

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، تنش برشی، مدل عددی CCHE2D، پیچان‌رود، ضریب زبری.

مقدمه

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 [۴]. بدین منظور، استفاده از مدل‌های عددی بدلیل سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری بالا در تغییر پارامترهای جریان و هزینه‌های کمتر نسبت به مدل‌های فیزیکی، جایگاه ویژه‌ای دارند.

جیا و ونگ مدل دوبعدی هیدرودینامیک به نام CCHE2D، برای مطالعه تغییرات جریان در کانال‌های روباز توسعه دادند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که این مدل را می‌توان برای مطالعه جریان‌های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرایندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های آبرفتی بکار برد [۶]. نصار 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 [۳].

در این تحقیق با کمک مدل دو بعدی CCHE2D، الگوی جریان و رسوب، تغییرات بستر، هیدرولیک جریان در قوس رودخانه، تغییرات سرعت در پلان و مقاطع عرضی، در بازه پیچان‌رود پایین دست سد میناب مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

همانطور که در شکل شماره (۱) مشاهده می‌شود محدوده مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه میناب از محل سد استقلال تا پل شهرستان میناب، استان هرمزگان است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی $08^{\circ} 06' 57''$ تا $04' 32'' 57''$ طول شرقی و $33^{\circ} 09' 27''$ تا $18' 09' 27''$ عرض شمالی قرار گرفته است. این بازه از شرق به سد استقلال و از غرب به پل شهرستان میناب محدود می‌شود. طول بازه حدود $4/5$ کیلومتر و با توجه به تراز توپوگرافی ابتدا و انتهای بازه به ترتیب در حدود $40/5$ و 32 متر بالاتر از سطح دریا، می‌باشد.

ارزیابی قابلیت یک مدل عددی در شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و رسوب (مطالعه موردی: پیچان‌رود پایین دست سد میناب)

غلامرضا نجفی^{۱*}، محمود اعظمی راد^۲، مهدی نجفی^۳
تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

چکیده

تحقیق حاضر سعی دارد قابلیت یک مدل هیدرودینامیک در پایش و پیش‌بینی فرایندهای حاکم بر جریان و رسوب در رودخانه را ارزیابی نماید. با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و نیروهای تنش برشی بر فرسایش کناره‌های رودخانه، از یک مدل عددی دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی (حد فاصل سد استقلال تا پل شهرستان میناب - استان هرمزگان) استفاده شد. با این هدف، اقدام به شبیه‌سازی الگوی جریان آب و رسوب در یک کانال مئاندری با رژیم جریان پایدار گردید تا بتوان تغییرات الگوی جریان و رسوب و همچنین تغییرات ریخت‌شناسی را مورد ارزیابی قرار داد. در این بررسی پس از نقشه‌برداری دقیق، نقشه توپوگرافی با مقیاس مناسب از محدوده مورد مطالعه بدست آمد و سپس هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف تهیه و در نهایت بر اساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان و رسوب رودخانه، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایج همچون تغییرات عمق، سرعت جریان، بار معلق و تغییرات بستر در رودخانه استخراج گردید. در پایان، از دو معیار آماری M.A.P.E و R.M.S.E، برای ارزیابی کارایی مدل استفاده شد. نتایج بیانگر دقت مناسب و خطای ناچیز مدل در پیش‌بینی پارامترهای جریان و رسوب می‌باشد.

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

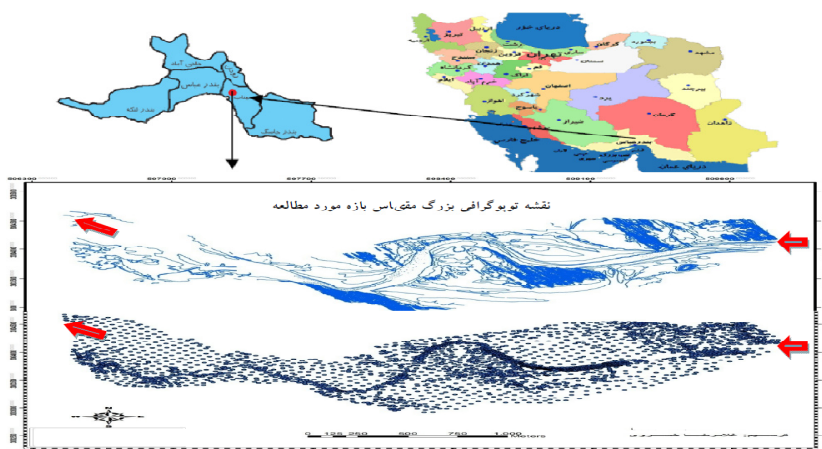
gholamreza.khosravi@yahoo.com

^۲ دانشجوی دکتری علوم مهندسی آب پردیس دانشگاه فردوسی مشهد

zamyrad@yahoo.com

^۳ فوق لیسانس تاسیسات آبیاری دانشگاه شهید باهنر کرمان

jouyab@yahoo.com



شکل ۱- نمایی از موقعیت بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

Figure 1. View of the location of Minab River

جدول ۱- مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه گیری شده در مقاطع مختلف بازه مورد مطالعه

Table 1. Parameter values velocity, depth and flow rate measured at different sections

دبی جریان flow (m ³ /s)	عمق جریان (depth) (m)	سرعت متوسط velocity (m/s)	حداکثر سرعت متوسط عمقی Velocity max (m/s)	sections	مقاطع
154	1.52	1.08	1.78	A	مقطع A
151	1.94	1.25	1.84	B	مقطع B
142	1.5	1.06	1.66	C	مقطع C
-	1.77	-	-	In	مقطع ورودی
-	1.41	-	-	out	مقطع خروجی

جدول ۲- مقادیر خصوصیات رسوبات کناره‌های بازه مورد مطالعه

Table 2. values of Features deposits banks

(m) D ₅₀	ضریب اطمینان Confidence (بدون بعد) (No dimension)	چسبندگی رسوب Adhesive deposition (kg/cm ²)	وزن مخصوص weight Specific (m ³ / kg)	زاویه اصطکاک (درجه) angle Friction (degrees)
0.01	1	22.25	2.57	17

رودخانه میناب پرداخته شد. در سه مقطع از مقاطع نقشه برداری شده به اندازه گیری پارامترهای جریان پرداخته شد و بیشترین تاکید بر روی قوس‌ها متوالی رودخانه بود تا بتوان تاثیر جریان‌های ثانویه و نیروهای گریز از مرکز را در سر پیچ‌های متاندر بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر رودخانه بررسی کرد.

همان طور که در جدول شماره (۱) 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.

۲- مطالعات رسوبات بستر رودخانه به چندین بخش تقسیم شد. برداشت نمونه‌ها از بستر رودخانه، بر اساس مقاطع عرضی از پایین دست (پل میناب) به سمت بالا دست (سد استقلال) با نامهای (P, A, B, C, ...) انجام شده است یعنی در امتداد یک مقطع عرضی، نقاطی در ساحل چپ، ساحل راست و بخش میانی رودخانه انتخاب

مدل CCHE2D

یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان ماندگار، غیر ماندگار آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های 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 دو بعدی بوده، که برای ساخت هندسه میدان و شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای 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.

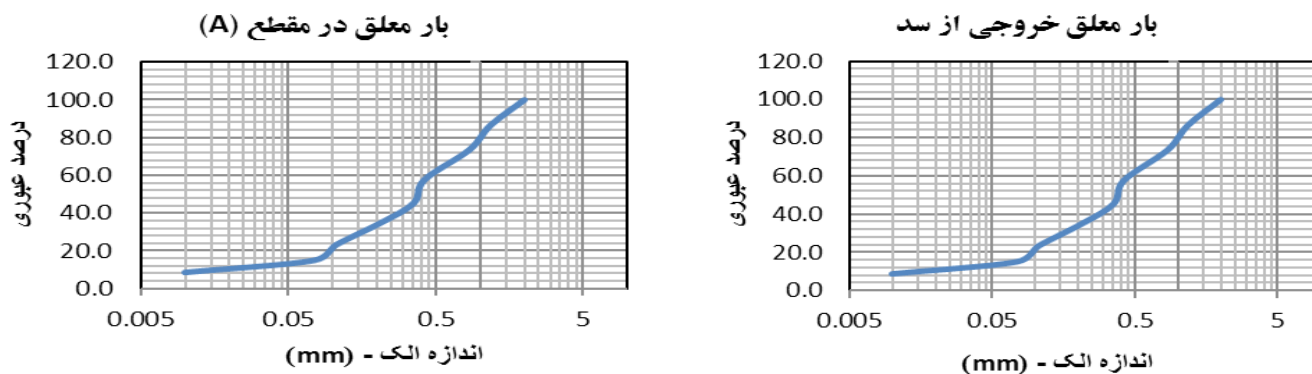
اندازه‌گیری داده‌های میدانی و آزمایشگاهی

۱- نقشه برداری و اندازه‌گیری پارامترهای جریان در گام نخست این پژوهش، به نقشه‌برداری بازه انتخابی از

جدول ۳- اطلاعات وزن مخصوص نمونه‌های برداشت شده

Table 3. Information specific weight of selective samples

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



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)

Figure 2. Size curve of suspended load and section (A) measurement

۵- شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب

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

ورود و فراخوانی فایل Geo؛ تنظیم شرایط اولیه جریان (عمق آب بالادست و پایین دست)؛ تنظیم شرایط اولیه رسوب از جمله زبری بستر، فرسایش پذیری بستر اولیه، حداکثر ضخامت رسوب گذاری، حداکثر عمق فرسایش و تعیین ضخامت سه لایه سطحی بستر در نقاط مختلف؛ تنظیم پارامترهای جریان آب شامل: گام زمانی (۲۴ ساعت)، انتخاب مدل آشفتگی، انتخاب فرمول محاسبه؛ تنظیم پارامترهای رسوب از جمله: کلاس بندی 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 دانه‌بندی و وزن بار معلق بر حسب دبی جریان) و در نهایت اجرای شبیه‌سازی. در نرم‌افزار CCHE2D، به منظور برآورد انتقال رسوب از چهار معادله SEDTRA، ایکر وایت اصلاح شده، انگلاند و هانسن اصلاح شده و فرمول وو و همکاران استفاده می‌گردد و معادله‌ای که انطباق بهتری با واقعیت داشته باشد انتخاب می‌گردد. [۵]. با توجه به غالب بودن بار معلق در بازه مورد مطالعه، چهار معادله حمل رسوب برای شبیه‌سازی بار معلق مورد مقایسه قرار گرفتند و در نهایت مشاهده شد، معادله انتقال رسوب (Wu et al. formula)، برآورد نزدیکتری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

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، D_{50} و ضریب اطمینان مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳- وزن مخصوص حقیقی: همانطور که در جدول شماره (۳) نشان داده شده است در این تحقیق در آزمایشگاه خاکشناسی، وزن مخصوص حقیقی رسوبات به روش پیکنومتری تعیین گردید [۲].

۴- اندازه‌گیری بار معلق

با توجه به اینکه جریان ورودی بازه مورد مطالعه، جریان خروجی از دریچه‌های سد میناب (با دبی ثابت) است و بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده، این جریان حاوی رسوبات ریزدانه به صورت بار معلق است و شرایط مرزی ورودی فاقد بار بستر می‌باشد. بنابراین برای تعریف شرایط مرزی رسوب تنها بار معلق اعمال می‌شود. بدین منظور در اولین مقطع ورودی جریان و مقطع اندازه‌گیری (A) با روش نمونه‌گیری غیر نقطه‌ای، اندازه‌گیری شد [۲]. در شکل شماره (۴)، منحنی دانه‌بندی رسوبات بار معلق برای اولین مقطع ورودی بازه و مقطع اندازه‌گیری (A)، نشان داده شده‌است.

۴- تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D:

مدل CCHE2D برای ساخت هندسه میدان و شبکه بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH، استفاده می‌شود.

۶- واسنجی مدل عددی CCHE2D

با انجام چندین بار مدل‌سازی و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج مدل، مرحله بعدی واسنجی مدل عددی CCHE2D است تا از طرفی درصد خطای مدل در پیش‌بینی پارامترها مشخص و از طرف دیگر شرایطی استاندارد در خصوص تنظیمات مدل و اندازه‌گیری پارامترها به وجود آید. بدین منظور در بازه مورد مطالعه رودخانه میناب، فرضیه تغییر ضریب زبری (حساس‌ترین پارامتر) بر الگوی جریان با استفاده از مقدار (مشاهدات صحرائی) در دامنه ۰/۰۳۴ تا ۰/۰۶۳ و تغییر آن و مقدار به دست آمده از روابط (معادلات) در دامنه ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵ مقایسه گردید.

همان‌گونه که از جداول و شکل فوق مشاهده می‌شود، استفاده از ضریب زبری محاسباتی بدست آمده از روابط و معادلات در دامنه ۰/۰۳۳-۰/۰۵۲، نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد.

۷- ارزیابی کارایی مدل

در ادامه تحقیق، نتایج به دست آمده از مدل را با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت مقایسه می‌گردد تا به دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب انرژی پی ببریم. جهت بررسی

دقیق مدل از دو روش آماری برای ارزیابی دقت مدل استفاده کردیم که عبارتند از جذر میانگین مربع خطا و میانگین درصد خطای مطلق و روابط آنها به شرح ذیل است:

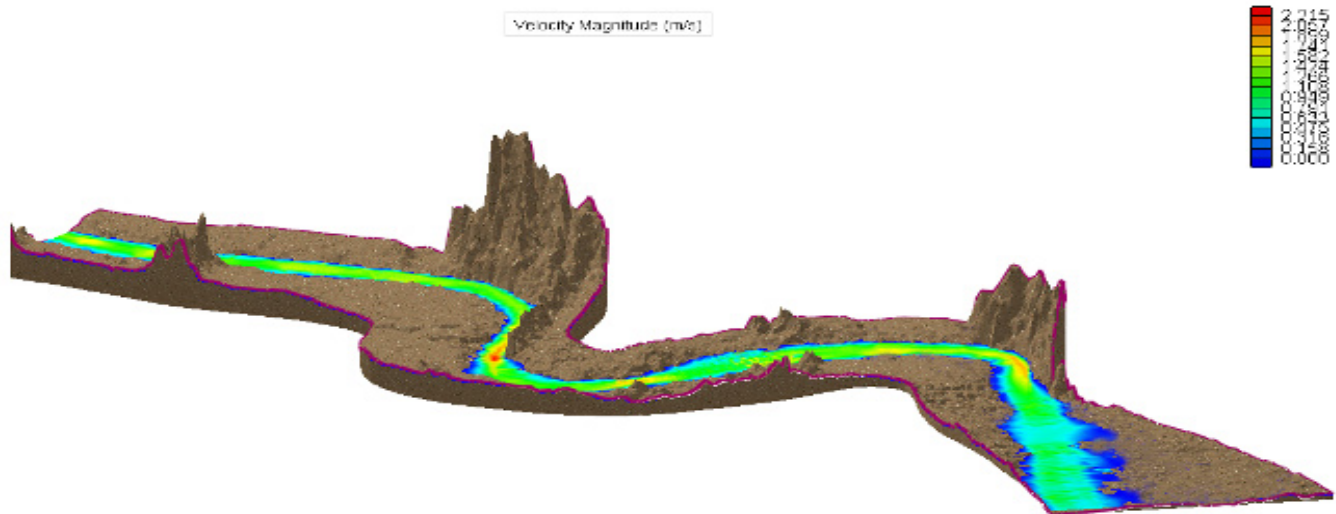
$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (4)$$

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

نتایج و بحث

۱- پارامتر سرعت جریان آب

با ورود جریان به قوس اول، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. 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 کانال متمایل می‌شود. با پیشروی جریان در کانال، این روند ادامه داشته، تا جائیکه جریان ثانویه بتواند بر گرادیان طولی فشار غلبه کند؛ این



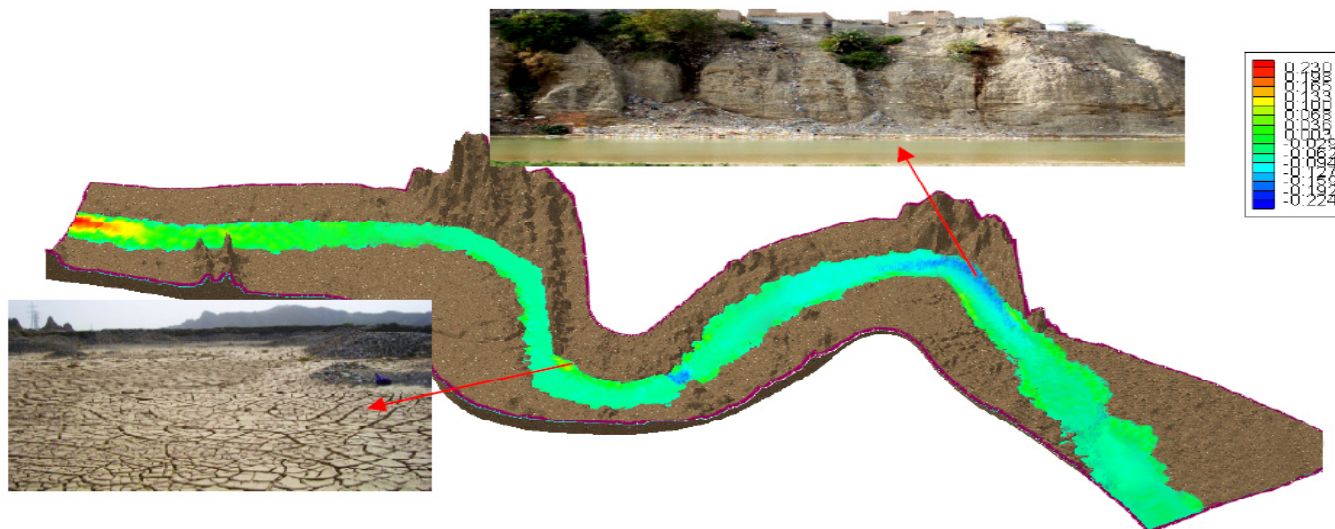
شکل ۳- تصویر توزیع متغیر سرعت در بازه مورد مطالعه

Figure 3. Distribution of variable speed

جدول ۴- مقایسه پارامتر متوسط سرعت و عمق جریان در حالت تغییر ضریب زبری

Table 4. Compare the mean change in the velocity and depth of the roughness coefficient

مقاطع اندازه‌گیری شده sections	پارامتر متوسط سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده (s/m) Velocity Measured	پارامتر عمق جریان (P) اندازه‌گیری شده (m) (depth) Measured	پارامتر سرعت جریان (V) محاسباتی مدل Computational models (s/m) velocity		پارامتر عمق جریان (P) محاسباتی مدل Computational models (m) (depth)	
			زبری (۰,۰۳۴ - ۰,۰۶۳) Roughness	زبری (۰,۰۳۳ - ۰,۰۶۳) Roughness	زبری (۰,۰۳۴ - ۰,۰۶۳) Roughness	زبری (۰,۰۵۲ - ۰,۰۳۳) Roughness
مقطع A	1.08	1.52	0.95	0.98	1.75	1.68
مقطع B	1.25	1.94	1.15	1.19	2.23	2.11
مقطع C	1.06	1.5	1.08	1.12	1.57	1.46



شکل ۴- تصاویر تغییرات بستر، فرسایش و رسوب گذاری بازه مورد مطالعه رودخانه میناب

Figure 3. Changes in bed, erosion and sedimentation

و رسوب در یک بازه پیچان رود طبیعی شبیه سازی گردید و نتایج حاصل، قابلیت مدل عددی بکار رفته را در پیش بینی پارامترهای جریان و رسوب تایید نمود. بنابراین بر اساس بررسی های انجام شده می توان پذیرفت، مدل عددی حاضر به نحو مطلوبی قادر به بررسی الگوی جریان آب و رسوب در کانال های پیچان رودی طبیعی می باشد. همچنین در این تحقیق برای شبیه سازی حالات انتقال آشفستگی، از دو مدل لزجت گردابه ای و مدل $k-\epsilon$ استفاده گردید و معلوم شد که به طور متوسط مدل آشفستگی لزجت گردابه ای برای برآورد توزیع سرعت و تغییرات عمق جریان در کل قلمرو جریان مناسب است اما در محدوده دیواره رودخانه بخصوص قسمت مقعر قوس رودخانه دقت کمتری دارد. لذا با توجه به خروجی مدل به نظر می رسد برای برآورد تغییرات عمق و توزیع سرعت جریان در چنین محدوده هایی، مدل آشفستگی $k-\epsilon$ دقیق تر است.

مراجع

1. Alizadeh, A. 2006. Principles of Applied Hydrology, 19 th edition, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
2. Jafari Haghighi, M. 2003. Methods of soil sampling and physical and chemical analysis with emphasis on theory and application principles. Nedaye zohi publication, 236pp.
3. Nassar, M. A. 2011. Multi-parametric sensitivity analysis of CCHE2D for channel flow simulations in Nile River. Journal of Hydro-environment Research, 5 (3): 187-195.
4. Telvari, E. R. 2004. Fundamentals of River Training and Engineering, Education Organization Soil

پدیده در نیمه دوم قوس اول رخ می دهد. در این مقاطع، جریان ثانویه با غلبه بر گرادیان طولی فشار، حداکثر سرعت در مقاطع را به سمت جداره خارجی کانال منتقل می کند. حداکثر سرعت جریان در کل قلمرو جریان نیز در این ناحیه است؛ علت این امر، محدود بودن این ناحیه از رودخانه توسط دیواره ها و عدم پخش سیلاب در نواحی سیلاب دشت است. با ورود جریان به قوس دوم، به علت افزایش عرض بازه و انحنای قوس، عمق جریان کاهش پیدا کرده و تغییرات مقدار سرعت بین قوس داخلی و خارجی نسبت به قوس اول کمتر می شود. در انتهای قوس مزبور عرض مقطع جریان کاهش یافته و سبب افزایش سرعت و عمق جریان شده است

پارامترهای فرسایش و رسوبگذاری

همان طور که در شکل شماره (۴) 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. 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 به سمت پایین دست دارای بستر سنگی با شیب کم بوده و عمل فرسایش و کنش در ساحل مقعر محدود صورت می گیرد و تنها در بستر اصلی در اثر جریان ثانویه و حلزونی در این محدوده، رسوبات بستر به ساحل محدب و پایین دست انتقال می یابند.

نتیجه گیری

در این پژوهش با بهره گیری از یک مدل دو بعدی عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، به نام CCHE2D، الگوی جریان آب

Conservation and Watershed Management Research Institute.

5. 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

6. 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.