذا بررسی‌ها نشان می‌دهد که تطابق هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد مثلی کمتر است. بعلاوه اختلاف پارامترهای هیدروگراف فراکتالی و NRCS که در جدول ۳ ارائه شده نیز این موضوع را تایید می‌کند. به طوری که اختلاف، ارتفاع، اختلاف زمان پایه (Hr)، اختلاف زمان اوج (Hr)، اختلاف دبی پیک (CFS) موجب افزایش اختلاف درصد خطای پارامترهای هیدروگراف فراکتالی و NRCS شده است خلاصه‌ای از اختلاف و درصد خطای پارامترهای هیدروگراف فراکتالی و NRCS مربوط به دو زیرحوضه در جداول (۵ و ۴) آمده است. نتایج تحلیل آماری مقادیر R^2 و RMSE نشان می‌دهد که زیرحوضه Ac با کمترین خطا بیشترین تطابق و زیرحوضه Ah با بیشترین خطا کمترین تطابق را در هیدروگراف‌های مشاهده‌ای NRCS و فراکتالی ارائه داده‌اند (جدول ۳).

جدول (۳): نتایج برآورد خطای آماری هیدروگراف‌های زیرحوضه‌های Ac و Ah

Table (3): Results of statistical error estimation of hydrographs of Ac and Ah sub-basins

زیرحوضه	RMSE	R^2
Ac	۰/۷۶	۰/۹۲
Ah	۰/۹۳	۱/۳۵

جدول (۴): اختلاف پارامترهای هیدروگراف فراکتالی و NRCS

Table (3): Difference between fractal and NRCS hydrograph parameters

زیرحوضه	اختلاف ارتفاع (M)	اختلاف زمان پایه (Hr)	اختلاف زمان اوج (Hr)	اختلاف دبی پیک (CFS)
Ac	۲۸۷	۰/۸۸	۰/۳۳	۴۴/۸۶
Ah	۱۳۱/۸۰	۱/۶۰	۰/۶۰	۸۸/۰۶

جدول (۵): درصد خطای پارامترهای هیدروگراف فراکتالی و NRCS

Table(4): Percentage error of fractal hydrograph parameters and NRCS

زیرحوضه	درصد خطا مربوط به هر پارامتر		
	درصد خطا دبی پیک (CFS)	درصد خطا زمان اوج (Hr)	درصد خطا زمان پایه (Hr)
Ac	٪۱۱/۰۱	٪۱۱/۰۱	٪۱۱/۰۲
Ah	۱۶/۱۶۲	۱۶/۱۶۲	۱۶/۱۶۳

در این تحقیق به جهت صحت‌سنجی و افزایش ضریب دقت و بررسی هیدروگراف واحد مشاهداتی زیرحوضه‌های Ac و Ah از مدل هیدروولوژیکی HEC _ HMS جهت رسم هیدروگراف و مقایسه آن‌ها استفاده شده است، به این صورت که اطلاعات مورد نیاز برای رسم هیدروگراف واحد مشاهداتی با استفاده از نقشه کاربری اراضی (شکل ۸) مقادیر CN برآورد و وارد نرم‌افزار شده و با توجه به مقادیر - CN خاک که حدود ۷۳ و گروه خاک که C می‌باشد و با استفاده از نتایج مطالعات خاک، گروه‌های هیدروولوژیک زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه برآورد و سپس هیدروگراف HEC _ HMS رسم و با بعد فراکتال مقایسه شد. جدول (۶) نشان‌دهنده مقادیر گروه‌های هیدروولوژیک و جدول (۷) مقادیر اولیه CN را براساس گروه‌های هیدروولوژیک، پوشش گیاهی و وضعیت هیدروولوژیکی زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد.

جدول (۶): توزیع مساحت گروه‌های هیدروولوژیک در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

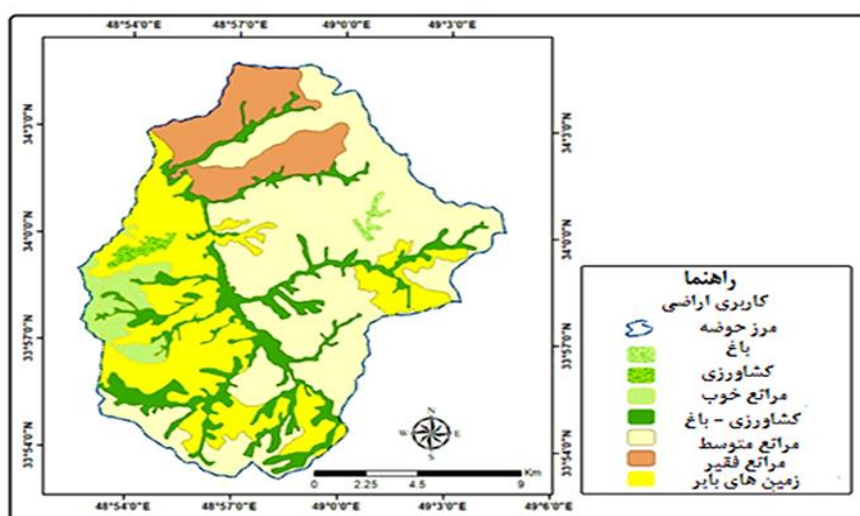
Table (5): Area distribution of hydrological groups in the sub-basins of the study area

زیرحوضه	A	B	C	D	مساحت زیرحوضه (کیلومتر مربع)
Ac	۰	۰	۸۲۶/۳۷	۳۶۴/۱۸	۱۱۹/۰۶
Ah	۷۶/۷۶	۳۰/۳۲	۱۵۹۸/۷۲	۰	۱۷۰/۵۹

جدول (۷): مقادیر اولیه CN زیرحوضه‌های مورد مطالعه بر اساس جدول استاندارد SCS

Table (6): Initial CN values of the studied sub-basins based on the standard table

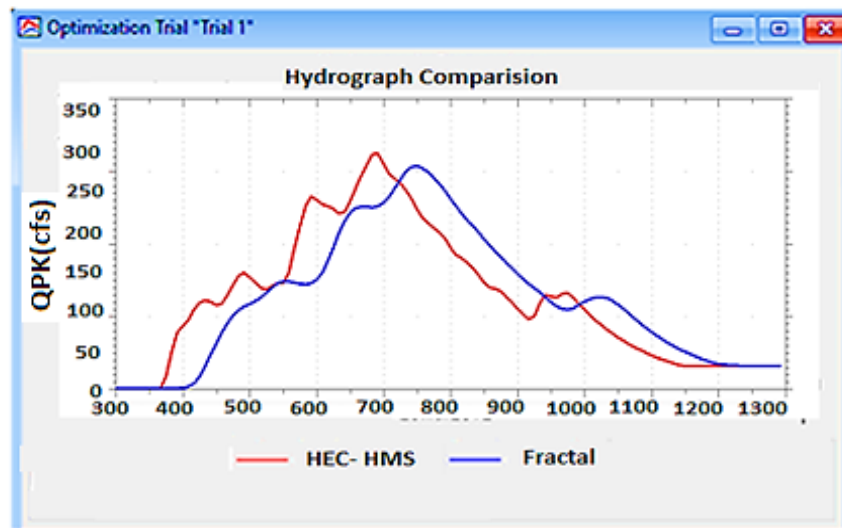
عنوان	A	B	C	D
CN	۵۰	۶۵	۷۳	۷۹



شکل (۸): نقشه کاربری اراضی حوضه سد کلان ملایر

Figure(8): Land use map of the Malayer Dam basin

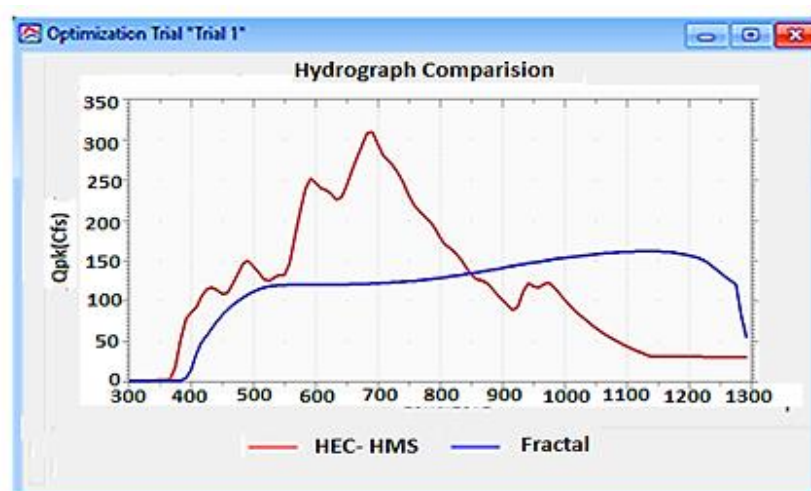
همان‌طور که از خروجی مدل HEC-HMS در زیرحوضه Ac مشاهده می‌شود (شکل ۹)، می‌توان چنین استنباط نمود که تطابق خوبی بین مدل HEC-HMS با بعد فراکتالی مشاهده می‌شود و بیانگر این است که بین داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل انطباق قابل قبولی وجود دارد که در بعد فراکتال و خروجی HEC-HMS بصورت یک هیدروگراف واحد NRCS بوجود آمده است.



شکل (۹): نمودار مشاهداتی زیرحوضه Ac بین مدل HEC-HMS و بعد فراکتالی

Figure(9): Observational diagram of the Ac sub-basin between the HEC-HMS model and the fractal dimension

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خروجی زیرحوضه Ah در مدل HEC-HMS تطابق قابل قبولی بین داده‌های مشاهداتی و ترسیمی مدل وجود ندارد. این امر در بعد فراکتال در خروجی مدل نیز در همین زیرحوضه مشاهده می‌شود. پایین بودن رده آبراهه و اختلاف ارتفاع بیشتر از مهم‌ترین دلایل آن می‌باشد و این موضوع به خوبی نقش پارامترهای ژئومورفولوژی از قبیل شیب و تراکم زهکشی و یا تفاوت در کاربری اراضی را به خوبی در رسم هیدروگراف نشان می‌دهد (شکل ۱۰).

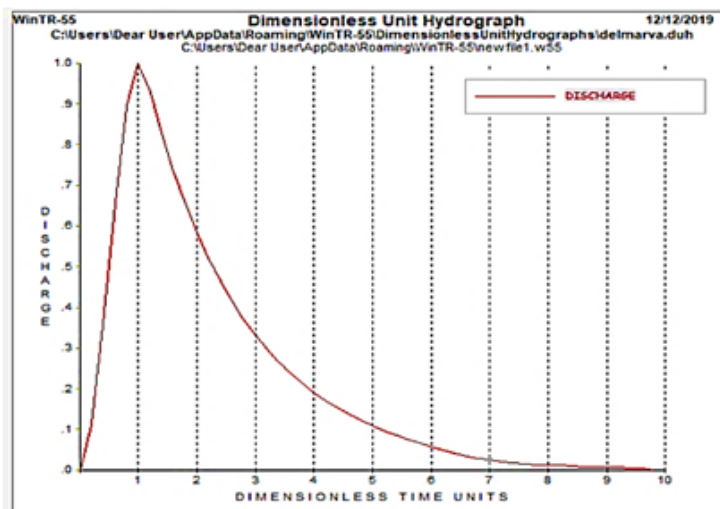


شکل (۱۰): نمودار مشاهداتی زیرحوضه Ah با مدل HEC-HMS و بعد فراکتالی

Figure(10): Observational diagram of the Ah sub-basin with the HEC-HMS model and fractal dimension

جهت ارزیابی دقیق‌تر ابتدا با بررسی نقشه کاربری اراضی و محاسبه وسعت و اندازه هر کاربری، مقادیر شماره منحنی در دو زیرحوضه برآورد و همراه با پارامترهای زمان تمرکز، دبی حداکثر هیدروگراف سیلاب بعلاوه شیب و سرعت جریان طول جریان سطحی، مقدار

جریان سطحی به شکل ورقه‌ای و متمرکز، ارتفاع آب در مسیر جریان رواناب، ضریب مانینگ، خصوصیات فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و بارندگی ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال در دو زیر حوضه آبریز سدکلان وارد مدل WinTR-55 ملایر شد و هیدروگراف واحد بدون بعد به روش^۱ SCS تهیه گردید (شکل ۱۱).



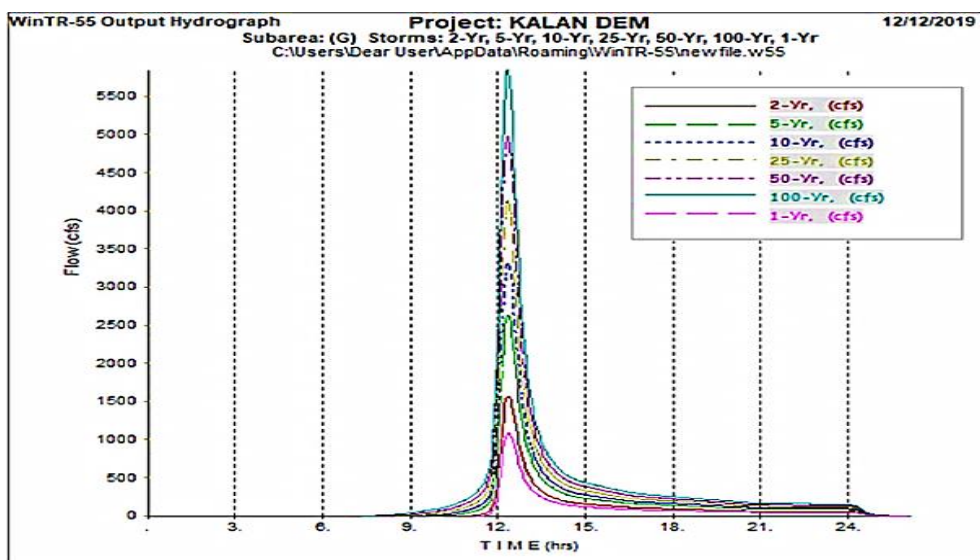
شکل (۱۱): هیدروگراف واحد بدون بعد WinTR-55
Figure(11): Dimensionless Unit Hydrograph WinTR-55

از بررسی هیدروگراف‌های WinTR-55 چنین استنباط می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) که این مدل هیدرولیکی در دوره بازگشت‌های پایین مثل دوره بازگشت ۵ سال سنجش قابل قبولی را نسبت به داده‌های مشاهداتی انجام می‌دهد و هرچقدر دوره بازگشت‌ها افزایش می‌یابد از دقت مدل کاسته می‌شود. این امر را می‌توان در خروجی زیرحوضه Ac کاملاً مشاهده نمود. چون حوضه سد کلان تعارض زیادی داشته، واحدهای هیدرولوژی و CN‌های متفاوتی دارد و در زیرحوضه Ac که تقریباً از لحاظ اختلافات؛ تفاوت‌های کمتری دارد و تقریباً از لحاظ کاربری اراضی دارای یکپارچگی نسبی است و کاربری اراضی در این زیرحوضه کمتر اتفاق افتاده است می‌توان به این نتیجه رسید که مدل WinTR-55 برای حوضه‌هایی با دوره بازگشت بالا کارایی خوبی ندارد. بررسی هیدروگراف WinTR-55 و بعد فراکتال نشان می‌دهد برای زیرحوضه‌های کوچک نتایج خوب و قابل قبولی ارائه داده، ولی برای حوضه‌های بزرگتر مناسب نمی‌باشند. لذا نتایج این بررسی نشان می‌دهد که برای حوضه‌های کوچک باید از مدل winTR-55 و بعد فراکتال استفاده کرد و هر چقدر تراکم زهشکی بیشتر باشد. نتایج حاصل از ترسیم و تحلیل هیدروگراف‌ها دقیق‌تر و قابل قبول‌تر می‌باشد. بعلاوه نتایج هیدروگراف‌های مدل هیدرولوژیکی ژئومورفولوژیکی، مدل NRCS و WinTR-55 و مقایسه آن‌ها با نتایج مدل HEC-HMS نشان می‌دهد که از دقت قابل قبولی برخوردار هستند و می‌توان از آن‌ها در زیرحوضه‌های کوچک و فاقد آمار به خوبی استفاده نمود. بررسی نتایج جدول (۸) نشان می‌دهد مقادیر برآورد مشخصات هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های ژئومورفولوژی برای دو زیرحوضه سد کلان ملایر با استفاده از داده‌های ژئومورفولوژی در زیرحوضه‌های کوچک می‌توان مقادیر مشخصات هیدرولوژیکی را با دقت قابل قبولی برآورد نمود.

جدول (۸): مقادیر برآورد مشخصات هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص های برای دو زیر حوضه سد کلان ملایر

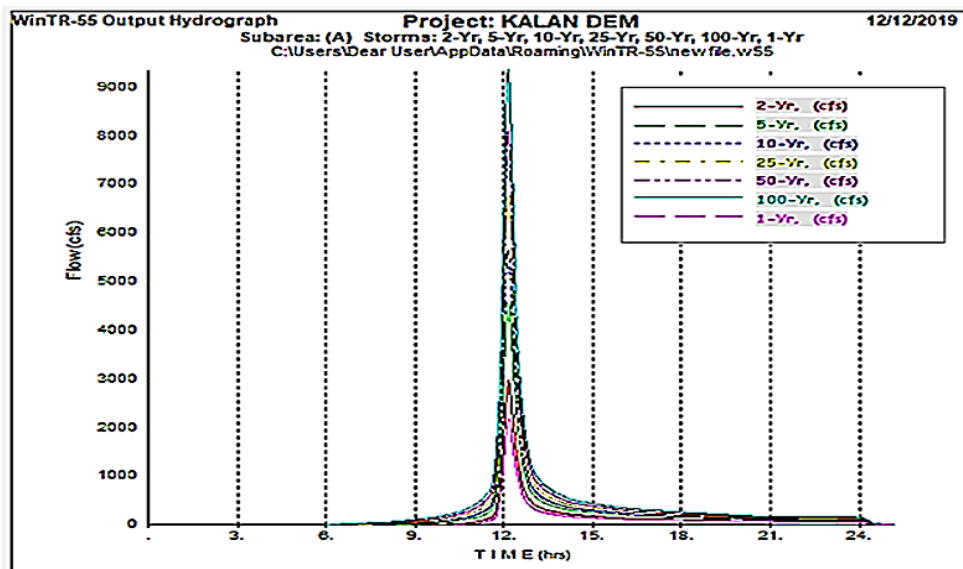
Table (7): Estimated values of hydrological characteristics using indices for two sub-basins of the Malayer Dam

شاخص نفوذ (Φ) (md)	ضریب رواناب (C) %	ارتفاع رواناب (R) (mm)	Qpk(sfc)	Tr(hr)	Tb(hr)	حجم رواناب (V) (sfc)	زیر حوضه
۸/۲۱	۸	۰/۰۳	۴۱۰/۳۲	۲/۱۴	۰/۸۰	۲۰۵۱/۶	Ac
۷۹/۲۳	۸/۲	۰/۰۵	۵۲۹/۸۲	۳/۸۲	۱/۴۳	۲۶۴۹/۱	Ah



شکل (۱۲): هیدروگراف WinTR-55 حوضه Ac

Figure(12): Hydrograph WinTR-55 Ac Basin



شکل (۱۳): هیدروگراف واحد WinTR-55 حوضه Ah

Figure(13): WinTR-55 Basin Ah Unit Hydrograph

نتیجه گیری

این بررسی جهت دستیابی به روابطی برای زمان تمرکز بر اساس بعد فراکتال به منظور تولید هیدروگراف واحد مثلثی و بررسی کارایی آن با مدل های WinTR-55، HCE-HMS و نقش پارامترهای ژئومورفولوژیکی در برآورد دبی اوج هیدروگراف در حوضه آبریز سد کلان

ملایر همدان انجام شده است. نتایج حاصل از هیدروگراف‌های استخراج شده از مدل‌های HCE-HMS و WinTR-55 نشان می‌دهد که بعد فراکتال باعث اصلاح هیدروگراف‌ها شده است، که با نتایج باباعلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ملکی و همکاران، ۱۳۹۸؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) مطابقت دارد. نتایج نشان داد که بعد فراکتال محاسبه شده برای شبکه رودخانه از بالا دست به سمت خروجی حوضه روند افزایشی داشته و نشان‌دهنده سطح پر شدگی یا اشغال حداکثری حوزه از شبکه زهکشی بوده که بررسی منحنی فراکتال شبکه رودخانه، میزان پخش شدگی آبراهه‌ها در سطح حوضه و میزان وسعتی از سطح حوضه را که توسط آبراهه‌ها اشغال شده را تایید می‌کند. به طوری که هر چقدر این عدد به ۲ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که سطح بیشتری از حوضه توسط آبراهه‌ها زهکشی می‌شود که با نتایج بلوکی و همکاران، ۱۴۰۲؛ سپهوند و همکاران، ۱۴۰۲؛ وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ یاراحمدی و همکاران، ۱۴۰۳) مطابقت دارد. در این بررسی عدد ۲ نشان‌دهنده این است که سطح قابل توجهی از حوضه توسط آبراهه‌ها پوشیده شده است. در واقع افزایش بعد فراکتال به دست آمده از این روش از بالاترین نقطه به سمت خروجی نشان‌دهنده این است که با نزدیک‌تر شدن به خروجی حوضه تعداد بیشتری از آبراهه‌ها در زهکشی سطح حوضه موثر واقع می‌شوند. نتایج نشان داد که علی‌رغم وسعت کوچک و کم دو زیر حوضه مورد بررسی و تعداد کم خصوصیات ژئومورفولوژیکی بکار گرفته شده در مدل GIUH در حوضه سدکلان ملایر، برآورد مقادیر جریان رواناب و دبی حداکثر سیلاب با استفاده از مدل GIUH از دقت قابل قبولی برخوردار بوده به طوری که بین مقادیر دبی حداکثر سیلاب محاسباتی مدل و مشاهداتی تطابق خوبی وجود دارد که با نتایج (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶؛ برزگری دهج و همکاران، ۱۳۹۸؛ غلامیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱) نتایج مشابه و قابل قبولی ارائه داده است. هم‌چنین دبی‌های محاسبه شده توسط مدل WinTR-55 به معنای آن است که پارامترهای ژئومورفولوژی نقش مهم و مؤثری در برآورد دبی اوج ایفا می‌کنند که با نتایج یار احمدی و همکاران (۱۴۰۳) مطابقت دارد. نتایج نشان داد که مدل به مقادیر شماره منحنی CN حساسیت بیشتری نشان می‌دهد و بیانگر این است که تغییر کاربری اراضی نقش مهمی در دبی پیک سیلاب دارد. بررسی هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد فراکتالی در حوضه سد کلان و مقایسه آن‌ها نشان می‌دهد که هیدروگراف‌ها انطباق‌های خوبی با هم دارند به صورتی که در زیرحوضه Ac نمودارهای بعد فراکتال و هیدروگراف NRCS و خروجی مدل HEC-HMS کاملاً منطبق هستند و بیانگر این است که بین داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل انطباق قابل قبولی وجود دارد که در بعد فراکتال و خروجی HEC-HMS بصورت یک هیدروگراف واحد NRCS مشاهده می‌شود که با نتایج غلامیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ سپهوند و همکاران، ۱۴۰۲؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ثانی‌خانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که هر چه اختلاف ارتفاع بیشتر باشد تطابق هیدروگراف واحد NRCS و هیدروگراف واحد مثلثی کمتر است و با نتایج (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰؛ اسماعیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ کوساکت^۱ و همکاران، ۲۰۲۲) مطابقت دارد. اما نکته مهمی که از هیدروگراف‌های فراکتال قابل استنباط است این است که زمان تمرکز را نسبت به شبکه هیدروگرافی در هر دو زیرحوضه اصلاح نموده است که این موضوع در هیدروگراف‌های زیرحوضه Ah قابل مشاهده است. نتایج این بررسی نشان داد که هیدروگراف‌های WinTR-55 در دوره بازگشت‌های پایین به خصوص ۵ سال سنجش قابل قبولی را نسبت به داده‌های مشاهداتی انجام می‌دهد و هرچقدر دوره بازگشت‌ها بیشتر می‌شود از دقت مدل کاسته می‌شود که این امر را می‌توان در زیر حوضه Ac کاملاً مشاهده نمود، که با نتایج (مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ فتاحی و همکاران، ۱۳۹۶؛ برزگری دهج و همکاران، ۱۳۹۸؛ غلامیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ وکیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اسدی و همکاران، ۱۴۰۱؛ مصطفی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰؛ اسماعیلی و همکاران، ۱۴۰۱؛ کوساکت و همکاران (۲۰۲۲) نتایج مشابه و قابل قبولی ارائه داده است. بررسی نتایج مدل WinTR-55 و بعد فراکتال نشان می‌دهد که مدل برای زیر حوضه‌ها خیلی کوچک نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد، ولی برای حوضه‌های بزرگ‌تر مناسب نمی‌باشند. که در حوضه آبخیز سد کلان ملایر به دلیل وسعت کم زیر حوضه‌ها از کارایی بالا برخوردار بوده و می‌توان نتایج حاصله را به اکثر حوضه‌های آبریز مجاور و مشابه آن تعمیم داد که این مسأله از لحاظ کاربردی حائز اهمیت فراوان است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که برای حوضه‌های کوچک و حداکثر با

مساحتی برابر ۶۵ کیلومتر مربع (۲۵ مایل مربع) که این مدل می‌تواند شبیه‌سازی قابل قبولی ارائه می‌دهد و به عبارتی در حد زیرحوضه‌ها استفاده شود. بعلاوه این مدل در حوزه‌هایی که زمان تمرکز آن‌ها بین ۰/۱ تا ۱۰ ساعت باشد، نتایج بهتری را ارائه می‌کند و توصیه می‌شود از مدل winTR-55 و بعد فراکتال در چنین حوضه‌ها استفاده شود.

References

- Alimoradi, M., Ekhtesasi, M., Tazeh., M., & Karimi, H. (2021) The Relation of Fractal Dimension with Discharge and Sediment Indices in Ilam Watershed , Journal of Quantitative Geomorphology Research, 10(-3), 19-39. (In Persian).
- Aliye, M.R., Aga, A.O., Tadesse, T., & Yohannes, P. (2020) .Evaluating the Performance of HEC-HMS and SWAT Hydrological Models in Simulating the Rainfall-Runoff Process for Data Scarce Region of Ethiopian Rift Valley Lake Basin. Open Journal of Modern Hydrology, 10 (4), 105-122.
- Asadi, M., Jabbari, I., & Hesadi, H. (2022). Evaluation and Assessment of Capability of Hydrograph Model of Instantaneous Geomorphology Unit in Simulating Flood Hydrograph of Minab River Basin, Geography and Development, 20(68), 116-137. (In Persian).
- Asadi, M, Jabbari, I., & Hesadi, H. (2020). Flood Modeling in Arid and Semi Arid Areas Using HEC-HMS Model (Case Study: Esteghlal Minab Basin), Quantitative Geomorphology Research, 8(3), 17-33. (In Persian).
- Babaali, H. R., Ramek, Z., & Sepahvand, R. (2018). Estimation of Design Flood using Fractal Theory and HEC-HMS Model (Case Study: Khorramabad River Basin), Water and Soil, 32(6), 1097-1107. (In Persian).
- Barzegari, V., Zare, M., & Ekhtasasi, M. R. (2020). Comparison of Dimensionless Drainage Network Density and Fractal Dimensions in Separating of Lithological Units (Case Study: Taft Watershed, Yazd), Quantitative Geomorphology Research, 8(3), 80-96. (In Persian).
- Bamuffleh, S., Al-Wagdany, A., Elfeki, A., & Chaabani, A. (2020). Developing a geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) using equivalent Horton-Strahler ratios for flash flood predictions in arid regions.
- Bolouki, H., Fazeli, M., & Sharifzadeh, M. (2023). Extraction of Intensity-Duration-Frequency Curves Using Fractal Theory and Evaluation of Climate Change on it (Case Study: Bushehr), Journal of Civil and Environmental Engineering, 53(110), 103-113. (In Persian).
- Darji, K., Khokhani, V., Prakash, I., Mehmood, K., Pham, B.T., & Final, M.E. (2019). Rainfall-runoff modelling using HEC-HMS model: an application of regression analysis. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 6(5), 225-234.
- Derdour, A., Bouanani, A., & Babahamed, K. (2018). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). March 2018 Journal of Water and Land Development, 36(1):45-55.
- Dong, Y., Wang, P., Hua, Z., dong Liu, X. (2024). River networks evolution under multiple stresses: A geometric and structural fractal perspective, Journal of Cleaner Production, 448, 141411.
- Dokusu, K., Değişiminin, M., Geometri, F., & Hesaplanması, A. (2019). Fractal Geometry Analysis of Urban Tissue Morphological Change: The Case Study of Bursa. vol. 4, Architecture and Life, 1, 117-140.
- Esfandyari Darabad, F., Pourganji, Z., Mostafizadeh, R., & Aghaei, M. (2022). Comparison of Effective Rainfall Conversion Methods to Surface Runoff in Flood Hydrographic Simulation of Nanekaran Watershed, Ardabil Province, Hydrogeomorphology, 9(32), 63-86. (In Persian).

- Esmacili, F., Vatakhah, M., & Moosavi, V. (2023). The effectiveness of Clark's Instantaneous unit hydrograph model (IUH) on the spatial resolution of different digital elevation models, *Journal of Range & Watershed Management*, 75(4), 661-674. (In Persian).
- Fattahi, M. H., & Kamyab, S. (2018). Compliance Process of the Geo-morphological indices of the watershed with the Multi-fractal Properties of the River Network, Iran - *Water Resources Research*, 14(5), 339-451. (In Persian).
- Fattahi, M. H., & Talebzadeh, Z. (2017). The relationship between watershed compactness coefficient and the fractal characteristics. *Iran - Water Resources Research*, 13(1), Issue 1, May 2017, Pages 191-203. (In Persian).
- Gholamian, H., & Ildoromi, A. (2020) Estimates of maximum flood discharge, transfer capacity and sedimentation of Sonqor watershed using the GIUH and WinTR-55 models, 7(24), 1-18. (In Persian).
- Gholamian, H., & Ildoromi, A. (2020). The Effects of Land Use Changes on the Maximum Flood Discharge in the Songhor Watershed, *Geography and Environmental Planning*, 31(3), 107-130. (In Persian).
- Haibo, M., Xin, D., & Wenjuan, C. (2018). Application of Synthetic Unit Hydrograph on HEC-HMS Model for flood forecasting. In *MATEC Web of Conferences*, 246 (01076): 1-8.
- Heydari Chenari, F., Fazloulou, R., & Nikzad Tehrani, E. (2022). Calibration and evaluation of HEC-HMS hydrological model parameters in simulation of single rainfall-runoff events (Case study: Tajan watershed), *Journal of Watershed Management Research*, 13(26), 69-81. (In Persian).
- Hui, Y., & Changxing, S. (2017). The Fractal Characteristics of Drainage Networks and Erosion Evolution Stages of Ten Kongdus in the Upper Reaches of the Yellow River, China. *Journal of Resources and Ecology*, 8(2), 165 – 174.
- Izadi, S., & Shamohammadi, S. (2022). Evaluation of Rainfall-Runoff-Retention Model (3RM) in Kassilian and Darjazin Watersheds, *Water and Irrigation Management (JWIM)*, 12(2), 309-325. (In Persian).
- Ildoromi, A.R. (2023). Sensitivity separation of geological formations of northern slopes of Alvand Hamedan using fractal dimension of drainage network. , *Journal of Quantitative Geomorphology Research*, 11(4), 1-21. (In Persian).
- Ildoromi, A. R., & Sepehri, M., (2018). Relationship of Quantitative Geomorphological Indices Using Fractal Dimension, *Quantitative Geomorphology Research*, 6(4), 70-87. (In Persian).
- Kusák, M. (2022). Application of fractal and multifractal analysis on Blue Nile drainage patterns in the morphostructural analysis of the Ethiopian highlands, Ethiopia. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 03091333211059419.
- Khosravi, A., Sepehr, A., & Abdollahzadeh, Z. (2017). Fractal Behavior and Its Relationship with Hydromorphometric Characteristics over Catchments of Binaloud Northern Hillslopes Hydrogeomorphology, 3(9), 1-20. (In Persian).
- Joo Kim, H., (2022). Fractal Characteristics of River Networks Induced by Dynamical Stochastic Replication, *Fractal Fract.* Published: 6 October 2022, 6(10), 569.
- Maleki, A., & Hafez Parast, M. (2020). Efficiency of Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH), Comparing to other Models in Mereg Catchment, Kermanshah., *Geographic Space*, 19(68), 59 - 74. (In Persian).
- Martinez, F., Ojeda, A., & Manríquez, H. (2022). Application of fractal theory to describe the morphological complexity of large stream networks in Chile. *Water Resources*, 49(2), 301-310.

- Mohammadi Khoshoui, M., Ekhtesasi, M.R., & Talebi, A. (2024). Fractal analysis of drainage network and its relationship with flooding potential in arid areas, *Advanced Tools for Studying Soil Erosion Processes*, pp.157-180).
- Mostafazadeh, R., Vafakhah, M., & Zabihi, M. (2017). Spatial and temporal analysis of monthly precipitation variations in Golestan Province using fractal dimension, *Watershed Engineering and Management*, 9(1), 34-45. (In Persian).
- Mostafazadeh, R., Zabihi, M., Adhami, M. (2015). Efficiency Evaluation of Diskin Method in Derivation of Instantaneous Unit Hydrograph in Jafar-Abad watershed, Golestan Province, *journal of Ecohydrology*, 2(2), 141-150. (In Persian).
- Mostafazadeh, R., Bahreman, A., & Sadaddin, A. (2010). Simulating the direct runoff hydrograph using Clark instantaneous unit hydrograph (Case study: Jafar-Abad Watershed, Golestan Province), 16(3), 105-122. (In Persian).
- Mostafazadeh, R., Mirzaei, S., Esmali, A., Zabihi, M. (2018). Sensitivity analysis of the flow hydrograph components due to changes in Clark's time-area model in Mohammad-Abad watershed, Golestan Province, (2018) *Iranian journal of Soil and Water Research*, 49(1), 91-99. (In Persian).
- Mostafazadeh, R., Esfandyari Darabad, F., Naseri, A., Abyat, A., & Adhami, M. (2024). Determining the fractal pattern in a reach of Qharesou River, Ardabil province, Northwest of Iran, *Hydrogeomorphology*, 10(37), 97-81. (In Persian).
- Mostafazadeh, R., & Asgari, E. S. (2021). Performance assessment of GR4J rainfall-runoff model in daily flow simulation of Nirchai Watershed, Ardabil province, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(3), 79-95. (In Persian).
- Nazari Sarem, M., Dabiri, R., Ansari, M.R., Vosoughi Abedini, M. (2020). Estimate of shore geomorphology fractal dimension north of Persian Gulf by box – counting method, *Quantitative Geomorphology Research*, 9(2), 159-174. (In Persian).
- Nayyeri, H., Moradi, R., & Sanikhani, H. (2025). Fractal and morphometric characterization of drainage and fault systems in the tectonically active Mereg Basin, Western Iran, *International Journal of River Basin Management*, 2025, Published online: 17 Jun 2025 <https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2517831>.
- Rezaei Moghadam, M., Mokhtari, D., & skandari, M. (2024). Comparative evaluation of a semi-distributed hydrological model with an integrated model to simulate the runoff of Gomanab Chai basin *Hydrogeomorphology*, 11(40), 39-22. (In Persian).
- Sahu, S., Pyasi, S., & Galkate, R. (2020). A review on the hec-hms rainfall-runoff simulation model. *International-Journal-ofAgricultural-Science-and-Research-2250-0057*, 10(4), 183-190.
- Sadeghzadeh, N., Golkarian, A., Jahani, M. (2024). Investigation the relationship between the fractal dimension of soil particles with different types of erosion and different parent materials, 12(44), 17-29. (In Persian).
- Sepehvand, T., Soleimani Motlagh, M., Zeinivand, H., & Mirzaei Mosivand, A. (2023). Estimating Flood through the Fractal Theory-Based Precipitation Estimation and the CN Extracted from Sentinel 2 in HEC-HMS Model: A Case Study of Thireh Watershed in Borujerd-Dorud Region, *Desert Ecosystem Engineering Journal*. 12(38), 87-103. (In Persian).
- Sharifi, Z., Mostafazadeh, R., Esmaali, A. O., Hezbawi, Z., & Golshan, M. (2023). Comparing optimization methods of SIMHYD model parameters to simulate daily flow discharge in the Kouzetopraghi Watershed, Ardabil, *Hydrogeomorphology*, 10(34), 51-33. (In Persian).

Soltani, S., Ghohroudi Tali, M., & Sadoogh, S. H. (2019). Application of remote sensing and fractal mathematical model in studying the behavior and variations of geomorphologic landforms of Aras river, quantitative geomorphological researches, 7(4), 73-92. (In Persian).

SaniKhani, H., & Amirataee, B. (2022). Determination of flow drainage patterns using fractal tree method (Case study: Zarrineh Rud sub-basin in Kurdistan province), Iranian Journal of Agricultural Sciences, 53(4), 885-896. (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, January 2022, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 36(2).

Vakili, S., & Moghaddamnia, A. (2022). Comparative Study of HEC-HMS Rainfall-Runoff Model with Different Experimental Methods of Flood Estimation, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 16(58), 32-43. (In Persian).

Yarahmadi, Y., Younesi, H., Godarzi, Rostami, A. (2025). SEstimating the Runoff Coefficient by Combining Arc CN-Runoff, SCS-CN and ICAR Empirical Relationship (Case Study: Selseleh Study Area - Lorestan Province, Iranian Journal of Remote Sensing and GIS (Iran J Remote Sens GIS), 16(4), 57-76.

Zakharov, V.S., Simonov, D.A., Gilmanova, G.Z., & Didenko, A.N. (2020). The fractal geometry of the river network and neotectonics of south Sikhote-Alin. Russian Journal of Pacific Geology, 14, 526–541.