

یادداشت فنی

شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در بازه‌ای از پیچان رود طبیعی رودخانه خشکه‌رود فارسان به کمک نرم‌افزار CCHE2D

محمد فتحی^{۱*}، افشین هنربخش^۲ و محمد رستمی^۳

چکیده

در این پژوهش بر اهمیت شناخت دقیق پارامترهای جریان در مهندسی رودخانه برای پیش‌بینی و تحلیل فرایندهای حاکم بر جریان بحث شده است. بدین منظور و با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و تنش‌های برشی ناشی از آن بر فرسایش کناره‌ها و کف رودخانه، از یک مدل عددی دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان در بازه‌ای از پیچانرود طبیعی (رودخانه خشکه‌رود فارسان در ۳۰ کیلومتری غرب شهرکرد) استفاده شد. در این بررسی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی محدوده مورد مطالعه، ابتدا هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف، تهیه و سپس بر اساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی هم‌چون توزیع عمق و سرعت جریان در خم رودخانه استخراج شد. بر طبق نتایج به دست آمده، داده‌های سرعت جریان آب محاسباتی و مشاهداتی در سه مقطع به ترتیب ۰/۹، ۰/۹۱۴، ۰/۹۷۸، ۱/۰۱ و ۱/۰۲، ۱/۱۷۴ و داده‌های عمق آب محاسباتی و مشاهداتی در سه مقطع به ترتیب ۰/۹۳۷، ۱/۰۱۶، ۰/۸۹۲، ۰/۹۴۷ و ۰/۸۳۹، ۰/۸۹ هستند که می‌توان نتیجه گرفت، داده‌های شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های مشاهداتی شباهت زیادی دارند.

واژه‌های کلیدی: پیچان‌رود، الگوی جریان، خشکه‌رود فارسان، عمق آب، مدل‌سازی، مدل عددی CCHE2D.

ارجاع: فتحی م. هنربخش ا. و رستمی م. ۱۳۹۳. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی رودخانه خشکه‌رود فارسان به کمک نرم‌افزار CCHE2D. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۲۴۱-۲۴۶.

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری و مهندسی رودخانه، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد.

۳- عضو هیات علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری تهران.

* نویسنده مسئول: fathiapadana@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۲/۱۹

مقدمه

به طور 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 مبتنی بر زمان هستند و ارتباط مستقیمی با تغییرات بستر رودخانه دارند (آیکدا و همکاران، ۱۹۸۱ و لئوپلد و ولمن، ۱۹۹۴)، هنوز به‌عنوان موضوعات پژوهشی بسیار مهم در مهندسی و مدیریت رودخانه‌ها هستند. با پیشرفت‌های به وجود آمده در توانمندی کامپیوترها و توسعه روش‌های محاسبات عددی، امروزه کاربرد مدل‌های CFD، به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای مهندسين هیدرولیک در بررسی کانال‌های روباز و فرایندهای رودخانه‌ای محسوب می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۷). مدل‌های عددی زیادی برای تشریح فرایندهای جریان در کانال روباز و رودخانه‌ها وجود دارند که شامل یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۷).

منصوری و همکاران (۱۳۸۵) در یک کانال آزمایشگاهی، خاصیت سه‌بعدی جریان در دو قوس ۱۸۰ درجه با انحنا نسبی متفاوت و با بستر کانال صلب را با مدل عددی SSIM، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد، مدل تا حدی به انتخاب شبکه، حساس بوده ولی الگوی جریان شبیه‌سازی شده با الگوی جریان واقعی هماهنگی دارد.

وو (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد پرداخت که با استفاده از یک مدل عددی دوبعدی، مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ را با مدل‌های صفر معادله‌ای مقایسه کرد. نتایج حاصل نشان داد، تمام مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی (نزدیک) در مورد جریان‌های ساده ارائه می‌کنند.

در این پژوهش، از جنبه تئوری، استفاده از کانال‌های آزمایشگاهی و مطالعه در کانال‌های مستقیم فراتر رفته و قابلیت‌های یک مدل دو بعدی توانمند در شبیه‌سازی الگوی جریان در یک مطالعه میدانی و یک پیچان رود طبیعی بررسی شده است.

مشخصات مدل عددی CCHE2D

این مدل، مختص شبیه‌سازی جریان غیردائم آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز است که در مرکز ملی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی (NCCHE)، دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی تولید و توسعه یافته است. این

مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده که برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده به نام CCHE-MESH و برای حل میدان جریان و انتقال رسوب از محیط گرافیکی نرم‌افزار، با عنوان CCHE-GUI، استفاده می‌شود (وو، ۲۰۰۹). در این پژوهش از ورژن ۳/۲۶/۴ مدل عددی CCHE2D استفاده شد. این مدل، برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (رودی، ۱۹۷۶) بهره برده و برای شبیه‌سازی معادلات انتقال آشفتگی، از مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود (FEM^1) انجام می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۷ و وو، ۲۰۰۹).

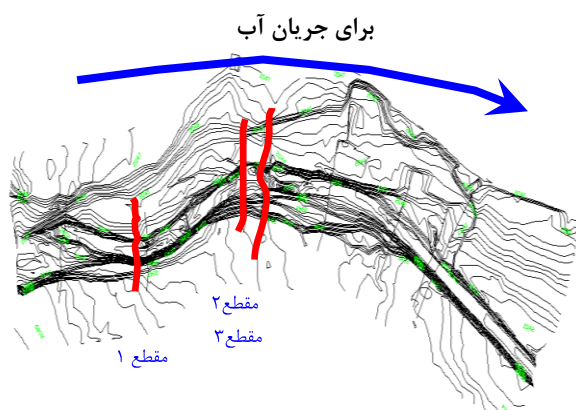
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه، بازه‌ای پیچان‌رود از رودخانه خشکه‌رود در حوزه آبخیز شهر فارسان در غرب شهرکرد است. از جمله موارد تأثیرگذار بر الگوی جریان در بازه مورد مطالعه در رودخانه خشکه‌رود، وجود پل عیسی‌آباد در بالادست است که بر روی الگوی جریان بازه تأثیر می‌گذارد. همچنین پدیده برداشت بی‌رویه شن و ماسه با کارخانه شن‌شویی گوجان در پایین‌دست که باعث تشدید چاله فرسایشی در پایین‌دست قوس می‌شود. موقعیت جغرافیایی رودخانه، ۴۵۵۶۹۶/۵۲ طول شرقی و ۳۵۷۱۳۴۷/۳۱ عرض شمالی، طول بازه پیچان‌رود ۴۹۴/۲m، حداکثر ارتفاع ۲۰۴۶m، حداقل ۲۰۴۱m و شیب عمومی ۱٪ است. محدوده بازه انتخابی، بدون عوارض مورفولوژیکی مشخص در بستر رودخانه بوده، جنس رسوبات کناره‌ها از نوع آبرفتی کواترنر و دارای حساسیت به فرسایش بالا هستند. اصولاً زاویه مرکزی، پارامتر مهمی در مطالعه رودخانه‌های مئاندری است (وو، ۲۰۰۸ به نقل از کورنیس، ۱۹۸۰). معادله در رابطه ۱ آمده است:

$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad (1)$$

که در آن، A، اندازه زاویه مرکزی، L، طول قوس و R، شعاع قوس هستند و با توجه به جدول کورنیس، بازه پیچان‌رود انتخابی، جزء رودخانه‌های مئاندری توسعه یافته



شکل ۳- نمایی از پلان نقشه برداری، همراه با خط‌های توپوگرافی بازه و مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای جریان

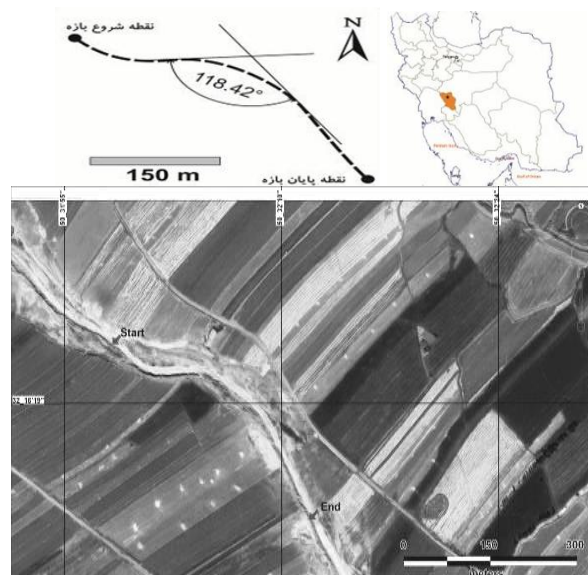


شکل ۴- نمایی از قرارگیری دستگاه در کانال رودخانه (راست) و پلان دستگاه Easy Q™ (چپ)

تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D ابتدا برای مدل، نوع مورفولوژی کانال تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی (CCHE-MESH) انتخاب و مراحل تولید شبکه شامل بارگذاری داده‌های توپوگرافی و تعریف مرزهای بلوک، تولید شبکه محاسباتی جبری و عددی، درونیابی رقوم بستر رودخانه و ذخیره شبکه با پسوند *.geo انجام شد که در شکل ۵ آمده است.

شبیه‌سازی الگوی جریان با مدل CCHE2D برای انجام شبیه‌سازی الگوی جریان پایدار رودخانه خشک‌رود از نرم‌افزار CCHE-GUI استفاده شد. در ابتدا شرایط اولیه جریان، شامل تراز آب در بالادست، $2046/66\text{m}$ و پایین‌دست، $2040/39\text{m}$ و ضریب زبری محاسباتی $0/35$ و پارامترهای جریان و شبیه‌سازی تنظیم و در نهایت شرایط مرزی بالا و پایین‌دست رودخانه، شامل دبی ورودی برابر $8/572 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ تراز آب خروجی، معادل $2040/39\text{m}$ تنظیم و مدل اجرا می‌شود.

است. شکل ۱ نمایی از موقعیت جغرافیایی و زاویه انحنای قوس انتخابی و شکل ۲ نیز وضعیت موجود رودخانه است.



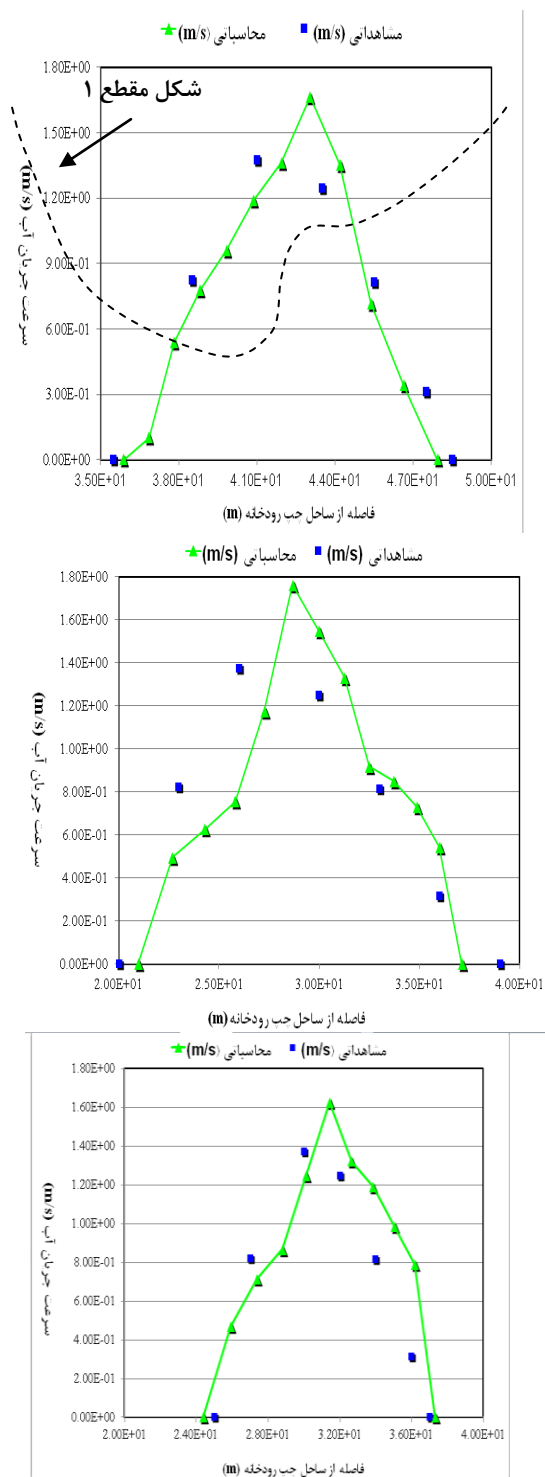
شکل ۱- نمایی از موقعیت جغرافیایی رودخانه خشک رودفارسان



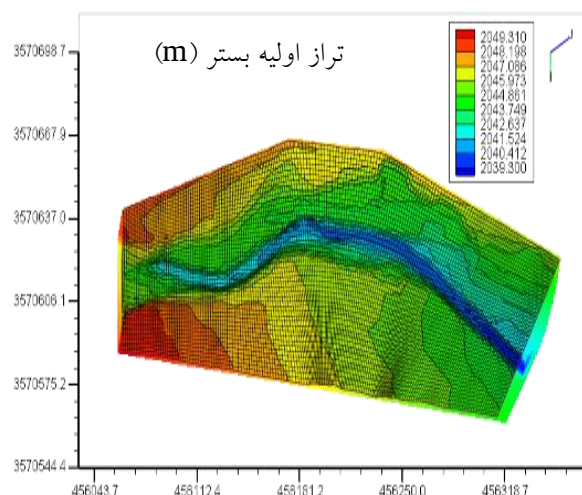
شکل ۲- نمایی از وضعیت رودخانه: الف) پل عیسی‌آباد، ب) پدیده تراوش و ج) رسوبات حساس به فرسایش

اندازه‌گیری داده‌های میدانی لازم برای مدل CCHE2D به طور کلی برای انجام فرایند شبیه‌سازی، پارامترهای مهم شامل ۱- داده‌های مرتبط با تعریف هندسه رودخانه، ۲- داده‌های مرتبط با تراز سطح آب و ۳- داده‌های مربوط به ضریب زبری، سرعت و دبی جریان آب هستند. ابتدا طی بازدید میدانی از بازه پیچان‌رود انتخابی رودخانه خشک رود، ۹ مقطع عرضی برداشت و نقشه‌برداری شد که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. سپس، در سه مقطع، پارامتر سرعت دو بعدی جریان با دستگاه Easy Q™ و پارامتر عمق آب با اشل اندازه‌گیری شد و بیشترین تأکید بر خم (قوس) رودخانه بود تا بتوان تأثیر جریان ثانویه و نیروی گریز از مرکز (کوریولیس) را بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر بررسی کرد که در شکل ۴ آمده است.

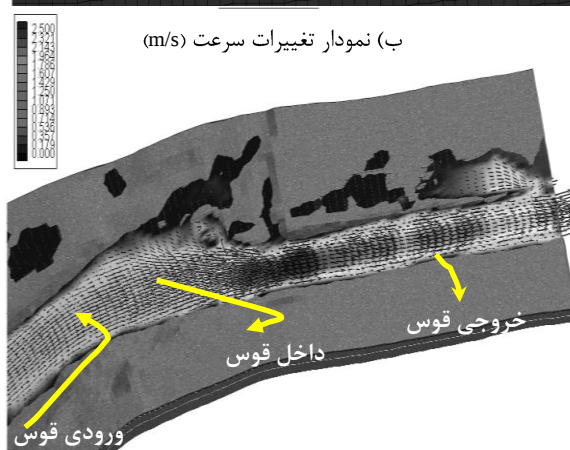
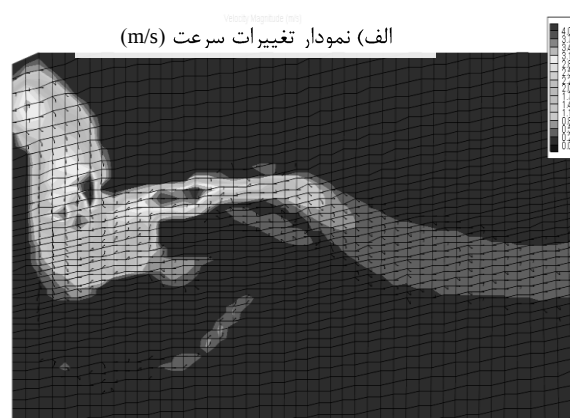
سرعت، رسم شد. شکل ۷، نمودار تغییرات سرعت آب را نشان می‌دهد که محور x ها، مقادیر فاصله از ساحل سمت چپ رودخانه (D) و محور y ها، مقادیر سرعت در راستای طول (U)، راستای عرض (V)، سرعت نهایی (Total) پیش‌بینی شده با مدل و سرعت اندازه‌گیری شده در طبیعت هستند.



شکل ۷- تغییرات سرعت آب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با مدل در مقاطع اندازه‌گیری شده



شکل ۵- شبکه محاسباتی ساخته شده همراه با مختصات طولی و عرضی رودخانه (بر حسب UTM)

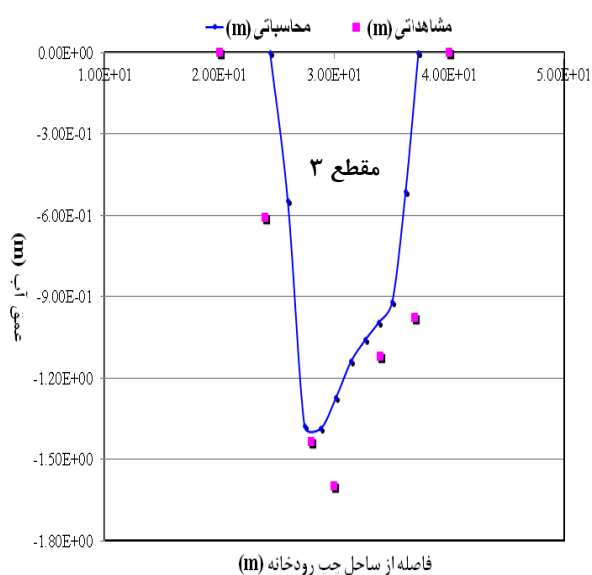
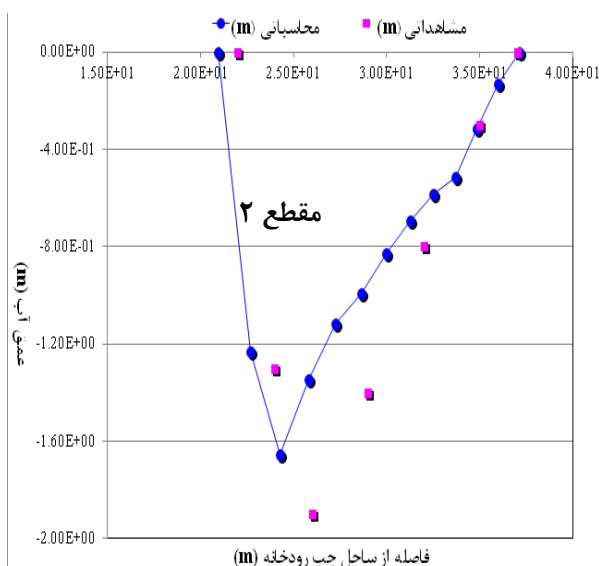
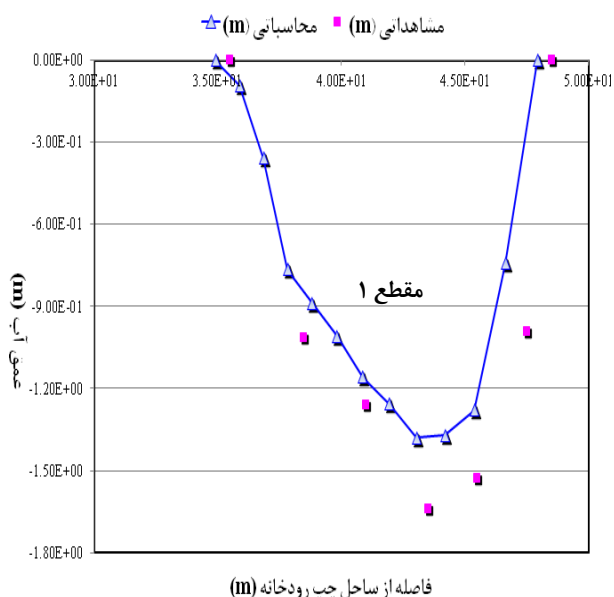


شکل ۶- الف) نتایج شبیه‌سازی جریان در جهت‌های I یا J و ب) برای بردارهای سرعت در طول کانال

نتایج و بحث

الف) پارامتر سرعت جریان آب

با تمام شدن شبیه‌سازی الگوی جریان در حالت پیش فرض مدل (شبکه 48×200 و زبری 0.35)، که در شکل ۶ نمایشی از آن آمده است، نتایج مدل برای پارامتر تغییرات



شکل ۸- تغییرات عمق آب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با مدل در مقاطع اندازه‌گیری شده

با توجه به نمودارها، حداکثر سرعت در حالت مستقیم کانال (مقطع ۱)، محل قوس (مقطع ۲) و کمی بعد از آن (مقطع ۳) متمایل به دیواره خارجی (مقعر) شکل می‌گیرد. در ادامه پژوهش، نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده در حالت میانگین‌گیری از داده‌ها مقایسه شد که نتایج، نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی جریان و پارامتر سرعت است. این مقایسه در جدول ۱، آمده است.

جدول ۱- مقایسه سرعت جریان آب در حالت اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل

مقطع اندازه‌گیری	پارامتر عمق آب محاسباتی (m)	پارامتر عمق آب مشاهداتی (m)
۱	۰/۹	۰/۹۱۴
۲	۰/۹۷۸	۱/۰۱
۳	۱/۰۲	۱/۱۷۴

پارامتر عمق آب

شکل ۸، تغییرات عمق آب در هر مقطع عرضی است که محور xها، مقادیر فاصله از ساحل چپ رودخانه (D) و محور yها، مقادیر عمق آب است. لازم به ذکر است که در مدل ذکر شده، سطح آب، صفر در نظر گرفته شده است. با توجه به نمودارها، حداکثر تراز آب، متمایل به دیواره داخلی (محدب) تشکیل می‌شود. با افزایش ارتفاع آب به دلیل ایجاد نیروی گریز از مرکز و شیب جانبی در سطح آب، در قوس خارجی، مقطع عرضی مثلثی شکل می‌شود که به دنبال آن، آب از قوس داخلی به سمت قوس خارجی رانده شده و در نتیجه، فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی ایجاد می‌شود. در ادامه، نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی، در حالت میانگین مقایسه شد (جدول ۲) و نتایج، تأیید کننده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی پارامتر سرعت است.

جدول ۲- مقایسه عمق آب در حالت اندازه‌گیری شده در طبیعت و برآورد شده از مدل

مقطع اندازه‌گیری	پارامتر عمق آب محاسباتی (m)	پارامتر عمق آب مشاهداتی (m)
۱	۰/۹۳۷	۱/۰۱۶
۲	۰/۸۹۲	۰/۹۴۷
۳	۰/۸۳۹	۰/۸۹

قوس ۱۸۰ درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۰ ص.

- Ikeda S. Parker G. and Sawai K. 1981. Bend theory of river meanders, linear development. Journal of Fluid Mechanics. 112: 363-377.
- Leopold L. B. and Wolman M. G. 1994. River channel patterns: braided, meandering and straight. U.S. Government Printing Office. Washington D.C. USA. 12 p.
- Rodi W. 1976. A new algebraic relation of calculating the Reynolds stresses. ZAMM, Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 56(4):1219-1221.
- Wu W. 2009. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Technical Report No. NCCHE- TR - 2001-3. Univ. of Mississippi. 58 p.
- Wu W. 2008. Computational River Dynamics, NCCHE. Univ. of Mississippi, USA. 508 p.
- Zhang Y. Jia Y. and Wang S. Y. 2007. A Conservative Multi-block Algorithm for 2Dimensional Numerical Model. Journal of Mathematics Science. 1(1):33-45

تعیین درصد خطای مدل

برای بررسی دقیق نتایج از روش آماری جذر میانگین مربع خطا یا RMSE و میانگین درصد خطای مطلق یا MAPE استفاده شد. جدول ۳، درصد خطای مدل در پیش‌بینی پارامتر سرعت جریان است.

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

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_o - Q_e}{Q_o} \right| * 100 \quad (3)$$

که در آن‌ها، Q_o ، مقدار مشاهداتی و Q_e ، مقدار برآوردی مدل است.

جدول ۳- مقایسه سرعت جریان، عمق آب و شیب انرژی با دو روش RMSE و MAPE

پارامتر	پارامتر شیب انرژی	پارامتر سرعت جریان	نوع روش
عمق آب	انرژی	آب	آماري
۰/۱۳۶	۴E-۰۵	۰/۰۳۳۴	R.M.S.E
٪۱۰/۲۵۴	٪۲/۶۷	٪۲/۸۷۳	M.A.P.E

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد که مدل در پیش‌بینی مقادیر سرعت جریان، کمترین خطای ممکن را داشته و نتایج حاصل از مدل، اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. پس مدل در پیش‌بینی دقیق پارامترهای جریان، توانمند است.

یکی از نکته‌های مدل‌های دو بعدی، رعایت شبکه‌بندی استاندارد مدل ورودی است (در این پژوهش 200×48). به دنبال آن خارج کردن ابعاد شبکه استاندارد، باعث ایجاد خطا در مدل می‌شود، زیرا با ریزتر کردن شبکه محاسباتی، شبکه از حالت واقعی در طبیعت خارج شده و به‌عنوان مثال، مقطع عرضی به‌صورت یک خط در می‌آید.

سپاس‌گزاری

در پایان، از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری که بخشی از هزینه‌های این پژوهش را تأمین کرده‌اند، تشکر می‌شود.

منابع

- منصوری ا. ر. صالحی نیشابوری ع. ا. و هنربخش ا. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی عددی سه بعدی تغییرات بستر در