



## تحلیل عددی الگوی جریان و رسوب و تغییرات مرفولوژی در یک بازه پیچانرود طبیعی (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب)

غلامرضا خسروی<sup>۱\*</sup>، احمد نوحه گر<sup>۲</sup>

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

آدرس پست الکترونیکی مولف مسئول ([gholamreza.khosravi@yahoo.com](mailto:gholamreza.khosravi@yahoo.com))

۲- استاد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران ([ahmad.nohegar@gmail.com](mailto:ahmad.nohegar@gmail.com))

### چکیده

رودخانه‌ها از اصلی‌ترین و در دسترس‌ترین منابع‌های تامین آب برای مصارف گوناگون می‌باشند، لذا بررسی شرایط هیدرولیکی و رسوبی رودخانه‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است و ضرورت انجام آن کاملا احساس می‌شود. با توجه به روند پیچیده رسوب گذاری و فرسایش در پیچانرودها و اهمیت سرعت جریان آب و نیروهای تنش برشی بر فرسایش کناره‌های رودخانه، از یک مدل عددی دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در بازه‌ای از پیچانرود طبیعی (حد فاصل سد استقلال تا پل شهرستان میناب- استان هرمزگان) استفاده شد. با این هدف، اقدام به شبیه‌سازی الگوی جریان آب و رسوب در یک کانال مئاندری با رژیم جریان پایدار گردید تا بتوان تغییرات الگوی جریان و رسوب و همچنین تغییرات ریخت شناسی را مورد ارزیابی قرار داد. در این بررسی پس از نقشه برداری دقیق، نقشه توپوگرافی با مقیاس مناسب از محدوده مورد مطالعه بدست آمد و سپس هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف تهیه و در نهایت بر اساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان و رسوب رودخانه، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی همچون تغییرات عمق، سرعت جریان، بار معلق و تغییرات بستر در رودخانه استخراج گردید. در پایان، از دو معیار آماری R.M.S.E و M.A.P.E، برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد. نتایج بیانگر دقت بالا و خطای ناچیز مدل در پیش بینی پارامترهای جریان و رسوب می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، تنش برشی، مدل عددی CCHE2D، پیچانرود، ضریب زبری.

### مقدمه

رودخانه فرآیندی پویا است و الگوی رفتاری جریان در آن بطور دائم در حال تغییر می‌باشد. این تغییرات موجب تحت تاثیر قرار گرفتن شرایط هیدرولیکی جریان در رودخانه می‌گردد. این موضوع در رودخانه‌های پیچانرودی تاثیر بیشتری بر جای می‌نهد. در چنین جریانانی، تغییر در میزان مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت، دبی، تنش برشی و تغییرات پروفیل سطح آب مهم می‌باشد (جان اس، ۲۰۰۳). 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). بدین منظور، استفاده از مدل‌های عددی بدلیل سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری بالا در تغییر پارامترهای جریان و هزینه‌های کمتر نسبت به مدل‌های فیزیکی، جایگاه ویژه‌ای دارند. برای تحلیل فرآیندهای هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در رودخانه، مطالعات متعددی انجام شده است. برخی از این مطالعات در غالب مدل‌های عددی به شرح زیر می‌باشد.

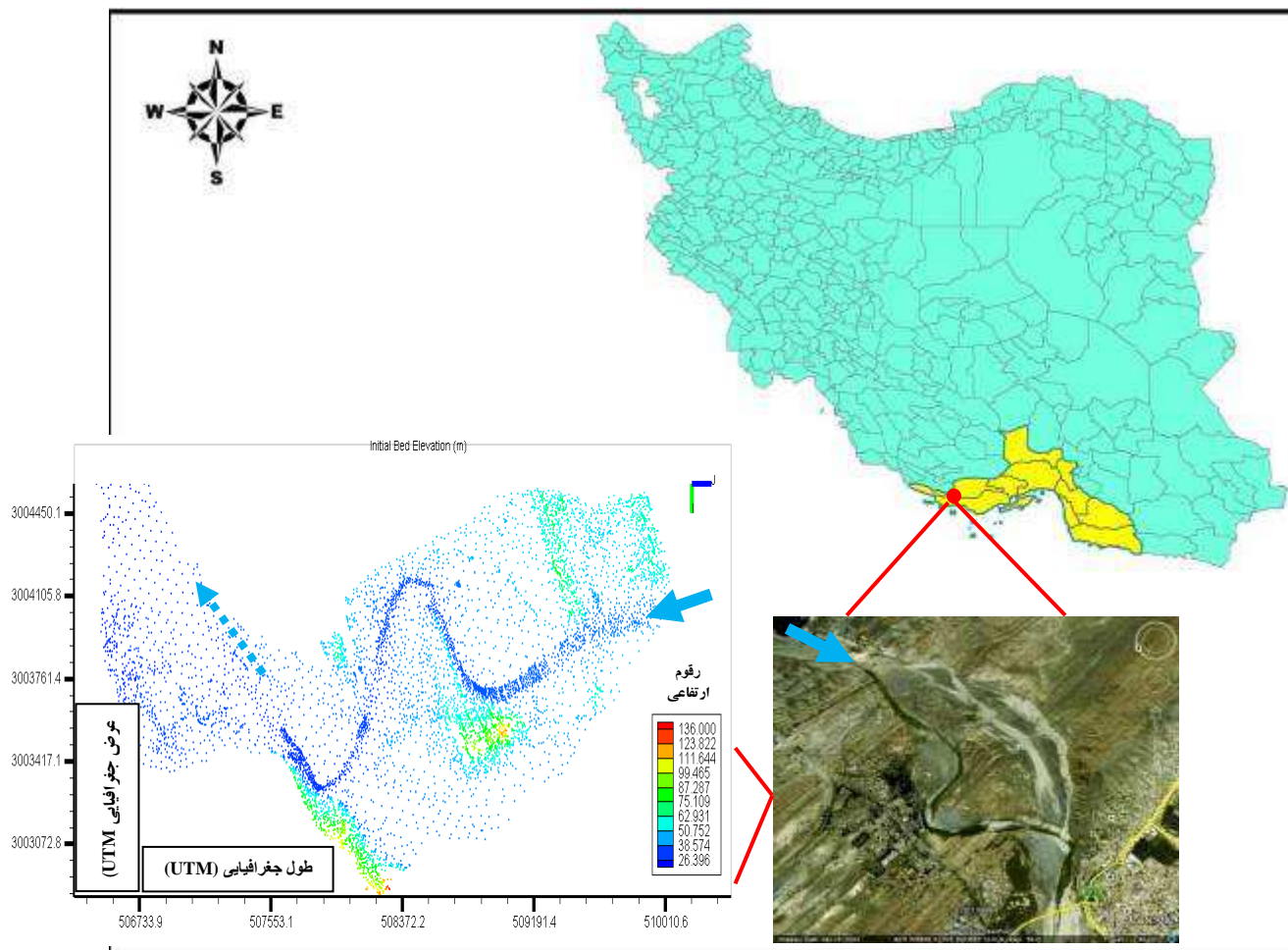


استفلا و بلک برن (۲۰۰۲)، بر اساس بررسی مدل‌های هیدرولیکی یک بعدی مانند HEC-RAS، به این نتیجه رسیدند که با وجود اینکه مدل‌های یک بعدی به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی در مواردی مثل متغیرهای هیدرولیکی و پروفیل سطح آب و همچنین الگوی فرسایش و رسوب گذاری در پیچان‌رودها، به دلیل شبیه سازی یک بعدی جریان و رسوب آنچنان توانمند نمی‌باشند. 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 به صورت گسترده استفاده می‌شود ولی توانایی تحلیل برخی از مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند الگوی جریان و رسوب در پیچان‌رودها و محدوده سازه‌ها در رودخانه را ندارند. جیا و ونگ (۲۰۰۸)، مدل دو بعدی هیدرودینامیک به نام CCHE2D، برای مطالعه تغییرات جریان در کانال‌های روباز توسعه دادند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که این مدل را می‌توان برای مطالعه جریان‌های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرایندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های آبرفتی بکار برد. وو و ونگ (۲۰۰۹)، در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداختند با استفاده از مدل‌های عددی دو بعدی، مدل‌های آشفته‌گی دو معادله‌ای  $k - \varepsilon$  را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمودند. بر اساس مقایسه، این نتیجه حاصل شد که تمام مدل‌های آشفته‌گی نتایجی واقعی در مورد جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در خصوص جریان‌های پیچیده، سه مدل آشفته‌گی  $k - \varepsilon$  (استاندارد، غیرتعدالی و RNG) نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. فتحی و همکاران (۱۳۹۰)، از مدل دو بعدی CCHE2D، برای مدل‌سازی الگوی جریان در یک پیچان رود طبیعی واقع در رودخانه فارسان- ایران استفاده کرد. و به این نتیجه رسیدند که مدل CCHE2D، از قابلیت خوبی جهت پیش بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان رودی برخوردار است. نگاهی به مطالعات صورت‌گرفته، نشان می‌دهد که هر چند استفاده از مدل‌های سه بعدی ممکن است نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های دو بعدی داشته باشد، ولی استفاده از آنها نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق‌تر و استفاده از وسایلی است که اغلب پرهزینه بوده و نصب و راه اندازی آنها در شرایط طبیعی فوق‌العاده مشکل است. از این رو استفاده از مدلی دو بعدی با توانایی بالا هم می‌تواند سودمند باشد. لذا با توجه به اهمیت بررسی الگوی جریان و رسوب در رودخانه‌های مئاندری، در این تحقیق با کمک مدل دو بعدی CCHE2D، الگوی جریان و رسوب، تغییرات بستر، هیدرولیک جریان در قوس رودخانه، تغییرات سرعت در پلان و مقاطع عرضی، در یک بازه به طول ۴/۵ کیلومتر از پیچان رود پایین دست سد میناب مورد بررسی و شبیه سازی قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

### 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  $32^{\circ} 04' 04''$  طول شرقی و  $27^{\circ} 09' 33''$  تا  $27^{\circ} 09' 18''$  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.

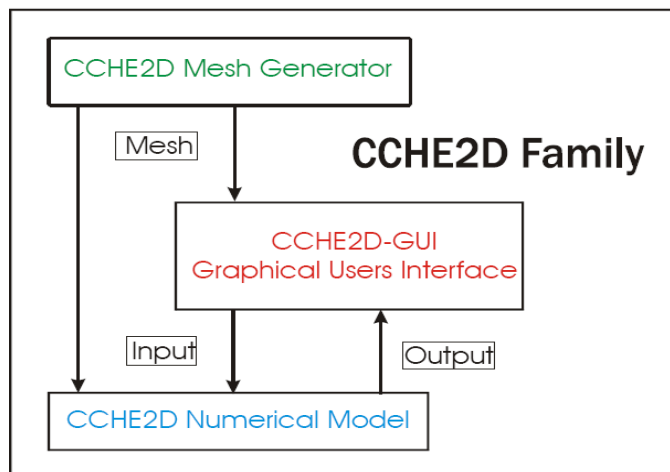


شکل ۱- نمایی از موقعیت بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

– روش تحقیق

– مدل CCHE2D

CCHE2D یک مدل عددی دو بعدی برای شبیه سازی جریان ماندگار و غیرماندگار آشفته و همچنین انتقال رسوب در کانال های باز است که در مرکز بین المللی علوم هیدرولیک و مهندسی آب (NCCHE)، دانشگاه می سی سی پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. برای ساخت هندسه میدان و شبکه بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH بهره می برد و حل میدان جریان و فرآیند انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم افزار، با عنوان CCHE-GUI انجام می شود. شبیه سازی جریان آب بر اساس حل معادلات متوسط عمقی ناویر-استوکس می باشد. تنش برشی متلاطم با استفاده از تخمین معادلات بوزینسک محاسبه می گردد و برای محاسبه لزجت گردابه ای متلاطم از سه مدل آشفتگی مختلف می توان استفاده نمود. مدل شبیه ساز پدیده انتقال رسوب این نرم افزار، توانایی مدل سازی 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 جریان های ثانویه بر نحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه های پیمان رود را در نظر می گیرد. روند به کار گرفته شده در مدل CCHE2D به طور شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است (Zhang, 2009).



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،  $\tau_{yx}$  و  $\tau_{yy}$ ،  $\tau_{xy}$ ،  $\tau_{xx}$  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 آشفتگی: برای شبیه سازی اثر آشفتگی 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

#### ۱- نقشه برداری و اندازه‌گیری پارامترهای جریان بازه مورد مطالعه

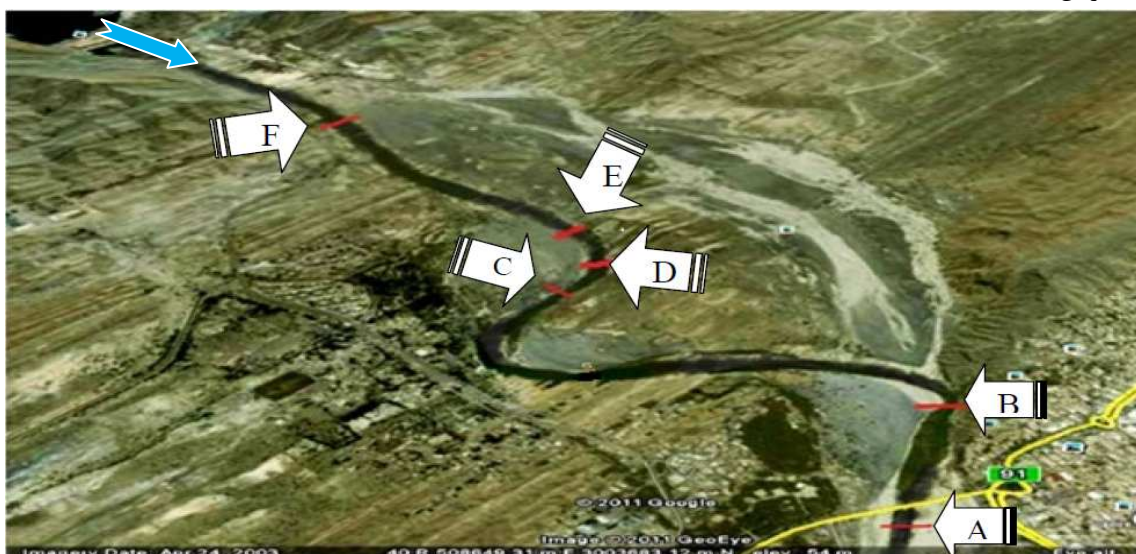
در گام نخست این پژوهش، به نقشه‌برداری بازه انتخابی از رودخانه میناب با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال پرداخته شد. همان طور که در شکل (۳) مشهود است در شش مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان پرداخته شد و بیشترین تاکید بر روی قوس‌های متوالی رودخانه بود تا بتوان 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 دریاچه‌های 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 Q<sup>TM</sup> 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 صحت سنجی 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

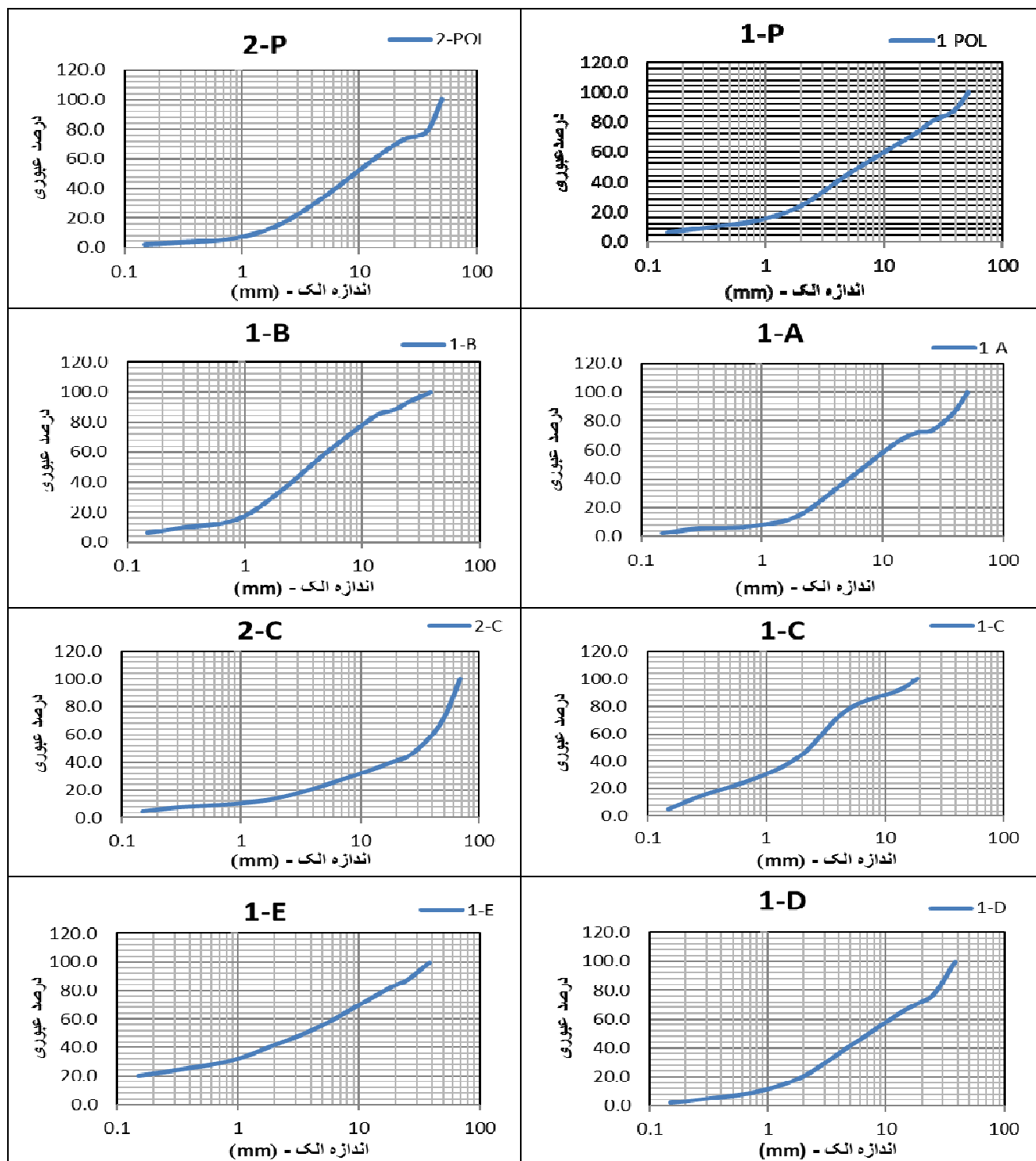
همان طور که در جدول (۲)، مشاهده می‌شود برای جریان خروجی با دبی ثابت از دریچه‌های سد میناب، پارامترهایی از قبیل سرعت، دبی و عمق جریان در مقاطع مذکور و ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه رودخانه میناب اندازه‌گیری شده است.

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

مقاطع اندازه‌گیری 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
مقطع (F) ورودی	-	-	-	-	-	۱/۶۳	۸۵
مقطع (A) خروجی	-	-	-	-	-	۱/۴۱	۸۵

### ۲- مطالعات رسوبات بستر رودخانه

به چندین بخش تقسیم شد. برداشت نمونه‌ها از بستر رودخانه، بر اساس مقاطع عرضی از پایین دست (پل میناب) به سمت بالا دست (سد استقلال) با نامهای (P, A, B, C, ...) انجام شده است یعنی در امتداد یک مقطع عرضی، نقاطی در ساحل چپ، ساحل راست و بخش میانی رودخانه انتخاب گردید. این نقطه در مرکز دایره‌ای به شعاع ۵۰ سانتی متر قرار داشته و رسوب داخل دایره، تا عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی متر برداشت گردید. این نمونه‌ها در آزمایشگاه به منظور دانه بندی، چگالی، زاویه اصطکاک، چسبندگی، D50 و ضریب اطمینان مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج آن در شکل شماره (۴) و جدول شماره (۳) ارائه شده است.



شکل ۴- منحنی دانه بندی رسوبات پروفیل‌های مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه

### جدول ۳- مقادیر خصوصیات رسوبات کناره‌های بازه مورد مطالعه

D <sub>50</sub> (m)	ضریب اطمینان (بدون بعد)	چسبندگی رسوب (kg/cm <sup>2</sup> )	وزن مخصوص (kg / m <sup>3</sup> )	زاویه اصطکاک (درجه)
۰/۰۱	۱	۲۲/۲۵	۲/۵۷	۱۷

#### - وزن مخصوص حقیقی:

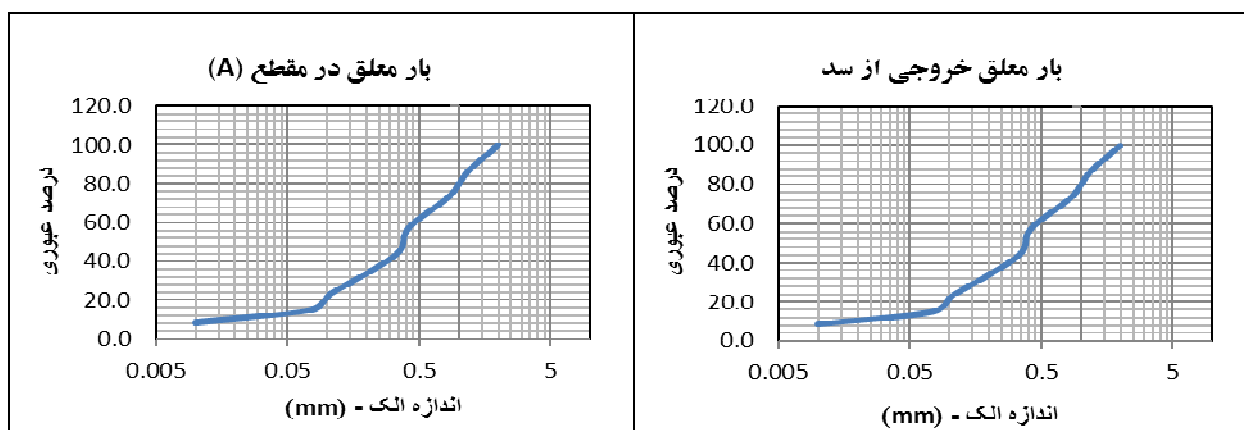
همانطور که در جدول شماره (۴) نشان داده شده است در این تحقیق در آزمایشگاه خاکشناسی، وزن مخصوص حقیقی رسوبات به روش پیکنومتری تعیین گردید.

### جدول ۴- اطلاعات وزن مخصوص نمونه های برداشت شده

نام پروفیل	1- P	2- P	1-A	1-B	1-C	2-C	1-D	1-E	2-E
وزن مخصوص (kg / m <sup>3</sup> )	۲/۵۹	۲/۶۵	۲/۵۳	۲/۵	۲/۵۲	۲/۶۲	۲/۶۶	۲/۵۳	۲/۳

#### - اندازه گیری بار معلق

با توجه به اینکه جریان ورودی بازه مورد مطالعه، جریان خروجی از دریاچه‌های سد میناب (با دبی ثابت) است و بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، این جریان حاوی رسوبات ریزدانه به صورت بار معلق است و شرایط مرزی ورودی فاقد بار بستر می باشد. بنابراین برای تعریف شرایط مرزی رسوب تنها بار معلق اعمال می‌شود. بدین منظور در اولین مقطع ورودی جریان و مقطع اندازه‌گیری (A) با روش نمونه‌گیری غیر نقطه‌ای، هم زمان با اندازه‌گیری پارامترهای جریان آب از قبیل (اندازه‌گیری عمق و سرعت جریان آب)، با استفاده از یک بطری که در قاب فلزی محافظ جای داده شده بود به تدریج در داخل آب فرو برده و وقتی به کف رودخانه برخورد کرد به آرامی بالا کشیده شد و برای هر مقطع ۲ نمونه برداشت گردید. به منظور حصول اطمینان از برداشت یکنواخت از کل عمق جریان، سعی شد هنگامی که بطری از آب خارج می‌شود کاملاً پر نشده باشد. در شکل شماره (۵)، منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)، نشان داده شده است



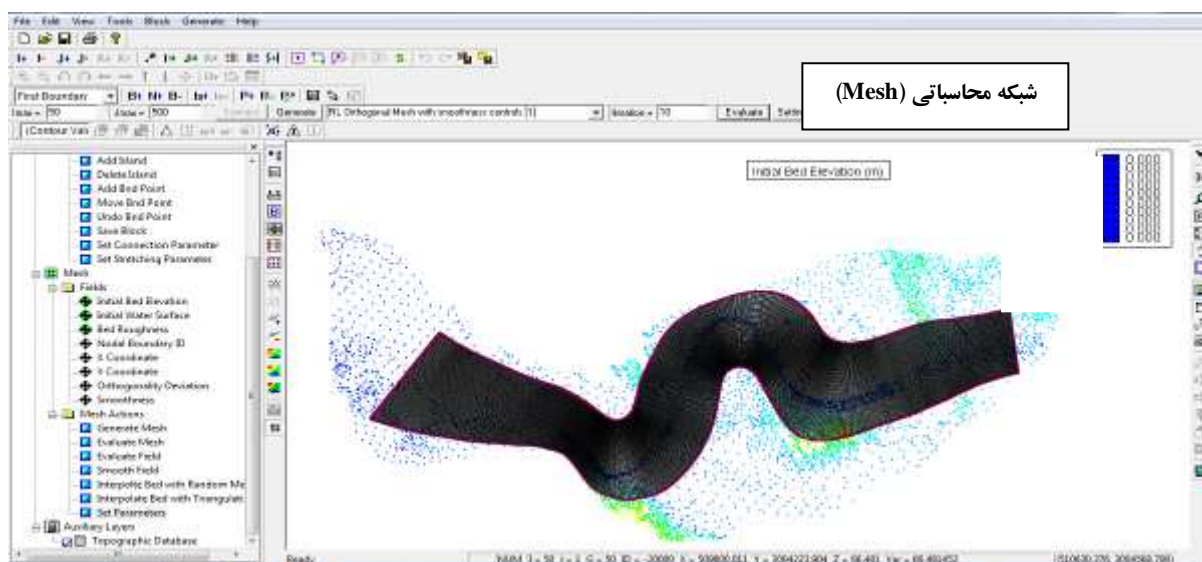
شکل ۵- منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)



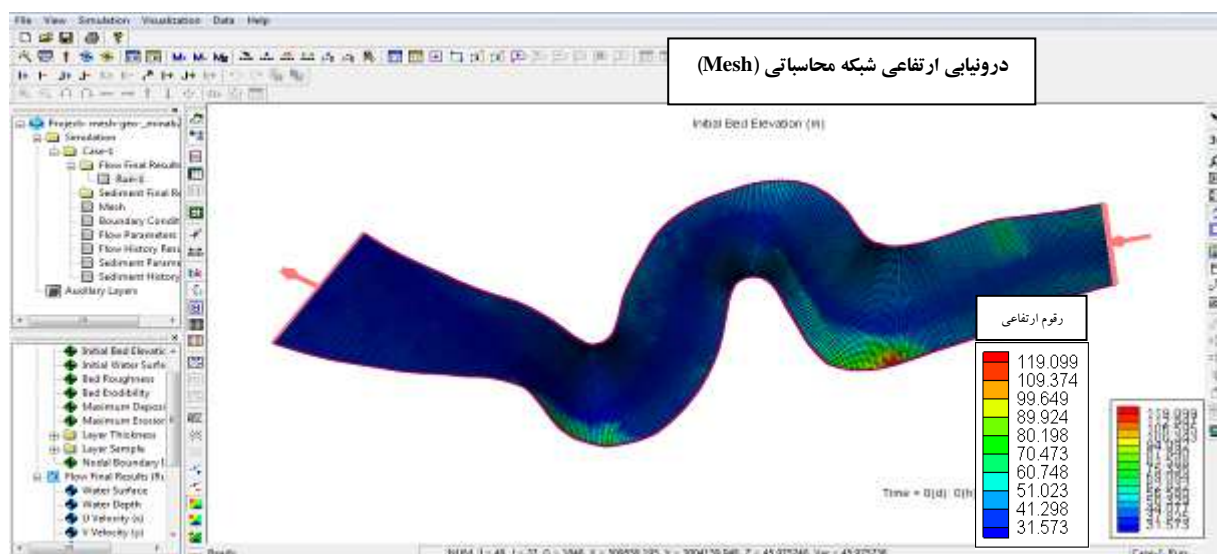


### تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D -

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 (۶) و (۷) 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 ۶- نمایشی از شبکه محاسباتی (Mesh) ساخته شده برای بازه مورد مطالعه رودخانه میناب





## شکل ۷- نمای درون یابی ارتفاعی شبکه محاسباتی (Mesh) برای بازه مورد مطالعه در رودخانه میناب

### - شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب

مراحل شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب توسط نرم افزار CCHE-GUI به شرح زیر است (Zhang, 2009): ورود و فراخوانی فایل Geo؛ تنظیم شرایط اولیه جریان ( عمق آب بالادست و پایین دست) بر اساس اندازه گیری های انجام شده در جدول شماره (۲)؛ تنظیم شرایط اولیه رسوب از جمله زبری بستر (ضریب زبری در کناره‌ها و کف رودخانه، با مشاهدات و تهیه عکس و فیلم از بازه مورد مطالعه و استفاده از معتبرترین منابع محاسباتی هیدرولیک، مانند: کتاب چاو<sup>۲۳</sup> و معادله کاوون<sup>۲۴</sup> مشخص شد)، فرسایش پذیری بستر اولیه بر اساس دانه بندی رسوبات بستر، حداکثر ضخامت رسوب گذاری ( با فرض اینکه حداکثر ضخامت رسوب گذاری در محدوده‌های محدب پیچان رود رخ میدهد)، حداکثر عمق فرسایش (با فرض اینکه حداکثر عمق فرسایش در محدوده‌های مقعر پیچان رود رخ میدهد) و تعیین ضخامت سه لایه سطحی بستر در نقاط مختلف؛ تنظیم پارامترهای جریان آب شامل: گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی (برای شبیه سازی حالات انتقال آشفتگی، از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل k-ε 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 برای برآورد تغییرات عمق و توزیع سرعت جریان از مدل آشفتگی k-ε استفاده گردید)، انتخاب فرمول محاسبه زبری (فرمول مانینگ نسبت به فرمول‌های رسوبات، پارامتر انتقال رسوب، پارامتر اثر انحنا و وزن مخصوص رسوبات، انتخاب فرمول محاسبه زبری (فرمول مانینگ)، خصوصیات فرسایش کناره‌ها، فایل شرایط مرزی رسوب (فایل دانه بندی و وزن بار معلق بر حسب دبی جریان) و در نهایت اجرای شبیه‌سازی. در نرم افزار CCHE2D، به منظور برآورد انتقال رسوب از چهار معادله SEDTRA، ایگر وایت اصلاح شده، انگلاند و هانسن اصلاح شده و فرمول وو و همکاران استفاده می‌گردد و معادله ای که انطباق بهتری با واقعیت داشته باشد انتخاب می‌گردد. با توجه به غالب بودن بار معلق نسبت به بار بستر در بازه مورد مطالعه، چهار معادله حمل رسوب برای شبیه سازی بار معلق مورد مقایسه قرار گرفتند. جدول شماره (۵)، مقایسه غلظت بار معلق مشاهداتی و غلظت بار معلق برآوردی توسط مدل برای چهار معادله انتقال رسوب نشان می‌دهد.

### جدول ۵- مقایسه میانگین غلظت بار معلق مشاهداتی و برآوردی چهار معادله انتقال رسوب

مقدار مشاهداتی	مقادیر برآوردی	معادلات ظرفیت حمل رسوب [۱۱]
	۴۰/۷	Wu et al. formula
۳۹/۲	۲۷/۶	Modified Ackers and White formula
	۴۲/۱	Modified Engelund and Hansen formula
	۳۲/۳	SEDTRA module

### - واسنجی مدل عددی CCHE2D

<sup>1</sup>- Chow

<sup>2</sup>- Cowan



# 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

۱۱ فروردین ۱۳۹۲  
April 10-21, 2016



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 به وجود 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 صحرایی) در دامنه ۰/۰۳۴ تا ۰/۰۶۳ و تغییر آن با مقدار به دست 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 به دست آمد که ابعاد شبکه محاسباتی (۵۵×۵۰۰) باشد. در جدول‌های (۶) و (۷)، 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 ۶- مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

مقاطع	پارامتر سرعت جریان (V)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش‌بینی شده توسط مدل (m/s)			
		ابعاد ۴۸×۴۲۰		ابعاد ۵۵×۵۰۰	
		زبری	زبری	زبری	زبری
اندازه‌گیری شده	اندازه‌گیری شده	(۰/۰۳۴ - ۰/۰۶۳)	(۰/۰۳۳ - ۰/۰۵۲)	(۰/۰۳۴ - ۰/۰۶۳)	(۰/۰۳۳ - 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 ۷- مقایسه پارامتر عمق جریان (m) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

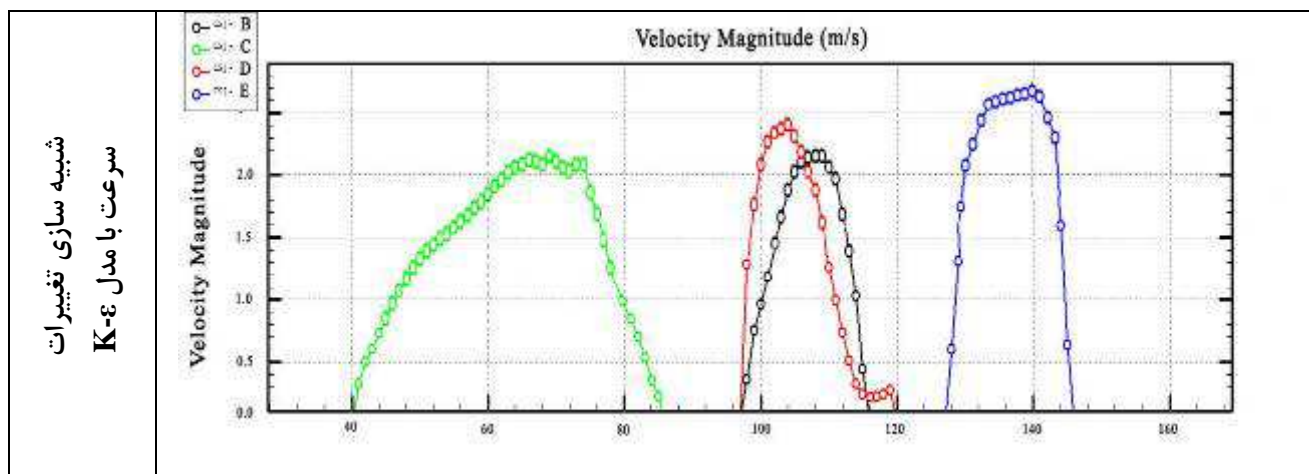
مقاطع	پارامتر عمق آب (P)	پارامتر عمق آب (P) پیش‌بینی شده توسط مدل (m)			
		ابعاد ۴۸×۴۲۰		ابعاد ۵۵×۵۰۰	
		زبری	زبری	زبری	زبری
اندازه‌گیری شده	اندازه‌گیری شده (m)	(۰/۰۳۴ - ۰/۰۶۳)	(۰/۰۳۳ - ۰/۰۵۲)	(۰/۰۳۴ - ۰/۰۶۳)	(۰/۰۳۳ - ۰/۰۵۲)
B مقطع	۱/۵۲	۱/۷۳	۱/۶۴	۱/۶۵	۱/۵۹
C مقطع	۱/۹۴	۲/۱۸	۲/۱۵	۲/۱۶	۲/۱۱
D مقطع	۱/۶۷	۱/۸۳	۱/۷۵	۱/۷۷	۱/۷۳
E مقطع	۱/۵	۱/۶۴	۱/۵۳	۱/۵۹	۱/۴۷
A مقطع (ورودی)	۱/۶۳	۱/۸۷	۱/۷۶	۱/۸	۱/۷
مقطع	۱/۴۱	۱/۶۲	۱/۵۱	۱/۵۴	۱/۴۵

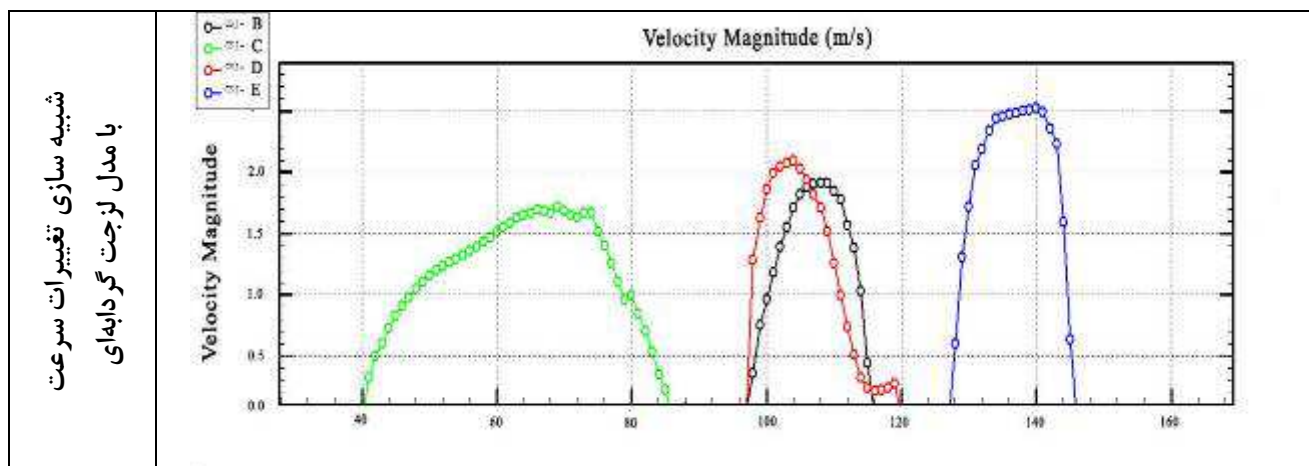
F(خروجی)

همان‌گونه که از جداول فوق مشاهده می‌شود، نزدیکترین مقادیر پیش‌بینی شده به مشاهدات، مربوط است به شبکه محاسباتی تولید شده با ابعاد (۵۵×۵۰) 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 (خصوصاً در محدوده مقعر قوس رودخانه) به تغییر ابعاد شبکه نشان داده است.

#### - بررسی مدل‌های آشفتگی جریان

در این تحقیق برای شبیه‌سازی حالات انتقال آشفتگی، از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۸) مشهود است نتایج آماری شبیه‌سازی سرعت جریان (با توجه به حساسیت بالای این پارامتر نسبت به مدل آشفتگی و تغییرات ابعاد شبکه قلمرو جریان) برای این دو مدل آشفتگی مقایسه و در جدول‌های (۸) نتایج برآوردی مدل‌های آشفتگی با نتایج اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف (B, C, D, E)، مقایسه شده است.





شکل ۸- نمودار تغییرات سرعت در چهار مقطع (B, C, D و E) برای دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل K-ε

جدول ۸- 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

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.

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

جدول ۹- 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

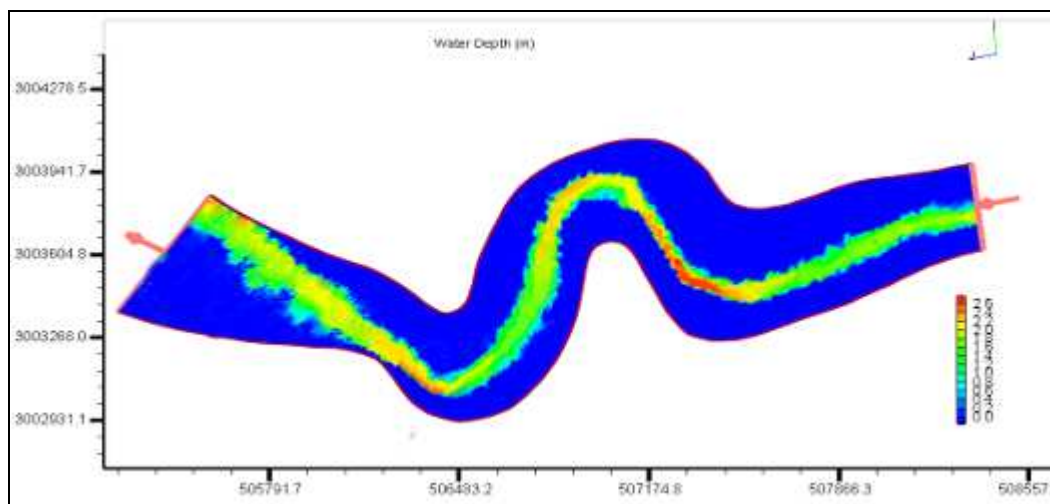
نوع روش	پارامتر سرعت جریان آب	پارامتر عمق آب	پارامتر شیب انرژی
RMSE	۰/۰۷۵	۰/۱۱۶	۰/۰۰۰۸
MAPE	۰/۰۲۷	۰/۰۶۲	۰/۰۴۴

#### بحث و نتایج

در زیر به بررسی بعضی از متغیرهای خروجی از مدل از جمله عمق جریان، سرعت جریان و تنش برشی و فرسایش و رسوب گذاری در قلمرو جریان پرداخته شده است.

#### ۱- پارامتر عمق آب

همانطور که در شکل شماره (۹) نشان داده شده است با ورود جریان به قوس اول به علت اینکه بازه مستقیم بالادست قوس اول دارای ضریب زبری بالاتری نسبت به محدوده قوس است، و همچنین به دلیل وجود انحنای زیاد در نیمه اول قوس، حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در نیمه دوم قوس صورت می‌گیرد. در این محدوده نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر نموده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌گردد که در نتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی بالا رفته و در قوس داخلی کاهش می‌یابد. همچنین کاهش عرض در نیمه دوم قوس اول سبب افزایش عمق شده است و باعث بالا رفتن توان حمل رسوب و بارکف و در نهایت موجب آبشستگی زیاد در بستر می‌شود. در قوس دوم، برداشت مصالح رودخانه‌ای سبب افزایش عرض رودخانه، کاهش ارتفاع جریان آب، افزایش تاثیر زبری بستر و در نتیجه کاهش سرعت جریان می‌شود. همچنین کاهش سرعت و ارتفاع جریان در قوس دوم سبب کمتر شدن اختلاف ارتفاع سطح آب در ساحل خارجی و داخلی قوس دوم نسبت به قوس اول می‌شود. به طور کلی از قوس دوم به سمت پایین دست ضریب زبری بازه مورد مطالعه کاهش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. در قوس سوم، کاهش ضریب زبری و افزایش انحنای قوس باعث می‌شود که در محل وقوع خم و کمی بعد از آن، مقدار حداکثر سرعت، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) ایجاد شود که سبب افزایش ارتفاع در قوس مقعر می‌گردد.

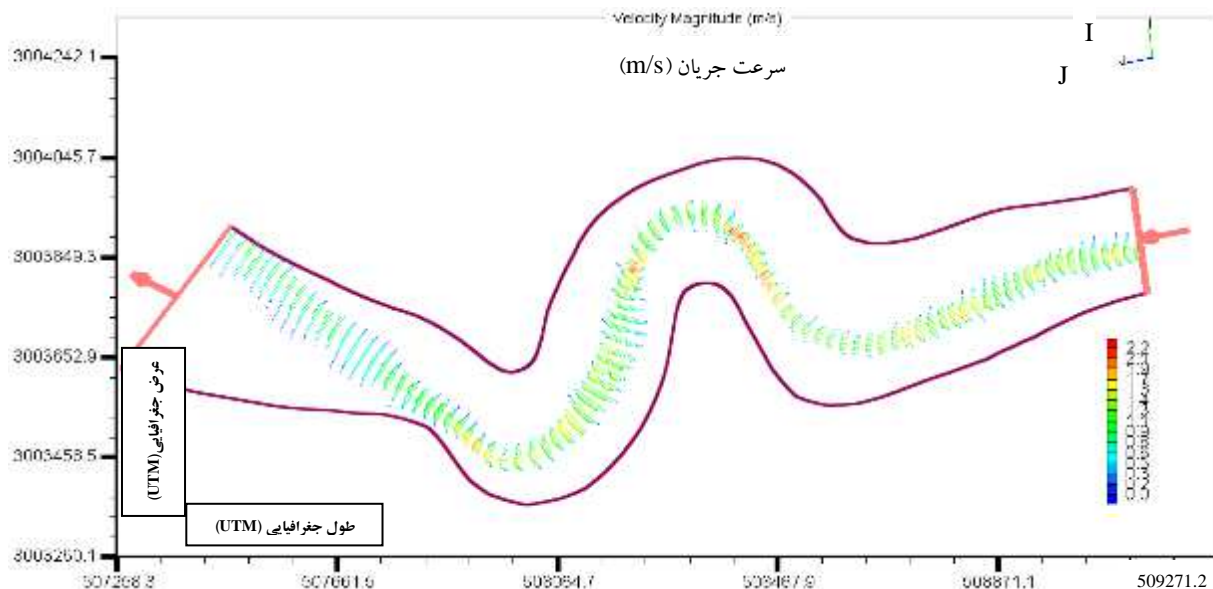


شکل ۹- تصویر توزیع متغیر عمق جریان در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

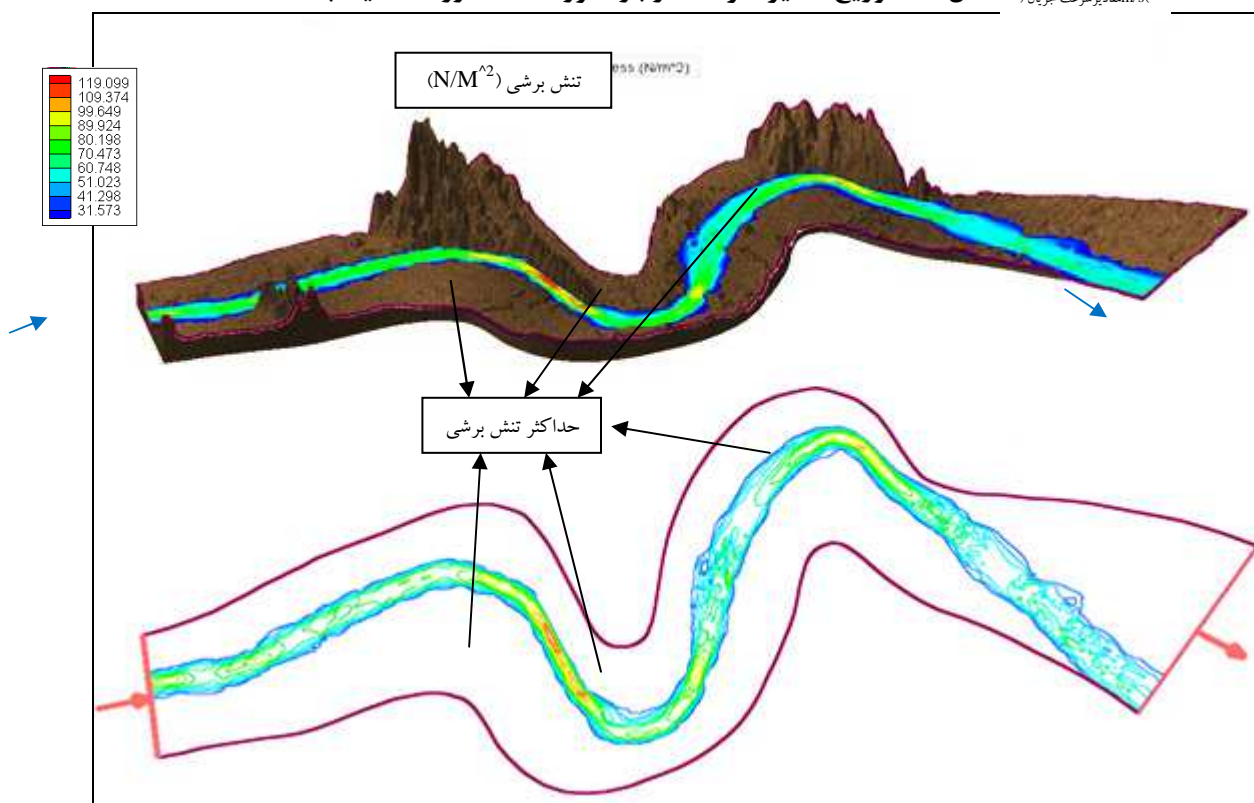
## ۲- بررسی پارامترهای سرعت جریان آب و تنش برشی

تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول کانال در شکل (۱۰)، 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 گرادیان سرعت دارد؛ همان‌طور که در شکل (۱۱)، 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 جریان 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 گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جاذب مرکز، حداکثر سرعت به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود. در قسمت کوتاهی از اول قوس، گرادیان 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 ۱۰- توزیع متغیر سرعت در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب (مقادیر سرعت جریان)

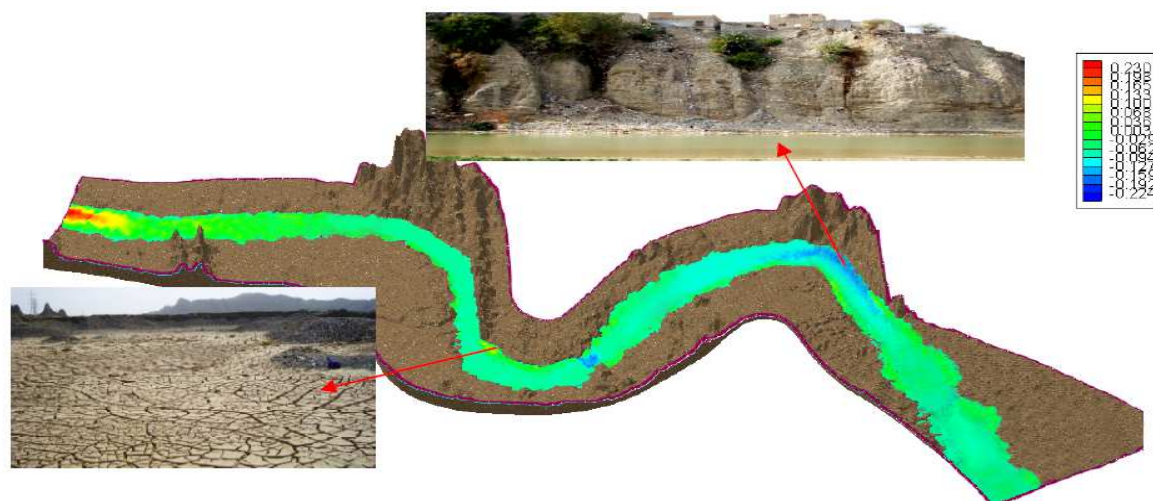


شکل ۱۱- توزیع متغیر تنش برشی در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

۳- پارامترهای فرسایش و رسوبگذاری



همان‌طور که در شکل شماره (۱۲) مشاهده می‌شود در ابتدای بازه مورد مطالعه به علت وجود بستر مقاوم به فرسایش، جریان خروجی از سد، در بدنه رودخانه کنش محسوسی ایجاد می‌کند. وجود پوشش گیاهی پرتراکم و ناهمواری‌های کف بستر این بازه مستقیم، سبب رسوبگذاری بار معلق می‌گردد. در فاصله نزدیک قوس اول و محدوده قوس مزبور، ساحل محدب، به سمت پایین دست، فرسایش پذیر بوده، اما ساحل مقابل و بستر، مقاوم به فرسایش می‌باشند. این عوامل و جریان فاقد بار بستر در این محدوده سبب کاهش رسوب گذاری در قوس داخلی می‌گردد. در قوس دوم، ساحل سمت راست به سمت پایین دست دارای بستر سنگی با شیب کم بوده و عمل فرسایش و کنش در ساحل مقعر محدود صورت می‌گیرد و تنها در بستر اصلی در اثر جریان ثانویه و حلزونی در این محدوده، رسوبات بستر به ساحل محدب و پایین دست انتقال می‌یابند. در قوس سوم، ساحل مقعر و محدب و نیز بستر اصلی فرسایش پذیر می‌باشند؛ در این قوس دیواره ساحل مقعر دارای شیب زیاد و فرسایش پذیر است؛ در اثر فرآیند فرسایش بستر در این قوس، گودال‌هایی در پای دیواره مقعر ایجاد کرده و سبب ریزش دیواره می‌گردد تا گودال ایجاد شده را پر کند، ادامه این روند موجب فرسایش با سرعت قابل توجه در جهت قوس بیرونی خواهد شد و جریان مارپیچی در این قوس، رسوبات ناشی از فرسایش دیواره مقعر را به طرف جلو و دیواره محدب انتقال می‌دهد.



شکل (۱۲) - تصاویر تغییرات بستر، فرسایش و رسوب گذاری 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 و رسوب در یک بازه پیچان رود طبیعی شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل، قابلیت مدل عددی بکار رفته را در پیش بینی پارامترهای جریان و رسوب تایید نمود. بنابراین بر اساس بررسی‌های انجام شده می‌توان پذیرفت، مدل عددی حاضر به نحو مطلوبی قادر به بررسی الگوی جریان آب و رسوب در کانال‌های پیچان رودی طبیعی می‌باشد. شایان به ذکر است 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 نتیجتاً 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؛ البته نباید شبکه محاسباتی را زیاد از حد از حالت استاندارد، ریز نمود، زیرا دیگر تفاوتی میان روش‌های عددی در انفعال (گسستگی) معادلات حاکم بر جریان در نتیجه نهایی وجود نخواهد داشت همچنین 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.



## - 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 شبیه سازی جریان و انتقال رسوب، چاپ اول، هرمزگان، نشر دانشگاه هرمزگان.
- خسروی، غ.، نوحه‌گر، ا.، خورانی، ا.، ارشادی، س.، فتاحی، م. (۱۳۹۲). شبیه سازی جریان و رسوب توسط مدل CCHE2D، مجله پژوهش آب ایران، دانشگاه شهرکرد.
- مغربی، م.، مقدم، ع.، و مشکلی کاخکی، م. (۱۳۸۹). شبیه سازی عددی الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه ی شریانی با استفاده از مدل CCHE2D مطالعه موردی: رودخانه سرباز، 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.
- فتاحی، م. (۱۳۹۰). مدل‌سازی الگوی جریان با CCHE2D در یک پیچان رود طبیعی، هفتمین همایش ملی علوم مهندسی آبخیزداری. 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.
- نوحه‌گر، 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.