

مقاله علمی-پژوهشی

استفاده از روش‌های تغییرات و محاسبات درون سلولی با هدف افزایش سرعت مدل‌سازی

سیلاب با استفاده از نرم افزار STE

رضا تیموری<sup>۱</sup>، امیراحمد دهقانی<sup>۲</sup>، مهدی مفتاح هلقی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

چکیده

سیلاب‌های شدید و ناگهانی همواره منجر به خسارات جبران ناپذیری اعم از مرگ هزاران نفر و ضررهای اقتصادی بسیاری شده است. پهنه‌بندی سریع سیلاب یکی از مهمترین و اساسی‌ترین موارد در مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از سیل است. برای کاهش خطرات، خسارات و اقدام به موقع، ضروری است که مناطق در معرض خطر سیلاب و آبگرفتگی را سریعاً شناسایی کرده و اقدامات لازم انجام شود. در این تحقیق، با توسعه بخش دوبعدی نرم‌افزار کاربر پسند STE اقدام به حل سریع تر معادلات آب کم عمق شده و با ارائه و بررسی روش‌های جدید شبکه‌بندی کلاسیک و تغییرات درون سلولی، به تسریع فرآیند پهنه‌بندی و شبیه سازی سیلاب پرداخته شده است. به منظور ارزیابی روش‌های ارائه شده اقدام به مدل‌سازی سیلاب اتفاق افتاده در سال ۲۰۱۷ توسط طوفان هاروی در ایالت تگزاس آمریکا در طول یک بازه ۲۲ کیلومتری از رودخانه برازوس در نزدیکی شهر همپستد شده است. مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی دقیق و طولانی مدت سیلاب با استفاده از دسته معادلات آب کم عمق با روش‌های سریع ارائه شده در تحقیق نشان می‌دهد روش‌های تغییرات درون سلولی می‌توانند ضمن حفظ دقت مدل‌سازی مدت زمان لازم برای اتمام مدل‌سازی سیلاب را از ۱۰۹۰ دقیقه به ۱۷ الی ۳۶ دقیقه (۹۷ درصد) کاهش دهند. این در حالی است که پهنه سیلابی با دقت ۹۴ درصد و مدل‌سازی عمق جریان با RMSE برابر ۰.۱۴ همراه بوده است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات درون سلولی، محاسبات درون سلولی، مدل‌سازی سریع سیلاب، معادلات آب کم عمق SWE، نرم‌افزار STE

مقدمه

پیش‌بینی‌های هواشناسی، شرایط موجود را شبیه‌سازی کرده و سریعاً مناطق در معرض خطر و قسمت‌های مختلف منطقه که در معرض آب‌گرفتگی و خسارت هستند، شناسایی کردند تا اقدامات لازم انجام شود. با پیشرفت کامپیوترها دستیابی به روش‌هایی برای پهنه‌بندی سریع و دقیق سیلاب امکان پذیر است. یکی از بهترین و جدیدترین ابزارها برای مدل‌سازی، نمایش و جانمایی نقشه پهنه‌بندی سیلاب، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آن با مدل‌های هیدرولیکی است. تحلیل سریع و به موقع پهنه سیلاب در زمان یا پیش از وقوع سیل برای شناسایی مناطق مورد تهدید و ارزیابی خسارات احتمالی، امری ضروری است. برنامه‌ریزی برای مقابله با خطرات ناشی از سیل، پاسخگویی سریع در شرایط ضروری و مدیریت بحران نیازمند دسترسی سریع به نقشه‌های دقیق آبگرفتگی ناشی از سیل بوده که شناسایی مناطق مورد تهدید را میسر کند. در زمان وقوع سیل مشکلات و سوالات متعددی مطرح خواهند شد که نیاز به رسیدگی سریع، به موقع و موثر خواهند داشت و اگر زمان از دست برود خسارات حداکثر شده و مشکلات بی‌نهایت می‌شوند. برای پاسخگویی و رسیدگی به موقع به مشکلات، سوالات و چالش‌های

در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین، تغییرات آب و هوایی شدت گرفته است و خطر وقوع سیل بیشتر از پیش کشورها را تهدید می‌کند. همواره خسارت‌های جانی و مالی زیادی توسط سیل‌های شدید و ناگهانی متوجه کشورها شده است. مدل‌سازی سریع سیلاب و رسیدن به پهنه آبگرفتگی ناشی از سیل یکی از موارد مهم و اساسی در مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از سیل است. به منظور کاهش خطرات، آسیب‌ها و اتخاذ تدابیر به موقع، ضروری است که با بهره‌گیری از داده‌های موجود و

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی

گرگان، گرگان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان،

گرگان، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

گرگان، ایران

(\* - نویسنده مسئول: Email: meftah@gau.ac.ir)

2003).

نیل و همکاران اقدام به مقایسه حل عددی سه دسته معادلات دوبعدی: آب کم عمق (دینامیک کامل)، آب کم عمق (تقریب اینرسی محلی) و موج دیفیوژن در حالت صریح پرداخته‌اند. در این تحقیق برای مقایسه بهتر هر سه مدل در یک محیط کدنویسی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل موج دیفیوژن زمان بسیار بیشتری را برای اتمام مدل‌سازی نیاز دارد در حالی که مدل تقریب اینرسی محلی سریعترین مدل در این تحقیق بوده است. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد برای جریان‌هایی که در راستای زمان، تدریجی تغییر می‌کنند حل معادلات دینامیک کامل ضروری نیست. در این تحقیق معادلات ساده شده قادر به مدل‌سازی دقیق جریان فوق بحرانی نبوده‌اند (Neal et al., 2011).

دی‌آلمیدا و بیس به بررسی کاربرد دسته معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی، حل عددی، خصوصیات ساده سازی و تاثیر این ساده سازی در دقت نتایج با مقایسه نتایج این معادله با حل تحلیلی معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) در مدل‌های آزمایشی طراحی شده مورد بررسی تحقیق پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد توافق خوبی بین نتایج بدست آمده از معادلات ساده شده با نتایج بدست آمده از معادلات دینامیک کامل مخصوصاً در جریان‌های زیر بحرانی و مقادیر عدد فرود کمتر از ۰.۵ وجود دارد (De Almeida & Bates., 2013).

گاسپوروسکی به مقایسه نتایج بدست آمده از حل عددی دسته معادلات موج دیفیوژن یک بعدی و معادلات آب کم عمق یک بعدی به روش المان محدود پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داد، اگر چه معادلات موج دیفیوژن شتاب محلی را در محاسبات لحاظ نمی‌کند، ولی می‌تواند آنگرفتنگی در پهنه‌های سیلابی را به خوبی مدل‌سازی کند. با استفاده از روش حل عددی مورد استفاده در این تحقیق معادلات موج دیفیوژن نتایج دقیقی را برای موج‌های آرام و حتی نواحی دارای شیب تند کف ارائه داده و فقط در موج‌های سریع بر روی برآمدگی‌ها از دقت نتایج آن کاسته شده است (Gąsiorowski., 2014).

کورتی و همکاران اقدام به توسعه ابزار مدل‌سازی سیل در زبان برنامه نویسی پایتون با استفاده از شکل ساده شده معادلات آب کم عمق با نام تقریب اینرسی محلی کرده‌اند. در این تحقیق به صحت سنتی و مقایسه دسته معادلات نام برده در مقابل معادلات آب کم عمق (دینامیک کامل) پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق ثابت کرد 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 مورد مطالعه این تحقیق، شایستگی خود را در مشخص سازی دقیق پهنه سیلابی که توسط سازمان‌های محلی نیز مورد تایید بوده، نشان داده است

زمان وقوع بحران سیل نیاز به آگاهی از شرایط دقیق پیشرو اعم از شدت آنگرفتنگی، ناحیه مورد تهدید، پهنه سیلاب، عمق و سرعت جریان آب، ساختمان‌ها، جاده‌ها، پل‌ها و مناطق مسکونی و مورد تهدید و همچنین کلیه 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 اقدامات لازم خیلی سریعتر و به موقع انجام شود. برای این منظور نیاز است تا با استفاده از فناوری‌های جدید، کامپیوترها و روش‌های حل سریع‌تر معادلات حاکم، به مدل‌سازی دقیق سیلاب سرعت بخشیده و جهت کاهش خسارات ناشی از سیل و مدیریت بحران، پهنه‌های سیلابی و نواحی مورد تهدید سیل را به سرعت مشخص کرد و اقدامات لازم را انجام داد. مدل‌سازی دقیق و هیدرولیکی سیلاب همواره با چالش‌های زیادی همراه بوده است. در دهه‌های اخیر به منظور کاهش چالش‌ها و رسیدن به معادلات و روش‌های ساده‌تر و مناسب برای مدل‌سازی هیدرولیکی، دقیق و سریع سیل تحقیقات متعددی انجام گرفته و پیشرفت بسیار خوبی حاصل شده است. یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها نحوه 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 زمانی محاسبات کاهش خواهد یافت از طرفی به دلیل بالا بودن تعداد سلول‌های محاسباتی مدت زمان لازم جهت انجام مدل‌سازی طولانی بوده و نیاز است تا با افزایش ابعاد سلول‌های شبکه، تعداد سلول‌های محاسباتی را کاهش داد تا ضمن افزایش گام محاسباتی، حجم محاسبات را کاهش داده و زمان لازم جهت 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 کلاسیک<sup>۱</sup> و یا روش‌های تغییرات درون سلولی<sup>۲</sup> دقت مدل‌سازی را نسبت به افزایش ابعاد سلول‌های شبکه مقاوم ساخت.

سینا کاردن و همکاران اقدام به تهیه نقشه خطر سیل برای رودخانه پاری در مالزی نمودند. برای این منظور از سامانه اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار Arcview استفاده گردید. ایشان با توجه به مشاهدات میدانی، نتیجه‌گیری کردند که این سامانه محیط مناسبی را برای تهیه نقشه خطر سیل ایجاد می‌کند (Sinnakaudan et al.,

(Courty et al., 2017).

هیدرولیکی سیلاب و پهنه‌بندی سیل پیشرفت قابل توجهی انجام شده و معادلات دوبعدی مناسبی قابل استفاده هستند. از طرفی یکی از مهمترین و تاثیر گذارترین مسائل در دقت و سرعت مدل‌سازی دوبعدی سیل نحوه گسسته سازی و شبکه‌بندی دامنه حل است که استفاده از روش مناسب می‌تواند ضمن حفظ دقت، سرعت مدل‌سازی را بسیار افزایش داده و زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی، پهنه‌بندی سیل و شناسایی مناطق مورد تهدید را کاهش دهد. در این تحقیق به ارائه و بررسی دو روش شبکه‌بندی کلاسیک و دو روش تغییرات درون سلولی 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.

### مواد و روش‌ها

به منظور مدل‌سازی جریان آب سطحی به صورت دو بعدی معادلاتی که مورد بررسی قرار می‌گیرند با در نظر گرفتن فرضیاتی 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 معادلات از معادلات ناویه استوکس 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 معادلات 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 روابط شماره (۱) تا (۳) می‌باشند.

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

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

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

تاناکا و یوشیوکا 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 مورد بررسی قرار گرفته و حالت ضمنی حل عددی این معادلات ارائه و برتری‌های آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Tanaka & Yoshioka., 2017).

آرتیچویک و گاسیوروسکی به بررسی روش‌های موثر در حل سریع‌تر معادله موج دیفیوژن دوبعدی پرداخته‌اند. در این تحقیق از پردازش موازی جهت کاهش زمان لازم برای انجام مدل‌سازی استفاده و نتایج نشان داد حل معادلات بدست 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 جهت اتمام مدل‌سازی به همراه دارد (Artichowicz & Gąsiorowski., 2019).

صمدی و عزیزیان (۱۳۹۹) به ارزیابی تاثیر تغییرات درون سلولی، ابعاد شبکه محاسباتی و مقیاس نقشه توپوگرافی بر عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه سیل رودخانه سرباز پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش ابعاد سلول محاسباتی، میزان خطای مدل در شبیه‌سازی پهنه‌های سیلگیر نسبت به ابعاد سلولی کوچک نسبتاً پائین می‌باشد. مدت زمان اجرای مدل دوبعدی نیز در ابعاد سلولی ۵۰۰ متر تقریباً ۴۵ برابر کمتر از مدت زمان اجرای مدل در صورت استفاده از ابعاد سلولی ۲۰ متر است.

جمالی و همکاران به منظور کاهش زمان لازم جهت مدل‌سازی سیلاب در حوضه‌های طبیعی اقدام به بررسی روش‌های مختلف یادگیری ماشین کرده‌اند. در این تحقیق حل عددی دسته معادلات آب کم عمق در حالت تقریب محلی اینرسی مورد استفاده قرار گرفته است و از روش‌های یادگیری ماشین برای جایگزینی بخشی از معادلات روش تفاضل محدود استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است استفاده از روش‌های یادگیری ماشین قادر به کاهش زمان لازم جهت مدل‌سازی سیلاب می‌باشد (Jamali et al., 2021).

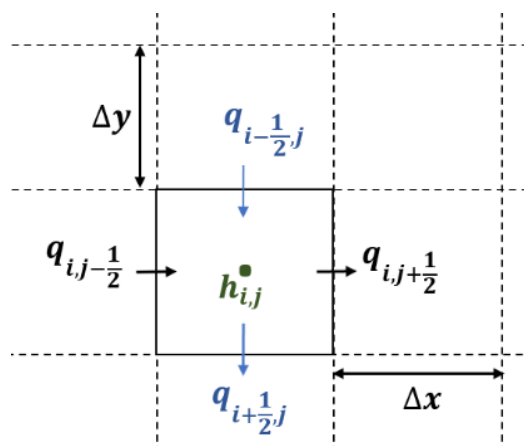
سلطانی و همکاران (۱۴۰۰) به مقایسه نتایج مدل هیدرولیکی MIKEFLOOD در اندازه‌های شبکه محاسباتی ۱، ۲.۵، ۵ و ۱۲ متر در بازه‌ای به طول تقریبی ۲.۸ کیلومتر از ابتدای کانال سیل برگردان غرب تهران پرداخته‌اند. مدل بیان شده برای دبی با دوره بازگشت ۵۰ سال اجرا شده است. مقایسه‌ی نتایج پهنه‌بندی سیل در اندازه شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد که درصد اختلاف مساحت پهنه‌ی سیل در شبکه با ابعاد ۱ متر مربع نسبت به پهنه‌ی سیل شبکه‌های ۲.۵، ۵ و ۱۲ متر به ترتیب برابر با ۱۶٪، ۳۵٪ و ۶۸٪ است. از نظر زمان اجرا نیز اجرای مدل ۱ متر به ترتیب ۷، ۳۹ و ۱۴۶ برابر مدل با ابعاد شبکه ۵، ۲.۵ و ۱۲ متر به طول انجامیده است.

بررسی سوابق تحقیق نشان می‌دهد در زمینه مدل‌سازی دوبعدی و

QGIS، Arcmap، HEC-RAS، HEC-HMS و غیره نداشته باشد لذا سعی شده است تا تمامی ابزارهای مورد نیاز جهت کار با فایل های رستری<sup>۲</sup>، برداری و جغرافیایی و همچنین انجام محاسبات و تحلیل های 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](http://www.ste.hwstr.ir)

### روش های شبکه بندی کلاسیک و تغییرات درون سلولی

در نرم افزار توسعه داده شده در این تحقیق از معادلات ساده سازی شده با نام تقریب اینرسی محلی (۴) برای مدل سازی گسترش سیلاب و مشخص سازی پهنه سیلابی استفاده شده است که این معادلات با استفاده از روش تفاضل های محدود و به دو حالت ضمنی و نیمه ضمنی حل و کدنویسی شده است (Tanaka & Yoshioka., 2017). مطابق شکل ۱ سلول هایی مستطیل شکل با فواصل  $\Delta x$  و  $\Delta y$  از هم که مقدار عمق یا حجم آب در وسط سطح سلول و مقدار دی در اضلاع سلول محاسبه خواهند شد.



شکل ۱- نحوه شبکه بندی و تنظیم گره های محاسباتی جهت حل معادلات آب کم عمق دو بعدی در نرم افزار STE

به منظور مدل سازی سیل در دقیق ترین حالت ممکن لازم است تا اندازه سلول های شبکه برابر با سلول های فایل رستری نقشه توپوگرافی منطقه باشد. در این حالت با توجه به بالا بودن تعداد سلول های محاسباتی، حجم پردازش و محاسبات بر روی پردازنده بسیار بالا رفته و با توجه به شرایط پایداری حل عددی دسته معادلات آب کم عمق، مدل سازی با سلول های محاسباتی کوچک، گام زمانی محاسباتی کوچکتری نیاز دارد لذا زمان لازم برای اتمام مدل سازی بسیار طولانی است. با افزایش ابعاد سلول های شبکه می توان تعداد سلول های محاسباتی را کاهش داد تا ضمن افزایش گام زمانی

که در روابط (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 می باشد.

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

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

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

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

### نرم افزار توسعه یافته STE و افزونه STEGIS

بخش یک بعدی نرم افزار برآورد گر بار رسوبی در رودخانه ها<sup>۱</sup> توسط تیموری و دهقانی (۱۳۹۸) توسعه داده شد. این نرم افزار روش های مختلف برآورد بار رسوب اعم از ۹۲ روش هیدرولیکی، روش های مختلف هیدرولوژیکی و روش های هوشمند جهت برآورد باربستر، معلق و بار کل مطالعه و کد نویسی شده است. در این نرم افزار روش های مختلف محاسبه سرعت سقوط ذرات، تنش برشی، آستانه حرکت ذرات و دیگر پارامترهای هیدرولیکی در دسترس و قابل استفاده هستند و همچنین روش های مختلف و موثری جهت بهینه سازی، هوشمند سازی، کالیبراسیون 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 می توانند امکانات منحصر به فردی را در محاسبه، مدل سازی و جانمایی پهنه های سیلابی، هیدرولیک جریان، تحلیل های 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 تحلیل های 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 بگونه ای کدنویسی و در افزونه قرار گیرد تا کاربر در زمان انجام مدل سازی ها و تحلیل های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و غیره نیازی به نرم افزارهای متفرقه مانند

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 مناطق 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 ۲ در این حالت تراز سطح زمین انتخاب شده می‌تواند ضمن در نظر گرفتن مجاری آبی به تراز سطح زمین نیز نزدیک‌تر بماند.

### روش‌های شبکه‌بندی با در نظر گرفتن تغییرات درون سلولی

انتخاب یک مقدار به عنوان تراز سطح زمین در یک سلول محاسباتی با چالش‌های متعددی مخصوصاً در مواقعی که سلول در منطقه‌ای با تغییرات زیاد تراز سطح زمین باشد و یا سلول ابعاد بزرگی داشته باشد، همراه است. معمولاً مجاری آبی در تراز پایین‌تری نسبت به دشت‌های سیلابی و مناطق دیگر قرار دارند. با توجه به اینکه لحاظ شدن مجاری آبی در مدلسازی از اهمیت بالایی برخوردار است، لازم است تا کمترین مقادیر 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 کانال‌ها و یا قسمت‌هایی از رودخانه که عرضی کمتر از ابعاد سلول دارند، در مدلسازی می‌باشد. در صورتی 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 مومتوم 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 مقادیر موجود تراز کف استفاده خواهد شد. در این حالت پیش از شروع مدلسازی، هر سلول محاسباتی مورد بررسی کامل قرار گرفته و مطابق شکل ۳ رابطه تراز سطح آب و حجم آب موجود در سلول برای هر

محاسبات، حجم محاسبات را کاهش داده و زمان لازم جهت اتمام 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 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<sup>۱</sup> و ترکیبی<sup>۲</sup> 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 موقعیت مکانی سلول، دسته‌بندی پوششی آن مشخص و ضریب زبری با توجه به روش شبکه‌بندی مورد استفاده، محاسبه و تعیین می‌گردد. 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.

### 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 ۲ در این حالت با افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی، این روش جزئیات ارتفاعی بیشتری را از دست داده و خطا افزایش می‌یابد.

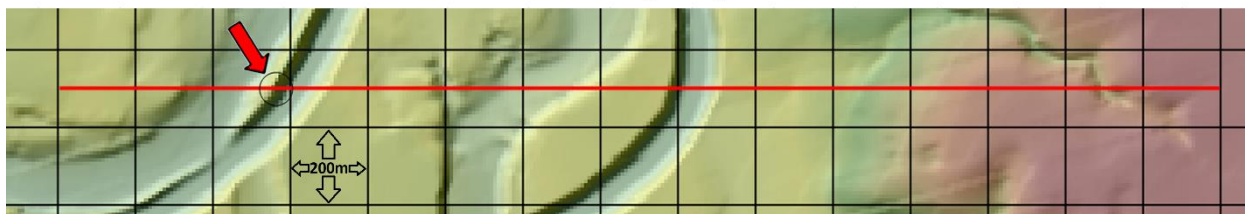
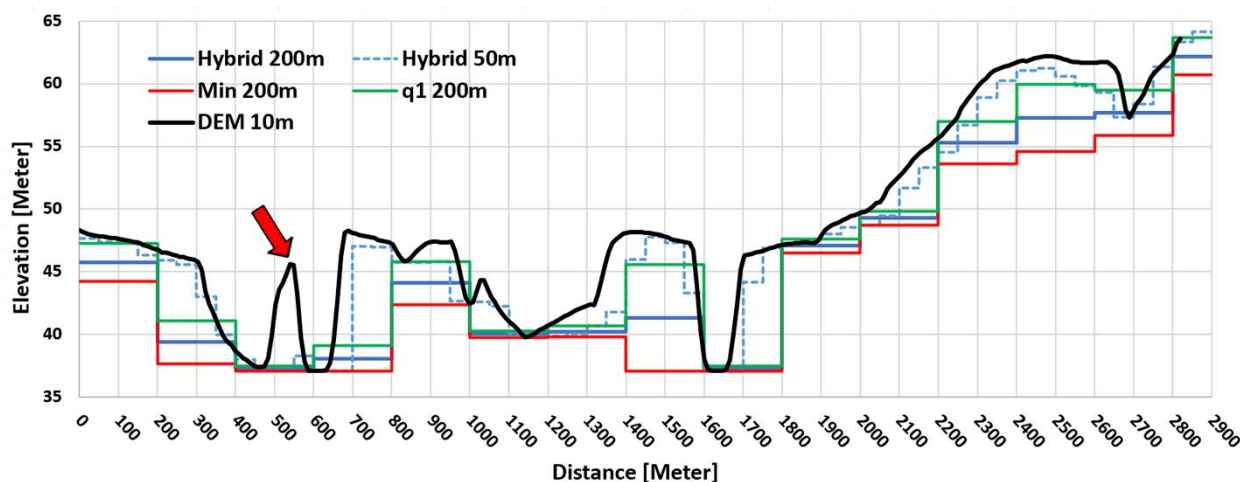
### روش چارک اول<sup>۳</sup>

در این روش مقداری به عنوان تراز سطح زمین در سلول محاسباتی انتخاب می‌شود که ۲۵ درصد مقادیر تراز سطح زمین در محدوده سلول کمتر از آن هستند و ۷۵ درصد مقادیر بیشتر از آن هستند. مطابق شکل ۲ در این حالت با افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی، این روش قادر است تراز سطح زمین را نزدیک‌تر به نقشه

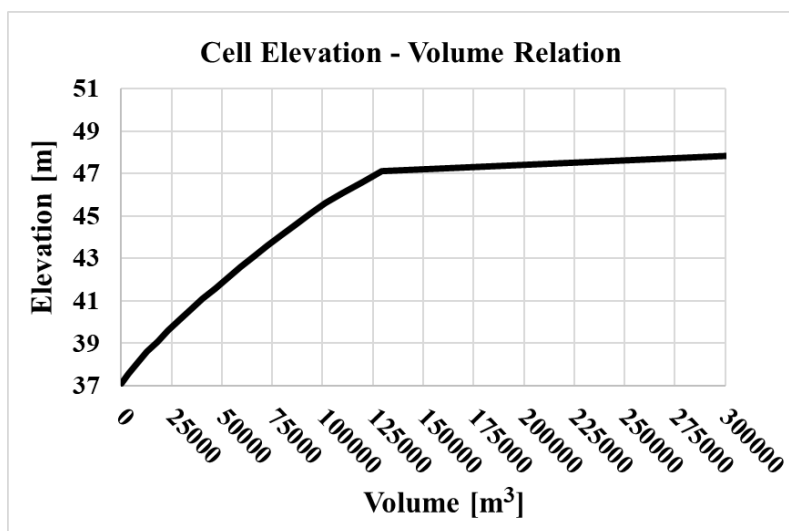
1- Min  
2- Hybrid  
3- Q1

تغییرات درون سلولی انجام محاسبات مومنتوم می‌باشد. برای انجام محاسبات مومنتوم و بدست 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.

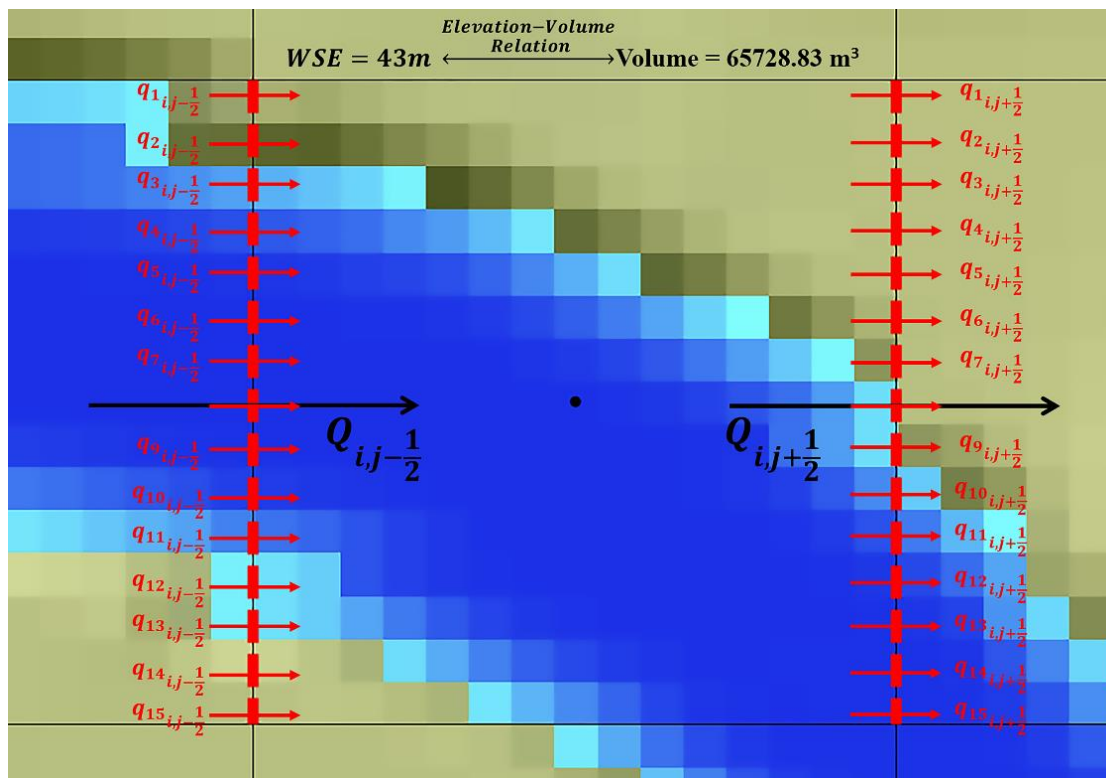
یک از سلول‌های محاسباتی، محاسبه و ثبت خواهد شد. لذا با استفاده از رابطه استخراج شده در هر سلول می‌شود با استفاده از تراز سطح آب به حجم آب داخل سلول رسید و با استفاده از حجم آب داخل سلول به تراز سطح آب در حین مدلسازی و تحلیل نتایج رسید. یکی از چالش برانگیزترین قسمت‌ها در محاسبات روش‌های



شکل ۲- تراز سطح زمین انتخاب شده توسط روش‌های شبکه‌بندی کلاسیک در مقابل تراز سطح زمین در نقشه توپوگرافی



شکل ۳- رابطه تراز سطح آب و حجم آب موجود در سلول، استخراج شده برای یک سلول محاسباتی پیش از شروع محاسبات



شکل ۴- 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

جریان) به مقطع‌هایی کوچک به اندازه دقت نقشه توپوگرافی مورد استفاده تقسیم خواهند شد. بنابراین محاسبات مونتوم برای هر یک از این مقاطع در عرض ضلع سلول تکرار و برای هر کدام از مقاطع یک  $q_k^{t+\Delta t}$  دبی جریان در واحد عرض برای مقطع عرضی در زمان بعدی بر حسب متر مربع بر ثانیه محاسبه می‌شود که با ضرب این مقدار در اندازه مقطع عرضی و تکرار این محاسبات برای تمامی مقاطع عرضی موجود در ضلع سلول و جمع مقادیر بدست 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 ۴). 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 مونتوم جریان خواهد شد. لذا نتایج دقیق‌تری از این روش مورد تصور خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه این روش اضلاع سلول‌های محاسباتی را با مقاطع عرضی با فاصله‌ای برابر با نقشه توپوگرافی مورد استفاده تقسیم می‌کند، امکان انجام محاسبات درون سلولی<sup>۳</sup> را میسر ساخته و می‌شود در صورتی که نیاز باشد در سلول‌های انتخابی، مدل‌سازی با

### ۱) روش سطح مقطع کامل<sup>۱</sup>

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 بر حسب متر مکعب بر ثانیه محاسبه خواهد شد (شکل ۴). در این روش یکی از پارامترهای قابل انتخاب می‌تواند عمق جریان در محاسبات مونتوم 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.

### ۲) روش گسسته سازی شده در عرض<sup>۲</sup>

در این روش هر ضلع سلول (سطح مقطع ورودی یا خروجی

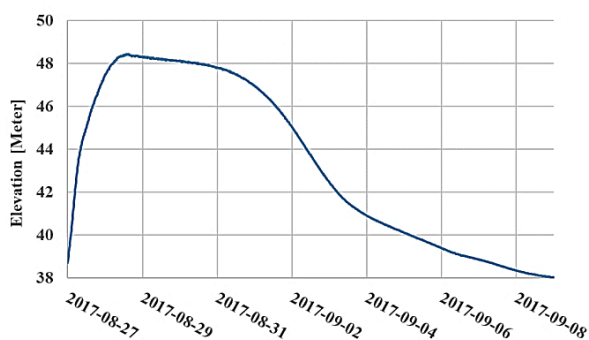
3- Subgrid Computations

1- Full Cross-Sectional Face (CF)  
2- Discretized Face (DF)

مورد ارائه در این تحقیق، طوفان بی سابقه هاروی<sup>۱</sup> در ایالت تگزاس<sup>۲</sup> آمریکا در یک بازه ۲۲ کیلومتری از رودخانه برازوس<sup>۳</sup> در نزدیکی شهر همپستد<sup>۴</sup> مطابق شکل ۶ انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. این بخش از رودخانه برازوس یک بازه مئاندری و شریانی است که مدلسازی سیلاب و محاسبه پهنه دقیق سیلابی آن به دلیل داشتن شیب بسیار کم و نزدیک به ۰.۰۰۰۱۸۶ بسیار سخت، پیچیده، حساس و همراه با چالش‌های فراوان و زمانبر است که مدلسازی سیل در این منطقه می‌تواند ارزیابی خوبی برای مدل‌های ارائه شده در تحقیق باشد. همچنین این منطقه یکی از مناطق پرخطر برای آبگرفتگی ناشی از سیل در ایالت تگزاس بوده و با توجه به شکل ۶ بازه انتخاب شده تراکم جمعیتی قابل توجهی داشته و برای مدل‌سازی سیلاب از اهمیت بالایی برخوردار است.

طوفان دریایی هاروی در آگوست ۲۰۱۷ به عنوان یکی از قوی‌ترین و شدیدترین طوفان‌ها در تاریخ ایالات متحده آمریکا شناخته شد. این طوفان با بادهای بسیار شدید و بارش‌های فراوان، مناطق گسترده‌ای از تگزاس را تحت تأثیر قرار داد. شهر هیوستون<sup>۵</sup> به عنوان یکی از بزرگترین شهرهای تگزاس واقع در مسیر طوفان، دچار خسارت‌های جدی و شدید شد. هاروی باعث آبگرفتگی و سیل در نواحی عریضی از این منطقه شد و تأثیرات ویرانگر بسیاری را بر جوامع محلی، زیرساخت‌ها و محیط زیست از جمله مرگ صدها نفر و ویرانی کامل بیش از هزار ساختمان داشت.

هیدروگراف تراز سطح آب در ایستگاه بالادست منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ثبت شده از مورخ ۲۰۱۷/۸/۲۷ تا ۲۰۱۷/۹/۹ مطابق شکل ۵ دریافت و برای انجام مدلسازی استفاده شده است.



شکل ۵- هیدروگراف تراز سطح آب ثبت شده در طوفان هاروی برای ایستگاه بالادست منطقه مورد مطالعه

توجه به اندازه سلول‌های نقشه توپوگرافی و با بالاترین دقت انجام شود. با توجه به اینکه روش تغییرات درون سلولی جریان ورودی به سلول محاسباتی را بدون در نظر گرفتن موانع جریان در سلول پخش می‌کند، محاسبات درون سلولی در مواقعی که یک برجستگی و یا برآمدگی محلی در وسط یک سلول محاسباتی وجود داشته باشد و مانع از عبور جریان از یک طرف سلول به طرف دیگر آن شود، بسیار کاربردی بوده و می‌تواند در بعضی مواقع باعث کاهش بخش زیادی از خطای مدلسازی به ازای افزایش ناچیز بار محاسباتی و زمان لازم جهت اتمام مدلسازی شود.

### محاسبات درون سلولی

محاسبات درون سلولی امکان استفاده از سلول‌های محاسباتی با ابعاد متغیر در دامنه حل را در حل عددی معادلات آب کم عمق به روش تفاضل محدود میسر کرده و باعث افزایش دقت و سرعت مدلسازی می‌شود که به دو روش مستقل و وابسته قابل انجام است.

#### ۱) وابسته

تمامی سلول‌ها با تمامی ابعاد در یک مدلسازی واحد در نظر گرفته شده و با تنظیم یک گام زمانی با توجه به کوچک‌ترین سلول موجود، مدلسازی انجام خواهد شد. در این حالت به دلیل کاهش گام زمانی، زمان لازم جهت اتمام مدلسازی افزایش قابل توجهی خواهد یافت.

#### ۲) مستقل

در این حالت برای هر سلول اصلی (بزرگترین ابعاد) که دارای سلول‌های ریزتر درون خود باشد (محاسبات درون سلولی در آن فعال باشد) یک مدلسازی جداگانه و مستقل با استفاده از سلول‌های ریزتر درون آن سلول در بازه گام زمانی مدلسازی اصلی انجام شده تا مقادیر تراز سطح آب، عمق و سرعت برای سلول‌های درون سلول اصلی، مدلسازی شده و بدست آید. در این حالت گام زمانی مدلسازی تغییری نخواهد کرد ولی فقط به دلیل افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی در دامنه حل و افزایش بار محاسباتی، زمان لازم جهت اتمام مدلسازی افزایش کمی خواهد یافت. با توجه به اینکه در این تحقیق کاهش حداکثری زمان لازم جهت اتمام مدلسازی در مقابل حفظ دقت مد نظر است از روش مستقل استفاده شده است.

### منطقه مورد مطالعه

با توجه به وجود اطلاعات دقیق از ایستگاه‌های هیدرومتری در کشور ایالات متحده آمریکا و قابل دریافت بودن آن‌ها از سایت [www. waterdata.usgs.gov](http://www.waterdata.usgs.gov) برای مقایسه و بررسی روش‌های

- 1- Hurricane Harvey
- 2- Texas
- 3- Brazos
- 4- Hempstead
- 5- Houston

### پارامترهای ارزیابی

باتوجه به اینکه برای منطقه مورد مطالعه در زمان وقوع سیل، تصاویر ماهواره‌ای مناسب جهت مشخص سازی دقیق پهنه آبگرفتگی بر روی زمین و مقایسه آن با نتایج مدل‌سازی وجود نداشت و همچنین به منظور بررسی و مقایسه کامل و دقیق تر روش‌های ارائه شده و مورد بررسی این تحقیق اقدام به مقایسه نتایج بدست آمده از روش‌های ارائه شده با نتایج مدل‌سازی دقیق و طولانی مدت با سلول‌های محاسباتی ۹.۳۸۵ متری و برابر با نقشه توپوگرافی شده است که دو خروجی مهم عمق جریان و پهنه سیلابی در مقابل زمان لازم برای اتمام مدل‌سازی مورد توجه قرار گرفته است.

### نمره<sup>۴</sup>

این پارامتر میزان توانایی مدل در تخمین 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<sup>۵</sup>

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

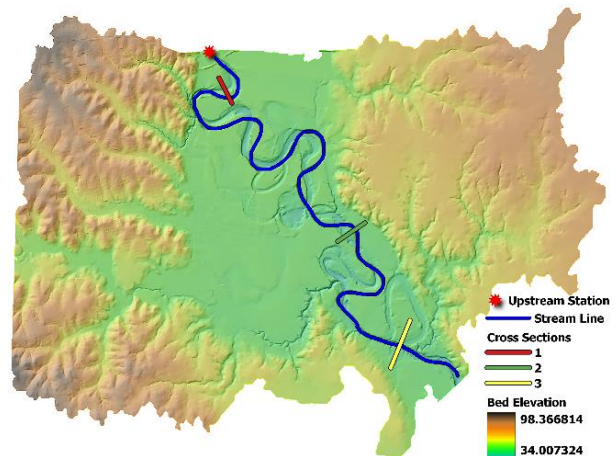
### درصد تسریع مدل‌سازی

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

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

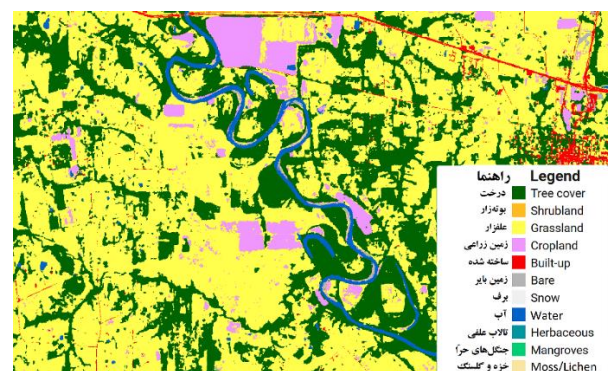
که در این رابطه FDT برابر زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی توسط دقیق‌ترین روش مدل‌سازی (مدل‌سازی با سلول‌های محاسباتی برابر نقشه توپوگرافی) بر حسب دقیقه و BT برابر زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی توسط روش مورد بررسی بر حسب دقیقه می‌باشد.

نقشه توپوگرافی منطقه با استفاده از قابلیت دانلود DEM<sup>۱</sup> نرم‌افزار STE از سرور سایت OpenTopography مطابق شکل ۶ دانلود و مورد استفاده قرار گرفته است. برای این تحقیق از نقشه توپوگرافی USGS 3DEP 10m استفاده شده است. نقشه دانلود شده از نوع DTM<sup>۲</sup> است و فقط تراز ارتفاعی سطح زمین در آن ثبت شده است. دقت مکانی این نقشه ۹.۳۸۵ متر در این منطقه بوده و مناسب مدل‌سازی سیل می‌باشد.



شکل ۶- نقشه توپوگرافی منطقه مورد مطالعه به همراه جانمایی ایستگاه بالادست، مسیر رودخانه و سطح مقطع‌های مورد بررسی تحقیق

نقشه پوشش زمین ESA WorldCover v200 با دقت مکانی ۱۰ متر مطابق شکل ۷ برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از قابلیت اسکرپیت نویسی نرم‌افزار STE از سامانه گوگل ارث انجین<sup>۳</sup> دریافت و از این نقشه برای تنظیم مقادیر ضریب زبری مانینگ در مدل‌سازی استفاده شده است.



شکل ۷- نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه تحقیق

4- Point  
5- Point Percentage (Point%)

1- Digital Elevation Map  
2- Digital Terrain Map  
3- Google Earth Engine

## درصد بازده

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

$$Ef\% = \frac{Point\% \times Boost\%}{100} \quad (۸)$$

جذر میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup>

این معیار متوسط اختلاف میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار مشاهده شده را ارائه می‌دهد. از این معیار برای مقایسه نقشه‌های عمق جریان استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (۹)$$

که در رابطه  $(Y)$  مقدار محاسبه شده توسط مدل،  $\hat{Y}_i$  مقدار مشاهده شده و  $n$  تعداد کل داده می‌باشد.

## نتایج و بحث

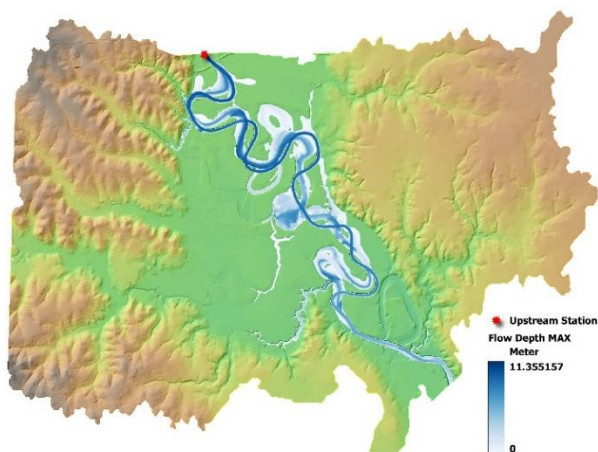
برای انجام مدلسازی از نوت‌بوک Y700 برند Lenovo با مشخصات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مطابق جدول ۱ استفاده شده است.

پس از تنظیم هندسه، ضرایب زبری مانینگ و مشخص سازی هیدروگراف تراز سطح آب به عنوان شرط مرزی در بالادست و عمق نرمال به عنوان شرط مرزی پایین دست منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار STE، اقدام به مدلسازی دقیق با سلول‌های محاسباتی ۹.۳۸۵ متری و برابر با نقشه توپوگرافی با قابلیت گام‌زمانی متغیر، توسط دسته معادلات آب کم عمق با تقریب اینرسی محلی شده و دو نقشه عمق جریان و پهنه سیلابی در حالت حداکثر<sup>۲</sup> برای ارزیابی روش‌های سریع مورد بررسی در نظر گرفته شد. تعداد سلول‌های محاسباتی در این مدلسازی ۱۸۰۴۷۴۱، گام زمانی متوسط ۰.۲۵۷ ثانیه و بدون خطای محاسباتی حجم آب<sup>۳</sup> بوده است. مدلسازی از ابتدای هیدروگراف ارائه شده در شکل ۵ شروع و در زمان ۲۰۱۷/۹/۱ ساعت ۱۰:۱۵ به دلیل ورود دبی پیک و خروج آن از پایین دست منطقه مورد مطالعه و بدست آمدن نقشه‌های حداکثر عمق جریان و پهنه سیلابی مطابق شکل ۸ متوقف گردید. لذا مدلسازی در بازه زمانی ۷۶۰۰ دقیقه‌ای از ابتدای هیدروگراف بالادست (از ۲۰۱۷/۸/۲۷

ساعت ۳:۳۰ تا ۲۰۱۷/۹/۱ ساعت ۱۰:۱۵) انجام شده و برای اتمام این مدلسازی نرم‌افزار توسعه یافته زمانی برابر با ۱۸ ساعت و ۹ دقیقه و ۵۴ ثانیه (معادل ۱۰۸۹.۹۱ دقیقه) در حال پردازش به صورت موازی بوده است.

جدول ۱ مشخصات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری دستگاه استفاده شده

برای انجام تمامی مدلسازی‌ها	
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU 2.60GHz up to 3.5GHz
RAM	16GB DDR4
OS Name	Microsoft Windows 10 Pro
OS Version	10.0.19045 Build 19045
STE	Version 6.76



شکل ۸- نقشه پهنه سیلابی و عمق جریان مدلسازی شده با ابعاد سلول‌های محاسباتی برابر با نقشه توپوگرافی

برای هر یک از روش‌های مورد ارائه نیز با تنظیمات و شرایط مرزی یکسان اقدام به مدلسازی در بازه زمانی ۷۶۰۰ دقیقه‌ای از ابتدای هیدروگراف بالادست با ابعاد سلول‌های محاسباتی به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۴۰ برابر ابعاد سلول‌های نقشه توپوگرافی شده است. در روش کلاسیک ترکیبی با آلفا و بتا مساوی (نصف روش حداقل و نصف روش چارک اول) اقدام به انجام مدلسازی و مقایسه نتایج شده است.

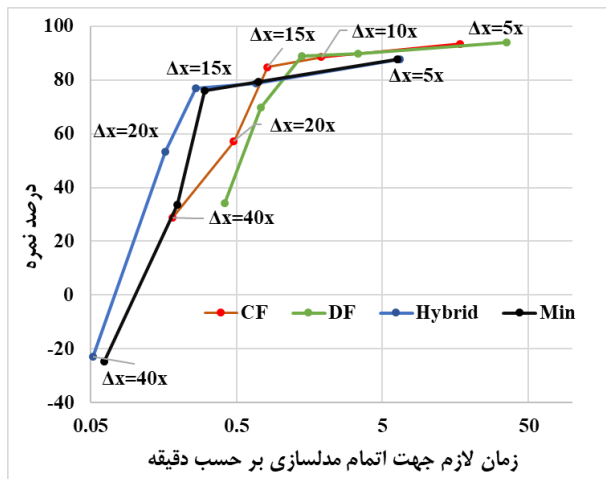
زمان لازم برای اتمام مدلسازی و ارائه پهنه سیلابی توسط هر روش بر حسب دقیقه در حالت پردازش موازی مطابق جدول ۲ می‌باشد.

تعداد سلول‌های محاسباتی و گام زمانی متوسط بر حسب ثانیه برای مدلسازی انجام شده با استفاده از هر روش در جدول ۳ ارائه شده و تمامی آن‌ها بدون خطای محاسباتی حجم آب بوده‌اند.

1 Root Mean Square Error (RMSE)

2 Maximum

3 Volume Loss



شکل ۹- زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی در مقابل درصد نمره پهنه سیل خروجی مدل

با توجه به نتایج به دست آمده، دقیق‌ترین روش برای پهنه بندی سیلاب روش تغییرات درون سلولی گسسته سازی شده در عرض بوده و این روش توانسته است با ۵ برابر کردن ابعاد سلول‌های محاسباتی ضمن حفظ دقت، زمان لازم برای انجام مدل‌سازی و پهنه‌بندی دقیق سیل را از ۱۰۹۰ دقیقه به ۳۶ دقیقه (۹۷ درصد) کاهش دهد. مطابق جدول ۴، شکل ۹ و ۱۰ در پهنه‌بندی سیلاب دو روش تغییرات درون سلولی ضمن ارائه دقت بیشتر، مقاومت بیشتری نیز در حفظ دقت مدل‌سازی در برابر افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی داشته‌اند. از بین این دو روش همانطور که انتظار می‌رود، روش گسسته سازی شده در عرض دقت بیشتری را در مدل‌سازی سیلاب و پهنه‌بندی سیل ارائه داده و مقاومت بیشتری نیز در حفظ دقت مدل‌سازی در برابر افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی نشان داده است. این در حالی است که زمان لازم برای اتمام مدل‌سازی با استفاده از این روش حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد نسبت به روش سطح مقطع کامل افزایش پیدا کرده است. این افزایش دقت و افزایش زمان مدل‌سازی بدلیل انجام محاسبات در عرض اضلاع سلول‌های محاسباتی بوده که موجب در نظر گرفته شدن تغییرات ضریب زبری مانینگ در عرض اضلاع سلول‌های محاسباتی شده و مقدار ضریب زبری مانینگ استفاده شده در محاسبات نزدیک‌تر به مدل‌سازی دقیق با ابعاد سلول‌های محاسباتی برابر با نقشه توپوگرافی (۹.۳۸۵ متر) بوده است. در صورت استفاده از تراز سطح آب به عنوان شرط مرزی بالادست روش‌های کلاسیک نیز ضمن ارائه دقت قابل قبول، قادر به حفظ دقت مدل‌سازی تا ۱۵ برابر اندازه ابعاد سلول‌های نقشه توپوگرافی بوده‌اند. روش‌های کلاسیک نزدیک به ۶۰ درصد سریع‌تر نسبت به روش‌های تغییرات درون سلولی محاسبات را به پایان رسانده‌اند ولی از دقت کمتری نسبت به روش‌های تغییرات درون سلولی برخوردارند. در بین روش‌های

جدول ۲- زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی بر حسب دقیقه

روش	تغییرات درون سلولی		کلاسیک		
	$\Delta x$	CF	DF	Hybrid	Min
۵x	۱۶.۹۴	۳۵.۵۴	۶.۵۷۷	۶.۳۳۵	۰.۷۱۰
۱۰x	۱.۹۱۶	۳.۳۸۵	۰.۶۷۷	۰.۳۰۳	۰.۱۹۵
۱۵x	۰.۸۱۵	۱.۳۹۳	۰.۲۶۲	۰.۱۶۳	۰.۰۶۲
۲۰x	۰.۴۷۹	۰.۷۳۲	۰.۱۶۳	۰.۰۵۲	۰.۰۶۲
۴۰x	۰.۱۸۲	۰.۴۱۵	۰.۰۵۲		

جدول ۳- تعداد سلول‌های محاسباتی به همراه گام زمانی متوسط

روش	$\Delta x$	تغییرات درون سلولی		کلاسیک	
		تعداد سلول‌ها	CF	DF	Hybrid
۵x	۷۲۹۶۶	۱.۴۱	۱.۰۹	۱.۶۸	۱.۶۸
۱۰x	۱۸۵۰۴	۵.۹۱	۵.۴۳	۵.۸۲	۵.۹۱
۱۵x	۸۳۲۳	۸.۸۶	۸.۸۶	۸.۸۲	۸.۸۱
۲۰x	۴۷۴۷	۱۱.۶	۱۱.۸	۱۱.۶	۱۱.۳
۴۰x	۱۲۴۱	۱۸.۸	۱۵.۳	۲۴.۴	۲۱.۷

مطابق جدول ۳ همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی تعداد آن‌ها کاهش پیدا کرده و گام زمانی می‌تواند افزایش پیدا کند. کاهش تعداد سلول‌های محاسباتی باعث کاهش بار محاسباتی بر روی پردازنده شده و سرعت محاسبات و مدل‌سازی را افزایش خواهد داد همچنین افزایش گام زمانی باعث پیشروی سریع‌تر مدل‌سازی در بعد زمان شده و زمان لازم برای اتمام مدل‌سازی را کاهش خواهد داد. به عنوان مثال مدل‌سازی با استفاده از ابعاد ۵ برابر باعث کاهش تعداد سلول‌های محاسباتی از ۱۸۰۴۷۴۱ به ۷۲۹۶۶ شده و گام زمانی مدل‌سازی را از ۰.۲۵۷ ثانیه به ۱.۵ ثانیه رسانده است که این امر موجب شده است زمان لازم برای اتمام مدل‌سازی از ۱۰۹۰ دقیقه به حدود ۳۵ تا ۳۶ دقیقه (۹۸ درصد) کاهش یابد.

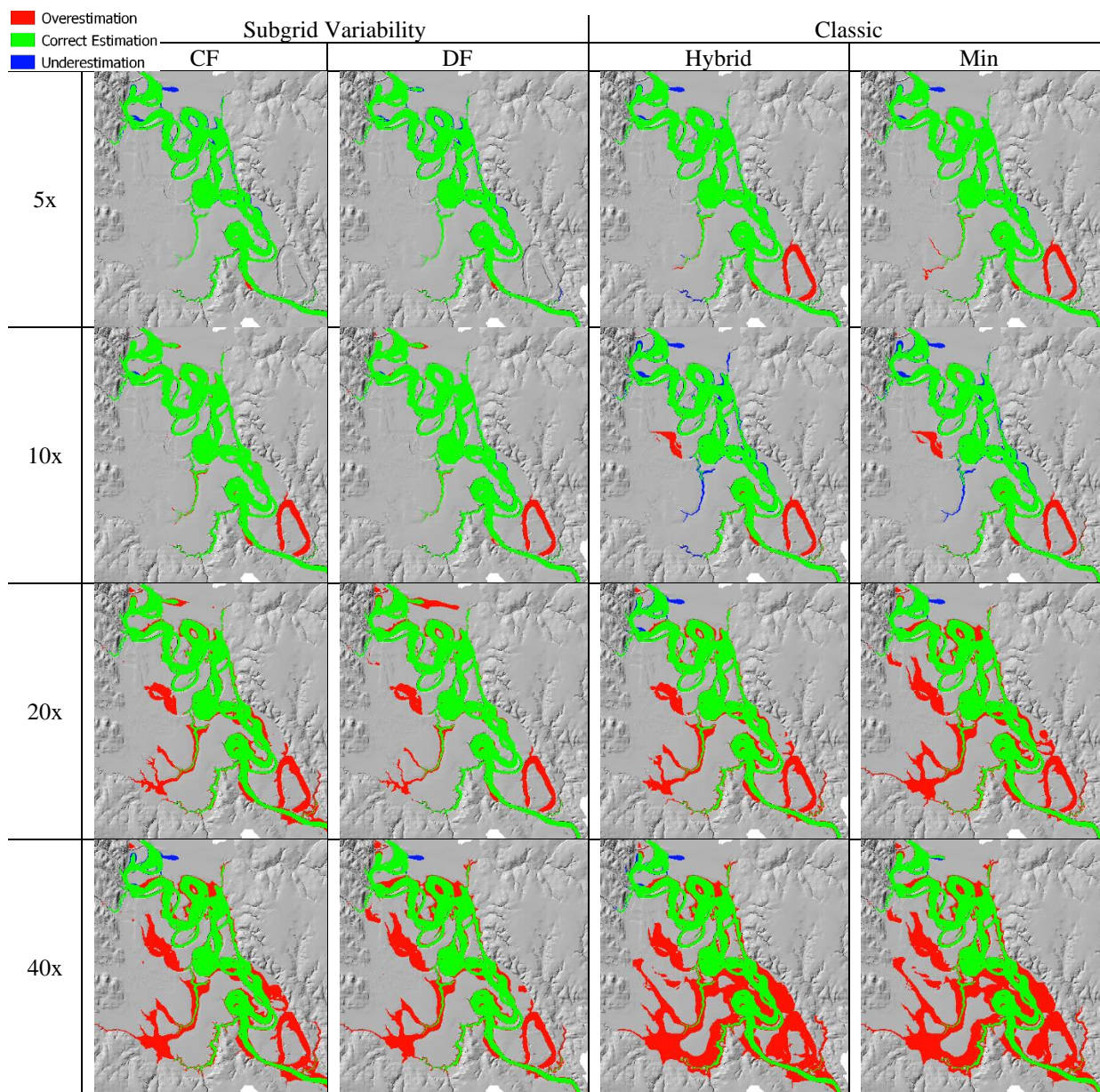
جدول ۴- درصد نمره پهنه سیل بدست آمده توسط هر مدل

روش	تغییرات درون سلولی		کلاسیک		
	$\Delta x$	CF	DF	Hybrid	Min
۵x	۹۳.۴۱	۹۴.۰۹	۸۷.۷۴	۸۷.۶۶	۸۷.۶۶
۱۰x	۸۸.۳۷	۸۹.۸۴	۷۸.۶۸	۷۹.۲۹	۷۹.۲۹
۱۵x	۸۴.۸۱	۸۸.۹۳	۷۶.۸۹	۷۵.۹۹	۷۵.۹۹
۲۰x	۵۷.۱۸	۶۹.۶۴	۵۳.۳۵	۳۳.۶۳	۳۳.۶۳
۴۰x	۲۸.۹۲	۳۴.۲۷	-۲۲.۸۵	-۲۴.۵۹	-۲۴.۵۹

بگیرند که مطابق شکل ۱۱ برجستگی‌هایی که مانع از عبور جریان از سلول می‌شوند در اضلاع سلول قرار نگیرند، جریان بدون در نظر گرفته شدن برجستگی‌ها از سلول عبور داده خواهد شد. این موضوع باعث پخش شدن آب در سلول و رسیدن آن به سلول‌های مجاور که نباید به آن‌ها آب می‌رسید شده و پهنه سیلابی بیش از حد برآورد خواهد شد. همچنین رعایت شرط مرزی تراز سطح آب در زمانی که سلول‌های محاسباتی درشت‌تر شوند برای مدل سخت‌تر شده و حجم آب بیشتری وارد محدوده مدلسازی می‌شود که موجب آبگرفتگی بیش از حد مخصوصاً در پایین‌دست منطقه مورد مطالعه خواهد بود.

کلاسیک، روش ترکیبی با آلفا و بتا برابر قادر به ارائه مقاومت بیشتر در حفظ دقت مدلسازی در برابر افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی بوده است.

با توجه به شکل ۱۰ در حالتی که تراز سطح آب شرط مرزی بالادست در مدلسازی باشد، افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی باعث بیش از حد محاسبه شدن پهنه سیلابی شده است. مطابق شکل ۱۱ در تغییرات درون سلولی با بزرگ‌تر شدن سلول‌های محاسباتی، اضلاع سلول‌ها که در آن‌ها محاسبات مومنتوم و میزان دبی جریان که می‌تواند از سلول خارج یا وارد شود محاسبه می‌شود، از هم فاصله خواهند گرفت. لذا در صورتی که این اضلاع به حدی از هم فاصله



شکل ۱۰- نقشه خطای پهنه محاسبه شده توسط هر مدل

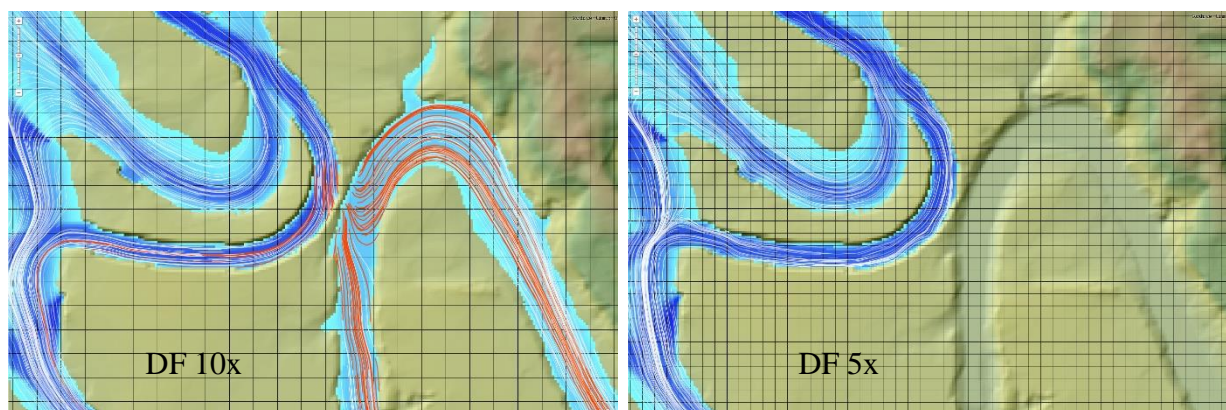
به ۹۳.۷۸ ارتقا یافته است. همچنین خطای مورد بحث در شکل ۱۱ کاملاً از بین رفته و نقشه خطای پهنه محاسبه شده توسط این مدل مطابق شکل ۱۲ می‌باشد. در حالتی که محاسبات درون سلولی غیر فعال بوده است به ۲۴۰۴ سلول با ابعاد ۹۳.۸۵ متر (۱۰ برابر نقشه توپوگرافی) آب رسیده و پردازشگر در حال انجام محاسبات بر روی آن‌ها بوده است. ولی در حالتی که محاسبات درون سلولی فعال است تعداد از ۲۳۰۸ سلول با ابعاد ۹۳.۸۵ متر (۱۰ برابر نقشه توپوگرافی) به علاوه ۱۰۲ سلول با ابعاد ۹.۳۸۵ متر (برابر سلول‌های نقشه توپوگرافی) که متعلق به محاسبات درون سلولی می‌باشند خیس شده‌اند و محاسبات توسط پردازشگر بر روی آن‌ها در حال انجام بوده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت در صورت استفاده بجای و صحیح از محاسبات درون سلولی می‌توان به ازای افزایش ناچیز بار محاسباتی و زمان اتمام مدلسازی دقت مدلسازی را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

مطابق جدول ۵ و شکل ۱۳ در محاسبه عمق جریان نیز همانند نتایج بدست آمده از پهنه‌بندی سیلاب توسط روش‌های مختلف، روش‌های تغییرات درون سلولی کمترین خطا را در محاسبه عمق جریان داشته و مقاومت بیشتری در حفظ دقت نشان داده است. به منظور بررسی بیشتر دقت روش‌های مختلف در مدلسازی تراز سطح آب اقدام به مقایسه تراز سطح آب مدلسازی شده توسط روش‌های مختلف در ابعاد سلول‌های محاسباتی ۵، ۱۵ و ۴۰ برابر اندازه ابعاد سلول‌های نقشه توپوگرافی در طول مسیر اصلی رودخانه و مقاطع عرضی معرفی شده مطابق شکل ۶ شده است.

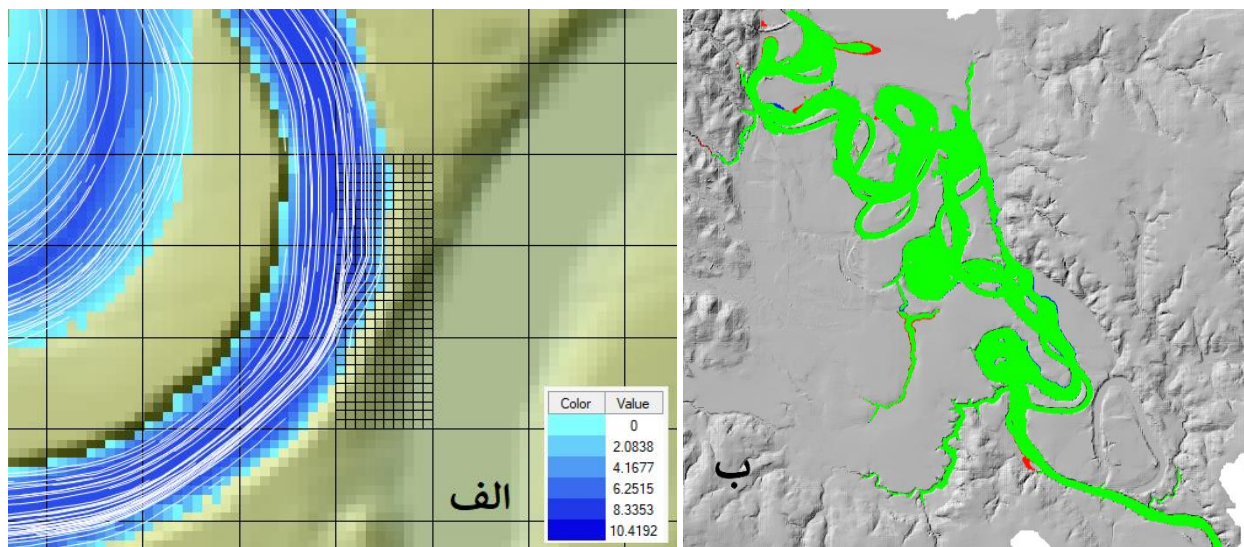
جدول ۵- خطای عمق جریان محاسبه شده بر حسب جذر میانگین مربعات خطا

روش	تغییرات درون سلولی		کلاسیک	
	$\Delta x$	CF	DF	Hybrid
۵x	۰.۱۴	۰.۱۴۵	۰.۴۷	۰.۴۵
۱۰x	۰.۵۳	۰.۴۵	۰.۵۸	۰.۵۴
۱۵x	۰.۵۶	۰.۴۴	۰.۸۲	۰.۷۵
۲۰x	۱.۱	۰.۵۸	۱.۱	۱.۱۲
۴۰x	۱.۳۱	۱.۰۳	۱.۵۸	۱.۴۹

مطابق شکل ۱۰ و ۱۱ در پایین سمت راست منطقه مورد مطالعه افزایش ابعاد سلول موجب عبور جریان از مجرای اصلی به یک مجرای فرعی در مجاورت مجرای اصلی شده است و خطای قابل توجهی در محاسبه پهنه سیلابی و عمق جریان را بوجود آورده است. با توجه به اینکه در روش گسسته سازی شده در عرض امکان انجام محاسبات درون سلولی وجود دارد، انجام محاسبات درون سلولی در سلول‌هایی که به اشتباه در حال عبور جریان هستند، می‌تواند مدلسازی را دقیق‌تر کرده و خطای بوجود آمده را از بین ببرد. به منظور بررسی این فرضیه اقدام به مدلسازی مجدد روش گسسته سازی شده در عرض با ابعاد سلول‌های محاسباتی ۱۰ برابر ابعاد سلول‌های نقشه توپوگرافی و فعال سازی محاسبات درون سلولی به روش مستقل در ۳ سلولی که به اشتباه در حال عبور جریان هستند مطابق شکل ۱۲ شده است. در این حالت زمان لازم جهت اتمام مدلسازی از ۳.۳۸۵ دقیقه به ۵.۲۴۵ دقیقه افزایش یافته است این درحالی است که دقت مدلسازی پهنه سیلابی از درصد نمره ۸۹.۸۴



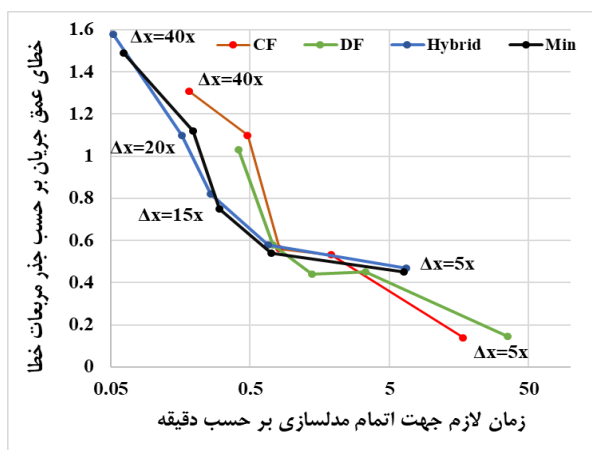
شکل ۱۱- خطوط جریان رسم شده توسط قابلیت ردیابی ذره نرم‌افزار STE (خطوط قرمز رنگ نشان دهنده جریان عبور کرده از موانع و خطای مدل می‌باشد)



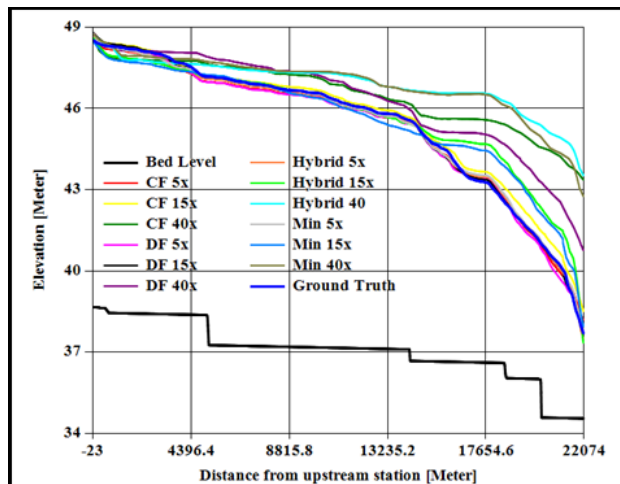
شکل ۱۲- نتایج محاسبات درون سلولی الف) خطوط جریان رسم شده توسط قابلیت ردیابی ذره به علاوه سلول‌های محاسباتی و عمق جریان ب) نقشه خطای پهنه محاسبه شده

جدول ۶- خطای تراز سطح آب محاسبه شده در طول کانال اصلی رودخانه و مقاطع عرضی بر حسب جذر میانگین مربعات خطا

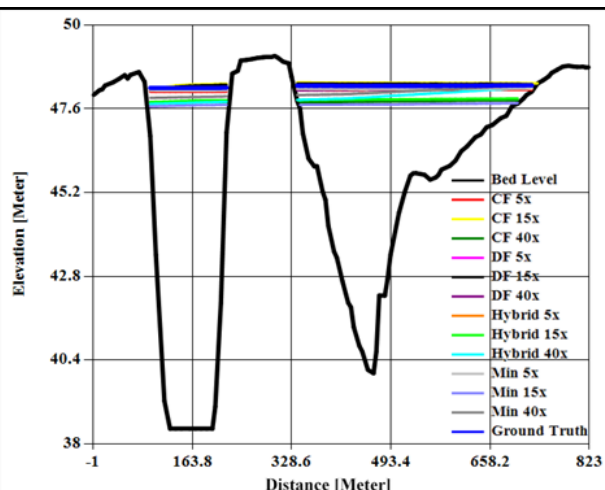
روش	تغییرات درون سلولی									کلاسیک						
	CF			DF			Hybrid			Min						
$\Delta x$	SL	CS1	CS2	CS3	SL	CS1	CS2	CS3	SL	CS1	CS2	CS3	SL	CS1	CS2	CS3
۵x	۰.۱۱۵	۰.۰۹۲	۰.۰۹۵	۰.۰۱۸	۰.۰۷۱	۰.۰۳۴	۰.۰۹۸	۰.۰۵۷	۰.۱۱۲	۰.۰۶۴	۰.۰۴۸	۰.۰۲۴	۰.۱۲۲	۰.۰۷	۰.۰۷۱	۰.۰۲۹
۱۵x	۰.۲۱۶۳	۰.۰۶۸	۰.۰۷	۰.۱۶	۰.۰۸۸	۰.۰۴۷	۰.۰۶۸	۰.۰۲۳	۰.۷۰۶	۰.۳	۰.۱۱۲	۰.۴۲۳	۰.۶۲۷	۰.۴	۰.۲۸۱	۰.۳۴۸
۴۰x	۱.۷۸۱	۰.۳۴	۰.۴۰۳	۱.۲۳	۱.۱۹۶	۰.۰۷۳	۰.۳۰۳	۰.۷۴	۲.۲۲۹	۰.۲۵۴	۰.۸۰۱	۱.۶۲۵	۲.۰۸۱	۰.۱۶	۰.۷۹۱	۱.۴۲



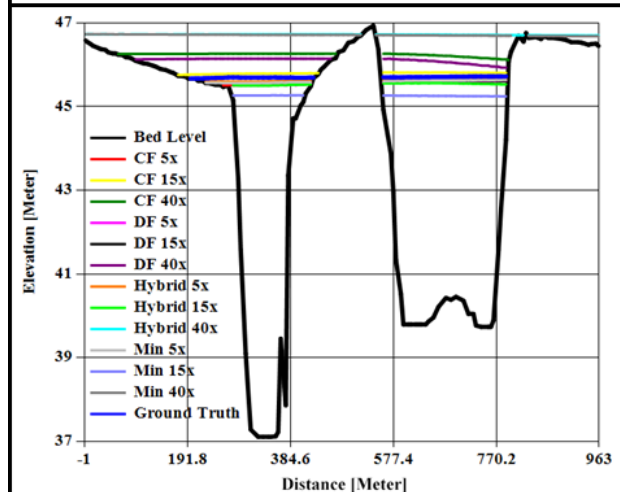
شکل ۱۳- زمان لازم جهت اتمام مدل‌سازی در مقابل خطای عمق جریان محاسبه شده بر حسب جذر میانگین مربعات خطا



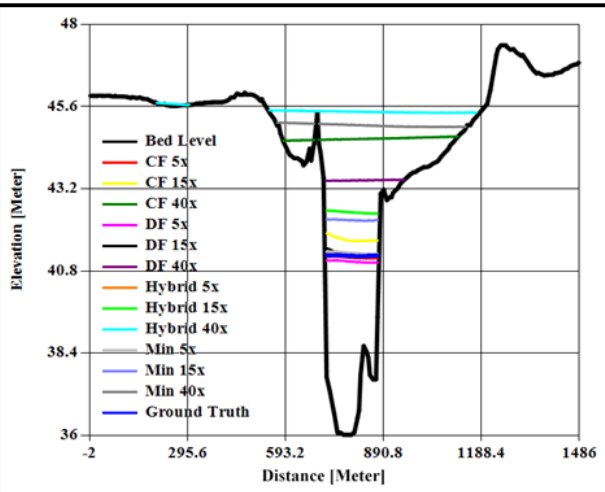
تراز سطح آب در طول رودخانه



تراز سطح آب در مقطع عرضی شماره ۱



تراز سطح آب در مقطع عرضی شماره ۲



تراز سطح آب در مقطع عرضی شماره ۳

شکل ۱۴- تراز سطح آب محاسبه شده توسط روش‌های مورد بررسی در طول کانال اصلی رودخانه و مقاطع عرضی

مماندری و شریانی است که در مسیر اصلی خود بین ۰.۰۰۰۱۲ تا ۰.۰۰۰۱ شیب محلی داشته و شیب متوسط بازه مورد مطالعه ۰.۰۰۰۱۸۶ بوده است. عرض این رودخانه در مقاطع عرضی مورد بررسی از ۱۶۰ متر تا ۸۰ متر متغیر بوده و عمق رودخانه در مقاطع عرضی مورد بررسی از ۱۲ تا ۱۸ متر متغیر بوده است لذا می‌توان از نتایج بدست آمده در این تحقیق برای مدل‌سازی دوبعدی و سریع سیلاب در رودخانه‌هایی با خصوصیات مشابه استفاده کرد.

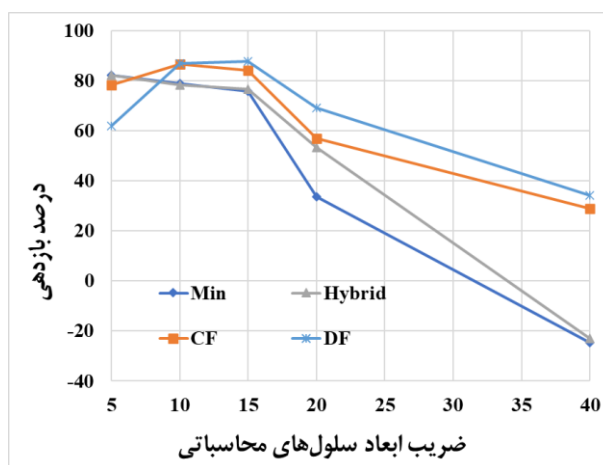
با توجه به جدول ۷ و شکل ۱۵ افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی تا ۱۵ برابر سلول‌های نقشه توپوگرافی تنها باعث افزایش بازدهی روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی شده است. ولی از ضریب ۱۵ تا ۴۰، درصد بازدهی برای تمامی روش‌ها کاهش یافته است. بررسی مقادیر بازدهی روش‌ها نشان می‌دهد بیشترین راندمان مدل‌سازی سریع سیلاب در این منطقه مورد مطالعه متعلق به روش

با توجه به شکل ۱۴ شرط مرزی بالادست در تمامی روش‌ها و با تمامی ابعاد سلول‌های محاسباتی به خوبی پیاده سازی و رعایت شده است. تراز سطح آب در طول رودخانه و مقاطع عرضی مورد بررسی با دقت بیشتری توسط روش‌های تغییرات درون سلولی، مخصوصاً روش گسسته سازی شده در عرض مدل‌سازی شده و این روش مقاومت خیلی خوب و بهتری را نسبت به سایر روش‌ها برای حفظ دقت در مقابل افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی نشان داده است. بهترین روش در مدل‌سازی تراز سطح آب روش گسسته سازی شده در عرض است که با ابعاد ۵ برابر توانسته تراز سطح آب در طول رودخانه را با جذر میانگین مربعات خطای برابر ۰.۰۷۱ مدل‌سازی و با ابعاد ۴۰ برابر توانسته است جذر میانگین مربعات خطا را تا ۱.۱۹۶ حفظ کند. این روش در مدل‌سازی تراز سطح آب در هر سه مقطع عرضی نیز بهتر از بقیه روش‌ها عمل کرده است. رودخانه مورد مطالعه یک رودخانه

گسسته سازی شده در عرض با ابعاد سلول‌های محاسباتی، ۱۵ برابر سلول‌های نقشه توپوگرافی می‌باشد.

جدول ۷- درصد بازدهی روش‌های مورد بررسی

روش	تغییرات درون سلولی			کلاسیک	
	$\Delta x$	CF	DF	Hybrid	Min
$\delta x$	۷۸.۱۷	۶۱.۸۸	۸۲.۱۸	۸۲.۳۱	
$۱۰x$	۸۶.۷۴	۸۶.۹۱	۷۸.۱۷	۷۸.۷۵	
$۱۵x$	۸۴.۱۵	۸۷.۷۴	۷۶.۷	۷۵.۷۷	
$۲۰x$	۵۶.۹۲	۶۹.۱۶	۵۳.۲۷	۳۳.۵۶	
$۴۰x$	۲۸.۸۷	۳۴.۱۳	-۲۲.۸۴	-۲۴.۵۸	



شکل ۱۵- درصد بازدهی روش‌های مورد بررسی در مقابل ابعاد سلول‌های محاسباتی

## نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مدل‌سازی سریع سیلاب و مشخص سازی پهنه‌های دقیق سیلابی به منظور اقدام به موقع و کاهش خسارات ناشی از سیل در این تحقیق با توسعه بخش دوبعدی نرم‌افزار توسعه یافته STE به ارائه و بررسی روش‌های مختلف شبکه‌بندی به منظور حل سریع تر دسته معادلات آب کم عمق پرداخته شده و میزان مقاومت هر یک از روش‌ها در حفظ دقت نسبت به افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده از هیدروگراف تراز سطح آب ثبت شده برای طوفان هاروی از مورخ ۲۰۱۷/۸/۲۷ تا ۲۰۱۷/۹/۹ در بالادست منطقه مورد مطالعه با مدل‌سازی دقیق سیلاب، پهنه آبرگرفتی و عمق جریان ناشی از این هیدروگراف بدست آمده و برای ارزیابی روش‌های مورد ارائه در این تحقیق استفاده شده است. به صورت خلاصه نتایج این تحقیق نشان داد:

(۱) روش‌های تغییرات درون سلولی نتایج دقیق‌تری ارائه داده و در

حفظ دقت نسبت به افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی مقاوم‌ترند. از طرفی زمان اتمام مدل‌سازی توسط این روش‌ها تا ۶۰ درصد بیشتر نسبت به روش‌های کلاسیک می‌باشد.

(۲) دقیق‌ترین روش برای پهنه‌بندی سیلاب روش تغییرات درون سلولی گسسته سازی شده در عرض بوده و این روش توانسته است با ۵ برابر کردن ابعاد سلول‌های محاسباتی ضمن حفظ دقت، زمان لازم برای انجام مدل‌سازی و پهنه‌بندی دقیق سیل را از ۱۰۹۰ دقیقه به ۳۶ دقیقه (۹۷ درصد) کاهش دهد. این روش ۱ الی ۵ درصد نسبت به روش ساده‌تر تغییرات درون سلولی (روش سطح مقطع کامل) دقیقتر بوده ولی زمان اتمام مدل‌سازی توسط این روش ۴۰ الی ۵۰ درصد نسبت به روش سطح مقطع کامل بیشتر است.

(۳) روش‌های کلاسیک ضمن ارائه دقت قابل قبول، قادر به حفظ دقت مدل‌سازی تا ۱۵ برابر اندازه سلول‌های نقشه توپوگرافی بوده‌اند. روش‌های کلاسیک نزدیک به ۶۰ درصد سریع‌تر نسبت به روش‌های تغییرات درون سلولی محاسبات را به پایان رسانده‌اند ولی از دقت کمتری نسبت به روش‌های تغییرات درون سلولی برخوردارند. در بین روش‌های کلاسیک، روش ترکیبی با آلفا و بتا برابر قادر به ارائه مقاومت بیشتر در حفظ دقت مدل‌سازی در برابر افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی بوده است.

(۴) در صورتی که تراز سطح آب شرط مرزی بالادست در مدل‌سازی باشد، افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی باعث بیش از حد محاسبه شدن پهنه سیلابی و ایجاد خطا در محاسبه عمق جریان توسط مدل خواهد شد. یکی از دلایل اصلی این موضوع در نظر گرفته نشدن برجستگی‌های سطح زمین در محاسبات مونتوم جریان می‌باشد.

(۵) محاسبات درون سلولی در مواقعی که یک برجستگی و یا برآمدگی محلی در وسط یک سلول محاسباتی وجود داشته باشد و مانع از عبور جریان از یک طرف سلول به طرف دیگر آن شود، بسیار کاربردی بوده و در صورت استفاده بجای و صحیح از محاسبات درون سلولی می‌توان به ازای افزایش ناچیز بار محاسباتی و زمان اتمام مدل‌سازی دقت مدل‌سازی را به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش داد.

(۶) تراز سطح آب در طول رودخانه و مقاطع عرضی مورد بررسی با دقت بیشتری توسط روش‌های تغییرات درون سلولی، مخصوصاً روش گسسته سازی شده در عرض مدل‌سازی شده و این روش مقاومت خیلی خوب و بهتری را نسبت به سایر روش‌ها برای حفظ دقت در مقابل افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی نشان داده است.

(۷) افزایش ابعاد سلول‌های محاسباتی تا ۱۵ برابر سلول‌های نقشه توپوگرافی تنها باعث افزایش بازدهی روش‌های شبکه‌بندی تغییرات درون سلولی شده است. ولی از ضریب ۱۵ تا ۴۰، درصد بازدهی برای تمامی روش‌ها کاهش یافته است. بیشترین راندمان مدل‌سازی سریع سیلاب در این منطقه مورد مطالعه متعلق به روش گسسته سازی شده

2017. Itzi (version 17.1): An open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*. 10(4): 1835-1847.

De Almeida, G. A. and 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(4): 111-125.

Jamali, B., Haghigat, E., Ignjatovic, A., Leitão, J. P. and Deletic, A. 2021. Machine learning for accelerating 2D flood models: Potential and challenges. *Hydrological Processes*. 35(4): 14-64.

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

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

Tanaka, T. and 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.

در عرض با ابعاد سلول‌های محاسباتی، ۱۵ برابر سلول‌های نقشه توپوگرافی می‌باشد.

## منابع

تیموری، ر. و دهقانی، ا. ا. ۱۳۹۸. ارزیابی معادلات برآورد بار بستر در رودخانه‌های استان گلستان با استفاده از نرم افزار توسعه یافته STE. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*. ۵۲(۱۱): ۲۷۴۳-۲۷۶۰.

تیموری، ر. و دهقانی، ا. ا. ۱۳۹۸. مقایسه روش‌های مختلف تخمین بار بستر در رودخانه بابل رود با توسعه نرم افزار STE. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۲۷(۱): ۲۲۹-۲۳۶.

صمدی، م. و عزیزیان، م. ۱۳۹۹. تاثیر مفهوم تغییرات درون سلولی، ابعاد شبکه محاسباتی و مقیاس نقشه توپوگرافی بر عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه‌های سیل گیر رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه سرباز). *حفاظت منابع آب و خاک*. ۹(۳): ۱-۱۲.

سلطانی، س.، یزدی، ج. و شاه سوندی، م. ۱۴۰۰. بررسی تاثیر ابعاد شبکه محاسباتی بر نتایج پهنه بندی سیلاب و زمان اجرای مدل MIKEFLOOD. چهاردهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهرداری، بابل. <https://civilica.com/doc/1370021>

Artichowicz, W. and Gąsiorowski, D. 2019. Computationally efficient solution of a 2D diffusive wave equation used for flood inundation problems. *Water*. 11(10): 2195.

Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A. and Bates, P. D.

## Utilizing Subgrid Variability and Computations to Improve the Speed of Flood Modeling Using STE Software

R.Teimourey<sup>1</sup>, A.A.Dehghani<sup>2</sup>, M.Meftah Halaghi<sup>3\*</sup>

Recived: May.15, 2023

Accepted: Nov.19, 2023

### Abstract

Severe and sudden floods have always led to irreparable damages, including the deaths of thousands and significant economic losses. Rapid flood zoning is one of the most important and fundamental aspects of crisis management and reducing flood-related damages. To mitigate risks, damages, and take timely action, it is essential to quickly identify areas prone to flooding and inundation and take necessary measures. In this study, a new user-friendly module of STE software was developed to solve shallow water equations more rapidly. By introducing and examining new grid discretization and subgrid variability methods, the process of flood zoning and simulation has been accelerated. To evaluate the proposed methods, flood modeling was conducted for the flooding event caused by Hurricane Harvey in 2017 in the vicinity of Hempstead city, Texas, USA, along a 22-kilometer stretch of the Brazos River. The comparison of results obtained from accurate and long-term flood modeling using shallow water equations with the rapid methods presented in the study demonstrates that subgrid variability methods can significantly reduce the modeling time for flood simulation from 1090 minutes to 17 to 36 minutes (a 97% reduction) while maintaining modeling accuracy. This is achieved with a flood zone accuracy of 94% and a root mean square error (RMSE) of 0.14 for flow depth modeling.

**Keywords:** 2D Flood Modeling, Subgrid Computation, Subgrid Variability, Shallow Water Equations, STE Software

---

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

(\*- Corresponding Author Email: meftah@gau.ac.ir)