دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

شبیه‌سازی الگوی جریان در یک بازه پیچان‌رود طبیعی با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE2D (مطالعه موردی: پیچان‌رودهای بالادست سد درودزن)

ابوذرنیکنام[۱]، غلامرضا خسروی[۲]، احمد نوحه‌گر[۳] و ارشک حلی‌ساز[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، (نویسنده مسوول: abuzarniknam@yahoo.com)
۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۳- استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران
۴- استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان
تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۱۸ تاریخ پذیرش:۹۶/۲/۱۳

چکیده

بررسی الگوی جریان در رودخانه به‌خصوص بازه‌های مکانی فرسایش‌پذیر از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به روند پیچیده فرسایش و رسوب‌گذاری 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 در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی رودخانه کر در حد فاصل پل عباس‌آباد و سد درودزن استان فارس استفاده شد. در این بررسی با بهره‌گیری از نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس محدوده مورد مطالعه، ابتدا هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف تهیه و در نهایت بر اساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی همچون تغییرات عمق و سرعت جریان استخراج گردید. از دو معیار آماری RMSE و MAPE برای مقایسه داده‌های حاصل از شبیه سازی مدل عددی و داده‌های مشاهده‌ای، استفاده شد، که خطای مدل برای پارامترهای سرعت و عمق با شاخص RMSE به ترتیب ۰/۰۲۷، ۰/۱۳ و با شاخص MAPE به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۶۵ درصد برآورد گردید. نتایج نشان داد که این مدل در پیش‌بینی مقادیر سرعت و عمق جریان به‌خصوص در قوس های قلمرو مورد مطالعه از دقت مناسبی برخوردار بوده و داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های اندازه‌گیری شده شباهت زیادی دارند.

واژه‌های کلیدی: پیچان‌رود، سرعت‌جریان، شبیه‌سازی، عمق جریان، مدل عددی CCHE2D

مقدمه

امروزه رودخانه‌ها به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع فراهم‌کننده آب و انرژی برای انسان، به منزله شاهرگ جوامع بشری قلمداد می‌شوند و علیرغم خسارات بی‌شماری که از دیرباز به انسان‌ها وارد نموده‌اند، به دلیل تاثیر ویژه‌ای که در زندگی بشر و شکل‌گیری تمدن‌های مختلف داشته‌اند، همواره مورد توجه بوده‌اند لذا بررسی رفتار آنها از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است(۱۰). در قوس رودخانه‌ها معمولاً یافتن محل مناسب آبگیرها، تثبیت کناره‌ها یا بستر فرسایشی، انحراف جریان وکشتیرانی از جهات مختلف مورد بررسی است و این مسائل به ضعف و قوت جریان‌های ثانویه، خیزاب، توزیع سرعت، توپوگرافی بستر و مشخصات هندسی پیچان‌رود بستگی دارد (۹). اندرکنش نیروهای هیدرودینامیکی جریان در پیچان‌رودها می‌تواند منجر به گسترش جریان به سیلاب دشت‌ها و فرسایش‌پذیری کناره‌های رودخانه گردد. از این رو تحلیل هیدرودینامیکی جریان در پیچان‌رودها، در طراحی و اجرای طرح‌های مهندسی رودخانه و سیلاب، مؤثر بوده و باید به دقت مورد بررسی قرار گیرد (۷). بدین منظور، استفاده از مدل‌های عددی به‌دلیل سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری بالا در تغییر پارامترهای جریان و هزینه‌های کمتر نسبت به مدل‌های فیزیکی، جایگاه ویژه‌ای دارند. در زمینه تحلیل فرآیندهایی چون هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در رودخانه، مطالعات متعددی انجام شده است. برخی از این مطالعات در مورد مدل‌های عددی به شرح زیر می‌باشند:

خسروی (۸)، از مدل عددی دوبعدیCCHE2D[1] برای شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی، حدفاصل سد استقلال تا پل شهرستان میناب–استان هرمزگان، پرداخت و به این نتیجه رسید که مدل از قابلیت خوبی جهت پیش‌بینی مشخصات جریان و رسوب در رودخانه‌های پیچان‌رودی برخوردار است. فتحی و همکاران (۳)، برای شبیه‌سازی عددی فرسایش کناری در رودخانه‌های طبیعی از مدل عددی دوبعدی CCHE2D در رودخانه‌ی فارسان که دارای بار رسوبی و تغییرات زیاد می‌باشد استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از مدل و داده‌ها قابلیت مدل CCHE2D برای شبیه‌سازی فرسایش کناری در این رودخانه را نشان داد. فتحی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر (۴)، به شبیه‌سازی الگوی جریان رودخانه فارسان با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند. نتایج حاکی از قابلیت بالای مدل جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی است. ابراهیمی و همکاران (۲)، به مدل‌سازی ریاضی اثر حذف پیچان‌رودها در تغییر میزان فرسایش در پیچان‌رود گنجیه رودخانه کارون پرداختند. نتایج نشان داد که در ۱۶ کیلومتر ابتدایی پیچان‌رود، در طول زمان تخلیه رسوب کمی وجود دارد. با حذف پیچانرود در پایین دست، تخلیه رسوب باعث از بین بردن پیچ و خم رودخانه و ازبین بردن تعادل در

1- Center Computational Hydro science and Engineering Two-dimensional

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

مقایسه با شرایط قبل از حذف پیچان‌رود می‌شود. پس از حذف پیچان‌رود در ۱۶ تا ۱۸ کیلومتر ابتدایی همچنین ۳۵ تا ۴۰ کیلومتر انتهایی به وزن رسوبات و تراکم آنها در طول زمان افزوده شده و رسوبات انباشته می شوند. نیکنام و همکاران (۱۲)، به بررسی اثر دبی‌های سیلابی مختلف بر تغییرات رودخانه کر در محدوده بین پل عباس‌آباد و سد درودزن پرداختند. نتایج نشان داد که در هنگام بروز سیلاب در رودخانه، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی اطراف آن می‌شود. در این شرایط، به دلیل تفاوت بین زبری سیلاب‌دشت و رودخانه اصلی، سرعت جریان بر روی سیلاب‌دشت بسیار کمتر از سرعت در رودخانه اصلی بوده و لذا این اختلاف سرعت نیز باعث ایجاد لایه‌های برشی در محل اتصال جریان رودخانه اصلی و سیلاب‌دشت در ورودی بازه شده و آشفتگی‌های نسبتاً بزرگی را ایجاد می‌کند. تاج‌بخش و موسوی جهرمی (۱۴)، با استفاده از مدل CCHE2D به پیش‌بینی و پایش فرآیندهای حاکم بر جریان در یک پیچان‌رود طبیعی پرداختند. نتایج نشان داد که به دلیل جریان حلزونی عمق بستر در محل قوس خارجی افزایش بیشتری دارد. خسروی و همکاران (۷)، در تحقیقی به ارزیابی قابلیت مدل عددی CCHE2D در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب در پیچان‌رود پایین‌دست سد میناب پرداختند. نتایج بیانگر دقت مناسب و خطای ناچیز مدل در پیش‌بینی پارامترهای جریان و رسوب می‌باشد. نوحه‌گر و همکاران (۱۳)، به شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان رودخانه‌ی مخروط افکنه‌ای رودان با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که جریان حول جزایر رسوبی تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و این جزایر در دبی‌های مختلف، اثرگذاری متفاوتی بر روی الگوی جریان در ناحیه مورد بررسی دارند. خطای مدل برای پارامتر عمق، با شاخص RMSE برابر ۰/۰۸۵۱ و با شاخص MAPE برابر ۵/۰۲ درصد برآورد گردید. مدل مذکور در پیش‌بینی مقادیر عمق جریان، کمترین خطا را داشته، لذا نتایج تحقیق، توانمندی بالای مدل در پیش‌بینی دقیق پارامتر عمق جریان را تایید می‌کند. حسن و همکاران (۵)، با استفاده از مدل CCHE2D در بازه‌ای از رودخانه مودا، 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 (۱۸)، با بررسی مدل ریاضی دو بعدی CCHE2D و مدل یک بعدی HEC-RAS در رودخانه مردکا، به این نتیجه رسید که اگرچه مدل‌های یک‌بعدی 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 (۶)، مدل هیدرودینامیک دوبعدی CCHE2D را برای مطالعه تغییرات جریان در رودخانه‌های روباز توسعه دادند. نتایج تحقیقات ایشان حاکی از آن است که این مدل را می‌توان برای مطالعه جریان‌های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرآیندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌های آبرفتی به کار برد. وو و وانگ (۱۶)، در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداختند. آنها با استفاده از مدل‌های عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که تمام مدل‌های آشفتگی نتایجی واقعی در مورد جریان‌های ساده ارائه می‌کنند، اما در خصوص جریان‌های پیچیده، سه مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (استاندارد، غیرتعادلی و RNG) نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. نسار (۱۱)، مدل CCHE2D را برای بازه‌ای از رودخانه نیل اجرا کرده و با استفاده از آنالیز حساسیت چند پارامتره نشان داد که جریان در رودخانه نیل بیشتر توسط ضریب زبری بستر کنترل می‌شود. نگاهی به مطالعات صورت‌گرفته، نشان می‌دهد که هر چند استفاده از مدل‌های سه‌بعدی ممکن است نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های دوبعدی داشته باشد، ولی استفاده از آنها نیاز به اندازه‌گیری‌های میدانی دقیق‌تر و استفاده از وسایلی است که اغلب پرهزینه بوده و نصب و راه‌اندازی آنها در شرایط طبیعی فوق‌العاده مشکل است. از این رو استفاده از مدلی دوبعدی با توانایی بالا می‌تواند سودمند باشد. لذا با توجه به اهمیت بررسی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی، در این تحقیق با کمک مدل دوبعدی CCHE2D، الگوی جریان در قوس رودخانه، تغییرات سرعت و عمق جریان در مقاطع مختلف یک بازه پیچان‌رودی به طول ۴/۵ کیلومتر در بالادست سد درودزن مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت.

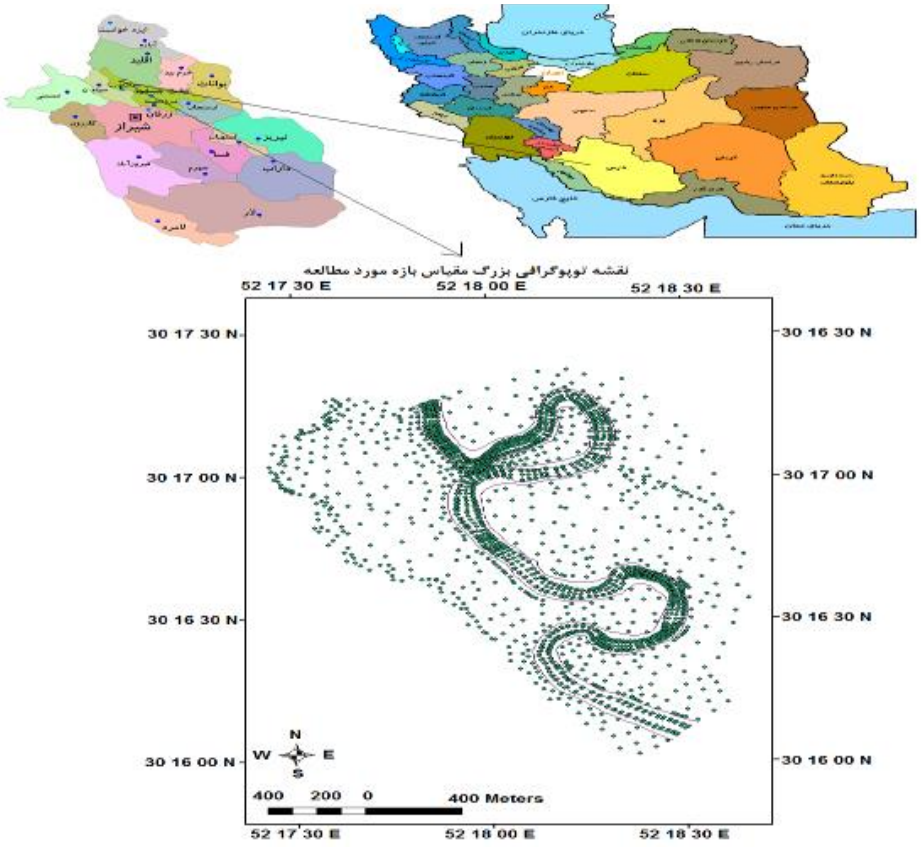
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه موردمطالعه

محدوده مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه کر از محل پل عباس‌آباد تا سد درودزن شهرستان کامفیروز، استان فارس است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی ″۱۸ ′۱۸ °۵۲ تا ″۲۱ ′۱۸ °۵۲ طول شرقی و ″۱۸ ′۱۷ °۳۰ تا ″۲۰ ′۱۶ °۳۰ عرض شمالی قرار گرفته است. طول بازه حدود ۴/۵ کیلومتر و با توجه به تراز توپوگرافی ابتدا و انتهای بازه به ترتیب در حدود ۱۶۹۶ و ۱۶۹۱ متر بالاتر از سطح دریا، می‌باشد(شکل ۱).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان فارس
Figure 1. Location of the study area in Fars province

روش تحقیق

مشخصات مدل عددی CCHE2D

مدل CCHE2D یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان ماندگار، غیر ماندگار آشفته و انتقال رسوب در رودخانه‌های باز است که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی آب (NCCHE)، دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. این مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی بوده، که برای ساخت هندسه میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH برخوردار است و حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار، با عنوان CCHE-GUI انجام می‌شود.

معادلات حاکم بر جریان

مدل عددی CCHE2D، برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (Depth - Average) استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی معادلات انتقال آشفتگی، از دو مدل صفر معادله‌ای به نام‌های توزیع سهموی و مدل طول‌اختلاط لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای مدل k–ε استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش اجزای محدود صورت می گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به ترتیب با استفاده از روش‌های: تصحیح سرعت و تکرار گوس- سایدل و حداکثر ضمنی یا SIP انجام می شود (۱۷، ۱۶). در ذیل معادلات پیوستگی (رابطه ۱) و حرکت (رابطه ۲ و ۳) آمده است.

الف) معادله پیوستگی

$$\frac{\delta z}{\delta t}+\frac{\delta(hu)}{\delta x}+\frac{\delta(hv)}{\delta y}=0 \qquad \text{رابطه}(۱)$$

و ب) معادله حرکت

$$\frac{\delta u}{\delta t}+u\frac{\delta u}{\delta x}+u\frac{\delta u}{\delta y}=-g\frac{\delta z}{\delta x}+\frac{1}{h}\left[\frac{\delta(h\tau_{xx})}{\delta x}+\frac{\delta(h\tau_{xy})}{\delta y}\right]-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}+f_{cor}v \qquad \text{رابطه (۲)}$$

$$\frac{\delta v}{\delta}+u\frac{\delta v}{\delta x}+v\frac{\delta v}{\delta y}=-g\frac{\delta z}{\delta y}+\frac{1}{h}\left[\frac{\delta(h\tau_{xy})}{\delta x}+\frac{\delta(h\tau_{yy})}{\delta y}\right]-\frac{\tau_{by}}{\rho h}+f_{cor}u \qquad \text{رابطه (۳)}$$

که در این معادلات 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(برحسب متر بر مجذور ثانیه)، Z بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب (متر)، ρ بر روی قوس‌های متوالی رودخانه بود تا بتوان تاثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را در سر پیچ‌ها بر

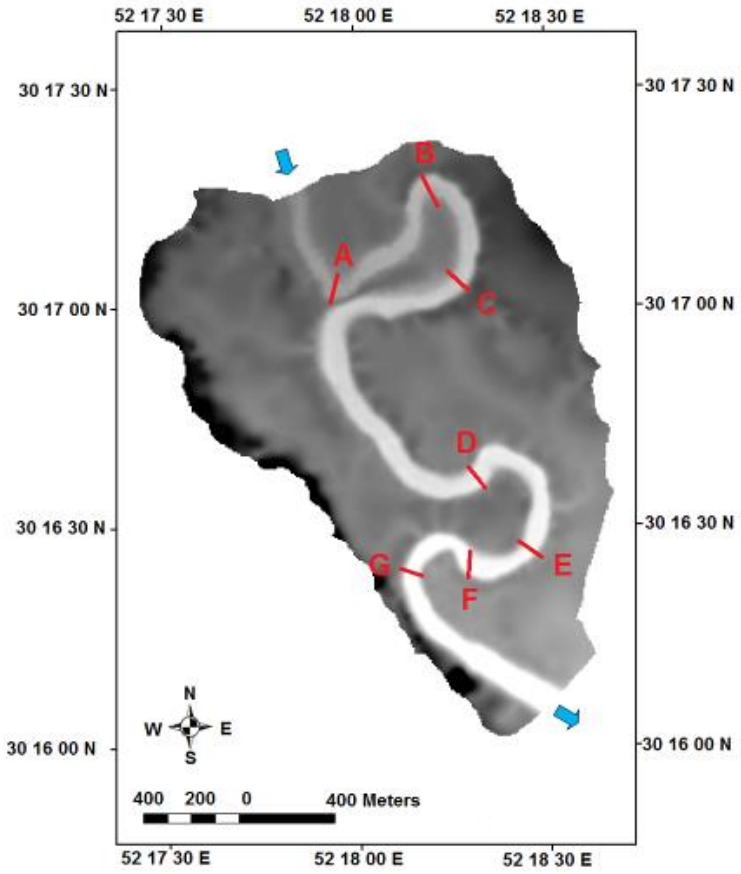
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

فرسایش کناره‌ها و کف بستر رودخانه بررسی کرد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب از سرعت‌سنج (مولینه)، استفاده شد (جدول ۱). نظر به اینکه مقدار سرعت در نقاط مختلف عرض رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر است، سرعت متوسط در طول هر مقطع و حداقل در ده نقطه (مقطع با عرض ۵۰ متر) و حداکثر شانزده نقطه (مقطع با عرض ۸۰ متر) با فواصل مساوی از عمق آب، اندازه‌گیری شد. بدین نحو که ابتدا مقطع عرضی را به اندازه‌های مساوی تقسیم کرده و تعدادی محور عمودی بدست آمد؛ در هر یک از محورهای عمودی سرعت آب با روش انتگراسیون عمقی اندازه‌گیری شد. شایان ذکر است در روش انتگراسیون عمقی مولینه با سرعت یکنواخت و در نقاط تعیین شده در آب پایین برده می‌شود سپس به تدریج بالا آورده می‌شود. سرعت متوسط در هر محور بدست آمد و در نهایت سرعت میانگین مقطع عرضی محاسبه گردید (۱). سرعت جریان آب در دو طرف رودخانه کمتر و در وسط بیشتر است. همچنین سرعت آب در اعماق مختلف رودخانه متفاوت است که بیشترین سرعت در سطح آب و کمترین آن در عمق نزدیک به کف رودخانه است. لذا برای محاسبه سرعت، سرعت متوسط را اندازه گیری می کنند. شکل (۲) نمایی از این هفت مقطع را در طول بازه مکانی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات سرعت سنج (مولینه)

Table 1. Specifications speedometer (current meter)

نوع مولینه	فرمول	ضریبa	ضریب b
آلمانی	V= 0.251 N + 0.0089	0.251	0.0089



شکل ۲- مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای جریان بازه مورد مطالعه رودخانه کر

Figure 2. The parameters measured during the period studied sections of the river Kor

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

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

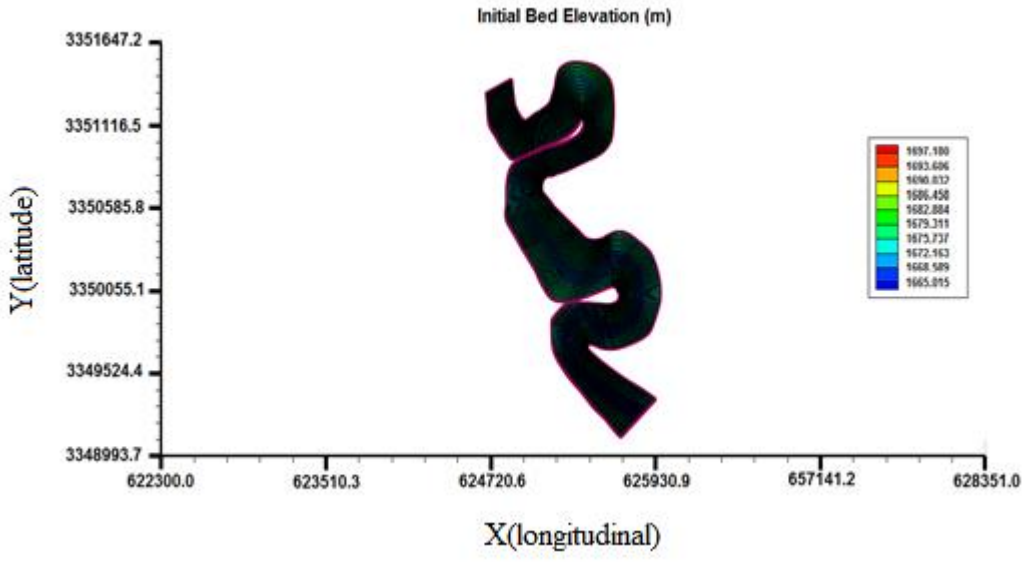
جدول ۲- مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه
Table 2. Parameters values speed, depth and flow rates measured at different times during the study

	حداکثر سرعت متوسط عمقی (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق جریان (m)	دبی جریان (m^3/s)
مقطع A	۱/۴۷	۰/۷۷	۰/۹۶	۶۰
مقطع B	۱/۳۲	۰/۷۳	۱	۵۹/۱۳
مقطع C	۱/۳	۰/۷۱	۰/۷۸	۵۸/۸۵
مقطعD	۱	۰/۳۸	۱/۳۷	۵۷/۴۸
مقطعE	۰/۸۴	۰/۳۰	۲/۱۱	۵۶/۷۰
مقطعF	۰/۶۵	۰/۲۲	۲/۳۵	۵۶/۵۰
مقطع G	۰/۶۰	۰/۲۰	۲/۹۲	۵۶/۳۵
مقطع ورودی	۱/۵	۰/۸۰	۱	۶۰/۵
مقطع خروجی	۰/۵۸	۰/۱۹	۲	۵۶

اختلاف دبی ۴/۵ متر مکعب بر ثانیه، مقطع ورودی و مقطع خروجی مربوط به تلفات جریان (کانال فرعی جهت آبیاری زمین های کشاورزی) هستند. مقطع ورودی و خروجی اشاره شده در جدول فوق به ترتیب مقاطع ابتدا و انتهای بازه مورد مطالعه است

تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D

در مدل CCHE2D برای ساخت هندسه میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH، استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود به علت اینکه شکل بازه مطالعاتی تک‌شاخه‌ای و بدون انشعاب است، حالت تک بلوکی یا تک‌شاخه‌ای برای نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی انتخاب گردید، در این شکل محور افقی طول و محور عمودی عرض جغرافیایی بازه مورد مطالعه می‌باشد و راهنمای نقشه تراز توپوگرافی بازه مکانی مورد مطالعه رودخانه کر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شبکه محاسباتی (Mesh)، ساخته شده بازه مورد مطالعه رودخانه کر(محور افقی طول جغرافیایی و محور عمودی عرض جغرافیایی بر مبنای UTM می باشد)
Figure 3. Computing Grid (Mesh), made the study period Kor River (The horizontal axis is longitudinal and the vertical axis is latitude based on the UTM)

شبیه‌سازی الگوی جریان

برای انجام شبیه‌سازی الگوی جریان رودخانه کر با استفاده از نرم افزار CCHE-GUI، ابتدا شرایط اولیه جریان شامل: تراز آب در بالادست و پایین‌دست و ضریب زبری تنظیم می‌شود؛ در مرحله بعدی، عامل‌های جریان آب مانند، گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی، محاسبه جریان ناپایدار و انتخاب فرمول محاسبه زبری، تنظیم می‌شود؛ در مرحله آخر نیز شرایط مرزی ورودی و خروجی رودخانه، تنظیم می‌گردد، پس از اتمام تنظیمات مدل، مرحله‌ی اجرا (Run) مدل CCHE2D است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

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 شرایط استاندارد در خصوص تنظیمات مدل و اندازه‌گیری پارامترها به وجود آید.

نتایج و بحث

در بازه مورد مطالعه رودخانه کر، فرضیه تغییر ضریب زبری بر الگوی جریان با استفاده از مقدار تخمینی (مشاهدات صحرایی) در دامنه ۰/۰۴۰ تا ۰/۰۸۰ و تغییر آن و مقدار به دست آمده از روابط (معادلات) در دامنه ۰/۰۳۰ تا ۰/۰۷۰ مقایسه گردید. در جدول (۳) و (۴)، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، سرعت جریان (V) و عمق جریان (P)، در حالت تغییر ضریب زبری مقایسه شده است. در شکل (۴) برای تغییرات عمق جریان در حالت تغییر ضریب زبری برای نمونه سه مقطع (A، B و C) مورد مقایسه قرار گرفته است. و همچنین در شکل (۵) تغییرات سرعت جریان (V) و شکل (۶) تغییرات عمق جریان در حالت تغییر ضریب زبری مقایسه شده است.

جدول ۳- مقایسه پارامتر متوسط سرعت جریان (V) در حالت تغییر ضریب زبری

Table 3. Comparison of average parameter flow velocity (V) in the roughness coefficient

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر متوسط سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده(m/s)	پارامتر سرعت جریان (V) محاسباتی مدل	
		شبکه محاسباتی با ابعاد ۶۰۰×۵۰	
		زبری (۰/۰۸- ۰/۰۴)	زبری (۰/۰۷- ۰/۰۳)
مقطع A	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۷۹
مقطع B	۰/۷۳	۰/۶۸	۰/۷۵
مقطع C	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۷۱
مقطع D	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۳۵
مقطع E	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۲۸
مقطع F	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۳
مقطع G	۰/۲۰	۰/۲۲	۰/۲۱

جدول ۴- مقایسه پارامتر میانگین عمق جریان (P) در حالت تغییر ضریب زبری

Table 4. Comparison of mean flow depth (P) in the roughness coefficient

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر عمق جریان (P) اندازه‌گیری شده (m)	پارامتر عمق جریان (D) محاسباتی مدل	
		شبکه محاسباتی با ابعاد ۶۰۰×۵۰	
		زبری (۰/۰۸- ۰/۰۴)	زبری (۰/۰۷- ۰/۰۳)
مقطع A	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۸
مقطع B	۱/۰۰	۱/۱۹	۱/۱۰
مقطع C	۰/۷۸	۱/۱	۰/۸۰
مقطع D	۱/۳۷	۱/۳۹	۱/۳۸
مقطع E	۲/۱۱	۲/۴	۲/۰۰
مقطع F	۲/۳۵	۲/۷	۲/۴۰
مقطع G	۲/۹۲	۳/۴	۲/۰۰

همان‌گونه که از جداول (۳)، (۴) و شکل (۴) مشاهده می‌شود، استفاده از ضریب زبری محاسباتی بدست آمده از روابط و معادلات در دامنه ۰/۰۷۰- ۰/۰۳۰، نتایج دقیق تری را به دست می‌دهد.

ارزیابی کارایی مدل

در ادامه تحقیق، نتایج به دست آمده از مدل(شبیه سازی شده)، با داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت میان‌گیری شده از داده‌ها مقایسه می‌گردد تا به دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب انرژی پی برده شود. جهت بررسی دقیق مدل از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد که عبارتند از جذر میانگین مربع خطا و میانگین درصد خطای مطلق که روابط آنها به شرح ذیل است:

$$RMSE = \sqrt{\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_e)^2\right|}$$

رابطه(۶)

که در این معادله، Q_o، مقدار مشاهداتی یا اندازه گیری شده و Q_e، مقدار محاسباتی از مدل است.

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{y_t - \hat{y}}{y_t}\right| * 100$$

رابطه (۷)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

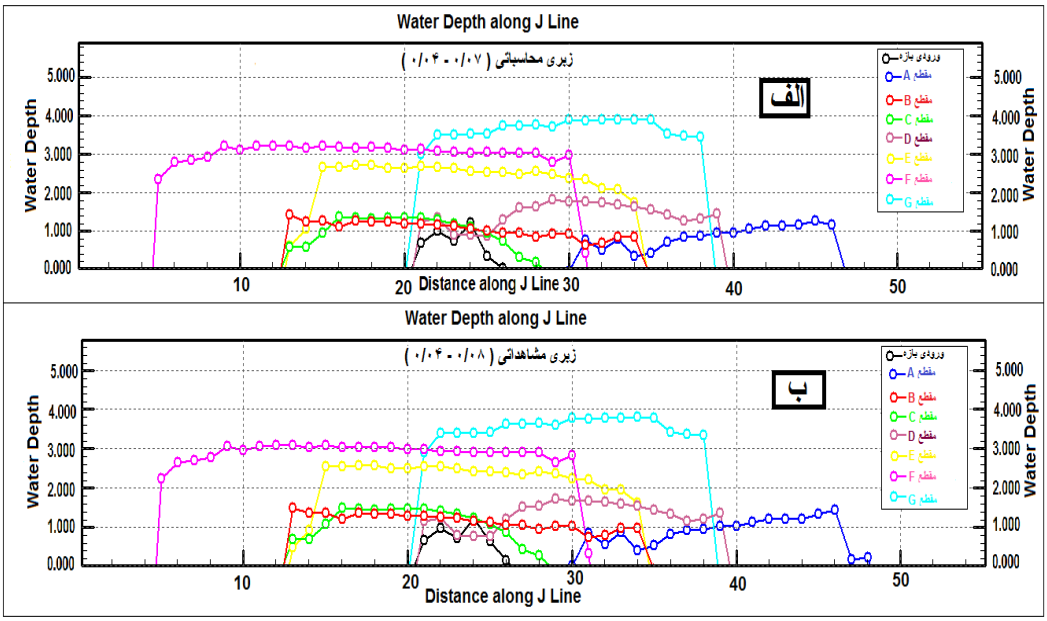
که در این معادله، y_t، مقدار مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده و $\hat{y}$، مقدار محاسباتی از مدل است. در جدول (۵) نتایج دو روش RMSE و MAPE برای نشان دادن میزان دقت مدل در برآورد پارامترهای سرعت جریان آب، تراز (عمق) آب و شیب انرژی آورده شده است.

جدول ۵- نتایج مقایسه سرعت جریان، عمق آب و شیب انرژی مشاهداتی و برآوردی بر اساس دو معیار R.M.S.E و M.A.P.E

Table 5. Comparison of velocity, water depth and energy slope observed and estimated based on two criteria R.M.S.E and M.A.P.E

نوع روش	پارامتر سرعت جریان آب	پارامتر عمق آب	پارامتر شیب انرژی
RMSE	۰/۰۲۷	۰/۱۳	۰/۰۰۰۰۴
MAPE	٪۰/۵۱	٪۰/۶۵	٪۳/۳۳

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



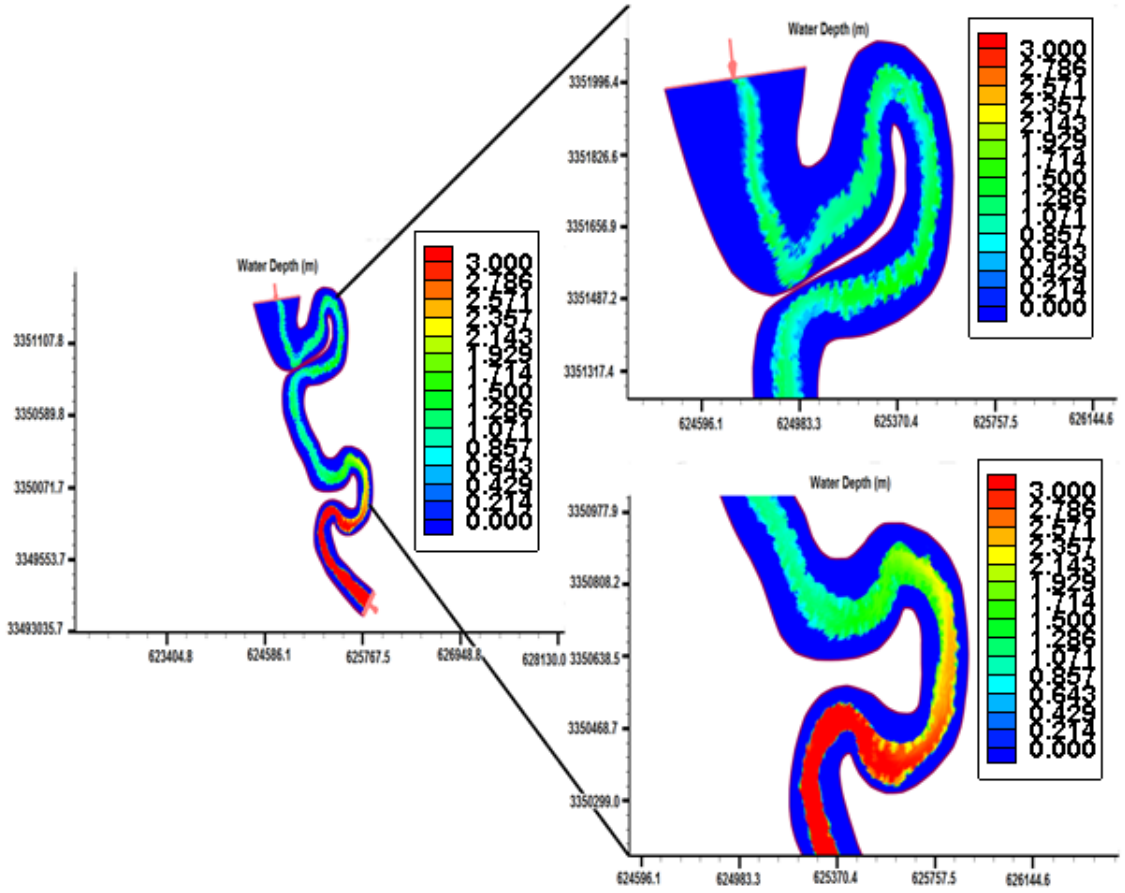
شکل ۴- نمودار تغییرات عمق جریان برای مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه و برای ضرایب زبری الف) محاسباتی و ب) مشاهداتی

Figure 4. The current depth charts for different sections of the study period and for roughness coefficients a) computational and B) observation

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

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]



شکل ۵– تصویر توزیع متغیر عمق جریان در بازه مورد مطالعه رودخانه کر
Figure 5. Picture of depth variable distribution

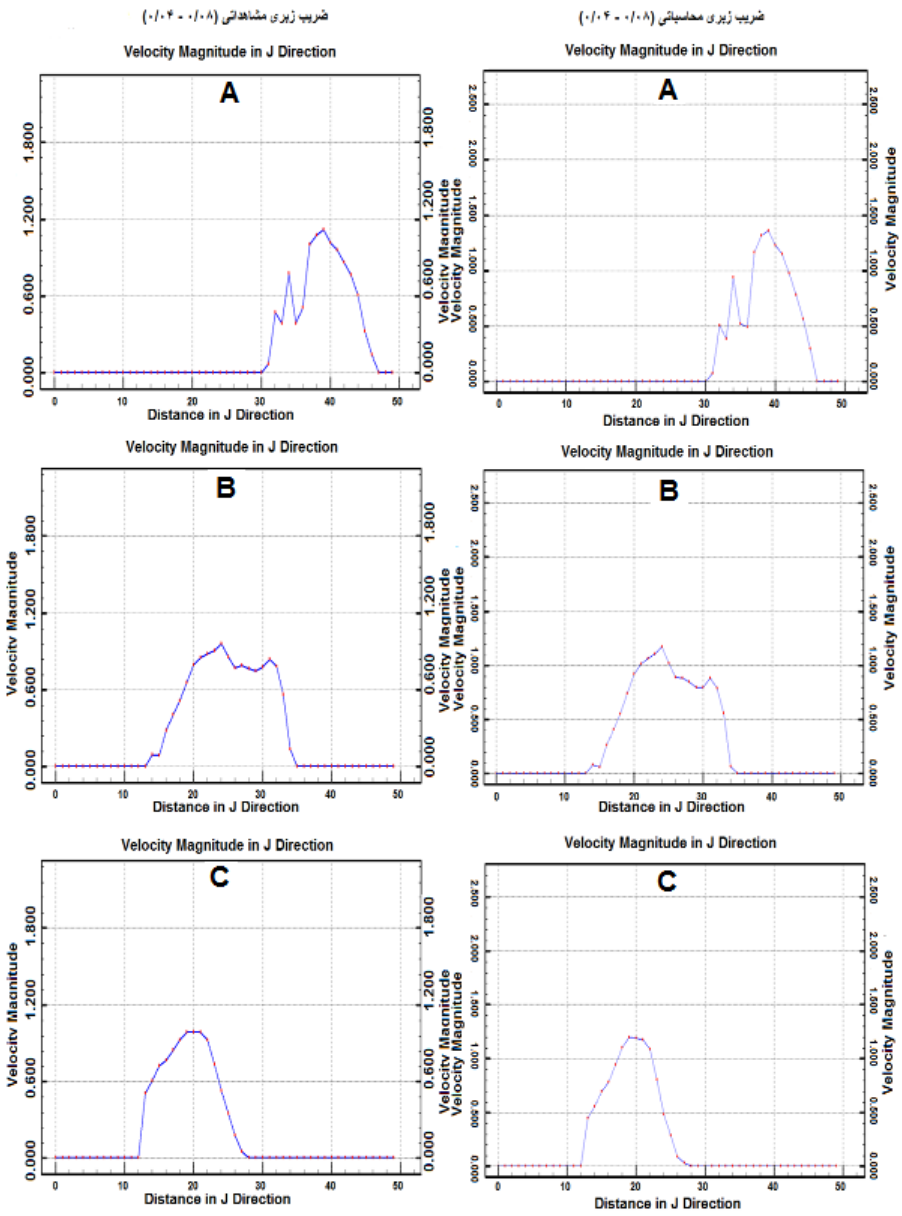
پارامتر عمق آب

اصولاً در محل ایجاد قوس در رودخانه‌ها، مقدار ماکزیمم تراز آب، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) تشکیل می‌شود (۱۵). نتایج حاصل از مدل و مشاهدات در طبیعت نیز تأییدی بر مطالب فوق می‌باشد؛ زیرا در محل وقوع قوس (هفت مقطع بازه مطالعاتی)، ماکزیمم عمق آب پیش‌بینی شده توسط مدل و مشاهدات در طبیعت، در ساحل مقعر ایجاد شده است. به این ترتیب توانمندی مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان آب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۴) و (۵)، تراز سطح آب در قوس‌های خارجی بازه مورد مطالعه بالاتر از قوس داخلی می‌باشد که عامل تشکیل‌دهنده آن را می‌توان نیروی گریز از مرکز معرفی کرد که باعث حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در قوس خارجی می‌شود. در محدوده‌های پیچان‌رودی بازه مورد مطالعه نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر نموده و باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌گردد که درنتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی بالا رفته و در قوس داخلی کاهش می‌یابد، این پدیده باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در داخل مقطع خواهد شد، درنتیجه در اثر عدم تعادل موضعی بین نیروی گریز از مرکز و گرادیان فشار جانبی، جریان ثانویه در داخل مقطع عرضی شکل می‌گیرد. این روند از ورودی قوس اول تا خروجی قوس ادامه دارد.

بررسی پارامتر عمق آب رودخانه نشان می‌دهد، وقتی رودخانه دارای جریان عادی باشد (دبی پایه) سیلاب‌دشت تحت تأثیر جریان رودخانه نمی‌باشد، در هنگام بروز سیلاب در رودخانه، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی اطراف آن می‌شود که با نتایج نیکنام و همکاران(۱۲) همخوانی دارد. در این شرایط، به دلیل تفاوت بین زبری سیلاب‌دشت و رودخانه اصلی، سرعت جریان بر روی سیلاب‌دشت بسیار کمتر از سرعت در رودخانه اصلی بوده و لذا این اختلاف سرعت نیز باعث ایجاد لایه‌های برشی در محل اتصال جریان رودخانه اصلی و سیلاب‌دشت در ورودی بازه شده و آشفتگی‌های نسبتاً بزرگی را ایجاد می‌کند، که با نتایج نسار (۱۱) در رودخانه نیل، مبنی بر تأثیر ضریب زبری مطابقت دارد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]



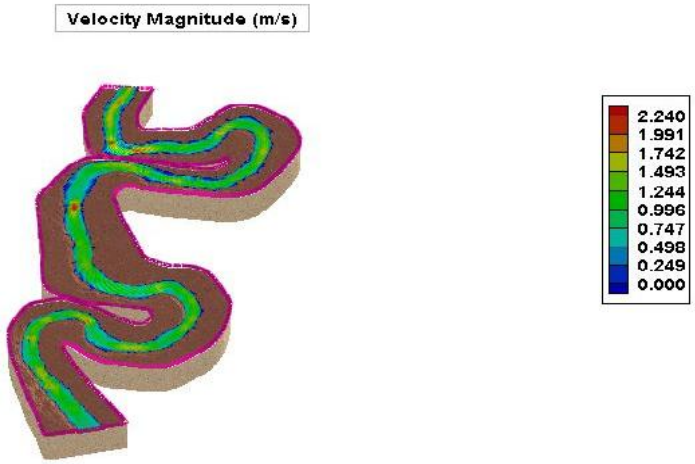
شکل۶- نمودار تغییرات سرعت برای مقاطع (A، B و C) بازه مورد مطالعه و برای ضرایب زبری محاسباتی و مشاهداتی
Figure 6. Chart speed changes to sections (A, B and C) study area for roughness coefficients computational and observational

پارامتر سرعت جریان آب

تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول رودخانه نشان می‌دهد که در بازه مستقیم بعد از قوس اول، ماکزیمم مقدار سرعت آب در وسط رودخانه اتفاق می‌افتد. انحنای بالای قوس باعث می‌شود که تغییراتی مانند جریان ثانویه، گریز از مرکز و سرعت جریان در قوس شدت بگیرند. با ورود جریان به قوس اول، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. علت این رفتار از آنجا ناشی می‌شود که با ورود جریان به قوس در اثر نیروی گریز از مرکز، در جداره خارجی سطح آب افزایش یافته و روند این افزایش نیز در طول رودخانه صعودی است؛ همین فرآیند به شکل معکوسی برای جداره داخلی رودخانه نیز رخ می‌دهد؛ لذا در نزدیکی جداره داخلی، گرادیان طولی فشار منفی بوده و باعث افزایش سرعت ذرات سیال در این ناحیه می‌شود؛ در نزدیکی جداره خارجی نیز به همین ترتیب، سرعت ذرات سیال در طول رودخانه کاهش می‌یابد؛ لذا در مقاطع ورودی، حداکثر سرعت به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود که با نتایج تاج‌بخش و موسوی‌جهرمی (۱۴) مطابقت دارد. با قدرت یافتن جریان ثانویه و شکل‌گیری جریان حلزونی در مقطع بعد از ورودی قوس، حداکثر سرعت از جداره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه رودخانه متمایل می‌شود. با پیشروی جریان در

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]
[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

رودخانه‌های، این روند ادامه داشته، تا جایی‌که جریان ثانویه بتواند بر گرادیان طولی فشار غلبه کند؛ همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود. حداکثر سرعت جریان در کل قلمرو جریان نیز در قوس خارجی ناحیه است؛ علت این امر، محدود بودن این ناحیه از رودخانه توسط دیواره‌ها و عدم پخش سیلاب در نواحی سیلاب‌دشت می‌باشد. در هنگام خروج جریان از قوس اول، تغییرات گرادیان طولی فشار برعکس آن چیزی است که در ورودی رخ می‌دهد. در جداره خارجی، گرادیان طولی منفی است لذا سرعت سیال افزایش و در جداره داخلی گرادیان طولی مثبت و لذا سرعت سیال کاهش می‌یابد. نتایج حاصل با تحقیقات خسروی (۸) بر روی رودخانه میناب مطابقت کامل دارد. مدل مذکور در پیش‌بینی مقادیر سرعت جریان، کمترین خطای ممکن را داشته و نتایج حاصل از مدل اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. لذا نتایج پژوهش، توانمندی بالای مدل در پیش‌بینی دقیق عامل سرعت جریان را تایید نمود که با نتایج سایر محققین از جمله نوحه‌گر و همکاران (۱۳) مطابقت دارد.



شکل ۷- تصویر توزیع متغیر سرعت در بازه مورد مطالعه
Figure 7. Speed variable distribution in the range of study

با بهره‌گیری از یک مدل دوبعدی به نام CCHE2D، الگوی جریان آب برتغییرات رودخانه در یک بازه‌ی طبیعی پیچان‌رود شبیه‌سازی گردید و نتایج حاصل از تحقیق، قابلیت مدل عددی به‌کار رفته را در شبیه‌سازی الگوی جریان با استفاده از پارامترهای جریان تأیید نمود، که با نتایج فتحی و هنربخش (۳) بر روی رودخانه خشکه‌رود فارسان و خسروی(۷، ۸) بر روی رودخانه میناب مطابقت دارد. بنابراین با بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت، مدل عددی حاضر قادر به شبیه‌سازی الگوی جریان رودخانه در رودخانه‌های پیچان‌رودی به نحوی مطلوب می‌باشد.

در این پژوهش با توجه به محدودیت‌ها و تجهیزات موجود، مدلی از بازه‌ی پیچان‌رود انتخابی، ساخته و الگوی جریان برای بازه مربوطه شبیه‌سازی گردید. در این روند حتما نقص‌هایی وجود داشته و حال که به انتهای کار رسیدیم، دریافتیم که از روش‌های اصلاحی و جایگزین در بخش‌های مختلف اعم از: اندازه‌گیری، اجرای مدل و غیره می‌توان استفاده کرد. با توجه به مطالب و نتایج حاصل از این تحقیق، جهت ادامه کار در خصوص این موضوع، پیشنهادات زیر ارایه می‌گردند:

۱- پیش از شروع به کار با هر مدل عددی رودخانه، جهت تولید شبکه محاسباتی با نرم افزار تولیدکننده شبکه، از رقومی بودن نقشه بازه رودخانه در هر سه بعد (X ، Y و Z) مطمئن شوید.

۲- برای ارزیابی دقیق‌تر مدل عددی، باید اندازه‌گیری مقادیر دبی و سرعت در تعداد مقاطع بیشتر و با شدت‌های مختلف، به خصوص دبی‌های سیلابی انجام شود.

۳- توصیه می‌شود، مدلی از رودخانه ایجاد شود تا همه عوامل تاثیرگذار بر الگوی جریان، اعم ازخصوصیات هندسی رودخانه، سازه‌ها و پل‌ها را بررسی کنیم.

۴- توصیه می‌شود، از دستگاه‌های دقیق‌تری برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب استفاده گردد، به طوری که بسته به نیاز مدل عددی، بتواند سرعت جریان دوبعدی و سه‌بعدی را برداشت کند.

۵- و در پایان با عنایت به نتایج به دست آمده از مدل عددی CCHE2D، پیشنهاد می‌شود، الگوی توسعه و تحول پیچان‌رود در رودخانه کر دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

در پایان، از شرکت آب منطقه‌ای استان فارس که در این تحقیق ما را همراهی کردند، تشکر می‌گردد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

منابع

1. Alizadeh, A. 2006. Principles of Applied Hydrology, 19 th edition, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian).
2. Ebrahimi, E. and M. Shafahi Bajestani. 2014. Mathematical Modeling of the Effect of Meanders Removal on Changes in Erosion Rate, Case Study: in Karun River's Gangieh Meander, European Online Journal of Natural and Social Sciences, 4: 366-377.
3. Fathi, M., A. Honarbakhsh and M. Rostami. 2012. Simulate the flow pattern of the river meandering Using CCHE2D, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 19: 59-66 (In Persian).
4. Fathi, M., A. Honarbakhsh, M. Rostami and D. Davoodian Dehkordi. 2012. simulate the flow pattern with a two-dimensional numerical models in a range of natural meanders, Case Study: Khoshkerood River Farsan, Chaharmahal and Bakhtiari, Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Soil and Water Sciences, 62: 95-108 (In Persian).
5. Hasan, Z., A. Ghani and N. Zakaria. 2007. Application of 2-D Modeling for Muda River Using CCHE2D, 2nd International Conference on managing River Basins.
6. Jia Y. and S.Wang. 2008. CCHE2D: A Two Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. Technical Report CCHE TR-2, NCCHE, University of Mississippi.
7. Khosravi, Gh., M.A. Rudd and M. Najafi. 2015. Estimation of a numerical model to simulate the hydrodynamic and sediment, Case Study: Meander Dam downstream Minab, Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, 30: 67-72 (In Persian).
8. Khosravi, G. 2012. The numerical simulation of flow and sediment model CCHE2D (Case Study: meander downstream Minab). Master's thesis, University of Hormozgan, Bandarabbas, Iran (In Persian).
9. Maghrebi, M. 2007. Survey of secondary flows in open channel by laboratory Model, Hydraulic Conference, and Iranian Hydraulic Association. K.N.Toosi University of Technology (In Persian).
10. Naji Abhari, M. 2008. Numerical Simulation of flow by SSIIM. Fourth National Congress on River Engineering, Tehran University (In Persian).
11. Nassar, M. A. 2011. Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. Journal of Hydro-environment Research, 3: 187-195.
12. Niknam, A., Gh. Khosravi and M. Kazemi. 2014. The effect of torrential flow of the river changes by using CCHE2D, Case Study: Kor River, located between the bridge and the dam Abbas Abad, The first regional conference on the sea, the development of water resources and coastal areas of the Persian Gulf, Bandar Abbas, Iran (In Persian).
13. Nohegar, A., H. Mohsenzadeh and O. Bazrafshan. 2015. The two-dimensional simulation of the flow pattern of the river alluvial fans using the model CCHE2D, Case Study: Rivers River, Environmental Erosion Research Journal, 18: 15-31(In Persian).
14. Tajbakhsh, M. and S.H., Mousavi Jahromy. 2015. Modeling the effect of spur dike to control erosion of the beach with two dimensional models CCHE2D, Case Study: Karun River in Ahvaz between hydrometric stations and Farsyab, Iran Water Research Journal, 9(2): 79-89(In Persian).
15. Telvari, E.R. 2004. Fundamentals of River Training and Engineering. Education Organization Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (In Persian).
16. Wu, W. and S. Wang. 2009. Mathematical models for liquid-solid two-phase flow and Sediment, 15(3): 288-298.
17. Zhang, Y. and Y.F. Jia. 2009. CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator User's Manual -Version 3.x, Technical Report No. NCCHE-TR-2009-01, Mississippi University, MS 38677.
18. Zorkeflee, H. 2007. Application of 2-D Modelling for Muda River Using CCHE2D In. International conference on Managing Rivers in the 21 Century Solution Towards Sustainable River Basins.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]

Simulation of Flow Pattern in a Natural Meander Range using CCHE2D Hydrodynamic Model (Case Study: Meanders in Upstream of Droodzan Dam)

Abouzar Niknam[1], Gholam Reza Khosravi[2], Ahmad Nohegar[3] and Arashk Holisaz[4]

1- Graduate M.Sc. Student of Watershed Management and Engineering, University of Hormozgan
(Corresponding Author: abuzarniknam@yahoo.com)
2- Ph.D. Student of Watershed Management and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Gorgan
3- Professor, Faculty of Environment, Tehran University
4- Assistant Professor Department of Watershed Management and Engineering, University of Hormozgan
Received: July 8, 2016 Accepted: May 3, 2017

Abstract

Investigation of flow pattern in river especially intervals location erodibleit is of utmost importance. Due to the complex process of erosion and sedimentation in meanders and the importance of the flow velocity and shear stress forces on the river bank erosion, two-dimensional numerical model as CCHE2D to simulation of flow pattern of water in the range of natural meanders River Kor between Bridge Abbas abad and Droodzan Dam, Fars province was used. In this study, using large-scale topographic maps of Study area, the first model geometry and computational grid with various aspects of the preparation and finally, based flow measurement specifications, two-dimensional hydrodynamic model average depth, run and results such as changes in the depth and velocity were calculated. From two statistical criteria RMSE and MAPE to compare data from numerical model simulations and observational data were used, the error model to velocity and depth, RMSE index, respectively, 0.027, 0.13 and MAPE index, 0.51 and 0.65 percent were estimated. The results showed that, the model to predict speed and flow depth particularly in the arc of territory had studied appropriate accuracy and simulated data with measured data have many similarities.

Keywords: Flow depth, Flow velocity, Meander, Simulation, The numerical model CCHE2D

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-07]

[DOI: 10.29252/jwmr.8.16.65]