

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.7.9

درصد همانندی: ۸٪

## مدلسازی عددی الگوی جریان در ابعاد مدل فیزیکی رودخانه کارون (محدوده مائدر جنگیه)

علیرضا صدیق<sup>۱</sup>، مهدی قمشی<sup>۲</sup>، محمدرضا زایری<sup>۳\*</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

sadigh.watereng@gmail.com

ghomeshi@scu.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.<sup>۳\*</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

m.zayri@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵

## چکیده

در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌های حاصل شده در توان محاسباتی رایانه‌ها و توسعه روش‌های محاسبات عددی، فرایندهای مرتبط با جریان آب و انتقال رسوب با دقت بیشتری بررسی شده‌اند. این مطالعه استفاده از مدل‌سازی عددی دوبعدی HEC-RAS را به عنوان گزینه‌ای برای پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدرولیکی در مسیر خم بررسی می‌کند. مقایسه نتایج در چارچوب یک مطالعه مدل فیزیکی کج رودخانه کارون در بخش پیچان رود جنگیه صورت پذیرفت. محدوده مدل‌سازی شده حدفاصل ایستگاه اهواز تا فارسیات، به طول ۴۰ کیلومتر بوده که شامل برداشت رقوم سطح آب و سرعت جریان می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، مدل عددی، الگوهای سرعت جریان مشابهی با مدل فیزیکی، با شاخص‌های ضریب تبین، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب ناش-ساتکلیف به ترتیب  $R^2=0.941$ ،  $RMSE=0.04$  (m/s) و  $NSE=0.88$  پیش‌بینی نمود. باین حال ویژگی‌های شبکه مورد استفاده تأثیر بالایی بر توزیع سرعت دارا بود، به گونه‌ای که شبکه منظم با تراکم بالا بهترین دقت را در شبیه‌سازی سرعت جریان داشته است. برای شبیه‌سازی جریان در مدل عددی، تعیین مدت‌زمان شبیه‌سازی و گام‌های زمانی در انجام فرایند محاسبات عددی، لازم و ضروری است. در این تحقیق در مراحل مختلف، زمان شبیه‌سازی متفاوت بوده است و گام‌های زمانی در اغلب مراحل شبیه‌سازی برابر با مقدار ۰/۵ ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین نتایج با بررسی نقشه‌های ماهواره‌ای مربوط به ۵۱ سال اخیر نشان داد محدوده دیواره‌های ساحلی محدوده مائدر جنگیه به دلیل تنش برشی تمایل به فرسایش داشته است.

واژه‌های کلیدی: مطالعه عددی، مدل فیزیکی، پیچان رود، رودخانه کارون، تصویر ماهواره‌ای

## ۱. مقدمه

مدلسازی عددی الگوی جریان رودخانه به عنوان یک رویکرد پیچیده برای درک و پیش‌بینی رفتار سیال آب می‌تواند تعاملات میان هندسه جریان و دینامیک سیالات را ارائه دهد. این رویکرد به‌ویژه در مطالعات مدیریت منابع آب اهمیت دارد، زیرا به عنوان یکی از ابزارهای قوی جهت تخصیص آب، کاهش ریسک سیلاب، حفظ اکوسیستم‌ها و طراحی سازه‌های آبی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد. به این جهت شبیه‌سازی جریان هیدرولیکی در رودخانه‌ها امری اساسی بوده و در پروژه‌های مهندسی رودخانه مورد توجه ویژه قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی جریان رودخانه، انواع مختلفی از مدل‌ها با استفاده از فرضیات گوناگون و روش‌های عددی متنوع طراحی و به کار گرفته شده است. روش‌های پیشرفته با استفاده از فناوری‌هایی همچون سنجش‌ازدور، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، ابزارهای متنوعی را برای شبیه‌سازی و تحلیل جریان رودخانه فراهم کرده‌اند [۱]. بیشتر مدل‌های رایج، جریان را به صورت یک‌بعدی فرض کرده و پارامترهای هیدرولیکی آن را با استفاده از معادلات یک‌بعدی سنت-ونانت شبیه‌سازی می‌کنند. این فرض در بسیاری از بخش‌های رودخانه قابل قبول است، اما در برخی نقاط خاص، مکانیزم جریان به الگوهای دوبعدی یا حتی سه‌بعدی وابسته است. مدل‌های یک‌بعدی به دلیل سادگی و سرعت بالای محاسبات، کاربرد گسترده‌ای دارند. با این حال، پیشرفت در روش‌های عددی و افزایش قدرت پردازش رایانه‌ها، امکان استفاده از مدل‌های دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان هیدرولیکی در رودخانه‌ها را فراهم کرده است. به‌طور خاص پیش‌بینی دقیق هیدرولیک سیلاب‌ها به درک پارامترهای جریان آب در رودخانه‌ها بستگی دارد. عواملی مانند عمق جریان، سرعت جریان و احتمال وقوع سیلاب می‌توانند پیش‌بینی سیلاب‌ها را تحت تأثیر قرار دهند [۲-۴]. یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌گیری از مدل‌های دو و سه‌بعدی، نیاز به نقشه‌های دقیق رقوم ارتفاعی<sup>۱</sup> از رودخانه و مناطق اطراف آن است که تأثیر قابل توجهی بر دقت نتایج

مدلسازی دارد. تهیه این نقشه‌ها شامل دو بخش است: بخش اول به نقشه‌برداری از سیلاب‌دشت‌های رودخانه اختصاص دارد که اغلب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انجام می‌شود. بخش دوم مربوط به نقشه‌برداری از توپوگرافی بستر رودخانه است که به دلیل پیچیدگی آن، نیازمند فناوری‌های پیشرفته سنجش‌ازدور یا اندازه‌گیری و نقشه‌برداری مستقیم در محل رودخانه است [۵]. قوس‌های رودخانه از جنبه‌های مختلفی مانند انتخاب مکان‌های مناسب برای آبگیرها، تثبیت کناره‌ها یا بستر رودخانه، کنترل فرسایش، انحراف جریان و کشتیرانی اهمیت دارند. این مسائل به عوامل مختلفی نظیر شدت و ضعف جریان‌های ثانویه، توزیع سرعت، توپوگرافی بستر رودخانه و ویژگی‌های هندسی پیچان رود وابسته هستند. جریان‌های مارپیچی یکی از ویژگی‌های اصلی جریان در قوس‌های رودخانه هستند که در نتیجه برخورد جریان ثانویه با بردار سرعت متوسط به وجود می‌آیند و این جریان‌ها نقش مهمی در فرسایش کناره‌های بیرونی رودخانه دارند [۶]. از این رو، تحلیل هیدرودینامیکی دقیق جریان در پیچان‌رودها برای طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی مرتبط با رودخانه‌ها و مدیریت سیلاب‌ها ضروری است [۷]. رایج‌ترین مدل‌های عددی که توسط مهندسان به کار گرفته می‌شوند، مدل‌های هیدرودینامیکی هستند که شرایط جریان را با بهره‌گیری از روش‌های عددی تحلیل می‌کنند. برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان، حداقل به یک مدل دوبعدی نیاز است [۸]. مدل‌های دوبعدی به دلیل هزینه محاسباتی کمتر نسبت به مدل‌های سه‌بعدی، در بسیاری از مسائل ترجیح داده می‌شوند [۹]. با وجود این، برای مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌هایی مانند شبیه‌سازی گرداب نعلی‌شکل و آب‌شستگی موضعی اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه پل‌ها، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی ضروری است، زیرا در این موارد به کارگیری مدل‌های دوبعدی نمی‌تواند پاسخگوی نیازها باشد. برای بررسی دقیق‌تر، در شکل ۱ واژه‌های کلیدی پرکاربرد توسط محققان پیشین در حوزه مطالعاتی جریان در مسیر پیچان‌رود در پایگاه استنادی اسکوپوس مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود ارتباط درک دینامیک پیچیده جریان در انحنایها و مسیرهای مثانداری رودخانه جهت



گرفتند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از مدل هیبریدی یک‌بعدی-دو بعدی به‌طور چشمگیری زمان اجرای مدل را کاهش داده است، درحالی‌که دقت آن تفاوت قابل توجهی با مدل دو بعدی کامل نداشته و همچنان نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهد [۲۳]. دوال و همکاران (۲۰۲۳) از معادلات دو بعدی جریان کم‌عمق برای شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری بهره بردند. این پژوهش به تحلیل ساختار جریان در معابر شهری و همچنین جریان عبوری از پنجره‌ها و درهای شکسته پرداخت. در این مطالعه، دو مدل آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد این مدل‌ها، سیزده منطقه شهری با جریان پایدار و پنج منطقه با جریان ناپایدار انتخاب شدند. نتایج نشان داد که هر دو مدل تلاطم توانستند عمق جریان را در شرایط پایدار با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند. با این حال، پیش‌بینی توزیع دبی و سرعت جریان در خیابان‌ها، به‌ویژه در فضاهای باز بزرگ، با دقت کمتری همراه بود. میانگین خطای توزیع دبی شبیه‌سازی شده در خروجی‌ها برای مدل مبتنی بر عمق جریان ۲/۵ درصد و برای مدل  $k-\epsilon$  تلاطم ۷/۳ درصد گزارش شد [۲۴]. ژانگ و همکاران (۲۰۲۵) مدل هیدرودینامیکی یک‌بعدی را جایگزینی برای مدل‌های دو بعدی در شبیه‌سازی جریان سطحی در حوزه‌های پیچیده دو بعدی توسعه دادند. این مدل با حذف یک بعد، توانست شبیه‌سازی را با دقتی مطلوب و کارایی محاسباتی بسیار بالاتر انجام دهد. فرایند جایگزینی از طریق ایجاد شبکه‌ای کانال یک‌بعدی انجام شد. این شبکه به‌گونه‌ای طراحی شده بود تا تمام دامنه مورد نظر را بدون هم‌پوشانی یا تقاطع پوشش دهد و همچنین از نظر هیدرولوژیکی با شیب‌های تند سازگار باشد. مقایسه نتایج این مدل یک‌بعدی با مدل دو بعدی نشان داد که مدل پیشنهادی نه تنها دقتی قابل مقایسه با مدل‌های دو بعدی در پیش‌بینی جریان سطحی ارائه می‌دهد، بلکه از نظر زمان و هزینه محاسباتی نیز بسیار کارآمدتر عمل می‌کند. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای مدل یک‌بعدی در شبیه‌سازی جریان سطحی در حوزه‌های پیچیده است [۲۵].

رسوب‌گذاری نیز دقتی بیشتر از ۹۰ درصد دارد [۱۹]. کردی و همکاران (۲۰۱۹) با ارائه یک مدل ریاضی شبه‌دو بعدی برای تعیین توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب، آن را در مختصات منحنی‌الخط به‌صورت عددی حل کردند. این روش بر مبنای شبیه‌سازی سلول‌های جریان ثانویه در رودخانه‌های پیچان‌رود طراحی شده است. برای بهبود پیش‌بینی سرعت متوسط جریان در عمق، جریان ثانویه به‌عنوان تابعی از تنش برشی بستر و سرعت جریان تعریف شده است [۲۰]. سلماسی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از یک مدل دو بعدی به تحلیل الگوی جریان رودخانه بشار پرداختند. در این پژوهش، مسیری به طول ۱۲ کیلومتر در بالادست ایستگاه هیدرومتری شاهمختار، واقع در حوالی شهر یاسوج، انتخاب شد. برای کالیبراسیون مدل، ضرایب مختلف زبری مانینگ و مدل‌های گوناگون آشفتگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج عددی مدل با داده‌های مشاهده‌ای برای سه دبی متفاوت مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که برای دبی‌های متوسط و بالا، ضرایب زبری مانینگ کمتر (۰/۱۵ - ۰/۲۵) و برای دبی‌های پایین، ضرایب زبری مانینگ بالاتر (۰/۲۵ - ۰/۳۵) مناسب‌تر است. همچنین، در میان مدل‌های آشفتگی، مدل  $k-\epsilon$  عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داد و به‌عنوان گزینه مطلوب معرفی شد [۲۱]. داس و بیسوال (۲۰۲۳) از یک مدل دو بعدی برای تحلیل جریان غیرمماندگار در قوس رودخانه گوماتی استفاده کردند. برای اعتبارسنجی این مدل، آن‌ها از فاکتورهای مختلف زبری مانینگ و مدل‌های آشفتگی بهره بردند. نتایج شبیه‌سازی برای دو دبی جریان مختلف با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. نتایج مدل عددی نشان داد که وجود نیروی گریز از مرکز و جریان‌های حلزونی تأثیر زیادی بر تغییرات ساختار جریان در قوس رودخانه دارد. همچنین در مقاطع عرضی قوس، شیب عرض جغرافیایی سطح آب به‌وسیله جریان حلزونی و سرعت متوسط تغییر می‌کند. بر اساس مؤلفه‌های ضریب تعیین و ضریب همبستگی خطی، رابطه‌ای خطی و مستقیم بین سرعت و تنش برشی در تمامی محدوده مطالعه مشاهده شد [۲۲]. لی و نگویان (۲۰۲۴) در پژوهشی از ترکیب مدل‌های یک‌بعدی و دو بعدی برای شبیه‌سازی تغییرات بستر رودخانه‌های بهره

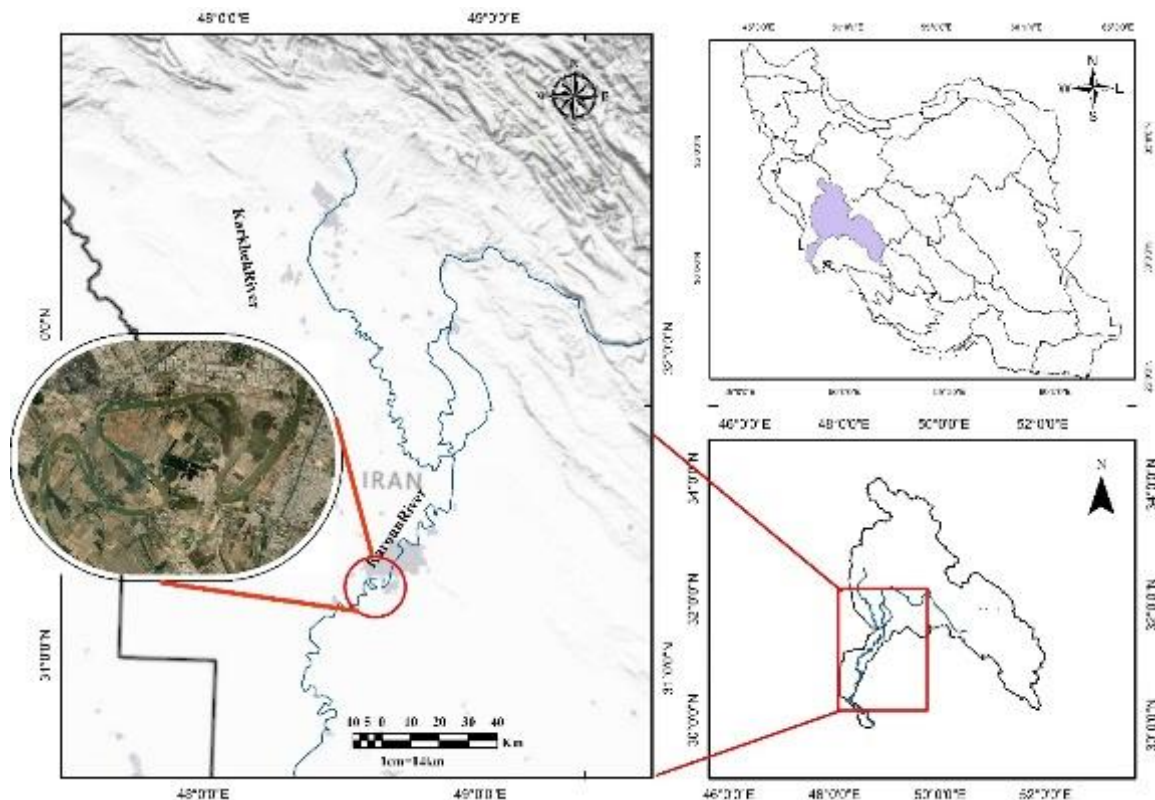
عمومی جنوب شرقی - شمال غربی جریان می‌یابد. رودخانه کارون پس از ورود به دشت خوزستان در شمال گتوند، به سمت جنوب جریان می‌یابد. در شوشتر، توسط بند میزان، رودخانه به دو شاخه شطیط یا دجیل و گرگر تقسیم می‌شود. در بند قیر دو شاخه به علاوه رودخانه دز به هم ملحق شده و به سمت جنوب جریان می‌یابد. این رودخانه پس از عبور از شهر اهواز، در ادامه مسیر جنوبی را ادامه می‌دهد تا در نزدیکی خرمشهر به بهمنشیر و اروندرود متصل می‌شود. محدوده مورد مطالعه بخشی از رودخانه کارون به شمار می‌آید که در مرکز استان خوزستان و جنوب غرب کشور در پایین دست شهر اهواز قرار می‌گیرد. بازه مدل‌سازی فیزیکی و ریاضی این مطالعه از محدوده روستای دغاغله در شمال اهواز آغاز شده و تا محدوده روستای ام الطمیر در جنوب پیران رود ادامه می‌یابد. موقعیت جغرافیایی رودخانه کارون و محل قوس جنگیه در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این پژوهش جهت مدل‌سازی فیزیکی و عددی، از هندسه مقاطع برداشت شده بخشی از رودخانه کارون استفاده شد. از این رو برای صحت‌سنجی مدل دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS از نتایج پارامترهای هیدرولیکی برداشت شده از مدل فیزیکی استفاده شد. علاوه بر این در این پژوهش سعی شده است تا اندازه و نوع مش‌بندی بر میزان کارایی مدل هیدرودینامیکی به ویژه در قوس رودخانه بررسی شود.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

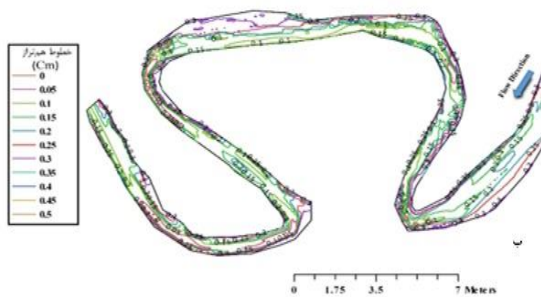
محدوده مورد مطالعه حدود ۴۰ کیلومتر از رودخانه کارون است که شامل ایستگاه آب‌سنجی اهواز و فارسیات می‌باشد. رودخانه کارون به طول ۸۹۰ کیلومتر از چهارشاخه اصلی به نام‌های خرسان، آبونک، آبکیار و بازفت تشکیل شده است که پس از اتصال چهارشاخه اصلی، این رودخانه در جهت



شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه شامل رودخانه کارون و مئاندر جنگیه

## ۲-۲. مشخصات مدل فیزیکی

برای صحت‌سنجی نتایج مدل عددی، از مجموعه آزمایش‌هایی که در یک مدل فیزیکی کج از رودخانه کارون در محدوده بالادست مناندر جنگیه می‌باشد، استفاده شد. مدل فیزیکی مذکور دارای مقیاس افقی ۴۰۰ و مقیاس عمودی ۴۰ (با نسبت کجی معادل ۱۰) مطابق شکل ۳-الف می‌باشد. برای ساخت رقوم ارتفاعی رودخانه کارون از ترکیب نقاط نقشه‌برداری حریم رودخانه کارون که با توجه به اهمیت آن با دقت ۱/۱۰۰۰، به‌علاوه از مقاطع عرضی سال ۱۳۹۲ در محدوده طرح و در نهایت از مدل رقوم ارتفاعی ۳۰ متری کل استان خوزستان استفاده شد. بدین منظور بعد از وارد نمودن و تجمیع نقاط از این سه پایگاه داده، در نرم‌افزار ArcGis با استفاده از درون‌یابی بین این نقاط هندسه DEM رودخانه مطابق شکل ۳-ب ساخته شد. بستر مدل فیزیکی از نوع ثابت و با جنس ملات ماسه و سیمان تشکیل شده است. دبی ایجادشده در بالادست توسط دبی‌سنج و در پایین‌دست توسط یک سرریز مثلثی مطابق شکل ۳-ج اندازه‌گیری شده است. جهت برداشت تراز سطح آب از یک پوینت گنج<sup>۲</sup> که مطابق شکل ۳-د با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. همچنین برای برداشتن سرعت، از دستگاه سرعت‌سنج الکترومغناطیس مدل ۸۰۱ به همراه حسگر تخت با دقت  $\pm 5 \text{ mm/s}$  استفاده شد. در این پژوهش مطابق جدول ۱ برای بررسی تغییرات تراز سطح آب و تغییرات سرعت آب، دو دبی مختلف که معرف دبی دوساله و دبی سیلابی است، مورد بررسی قرار گرفت. برای تبدیل میزان دبی‌ها از نمونه واقعی به مدل و بالعکس از جدول ۱ استفاده شد.



شکل ۳. الف) مدل فیزیکی رودخانه کارون، ب) خطوط هم‌تراز مستخرج از DEM در ابعاد مدل فیزیکی، ج) سرریز مثلثی پایین‌دست جهت اندازه‌گیری دبی و د) نحوه استخراج تراز سطح آب

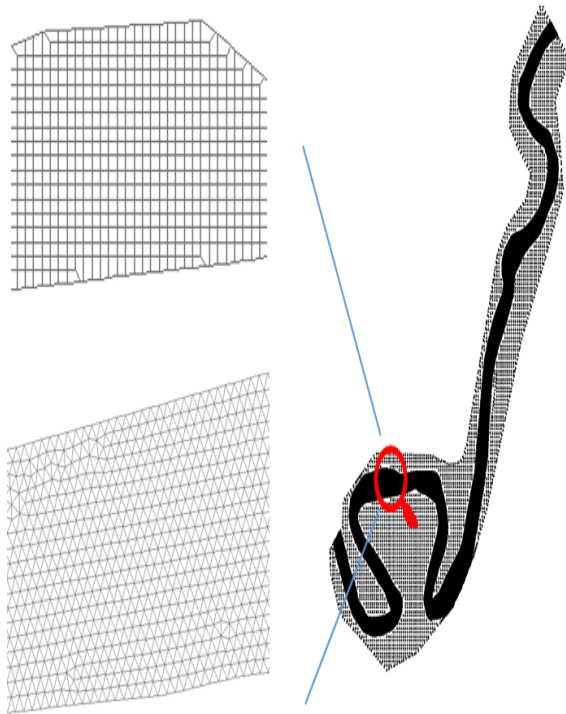
## ۲-۳. معرفی مدل عددی

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی‌های هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون و بررسی صحت نتایج، از مدل دوبعدی HEC-RAS که توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است، استفاده شد. این مدل به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای مهندسی رودخانه شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، قابلیت شبیه‌سازی دوبعدی نیز به این نرم‌افزار اضافه شده است که امکانات متعددی را برای مدل‌سازی جریان در اختیار مهندسان هیدرولیک قرار می‌دهد. این مدل انعطاف‌پذیری زیادی دارد و قادر به شبیه‌سازی جریان‌های ناپایدار و حل معادلات مومنت کامل و موج دیفیوژیو است. رابطه‌های ۱ تا ۳ معادلات پیوستگی و مومنت حاکم بر مدل دوبعدی HEC-RAS برای جریان‌های غیرماندگار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶]:

جدول ۱. محدوده آزمایش‌های انجام شده جهت برداشت پارامترهای

هیدرولیکی

| پارامتر   | محدوده مدل آزمایشگاهی | محدوده نمونه واقعی           |
|-----------|-----------------------|------------------------------|
| دبی جریان | ۳۳ و L/S ۵/۵          | ۳۳۴۰ و ۵۵۷ m <sup>3</sup> /s |
| سرعت آب   | m/s ۰/۰۱۳-۰/۷۵        | m/s ۰/۰۸۲-۴/۷۵               |
| عمق جریان | Cm ۵/۰۵-۲۴/۸۶         | m ۲/۰۲-۹/۹۴                  |
| عدد فرود  | ۰/۰۱۱-۰/۶۵            | ۰/۰۱۱-۰/۶۵                   |



شکل ۴. استفاده از دو نوع مش‌بندی منظم و نامنظم جهت شبیه‌سازی عددی جریان

با توجه به آنکه قوس‌های رودخانه از جمله نقاط کلیدی برای بررسی‌های هیدرولیکی هستند، زیرا در این مناطق جریان تحت تأثیر جریان‌های ثانویه قرار گرفته و از حالت یک‌بعدی خارج می‌شود، در محدوده قوس تعداد شبکه‌های ایجاد شده افزایش داده شده است. علاوه بر تغییرات سرعت، عمق جریان نیز در نواحی داخلی و خارجی قوس به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند. یکی از چالش‌برانگیزترین بخش‌های مدل‌های هیدرودینامیکی، تخمین ضریب زبری مانینگ است. معمولاً از روابط تجربی، تصاویر و جدول‌ها برای برآورد این مؤلفه استفاده می‌شود. در این پژوهش، برای تعیین ضریب زبری مانینگ از تحقیقات انجام شده در محدوده مطالعه بر رودخانه کارون بهره گرفته شده است

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad (3)$$

جهت پایداری مدل عددی می‌بایست گام محاسباتی زمانی تعیین شود. این گام زمانی باید محدودیتی را رعایت کند که پایداری و دقت یک مدل عددی را تضمین کند و این محدودیت به شرح زیر قابل بیان است.

$$C_r = \frac{V_w \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $V_w$  سرعت موج (که به‌طور کلی از میانگین سرعت جریان بیشتر است)،  $\Delta x$  فاصله بین مقاطع عرضی و  $C_r$  عدد کورانت هستند. همچنین، مقدار پایدار برای عدد کورانت حداکثر برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه گام زمانی مناسب برای انجام محاسبات، ۰/۵ ثانیه تعیین شده است.

مطابق شکل ۴، با استفاده از قابلیت نسخه جدید این نرم‌افزار از تعداد بیشتری شبکه در دو حالت منظم و نامنظم استفاده می‌شود. جهت مش‌بندی رودخانه کارون از شبکه منظم با ابعاد تقریبی دو سانتی‌متر برای دشت‌های سیلابی و شبکه‌هایی با طول و عرض ۰/۸ سانتی‌متر برای ناحیه اصلی رودخانه استفاده شده است. در نهایت، حدود ۳۵۰ هزار سلول بر روی محدوده هندسه مورد مطالعه ایجاد شده است. در طول مسیر رودخانه، جداسازی سواحل چپ و راست از بستر رودخانه و تشکیل شبکه‌های مجزا به دلیل تغییرات ناگهانی در نقشه ارتفاعی (تغییر ارتفاع از بستر رودخانه به سمت سواحل) انجام شده تا محاسبات با دقت بیشتری صورت گیرد.



شکل ۶. موقعیت نقاط اندازه‌گیری سرعت در مسیر پیچانرودی جنگیه در رودخانه کارون

برای ارزیابی و مقایسه کارایی مدل HEC-RAS، از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) در نقاط اندازه‌گیری شده سرعت استفاده شده است. هرچه مقدار ( $R^2$ ) به عدد یک نزدیک‌تر باشد، برازش بهتر و نتایج مدل دقیق‌تر است. اگر مقدار NSE بیشتر از ۰/۷ باشد، نتایج مدل‌سازی خوب است، مقادیر بین ۰/۴ تا ۰/۷ رضایت‌بخش هستند، ولی اگر کمتر از ۰/۴ باشد، نشان‌دهنده دقت پایین مدل‌سازی است. در روابط زیر  $V^{measured}$  میزان سرعت جریان اندازه‌گیری شده و  $V^{computed}$  مقدار سرعت شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (V^{measured} - V^{computed})^2}{\sum (V^{measured} - \overline{V^{measured}})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (V^{measured} - \overline{V^{computed}})^2} \quad (6)$$

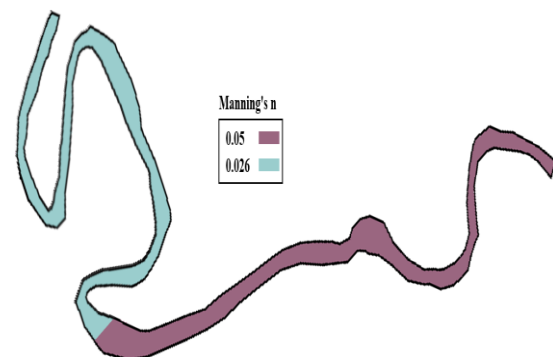
$$NSE = 1 - \frac{\sum (V^{measured} - V^{computed})^2}{\sum (V^{measured} - \overline{V^{computed}})^2} \quad (7)$$

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. صحت‌سنجی سرعت متوسط عمقی

جهت بررسی اثر اندازه شبکه بر نتایج میدان سرعت در شکل ۷ نتایج مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی با

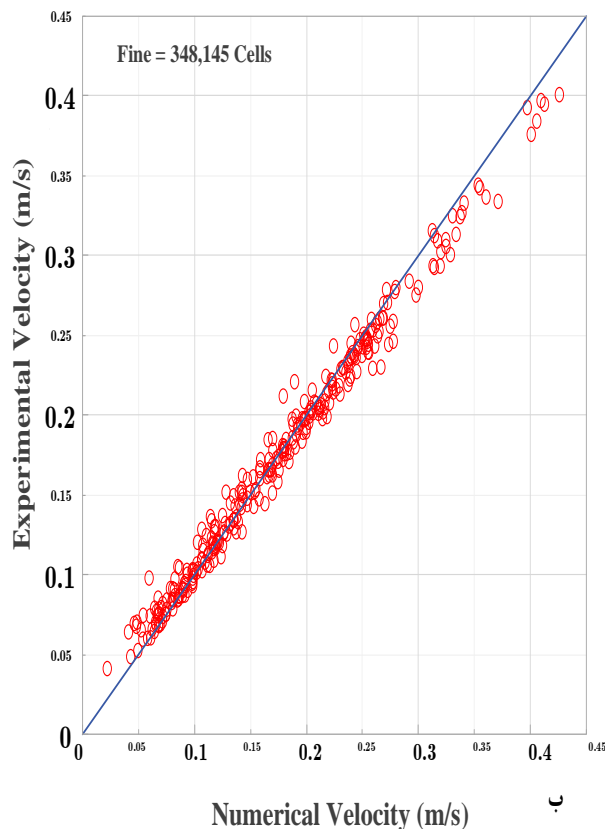
[۲۷]. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، رودخانه کارون در محدوده طرح با توجه به شرایط منطقه به دو بخش مجزا تقسیم شده است و برای هر بخش، پس از انجام کالیبراسیون، مطابق شکل ۵ مقدار ضریب زبری مانینگ تعیین شده است. پس از مشخص شدن مقادیر این ضریب با توجه به بعد آن و همچنین اینکه مدل تحت نسبت کجی مشخص قرار گرفته شده است از رابطه  $1.689 \times n_p$  استفاده شد که در این رابطه  $n_p$  میزان ضریب زبری مانینگ به‌دست‌آمده از تحقیقات گذشته در مقیاس واقعی می‌باشد. شایان‌ذکر است جهت تشابه رفتار جریان بین مدل فیزیکی و رودخانه با اعمال زبری مصنوعی در مدل فیزیکی از جهت کاهش سرعت و افزایش رقوم سطح آب استفاده شد. بدین منظور از سنگ‌دانه‌های نسبتاً ریز و چسبنده در تمام محیط خیس‌شده مدل فیزیکی استفاده شد.



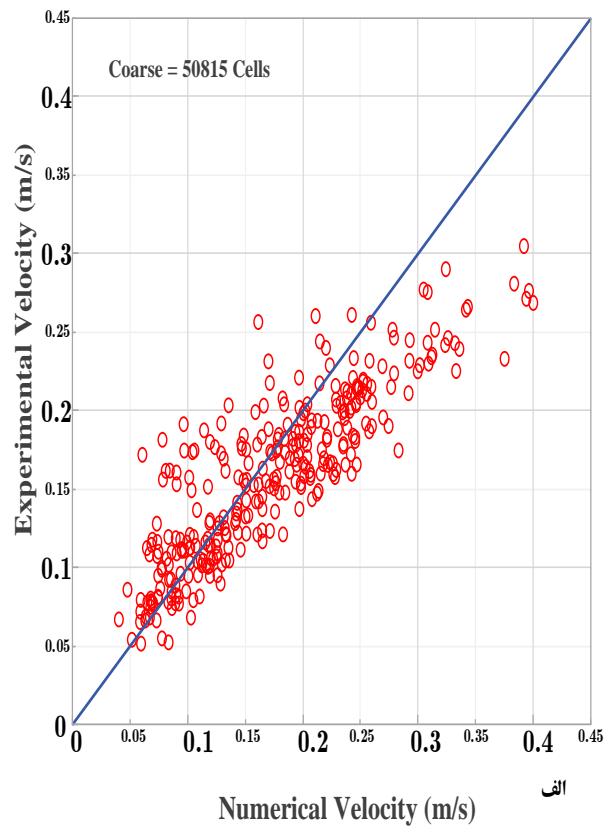
شکل ۵. محدوده اعمال ضریب زبری مانینگ در مدل عددی

برای مقایسه نتایج سرعت بین مدل عددی و فیزیکی، اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای سرعت در موقعیت‌های نشان داده شده در شکل ۶ صورت پذیرفت. برای تقریب سرعت‌های متوسط عمقی، این برداشت‌ها در عمق ۰/۶ از سطح آب انجام گرفت. میدان جریان به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ARCGIS در درون‌یابی، ترسیم و با نتایج مدل دوبعدی نرم‌افزار Hec-Ras مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

نشان می‌دهد؛ بنابراین از مؤلفه سرعت برای صحت‌سنجی استفاده شد. با افزایش تعداد سلول‌های مش‌بندی به‌خصوص در ناحیه قوس رودخانه تطابق مناسبی با نتایج اندازه‌گیری شده حاصل می‌شود. به‌نحوی که مدل با اندازه شبکه ۳۴۸ هزار سلول می‌تواند با شاخص‌های  $R^2=0.941$ ،  $RMSE=0.04$  و  $NSE=0.88$  تقریب خوبی از سرعت متوسط عمقی ارائه دهد.



مقادیر محاسبه‌شده از مدل عددی نشان داده شده است. برای جلوگیری از خطای ناشی از درون‌یابی، فقط نتایج در موقعیت‌های اندازه‌گیری شده سرعت در مدل فیزیکی با مدل عددی موردقیاس واقع شده است. شایان‌ذکر است تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تغییرات عمق جریان حساسیت کمتری به تغییرات شبکه محاسباتی دارد، اما توزیع سرعت جریان، به‌ویژه در ناحیه قوس، به تغییرات شبکه حساسیت بیشتری

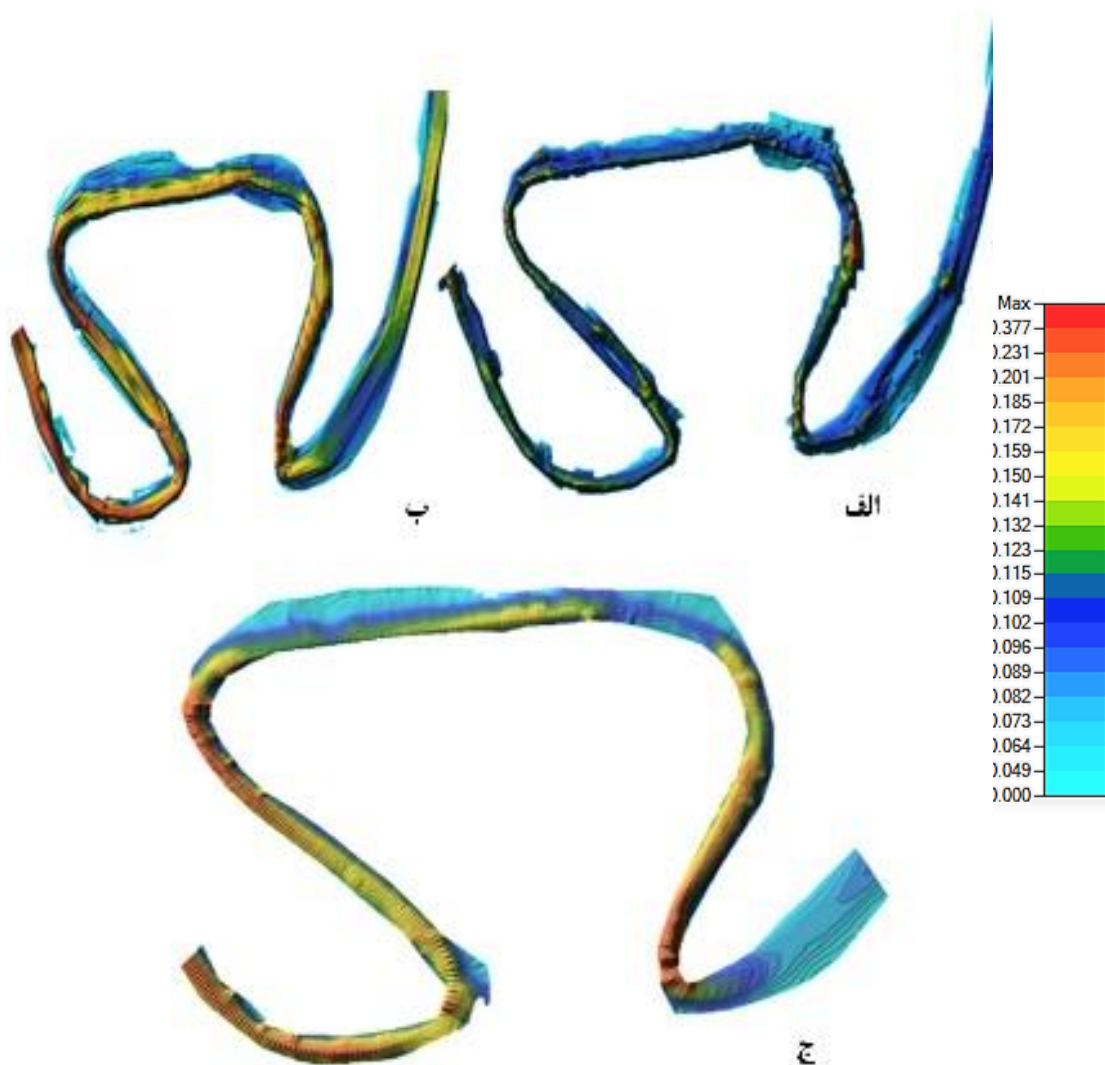


شکل ۷. مقایسه سرعت اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی با مدل عددی با اندازه شبکه الف (۵۰ هزار ب) ۳۴۸ هزار

تقریباً متقارن است. پس از آن به دلیل افزایش عمق جریان از میزان سرعت کاسته شده است؛ زیرا در این مقطع از رودخانه آب دچار پس‌زدگی می‌شود تا حد لازم برای عبور جریان به دلیل اتلاف‌های انرژی را به دست آورد. حین انتقال به خم دوم در امتداد ساحل راست سرعت جریان افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود پیش از آنکه جریان وارد خم دوم شود، جریان‌های با سرعت بالا به‌صورت متقارن در عرض رودخانه توزیع شده‌اند. ناحیه با بالاترین سرعت درست در پایین دست راس خم دوم قرار دارد و برای فاصله کوتاهی تا انتهای مسیر امتداد می‌یابد.

شکل ۸ تغییرات دوبعدی سرعت اندازه‌گیری شده در مدل فیزیکی و پیش‌بینی شده توسط مدل HECRAS-2D را به ازای دو مدل مش‌بندی شده، نشان می‌دهد. برای مدل فیزیکی، سایه‌زنی رنگی نشان‌دهنده کانتورهایی است که با استفاده از روش وزن‌دهی معکوس فاصله<sup>۳</sup> برای ایجاد یک سطح رستری از داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل شده‌اند.

نتایج مدل HECRAS-2D نیز ناحیه‌ای با سرعت بالا را در داخل خم اول (شکل ۸) در مقطع بالادست نشان می‌دهد. این ناحیه به نظر می‌رسد به دلیل اثر انقباض مقطع رودخانه است و نه شرایط ورودی. در بالادست خم اول، ناحیه با سرعت بالا



شکل ۸. تغییرات دوبعدی سرعت در مدل عددی با اندازه شبکه الف (۵۰ هزار، ب) ۳۴۸ هزار و ج) اندازه گیری شده در مدل فیزیکی

### ۲-۳. بررسی نیمرخ عرضی سرعت

از مقاطع نشان داده شده در شکل ۹ به منظور ارزیابی نیمرخ عرضی سرعت متوسط جریان در مدل عددی، به ازای دو دبی ۵/۵ لیتر بر ثانیه و ۳۳ لیتر بر ثانیه استفاده شد. در حالت مستقیم رودخانه، بیشینه سرعت جریان معمولاً در مرکز کانال رخ می‌دهد که علت آن کاهش اصطکاک در دیواره‌های کناری است؛ اما در نواحی قوس و کمی بعد از آن، بیشینه سرعت به سمت دیواره خارجی متمایل می‌شود [۲۸].



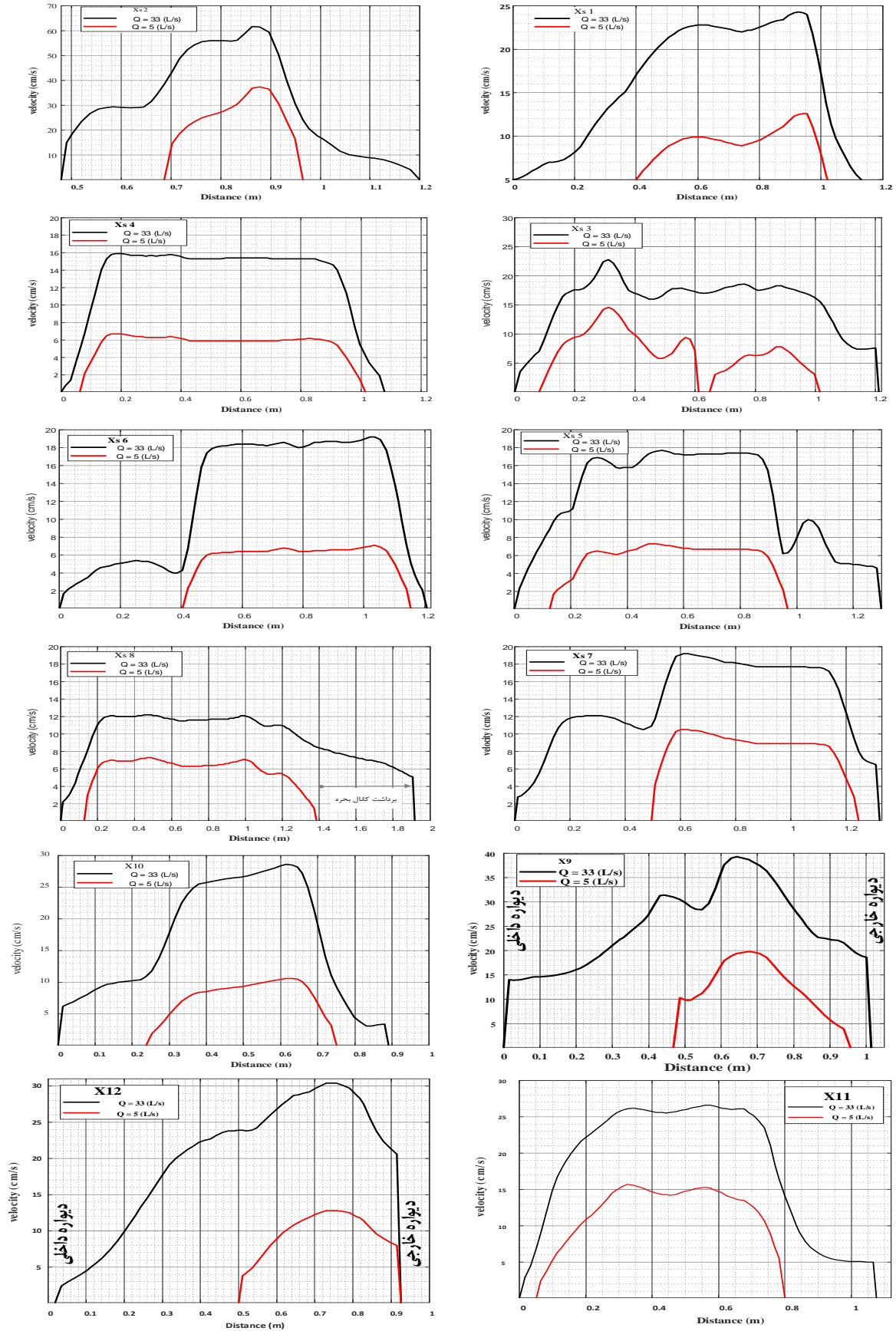
شکل ۹. موقعیت مقاطع در محدوده مدل عددی جهت برداشت نیمرخ عرضی سرعت

ناحیه قوس خارجی ثبت شده است. این پدیده ناشی از محدود بودن این ناحیه توسط دیواره‌ها و عدم گسترش جریان به نواحی سیلاب‌دشت است. هنگام خروج جریان از قوس اول، تغییرات شیب طولی فشار برعکس آنچه در ورودی رخ می‌دهد، اتفاق می‌افتد. در دیواره خارجی، شیب طولی منفی شده و سبب افزایش سرعت سیال می‌شود، درحالی‌که در دیواره داخلی شیب مثبت است و سرعت جریان کاهش می‌یابد. با افزایش شش برابری میزان دبی ورودی به مدل مشاهده می‌شود میزان بیشینه سرعت متوسط جریان در قوس دوم به دلیل شکل مقطع و تنگ‌شدگی آن و همچنین تقویت جریان ثانویه،  $\frac{2}{3}$  برابر شده است که در مواقع سیلابی و دبی‌های بالاتر می‌تواند وارد سیلاب‌دشت گردد.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در مدل‌سازی صورت گرفته نیز در حالت مستقیم رودخانه و قبل از رسیدن به مئاندر جنگیه، بیشینه سرعت جریان که توسط مدل پیش‌بینی شده مطابق مقاطع X۴ و X۵ در مرکز کانال دیده می‌شود. در مقاطع X۱ و X۲ مشاهده می‌شود با افزایش شش برابری میزان دبی ورودی، میزان بیشینه سرعت جریان دو برابر شده است. با ورود جریان به مقاطع (X۶ تا X۸) به دلیل افزایش عرض بازه و تغییرات انحنای جریان موجب کاهش تدریجی و یکنواخت‌تر شدن توزیع سرعت می‌شود.

در نواحی قوس، مانند قوس اول و دوم در بازه مورد مطالعه، این بیشینه سرعت به دیواره خارجی منتقل می‌شود (X۹ و X۱۲). تغییرات سرعت در طول این بازه از رودخانه نشان می‌دهد که در بازه مستقیم پیش از قوس اول، بیشینه سرعت همچنان در مرکز رودخانه رخ می‌دهد. افزایش ضریب زبری در بازه مستقیم بالادست قوس اول (X۹) منجر به کاهش سرعت جریان پیش از ورود به قوس می‌شود؛ اما جریان ورودی به دلیل انحنای قابل توجه قوس، موجب ایجاد تغییراتی نظیر جریان ثانویه، نیروی گریز از مرکز و افزایش سرعت جریان می‌شود. پس از خروج جریان از قوس اول، موقعیت بیشینه سرعت در مقاطع عرضی به سمت مرکز کانال جابه‌جا می‌شود. این رفتار به دلیل تأثیر تغییر نیروی گریز از مرکز است که باعث افزایش فشار در دیواره خارجی و کاهش فشار در دیواره داخلی می‌شود. با افزایش شش برابری میزان دبی ورودی به مدل مشاهده می‌شود میزان بیشینه سرعت متوسط جریان در قوس دوم به دلیل تقویت جریان ثانویه دو برابر شده است که در مواقع سیلابی و دبی‌های بالاتر می‌تواند وارد سیلاب‌دشت گردد.

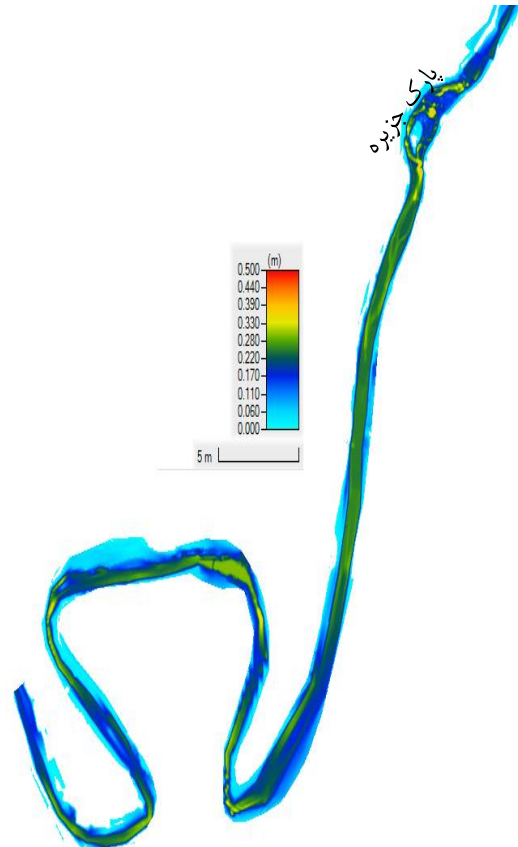
با پیشروی جریان در طول قوس و رسیدن به مقطع X۱۲، این روند ادامه پیدا می‌کند تا جایی که جریان ثانویه بر شیب طولی فشار غالب می‌شود. در این شرایط (شکل ۱۰)، جریان ثانویه باعث می‌شود بیشینه سرعت در مقاطع به سمت دیواره خارجی کانال منتقل شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، خط بیشینه سرعت در نزدیکی دیواره خارجی کانال قرار گرفته است. در کل قلمرو جریان، بیشینه سرعت در



شکل ۱۰. نیم‌رخ عرضی سرعت در مقاطع (X1 تا X12) به ازای دبی ۵/۵ و ۳۳ لیتر بر ثانیه

## ۳-۳. بررسی تغییرات عمق آب

با توجه به هیدروگرافی بستر رودخانه در بازه مورد مطالعه، شکل ۱۱، نشان می‌دهد بیشینه عمق آب در محدوده پارک جزیره تا بالادست قوس به دلیل ضریب زبری بالاتر و تغییرات هندسه بستر، به وقوع پیوسته است. با ورود جریان به قوس اول، به دلیل کاهش ضریب زبری و کاهش عرض کانال منجر به افزایش عمق آب شده که خود باعث افزایش توان حمل رسوبات و بار کف می‌شود و در نتیجه، می‌تواند پتانسیل آبشستگی قابل توجهی در بستر کانال ایجاد کند. در هر دو قوس مورد بررسی، نیروی گریز از مرکز تأثیر قابل توجهی بر جریان وارد کرده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود. این شیب عرضی منجر به افزایش ارتفاع سطح آب در دیواره خارجی قوس و کاهش آن در دیواره داخلی می‌شود. به طور کلی، با افزایش ۶ برابری میزان دبی مشاهده می‌شود در محدوده بالادست قوس اول ۱۳۶ درصد متوسط عمق آب افزایش یافته و در محدوده پایین دست آن شاهد افزایشی به میزان ۱۲۴ درصد هستیم.



شکل ۱۱. نمایش دوبعدی تغییرات عمق آب

## ۳-۴. بررسی تغییرات تنش برشی و پتانسیل

## فرسایش پذیری

تحقیقات نشان داده است که نواحی با بیشترین مقدار تنش برشی، آسیب پذیرترین مناطق در برابر فرسایش بستر هستند، در حالی که نواحی دارای تنش برشی کمتر، بهترین محل‌ها برای رسوب گذاری محسوب می‌شوند [۲۹]؛ بنابراین، بررسی توزیع تنش برشی می‌تواند ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی مناطق مستعد آبشستگی باشد. در شکل ۱۲- الف، تغییرات تنش برشی در محدوده هر دو قوس نشان داده شده است. افزایش تغییرات سرعت جریان در این محدوده به وضوح در روابط  $\tau = \gamma R S$  و  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$  نشان‌دهنده ارتباط مستقیم تنش برشی با گرادیان سرعت است. به طور کلی در بازه‌های مستقیم رودخانه، بیشینه مقدار تنش برشی در بستر رودخانه رخ می‌دهد، در حالی که در نواحی قوسی، این بیشینه در دیواره خارجی رودخانه ظاهر می‌شود. دلیل این امر، افزایش شیب سرعت در کناره خارجی قوس است. در قوس اول، دو ناحیه با تنش برشی بالا مشاهده می‌شود: یکی در بخش ابتدایی قوس داخلی و دیگری در جلداره خارجی کانال، جایی که بیشینه تنش برشی در این بخش به ثبت می‌رسد. با بررسی نقشه‌های ماهواره‌ای مربوط به ۵۱ سال اخیر مطابق شکل ۱۲- ب مشاهده می‌شود این محدوده تمایل به فرسایش دیواره ساحل خارجی خود را داشته است. پس از خروج جریان از این بخش، رودخانه در حال تغییر از یک وضعیت پیچان‌رودی شدید به حالتی نسبتاً مستقیم است. کاهش عرض جریان در این بخش که منجر به افزایش سرعت و در نتیجه افزایش تنش برشی شده طبق شکل ۱۲- ب منجر به فرسایش دیواره ساحلی چپ گشته است. در محل بالادست قوس انتهایی، تنش برشی دیواره ساحل راست نیز بالا بوده و به دلیل آنکه این دیواره نهر فرسایش پذیر بوده است، مطابق شکل ۱۲- ب تخریب در این جهت صورت

دیواره ساحلی راست آن شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از الگوی تنش برشی، با مطالعه عددی پیشین که با استفاده از نرم افزار CCHE2D در محدوده مورد مطالعه رودخانه کارون صورت پذیرفت نیز تطابق دارد [۳۰].



شکل ۱۲. الف) تغییرات تنش برشی محل قوس جنگیه و ب) تصویر ماهواره‌ای تغییرات پلان رودخانه در بازه ۵۱ ساله

بیشتر به دلیل برداشت و تفکیک بهتر داده‌های سرعت جریان در نتایج محاسباتی است. اهمیت این موضوع در مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های مشاهداتی در مقاطع اندازه‌گیری شده آشکارتر شد. نتایج تغییرات سرعت متوسط عرضی نشان می‌دهد که در بالادست محدوده قوس توزیع سرعت جریان یکنواخت می‌باشد ولی با ورود جریان به قوس اول تا خروجی آن، خط حداکثر سرعت در نزدیکی دیواره خارجی کانال قرار گرفته و تا انتهای قوس تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. نتایج تغییرات تنش برشی نشان می‌دهد که در ابتدای قوس‌ها، احتمال وقوع فرسایش در کناره‌ها و بستر زیاد است. جریان‌های ثانویه قوی که در قوس‌های مطالعه شده شکل می‌گیرند، به انتقال جریان به سمت دیواره‌های خارجی کمک می‌کنند. این امر موجب ایجاد شیب سرعت بالا در نزدیکی دیواره خارجی و تنش برشی قابل توجه در بستر و دیواره‌های بیرونی می‌شود.

پذیرفته است. با خروج جریان از انتهای قوس انتهایی نیز و ورود آن به مسیر مستقیم، سرعت جریان به دلیل افزایش انرژی جریان افزایش می‌یابد و تنش برشی نیز در ابتدای این مسیر مستقیم بالا می‌رود که منجر به افزایش پتانسیل فرسایش

#### ۴. نتیجه‌گیری

مدل‌های عددی به دلیل سهولت در اجرا، انعطاف‌پذیری بالا در تغییر پارامترهای جریان و هزینه‌های کمتر در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، در این زمینه به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. به‌ویژه استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در شبیه‌سازی جریان‌های آبی، به‌طور قابل توجهی ما را به پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از فرایندهای حاکم بر جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی نزدیک‌تر می‌کند. در این پژوهش، الگوی جریان در یک بازه پیچان‌رود طبیعی با استفاده از مدل دوبعدی عددی دینامیک سیالات محاسباتی Hec-ras2D شبیه‌سازی شد. ارزیابی شاخص‌های آماری مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی نشان داد که این مدل از قابلیت مناسبی برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار جریان برخوردار است. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد گره‌ها و در نتیجه افزایش تعداد سلول‌های تولیدشده در مقطع عرضی رودخانه، شبکه محاسباتی دقیق‌تر شده و الگوی جریان شبیه‌سازی شده به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. این دقت

- [8]. Shahidan NFN, Hasan ZA, Abdullah MZ, Ghani AA. MATHEMATICAL MODELLING OF FLOW AND SEDIMENT PATTERN AT IJOK INTAKE, IJOK RIVER, PERAK, MALAYSIA. *International Journal of Modelling and Simulation*. 2012;32. <https://doi.org/10.2316/Journal.205.2012.3.205-5595>.
- [9]. Nassar MA. Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. *Journal of hydro-environment research*. 2011;5:187–95. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.002>.
- [10]. Souli H, Ahattab J, Agoumi A. Investigating Supercritical Bended Flow Using Physical Model and CFD. *Modelling and Simulation in Engineering*. 2023;2023:1–15. <https://doi.org/10.1155/2023/5542589>.
- [11]. Qie Z, Liu H, Wu X, Ran Y. Establishment of swirling-flow fishway and analysis of its hydraulic characteristics. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2020;36:119–25.
- [12]. Ferrer-Boix C, Boix Oliva J, Martín-Vide JP, Ollero A. Alluviation of a side-channel by bed material load. Field measurements and modelling. *Geomorphology* 2021;389:107801. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107801>.
- [13]. McMillan M, Liebens J, Bagui S. A statistical model for streambank erosion in the Northern Gulf of Mexico coastal plain. *CATENA*. 2018;165:145–56. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.027>.
- [14]. Baird D, Abban B, Scurlock S, Abt S, Thornton C. Two-Dimensional Numerical Modeling of Flow in Physical Models of Rock Vane and Bendway Weir Configurations. *Water*. 2021;13:458. <https://doi.org/10.3390/w13040458>.
- [15]. Duan JG, Wang SSS, Jia Y. The applications of the enhanced CCHE2D model to study the alluvial channel migration processes. *Journal of Hydraulic Research*. 2001;39:469–80. <https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628272>.
- [16]. Kashyap S, Constantinescu G, Rennie CD, Post G, Townsend R. Influence of Channel Aspect Ratio and Curvature on Flow, Secondary Circulation, and Bed Shear Stress in a Rectangular Channel Bend. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2012;138:1045–59. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000643](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000643).
- [17]. Hickin EJ. Mean flow structure in meanders of the Squamish River, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.WH1403.43525) در انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

## مراجع

- [1]. Liu B, Ma J, Luo L, Bai Y, Wang S, Zhang J. Two-Dimensional LDV Measurement, Modeling, and Optimal Design of Rectangular Primary Settling Tanks. *Journal of Environmental Engineering*. 2010;136:501–7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000186).
- [2]. Paiva RCD, Lima SG. A Simple Model of Flood Peak Attenuation. *Water Resources Research*. 2024;60:e2023WR034692. <https://doi.org/10.1029/2023WR034692>.
- [3]. Pandey BR, Knoblauch H, Zenz G. Potential Dam Breach Flood Assessment with the 2D Diffusion and Full Dynamic Wave Equations Using a Hydrologic Engineering Center-River Analysis System. *Water*. 2024;16:277. <https://doi.org/10.3390/w16020277>.
- [4]. Morianou GG, Kourgialas NN, Karatzas GP, Nikolaidis NP. Assessing hydro-morphological changes in Mediterranean stream using curvilinear grid modeling approach - climate change impacts. *Earth Science Informatics*. 2018;11:205–16. <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0326-2>.
- [5]. Wang X, Yang L, Sun Y, Song L, Zhang M, Cao Y. Three-Dimensional Simulation on the Water Flow Field and Suspended Solids Concentration in the Rectangular Sedimentation Tank. *Journal of Environmental Engineering*. 2008;134:902–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:11\(902\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:11(902)).
- [6]. Valizadeh R, Arman A, Ghobadian R. The effect of the pipe angle and protective inclined apron on the scouring and sedimentation pattern around a semi-buried pipe in a 90° mild bend. *Ocean Engineering*. 2023;286:115711. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115711>.
- [7]. Al-Sammarraee M, Chan A, Salim SM, Mahabaleswar US. Large-eddy simulations of particle sedimentation in a longitudinal sedimentation basin of a water treatment plant. Part I: Particle settling performance. *Chemical Engineering Journal*. 2009;152:307–14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.04.062>.

- congress & destructive water 2002 (pp. 3782-3787). ASCE.
- [27]. Zahiri J, Ashnavar M. Two Dimensional Hydraulic Modeling of Karun River. JWSS - Isfahan University of Technology. 2019.
- [۲۸] تائبی حمید، شفاعی بجستان محمود، کاهه مهدی. شبیه‌سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D. هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه؛ ۱۳۸۸؛ اهواز.
- [29]. Larsen LG, Harvey JW, Crimaldi JP. Predicting bed shear stress and its role in sediment dynamics and restoration potential of the Everglades and other vegetated flow systems. *Ecological Engineering*. 2009;35:1773–85. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.002>.
- [30]. Osivand S, Zahiri J, Jafari A, Porasaf F. Efficiency of CCHE2D numerical model in flow and sediment modeling (case study: Karun River). *Advanced Technologies in Water Efficiency*. 2024. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10855.113>
- 1978;15:1833–49. <https://doi.org/10.1139/e78-191>.
- [18]. Niknam, A, Khosravi, G, Nohegar, A, Holisaz, A. Simulation of the Kor River Morphological Changes Using the CCHE2D Model (Case Study: Meanders Upstream the Dorudzan Dam). *Watershed Management Research*, 2018; 31(4): 69-83. doi: 10.22092/wmej.2018.100548.1000
- [19]. Arman A, Fattahi P, Zahiri J. Simulation of Flow and Sediment Pattern with Spurdikes Series in a 90 degree Mild Bend using CCHE2D Model. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2017. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2017.12018.2654>.
- [20]. Kordi H, Amini R, Zahiri A, Kordi E. Improved Shiono and Knight Method for Overflow Modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2015;20:04015041. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001239](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001239).
- [21]. Salmasi F, Ayaseh A, Dalir AH, Arvanaghi H. Flow pattern study in Beshar River and its two straight and meander reaches using CCHE2D model. *Applied Water Science*. 2020;10. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1107-5>.
- [22]. Das A, Biswal SK. Numerical Modeling of Flow Pattern at a Right-angled River Bend Using CCHE2D Model. *Scientific Research Communications*. 2023 Jan 31;3(1).
- [23]. Le GS, Nguyen HTT. Study on the Change of Riverbed of Hau River at Chau Phu District, an Giang Province by 1D2D3D Combined Numerical Model. In: Reddy JN, Wang CM, Luong VH, Le AT, editors. *Proc. The International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture*. vol. 442, Singapore: Springer Nature Singapore; 2024, p. 1928–38. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4\\_208](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7434-4_208).
- [24]. Dewals B, Kitsikoudis V, Angel Mejía-Morales M, Archambeau P, Mignot E, Proust S, et al. Can the 2D shallow water equations model flow intrusion into buildings during urban floods?. *Journal of Hydrology*. 2023;619:129231. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129231>.
- [25]. Zhang Y, Al-Hamdan MZ, Bingner RL, Chao X, Langendoen E, O'Reilly AM, et al. Application of 1D model for overland flow simulations on 2D complex domains. *Advances in Water Resources*. 2024;188:104711. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104711>.
- [26]. Brunner GW. Hec-ras (river analysis system). In: *North American water and environment*

### پی‌نوشت‌ها

1. Digital Elevation Mode
2. Point gage
3. Inverse distance weighting