

# Performance Evaluation of Topographical-based HAND Model in Flood Inundation Mapping

Amirhossein Akhavan<sup>1</sup>, Asghar Azizian<sup>2\*</sup>, David Tarboton<sup>3</sup>

1- Graduate of Water Structures Engineering, Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

2- Faculty member of Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin.

3- Professor and Director of the Water Research Institute, University of Utah, USA.

\* [azizian@eng.ikiu.ac.ir](mailto:azizian@eng.ikiu.ac.ir)

Received: 3 May 2021, Accepted: 8 July 2021  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Flood is a natural disaster that threatens the lives of millions of people yearly. Obtaining the flood zone and consequently obtaining the flood zone maps with a specific return period for a reach is one of the important issues. Therefore, estimation of flood maps is required for accurate river engineering studies, flood control projects and planning to reduce the economic and social flood damages. In most parts of the world, hydraulic models are the best ones for flood inundation mapping. However, due to the lack of data and numerical problems, it is not possible to use them for hydraulic simulations. Different of these models, topographically based models such as HAND due to their simple structure and minimum data requirements are the best choice for data sparse regions. Hence, evaluating the performance of the HAND model, which relies solely on topographic features, is one of the objectives of the present project.

**Methodology:** In this study, the flood maps are determined using the HAND model with a calibration based on satellite observations. Seimareh river is selected as a case study to challenge the performance of the model in relation to the observational data and HEC-RAS hydraulic model. In addition, the efficiency of HAND model in low and high flows compared with a 1D and 2D hydraulic model to evaluate the performance of the model in different flow conditions.

**Results and Discussion:** The most important results can be summarized as follows:

- The results obtained from the HAND model indicate that this model has the high potential for flood inundation mapping in Seimareh river. The similarity percentages of the estimated and observed flood extents are higher than 92%. Also, the average relative error (ARE) between HAND model and observed flood extents through the study reach is 8.5%.
- The results in Seimareh river show that changing the discharge value does not change the performance of HAND model and the model has a good capability compared to HEC-RAS model. Based on the findings, the similarity percentage of estimated (based on HEC-RAS) and observed flood extents is limited to 83%. The ARE value of HEC-RAS model in simulation of flood extents is 13%.
- Despite the excellent performance of the HAND model in estimating the flood maps,

in some parts of the study reach there are differences between the HAND model, satellite images, and the hydraulic model. The main reason of this discrepancy can be related to the extraction and using only one rating-curve for Seimareh river. Therefore, dividing the river into different segments, which contain similar roughness coefficient and river geometry, can significantly increase the performance of the model.

- Hydraulic model compared to HAND has more error in estimating flood extents. The main reason for this can be related to important factors such as distance between cross sections, computational dimensions, numerical parameters used in the 1D and 2D hydraulic models (such as  $\theta$  parameter and currant number), boundary conditions, computational time step and Manning roughness coefficient for each cross section. In general, more factors affect the performance of the hydraulic models and affect theirs outputs, while the HAND model experiences relatively better conditions in this regard.

#### Conclusion:

Flood inundation mapping (FIM) is one the key parts of river engineering and flood control studies. Therefore, using a reliable and robust method for calculation of FIM is paramount of importance. In this research, the applicability of a topographic-based method (HAND model) is investigated in Seimareh River. In addition, the performance of is compared with HEC-RAS model and observed flood extents. Findings clearly showed that the HAND model, in spite of having simple structure, performed better than HEC-RAS and estimated the FIM as well as observed flood maps. This model can be used in data sparse regions or large scale reaches in which setting up or running hydrodynamic models is a daunting and time consuming task. Finally, coupling HAND approach with flood warning models can be used as an applicable system for flood emergency management and flood control studies.

**Keywords:** Flood Zone, Rating Curve, HAND Model, Flood Prediction, Digital Elevation Models, Hydraulic Model.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

[\(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/\)](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

# ارزیابی دقت مدل مبتنی بر توپوگرافی HAND در برآورد پهنه‌های سیل گیر رودخانه

امیرحسین اخوان<sup>1</sup>، اصغر عزیزیان<sup>2\*</sup>، دیوید تاروتون<sup>3</sup>

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

2- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

3- استاد و مدیر موسسه تحقیقات آب دانشگاه یوتا، آمریکا.

\* [azizian@eng.ikiu.ac.ir](mailto:azizian@eng.ikiu.ac.ir)

دریافت: 1400/02/13، پذیرش: 1400/04/17، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

**چکیده:** از آنجاییکه تعیین پهنه‌های سیلابی رودخانه دارای اهمیت بالایی به ویژه در مطالعات مهندسی رودخانه، هشدار سیل و مدیریت سیلاب است، در پژوهش حاضر به ارزیابی کارایی مدل متکی بر توپوگرافی HAND و مدل هیدرولیکی HEC-RAS در برآورد پهنه‌های سیلاب رودخانه سیمره، پرداخته شده است. همچنین برای به چالش کشیدن عملکرد دو مدل یاد شده از عکس‌های ماهواره‌ای Sentinel-2 برای سیلاب مورخه 2019/4/1 رودخانه سیمره استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل واسنجی شده HAND در رودخانه سیمره، نشان از عملکرد مناسب مدل مذکور در به دست آوردن پهنه سیلاب است. بنابر نتایج به دست آمده از مدل HAND، میزان انطباق پهنه سیلاب در مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای بالاتر از 92 درصد و این در حالی است که در صورت استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS این میزان به حدود 83 درصد محدود می‌شود. همچنین متوسط اختلاف برآورد پهنه‌های سیلاب در طول بازه مورد بررسی بر اساس دو مدل HAND و HEC-RAS به ترتیب در حدود 8/5 و 13 درصد بدست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مدل HAND به‌رغم ساختار نسبتاً ساده و شمار کم پارامترهای ورودی از عملکرد به مراتب بهتری نسبت به مدل هیدرولیکی برخوردار می‌باشد و لذا از آن می‌توان برای استخراج پهنه‌های سیلگیر رودخانه در کمترین زمان ممکن بهره برد. این مسئله در رودخانه‌های بزرگ و عریض که مدل هیدرولیکی نیازمند زمان محاسباتی قابل توجهی است، نمود بیشتری دارد. همچنین در سامانه‌های هشدار سیل که امکان اجرای مدل‌های هیدرولیکی به صورت آنلاین با چالش‌های زیادی روبه‌رو است از مدل HAND برای این منظور استفاده کرد.

**کلید واژگان:** پهنه سیلاب، منحنی دبی-اشل، مدل HAND، پیش‌بینی سیلاب، تصویرهای ماهواره‌ای، مدل هیدرولیکی

## 1- مقدمه

HEC-RAS<sup>1</sup> از مدل‌های مورد استفاده در ایران است که برای به دست آوردن پهنه سیلاب استفاده می‌شود. یکی از کارهایی که می‌توان برای کاهش خسارات وارده از سیل انجام داد، پیش‌بینی و همچنین شناسایی محدوده‌های مستعد سیلابی شدن می‌باشد. زمانی که تلاش برای شناسایی بازه‌های سیل‌گیر صورت گیرد، می‌توان به دنبال راهکارهایی برای مهار سیل نیز بود. این مسئله دارای اهمیت زیادی است که پیش از رخداد سیل مناطق پرخطر شناسایی شود و اقدام‌های لازم برای کنترل سیل در آن ناحیه‌ها انجام شود تا از خسارات وارده جلوگیری به

سیل یکی از بلاها و رویدادهای طبیعی است که سالانه جان میلیون‌ها انسان را به خطر می‌اندازد. کشور ایران نیز از این بلا در امان نبوده و سالانه خسارات مالی و جانی زیادی را توسط سیل متحمل می‌شود. به دست آوردن پهنه سیلاب و در پی آن به دست آوردن نقشه پهنه سیلاب برای دبی با یک دوره بازگشت مشخص برای یک حوضه مورد نظر، از نتایج مهم حاصل از مدل‌های مختلف می‌باشد. هم‌اکنون مدل‌های هیدرولیکی مانند مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی با استفاده از نرم افزار

عمل آید. بنابراین استخراج پهنه سیلاب یکی از نیازهای بنیادین در طراحی سازه‌های آبی، مدیریت و برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات اقتصادی و اجتماعی سیل، کاربرد برای تعیین میزان بیمه تعلق یافته منطقه‌های مسکونی موجود در حاشیه رودخانه و همچنین شناسایی مناطق پرخطر رودخانه‌ها از نظر وضعیت سیل‌گیری و اقدام‌های کنترل سیلاب می‌باشد. بدین منظور در بحث‌های پهنه‌بندی سیلاب، شبیه‌سازی مناسب تراز سطح آب و پهنه سیلاب دارای اهمیت بسیار زیادی به ویژه در برآورد میزان خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب می‌باشد (Azizian, 2019). مدل‌های هیدرولیکی همواره دارای محدودیت‌هایی از جمله اعتبارسنجی شاخص‌های مختلف، حل معادله‌های هیدرولیکی، در دسترس نبودن داده‌های توپوگرافیکی زمینی در حوضه‌های بدون آمار و هزینه بر بودن و وقت‌گیر بودن آن در شرایط خطر سیلاب می‌باشد. بنابراین در کشورهای در حال توسعه از جمله ایران، تحقیقات صورت گرفته برای منطقه‌های بدون داده‌های ضروری بسیار کم بوده و سرمایه‌گذاری قابل توجهی برای دسترسی به این داده‌ها صورت نمی‌گیرد. در صورتی که ایران جزو کشورهای سیل‌خیز می‌باشد که سالانه می‌تواند در مدت زمان کمی خسارات جبران‌ناپذیری را متحمل سازد. بدین ترتیب باید به فکر یک روش جایگزین برای مدل‌های هیدرولیکی بود. در سال‌های اخیر در کشورهای توسعه یافته همچون آمریکا راه‌های مختلفی برای پیش‌بینی و شناسایی مناطق سیل‌گیر حاشیه رودخانه پیشنهاد شده است که مدل HAND<sup>1</sup> یکی از مدل‌هایی است که بدین منظور استفاده می‌شود که دارای دقت و سرعت بالایی در برآورد پهنه سیلاب می‌باشد. مدل HAND می‌تواند برای استخراج نقشه مخاطرات سیل در مناطق با اطلاعات ضعیف استفاده شود. در مدل‌های هیدرولیکی، بیشتر ابزارهایی استفاده می‌شوند که از معادله‌های ساده شده مانند سنت و نانت برای توصیف تداوم حرکت آب استفاده می‌کنند. با این وجود تنها برای بخش کوچکی از محدوده‌های مستعد سیلابی شدن در سطح جهان نقشه‌های خطر سیل با وضوح بالا با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی موجود هستند (Nobre et al., 2015). بدین منظور در این پژوهش به ارزیابی کارایی مدل HAND که مدلی متکی بر ویژگی‌های

توپوگرافیکی رودخانه می‌باشد، پرداخته شده است. مدل HAND وضعیت توپوگرافی زمین را بر مبنای ارتفاع نسبی هر کدام از سلول‌های DEM<sup>2</sup> نسبت به نزدیک‌ترین شبکه آبراهه نرمال‌سازی می‌کند. فلسفه اصلی این مدل، به دست آوردن منحنی دبی-اشل برای هر بازه می‌باشد که در مواد و روش‌ها به تفصیل بدان پرداخته خواهد شد. مدل یاد شده برای کشورهای در حال توسعه مانند ایران که داده‌های کمی در اختیار است و اجرا کردن مدل‌های هیدرولیکی به راحتی میسر نمی‌باشد، می‌تواند سودمند باشد. از علل انتخاب مدل HAND و مزیت‌های آن برای شناسایی محدوده‌های مستعد سیلابی شدن، می‌توان به مقرون به صرفه بودن به ویژه برای کشورهای در حال توسعه همچون ایران، متکی بودن تنها به یک داده ورودی یعنی نقشه‌های توپوگرافی، تبدیل یک حوضه بزرگ به زیرحوضه‌های کوچک برای پهنه‌بندی سیلاب، عدم نیاز به داده‌های پرشمار برای واسنجی، مدت زمان سریع اجرای مدل برای تعیین پهنه سیلاب به ویژه در مقیاس‌های بزرگ، در نظر گرفتن یک ضریب زبری مانینگ در طول بازه مورد بررسی و به طور کلی کاهش مشکلات ناشی از مدل‌سازی هیدرولیکی، اشاره کرد. به عنوان مثال، (Nobre et al., 2011) به معرفی یک مدل زمینی جدید از نظر هیدرولوژیکی به نام مدل HAND برای بررسی تاثیر توپوگرافی بر دینامیک آب خاک در سطح حوضه و تعیین مناطق اشباع پرداختند. نتایج نشان می‌دهد مدل HAND یک ورژن معمولی زهکش شده از مدل رقومی ارتفاعی است. مدل HAND توان بالقوه کاربردی بسیار خوبی برای شماری از موضوعات و رشته‌های متنوع مانند هیدرولوژی سطحی، نقشه برداری پهنه سیلاب، هواشناسی، حفاظت و استفاده از اراضی ارائه می‌دهد. (Nobre et al., 2015) به بررسی یک اصطلاح جدید به نام HAND به عنوان یک جایگزین مناسب برای برآورد وسعت سیلاب در جنوب برزیل پرداختند. نتایج نشان داد این روش محدوده‌های سیلگیر را در آبراهه اصلی و سیلابدشت‌ها با دقت زیادی شبیه‌سازی می‌کند. این روش همچنین در بازه‌هایی از رودخانه‌ها یا بخش‌هایی که فاقد جزئیات دقیق اندازه‌گیری یا دیگر

داده‌های واسنجی هستند، بسیار سودمند است. نقشه HAND

<sup>2</sup> Digital Elevation Model

<sup>1</sup> Height Above Nearest Drainage

رودخانه در جنوب برزیل با ترکیبی از تحلیل فراوانی سیلاب و مدل HAND پرداختند. همچنین عملکرد و حساسیت مدل برای DEMهای با توان تفکیک و سیلابهای با دوره بازگشتهای مختلف ارزیابی شد. نتایج به دست آمده برای دوره بازگشت 20 ساله گویای وجود تطابق 90 درصدی با پهنه سیل مشاهداتی در مورخه 2011/3/2 در Blumenau دارد. نتایج نشان می‌دهد که مدل HAND می‌تواند ابزاری موثر برای مدیریت سیلاب و جلوگیری از بروز حوادث شود. این روش نیازمند حجم محاسباتی بالایی نیست. (Rahmati et al. (2018)

به توسعه یک ابزار خودکار در GIS<sup>1</sup> برای تولید مدل زمینی HAND پرداختند. این پژوهش با هدف توسعه ابزاری در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) به نام HAND Tool با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون انجام شده است. نتایج نشان داد که مدل HAND در میان سایر عوامل توپوگرافیکی از عملکرد بسیار مناسبی در شناسایی محدوده‌های شکل‌گیری رواناب برخوردار است. هدف اصلی این پژوهش به چالش کشیدن عملکرد مدل مبتنی بر توپوگرافی HAND در برآورد پهنه سیلاب رودخانه سیمره می‌باشد. برای بررسی این مسئله علاوه بر مدل هیدرولیکی HEC-RAS (که در حال حاضر به عنوان یک مدل پرکاربرد در مطالعات مهندسی رودخانه به شمار می‌آید) از پهنه سیلاب بدست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای Sentinel-2 نیز استفاده به عمل آمده است.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- ویژگی‌های رودخانه مورد بررسی

برای بررسی هر چه بهتر کارایی مدل HAND و مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای که از تصویرهای ماهواره‌ای به دست آمده است و همچنین مقایسه با مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دو‌بعدی، رودخانه سیمره به عنوان محدوده مورد بررسی انتخاب شده است. رودخانه سیمره در 25 کیلومتری جنوب شرقی کرمانشاه (غرب بروجرد) از بهم پیوستن دو رود به وجود می‌آید و یکی از جاذبه‌های طبیعی استان لرستان به شمار می‌رود. این رود با طول 755 کیلومتر یکی از بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های این استان است و از مهم‌ترین سرشاخه‌های کرخه

به عنوان یک مفهوم جدید از مدل HAND، ابزاری خوب و ساده و در عین حال سودمند برای مطالعات سیلاب است و می‌تواند منجر به تحولات ارزشمندی در پیش‌بینی دقیق سیلاب گردد. (Tarboton (2016)

با ارائه پروژه‌های به حل یک مسئله تحت عنوان تجزیه و تحلیل پهنه سیلاب با استفاده از مدل HAND پرداخت. بدین منظور وی از نرم افزار Arc GIS Pro و برنامه Cyber GIS که در آن ابزار TauDEM نیز مورد توجه است استفاده کرد و همچنین به صورت آنلاین وبسایت Hydroshare نیز استفاده شد. بعلاوه از حوضه آبریز در مرکز تگزاس آمریکا استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با وارد کردن دبی در منحنی دبی-اشل، عمق سیلاب به دست آمده و با وارد کردن عمق سیلاب در نرم افزار می‌توان پهنه سیلاب را به دست آورد. همچنین با مقایسه نقشه پهنه سیلاب مدل HAND با مدل هیدرولیکی نتیجه گرفته شد که مدل HAND می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل هیدرولیکی شود. حال می‌توان برای کل حوضه تگزاس، منحنی دبی-اشل ساخته و پهنه سیلاب برای همی زیرحوضه‌ها ساخته شود و در نتیجه نقشه پهنه سیلاب به ازای دبی با دوره بازگشت مختلف تولید شود. Liu et al. (2016)

با استفاده از مدل HAND که به کمک Cyber GIS انجام گرفت، به تولید نقشه رستری با دقت بالا پرداختند. (Zheng (2016)

به کاربرد مدل HAND در منطقه هوستون پرداخت. هدف اصلی این پژوهش بررسی داده‌های زمینی با وضوح بالا (در مقیاس 1:24000 یا بهتر) NHDPlus و داده‌های زمینی 3 متری NED برای مدل‌سازی با استفاده از مدل HAND بود. مقایسه داده‌های ارتفاعی با خطوط جریان با وضوح بالا بدست آمده از منبع ارتباعتی NHDPlus نشان داد، مدل HAND با استفاده از چنین منبعی آنطور که انتظار می‌رفت قابل اعتماد نیست. بنابراین، برای بهبود دقت نتایج مدل HAND، باید از منابع ارتفاعی مناسب استفاده گردد. (Kesler (2017)

به تعیین نقشه پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND از طریق بسته نرم‌افزاری Tethys پرداخت. با چارچوب ایجاد شده در این تحقیق، برنامه با موفقیت توانست دبی پیش‌بینی شده در زمان واقعی را به تراز ارتفاع و نقشه‌های سیلاب تبدیل کند. (Speckhann et al. (2017)

اقدام به برآورد پهنه‌های سیلگیر

<sup>1</sup> Geographic Information System

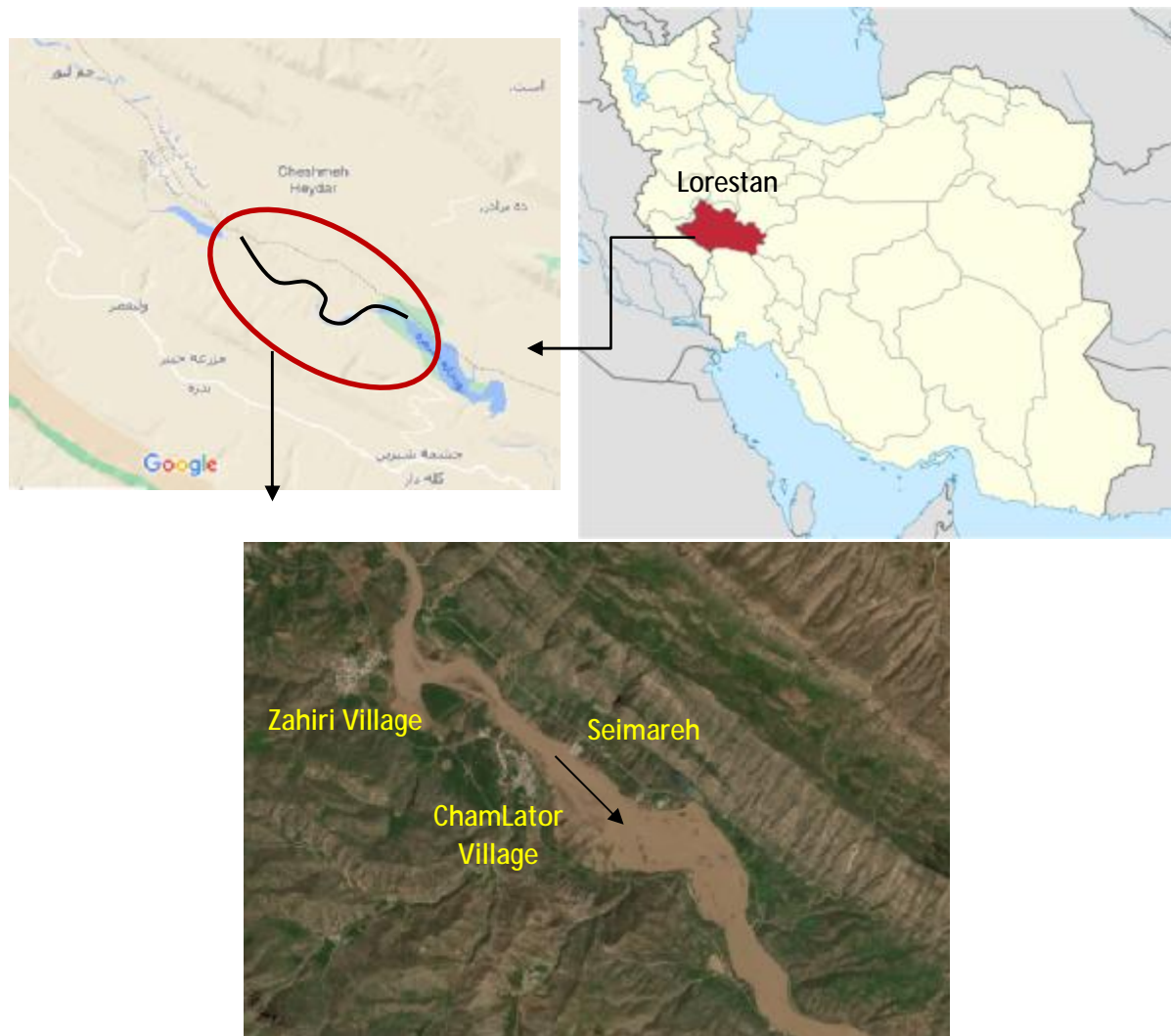


Fig. 1 Geographic location and digital elevation model of Seimareh River  
 شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و تغییرات ارتفاعی رودخانه سیمره در بازه مورد بررسی

آبراهه نرمل سازی می کند. فلسفه و دیدگاه اصلی مدل HAND، استخراج پهنه سیلاب با تبدیل دبی به عمق جریان و مقایسه آن با لایه رستری نرمل شده ارتفاع (نقشه رستری HAND) می باشد. برای تبدیل دبی به ارتفاع جریان می توان از معنی دبی-ثلث بدست آمده از معادله مانینگ (با هر معادله مربوط به مقاومت جریان) استفاده نمود.

پس از اصلاح DEM می توان نقشه رستری جهت جریان (Flow Direction) را برای تعیین هر کدام از مسیرهای شبکه آبراهها محاسبه نمود. برای محاسبه جریان خروجی از هر سلول DEM، الگوریتمهای روندیابی مختلفی توسط محققین توسعه داده شده است که در این تحقیق از روش پرکلرید D8 برای ساخت نقشه جهت جریان و نقشه شبکه انباشت جریان (Flow Accumulation) استفاده شد. در نهایت برای ساخت نقشه

به شمالی رود. از ویژگی های این رودخانه آب گل آلود آن است که به همین علت به آن سیمره می گویند. سیمره از دو بخش سی به معنی سیاه و مره یعنی غلر و دیواره سنگی تشکیل شده است. موقعیت جغرافیایی و تغییرات ارتفاعی رودخانه سیمره در شکل (۱) نشان داده شده است.

2-2- فرآیند مدل سازی به روش HAND  
 مدل HAND مخفف عبارت Height Above Nearest Drainage می باشد که برای نخستین بار توسط Nobre و همکاران (2011) برای بررسی تاثیر توپوگرافی بر دینامیک آب خاک در سطح حوضه و تعیین مناطق تشیع ارائه شد. به طور کلی، مدل HAND وضعیت توپوگرافی زمین را بر مبنای ارتفاع نسبی هر کدام از سلول های DEM نسبت به نزدیک ترین شبکه

در جدول (1) ارائه شده است، مقدار دی را به دست آورد. با تکرار این فرآیند برلی عمق‌های مختلف و به دست آوردن دی در هر حالت می‌توان منحنی دی-تثلی را برلی بازه مورد نظر استخراج نمود. با استخراج این منحنی می‌توان، به ازلی یک دی

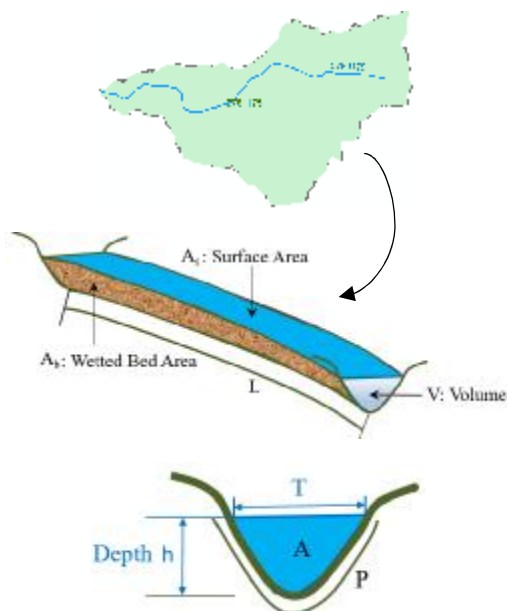


Fig. 3 Hydraulic properties of each river reach and calculation of rating curve  
 شکل 3 محاسبه ویژگی‌های هیدرولیکی هر بازه به ازلی عمق‌های مختلف و استخراج منحنی دی-تثلی

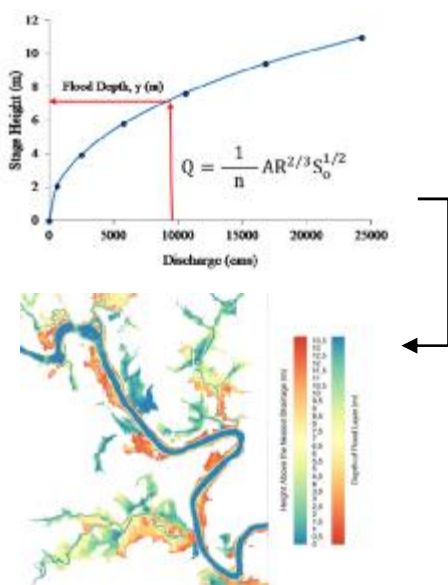


Fig. 4 Estimation of flood depth and extent for each river segment using rating curve (Tarboton, 2016)  
 شکل 4 برآورد عمق و پهنه سیلاب در هر بازه با استفاده از منحنی دی-تثلی (Tarboton, 2016)

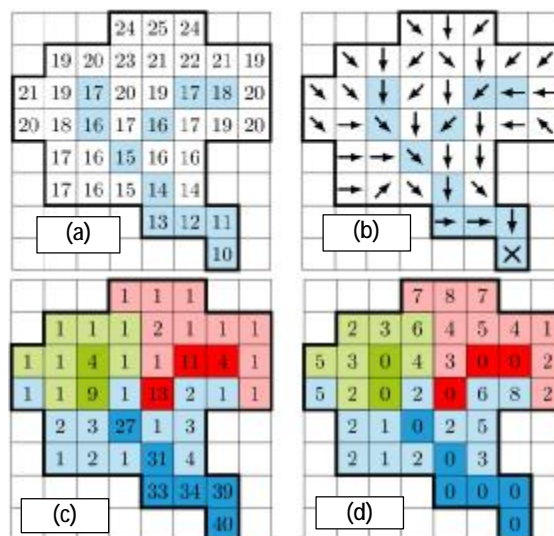


Fig. 2 The steps of HAND raster creation (a) digital elevation model (DEM), (b) flow direction raster based on D8 flow tracing algorithm, (c) flow accumulation raster and (d) Hand raster

شکل 2 مرحله‌های ساخت نقشه رستری HAND (a) مدل رقمی ارتفاعی زمین (DEM) و اصلاح آن، (b) ساخت نقشه برلی جریان با یکی از الگوریتم‌های روندیابی جریان (در پروژه حاضر از روش D8 استفاده شده است)، (c) نقشه رستری شبکه انبساط جریان و (d) لایه رستری HAND

رستری HAND بایستی فاصله قائم هر سلول از نزدیک‌ترین آرلهه به آن (Vertical Distance to the Nearest Stream) محاسبه شود که در این تحقیق از الحاقیه TauDEM در محیط ArcGIS برلی ساخت این لایه رستری با الگوریتم D8 استفاده شد. پس از ساخت نقشه HAND بایستی برلی هر کلام از بازه‌های موجود در لایه شبکه آرلهه‌ها منحنی دی-تثلی به طور جداگانه استخراج شود که جزئیات آن در شکل‌های (3) و (4) شرح داده شده است. در بازه‌بندی رودخانه بایستی به گونه‌ای عمل شود تا بازه مورد نظر از قطر تغییرات سطح مقطع و نیز پوشش گیاهی تقریباً یکنواخت بلند. هرچند لازم به یادآوری است که در رودخانه‌هایی که شکل مقطع در طول رودخانه تغییرات چندانی را تجربه نمی‌کند، عدم بازه‌بندی رودخانه و استخراج تنها یک منحنی دی-تثلی، خطای چندانی را بر پهنه سیلاب شبیه‌سازی شده توسط مدل HAND در بر خواهد داشت. فلسفه اصلی مدل HAND به دست آوردن منحنی دی-تثلی برلی هر بازه می‌باشد. برلی ساخت این منحنی، بایستی به ازلی یک عمق مشخص، پارامترهای هیدرولیکی مانند A و P و R را برلی هر بازه محاسبه و سپس با استفاده از معادله مانینگ که

برای شبیه‌سازی پهنه سیلاب از مدل یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS استفاده شده است. مدل HEC-RAS در حال حاضر یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین مدل‌های هیدرولیکی در سراسر جهان و به ویژه ایران می‌باشد و تاکنون بخش عمده‌ای از مطالعات حد بستر و حریم رودخانه‌ها با استفاده از این مدل هیدرولیکی به انجام رسیده است. در این تحقیق برای استخراج مقاطع عرضی موردنیاز مدل یک‌بعدی HEC-RAS از الحاقیه HEC-GeoRAS در محیط GIS استفاده شده است. همچنین برای شبکه‌بندی مدل دوبعدی HEC-RAS نیز از سلول‌های با ابعاد 30 متر (10 برابر ابعاد DEM به دست آمده از نقشه‌های توپوگرافی) استفاده شده است. هرچند لازم به یادآوری است که مدل دوبعدی HEC-RAS با توجه به استفاده از مفهومی به نام Sub-Grid Variability از وابستگی بسیاری کمی به ابعاد سلولی برخوردار بوده (برخلاف بسیاری از مدل‌های Depth-Averaged که به شدت تحت تاثیر ابعاد سلول محاسباتی هستند) و تغییرات ابعاد مش کمترین تاثیر را بر خروجی مدل در دارد (Azizian, 2019). برای واسنجی مدل دوبعدی نیز از نقشه کاربری اراضی بستر و سواحل رودخانه سیمره در بازه مطالعاتی استفاده و متناسب با هر نوع کاربری مدل، مقدار ضریب زبری بدست آمد و در پروسه واسنجی، مقادیر زبری مانینگ طوری واسنجی شدند تا پهنه سیلاب مشاهداتی و محاسباتی دارای بیشترین تطابق با هم باشند. در نهایت برای اجرای مدل از شرط مرزی Flow Hydrograph (هیدروگراف سیلاب رخ داده در مورخه 2019/4/1 در رودخانه سیمره) و برای پائین‌دست نیز به علت نبود ایستگاه هیدرومتری از شرط مرزی Normal Depth استفاده شده است.

#### 2-4- شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی از شاخص‌های مهمی همچون خطای قدرمطلق (MARE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و میزان تطابق بین دو مدل (F-statistic)، برای ارزیابی استفاده شده است. شاخص MARE بیان‌گر میزان خطای نسبی بین مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل HAND و مقدار بدست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای یا اجرای مدل هیدرولیکی (در این پروژه از آن به عنوان داده مبنا

با دوره بازگشت مشخص، عمق و پهنه سیلاب را از روی نقشه رستری HAND به دست آورد. در جدول (1) پارامترهای هیدرولیکی لازم برای به دست آوردن منحنی دبی-اشل همراه با معادله آنها نشان داده شده است.

جدول 1 پارامترهای هیدرولیکی لازم جهت به دست آوردن منحنی دبی-اشل

Table 1 Hydraulic parameters required for calculation for rating curve

Equation	Hydraulic parameter
$Q = \frac{1}{n} . A . R^{\frac{2}{3}} . \sqrt{S}$	Manning equation
$A_c = d_x d_y$	Area of each cell
$A_s = \sum A_c$	Total area of each cell
$A_b = \sum A_c \sqrt{1 + slp^2}$	Riverbed area
$V = \sum A_c (h - h_s)$	Flow Volume
$A = \frac{V}{L}$	River area
$P = \frac{A_b}{L}$	Wet environment
$T = \frac{A_s}{L}$	Width of water level
$R = \frac{A}{P}$	Hydraulic radius

$Q^*$ : دبی (متر مکعب بر ثانیه)،  $n$ : میانگین ضریب زبری مانینگ بازه موردنظر،  $A$ : میانگین مساحت سطح مقطع بازه مورد بررسی (متر مربع)،  $R$ : شعاع هیدرولیکی (متر) و  $S$ : شیب متوسط طولی رودخانه (متر/متر)،  $A_c$ : مساحت هر سلول در نقشه DEM،  $d_x$ : اندازه هر سلول افقی  $d_y$ : اندازه هر سلول عمودی  $A_s$ : مساحت مجموع همه سلول‌های موجود در پهنه سیلاب مرتبط با عمق موردنظر  $A_b$ : مساحت بستر رودخانه  $slp$ : مقدار شیب هر سلول DEM است  $V$ : حجم جریان عبوری،  $h$ : عمق جریان  $h_s$ : عدد مربوط به مدل HAND برای سلول موردنظر  $L$ : طول رودخانه،  $P$ : محیط خیس شده مقطع،  $T$ : عرض سطح آب

در این پژوهش، از الحاقیه TauDEM در بستر GIS برای ساخت نقشه رستری HAND از استفاده شده است.

#### 2-3- فرآیند مدل‌سازی هیدرولیکی جریان با مدل یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS

در این پژوهش برای به چالش کشیدن توانایی مدل HAND



می‌باشد. روابط مربوط به شاخص‌های مذکور در جدول (2) ارائه شده است.

## 2-5- داده‌های مورد استفاده برای واسنجی مدل‌های HAND و HEC-RAS

برای بررسی هر چه بهتر کارایی مدل‌های HAND و HEC-RAS در برآورد پهنه‌های سیلگیر بایستی آنها را با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای واسنجی کرد. برای واسنجی مدل‌های مذکور راهکارهای مختلفی وجود دارد که از مهمترین آنها می‌توان به پهنه سیلاب مشاهده‌ای، منحنی دبی-اشل و داغاب‌های برجای مانده در بدنه رودخانه اشاره کرد. در رودخانه سیمره برای واسنجی این مدل‌ها از تصویرهای ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا استفاده شد. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که از میان منابع مختلف موجود، تصویرهای ماهواره‌ای Sentinel2 از کیفیت مناسب برای این منظور برخوردار می‌باشد. در فروردین ماه سال 1398 سیلاب‌های متعددی در بخش‌های مختلف ایران به ویژه استان لرستان رخ داد که منجر به سیلابی شدن بخش قابل توجهی از رودخانه‌های این استان و وارد آمدن خسارات زیادی به اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی شد. در بازه زمانی 2019/3/31 تا 2019/4/2 (11 تا 13 فروردین 1398) رودخانه سیمره نیز از این قاعده مستثنی نبود و جریان‌های سیلابی شدیدی را تجربه کرد، به طوری که سیلاب بخش قابل توجهی از اراضی واقع در حاشیه (سیلابدشت‌ها) را در بر گرفت. در شکل (5) و (6) نمایی از بازه‌های رودخانه سیمره پیش و پس از عبور سیلاب در بازه زمانی یاد شده نشان داده شده است.

برای تعیین پهنه‌های آبی از روی تصویرهای ماهواره‌ای روشهای مختلفی وجود دارد که مهم‌ترین آنها شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDWI) می‌باشد. این شاخص برای نخستین بار توسط Gao در سال 1996 معرفی شد که انعکاس دهنده مقدار رطوبت در گیاه و خاک بوده و تا حدودی شبیه به شاخص طیفی NDVI تعریف و تعیین می‌شود. این شاخص توسط رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد. در این رابطه از باندهای NIR و SWIR استفاده می‌شود که بعدها توسط Xu تغییر و از باندهای Green و SWIR استفاده شد.

استفاده شده است) می‌باشد. برای بررسی هر چه بهتر عملکرد مدل HAND در برآورد پهنه‌های سیلگیر، بازه مورد بررسی به تعدادی مقطع عرضی تقسیم و پهنه جریان در آنها محاسبه و با نتایج مدل هیدرولیکی (در دو حالت یک و دوبعدی) مقایسه شد. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیک باشد بیانگر نزدیک بودن عملکرد مدل HAND به تصویرهای ماهواره‌ای یا مدل هیدرولیکی می‌باشد. شاخص RMSE نیز بیانگر خطای جذر میانگین مربعات یا ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد. هر چه مقدار آن به صفر نزدیک باشد، بیانگر عملکرد بالای مدل HAND در برآورد پهنه‌های سیلاب می‌باشد.

### جدول 2 شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی

Table 2 Statistical metrics for models evaluation

Performance benchmark	Methods
$MARE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{X_{base-map} - X_i}{X_{base-map}} \right $	Relative Error
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{base-map} - X_i)^2}$	Root Mean Square Error
$F (\%) = 100 \left( \frac{A_{os}}{A_o + A_s - A_{os}} \right)$	F statistic

\* Relative Error : خطای قدرمطلق (RE)، Root Mean Square Error : خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، F statistic : میزان انطباق بین دو مدل،  $X_{(base-map)}$  : داده‌های مدل واقعی یا داده‌های به دست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای یا شبیه‌سازی هیدرولیکی،  $X_i$  : داده‌های مدل پیش‌بینی شده یا داده‌های بدست آمده از الگوریتم HAND. n : تعداد مقاطع عرضی یا بازه‌های مورد استفاده برای مقایسه، A<sub>os</sub> : وجه اشتراک مساحت پهنه سیلاب به دست آمده از دو مدل، A<sub>o</sub> : مساحت پهنه سیلاب به دست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای یا مدل هیدرولیکی و A<sub>s</sub> : مساحت پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND

شاخص F-statistic نیز یک شاخص آماری است که میزان تطابق پهنه کلی سیلاب به دست آمده از دو مدل مختلف را نشان می‌دهد. بر خلاف دو شاخص قبلی، هر چه مقدار آن به یک نزدیک باشد بیانگر انطباق بالای خروجی مدل HAND با پهنه سیلاب حاصل از تصویرهای ماهواره‌ای یا مدل هیدرولیکی

Sentinel 2 در این پروژه از باندهای B3 و B8 برای محاسبه شاخص NDWI استفاده شد (شکل 7). پس از استخراج توزیع مکانی این شاخص بایستی از یک عدد آستانه (Threshold) برای تشخیص سطوح آبی از غیر آبی استفاده کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که عدد 0/25-، آستانه مناسبی برای محاسبه سطوح سیلگیر می‌باشد. در شکل (8) سطوح سیلگیر رودخانه سیمره به صورت برداری نشان داده شده است. همچنین بررسی داده‌های ثبت شده در ایستگاه آب‌سنجی تنگ سازین واقع در بالادست بازه مورد بررسی در مورخه 2019/4/1 گویای آن است که بیشینه دبی لحظه‌ای عبوری از این بازه در حدود 1143 مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. لذا از دبی مذکور و نیز پهنه سیلاب بدست آمده از تصویرهای ماهواره‌ای برای واسنجی دو مدل HAND و HEC-RAS استفاده شد.

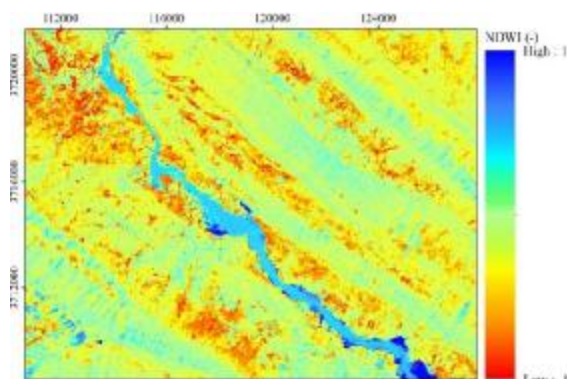


Fig. 7 Spatial distribution of NDWI index through the study reach.

شکل 7 توزیع مکانی شاخص NDWI در طول بازه مطالعاتی



Fig. 8 Flood extent obtained based on Sentinel-2 images (2019.04.01)

شکل 8 پهنه سیلاب به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای Sentinel 2 در مورخه 2019/4/1

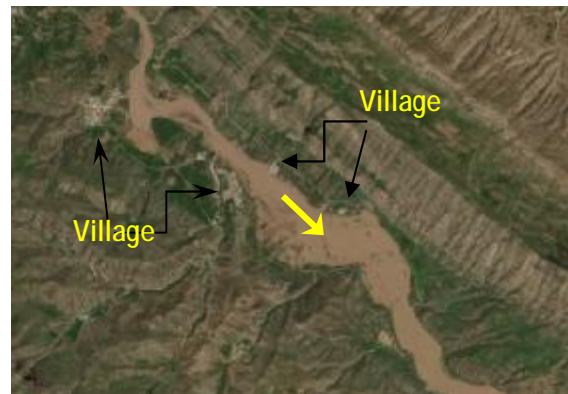


Fig. 5 Flood condition of Seimareh River based on Sentinel-2 images (2019.04.01)

شکل 5 وضعیت سیلابی رودخانه سیمره در مورخه 2019/4/1 ساعت 7 و 46 دقیقه صبح (زمان ثبت تصویر ماهواره‌ای Sentinel 2)

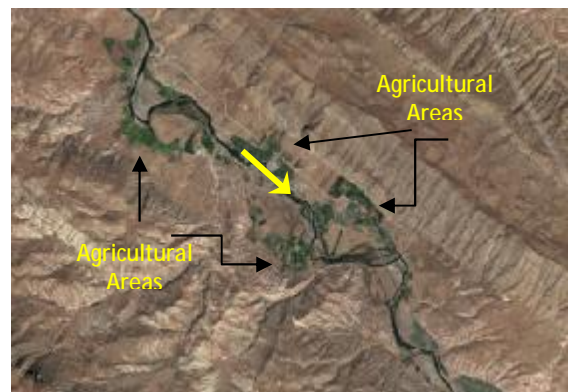


Fig. 6 River condition of Seimareh River before flood

شکل 6 وضعیت رودخانه سیمره پیش از بروز سیل

$$NDWI_{Gao} = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}, \quad NDWI_{Xu} = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (1)$$

NIR: همان باند مادون قرمز نزدیک (Near Infrared) است که دارای طول موجی بین 0/841 تا 0/876 نانومتر می‌باشد، SWIR: بخشی از دامنه با طول موج بین 1/628 تا 1/652 نانومتر می‌باشد.

در باند مادون قرمز نزدیک موج کوتاه (SWIR) بخش زیادی از نور توسط آب جذب می‌شود. نتایج به دست آمده از شاخص NDWI می‌تواند به صورت نقشه و یا نمودار ارائه شود که این مسئله اطلاعات ارزشمندی در مورد توزیع مکانی سطوح آبی را فراهم می‌آورد. این شاخص یک شاخص بدون بعد بوده و دامنه تغییرات آن بین +1 تا -1 می‌باشد. مقدار بالای شاخص NDWI (عدد 1 بیشینه مقدار می‌باشد) به معنای بالا بودن احتمال وجود آب در محدوده موردنظر دارد. با توجه به استفاده از ماهواره

### 3- نتایج

#### 3-1- ارزیابی مدل HAND توسط تصویرهای ماهواره‌ای

در این بخش عملکرد مدل ژئومورفولوژیکی HAND برای برآورد پهنه سیلاب در رودخانه سیمره ارزیابی و بررسی شده است. برای ارزیابی هرچه بهتر عملکرد مدل HAND در استخراج پهنه سیلاب، ضریب زبری مانینگ بازه مورد بررسی طوری واسنجی گردید تا پهنه سیلاب به دست آمده از آن به ازای سیلاب رخ داده در مورخه 2019/4/1 با پهنه سیلاب مشاهده‌ای (به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای) حداکثر تطابق را داشته باشد. نتایج محاسبه‌های مربوط به مدل HAND با در نظر گرفتن ضریب زبری مانینگ واسنجی شده (معادل 0/09) ارائه شده است. در این جدول به ازای عمق‌های مختلف، پارامترهای هیدرولیکی

مربوط به بازه مورد بررسی محاسبه و با استفاده از رابطه مانینگ میزان دبی و در پی آن منحنی دبی-اشل بازه مطالعاتی استخراج شد (شکل 9). پس از استخراج منحنی دبی-اشل می‌توان عمق جریان متناسب با هر دبی را محاسبه و سپس نقشه رستری HAND مربوط به توزیع مکانی پهنه سیلاب را به دست آورد. در شکل (9) منحنی دبی-اشل به دست آمده از مدل HAND بر مبنای ضریب زبری واسنجی شده برای بازه مورد بررسی رودخانه سیمره نشان داده شده است. در این بخش به ارزیابی نتایج بدست آمده از مدل HAND و مدل هیدرولیکی بر اساس ضریب زبری واسنجی شده بر اساس تصویرهای ماهواره‌ای پرداخته خواهد شد. با استفاده از پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND (بر مبنای دبی 1143 مترمکعب بر ثانیه) میزان انطباق آن با تصویرهای ماهواره‌ای برآورد گردید.

جدول 3 محاسبه‌های مربوط به مدل HAND برای به دست آوردن منحنی دبی-اشل رودخانه سیمره

Table 3 HAND model calculation for deriving rating curve in Seimareh River.

Stage (m)	1	2	4	6	8	10
Ac (m2)	900	900	900	900	900	900
As (m2)	4642200	6091200	9140400	10764900	12614400	14734800
mean (srp)	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002
Ab (m2)	4651484	6103382	9158680	10786429	12639628	14764269
V (m3)	3203118	7857648	21662748	40906620	63072000	88408800
L (m)	16396	16396	16396	16396	16396	16396
A=V/L (m2)	195	479	1321	2494	3846	5392
P=Ab/L (m)	283	372	558	657	770	900
R=A/P (m)	0.68	1.28	2.36	3.79	4.99	5.98
S0	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
n	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
T (m)	283	371	557	656	769	898
Q (m3/s)	41	155	643	1664	3082	4879

همان‌طور که در شکل (10) مشاهده می‌شود، میزان انطباق پهنه سیلاب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای برابر با 92/2 درصد است که نشان دهنده این مطلب است که مدل HAND عملکرد بسیار مناسبی برای شناسایی سطوح سیل‌گیر داشته است. همچنین در شکل (10) پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و تصویرهای ماهواره‌ای در مقاطع عرضی مختلف رودخانه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار شاخص MARE مدل HAND در برآورد پهنه سیلاب در طول بازه مورد بررسی در حدود 8/5 درصد می‌باشد. همچنین مقدار شاخص

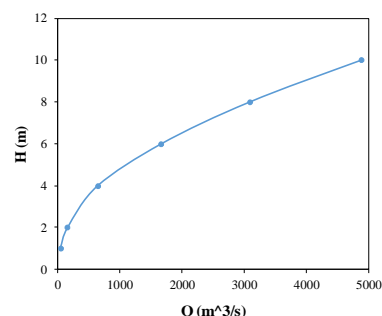


Fig. 9 Rating curve calculated for the Seimareh River.

شکل 9 منحنی دبی-اشل بر اساس ضریب زبری واسنجی شده در طول بازه مورد بررسی رودخانه سیمره

اشل برای هر زیربازه، می‌تواند عملکرد مدل HAND را تا حد زیادی ارتقا دهد. در ادامه به ارزیابی پهنه سیلاب به دست آمده از مدل هیدرولیکی برای سیل مورخه 2019/4/1 (بر مبنای دبی 1143 مترمکعب بر ثانیه) پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل (10) ملاحظه می‌شود، میزان انطباق پهنه سیلاب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS با تصویرهای ماهواره‌ای بترتیب برابر با 87/3 و 88/5 درصد است که عملکرد مناسب مدل هیدرولیکی در شناسایی سطوح سیل‌گیر می‌باشد.

RMSE مدل HAND در برآورد پهنه سیلاب در حدود 4/8 متر می‌باشد. به غیر از چند مقطع عرضی خاص، در عمده موارد پهنه سیلاب بدست آمده از مدل HAND در داخل محدوده خطای  $\pm 15$  درصد قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل HAND به‌رغم در نظر گرفتن یک منحنی دبی-اشل برای کل بازه مورد بررسی، در شناسایی پهنه‌های سیلگیر عملکردی مشابه با واقعیت موجود (تصویرهای ماهواره‌ای) دارد. هرچند لازم به یادآوری است که استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با توان تفکیک بالا و نیز بازبندی مسیر رودخانه و استخراج منحنی‌های دبی-

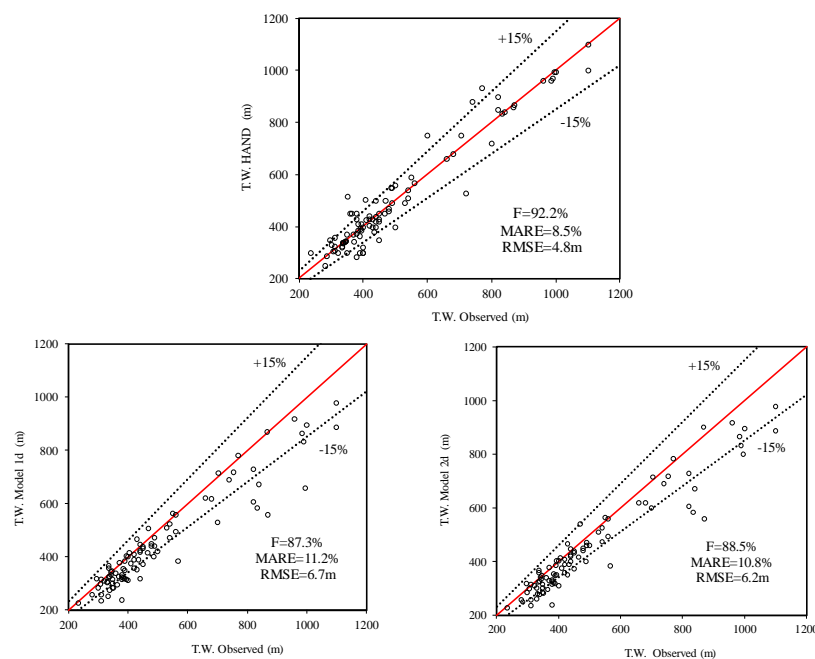


Fig. 10 Comparison of flood extent based on HAND and HEC-RAS models and observed flood map.

شکل 10 مقایسه پهنه سیلاب برآورد شده توسط مدل HAND و مدل هیدرولیکی HEC-RAS با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای در رودخانه سیمره

بسیار مناسب می‌باشد، اما نسبت به مدل HAND دارای خطای بیشتر در برآورد پهنه سیلاب می‌باشد. علت اصلی این مسئله را می‌توان به عامل‌های مهمی مرتبط دانست که عبارت‌اند: فاصله بین مقاطع عرضی، ابعاد سلول محاسباتی، پارامترهای عددی به کار رفته در مدل هیدرولیکی دوبعدی (مانند پارامتر  $\theta$  و عدد کورانت)، شرایط مرزی مورد استفاده در مدل هیدرولیکی، واسنجی گام زمانی و تعیین ضریب زبری مانینگ برای هر مقطع عرضی. به طور کلی عوامل نسبتاً بیشتری بر عملکرد مدل هیدرولیکی موثر بوده و خروجی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد و این در حالی است که مدل HAND از این نظر شرایط به نسبت

همچنین با توجه به پهنه سیلاب به دست آمده در مقاطع عرضی مختلف، شاخص MARE مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی در شبیه‌سازی پهنه سیلاب در طول بازه مورد بررسی بطور میانگین در حدود 11 درصد به دست آمده است. علاوه بر آن مقدار شاخص RMSE در برآورد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بطور میانگین در حدود 6/5 متر می‌باشد. همچنین به غیر از چند مقطع عرضی خاص، در عمده موارد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل هیدرولیکی در داخل محدوده خطای  $\pm 15$  درصد قرار می‌گیرد. بطور کلی اگرچه عملکرد مدل هیدرولیکی

که پهنه سیلاب بخش قلی توجی از سیلابشت رودخانه را شمل شده و در نتیجه عبور سیلاب ارضی کشاورزی دچار وضعیت غرقلی شدهاند. همچنین بخشهایی از روستاهلی واقع در حاشیه رودخانه نیز دچار سلی گرفتگی شدهاند.

بهتری را تجربه می نماید. همن طور که در شکل (11) ملاحظه می شود، بخشی از پهنه سیلاب بست آمده از تصویر ماهوارهلی در رودخانه سیمیره بر روی Google Satellite نشان داده شده است. همن طور که نماین است، نتایج بیانگر این مسئله می باشد



Fig. 11 Observed flood extent based on Sentinel-2 images in Seimareh River.

شکل 11 پهنه سیلاب مربوط به تصویر ماهوارهلی نشان داده شده بر روی Google Satellite در رودخانه سیمیره

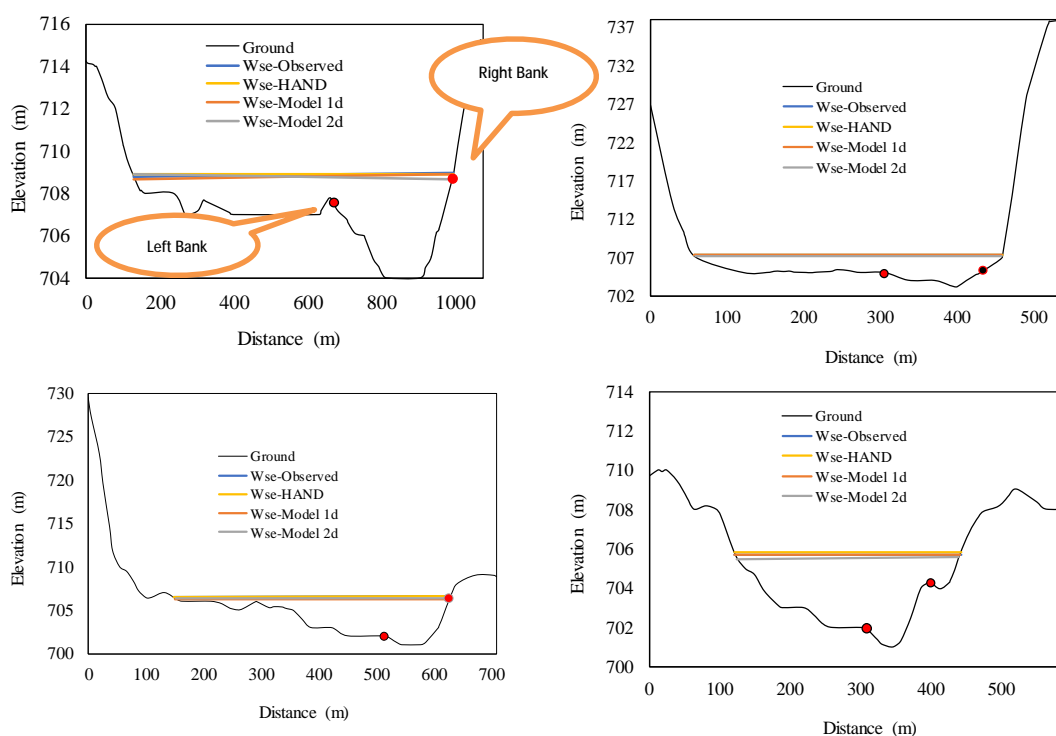


Fig. 12 Water surface elevation based on different models and observed map in four cross-sections of Seimareh River.

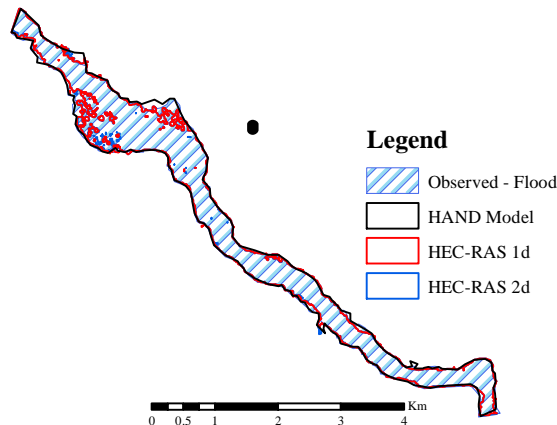
شکل 12 تراز سطح آب به دست آمده از مدل هلی مختلف در چند مقطع عرضی در بازه مورد بررسی رودخانه سیمیره

مشاهدهلی، وارد سیلابشت شده است و سلی، ارضی کشاورزی و خانههلی مسکونی را فرا گرفته است (شکل 12). همن طور که ملاحظه می شود، اختلاف چندن زلیلی در برآورد پهنه سیلاب

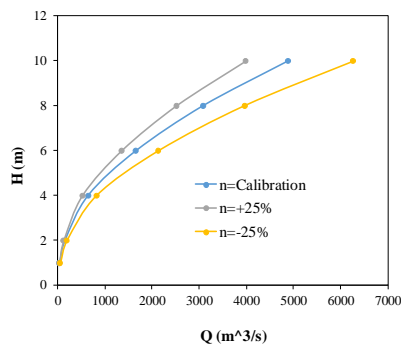
همچنین با بررسی چند مقطع عرضی در بازههلی مختلف رودخانه نیز مشاهده می شود که پهنه سیلاب به دست آمده به زلی دی مشخص از مدل HAND، مدل هیدرولیکی و دلمهلی

نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مدل HAND در مقایسه با تصویرهای ماهواره‌ای دارای عملکرد مناسبی می‌باشد، بدین صورت که به غیر از قسمت کوچکی از محدوده مورد بررسی، در عمده بخش‌ها، پهنه سیلاب بدست آمده از آن منطبق بر پهنه سیلاب مشاهده‌ای می‌باشد.

مدل HAND در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای و مدل هیدرولیکی دیده نمی‌شود و می‌توان نتیجه گرفت که مدل ژئومورفولوژیکی HAND دارای عملکرد بسیار مناسبی است (محدوده آبراهه اصلی بر روی شکل نشان داده شده است). در نهایت در شکل (13)، توزیع مکانی عملکرد مدل‌های مذکور در مقایسه با تصویرهای ماهواره‌ای در بدست آوردن پهنه سیلاب



**Fig.13** Flood extents based on HAND, hydraulic model and observed map for flood event 2019.4.1  
شکل 13 پهنه سیلاب مدل HAND و مدل هیدرولیکی و داده‌های مشاهده‌ای برای سیلاب مورخه 2019/4/1



**Fig. 14** Effect of roughness coefficient on Seimareh River's rating curve

شکل 14 تاثیر ضریب زبری بر منحنی دبی-اشل بازه مطالعاتی رودخانه سیمره

حدود 11/1 درصد و میزان انطباق برابر 87/5 درصد است و این در حالی است که در صورت برآورد مقادیر کم برای ضریب زبری مقدار خطای مذکور به حدود 12/2 درصد افزایش می‌یابد و میزان انطباق بین دو مدل نیز برابر 80/9 درصد خواهد شد. به عبارت بهتر بیش‌برآوردی ضریب زبری موجب ایجاد خطای بمراتب کمتری در پهنه سیلاب می‌گردد (شکل 15). در نهایت در شکل (16)، توزیع مکانی مربوط به تاثیر ضرایب زبری مختلف

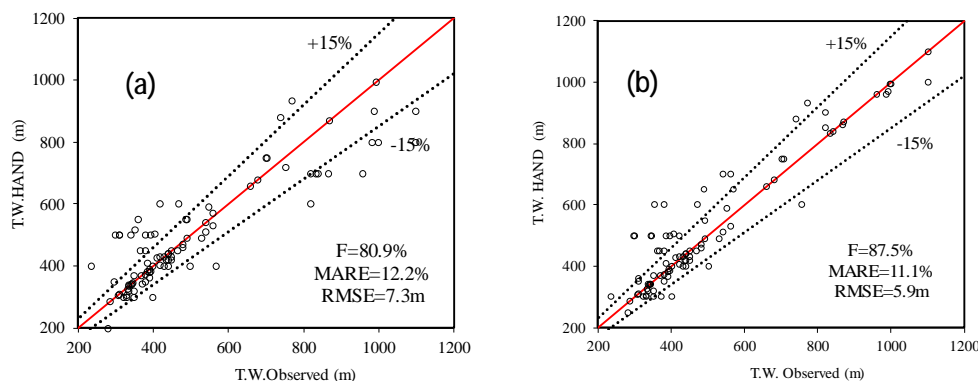
### 3-2- تحلیل حساسیت ضریب زبری مانینگ

در ادامه برای بررسی تحلیل حساسیت ضریب زبری مانینگ بر پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND، مقدار ضریب زبری واسنجی شده در محدوده  $\pm 25\%$  تغییر و منحنی دبی-اشل در سه حالت (واسنجی شده، 25 درصد افزایش و 25 درصد کاهش) برای بازه مورد بررسی استخراج گردید که در شکل (14) نشان داده شده است. سپس در هر حالت با برازش دبی 1143 مترمکعب بر ثانیه بر منحنی دبی-اشل، عمق جریان محاسبه و با تلفیق آن با نقشه رستری HAND، پهنه سیلاب حاصل و با پهنه سیلاب به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای ارزیابی شد.

در شکل (15) تاثیر افزایش و کاهش 25 درصدی ضریب زبری نسبت به ضریب زبری واسنجی شده بر پهنه سیلاب رودخانه سیمره نشان داده شده است. طبق محاسبات صورت گرفته، مقدار شاخص تطابق F در حالت پایه در حدود 92/2 درصد و میانگین خطای نسبی در برآورد پهنه سیلاب در طول بازه مطالعاتی، در حدود 8/5 درصد است (شکل 10). در حالت بیش‌برآورد 25 درصدی ضریب زبری، پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND بطور میانگین دارای خطای نسبی در

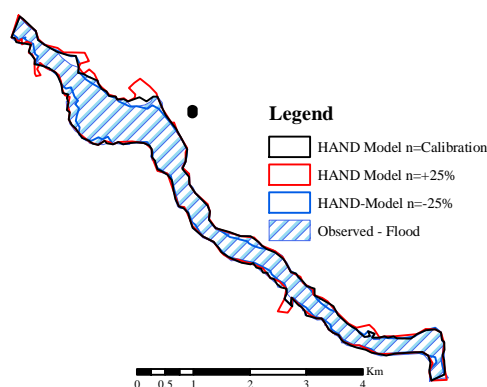
است، بدین صورت که به غیر از قسمت کوچکی از محدوده مورد بررسی، در عمده بخش‌ها، پهنه سیلاب بدست آمده از هر دو مدل، تطابق بالایی را نشان می‌دهد.

بر عملکرد مدل HAND در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای در به دست آوردن پهنه سیلاب نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مدل HAND با ضریب زبری واسنجی شده در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بهترین عملکرد را نشان داده



**Fig. 15** Comparison of flood extent based on HAND and HEC-RAS models and observed flood map in both (a) underestimation and (b) overestimation of Manning roughness coefficient.

شکل 15 مقایسه پهنه سیلاب برآورد شده توسط مدل HAND و داده‌های مشاهده‌ای در رودخانه سیمره برای دو حالت کم برآوردی (a) و بیش برآوردی (b) ضریب زبری مانینگ



**Fig. 16** Effect of using different Manning roughness coefficient on HAND model's flood extent.

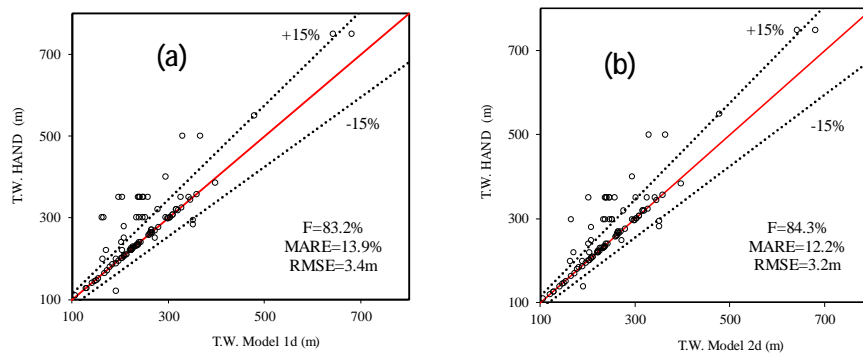
شکل 16 تاثیر مقادیر مختلف ضریب زبری بر پهنه سیلاب مدل HAND در رودخانه سیمره

هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی نیز استفاده شده است. با استفاده از پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND (بر اساس دبی 200 مترمکعب بر ثانیه) میزان انطباق آن با مدل هیدرولیکی یک‌بعدی و دوبعدی برآورد شد. همان‌طور که در شکل (17) مشاهده می‌شود میزان انطباق بین مدل HAND با مدل یک‌بعدی و دوبعدی به طور میانگین در حدود 84 درصد است که نشان‌دهنده این مطلب است که به ازای دبی‌های کم و شرایطی که آب در آبراه اصلی قرار دارد نیز مدل ژئومورفولوژیکی HAND دارای عملکرد مناسبی است. همچنین

**3-3- ارزیابی مدل HAND در شرایط جریان مختلف**  
 واسنجی شده در مقایسه با تصویرهای ماهواره‌ای که در مرحله قبل انجام پذیرفت، نتیجه گرفته شد که مدل مذکور دارای عملکرد بسیار مناسبی برای تعیین پهنه سیلاب برخوردار می‌باشد. حال با استفاده از مدل HAND بر اساس ضریب زبری واسنجی شده، پهنه سیلاب به ازای دبی‌های مختلف (200 و 1500 مترمکعب بر ثانیه) نیز بررسی می‌شود تا عملکرد مدل مذکور در شرایط جریان مختلف نیز سنجیده شود. جهت ارزیابی عملکرد مدل HAND به ازای دبی‌های مختلف از مدل

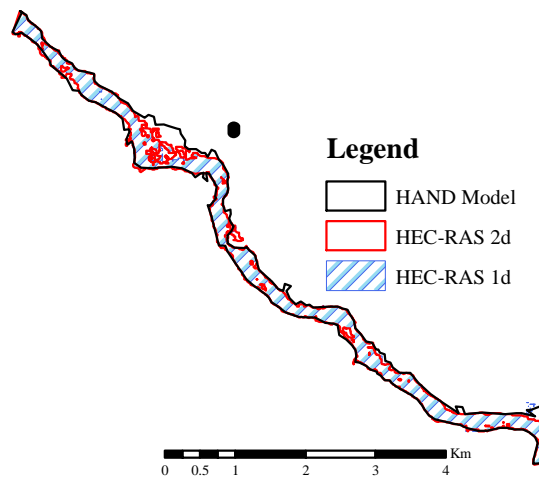
دارای عملکرد مناسبی در تعیین پهنه سیلاب می باشد. همچنین همان طور که پیش از این گفته شد استفاده از نقشه های توپوگرافی با توان تفکیک بالا می تواند خطای ناشی از برآورد پارامترهای هیدرولیکی و منحنی دبی-اشل را به کمترین مقدار برساند. در نهایت در شکل (18)، توزیع مکانی عملکرد مدل HAND در مقایسه با مدل هیدرولیکی یک بعدی و دوبعدی HEC-RAS در به دست آوردن پهنه سیلاب نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، مدل HAND با ضریب زبری و اسنجی شده در مقایسه با مدل یک بعدی و دوبعدی HEC-RAS عملکرد مناسبی را نشان داده است، بدین صورت که به غیر از قسمت کوچکی از محدوده مطالعاتی، در عمده بخش ها، پهنه سیلاب به دست آمده از هر دو مدل، تطابق بالایی را نشان می دهد.

در شکل (17) پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و مدل HEC-RAS در مقاطع عرضی مختلف رودخانه نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می گردد، مقدار شاخص MARE مدل HAND در شبیه سازی پهنه سیلاب در طول بازه مطالعاتی به طور میانگین در حدود 13 درصد در مقایسه با مدل هیدرولیکی یک بعدی و دوبعدی می باشد. افزون بر این، مقدار شاخص RMSE در برآورد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و مدل هیدرولیکی یک بعدی و دوبعدی نیز به طور میانگین در حدود 3/3 متر می باشد. به غیر از چند مقطع عرضی خاص، در عمده موارد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل ژئومورفولوژیکی HAND در داخل محدوده خطای  $\pm 15$  درصد قرار می گیرد. بنابراین می توان نتیجه گرفت مدل HAND آبراهه اصلی را بخوبی تشخیص داده و به ازای کاهش دبی ورودی نیز



**Fig 17** Comparison of flood extent based on HAND and HEC-RAS models and observed flood map in both (a) underestimation and (b) overestimation of Manning roughness coefficient.

شکل 17 مقایسه پهنه سیلاب برآورد شده توسط مدل HAND و مدل هیدرولیکی یک بعدی (a) و مدل هیدرولیکی دوبعدی (b) با ضریب زبری و اسنجی شده در رودخانه سیمره



**Fig. 18** Comparison of flood extents based on different models in Seimareh River for low floods  
شکل 18 مقایسه پهنه سیلاب مدل HAND و مدل هیدرولیکی در رودخانه سیمره برای سیلاب های کم



HEC-RAS در به دست آوردن پهنه سیلاب نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، مدل HAND با ضریب زبری واسنجی شده در مقایسه با مدل یکبعدی و دوبعدی HEC-RAS عملکرد مناسبی را نشان داده است، بدین صورت که به غیر از قسمت کوچکی از محدوده مطالعاتی، در عمده بخش‌ها، پهنه سیلاب بدست آمده از هر دو مدل، تطابق بالایی را نشان می‌دهد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- نتایج به دست آمده از مدل HAND بر اساس ضریب زبری واسنجی شده در رودخانه سیمره گویای عملکرد مناسب مدل مذکور در به دست آوردن پهنه سیلاب است. طبق محاسبات، میزان انطباق پهنه سیلاب در مقایسه با تصویرهای ماهواره‌ای بالاتر از 92 درصد است. همچنین میانگین اختلاف بین مدل HAND و تصویرهای ماهواره‌ای برای برآورد پهنه‌های سیلاب در طول بازه مطالعاتی رودخانه مذکور در حدود 8/5 درصد به دست آمد.
- نتایج در رودخانه سیمره نشان می‌دهد که افزایش و کاهش دبی ورودی تغییری در نتایج عملکرد مدل HAND ایجاد نکرده و همچنان مدل یاد شده دارای قابلیت مناسبی در مقایسه با مدل‌های هیدرولیکی می‌باشد. طبق محاسبات، میزان انطباق پهنه سیلاب در مقایسه با مدل هیدرولیکی در دبی‌های مختلف همواره بالاتر از 83 درصد است. همچنین میانگین اختلاف بین مدل HAND و مدل‌های هیدرولیکی برای برآورد پهنه‌های سیلاب در طول بازه مطالعاتی رودخانه مذکور کمتر از 13 درصد می‌باشد.

حال با استفاده از پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND (بر مبنای دبی 1500 مترمکعب بر ثانیه) میزان انطباق آن با مدل هیدرولیکی یکبعدی و دوبعدی برآورد گردید. همان طور که در شکل (19) مشاهده می‌شود میزان انطباق بین مدل HAND با مدل یکبعدی و دوبعدی به ترتیب در حدود 86/1 و 90/4 درصد است که نشان دهنده این مطلب است که به ازای دبی‌های بیشتر و شرایطی که آب از آبراهه اصلی خارج شده و وارد سیلابدشت شده است نیز مدل ژئومورفولوژیکی HAND سازگاری خوبی با مدل هیدرولیکی HEC-RAS داشته است. همچنین در شکل (19) پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و مدل HEC-RAS در مقاطع عرضی مختلف رودخانه نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، مقدار شاخص MARE مدل HAND در شبیه‌سازی پهنه سیلاب در طول بازه مدل‌سازی به ترتیب در حدود 13/2 و 10/6 درصد در مقایسه با مدل هیدرولیکی یکبعدی و دوبعدی می‌باشد. افزون بر این، مقدار شاخص RMSE در برآورد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل HAND و مدل هیدرولیکی یکبعدی و دوبعدی نیز به ترتیب در حدود 5/6 و 4/9 متر می‌باشد. به غیر از چند مقطع عرضی خاص، در عمده موارد پهنه سیلاب به دست آمده از مدل ژئومورفولوژیکی HAND در داخل محدوده خطای  $\pm 15$  درصد قرار می‌گیرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل HAND به ازای افزایش دبی ورودی نیز دارای عملکرد مناسبی در تعیین پهنه سیلاب در مقایسه با مدل هیدرولیکی HEC-RAS می‌باشد. در نهایت در شکل (20)، توزیع مکانی عملکرد مدل HAND در مقایسه با مدل هیدرولیکی یکبعدی و دوبعدی

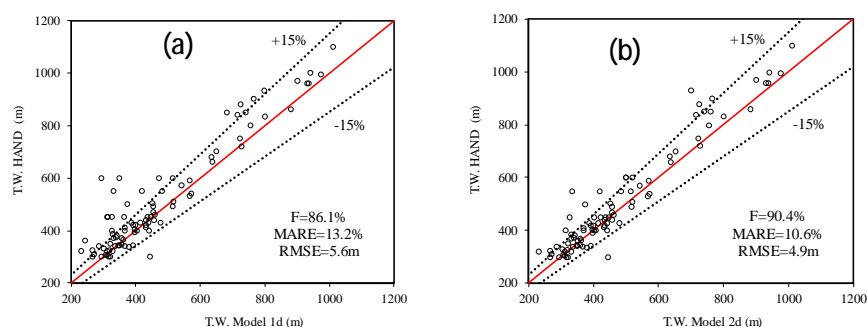
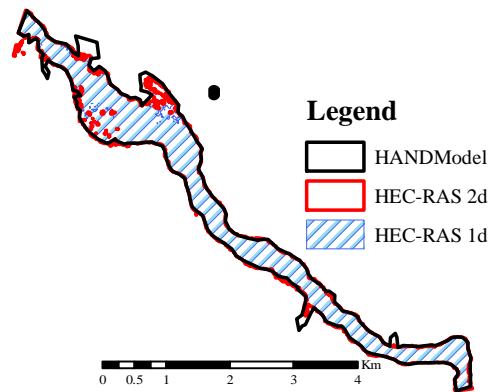


Fig. 19 Comparison of flood extent based on HAND model and HEC-RAS 1D (a) and (b) 2D models in Seimareh River.

شکل 19 مقایسه پهنه سیلاب برآورد شده توسط مدل HAND و مدل هیدرولیکی یکبعدی (a) و مدل هیدرولیکی دوبعدی (b) با

ضریب زبری واسنجی شده در رودخانه سیمره



**Fig. 20** Comparison of flood extents based on HAND and HEC-RAS1D-2D models in Seimareh River for high floods  
 شکل 20 مقایسه پهنه سیلاب مدل HAND و مدل هیدرولیکی در رودخانه سیمره برای سیلاب‌های بالا

Model and Flood Inundation Mapping. *Water Resource Management*, 33(4), 1315–1333.

Azizian, A. and Samadi, A. (2017). 2D flood simulation in the environment of HEC-RAS 5 numerical model, Parsia Publications. (In Persian)

Garousi-Nejad, I., Tarboton, D., Aboutalebi, M. and Torres-Rua, A. (2019). Data For Terrain Analysis Enhancements to the Height Above Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method. *HydroShare Database*.

Godbout, L.D. (2018). Error assessment for Height Above the Nearest Drainage Inundation Mapping. Master of Science in Engineering thesis, The University of Texas at Austin.

HEC (Hydrologic Engineering Center). (2010). HEC-RAS River Analysis System-User manual. Version 4.1. Davis, CA: US Army Corps of Engineering, Hydrologic Engineering Center.

Liu, Y.Y., Maidment, D.R., Tarboton, D.G., Zheng, X. and Wang, S. (2018). A CyberGIS Integration and Computation Framework for High-Resolution Continental-Scale Flood Inundation Mapping. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 54(4), 770-784.

Liu, Y.Y., Maidment, D.R., Tarboton, D.G., Zheng, X., Yildirim, A., Sazib, N.S. and Wang, S. (2016). A CyberGIS Approach to Generating High-resolution Height above Nearest Drainage (HAND) Raster for National Flood Mapping, in *CyberGIS 16, The Third International Conference on CyberGIS and Geospatial Data Science*, edited, Urbana, Illinois.

Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C., Rodrigues, G.O., Silveira, A., Waterloo, M. and

به‌رغم عملکرد بسیار مناسب مدل HAND در تخمین پهنه سیلاب، در برخی بازه‌ها اختلافاتی بین مدل HAND با تصویرهای ماهواره‌ای و مدل هیدرولیکی وجود دارد که می‌توان با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی با تفکیک بالا و نیز بازبندی مسیر رودخانه و استخراج منحنی‌های دی-اشل برای هر زیربازه، عملکرد مدل HAND را تا حد زیادی ارتقا داد.

مدل هیدرولیکی نسبت به مدل HAND دارای خطای بیشتری در برآورد پهنه سیلاب می‌باشد. علت اصلی این مساله را می‌توان به عامل‌های مهمی مرتبط دانست که عبارت‌اند: فاصله بین مقاطع عرضی، ابعاد سلول محاسباتی، پارامترهای عددی به کار رفته در مدل هیدرولیکی دوبعدی (مانند پارامتر  $\theta$  و عدد کورانته)، شرایط مرزی مورد استفاده در مدل هیدرولیکی، واسنجی گام زمانی و تعیین ضریب زبری مانینگ برای هر مقطع عرضی. به طور کلی عوامل نسبتاً بیشتری بر عملکرد مدل هیدرولیکی موثر بوده و خروجی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد و این در حالی است که مدل HAND از این نظر شرایط به نسبت بهتری را تجربه می‌کند، به طوری‌که تنها با در نظر گرفتن یک ضریب زبری برای کل بازه مطالعاتی و استخراج منحنی دی-اشل می‌توان پهنه سیلاب را به دست آورد.

## 7- منابع‌ها

Azizian, A. (2019). The Effects of Topographic Map Scale and Costs of Land Surveying on Geometric

Geometry and Rating Curve Estimation Using Height Above the Nearest Drainage. JAWRA Journal of the American Water Resources Association.

Zheng, X., Maidment, D.R., Tarboton, D.G., Liu, Y.Y. and Passalacqua, P. (2018). GeoFlood: Large-Scale Flood Inundation Mapping Based on High-Resolution Terrain Analysis. *Water Resources Research*, 54(12), 10013-10033.

Saleska, S. (2011). Height above the nearest drainage hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404, 13-29.

Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Momo, M.R., Severo, D.L., Pinheiro, A. and Nobre, C.A. (2016). HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2), 320-333.

Nobre, A.D., Cuartas L. A., Hodnett M., Rennó C. D., Rodrigues G., Silveira A., Waterloo M., & Saleska S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1–2), 13-29.

Nobre CA, Young AF, Saldiva P, Marengo JA, Nobre AD, Alves S, Silva GCM, Lombardo M. (2010). Vulnerabilities das Megacities Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo.

Rahmati, O., Kornejady A., Samadi M., Nobre A. D., and Melesse A. M. (2018). Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. *Environmental Modelling & Software*, 102, 1-12.

Speckhann, G.A., Borges Chaffe, P.L., Fabris Goerl, R., Abreu, J.J.D., Altamirano Flores, J.A. (2017). Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. *Hydrol. Sci. J.* 8 (10), 200-215.

Tarboton, D. G. (2017). Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM), Utah Water Research Laboratory, Utah State University.

Tarboton D. (1997). A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33, 309–319.

USGS (US Geological Survey) (2016). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc Second Global. Available from: <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc> [Accessed 4 December 2017].

Zheng, X. (2015). Hydraulic Fabric: An Information Framework for River Channel Cross Section Data.” Master’s dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX.

Zheng, X., D. Maidment, Y. Liu, D.G. Tarboton, and P. Lin. (2016). “From Forecast Hydrology to Real-Time Inundation Mapping at Continental Scale.” American Geophysical Union (AGU), Fall Meeting 2016.

Zheng, X., Tarboton, D.G., Maidment, D.R., Liu, Y.Y. and Passalacqua, P. (2018). River Channel