



دوره ۳۱، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۲۱، زمستان ۱۳۹۷، صفحات ۸۳-۶۹
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMEJ.2018.100548.1000

پژوهش‌های آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

مدل‌سازی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ی کر با استفاده از مدل CCHE2D (در پیچان‌رودهای سراب سد درودزن)

ابوذر نیکنام*

(نویسنده‌ی مسئول)* دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

غلامرضا خسروی

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

احمد نوحه‌گر

استاد دانشکده‌ی محیط زیست، دانشگاه تهران

ارشک حلی‌ساز

استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان

تاریخ دریافت: اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴ تاریخ پذیرش: آذرماه ۱۳۹۷

Corresponding Email: abuzarniknam@yahoo.com *

چکیده

دگرگونی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به آسیب‌های جدی شامل تغییرات عرض و تصویر افقی آبراه، فرسایش و رسوب‌گذاری بستر و سواحل، خرابی سازه‌ها و ازدست‌رفتن زمین‌های بارز منجر می‌شود. در این پژوهش از یک مدل عددی دوبعدی به نام CCHE2D، برای شبیه‌سازی اثر الگوی جریان بر تغییرات رودخانه در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی رود کر، حد فاصل پل عباس‌آباد و سد درودزن استان فارس بهره گرفته شده است. در این بررسی با بهره‌وری از نقشه‌های پستی‌وبلندی، هندسه‌ی مدل و شبکه‌ی محاسباتی با ابعاد مختلف تهییه شد و بر اساس مشخصات اندازه‌گیری‌شده‌ی جریان، مدل آب‌پویایی دوبعدی متوسط عمق، اجرا شد، و نتایجی همچون تغییرات عمق، سرعت جریان، جریان ثانویه و تنش برشی استخراج گردیدند. در پایان، با کاربرد دو معیار آماری RMSE و MAPE داده‌های حاصل از مدل‌سازی مدل عددی با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شدند. نتایج نشان دادند که این مدل در پیش‌بینی مقادیر فراسنج‌های جریان دقت مناسبی داشته و داده‌های مدل‌سازی‌شده به داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صحرائی شباهت زیادی دارند. نتایج تغییرات الگوی جریان به‌عنوان یک شاخص مؤثر در پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی و آب‌پویایی نشان می‌دهند با اصلاح مسیر و حذف پیچان‌رود در بازه‌های پیچان‌رودی رودخانه‌ی کر با تبدیل رودخانه از حالت پیچان‌رودی به مستقیم (حالت میان‌بری) از تخریب بیشتر زمین‌های کشاورزی جلوگیری می‌گردد، اما فرسایش کناره‌ها و کف بستر را افزون می‌کند که مستلزم هزینه‌ای به نسبت زیاد است. بهره‌گیری از مدل‌های پویایی سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی تغییرات رودخانه، محققان را یک گام به پیش‌بینی‌های کلی‌تر برای فرایندهای حاکم بر رودخانه‌های پیچان‌رودی نزدیک‌تر می‌کند. مدل CCHE2D نیز از توانایی خوبی برای پیش‌بینی تغییرات رودخانه‌های پیچان‌رود برخوردار است.

واژگای کلیدی: پیچان‌رود، ریخت‌شناسی رودخانه، مدل‌سازی، مدل عددی CCHE2D، ضریب زبری

Simulation of the Kor River Morphological Changes Using the CCHE2D Model (Case Study: Meanders Upstream the Dorudzan Dam)

Abouzar Niknam*

(Corresponding Author)* M.Sc. Graduate of Watershed Management, University of Hormozgan

Gholamreza Khosravi

Ph.D. Student, Watershed Management Science and Engineering, University of Agriculture and Natural Resources, Gorgan

Ahmad Nohegar

Professor of Environmental Engineering, Department of the Environment, Tehran University

Arashk Holisaz

Assistant Professor, Department of Watershed Management, University of Hormozgan

Abstract

Morphological changes in rivers lead to serious damages, including changes in the width of the waterways, changes in the drainage plan, erosion and sedimentation of the bed and banks, structural failure and loss of valuable land. A two-dimensional numerical model called CCHE2D was used to simulate the effect of the flow pattern on the riverbed changes in the reach of the natural floodplain of the Kor River between the Abbas Abad Bridge and the Dorudzan Bridge, the Province of Fars. The topographical maps of the study area, the geometry of the model, and the computational grid with different dimensions were prepared. Based on the measured follow parameters, a two-dimensional hydrodynamic model of the mean depth, performance and results such as the changes in depth, flow velocity, secondary flow and shear stress were extracted. Finally, two data sets of the RMSE and MAPE were compared using the numerical model simulation versus the collected data. The results showed that this model had a good accuracy in predicting the flow parameter values, and the simulated data were similar to those obtained from field measurements. The results of changes in the flow pattern as an effective indicator in predicting the hydraulic behavior and hydrodynamics showed that by correcting the path and removing the bends in the clay meadows of the Kor River by straightening the meanders, the heavy erosion of meander most agricultural land will be prevented. It must be emphasized that straightening the waterway entails its lining with erosion resisting materials. It can be seen that using the computational fluid dynamics for modeling the streambed variations brings researchers closer to a more general prediction for governing the processes in riverine plains. Also, the CCHE2D model has a good ability to predict the changes in the meandering rivers.

Keywords: meander, river morphology, roughness coefficient, simulation, the CCHE2D numerical model

مقدمه

مهم‌ترین پدیده در فرایندهای پوسته‌ی زمین، جریان آب‌ها است و رودها نه تنها در سیمای کلی زمین نقش دارند، بلکه شکل زیستن انسان در کره‌ی زمین را نیز تعیین می‌کنند (غفاری و همکاران ۲۰۰۶). سامانه‌های رودخانه‌ای از حیاتی‌ترین عناصر تشکیل‌دهنده‌ی سطح خارجی زمین اند و از جنبه‌های گوناگون مورد توجه انسان قرار دارند. خصوصیات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها به واسطه‌ی ویژگی پویای آن‌ها، همواره در حال تغییر است، و این تغییرات می‌تواند بر سازه‌های بناشده در حاشیه‌ی رودخانه‌ها، زمین‌های کشاورزی و مانند آن‌ها اثر منفی بگذارد. رودخانه‌های طبیعی تحت تأثیر عوامل و متغیرهای مختلف، پیوسته از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در حال تغییر اند. تغییرات آب‌شناسی طبیعت به تدریج موجب تغییر موقعیت و ریخت‌شناسی رودخانه‌ها می‌شود. تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها در حدود یک قرن، به خوبی فهمیدنی و ثابت‌کردنی است. شواهد ریخت‌شناسی رودخانه‌ها نشان می‌دهد که بیشتر رودخانه‌ها در معرض تغییرات مستمر قرار دارند؛ تغییراتی که بخشی از تحول ریخت‌شناسی آن‌ها است. الگوی جریان در رودخانه‌ها بسیار پیچیده است. علت این پیچیدگی، آشفتگی و طبیعت سه‌بعدی جریان و پستی‌وبلندی و تغییرهای عمقی است. با ورود جریان به قوس رودخانه بر اثر اختلاف سرعت خطی جریان در دو ساحل رودخانه و اعمال نیروی جانب مرکز و اندرکنش آن با دیگر نیروهای حاکم، جریان ثانویه ایجاد و باعث بازتوزیع در جهت عرضی مقطع می‌شود. این نابرابری نیرو در دو ساحل رود موجب می‌گردد در یک ساحل، فرسایش و در ساحل مقابل، رسوب‌گذاری انجام پذیرد؛ بدین ترتیب مسیر رودخانه، پیچ‌وخم‌دار می‌شود (یمانی و همکاران ۲۰۱۱). برای تحلیل فرایندهایی چون تغییرات آب پویایی جریان و ریخت‌شناسی رودخانه در رودخانه‌ها، بررسی‌های متعددی انجام شده است. برخی از این بررسی‌ها در غالب مدل‌های عددی به شرح زیر است:

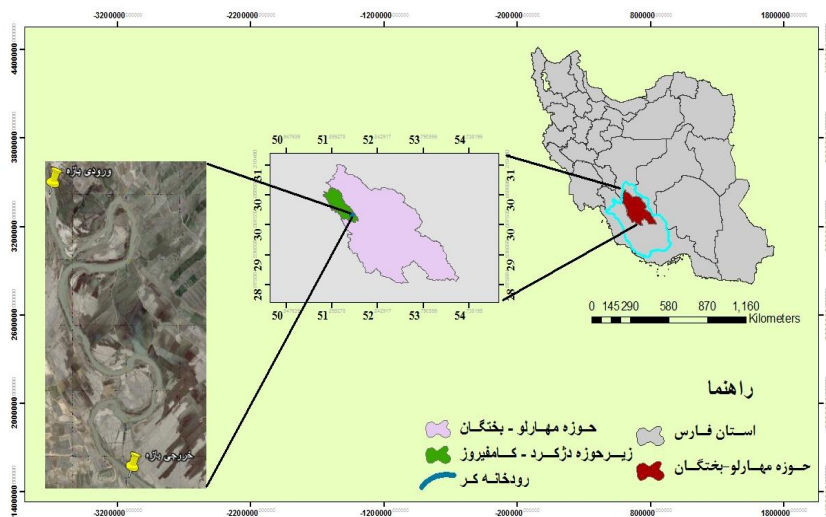
نوحه‌گر و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر سازه‌ی حفاظتی آب‌شکن بر قوس رودخانه با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند و به این نتیجه رسیدند که هندسه‌ی رودخانه با آبدهی موجود و میزان رسوب تنظیم می‌شود و آب‌شکن در هدایت سرعت و الگوی جریان به سمت خط‌القعر رودخانه تأثیرگذار است. آرمان و همکاران (۲۰۱۷) به مدل‌سازی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه‌ی رودخانه با حضور سری آب‌شکن با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول آب‌شکن‌ها بیشینه‌ی میزان سرعت و نیز عمق فرسایش و رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد. درویش‌زاده (۲۰۱۷) به بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ی زهره با استفاده از مدل CCHE2D پرداخت و به این نتیجه رسید که رود زهره در بیشتر مواقع سال پدیده رسوب‌گذاری را خواهد داشت و فقط در آبدهی‌های سیلابی بیش‌تر از ۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه دارای فرسایش است که خود عامل تغییراتی در ریخت‌شناسی این رودخانه در درازمدت است. خسروی (۲۰۱۲) از مدل عددی دوبعدی CCHE2D برای مدل‌سازی الگوی جریان و رسوب در

بازه‌ای از پیچان رودی طبیعی، حدفاصل سد تا پل شهرستان میناب استان هرمزگان استفاده کرد و به این نتیجه رسید که مدل از قابلیت خوبی برای پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان رودی برخوردار است. نثار (۲۰۱۱) مدل CCHE2D را برای بازه‌ای از رودخانه‌ی نیل اجرا کرد و با استفاده از تحلیل حساسیت چند فراسنج (MPSA) نشان داد که جریان در رودخانه نیل بیشتر به‌وسیله‌ی ضریب زبری بستر مهار می‌شود. حسن و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از مدل CCHE2D در بازه‌ای از رودخانه‌ی مودا^۱ مدل‌سازی الگوی جریان و رسوب را بررسی کردند و اظهار داشتند که می‌توان به خوبی از نرم‌افزار CCHE2D برای تحلیل رفتار جریان، هم در رودخانه و هم در سیلاب‌دشت‌ها استفاده کرد. جیا و ونگ (۲۰۰۸) مدل دوبعدی آب پویایی به نام CCHE2D را برای مطالعه‌ی تغییرات جریان در نهرهای روباز توسعه دادند. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که این مدل را می‌توان برای مطالعه‌ی جریان‌های پایدار و ناپایدار و آشفته و همچنین فرایندهای حمل رسوب و تغییرات ریخت‌شناسی نهرهای آبرفتی به کار برد. وو و وانگ (۲۰۰۸) در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رود زرد در کشور چین پرداختند و با استفاده از مدل‌های عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای $k-\epsilon$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه کردند. بر اساس مقایسه، این نتیجه حاصل شد که تمام مدل‌های آشفتگی نتایجی واقعی را درباره‌ی جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در خصوص جریان‌های پیچیده، سه مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (معیار، غیرتعدالی و RNG) نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. با توجه به روند پیچیده‌ی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها و اهمیت زیادی که تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در طرح‌های سامان‌دهی، مهار سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارد، نیاز به شناخت تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه‌ها شدیداً احساس می‌شود. با پیش‌بینی اثر الگوی جریان بر تغییرات رودخانه با استفاده از مدل‌های عددی نقاطی از رودخانه که به فرسایش حساس‌اند، شناسایی می‌شوند و در صورت پیش‌بینی روند تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه، راهکارهای بهتر و دقیق‌تری را می‌توان برای حل مشکلات ارائه داد. پس با توجه به اهمیت بررسی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی، در این تحقیق با کمک مدل دوبعدی CCHE2D، اثر الگوی جریان بر تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه در بازه‌ی به طول ۴/۵ کیلومتر از پیچان‌رود بالادست سد دروزن بررسی و مدل‌سازی می‌شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه‌ی مطالعه‌شده

رود کر از مهم‌ترین رودهای حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌ی سد دروزن و یکی از رودهای پرآب استان فارس است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود محدوده‌ی مطالعه‌شده، بازه‌ای از رودخانه‌ی کر از محل پل عباس‌آباد تا



شکل ۱- نمایی از موقعیت بازه‌ی مطالعه‌شده‌ی رودخانه‌ی کر.

در معادلات بالا u و v به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y (برحسب متر بر ثانیه)، t زمان (ثانیه)، g شتاب گرانش، Z بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب (متر)، ρ وزن مخصوص آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، h عمق جریان (متر) و f_{COR} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (بی‌بعد) و τ_{xx} ، τ_{yy} ، τ_{xy} و τ_{yx} تنش‌های برشی بستر در راستای x و y (نیوتن بر مترمربع) است. (ج) **معادله‌ی آشفستگی:** برای مدل‌سازی اثر آشفستگی بر الگوی جریان و بستن سامانه‌ی معادلات حاکم، مدل CCHE2D، از مدل لزجت گردابه‌ای، مدل طول اختلاط و مدل دومعادله‌ای $k-\epsilon$ بهره می‌برد. برای مطالعه و توضیحات بیشتر به منبع ۱۷ مراجعه کنید.

اندازه‌گیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی لازم برای مدل CCHE2D در گام نخست این پژوهش، به نقشه‌برداری بازه‌ی انتخابی از رودخانه‌ی کر با استفاده از دوربین نقشه‌برداری و تصاویر ماهواره‌ای بر اساس روش فتوگرامتری پرداخته شد. در هفت مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری فراسنج‌های جریان پرداخته شد که بیشترین تأکید بر قوس‌ها متوالی رودخانه بود تا بتوان تأثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را سر پیچ‌های پیمان‌رود بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر رودخانه بررسی کرد. پس از اتمام طرح نقشه‌برداری برای اندازه‌گیری سرعت جریان آب از سرعت‌سنج (مولینه) استفاده شد. نظر به اینکه سرعت در نقاط مختلف عرض رودخانه و همچنین در اعماق آب متغیر است، سرعت متوسط در طول هر مقطع و دست‌کم در ده نقطه (مقطع با عرض ۵۰ متر) و حداکثر شانزده نقطه (مقطع با عرض ۸۰ متر) با فواصل مساوی از عمق آب با استفاده از پل تلفریک داده‌های جریان، اندازه‌گیری شد؛ بدین نحو که ابتدا مقطع عرضی به اندازه‌های مساوی تقسیم شد و تعدادی محور عمودی به دست آمد. در هر یک از محورهای عمودی سرعت آب با روش انتگرال‌سیون عمقی اندازه‌گیری

سد درودزن شهرستان کامفیروز، استان فارس است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی $18^{\circ} 18' 52''$ تا $18^{\circ} 21' 52''$ طول شرقی و $30^{\circ} 16' 20''$ تا $30^{\circ} 16' 20''$ عرض شمالی قرار گرفته است. طول بازه حدود $4/5$ کیلومتر و با توجه به تراز پستی و بلندی ابتدا و انتهای بازه به ترتیب در حدود ۱۶۹۶ و ۱۶۹۱ متر بالاتر از سطح دریا است (گروه مهندسی مشاور حساب فارس ۲۰۰۱).

مدل CCHE2D

مدل عددی برای مدل‌سازی جریان ماندگار، غیرماندگار آشفته و انتقال رسوب در نهرهای باز است که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی آب (NCCHE) دانشکده‌ی فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. این مدل جزو مدل‌های آب‌پویایی دویبعی است که نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده با عنوان CCHE-MESH برای ساختن هندسه‌ی میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی دارد. حل میدان جریان و انتقال رسوب و مشاهده‌ی نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار، با عنوان CCHE-GUI انجام می‌شود. معادلات اصلی پایه‌گذار این مدل را می‌توان به صورت زیر ارائه نمود:

الف) معادله‌ی پیوستگی:

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

ب) معادله‌ی مومنتم:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{cor} u \quad (2)$$

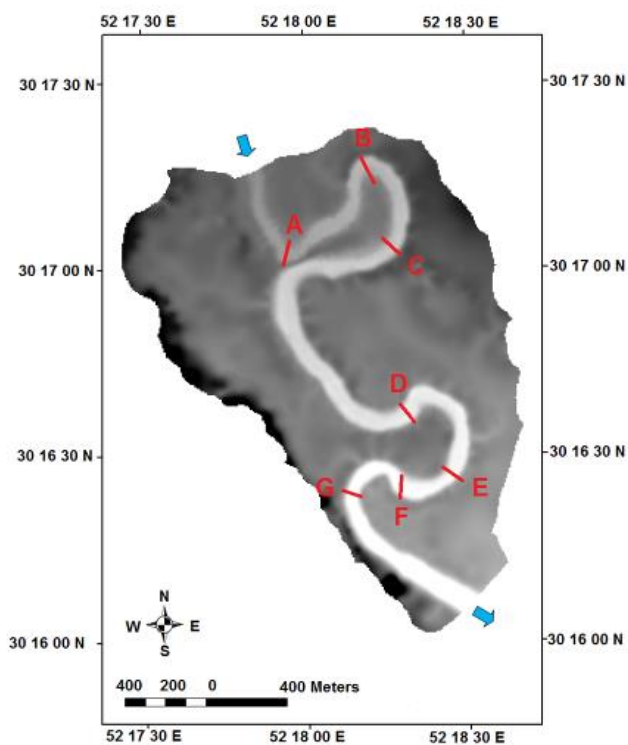
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor} v \quad (3)$$

می‌شود (علیزاده ۲۰۰۶). شکل‌های ۲ و ۳ نمایی از بازه‌ی مورد مطالعه و مقاطع اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند. برای جریان، فراسنج‌هایی مانند سرعت، آدهی و عمق جریان در مقاطع

شد و سرعت متوسط در هر محور به دست آمد و در آخر سرعت میانگین مقطع عرضی محاسبه گردید. توضیح اینکه در این روش مولینه با سرعت یکنواخت و در نقاط تعیین شده در آب پایین برده و سپس به تدریج بالا آورده



شکل ۲- نمایی از بازه‌ی مطالعه‌شده و اندازه‌گیری فراسنج‌های جریان و رسوب بازه‌ی رودخانه‌ی کر.



شکل ۳- نمایی از مقاطع اندازه‌گیری فراسنج‌های جریان بازه‌ی مطالعه‌شده‌ی رودخانه‌ی کر.

مدل سازی تغییرات ریخت شناسی رودخانهی کر...

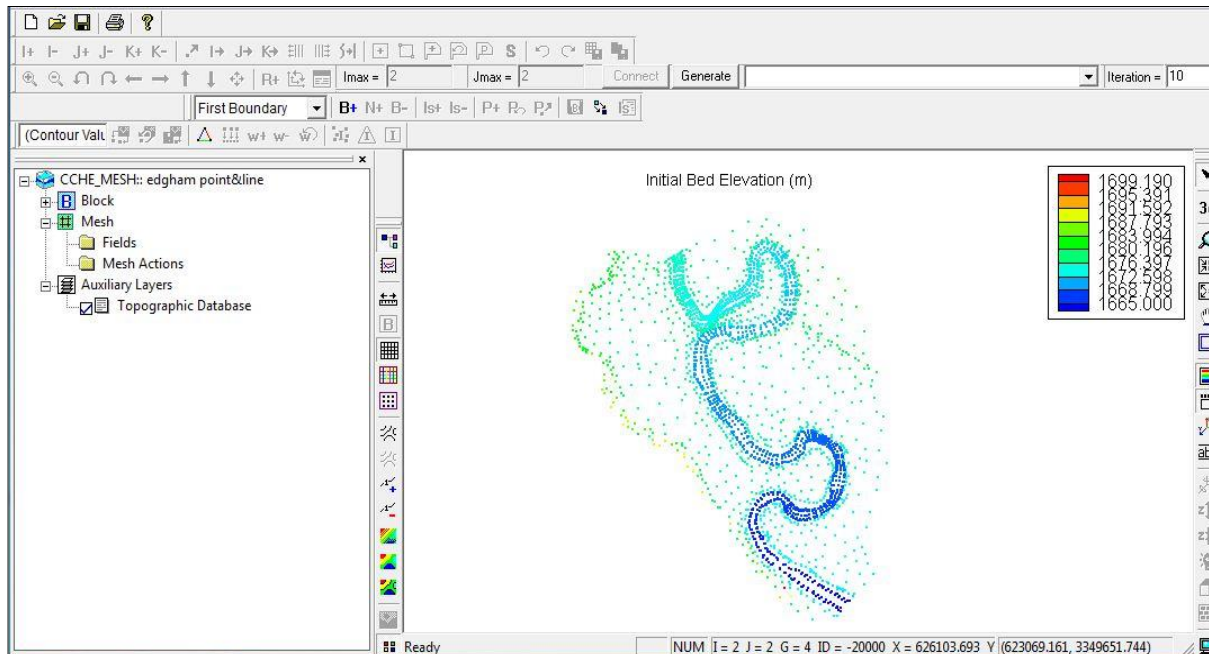
یادشده و ابتدا و انتهای بازه‌ی مطالعه شده‌ی رودخانه‌ی کر اندازه گیری شده است (جدول ۱).

جدول ۱- مقادیر فراسنج‌های سرعت، عمق و آبدهی جریان اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف بازه‌ی مطالعه شده.

مقاطع	بیشینه‌ی سرعت متوسط عمقی (m/s)	سرعت متوسط (m/s)	عمق جریان (m)	آبدهی 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
مقطع D	۱	۰/۳۸	۱/۳۷	۵۷/۴۸
مقطع E	۰/۸۴	۰/۳۰	۲/۱۱	۵۶/۷۰
مقطع F	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

را پوشش می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، چون شکل بازه‌ی مطالعاتی تک‌شاخه‌ای و بدون انشعاب است، حالت تک‌قطعه یا تک‌شاخه‌ای برای نرم‌افزار تولید شبکه‌ی محاسباتی انتخاب شد (جیا و وانگ ۲۰۰۹).

تولید شبکه‌ی محاسباتی در مدل عددی CCHE2D
در مدل CCHE2D برای ساخت هندسه‌ی میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده با عنوان CCHE-MESH استفاده می‌شود. مدل عددی گفته شده، سه نوع ریخت‌شناسی کلی شامل نهر تک‌قطعه، نهر تک‌قطعه با جزیره و نهر چندقطعه از رودخانه‌ها



شکل ۴- شبکه‌ی محاسباتی (Mesh)، ساخته شده بازه‌ی مطالعه شده‌ی رودخانه‌ی کر.

استفاده شد. رابطه‌ی محاسبه‌ی زبری (رابطه‌ی مانینگ) نسبت به رابطه‌های دیگر برآورد نزدیک‌تری را نشان داد.

واسنجی مدل عددی CCHE2D

پس از انجام چندین بار مدل‌سازی و بررسی تأثیر فراسنج‌های مختلف بر نتایج مدل، نوبت واسنجی مدل عددی CCHE2D است تا از طرفی درصد خطای مدل در پیش‌بینی فراسنج‌ها مشخص شود و از طرف دیگر شرایط معیار در خصوص تنظیمات مدل و اندازه‌گیری فراسنج‌ها به وجود آید؛ بدین منظور در بازه‌ی مطالعه‌شده‌ی رودخانه‌ی کر، فرضیه‌ی تغییر ضریب زبری (حساس‌ترین فراسنج) بر الگوی جریان با استفاده از مقدار تخمینی (مشاهدات صحرائی) در دامنه‌ی $0/040$ تا $0/080$ و تغییر آن و مقدار به‌دست‌آمده از روابط (معادلات) در دامنه‌ی $0/030$ تا $0/070$ مقایسه شد. در جدول ۲ و ۳، مقادیر اندازه‌گیری و مدل‌سازی‌شده، سرعت جریان (V) و عمق جریان (P)، در حالت تغییر ضریب زبری مقایسه شده‌اند. در شکل ۵، تغییرات سرعت جریان (V) در حالت تغییر ضریب زبری مقایسه شده است.

شبیه‌سازی الگوی جریان

مراحل مدل‌سازی الگوی جریان با نرم‌افزار CCHE-GUI به این شرح است: ورود و فراخوانی پرونده‌ی Geo؛ تنظیم شرایط اولیه‌ی جریان با استفاده از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل $k-\epsilon$ (عمق آب بالادست و پایین‌دست) بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام‌شده در جدول ۱؛ تنظیم شرایط اولیه‌ی رسوب از جمله زبری بستر. ضریب زبری در کناره‌ها و کف رودخانه، با مشاهدات و تهیه‌ی عکس و فیلم از بازه‌ی مورد مطالعه و استفاده از معتبرترین منابع محاسباتی هیدرولیک، مانند کتاب چاو^۳ و معادله‌ی کاون^۴ مشخص شد. تنظیم فراسنج‌های جریان آب شامل گام زمانی (۲۴ ساعت) و انتخاب مدل آشفتگی. برای مدل‌سازی حالات انتقال آشفتگی، از دو مدل لزجت گردابه‌ای و مدل $k-\epsilon$ استفاده گردید و معلوم شد که به‌طور متوسط مدل آشفتگی لزجت گردابه‌ای برای برآورد توزیع سرعت و تغییرات عمق جریان در کل قلمرو جریان مناسب است؛ اما در محدوده‌ی دیواره‌ی رودخانه، به‌خصوص قسمت مقعر قوس رودخانه دقت کمتری دارد؛ پس با توجه به خروجی مدل برای برآورد تغییرات عمق و توزیع سرعت جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$

جدول ۲- مقایسه‌ی فراسنج میانگین سرعت جریان (V) در حالت تغییر ضریب زبری.

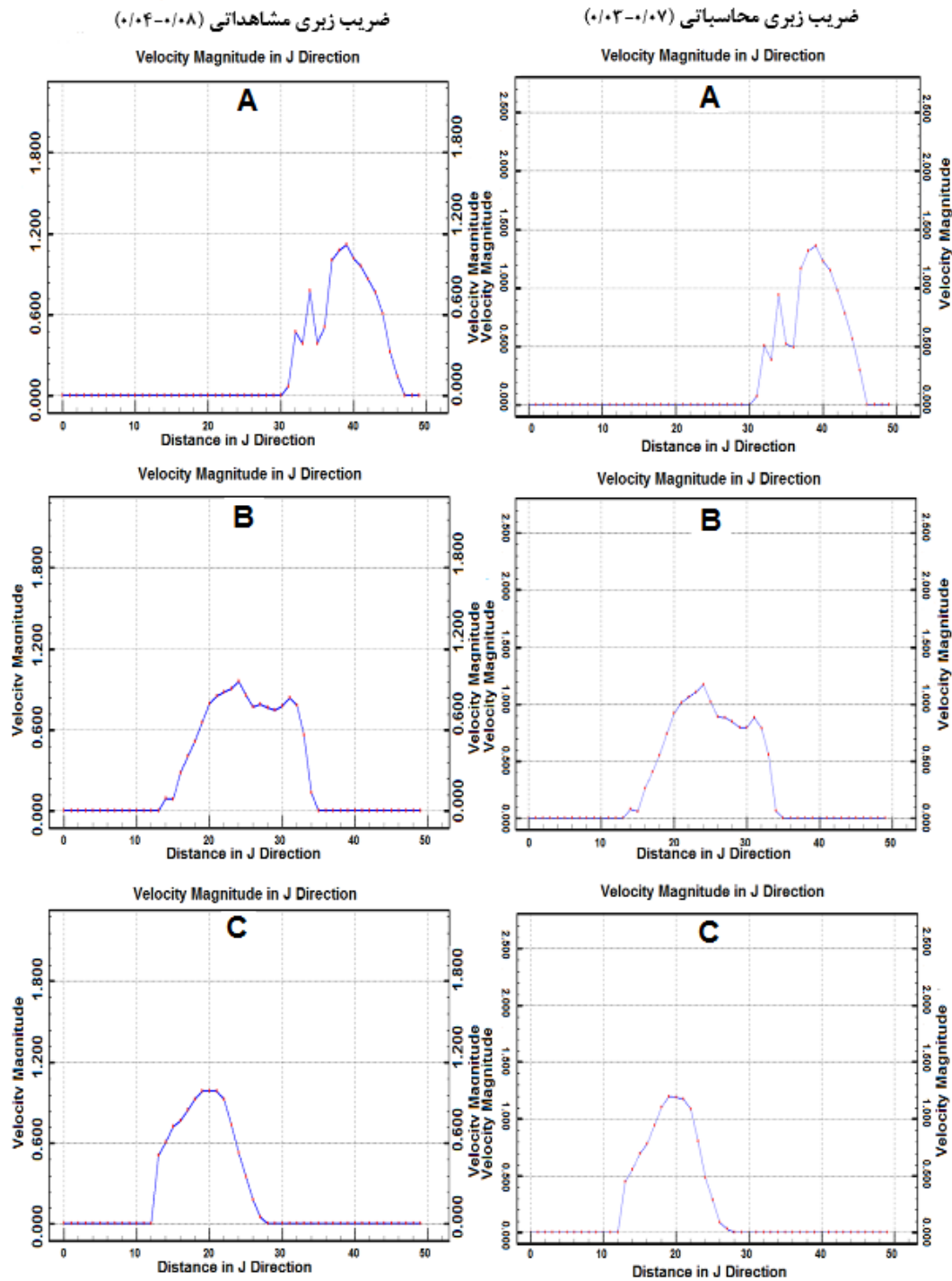
مقاطع اندازه‌گیری‌شده	فراسنج میانگین سرعت جریان (V) اندازه‌گیری- شده	فراسنج سرعت جریان (V) محاسباتی شبیه شبکه‌ی محاسباتی با ابعاد 50×600	
		زبری (0/03 - 0/07)	
		زبری (0/04 - 0/08)	زبری (0/03 - 0/07)
A مقطع	0/77	0/73	0/79
B مقطع	0/73	0/68	0/75
C مقطع	0/71	0/66	0/71
D مقطع	0/38	0/40	0/35
E مقطع	0/30	0/32	0/28
F مقطع	0/22	0/24	0/23
G مقطع	0/20	0/22	0/21

جدول ۳- مقایسه‌ی فراسنج میانگین عمق جریان (P) در حالت تغییر ضریب زبری.

مقاطع اندازه‌گیری‌شده	فراسنج عمق جریان (P) اندازه‌گیری‌شده	فراسنج عمق جریان (D) محاسباتی شبیه شبکه‌ی محاسباتی با ابعاد 50×600	
		زبری (0/03 - 0/07)	
		زبری (0/04 - 0/08)	زبری (0/03 - 0/07)
A مقطع	0/96	0/93	0/98
B مقطع	1/00	1/19	1/10
C مقطع	0/78	1/1	0/80
D مقطع	1/37	1/39	1/38
E مقطع	2/11	2/4	2/00
F مقطع	2/35	2/7	2/40
G مقطع	2/92	3/4	2/00

3- Chow

4- Cowan



شکل ۵- نمودار تغییرات سرعت برای مقاطع A، B و C بازه‌ی مطالعه‌شده و ضرایب زبری محاسباتی و مشاهداتی.

تعیین مقدار شیب کارمایه

تعیین مقدار شیب کارمایه، از مهم‌ترین و درعین‌حال دشوارترین اندازه‌گیری‌های هیدرولیکی است. با توجه به تغییرات مقطع و وجود عوامل

جدول ۲ و ۳ و شکل ۵ نشان می‌دهد که استفاده از ضریب زبری محاسباتی به‌دست‌آمده از روابط و معادلات در دامنه‌ی ۰/۰۳۰-۰/۰۷۰، نتایج دقیق‌تری را به‌دست می‌دهد.

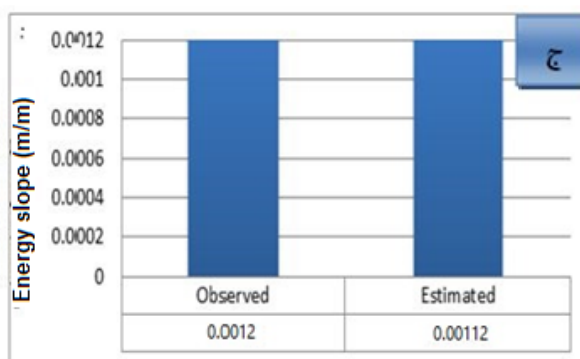
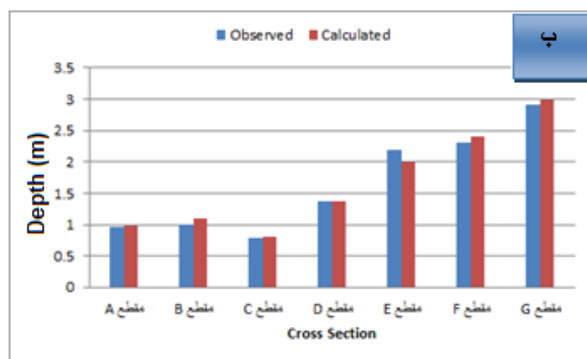
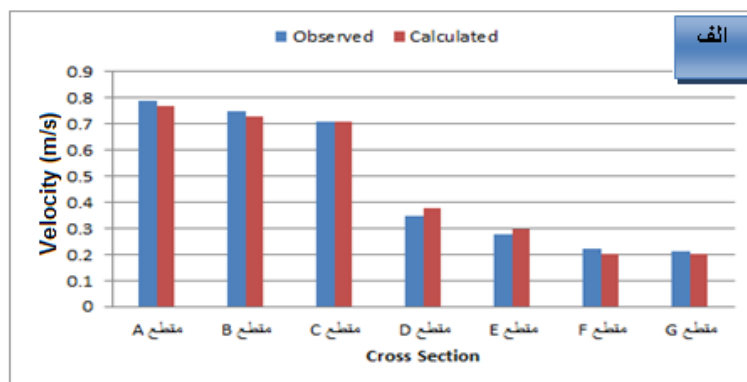
تعیین درصد خطای مدل

نتایج به دست آمده از مدل^۵ با داده های اندازه گیری شده در طبیعت^۶ در حالت میان گیری شده از داده ها مقایسه می گردد تا بتوان به دقت مدل در شبیه سازی سرعت، عمق و شیب کارمایه پی برد. در زیر درصد خطای سرعت اندازه گیری و برآورد شده در مقاطع مختلف (جدول ۴) و نمودارهای مقایسه ای سرعت جریان آب، عمق آب و مقدار شیب کارمایه در حالت مشاهداتی از طبیعت و محاسباتی از مدل ارائه شده است (شکل ۶).

مختلف ناهنجاری، امتداد سطح آب رود معمولاً موازی امتداد بستر رودخانه نیست. در این تحقیق با اندازه گیری داده های مورد نیاز و جای گذاری در رابطه ای مربوطه، مقدار شیب کارمایه ی مشاهداتی، معادل ۰/۰۰۱۲ و مقدار یا شیب کارمایه ی اندازه گیری شده از مدل، معادل ۰/۰۰۱۱۲ بود؛ همان طور که مشاهده شد تفاوتی جزئی در حدود ۰/۰۰۰۰۸ بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد. این مطلب، باز هم تأییدی بر درستی پیش بینی های مدل عددی دوبعدی CCHE2D است.

جدول ۴- درصد خطای سرعت اندازه گیری شده و برآورد شده در مقاطع مختلف بازه ی مورد مطالعه.

RMSE	سرعت متربرثانیه برآورد شده به وسیله ی شبیه			سرعت متربرثانیه اندازه گیری شده			مقاطع
	در هر مقطع			در هر مقطع			
	حاشیه ی چپ	وسط	حاشیه ی راست	حاشیه ی چپ	وسط	حاشیه ی راست	-
۰/۰۱۶	۰/۶۰	۰/۹۳	۰/۸۴	۰/۵۸	۰/۹۱	۰/۸۴	مقطع A
۰/۰۳۳	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۶۴	۰/۸۰	۰/۷۳	۰/۶۴	مقطع B
۰/۰۱۲	۰/۶۷	۱	۰/۴۶	۰/۶۸	۱	۰/۴۵	مقطع C
۰/۰۳۱	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۳۰	مقطع D
۰/۰۲۱	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۲۶	۰/۳۳	۰/۳۰	۰/۲۷	مقطع E
۰/۰۱۰	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۰	مقطع F
۰/۰۱۲	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۱۷	مقطع G



شکل ۶- مقایسه ی مشاهداتی و محاسباتی برای الف) سرعت جریان، ب) عمق آب و ج) شیب کارمایه.

5- Estimated
6- Observed

ارزیابی کارایی مدل

در ادامه‌ی تحقیق، نتایج به دست آمده از مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت، در حالت میان‌گیری شده از داده‌ها مقایسه می‌گردد تا به دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب کارمایه پی ببریم. برای بررسی مدل از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده کردیم که عبارت‌اند از: جذر میانگین مربع خطا و میانگین درصد خطای مطلق و روابط آن‌ها به شرح زیر:

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (4)$$

که در این رابطه، مقدار مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده و مقدار محاسباتی از مدل است.

$$M.A.P.E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| * 100 \quad (5)$$

که در این معادله، مقدار مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده و، مقدار محاسباتی از مدل است. در جدول ۵، نتایج دو روش RMSE و MAPE برای نشان دادن میزان دقت مدل در برآورد فراسنج‌های سرعت جریان آب، تراز (عمق) آب و شیب کارمایه آورده شده است.

جدول ۵- نتایج مقایسه‌ی سرعت جریان، عمق آب و شیب کارمایه‌ی مشاهداتی و برآوردی بر اساس دو معیار RMSE و MAPE.

معیار	فراسنج سرعت جریان آب	فراسنج عمق آب	فراسنج شیب کارمایه
RMSE	۰/۰۲۷	۰/۱۳	۰/۰۰۰۰۴
MAPE	٪۰/۵۱	٪۰/۶۵	٪۳/۳۳

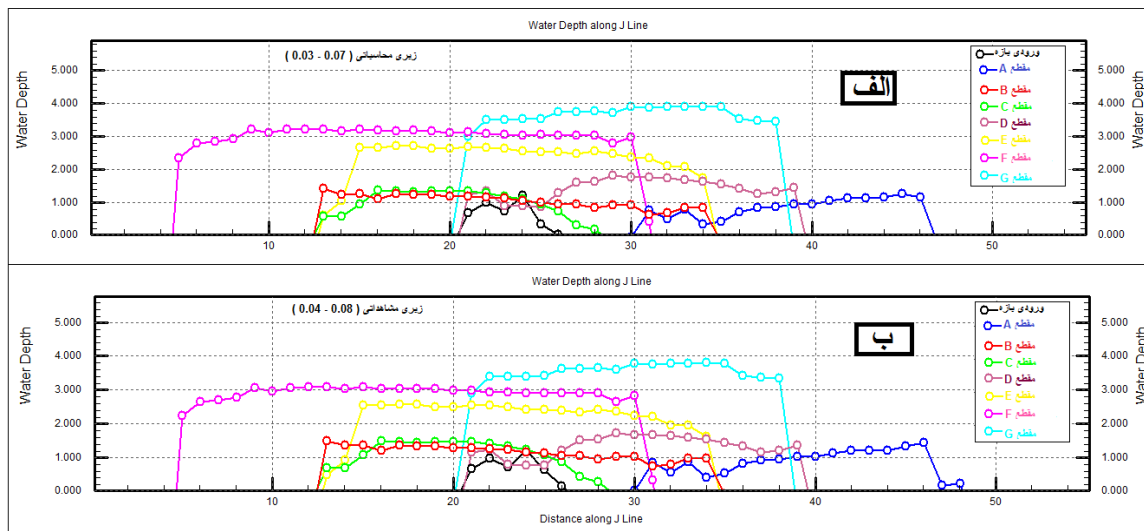
نتایج و بحث

در ادامه به بررسی بعضی از متغیرهای خروجی از مدل، همچون عمق جریان، سرعت جریان، تنش برشی، عدد فرود و شیب کارمایه در قلمرو جریان پرداخته شده است.

فراسنج عمق آب

اصولاً در محل ایجاد قوس در رودخانه‌ها، مقدار بیشینه‌ی تراز آب، متمایل به دیواره‌ی خارجی (مقعر) تشکیل می‌شود که آن‌هم به دلیل افزایش ارتفاع آب ناشی از ایجاد نیروی گریزازمرکز و شیب جانبی در سطح آب و در قوس خارجی است؛ در نتیجه، حالتی مثلثی شکل در سطح آب در مقطع عرضی ایجاد و آب از قوس خارجی به سمت قوس داخلی رانده می‌شود و به تبع آن فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی رخ می‌دهد (تلوری ۲۰۰۴). نتایج حاصل از مدل و مشاهدات در طبیعت نیز تأییدی بر مطالب گفته شده است؛ زیرا در محل وقوع قوس (هفت مقطع بازه‌ی مطالعاتی)،

بیشینه‌ی عمق آب پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل و مشاهده‌ها در طبیعت، در ساحل مقعر ایجاد شده است که توانمندی مدل را در شبیه‌سازی الگوی جریان آب نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، تراز آب در قوس‌های خارجی بازه‌ی مطالعه شده بالاتر از قوس داخلی است که عامل تشکیل دهنده‌ی آن را می‌توان نیروی گریزازمرکز معرفی کرد که باعث بیشینه‌ی تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در قوس خارجی می‌شود. در محدوده‌های پیکان‌رودی بازه‌ی مطالعه شده نیروی گریزازمرکز بر جریان اثر کرده و باعث شیب عرضی در سطح آب می‌گردد؛ در نتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی زیاد و در قوس داخلی کاهش می‌یابد؛ این پدیده باعث شیب یافتن فشار جانبی داخل مقطع خواهد شد؛ بنابراین، بر اثر نبود تعادل موضعی بین نیروی گریزازمرکز و شیب فشار جانبی، جریان ثانویه داخل مقطع عرضی شکل می‌گیرد. این روند از ورودی قوس اول تا خروجی قوس ادامه دارد.

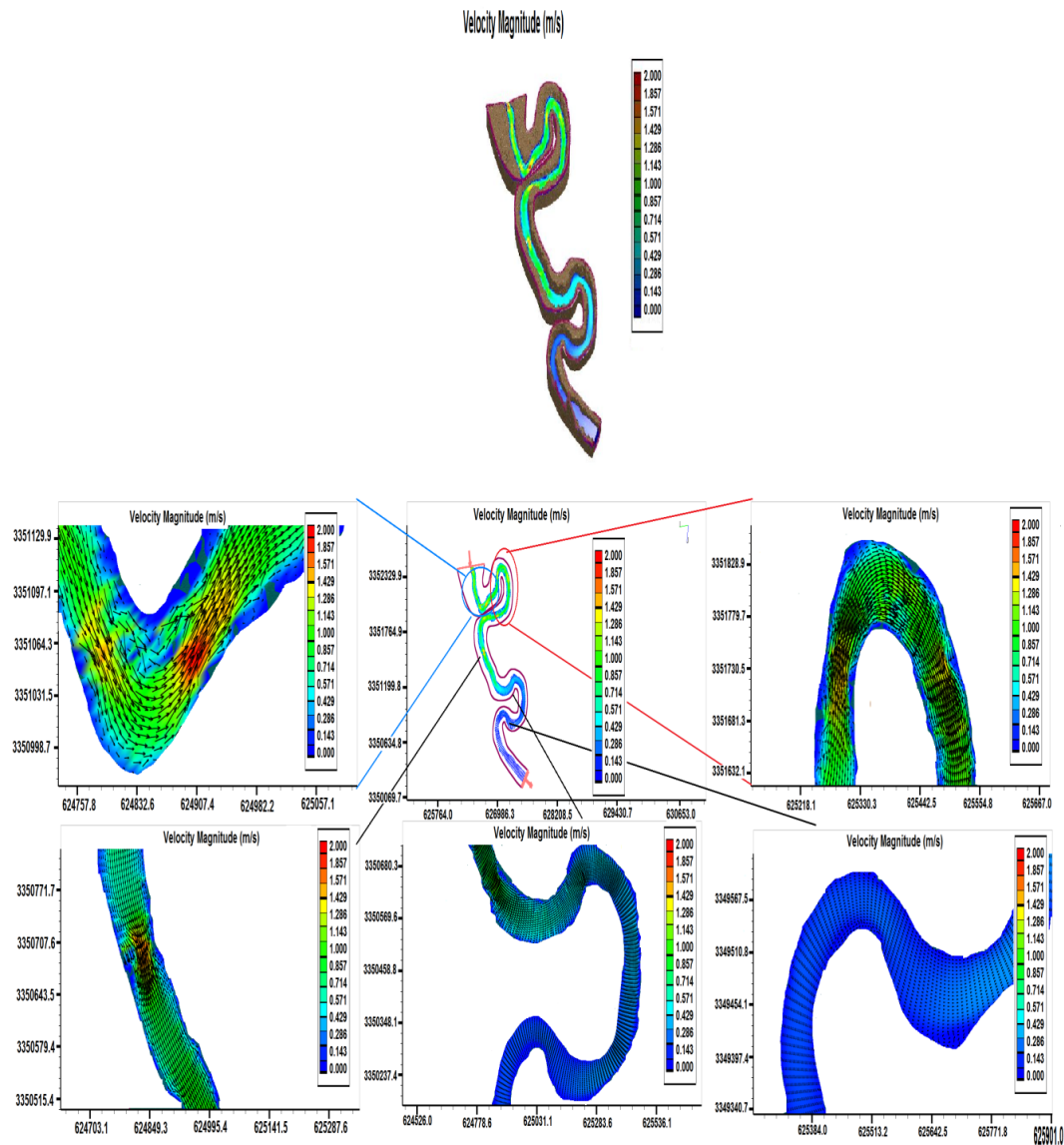


شکل ۷- نمودار تغییرات عمق جریان برای مقاطع مختلف بازه‌ی مطالعه شده و ضرایب زبری (الف) - محاسباتی و (ب) - مشاهداتی.

است و باعث افزایش سرعت ذرات سیال در این ناحیه می‌شود. در نزدیکی جداره‌ی خارجی نیز به همین ترتیب، سرعت ذرات سیال در طول نهر کاهش می‌یابد؛ بنابراین در مقاطع ورودی، بیشینه‌ی سرعت به سمت جداره‌ی داخلی کشیده می‌شود. با قدرت یافتن جریان ثانویه و شکل‌گیری جریان حلزونی در مقطع بعد از ورودی قوس، بیشینه‌ی سرعت از جداره‌ی داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه‌ی نهر متمایل می‌شود. با پیشروی جریان در نهر، این روند ادامه دارد؛ تاجایی که جریان ثانویه بتواند بر شیب طولی فشار غلبه کند. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، در این مقطع، جریان ثانویه با غلبه بر شیب طولی فشار، حداکثر سرعت در مقطع را به سمت جداره‌ی خارجی نهر منتقل می‌کند؛ همچنین با دقت در شکل یادشده به‌خوبی دیده می‌شود که خط بیشینه‌ی سرعت در جداره‌ی خارجی نهر قرار گرفته است. علت این امر آن است که پروفیل‌های سرعت در مقاطع عرضی واقع در قوس به حالت توسعه‌یافته رسیده‌اند و مقادیر سرعت بین دو مقطع تغییر چندانی ندارند. بیشینه‌ی سرعت جریان در کل قلمرو جریان نیز در قوس خارجی ناحیه است؛ علت این امر، محدود بودن این ناحیه از رودخانه به‌وسیله‌ی دیواره‌ها و پخش نشدن سیلاب در نواحی سیلاب‌دشت است. هنگام خروج جریان از قوس اول، تغییرات شیب طولی فشار برعکس آن پدیده‌ای است که در ورودی رخ می‌دهد. در جداره‌ی خارجی، شیب طولی منفی است؛ پس سرعت سیال افزایش پیدا می‌کند و در جداره‌ی داخلی شیب طولی مثبت می‌شود و سرعت سیال کاهش می‌یابد.

فراسنج سرعت جریان آب

همواره در حالتی که نهر رودخانه، به حالت مستقیم است، بیشینه‌ی مقدار سرعت در وسط نهر اتفاق می‌افتد که این به دلیل کاهش اثرات اصطکاکی کناره‌هاست؛ ولی در محل وقوع خم و کمی بعد از آن، مقدار بیشینه‌ی سرعت، متمایل به دیواره‌ی خارجی (مقعر) ایجاد می‌شود (تائبی و شفاعی‌بجستانی ۲۰۰۹). نتایج شبیه‌سازی مدل و مشاهده شده در بازدید میدانی نیز تأییدی بر مطالب گفته شده است؛ زیرا در حالت نهر مستقیم، بیشینه‌ی سرعت آب پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی مدل و اندازه‌گیری شده در طبیعت، در وسط نهر ایجاد می‌شود و در محل وقوع قوس (قوس اول و دوم بازه‌ی مورد مطالعه)، بیشینه‌ی سرعت آب پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی مدل و مشاهده شده در طبیعت، در ساحل مقعر ایجاد می‌گردد (شکل ۸). تغییرات مقادیر و بردارهای سرعت در طول نهر در شکل ۹ نشان می‌دهند که در بازه‌ی مستقیم بعد از قوس اول، بیشینه‌ی سرعت آب در وسط نهر اتفاق می‌افتد. انحنای زیاد 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 بیشینه‌ی سرعت در مقاطع عرضی به سمت جداره‌ی داخلی کشیده می‌شود. این رفتار از آنجا ناشی می‌شود که با ورود جریان به قوس، اثر نیروی گریز از مرکز، در جداره‌ی خارجی سطح آب افزایش می‌یابد که روند این افزایش نیز در طول نهر صعودی است. همین فرایند به شکل معکوسی برای جداره‌ی داخلی نهر نیز رخ می‌دهد؛ پس در نزدیکی جداره‌ی داخلی، شیب طولی فشار منفی



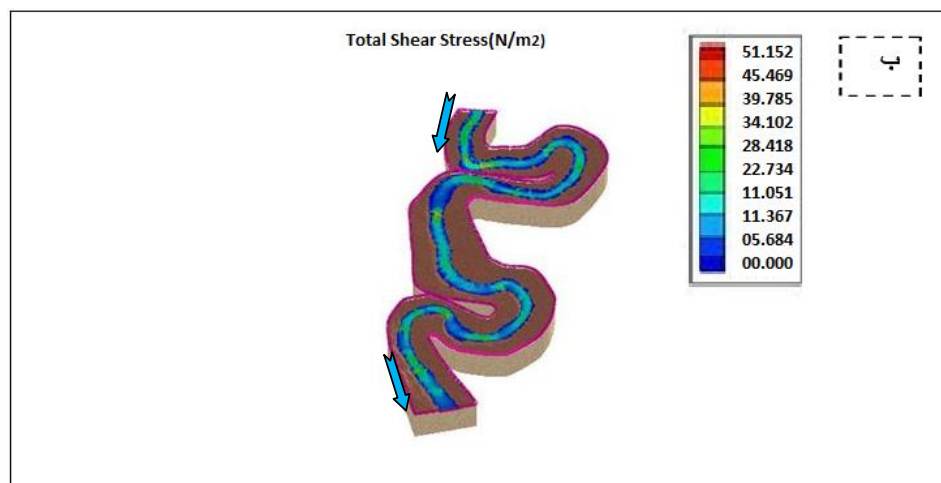
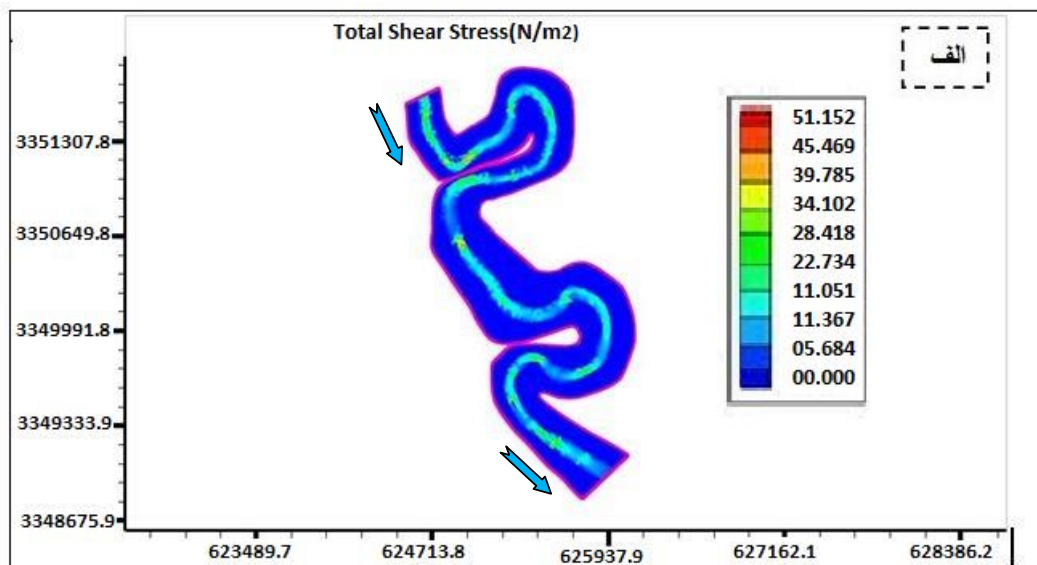
شکل ۸- تصویر توزیع متغیر سرعت در بازه‌ی مورد مطالعه.

مشاهده می‌شود در بازه‌ی مطالعه‌شده و در ورودی پیچان رود اول (مقطع A)، توزیع سرعت، بیشینه‌ی مقدار تنش برشی آب در کرانه‌ی سمت راست شده و رودخانه در حال میانبری و تبدیل شدن از حالت پیچان رودی شدید به حالت مستقیم است. بیشترین تنش برشی مربوط به مقاطع پیچان رود اول بازه‌ی مطالعه‌شده است و این تنش برشی بیشتر سبب تغییرات بیشتری در مقاطع اولیه شده است. در قسمت ورودی پیچان رود اول و در قوس خارجی، مواد کناری بستر به وسیله‌ی تنش برشی جریان ابتدا فرسایش می‌یابند؛ سپس به وسیله‌ی جریان به طرف پایین دست حمل می‌شوند. در این قسمت بیشینه‌ی تنش برشی اتفاق افتاده و در مرکز و انتهای قوس یادشده به علت

فراسنج تنش برشی
تحقیقات نشان می‌دهد که محدوده‌های دارای بیشترین تنش برشی، آسیب‌پذیرترین مناطق در مقابل فرسایش بستر و نواحی با تنش برشی کم، مناسب‌ترین مناطق برای رسوب‌گذاری‌اند؛ بنابراین با بررسی توزیع تنش برشی می‌توان نواحی محتمل آبستنگی را پیش‌بینی کرد (فقیه‌الاسلام‌چهرمی و موسوی‌چهرمی ۲۰۰۹). با توجه به رابطه‌ی $\tau = \gamma R S_f$ کاملاً مشهود است که فراسنج تنش برشی رابطه‌ی مستقیم با شیب سرعت دارد؛ پس در مسیر مستقیم نهر رودخانه، بیشینه‌ی تنش برشی در بستر رودخانه اتفاق می‌افتد و در محل قوس‌ها، در کناره‌ی خارجی است که آن هم به دلیل افزایش شیب سرعت در قوس خارجی است. همان‌طور که در شکل شماره‌ی ۹

باشد، احتمال تخریب محل مزبور وجود دارد. با خروج جریان از انتهای قوس اول، رودخانه یک مسیر مستقیم را طی می کند که در ورودی این مسیر مستقیم تنش برشی به علت افزایش سرعت جریان افزایش می یابد و پس از طی مسیری کوتاه جریان در بستری مستقیم آرام می گیرد و سرعت جریان و بالطبع تنش برشی، کاهش می یابند. با ورود جریان به قوس دوم به علت افزایش عرض بازه، انحنای جریان و عمق جریان، سرعت جریان به تدریج کاهش می یابد و توزیع تنش برشی تقریباً در ناحیه ی ورودی خم یکنواخت می شود و در محدوده ی خروجی قوس به علت تنگ شدگی بازه یک ناحیه ی تنش برشی قوی در نزدیکی انتهای قوس اتفاق می افتد.

افزایش عرض رودخانه و کاهش سرعت جریان، کاهش می یابد؛ بنابراین در صورت حساسیت بستر به فرسایش، وقوع حفزه ی آبستگي ابتدای قوس اول (کناره ها و بستر) تا حد زیادی محتمل است. وجود قدرت زیاد جریان ثانویه در دو قوس این بازه باعث انتقال شدید خطوط جریان به طرف دیواره ی بیرونی می شود که همین پدیده باعث تشکیل نواحی با شیب سرعت زیاد نزدیک دیواره ی بیرونی و بستر و در نتیجه تنش برشی شدید در بستر و جداره بیرونی نهر می شود. بیشینه ی عرض تنش زیاد در نیمه ی اول پیچان رود تا مرکز پیچان رود اول است؛ بنابراین مقدار تنش برشی جداره ی بیرونی نهر نیز در محل خروج قوس زیاد است و در صورتی که جداره های نهر فرسایش پذیر

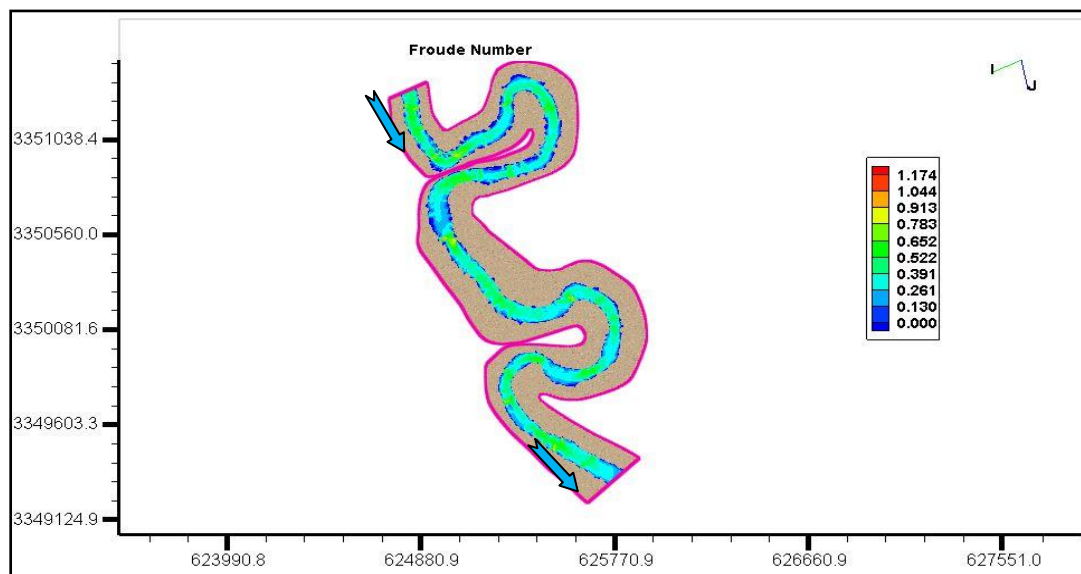


شکل ۹- تصاویر توزیع متغیر تنش برشی در بازه ی مطالعه شده ی رودخانه ی کر: الف) تصویر دوبعدی، ب) تصویر سه بعدی.

عدد فرود

عدد فرود، نسبت نیروهای گرانشی به نیروهای سختی وارد بر سیال است. این عدد را با Fr نشان می دهند. اگر $Fr > 1$ باشد، جریان را فرابحرانی و اگر $Fr = 1$ باشد، جریان را بحرانی و اگر $Fr < 1$ باشد، جریان را زیربحرانی می گویند (تلوری ۲۰۰۴).

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، وضعیت جریان در بازه‌ی مطالعه شده در ابتدای ورودی پیچان رود اول و مرکز قوس پیچان رود اول و حدفاصل دو پیچان رود اول و دوم فرابحرانی است و به همین دلیل در قسمت ورودی پیچان رود اول بیشترین کنش، جابه جایی و تغییرات را داریم.



شکل ۱۰- تصویر توزیع متغیر عدد فرود جریان در بازه‌ی مطالعه شده‌ی رودخانه‌ی کر.

نتیجه گیری

با بهره گیری از یک مدل عددی دوبعدی به نام CCHE2D، الگوی جریان آب بر تغییرات رودخانه در یک بازه‌ی طبیعی پیچان رودی شبیه سازی گردید و نتایج حاصل از تحقیق، قابلیت مدل عددی به کاررفته را در پیش بینی روند تغییرات رودخانه با استفاده از فراسنج‌های جریان تأیید کرد؛ بنابراین با بررسی های انجام شده می توان گفت که مدل عددی حاضر قادر به بررسی روند تغییرات جریان در نهرهای پیچان رودی به نحوی مطلوب است. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق آب و برآیند سرعت در جداره‌ی خارجی پیچان رود نسبت به دیگر نقاط بیشتر شده است که نشان دهنده‌ی خطر فرسایش در جداره‌ی خارجی پیچان رود نسبت به نقاط دیگر است. نرم افزار CCHE2D توانایی فراوانی در مدل سازی الگوی فرسایش جریان در نقاط مختلف رودخانه دارد؛ پس می توان با انجام اقدامات سازه‌ای، جداره‌ی خارجی پیچان رود را زبرتر کرد تا از فرسایش جداره‌ی خارجی پیچان رود جلوگیری شود. مهم ترین عامل فرسایش در بستر فعلی رود کر سیل های شدید است تعیین کاربری های کشاورزی در امتداد بستر رود نیز باید با مطالعه و در نظر گرفتن الگوهای جریان صورت گیرد. کشاورزی و به خصوص شالی کاری در حاشیه‌ی رودخانه باید با فاصله بیشتری انجام شود تا حریم رودخانه را تحت تأثیر قرار ندهد. یکی از مناطقی که در معرض خطر جریان سیلابی قرار دارد، ورودی پیچان رود اول است که اختلاف ارتفاع کمی نسبت به

رودخانه دارد. در این پژوهش، ابتدا با مشاهده ها و بازدیدهای صحرائی، مدل سازی فراسنج های جریان آب و اثر آن بر تغییرات رودخانه، با ضریب زبری در دامنه‌ی ۰/۰۴ تا ۰/۰۸ برآورد گردید؛ در مرحله‌ی بعد، مدل سازی را با تغییر مقدار زبری به اعداد بیش تر و کم تر از مقدار گفته شده، به وسیله‌ی مقدار به دست آمده از معادلات و روابط در دامنه‌ی ۰/۰۳ تا ۰/۰۷ اجرا شد؛ سپس این نتیجه حاصل شد که بهترین مقدار ضریب زبری در دامنه‌ی ۰/۰۳ تا ۰/۰۷ است. این مطلب ممکن است به این دلیل باشد که یکی از عوامل تأثیرگذار بر زبری، همان گونه که اشاره شد، انحنای نهر است و چون بیشتر اندازه گیری های انجام شده در محل قوس صورت گرفته است، تغییر ضریب زبری توجیه پذیر است.

پیشنهادها

در این تحقیق با توجه به محدودیت های موجود، بازه‌ی از پیچان رود طبیعی انتخاب شد و اثر الگوی جریان بر تغییرات رودخانه شبیه سازی گردید. در این روند حتماً نقص هایی وجود داشته است که از روش های اصلاحی و جایگزین در بخش های مختلف می توان استفاده کرد تا هم دقت نتایج پیش بینی شده‌ی مدل و هم سرعت عمل انجام تحقیق بهبود یابد.

توصیه می شود:

۱- به جز استفاده از این مدل از مدل های آب پویایی دیگری نیز برای بررسی

مقایسه کنید.

۳ - در پایان با عنایت به نتایج به دست آمده از مدل عددی CCHE2D، پیشنهاد می شود که الگوی توسعه و تحول پیچان رودها در رودخانه ی کر دقیق تر بررسی شود.

ریخت شناسی و تغییرات رودخانه استفاده گردد و نتایج آن ها با هم مقایسه شود.

۲ - پیشنهاد می شود ضمن بررسی تغییرات ریخت شناسی رودخانه در شرایط طبیعی، در شرایط مشابه آزمایشگاهی نیز این کار را انجام داده و با هم

منابع

- Arman A, Zahiri J, Fattahi F. 2017. Simulation of Flow Pattern in 90 Degrees of the River with the Presence of a Split Series Using the CCHE2D Model, *Journal of Water and Soil Conservation Studies*, 24(3): 21–39. (In Persian).
- Alizadeh A. 2006. Principles of Applied Hydrology, 19 th edition, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian).
- Bambeichi S, Hosseini S, ghahreman B. 2010. Development of Regression Equations for Estimating Transmission Losses in Ephemeral Rivers of Ghara-Ghoom Catchment, *Journal of Watershed Management Sciences and Engineering*. 4 (11): 13–24. (In Persian).
- Darvishzadeh F. 2017. Morphological study of Zohreh River using CCHE2D model, M.Sc.master's thesis, Shahrood University of Technology. (In Persian).
- Faqih al-Islam Jahromi A, Mousavi Jahromi H. 2009. Numerical simulation of flow pattern and sediment flow around a spillway in a 180 degree arc by CCHE2D software, 8th international river engineering seminar, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian).
- Ghaffari G, Soleimani G, Mosaedi A. 2006. Investigation of Channel Coastal Morphological Changes Using GIS (Babolrood Mazandaran). *Geographical research*. 57: 61–71. (In Persian).
- Jia Y, Wang S. 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.
- Haseb Fars Consultant Engineers. 2001. Exploratory Study on the Constructing of the Kor River in Fars province, Volume 2, Fars Regional Water Authority, Ministry of Energy.
- Hasan Z, Ghani A, Zakaria N. 2007. Application of 2-D Modeling for Muda River Using CCHE2D, 2nd International Conference on managing River Basins.
- Khosravi G. 2012. the numerical simulation of flow and sediment model CCHE2D (Case Study: meander downstream Minab) M.Sc.master's thesis, University of Hormozgan.
- Nassar MA. 2011. Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. *Journal of Hydro-environment Research*. 5 (3): 187–195.
- Nohegar A, Jafarpour A, Roštami M, Avand M. T. 2017. The Effect of Protective Structural Deflection on River Arc Using CCHE2D Model (Minab River Case Study), *Echo hydrology Journal*, 4(2): 615–626. (In Persian).
- Taebi H, Shafahi Bajestani M. 2009. Numerical Simulation of flow by CCHE2D, Eighth International Seminar of River Engineering. (In Persian).
- Telvari ER. 2004. Fundamentals of River Training and Engineering, Education Organization Soil Conservation and Watershed Management Research Institute. (In Persian).
- Wu W, Wang S. 2008. Mathematical models for liquid-solid two-phase flow and Sediment, *Int. J. Sediment Research*. 15(3): 288–298.
- Yamani M, Elmizade H, Maghsoodi M, Moghimi A, Nohegar A. 2011. Investigation of Pinnacle Change and Instability of Riverside Basin in the Northern Strait of Hormoz Strait. *Quarterly Journal of Humanities*. 70: 215. (In Persian).
- Zhang Y, 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.