

## مدل‌سازی دوبعدی هیدرولیک جریان در رودخانه کارون

جواد ظهیری\* و مهران آشناور<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۲۱)

### چکیده

مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها، اغلب جریان را به صورت یک‌بعدی فرض کرده و پارامترهای هیدرولیکی را بر اساس معادلات یک‌بعدی سنت‌ونانت شبیه‌سازی می‌کنند. در این پژوهش از مدل دوبعدی HEC- RAS برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه کارون و در حد فاصل ایستگاه ملائانی تا فارسیات استفاده شده است. به منظور آماده‌سازی نقشه ارتفاعی با استفاده از تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و اطلاعات پروفیل‌های بستر رودخانه استفاده شد. نتایج مدل‌سازی در قوس‌های مورد مطالعه، نشان می‌دهد که مقادیر حداکثر سرعت در قوس بیرونی اتفاق می‌افتد که با مکانیزم جریان در قوس‌ها مطابقت دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، نوع و تراکم شبکه‌بندی تأثیر چندانی روی مدل‌سازی عمق جریان نداشته است. با این حال ویژگی‌های شبکه مورد استفاده تأثیر بالایی بر توزیع سرعت دارا بوده، به گونه‌ای که شبکه منظم با تراکم بالا بهترین دقت را در شبیه‌سازی سرعت جریان داشته است. تحلیل‌های آماری صورت گرفته نشان‌دهنده دقت بالای مدل است به گونه‌ای که جذر میانگین مربعات خطا برای دبی جریان و سطح آب به ترتیب ۱۷/۹۵ مترمکعب بر ثانیه و ۰/۰۵ متر محاسبه شده است. علاوه بر این ضریب ناش- ساتکلیف نیز برای دبی جریان و سطح آب بالای ۰/۹ برآورد شد که مقدار مطلوبی به حساب می‌آید.

واژه‌های کلیدی: مدل HEC- RAS، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، شبکه‌بندی، قوس رودخانه

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

\* مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: j.zahiri@asnruk.ac.ir

## مقدمه

هیدرولیک جریان با تأثیر گذاشتن روی انتقال رسوبات و شکل آبراهه به‌عنوان مهم‌ترین عامل تغییرات مورفولوژی رودخانه به‌حساب می‌آید (۱۳). بر همین اساس شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها از جمله موارد مهم در تمامی پروژه‌های مهندسی رودخانه به‌حساب می‌آید. برای مدل‌سازی جریان رودخانه مدل‌های متعدد و متنوعی با فرضیات و روش‌های عددی مختلف توسعه یافته و استفاده می‌شود. روش‌های نوین ارائه شده از تکنیک‌های مختلفی از قبیل سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولژیکی برای مدل‌سازی جریان رودخانه سود می‌برند (۶). بیشتر مدل‌های ارائه شده که به‌طور متداول استفاده می‌شوند، جریان را به‌صورت یک‌بعدی فرض کرده و پارامترهای هیدرولیکی جریان را بر اساس معادلات یک‌بعدی سنت‌ونانت شبیه‌سازی می‌کنند. فرض یک‌بعدی بودن جریان در اغلب بازه‌های رودخانه قابل توجیه است ولی در بخش‌های خاصی از رودخانه، مکانیزم جریان از شرایط دو‌بعدی و یا حتی سه‌بعدی تبعیت می‌کند. دلیل استفاده از مدل‌های یک‌بعدی، ساده بودن این مدل‌ها و سرعت بالای اجرای آنهاست که امروزه با توسعه روش‌های عددی و افزایش سرعت پردازش رایانه‌ها می‌توان از مدل‌های دو‌بعدی در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها بهره‌برد. یکی دیگر از مشکلات استفاده از مدل‌های دو و سه‌بعدی، نیاز به نقشه ارتفاعی رودخانه و محدوده اطراف آن است که می‌تواند به‌شدت روی نتایج به‌دست آمده از مدل عددی تأثیر گذار باشد. تهیه نقشه ارتفاعی شامل دو بخش است که بخش اول آن مربوط به دشت‌های سیلابی رودخانه است که می‌بایست توسط سیستم سنجش از راه دور تهیه شود. بخش دوم نقشه ارتفاعی مربوط به توپوگرافی بستر رودخانه است که تهیه آن بسیار مشکل است و نیاز به تکنیک‌های نوین سنجش از راه دور و یا اندازه‌گیری در محل است (۵). نتایج استفاده از دو مدل HEC- RAS و مدل مرفودینامیکی و یک‌بعدی RubarBE

برای شبیه‌سازی جریان در حالت پایدار و ناپایدار رودخانه دانوب و رودخانه نازلو نشان‌دهنده توانایی بالای این دو مدل در شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان است (۱۵). مقایسه نتایج مدل دو‌بعدی HEC- RAS و عکس‌های ماهواره‌ای سیلاب سال ۲۰۱۴ در جنگل‌های آمازون کشور بولیوی نشان‌دهنده کارایی مناسب این مدل است (۸). بر اساس مقایسه صورت گرفته روی مدل‌های عددی، دو مدل HEC- RAS و FLO 2D به‌ترتیب بیشترین دقت را در مدل‌سازی جریان در رودخانه و دشت‌های سیلابی داشته‌اند (۱). یکی از مشکلات مدل‌های دو‌بعدی ناشی از اختلاف توپوگرافی رودخانه در کانال اصلی و دشت‌های سیلابی است که می‌تواند روی نتایج این مدل‌ها تأثیر گذارد. بر همین اساس در این پژوهش بر لزوم استفاده از مدل‌های سه‌بعدی در رودخانه‌هایی که تفاوت زیادی میان توپوگرافی آبراهه و دشت‌های سیلابی وجود دارد، تأکید شده است. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه Inn در اتریش از مدل HEC- RAS و نقشه ارتفاعی با دقت بالا که با تکنیک اسکن لیزری (Laser scanner) تهیه شده بود، استفاده شد (۱۲). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های مربوط به دبی جریان و نقشه‌های پهنه‌بندی سیل، مدل قادر به شبیه‌سازی سیلاب با دقت بالایی خواهد بود. نتایج مدل‌سازی جریان رودخانه Nam Kim در ویتنام با استفاده از ترکیب دو مدل KINEROS2 و HEC- RAS نشان‌دهنده نزدیکی بالای مقادیر دبی و سطح آب شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی است به‌طوری که ضریب ناش-سانتکلیف حدود ۰/۹۳ محاسبه شده است (۹). به‌منظور بررسی وضعیت جاده قرار گرفته روی فلات اسیوط (Assiut plateau) در مصر تحت‌تأثیر سیلاب از ترکیب مدل HEC- RAS و GIS استفاده شد (۳). بر اساس مدل تهیه شده حداکثر عمق و سرعت جریان بر اساس حداکثر میزان بارندگی اتفاق افتاده در منطقه به‌ترتیب برابر ۴ متر و ۱۱/۷۵ متر بر ثانیه برآورد شد.

یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین قسمت‌های مدل‌های دو‌بعدی، تهیه نقشه ارتفاعی رودخانه و دشت‌های

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده در این مطالعه

ردیف	ایستگاه	رودخانه	اطلاعات مورد استفاده	دوره آماری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
۱	ملائانی	کارون	هیدروگراف	۱۳۹۳-۹۴	۲۹۸۶۴۹	۳۴۹۶۲۵۵	۲۵
۲	اهواز	کارون	هیدروگراف و اشل	۱۳۹۳-۹۴	۲۷۹۵۸۲	۳۴۶۸۸۶۳	۲۰
۳	فارسیات	کارون	اشل	۱۳۹۳-۹۴	۲۶۲۸۹۴	۳۴۵۱۵۵۲	۱۱

در بند قیر دو شاخه مذکور به علاوه رودخانه دز به هم ملحق شده و به سمت جنوب جریان می‌یابد. رودخانه پس از عبور از شهر اهواز، همچنان مسیر جنوبی را ادامه می‌دهد تا در نزدیکی خرمشهر به بهمینشیر و اروندرود متصل می‌شود (۱۶). سه ایستگاه آب‌سنجی مورد مطالعه شامل ملائانی، اهواز و فارسیات هستند که ایستگاه‌های ملائانی و فارسیات به عنوان شرایط مرزی در بالادست و پایین دست در نظر گرفته شدند و ایستگاه اهواز به عنوان ایستگاه شاهد برای صحت‌سنجی مدل استفاده می‌شود. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول (۱) و موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها در رودخانه کارون در شکل (۱) نشان داده شده است.

#### اطلاعات مورد استفاده

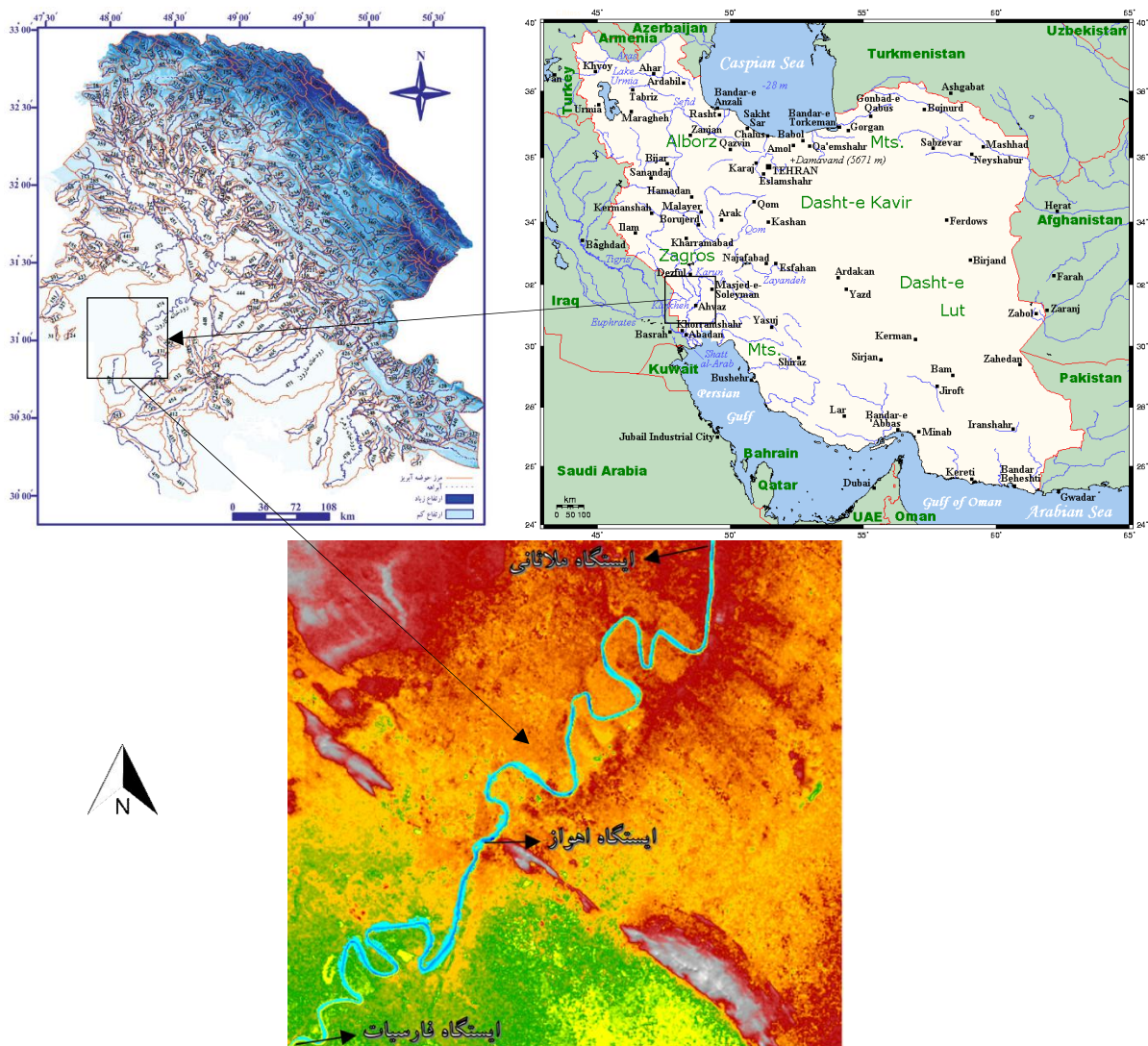
اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش شامل اطلاعات مقاطع رودخانه کارون، دبی جریان و تراز سطح آب در سه ایستگاه آب‌سنجی ملائانی، اهواز و فارسیات در بازه زمانی ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴ است که از سازمان آب و برق استان خوزستان تهیه شد. برای مدل‌سازی دوبعدی در محیط HEC- RAS در دسترس بودن نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه لازم است. بدین منظور نقشه ارتفاعی رودخانه کارون با دقت ۳۰ متر و از سازمان زمین‌شناسی آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) دریافت شد. در این نقشه‌ها، ارتفاع کف رودخانه به صورت ارتفاع سطح آب نمایش داده می‌شود. به دلیل در دسترس نبودن نقشه ارتفاعی از بستر رودخانه کارون، در ابتدا می‌بایست بسترسازی رودخانه در محیط GIS انجام شود. بدین منظور مقاطع برداشت شده

سیلابی آن است. تصاویر ماهواره‌ای به جای ارتفاع کف رودخانه، سطح آب در رودخانه را نشان می‌دهند در حالی که برای تهیه توپوگرافی رودخانه می‌بایستی از مقاطع برداشت شده از رودخانه استفاده کرد و در نهایت توپوگرافی منطقه و رودخانه را ادغام کرد. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای با دقت ۳۰ متر برای تهیه نقشه ارتفاعی و از مقاطع برداشت شده از رودخانه برای شبیه‌سازی توپوگرافی بستر رودخانه استفاده شد. به منظور آماده‌سازی نقشه ارتفاعی از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و برای شبیه‌سازی دوبعدی جریان در این پژوهش از مدل HEC- RAS استفاده شد. علاوه بر این در این پژوهش سعی شده است تأثیر اندازه و نوع مش‌بندی بر میزان کارایی مدل هیدرودینامیکی به‌ویژه در قوس‌های رودخانه بررسی شود.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

محدوده طرح مورد مطالعه حدود ۱۱۰ کیلومتر از رودخانه کارون است که شامل سه ایستگاه آب‌سنجی ملائانی، اهواز و فارسیات است. رودخانه کارون به طول ۸۹۰ کیلومتر از چهار شاخه اصلی به نام‌های خرسان، آب‌ونک، آب‌کیار و بازفت تشکیل شده است که پس از اتصال چهار شاخه اصلی، این رودخانه در جهت 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 که توسط شاپور اول ساخته شده، رودخانه به دو شاخه شطیپ یا دجیل و گرگر تقسیم می‌شود.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه شامل رودخانه کارون و ایستگاه‌های آب‌سنجی ملاثانی، اهواز و فارسیات

شد. بعد از آن نقاط ارتفاعی موردنظر به نقشه اضافه شدند، که این نقاط به دو دسته نقاطی که مربوط به بستر رودخانه بوده و نقاطی که سواحل را پوشش می‌دادند، تقسیم شدند. عملیات میان‌یابی به روش کریجینگ میان نقاط مدنظر انجام شد و بستر رودخانه با دقت بالایی تهیه شد. در مرحله آخر لایه‌های سواحل و بستر رودخانه دوباره به هم متصل شدند و نقشه ارتفاعی منطقه با داشتن بستر رودخانه و مختصات UTM برای پردازش و مدل سازی آماده شد. تصویر نقشه ارتفاعی بستر رودخانه کارون در شکل (۲) نشان داده شده است.

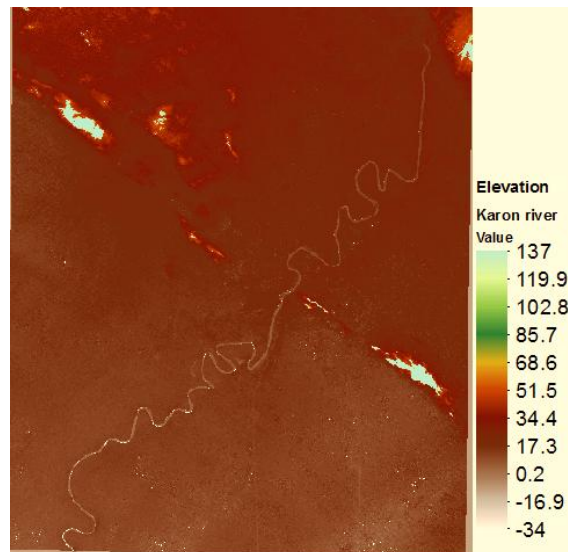
توسط سازمان آب و برق خوزستان در قسمت‌های مختلف رودخانه کارون برای شبیه‌سازی بستر رودخانه مورد استفاده قرار گرفتند. این مقاطع شامل ۸۰۰۰۰ نقطه ارتفاعی از بازه ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی تا فارسیات هستند که سواحل و بستر رودخانه را در بر می‌گیرند. در بیشتر مقاطع فقط نقاط ابتدا و انتها دارای مختصات UTM بود و نقاط بین آنها فاقد مختصات بود و فقط فاصله آنها تا نقطه ابتدا مشخص بود. بدین ترتیب در مرحله اول نقشه ارتفاعی منطقه به حالت متریک با مختصات UTM Zone 39 تبدیل شد و سپس نقاطی که فاقد مختصات UTM بودند، مختصات آنها معلوم

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

رابطه (۱) معادله پیوستگی جریان و روابط (۲) و (۳) فرم دیفرانسیلی معادله مومنتم را نشان می‌دهد. در این روابط H سطح تراز آب، عمق جریان، t زمان، u و v مؤلفه‌های سرعت در راستای طولی و عرضی رودخانه، q دبی ورودی یا خروجی به رودخانه در واحد عرض،  $v_t$  ضریب ویسکوزیته گردابی در راستای افقی،  $c_f$  ضریب اصطکاک کف و f ضریب کوریولیس است.

اولین مرحله مدلسازی تهیه نقشه ارتفاعی است که بدین منظور نقشه ارتفاعی تهیه شده در GIS برای شروع عملیات مدلسازی توسط رابط کاربری RAS Mapper فراخوانی شد. در مدلسازی دوبعدی جریان، منطقه مورد مطالعه می‌بایستی شبکه‌بندی شده و سپس بالادست و پایین دست جریان برای مدل معرفی شوند. نحوه شبکه‌بندی رودخانه کارون در محل ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است.

برای مش‌بندی رودخانه کارون از شبکه نامنظم با ابعاد تقریبی ۸۰ متر برای سیلاب‌دشت‌ها و شبکه‌های با طول و عرض ۴۰ متر برای مقطع اصلی رودخانه استفاده شده است که در نهایت بیش از ۳۰۰۰۰ سلول روی محدوده مورد مطالعه ایجاد شد. در کل مسیر رودخانه، جداسازی سواحل چپ و راست از بستر رودخانه و تشکیل شبکه‌های مجزا، به‌علت تغییرات ناگهانی روی نقشه ارتفاعی (تغییر ارتفاعات از بستر رودخانه به سواحل) و برای انجام محاسبات دقیق‌تر صورت گرفته است. به‌منظور افزایش دقت مدلسازی در مسیرهای قوسی شکل از تعداد شبکه‌های بیشتر در دو حالت منظم و نامنظم استفاده شد. عملیات شبکه‌بندی به سه صورت نرمال، افزایش تعداد شبکه‌ها به‌صورت منظم و افزایش تعداد شبکه‌ها به‌صورت نامنظم انجام شد. در شکل (۴) نحوه شبکه‌بندی در یکی از قوس‌های رودخانه و مجزا کردن شبکه‌بندی در بستر رودخانه و سواحل آن نشان داده شده است. در این شکل



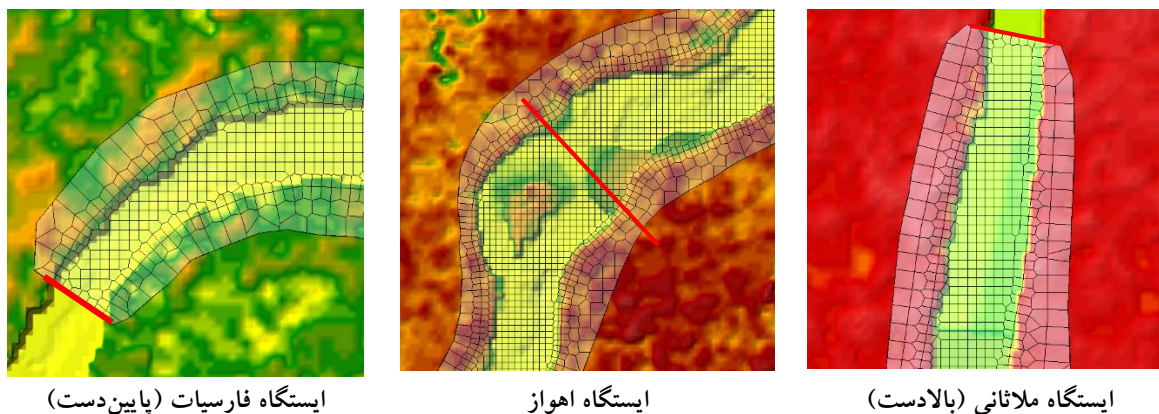
شکل ۲. نقشه ارتفاعی رودخانه کارون

### مدلسازی هیدرولیکی

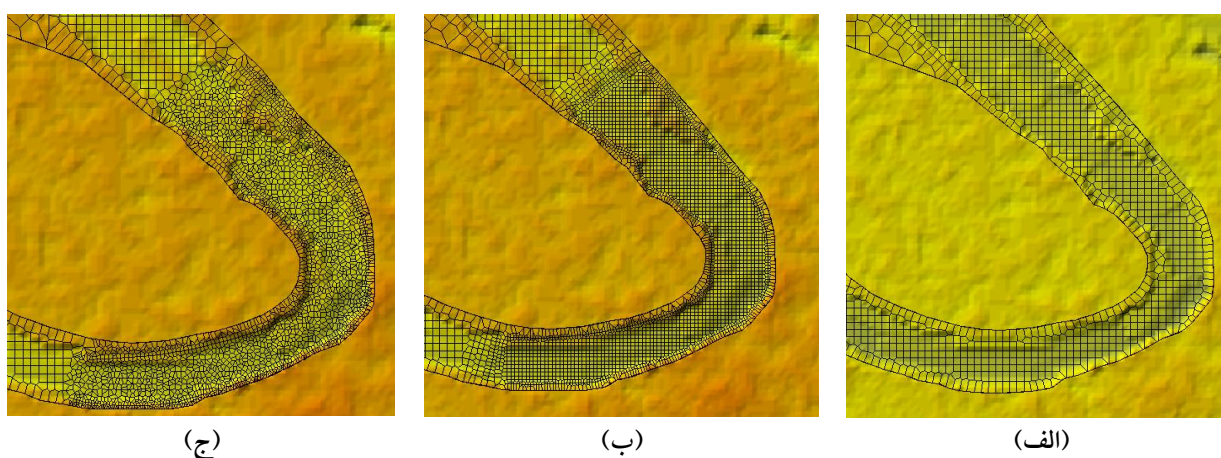
در این پژوهش برای شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون و صحت‌سنجی این پارامترها در ایستگاه آب‌سنجی اهواز از مدل دوبعدی HEC- RAS که توسط گروه مهندسين مشاور ارتش آمریکا (USACE) توسعه یافته است، استفاده شد. مدل HEC- RAS یکی از قوی‌ترین و در عین حال پرکاربردترین مدل‌های مهندسی رودخانه به حساب می‌آید. در سال‌های اخیر شبیه‌سازی دوبعدی نیز به این نرم‌افزار اضافه شد که قابلیت‌های فراوانی را در زمینه مدلسازی جریان در اختیار مهندسان هیدرولیک قرار داده و از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است. مدل دوبعدی HEC- RAS جریان را به‌صورت ناپایدار شبیه‌سازی می‌کند و توانایی حل معادلات به دو صورت مومنتم کامل و موج دیفیوژیو را دارد (۴). معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر مدل دوبعدی HEC- RAS برای جریان غیرماندگار به‌صورت زیر هستند:

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

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



شکل ۳. شبکه بندی رودخانه کارون در محدوده ایستگاه های آب سنجی



شکل ۴. انواع مختلف شبکه بندی در قوس ها: الف) شبکه بندی نرمال، ب) شبکه بندی منظم و ج) شبکه بندی نامنظم

تعیین ضریب زبری مانینگ از پژوهش های صورت گرفته روی رودخانه کارون در بازه مورد مطالعه استفاده شد (۱۰، ۱۱ و ۱۶). در پژوهش های اشاره شده برای تخمین اولیه ضریب زبری مانینگ در رودخانه کارون از عکس های رودخانه و دانه بندی ذرات در مقاطع مختلف استفاده شد. پس از آن از مدل یک بعدی FASTER برای شبیه سازی هیدرولیک جریان در رودخانه کارون استفاده شد. در این پژوهش ها ضریب زبری مانینگ به عنوان ضریب کالیبراسیون در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، رودخانه کارون در محدوده طرح به چهار قسمت مجزا با توجه به شرایط رودخانه تقسیم شد و برای هر قسمت بر اساس کالیبراسیون صورت گرفته مقدار ضریب مانینگ تعیین شد (۱۰، ۱۱ و ۱۶). برای وارد کردن ضریب زبری مانینگ

افزایش تعداد شبکه های ایجاد شده در محدوده قوس به خوبی قابل مشاهده است. این شبکه ها در سه حالت نرمال، منظم و نامنظم در نظر گرفته شدند. قوس های رودخانه از جمله مکان های حساس برای بررسی های هیدرولیکی هستند زیرا در این نواحی مکانیزم جریان تحت تأثیر جریان های ثانویه قرار گرفته و از حالت یک بعدی خارج می شود. علاوه بر تغییرات سرعت، عمق جریان در دو ناحیه داخلی و بیرونی قوس نیز دارای تغییرات شدیدی است.

یکی از پیچیده ترین قسمت های مدل های هیدرودینامیکی تخمین ضریب زبری مانینگ است که روش خاصی برای تخمین این ضریب ارائه نشده و معمولاً از روابط تجربی، عکس ها و جداول موجود استفاده می شود. در این پژوهش برای

جدول ۲. مختصات UTM محدوده‌های با ضریب زبری مختلف در رودخانه کارون

مختصات انتهای محدوده		مختصات ابتدای محدوده		ضریب مانینگ	محدوده‌ها
عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی		
۳۴۱۴۹۳۹/۱۹	۲۹۷۶۵۴	۳۴۹۶۳۳۷/۹۵	۲۹۸۱۷۴۴/۴۵	۰/۰۳۱	محدوده (۱)
۳۴۷۳۵۳۷/۵	۲۷۹۸۱۱۲/۲۷	۳۴۱۴۹۳۹/۱۹	۲۹۷۶۵۴	۰/۰۴	محدوده (۲)
۳۴۵۸۱۹۲/۳۵	۲۷۴۲۶۶/۳۷	۳۴۷۳۵۳۷/۵	۲۷۹۸۱۱۲/۲۷	۰/۰۵	محدوده (۳)
۳۴۵۱۱۵۱/۱۹	۲۶۲۸۲۸/۷	۳۴۵۸۱۹۲/۳۵	۲۷۴۲۶۶/۳۷	۰/۰۲۶	محدوده (۴)

ضریب ناش - ساتکلیف (NSE) برای دبی جریان و تراز سطح آب در ایستگاه اهواز استفاده شد. هرچه مقدار  $R^2$  به یک نزدیک تر باشد، برازش بهتر بوده و نتایج مدل دارای دقت بالاتری است. ضریب NSE نشان‌دهنده مقدار نسبی واریانس باقیمانده در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی است. اگر  $NSE > 0.7$  باشد، نتایج مدل سازی خوب بوده و مقادیر  $0.4 < NSE < 0.7$  رضایت‌بخش ولی  $NSE < 0.4$  نشان‌دهنده دقت پایین مدل‌سازی خواهد بود (۱۴).

$$R^2 = \frac{\sum (Q^{\text{measured}} - \overline{Q^{\text{measured}}})^2}{\sum (Q^{\text{measured}} - \overline{Q^{\text{measured}}})^2 + \sum (Q^{\text{computed}} - \overline{Q^{\text{computed}}})^2} \quad (5)$$

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

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

$Q^{\text{measured}}$  مقادیر مشاهداتی،  $Q^{\text{computed}}$  مقادیر پیش‌بینی شده، N تعداد داده‌ها و  $\bar{Q}$  میانگین مقادیر دبی و سطح تراز آب هستند.

### نتایج و بحث

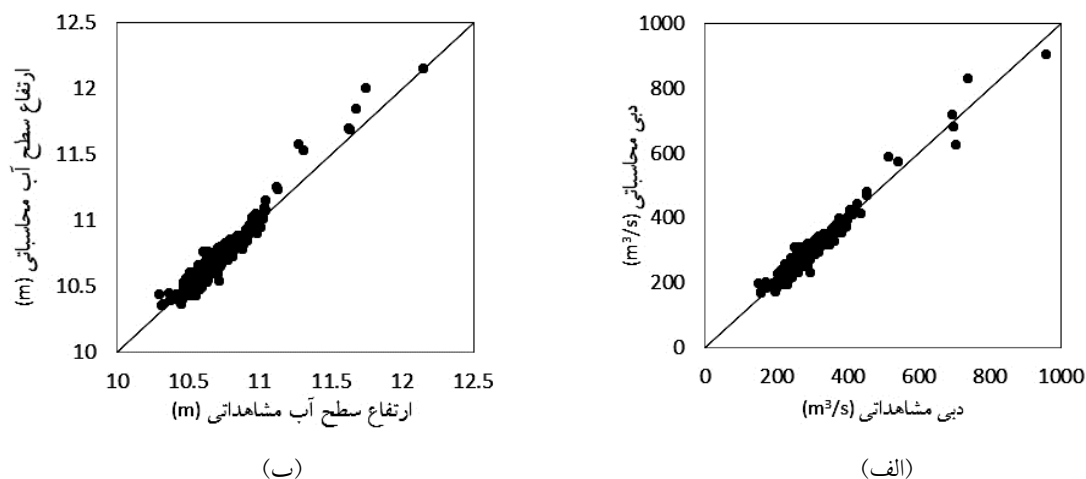
پس از تهیه نقشه ارتفاعی و شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه و در نظر گرفتن شرایط اولیه و مرزی و پردازش اطلاعات در مدل

هر نقطه از مسیر رودخانه به مدل دوبعدی، نیاز به نقشه کاربری اراضی است. نقشه کاربری اراضی مورد استفاده در این مطالعه در محیط GIS تهیه شد و مقادیر ضریب زبری هر قسمت از رودخانه مشخص شد. مختصات UTM ابتدا و انتهای هر محدوده از رودخانه کارون برای مشخص کردن ضرایب زبری مانینگ نیز در جدول (۲) ارائه شده است.

برای مدل‌سازی هیدرولیک جریان نیاز به شرایط مرزی در بالادست و پایین دست رودخانه است. در این پژوهش از شرایط غیرماندگار برای مدل‌سازی رودخانه کارون استفاده شد که هیدروگراف جریان روزانه به‌عنوان شرط مرزی بالادست در ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی و مقادیر سطح تراز آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه آب‌سنجی فارسیات به‌عنوان شرط مرزی پایین دست در نظر گرفته شد. گام زمانی مناسب برای انجام محاسبات می‌تواند پایداری و صحت یک مدل عددی را تا حدود زیادی تضمین کند. این گام زمانی بایستی محدودیت‌های عدد کورانت را برآورده کند که به‌صورت 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 متوسط سرعت جریان بیشتر است)،  $\Delta x$  فاصله بین مقاطع عرضی و  $C_r$  عدد کورانت هستند. همچنین برای عدد کورانت مقدار یک، بهینه‌ترین عدد است. بر این اساس در این پژوهش گام زمانی مناسب برای انجام محاسبات پنج دقیقه در نظر گرفته شد. برای مقایسه و ارزیابی کارایی مدل HEC-RAS از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و



شکل ۵. نمودار همبستگی: الف) دبی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده و ب) سطح آب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده

جدول ۳. آنالیزهای آماری روی مدل هیدرودینامیک در ایستگاه اهواز

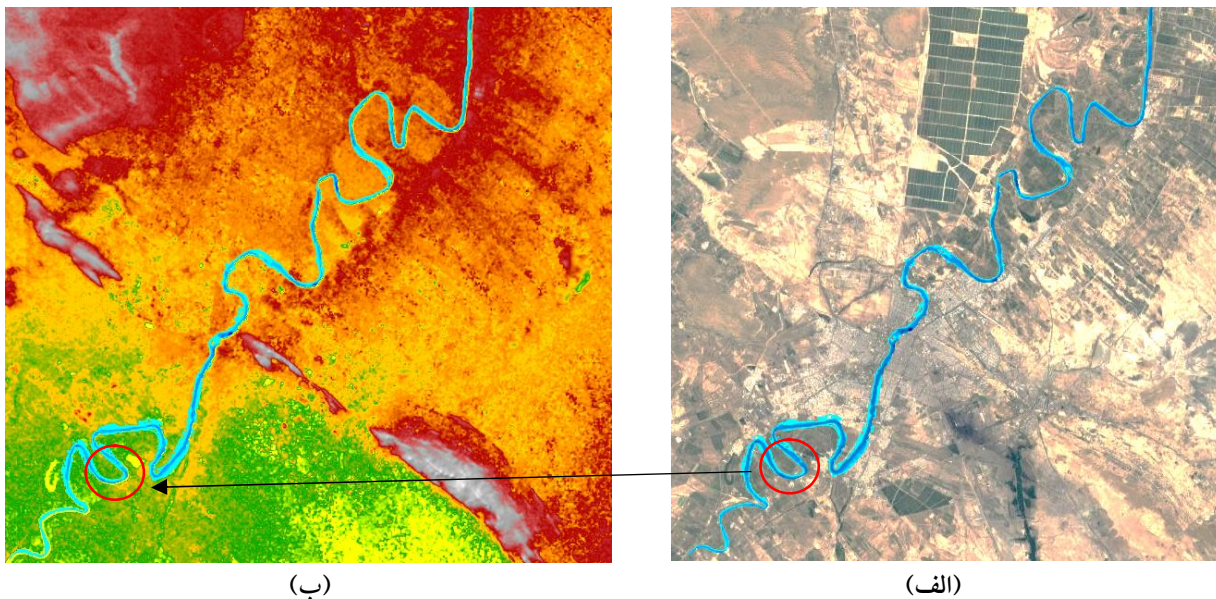
پارامتر هیدرولیکی	RMSE	NSE	R <sup>2</sup>
دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)	۱۷/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵
سطح آب (متر)	۰/۰۵	۰/۹۳	۰/۹۵

مقادیر بالای سطح آب، کمی بیشتر از مقادیر مشاهداتی توسط مدل هیدرودینامیکی برآورد شده است. برای بررسی دقیق‌تر میزان کارایی مدل HEC- RAS در شبیه‌سازی جریان در رودخانه کارون از روابط (۵)، (۶) و (۷) استفاده شد که نتایج تحلیل‌های آماری صورت گرفته در جدول (۳) نشان داده شده است. در پژوهش انجام شده مقدار NSE برای دبی جریان و سطح آب به ترتیب برابر با ۰/۹۵ و ۰/۹۳ محاسبه شد که این مقادیر نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی هستند. جذر میانگین مربعات خطا در مطالعه صورت گرفته توسط ظهیری که از مدل عددی یک‌بعدی FASTER برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه کارون استفاده کرد، برای دبی جریان ۱۲۱ و برای سطح آب ۰/۳۰ به دست آمد (۱۶). این مقایسه نشان می‌دهد که مقدار RMSE مربوط به دبی جریان و سطح تراز آب در مدل دوبعدی نسبت به مدل یک‌بعدی FASTER بیشتر از شش برابر کاهش داشته است. مقدار RMSE در مطالعه صورت گرفته توسط محمدی و کاشفی‌پور (۷) که از ضریب زبری دینامیک به‌همراه مدل

دوبعدی HEC- RAS، نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی به دو صورت گرافیکی و عددی در محیط RAS Mapper قابل مشاهده است. از جمله متغیرهای خروجی، عمق جریان و توزیع سرعت است که در تمام طول مسیر رودخانه قابل نمایش هستند. همچنین با استفاده از رابط کاربری RAS Mapper می‌توان نقشه آنالین منطقه مورد مطالعه را به صورت لایه‌ای مجزا در نظر گرفت و نتایج پژوهش را روی نقشه آنالین نیز بررسی کرد. همانطور که پیش‌تر گفته شد، ایستگاه اهواز به‌عنوان ایستگاه شاخص برای صحت‌سنجی نتایج، استفاده شده است. در شکل (۵) همبستگی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دبی و ارتفاع سطح آب در ایستگاه اهواز نشان داده شده است.

با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی از دقت بالایی برخوردار هستند. تراکم نقاط در اطراف خط ۴۵ درجه گویای نزدیکی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی است. علاوه بر این، تراز سطح آب مدل‌سازی شده در





شکل ۶. نمایش رودخانه کارون و موقعیت قوس مورد مطالعه روی: الف) نقشه آنالین و ب) نقشه ارتفاعی

وجود سرعت‌های بالا در ابتدای قوس در شکل (۷) به دلیل قرارگیری قوس مورد نظر در پایین‌دست قوس دیگر است. این امر باعث افزایش سرعت در ابتدای قوس شده است. علاوه بر این بیشترین عمق در محل قوس خارجی رخ داده است که اثر شتاب جانبی جریان را نشان می‌دهد.

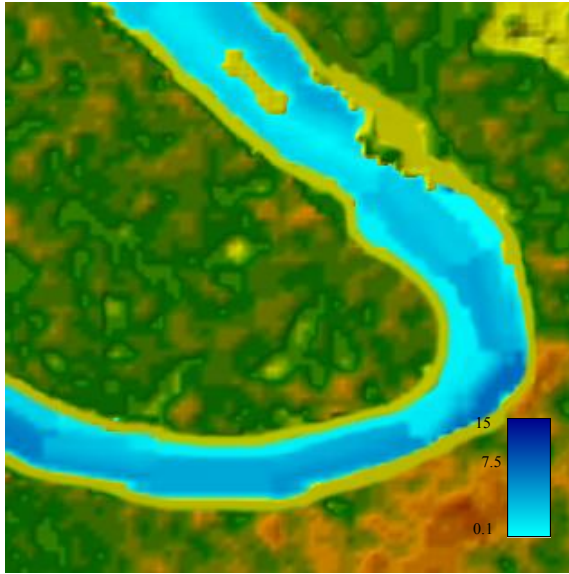
پروفیل‌های سرعت و تراز سطح آب روی قوس مورد مطالعه برای سه حالت شبکه‌بندی نرمال، منظم و نامنظم در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.

با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته در هر سه حالت مختلف شبکه‌بندی، مقادیر حداکثر سرعت در قوس بیرونی اتفاق افتاده است که با مکانیزم جریان در قوس‌ها مطابقت دارد. وجود جریان‌های حلزونی در قوس‌ها باعث انتقال بردارهای حداکثر سرعت به سمت قوس خارجی شده که در نتیجه آن فرسایش سواحل در قوس‌های بیرونی را به همراه دارد. جریان‌های ثانویه دارای مکانیزم سه‌بعدی بوده ولی توسط مدل دوبعدی HEC- RAS به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند. برای مقایسه نتایج مدل عددی برای سه حالت مختلف شبکه‌بندی، مقادیر سرعت و عمق جریان در قوس داخلی و بیرونی در جدول (۴) ارائه شده است. بر این اساس نوع و تراکم شبکه‌بندی

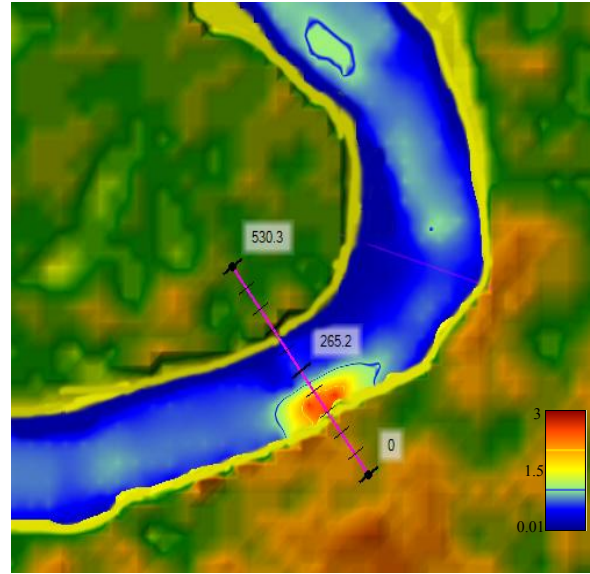
یک‌بعدی برای شبیه‌سازی سطح آب در رودخانه کارون استفاده کردند، حدود ۰/۲۸ محاسبه شد که در مقایسه با پژوهش حاضر از خطای بالاتری برخوردار است.

مدل دوبعدی HEC- RAS نسبت به مدل یک‌بعدی از مکانیزم منعطف‌تری برخوردار است و می‌تواند مقادیر سرعت در مقاطع عرضی و به‌ویژه در قوس‌های رودخانه را به خوبی شبیه‌سازی کند. بر همین اساس یکی از قوس‌های رودخانه در محدوده مطالعاتی انتخاب شده و نحوه توزیع سرعت، عمق و نیز خطوط جریان در قسمت‌های مختلف قوس بررسی شده است. همچنین در مدل دوبعدی می‌توان به خوبی تأثیر تنگ‌شدگی مقطع روی هیدرولیک جریان را بررسی کرد. موقعیت قوس انتخاب شده روی نقشه آنالین و نیز روی نقشه ارتفاعی منطقه در شکل (۶) نمایش داده شده است.

در شکل (۷) نحوه توزیع سرعت و عمق جریان برای آخرین روز مدل‌سازی (۳۱ شهریور سال ۱۳۹۴) و موقعیت مقطع عرضی در نظر گرفته شده، نمایش داده شده است. با توجه به این شکل بیشترین مقادیر سرعت در قسمت انتهایی قوس اتفاق افتاده است که این امر با مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در قوس مطابقت دارد (۲).

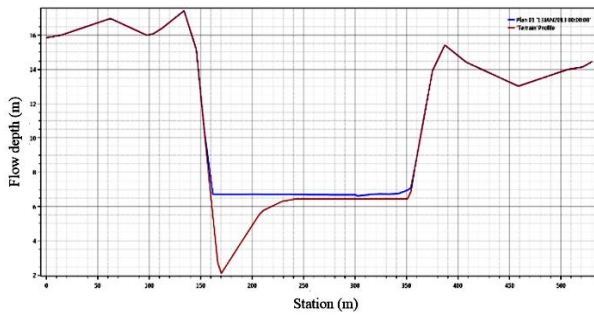


(ب)

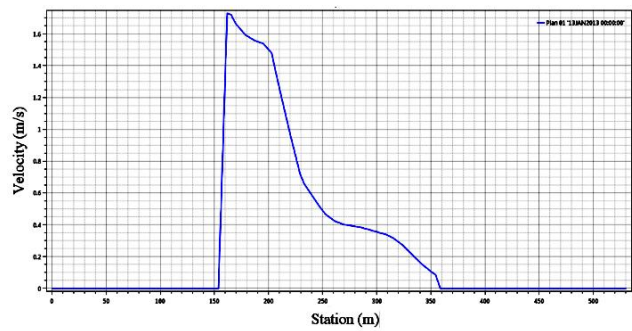


(الف)

شکل ۷. الف) موقعیت مقطع عرضی در نظر گرفته شده و نحوه توزیع سرعت در قوس و ب) تغییرات عمق جریان در قوس

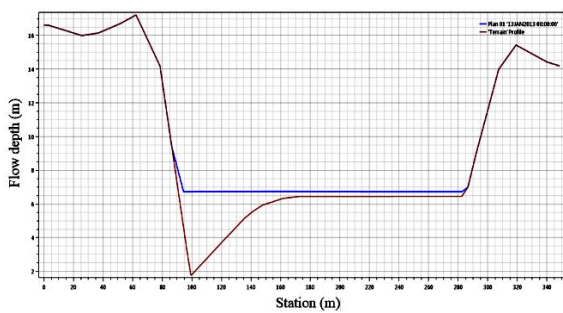


(ب)

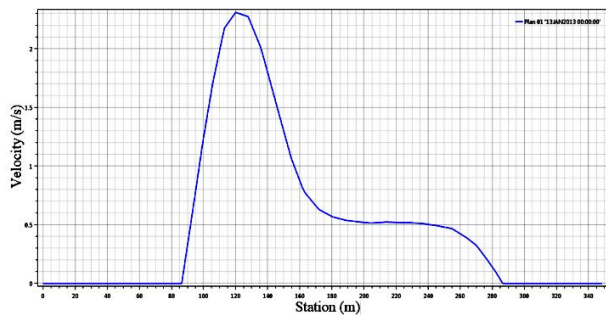


(الف)

شکل ۸. نتایج مدل‌سازی با شبکه‌بندی نرمال: الف) پروفیل سرعت و ب) تراز سطح آب

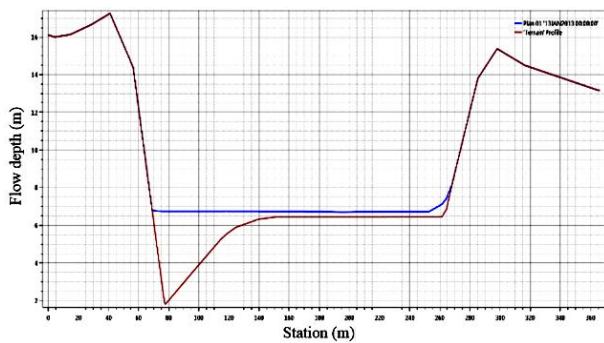


(ب)

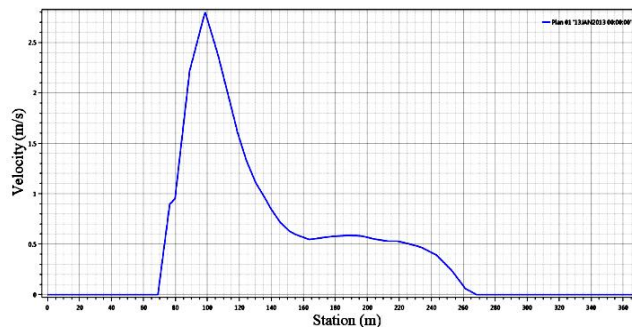


(الف)

شکل ۹. نتایج مدل‌سازی با شبکه‌بندی منظم: الف) پروفیل سرعت و ب) تراز سطح آب



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. نتایج به دست آمده برای مدل‌سازی با شبکه‌بندی نامنظم: (الف) پروفیل سرعت و (ب) تراز سطح آب

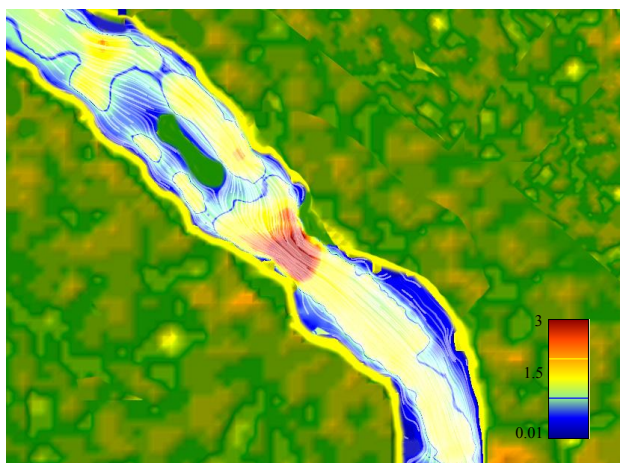
جدول ۴. مقادیر پارامترهای هیدرولیکی در انواع شبکه‌بندی

نوع شبکه‌بندی			پارامتر هیدرولیکی	موقعیت
نرمال	منظم	نامنظم		
۰/۲	۰/۴	۰/۳۵	سرعت (m/s)	قوس داخلی
۰/۴۵	۰/۲۷	۰/۳	عمق جریان (m)	
۱/۷	۲/۳	۲/۸	سرعت (m/s)	قوس بیرونی
۴/۶۲	۴/۹۵	۴/۹	عمق جریان (m)	

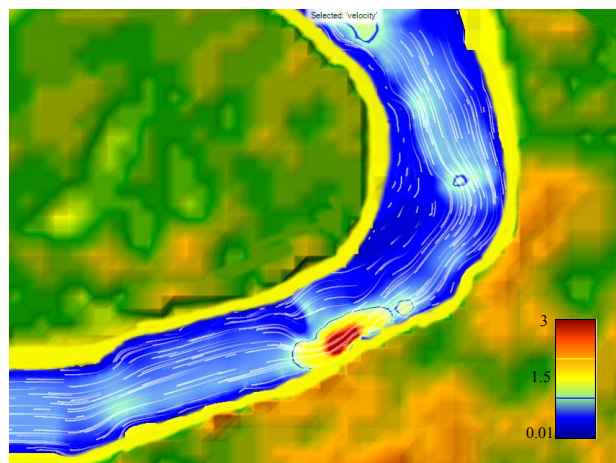
می‌توان بررسی کرد. در شکل (۱۱) خطوط جریان برای قوس مورد مطالعه و یکی از مقاطع تنگ شده رودخانه نشان داده شده است. توزیع خطوط جریان در شکل (۱۱-الف) نشان‌دهنده جدا شدن بردارهای جریان از قوس داخلی و حرکت به سمت قوس خارجی است. نتیجه این امر فرسایش در قوس خارجی و رسوبگذاری در قوس داخلی است که پلان رودخانه در این شکل گویای این مسئله است. در مقطع نشان داده شده در شکل (۱۱-ب) نیز خطوط جریان در مقطع تنگ‌شدگی دارای تراکم بالایی بوده که نتیجه این امر افزایش سرعت در مقطع مدنظر است. پدیده جداشدگی جریان بعد از مقطع تنگ‌شدگی نیز به وضوح قابل مشاهده است و از طریق این مدل‌سازی می‌توان به بررسی این پدیده به‌ویژه در محل آبگیرها در شرایطی که امکان مدل‌سازی سه‌بعدی وجود نداشته باشد، پرداخت.

تأثیر چندانی روی عمق جریان ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده، دو نوع شبکه‌بندی منظم و نامنظم که با تراکم یکسان استفاده شده است، تأثیر بسیار ناچیزی روی شبیه‌سازی عمق جریان داشته‌اند.

بررسی نتایج توزیع سرعت نشان می‌دهد که برعکس عمق جریان، نوع و تراکم شبکه‌بندی تأثیر بالایی روی مقادیر سرعت دارد. این امر به‌ویژه درباره سرعت‌های بیشینه چشمگیر است. نکته بسیار مهم اینکه، تغییرات توزیع سرعت در حالت شبکه‌بندی منظم با تراکم بالاست که منحنی به دست آمده به صورت یکنواخت بوده و برعکس منحنی‌های مربوط به دو شبکه منظم و شبکه نامنظم فاقد تغییرات ناگهانی است که می‌تواند به عنوان یکی از مزایای این نوع شبکه‌بندی به حساب آید. علاوه بر مقادیر و پارامترهای هیدرولیکی در مدل دوبعدی، نحوه توزیع خطوط جریان را نیز در قسمت‌های مختلف رودخانه



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. خطوط جریان الف) در قوس مورد مطالعه و ب) در تنگ شدگی مقطع رودخانه

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل دوبعدی HEC- RAS برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه کارون استفاده شده است. یکی از مزایای این مدل، سرعت اجرای بالای آن در حالت دوبعدی بوده است که می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای مهندسان هیدرولیک و رودخانه استفاده شود. به‌منظور بررسی کارایی این مدل در ایستگاه اهواز به عنوان ایستگاه شاهد از معیارهای آماری مختلفی استفاده شد. ضریب ناش - ساتکلیف در هر دو مورد عمق و دبی جریان مقادیر بالای ۰/۹ داشته است که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات صورت گرفته توسط ظهیری (۱۶) و محمدی و کاشفی‌پور (۷) نیز نشان می‌دهد که مدل دوبعدی HEC- RAS از توانایی بالاتری در شبیه‌سازی هیدرولیک جریان در مقایسه با مدل‌های یک‌بعدی برخوردار است. ضریب ناش - ساتکلیف در پژوهش صورت گرفته توسط نوین و همکاران (۹) که از مدل HEC- RAS برای شبیه‌سازی دبی جریان و تراز سطح آب استفاده کردند برابر با ۰/۹۳ محاسبه شده بود که با پژوهش حاضر مطابقت دارد. در این مطالعه با استفاده از مدل دوبعدی، توزیع سرعت و عمق جریان در قوس‌های رودخانه که از پیچیده‌ترین قسمت‌های مدل‌سازی هستند، بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده توزیع غیریکنواخت سرعت در قوس بود به‌گونه‌ای که بردارهای حداکثر سرعت در قسمت انتهایی قوس و

در ناحیه قوس بیرونی اتفاق افتاده‌اند که با نتایج مطالعات گذشته که به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است، مطابقت دارد. علاوه‌بر این در این پژوهش برای بررسی تأثیر تراکم و نوع شبکه‌بندی مورد استفاده روی میزان کارایی مدل دوبعدی از سه شبکه‌بندی منظم، منظم با تراکم بالا و نامنظم با تراکم بالا استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نوع و تراکم شبکه‌بندی تأثیر چندانی روی میزان عمق جریان نداشته است به‌گونه‌ای که در قوس بیرونی تغییرات عمق جریان در سه شبکه مختلف حدود شش درصد بوده است. توزیع سرعت برخلاف عمق جریان به‌شدت تحت تأثیر نوع و تراکم شبکه‌بندی بوده به‌گونه‌ای که شبکه‌بندی منظم با تراکم بالا بهترین نتایج را ارائه کرده است. در شبکه‌بندی منظم با تراکم پایین و نامنظم با تراکم بالا، تغییرات ناگهانی سرعت در مقطع عرضی مشاهده می‌شود که با فیزیک مسئله مطابقت چندانی ندارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌توان از مدل دوبعدی HEC- RAS در قسمت‌هایی از رودخانه که مکانیزم جریان از حالت یک‌بعدی تبعیت نمی‌کند، استفاده کرد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به لحاظ تأمین مالی این پژوهش تشکر می‌کند.

منابع مورد استفاده

1. Anees, M. T., K. Abdullah, M. Nawawi and N. Rahman. 2016. Numerical modeling techniques for flood analysis. *Journal of African Earth Sciences* 124: 478-486.
2. Blanckaert, K. and W. H. Graf. 2001. Mean flow and turbulence in open-channel bend. *Journal of Hydraulic Engineering* 127(10). 835-847.
3. Ezz, H. 2017. Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 21(3): 219-227.
4. Hydrologic Engineering Center. 2015. Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center, USACE, 609 2nd St. Davis CA.
5. Lai, R., M. Wang, M. Yang and C. Zhang. 2018. Method based on the laplace equations to reconstruct the river terrain for two-dimensional hydrodynamic numerical modeling. *Computers & Geosciences* 111: 26-38.
6. Merkurjeva, G., Y. Merkurjev, B. V. Sokolov, S. Potryasaev, V. A. Zelentsov and A. Lektuers. 2015. Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Science* 10:77-85
7. Mohammadi, S. and S. M. Kashefipour. 2012. Numerical modeling of flow using an improved dynamic roughness coefficient (Case study: Karun River). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 35(3): 99-109 (In Farsi).
8. Moya Quiroga, V., S. Kure, K. Udo and A. Mano. 2016. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua* 3:25-33.
9. Nguyen, H. Q., J. Degener and M. Kappas. 2015. Flash flood prediction by coupling KINEROS2 and HEC-RAS models for tropical regions of northern Vietnam. *Journal of Hydrology* 2:242-265.
10. Roshanfekar, A. 2007. Integrated 1D and 2D dynamic modeling of heavy metals in riverine basins. MSc. Thesis, Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (In Farsi).
11. Tavakoli Zadeh, A. A. 2003. Modeling flow and water quality in riverine basins. MSc. Thesis, Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (In Farsi).
12. Tong, R. and J. Komma. 2017. Calibration of HEC-Ras hydrodynamic model using gauged discharge data and flood inundation maps. In: Proceeding of the EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria. p 15805.
13. Wang, J., Z. Zhang, B. Greimann and V. Huang. 2018. Application and evaluation of the HEC-RAS - riparian vegetation simulation module to the Sacramento River. *Journal of Ecological Modelling* 368:158-168.
14. Wu, B., Z. Wang, Q. Zhang, N. Shen and J. Liu. 2017. Modelling sheet erosion on steep slopes in the loess region of China. *Journal of Hydrology* 553: 549-558.
15. Yasi, M. and L. Nasiri Sultan Ahmadi. 2017. Simulation and evaluation of perennial rivers flows with HEC-RAS and RubarBE models. *Journal of Water and Soil Science* 27(2): 225-236 (In Farsi).
16. Zahiri, J. 2007. 1D sediment transport modeling in Karun River. MSc. Thesis, Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (In Farsi).

## Two Dimensional Hydraulic Modeling of Karun River

J. Zahiri\* and M. Ashnavar<sup>1</sup>

(Received: July 22-2018 ; Accepted: May 11-2019)

### Abstract

Hydrodynamic models proposed for simulating flow hydraulic in rivers assume the flow in one direction and simulate the hydraulic parameters based on the one-dimensional Saint-Venant equations. In this research, a two-dimensional HEC-RAS model was used to simulate the flow in the Karun River, between Mollasani and Farsiat stations. Geographic information system (GIS) and river cross sections were used to prepare the altitude map using the satellite image of the study area. Modeling results in river bends showed that the maximum velocity occurred in the outer bend, which coincided with the flow mechanism in the bends. Based on the results, grid type and density have little effect on flow depth modeling. However, the characteristics of the mesh used had a great influence on the velocity distribution, so that the regular high-density mesh had the best accuracy in simulating the flow velocity. Statistical analysis showed that the RMSE for the flow discharge and flow depth were 17.95 m<sup>3</sup>/s and 0.05 m, respectively. In addition, the Nash–Sutcliffe efficiency index was calculated to be above 0.9 for the discharge and flow depth, which could be considered as a desirable value.

**Keywords:** HEC-RAS model, GIS, Mesh grid, River bend

---

1. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: j.zahiri@asnruk.ac.ir