Iranian Hydraulic Association
Journal of Hydraulics
Vol. 20, No. 4, PP. 1-21, Winter 2026

Research Article
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.432211.1689

Analyzing the Impact of Parallel Processing and Various Discretization Methods on the Speed and Accuracy of Flood Modeling Using the STE Software

Reza Teimourey[1], Amir Ahamd Dehghani[2]*, Mahdi Meftah Halaghi[3]

1- Ph.D. Candidate Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

2- Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Golestan, Iran.

* **a.dehghani@gau.ac.ir**

Received: 25 December 2023
Accepted: 14 October 2024
Discussion: 21 March 2026

J. Hydraul.
Iranian Hydraulic Association
Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: In recent decades, as climate change has intensified, flood risks pose a greater threat to countries than ever before. These events have resulted in significant losses, including the tragic loss of thousands of lives and substantial economic damages due to severe and flash floods. Rapid estimation of flood extents is one of the most important and crucial things in emergency management and reducing damages caused by floods. To mitigate risks, damages, and challenges, leveraging available data and meteorological forecasts are crucial for better identifying flood extents and pinpointing the exact locations of impacts. This information empowers us to take prompt and necessary actions to reduce risks and minimize damages effectively. With the advancement of computers, achieving a method for precise and rapid flood mapping is now possible. For this purpose, extensive studies have been conducted in the past, and significant advancements have been made in two-dimensional hydraulic flood modeling and floodplain mapping, with suitable 2D equations now available for use. However, one of the most critical and impactful factors affecting both the accuracy and speed of 2D flood modeling is the discretization of the solution domain, an area that still requires further research. Employing the right method can significantly enhance modeling speed while maintaining accuracy, thereby reducing the time needed for completing the modeling process, floodplain mapping, and identifying flood-prone areas. This study presents and evaluates various classical discretization methods and subgrid variability approaches, focusing on parallel processing to accelerate 2D flood modeling.

Methodology: In this study, the 2D-shallow water equations were solved by developing a new user-friendly module of STE software. The impact of parallel processing and various classical and subgrid variability discretization methods on the speed and accuracy of the obtained flood-prone areas has been studied. The model results were compared with Sentinel-2 satellite and HEC-RAS results for the 2019 flood in the Golestan province, Gorganrood River. In order to model 2D surface water flow, the shallow water equations, which are based on assumptions derived from the Navier-Stokes equations, are considered. The key point to simplify these equations is to locally approximate the inertial term based

on the assumption of the negligible contribution of the convective acceleration term compared to the other terms of the equations. Therefore, it is possible to neglect the mentioned term, and the simplified equations, named local inertial approximation, can be written as the relations (4) to (6). These equations have been solved in the developed software of the present study using the finite difference method using both implicit and semi-implicit schemes.

In this study, new user-friendly module of STE software has been undertaken with an extension named STEGIS. This extension is tasked with conducting geographical analyses and performing all GIS operations and two-dimensional calculations, presenting the results, and analyzing them. In the development of this extension, efforts have been made to incorporate all the necessary tools for users in a way that eliminates the need for separate software such as QGIS, Arcmap, HEC-RAS, HEC-HMS, etc., during hydraulic, hydrological, and other modeling and analyses. Therefore, the aim is to make all the necessary tools for working with raster, vector, and geographical files, as well as performing hydraulic, hydrological, and topographic calculations and analyses, readily accessible to the user in this extension and making it easier to use. For more information, please visit www.en.ste.hwstr.ir.

Results and Discussion: This research showed that increasing cell size in discretization methods can reduce flood modeling time by up to 90% while maintaining acceptable accuracy. The developed STE software matches HEC-RAS in modeling accuracy, but significantly outperforms it in speed, completing simulations about 95% faster. The Hybrid and Min methods yield similar runtimes, though Hybrid offers better accuracy across cell sizes. The discretized Face (DF) method improves accuracy by about 1% over the cross-sectional Face (CF) method but takes 8%–40% more time. At the Voshemgir Dam inlet, both tools provided accurate hydrographs for all cell sizes. Accuracy in flow discharge was not significantly affected by increased cell size, with no major water volume errors. Efficiency improved with larger cells up to 150 meters, with subgrid methods maintaining performance beyond that. The Hybrid method at 150 meters was most efficient. Parallel processing reduced modeling time by up to 65%, especially for small cell sizes, with its benefits increasing with the number of cells and processor cores.

Conclusion: The methods evaluated in this study not only increased modeling speed and reduced the time required to complete flood modeling but also demonstrated satisfactory accuracy. These methods can serve as effective tools for rapid flood modeling, enabling quicker identification of flood-prone areas, timely notifications, and evacuation of at-risk regions, ultimately helping to reduce casualties and financial losses.

Keywords: Rapid flood modeling, HEC-RAS software, STE software, classical meshing, subgrid variability meshing, shallow water equations, parallel processing.

Conflict of Interest: The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

Funding: The financial support of this research has been provided by Grant for PhD thesis, and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources for their support.

Data Availability Statements: The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution:

First Author: Code development and results analysis.

Second Author: Developing the paper idea and results analysis.

Third Author: Paper editing.

انجمن هیدرولیک ایران
نشریه هیدرولیک
سال ۲۰، شماره ۴، صفحات ۱-۲۱، زمستان ۱۴۰۴

مقاله پژوهشی
https://doi.org/10.30482/jhyd.2024.432211.1689

بررسی تاثیر پردازش موازی و روش‌های مختلف شبکه‌بندی در سرعت و دقت مدلسازی سیلاب با استفاده از نرم‌افزار STE

رضا تیموری[۱]، امیراحمد دهقانی[۲]*، مهدی مفتاح هلقی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۲- استاد، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

* a.dehghani@gau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳، نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱ وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: پهنه‌بندی سریع سیلاب یکی از مهمترین و اساسی ترین موارد در مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از سیل است. تحلیل و نمایش دقیق پهنه سیل به مراجع ذی‌ربط کمک می‌کند تا متوجه شرایط سیل، خطرات و تهدیدات آن قرار گرفته و به موقع اقدامات لازم را انجام دهند. به منظور کاهش خطرات، خسارات و مواجهه به موقع، نیاز است تا بتوان پهنه سیلاب و نواحی از منطقه مورد تهدید که دچار آبگرفتگی و خسارت خواهد شد را به سرعت شناسایی کرده و اقدامات لازم انجام شود. در این تحقیق، با توسعه بخش دوبعدی نرم‌افزار کاربر پسند STE و ارائه روش‌های مختلف شبکه‌بندی کلاسیک و تغییرات درون سلولی اقدام به حل سریع‌تر معادلات آب کم عمق شده و تاثیر پردازش موازی بر سرعت و دقت پهنه‌های بدست آمده، با استفاده از پهنه ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ و نتایج نرم‌افزار HEC-RAS برای سیل سال ۱۳۹۸ استان گلستان رودخانه گرگان‌رود مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد افزایش گام مکانی با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی قادر هستند ضمن حفظ دقت مدلسازی سیلاب، سرعت محاسبات را تا ۹۰ درصد افزایش دهند. پردازش موازی باعث افزایش سرعت محاسبات تا ۶۵ درصد شده و هیچ تاثیری بر دقت مدلسازی نداشته است. نرم‌افزار توسعه یافته STE از نظر دقت مدلسازی پهنه سیلابی با نرم‌افزار HEC-RAS تقریبا در یک حد هستند ولی سرعت مدلسازی سیلاب در نرم افزار STE نزدیک به ۹۵ درصد بیشتر از نرم‌افزار HEC-RAS می‌باشد.

کلیدواژگان: مدلسازی سریع سیلاب، نرم‌افزار HEC-RAS، نرم‌افزار STE، شبکه‌بندی کلاسیک، شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی، معادلات آب کم عمق، پردازش موازی.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر تغییرپذیری‌های اقلیم شدت گرفته است و خطرهای سیل بیش از پیش کشورها را تهدید می‌کند. همواره آسیب و زیان های زیادی از جمله مرگ هزاران نفر و ضررهای اقتصادی فراوان توسط سیل‌های شدید و ناگهانی متوجه کشورها شده است. پهنه‌بندی سریع سیلاب یکی از بنیادی ترین موارد در مدیریت بحران و کاهش آسیب و زیان‌ها ناشی از سیل است. به منظور کاهش خطرها، آسیب و زیان‌ها و رویایی به هنگام، نیاز است تا با استفاده از داده‌های موجود و پیش‌بینی‌های هواشناسی بتوان پهنه سیلاب و ناحیه های از منطقه مورد تهدید که دچار آبگرفتگی و آسیب و زیان خواهد شد را به سرعت شناسایی کرده و اقدام‌های لازم انجام شود. با پیشرفت رایانه‌ها دستیابی به یک روش به منظور پهنه‌بندی دقیق و سریع سیلاب امکان پذیر است. یکی از جدیدترین روش‌ها برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی[۱] و تلفیق آن با

1. GIS

مدل‌های هیدرولیکی است. تحلیل سریع و مشاهده پهنه سیلاب در زمان یا پیش از رخداد سیل برای شناسایی منطقه‌های مورد تهدید و ارزیابی آسیب و زیان‌های احتمالی، ضروری می‌باشد. برنامه‌ریزی برای رویارویی با خطرها ناشی از سیل، پاسخگویی سریع در شرایط ضروری و مدیریت بحران نیازمند دسترسی سریع به نقشه‌های دقیق آبگرفتگی ناشی از سیل بوده که شناسایی منطقه‌های مورد تهدید را میسر کند. همچنین پهنه‌بندی سریع سیل امری ضروری برای برآورد میزان آسیب و زیان‌ها و پیش‌بینی آن‌ها به ویژه پس از رخداد سیل است. در زمان رخداد سیل مشکلات و پرسش‌های بسیاری مطرح خواهند شد که نیاز به رسیدگی سریع، به هنگام و موثر خواهند داشت و اگر زمان از دست برود آسیب و زیان‌ها بیشینه شده و مشکلات بی نهایت خواهند شد. برای پاسخگویی و رسیدگی به هنگام به مشکلات، سوالات و چالش‌های زمان وقوع بحران سیل نیاز به آگاهی از شرایط دقیق پیشرو اعم از شدت آبگرفتگی، ناحیه مورد تهدید، پهنه سیلاب، عمق و سرعت جریان آب، ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و منطقه‌های مسکونی و مورد تهدید و همچنین تمامی نقاط بحرانی برای عبور سیلاب می‌باشد که با نمایش پویای پهنه سیل و میزان آب گرفتی بر روی نقشه‌ها می‌شود به این مهم رسیده و از آنچه پیش رو است آگاهی داشت تا اقدام‌های لازم خیلی سریع‌تر و به هنگام انجام شود. مدلسازی دقیق و هیدرولیکی سیلاب همواره با چالش‌های زیادی همراه بوده است. در دهه‌های اخیر به منظور کاهش چالش‌ها و رسیدن به معادله‌ها و روش‌های ساده‌تر و مناسب برای مدلسازی هیدرولیکی، دقیق و سریع سیل تحقیقات بسیاری انجام گرفته و پیشرفت بسیار خوبی حاصل شده است. یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها چگونگی شبکه‌بندی دامنه مدلسازی است. برای مدلسازی دوبعدی سیل در دقیق‌ترین حالت ممکن لازم است تا اندازه سلول‌های شبکه برابر با سلول‌های فایل رستری نقشه توپوگرافی منطقه باشد. با توجه به شرایط پایداری مدلسازی با کوچکتر کردن ابعاد سلول‌های شبکه، به منظور حفظ پایداری مدلسازی گام محاسباتی کاهش خواهد یافت از سوی دیگر به دلیل بالا بودن شمار سلول‌های محاسباتی مدت زمان لازم برای انجام مدلسازی طولانی بوده و نیاز است تا با افزایش ابعاد سلول‌های شبکه، شمار سلول‌های محاسباتی را کاهش داد تا ضمن افزایش گام محاسباتی، حجم محاسبات را کاهش داده و زمان لازم برای انجام مدلسازی کوتاه‌تر شود. افزایش ابعاد سلول‌های شبکه منجر به کاهش دقت و ایجاد خطا در مدلسازی و پهنه سیل می‌شود. لذا نیاز است تا با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی مختلف دقت مدلسازی را نسبت به افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی مقاوم ساخت.

به منظور مدلسازی جریان آب سطحی به صورت دو بعدی معادله‌هایی که مورد بررسی قرار می‌گیرند با در نظر گرفتن فرضیه‌هایی، مستخرج از معادله‌های ناویه استوکس هستند و به نام دسته معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) شناخته شده‌اند. به منظور حل راحت‌تر و سریعتر، اقدام‌های مختلفی توسط محققان با هدف ساده سازی این معادله‌ها انجام گرفته است (De Almeida & Bates, 2013). دو دسته معادلات دوبعدی آب کم عمق (تقریب اینرسی محلی[1]) و موج دیفیوژن[2] معادله‌هایی هستند که با در نظر گرفتن فرضیه‌هایی از ساده سازی دسته معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) به‌دست آمده و دقت آن‌ها توسط محققان مختلف ارزیابی شده است (Neal et al., 2011). نتایج ارزیابی‌ها و بررسی‌ها نشان داده است که مدل موج دیفیوژن حل شده در حالت صریح زمان بسیار بیشتری را برای اتمام مدلسازی نیاز دارد در حالی که مدل تقریب اینرسی محلی سریع‌ترین مدل بوده است. همچنین مشخص شده است برای جریان‌هایی که در راستای زمان، تدریجی تغییر می‌کنند حل معادلات دینامیک کامل ضروری نیست و معادله‌های ساده شده قادر به مدلسازی دقیق جریان تنها در شرایط فوق بحرانی نبوده‌اند (Neal et al., 2011). لذا بررسی‌های بیشتری با استفاده از حل عددی دسته معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی و مقایسه نتایج با حل تحلیلی معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) در مدل‌های آزمایشی طراحی شده، انجام گرفته و نتایج نشان داده که توافق خوبی بین نتایج به‌دست آمده از معادلات ساده شده

1. Local Inertial Approximation (LIA)

2. Diffusive Wave Equation

با نتایج به‌دست آمده از معادلات دینامیک کامل به ویژه در جریان‌های زیر بحرانی و مقدار های عدد فرود کمتر از ۰/۵ وجود دارد (De Almeida & Bates, 2013). همچنین بررسی حل عددی دسته معادلات موج دیفیوژن نشان داده است اگر چه معادلات موج دیفیوژن شتاب محلی را در محاسبات لحاظ نمی‌کند، ولی می‌تواند آبگرفتگی در پهنه‌های سیلابی را به خوبی مدلسازی کند. معادلات موج دیفیوژن نتایج دقیقی را برای موج‌های آرام و حتی ناحیه‌های دارای شیب تند کف ارائه داده و تنها در موج‌های سریع بر روی برآمدگی‌ها از دقت نتایج آن کاسته شده است (Gąsiorowski, 2014). به منظور صحت سنجی و مقایسه نتایج دسته معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی در مقابل معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) و استفاده کاربردی از این دسته معادلات اقدام به توسعه ابزارهای مدلسازی سیل با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون شده است. نتایج نشان داده است که حل عددی معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی به روش تفاضل محدود توانایی بالایی در ارائه نتایج مطابق حل معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) داشته و در مدلسازی رویداد سیل واقعی شایستگی خود را در مشخص سازی دقیق پهنه سیلابی که توسط سازمان‌های محلی نیز مورد تایید بوده، نشان داده است (Courty et al., 2017). به منظور بررسی نتایج در یک رویداد واقعی و مقایسه هر سه دسته معادلات موجود برای مدلسازی دو بعدی جریان آب سطحی Martins et al. (2017) اقدام به مقایسه سه مدل آب کم عمق (دینامیک کامل)، آب کم عمق (تقریب اینرسی محلی) و موج دیفیوژن پرداخته و نتایج به‌دست آمده از مدل سازی یک رویداد واقعی در این تحقیق نشان داده است برخلاف وجود جریان و هندسه بسیار پیچیده در رویداد مورد مطالعه، همخوانی خوبی بین نتایج به‌دست آمده از هر سه مدل مورد بررسی در زمینه عمق و دبی جریان و وسعت پهنه سیل مشاهده شده است. در این تحقیق مدل موج دیفیوژن بیشینه عمق را اندکی بزرگتر و موج پیشرونده سیل را کمی کندتر نسبت به دو مدل دیگر مدلسازی کرده است. مدل آب کم عمق (تقریب اینرسی محلی) به دلیل اینکه کمی موج پیشرونده سیل را نسبت به مدل دینامیک کامل کندتر مدلسازی می‌کند عمق آب در پایین دست را کمی بیشتر نسبت به مدل دینامیک کامل مدلسازی کرده است. نتایج کلی تحقیق نشان داده است مدل‌های ساده شده می‌توانند با صرف زمان و انرژی محاسباتی بسیار کمتر، نتایج دقیقی را در مقایسه با مدل دینامیک کامل ارائه دهند.

یکی از مسائل مهم در مدلسازی سیلاب با استفاده از حل عددی دسته معادلات مورد بحث، پایداری حل عددی می‌باشد برای این منظور Tanaka & Yoshioka (2017) به بررسی پایداری حل عددی دسته معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی پرداخته‌اند. در این تحقیق شرایط پایداری حل عددی معادلات آب کم عمق در حالت نیمه ضمنی بررسی شده و حالت ضمنی حل عددی این معادله‌ها ارائه و برتری‌های آن نیز بحث و بررسی شده است.

امروزه رایانه‌ها در هر دو بخش نرم‌افزار و سخت‌افزار پیشرفت قابل توجهی داشته و می‌توانند در مدلسازی سیلاب و نمایش نتایج به‌دست آمده امکانات و قابلیت‌های بسیار مفیدی را ارائه دهند (Jamali et al. 2021). برای نمایش پهنه سیل، عمق و سرعت جریان و مشخص سازی منطقه‌های مورد تهدید سیل، سامانه اطلاعات جغرافیایی محیط مناسبی را ایجاد کرده و بسیار مناسب است (Sinnakaudan et al. 2003). همچنین به کارگیری دو روش فنی سنجش از دور و مدلسازی هیدرولیکی می‌تواند برای انجام اقدام‌های بازدارنده و کاهش شدت سیلاب راه گشا باشد. (Namazi Rad et al., 2022). لذا تا کنون ایده‌های بسیار زیادی برای تسریع مدلسازی سیلاب با استفاده از تکنیک‌های پردازشی بررسی شده و نرم‌افزارهای مختلفی ارائه شده است (Safari & Mahdavi, 2001). انجام محاسبات به صورت همزمان و به صورت موازی در بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه یکی از روش‌های موثر در تسریع مدلسازی سیلاب است که در تحقیق انجام شده توسط Artichowicz & Gąsiorowski (2019) به بررسی روش‌های موثر در حل سریع‌تر معادله موج دیفیوژن دوبعدی پرداخته شده است. در این تحقیق از پردازش موازی برای کاهش زمان لازم برای انجام مدلسازی استفاده و نتایج نشان داده حل معادلات به‌دست آمده در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود به صورت ضمنی و در حالت

پردازش موازی بیشترین تاثیر را در کاهش زمان لازم برای اتمام مدلسازی به همراه دارد.

یکی از مهم‌ترین داده‌های مورد نیاز برای مدلسازی سیلاب نقشه توپوگرافی و هندسه منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نقشه‌های توپوگرافی مختلفی با استفاده از ماهواره‌های مختلف برای کل کره زمین گرد آوری شده و در دقت‌های مختلف در دسترس هستند. انتخاب بهترین نقشه توپوگرافی برای مدلسازی سیلاب از چالش‌های مهم برای دستیابی به بالاترین دقت در مدلسازی سیلاب می‌باشد. لذا در تحقیقی انجام شده توسط Khojeh et al. (2022) به ارزیابی تاثیر نقشه‌های توپوگرافی مختلف در دقت مدلسازی سیلاب با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در استان گلستان و سیل فروردین ماه ۱۳۹۸ پرداخته و نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار را با تصویرهای ثبت شده از پهنه سیل توسط ماهواره سنتینل ۱ مقایسه و بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد نقشه توپوگرافی SRTM-30 m و ALOS-12.5 m دقت و توانایی بیشتری برای مدلسازی سیل و مشخص‌سازی پهنه سیل در این منطقه دارند.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد در زمینه مدلسازی دوبعدی و هیدرولیکی سیلاب و پهنه‌بندی سیل پیشرفت قابل توجهی انجام شده و معادله‌های دوبعدی مناسبی قابل استفاده هستند. از سوی دیگر یکی از مهم‌ترین و تاثیر گذارترین مسئله‌ها در دقت و سرعت مدلسازی دوبعدی سیل چگونگی گسسته سازی و شبکه‌بندی دامنه حل است که هنوز جای بررسی و تحقیق دارد. استفاده از روش مناسب می‌تواند ضمن حفظ دقت، سرعت مدلسازی را بسیار افزایش داده و زمان لازم برای اتمام مدلسازی، پهنه‌بندی سیل و شناسایی منطقه‌های مورد تهدید را کاهش دهد. در این تحقیق به ارائه و بررسی روش‌های مختلف شبکه‌بندی کلاسیک و تغییرات درون سلولی درحالت پردازش موازی به منظور افزایش سرعت مدلسازی پرداخته شده است. لذا به منظور پیاده سازی و استفاده کاربردی از روش‌های پیشنهادی و مورد بررسی این تحقیق نیاز به یک نرم‌افزار با محیطی کاربر پسند و مختص مدلسازی سریع سیلاب، پهنه‌بندی سیل، مدلسازی دوبعدی رسوب و فرسایش و رسوب گذاری احساس می‌شود. بنابراین در این تحقیق اقدام به کدنویسی و توسعه بخش دوبعدی نرم‌افزار STE به منظور مدلسازی هیدرولیکی و دوبعدی گسترش سیلاب و مشخص سازی پهنه سیل با استفاده از معادلات دوبعدی آب کم عمق شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور مدلسازی جریان آب سطحی به صورت دو بعدی معادلاتی که مورد بررسی قرار می‌گیرند با در نظر گرفتن فرضیه هایی مستخرج از معادلات ناویه استوکس هستند و به نام دسته معادلات آب کم عمق شناخته شده‌اند که مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل هذلولوی با مشتقات جزئی (یا سهموی در صورت در نظر گرفتن تنش برشی لزج) است که جریان تحت فشار در یک سیال را توصیف می‌کند. این معادله‌ها از معادلات ناویه‌استوکس انتگرال‌گیری شده در عمق، در شرایطی که مقیاس افقی بسیار بزرگ‌تر از مقیاس عمودی باشد، استخراج شده‌اند. معادله اصلی مورد استفاده در این تحقیق مجموعه‌ای از معادله‌های دیفرانسیل هذلولوی با مشتقات جزئی استخراج شده از معادلات آب کم عمق دو بعدی است که بقای جرم و مومنتوم جریان آب کم عمق را توصیف می‌کند. در حالت دو بعدی این معادلات به صورت رابطه‌های شماره (۱) تا (۳) می‌باشند.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+\frac{\partial (uq_x)}{\partial x}+\frac{\partial (vq_x)}{\partial y}+gh\frac{\partial (h+z)}{\partial x}+\frac{gn^2\|q\|q_x}{h^{7/3}}=0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+\frac{\partial (vq_y)}{\partial y}+\frac{\partial (uq_y)}{\partial x}+gh\frac{\partial (h+z)}{\partial y}+\frac{gn^2\|q\|q_y}{h^{7/3}}=0 \quad (3)$$

که در رابطه‌های (۱) تا (۳) t زمان، h عمق آب، q_x دبی جریان در واحد عرض در جهت x، q_y دبی جریان در واحد عرض در جهت y، $\|q\|$ برآیند دو بردار q_x و q_y و u سرعت جریان در جهت x، v سرعت جریان در جهت y، z تراز کف، g شتاب گرانش زمین و n ضریب زبری

مانینگ می‌باشد.

کلید ساده سازی این معادلات به صورت تقریب اینرسی محلی بر اساس فرض ناچیز بودن ترم شتاب انتقالی نسبت به ترم‌های دیگر در دو معادله (۲) و (۳) می‌باشد بنابراین از ترم مذکور در جریان‌های زیر بحرانی می‌توان چشم پوشی کرده و معادلات ساده سازی شده با نام تقریب اینرسی محلی را به صورت رابطه‌های (۴) تا (۶) نوشت (De Almeida & Bates, 2013).

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}=0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t}+gh\frac{\partial (h+z)}{\partial x}+\frac{gn^2\|q\|q_x}{h^{7/3}}=0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t}+gh\frac{\partial (h+z)}{\partial y}+\frac{gn^2\|q\|q_y}{h^{7/3}}=0 \quad (6)$$

۲-۱- نرم افزار توسعه یافته STE و افزونه STEGIS

بخش یک بعدی نرم‌افزار برآوردگر بار رسوبی در رودخانه‌ها[1] توسط Teimourey & Dehghani. (2021) توسعه داده شد. این نرم افزار روش‌های مختلف برآورد بار رسوب اعم از ۹۲ روش هیدرولیکی، روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و روش های هوشمند برای برآورد باربستر، معلق و بار کل مطالعه و کد نویسی شده است. در این نرم‌افزار روش‌های مختلف محاسبه سرعت سقوط ذرات، تنش برشی، آستانه حرکت ذرات و دیگر پارامترهای هیدرولیکی در دسترس و قابل استفاده هستند و همچنین روش‌های مختلف و موثری برای بهینه سازی، هوشمند سازی، واسنجی و افزایش دقت در برآورد بار رسوبی توسعه داده شده است.

با توجه به اینکه اخیرا پردازشگرها و سامانه اطلاعات جغرافیایی پیشرفت خوبی داشته و می‌توانند امکانات منحصر به فردی را در محاسبه، مدلسازی و جانمایی پهنه‌های سیلابی، هیدرولیک جریان، تحلیل‌های هیدرولوژیکی و برآورد رسوب ارائه دهند، به همین منظور در این تحقیق اقدام به توسعه و کدنویسی بخش دوبعدی نرم افزار STE با نام افزونه STEGIS شده است که وظیفه تحلیل‌های جغرافیایی و انجام تمامی عملیات جی آی اسی و محاسبات دو بعدی را بر عهده گرفته و نتایج را ارائه و تحلیل کند. در توسعه این افزونه سعی شده است تا تمامی ابزارهای مورد نیاز کاربر به‌گونه‌ای کدنویسی و در افزونه قرار گیرد تا کاربر در زمان انجام مدلسازی‌ها و تحلیل‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و غیره نیازی به نرم‌افزارهای متفرقه مانند QGIS، Arcmap، HEC-RAS، HEC-HMS و غیره نداشته باشد لذا سعی شده است تا تمامی ابزارهای مورد نیاز برای کار با فایل‌های رستری[2]، برداری و جغرافیایی و همچنین انجام محاسبات و تحلیل‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و توپوگرافی در این افزونه در دسترس کاربر بوده و به راحتی قابل استفاده باشد. اطلاعات بیشتر در سایت www.ste.hwstr.ir ارائه شده است.

روش‌های شبکه‌بندی

در نرم‌افزار توسعه داده شده در این تحقیق از معادلات ساده سازی شده با نام تقریب اینرسی محلی برای مدلسازی گسترش سیلاب و مشخص سازی پهنه سیلابی استفاده شده است که این معادلات با استفاده از روش تفاضل‌های محدود و به دو حالت ضمنی و نیمه ضمنی حل و کدنویسی شده است (Tanaka & Yoshioka, 2017). مطابق شکل ۱ سلول‌هایی مستطیل شکل با فاصله‌های Δx و Δy از هم که مقدار عمق آب در وسط سطح سلول و مقدار دبی در واحد عرض در اضلاع سلول محاسبه خواهند شد.

به منظور مدلسازی سیل در دقیق‌ترین حالت ممکن لازم است تا اندازه سلول‌های شبکه برابر با سلول‌های فایل رستری نقشه توپوگرافی منطقه باشد. در این حالت با توجه به بالا بودن شمار سلول‌های محاسباتی، حجم پردازش و محاسبات بر روی پردازنده بسیار بالا رفته و با توجه به شرایط پایداری حل عددی دسته معادلات آب کم عمق، مدلسازی با سلول‌های محاسباتی کوچک، گام زمانی محاسباتی کوچکتری نیاز دارد لذا زمان لازم برای اتمام مدلسازی بسیار طولانی است. با افزایش ابعاد سلول‌های شبکه می‌توان تعداد سلول‌های محاسباتی را کاهش داد تا ضمن افزایش گام زمانی محاسبات، حجم محاسبات را کاهش داده و زمان لازم برای اتمام مدلسازی کوتاه تر

1. Sediment Transport Estimator (STE)

2. Raster

شود. افزایش ابعاد سلول‌های شبکه منجر به کاهش دقت و ایجاد خطا در مدلسازی و پهنه سیل می‌شود. لذا نیاز است تا با استفاده از روش‌های کلاسیک و یا روش‌های تغییرات درون سلولی دقت مدلسازی را نسبت به افزایش ابعاد سلول‌های شبکه مقاوم ساخت.

روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک

به جهت انتخاب مقدار تراز سطح زمین برای هر یک از سلول‌های شبکه، روش‌های مختلفی طراحی و در نرم‌افزار کدنویسی شده و قابل انتخاب توسط کاربر می‌باشد که روش‌های حداقل و ترکیبی مورد بررسی این تحقیق می‌باشد.

ضریب زبری مانینگ یکی دیگر از پارامترهای مهم هندسی است که باید در دامنه حل و سلول‌های محاسباتی مقدار آن مشخص و در محاسبات مورد استفاده قرار گیرد. برای محاسبه این پارامتر در هر سلول محاسباتی، از نقشه‌های پوشش زمین استفاده می‌شود. به این طریق که برای هر یک از دسته‌بندی‌های موجود در نقشه پوشش زمین مقداری به عنوان ضریب زبری مانینگ مشخص و سپس با توجه به هنگامیت مکانی سلول، دسته‌بندی پوششی آن مشخص و ضریب زبری با توجه به روش شبکه‌بندی مورد استفاده، محاسبه و تعیین می‌شود. در این روش‌ها با توجه به اینکه ممکن است چند دسته‌بندی مختلف از پوشش‌های زمین در یک سلول محاسباتی قرار گیرند ضریب زبری مانینگ برای هر سلول محاسباتی به طور متوسط برای کل سلول محاسبه می‌شود.

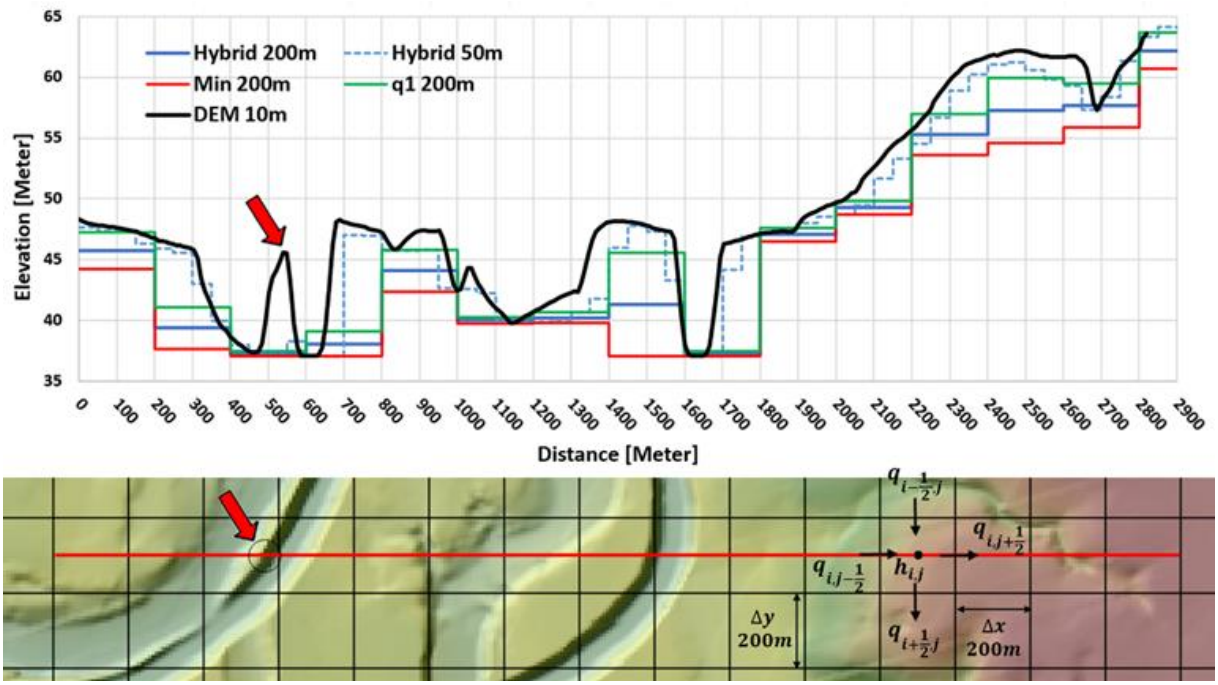

Fig. 1 The bed elevation is selected by classical meshing methods compared to the digital elevation map

شکل ۱ تراز سطح زمین انتخاب شده توسط روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک در مقابل تراز سطح زمین در نقشه توپوگرافی

روش حداقل

در این روش کوچکترین مقدار تراز سطح زمین در محدوده سلول محاسباتی به عنوان تراز سطح زمین برای سلول انتخاب و در محاسبات لحاظ می‌شود. مطابق شکل ۱ در این حالت با افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی، این روش جزئیات ارتفاعی بیشتری را از دست داده و خطا افزایش می‌یابد.

روش چارک اول

در این روش مقداری به عنوان تراز سطح زمین در سلول محاسباتی انتخاب می‌شود که ۲۵ درصد مقدار های تراز سطح زمین در محدوده سلول کمتر از آن هستند و ۷۵ درصد مقدار های بیشتر از آن هستند. مطابق شکل ۱ در

این حالت با افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی، این روش قادر است تراز سطح زمین را نزدیک تر به نقشه توپوگرافی تنظیم کند ولی ترازهای ارتفاعی پایین‌تر که از اهمیت بالایی در مدلسازی جریان آب سطحی برخوردار بوده و اغلب مربوط به مجاری آبی هستند را در نظر نگرفته و خطا به شدت افزایش خواهد یافت. لذا از بررسی این روش در این تحقیق صرف نظر شده است.

روش ترکیبی

این روش با ترکیب روش حداقل و روش چارک اول مقدار تراز سطح زمین را در سلول محاسباتی مشخص می‌کند. برای کارایی بیشتر این روش در منطقه‌های مورد مطالعه مختلف دو ضریب آلفا و بتا به ترتیب برای هر یک از روش‌های حداقل و چارک اول قابل انتخاب است. این ضرایب درصد استفاده از هر کدام از روش‌ها را در ارائه مقدار نهایی تراز سطح زمین توسط روش ترکیبی در هر سلول مشخص می‌کند. مطابق شکل ۱ در این حالت تراز سطح زمین انتخاب شده می‌تواند ضمن در نظر گرفتن مجاری آبی به تراز سطح زمین نیز نزدیک‌تر بماند.

روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی

انتخاب یک مقدار به عنوان تراز سطح زمین در یک سلول محاسباتی با چالش‌های بسیاری به ویژه در مواقعی که سلول در منطقه‌ای با تغییرات زیاد تراز سطح زمین باشد و یا سلول ابعاد بزرگی داشته باشد، همراه است. معمولا مجاری آبی در تراز پایین‌تری نسبت به دشت‌های سیلابی و منطقه‌های دیگر قرار دارند. با توجه به اینکه لحاظ شدن مجاری آبی در مدلسازی از اهمیت بالایی برخوردار است، لازم است تا کمترین مقدار های تراز ارتفاعی موجود در زیر یک سلول محاسباتی برای آن سلول انتخاب شود لذا یکی از مهم‌ترین چالش‌های بوجود آمده، عریض‌تر در نظر گرفته شدن آبراهه‌ها و یا قسمت‌هایی از رودخانه که عرضی کمتر از ابعاد سلول دارند، در مدلسازی می‌باشد. درصورتی که حجم مشخصی از جریان به دامنه حل وارد شود، تراز سطح آب در سلول به دلیل بیشتر بودن عرض آبراهه نسبت به واقعیت، کمتر محاسبه شده و پهنه سیل کمتر از واقعیت محاسبه خواهد شد. همچنین در محاسبات مومنتوم جریان نیز خطا ایجاد شده و سرعت جریان کمتر از واقعیت محاسبه می‌شود. برای حل این موضوع و در نظر گرفتن تمامی پستی و بلندی‌های موجود در زیر سطح یک سلول محاسباتی می‌شود از روش‌های تغییرات درون سلولی برای مدلسازی سیلاب با استفاده از دسته معادلات آب کم عمق استفاده کرد. در این نوع محاسبات به جای در نظر گرفتن یک مقدار برای تراز کف سلول محاسباتی از تمامی مقدار های موجود تراز کف استفاده خواهد شد. در این حالت پیش از شروع مدلسازی، هر سلول محاسباتی مورد بررسی کامل قرار گرفته و مطابق شکل ۲ رابطه تراز سطح آب و حجم آب موجود در سلول برای هر یک از سلول‌های محاسباتی، محاسبه و ثبت خواهد شد. لذا با استفاده از رابطه استخراج شده در هر سلول می‌شود با استفاده از تراز سطح آب به حجم آب داخل سلول رسید و با استفاده از حجم آب داخل سلول به تراز سطح آب در حین مدلسازی و تحلیل نتایج رسید.

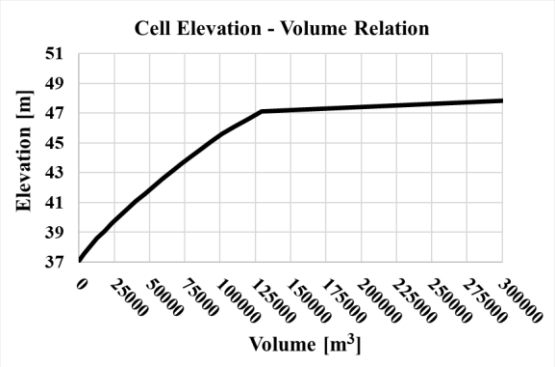

Fig. 2 The relationship between water surface elevation and the volume of water in the cell, extracted for a computational cell before starting the simulation.

شکل ۲ رابطه تراز سطح آب و حجم آب موجود در سلول، استخراج شده برای یک سلول پیش از شروع مدلسازی

یکی از چالش برانگیزترین قسمت‌ها در محاسبات روش‌های تغییرات درون سلولی انجام محاسبات مومنتوم می‌باشد. برای انجام محاسبات مومنتوم و به‌دست آوردن مقدار Q_x دبی جریان در جهت x و Q_y دبی جریان در جهت y در حالت تغییرات درون سلولی، دو روش در این تحقیق ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

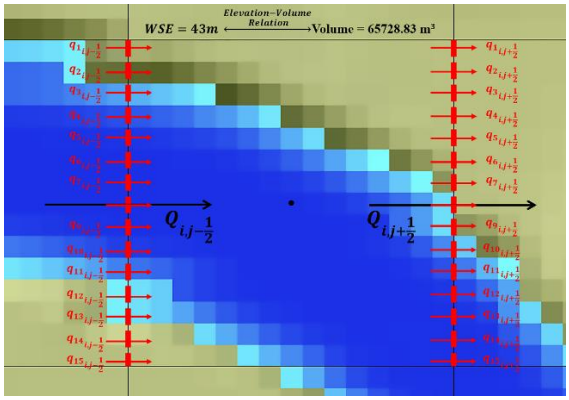

Fig. 3 The computational cell with subgrid variability, including the positioning of flow discharges in the x-direction for both CF and DF methods.

شکل ۳ سلول محاسباتی تغییرات درون سلولی به همراه جانمایی دبی‌های جریان در جهت x برای دو روش سطح مقطع کامل و گسسته سازی شده در عرض

روش سطح مقطع کامل[1]

در این روش برای هر یک از چهار ضلع سلول که جریان در آن‌ها خارج یا وارد خواهد شد، یک سطح مقطع کامل در نظر گرفته می‌شود و محاسبات با توجه به این سطح مقطع انجام و مقدار $Q^{t+\Delta t}$ دبی جریان در زمان بعدی برای ضلع سلول برحسب متر مکعب بر ثانیه محاسبه خواهد شد (شکل ۳). در این روش یکی از پارامترهای قابل انتخاب می‌تواند عمق جریان در محاسبات مومنتوم باشد که چهار حالت شعاع هیدرولیکی، عمق هیدرولیکی، عمق متوسط و بیشترین عمق سطح مقطع برای نرم‌افزار STE تعریف و کدنویسی شده است که در این تحقیق برای این روش عمق متوسط انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش با توجه به اینکه دبی جریان ورودی و خروجی از سلول در سطح مقطع‌های تعریف شده در اضلاع سلول محاسبه می‌شود، ضریب زبری مانینگ متوسط برای سطح مقطع محاسبه خواهد شد.

روش گسسته سازی شده در عرض[2]

در این روش هر ضلع سلول (سطح مقطع ورودی یا خروجی جریان) به مقطع‌هایی کوچک به اندازه دقت نقشه توپوگرافی مورد استفاده تقسیم خواهند شد. بنابراین محاسبات مومنتوم برای هر یک از این مقطع‌ها در عرض ضلع سلول تکرار و برای هر کدام از مقطع‌ها یک $q_k^{t+\Delta t}$ دبی جریان در واحد عرض برای مقطع عرضی در زمان بعدی برحسب متر مربع بر ثانیه محاسبه می‌شود که با ضرب این مقدار در اندازه مقطع عرضی و تکرار این محاسبات برای تمامی مقطع‌ها عرضی موجود در ضلع سلول و جمع مقدار های به‌دست آمده مقدار $Q^{t+\Delta t}$ دبی جریان در زمان بعدی برای کل ضلع سلول بر حسب متر مکعب بر ثانیه محاسبه خواهد شد (شکل ۳). این روش ممکن است کمی زمان لازم برای اتمام مدلسازی را افزایش دهد ولی علاوه بر محاسبه دقیق‌تر دبی جریان، استفاده از ضریب زبری مانینگ با جزئیات بالا، دقیق و مطابق با دقت نقشه توپوگرافی و نزدیک‌تر به واقعیت را میسر خواهد ساخت که خود باعث محاسبه دقیق‌تر مومنتوم جریان خواهد شد. لذا نتایج دقیق‌تری از این روش مورد تصور خواهد بود.

۲-۲- نرم افزار HEC-RAS

این نرم‌افزار برای مدلسازی و تحلیل هیدرولوژیک و هیدرودینامیک جریان آب در رودخانه‌ها و سامانه‌های آبی توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش ایالات متحده توسعه داده شده است. در نگارش‌های اخیر این نرم‌افزار قابلیت‌های جدید و کاربردی به منظور مدلسازی دو بعدی جریان آب سطحی اضافه شده و برای انجام تحقیقات و پروژه‌های مختلف توسط متخصصان حوزه استفاده می‌شود. این نرم‌افزار قادر به انجام مدلسازی دوبعدی با استفاده از سه دسته معادلات: موج دیفیوژن، آب کم عمق(تقریب اینرسی محلی) و آب کم عمق (دینامیک کامل) با قابلیت روش شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی مختص خود می‌باشد. روش شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی به کار گرفته شده در نرم افزار HEC-RAS با دو روش شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی مورد ارائه در این تحقیق و کدنویسی شده در نرم‌افزار STE متفاوت است. در این تحقیق از دسته معادلات آب کم عمق دوبعدی (تقریب اینرسی محلی) حل

1. Full Cross-Sectional Face (CF)

2. Discretized Face (DF)

شده به روش حجم محدود نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شده است. به منظور مقایسه بهتر بین نرم‌افزار توسعه یافته STE و نرم‌افزار HEC-RAS، شبکه‌بندی در نرم‌افزار HEC-RAS به صورت مربعی و یکنواخت در تمامی دامنه حل دو بعدی انجام شده و سعی شده است تا تمامی موارد و تنظیمات به صورت یکسان و برابر برای هر دو نرم‌افزار انجام شود تا مقایسه درستی بین نتایج به‌دست آمده از دو نرم‌افزار رخ دهد.

۲-۳- پردازش موازی

به منظور مدلسازی سریع گسترش سیلاب و برآورد رسوب، یکی از مهمترین مسئله‌ها چگونگی کدنویسی و پیاده سازی روش‌های حل معادلات می‌باشد. لذا در این تحقیق سعی شده است تا کد نویسی و پیاده سازی روش‌های مختلف به گونه‌ای انجام شود تا در اجرا، سریع‌ترین حالت ممکن رخ دهد. در این تحقیق از زبان VB.NET یکی از زبان‌های سریع برنامه نویسی ارائه شده توسط مایکروسافت به همراه قابلیت پردازش موازی استفاده شده است. پردازش موازی روشی برای اجرای همزمان بخشی از محاسبات بر روی چندین ریز پردازنده (هسته پردازشگر) به منظور افزایش سرعت علمکرد بوده و در رایانه‌هایی که مجهز به پردازنده‌های چند هسته‌ای هستند قابل استفاده است. در اصل این روش تقسیم یک کار بین دست‌کم دو ریز پردازنده است. در حل معادلات آب کم عمق به روش تفاضل‌های محدود محاسبات در راستای زمان به دلیل وابستگی مقدار های به یکدیگر حتما باید به صورت سری و پشت سر هم باشند ولی محاسبات در یک گام زمانی برای گره‌های محاسباتی مربوط به مکان (ygx) می‌تواند به صورت مجزا برای هر گره و گروهی ازگره‌ها انجام شود لذا از روش پردازش موازی مطابق شکل ۴ می‌توان برای افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان لازم برای اتمام شبیه سازی استفاده کرد.

مطابق شکل ۴ در هر هسته پس از اتمام محاسبات و ذخیره سازی مقدار های $q_{ij+\frac{1}{2}}^{t+\Delta t}$ و $q_{i+\frac{1}{2}j}^{t+\Delta t}$ در تمامی گره‌های محاسباتی، مجددا مطابق شکل ۴ مقدار های عمق آب $h_{ij}^{t+\Delta t}$ در هر هسته محاسبه و در حافظه اشتراکی مربوط به خود ذخیره سازی شده و پس از اتمام محاسبات در تمامی هسته‌ها، مدلسازی به گام زمانی بعدی انتقال می‌یابد.

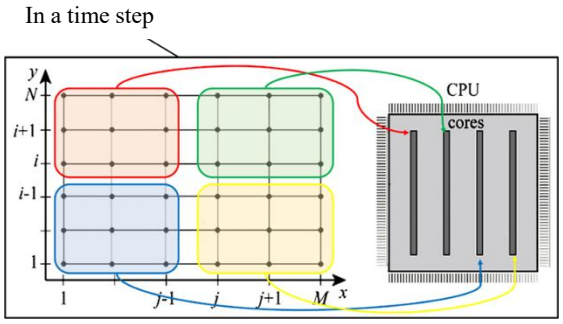

Fig. 4 Parallelization scheme for a time step in numerical solution of shallow water equations.

شکل ۴ چگونگی اجرای پردازش موازی در یک گام زمانی برای گره‌های محاسباتی برای حل معادلات آب کم عمق دو بعدی

۲-۴- منطقه مورد مطالعه

رود گرگان یا گرگان‌رود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های شمال‌شرق ایران، استان گلستان است و بیشترین حجم آب استان گلستان در آن جریان دارد. این رود از رشته‌کوه آلاداغ در بجنورد سرچشمه گرفته و پس از به هم پیوستن رودخانه‌های زاو و قره‌ناو در شمال شرقی شهرستان کلاله شکل می‌گیرد و به سد بوستان و سپس سد گلستان می‌ریزد. رودخانه های قره‌شور، دوغ و اوغان در محل سد گلستان و رودخانه قلی‌تپه پس از سد گلستان به آن می‌پیوندند. همچنین رودخانه‌های نرماب، خرمالو و چهل‌چای در جنوب شهر گنبد کاووس با گذر از ایستگاه‌های هیدرومتری ارازکوسه به این رودخانه ملحق شده و سپس به سد وشمگیر وارد می‌شود. در نهایت این رودخانه وارد دشت گرگان شده و پس از عبور از شهرستان آق‌قلا از ناحیه خواجه نفس در نزدیکی بندرترکمن به دریای خزر می‌ریزد. در بازه مورد مطالعه این تحقیق تعداد ۳ پل در مسیر رودخانه قرار دارد که بدون در نظر گرفتن آن‌ها در هر دو نرم افزار مدلسازی انجام شده است. لذا می‌شود انتظار داشت با معرفی پل‌ها برای هر دو نرم‌افزار دقت هر دو نرم‌افزار افزایش یابد.

از تاریخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ بر اثر بارندگی‌های شدید در استان‌های شمالی ایران، از جمله گلستان، مازندران و خراسان شمالی، سیل جاری شده و موجب خسارات مالی

و جانی بسیاری شده است. در استان گلستان شهرهای گنبدکاووس، آق قلا، بندر ترکمن و گمیشان که در مسیر رودخانه‌های قره سو و گرگان‌رود قرار داشتند دچار آبگرفتگی شده و آسیب و زیان دیده‌اند.

در این تحقیق با استفاده از داده‌های ثبت شده دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری گنبدکاووس و ارازکوسه از ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ تا ۱۸ فروردین ۱۳۹۸ مطابق شکل ۶ در بالادست منطقه مورد مطالعه و ورودی سد وشمگیر در پایین‌دست بازه مورد مطالعه اقدام به مدلسازی گسترش سیلاب و پهنه‌بندی سیل با استفاده از نرم‌افزار توسعه یافته STE و نرم‌افزار HEC-RAS و مقایسه نتایج با پهنه ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ در تاریخ ۳ فروردین ۱۳۹۸ ساعت ۷:۰۹ صبح شده است. پهنه ثبت شده در این تصویر با استفاده از شاخص NDWI و الگوریتم های کدنویسی شده در نرم‌افزار توسعه یافته STE استخراج و به صورت نقشه باینری صفر و یک مطابق شکل ۵ برای ارزیابی نتایج مدل HEC-RAS و STE مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به یادآوری است پهنه به‌دست آمده از تصویر ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ توسط تصویر ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۱ در محدوده تاریخ یادشده مورد تایید است.

سیل میان حوضه‌ای این منطقه از طریق دو سرشاخه جنوبی به نام‌های رودخانه قره‌چای و رودخانه سیاه‌جوی به رودخانه گرگان رود منتقل می‌شوند. سرشاخه قره‌چای توسط یک بند انحرافی با سرریز اوجی در سه مسیر تنظیم گردیده که تنها یکی از این مسیرها می‌تولند جریان آب خود را به منطقه مورد مطالعه برسانند. دبی این مسیر نسبت به دبی رودخانه گرگانرود بسیار ناچیز است و با توجه به اینکه دریچه‌های ورودی این مسیر در بند انحرافی باریک بوده و در سیلاب‌های بزرگ مانند سیلاب سال ۱۳۹۸ با رسوبات سیل پر شده و مسیر تا حدودی مسدود می‌گردد آب زیادی را به رودخانه منتقل نکرده و قابل صرف نظر است لذا خطایی را در مدلسازی بوجود نخواهد آورد. مسیرهای دیگر این سرشاخه، یکی جریان خود را به آبندان بی‌بی‌شیروان و دیگری به پایین دست سد وشمگیر می‌رساند. رودخانه سیاه‌جوی نیز به پایین دست سد وشمگیر و به رودخانه گرگانرود ملحق می‌شود و جریان سیلابی آن تاثیری در سیلاب منطقه مورد مطالعه نداشته است.

Fig. 5 Flood extent observed and registered by Sentinel-2 satellite (a) Sentinel 2 satellite RGB image (b) Detected flood extent from Sentinel 2 image

شکل ۵ پهنه سیل مشاهده شده وثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ (a) تصویر RGB ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ (b) پهنه استخراج شده از تصویر ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲

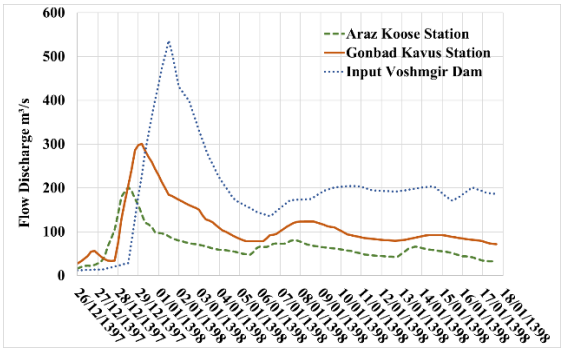

Fig. 6 The hydrographs observed for the flood event occurring in study area

شکل ۶ هیدروگراف ثبت شده برای منطقه مورد مطالعه در سیل سال ۱۳۹۸

برای تامین نقشه توپوگرافی[1] منطقه از داده‌های Copernicus DEM SRTM-30m با دقت مکانی ۲۷ متر در استان گلستان استفاده شده است. این نقشه مطابق شکل ۷ با استفاده از قابلیت دانلود نقشه توپوگرافی نرم‌افزار STE دریافت شده و با توجه به اینکه داده‌های به‌دست آمده از ماهواره سنتینل ۲ دقت مکانی ۱۰ متر دارند، لذا با استفاده از قابلیت درون‌یابی پیکسلی نرم‌افزار توسعه یافته STE اقدام به درونیابی نقشه توپوگرافی و افزایش دقت مکانی به ۱۰ متر با استفاده از روش درونیابی دومکعبی[2] شده است. نقشه پوشش زمین ESA WorldCover v200 با دقت مکانی ۱۰ متر مطابق شکل ۸ برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از قابلیت اسکریپت نویسی نرم‌افزار STE از سامانه گوگل ارث انجین دریافت و از این نقشه برای تنظیم مقدار های ضریب زبری مانینگ در مدلسازی‌ها استفاده شده است.

Fig. 7 Digital elevation map of study area along with the location of hydrometric stations

شکل ۷ نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه همراه با مکان قرارگیری ایستگاه‌های هیدرومتری

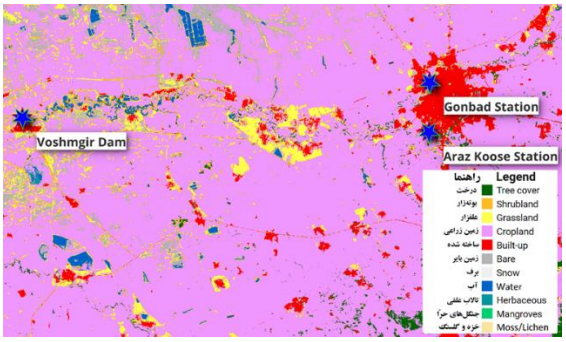

Fig. 8 The land cover map of study area

شکل ۸ نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه

۲-۵- پارامترهای ارزیابی مدل

با توجه به صفر و یک بودن داده های مشاهده شده (پهنه سیل استخراج شده از تصویر ماهواره ای) برای ارزیابی دقت مدل‌ها، لازم است تا پهنه های سیل به‌دست آمده از مدل‌های STE و HEC-RAS نیز توسط یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار توسعه یافته STE به مقدار های صفر و یک تبدیل شده و دقت مدل‌ها توسط پارامترهای مخصوص ارزیابی داده‌های باینری مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

نمره[3]

این پارامتر میزان توانایی مدل در برآورد درست پهنه سیلابی را مشخص می‌کند به نحوی که به ازای تخمین درست سلول‌های پهنه سیل (مقدار مشاهده شده و محاسبه شده هر دو ۱ هستند) یک نمره‌ی مثبت و به ازای سلول‌هایی که به اشتباه پهنه سیل مشخص شده‌اند (مقدار محاسبه شده ۱ ولی مقدار مشاهده شده ۰ است) یک نمره‌ی منفی در نظر گرفته می‌شود. هر چه نمره بیشتر باشد نشان دهنده دقت بیشتر مدل است.

درصد نمره[4]

با تقسیم نمره به‌دست آمده بر شمار کل سلول‌های پهنه سیل مشاهداتی (تمامی مقدار های مشاهده شده دارای مقدار ۱) ضرب در ۱۰۰، مقدار درصد نمره به‌دست خواهد آمد. هرچه این مقدار نزدیک‌تر به ۱۰۰ باشد دقت مدل بیشتر است.

1. Digital Elevation Map (DEM)
2. Bicubic Interpolation

3. Point
4. Point Percentage (Point%)

درصد تسریع مدلسازی

این پارامتر برای بررسی میزان تاثیر روش مدلسازی سریع سیلاب در کاهش زمان لازم برای اتمام مدلسازی استفاده شده و میزان تسریع مدلسازی توسط روش مورد بررسی را به درصد نشان می‌دهد.

$$Boost\% = \frac{FDT - BT}{FDT} \times 100 \quad (7)$$

که در این رابطه FDT برابر زمان لازم برای اتمام مدلسازی توسط دقیق‌ترین روش مدلسازی (مدلسازی با سلول‌های محاسباتی برابر نقشه توپوگرافی) بر حسب دقیقه و BT برابر زمان لازم برای اتمام مدلسازی توسط روش مورد بررسی بر حسب دقیقه می‌باشد.

درصد بازده[1]

این معیار برای مشخص سازی میزان بازدهی روش مدلسازی سریع سیلاب از نظر دقت پهنه سیلابی و زمان لازم برای اتمام مدلسازی استفاده شده است. درصد بازده یک روش با ضرب درصد نمره آن روش در درصد تسریع مدلسازی تقسیم بر ۱۰۰ به‌دست می‌آید.

$$Ef\% = \frac{Point\% \times Boost\%}{100} \quad (8)$$

ضریب تاثیر پردازش موازی[2]

این پارامتر با تقسیم زمان لازم برای اتمام مدلسازی در حالت پردازش سری بر زمان لازم برای اتمام مدلسازی در حالت پردازش موازی به‌دست آمده و نشان دهنده میزان تاثیر انجام محاسبات بخش‌های مختلف مدلسازی سیلاب به صورت موازی و همزمان، بر روی زمان لازم برای اتمام مدلسازی و سرعت مدلسازی نسبت به حالت سری و متوالی می‌باشد.

۲-۶- دستگاه‌های رایانه‌ای مورد استفاده

برای بررسی تاثیر پردازش موازی و انجام مدلسازی با استفاده از روش‌های مورد بررسی، از دو دستگاه با ویژگی‌های سخت افزاری متفاوت مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دستگاه‌های استفاده شده در تحقیق

Table 1 The hardware and software information of the computer systems used in the study

#	Type	Processor (CPU)	RAM
1	NoteBook Lenovo Y700	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ 2.60GHz up to 3.5GHz 4 Cores, 8 Logical Processors	**16GB DDR4 2133 MHz**
2	PC ASUS H770 PRO	Intel(R) Core(TM) i7-14700KF 3.40GHz up to 5.6GHz 20 Cores, 28 Logical Processors	**32GB DDR5 5200 MHz**

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روش‌های شبکه‌بندی

با استفاده از هیدروگراف‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری گنبد کاووس و ارازکوسه، شرایط مرزی برای ورود جریان به دامنه مدلسازی تعریف شده و با استفاده از هیدروگراف ثبت شده برای ورودی سد وشمگیر (پایین دست منطقه مورد مطالعه) شیب اصطکاکی، محاسبه شده و با فرض عمق نرمال برای شرط مرزی پایین‌دست، هندسه و شرایط مرزی برای هر دو مدل STE و HEC-RAS تنظیم شده است. با توجه به اینکه برای مدلسازی سیلاب با بیشترین دقت ممکن با استفاده از روش تفاضل‌های محدود لازم است تا ابعاد سلول‌های محاسباتی برابر با ابعاد سلول‌های نقشه توپوگرافی باشند، لذا به منظور مقایسه میزان تاثیر روش‌های مورد بررسی در تسریع مدلسازی سیلاب ابتدا اقدام به انجام مدلسازی توسط نرم‌افزار STE با استفاده از گام مکانی (ابعاد سلول‌های محاسباتی) برابر نقشه توپوگرافی دانلود شده برای منطقه مورد مطالعه (۲۷ متر) شده است. این مدلسازی با استفاده از دستگاه شماره ۱ انجام شده و در این مدلسازی تعداد ۳۵۷۷۱ سلول محاسباتی در دامنه حل وجود داشته و مدلسازی پس از گذشت ۸۵/۷۲ دقیقه با گام زمانی متوسط ۲/۱۲ ثانیه به پایان رسیده است. سپس اقدام به انجام مدلسازی با استفاده از دستگاه شماره ۱ در فواصل مکانی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ متر در حالت

1. Efficiency Percentage (EF%)

2. Parallel Processing Impact Factor

پردازش موازی شده است. در نرم‌افزار STE با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک حداقل و ترکیبی و روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی سطح مقطع کامل و روش گسسته سازی شده در عرض اقدام به انجام مدلسازی و مقایسه نتایج شده است.

با توجه به مطالعات De Almeida & Bates (2013) و با توجه به اینکه در منطقه و سیل مورد مطالعه تحقیق حداکثر عدد فرود به‌دست آمده از نتایج مدلسازی دوبعدی مقدار ۰/۳۶۷ بوده است استفاده از معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی[1] دقتی برابر دسته معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) دارد. لذا این دسته معادلات به همراه قابلیت گام‌زمانی متغیر برای هر دو مدل انتخاب شده و هر دو مدل قادر به تغییرگام‌زمانی باتوجه به شرایط حل بوده‌اند. زمان لازم برای اتمام مدلسازی و ارائه پهنه سیلابی توسط هر مدل بر حسب دقیقه در حالت پردازش موازی مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲ زمان لازم برای اتمام مدلسازی بر حسب دقیقه

Table 2 The total time required to complete simulation [Minutes]

Model $\Delta x, \Delta y$	HEC RAS	STE			
		Subgrid Variability		Classic	
		CF	DF	Hybrid	Min
50m	356.45	47.32	51.6	18.4	19.13
100m	51.33	8.97	13.15	2.9	3.28
150m	14.88	4	5.76	1.02	1.32
250m	3.81	1.43	2.55	0.305	0.42

جدول ۳ تعداد سلول‌های محاسباتی به همراه گام زمانی متوسط/ پایه مدلسازی برحسب ثانیه

Table 3 The total number of computation cells and the average/base simulation time step [Seconds]

Model $\Delta x, \Delta y$	Cells	HEC RAS	STE			
			Subgrid Variability		Classic	
			CF	DF	Hybrid	Min
50m	10583	4	3.9	3.88	4.21	3.96
100m	3119	8	7.73	7.63	8.8	8.1
150m	1565	12	11.64	11.53	14.65	12.37
250m	663	20	19.11	18.64	26.71	21.12

گام زمانی متوسط استفاده شده توسط مدل STE در طول انجام مدلسازی مطابق جدول ۳ می‌باشد. متاسفانه گام زمانی متوسط توسط مدل HEC-RAS گزارش نمی‌شود و در جدول ۳ مقدار گام زمانی پایه مدلسازی این نرم‌افزار ارائه شده است. مدلسازی توسط هر دو نرم‌افزار در تمامی حالات بدون خطای محاسباتی حجم آب[2] بوده است. دقت پهنه سیل به‌دست آمده توسط هر مدل مطابق جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴ درصد نمره پهنه سیل به‌دست آمده توسط هر مدل

Table 4 The point percentage acquired by each model

Model $\Delta x, \Delta y$	HEC RAS	STE			
		Subgrid Variability		Classic	
		CF	DF	Hybrid	Min
50m	73.93	73.68	74.79	75.09	75.11
100m	73.72	73.67	74.23	74.13	70.28
150m	73.49	73.06	73.84	73.56	64.79
250m	72.6	72.38	73.28	67.12	45.72

بررسی جداول ۲ و ۴ نشان می‌دهد افزایش گام مکانی با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی می‌تواند ضمن حفظ دقت مدلسازی سیلاب تا حد قابل قبولی، زمان لازم برای اتمام مدلسازی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد.

جدول ۴ و شکل ۹ نشان می‌دهد، نرم‌افزار توسعه یافته STE از نظر دقت مدلسازی پهنه سیلابی با نرم‌افزار HEC-RAS تاحدودی در یک حد هستند ولی سرعت محاسبات در نرم‌افزار STE در هر دو حالت شبکه‌بندی بسیار بیشتر از نرم‌افزار HEC-RAS بوده و زمان لازم برای اتمام مدلسازی سیلاب در نرم افزار STE نزدیک به ۹۵٪ کمتر از نرم‌افزارHEC-RAS می‌باشد. به بیان دیگر، نرم‌افزار STE برای اتمام مدلسازی و مشخص سازی پهنه سیلابی تنها ۵٪ از زمانی که نرم‌افزار HEC-RAS برای اتمام مدلسازی استفاده می‌کند را لازم دارد.

در هر دو نرم‌افزار دقت و زمان لازم برای اتمام مدلسازی با کاهش ابعاد سلول‌های محاسباتی افزایش پیدا کرده است. با توجه به جدول ۳ کاهش ابعاد سلول‌های محاسباتی باعث افزایش تعداد سلول‌هایی که در هر گام زمانی باید محاسبه شوند، شده و گام مکانی کوچکتر نیاز به گام زمانی کوچکتر برای حفظ پایداری مدلسازی دارد.

1. SWE-LIA

2. Volume Loss

با توجه به شکل ۹ زمان لازم برای اتمام مدلسازی در نرم‌افزار HEC-RAS بسیار وابسته به گام مکانی بوده و با کوچک شدن این مقدار زمان لازم برای اتمام مدلسازی به شدت افزایش می‌یابد این در حالی است که دقت، کمتر مورد تاثیر گام مکانی بوده و این نرم‌افزار به دلیل استفاده از محاسبات درون سلولی می‌تواند با استفاده از سلول‌های درشت‌تر نیز دقت مدلسازی را تا حد خوبی حفظ کند. کاهش گام مکانی در نرم‌افزار HEC-RAS موجب افزایش دقت قابل توجهی نمی‌شود و فقط زمان لازم برای اتمام مدلسازی را افزایش می‌دهد لذا مقدار های ۱۰ الی ۱۵ برابر اندازه سلول‌های نقشه توپوگرافی مورد استفاده مقدار بهینه برای ابعاد سلول‌های محاسباتی در این نرم‌افزار بوده و با استفاده از این مقدار های، مدلسازی می‌تواند دقت کافی به همراه زمان مناسب برای اتمام مدلسازی را در نرم‌افزار HEC-RAS ارائه دهد.

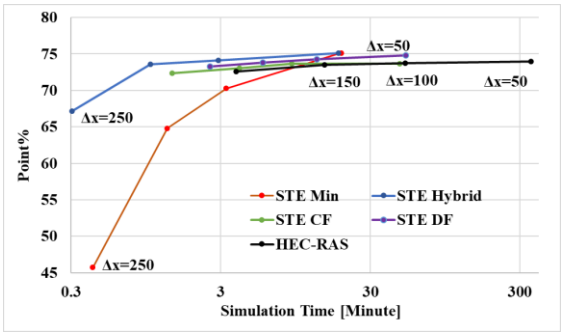

Fig. 9 The total time required to complete simulation against point percentage of predicted flood extent

شکل ۹ زمان لازم برای اتمام مدلسازی در مقابل درصد نمره پهنه سیل

با توجه به شکل ۹ روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک نزدیک به ۷۰ درصد نسبت به روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی سریع‌تر است. از سوی دیگر روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک مقاومت کمتری در حفظ دقت خود در مقابل افزایش گام مکانی دارند. روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی می‌توانند با استفاده از سلول‌های درشت‌تر نیز دقت مدلسازی را تا حد زیادی حفظ کنند. دقت مدلسازی با استفاده از روش گسسته سازی شده در عرض (DF) نزدیک به ۱ درصد بیشتر از روش سطح مقطع کامل (CF) است ولی به ۸ تا ۴۰ درصد زمان بیشتری برای اتمام مدلسازی نیاز دارد.

دقت در مدلسازی با استفاده از روش شبکه‌بندی حداقل (Min) بیشتر از مابقی روش‌ها وابسته به گام مکانی است. این روش دقیق‌ترین نتایج را در کمترین گام مکانی و ضعیف‌ترین نتایج را در بیشترین گام مکانی ارائه داده است. این نتایج به دلیل استفاده این روش، از کوچکترین مقدار تراز کف در سلول محاسباتی می‌باشد هرچه سلول بزرگتر باشد مقدار انتخاب شده در این روش باعث ایجاد خطای بیشتر در مدلسازی می‌شود. روش ترکیبی (Hybrid) توانسته است از گام مکانی ۵۰ متر تا ۱۵۰ متر دقت مدلسازی را به خوبی حفظ کرده و دقت بیشتری را در مدلسازی پهنه سیلابی نسبت به روش حداقل ارائه دهد. این روش در گام مکانی ۲۵۰ متر با کاهش شدید دقت نسبت به نتایج خود همراه بوده است.

مطابق شکل ۱۰ روش شبکه‌بندی ترکیبی با کاهش گام مکانی پهنه را بیشتر از واقعیت محاسبه می‌کند در حالی که در نرم‌افزار HEC-RAS و روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی این موضوع برعکس است. با کاهش گام مکانی پهنه کمتر از واقعیت و با افزایش این گام پهنه بیشتر از واقعیت محاسبه می‌شود. انتخاب یک عدد از تراز کف که در بیشتر روش‌ها برای مدلسازی دوبعدی عددی کوچک‌تر نسبت به اعداد سلول‌های مجاور است باعث پایین‌تر قرار گرفتن تراز سطح آب و کمتر برآورد کردن پهنه سیل می‌شود. با هدف بررسی بیشتر و صحت سنجی نتایج به‌دست آمده اقدام به مقایسه هیدروگراف محاسبه شده توسط دو نرم‌افزار STE و HEC-RAS در پایین دست منطقه مورد مطالعه (ورودی سد وشمگیر) با مقدار های اندازه‌گیری شده در زمان رخداد سیل شده است. بررسی شکل ۱۱ نشان می‌دهد هر دو نرم‌افزار دقت خوبی در مدلسازی دبی جریان در تمامی گام‌های مکانی داشته‌اند و افزایش گام مکانی تاثیری در مدلسازی دبی جریان پایین دست نداشته و باعث ایجاد خطای حجم آب نمی‌شود.

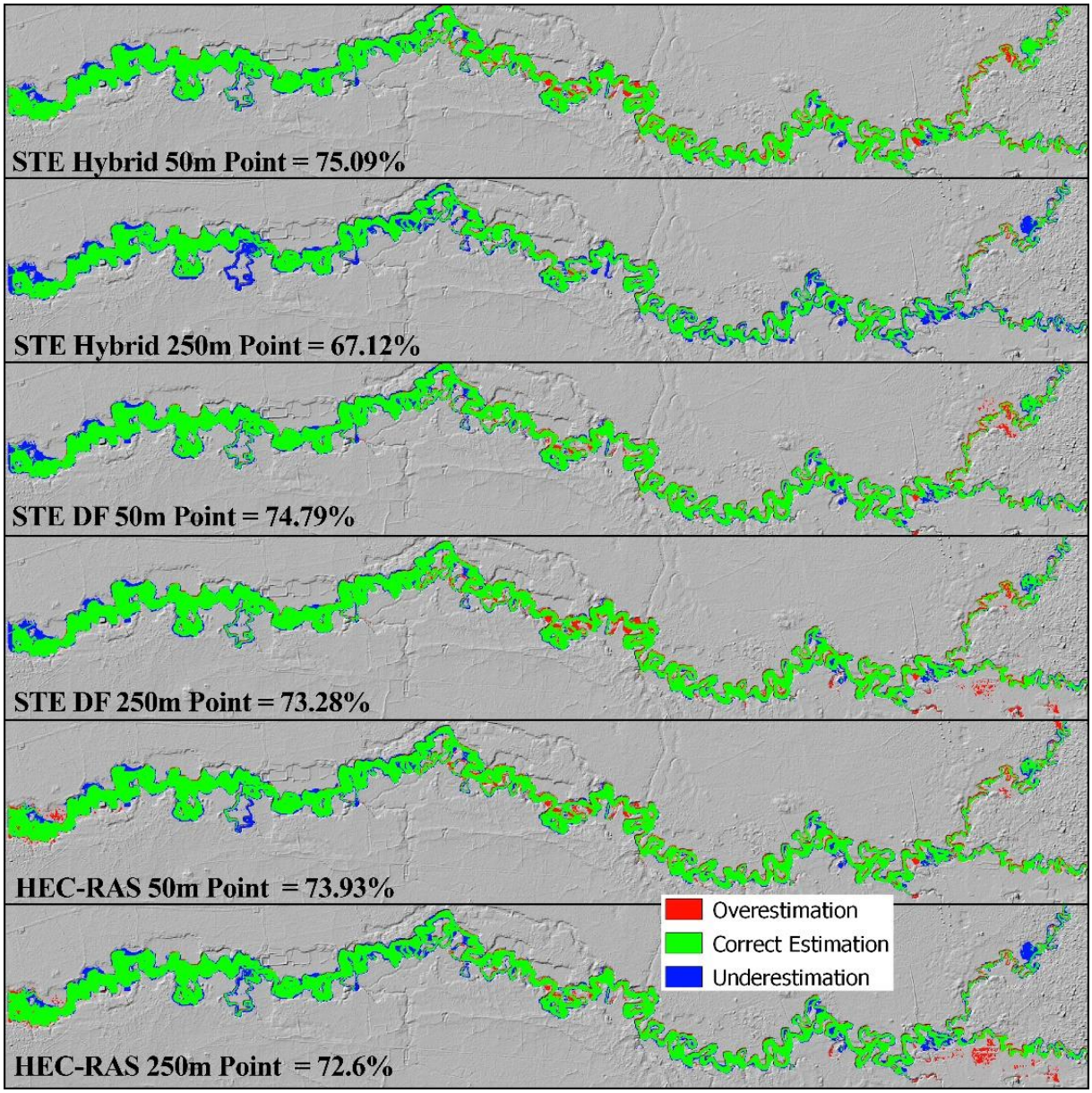

Fig. 10 The error map of predicted flood extent using each model in 50- and 250-meter computational grid spacing

شکل ۱۰ نقشه خطای پهنه محاسبه شده توسط هر مدل در ابعاد سلول‌های محاسباتی ۵۰ و ۲۵۰ متر

با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۲ افزایش گام مکانی باعث افزایش بازدهی تمامی روش‌ها تا گام مکانی ۱۰۰ الی ۱۵۰ متر شده است ولی از گام مکانی ۱۵۰ متر تا ۲۵۰ متر تنها روش‌های شبکه‌بندی مجهز به تغییرات درون سلولی قادر به افزایش بازدهی خود بوده‌اند. همچنین بررسی مقدار های بازدهی روش‌ها نشان می‌دهد بیشترین بازدهی مدلسازی سریع سیلاب در این منطقه مورد مطالعه متعلق به روش ترکیبی با گام مکانی ۱۵۰ متر می‌باشد. نرم‌افزار HEC-RAS دقت بالایی در مدلسازی پهنه سیلابی داشته است ولی به دلیل سرعت پایین‌تر این نرم‌افزار در انجام مدلسازی از بازدهی کمتری نسبت به نرم‌افزار STE برخوردار است. بیشترین بازدهی نرم افزار HEC-RAS برای مدلسازی سیلاب در این منطقه مورد مطالعه در گام مکانی ۲۵۰ متر بوده است.

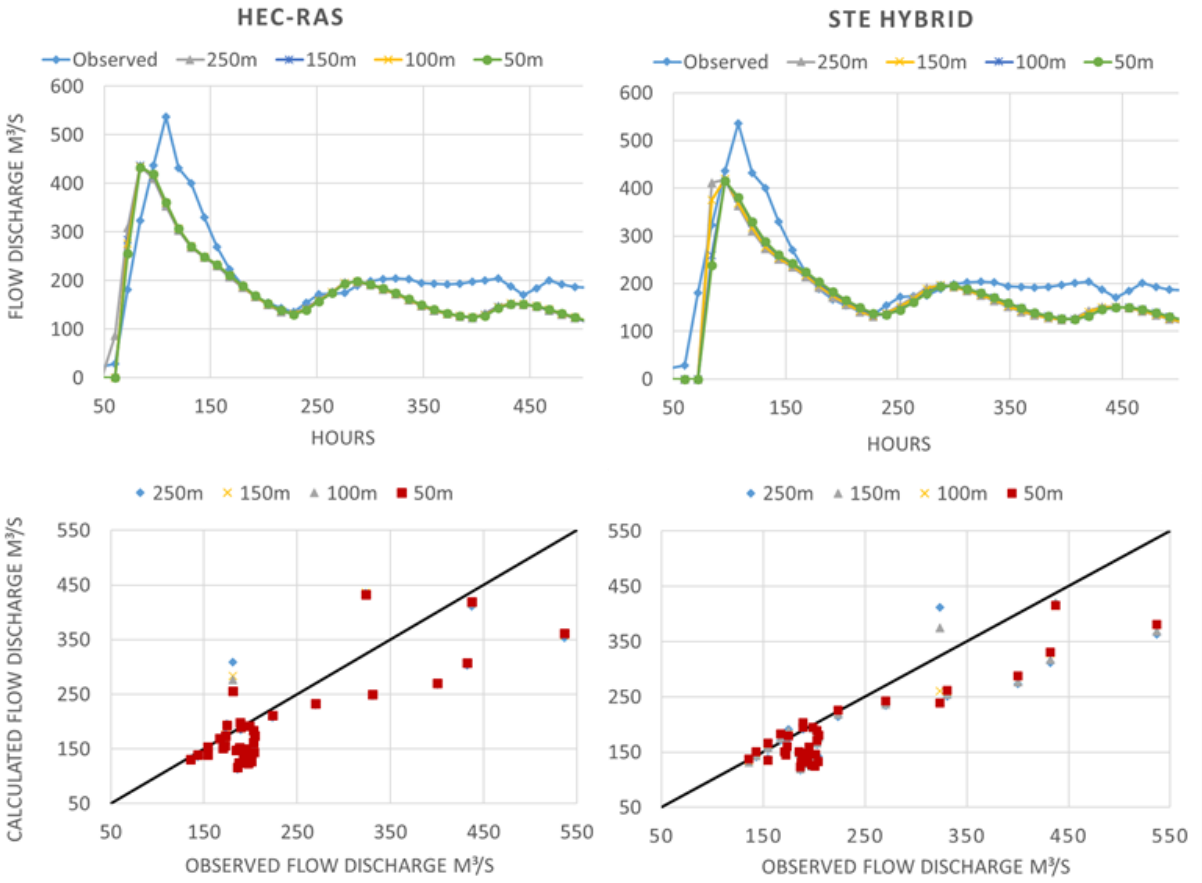

Fig. 11 Calculated flow hydrographs compared to the recorded flow hydrograph

شکل ۱۱ هیدروگراف‌های دبی جریان محاسبه شده در مقابل هیدروگراف دبی جریان مشاهده شده

۳-۲- تاثیر پردازش موازی

به منظور بررسی تاثیر پردازش موازی اقدام به مدلسازی دوباره سیلاب مورد بررسی در حالت پردازش سری و پردازش موازی با استفاده از هر دو دستگاه توسط نرم‌افزار STE و روش شبکه‌بندی ترکیبی شده است. میزان استفاده از کل ظرفیت پردازنده مرکزی در زمان مدلسازی توسط نرم افزار STE و HEC-RAS به ترتیب حدود ۹۰ و ۶۰ درصد بوده است. با توجه به اینکه استفاده بهینه از بخش بیشتری از منابع پردازشی توسط نرم‌افزار منجر به افزایش سرعت محاسبات خواهد شد، مقایسه میزان استفاده دو نرم‌افزار از کل ظرفیت پردازنده در زمان مدلسازی نشان دهنده موثرتر بودن الگوریتم کدنویسی شده در نرم‌افزار STE به منظور استفاده از بیشینه توان پردازشی و افزایش سرعت مدلسازی می‌باشد.

با توجه به جدول ۶ و شکل ۱۳ پردازش موازی و محاسبه بخش‌های مختلف دامنه حل دوبعدی به صورت همزمان،

جدول ۵ درصد بازدهی روش‌های مورد بررسی

Table 5 The efficiency percentage of the models

Model $\Delta x, \Delta y$	HEC RAS	STE			
		Subgrid Variability		Classic	
		CF	DF	Hybrid	Min
50m	-179.93	32.66	29.39	58.84	58.21
100m	37.27	65.9	62.75	71.6	67.57
150m	62.96	69.62	68.84	72.68	63.78
250m	69.94	71.16	71.08	66.88	45.49

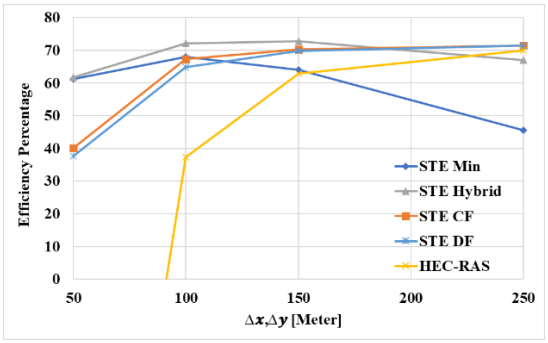

Fig. 12 The efficiency percentage of the methods against variations in cell size.

شکل ۱۲ درصد بازدهی روش‌های مورد بررسی در مقابل تغییرات گام مکانی

تنها باعث افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان لازم برای اتمام مدلسازی تا ۶۵ درصد به ویژه در گام‌های مکانی کوچکتر شده و هیچ تاثیری بر دقت مدلسازی و موارد دیگر نداشته است. برای اجرای کدهای نوشته شده در حالت موازی زمان قابل توجهی صرف آماده سازی و اجرای کد می‌شود بنابراین در صورتی که انجام محاسبات به صورت موازی صرفه لازم برای اجرا در حالت موازی را نداشته باشد نمی‌تواند زمان لازم برای اتمام محاسبات را کاهش دهد و گاهی ممکن است باعث طولانی‌تر شدن محاسبات نیز شود لذا مطابق جدول ۶ با کوچکتر شدن ابعاد سلول‌های محاسباتی تعداد سلول‌ها در هر گام زمانی افزایش یافته و انجام محاسبات به صورت موازی و همزمان، سریع‌تر است.

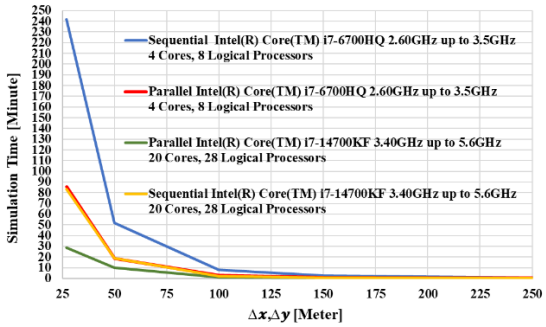

Fig. 13 Time required to complete the simulation in parallel and sequential processing modes versus cell size.

شکل ۱۳ زمان لازم برای اتمام مدلسازی در دو حالت پردازش موازی و پردازش سری در مقابل گام مکانی

جدول ۶ زمان لازم برای اتمام مدلسازی برحسب دقیقه توسط دستگاه‌های مختلف و نرم‌افزار STE

Table 6 The time required to complete the simulation in minutes using different processors and STE software

$\Delta x, \Delta y$	Parallel 6700HQ	Sequential 6700HQ	Parallel 14700KF	Sequential 14700KF	Cells
27m	85.72	241.73	28.61	83.17	27472
50m	18.4	51.84	9.95	18.73	10583
100m	2.9	7.87	1.23	2.14	3119
150m	1.02	2.48	0.47	0.65	1565
250m	0.305	0.67	0.13	0.16	663

مطابق شکل ۱۴ تاثیر پردازش موازی در پردازنده‌هایی که سرعت پردازش کمتری داشته ولی چند هسته‌ای هستند مانند 6700HQ، بیشتر بوده است. در صورتی که در پردازشگرهای بروزتر و سریع‌تر مانند پردازنده 14700KF با اینکه تعداد هسته‌های بیشتری مورد استفاده قرار می‌گیرد ولی در گام‌های مکانی بزرگتر ضریب تاثیر کمتری داشته است. ضریب تاثیر در این پردازنده‌ها با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی افزایش شدیدتری دارد. در مجموع این مقدار های با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی مطابق شکل ۱۴ افزایش یافته و تاثیر پردازش موازی با تعداد سلول‌های محاسباتی موجود در دامنه حل رابطه مستقیم و با گام مکانی رابطه عکس دارد. افزایش ضریب تاثیر در پردازنده‌های دارای هسته‌های بیشتر، در مقابل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی بسیار شدیدتر است.

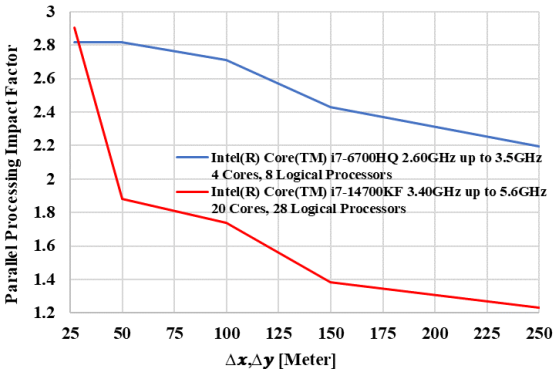

Fig. 14 The parallel processing impact factor in rapid flood modeling versus cell size.

شکل ۱۴ ضریب تاثیر پردازش موازی در سرعت مدلسازی در مقابل گام مکانی

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توسعه بخش دوبعدی نرم‌افزار توسعه یافته STE به بررسی روش‌های مختلف شبکه‌بندی ارائه شده درکنار تاثیر پردازش موازی در سرعت و دقت مدلسازی سیلاب با استفاده از معادلات آب کم عمق دو بعدی پرداخته شده و نتایج به‌دست آمده با نتایج نرم‌افزار HEC-RAS و پهنه ثبت شده توسط ماهواره سنتینل ۲ در سیل فروردین ماه سال ۱۳۹۸ در رودخانه گرگانرود استان گلستان مورد مقایسه، بحث و بررسی قرار گرفته است. به صورت خلاصه نتایج این تحقیق نشان داد :

۱) افزایش گام مکانی با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی می‌تواند ضمن حفظ دقت مدلسازی سیلاب تا حد قابل

قبولی، زمان لازم برای اتمام مدلسازی را تا ۹۰ درصد کاهش دهد.

۲) نرم‌افزار توسعه یافته STE از نظر دقت مدلسازی پهنه سیلابی با نرم‌افزار HEC-RAS تقریبا در یک حد هستند ولی سرعت محاسبات در نرم‌افزار STE در هر دو حالت شبکه‌بندی بسیار بیشتر از نرم‌افزار HEC-RAS بوده و زمان لازم برای اتمام مدلسازی سیلاب در نرم افزار STE نزدیک به ۹۵٪ کمتر از نرم‌افزار HEC-RAS می‌باشد.

۳) زمان لازم برای اتمام مدلسازی با استفاده از روش‌های شبکه‌بندی ترکیبی و حداقل تاحدودی یکسان است ولی این روش‌ها در دقت مدلسازی بسیار موثر هستند. روش ترکیبی دقت بیشتری را در گام‌های مختلف مکانی ارائه می‌دهد.

۴) دقت مدلسازی با استفاده از روش گسسته سازی شده در عرض (DF) نزدیک به ۱ درصد بیشتر از روش سطح مقطع کامل (CF) است ولی به ۸ تا ۴۰ درصد زمان بیشتری برای اتمام مدلسازی نیاز دارد.

۵) مقایسه هیدروگراف‌های محاسبه شده در پایین دست منطقه مورد مطالعه (ورودی سد وشمگیر) با مقدار های اندازه‌گیری شده در زمان رخداد سیل، نشان می‌دهد هر دو نرم‌افزار از دقت خوبی در مدلسازی دبی جریان در تمامی گام‌های مکانی برخوردار بوده و افزایش گام مکانی تاثیر زیادی در مدلسازی دبی جریان پایین دست نداشته و باعث ایجاد خطای حجم آب نمی‌شود.

۶) افزایش گام مکانی باعث افزایش بازدهی تمامی روش‌ها تا گام مکانی ۱۰۰ الی ۱۵۰ متر شده است ولی از گام مکانی ۱۵۰ متر تا ۲۵۰ متر فقط روش‌های شبکه‌بندی مجهز به تغییرات درون سلولی قادر به افزایش بازدهی خود بوده‌اند. همچنین بررسی مقدارهای بازدهی روش‌ها نشان می‌دهد بیشترین بازدهی مدلسازی سریع سیلاب در این منطقه مورد مطالعه متعلق به روش ترکیبی با گام مکانی ۱۵۰ متر است.

۷) پردازش موازی و محاسبه بخش‌های مختلف دامنه حل دوبعدی به صورت همزمان، تنها باعث افزایش سرعت محاسبات و کاهش زمان لازم برای اتمام مدلسازی تا ۶۵ درصد به ویژه در گام‌های مکانی کوچکتر شده و هیچ تاثیری بر دقت مدلسازی و موارد دیگر نداشته است.

۸) تاثیر پردازش موازی با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی افزایش یافته و تاثیر پردازش موازی با تعداد سلول‌های محاسباتی موجود در دامنه حل رابطه مستقیم و با گام مکانی رابطه عکس دارد. افزایش ضریب تاثیر در پردازنده‌های دارای هسته‌های بیشتر، در مقابل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی بسیار شدیدتر است.

۹) میزان استفاده از کل ظرفیت پردازنده مرکزی در زمان مدلسازی توسط نرم افزار STE و HEC-RAS به ترتیب حدود ۹۰ و ۶۰ درصد بوده است. با توجه به اینکه استفاده بهینه از بخش بیشتری از منابع پردازشی توسط نرم‌افزار منجر به افزایش سرعت محاسبات خواهد شد، مقایسه میزان استفاده دو نرم‌افزار از کل ظرفیت پردازنده در زمان مدلسازی نشان دهنده موثرتر بودن الگوریتم کدنویسی شده در نرم‌افزار STEبه منظور استفاده از بیشینه توان پردازشی و افزایش سرعت مدلسازی می‌باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی رساله دکتری صورت گرفته است. بدینوسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان تقدیر می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: توسعه کد و تجزیه و تحلیل داده‌ها.

نویسنده دوم: ایده کار و تحلیل نتایج.

نویسنده سوم: ویرایش مقاله.

۵- منبع‌ها

Artichowicz, W. & Gąsiorowski, D. (2019). Computationally efficient solution of a 2D diffusive wave equation used for flood inundation problems. *Water*, *11*(10), 2195, https://doi.org/10.3390/w11102195.

Courty, L.G., Pedrozo-Acuña, A. & Bates, P.D. (2017). Itzï (version 17.1): An open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. Geoscientific Model Development, *10*(4), 1835-1847.

De Almeida, G.A. & Bates, P. (2013). Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. *Water Resources Research*, *49*(8), 4833-4844.

Gąsiorowski, D. (2014). Modelling of flood wave propagation with wet-dry front by one-dimensional diffusive wave equation. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, *61*(3-4), 111-125.

Jamali, B., Haghighat, E., Ignjatovic, A., Leitão, J. P. & Deletic, A. (2021). Machine learning for accelerating 2D flood models: Potential and challenges. *Hydrological Processes*, *35*(4), e14064, https://doi.org/10.1002/hyp.14064.

Khojeh, S., Ataie-Ashtiani, B. & Hosseini, S. M. (2022). Effect of DEM resolution in flood modeling: a case study of Gorganrood River, Northeastern Iran. *Natural Hazards*, *112*(3), 2673-2693.

Martins, R., Leandro, J., Chen, A. S., & Djordjević, S. (2017). A comparison of three dual drainage models: shallow water vs local inertial vs diffusive wave. *Journal of Hydroinformatics*, *19*(3), 331-348.

Namazi Rad, A., Mohseni, N., & Hosseinzadeh, S. R. (2021). Flood inundation monitoring using Sentinel SAR data and hydraulic modeling. *Quantitative Geomorphological Research*, *10*(3), 40-56. (In Persian)

Neal, J., Villanueva, I., Wright, N., Willis, T., Fewtrell, T. & Bates, P. (2012). How much physical complexity is needed to model flood inundation?. *Hydrological Processes*, *26*(15), 2264-2282.

Safari, A. & Mahdavi, M. (2001). Determining a scheme for manage optimizing in flood plains (Case Study nekarood river), M.Sc. Thesis, Tehran University, 100p.

Samadi, A. & Azizian, A. (2020). Influence of the concept of subgrid variability and computational mesh dimensions on the performance of HEC-RAS 2D model in simulating river floodplains (Case study: Sarbaz River). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *9*(3), 1-12. (In Persian)

Sinnakaudan, S.K., Ab Ghani, A., Ahmad, M.S.S. & Zakaria, N. A. (2003). Flood risk mapping for Pari River incorporating sediment transport. Environmental Modelling & Software, *18*(2), 119-130.

Tanaka, T., & Yoshioka, H. (2017). Numerical stability analysis of the local inertial equation with semi-and fully implicit friction term treatments: assessment of the maximum allowable time step. *Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering*, *4*(2), 162-175.

Teimourey, R. & Dehghani, A.A. (2021). Assessment of bed load transport formula by using developed applied software (STE)(Case study: Chehel-chai, Khormaloo and Soosara rivers in Golestan province). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *52*(11), 2743-2760.

Teimourey, R. & Dehghani, A.A. (2020). Comparison of Different Methods for Estimating Bed Load using developed software of STE (case study: Babolroud River). *Journal of Water and Soil Conservation*, *27*(1), 229-236.

© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.