

Accuracy Assessment of RS-Based DEMs in Flood Inundation Mapping of Different Morphological Types of Rivers

Amir Mohammad Arash ^{1*}, Mehdi Yasi ², Asghar Azizian ³

1. M.Sc. Student of Hydraulic Structures Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Associate Professor of River Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Assistant Professor of Water Engineering, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

* amirmohammadarash@ut.ac.ir

Received: 17 May 2020, Accepted: 1 August 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Flood is one of the most devastating natural hazards that causes significant losses and damages. Flood inundation maps represent the flood-prone areas over the catchment, which is initial requirements for integrated flood management plans. Over decades ago, surveyed topography maps and bathymetry data were utilized to construct the river terrain for flood inundation mapping accurately. However, in most developing countries, including Iran, such precious data is rare for the sake of the time-consuming and costly procedure of rivers surveying. Therefore, for tackling this challenging issue, DEMs as an accelerator and free of charge datasets, are widely used in flood modelling. Nevertheless, the reliability of the finer datasets, such as LiDAR, the limited coverage of world and the exorbitant price of provision has obliged experts to utilize coarser-resolution DEMs rather than these higher-resolution DEM sources. As a result, the accuracy of open-access and free of charge DEMs used in flood modelling in the data-scarce rivers should be studied broadly, unless the lower-resolution DEMs hinder flood modelling results by incorrectly reproducing river terrain. In this study, three sets of widely used open-access DEMs' performance in flood inundation mapping and estimating hydraulic parameters of four various rivers are assessed thoroughly.

Methodology: In this paper, three sets of free and accessible 30m resolution DEM resources (ALOS, SRTM, ASTER) of four various types of rivers in Iran will be utilized as HEC-RAS geometry input file. The procedure consists of 5 main steps: 1) Generating GDEMs from 1:1000 or 1:2000 topography maps; 2) Extracting the river geometry using HEC-GeoRAS; 3) Flood modelling 4) Assessment of DEMs' performance in estimating hydraulic parameters; 5) Investigating the significance of morphological characteristics of four different Iran.

Results and Discussion: From modelling of the study rivers with different morphology, these brief results are drawn. The river geometry derived from ALOS DEMs were more identical to surveyed cross-sections. Therefore, according to previous studies, the higher performance of this dataset in flood modelling is expected. However, all of these RS-based DEMs were unable to present the Gorganrud river geometry data. Apart from the better representation of river geometry, the ALOS dataset is superior to ASTER and SRTM DEMs datasets in terms of fairly

prediction of hydraulic parameters (water extents and water surface elevation). For instance, ALOS had the least RMSE (2.3-8.6m) and the higher value of F statistics (nearly 80%) in predicting flood extents. Reversely, the RMSE of ASTER, the least accurate model, in flood extents estimation was from 2.8 to 15m and with the F-statistics of 68% at most. The SRTM performance in generating flood inundation map was better than ASTER and less accurate compared to ALOS (maximum F-statistic value was 78%). The accuracy of DEMs in simulating WSE of the mountainous rivers was similar to each other, and it was higher than predicted WSE of flat rivers. Moreover, the estimated WSE using ALOS led to less disagreement with the benchmark values, whereas the operation of ASTER and SRTM for this purpose resulted in overestimating. Overall, despite the tremendous difference of these DEMs in predicting the flood extents, the performance of these DEMs was acceptable in the predicting WSE of the rivers (Mean Relative Error=1% within all cross-sections) save in Gorganrud river with the highest RE% (nearly 5%).

Conclusion: The accuracy of flood inundation mapping is highly dependent upon the river geometry input files. Accordingly, it is critical to evaluate the influence of these DEMs on hydraulic outputs. Despite the significant impacts of river morphology characteristics in flood modelling, there is no viable reference indicating DEMs performance in various rivers with varying morphologies. The results of flood modelling in different types of Iran rivers revealed that the ALOS DEM dataset is superior to ASTER and SRTM DEM datasets in terms of a better representation of river geometry and fair prediction of hydraulic parameters. For instance, the higher percentage of F statistics (approximately 80%) proves that this model presented the flood inundation map with the highest agreement. However, the maximum values of F-statistics of SRTM and ASTER were nearly 78% and 68%, respectively, showing the flaws of these DEM sources in flood extents mapping. The efficiency of all DEMs datasets in estimating WSE of the rivers was excellent (under 1% within the cross-sections). Consequently, ALOS is particularly potent in accurately hydraulic modelling. Additionally, the remote-sensing based DEMs are more applicable in wide and (or) straight river reaches than narrow and meandering rivers. From Gorganrud river, we conclude the underperformance of DEMs in the prediction of the meandering rivers hydraulic parameters demonstrates that these DEMs are not appropriate for flood inundation mapping of free-meandering rivers.

Keywords: DEM, Flood, Flood Inundation Mapping, HEC-RAS, GIS, Hydrodynamic Modelling.



© 2020 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/>)

تعیین میزان دقت منبع‌های ارتفاعی مختلف برای برآورد پهنه سیلاب در رودخانه‌های با شرایط ریخت‌شناسی متفاوت

امیر محمد آرش^{۱*}، مهدی یاسی^۲، اصغر عزیزیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.
 ۲- دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران.
 ۳- استادیار مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

*amirmohammadarash@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱ ☞ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: مدیریت رودخانه و کاهش خطرهای سیل نیازمند تهیه نقشه‌های حد بستر و پهنه‌بندی سیل است. همواره زمان و هزینه زیاد برداشت زمینی پستی و بلندی یا عوارض مسیر (توپوگرافی) رودخانه عامل محدودکننده بوده است. هدف اصلی از این تحقیق ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در معرفی هندسه رودخانه‌ها، برای تعیین پهنه سیلاب و ویژگی‌های هیدرولیکی جریان بوده است. در این پژوهش، از مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان SRTM، ALOS و ASTER با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر برای تهیه فایل ورودی هندسه رودخانه در نرم افزار HEC-RAS استفاده شد. برای ارزیابی ارتباط بین عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی با ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه، چهار رودخانه مختلف: سجاجس رود (استان زنجان)، طالقانرود (استان البرز)، گرگانرود (استان گلستان) و رودخانه سرباز (استان سیستان و بلوچستان)، مورد نظر قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل ALOS در مقایسه با ASTER و SRTM می‌باشد. در تعیین عرض و پهنه سیلاب با مدل ALOS، کم‌ترین خطا با شاخص آماری RMSE بین ۲/۳ تا ۸/۶ متر؛ و با شاخص F در حدود ۸۰ درصد به دست آمده است. در تعیین تراز سطح آب سیلاب، خطای MAPE منبع‌های ارتفاعی ALOS و SRTM رودخانه‌های سجاجس رود، سرباز و طالقانرود زیر ۱ درصد بوده است. با مقایسه طرح و نقشه (پلان) و الگوی پخش سیلاب شبیه‌سازی شده و همچنین دقت بالای مدل ALOS در تعیین تراز سطح آب، توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی سیلاب رودخانه اثبات می‌شود. به طور کلی، عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد ارزیابی در پهنه‌بندی رودخانه‌های عریض و مستقیم بهتر از رودخانه‌های باریک و پیچانرودی می‌باشد.

کلید واژگان: پهنه‌بندی سیلاب، سنجش از دور، HEC-RAS، هیدرولیک سیل، مدل‌های رقومی ارتفاعی.

۱- مقدمه

نزدیک به دو دهه گذشته (۹۷-۱۳۷۹)، حدود ۵۳ هزار کیلومتر از رودخانه‌های کشور تعیین حد بستر و حریم شده‌اند. بنابراین، با احتساب کل رودخانه‌های ایران، هنوز حدود ۶۴ درصد طول رودخانه‌ها نیازمند اجرای طرح تعیین حد بستر و حریم هستند. برابر برنامه سه ساله (۱۴۰۰-۱۳۹۸) وزارت نیرو، اقدام‌های اضطراری برای تعیین نقشه‌های حد تقریبی بستر و حریم بیش از ۹۰ هزار کیلومتر باقی‌مانده در نظر گرفته شده، که مشروط به تأمین اعتبار و بودجه‌های لازم است (Special Reporting Committee on Iran Floods, 2019).

حد بستر قانونی رودخانه در ایران، یک پهنه حقوقی برای تعیین حد مالکیت عمومی بر سامانه رودخانه است. همچنین، نشانگر یک پهنه گسترده برای ایمن‌سازی عبور سیلاب‌های متناوب (با فراوانی مجموعه سیلاب‌های تا دوره بازگشت ۲۵ ساله طبیعی) و کاهش آسیب و زیان‌ها بر رودخانه و همچنین بر جان مردم و دارایی‌های کشور است. در سال ۱۳۷۹، از ۱۴۶ هزار کیلومتر رودخانه‌های ایران، ۷۵ هزار کیلومتر (حدود ۵۰ درصد) در اولویت نخست بررسی‌های حد بستر و حریم و ساماندهی قرار گرفتند. در

دست آمده از مدل هیدرولیکی به واقعیت نزدیک خواهد بود (Bates, 2006; Callow et al., 2007). کیفیت و توان تفکیک نقشه عوارض عامل کلیدی در شبیه‌سازی و برآورد پهنه‌های سیلاب می‌باشد (Horritt & bates, 2002). لذا نبود زمینه انتخاب نقشه عوارض با کیفیت مناسب نتایج شبیه‌سازی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Vaze et al., 2010; Azizian & Shokoohi, 2015). این بدین معناست که مدل هیدرولیکی زمانی درست عمل می‌کند که اطلاعات هندسی مجرای اصلی رودخانه و سیلابدشت‌ها و فراسنجه‌های (پارامترهای) ورودی با دقت تعریف شده باشد (Merwade et al., 2008a; Grimaldi et al., 2018). نقشه‌برداری زمینی از بستر و سیلابدشت رودخانه‌ها در مقیاس مناسب برای بررسی‌های رودخانه‌ای مانند ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ بسیار هزینه‌بر بوده و مستلزم صرف زمان زیادی می‌باشد (Azizian, 2019). همچنین در برخی از کشورها نقشه‌برداری با پهبادها رایج است که داده‌های با دقت بالا را در مدت زمان کوتاهی برداشت می‌کنند. از کاستی‌های این فناوری می‌توان به هزینه اجرایی بالا، قابلیت استفاده در محدوده‌های کوچکتر از ۱۰۰ هکتار و نیاز به مجوزهای لازم برای پرواز در منطقه‌های حفاظت شده اشاره کرد (Saadatseresht et al., 2015; Burdziakowski, 2018). به دلیل نبود بودجه لازم برای تهیه چنین داده‌هایی به ویژه در کشورهای در حال توسعه و بدون آمار مدون، مدلسازی هیدرولیکی سیلاب و استخراج مؤلفه‌های هیدرولیکی همچون: عمق، تراز و پهنه سیلاب در چنین شرایطی امکان‌پذیر نمی‌باشد (Azizian & Brocca, 2019; Jarhani et al., 2015).

سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ابزارهای مهمی در گردآوری اطلاعات دقیق مورد نیاز برای مدلسازی سیلاب به شمار می‌آید (Puno et al., 2019; Grimaldi et al., 2016). در واقع سنجش از دور امکان بررسی مقطع‌های رودخانه، پهنه سیلاب و عرض رودخانه را فراهم می‌کند که اندازه‌گیری مستقیم آن به سختی امکان‌پذیر است (Mersel et al., 2013). بهره‌گیری از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی افزون بر تولید نقشه‌های با کیفیت پهنه‌بندی سیلاب (Heidari et al.,

سیلاب همواره به عنوان یکی از زیانبارترین رخدادهای طبیعی در جهان به شمار می‌آید که انتظار می‌رود با افزایش جمعیت و تغییر کاربری اراضی سیلابدشت رودخانه‌ها و با تغییر اقلیم شدیدتر و زیانبارتر شود (CRED & UNISDR, 2015; Kwak, 2017; Kumar et al., 2019). بنابر گزارش سازمان جهانی هواشناسی، در چند دهه متوالی گذشته، شمار مخاطره‌های سیل، تلفات انسانی و زیان مالی رو به افزایش داشته است. کشور ایران از نظر شمار رخدادهای سیلاب در بین منطقه‌های میانگین جهان قرار داشته؛ و در آسیا رتبه ۱۱ از ۳۵ دارد. ایران بیشترین آسیب و زیان‌ها را از سیل دارد، سالانه تلفات انسانی ۴۰ تا ۱۸۰ نفر؛ و زیان‌های مالی ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ میلیون دلار برآورد شده است (WMO, 2014). پدیده سیل در ایران یک پدیده همه‌ساله و فراگیر بوده و در حال تشدید می‌باشد؛ و بیشتر ناحیه‌های کشور به نوعی متحمل آسیب و زیان‌های آن هستند. راه‌حل عملی برای جلوگیری از آسیب و زیان‌های آتی سیلاب، شناخت منطقه‌های مستعد سیلاب است. نقشه‌های پهنه سیل، زیربنای بسیاری از اقدامات مدیریت رودخانه است. کاربرد فراوان این نقشه‌ها در مدیریت رودخانه و نقشی که در مدیریت سیلاب، برنامه‌ریزی کاربری اراضی در سیلابدشت، اطلاع‌رسانی همگانی و افزایش سطح آگاهی اجتماعی، برنامه‌ریزی شرایط بحرانی و اضطراری، بیمه سیلاب، تحلیل و ارزیابی آسیب و زیان‌های سیل، تعیین نقطه‌های آسیب‌پذیر تأسیسات زیربنایی و پیاده‌سازی سامانه‌های هشدار سیل دارد، تهیه و ارائه این نقشه‌ها را ضروری می‌سازد (Special Reporting Committee on Iran Floods, 2019). در ایران، تهیه سریع، آسان و ارزان نقشه‌های پهنه خطر سیلاب از اولویت‌های نخست به شمار می‌آید. برای پیش‌بینی، شبیه‌سازی و درک بهتر سیلاب و بحث‌های مدیریتی مرتبط با آن در مقیاس منطقه‌ای (مانند: سیلاب‌های بازه‌های شهری و شکست سد) استفاده از مدل‌های هیدرولیکی ابزار مناسبی به شمار می‌آید (Adams, 2018). یکی از ورودی‌های بنیادین مدل‌های هیدرولیکی برای شبیه‌سازی درست جریان در رودخانه‌ها، نقشه پستی و بلندی یا عوارض (توپوگرافی) می‌باشد و هرچه نقشه یاد شده دارای دقت و توان تفکیک مکانی بالا باشد، نتایج به

اطلاعات، معادله‌های توصیف‌کننده‌ی فرآیندهای فیزیکی و سازه‌های در مسیر رودخانه در ارتباط با سیلاب تأثیرگذار است (Merwade et al., 2008b; Costabile & Macchione, 2015). رفع کامل این عدم قطعیت‌ها یا تعیین میزانشان در نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب به خاطر محدودیت منبع‌های مالی، زمان محاسبات طولانی و یا ناآگاهی لازم راجع به علم سیل؛ بسیار دشوار است. به این منبع‌های عدم قطعیت در مقاله‌های علمی به طور گسترده-تری پرداخته شده است. به طور کلی از برآورد بیشینه جریان سیلاب، مدل هندسی و فراسنجه‌های معرفی شده به نرم افزار (مانند: ضریب زبری مانینگ) به عنوان منبع‌های عدم قطعیت در برآورد پهنه سیلاب رودخانه یاد می‌شود (Bates et al., 2004; Jung & Merwade, 2014). از جمله عامل‌های عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولیکی، دقت DEMها است که به عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده‌ی عملکرد مدل هیدرولیکی به شمار می‌رود (Bates et al., 2018; Chen et al., 1998). یکی از بنیادی‌ترین مواردی که بر کیفیت و کمیت DEMها و در پی آن دقت مدل هندسی تأثیرگذار است تراکم داده‌های مورد استفاده برای ساخت آن می‌باشد، به طوری که هرچه شمار داده‌های بیشتری استفاده شود، نقشه مورد نظر بزرگ مقیاس‌تر به شمار می‌آید (Azizian & Shokoohi, 2015). نقشه عوارض‌هایی که ابعاد سلولی بزرگتری دارند سبب افزایش در سرعت مدلسازی، تحلیل (آنالیز) حساسیت و واسنجی مدل می‌شوند، اما باعث از دست رفتن جزئیاتی می‌شوند که روی نتایج مدلسازی مؤثر و با اهمیت می‌باشند (Haile & Rientjes, 2005). مسئله‌ای که هنگام استفاده از DEMها باید به آن توجه داشت پوشش منطقه مورد نظر و دقت DEMهای تولید شده است (Teng et al., 2015; Papaioannou et al., 2016). نتایج پیشین گویای نبود زمینه دسترسی به نقشه عوارض واقعی به ویژه رقوم کف رودخانه‌ها در بسیاری از منطقه‌های جهان به ویژه ایران می‌باشد، که مدلسازی سیلاب و تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب را با چالش جدی رو به رو می‌سازد. کارایی مدل‌های رقومی ارتفاعی به عنوان جایگزین نقشه‌های عوارض نیازمند ارزیابی است. هدف اصلی از این

افزایش سرعت و دقت بررسی‌های هیدرولیک رودخانه‌ها را به همراه دارد (Bagheri & Torkaman, 2019; Zadeh, 2018). همچنین استفاده از روش فنی (تکنیک) سنجش از دور و بررسی‌های میدانی موجب تهیه نقشه‌های خطر سیلاب با دقت بالایی می‌شود (Sistani Badouie et al., 2017). امروزه مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) مبتنی بر سنجش با پوشش جهانی و توان تفکیک مناسبی وجود دارند که برای مدلسازی سیلاب قابل استفاده بوده و هزینه‌های پروژه‌های مهندسی رودخانه را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهند (Jarhani et al., 2013). مدل‌های رقومی ارتفاعی نه تنها در پهنه‌بندی سیلاب استفاده می‌شوند، بلکه در بخش‌های دیگر مدیریت سیلاب مانند ناحیه‌بندی سیلابدشت و بررسی‌های ریخت‌شناسی (مورفولوژیکی) رودخانه‌ها به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند (Ng et al., 2018; Khanna et al., 2017). در بسیاری از کشورها مدل رقومی ارتفاعی LiDAR در مقیاس محلی و با توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر موجود می‌باشد که بهترین جایگزین برای نقشه‌های عوارض زمینی به شمار می‌رود (Sanders, 2007). برخلاف مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان، این مدل قادر به نمایش جزئیات کف رودخانه با دقت بالایی است که مانند نقشه عوارض واقعی رودخانه عمل می‌کند. در واقع اطلاعات عمق‌سنجی از مهم‌ترین ورودی‌های مدل‌های هیدرولیکی است که موجب بالارفتن دقت شبیه‌سازی سیلاب می‌شود (Merwade et al., 2008b; Grimaldi et al., 2018). افزودن بر اطلاعات عمق‌سنجی، این مدل قادر به استخراج عوارض موجود در سیلابدشت رودخانه‌ها با انعطاف‌پذیری بالایی نیز می‌باشد (Shahbazi, 2016). مشکل اصلی این مدل رقومی ارتفاعی گران بودن آن، حجم بالای آن و دسترسی شمار معدودی از کاربران به اطلاعات آن می‌باشد. در واقع ارزیابی‌های خطرهای سیلاب ناشی از شماری از منبع‌های عدم قطعیت است که نتایج مدلسازی به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند. به طور خاصی این عدم قطعیت‌ها بر اطلاعات هیدرولوژیکی، فراسنجه‌های هیدرولیکی، واسنجی (کالیبراسیون) و صحت‌سنجی

وجود عدم قطعیت در برآورد فراسنجه‌های ورودی مدل‌های ریاضی از عیب و کاستی‌های این مدل‌ها به شمار می‌رود. در این بررسی، فراسنجه‌های ورودی به مدل HEC-RAS (مانند: هندسه رودخانه، ضریب زبری مانینگ، شرایط مرزی) باید با دقت کافی ارزیابی شوند. به این منظور، در آغاز ضریب‌های زبری مانینگ با توجه به داغاب‌ها واسنجی می‌شوند. در ادامه سعی شده منحنی دبی-اشل شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی با منحنی دبی-اشل مشاهده شده در محل ایستگاه آب‌سنجی (هیدرومتری) بیشترین سازگاری را داشته باشند. با توجه به اینکه هندسه رودخانه مهم‌ترین فراسنجه ورودی به مدل به شمار می‌آید، لازم است تا مدل رقومی ارتفاعی در معرفی هندسه بستر آبراهه اصلی و سیلابدشت رودخانه را به درستی انتخاب کرد (Arash et al., 2019).

۲-۲- مدل‌های رقومی ارتفاعی

ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) در معرفی هندسه رودخانه، برای تسریع در تعیین نقشه‌های حد بستر و پهنه سیلاب، و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی جریان سیلاب رودخانه ضروری است. در این پژوهش از نقشه‌های عوارض زمینی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ یا ۱:۲۰۰۰ به عنوان مبنایی برای ارزیابی عملکرد هر کدام از منبع‌های ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور SRTM، ASTER و ALOS استفاده شده است. مدل‌های رقومی ارتفاعی ALOS، SRTM و ASTER برای همه‌ی رودخانه‌های مورد مطالعه به ترتیب در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۴ و ۲۰۰۸ و در فاصله زمانی یک روزه دریافت (دانلود) شده‌اند. مدل هیدرولیکی HEC-RAS با استفاده از سه منبع ارتفاعی یاد شده در چهار بازه از رودخانه‌های با ریخت‌شناسی متفاوت در منطقه‌های مختلف ایران اجرا، و نتایج آن با نتایج همانند از استفاده نقشه‌های عوارض زمینی به صورت مقایسه همه‌ی مقطع‌ها با مقطع‌های همانندشان، مقایسه شده است. به دلیل نداشتن نقشه‌های پهنه‌سیلاب واقعی در رودخانه‌های مورد بررسی، برای مدلسازی سیلاب این رودخانه‌ها، شرایط مرزی و ضریب‌های زبری مانینگ در اجراهای مختلف همسان در نظر گرفته شد. نکته دارای اهمیت موقعیت و شمار مقاطع

تحقیق، ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان و در دسترس در معرفی هندسه رودخانه‌ها، برای تسریع در تعیین نقشه‌های حد بستر و پهنه سیلاب، و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی جریان سیلاب بوده است. برای ارزیابی ارتباط بین عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی با ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه، چهار رودخانه مختلف در ایران مورد نظر قرار گرفت. هر یک از این رودخانه‌ها از نظر ویژگی‌های ریخت‌شناسی (شکل ظاهری، نسبت عرض به عمق، مواد بستر و...) با یکدیگر متمایز می‌باشند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدلسازی ریاضی هیدرولیک رودخانه

مدل‌های HEC-RAS و MIKE11 از بهترین مدل‌های یک‌بعدی شبیه‌سازی سیلاب می‌باشند که به طور فراگیری در بررسی‌های هیدرولیک رودخانه استفاده می‌شود (Anees et al., 2016). این دو مدل رایگان بوده که از برتری‌های آن به شمار می‌رود. در ایران، از مدل یک بعدی جریان پایدار HEC-RAS به صورت گسترده برای تهیه نقشه‌های حد بستر و پهنه‌بندی سیلاب استفاده می‌شود، و دقت و کارایی آن نیز مورد تأیید مهندسان مشاور و دفتر مهندسی رودخانه شرکت‌های آب منطقه‌ای تابعه وزارت نیرو بوده است (Yasi & Nasiri Soltan Ahmadi, 2017). از قابلیت‌های مدل HEC-RAS می‌توان به شبیه‌سازی جریان‌های یک‌بعدی پایدار و ناپایدار اشاره کرد. به منظور نمایش پهنه سیلاب و عمق و سرعت آب گرفتگی می‌توان از نرم افزار ArcGIS و یکی از ملحقات آن به نام HEC-GeoRAS استفاده کرد. لذا، شبیه‌سازی هیدرولیک سیلاب رودخانه‌های این بررسی، به صورت یک بعدی و در شرایط جریان پایدار صورت پذیرفت. افزون بر آن، در این پژوهش تنها مدل هیدرولیکی HEC-RAS به منظور تحلیل جریان استفاده شد و نرم‌افزارها و یا روش‌های پردازش تصویر به کار گرفته نشده‌اند. عملکرد این مدل‌ها وابسته به عامل‌های زیادی مانند نوع مدل، بعد مدل، هندسه رودخانه و دیگر فراسنجه‌های ورودی و تنظیم‌های کاربری در مدل دارد (Jung & Merwade, 2012; Saksena & Merwade, 2015; Azizian & Brocca, 2019; Azizian, 2019).

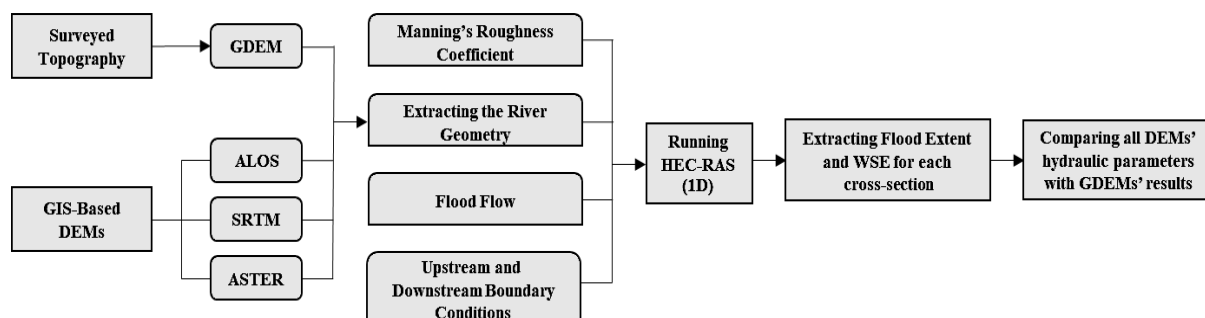


Fig. 1 Flowchart for the accuracy assessment of DEMs in flood modelling

شکل ۱ روندنمای بررسی اثر مدل‌های رقومی ارتفاعی بر مدل‌سازی سیلاب رودخانه

دارای ریخت کوهستانی بوده و شیب به نسبت زیادی دارد. افزون بر این، تغییر کاربری اراضی و تضعیف پوشش گیاهی منطقه باعث شده تا توان نگهداشت و نفوذ جریان آب کاهش یافته و در هنگام بارندگی، به سرعت رواناب ایجاد شود. بازه‌های شریانی، سینوسی و مستقیم رودخانه طالقانرود با مقطعی مرکب در پهنه‌بندی سیلاب اهمیت زیادی دارد. روستاهای زیادی در کناره رودخانه پیچانرودی گرگانرود به وجود آمده‌اند و اراضی کنار رودخانه به طور عمده به صورت زمین‌های کشاورزی و همچنین منطقه مسکونی استفاده شده است. جنس مواد بستر در طول رودخانه در محدوده مورد بررسی ریزدانه می‌باشد. شیب میانگین طولی رودخانه $0/0001$ درصد می‌باشد که سبب سرعت کم جریان به هنگام عبور از مجرای پرپیچ و خم این رودخانه می‌شود. رودخانه عریض سرباز بزرگترین رودخانه فصلی بلوچستان به شمار می‌آید که در برخی از بخش‌های مسیر خود به صورت دائمی می‌باشد. وجود آب و هوای گرم و مرطوب در این منطقه موجب رونق کشاورزی در طول سال شده است. ویژگی‌های ریخت‌شناسی چهار رودخانه مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

برای مدل‌سازی رودخانه‌های گرگانرود و سرباز از نقشه‌های عوارض با مقیاس‌های $1:2000$ و برای رودخانه‌های سرجاسرود و طالقانرود از نقشه‌های عوارض با مقیاس‌های $1:1000$ استفاده شد. با توجه به مقطع‌برداری رودخانه طالقانرود با استفاده از عمق‌سنجی بستر اصلی رودخانه (به علت بالابودن تراز سطح آب هنگام نقشه‌برداری)، مدل رقومی ارتفاعی از ترکیب مقطع‌های عرضی برداشت شده و عوارض سیلابدشت ساخته شد.

عرضی در هر اجرا می‌باشد. برای افزایش دقت مدل‌سازی هنگام مقایسه فراسنجه‌های هیدرولیکی هر رودخانه، باید مقطع‌های عرضی ساخته شده برای هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی متناظر و یکسان باشند. مقطع‌های عرضی ساخته شده برای هر رودخانه با فرمت شیپ فایل (.Shp) ذخیره می‌شود. هنگام رقومی‌سازی ساحل‌های و خط القعر رودخانه برای هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی در افزونه HEC-GeoRAS، مقطع‌های عرضی به مدل فراخوانی شده و رقومی‌سازی می‌شوند. مرحله‌های مدل‌سازی این پژوهش در روندنمای شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲-۳- رودخانه‌های مورد بررسی

برای ارزیابی ارتباط بین عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی با ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه، چهار رودخانه مختلف: سرجاسرود (استان زنجان)، طالقانرود (استان البرز)، گرگانرود (استان گلستان) و رودخانه سرباز (استان سیستان و بلوچستان)، مورد نظر قرار گرفت. شکل ۲ موقعیت این رودخانه‌ها را در مقیاس کشور ایران نمایش می‌دهد.

ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه و شرایط اقلیمی حوضه آبخیز وجه تمایز این رودخانه‌ها به شمار می‌آیند، که امکان بررسی دقیق‌تر تأثیر مدل‌های رقومی ارتفاعی را در پهنه‌بندی رودخانه‌ها با ویژگی‌های متفاوت میسر می‌سازد. رودخانه سرجاسرود از مسیر کوهستانی عبور می‌کند و از نظر ساختار زمین‌شناختی در دسته‌ی رودخانه‌های جوان (با مقطع V شکل) به شمار می‌آید. دیواره این رودخانه از گیاهان مترکمی پوشیده شده که فراسنجه‌های هیدرولیکی این رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. حوضه آبخیز طالقان

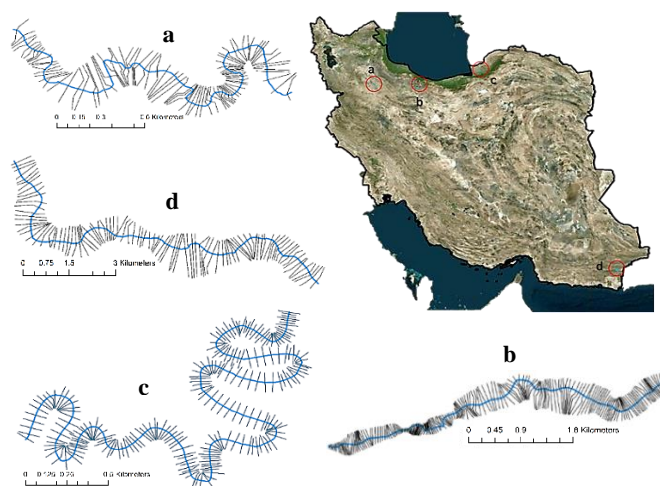


Fig. 2 Location and plan of the rivers (a: Sojasrud river, b: Taleghanrud river, c: Gorganrud river, d: Sarbaz river)
شکل ۲ موقعیت و نقشه رودخانه‌ها. a: سجاجس رود (زنجان)، b: طالقانرود (البرز)، c: گرگانرود (گلستان)، d: سرباز (سیستان و بلوچستان)

جدول ۱ ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌های مورد بررسی

Table 1 Morphology characteristics of the rivers

River	NO. of Reach	Kilometrage		Cross-Sections Scheme	Topographic Type	Plan Form	Bed Material	Sinuosity Index	Bed Slope (%)	Width (m)
		Start	End							
Taleghanrud	1	0+000	4+054	Compound	Hilly	Wide-Braided	Rubble	1.1	0.91	132
	2	4+054	4+977					1.27	0.69	32
	3	4+977	7+434					1.04	0.12	36
Sojasrud	1	0+000	1+349	Simple	Steep	Mountainous-Meandering	Coarse Sand	2.78	0.5	35
	2	1+349	2+349					1.49	0.7	33
	3	2+349	3+849					1.78	0.63	31
Sarbaz	1	0+000	6+667	Compound	Flat	Straight	Gravel	1.5	0.47	198
	2	6+667	9+667					1.09	0.49	218
	3	9+667	15+667					1.24	0.43	240
Gorganrud	1	0+000	2+147	Compound	Flat	Free-Meandering	Fine Gravel	2.99	0.03	105
	2	2+147	4+597					2.97	0.12	73
	3	4+597	6+247					2.68	0.19	62

رقومی ارتفاعی برای شبیه‌سازی سیلاب، باید از بده سیلابی با دوره برگشت ۲ سال در این رودخانه استفاده شود.

جدول ۲ بده سیلاب رودخانه‌های مورد بررسی

Table 2 Flood flows in the rivers

River	Upstream Hydrometric Station	2-year Flood Flow (Cms)	100-year Flood Flow (Cms)
Sojasrud	Balvbin	30	807.1
Sarbaz	Pishin	336.5	3342.9
Gorganrud	Aq Qala	87.7	317
Taleghanrud	Galinak	120	280.5

۴-۲- شاخص‌های آماری

در این پژوهش به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی بر مبنای مدل‌های رقومی ارتفاعی

محاسبات هیدرولیکی جریان رودخانه‌ها برای بده بیشینه سیلاب با دوره برگشت ۱۰۰ ساله در ایستگاه آب‌سنجی بالادست، برابر جدول ۲ انجام یافت. دلیل انتخاب جریان با دوره برگشت ۱۰۰ سال این است که در بده‌های کمتر، احتمال پخش جریان در سیلابدشت رودخانه کم است و جریان تنها در مجرای اصلی رودخانه قرار می‌گیرد. بنابراین امکان بررسی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در سیلابدشت رودخانه وجود نخواهد داشت (Saksena and Merwade, 2015). اما در مورد رودخانه گرگانرود به دلیل بالابودن بده سیلابی با دوره برگشت ۱۰۰ سال و شیب بسیار کم این رودخانه، جریان به سرعت وارد سیلابدشت شده و الگوی پخش سیلاب همه‌ی مدل رقومی ارتفاعی همانند یکدیگر خواهند بود. بنابراین برای در نظر گرفتن تأثیر نوع مدل

فراسنجه‌های اصلی مدل‌سازی هیدرولیکی، اهمیت بالای آنها در بررسی‌های پهنه‌بندی سیلاب می‌باشد.

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در معرفی هندسه رودخانه

مقایسه بین هندسه مقطع‌های عرضی استخراج شده از مدل‌های رقومی ارتفاعی ALOS، ASTER و SRTM با مدل رقومی ارتفاعی به دست آمده از نقشه‌های عوارض زمینی، برای چهار رودخانه مورد بررسی در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل رقومی ارتفاعی ALOS بیشترین سازگاری را در تشخیص دیواره‌های رودخانه و کف بستر آن با مقطع‌های عرضی به دست آمده از نقشه‌برداری زمین داراست. تشخیص درست بستر رودخانه در مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه بسیار با اهمیت می‌باشد. در صورت بالاتر یا پایین‌تر نشان دادن کف بستر رودخانه، پهنه سیلاب که مهم‌ترین مشخصه هیدرولیکی سیلاب به شمار می‌رود، به ترتیب بیش برآورد و کم برآورد می‌شود. شکل مقطع‌های عرضی مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی ALOS بسیار به مقطع‌های عرضی واقعی شباهت دارد که نشانگر وجود رابطه‌ای بین این رقومی ارتفاعی SRTM نیز کیفیت خوبی در تشخیص مقطع‌های عرضی دارد؛ ولی مدل رقومی ارتفاعی ASTER اختلاف‌های چشمگیری در مقطع عرضی و در نتیجه برآورد رقوم بستر و دیواره با داده‌های زمینی دارد. یکی از عامل‌های تأثیرگذار بر عملکرد ضعیف مدل رقومی ارتفاعی ASTER نحوه عملکرد عامل‌های (سنسورهای) این ماهواره است. از دیگر نقطه‌های ضعف این مدل می‌توان به برداشت سطح زمین همراه با عوارضی همچون ساختمان‌ها اشاره کرد که ایجاد خطای زیادی در مدل‌سازی رودخانه خواهد کرد. سنجنده SRTM نیز چون با برداشت عوارضی همچون پوشش گیاهی، برف و ساختمان‌ها، همچنان قادر به تشخیص هندسه رودخانه با دقت مناسبی می‌باشد. به همین دلیل برای حذف خطای ناشی از پوشش گیاهی سیلاب‌دشت در شبیه‌سازی سیلاب با این مدل رقومی ارتفاعی، روی آن اصلاح‌های ساختاری

مبتنی بر سنجش از دور نسبت به نتایج مدل‌سازی با نقشه عوارض زمینی، از شاخص‌های آماری میانگین خطای مطلق (MAD)، میانگین خطای نسبی (MAPE)، ریشه‌ی میانگین خطای مربعات (RMSE)، خطای نسبی (RE) و شاخص آماری F استفاده شد. این آماره‌ها به صورت رابطه‌های ۱ تا ۵ می‌باشند:

$$MAD(m) = \frac{\sum_{i=1}^N |x_{GDEM} - x_i|}{N} \quad (1)$$

$$MAPE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{x_{GDEM} - x_i}{x_{GDEM}} \right|}{N} \times 100 \quad (2)$$

$$RMSE(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{GDEM} - x_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$RE(\%) = \frac{x_i - x_{GDEM}}{x_{GDEM}} \times 100 \quad (4)$$

$$F(\%) = \left(\frac{A_{os}}{A_o + A_s - A_{os}} \right) \times 100 \quad (5)$$

در رابطه‌های بالا، x_{GDEM} : نتایج به دست آمده از مدل‌سازی (پهنه سیلاب، رقوم سطح آب و سرعت) با استفاده از عوارض زمینی، x_i : نتایج به دست آمده از مدل‌سازی (پهنه سیلاب، رقوم سطح آب و سرعت) با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور، N : شمار مقطع‌های عرضی در هر رودخانه، A_{os} : گستره پهنه سیلاب پیش‌بینی شده بر مبنای عوارض و دیگر مدل‌های رقومی ارتفاعی، A_o : گستره پهنه سیلاب به دست آمده با استفاده از عوارض زمینی و A_s : گستره پهنه سیلاب به دست آمده با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور.

در شرایط نبود داده مشاهده شده، شاخص F برای مقایسه کمی بین نقشه پهنه سیلاب مبنا (به دست آمده با استفاده از عوارض زمینی) و پهنه سیلاب به دست آمده با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور، استفاده می‌شود (Cook & Merwade, 2009). میزان شاخص F از ۱۰۰ درصد می‌باشد که اگر برابر ۱۰۰ به دست آید، نشانگر سازگاری کامل پهنه سیلاب به دست آمده از مدل‌سازی با پهنه سیلاب واقعی رودخانه می‌باشد (Jamali et al., 2018).

میزان کمتر شاخص‌های MAD، MAPE و RMSE، و درصد بیشتر شاخص F نشانگر بهتر بودن است. علت اصلی در نظر گرفتن پهنه سیلاب و رقوم سطح آب به عنوان

چندان قابل قبول نمی‌باشد. مدل رقومی ارتفاعی ALOS و ASTER به ترتیب با خطای میانگین نسبی (MAPE) ۱۰ تا ۳۰ درصد و ۲۰ تا ۳۵ درصد و RMSE ۲/۳ تا ۸/۶ متر و ۲/۸ تا ۱۵ متر را می‌توان بهترین و بدترین مدل رقومی ارتفاعی برای برآورد پهنه‌ی سیلاب دانست. خطای نقشه ASTER در برآورد پهنه سیلاب رودخانه‌های عریض به علت محاسبه نادرست ارتفاع کف بستر و دیواره‌های رودخانه می‌باشد. همچنین محاسبات گویای آن است که عملکرد مدل رقومی ارتفاعی SRTM از نظر میزان خطا در برآورد پهنه سیلاب در رودخانه‌های مورد بررسی دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدل رقومی ارتفاعی ALOS می‌باشد. در مورد رودخانه‌های عریض با پوشش گیاهی ضعیف در سیلابدشت رودخانه، به دلیل تشخیص دقیق‌تر هندسه رودخانه در منبع ارتفاعی مورد نظر، به تقریب دقت همه‌ی مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد پهنه سیلاب قابل قبول است، که این مسئله نشانگر تأثیر کم انتخاب منبع DEM بر پهنه سیلاب می‌باشد.

خروجی‌های به دست آمده از مدلسازی هیدرولیکی نشانگر عملکرد مطلوب DEM‌های ALOS در برآورد پهنه سیلاب و این در حالی است که نتایج به دست آمده از DEM‌های ASTER در چهار رودخانه مورد بررسی چندان قابل قبول نمی‌باشد. مدل رقومی ارتفاعی ALOS و ASTER به ترتیب با خطای میانگین نسبی (MAPE) ۱۰ تا ۳۰ درصد و ۲۰ تا ۳۵ درصد و RMSE ۳ تا ۸/۵ متر و ۳ تا ۱۵ متر را می‌توان بهترین و بدترین مدل رقومی ارتفاعی برای برآورد پهنه‌ی سیلاب معرفی کرد. خطای نقشه ASTER در برآورد پهنه سیلاب رودخانه‌های عریض به علت محاسبه نادرست ارتفاع کف بستر و دیواره‌های رودخانه می‌باشد. همچنین محاسبات گویای آن است که عملکرد مدل رقومی ارتفاعی SRTM از نظر میزان خطا در برآورد پهنه سیلاب در رودخانه‌های مورد بررسی دارای عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدل رقومی ارتفاعی ALOS می‌باشد.

در مورد رودخانه‌های عریض با پوشش گیاهی ضعیف در سیلابدشت رودخانه، به دلیل تشخیص دقیق‌تر هندسه رودخانه در منبع ارتفاعی مورد نظر، به تقریب دقت همه‌ی مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد پهنه سیلاب قابل قبول

صورت می‌پذیرد (Chen et al., 2018). با بزرگ مقیاس‌تر شدن نقشه‌ها در رودخانه کوچکی همچون سجاسرود جزئیات زیادی از دست می‌رود و در نتیجه سبب نبود زمینه استخراج درست دیواره و هندسه رودخانه و در نتیجه مدلسازی نادرست جریان می‌شود.

۳-۲- ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در تهیه نقشه پهنه سیلاب

فراسنجه‌های هیدرولیکی مورد استفاده در این پژوهش پهنه سیلاب و تراز سطح آب می‌باشد که مهم‌ترین شاخص‌های هیدرولیکی سیلاب برای تهیه نقشه‌های پهنه سیلاب و نقشه‌های خطرپذیری سیلاب به شمار می‌روند. این شاخص‌ها در اغلب پژوهش‌های پیشین مانند Saksena & Merwade (2015) و Azizian & Brocca (2019) برای ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاعی در پهنه‌بندی سیلاب استفاده شده‌اند. در هنگام مدلسازی فراسنجه‌های هیدرولیکی دیگر مانند سرعت و عدد فرود به دلیل تغییرپذیری کم در شرایط تشکیل جریان زیربحرانی به مقایسه دقیق بین مدل‌ها منجر نمی‌شود. بنابراین از بررسی عملکرد منبع‌های ارتفاعی بر مبنای تغییرپذیری این فراسنجه‌ها صرف نظر می‌شود. در رخدادهای سیلاب، برآورد پهنه سیلاب و تشخیص و اولویت‌بندی منطقه‌هایی که در معرض خطر سیلاب قرار دارند، موجب کارآمدی برنامه‌ریزی عملیات امداد و نجات به هنگام می‌شود. به منظور بررسی اثر نوع مدل رقومی ارتفاعی بر پهنه سیلاب و تراز سطح آب، مدل HEC-RAS برای هر یک از رودخانه‌های مورد بررسی و برای هر مدل رقومی ارتفاعی با شرایط مرزی، ضریب مانینگ و بده طراحی یکسان اجرا شد و نتایج به دست آمده با میزان‌های همانند به دست آمده از مدلسازی با مدل ساخته شده از نقشه عوارض واقعی (نقشه مینا) مقایسه شد. اختلاف بین این میزان‌های به صورت شاخص‌های آماری به صورت جدول‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. خروجی‌های به دست آمده از مدلسازی هیدرولیکی نشانگر عملکرد مطلوب DEM‌های ALOS در برآورد پهنه سیلاب و این در حالی است که نتایج به دست آمده از DEM‌های ASTER در چهار رودخانه مورد بررسی

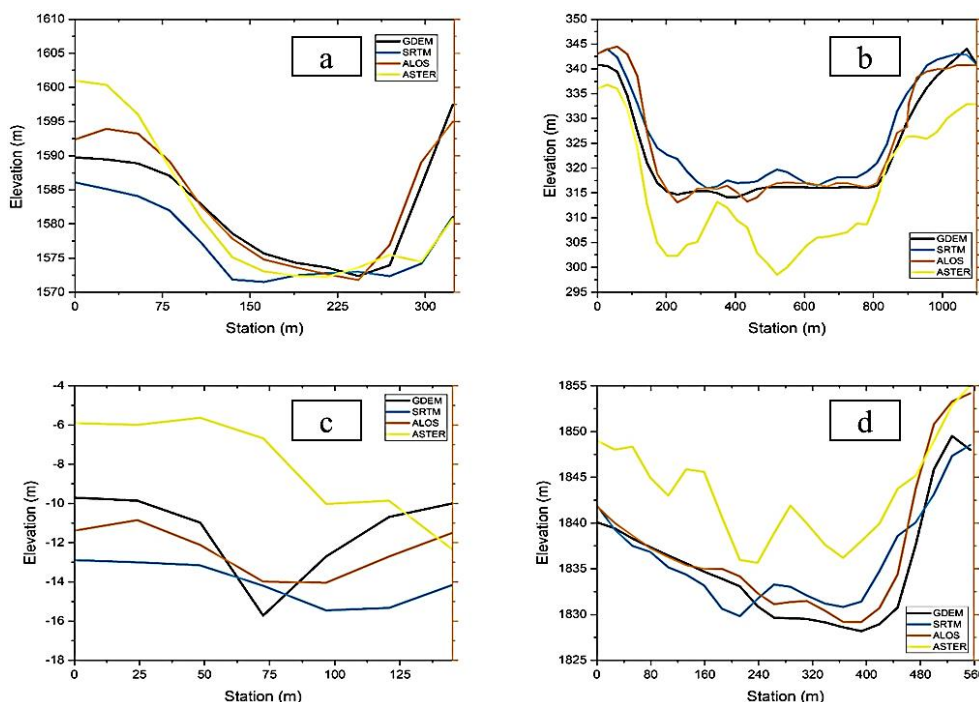


Fig. 3 Comparison of cross-sections derived from various DEM sources in the rivers (a: Sojasrud river, b: Sarbaz river, c: Gorganrud river, d: Taleghanrud river)

شکل ۳ مقایسه مقطع‌های عرضی چهار رودخانه مورد بررسی توسط منابع‌های ارتفاعی مختلف. a: سجاجس رود، b: سرباز، c: گرگانرود، d: طالقانرود

جدول ۳ شاخص‌های آماری برآورد پهنه سیلاب از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در رودخانه‌های سجاجس رود و سرباز

Table 3 Statistical indices for flood mapping by using different DEMs (Sojasrud and Sarbaz rivers)

DEM	Sojasrud river			F (%)	Sarbaz river			F (%)
	MAD (m)	RMSE (m)	MAPE (%)		MAD (m)	RMSE (m)	MAPE (%)	
GDEM	Reference Map			-	Reference Map			-
ALOS	21.22	2.91	16.9	82.02	60.57	8.63	9.92	85.31
SRTM	26.87	3.68	21.93	73.67	96.17	13.54	14.87	78.19
ASTER	35.59	4.58	27.87	65.23	116.68	15.15	15.59	68.14

جدول ۴ شاخص‌های آماری برآورد پهنه سیلاب از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در رودخانه‌های گرگانرود و طالقانرود

Table 4 Statistical indices for flood mapping by using different DEMs (Gorganrud and Taleghanrud rivers)

DEM	Gorganrud river			F (%)	Taleghanrud river			F (%)
	MAD (m)	RMSE (m)	MAPE (%)		MAD (m)	RMSE (m)	MAPE (%)	
GDEM	Reference Map			-	Reference Map			-
ALOS	27.91	2.3	30.22	55.87	38.53	3.87	23.33	73.58
SRTM	27.91	2.29	30.4	54.46	65.5	6.85	35.54	57.69
ASTER	33.54	2.87	35.07	49.14	69.2	7.08	39.28	53.07

بررسی میزان شاخص F بین ۷۵ تا ۸۵ درصد (به غیر از گرگانرود) متغیره بوده و این بدین معنی است که تطابق خیلی زیادی با نتایج به دست آمده از نقشه‌های عوارض زمین دارا می‌باشد. برخلاف منبع ارتفاعی مذکور، نتایج به

است، که این مسئله نشانگر تأثیر کم انتخاب منبع DEM بر پهنه سیلاب می‌باشد. تحلیل نتایج بر مبنای شاخص F (شکل ۴)، نشان می‌دهد که مدل رقومی ارتفاعی ALOS در همه‌ی بازه‌های مورد

کف بستر رودخانه‌های با بستر مرکب است که اهمیت در نظر گرفتن ضریب پیچشی را در انتخاب مدل رقومی ارتفاعی مناسب برای مدل‌سازی هیدرولیک رودخانه خاطر نشان می‌سازد.

۳-۳- ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد تراز سطح آب و عمق آب

تراز سطح آب از مهم‌ترین اجزای سیلاب در تهیه نقشه‌های خطر سیلاب می‌باشد. شکل ۶ به طور نمونه رخ‌نمای (پروفیل) طولی تراز سطح آب در رودخانه سجاجس رود را برای مدل‌سازی‌های مختلف را نشان می‌دهد. به طور کلی، دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد تراز سطح آب سیلاب رودخانه‌های کوهستانی و پرشیب فارغ از نوع ریخت‌شناسی آن‌ها می‌باشد. خطای مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد تراز سطح آب سیلاب در رودخانه‌های پرشیب و کوهستانی بسیار کمتر از رودخانه‌های سیلابدشتی و کم شیب می‌باشد. خطای مطلق مقطع‌های عرضی رودخانه‌های مورد بررسی در برآورد تراز سطح آب سیلاب ارزیابی و مقایسه شد. با توجه به نتایج، اختلاف عمق با مدل رقومی ارتفاعی ALOS در مورد همه‌ی رودخانه‌ها کمتر از دیگر منابع‌های ارتفاعی است. همچنین اختلاف بین عمق شبیه‌سازی شده و واقعی توسط مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER در مورد رودخانه‌های سجاجس رود، سرباز و طالقانرود بسیار همانند هم‌دیگر بوده که در بیشتر موارد بیش برآورد عمق توسط این دو مدل پدید آمده است. به طور مثال خطای MAPE منابع‌های ارتفاعی ALOS و SRTM در برآورد تراز سطح آب رودخانه-های سجاجس رود، سرباز و طالقانرود زیر ۱ درصد است. برآورد همه‌ی منابع‌های ارتفاعی موجود از عمق جریان سیلابی رودخانه سرباز بسیار خوب و با اختلاف کمتری همراه بوده است که عملکرد خوب این منابع‌های ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور را در برآورد عمق سیلاب رودخانه‌های همانند رودخانه‌ی سرباز نشان می‌دهد. همچنین برآورد تراز سطح آب همانند پهنه سیلاب بسیار متأثر از ضریب پیچشی رودخانه‌ها می‌باشد، به طوری که خطای نسبی همه‌ی منابع‌های ارتفاعی در برآورد تراز سطح آب رودخانه

دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی ASTER گویای میزان کم شاخص F در همه‌ی بازه‌های مورد بررسی دارد به طوری که بیشینه میزان این شاخص در حدود ۶۵ درصد می‌باشد. بنابراین استفاده از مدل ASTER در پهنه‌بندی رودخانه‌هایی با ویژگی‌های همانند رودخانه‌های سرباز، سجاجس رود، طالقانرود و گرگانرود، نتایج ناکارآمدی را به ارمغان خواهد داشت. از میان بازه‌های مطالعاتی، رودخانه گرگانرود دارای کمترین میزان شاخص F (در حدود ۵۵ درصد) بوده و این بدین معنی است که منابع‌های ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور در چنین رودخانه‌هایی که دارای وضعیت پیچانرودی شدیدی هستند، دقت ارتفاعی لازم را ندارند.

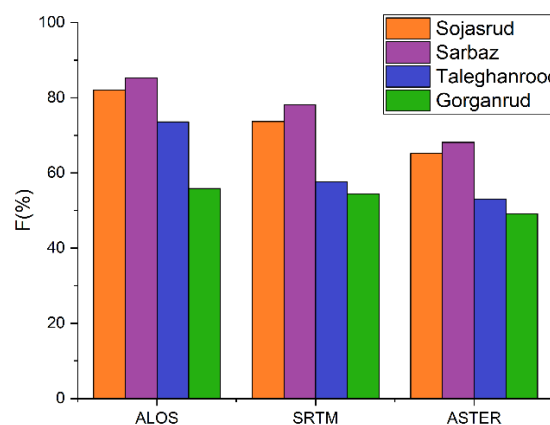


Fig. 4 Performance of DEMs in flood mapping based on F-index in the rivers

شکل ۴ مقایسه پهنه سیلاب چهار رودخانه مورد بررسی توسط منابع‌های ارتفاعی مختلف با شاخص F

نقشه پهنه سیلاب چهار رودخانه‌ی طالقانرود و سرباز و گرگانرود و سجاجس رود، برای منابع‌های ارتفاعی مختلف، ارزیابی شد. نمونه آن برای طالقانرود در شکل ۵ نمایش داده شده است. با توجه به الگوی پخش سیلاب می‌توان دقت بالای مدل ALOS در برآورد پهنه سیلاب را مشاهده کرد. در قوس‌های رودخانه‌های مورد بررسی پهنه سیلاب با خطای بیشتری نسبت به بازه‌های مستقیم همراه بوده است. دلیل زیاده‌تر بودن خطا در مدل‌سازی پهنه سیلاب رودخانه‌های پیچانرودی نسبت به رودخانه‌های مستقیم، عملکرد ضعیف مدل‌های رقومی ارتفاعی در تشخیص رقوم کف بستر رودخانه‌های با بستر مرکب است تشخیص رقوم

نماینده هندسه رودخانه‌های پیچانرودی در پهنه‌بندی سیلاب می‌باشد.

پیچانرودی گرگانرود بالای ۵ درصد بوده، که این نشانگر نامناسب بودن کاربرد این منبع‌های ارتفاعی به عنوان

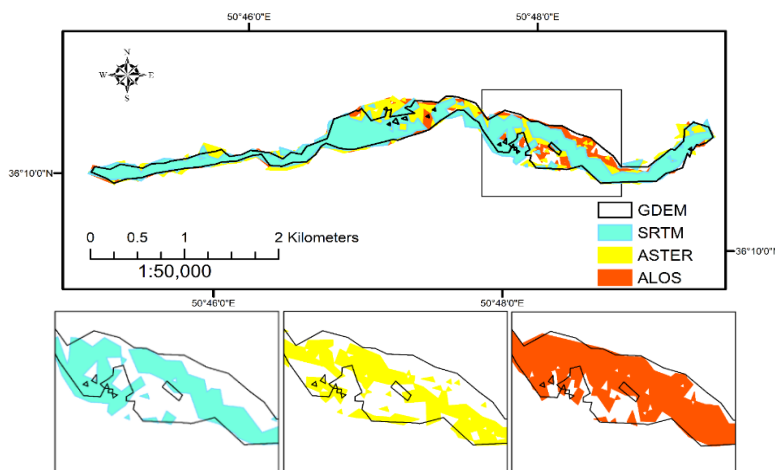


Fig. 5 Comparison of simulated 100-year flood mapping with GIS-based DEMs (Taleghanrud river)
 شکل ۵ مقایسه پهنه سیلاب رودخانه طالقانرود به ازای بده با دوره برگشت ۱۰۰ سال با مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف

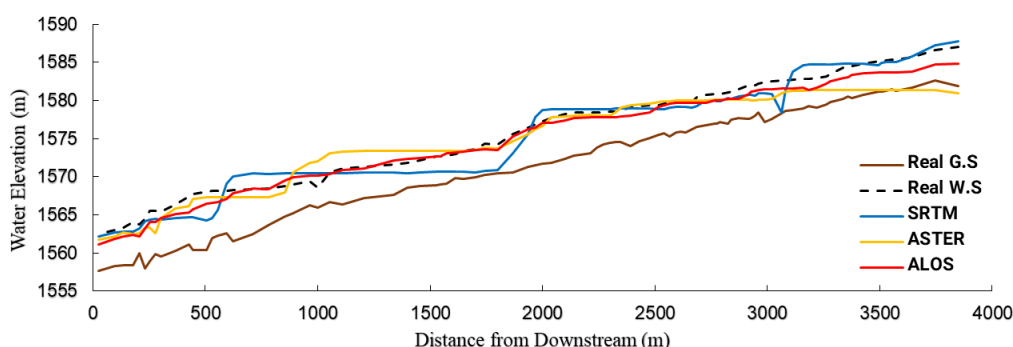


Fig. 6 Longitudinal Water-Surface Profile using DEMs (Sojasrud river)

شکل ۶ رخ‌نمای طولی تراز سطح آب سجاسرود

باتوجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که خطای نسبی منبع‌های ارتفاعی SRTM و ALOS در برآورد پهنه سیلاب زیر بازه رودخانه‌هایی با ضریب پیچشی کمتر از ۲، زیر ۲۰ درصد بوده است. همچنین بهترین عملکرد ALOS و SRTM در ضریب پیچشی بین ۱/۲۵ و ۱/۵ مشاهده می‌شود. خطای مدل رقومی ارتفاعی ASTER در رودخانه‌هایی با ضریب پیچانرودی ۲/۷۵ و بیشتر، کمتر می‌باشد. بررسی ارتباط بین شیب کف بستر رودخانه و دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در برآورد پهنه سیلاب، برابر شکل ۷ نشانگر عملکرد ضعیف همه مدل‌های رقومی ارتفاعی در رودخانه‌هایی با شیب‌های کمتر از ۰/۲۵ درصد می‌باشد.

۳-۴- ارتباط بین عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی و

ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها

به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی‌های رودخانه‌های مورد بررسی و عملکرد هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی با توجه به ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه (مانند: شیب، ضریب پیچشی و عرض میانگین رودخانه)، هریک از بازه‌های مورد بررسی رودخانه‌های مورد نظر به زیربازه‌هایی تقسیم شدند، که ویژگی‌های هریک در جدول ۱ ارائه شده است. نمودارهای خطای منبع‌های ارتفاعی مختلف در شبیه‌سازی پهنه سیلاب در مقابل عامل‌های ریخت‌شناسی هر یک از چهار رودخانه مورد بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است.

کمترین تأثیر را در برآورد پهنه سیلاب توسط منابع‌های ارتفاعی یاد شده دارند. بنابراین هنگام استفاده از منابع‌های ارتفاعی یاد شده در رودخانه‌های کم شیب و عریض مانند گرگانرود، انتظار خطای بالایی در برآورد پهنه سیلاب را باید داشت. درعین حال عملکرد این منابع‌های ارتفاعی در رودخانه‌های مستقیم یا با ضریب پیچشی کم (مانند: سجاس‌رود و سرباز) بسیار به واقعیت نزدیک می‌باشد.

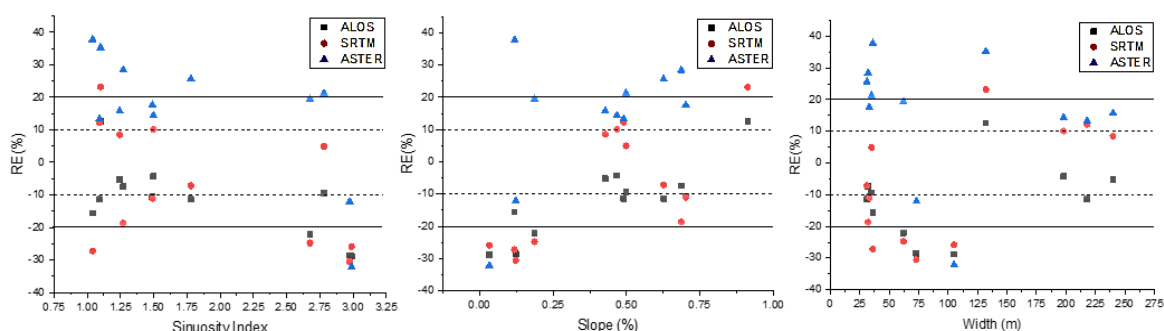


Fig.7 Relation among river morphology parameters and the RE of the predicted flood extent using different DEMs

شکل ۷ ارتباط بین ضریب پیچشی، شیب و عرض میانگین زیربازه‌های رودخانه‌ها و خطای نسبی منابع‌های ارتفاعی در تعیین پهنه سیلاب

پایگاه داده در بسیاری از منطقه‌های جهان، در عوض از مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان با توان تفکیک مکانی ۳۰ متر مانند ALOS، SRTM و ASTER استفاده می‌شود. در بررسی‌های سیلاب رودخانه‌های ایران اغلب به دلیل نبود زمینه اطمینان به دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی رایگان از کاربرد آن صرف نظر می‌شود و با صرف زمان و هزینه زیادی نقشه‌های عوارض زمین با مقیاس ۱:۱۰۰۰ و ۱:۲۰۰۰ تهیه می‌شود. بنابراین با توجه به اهمیت بالای توان تفکیک مکانی مدل‌های رقومی ارتفاعی در دقت مدل‌های هیدرولیکی، عملکرد این مدل در شبیه‌سازی سیلاب رودخانه‌هایی با ویژگی‌های متفاوت ریخت‌شناسی باید بررسی شود تا نقطه‌های قوت و ضعف آن‌ها مشخص شود. زیرا ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به طور مستقیمی در ارتباط با دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی می‌باشد. در بیشتر این بررسی‌ها تنها ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاعی یا مدل‌های ریاضی در مدل‌سازی هیدرودینامیکی جریان رودخانه‌ها مطرح بوده است و تأثیر ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در تعیین فراسنجه‌های هیدرولیکی سیلاب نادیده گرفته می‌شده است.

دقت مدل‌های ALOS و SRTM در برآورد پهنه سیلاب رودخانه‌های با شیب حدود ۰/۵ درصد بهتر از رودخانه‌های با شیب بیشتر ۰/۷۵ درصد یا کمتر از ۰/۲۵ درصد است. نتایج به‌دست آمده از شکل ۷ نبودن ارتباط مشخصی را بین دقت شبیه‌سازی پهنه سیلاب مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور با عرض میانگین رودخانه نشان می‌دهد. بنابراین ضریب پیچشی بیشترین و عرض میانگین رودخانه

۴- نتیجه‌گیری

روش یکپارچه مدل‌سازی هیدرولیکی و سنجش از دور با استفاده از روش‌های GIS، منجر به پیش‌بینی سریع و کم-هزینه‌ی سیلاب می‌شود. هندسه رودخانه به عنوان اصلی-ترین ورودی مدل‌های هیدرولیکی به شمار می‌آید. نقشه-های عوارض واقعی رودخانه و سیلاب‌دشت‌ها در بررسی‌های پیشین مهندسی رودخانه و سیلاب به عنوان ورودی هندسه رودخانه به مدل‌های شبیه‌سازی سیلاب مانند HEC-RAS معرفی می‌شدند. با وجود دقت بالای عوارض در پهنه‌بندی سیلاب، صرف هزینه و زمان زیاد برای تهیه نقشه‌های حد بستر و پهنه سیلاب پاسخگوی حجم زیاد کار رودخانه‌های ایران نیست. مشکل دیگر در نقشه‌برداری، محدودیت‌های ابزاری در برداشت تراز کف رودخانه‌ها می‌باشد. با پیشرفت علم رایانه و سنجش از دور، مدل‌های رقومی ارتفاعی با توان تفکیک مکانی (رزولوشن) و دقت بالایی تهیه شده‌اند که پوشش جهانی دارند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به LiDAR اشاره کرد که با توان تفکیک مکانی زیر ۱۰ متر استفاده گسترده‌ای در بررسی‌های مهندسی رودخانه کشور آمریکا دارد. به دلیل گران بودن و نبود دسترسی به این

محدودیت‌های این مدل‌ها به شمار می‌رود. به طور مثال بهترین عملکرد ALOS و SRTM در رودخانه‌هایی با ضریب پیچشی بین ۱/۲۵ و ۱/۵ و مدل رقومی ارتفاعی ASTER با ضریب پیچشی کمتر از ۲/۷۵ مشاهده می‌شود. در رودخانه‌های کم شیب (کمتر از ۰/۲۵ درصد) عملکرد همه مدل‌های رقومی ارتفاعی ضعیف می‌باشد. ولی ارتباط مستقیم بین عرض رودخانه‌ها و دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در مدلسازی پهنه سیلاب وجود ندارد. ضعف اصلی همه‌ی این مدل‌ها در تشخیص رقوم کف رودخانه می‌باشد که مدل ALOS تا حد قابل قبولی قادر به تشخیص این میزان‌ها است. در نتیجه برای بهبود عملکرد نتایج پهنه‌بندی توصیه می‌شود از روش‌های اصلاحی DEM برای بهبود عملکرد این مدل‌ها استفاده شود.

با توجه به نتایج این تحقیق، اگرچه با قاطعیت نمی‌توان ادعا کرد که منبع ارتفاعی ALOS همواره نتایج خوبی را در همه منطقه‌ها در بر خواهد داشت، ولی یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت نبود نقشه‌های عوارض زمینی، این منبع ارتفاعی می‌تواند جایگزین مناسب و شایسته در مبحث مدلسازی پهنه‌های سیلاب باشد. از این رو، نتایج بررسی‌های ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی در حوضه‌های بدون آمار، پروژه‌هایی با کمبود منبع‌های مالی و همچنین در بررسی‌های اولیه رودخانه و سیلاب قابل استفاده‌اند و این منبع‌های ارتفاعی به عنوان جایگزین مناسبی برای نقشه‌های عوارض زمینی به شمار می‌آیند.

۵- منبع‌ها

Adams, T., Chen, S., Davis, R., Schade, T., and Lee, D. (2010). The Ohio River Community HEC-RAS Model. World Environmental and Water Resources Congress 2010. doi:10.1061/41114(371)160

Anees, M.T., Abdullah, K., Nawawi, M.N.M., Ab Rahman, N.N.N., Piah, A.R.M., Zakaria, N.A., and Mohd Omar, A.K. (2016). Numerical modeling techniques for flood analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 478-486. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2016.10.001

Arash, A.M., Yasi, M., Azizian, A. and Farhoudi, J. (2019). Studying Adequacy of ALOS, ASTER and SRTM DEMs for Hydraulic Modelling and Inundation Mapping in Areas with Data Scarcity. 7th

در این پژوهش عملکرد مناسب‌تر ALOS در پهنه‌بندی سیلاب با توجه به تشخیص دقیق‌تر هندسه رودخانه‌ها، برآورد پهنه سیلاب و تراز سطح آب با خطای کمتر نسبت به دیگر منبع‌های ارتفاعی، اثبات شد. مدل رقومی ارتفاعی ASTER به دلیل تشخیص جزئیات و رقوم کف رودخانه‌ها، خطای خیلی زیادی نسبت به ALOS و SRTM را ارائه داد. مدل SRTM عملکرد بسیار بهتری را نسبت به ASTER دارا بوده و در مورد رودخانه‌های پیچانرودی مانند گرگانرود، همانندی زیادی به نتایج ALOS نشان داده است. مدل رقومی ارتفاعی ALOS با RMSE بین ۲/۳ تا ۸/۶ متر کمترین خطا در تعیین پهنه سیلاب داشته است. با توجه به اینکه این مدل بیشترین میزان شاخص F (حدود ۸۰ درصد) را در مقایسه با دیگر مدل‌ها داشته است، نقشه پهنه سیلاب و الگوی پخش سیلاب تهیه شده از این مدل همانندی بیشتری نسبت به پهنه سیلاب واقعی این رودخانه‌ها داشته است.

مدل رقومی ارتفاعی ALOS بیشترین دقت را در برآورد تراز سطح آب دارد که در مورد همه‌ی رودخانه‌های این پژوهش صادق است. با وجود اینکه مدلسازی با مدل رقومی ارتفاعی SRTM دقت خوب و نتایج نزدیک به واقعیت را نشان می‌دهد، بهترین عملکرد را مدل ALOS داراست. خطای MAPE منبع‌های ارتفاعی ALOS و SRTM در برآورد تراز سطح آب رودخانه‌های سجاسرود، سرباز و طالقانرود زیر ۱ درصد است. با اینکه مدل رقومی ارتفاعی ALOS کمترین خطا نسبی را در برآورد تراز سطح آب رودخانه‌ی سجاسرود نسبت به دیگر رودخانه‌ها دارد، عملکرد کلی همه‌ی منبع‌های ارتفاعی در برآورد تراز سطح آب رودخانه‌های عریض با دقت مناسب و قابل اعتمادی صورت گرفته است. این در حالی است که در رودخانه عریض گرگانرود به دلیل پیچانرودی بودن خطای MAPE همه‌ی مدل‌ها در برآورد تراز سطح آب بالای ۵ درصد بوده است. بنابراین از تأثیر ویژگی‌های ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در مدلسازی هیدرولیکی سیلاب نمی‌توان چشم‌پوشی کرد.

در مجموع عملکرد مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور در مورد رودخانه‌های باریک و پیچانرودی ضعیف‌تر از رودخانه‌های مستقیم یا عریض می‌باشد که از

- Water Resources Research, 54(2), 1031–1057. doi:10.1002/2017wr021765
- Haile, A. and Rientjes, T. (2005). Effects of LiDAR DEM resolution in flood modelling: A model sensitivity study for the city of Tegucigalpa, Honduras. In Proceedings of the ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Laser Scanning Workshop (pp. 168–173). Enschede, the Netherlands: ISPRS.
- Heidari, K., Momeni Goldiani, M. and Mardokh Por, A.R. (2019). Flood Hazard Mapping Using HEC-RAS (Case study: Emam Zadeh Ebrahim River, Gilan Province). 6th National Conference on Applied research in Civil Eng., Architecture and Urban Management., Tehran, Iran.
- Horritt, M.S. and Bates, P.D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1-4), 87–99. doi:10.1016/s0022-1694(02)00121-x
- Jamali, B., Löwe, R., Bach, P.M., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K. and Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, 564, 1085–1098. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.064
- Jarihani, A.A., Callow, J.N., McVicar, T.R., Van Niel, T.G. and Larsen, J.R. (2015). Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. *Journal of Hydrology*, 524, 489–506. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.049
- Jarihani, A.A., Callow, N., Johansen, K. and Gouweleeuw, B. (2013). Evaluation of multiple satellite altimetry data for studying inland water bodies and river floods. *Journal of Hydrology*, 505, 78-90. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.010
- Jung, Y. and Merwade, V. (2012). Uncertainty Quantification in Flood Inundation Mapping Using Generalized Likelihood Uncertainty Estimate and Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(4), 507–520. doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0000476
- Jung, Y. and Merwade, V. (2014). Estimation of uncertainty propagation in flood inundation mapping using a 1-D hydraulic model. *Hydrological Processes*, 29(4), 624–640. doi:10.1002/hyp.10185
- Khanna, R.K., Agrawal, C.K. and Kumar, P., (2018). Remote sensing and GIS applications in flood management. Central Water Commission New Delhi, India.
- Kwak, Y. (2017). Nationwide Flood Monitoring for Disaster Risk Reduction Using Multiple Satellite Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(7), 203. doi:10.3390/ijgi6070203
- Comprehensive Conference on Flood Engineering and Management., Tehran, Iran. (In Persian)
- Azizian, A. (2019). The Effects of Topographic Map Scale and Costs of Land Surveying on Geometric Model and Flood Inundation Mapping. *Water resources management*, 33, 1315-1333. doi: 10.1007/s11269-019-2202-y.
- Bagheri, A. and Torkaman Zadeh, M.H. (2018). Flood Hazard Mapping in Gabrik Watershed. *J. Water Engineering*. 6(4), 249-256. (In Persian)
- Bates, P.D., Horritt, M.S., Aronica, G. and Beven, K. (2004). Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data. *Hydrological Processes*, 18(17), 3347–3370. doi:10.1002/hyp.1499
- Bates, P.D., Wilson, M. D., Horritt, M. S., Mason, D. C., Holden, N., & Currie, A. (2006). Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne synthetic aperture radar imagery: Data analysis and modelling. *Journal of Hydrology*, 328(1-2), 306–318. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.12.028
- Burdziakowski, P. (2018). UAV in todays photogrammetry - application areas and challenges. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 18(2.3), 241-248.
- Chen, H., Liang, Q., Liu, Y. and Xie, S. (2018). Hydraulic correction method (HCM) to enhance the efficiency of SRTM DEM in flood modeling. *Journal of Hydrology*, 559, 56–70. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.056
- Cook, A. and Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 131–142. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.015
- Costabile, P. and Macchione, F. (2015). Enhancing river model set-up for 2-D dynamic flood modelling. *Environmental Modelling & Software*, 67, 89–107. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.01.009
- CRED & UNISDR (2015). The human costs of weather-related disasters.
- Grimaldi, S., Li, Y., Pauwels, V.R.N. and Walker, J. P. (2016). Remote Sensing-Derived Water Extent and Level to Constrain Hydraulic Flood Forecasting Models: Opportunities and Challenges. *Surveys in Geophysics*, 37(5), 977–1034. doi:10.1007/s10712-016-9378-y
- Grimaldi, S., Li, Y., Walker, J.P. and Pauwels, V.R. N. (2018). Effective Representation of River Geometry in Hydraulic Flood Forecast Models.

- Structures on River Flood Extent Using HEC-RAS and ArcGIS Softwares. Case study: Babolrood River, Mazandaran. *J. Geography and Environmental Hazards*, 6(22), 163-182. (In Persian)
- Special Reporting Committee on Iran Floods (2019). Report of River Engineering and Hydraulic Structures Working Group. University of Tehran. (In Persian)
- Teng, J., Vaze, J., Dutta, D. and Marvanek, S. (2015). Rapid Inundation Modelling in Large Floodplains Using LiDAR DEM. *Water Resources Management*, 29(8), 2619–2636. doi:10.1007/s11269-015-0960-8
- World Meteorological Organization. (2014). Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970-2012). World Meteorological Organization.
- Yasi, M. and Nasiri Soltan Ahmadi, L. (2017). Simulation and Evaluation of Perennial Rivers Flows with HEC-RAS and RubarBE Models. *J. Water and Soil Science-University of Tabriz*, 27(2), 225-236. (In Persian).
- Kumar, A., Dasgupta, A., Lokhande, S. and Ramsankaran, R. (2019). Benchmarking the Indian National CartoDEM against SRTM for 1D Hydraulic Modelling. *International Journal of River Basin Management*, 1–39. doi:10.1080/15715124.2019.1606816
- Mersel, M.K., Smith, L.C., Andreadis, K.M. and Durand, M.T. (2013). Estimation of river depth from remotely sensed hydraulic relationships. *Water Resources Research*, 49(6), 3165–3179. doi:10.1002/wrcr.20176
- Merwade, V., Cook, A. and Coonrod, J. (2008b). GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, 23(10-11), 1300–1311. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.03.005
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M. and Edleman, S. (2008a). Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608–620. doi:10.1061/(asce)1084-0699(2008)13:7(608)
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L. and Aronica, G. T. (2016). Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Natural Hazards*, 83(S1), 117–132. doi:10.1007/s11069-016-2382-1
- Puno, G.R., Amper, R.A.L., Opiso, E.M. and Cipriano, J.A.B. (2019). Mapping and analysis of flood scenarios using numerical models and GIS techniques. *Spatial Information Research*. doi: 10.1007/s41324-019-00280-2
- Saadatseresht, M., Hashempour, A.H., and Hasanlou, M. (2015). UAV photogrammetry: a practical solution for challenging mapping projects. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 619.
- Saksena, S. and Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180–194. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.069
- Sanders, B.F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. *Advances in Water Resources*, 30(8), 1831–1843. doi: 10.1016/j.advwatres.2007.02.005
- Shahbazi, Ch. (2016). Comparison Evaluation of DTM Production Using LiDAR Aerial and Satellite Image Data, M.Sc Thesis, Islamic Azad University Shahrood Branch, Shahrood, 107p. (In Persian)
- Sistani Badouie, M., Negaresh H. and Fotouhi, S. (2017). Investigating the Effect of Construction