



## بررسی دو مدل آشفتگی در شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در یک بازه پیچان‌رودی طبیعی توسط

### مدل CCHE2D (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب)

غلامرضا خسروی<sup>۱\*</sup>، احمد نوحه‌گر<sup>۲</sup>، سعید پورزمان<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

آدرس پست الکترونیکی مولف مسئول ((gholamreza.khosravi@yahoo.com))

۲- استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

### چکیده

در تحقیق حاضر قابلیت دو مدل آشفتگی جریان در پایش و پیش‌بینی فرآیندهای حاکم بر جریان و انتقال رسوب در رودخانه ارزیابی شده است. با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و نیروهای تنش برشی بر فرسایش کناره‌های رودخانه، از مدل عددی دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان آب در بازه‌ای از پیچانرود طبیعی پایین دست سد میناب (استان هرمزگان، ایران) استفاده شد. با استفاده از داده‌های توپوگرافی حاصل از نقشه برداری زمینی و سپس مدل هندسی و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف و نیز اندازه‌گیری صحرائی مشخصات جریان شامل سرعت و عمق، مدل هیدرودینامیکی دو بعدی اجرا گردید. به منظور ارزیابی تغییرات پروفیل طولی سرعت، توزیع تنش برشی و عمق جریان در بخش‌های انحنا دار کانال رودخانه، مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل آشفتگی استفاده شده در پیش‌بینی الگوی جریان دقت مناسبی دارند با لین وجود مدل k-ε در پیش‌بینی نواحی گردابه‌ای در ناحیه قوس مقعر عملکرد بهتری نسبت به مدل لزجت گردابه‌ای داشته است. همچنین پارامتر توزیع سرعت جریان بیشترین و متغیر عمق جریان کمترین حساسیت را به تغییر ابعاد در شبکه ساخته شده محاسباتی دارند.

کلمات کلیدی: جریان آشفته، انتقال رسوب، مدل k-ε، مدل لزجت گردابه‌ای

### مقدمه

یکی از اهداف مهم آبخیزداری، بهینه کردن منافع و کمینه کردن خسارات ناشی از جریان در رودخانه‌ها است؛ این کار با شناسایی، رفتارسنجی و تحلیل جریان در مسیر رودخانه‌ها میسر می‌گردد (ناجی ابهری، ۱۳۸۷). بررسی رفتار جریان در رودخانه‌ها نشان می‌دهد که رودخانه فرآیندی پویا بوده و رفتار آن بسته به مشخصات هندسی دائمی در حال تغییر است و به دنبال این تغییرات، شرایط هیدرولیکی رودخانه تحت تأثیر قرار می‌گیرد (نوحه‌گر، ۱۳۸۰). اغلب جریان‌های جاری در طبیعت از نوع آشفته‌اند؛ در این جریان‌ها، پارامترهای توزیع سرعت، افت انرژی، پخش آلودگی، نیروی برشی کف رودخانه و انتقال رسوب، به شدت تحت تأثیر فرآیند انتقال آشفتگی قرار می‌گیرد؛ به علاوه حضور جریان‌های آشفته در قوس رودخانه‌ها، عامل اصلی شکل‌گیری جریان‌های ثانویه است (Bridge, 2003). اندرکنش نیروهای هیدرودینامیکی جریان در پیچان‌رودها می‌تواند منجر به گسترش جریان به سیلابدشت‌ها و فرسایش‌پذیری کناره‌های رودخانه گردد، از این رو تحلیل هیدرودینامیکی جریان و رسوب در پیچان‌رودها، در طراحی و اجرای طرح‌های مهندسی رودخانه و سیلاب، مؤثر بوده و باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد (تلوری، ۱۳۸۳). برای این منظور، مدل‌های عددی بدلیل انجام محاسبات دقیق و انعطاف‌پذیری در تغییر پارامترهای جریان و هزینه کمتر نسبت به مدل‌های فیزیکی، جایگاه ویژه‌ای دارند. برای تحلیل فرآیندهای هیدرودینامیک جریان و رسوب در رودخانه، مطالعات متعددی انجام شده است. برخی از این مطالعات در غالب مدل‌های عددی به شرح زیر است.



برای شبیه‌سازی عددی جریان در حالت آشفته، کشاورا و شتار (۱۹۹۶)، از معادلات رینولدز متوسط گیری شده در عمق (حالت دو بعدی) استفاده و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد را همراه با تابع دیوار استاندارد برای بستن سیستم معادلات آشفته خود به کار گرفتند. عیسی و اولیویرا (۱۹۹۴)، برای اولین بار به مدلسازی عددی الگوی جریان آشفته در حالت سه بعدی پرداختند؛ این دو محقق معادلات ناویراستوکس را به صورت متوسط گیری شده زمانی با استفاده از روش حجم محدود و با به کار بردن مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  با تابع دیوار استاندارد حل کرده و از ۳۰۰۰۰ گره برای میدان مورد نظر استفاده کردند. استفلر (۲۰۰۲)، بر اساس بررسی مدل‌های هیدرولیکی یک بعدی مانند HEC-RAS، نشان داد که با وجود اینکه مدل‌های یک بعدی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بخصوص در بحث مدیریت سیلاب فوق‌العاده مفید و سودمند می‌باشند، ولی در مواردی مثل متغیرهای هیدرولیکی و پروفیل سطح آب و همچنین تغییرات سرعت جریان و الگوی فرسایش و رسوب گذاری در پیچان‌رودها، به دلیل شبیه‌سازی یک بعدی جریان و رسوب (در راستای طولی)، آنچنان توانمند نمی‌باشند. بوئیچ (۲۰۰۳) با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ (LES)، الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه بسیار ملایم را مدلسازی کرد. این پژوهشگر معتقد است جریان ثانویه باعث می‌شود که حداکثر سرعت بیشتر از حالت عادی به بستر نزدیک شود و همین پدیده باعث آبشستگی و فرسایش موضعی شدید در محل دیواره خارجی به صورت زیرشویی این دیواره شده و باعث تخریب آن می‌شود. همچنین علت تشکیل این جریان را تنش برشی در طول دیواره خارجی و ناهمگنی آشفتگی حاصل از جریان ثانویه مرکزی ذکر کرده است. مدل CCHE2D یک مدل عددی دوبعدی هیدرودینامیک است که توسط جیا و وانگ (۲۰۰۸)، برای مطالعه تغییرات جریان در کانال‌های روباز توسعه داده شده است و ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که این مدل را می‌توان برای مطالعه جریان‌های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرآیندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های آبرفتی بکار برد. همچنین وو و وانگ (۲۰۰۹)، در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداختند و با استفاده از مدل عددی CCHE2D، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تمام مدل‌های آشفتگی شبیه‌سازی‌های نزدیک به واقعیت برای جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در خصوص جریان‌های پیچیده، سه مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  (استاندارد، غیرتعدالی و RNG) نتایجی دقیق‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. حسن و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل CCHE2D در بازه‌ای از رودخانه مودا (Muda)، شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب را مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که می‌توان به خوبی از نرم‌افزار CCHE2D برای تحلیل رفتار جریان، هم در رودخانه و هم در سیلاب‌دشت‌ها استفاده کرد. زرکفلی (۲۰۰۷)، با بررسی مدل ریاضی دو بعدی CCHE2D و مدل یک بعدی HEC-RAS در رودخانه Merdeka، به این نتیجه رسید که اگرچه مدل‌های یک بعدی مانند HEC-RAS، به صورت گسترده استفاده می‌شود ولی توانایی تحلیل برخی از مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند الگوی جریان و رسوب در پیچان‌رودها و محدوده سازه‌ها و موانع‌ها را در رودخانه را ندارند. مغربی و همکاران (۱۳۸۹)، طی تحقیقی با عنوان شبیه‌سازی عددی الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه‌ی شریانی با استفاده از مدل CCHE2D به بررسی موضوع در رودخانه سرباز و با دو دبی مختلف پرداختند نتایج نشان داد که الگوی جریان حول جزیره رسوبی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و جزیره‌ی رسوبی در دبی‌های مختلف اثرگذاری متفاوتی بر روی الگوی جریان در ناحیه‌ی مورد بررسی دارد. خسروی (۱۳۹۱) از مدل عددی دوبعدی CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در بازه‌ای از پیچان‌رودی طبیعی، حدفاصل سد تا پل شهرستان میناب- استان هرمزگان، پرداخت و به این نتیجه رسید که مدل از قابلیت خوبی جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی برخوردار است. مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد در حالی که بحث جریان ثانویه و روند رشد و استهلاک آن در طول کانال اصلی از نکات با اهمیت فراوان است و ارتباط بسیار نزدیکی با پدیده انتقال رسوب و مسائل مورفولوژیکی بازه‌های رودخانه‌ای دارد ولی آنچنان که باید مورد توجه قرار نگرفته است و در تحقیقات کمتر به این موضوع پرداخته شده است. بحث آبشستگی نیز از جمله مباحث مهمی است که مطالعات زیادی برای شناخت آن مورد نیاز است. در این تحقیق سعی بر آن است که با



کمک مدل دو بعدی CCHE2D، مدل آشفنگی مناسبی برای پیش بینی الگوی دو بعدی جریان شناسایی و به کمک آن به مطالعه مولفه‌های مرفولوژیکی و هیدرودینامیکی موثر بر آن پرداخته شود و همچنین الگوی جریان، عمق جریان و توزیع سرعت و تنش برشی در پلان و مقاطع عرضی بررسی می‌شود. شایان ذکر است مطالعات ژئومورفولوژیکی انجام شده در بازه پایین دست سد میناب نشان می‌دهد که قسمت عظیمی از تغییرات ایجاد شده روی بستر و کناره‌های این بازه، بر اثر جریان سیلابی خروجی از سد و فرسایش پذیری بستر و کناره‌های آن است. همچنین با احداث سد میناب و متعاقب آن قطع رسوبات انتقالی بخصوص رسوب‌های درشت دانه به پایاب سد میناب و نیز بهره برداری مصالح آبرفتی از جمله مسائلی است که در این رودخانه باعث تغییرپذیری مسیر بخصوص در محدوده پیچان رودها و همچنین سبب تخریب کناره‌ها، عریض شدن بستر و تهدید سازه‌های رودخانه‌ای، مناطق مسکونی و باغات مجاور رودخانه گردیده است. بنابراین ضرورت دارد شبیه سازی عددی اثر توأم جریان آب و رسوب در بازه مذکور مورد توجه قرار گیرد.

## مواد و روش ها

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است محدوده مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه میناب از یک کیلومتر پایین دست سد استقلال تا پل شهرستان میناب واقع در استان هرمزگان است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی  $08^{\circ} 06' 57''$  تا  $32^{\circ} 32' 04''$  طول شرقی و  $27^{\circ} 09' 33''$  تا  $18^{\circ} 09' 27''$  عرض شمالی قرار گرفته است. این بازه از شرق به سد استقلال و از غرب به پل شهرستان میناب محدود می‌شود. طول بازه حدود ۴/۵ کیلومتر و با توجه به تراز توپوگرافی ابتدا و انتهای بازه به ترتیب در حدود ۴۰/۵ و ۳۲ متر بالاتر از سطح دریا است.

## - روش تحقیق

### - مدل CCHE2D

CCHE2D یک مدل عددی دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان ماندگار و غیرماندگار آشفته و همچنین انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز بین المللی علوم هیدرولیک و مهندسی آب (NCCHE)، دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. برای ساخت هندسه میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH بهره می‌برد و حل میدان جریان و فرآیند انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم افزار، با عنوان CCHE-GUI انجام می‌شود. شبیه سازی جریان آب بر اساس حل معادلات متوسط عمقی ناویر-استوکس می‌باشد. تنش برشی متلاطم با استفاده از تخمین معادلات بوزینسک محاسبه می‌گردد و برای محاسبه لزجت گردابه‌ای متلاطم از سه مدل آشفنگی مختلف می‌توان استفاده نمود. مدل شبیه‌ساز پدیده انتقال رسوب این نرم‌افزار، توانایی مدل‌سازی انتقال هر دو فاز بار معلق و بار بستر را در تمام حالات غیر تعادلی، غیر یکنواخت و رسوب چسبنده یا غیر چسبنده دارد. همچنین این مدل، تأثیر جریان‌های ثانویه بر نحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه‌های پیچان رود را در نظر می‌گیرد. روند به کار گرفته شده در مدل CCHE2D به طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است (Zhang, 2009).

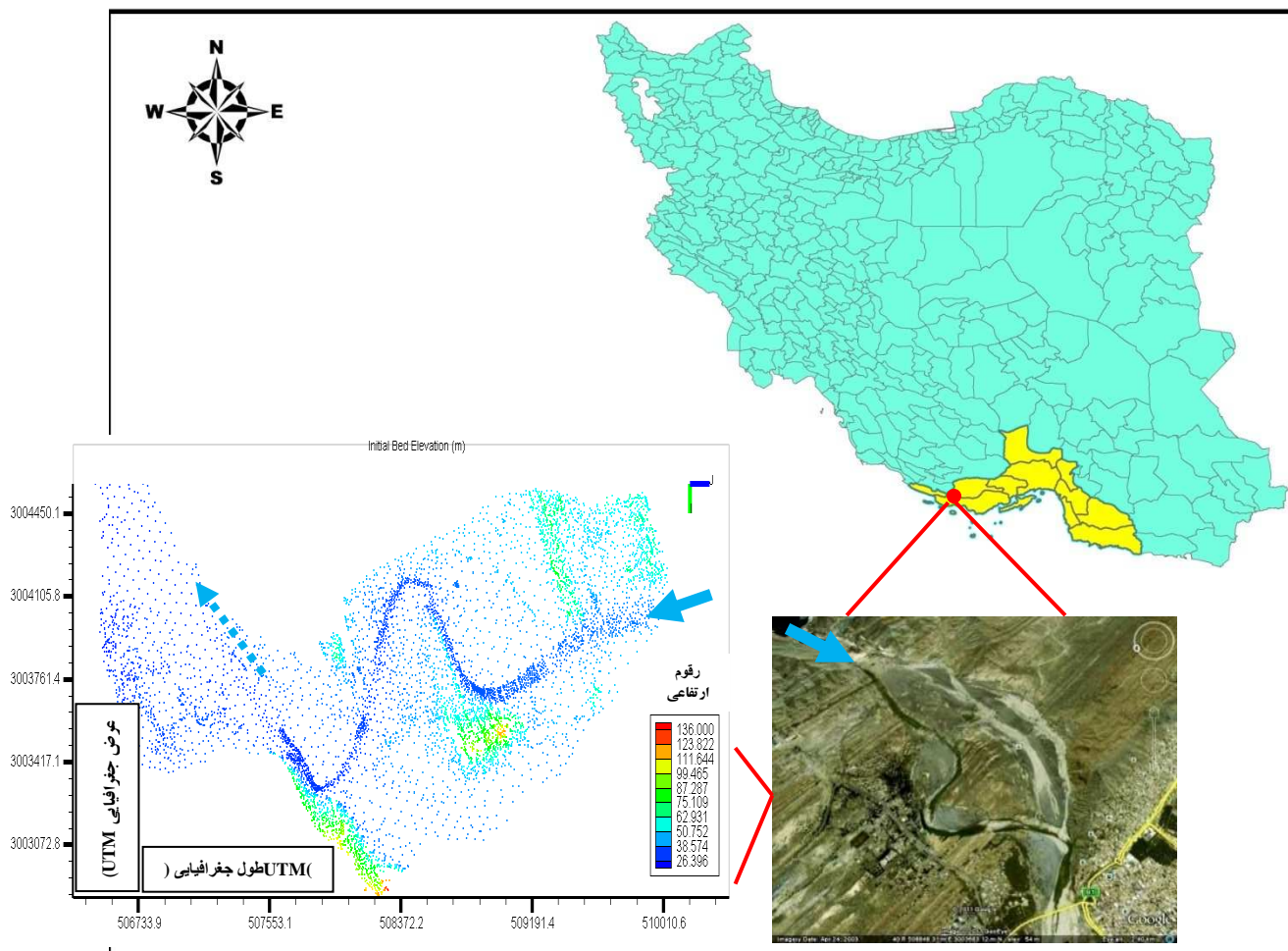


یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران  
توسعه مشارکتی در مدیریت حوزه‌های آبخیز

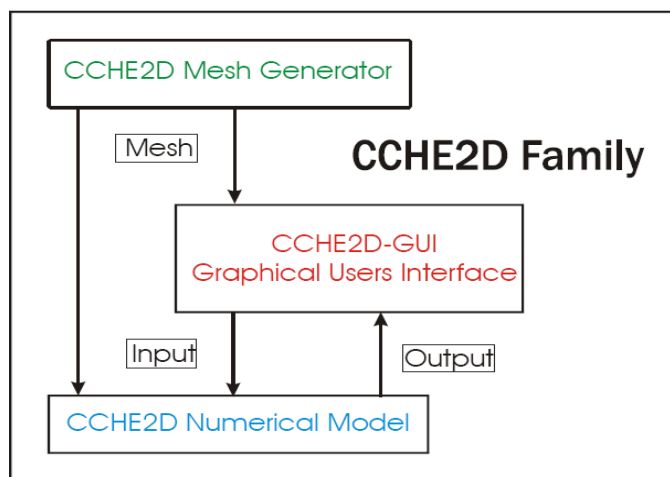
**11<sup>th</sup>** National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran  
Participatory Development in Watershed Management



۳۱ فروردین لغایت ۲ اردیبهشت ۱۳۹۵  
April 19-21, 2016



شکل ۱- نمایی از موقعیت بازه مورد مطالعه رودخانه میناب



شکل ۲- روند شبیه سازی مدل CCHE2D



معادلات اصلی که این مدل براساس آن‌ها پایه‌گذاری شده است را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:  
الف) معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

ب) معادله مومنتم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left( \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor}v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left( \frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{Cor}u$$

در معادلات فوق:  $u$  و  $v$  به ترتیب بیانگر مولفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای  $x$  و  $y$  (بر حسب متر بر ثانیه)،  $t$  زمان (ثانیه)،  $g$  شتاب جاذبه،  $Z$  بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب (متر)،  $\rho$  وزن مخصوص آب (نیوتن بر متر مکعب)،  $h$  عمق جریان (متر) و  $f_{Cor}$  ضریب مربوط به شتاب کوریولیس،  $\tau_{xx}$   $\tau_{xy}$   $\tau_{yx}$   $\tau_{yy}$  تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (بی بعد) و  $\tau_{bx}$  و  $\tau_{by}$  تنش‌های برشی بستر در راستای  $x$  و  $y$  (نیوتن بر متر مربع) می‌باشند.  
ج) معادله آشفستگی: برای شبیه سازی اثر آشفستگی بر الگوی جریان و بستن سیستم معادلات حاکم، مدل CCHE2D، از مدل لزجت گردابه‌ای، مدل طول اختلاط و مدل دو معادله‌ای  $k - \epsilon$  بهره می‌برد. (برای توضیحات بیشتر به منبع شماره ۲ رجوع گردد).

## – اندازه‌گیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی مورد نیاز مدل CCHE2D

### – نقشه برداری و اندازه‌گیری پارامترهای جریان بازه مورد مطالعه

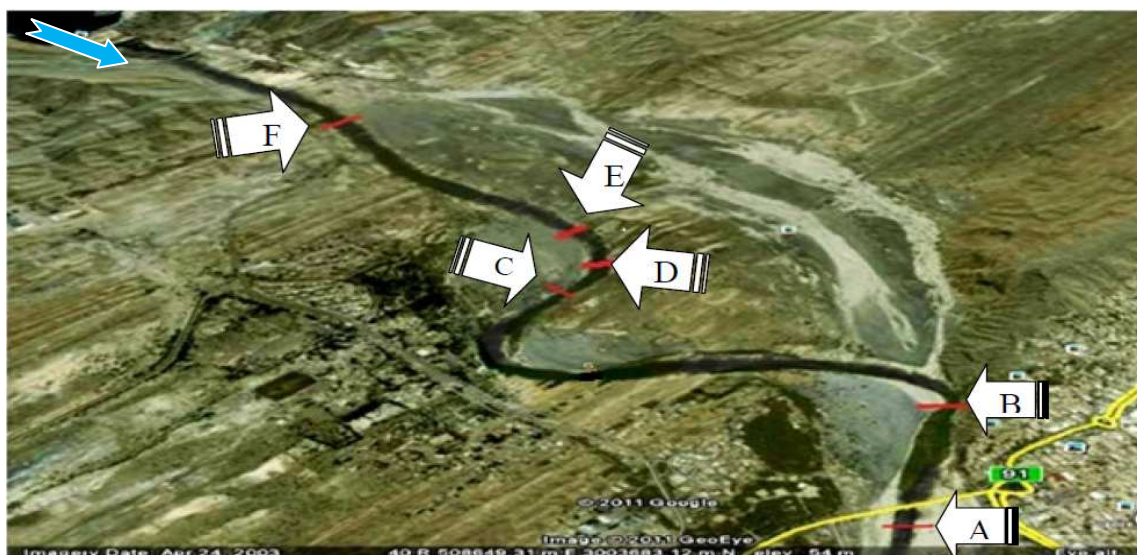
در گام نخست این پژوهش، به نقشه‌برداری بازه انتخابی از رودخانه میناب با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال پرداخته شد. همان طور که در شکل (۳) مشهود است در شش مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان پرداخته شد و بیشترین تاکید بر روی قوس‌های متوالی رودخانه بود تا بتوان تاثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر رودخانه بررسی کرد. لازم به ذکر است با توجه به مدت زمان کم جریان ماندگار خروجی از دریچه‌های سد (دبی جریان خروجی ثابت اندازه‌گیری شده) به مدت ۴ ساعت و همچنین اندازه‌گیری چندین پارامتر جریان آب مانند سرعت دو بعدی جریان، تنها امکان نمونه برداری در چهار مقطع و برای پارامتر عمق جریان در شش مقطع در این مدت زمان در بازه مورد مطالعه وجود داشت. برای اندازه‌گیری سرعت جریان و عمق آب از دستگاه سرعت سنج صوتی Easy Q<sup>TM</sup> و شاخص اندازه‌گیری استفاده شد. در جدول (۱) مشخصات سرعت سنج مذکور آورده شده است. برای اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان، دستگاه سرعت سنج دو بعدی کاملاً داخل جریان آب قرار گرفته و برای این هدف، یک ثبات (مشابه پل تلفریک) طراحی و ساخته و سپس دستگاه روی آن نصب شد تا در هر مرحله قرائت، دستگاه کاملاً ساکن و بدون لرزش باشد و همچنین قابلیت جابه‌جایی در عرض، برای برداشت داده‌های جریان از ساحل سمت چپ تا راست و هم قابلیت جابه‌جایی در عمق رودخانه را برای برداشت جریان از سطح آب تا کف بستر به فواصل ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ از عمق، توأم داشته باشد. نظر به اینکه در جریان‌های سیلابی مقدار سرعت در نقاط مختلف عرض



رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر و همراه با تلاطم است، سرعت متوسط در طول هر مقطع (با توجه به عرض هر مقطع) حداقل در ۶ نقطه و حداکثر ۱۰ نقطه با فواصل مساوی از عمق آب، اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است دستگاه سرعت سنج صوتی Easy QTM در هر نقطه، در سه جهت (عمق، عرض و طول) کانال مقدار سرعت را محاسبه می‌کند. ولی با توجه به دبی سیلابی و جریانات آشفته همراه با گریز از مرکز در محدوده پیچان رود رودخانه، سرعت در بعد عرض و عمقی با خطا همراه بود و به ناچار فقط از مقادیر سرعت در راستای طولی در عمق‌های مختلف استفاده شد. همچنین با توجه به اینکه مدل دو بعدی است و از میانگین عمق بهره می‌برد، به منظور واسنجی و صحت‌سنجی در بخش اندازه‌گیری نیز با استفاده از روش پنج نقطه‌ای، از نقاط مختلف در عرض هر مقطع در راستای عمقی میانگین گرفته و در محاسبات از سرعت میانگین مقطع عرضی استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات دستگاه سرعت سنج صوتی Easy Q<sup>TM</sup>

کاربرد	حداکثر سرعت قابل اندازه‌گیری	دامنه اندازه‌گیری عمق جریان	دامنه گام زمانی اندازه‌گیری
سنجش سرعت و عمق جریان	۱۰ m/s	0.15-10 m	1- 120 s



شکل ۳- نمایی از مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای جریان بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

همان‌طور که در جدول (۲)، مشاهده می‌شود برای جریان خروجی با دبی ثابت از دریچه‌های سد میناب، پارامترهایی از قبیل سرعت، دبی و عمق جریان در مقاطع مذکور و ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه رودخانه میناب اندازه‌گیری شده است.



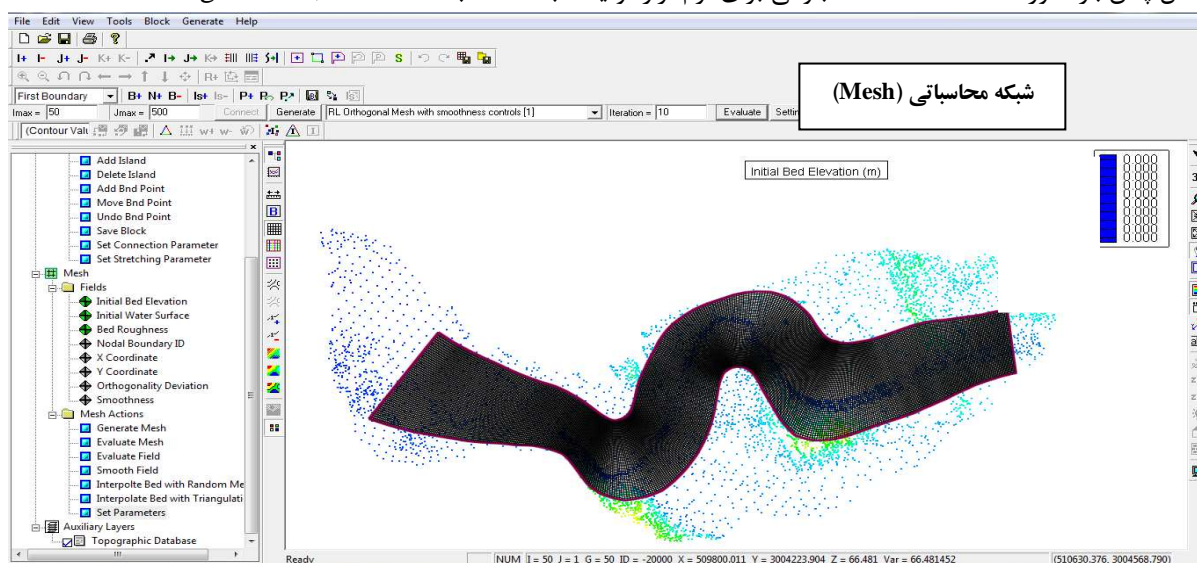
جدول ۲. مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه گیری شده در مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه

مقاطع اندازه گیری شده	سرعت در عمق ۰/۲ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۴ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۶ (m/s)	سرعت در عمق ۰/۸ (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق جریان (m)	دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)
مقطع (B)	۱/۶	۱/۲۷	۰/۹	۰/۴۵	۱/۰۸	۱/۵۲	۸۵
مقطع (C)	۱/۶۴	۱/۳۸	۱/۱۵	۰/۸۳	۱/۲۵	۱/۹۴	۸۵
مقطع (D)	۱/۵۵	۱/۲۹	۱/۰۹	۰/۴۳	۱/۰۹	۱/۶۷	۸۵
مقطع (E)	۱/۴۷	۱/۱۶	۰/۹۸	۰/۶۳	۱/۰۶	۱/۵	۸۵
ورودی	-	-	-	-	-	۱/۶۳	۸۵
مقطع (A)	-	-	-	-	-	۱/۴۱	۸۵

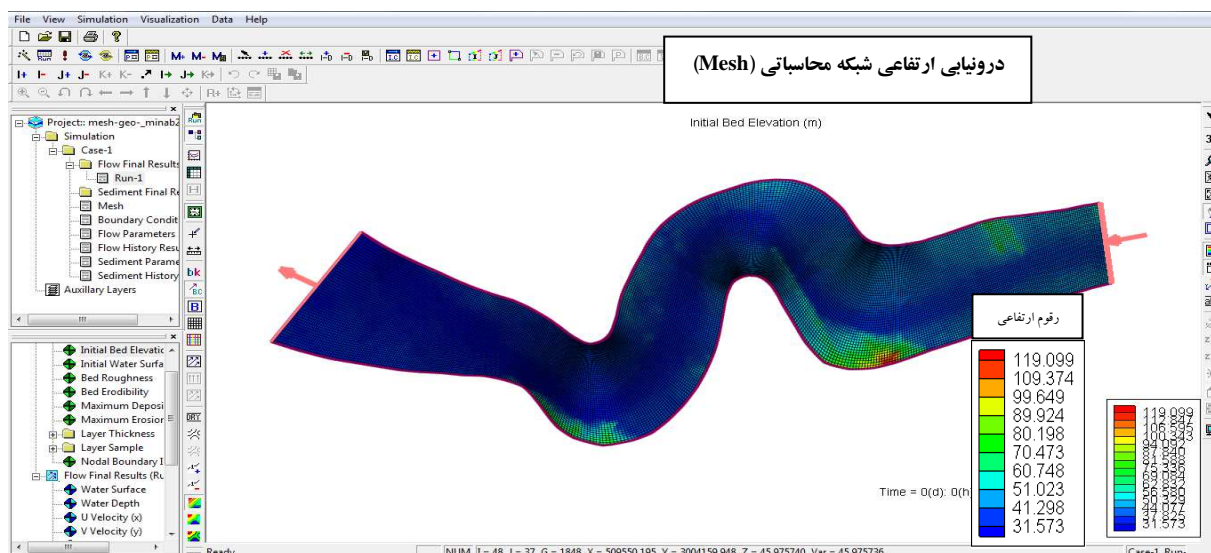
خروجی

#### تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D

همان‌طور که عنوان شد در مدل CCHE2D برای ساخت هندسه میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH، استفاده می‌شود. پس از ورود داده‌های هندسی حاصل از نقشه‌برداری به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزها، محدوده مورد نظر با استفاده از روش‌های جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص‌یافته به منظور انجام محاسبات، انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است با توجه به شکل پلان بازه مورد مطالعه، حالت تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه انتخاب شد (Zhang and Jia, 2009).



شکل ۴. نمای از شبکه محاسباتی (Mesh) ساخته شده برای بازه مورد مطالعه رودخانه میناب



شکل ۵. نمای درون یابی ارتفاعی شبکه محاسباتی (Mesh) برای بازه مورد مطالعه در رودخانه میناب

#### – شبیه‌سازی الگوی جریان

مراحل شبیه‌سازی الگوی جریان توسط نرم افزار CCHE-GUI به شرح زیر است (Zhang, 2009): ورود و فراخوانی فایل Geo، تنظیم شرایط اولیه جریان (تراز آب بالادست و پایین دست و ضریب زبری) براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول (۲)، تنظیم پارامترهای جریان (گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی، محاسبه جریان ناپایدار و فرمول محاسبه زبری)، تنظیم شرایط مرزی ورودی و خروجی رودخانه (دبی جریان ماندگار، تراز سطح آب) و اجرای شبیه‌سازی.

#### – واسنجی مدل عددی CCHE2D

با انجام چندین بار مدل‌سازی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج مدل، مرحله بعدی واسنجی مدل عددی CCHE2D است تا از طرفی درصد خطای مدل در پیش‌بینی پارامترها مشخص و از طرف دیگر شرایطی استاندارد در خصوص تنظیمات مدل و اندازه‌گیری پارامترها به‌وجود آید (خسروی و همکاران، ۱۳۹۲). بدین منظور در بازه مورد مطالعه، فرضیه تغییر ضریب زبری (حساس‌ترین پارامتر) بر الگوی جریان با استفاده از مقدار تخمینی (مشاهدات صحرايي) در دامنه ۰/۰۳۴ تا ۰/۰۶۳ و تغییر آن با مقدار به‌دست آمده از معادلات در دامنه ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵۲ مقایسه گردید؛ همچنین برای داشتن بهترین شرایط پایه در ساخت شبکه محاسباتی، تغییر ابعاد شبکه اعمال گردید. اصولاً، گره‌ها در شبکه از تلاقی بردارهای طولی (I) و عرضی (J) با یکدیگر بوجود می‌آیند و هر گره معرف برآیند ویژگی‌های چهار سلول اطراف خود است. بنابراین هر چه تعداد گره‌ها و به تبع آن سلول‌های ایجاد شده در مقطع عرضی رودخانه بیشتر باشد، شبکه تولید شده و الگوی جریان شبیه‌سازی شده، دقت بالاتری دارد، این فرآیند باید تا آنجا ادامه یابد که تغییری در خروجی مدل مشاهده نشود (Zhang, 2009). برای ریزتر کردن شبکه تولید شده، تعداد I و J ها را از حالت اولیه (۴۸×۴۲۰) مدل خارج و ریزتر کرده؛ این فرآیند تا آنجایی ادامه داده شد که تغییری در خروجی مدل مشاهده نشود و این در حالی است که به‌دست آمد که ابعاد شبکه محاسباتی (۵۵×۵۰۰) باشد. در جدول‌های (۳) و (۴)، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای سرعت جریان (V) و عمق جریان (P)، در حالت تغییر ضریب زبری و تغییر ابعاد شبکه مقایسه شده است.





جدول ۳- مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده (m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش بینی شده توسط مدل (m/s)			
		ابعاد ۴۸×۴۲۰		ابعاد ۵۵×۵۰۰	
		زبری (۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۵۲)
B مقطع	۱/۰۸	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۵	۱/۰۷
C مقطع	۱/۲۵	۱/۱۳	۱/۱۶	۱/۱۵	۱/۲۱
D مقطع	۱/۰۹	۰/۹۱	۱/۰۴	۱/۰۵	۱/۱۲
E مقطع	۱/۰۶	۰/۸۸	۰/۹۴	۱/۰۲	۱/۱

جدول ۴- مقایسه پارامتر عمق جریان (m) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر عمق آب (P) اندازه‌گیری شده (m)	پارامتر عمق آب (P) پیش بینی شده توسط مدل (m)			
		ابعاد ۴۸×۴۲۰		ابعاد ۵۵×۵۰۰	
		زبری (۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۵۲)	زبری (۰/۰۶۳)	زبری (۰/۰۵۲)
B مقطع					
C مقطع	۱/۵۲	۱/۷۳	۱/۶۴	۱/۶۵	۱/۵۹
D مقطع	۱/۹۴	۲/۱۸	۲/۱۵	۲/۱۶	۲/۱۱
E مقطع	۱/۶۷	۱/۸۳	۱/۷۵	۱/۷۷	۱/۷۳
A مقطع	۱/۵	۱/۶۴	۱/۵۳	۱/۵۹	۱/۴۷
(ورودی)	۱/۶۳	۱/۸۷	۱/۷۶	۱/۸	۱/۷
مقطع F (خروجی)	۱/۴۱	۱/۶۲	۱/۵۱	۱/۵۴	۱/۴۵

همان‌گونه که از جداول فوق مشاهده می‌شود، نزدیکترین مقادیر پیش‌بینی شده به مشاهدات، مربوط است به شبکه محاسباتی تولید شده با ابعاد (۵۵×۵۰۰) و الگوی جریان شبیه‌سازی شده با ضریب زبری در دامنه (۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵۲). همچنین با توجه به جداول مذکور و نتایج مدل مشخص گردید تغییرات عمق جریان حساسیت کمتری به تغییر ابعاد شبکه محاسباتی دارد، این در حالی است که پارامتر توزیع سرعت جریان، حساسیت زیادی (بخصوص در محدوده مقعر قوس رودخانه) به تغییر ابعاد شبکه نشان داده است.

#### - ارزیابی کارایی مدل

در ادامه، نتایج به‌دست آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت (در حالت میان‌گیری شده از داده‌ها) مقایسه شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب انرژی آشکار گردد.



برای این منظور از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد. دو روش عبارتند از جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) که روابط آن‌ها به شرح ذیل است:

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2}$$

که در این معادله،  $Q_o$ ، مقدار مشاهداتی در طبیعت و  $Q_e$ ، مقدار محاسباتی مدل است.

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}}{y_t} \right| * 100$$

که در این معادله،  $y_t$ ، مقدار مشاهداتی در طبیعت و  $\hat{y}$ ، مقدار محاسباتی مدل است.

جدول (۵) میزان دقت و کارایی مدل در برآورد پارامترهای سرعت جریان، تراز (عمق) آب و شیب انرژی آورده را نشان می‌دهد.

جدول ۵- نتایج مقایسه سرعت جریان، عمق آب و شیب انرژی مشاهداتی و برآوردی با استفاده از مدل k-ε و بر

اساس دو معیار آماری RMSE و MAPE

نوع روش	پارامتر سرعت جریان آب	پارامتر عمق آب	پارامتر شیب انرژی
RMSE	۰/۰۷۵	۰/۱۱۶	۰/۰۰۰۸
MAPE	۰/۰۲۷	۰/۰۶۲	۰/۰۴۴

- بحث و نتایج

- بررسی مدل‌های آشفستگی جریان

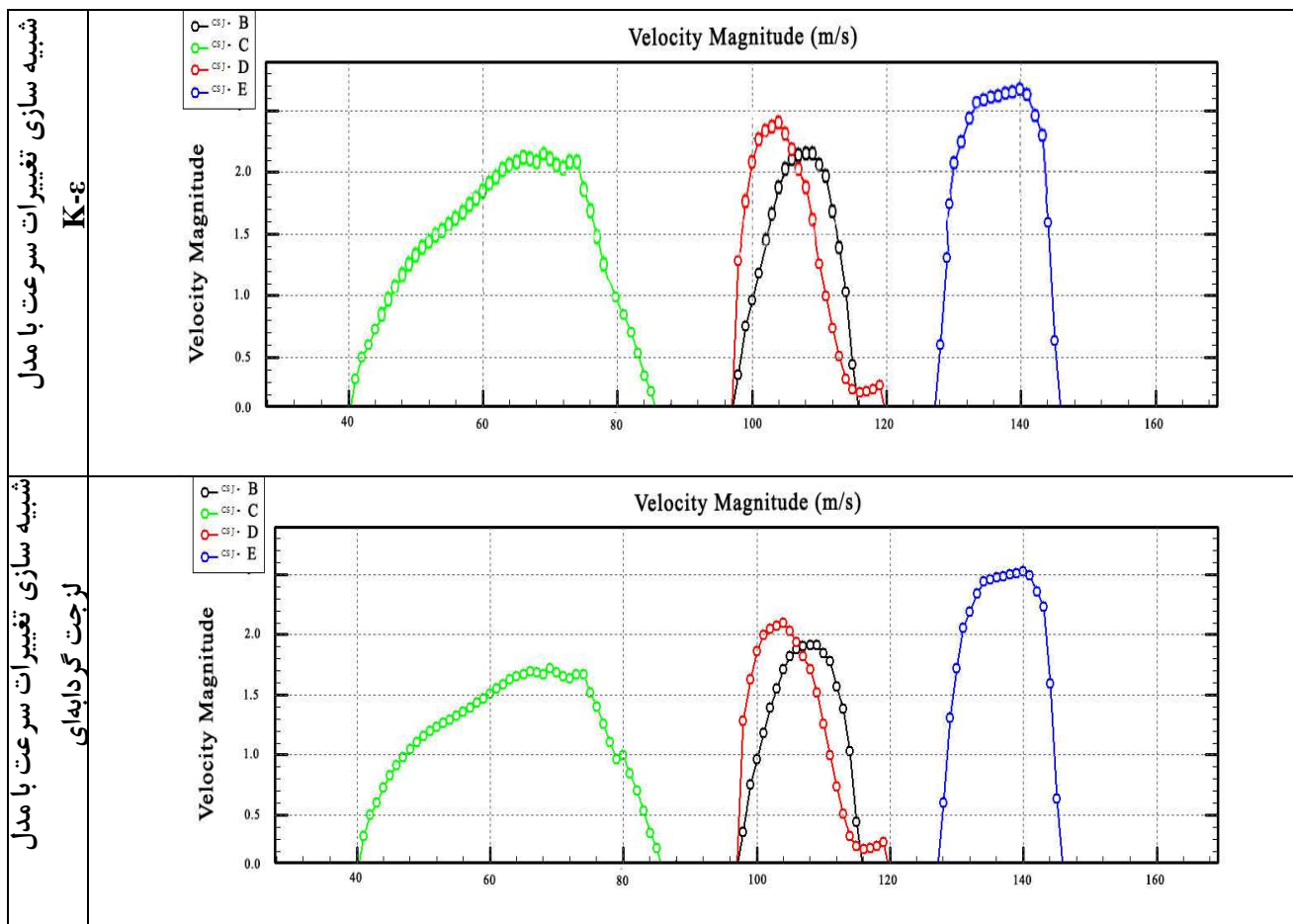
در این تحقیق برای شبیه‌سازی حالات انتقال آشفستگی، از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۶) مشهود است نتایج آماری شبیه‌سازی سرعت جریان (با توجه به حساسیت بالای این پارامتر نسبت به مدل آشفستگی و تغییرات ابعاد شبکه قلمرو جریان) برای این دو مدل آشفستگی مقایسه و در جدول‌های (۶) و (۷) نتایج برآوردی مدل‌های آشفستگی با نتایج اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف (B, C, D و E)، مقایسه شده است.



یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران  
توسعه مشارکتی در مدیریت حوزه‌های آبخیز  
11th National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran  
Participatory Development in Watershed Management



۳۱ فروردین لغایت ۲ اردیبهشت ۱۳۹۵  
April 19-21, 2016



شکل ۶- نمودار تغییرات سرعت در چهار مقطع (B, C, D و E) برای دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε

جدول ۶- مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) برای دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده (m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش بینی شده توسط مدل (m/s)	
		مدل لزجت گردابه‌ای	مدل K-ε
مقطع B	۱/۰۸	۰/۹۳	۱/۰۷
مقطع C	۱/۲۵	۱/۱۴	۱/۲۱
مقطع D	۱/۰۹	۱/۰۴	۱/۱۲
مقطع E	۱/۰۶	۰/۹۹	۱/۱



جدول ۷- نتایج مقایسه آماری سرعت جریان (m/s) برای دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε و بر اساس دو معیار

### آماري RMSE و MAPE

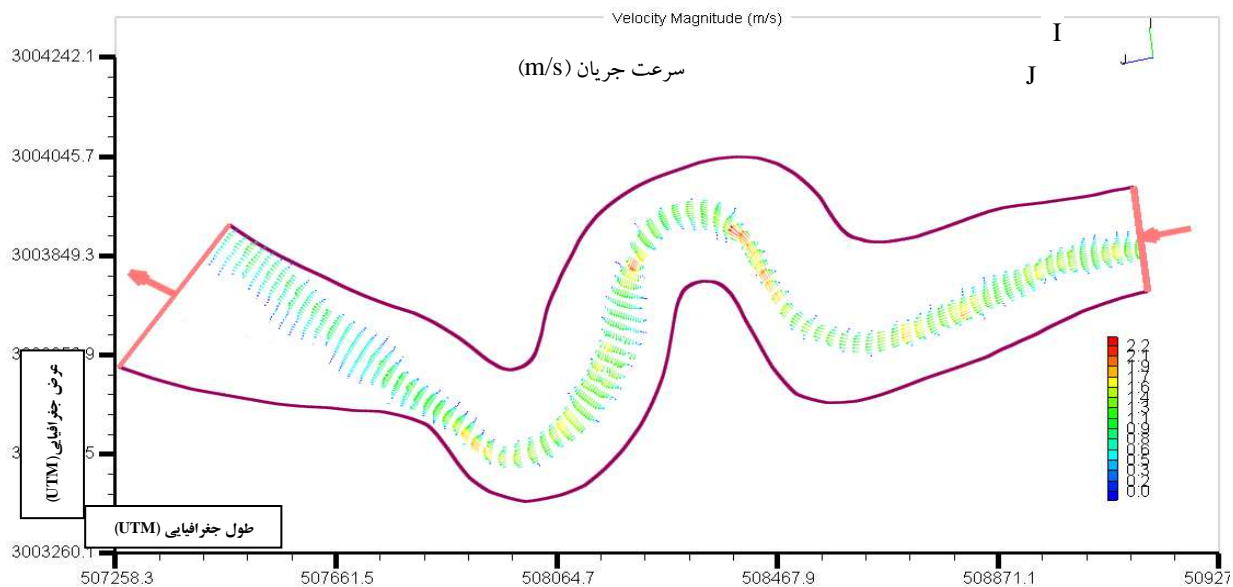
نوع روش	مدل لزجت گردابه‌ای	مدل K-ε
RMSE	۰/۰۲۶	۰/۰۱۸
MAPE	۰/۰۱۷	۰/۰۱۳

همان‌گونه که از شکل و جدول‌های فوق مشاهده می‌شود، مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل آشفتگی K-ε از دقت بالاتری برخوردار است. براساس نتایج مدل و مشخصات اندازه‌گیری جریان آب، مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای برای برآورد توزیع سرعت و تغییرات عمق جریان در محدوده دیواره رودخانه، بخصوص قسمت مقعر قوس رودخانه دارای دقت کمتری است، اما مدل آشفتگی K-ε برآورد دقیق‌تری از تغییرات عمق و توزیع سرعت جریان برای محدوده‌های مزبور دارد.

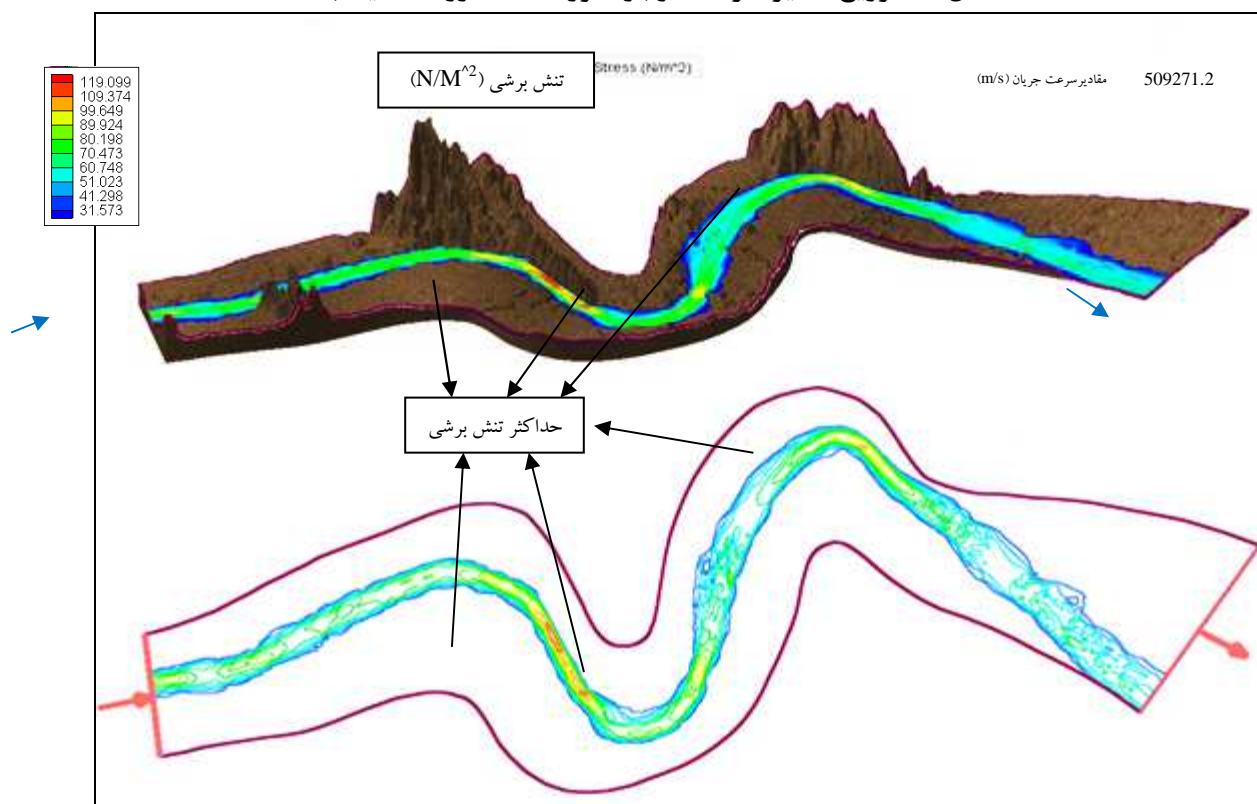
### - بررسی پارامترهای سرعت جریان آب و تنش برشی

تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول کانال در شکل (۷)، نشان می‌دهد که در بازه مستقیم قبل از قوس اول، ماکزیمم مقدار سرعت آب در وسط کانال اتفاق می‌افتد. افزایش ضریب زبری بازه مستقیم بالادست قوس اول، سبب کاهش سرعت جریان ورودی به قوس اول شده است؛ این امر و انحنای بالای قوس باعث می‌شود که تغییراتی مانند جریان ثانویه، نیروی گریز از مرکز و سرعت جریان در نیمه دوم قوس اول شدت بگیرند. همچنین محدود بودن نیمه دوم قوس اول توسط دیواره‌ها و عدم پخش سیلاب در نواحی سیلاب

دشت مزید بر علت است. با توجه به روابط  $\tau = \mu_0 \frac{\partial U}{\partial Y}$  و  $\tau = \gamma R S_f$  کاملاً مشهود است که پارامتر تنش برشی رابطه‌ای مستقیم با گرادین سرعت دارد؛ همان‌طور که در شکل (۸)، مشاهده می‌شود در بازه مستقیم بالادست قوس اول همانند توزیع سرعت، ماکزیمم مقدار تنش برشی آب در بستر کانال اتفاق می‌افتد ولی در قوس‌های بازه مورد مطالعه حداکثر تنش برشی در کناره خارجی اتفاق می‌افتد. به علاوه از نیمه دوم قوس اول افزایش تنش برشی شروع شده و در انتهای این قوس به علت کاهش عرض بازه و به تبع آن افزایش عمق و سرعت جریان، تنش برشی به حداکثر خود می‌رسد. با ورود جریان به قوس دوم به علت افزایش عرض بازه و انحنای جریان، مقدار سرعت جریان به تدریج کاهش می‌یابد و توزیع تنش برشی تقریباً در ناحیه ورودی خم، یکنواخت می‌شود و در محدوده خروجی قوس به علت تنگ شدن بازه و کاهش ضریب زبری، یک ناحیه تنش برشی قوی در نزدیکی انتهای قوس اتفاق می‌افتد. در قوس سوم با ورود جریان به قوس و به‌خاطر گرادین طولی فشار ناشی از نیروی جاذب مرکز، حداکثر سرعت به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود. در قسمت کوتاهی از اول قوس، گرادین طولی منفی در نزدیک دیواره رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات آب می‌شود. بعد از این محدوده، حداکثر سرعت به نزدیکی دیواره بیرونی منتقل می‌شود. در این قوس دو منطقه تنش برشی قوی در قسمت ابتدای قوس داخلی و در جداره بیرونی کانال که ماکزیمم مقدار تنش برشی در این قوس در قسمت انتهایی قوس خارجی رخ می‌دهد، ایجاد می‌شود.



شکل ۷- توزیع متغیر سرعت در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب



شکل ۸- توزیع متغیر تنش برشی در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب



## نتیجه‌گیری

- در این پژوهش با بهره‌گیری از یک مدل دو بعدی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، به نام CCHE2D، الگوی جریان آب در یک بازه پیچان رود طبیعی شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل از ارزیابی آماری مدل، قابلیت مدل عددی بکار رفته را در پیش‌بینی پارامترهای جریان آب تایید نمود.
- هر چه تعداد گره‌ها و به تبع آن سلول‌های ایجاد شده در مقطع عرضی رودخانه بیشتر باشد، شبکه تولید شده و الگوی جریان شبیه‌سازی شده، دقت بالاتری دارد زیرا با افزایش تعداد گره‌ها، تعداد بیشتری از داده‌های جریان، برداشت شده و در نتیجه پلات و نمودارهای استخراج شده، قدرت تفکیک بالاتری دارند. اهمیت این موضوع از مقایسه نتایج برآوردی مدل و مشاهداتی در مقاطع اندازه‌گیری شده بیشتر مشخص گردید. شایان ذکر است نباید شبکه محاسباتی را زیاد از حد از حالت استاندارد، ریز نمود، زیرا دیگر تفاوتی میان روش‌های عددی در انفصال (گسستگی) معادلات حاکم بر جریان در نتیجه نهایی وجود نخواهد داشت.
- تغییرات عمق جریان، حساسیت کمتری به تغییر ابعاد شبکه محاسباتی دارد، در حالی که پارامتر توزیع سرعت جریان حساسیت زیادی (بخصوص در محدوده مقعر قوس رودخانه) به تغییر ابعاد شبکه دارد.
- برای شبیه‌سازی حالات انتقال آشفتگی، از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل  $k-\epsilon$  استفاده گردید و معلوم شد که به طور متوسط مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای برای برآورد توزیع سرعت و تغییرات عمق جریان در کل قلمرو جریان مناسب است اما در محدوده دیواره رودخانه بخصوص قسمت مقعر قوس رودخانه دقت کمتری دارد. لذا با توجه به خروجی مدل به نظر می‌رسد برای برآورد تغییرات عمق و توزیع سرعت جریان در چنین محدوده‌هایی، مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  دقیق‌تر است.
- در مقاطع نیمه دوم تا خروجی قوس اول، خط حداکثر سرعت در جداره خارجی کانال قرار گرفته و تا انتهای کانال تقریباً بدون تغییر می‌ماند. این پدیده نشان دهنده قدرت بالای جریان ثانویه می‌باشد. علت این امر آن است که پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در نیمه دوم قوس به حالت توسعه یافته رسیده و مقادیر سرعت بین دو مقطع تغییر چندانی ندارد؛ همچنین شیب نسبتاً بالای بستر و محدود بودن این ناحیه از رودخانه توسط دیواره‌ها و عدم پخش سیلاب در نواحی سیلاب دشت مزید بر علت است.

## منابع

- تلوری، ع. ر. (۱۳۸۳). اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه، چاپ سوم، تهران، نشر آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.
- خسروی، غ.، نوحه‌گر، ا. (۱۳۹۳). راهنمای کاربردی مدل CCHE2D با مثال کاربردی شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب، چاپ اول، هرمزگان، نشر دانشگاه هرمزگان.
- خسروی، غ.، نوحه‌گر، ا.، خورانی، ا.، ارشادی، س.، فتحی، م. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی جریان و رسوب توسط مدل CCHE2D. مجله پژوهش آب ایران، دانشگاه شهرکرد.
- مغربی، م.، مقدم، ع.، و مشکی کاخکی، م. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی عددی الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه‌ی شریانی با استفاده از مدل CCHE2D مطالعه موردی: رودخانه سرپاز، تهران، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، انجمن هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- ملک عباسلو، ا.، حاجی‌کندی، ه.، پیرستانی، م. (۱۳۹۱). مدل‌سازی دوبعدی الگوی جریان در رودخانه‌های مخروط‌افکنه‌ای با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D، نهمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- فتحی، م. (۱۳۹۰). مدل‌سازی الگوی جریان با CCHE2D در یک پیچان رود طبیعی، هفتمین همایش ملی علوم مهندسی آبخیزداری.



یازدهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران

توسعه مشارکتی در مدیریت حوزه‌های آبخیز

11<sup>th</sup> National Conference on Watershed Management Sciences and Engineering of Iran  
Participatory Development in Watershed Management



۳۱ فروردین لغایت ۲ اردیبهشت ۱۳۹۵  
April 19-21, 2016

علیزاده، ا. (۱۳۸۵). اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ نوزدهم، مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد.  
ناجی ابهری، م. (۱۳۸۷). شبیه سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از نرم افزار SSIIM، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

نوحه گر، ا. (۱۳۸۰). ژئومورفولوژی رودخانه میناب، رساله دکتری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.

Booij, R. (2003). Measurements and large eddy simulations in some curved flumes. *Journal of Turbulence*. 4(1), 8-16, doi:10.1088/1468-5248/4/1/008.

Bridge J. S. (2003). *River and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*, ISBN, 978-0-632-06489-2, Wiley- Blackwell, 504 pp.

Issa R.I. and Oliveira P.J. (1994). Numerical Prediction of Phase Separation in Two-phase Flow through T-junction. *Computers. and Fluids*. 23(2), 347-356.

Zorkeflee, H. (2007). Application of 2-D Modelling for Muda River Using CCHE2D ,International conference on managing Rivers in the 21 Century Solution Towards Sustainable River Basins.

Hasan, Z. Ghani, A. and Zakaria, N. (2007). Application of 2-D Modeling for Muda River Using CCHE2D, 2<sup>nd</sup> International Conference on managing River Basins.

Jia Y. F. and Wang S. M. (2008). CCHE2D: A Two Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. Technical Report NCCHE TR-2008- 01, NCCHE, University of Mississippi.

Shettar A. and Keshava Murthy K. (1996). Numerical Study of Division of Flow in Open Channels, *J. Hydraul. Res.*, 34(5), 651-675.

Steffler, P. and Blackburn, J. (2002). *River2D – User Manual* , University of Alberta.

Wu W. and Wang S.( 2009). Mathematical models for liquid-solid two-phase flow and Sediment, *Int. J. Sediment Research*, 15(3), 288–298.

Zhang Y. (2009). CCHE-GUI – Graphical Users Interface for NCCHE Model User's Manual – Version 3.0, Technical Report No. NCCHE-TR-2009-01, Mississippi University, MS 38677.

Zhang Y. and Jia Y. F. 2009. CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator User's Manual - Version 3.x, Technical Report No. NCCHE-TR-2009-01, Mississippi University, MS 38677