## **Flood Inundation Mapping Using HAND** (A Case Study of Kashkan River, Western Iran)

Kaveh Ghahraman <sup>a,\*</sup> <sup>(D)</sup>, Mojtaba Yamani <sup>b</sup>, Balázs Nagy <sup>(D)</sup>

<sup>a</sup> PhD Candidate in Geomorphology, Department of Physical Geography, Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

<sup>b</sup>Professor in Geomorphology, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran <sup>c</sup>Associate Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary

Article History (Received: 04/06/2023	Accepted: 19/09/2023)
	Research Full Paper

#### **Extended** abstract

## **1-Introduction**

Floods pose significant risks as natural disasters on a global scale. In addition to climate change, anthropogenic activities have exacerbated the damaging effects of flooding over the past decade. Findings indicate that over 91 billion hectares of land in Iran are susceptible to flooding. Extensive hydrologic records reveal a total of 467 flooding events in the country up until 2002, contributing to a loss of 630 lives between 1982 and 1992. These alarming statistics underscore the necessity of studying and analyzing floods, as well as mapping inundation areas, in order to mitigate potential damage associated with future flooding events. One particular region in western Iran that has been heavily affected by recurring floods is the Kashkan River. This river traverses numerous urban and rural areas that are prone to annual flooding. Although various methodologies exist to investigate floods and identify areas susceptible to inundation, many of these approaches require data that may not be readily accessible. Consequently, this study employs the Height Above the Nearest Drainage (HAND) model to examine the flood-prone sections along the Kashkan River. Unlike other methods, the HAND model solely relies on a Digital Elevation Model (DEM), making it a promising and accurate technique for mapping inundation areas. By utilizing the HAND model, this research aims to identify specific sections of the Kashkan River that are prone to flooding. The findings of this study will contribute to a better understanding of flood dynamics in the region, enabling the development of effective strategies to minimize potential damage.

## 2-Methodology

In order to examine the areas that are prone to flooding, we employed the Height Above Nearest Drainage (HAND) model. This model was originally introduced by Rennó et al. (2008) and operates by utilizing a Digital Elevation Model (DEM) to compute the distance between a grid-cell within the topography data and the nearest cell along the stream it drains into. By considering cells with HAND values below a specific threshold as inundated, we can identify areas that are susceptible to flooding. Notably, the HAND model offers the advantage of being raster-based, eliminating the need for the construction of cross-sections, which is a requirement for alternative techniques like HEC-RAS. For our investigation, we employed the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM, which possesses a resolution of 30 meters. To validate the findings obtained from the HAND model, we employed flood maps generated from Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data from March 2019. These flood maps were created using the Sentinel Application Platform (SNAP) software and the

Corresponding Author: kevingh70@gmail.com

OTSU thresholding method. This method allows us to distinguish flooded areas within the study region and validate the results obtained from the HAND model.

#### 3- Results

The findings from this study indicate that a significant portion of the study area, encompassing 54.49 square km, is classified as highly flood prone. Additionally, an area measuring 31.78 square km is categorized as flood prone. Based on the HAND maps, it is evident that more than 30 percent of the study area is susceptible to flooding with varying intensities. The outcomes further reveal that the majority of both rural and urban regions situated alongside the Kashkan River are located within highly flood prone sections. Moreover, a comparison between the flood maps derived from Synthetic Aperture Radar (SAR) and the HAND results demonstrates that the HAND model successfully identified and classified the flood area in March 2019 as highly flood prone and flood prone. By examining the cross-section along the river, it becomes apparent that the inner banks of meanders are more susceptible to flooding when compared to the outer banks. Cross-section 1 analysis revealed that the sections with a high susceptibility to flooding are situated at higher elevations when compared to the maximum flood level observed in March 2019. This implies that in the event of more sever floods in the future, a larger portion of the areas along cross-section 1 will likely to be inundated. Additionally, the analysis demonstrated that during elevated flood flows, the outer bank of the meander is more prone to flooding compared to the inner bank. Similarly, in cross-section 2, the outer bank of the meander exhibits a greater extent of highly flood-prone areas compared to the inner bank. Furthermore, cross-section 2 findings indicate that the flood flow during March 2019 did not reach the upper limit of the highly flood-prone category. In contrast to the previous cross-sections, crosssections 3 and 4 primarily experienced flooding along the inner bank of the meanders, and the HAND model also classified them as highly flood prone. These results suggest that the distribution of inundation in the Kashkan river is predominantly influenced by the underlying topography.

#### 4- Discussion & Conclusions

The findings indicated that both rural and urban regions situated along the Kashkan river exhibit a high vulnerability to flooding, with a propensity for inundation during flooding events. The results revealed the efficacy of the HAND model in accurately identifying the flood-prone segments of the Kashkan River. Analysis of cross-sections along the river revealed that the inundation patterns in mountainous meandering rivers are predominantly influenced by the underlying topography. Overall, the HAND model represents a swift and precise approach for delineating areas at risk of flooding, thereby assisting authorities in enhancing planning strategies and implementing effective measures for mitigating damages.

Key Words: Flood, HAND model, Kashkan, Flood mapping, Inundation.

**Cite this article:** Ghahraman, K., Yamani, M., & Nagy, B. (2024). Flood Inundation Mapping Using HAND (A Case Study of Kashkan River, Western Iran). *Journal of* Environmental *Erosion Research*. 2024; 14 (1):1-17. http://doi.org/



Published by Hormozgan University Press. URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

# پیش بینی پهنههای سیل گیر با استفاده از مدل HAND (مطالعه موردی: رودخانه کشکان)

کاوه قهرمان\*: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیای طبیعی، دانشگاه اتووش لورند، بودا پست، مجارستان مجتبی یمانی: استاد ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران بالاژ نایج: دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیای طبیعی، دانشگاه اتووش لورند، بودا پست، مجارستان

نوع مقاله: پژوهشی		
تاريخ پذيرش: ۱۴۰۲/۶/۲۶)	تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۳/۱۴	
DOI: http//doi.org/		

## چکیدہ

سيلاب به عنوان يكى از مغرب ترين مخاطرات طبيعى در ايران و جهان، هرساله خسارات جانى و مالى زيادى بر جوامع وارد مى آورد. بر همين اساس تعيين مناطق مستعد سيلاب مى تواند نقش مهمى در كاهش خسارات ناشى از سيلابهاى احتمالى در آينده ايفا كند. در اين پژوهش، پهنههاى سيل گير در محدوده رودخانه كشكان با استفاده از مدل HAND تعيين شدند. به منظور تعيين پهنههاى سيل گير، از مدل رقومى ارتفاعى منطقه مورد مطالعه استفاده شد. همچنين از نرم افزارهاى QGIS و QGIS و لعمت بله مناطق مستعد سيلاب و نيمرخهاى ارتفاعى استفاده شد. در نهايت به منظور صحتسنجى نتايج مدل Excel ورش آستانه گذارى UTSU سيلاب و نيمرخهاى ارتفاعى استفاده شد. در نهايت به ماهواره سنتينل-۱، نرمافزار SNAP براى تهيه نقشه مناطق سيلزده در سيلاب و نيمرخهاى ارتفاعى استفاده از تصاوير رادارى مطالعه تهيه شد. نتايج اين تحقيق نشان داد كه تقريباً تمام مناطق شهرى و روستايى در اطراف رودخانه كشكان در طبقه موالاله تهيه شد. نتايج اين تحقيق نشان داد كه تقريباً تمام مناطق شهرى و روستايى در اطراف رودخانه كشكان در طبقه مدل HAND توانسته است با دقت بسيار بالايى پهنههاى سيل گير را تعيين كند. همچنين نتايج اين پژوهش مشخص كر كه بخشهاى داخلى مئاندر در محدوده رودخانه كشكان جزو مناطق سيل زده مستخرج از تصاوير رادارى نشان داد كه مدل HAND توانسته است با دقت بسيار بالايى پهنههاى سيل گير را تعيين كند. همچنين نتايج اين پژوهش مشخص كرد كه بخشهاى داخلى مئاندر در محدوده رودخانه كشكان جزو مناطق مهم مستعد سيلاب به شمار مىروند. بر اساس نتايج، در رودخلنههاى مئاندر در محدود ودخانه كشكان جزو مناطق مهم مستعد سيلاب به شمار مىروند. بر اساس نتايج، در رودخلنههاى مئاندر در محدود رودخانه كوهاى سيل گير را تعيين كند. همچنين نتايج اين پژوهش مشخص كرد كه بخشهاى داخلى مئاندر در محدود رودخانه كوهان مرو ماطق مهم مستعد سيلاب به شمار مى مان در دشترهاى در رودخلنههاى مئاندر در محدود رودخانه كمكان جزو مناطق مهم مستعد سيلاب به شمار مى وند. بر اساس نتايج، در رودخلنههاى مئاندر ماد محدود تود انه كوهان مر در حلى است كه در رودخانهاى مئاندرى مستقر در دشتهاى در سيل خيزى بخش هاى بيرونى يا داخلى مئاندر دارد. اين در حالى است كه در رودنانهاى مئادى مى ملهرى ير مر مى مندى مناي مر مر شرى مى مناي مى مندى مى مندر مى مى مندى مى مى خر مى مى مى مستعر مى مى مى مى

واژگان کلیدی: پهنه سیل گیر؛ سیلاب؛ کشکان؛ مدل HAND.

#### ۱\_ مقدمه

سیلاب به عنوان یکی از رایج ترین و مهمترین مخاطرات طبیعی در سرتاسر جهان شناخته می شود ( , Ashtari et al., 2020; Zhang et al., 2018) در دهههای اخیر، علاوه بر تغییرات اقلیمی و پیامدهای ناشی از آن (مانند بارش های حدی و سیلاب های شدید و ناگهانی)، گستر ش فعالیت های انسانی و افزایش جمعیت نیز منجر به (مانند بارش های حدی و سیلاب های شدید و ناگهانی)، گستر ش فعالیت های انسانی و افزایش جمعیت نیز منجر به تشدید خسارات ناشی از سیل شده است (Asadi & Emami, 2021; Saghafi & RezaeiMoghadam, 2012). بر اساس (Asadi & Emami, 2021; Saghafi & RezaeiMoghadam, 2012). بر اساس (Geravand et al., مین موضوع باعث شده است ( از اراضی کشور در گروه مناطق سیل خیز قرار دارند ( , ... 2021). همین موضوع باعث شده است تا ایران در بین کشورهای پرمخاطره از نظر وقوع سیلاب قرار بگیرد ( این بابت رسال ( اندر ( دار 2013). ایستگاههای هیدرومتری در سطح کشور، ۶۹۷ فقره سیلاب را تا سال ( ۱۳۸۱ به ثبت رساندهاند ( Rigaresh et al., 2013). علاوه بر این، بین سالهای ۱۳۶۱ تا ۱۳۷۱، ۳۰۰ نفر در اثر وقوع سیلاب در کشور جان باختهاند ( Negaresh et al., 2013). همه این موارد بر لزوم توجه به پدیده سیلاب را تا سال مختلف، از جمله موارد مدیریتی و قانون گذاری (خصوصاً در بحث ساختوساز در دشتهای سیلابی)، بررسی نقش مختلف، از جمله موارد مدیریتی و قانون گذاری (خصوصاً در بحث ساختوساز در دشتهای سیلابی)، بررسی نقش ماط طبیعی و انسانی در افزایش و یا کاهش خسارات ناشی از سیل و همچنین تعیین مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مناط طبیعی و روستایی واقع در اطراف این رودخانه کشکان یکی از پُر آب ترین شاخههای رودخانه کرخه به حساب می آید. می شوند ( Mehdinasab, 2019). بنابراین تعیین موقعیت مناطق مهمی در کاهش خسارات متعد می شوند ( اینه مورد در آینده اینا کند.

بررسی و اندازه گیریهای میدانی یکی از بهترین روشها برای تعیین مناطق مستعد سیلاب بهشمار میروند؛ با این حال به دلیل هزینههای فراوان و طولانی بودن فرآیند گردآوری اطلاعات، سازمانها و حتی محققان معمولاً تمایلی برای انجام پروژههای مداوم میدانی نشان نمیدهند. همین موضوع باعث شده است تا استفاده از ابزارهای سنجش از دوری نقش پررنگی در تحقیقات مرتبط با سیلاب ایفا کنند. ابزارها و روشهای متعددی برای بررسی سیلاب و تعیین مناطق سیلزده با اتکا به دادههای سنجش از دوری در دنیا بکار گرفته شده است. از معروف ترین آنها می توان به مدل -HEC معلی در سلسله مراتبی، منطق فازی، ابزارهای مختلف یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی و SVM مدل مداور ماهوارهای راداری و اپتیکال، استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و مدل HAND اشاره کرد.

در میان محققان ایرانی، Yamani و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل HEC-RAS پهنههای سیل گیری در بالادست پل طالقان را تعیین کردند. براساس نتایج بدست آمده، از مجموع مساحت در قلمرو سیل ۲۰۰ ساله، حدود ۸۸/۱۶ درصد مستعد سیل گیری توسط سیلابهایی با دوره باز گشت ۲۵ سال و کمتر است. Hosseini و همکاران ۱۵ (۲۰۱۵) با استفاده از مدل HEC-HMS سیلابهای تاریخی رودخانه کشکان را پیش بینی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل HEC-HMS در شبیهسازی رواناب روزانه طی دوره ترسالی کارایی بالایی دارد. همچنین مشخص شد که مدل مذکور در تعیین حداکثر دبی لحظهای سیلاب به ازای دورههای بازگشت کمتر از ۲۰۰۰ سال، نتایج قابل قبولی ارائه میده. Mohammad Nejhad در شهر پلدختر را مورد بررسی قرار داد و نقشه گسترش سیلاب را برای منطقه مورد مطالعه تهیه کرد. نتایج این تحقیق نشان داد که ۷/۹۹ کیلومتر مربع از محدوده مطالعه شده در اثر سیلابهای سال ۱۳۹۸ به زیر آب رفته است. Yousefi و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدلهای یادگیری ماشین، پتانسیل سیلخیزی در حوضه رودخانه کشکان را مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج این تحقیق، از میان مدلهای بکار گرفته شده، مدل CART دقیق ترین روش در تعیین پتانسیل سیلخیزی در محدوده مورد مطالعه بوده است. مساحت زیر منحنی در روش مذکور ۹۱ درصد محاسبه شد.

در مقیاس بین المللی، محققان متعددی پدیده سیلاب را از جنبه های مختلف و با استفاده از ابزارهای متفاوت مورد بررسی قرار داده اند. Zheng و همکاران (۲۰۱۸) نقشه مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی را برای مناطق پهناور تهیه کردند. برای انجام این کار علاوه بر مدل رقومی ارتفاعی از مدل HAND نیز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که نقشه خروجی از مدل HAND بین ۶۰ تا ۹۰ درصد با نقشه سیلاب ارائه شده توسط FEMA<sup>1</sup> همخوانی دارد. Tamiru و Tamiru با تلفیق مدل HAND و ۲۹۸۵ نقشه میلاب ارائه شده توسط محوانی رودخلنه بارو آکوبو<sup>7</sup> واقع در اتیوپی را تهیه کردند. براساس نتایج، تلفیق این دو هدل منجر به افزایش قلبل توجه در رودخلنه بارو آکوبو<sup>7</sup> واقع در اتیوپی را تهیه کردند. براساس نتایج، تلفیق این دو هدل منجر به افزایش قلبل توجه در پراکندگی فضایی مناطق مستعد سیلاب را در مقیاس ملی برای کشور ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که مناطق مستعد سیلاب دو هد کردند. براساس نتایج، تلفیق این دو مدل منجر به افزایش قلبل توجه در پراکندگی فضایی مناطق مستعد سیلاب در کلاسهای زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۲ درصد و ۳ درصد از مساحت کشور را نشان داد که مناطق مستعد سیلاب در کلاسهای زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۲ درصد و ۳ درصد از مساحت کشور را نشان داد که مناطق مستعد سیلاب در کلاسهای زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۱۲ درصد و ۳ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. همچنین این تحقیق مشخص کرد که ۲۹ درصد از شهرهای کشور دارای استعداد خیلی زیاد سیلاب هستند.

یکی از مهمترین مشکلات و محدودیتهای مدلهای مختلف تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب، نیاز به جمع آوری دادههای میدانی و سنجش از دوری است. مدل HAND تنها با بهره گیری از مدل رقومی ارتفاعی قادر است با دقت بسیار خوبی مناطق مستعد سیلاب را مشخص کند. منطقه مورد مطالعه هر ساله در اثر وقوع سیلاب دچار خسارات مالی و جانی می شود. با توجه به تعدد نقاط شهری و روستایی در اطراف رودخانه کشکان، تعیین پهنههای سیل گیر با روشی سریع و کم هزینه از اهمیت زیادی برخوردار است. تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب علاوه بر ارائه اطلاعات کاربردی برای برنامه ریزان و سازمانهای تصمیم گیرنده، می تواند نقش مهمی در آگاه سازی مردم محلی نسبت به مناطق پر مخاطره و مستعد سیلاب ایفا کند. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق تعیین پهنههای سیل گیر با استفاده از مدل HAND محدوده رودخانه کشکان است.

#### ۲\_منطقة مورد مطالعه

رودخانه کشکان به عنوان یکی از رودخانههای مهم غرب کشور، وظیفه زهکشی بخش عمدهای از مناطق کوهستانی استان لرستان را بر عهده دارد. این رودخانه یکی از پر آبترین شعبههای رودخانه کرخه به حساب میآید. همچنین با ثبت ۱۶ سیلاب با دبی بزرگتر از ۱۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، رودخانه کشکان به عنوان سیلخیزترین رودخانه استان لرستان نیز به شمار میرود (Geravand et al., 2021). در این تحقیق بخشی از رودخانه کشکان از حدود شهرستان

DOI: 10.61186/jeer.14.1.1 ]

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Federal Emergency Management Agency

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Artificial Neural Network

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Baro Akobo

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Convolutional Neural Network

معمولان تا بعد از شهرستان پلدختر مورد بررسی قرار گرفت. بازه مورد مطالعه هرساله در اثر وقوع سیلابهای شدید دچار خسارت مالی و جانی می شود. محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین طولهای "۱۲'۳۰°۴۷ تا "۰۰'۰۰ شرقی و عرضهای "۰۰'۶۰°۳۳ تا "۰۰'۲۴°۳۳ شمالی قرار دارد. به طور کلی بازه مورد مطالعه حدود ۱۰۰ کیلومتر از مسیر رودخانه کشکان را شامل میشود. براساس مدل رقومی ارتفاعی، حداکثر ارتفاع در بازه مورد بررسی ۱۷۵۹ متر و حداقل ارتفاع ۵۳۱ متر است (شکل ۱). علاوه بر سه شهر معمولان، افرینه و پلدختر، ۳۱ روستا در محدوده مورد بررسی Boyseini et al., است (شکل ۱). علاوه بر سه شهر معمولان، افرینه و پلدختر، ۳۱ روستا در محدوده مورد بررسی 2015). براساس طبقهبندی اقلیمی آمبرژه، حوضه آبریز رودخانه کشکان در اقلیم نیمه مرطوب سرد قرار دارد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و موقعیت نیمرخهای عرضی در مسیر رودخانه کشکان

#### ۳\_ مواد و روش

برای تعیین مناطق مستعد سیلاب در محدوده مورد مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از دقت و عنوان داده ورودی استفاده شد. مطالعات نشان دادند که مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از دقت و کارایی کافی برای تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND برخوردار است (Li et al., 2020). همچنین از مدل رقومی ارتفاعی برای تهیه نیمرخهای عرضی استفاده شد. به منظور صحتسنجی نتایج مدل HAND، از تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ مربوط به سیلاب فروردین ماه ۱۳۹۸ استفاده شد. به طور کلی ابزارهای استفاده شده در این تحقیق شامل نرمافزار QGIS به منظور پردازش مدل رقومی ارتفاعی و تهیه مدل HAND، نرمافزارهای استفاده شده در این تحقیق تهیه نیمرخهای عرضی (شکل ۱)، نرمافزار SNAP<sup>1</sup> به منظور پیش پردازش و پردازش تصاویر راداری و نرمافزار متلب برای اعمال روش آستانه گذاری OTSU، میشود. در مجموع، پس از تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND و همچنین نقشه مناطق سیلزده با تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱، که منعکس کننده نحوه گسترش سیلاب در شرایط واقعی است، دلیل سیل گیری پهنههای مختلف رودخانه کشکان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مدل HAND اولین بار توسط Rennó و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شد. این مدل با بهره گیری از مدل رقومی ارتفاعی، ارتفاع هر نقطه از سطح زمین که بالاتر از سلول مربوط به نزدیک ترین آبراهه است را تعیین می کند (شکل ۲). با توجه به توانایی این مدل، محققان از مدل HAND برای تعیین پتانسیل آب در خاک (Nobre et al., 2011)، پتانسیل سنجی آبهای زیرزمینی (Rahmati et al., 2018) و تعیین مناطق مستعد سیلاب (Nobre et al., 2016) استفاده کردهاند.



شکل ۲: نحوه عملکرد مدل HAND در تعیین مناطق مستعد سیلاب (برگرفته شده از Rebolho و همکاران (۲۰۱۸))

در مدل HAND، فاصله عمودی بین یک سلول در داده توپو گرافی (در مورد این تحقیق مدل رقومی ارتفاعی) و نزدیکترین سلول در مسیر نزدیکترین آبراهه به عنوان مقدار HAND در نظر گرفته می شود ( ;2018, Afshari et al., 2018 (سلول در مسیر نزدیکترین آبراهه به عنوان مقدار HAND در نظر گرفته می شود ( ;2018, به عنوان پهنه) (Li et al., 2020 میلول در نهایت تمامی سلول هایی که مقادیر کوچکتری از حد آستانه (سطح آب) دارند به عنوان پهنه سیل گیر شناخته می شوند. از آنجایی که مدل HAND روشی تصویر محور<sup>۲</sup> است، برخلاف روش های دیگر مانند روش HEC-RAS، به تهیه مقاطع عرضی برای تعیین پهنه های سیل گیر نیازی ندارد. شکل ۳ نمودار مراحل تهیه نقشه مناطق مستعد سیلاب مبتنی بر مدل HAND در این تحقیق را نمایش می دهد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Sentinel Application Platform

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Raster



شکل ۳: نمودار مراحل تهیه نقشه مناطق سیلاب مبتنی بر مدل HAND و مراحل تهیه نقشه صحتسنجی

#### ۲-۳\_ صحت سنجی نقشه مناطق مستعد سیلاب

محققان برای صحتسنجی نقشههای مناطق سیلزده از تصاویر راداری و شاخصهای مبتنی بر تصاویر اپتیکال مانند شاخص NDWI استفاده می کنند. با این حال تصاویر راداری با توجه به مزایایی همچون قابلیت تصویر برداری شبانه روزی، قابلیت عبور از ابر، عدم تأثیر پذیری از شرایط بد جوی و موارد دیگر، بیشتر از تصاویر اپتیکال مورد استفاده محققان قرار می گیرند. در این تحقیق به منظور صحت سنجی نقشه مناطق مستعد سیلاب مبتنی بر مدل HAND، از تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ استفاده شد. بنابراین پس از بر گرفتن تصاویر راداری مربوط به روزهای پنجم، یازدهم و سیزدهم فروردین ۱۳۹۸ از پایگاه Copernicus Open Access Hub، مراحل پیش پردازش و اعمال آستانه گذاری با روش OTSU بر روی تصاویر صورت گرفت. درنهایت نقشه مناطق سیلزده به منظور مقایسه و صحت سنجی مدل HAND تهیه شد.

#### ۴\_یافتهها

براساس نتایج مدل HAND (جدول ۱)، ۵۴/۴۹ کیلومتر مربع از محدوده مورد مطالعه در طبقه بسیار پرمخاطره، به لحاظ سیل گیری (یا غرقشدگی')، قرار دارد. همچنین ۳۱/۷۸ کیلومتر مربع از اراضی اطراف رودخانه کشکان در طبقه پرمخاطره قرار گرفتهاند. مناطق کممخاطره و دارای خطر متوسط به ترتیب ۲۶/۴۵ و ۲۷/۰۵ کیلومتر مربع از مساحت منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص دادهاند. در مجموع و با توجه به نتایج مدل HAND، ۳۰/۱۳ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه، با درجات مختلف، متأثر از وقوع سیلاب خواهد شد و ۶۰/۸۷ درصد از مساحت منطقه، از خطر

<sup>1</sup> Inundation

غرق شدگی در امان خواهد بود. باید توجه داشت عدد ۶۰/۸۷ درصد بیانگر مناطقی است که مقادیر آنها فراتر از حد آستانه در طبقهبندی مناطق مستعد سیلاب بوده است. به عبارتی در زمان وقوع سیلاب، این مناطق دچار غرق دگی نخواهند شد. همچنین باید توجه داشت که بخش قابل توجهی از مساحت مذکور شامل مناطق مرتفع و پرشیب می شود. جدول ۱: مساحت طبقات مستعد سیلاب در مدل HAND

تعداد پيكسل	درصد مساحت	مساحت (كيلومتر مربع)	طبقه
84448	10/1.	۵۴/۴۹	بسيار پرمخاطرہ
****	٨/٩٢	<b>m</b> 1/vA	پرمخاطرہ
37118	٧/۵٩	۲V/ · ۵	خطر متوسط
21411	V/FY	25/22	كممخاطره
مجموع مساحت منطقه مورد مطالعه: ۳۵۶/۲۴ کیلومتر مربع	W9/1W	121/11	مجموع

نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND (شکل ۴) نشان میدهد که بخش مهمی از اراضی مجاور رودخانه کشکان در طبقه بسیار پرمخاطره و پرمخاطره قرار دارند. همچنین شکل ۴ حاکی از آن است که تقریباً تمام نقاط شهری و روستایی در محدوده مورد مطالعه در طبقات بسیار پرمخاطره و پرمخاطره قرار دارند. با توجه به شکل ۴، در محل مئاندرها، معمولاً سواحل داخلی (محدب) مساحت بیشتری از طبقات بسیار پرمخاطره و پرمخاطره را در مقایسه با ساحل بیرونی (مقعر) به خود اختصاص میدهد. این در حالی است که در رودخانههای مئلندری، به دلیل وجود جریان پرسرعت و قدرتمند در ساحل بیرونی، در مقایسه با ساحل داخلی، سواحل بیرونی بیشتر مستعد سیلاب و غرقشد گی هستند (Willetts & Hardwick, 1993). بر این اساس، دو نیمرخ عرضی در محل مئاندرهایی با مناطق بسیار پرمخاطره در ساحل بیرونی و همچنین دو نیمرخ عرضی در محل مئاندرهایی با مناطق بسیار پرمخاطره در ساحل داخلی تهیه شد تا



شکل ۴: الف) مناطق مستعد سیلاب بر اساس مدل HAND، ب) نمای بزرگ شده از مناطق مستعد سیلاب در محدوده شهر پلدختر و اراضی اطراف آن

مقایسه شکل ۵الف و ۵ب نشان میدهد که مدل HAND، به درستی مناطق بسیار پرمخاطره و پرمخاطره را شناسایی کرده است؛ به طوری که مناطق سیلزده در سیلاب سال ۱۳۹۸، در نقشه مدل HAND نیز در کلاسهای بسیار پرمخاطره و پرمخاطره قرار دارند. همچنین شکل ۵ب حاکی از آن است که در سیلاب سال ۱۳۹۸ بخش بیرونی مئاندر (در محل نیمرخ عرضی) و قسمتی از ساحل داخلی آن دچار سیل شدهاند. نتایج مدل HAND نیز مناطق مذکور را جزو طبقه بسیار پرمخاطره قرار داده است. بنابراین نتایج مدل با نتایج تصاویر راداری که منعکس کننده شرایط واقعی است هماهنگی دارند.

نیمرخ عرضی شماره یک (شکل ۵ج) نحوه گسترش جریان سیلاب در فروردین ماه سال ۱۳۹۸، و همچنین محدوده و حد انتهایی طبقات مناطق مستعد سیلاب در مدل HAND را نمایش می دهد. با توجه به شکل ۵ج، حد انتهایی طبقه بسیار پرمخاطره (در هر دو بخش داخلی و بیرونی مئاندر) بالاتر از حد گسترش سیلاب سال ۱۳۹۸ قرار دارد. بنابراین در صورت بروز سیلابهای قدرتمند احتمالی، محدوده مشخص شده به عنوان منطقه بسیار پرمخاطره، جزو مناطق سیل زده قرار خواهند داشت. همچنین شکل ۵ج بیانگر رابطه توپو گرافی و نحوه گسترش سیلاب در محل مئاندرها است. توپو گرافی و شیب ملایم در ساحل داخلی باعث شده است تا جریان سیلابی به راحتی در این بخش گسترش یابد. این توپو گرافی و شیب ملایم در ساحل داخلی باعث شده است تا جریان سیلابی به راحتی در این بخش گسترش یابد. این توپو گرافی و تیب ملایم در ساحل داخلی باعث شده است تا جریان سیلابی به راحتی در این بخش گسترش یابد. این توپو گرافی و شیب ملایم در ساحل داخلی باعث شده است تا جریان سیلابی به راحتی در این بخش گسترش یابد. این توپو گرافی و شیب ملایم در ساحل داخلی باعث شده است تا جریان سیلابی به راحتی در این بخش گسترش یابد. این توپو گرافی تند اولیه نشوند و بنابراین مساحت کمتری در بخش بیرونی دچار غرق شدگی می شود. با این حال چنانچه ارتفاع جریان سیلابی از دامنه تند قسمت بیرونی عبور که در شکل ۵ج نمایش داده شده است)، بخش گستردهای از قسمت بیرونی مئاندر دچار غرق شدگی خواهد شد. در مرحله بعد، شیب بسیار تند در محدوده بین منطقه بسیار پرمخاطره و پرمخاطره در قسمت داخلی، باعث شده است تا مساحت بسیار کمی از این بخش در طبقه پرمخاطره



قرار بگیرد. این در حالی است که شیب ملایمتر در ساحل بیرونی باعث میشود که مساحت بیشتری از بخش بیرونی مئاندر در طبقه پرمخاطره قرار داشته باشد.

شکل ۱: الف) نمای بزرگ شده نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND، ب) نمای بزرگ شده مناطق سیل زده با استفاده از تصاویر راداری، ج)

## نيمرخ عرضي شماره يک

در شکل ۶ بخش بیرونی مئاندر در سیلاب سال ۱۳۹۸ جزو مناطق سیل زده قرار داشته است، درحالی که در بخش داخلی مئاندر، مناطق سیل زده دیده نمی شوند. مدل HAND نیز نتایج مشابهی را ارائه داده است، به طوری که بخش بیرونی مئاندر محدوده بزرگتری از طبقه بسیار پر مخاطره را در مقایسه با بخش داخلی، به خود اختصاص داده است. تجزیه و تحلیل نیمرخ شماره دو (شکل ۶ج) حاکی از آن است که در سیلاب سال ۱۳۹۸، بخش قابل توجهی از ساحل بیرونی مئاندر جزو مناطق سیل زده بوده است؛ در حالی که در بخش داخلی، مناطق سیل زده یا وجود نداشته اند یا بسیار ناچیز بودهاند. همچنین شکل ۶ج نشان می دهد که ارتفاع جریان در محل نیمرخ شماره دو، در سیلاب سال ۱۳۹۸، محدود متر بالاتر از بستر رودخانه بوده است؛ در حالی که در بخش داخلی، مناطق سیل زده یا وجود نداشته اند یا بسیار محر بالاتر از بستر رودخانه بوده است. همین موضوع باعث شده است تا جریان سیلابی از شیب اولیه در ساحل بیرونی عبور کند و محدوده بیرونی مئاندر را دچار غرق شده گی کند. طبق نتایج مدل HAND، در محل نیمرخ شماره دو، محدوده بسیار پرمخاطره در سمت بیرونی مئاندر، مساحت بسیار بیشتری در مقایسه با بخش داخلی را به خود اختصاص داده است. همچنین محدوده طبقه پرمخاطره در بخش بیرونی بیشتری از بخش داخلی است. این موضوع در ار تباط



محدودیت توپو گرافیکی در بخشهای داخلی و بیرونی مئاندر میباشد. به طور کلی شکل ۶ نشاندهنده همخوانی نتایج مدل HAND با شرایط واقعی است.

## نيمرخ عرضي شماره دو

شکل ۷ نشاندهنده مناطق مستعد سیلاب در بخش داخلی مئاندر در مقایسه با بخش بیرونی آن است. همانطور که پیش تر اشاره شد، در رودخانههای مئاندری، بخشهای بیرونی به دلیل وجود جریان قدرتمند و پرسرعت، بیشتر از بخش داخلی مستعد سیلزدگی یا غرقشدگی هستند. با این حال بر اساس نتایج مدل HAND و همچنین نقشه مناطق سیلزده با تصاویر راداری، در محل مئاندر شماره سه، بخش داخلی مئاندر دچار سیل شده و در مدل HAND نیز در طبقه بسیار پرمخاطره و پرمخاطره قرار دارد. باید توجه داشت که قسمت غربی مئاندر در شکل ۷ب جزو مناطق سیلزده شناخته شده است. در نتایج مدل HAND (شکل ۷الف) نیز این مناطق در طبقه بسیار پرمخاطره قرار دارند. بررسی نیمرخ شماره سه حاکی از آن است که محدوده گستردهای از بخش داخلی مئاندر (شکل ۷ج) در محدوده بسیار پرمخاطره قرار دارد. با این حال، در محل این مئاندر، بخش مهمی از محدوده پرمخاطره در ساحل هر برمخاطره قرار دارند. بررسی نیمرخ شماره و تا حدود مرز انتهایی این طبقه گسترش یافته است. این در حالی است که در ساحل در ساحل برونی، جریان سیلابی کمی با این حال، در محل این مئاندر، بخش مهمی از محدوده پرمخاطره در ساحل داخلی، تحت تأثیر سیلاب به زیر آب رفته و تا حدود مرز انتهایی این طبقه گسترش یافته است. این در حالی است که در ساحل بیرونی، جریان سیلابی کمی با این حال، در محل این مئاندر، بخش مهمی از محدوده پرمخاطره در ساحل داخلی، تحت تأثیر سیلاب به زیر آب رفته

شکل ۶: الف) نمای بزرگ شده نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND، ب) نمای بزرگ شده مناطق سیل زده با استفاده از تصاویر راداری، ج)

پژوهشهای فرسایش محیطی

شده است). بنابراین به دلیل عدم وجود محدودیت توپو گرافیکی در بخش داخلی و از طرفی محدودیت در بخش بیرونی، جریان سیلابی در قسمت داخلی مئاندر گسترش یافته و در نتیجه از ارتفاع جریان کاسته است. به همین دلیل جریان قادر نبوده است تا حد انتهایی طبقه پرمخاطره در ساحل بیرونی گسترش یابد. محدودیت توپو گرافیکی بخش بیرونی مئاندر در نیمرخ شماره سه مشهود است.



شکل ۷: الف) نمای بزرگ شده نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND، ب) نمای بزرگ شده مناطق سیل زده با استفاده از تصاویر راداری، ج)

نيمرخ عرضي شماره سه

متأسفانه در جریان سیلاب فروردین سال ۱۳۹۸ در رودخانه کشکان، شهرستان پلدختر دچار خسارات سهمگین شد. شکل ۸ب نشاندهنده بخشی از مناطق سیلزده در اطراف رودخانه کشکان در حوالی شهرستان پلدختر است. برخلاف مدل HAND که به خوبی توانسته است مناطق بسیار پرمخاطره در محدوده شهر پلدختر را تعیین کند، نقشه مناطق سیلزده که توسط تصاویر راداری تهیه شده است قادر به تعیین مناطق سیلزده در بخش شهری نبوده است. این موضوع می تواند ناشی از عوامل مختلف از جمله زمان تصویربرداری، بازپراکنش تصاویر راداری در مناطق شهری و... باشد. با توجه به شکل ۸لف، تقریباً تمام محدوده شهر پلدختر در طبقه بسیار پرمخاطره قرار دارد. نیمرخ شماره چهار نشان می دهد که بخش داخلی مئاندر، که به لحاظ تو پوگرافی تقریباً هموار است، در طبقه بسیار پرمخاطره قرار دارد. این در



حالی است که در ساحل بیرونی، به دلیل وجود توپو گرافی پرشیب، محدودههای بسیار پرمخاطره و پرمخاطره مساحت ناچیزی را به خود اختصاص دادهاند.

شکل ۲: الف) نمای بزرگ شده نقشه مناطق مستعد سیلاب با مدل HAND، ب) نمای بزرگ شده مناطق سیل زده با استفاده از تصاویر راداری، ج)

نیمرخ عرضی شمارہ چھار

## ۵\_ بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق از مدل HAND به منظور تعیین مناطق مستعد سیلاب در محدوده رودخانه کشکان استفاده شد. همچنین از تصاویر راداری ماهواره سنتینل-۱ برای صحتسنجی نتایج مدل HAND استفاده شد. نتایج نشان داد که تقریباً تمام مناطق شهری و روستایی در اطراف رودخانه کشکان در طبقات بسیار پرمخاطره و پرمخاطره قرار دارند. همچنین مشخص شد که حدود ۳۹ درصد از اراضی اطراف رودخانه کشکان با درجات مختلف تحت تأثیر سیلاب قرار خواهند گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که نقشه مناطق مستعد سیلاب تهیه شده با مدل HAND همخوانی بسیار خوبی با نقشههای مناطق سیل زده مستخرج از پردازش تصاویر راداری دارد. این موضوع حاکی از دقت این مدل در تعیین پهنههای مستعد سیلاب است. تجزیه و تحلیل نیمرخهای عرضی در محل مئاندرها نشان داد که توپو گرافی عامل تعیین کننده در سیل خیزی بخشهای بیرونی یا داخلی رودخانههای مئاندری در مناطق کوهستانی میباشد. این موضوع با نتایج Ghahraman دشت سیلابی بدون محدودیت توپو گرافیکی جریان داشته باشد، بخش بیرونی مئاندر به دلیل وجود جریان قدرتمند و پرسرعت در این قسمت، نسبت به بخش داخلی بیشتر مستعد سیلاب است. با این حال نتایج این تحقیق نشان داد که در مناطق کوهستانی، مناطق مستعد سیلاب در محل مئاندرها تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر محدودیت یا عدم محدودیت توپو گرافیکی در اطراف مئلندر است. به طوری که چنانچه بخش بیرونی دارای محدودیت و بخش داخلی دارای عدم محدودیت توپو گرافیکی باشند، بخش داخلی بیشتر از بخش بیرونی مستعد سیل خواهد بود.

به طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل HAND به عنوان یک ابزار ساده، از دقت بسیار بالایی در تعیین مناطق مستعد سیلاب برخوردار است. این موضوع با نتایج تحقیقات متعددی همچون Zhang و همکاران (۲۰۱۸)، Afshari و همکاران (۲۰۱۸)، Hu و Tomi (۲۰۲۱) همخوانی دارد.

منابع

- Afshari, S., Tavakoly, A. A., Rajib, M. A., Zheng, X., Follum, M. L., Omranian, E., & Fekete, B. M. (2018). Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. Journal of Hydrology, 556, 539-556. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.036
- Ashtari, N., Goorabi, A., Rahmati, M., & Darban Astaneh, A. (2022). Evaluation of Flood Hazard Potential and Investigation of Damage Caused by it in Talar Drainage Watershed. Environmental Erosion Research, 12(4), 1-25. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-708-en.html (in Persian)
- 3. Dastoorani, M., Hayatzadeh, M., Fathzadeh, A., & Hakimzadeh, M. (2014). Review the Efficiency of Empirical Relations on Estimating the Peak Flow Rate of Flood in Arid Areas of Central Iran. Geography and Development, 12(36), 145-160. https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1715 (in Persian)
- Ezzine, A., Saidi, S., Hermassi, T., Kammessi, I., Darragi, F., & Rajhi, H. (2020). Flood mapping using hydraulic modeling and Sentinel-1 image: Case study of Medjerda Basin, northern Tunisia. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 23(3), 303-310. https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.03.001
- Geravand, F., Mohamadkhan, S., Hosseini, S. M., & Pirani, P. (2021). Evaluating of Land Use Changes on Hydrological Characteristics of Basins and River Flood Plains (Case Study: Kashkan Basin in Lorestan Province). Iranian Water Research Journal, 15(2), 87-98. https://iwrj.sku.ac.ir/article\_10770.html?lang=en (in Persian)
- Ghahraman, K., & Zanganeh Asadi, M. (2022). Determination of flood-prone areas using Sentinel-1 Radar images (Case study: Flood on March 2019, Kashkan River, Lorestan Province) [Applicable]. Journal title, 9(3), 103-118. http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3276en.html (in Persian)
- Hosseini, Jafarbeiglu, M., Yamani, M., & Geravan, F. (2015). Prediction of historical floods of Kashkan river using HEC-HMS hydrological model. Quantitative Geomorphology Research, 4(1), 118-133. https://dorl.net/dor/20.1001.1.22519424.1394.4.1.9.2 (in Persian)
- Hosseini, S., JafarBeiglu, M., & Geravand, F. (2015). Modeling of Hydraulic Behavior of Kashkan River and Determination of Floodplain Limits Using HEC-Geo-RAS. Environmental Hazards Management, 2(3), 355-369. https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.58102 (in Persian)
- 9. Hu, A., & Demir, I. (2021). Real-time flood mapping on client-side web systems using hand model. Hydrology, 8(2), 65. https://doi.org/10.3390/hydrology8020065

- Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S. D., Saco, P. M., Bui, D. T., & Lee, S. (2020). Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. Journal of Hydrology, 591, 125552. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125552
- 11. Li, Z., Mount, J., & Demir, I. (2020). Evaluation of model parameters of HAND model for real-time flood inundation mapping: Iowa case study. Hydrological Science Journal. EarthArXiv. July, 1. https://doi.org/10.31223/osf.io/hqpzg
- 12. Mehdinasab, M. (2019). Analysis of the flooding events on Kashkan river in March 2019. Environment and Interdisciplinary Development, 5(67), 17-30. https://doi.org/10.22034/envj.2020.181143 (in Persian)
- 13. Mohamad Nejhad, V. (2021). Flood extent area mapping using sentinel 1 SAR image (a case study: the flood of Poledokhtar, march 1398). Geographical Planning of Space, 11(41), 69-80. https://doi.org/10.30488/gps.2020.226387.3224 (in Persian)
- Negaresh, H., Azhdareimogadam, M., & Aramesh, M. (2013). The Usage of Artificial Neural Network in Simulation and Prediction of Flood at Sarbaz Drainage Basin. Geography and Development, 11(31), 15-28. https://doi.org/10.22111/gdij.2013.791 (in Persian)
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage–a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology, 404(1-2), 13-29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., & Nobre, C. A. (2016). HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. Hydrological Processes, 30(2), 320-333. https://doi.org/10.1002/hyp.1058
- 17. Rahmati, O., Kornejady, A., Samadi, M., Nobre, A. D., & Melesse, A. M. (2018). Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. Environmental modelling & software, 102, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.01.004
- Rebolho, C., Andréassian, V., & Le Moine, N. (2018). Inundation mapping based on reach-scale effective geometry. Hydrology and Earth System Sciences, 22(11), 5967-5985. https://doi.org/10.5194/hess-22-5967-2018
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., & Tomasella, J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, 112(9), 3469-3481. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018
- 20. Saghafi, M., & RezaeiMoghadam, M. H. (2012). Evaluation of geomorphology method application for flood Hazards risk classification using Fuzzy Logic (Case study: Ojan Chay drainage basin) [Research]. Environmental Erosion Research, 2(1), 13-28. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-84-en.html (in Persian)
- Tamiru, H., & Dinka, M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. Journal of Hydrology: Regional Studies, 36, 100855. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100855
- 22. Willetts, B., & Hardwick, R. (1993). Stage dependency for overbank flow in meandering channels. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 101(1), 45-54.
- Yamani, M., Toorani, M., & Chezghe, S. (2012). Determination of the Flooding Zones by using HEC-RAS Model (Case Study: Upstream the Taleghan Dam). Journal of Geography and Environmental Hazards, 1(1), 1-16. https://doi.org/https://doi.org/10.22067/geo.v1i1.16519 (in Persian)

- 24. Yousefi, H., Yonesi, H. a., Davoudimoghadam, D., Arshia, A., & Shamsi, Z. (2022). Determination of Flood potential Using CART, GLM and GAM Machine learning Models. Irrigation and Water Engineering, 12(4), 84-105. https://doi.org/https://doi.org/10.22125/iwe.2022.150684 (in Persian)
- 25. Zhang, J., Huang, Y. F., Munasinghe, D., Fang, Z., Tsang, Y. P., & Cohen, S. (2018). Comparative analysis of inundation mapping approaches for the 2016 flood in the Brazos River, Texas. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 54(4), 820-833. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1752-1688.12623
- 26. Zheng, X., Maidment, D. R., Tarboton, D. G., Liu, Y. Y., & Passalacqua, P. (2018). GeoFlood: Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis. Water Resources Research, 54(12), 10,013-010,033. https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018WR023457