

## شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب با مدل CCHE2D (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب)

غلامرضا خسروی<sup>۱\*</sup>، احمد نوحه‌گر<sup>۲</sup>، اسدالله خورانی<sup>۳</sup>، سیروس ارشادی<sup>۴</sup> و محمد فتحی<sup>۵</sup>

### چکیده

در این پژوهش الگوی جریان و مقدار انتقال رسوب در بازه پیچانرود از رودخانه میناب در حد فاصل سد استقلال تا پل شهرستان میناب- استان هرمزگان با مدل عددی CCHE2D شبیه‌سازی شده است. پس از نقشه‌برداری دقیق، نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب از محدوده مورد بررسی به دست 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 نتایجی همچون تغییرات عمق، سرعت جریان، بار معلق و تغییرات بستر در رودخانه در نظر گرفته شد. در پایان، از دو معیار آماری R.M.S.E و M.A.P.E، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی را با داده‌های مشاهده‌ای، مقایسه شد که خطای مدل برای پارامترهای سرعت، عمق و شیب انرژی با شاخص R.M.S.E به ترتیب ۰/۰۷۵، ۰/۱۱۶ و ۰/۰۰۰۸ و با شاخص M.A.P.E به ترتیب ۲/۷، ۶/۲ و ۴/۴ درصد بود. مقایسه نتایج بیانگر دقت بالا و خطای کم مدل در پیش‌بینی پارامترهای جریان و رسوب است.

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

ارجاع: غلامرضا خسروی غ. نوحه‌گر ا. خورانی ا. ارشادی س. و فتحی م. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب با مدل CCHE2D (مطالعه موردی: پیچانرود پایین دست سد میناب). مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۱۹۳-۱۹۷.

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

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان.

۴- استادیار گروه مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان.

۵- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شهرکرد.

\* نویسنده مسئول: [gholamreza.khosravi@yahoo.com](mailto:gholamreza.khosravi@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹

## مقدمه

رودخانه فرآیندی پویا است و الگوی رفتاری جریان در آن به طور دائم در حال تغییر است. این تغییرات سبب تحت تأثیر قرار گرفتن شرایط هیدرولیکی جریان در رودخانه می‌گردد. این موضوع در رودخانه‌های پیچان‌رودی تأثیر بیشتری بر جای می‌نهد (جان، ۲۰۰۳). از این‌رو تحلیل هیدرودینامیکی جریان و رسوب در پیچان‌رودها، در طراحی و اجرای طرح‌های مهندسی رودخانه و سیلاب، مؤثر بوده و باید به دقت بررسی شود (تلوری، ۱۳۸۳). بدین منظور، استفاده از مدل‌های عددی به دلیل سهولت اجرا، انعطاف‌پذیری بالا در تغییر پارامترهای جریان و هزینه‌های کمتر نسبت به مدل‌های فیزیکی، جایگاه ویژه‌ای دارند. با احداث سد و در پی آن قطع رسوبات انتقالی به پایاب سد و نیز بهره‌برداری مصالح آبرفتی از جمله مسائلی است که در این رودخانه سبب آب شکستگی و تغییرپذیری مسیر پیچان‌رودها شده است. از این‌رو، تحلیل الگوی هیدرودینامیک جریان و رسوب امری ضروری است. بنابراین با توجه به اهمیت بررسی الگوی جریان و رسوب در رودخانه‌های مئاندری، در این پژوهش با کمک مدل دو بعدی CCHE2D، الگوی جریان و رسوب، تغییرات بستر، تغییرات سرعت در پلان، در یک بازه طبیعی بررسی و شبیه‌سازی شد.

## مواد و روش‌ها

## موقعیت منطقه مورد بررسی

محدوده مورد بررسی، بازه‌ای از رودخانه میناب از سد استقلال تا پل شهرستان میناب، استان هرمزگان است. موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی  $08^{\circ} 06' 57''$  تا  $32^{\circ} 04' 57''$  طول شرقی و  $33^{\circ} 09' 27''$  تا  $18^{\circ} 09' 27''$  عرض شمالی است. بازه از شرق به سد استقلال و از غرب به پل شهرستان میناب محدود می‌شود. طول بازه حدود  $4/5$  کیلومتر و تراز توپوگرافی ابتدا و انتهای بازه به ترتیب در حدود  $40/5$  و  $32$  متر از سطح دریا، است.

## مدل CCHE2D (ژانگ، ۲۰۰۹)

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 توسعه یافته است. این مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده، که برای ساخت هندسه میدان دارای یک نرم‌افزار جداگانه تحت عنوان CCHE-MESH 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 مورد نیاز مدل CCHE2D

در گام نخست این پژوهش، به نقشه‌برداری بازه انتخابی با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال پرداخته شد. در سه مقطع از مقاطع نقشه‌برداری شده به اندازه‌گیری پارامترهای جریان و رسوب پرداخته شد. شکل ۱- نمایی از سه مقطع مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از مقاطع اندازه‌گیری جریان آب و رسوب

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود برای جریان خروجی با دبی ثابت از دریچه‌های سد، پارامترهایی از قبیل سرعت، دبی و عمق جریان در مقاطع مذکور و ابتدا و انتهای بازه مورد بررسی اندازه‌گیری شده است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای سرعت، عمق و دبی جریان اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف بازه مورد بررسی

مقاطع اندازه‌گیری شده	عمقی (m/s)	حداکثر سرعت متوسط	سرعت متوسط (m/s)	عمق جریان (m)	دبی جریان (m <sup>3</sup> /s)
A	۱/۷۸	۱/۰۸	۱/۵۲	۱۵۴	
B	۱/۸۴	۱/۲۵	۱/۹۴	۱۵۱	
C	۱/۶۶	۱/۰۶	۱/۵	۱۴۲	
ورودی	-	-	۱/۷۷	-	-
خروجی	-	-	۱/۴۱	-	-

### نمونه برداری رسوب بستر و کناره‌ها

برداشت نمونه‌ها از بستر رودخانه، بر اساس مقاطع عرضی از پایین دست (پل میناب) به سمت بالا دست (سد استقلال) انجام شده است این نمونه‌ها در آزمایشگاه برای دانه‌بندی، چگالی، زاویه اصطکاک، چسبندگی،  $D_{50}$  و ضریب اطمینان آزمایش شد.

### اندازه‌گیری بار معلق

با توجه به اینکه جریان خروجی سد، حاوی رسوبات ریزدانه به صورت بار معلق است و شرایط مرزی ورودی بدون بار بستر است. بنابراین برای تعریف شرایط مرزی رسوب فقط بار معلق اعمال می‌شود. بدین منظور در اولین مقطع ورودی جریان و مقطع اندازه‌گیری (A) با روش نمونه‌گیری غیرنقطه‌ای، با استفاده از یک بطری که در قاب فلزی محافظ جای داده شده بود به تدریج در داخل آب فرو برده و وقتی به کف رودخانه برخورد کرد به آرامی بالا کشیده شد. برای اطمینان از برداشت یکنواخت از کل عمق جریان، تلاش شد هنگامی که بطری از آب خارج می‌شود به طور کامل پر نشده باشد (علیزاده، ۱۳۸۶).

### تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D

در مدل CCHE2D برای ساخت شبکه‌بندی قلمرو مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH، استفاده می‌شود. با توجه به شکل بازه مورد بررسی، حالت تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی انتخاب شد (ژانگ، ۲۰۰۹).

### شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب

مراحل شبیه‌سازی الگوی جریان و رسوب با نرم‌افزار CCHE-GUI به شرح زیر است:  
ورود و فراخوانی فایل Geo؛ تنظیم شرایط اولیه جریان (تراز آب بالادست و پایین‌دست)؛ تنظیم شرایط اولیه رسوب (زبری بستر، فرسایش‌پذیری بستر اولیه، حداکثر ضخامت رسوب‌گذاری، حداکثر عمق فرسایش، ضخامت لایه‌های سطحی بستر و تعداد لایه‌ها)؛ تنظیم پارامترهای جریان آب (گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی، انتخاب فرمول محاسبه زبری)؛ تنظیم پارامترهای رسوب (کلاس‌بندی رسوبات، پارامتر انتقال رسوب، طول انطباق بار بستر و معلق، پارامتر اثر انحنا و وزن مخصوص

رسوبات، انتخاب فرمول محاسبه زبری، فایل شرایط مرزی رسوب)؛ تنظیم شرایط مرزی (دبی جریان ماندگار، بار معلق، تراز سطح آب) و اجرای شبیه‌سازی.

در نرم‌افزار CCHE2D، برای برآورد انتقال رسوب از چهار معادله SEDTRA، ایگر وایت اصلاح شده، انگلاند و هانسن اصلاح شده و فرمول وو و همکاران (۲۰۰۹) استفاده می‌شود (ژانگ، ۲۰۰۹). با توجه به غالب بودن بار معلق، چهار معادله حمل رسوب برای شبیه‌سازی بار معلق مقایسه شدند. معادله انتقال رسوب وو و همکاران (۲۰۰۹)، نسبت به معادلات انتقال رسوب، برآورد نزدیک‌تری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

### واسنجی مدل عددی CCHE2D

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 بررسی، فرضیه تغییر ضریب زبری (حساس‌ترین پارامتر) بر الگوی جریان با استفاده از مقدار تخمینی در دامنه ۰/۰۳۴ تا ۰/۰۶۳ و تغییر آن و مقدار به دست آمده از روابط در دامنه ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۵۲ مقایسه شد. بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، سرعت جریان (V) و عمق جریان (P)، در حالت تغییر ضریب زبری مقایسه شد و در نهایت استفاده از ضریب زبری محاسباتی به دست آمده از معادلات در دامنه ۰/۰۳۳ - ۰/۰۵۲، نتایج دقیق‌تری را به دست داد.

### ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی سرعت، عمق و شیب انرژی نتایج به دست آمده از مدل با متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت، مقایسه شد. بدین منظور از دو روش آماری جذر میانگین مربع خطا و میانگین‌درصد خطای مطلق استفاده شد. در جدول ۲ نتایج دو روش برای نشان دادن دقت مدل در برآورد پارامترهای سرعت جریان، عمق و شیب انرژی آورده شده است.

### پارامتر عمق و سرعت جریان آب

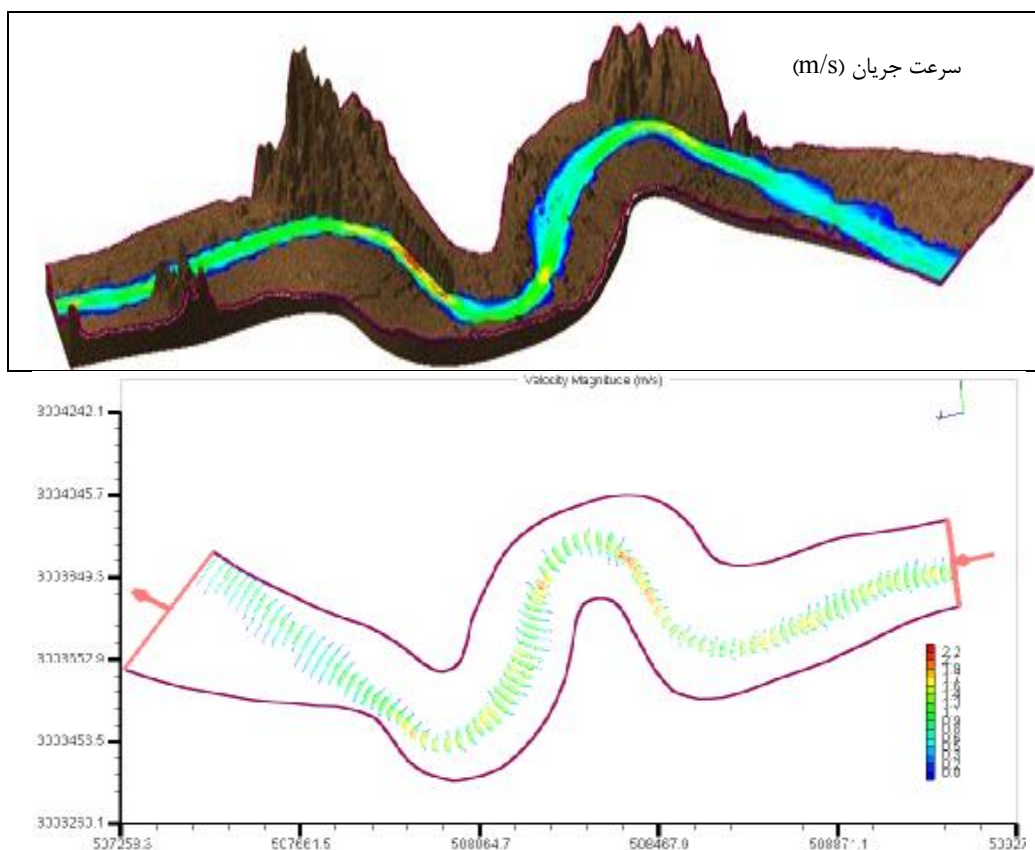
با ورود جریان به قوس اول، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به سمت جداره داخلی کشیده می‌شود. با قدرت یافتن جریان ثانویه و شکل‌گیری جریان حلزونی در مقطع بعد از ورودی قوس، حداکثر سرعت به سمت میانه کانال متمایل می‌شود. در این محدوده نیروی گریز از مرکز بر جریان اثر کرده و سبب ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود که در نتیجه شیب عرضی سطح آب در قوس خارجی بالا رفته و در قوس داخلی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود حداکثر سرعت جریان در کل قلمرو جریان نیز در این ناحیه است؛ دلیل آن، محدود بودن این ناحیه از رودخانه با دیواره‌ها 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 می‌شود.

### جدول ۲- نتایج مقایسه سرعت جریان، عمق و شیب انرژی مشاهداتی و برآوردی بر اساس دو معیار R.M.S.E و M.A.P.E

پارامتر شیب انرژی	پارامتر عمق آب	سرعت جریان	روند
۰/۰۰۰۸	۰/۱۱۶	۰/۰۷۵	R.M.S.E
٪۴/۴	٪۶/۲	٪۲/۷	M.A.P.E

### نتایج و بحث

برخی از متغیرهای خروجی مدل از جمله عمق جریان، سرعت جریان و فرسایش و رسوب‌گذاری در قلمرو جریان در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۲- تصویر توزیع متغیر سرعت در بازه مورد مطالعه

می‌شود. در قوس دوم، فقط در بستر اصلی در اثر جریان ثانویه و حلزونی در این محدوده، رسوبات بستر به ساحل محدب و پایین دست انتقال می‌یابند. در قوس سوم،

### پارامترهای فرسایش و رسوب‌گذاری

در ابتدای بازه مورد بررسی، وجود پوشش گیاهی پرتراکم و ناهمواری‌های بستر سبب رسوب‌گذاری بار معلق

ساحل مقعر و محدب و نیز بستر اصلی فرسایش‌پذیر هستند؛ جریان در این قوس، رسوبات ناشی از فرسایش دیواره مقعر را به طرف جلو و دیواره محدب انتقال می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

- ۱- نتایج حاصل، قابلیت مدل عددی به کار رفته را در پیش‌بینی پارامترهای جریان و رسوب تأیید کرد.
- ۲- معادله وو و همکاران (۲۰۰۹)، برآورد نزدیک‌تری با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.
- ۳- حداکثر تغییرات جریان (افزایش سرعت)، در نیمه دوم قوس اول است؛ دلیل این امر، محدود بودن این ناحیه از رودخانه با دیواره‌ها و عدم پخش سیلاب است همچنین انحنای زیاد قوس مزید بر علت است.
- ۴- حداکثر فرسایش در ساحل مقعر و بستر اصلی قوس سوم است.

### منابع

۱. تلوری ع. ر. ۱۳۸۳. اصول مقدماتی مهندسی و ساماندهی رودخانه، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، نشر آبخیز. ۴۸۸ ص.
۲. علیزاده ع. ۱۳۸۶. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ نوزدهم، دانشگاه فردوسی مشهد. ۸۰۰ ص.
3. John S. B. 2003. River and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record, Blackwell Publishing. 395 p.
4. Wu W. and Wang S. 2009. Mathematical models for liquid-solid two-phase flow and Sediment, Int. J. Sediment Research. 298 p.
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. 473 p.

