

تأثیر سازه حفاظتی آب‌شکن بر قوس رودخانه با استفاده از مدل ریاضی CCHE2D (مطالعه موردی: رودخانه میناب)

احمد نوحه‌گر^{۱*}، عاطفه جعفرپور^۲، محمد رستمی^۳، محمدتقی آوند^۴

۱. استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

۳. استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

۴. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۲۷؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۱/۲۷)

چکیده

رودخانه‌هایی که جداره ناپایدار دارند، مشکلات بسیار زیادی را در کوتاه‌مدت و درازمدت به وجود می‌آورند. تخریب تدریجی جداره رودخانه و در نتیجه تهدید سازه‌ها و اراضی مجاور رودخانه، ایجاد زمینه فرایند رسوب‌گذاری، کاهش زاویه داخلی پیچ‌ها و در نهایت به وجود آمدن مسیری جدید برای رودخانه از تأثیرات حرکت آب در پیچان‌رودهای دارای جداره ناپایدار است. در این تحقیق اثرگذاری آب‌شکن‌های متوالی روی الگوی جریان و رسوب و در نهایت محافظت از کرانه‌ها در رودخانه میناب با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D بررسی شده است. پارامترهایی که در مرحله واسنجی استفاده شدند، شامل سرعت جریان و عمق آب بود که این پارامترها در سه قوس موجود در رودخانه از سد تا پل اول اندازه‌گیری شده است. پارامترهای دیگری همچون تغییرات کف بستر، تغییرات تنش برشی و... نیز از نتایج مدل به دست آمده است. در این مرحله همچنین برای تهیه مدل بهینه از شبکه‌بندی‌های مختلف استفاده شد و شبکه ۵۰*۵۰ به دلیل اینکه به نتایج اندازه‌گیری‌های صحرائی نزدیک‌تر بود، انتخاب شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد هندسه رودخانه با دبی موجود و میزان رسوب تنظیم می‌شود و آب‌شکن در هدایت سرعت و تنش برشی به سمت تالوگ رودخانه تأثیرگذار است، به طوری که وجود سری آب‌شکن سبب ۶۶ درصد کاهش سرعت و نیز سبب انحراف خطوط سرعت حداکثر از کرانه‌ها و محافظت از دیواره رودخانه می‌شود. انحراف آب‌شکن‌ها از کناره رودخانه از سر آب‌شکن‌ها شروع می‌شود. طول آب‌شکن‌ها در این تحقیق ۳۰ متر بوده است و همچنین از بین رفتن فرسایش ۲۰ سانتی‌متری و جایگزین شدن پنج سانتی‌متر رسوب‌گذاری در کناره رودخانه و در نتیجه تثبیت و حفاظت کناره رودخانه می‌شود.

کلیدواژه‌گان: آب‌شکن، رودخانه میناب، ساماندهی، شبیه‌سازی عددی، مدل CCHE2D.

مقدمه

به‌طور کلی، شبیه‌سازی جریان آب و حمل رسوبات در رودخانه‌ها، موضوع مورد علاقه بسیاری از پژوهشگران علوم مهندسی رودخانه و هیدرولیک رسوب است. همچنین مدل‌سازی فرایندهای حمل رسوب که بر زمان مبتنی هستند و ارتباط مستقیمی با تغییرات بستر رودخانه دارند هنوز به‌عنوان موضوعات پژوهشی بسیار مهم در مهندسی و مدیریت رودخانه‌ها هستند [۱]. با پیشرفت‌های به‌وجودآمده در توانمندی کامپیوترها و توسعه روش‌های محاسبات عددی، امروزه کاربرد مدل‌های CFD، به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مهندسان هیدرولیک در بررسی کانال‌های روباز و فرایندهای رودخانه‌ای محسوب می‌شود [۲]. به کمک مدل‌سازی ریاضی می‌توان مسائل مهندسی رودخانه‌های زیادی را بررسی کرد. بررسی قابلیت مدل‌های مختلف برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان در یک بازه رودخانه‌ای نظیر عمق، سرعت و تنش برشی در کناره‌های رودخانه از نیازهای اساسی در طرح‌های مهندسی آن است. با این حال، از نظر کاربردی، کمترین نیازها به اطلاعات صحرائی، حجم محاسباتی اندک و درجه اعتماد کاربرد مدل‌های ریاضی در رودخانه باید مورد توجه قرار گیرد. از آنجا که ساختار جریان‌های ثانویه سه‌بعدی است، بنابراین شبیه‌سازی آنها به‌ویژه در رودخانه‌ها به مدل‌هایی نیاز دارد که جریان آب و حمل رسوب در کناره‌ها و کف رودخانه را به‌صورت سه‌بعدی بیان کند. بدیهی است که فقط مدل‌های دوبعدی می‌توانند تا حدودی کارایی یک مدل سه‌بعدی را در این مقوله داشته باشند به‌گونه‌ای که به شبیه‌سازی اثر جریان‌های ثانویه قادر باشند.

در زمینه ساماندهی رودخانه و مدل‌های عددی تحقیقات مختلفی صورت گرفته است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

جیا و همکارانش (۲۰۰۶) به شبیه‌سازی عددی جریان، حمل رسوب، تغییرات توپوگرافی بستر و سازه‌های رودخانه‌ای، در رودخانه آرکانزاس^۱، با مدل CCHE2D پرداختند. نتایج استفاده از دایک را تأیید کردند و نشان دادند وجود دایک سبب می‌شود مقدار رسوب کاهش پیدا کند [۳].

مارتین و همکارانش (۲۰۱۲) تحقیقاتی در زمینه مقابله با آب‌شستگی در قوس انجام دادند. در این تحقیق کل قوس

بیرونی توسط سنگ‌چین پوشانده شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد سنگ‌چین می‌تواند به‌صورت مؤثر از آب‌شستگی قوس بیرونی بکاهد. همچنین سنگ‌چین با انتقال خط‌القعر به سمت مرکز کانال، ساحل بیرونی قوس را محافظت می‌کند و با قراردادن سنگ‌چین به داخل خط‌القعر، توسعه آب‌شستگی کاهش می‌یابد و ساحل بیرونی کمتر تحت تأثیر فرسایش قرار می‌گیرد [۴].

قلی‌زاده و همکارانش (۲۰۱۱) طی تحقیقی با عنوان «شبیه‌سازی یک بعدی و شبه دوبعدی جریان‌های سیلابی در رودخانه‌ها (رودخانه گرگان رود، ایستگاه هیدرومتری آق‌قلا)» با واسنجی مدل‌های ریاضی یک‌بعدی و شبه دوبعدی، کارایی آنها را در حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه را مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد متوسط خطای تخمین توزیع سرعت در عرض رودخانه به کمک مدل‌های یک بعدی و شبه دوبعدی به ترتیب حدود ۱۳/۲ و ۷/۵ درصد است [۵].

داون و همکارانش (۲۰۰۹) ساختار جریان‌های متوسط و آشفته پیرامون آب‌شکن مستقیم واقع در یک نهر آزمایشگاهی با بستر صلب را مطالعه کردند. ایشان مشاهده کردند جریان متوسط در هر دو جهت جانبی و قائم جدا شده و در داخل ناحیه چرخشی پشت آب‌شکن، ترکیبی از گردابه‌های افقی و قائم وجود دارد. هر سه مؤلفه تنش‌های قائم رینولدز با عبور از مقطع آب‌شکن تشدید شده و بیشترین تنش در عمق میانی نهر و در امتداد لایه تنش برشی اتفاق می‌افتد [۶].

وو (۲۰۰۹) در مطالعات خود جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین را شبیه‌سازی کرد؛ همچنین با استفاده از مدل عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دومعادله‌ای $k - E$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه کرد. بر اساس مقایسه او این نتیجه به‌دست آمد که همه مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی (نزدیک) درباره جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در مورد جریان‌های پیچیده، دو مدل آشفتگی $k - E$ و RNG نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. همچنین بر اساس این پژوهش، در میان مدل‌های دومعادله‌ای، مدل $k - E$ و مدل RNG درباره جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری ارائه می‌کنند [۷].

ژانگ و همکارانش (۲۰۰۹) مدل دوبعدی هیدرودینامیک

تحقیقات وی در رودخانه‌های پروبیانکا^۱ و مسرانکا^۲ متعلق به حوضچه زهکشی رودخانه رابا^۳ واقع در کوه‌های فلیش‌کارپاتین^۴ لهستان انجام شد. از نتایج تحقیقات وی این است که ساماندهی رودخانه تعادل سیستم آبراهه را به هم می‌زند و بیشتر طرح‌های ساماندهی در آبراهه‌های کوهستانی در طولانی‌مدت مؤثر نیستند [۱۳].

وو و همکارانش (۲۰۰۵) ساماندهی رودخانه و تأثیر آن بر فرایندهای رودخانه‌ای را در پایین‌دست رودخانه زرد^۵ بررسی کردند. سازه‌های ساماندهی در این رودخانه شامل آب‌شکن‌ها، اپی‌های کوتاه و جدار پوشش‌ها هستند. نتایج نشان داد بر اثر ساماندهی بازه‌های انتقالی، الگوی انتقالی آبراهه به الگوی پیچ و خم‌دار (مئاندری) محدود شده تغییر شکل یافت. آنان دریافتند که رودخانه هندسه داخلی خود را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که انتقال رسوب همراه با دبی موجود فراهم شود [۱۴].

لازارید و همکارانش (۲۰۰۴) ساماندهی رودخانه اکسیراس^۶ واقع در پلوپونس^۷ یونان را بررسی کردند. مطالعات هیدرولوژیکی روی رودخانه یادشده نشان داد گابیون‌ها مناسب‌ترین گزینه برای ساماندهی است، زیرا این سازه در مقابل جریان برشی مقاومت می‌کند و محافظ سواحل و کف آبراهه اصلی است [۱۵].

آندرزد و همکارانش (۲۰۱۳) در پژوهشی در لهستان با هدف بررسی تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه بیالکا قبل و بعد از دو سیلاب بزرگ انجام شد. با جمع‌آوری مؤلفه‌های مورد نیاز، مدل‌سازی رودخانه برای سیلاب‌های یادشده با مدل cche2d انجام شد. نتیجه مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بر دقت زیاد مدل در تخمین تغییرات بستر رودخانه تأکید دارد [۱۶].

در این تحقیق برای طراحی آب‌شکن‌ها در بازه‌ای از رودخانه میناب در استان هرمزگان از مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل دوبعدی CCHE2D^۸ که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی

به نام CCHE2D را، برای مطالعه تغییرات جریان در کانال‌های روباز توسعه دادند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد از این مدل می‌توان برای مطالعه جریان‌های پایدار، ناپایدار و آشفته و همچنین فرایندهای حمل رسوب و تغییرات مورفولوژیکی کانال‌های آبرفتی استفاده کرد [۸].

واقفی و همکارانش (۲۰۱۳) با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d تأثیر شعاع انحنا بر الگوی جریان پیرامون آب‌شکن T شکل مستقر در قوس به‌صورت مستغرق و غیرمستغرق را مطالعه کردند. بررسی‌های آنها بیان می‌کند که با افزایش شعاع انحنا در پایین‌دست آب‌شکن غیرمستغرق، ابعاد گردابه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده کردند که هر چه شعاع انحنای نسبی کمتر باشد، ناحیه وسیع‌تری در پایین‌دست آب‌شکن مستغرق سکون نسبی جریان خواهد داشت [۹].

واقفی و همکارانش (۲۰۱۴) به‌صورت عددی اثر عدد فرود و درصد استغراق بر الگوی جریان پیرامون آب‌شکن T شکل مستقر در قوس ۹۰ درجه را با استفاده از نرم‌افزار Flow-3d بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش عدد فرود در پایین‌دست آب‌شکن، فاصله جریان‌های بازگشتی از آب‌شکن حدود ۱۰ درصد بیشتر می‌شود و همچنین در نزدیکی دیواره داخلی با افزایش استغراق آب‌شکن، سرعت طولی به نصف سرعت اولیه کاهش می‌یابد [۱۰].

اکسیوفنگ و همکارانش (۲۰۱۵) شدت پخش آشفستگی، در اطراف چهار نوع آب‌شکن کماتی، پروانه‌ای‌شکل، دوزنقه‌ای و چنگکی شکل تحت شرایط جریان یکسان را مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین آشفستگی در اطراف آب‌شکن با مقطع دوزنقه‌ای شکل رخ می‌دهد [۱۱].

در مطالعه‌ای فاضلی و همکارانش (۱۹۹۹) به‌منظور مطالعه جریان آشفته در ناحیه آب‌شستگی موضعی اطراف یک آب‌شکن غیرمستغرق با استفاده از مدل عددی به بررسی آزمایشگاهی تغییرات آب‌شستگی و چگونگی تشکیل چاله آب‌شستگی در اطراف آب‌شکن‌های مستقیم و مستقر در موقعیت‌های مختلف قوس ۹۰ درجه پرداختند و نتیجه گرفتند که هرچه موقعیت استقرار آب‌شکن به سمت انتهای قوس پیش می‌رود، مقدار آب‌شستگی بیشتر می‌شود [۱۲].

کوسیل نیاک (۲۰۰۷) تأثیر ساماندهی رودخانه بر تغییرات آبراهه‌ها را در مناطق کوهستانی و علل شکست برخی از طرح‌های مختلف ساماندهی را مطالعه کرد.

1. Probianka
2. Mszanka
3. Raba
4. Flysh Carpathian
5. Huang He
6. Xerias
7. Peloponnese
8. Two- dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model

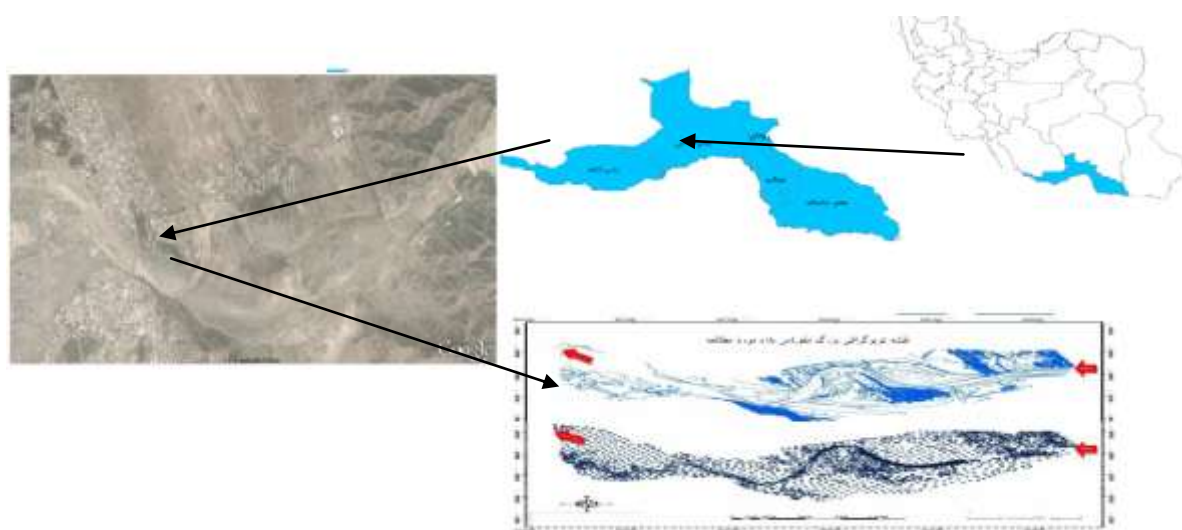
"۲۴'۵۰°۵۶ طول شرقی و "۴۱'۰۹°۲۷ تا "۴۲'۰۱°۲۷ عرض شمالی قرار گرفته است. این بازه از شرق به سد استقلال و از غرب به پل شهر میناب محدود می‌شود. طول بازه حدود ۴/۵ کیلومتر است. منطقه مطالعه شده در محدوده شهر میناب قرار دارد. در این ناحیه فرسایش قوس رودخانه سبب تهدید منازل مسکونی شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده، رودخانه و منازل مسکونی روی لبه دیواره رودخانه میناب را نشان می‌دهد. آب‌شکن‌های پیشنهادی به منظور کنترل فرسایش در قوس این ناحیه احداث خواهد شد.

(NCCHE)^۱ در دانشکده می‌سی‌سی‌پی آمریکا توسعه یافته، استفاده شده است. بدین‌منظور چهار آب‌شکن در طول ناحیه مطالعه شده جانمایی شده‌اند و اثربخشی این سازه روی الگوی جریان بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

منطقه مطالعه شده، بازه‌ای از رودخانه میناب پایین دست سد استقلال شهرستان میناب، استان هرمزگان است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی "۳۳'۰۶°۵۷ تا



شکل ۱. نمایی از بازه مطالعه شده رودخانه میناب

میناب تهیه شد که توسط مهندسان رودخانه و شرکت‌های مشاور انجام شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار GIS فایل ورودی نقشه برای نرم‌افزار CCHE2D آماده شد. ۲. مش‌بندی

مدل عددی CCHE2D با به‌کارگیری نرم‌افزار پیش‌پردازنده CCHE-MESH به ایجاد یک شبکه ساختاری^۲ دوبعدی برای میدان مد نظر می‌پردازد. به همین‌منظور نقشه‌های توپوگرافی منطقه تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزار AutoCAD و نرم‌افزار Dxf2xyz فایل mesh*_xyz که همان فایل ورودی نرم‌افزار CCHE2D است تولید شد و سپس نتایج به نرم‌افزار CCHE2D-MESH به‌منظور تعیین مرزهای بازه مطالعاتی و شبکه محاسباتی معرفی شد. پس از ورود داده‌های هندسی به

روش انجام کار شامل مراحل زیر است:

۱. تهیه نقشه توپوگرافی منطقه؛
۲. مرزبندی میدان محاسباتی؛
۳. مش‌بندی؛
۴. تعریف سناریوهای مختلف از نظر طرز قرارگیری آب‌شکن‌ها و شرایط اولیه جریان؛
۵. شبیه‌سازی.

روش انجام کار شامل مراحل زیر است:

۱. تهیه نقشه توپوگرافی منطقه
- در اولین مرحله نقشه توپوگرافی بازه انتخابی از رودخانه

1. National Center for Computational Hydroscience and Engineering

مدل CCHE2D

مدل CCHE2D یک مدل دوبعدی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب برای جریان‌های غیرماندگار است که توانایی شبیه‌سازی و تحلیل جریان‌های انتقال رسوبات و پروسه‌های مورفولوژیکی را داراست و دو قسمت دارد:

۱. CCHE-MESH Generation برای مش‌بندی ناحیه مد نظر
 ۲. CCHE-GUI برای شبیه‌سازی جریان و رسوب با استفاده از مش به‌دست‌آمده
- روند به کار گرفته‌شده در مدل CCHE2D به‌طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

معادلات حاکم

مدل‌سازی عددی بر اساس معادلات ناویر استوکس است. این معادلات شامل معادله پیوستگی و ممتم است. معادله پیوستگی دوبعدی به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

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

معادله ممتم نیز به‌صورت زیر در دو بعد تعریف می‌شود:

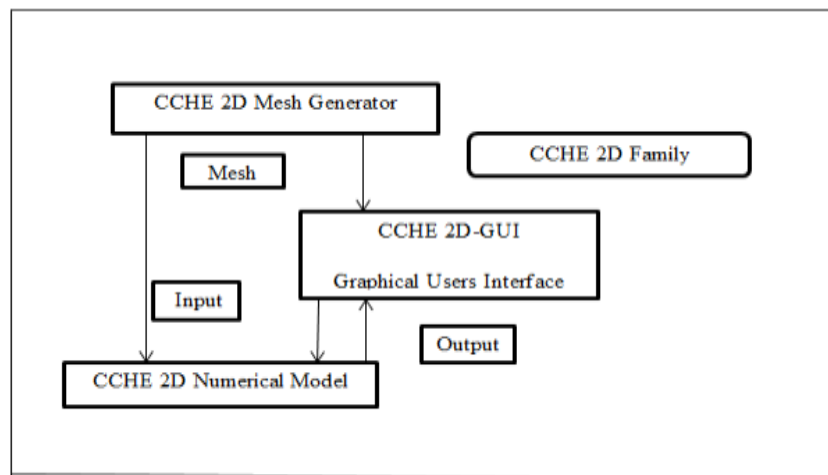
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \quad (2)$$

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

محیط نرم‌افزار و تعیین مرزها، محدوده مد نظر با استفاده از روش جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شده است.

۳. مرزبندی میدان محاسباتی
- پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم‌افزار CCHE-GUI معرفی شد. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در ورودی رودخانه مد نظر از شرط مرزی دبی جریان استفاده شد.
۴. تعریف سناریوهای مختلف از نظر طرز قرارگیری آب‌شکن‌ها و شرایط اولیه جریان
۵. شبیه‌سازی

پس از وارد کردن شرایط مرزی، شرایط اولیه و کلیه پارامترهای مربوط به مدل‌سازی، مدل آماده اجراست. پس از اجرای مدل شبیه‌سازی شده به راحتی می‌توان پارامترها و مقادیر مورد نیاز را استخراج کرد. این مدل خروجی‌های دوبعدی و بسیار گویایی از جمله توزیع عرضی و طولی پروفیل سرعت، توزیع تنش برشی، دبی، تغییرات سطح آب در رودخانه و همچنین چگونگی تغییرات فرایندهای رسوبی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد، اما یکی از خروجی‌های ارزشمند این مدل به‌خصوص در بخش رسوبی که در مطالعات رودخانه‌ای بسیار سودمند است. تخمین متوسط میزان تغییرات عمقی فرسایش یا رسوب‌گذاری، حجم رسوب‌گذاری یا فرسایش‌پذیری و همچنین محدوده (مساحت) کلی مربوط به نواحی رسوب‌گذار یا فرسایش‌پذیر در رودخانه است.



شکل ۲. روند شبیه‌سازی مدل CCHE2D

در معادلات یادشده: CCHE-MESH به ایجاد یک شبکه ساختاری^۴ دوبعدی برای میدان مد نظر می‌پردازد.

به همین منظور نقشه‌های توپوگرافی منطقه تهیه شد و با استفاده از نرم‌افزار GIS فایل xyz*mesh که همان فایل ورودی مدل CCHE2D تولید شد و سپس نتایج به نرم‌افزار CCHE2D-MESH به منظور تعیین مرزهای بازه مطالعاتی و شبکه محاسباتی معرفی شد. این مدل برای حل معادلات جریان از روش المان محدود استفاده می‌کند. شبکه‌بندی لازم توسط نرم‌افزار CCHE-MESH انجام گرفته است. بدین منظور از شبکه ۵۰*۵۰ استفاده شده است. پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم‌افزار CCHE-GUI معرفی می‌شود. شرط مرزی ورودی جریان عبارت خواهد بود از دبی ثابت ۱۵۰ مترمکعب بر ثانیه و شرط مرزی خروجی نیز ارتفاع ثابت سطح آب و دیواره‌ها است. از مرز دیواره برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده است. پس از ورود اطلاعات اولیه به مدل، مدل به‌ازای دو سناریوی مختلف اجرا شد. در سناریوی اول فرض شد که رژیم جریان رودخانه طبیعی است و هیچ‌گونه آب‌شکنی در آن احداث نشده است. در این حالت به واسنجهی مدل پرداخته و نیز دقت مدل را با پارامترهای آماری ارزیابی کرده و پس از اطمینان از مدل، در سناریوی دوم تأثیر آب‌شکن‌های وارد شده روی شرایط هیدرولیکی و سیلابی رودخانه بررسی شد و نتایج به دست آمده با رودخانه در حالت عادی مقایسه شد.

شکل ۳ نشان‌دهنده توپوگرافی رودخانه میناب در محیط مدل CCHE2D و شکل ۴ نیز نشان‌دهنده مکان قرارگیری آب‌شکن‌ها در کرانه رودخانه در منطقه مطالعه شده است.

نتایج

پارامترهایی که در مرحله واسنجهی استفاده شد، شامل سرعت جریان و عمق آب بود که در سه قوس رودخانه اندازه‌گیری شده است. در این مرحله همچنین برای تهیه مدل بهینه از شبکه‌بندی‌های مختلف استفاده شد و شبکه ۵۰*۵۰ به دلیل اینکه به نتایج اندازه‌گیری‌های صحرائی نزدیک‌تر بود، انتخاب شد. در جدول‌های ۱ و ۲ نتایج واسنجهی مدل آورده شده است.

u و v به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق به منظور x, y, z زمان، g شتاب جاذبه، ρ دانسیته آب (وزن مخصوص آب)، h عمق جریان و f_{Cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق و τ_{bx} و τ_{by} تنش‌های برشی بستر به منظور x و y هستند.

معادلات حاکم برای رسوب شامل معادله پیوستگی رسوب برای بار بستر و معادله کانوکشن دیفوزن برای بار معلق است. همچنین در مدل CCHE2D، سه نمونه مدل آشفستگی وجود دارد که عبارت‌اند از:

۱. مدل لزجت گردابه‌ای^۱

۲. مدل طول اختلاط^۲

۳. مدل $k - \epsilon$ ^۳

لزجت گردابه‌ای (v_t) از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$v_t = \frac{A_{xy}}{\epsilon} \kappa U^* h \quad (4)$$

در مدل دوم از مدل متوسط عمقی طول اختلاط استفاده شده است. ضریب لزجت گردابه‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_t = \bar{v} \sqrt{\left(\tau \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \tau \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2 \right)} \quad (5)$$

برای مواردی که مدل‌سازی به دقت بیشتری نیاز دارد، از مدل $k - \epsilon$ استفاده می‌شود. معادلات انتقال حاکم بر این مدل به صورت زیر است:

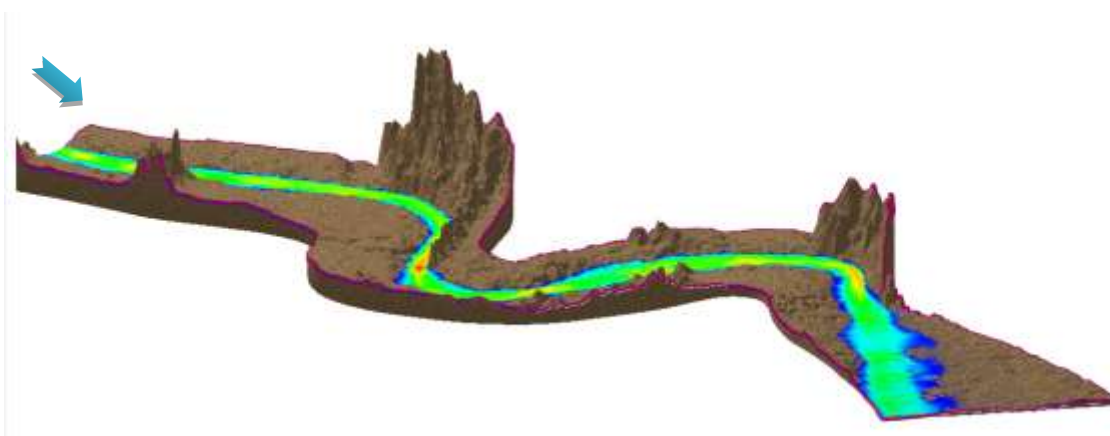
$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] = P - \epsilon + P_{\epsilon v} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] = C_{\epsilon v} \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon \tau} \frac{\epsilon^2}{k} + P_{\epsilon v} \quad (7)$$

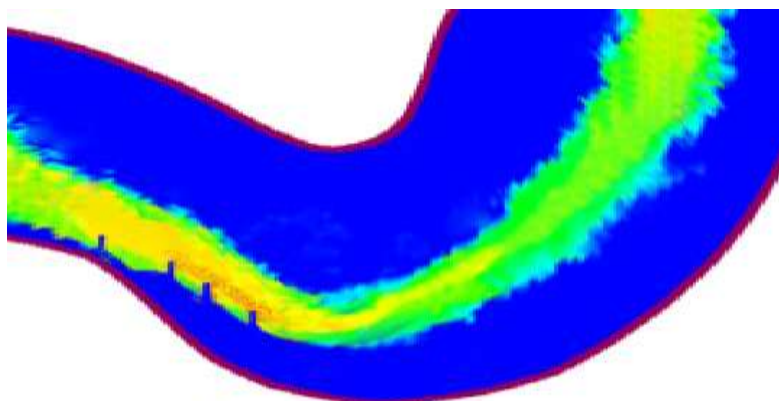
شرایط مرزی

مدل عددی CCHE2D با به‌کارگیری نرم‌افزار پیش‌پردازنده

1. Parabolic Eddy Viscosity Model
2. Mixing Length Model
3. K-Epsilon Model



شکل ۳. توپوگرافی رودخانه میناب در محیط CCHE2D



شکل ۴. موقعیت قرارگیری آب‌شکن‌ها در قوس رودخانه میناب در محیط CCHE2D

جدول ۱. مقایسه پارامتر سرعت متوسط جریان در حالت تغییر ابعاد شبکه محاسباتی

موقعیت جغرافیایی مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر سرعت جریان اندازه‌گیری شده (m/s)	پارامتر سرعت جریان پیش‌بینی شده با مدل	
		ابعاد ۴۰*۳۴۰	ابعاد ۵۰*۵۰۰
A	۵۰۷۸۲۶	۱/۰۸	۱/۹۳
	۳۰۰۳۳۸۷		۱/۹۸
B	۵۰۸۷۵۰	۱/۲۵	۱/۱۳
	۳۰۰۳۶۹۶		۱/۱۹
C	۵۰۹۰۵۰	۱/۰۶	۱/۹۹
	۳۰۰۶۷۵۲		۱/۱۲

جدول ۲. مقایسه پارامتر عمق متوسط جریان در حالت تغییر ابعاد شبکه محاسباتی

مقاطع اندازه‌گیری شده	پارامتر عمق جریان اندازه‌گیری شده (m)	پارامتر عمق جریان پیش‌بینی شده با مدل	
		ابعاد ۴۰*۳۴۰	ابعاد ۵۰*۵۰۰
A	۱/۵۲	۲/۰۳	۱/۶۸
B	۱/۹۴	۲/۴	۲/۱۱
C	۱/۵	۲/۰۸	۱/۴۶

می‌دهد. در جایی که رودخانه حالت مستقیم داشته است بیشترین سرعت به سمت میانه رودخانه اتفاق می‌افتد، در حالی که در قوس رودخانه بیشترین سرعت در کناره‌های قوس اتفاق می‌افتد. نتایج مدل‌سازی عددی نیز تأییدی بر این مسئله است و بیشترین سرعت در قوس‌های داخلی رودخانه است. بررسی تغییرات سرعت در طول رودخانه نشان داده است با عبور جریان از ورودی قوس، بیشترین سرعت در مقاطع عرضی به نزدیک دیواره داخلی کشیده می‌شود. همچنین به‌عنوان یکی از نتایج تغییر سرعت می‌توان گفت که دامنه زیاد تغییرات و توزیع ناموزون آن در قسمت‌های مختلف رودخانه مبین تغییرات شدید سطح مقطع جریان در نیمرخ‌های مختلف است که نشان‌دهنده پتانسیل فرسایش و رسوب‌گذاری نسبتاً زیاد در طول مسیر رودخانه است. با اضافه‌شدن سازه آب‌شکن در قوس سوم مشاهده شد که در این قوس بیشترین سرعت به سمت میانه رودخانه منحرف شده و در پایین‌دست قوس سوم سرعت کم شده است که نشان‌دهنده مناطق رسوب‌گذاری است. آب‌شکن‌ها با کاهش مقطع رودخانه، الگوی جریان را به‌طور محسوسی تحت تأثیر قرار می‌دهند. خطوط جریان با نزدیک‌شدن به سازه آب‌شکن آرایش خود را تغییر می‌دهند و به تبعیت از ساختار هندسی، نوع سازه و سایر مشخصات فنی مربوط، الگوهای متفاوتی از جریان در دماغه آب‌شکن پدیدار می‌شود. در نتیجه احداث آب‌شکن سرعت جریان در محدوده فاصله آب‌شکن‌ها به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. کاهش سرعت جریان در بین آب‌شکن‌ها به رسوب‌گذاری و تثبیت سواحل رودخانه منجر می‌شود، که این مورد در آب‌شکن ابتدایی نمود بیشتری دارد و فرسایش از کناره به مرکز منحرف شده است. فرسایش در وسط رودخانه نیز تا جایی ادامه پیدا می‌کند که یک شیب تعادلی جدید برقرار شود. در محدوده قوس سوم با احداث آب‌شکن تغییراتی نیز در بالادست و پایین‌دست قوس به‌وجود می‌آید، به این‌صورت که در پایین‌دست سرعت جریان از ۱/۶۹ به ۱/۰۷ m/s کاهش می‌یابد و رسوب‌گذاری بیشتری اتفاق می‌افتد.

برای ارزیابی خطای مدل از پارامتر آماری اندازه‌گیری ریشه دوم میانگین مربع خطا استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_e)^2} \quad (8)$$

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

جدول ۳ نشان‌دهنده میزان خطای مدل است. ۰/۰۷ خطا در برآورد سرعت و ۰/۱۳۶ خطا برای پارامتر عمق آب میزان قابل قبولی از خطا برای یک مدل عددی است و می‌توان به نتایج شبیه‌سازی توسط مدل اعتماد کرد.

جدول ۳. میزان خطای مدل برای پارامترهای سرعت جریان و عمق آب با استفاده از RMSE

نوع روش	پارامتر سرعت جریان	پارامتر عمق آب
RMSE	۰/۰۷۵	۰/۱۳۶

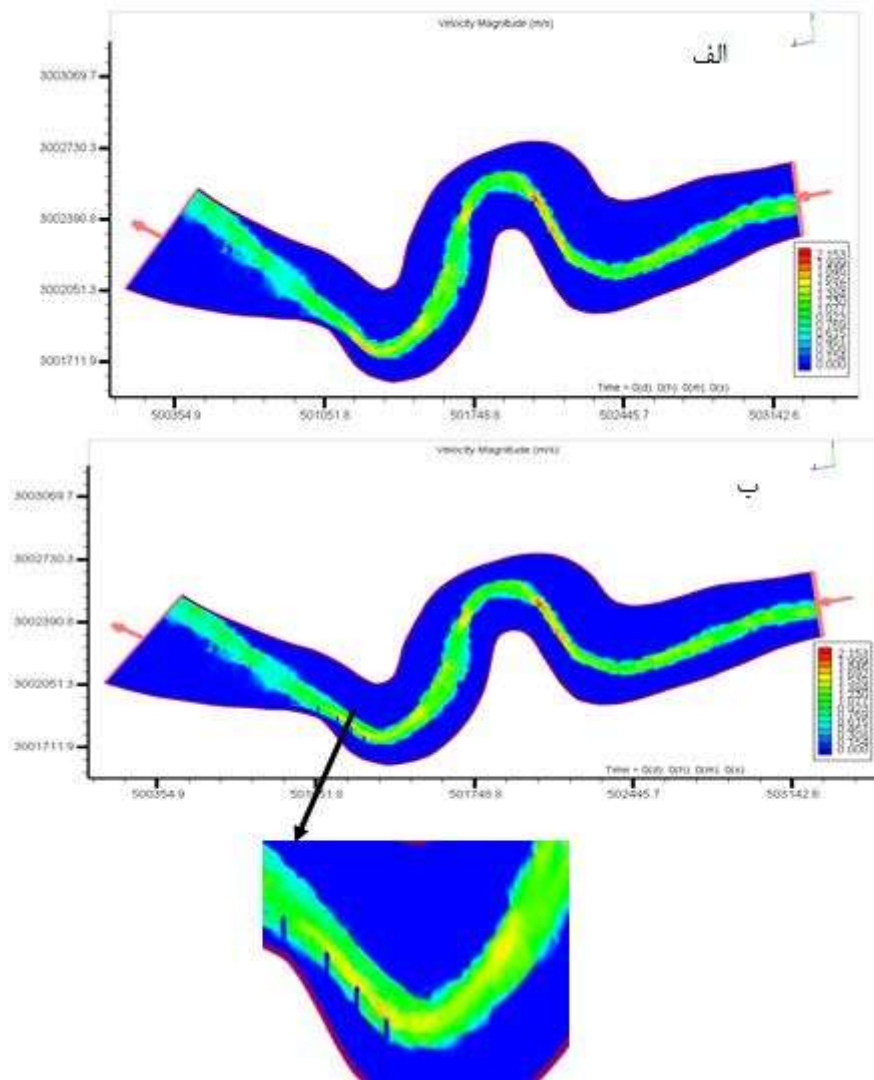
پس از ارزیابی مدل، با واردکردن سری آب‌شکن نتایج مدل مقایسه شد.

بحث و نتیجه‌گیری

سرعت جریان

بررسی تغییرات سرعت در طول رودخانه نشان می‌دهد با عبور جریان از ورودی قوس، موقعیت بیشترین سرعت در مقاطع عرضی به نزدیک جداره داخلی کشیده می‌شود. علت این رفتار از آنجا ناشی می‌شود که با ورود جریان به قوس بر اثر نیروی گریز از مرکز، در جداره خارجی سطح آب افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل و نتایج اندازه‌گیری شده در بازدید میدانی نشان می‌دهد در حالت کانال مستقیم، بیشترین سرعت آب پیش‌بینی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در طبیعت، در وسط کانال ایجاد می‌شود و در محل وقوع قوس بیشترین سرعت آب پیش‌بینی شده توسط مدل و مشاهده شده در طبیعت، در ساحل مقعر ایجاد می‌شود. شکل ۵ نشان‌دهنده تغییرات سرعت در مقاطع مختلف رودخانه است.

شکل ۵ تغییرات سرعت جریان را در دو حالت وجود داشتن یا نداشتن آب‌شکن در محدوده بررسی شده نشان

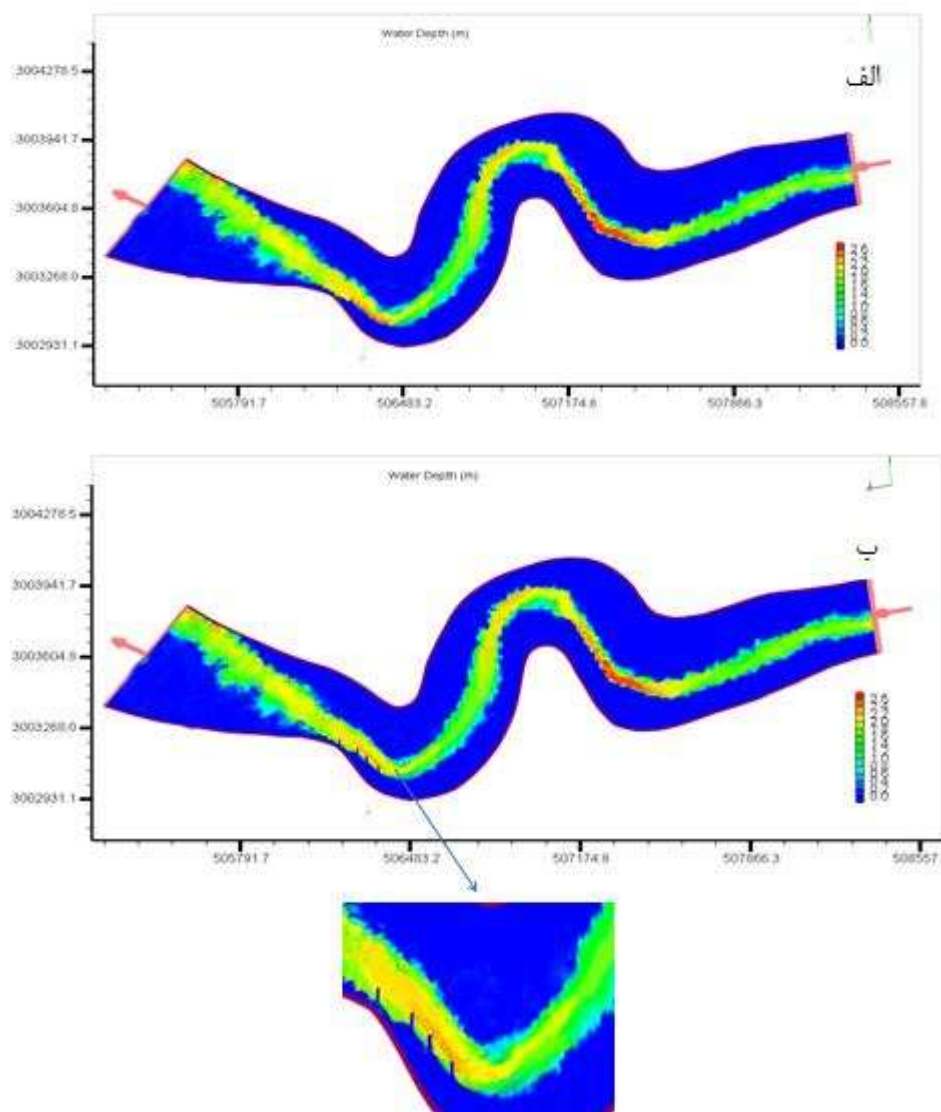


شکل ۵. تغییرات دویبعدی سرعت در رودخانه میناب
الف) بدون سازه؛ ب) سازه آب‌شکن

عمق آب زیادی دارند. با ورود جریان به قوس مطالعه‌شده، در محل وقوع خم و کمی بعد از آن، بیشترین مقدار سرعت، متمایل به دیواره خارجی ایجاد می‌شود که سبب افزایش ارتفاع در قوس مقعر می‌شود. در دیواره قوس سوم با وارد کردن آب‌شکن به مدل بیشترین عمق از دیواره دور شده و به سمت میانه رودخانه منحرف شده است. عمق آب در قسمت جای‌گذاری آب‌شکن‌ها از $2/2$ m به حدود $1/8$ m کاهش پیدا کرده است، اما همان‌طور که از شکل پیداست تأثیر آب‌شکن فقط در محدوده قوس است و در پایین دست تأثیر چندانی ندارد. شکل ۶ تغییرات دویبعدی عمق آب رودخانه میناب را در دو حالت رودخانه معمولی و رودخانه اصلاح‌شده با سازه آب‌شکن نشان می‌دهد.

عمق آب

اصولاً در محل ایجاد قوس در رودخانه‌ها، بیشترین مقدار تراز آب، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) تشکیل می‌شود، آن‌هم به دلیل افزایش ارتفاع آب ناشی از ایجاد نیروی گریز از مرکز و شیب جانبی در سطح آب و در قوس خارجی است. در نتیجه، حالتی مثلثی‌شکل در سطح آب در مقطع عرضی ایجاد می‌شود و آب از قوس خارجی به سمت قوس داخلی رانده شده و به تبع آن فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی رخ می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۶ نیز مشخص است بیشترین عمق آب در دیواره داخلی قوس اول اتفاق افتاده است که دلیل آن می‌تواند تنگ‌شدگی رودخانه در این منطقه باشد. قوس دوم و سوم نیز از نقاطی هستند که



شکل ۶. تغییرات دوبعدی عمق آب در رودخانه میناب
(الف) بدون سازه؛ (ب) سازه آبشکن

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ساماندهی و اثربخشی آبشکن روی حفاظت از کرانه‌ها با استفاده از مدل CCHE2D در بخشی از رودخانه میناب در استان هرمزگان پرداخته شده است. پس از واسنجی مدل و اطمینان از اینکه مدل توانایی شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب را دارد، سازه آبشکن برای حفاظت از دیواره رودخانه در قوس سوم رودخانه وارد مدل شد. علت انتخاب قوس سوم این بود که روی دیواره این قوس ساختمان‌های مسکونی قرار دارند. همچنین در انتهای قوس نیز پل اول میناب واقع شده است و اگر در این منطقه

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نتایج وو (۲۰۰۹)، مبنی بر اینکه هندسه رودخانه با دبی موجود و میزان رسوب تنظیم می‌شود را تأیید می‌کند. همچنین با نتایج دوان و همکارانش (۲۰۰۹) هم‌خوانی دارد که بیان‌کننده اثر آبشکن در هدایت سرعت و تنش برشی به سمت تالوگ رودخانه است. نیز با نتایج جیا و همکارانش (۲۰۰۶) یعنی کاهش میزان رسوب در نتیجه استفاده از دایک، و با نتایج کوسیل نیاک (۲۰۰۷)، مبنی بر اینکه ساماندهی رودخانه تعادل سیستم آبراهه را به هم می‌زند، مطابقت ندارد زیرا تغییرات ساماندهی رودخانه با استفاده از آبشکن در این مطالعه تا رسیدن به تعادل جدید ادامه دارد.

- [4]. Martin-Vide, J. P. M. Roca and C. A. Alvarado. 2012. Bend scour protection using riprap. *Water Management* 163(2):489-497
- [5]. Gholizadeh, J. Zahiri A. Dehghan R and Ahmad A. 2011. A quasi-two-dimensional simulation of flood flows in rivers (Case Study: Gorgan river Aqqala station), *Journal of soil and water conservation*, Volume 19, Issue 4, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources. [persian]
- [6]. Duan J. G. L. He X. Fu and Q. Wang. 2009. Mean flow and turbulence around experimental spur dike. *Adv Water Resour.* 32(12): 1717-1725
- [7]. Wu W. 2009. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Tech Report No. NCCHE-TR- 2001-3, NCCHE, University of Mississippi, USA, P: 12.
- [8]. 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.
- [9]. Vaghefi M and Radan P. 2014. Numerical study scour and stream flow pattern in an arc of 90 degrees with a T-shaped breakwater with changes in the radius of curvature of the arch. *Journal of Water Resources.* 7 (23): 37-51. [persian]
- [10]. Vaghefi M. Zerh poosh shirazi H and Akbari M. 2013. Numerical study of the influence of the radius of curvature on the flow patterns around Srspry submerged breakwater. *Journal of irrigation and water systems.* 5 (18): 145-156. [persian]
- [11]. Xiufang Z. Pingyi W. and Y. Chengyu. 2015. Experimental study on flow turbulence distribution around a spur dike with different structure. *Journal of Procedia Engineering* 28: 772-775.
- [12]. Hao, Z. Hajime, N. Kenji, K. and B. Yasyuki. 2014. Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *Journal of Sediment Research* 24: 33-45.
- [13]. Koocielniak J. 2007. The Influence of River Training on Mountain channel changes (corpathian Mountains). *Geomorphology*.
- [14]. Wu B. Wang G. Ma J. and R. Zhang. 2005. Case study: River Training and Its Effects Fluvial Processes in the Lower Yellow River, China. *J. Hydraul. Eng. ASEC*, 135 (2), 85-96.
- [15]. Lazaridou P. I. Daniil E. I. Michas, S. N. Papanicolaou, P. N. and L. S. Lazarides. 2004. Intergrated Environmented and Hydaulic Design of Xerias River, Corinthos, Greece, Training Works. *Water.Air. Soil. Poll.* 4, 319-330.

فرسایش دیواره اتفاق افتد، خسارت‌های زیادی وارد می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده از دو حالت رودخانه معمولی و رودخانه اصلاح‌شده با سازه آبشکن را با هم مقایسه کرده، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب رودخانه معمولی بیشترین سرعت، عمق آب و تغییرات فرسایش و رسوب را در قوس داخلی رودخانه نشان می‌دهد، که پس از وارد کردن آبشکن به مدل تغییرات ایجادشده در پارامترهای هیدرولیکی نشان داد سرعت جریان از ۱/۵ متر بر ثانیه به حدود یک متر بر ثانیه تغییر کرده است. به‌بیان دیگر، حدود ۶۶ درصد کاهش سرعت اتفاق افتاده است. همچنین عمق جریان در قوس مد نظر از ۲/۶ متر به حدود ۲ متر تغییر کرده یا ۷۶ درصد کاهش عمق جریان رخ داده است. به‌طور کلی، می‌توان گفت که با احداث آبشکن روی قوس رودخانه خطر فرسایش و ریزش رودخانه کاهش پیدا کرده است.

با توجه به نتایج مدل عددی CCHE2D می‌توان گفت که مدل یادشده در پیش‌بینی مقادیر سرعت و عمق جریان، کمترین خطای ممکن را داشته و نتایج مدل اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده دارد. نتایج مدل‌سازی نشان داد احداث آبشکن در منطقه مطالعه‌شده بر الگوی جریان تأثیرگذار است و سبب هدایت سرعت و عمق آب بیشینه به سمت تالوگ رودخانه می‌شود که این امر خود می‌تواند تضمین‌کننده سلامت رودخانه و حفاظت از کرانه‌ها و منازل مسکونی موجود در منطقه مطالعه‌شده شود.

منابع

- [1]. Leopold, L. B. and M.G. Wolman. 1994. *River channel patterns: Braided, Meandering and straight.* U.S Government Printing Office. Washington D.C. USA. 12 p.
- [2]. Zhang, Y. Jia, Y. and S.Y. Wang. 2007. A Conservative Multi-block Algorithm for 2Dimensional Numerical Model. *Journal of Mathematics Science.* 1 (1): 33-45.
- [3]. Jia Y. Zhang Y. Wang S. and A. Raible. 2006. Numerical Simulations of channel Response to river in Structures in Arkansas river, The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep. 10 – Sep. 13, Philadelphia, USA.

[16]. Andrzej S. Maciej W. Mateusz S. and K. Krzysztof. 2013. Cross-Section Changes in the Lower Part of a Mountain River After the Flood in Spring 2010, as Presented by Means of CCHE2D Program. Journal of Experimental Methods in Hydraulic Research. 1:287-297.

[17]. Jia y. and s.s.y. wang. 1999. Numerical model for channel and morphological change studies, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, No.9, pp 924-933.