

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی، جریان آشفته و انتقال رسوب،
CCHE2D، پیچان‌رود.

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 جریانی، تغییر در میزان مشخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند سرعت، دبی، تنش برشی و تغییرات پروفیل سطح آب مهم می‌باشد. 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 تاثیر فرآیند انتقال آشفته‌گی قرار می‌گیرد؛ به علاوه حضور جریان‌های آشفته در قوس رودخانه‌ها، عامل اصلی شکل‌گیری جریان‌های ثانویه است [۳]. 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 [۱۳]. 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، کشاوا^۲ و شتار^۳ [۱۳]، از معادلات رینولدز متوسط گیری شده در عمق (حالت دو بعدی) استفاده و مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ استاندارد را همراه با تابع دیوار استاندارد برای بستن سیستم معادلات آشفته خود به کار گرفتند. استفلر [۱۴]، 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

بررسی هیدرودینامیکی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب توسط مدل CCHE2D (مطالعه موردی: پیچان‌رود پایین دست سد میناب)

غلامرضا خسروی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱/۳۰

چکیده

بررسی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب در رودخانه بخصوص بازه‌های فرسایش پذیر از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به روند پیچیده رسوب‌گذاری و فرسایش در پیچان‌رودها و 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 و رسوب 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 صحرایی مشخصات جریان و رسوب شامل سرعت و عمق جریان، بار معلق، رسوبات بستر مقاطع مختلف (در ماه بهمن، ۱۳۹۰)، مدل هیدرودینامیکی دو بعدی اجرا گردید. به منظور ارزیابی تغییرات پروفیل طولی سرعت، توزیع تنش برشی، عمق جریان، فرسایش و رسوب گذاری در بخش‌های انحنادار کانال رودخانه، مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی مقایسه شدند. 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 و نیز شرایط فرسایشی و رسوبگذاری منطقه نشان از فرسایش پذیری بالای بازه مورد مطالعه در مقابل سیلاب های احتمالی دارد. همچنین نتایج نشان داد برای شبیه سازی حالات انتقال آشفته‌گی و پیش بینی نواحی گردابه‌ای در ناحیه قوس مقعر، مدل آشفته‌گی $k-\epsilon$ عملکرد بهتری نسبت به مدل لزجت گردابه‌ای داشته است.

۱- نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان پست الکترونیک: Gholamreza.khosravi@yahoo.com

فرسایش و رسوب گذاری در پیچان رودها، به دلیل شبیه سازی یک بعدی جریان و رسوب (در راستای طولی)، آنچنان توانمند نمی باشند. بوئیج^۱ [۲] با استفاده از روش گردابه های بزرگ^۲، الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه بسیار ملایم را توسط مدل Flow3D شبیه سازی کرد. این پژوهشگر معتقد است جریان ثانویه باعث می شود که حداکثر سرعت بیشتر از حالت عادی به بستر نزدیک شود و همین پدیده باعث آبستتگی و فرسایش موضعی شدید در محل دیواره خارجی به صورت زیرشویی این دیواره شده و باعث تخریب آن می شود. 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^۳ و وانگ^۴ [۶]، برای مطالعه تغییرات جریان در کانال های روباز توسعه داده شده است و ارزیابی ها نشان می دهد که این مدل را می توان برای مطالعه جریان های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرآیندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی کانال های آبرفتی بکار برد. همچنین وو^۵ و وانگ^۶ [۱۴]، در مطالعات خود به شبیه سازی جریان و انتقال رسوب در پایین دست رودخانه زرد در کشور چین پرداختند و با استفاده از مدل عددی CCHE2D، مدل های آشفتگی دو معادله ای $k - \varepsilon$ را با مدل های صفرمعادله ای مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تمام مدل های آشفتگی شبیه سازی های نزدیک به واقعیت برای جریان های ساده ارائه می کنند؛ اما در خصوص جریان های پیچیده، سه مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ (استاندارد، غیرتصادفی و RNG) نتایجی دقیق تر را نسبت به مدل های صفرمعادله ای نشان می دهند. حسن^۷ و همکاران [۵]، با استفاده از مدل CCHE2D در بازه ای از رودخانه مودا^۸، شبیه سازی الگوی جریان و رسوب را مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که می توان به خوبی از نرم افزار CCHE2D برای تحلیل رفتار جریان، هم در رودخانه و هم در سیلاب دشت ها استفاده کرد. زرکفلی [۱۷]، با بررسی مدل ریاضی دو بعدی CCHE2D و مدل یک بعدی HEC-RAS در رودخانه مردکا^۹، به این نتیجه رسید که اگرچه مدل های یک بعدی مانند HEC-RAS، به صورت گسترده استفاده می شود ولی توانایی تحلیل برخی از مشخصه های هیدرولیکی جریان مانند الگوی جریان و رسوب در پیچان رودها و محدوده سازه ها و موانع را در رودخانه را ندارند. فتیحی [۴]، از مدل دو بعدی CCHE2D، برای مدلسازی الگوی جریان در یک پیچان رود طبیعی واقع در رودخانه فارسان- ایران استفاده کرد و قابلیت مدل CCHE2D، برای پیش بینی مشخصات جریان در رودخانه های

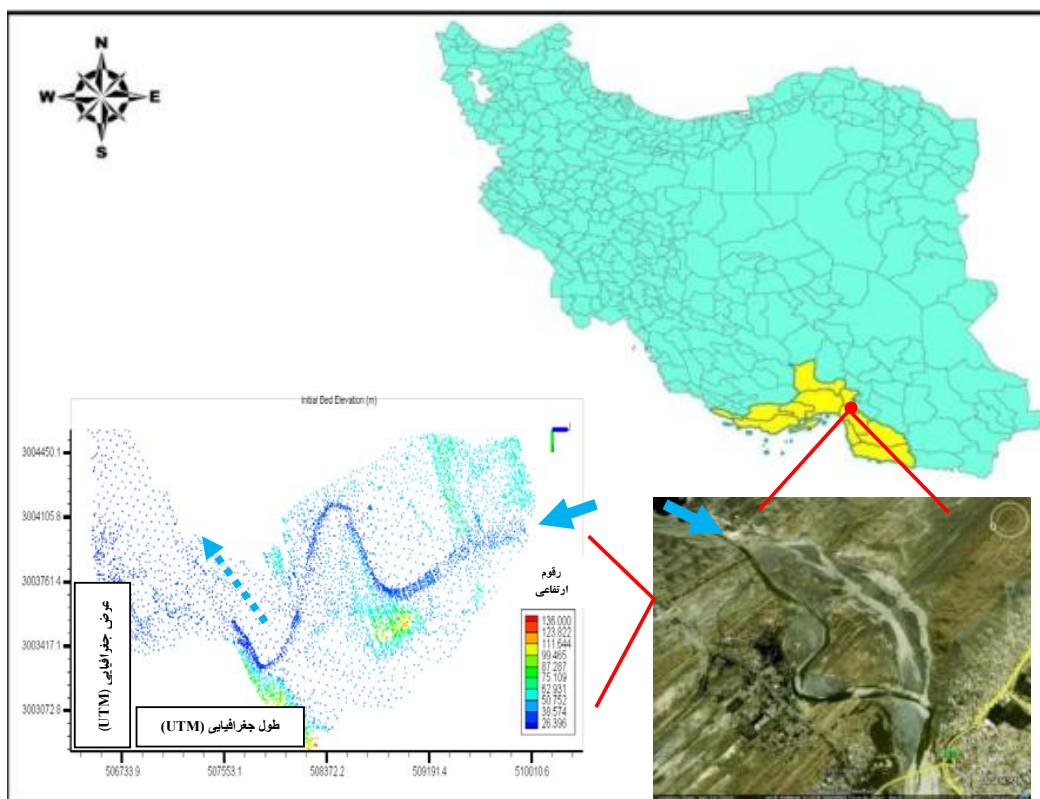
- 1- Booij
- 2- Large eddy simulation
- 3- Jia
- 4- Wang
- 5- Wu
- 6- Wang
- 7- Hasan
- 8- Muda
- 9- Merdeka

پیچان رودی را تایید نمودند. ملک عباسلو و همکاران [۱۰]، طی تحقیقی با عنوان پهنه بندی سیلاب در رودخانه های مخروط افکنه ای با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D به بررسی موضوع در رودخانه رودان پرداختند و نتیجه گرفتند که پهنه سیلاب به دست آمده از مدل دوبعدی، تطابق زیادی با بستر تعیین شده از بازدیدهای میدانی و عکس های هوایی داشته، درحالی که نتایج مدل یک بعدی در بخش های شریانی و مخروط افکنه ای رودخانه غیرقابل اعتماد می باشد. مغربی و همکاران [۹]، طی تحقیقی با عنوان شبیه سازی عددی الگوی جریان آشفته حول جزیره رسوبی در رودخانه 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 جزیره رسوبی در دبی های مختلف اثرگذاری متفاوتی بر روی الگوی جریان در ناحیه ی مورد بررسی دارد. خسروی [۷] از مدل عددی دوبعدی CCHE2D برای شبیه سازی الگوی جریان و رسوب در بازه ای از پیچان رودی طبیعی، حدفاصل سد تا پل شهرستان میناب- استان هرمزگان، پرداخت و به این نتیجه رسید که مدل از قابلیت خوبی جهت پیش بینی مشخصات جریان در رودخانه های پیچان رودی برخوردار است. مرور مطالعات انجام شده نشان می دهد بحث بررسی الگوی آشفته جریان و انتقال رسوب و به تبع آن فرسایش پذیری و تغییرات مورفولوژی کانال نیز از جمله مباحث مهمی است که مطالعات زیادی برای شناخت آن مورد نیاز است. در این تحقیق سعی بر آن است که با توجه اهمیت بازه مورد مطالعه با کمک مدل دو بعدی CCHE2D، به شبیه سازی الگوی جریان آشفته و انتقال رسوب و همچنین تغییرات عمق، سرعت و تنش برشی جریان و فرسایش و رسوب گذاری در پلان و مقطع عرضی بررسی می شود. شایان ذکر است مطالعات ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی انجام شده در بازه پایین دست سد میناب نشان می دهد که قسمت عظیمی از تغییرات ایجاد شده روی بستر و کناره های این بازه، بر اثر جریان سیلابی خروجی از سد و فرسایش پذیری بستر و کناره ها می باشد. با توجه به فرسایش پذیر بودن خاک و رگباری بودن بارندگی حوزه آبخیز میناب جریان های سیلابی خروجی سد با گل آلودگی بالا، سبب تخریب دیواره ها و کف بستر بازه مورد مطالعه می شود. همچنین با احداث سد میناب و متعاقب آن قطع رسوبات انتقالی بخصوص رسوب های 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 کناره ها، عریض شدن بستر و تهدید سازه های رودخانه ای، 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. سنگ شناسی و زمین ساخت حاکم بر منطقه از ویژگی های واحد مکران پیروی می کند. مهمترین واحدهای سنگی که در این محدوده به چشم می خورد عبارتند از مارن گوشی، ماسه سنگ خگو، ماسه سنگ تیاب و کنگلومرای میناب.



شکل ۱- نمایی از بیرون زدگی سنگی در عرض بستر رودخانه

Figure 1 - A view of the rock outcrop along the river bed



شکل ۲- محدوده مورد مطالعه، رودخانه میناب

Figure 2. The study area, Minab River

منطقه عمدتاً در راستای شمال غربی - جنوب شرقی است، گسل‌های فعال و بزرگی که در اطراف منطقه مورد مطالعه وجود دارد، به تسریع روند فرسایشی کمک می‌کند، این عامل (زمین ساخت)، همراه با دو عامل سنگ شناسی و توپوگرافی حوضه از عوامل اصلی شکل دهنده رودخانه میناب می‌باشند.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است محدوده مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه میناب از یک کیلومتر پایین دست سد

این رسوب‌ها به صورت تناوبی از مارن و ماسه سنگ پس از سد دیده می‌شوند. سنگ بستر بیرون زدگی دارد و به وضوح قابل رؤیت است. اکثر رخنمون‌های به جا مانده متشکل از تناوبی از ماسه سنگ با تراکم متوسط، به ندرت سخت، ریز دانه و دارای لایه‌های نازک سیلتی - رسی به رنگ خاکستری و خاکستری تیره است که دارای میان لایه‌های مارن، مارن شیلی، سنگ آهکی، مادستون، کنگلومرا با دانه بندی ریز همراه با سیمان ماسه‌ای، سیلتی و آهکی است. این لایه‌ها از جهت استحکام و مقاومت در برابر فرسایش و هوازدگی رفتار متفاوت بروز می‌دهند (شکل شماره ۱). سیستم دز و شکاف حاکم بر

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

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

ب) معادله مومنتم:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_y)}{\partial y} \right) - \frac{\tau_x}{\rho h} + f_{cw}v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_y)}{\partial y} \right) - \frac{\tau_y}{\rho h} - f_{cw}u \quad (3)$$

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)، ρ وزن مخصوص آب (نیوتن بر متر مکعب)، h عمق جریان (متر) و f_{cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، τ_{xy} ، τ_{yx} و τ_{xx} تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (بی بعد) و τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی بستر در راستای x و y (نیوتن بر متر مربع) می‌باشند.

ج) معادله آشفتگی: در مدل CCHE2D، برای شبیه‌سازی اثر آشفتگی بر الگوی جریان و بستن سیستم معادلات حاکم، از سه مدل آشفتگی جریان شامل مدل لزجت گردابه‌ای، مدل طول اختلاط و مدل دو معادله‌ای $k-\epsilon$ بهره می‌برد. (برای توضیحات بیشتر به منبع شماره ۸ رجوع گردد). در این تحقیق سه مدل مذکور مورد مقایسه قرار گرفته و سپس مدل بهینه انتخاب گردید. که در ادامه تحقیق شرح داده شده است.

اندازه‌گیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی مورد نیاز مدل CCHE2D

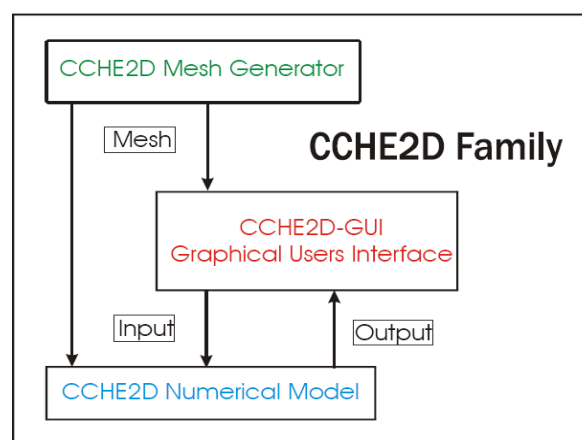
نقشه برداری و اندازه‌گیری پارامترهای جریان بازه مورد مطالعه در گام نخست، نقشه توپوگرافی با نقشه‌برداری بازه انتخابی از رودخانه میناب که توسط مهندسین رودخانه، سازمان آب منطقه‌ای با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال که در پاییز سال ۹۰ انجام شد، تهیه گردید. همان طور که در شکل (۴) مشهود است در شش مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان (سرعت و عمق جریان) و پارامترهای رسوب (بار معلق و رسوبات بستر در مقاطع مختلف) 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 چهار 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.

استقلال تا پل شهرستان میناب واقع در استان هرمزگان است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی $27^{\circ}09'18''$ تا $27^{\circ}09'33''$ طول شرقی و $57^{\circ}04'$ عرض شمالی قرار گرفته است. این بازه از شرق به سد استقلال و از غرب به پل شهرستان میناب محدود می‌شود. طول بازه حدود چهار و نیم 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.

مواد و روش‌ها

مدل CCHE2D

CCHE2D یک مدل عددی دو بعدی برای شبیه‌سازی جریان ماندگار و غیرماندگار آشسته و همچنین انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز بین المللی علوم هیدرولیک و مهندسی آب، 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. شبیه‌سازی 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 آشفتگی 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 چسبیده یا غیر چسبیده دارد. همچنین این مدل، تأثیر جریان‌های ثانویه بر نحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه‌های پیچان‌رود را در نظر می‌گیرد. روند به کار گرفته شده در مدل CCHE2D به طور شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۵].



شکل ۳- روند شبیه‌سازی مدل CCHE2D

Figure 3. Process of CCHE2D model simulations

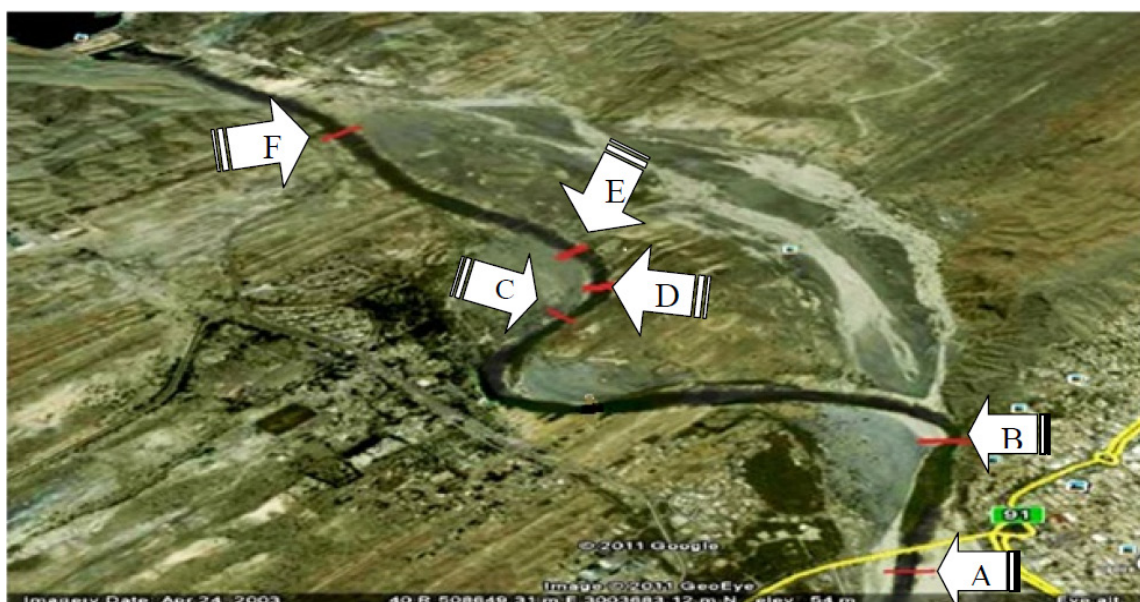
سرعت متوسط در طول هر مقطع (با توجه به عرض هر مقطع) حداقل در شش نقطه و حداکثر ده نقطه با فواصل مساوی از عمق آب، اندازه‌گیری شد.

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 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

برای اندازه‌گیری سرعت جریان و عمق آب از دستگاه سرعت سنج صوتی Easy QTM 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 ثابت (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 [۱].. نظر به اینکه در جریان‌های سیلابی مقدار سرعت در نقاط مختلف عرض رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر و همراه با تلاطم است،

جدول ۱- مشخصات دستگاه سرعت سنج صوتی Easy QTM
Table 1. Specifications of Easy QTM for flow velocity measurement

کاربرد Application	حداکثر سرعت قابل اندازه‌گیری Maximum measurable flow velocity	دامنه اندازه‌گیری عمق جریان Measuring range of flow depth	دامنه گام زمانی اندازه‌گیری range of time step
سنجش سرعت و عمق جریان Measure the flow velocity and flow depth	10 m/s	0.15-10 m	1- 120 s



شکل ۴- نمایی از مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای جریان
Figure 4. Sections of the parameters measured in Minab River

مقطع عرضی استفاده شد [۱].

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.

اندازه‌گیری پارامترهای رسوب رودخانه

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 [۱]. و نتایج آن در شکل شماره (۵) و (۶) و جدول شماره (۳) ارائه شده است.

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. نحوه کار در این روش بدین صورت است ابتدا یک بالون ژوژه (۱۰۰ سی سی)، با ترازوی حساس وزن نموده و سپس ۲۵ گرم رسوب را با ترازوی حساس وزن نموده و در درون بالون ژوژه می‌ریزیم. بالون ژوژه و خاک را دوباره با ترازو وزن می‌کنیم سپس حدود ۵۰ سی سی آب مقطر به بالون محتوای خاک اضافه می‌کنیم و به مدت ۱۰ دقیقه حرارت می‌دهیم و بعد به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده تا هوای خاک و آب کاملاً خارج شود. محتوای بالون ژوژه را با آب مقطر به حجم ۱۰۰ سی سی می‌رسانیم و با ترازو وزن می‌کنیم (جعفری حقیقی، ۱۳۸۲).

$$M_s = B - A \quad (۴)$$

$$D = C - B \quad (۵)$$

$$V_s = 100 - D \quad (۶)$$

$$P_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (۷)$$

که در آن:

A = وزن بالون ژوژه (gr)

B = وزن بالون ژوژه به اضافه ۲۵ گرم نمونه رسوب (gr)

جدول ۲- مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف

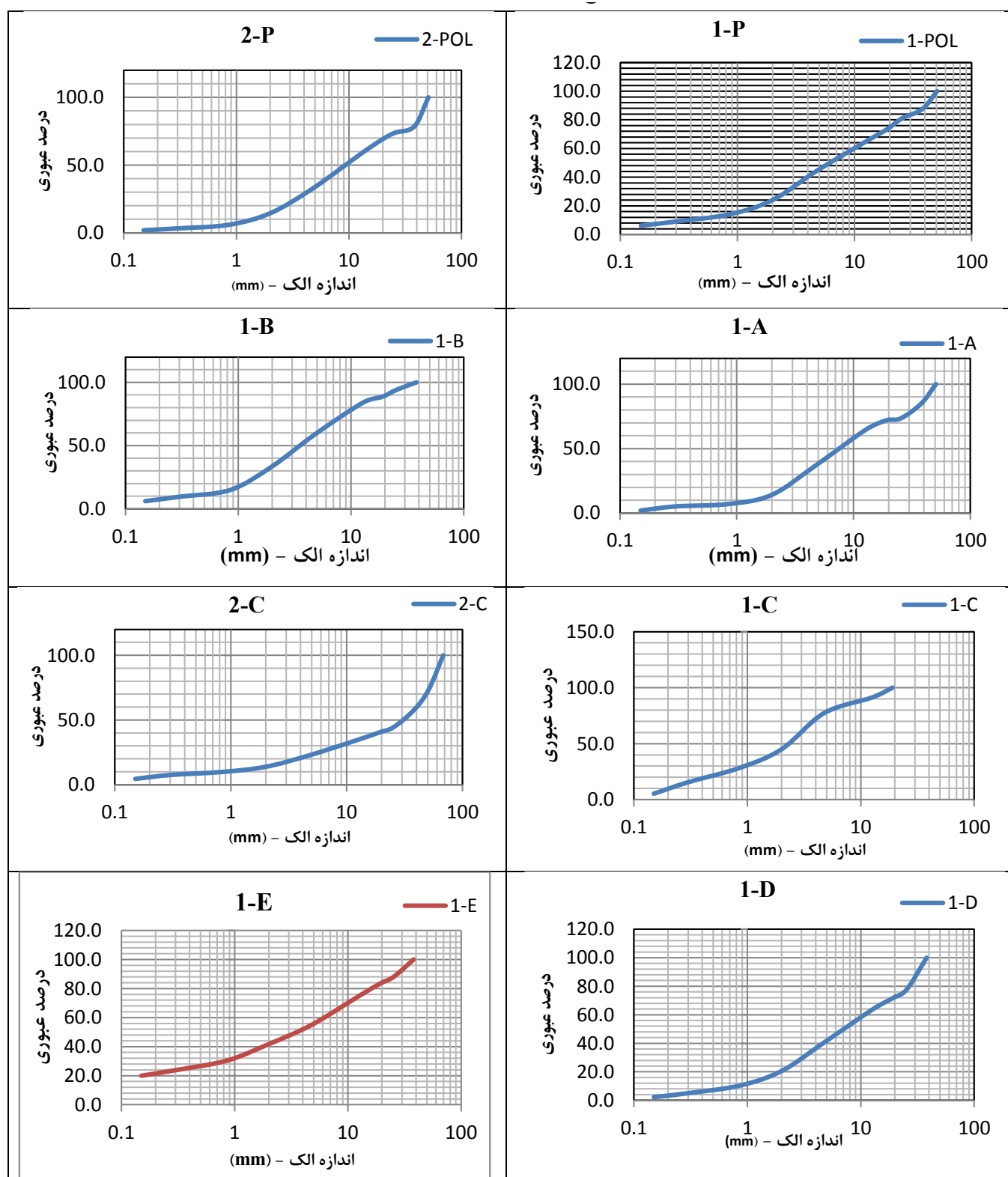
Table 2. Parameters values of flow velocity, water depth and flow discharge in different sections

مقاطع اندازه‌گیری شده Measured sections	سرعت در عمق 0.2 flow velocity at depth of 0.2 (m/s)	سرعت در عمق 0.4 flow velocity at depth of (m/s) 0.4	سرعت در عمق 0.6 flow velocity at depth of 0.6 (m/s)	سرعت در عمق 0.8 flow velocity at depth of 0.8 (m/s)	سرعت متوسط average flow velocity (m/s)	عمق جریان flow depth (m)	دبی جریان Flow (m³/s)
مقطع (B)	1.6	1.27	0.9	0.45	1.08	1.52	85
مقطع (C)	1.64	1.38	1.15	0.83	1.25	1.94	85
مقطع (D)	1.55	1.29	1.09	0.43	1.09	1.67	85
مقطع (E)	1.47	1.16	0.98	0.63	1.06	1.5	85
مقطع (F) ورودی	-	-	-	-	-	1.63	85
مقطع (A) خروجی	-	-	-	-	-	1.41	85

جدول ۳- مقادیر خصوصیات رسوبات کناره‌های بازه

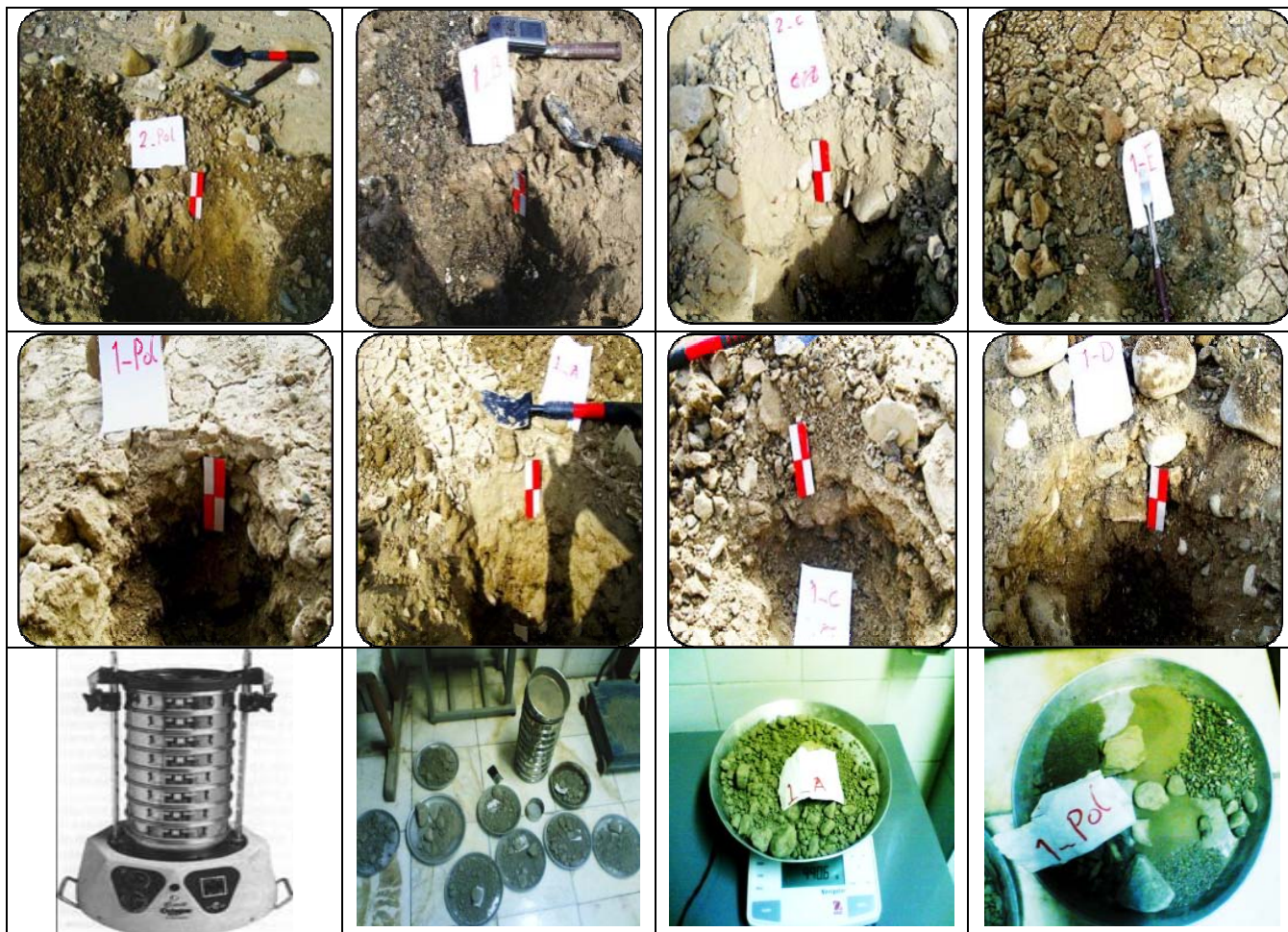
Table 3. river bank sediment characteristics

زاویه اصطکاک Friction angle (درجه)	وزن مخصوص Special Weight (kg /m³)	چسبندگی رسوب (kg/cm²)	ضریب اطمینان (بدون بعد)	D ₅₀ (m)
17	2.57	22.25	1	0.01



شکل ۵- منحنی نیمه لگاریتمی دانه بندی رسوبات پروفیل‌های مقاطع مختلف

Figure 5. sediment Grading Curve of profiles at different sections



شکل ۶- نمایی از پروفیل های برداشت رسوب در مقاطع مختلف و آزمایش دانه بندی رسوب

Figure 6 - A view of the depositional profiles in different sections

جدول ۴- اطلاعات وزن مخصوص نمونه های برداشت شده

Table4. specific gravity of samples

2-E	1-E	1-D	2-C	1-C	1-B	1-A	2- P	1- P	نام پروفیل Profile name
2.3	2.53	2.66	2.62	2.52	2.5	2.53	2.65	2.59	وزن مخصوص Special Weight (kg / m ³)

حاوی رسوبات ریزدانه (رسی- سیلتی) به صورت بار معلق است از طرفی در بازه مکانی مورد مطالعه، بستر اصلی کانال به علت وجود تراکم بالای پوشش بیشه زار و چمنی فاقد بار بستر است در نتیجه شرایط مرزی ورودی فاقد بار بستر می باشد. بنابراین برای تعریف شرایط مرزی رسوب تنها بار معلق اعمال گردید. بدین منظور در اولین مقطع ورودی جریان و مقطع اندازه گیری (A) با روش نمونه گیری غیر نقطه ای، هم زمان با اندازه گیری پارامترهای جریان آب از قبیل (اندازه گیری عمق و سرعت جریان آب)، با

$C = \text{وزن بالون ژوژه به اضافه ۲۵ گرم نمونه رسوب و وزن آب (gr)}$

$D = \text{جرم آب} = \text{حجم آب (gr)}$

اندازه گیری بار معلق

با توجه به اینکه جریان ورودی بازه مورد مطالعه، جریان خروجی از دریچه های سد میناب (با دبی ثابت) است و بر اساس اندازه گیری های و نمونه برداری های انجام شده، این جریان فقط

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 (۹) نشان داده شده است با توجه به شکل پلان بازه مورد مطالعه، حالت تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه انتخاب شد [۱۶].

شبیه‌سازی الگوی جریان

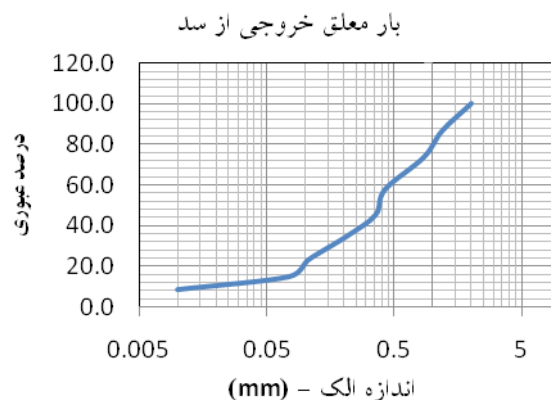
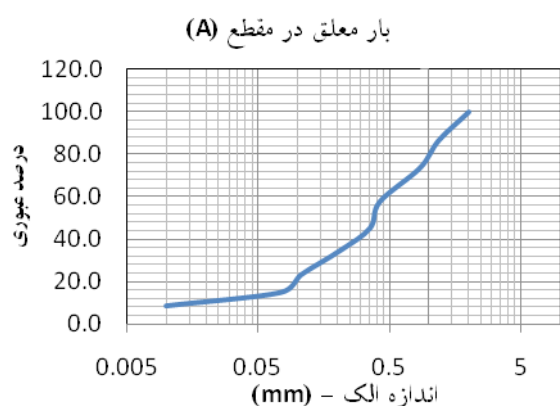
مراحل شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب توسط نرم‌افزار CCHE-GUI به شرح زیر است [۱۵]:

ورود و فراخوانی فایل Geo؛ تنظیم شرایط اولیه جریان (عمق آب بالادست و پایین دست) بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در جدول شماره (۲)؛ تنظیم شرایط اولیه رسوب از جمله زبری بستر (ضریب زبری در کناره‌ها و کف رودخانه، با مشاهدات و

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 دو 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. باشد شایان ذکر است برای نمونه برداری از روش انتگراسیون عمقی استفاده گردید و سرعت ثابت مورد نظر کمتر ۵ درصد سرعت متوسط آب بود. [۱]. در شکل شماره (۷)، منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)، نشان داده شده است.

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



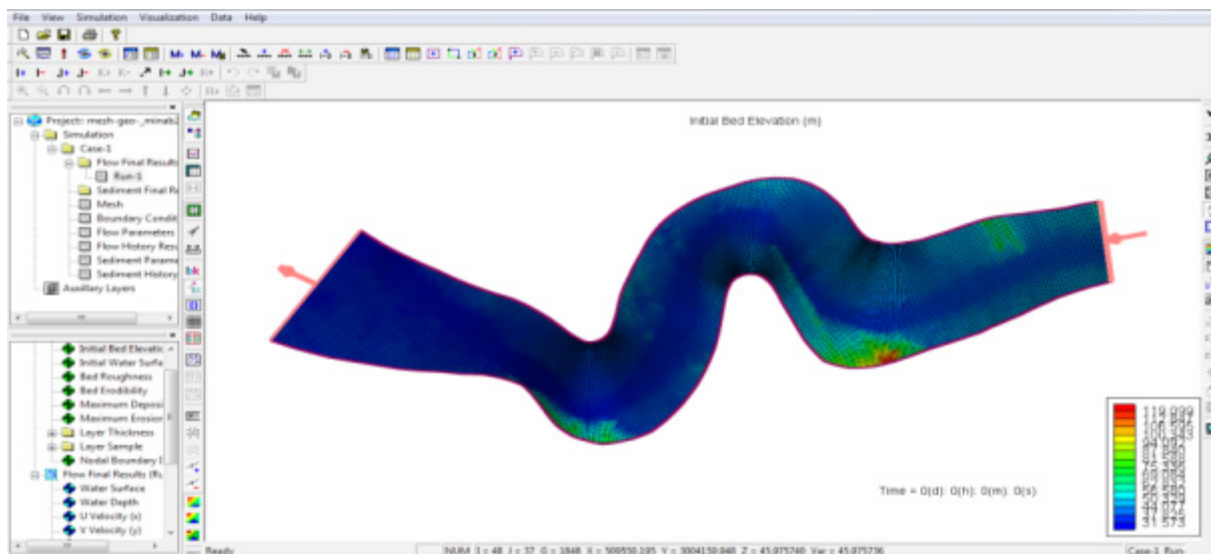
شکل ۷- منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)

Figure 7. sediment Grading Curve of Suspended load for the inlet and A section



شکل ۸- نمایی از نحوه اندازه‌گیری وزن مخصوص نمونه‌های برداشت شده و نحوه اندازه‌گیری بار معلق

Figure 8. view of how to measure the Special Weight of sediment samples



شکل ۹- نمای درون یابی ارتفاعی شبکه محاسباتی (Mesh)

Figure 9. interpolated of computational grid (Mesh)

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

Table 5. compares the observed and estimated the concentration average of suspended load for four of sediment transport equations

پارامتر متوسط بار معلق پیش بینی شده توسط مدل برای مقطع C		
The average suspended load parameter predicted by the model for section C		
(kg/m ³)		
معادلات ظرفیت حمل رسوب Sediment transport capacity equations	مقادیر برآوردی Estimated values	مقدار مشاهداتی Observation value
Wu et al. formula	40.7	39.2
Modified Ackers and White formula	37.6	
Modified Engelund and Hansen formula	42.1	
SEDTRA module	32.3	

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 دیگر برآورد نزدیکتری نشان داد)؛ تنظیم پارامترهای رسوب (بر اساس جداول شماره سه و چهار و اشکال شماره چهار و پنج از جمله: کلاس‌بندی 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

تهیه عکس و فیلم از بازه مورد مطالعه و استفاده از معتبرترین منابع محاسباتی هیدرولیک، مانند: کتاب چاو^۱ و معادله کوان^۲ مشخص شد)، فرسایش پذیری بستر اولیه بر اساس دانه بندی رسوبات بستر، حداکثر ضخامت رسوب گذاری (با فرض اینکه حداکثر ضخامت رسوب گذاری در محدوده های محدب پیچان رود رخ می‌دهد)، حداکثر عمق فرسایش (با فرض اینکه حداکثر عمق فرسایش در محدوده های مقعر پیچان رود رخ می‌دهد) و تعیین ضخامت سه لایه سطحی بستر در نقاط مختلف [۱۶]. تنظیم پارامترهای جریان آب شامل: گام زمانی (۲۴ ساعت)، 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

1- Chow
2- Cowan

معادله SEDTRA، ایکر وایت اصلاح شده، انگلاند و هانسن اصلاح شده و فرمول وو و همکاران استفاده می گردد و معادله ای که انطباق بهتری با واقعیت داشته باشد انتخاب می گردد. 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 می دهد.

واسنجی مدل عددی CCHE2D

با انجام چندین بار مدل سازی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج مدل، مرحله بعدی واسنجی مدل عددی CCHE2D است تا از طرفی درصد خطای مدل در پیش بینی پارامترها مشخص و از طرف دیگر شرایطی استاندارد در خصوص تنظیمات مدل و اندازه گیری پارامترها به وجود آید [۸]. بدین منظور در بازه مورد مطالعه، فرضیه تغییر ضریب زبری (حساس ترین 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، گره ها در شبکه از تلاقی بردارهای طولی (I) و عرضی (J) با یکدیگر بوجود می آیند و هر گره معرف برآیند ویژگی های چهار سلول اطراف خود است. بنابراین هر چه تعداد گره ها و به تبع آن سلول های ایجاد شده در مقطع عرضی رودخانه بیشتر باشد، شبکه تولید شده و الگوی جریان شبیه سازی شده، دقت بالاتری دارد، این فرآیند باید تا آنجا ادامه یابد که تغییری در خروجی مدل مشاهده نشود. شایان ذکر است با تغییر ابعاد شبکه، پستی و بلندی و شکل مقطع و کانال نیز تغییر می کند که این سبب تغییرات در الگوی جریان و به تبع آن رسوب می شود بنابراین با توجه به مورفولوژی کانال ابعاد بهینه شبکه انتخاب می شود [۱۶]. 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 حالتی به دست آمد که ابعاد شبکه محاسباتی (۵۵×۵۰۰) باشد. در جدول های (۶) و (۷)، مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای سرعت جریان (V) و عمق جریان (P)، در حالت تغییر ضریب زبری و

جدول ۶- مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

Table 6. Comparison of flow velocity (m / s) in case of roughness coefficient and computational grid size change

مقاطع اندازه گیری شده Measured sections	پارامتر سرعت جریان (V) اندازه گیری شده The measured flow velocity parameter (m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) پیش بینی شده توسط مدل (m/s) Parameter of flow velocity predicted by model			
		ابعاد 420*48		ابعاد 500*55	
		زبری Roughness (0.034 -0.063)	زبری Roughness (0.033 -0.052)	زبری Roughness (0.034 -0.063)	زبری Roughness (0.033 -0.052)
مقطع B	1.08	0.93	0.96	0.95	1.07
مقطع C	1.25	1.13	1.16	1.15	1.21
مقطع D	1.09	0.91	1.04	1.05	1.12
مقطع E	1.06	0.88	0.94	1.02	1.1

جدول ۷- مقایسه پارامتر عمق جریان (m) در حالت تغییر ضریب زبری و ابعاد شبکه محاسباتی

Table 7. Comparison of water depth (m) in case of roughness coefficient and computational grid size change

مقاطع اندازه گیری شده Measured sections	پارامتر عمق آب (P) (m) اندازه گیری شده The measured depth parameter	پارامتر عمق آب (P) پیش بینی شده توسط مدل (m) Water depth predicted by model			
		ابعاد 420*48		ابعاد 500*55	
		زبری Roughness (0.034 -0.063)	زبری Roughness (0.033 -0.052)	زبری Roughness (0.034 -0.063)	زبری Roughness (0.033 -0.052)
مقطع B	1.52	1.73	1.64	1.65	1.59
مقطع C	1.94	2.18	2.15	2.16	2.11
مقطع D	1.67	1.83	1.75	1.77	1.73
مقطع E	1.5	1.64	1.53	1.59	1.47
مقطع A (ورودی)	1.63	1.87	1.76	1.8	1.7
مقطع F (خروجی)	1.41	1.62	1.51	1.54	1.45

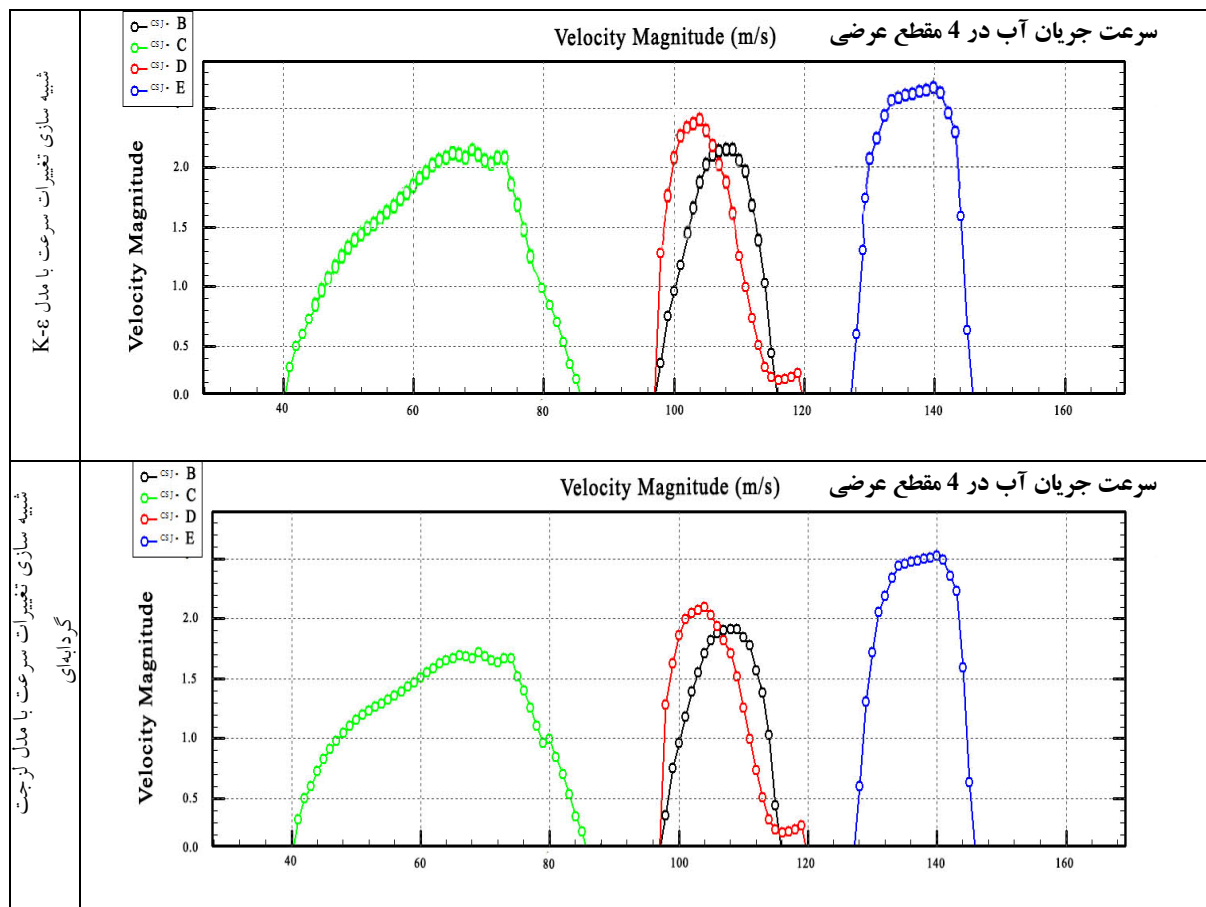
تغییر ابعاد شبکه مقایسه شده است.

قوس رودخانه) به تغییر ابعاد شبکه نشان داده است.

همان گونه که از جداول فوق مشاهده می شود، نزدیکترین مقادیر پیش بینی شده به مشاهدات، مربوط است به شبکه محاسباتی تولید شده با ابعاد (۵۵×۵۰۰) و الگوی جریان شبیه سازی 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 (به خصوص در محدوده مقعر

بررسی مدل های آشفتگی جریان

در این تحقیق برای شبیه سازی حالات انتقال آشفتگی، از دو مدل لزجت گردابه ای و مدل K-ε استفاده شد. همان طور که در شکل (۱۰) مشهود است نتایج آماری شبیه سازی 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 جدول های (۸) نتایج برآوردی مدل های آشفتگی با نتایج اندازه گیری



شکل ۱۰- نمودار تغییرات سرعت در چهار مقطع (B، C، D و E) برای دو مدل لزجت گردابه ای و مدل K-ε
Figure 10. Graph of velocity changes in section four (B, C, D and E) for eddy viscosity and K-ε models

جدول ۸- مقایسه پارامتر سرعت جریان (m/s) برای دو مدل لزجت گردابه ای و مدل K-ε

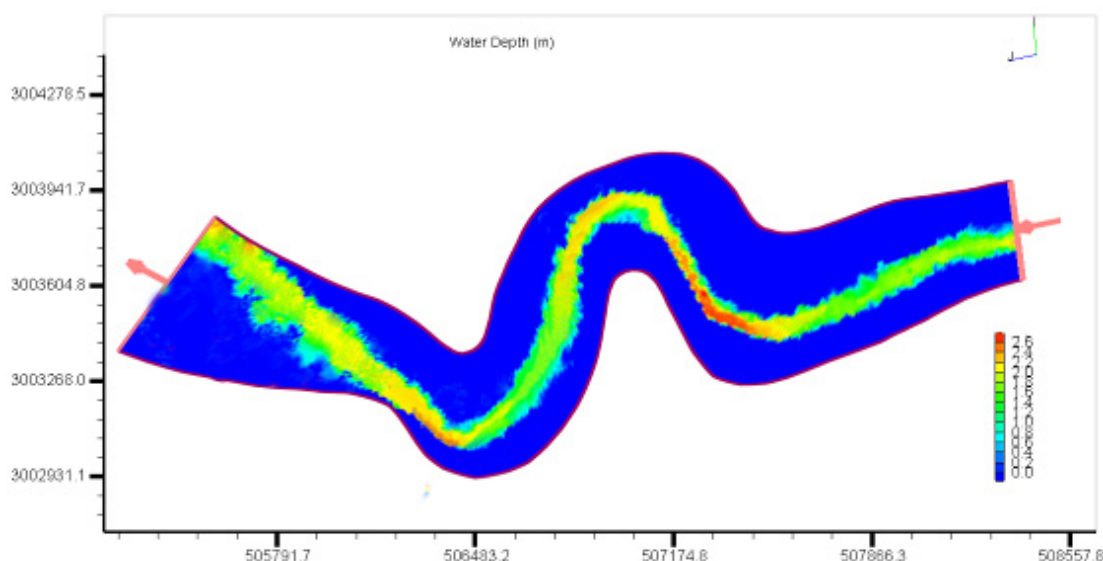
Table 8. Comparison flow velocity (m / s) for eddy viscosity and of K-ε models

مقاطع اندازه گیری شده Measured sections	پارامتر سرعت جریان (V) اندازه گیری شده (m/s) The measured depth parameter	پارامتر سرعت جریان (V) پیش بینی شده توسط مدل (m/s) Parameter of flow velocity predicted by model شبکه با ابعاد 500*55 و ضریب زبری (0.033-0.052)	
		مدل لزجت گردابه ای	مدل K-ε
مقطع B	1.08	0.93	1.07
مقطع C	1.25	1.14	1.21
مقطع D	1.09	1.04	1.12
مقطع E	1.06	0.99	1.1

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

Table 9. Comparison of velocity, water depth observed and estimated by k-ε model based on RMSE and MAPE

نوع روش Methods	پارامتر سرعت جریان آب Flow velocity parameter	پارامتر عمق آب Water Depth Parameter	پارامتر شیب انرژی
RMSE	0.075	0.116	0.0008
MAPE	0.027	0.062	0.044



شکل ۱۱- تصویر توزیع متغیر عمق جریان

Figure 11. Distribution of water depth

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (8)$$

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

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}}{y_t} \right| * 100 \quad (9)$$

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.

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.

پارامتر عمق آب

همانطور که در شکل شماره (۱۱) نشان داده شده است با ورود

شده در مقاطع مختلف (B، C، D و E)، مقایسه شده است.

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. شایان ذکر است برای مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای، در مدل هیدرودینامیکی CCHE2D این امکان وجود دارد که ضریب ویسکوزیته آشفتگی در دامنه (۰/۱ تا ۱۰۰۰) تنظیم نمود. ولی به طور معمول معادل یک در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

ارزیابی کارایی مدل

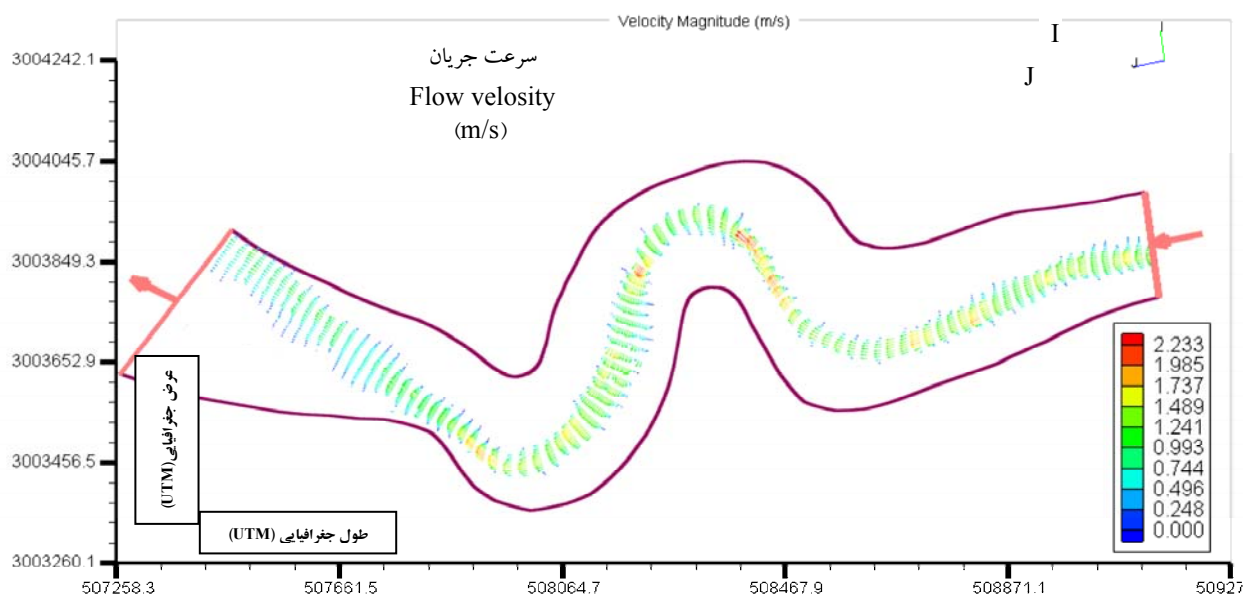
در ادامه، نتایج به‌دست آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت (در حالت میان‌گیری شده از داده‌ها) مقایسه شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب انرژی آشکار گردد. برای این منظور از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد. دو روش عبارتند از جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) که روابط آنها به شرح ذیل است:

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 $\tau = \gamma R_f$ کاملاً مشهود است که پارامتر تنش برشی رابطه‌ای مستقیم با گرادیان سرعت دارد؛ همان‌طور که در شکل (۱۳)، 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 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.

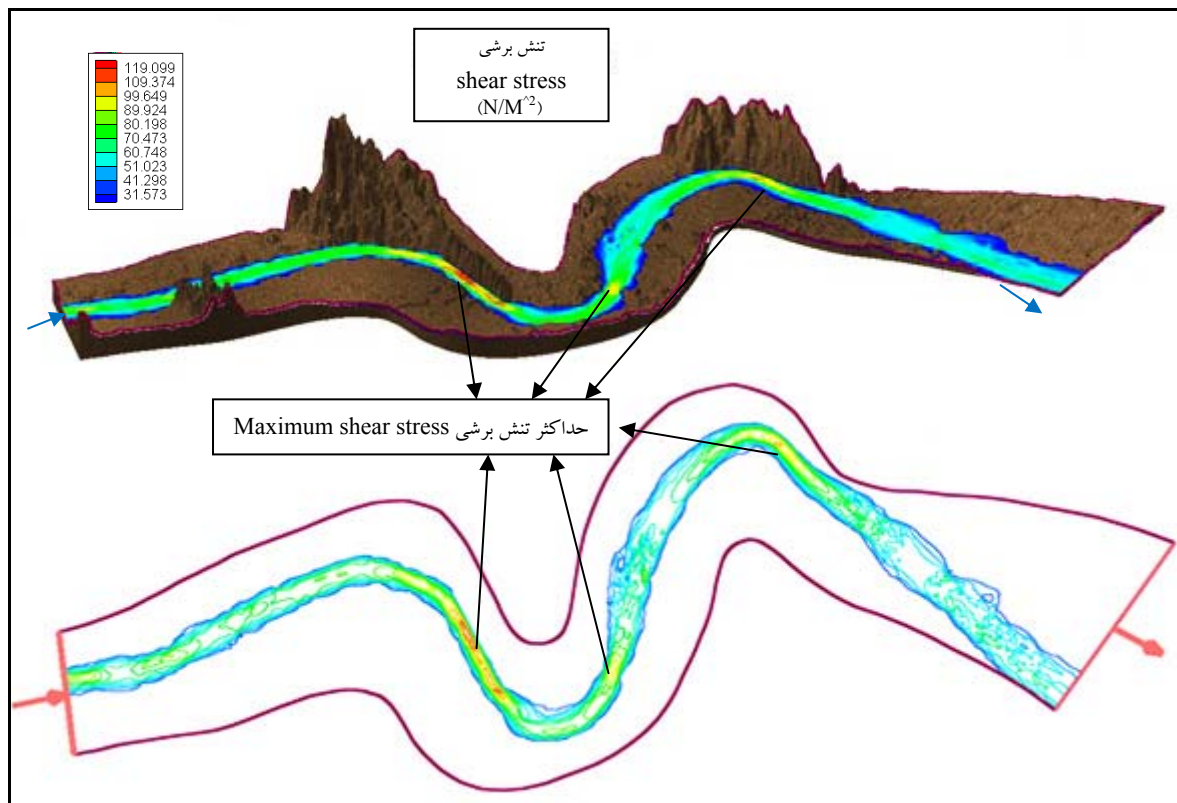
جریان به قوس اول به علت اینکه بازه مستقیم بالادست قوس اول دارای ضریب زبری بالاتری نسبت به محدوده قوس است، و همچنین به دلیل وجود انحنای زیاد در نیمه اول قوس، حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در نیمه دوم قوس صورت می‌گیرد. در این محدوده نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر نموده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح 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.

بررسی پارامترهای سرعت جریان آب و تنش برشی

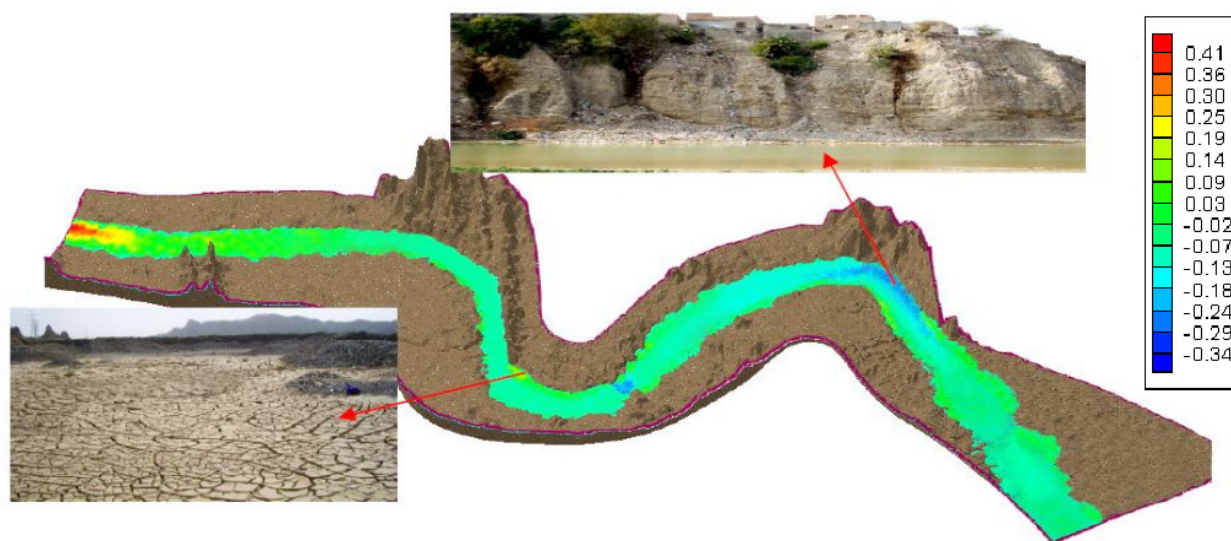
تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول کانال در شکل (۱۲)، نشان می‌دهد که در بازه مستقیم قبل از قوس اول، ماکزیمم مقدار سرعت آب در وسط کانال اتفاق می‌افتد. افزایش ضریب زبری بازه مستقیم بالادست قوس اول، سبب کاهش سرعت جریان ورودی به قوس اول شده است؛ این امر و انحنای بالای قوس باعث می‌شود که



شکل ۱۲- توزیع متغیر سرعت جریان
Figure 12. Distribution of flow velocity



شکل ۱۳- توزیع متغیر تنش برشی
Figure 13. Distribution of shear stress



شکل ۱۴- تصویر تغییرات بستر، فرسایش و رسوب گذاری
Figure 14. changes of bed, erosion and sedimentation

سبب رسوبگذاری بار معلق می گردد. 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 می باشند. این عوامل و جریان فاقد بار بستر در این محدوده سبب کاهش رسوب گذاری در قوس داخلی می گردد. در قوس دوم، ساحل سمت راست

پارامترهای فرسایش و رسوبگذاری همان طور که در شکل شماره (۱۴) مشاهده می شود در ابتدای بازه مورد مطالعه به علت وجود بستر مقاوم به فرسایش، جریان خروجی از سد، در بدنه رودخانه کنش محسوسی ایجاد می کند. وجود پوشش گیاهی پرتراکم و ناهمواری های کف بستر این بازه مستقیم،

و تغییرات عمق جریان در کل قلمرو جریان مناسب است اما در محدوده پیچانرود 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 $k-\varepsilon$ دقیق‌تر است.

منابع

1. Alizadeh, A. 2006. Principles of Applied Hydrology, 19 th edition, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
2. Booi, 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.
3. Bridge J. S. (2003). River and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record, ISBN, 978-0-632-06489-2, Wiley- Blackwell, 504 pp.
4. Fathi, M. 2011. CCHE2D modeling of flow pattern in a natural meanders, Master's thesis. The University Shahrekord. (In Persian)
5. Hasan, Z. Ghani, A. and Zakaria, N. (2007). Application of 2-D Modeling for Muda River Using CCHE2D, 2nd International Conference on managing River Basins.
6. 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.
7. Khosravi, Gh. Nohegar, A. Khorani, A. Ershadi, S. And Fathi, M. 2013. Simulation of flow and sediment By Model CCHE2D, Journal of Water Research Iran, University of Shahrekord. (In Persian)
8. Khosravi, Gh., Nohegar, A. 2014. A Practical Guide by example functional simulation of flow and sediment transport model CCHE2D, First Edition, Hormozgan, Hormozgan University Press. (In Persian)
9. Maghrebi, M. Mogdam, E. Meshki Kakhaki, M. 2010. Numerical simulation of turbulent flow pattern over the islands in the river sediment arterial CCHE2D model (case study: River sarbaz). Tehran, Iran Hydraulics Conference, Iranian Hydraulic Association, Tarbiat Modarres University. (In Persian)
10. Malekabbaslu, A. Haji Kennedy, H. And Pirestani, M. 2012. Two-dimensional modeling of flow pattern in the

به سمت پایین دست دارای بستر سنگی با شیب کم بوده و عمل فرسایش و کش 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.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از یک مدل دو بعدی عددی دینامیک سیالات محاسباتی^۱، به نام CCHE2D، الگوی جریان آب و رسوب 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 و رسوب تایید نمود.

- 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.

- در محدوده بین قوس اول و دوم به دلیل افزایش عرض و کاهش شیب سبب کم شدن سرعت جریان و جریان‌ات ثانویه شده که به تبع آن میزان فرسایش و تغییرات بستر کمتر شده و محلی برای ترسیب ذرات برداشت شده از قوس قبلی می‌باشد.

- نتایج مدل عددی مبین نقش مستقیم جریان‌های ثانویه در تغییر ساختار جریان و تنش برشی در قوس‌های مقعر می‌باشد که این امر می‌تواند تاثیر بسزایی در افزایش فرسایش در محدود قوس مقعر و افزایش رسوبگذاری در محدود قوس محدب داشته باشد.

- 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 $k-\varepsilon$ استفاده گردید و معلوم شد که به طور متوسط مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای برای برآورد توزیع سرعت

1- Computational fluid dynamics

15. 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.
16. 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.
17. 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.
- river alluvial fans using two dimensional model CCHE2D, the ninth international seminar on river engineering, Shahid Chamran University. (In Persian)
11. Shettar A. and Keshava Murthy K. (1996). Numerical Study of Division of Flow in Open Channels, J. Hydraul. Res., 34(5), 651-675. (In Persian)
12. Steffler, P. and Blackburn, J. (2002). River2D – User Manual , University of Alberta.
13. Telvari, E. R. 2004. Fundamentals of River Training and Engineering, Education Organization Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (In Persian)
14. Wu W. and Wang S.(2009). Mathematical models for liquid-solid two-phase flow and Sediment, Int. J. Sediment Research, 15(3), 288–298.

*Abstract***Hydrodynamic Investigation of Turbulence Flow and Sediment Transport Pattern by CCHE2D (Case Study: of Downstream Meander of Minab Dam)**Q. khosravi¹

Received: 2016/09/04 Accepted : 2017/04/19

Study of turbulent flow and sediment transport pattern in rivers, especially erodible reach is utmost importance. With regard to the complex process of sedimentation and erosion in meander reach and significance role of the flow velocity and shear stress forces on river bank erosion, two-dimensional numerical modeling as CCHE2D was performed to simulate flow and sediment patterns of a meandering river reach located in the downstream of the Minab dam (Hormozgan province, Iran). Using topographic data obtained from field surveys and then the geometry model and the computational mesh (grid) with different dimensions and also field measurements of flow and sediment characteristics such as velocity, depth and suspended load, the two-dimensional hydrodynamic model was run. Simulated data were compared with observed ones in order to assess the velocity horizontal profile gradients, the distribution of shear stress and the flow depth condition, erosion and deposition in curved parts of the river channel. Furthermore, two statistical criteria (RMSE and MAPE) were used to evaluate the performance of the model. The results indicated that the simulated values are in good agreement with the field measurements. Also, results showed that simulating the flow pattern, by k- ϵ model has a better performance in predicting of turbulence closure areas in concave portions of the river bends than Eddy Viscosity model.

Keywords: Simulation, Turbulent flow and Sediment transport, CCHE2D, Meandering

1. Ph.D. Student of watershed management and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gorgan Corresponding Author Email: Gholamreza.khosravi@yahoo.com