مجله

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering

سال ششم- شماره ۱۹- پاییز و زمستان ۱۳۹۱ Vol. 6, No. 19, Fall &Winter 2012-2013

شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچانرودی با استفاده از مدل CCHE۲D

محمد فتحی[۱]، افشین هنربخش[۲] و محمد رستمی[۳]
تاریخ دریافت:۸۹/۱۰/۲۷ تاریخ پذیرش:۹۱/۰۶/۱٤

چکیده

در این مقاله مزیت و اهمیت یک مدل عددی به منظور پیش بینی و پایش فرایندهای حاکم بر جریان رودخانه‌ها مورد بحث قرار گرفته است. به همین منظور و با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و تنش‌های برشی ناشی از آن بر فرسایش رودخانه‌ای، از یک مدل عددی دو بعدی به نامCCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان در بازه‌ای از پیچانرود طبیعی (رودخانه خشکه رود فارسان- ایران) بهره گرفته شده است. در این بررسی با بهره‌گیری از نقشه‌های پستی و بلندی محدوده مورد مطالعه، ابتدا هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف، تهیه و سپس بر اساس مشخصات اندازه گیری شده جریان رودخانه، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی همچون توزیع عمق و سرعت جریان در خم رودخانه استخراج گردید. نتایج نشان دادند که در صورت ورود شبکه محاسباتی استاندارد به مدل، این مدل در پیش بینی مقادیر سرعت جریان از دقت بالایی برخوردار بوده و داده های شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده های حاصل از اندازه گیری صحرایی شباهت زیادی دارند. نتایج حاصله نشان دادند که بهره گیری از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی جریان آب، ما را یک گام به پیش بینی های کلی تر برای فرایندهای حاکم بر جریان در رودخانه های پیچان‌رودی نزدیک‌تر می کند. همچنین، مدل CCHE۲D از قابلیت خوبی جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان برخوردار است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، تنش برشی، مدل عددی CCHE۲D، پیچان‌رود، ضریب زبری.

۱- نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری آبخیزداری، مهندسی رودخانه، دانشگاه شهرکرد
۲- دکتری مهندسی رودخانه، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد
۳- دکتری هیدرولیک، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری ایران

مقدمه

بطور کلی شبیه‌سازی جریان آب و حمل رسوبات در رودخانه‌ها، موضوع مورد علاقه بسیاری از متخصصین علوم مهندسی رودخانه و هیدرولیک رسوب است. همچنین مدل سازی فرایندهای حمل رسوب که مبتنی بر زمان هستند و ارتباط مستقیمی با تغییرات بستر رودخانه دارند، هنوز به عنوان موضوعات پژوهشی بسیار مهم در مهندسی و مدیریت رودخانه‌ها محسوب می‌شوند، آیکدا و همکاران و لئوپولد و همکاران [٤ و٦].

در دهه‌های اخیر، فرایندهای حاکم بر جریان آب و حمل رسوب به صورت دقیق‌تر، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته اند. همچنین، با پیشرفت‌های به وجود آمده در توانمندی رایانه‌ها و توسعه روش‌های محاسبات عددی، استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی، به صورت چشمگیری افزایش یافته است و امروزه کاربرد مدل‌های CFD، به عنوان یک ابزار موثر برای مهندسین هیدرولیک در بررسی کانال‌های روباز و فرایندهای رودخانه ای محسوب می‌شود، ژانگ و همکاران [۱۲]. بدون شک، تعداد زیادی مدل عددی برای تشریح فرایندهای جریان در کانال های روباز و رودخانه ها وجود دارند؛ این مدل ها به سه بخش: یک بعدی (D۱)، دو بعدی (D۲) و سه بعدی (D۳) تقسیم می‌شوند، [۱۲].

از آنجایی که ساختار جریان‌های ثانویه سه بعدی می باشد، لذا شبیه سازی آنها به ویژه در رودخانه ها نیاز به مدل هایی دارد که جریان آب و حمل رسوب در کناره‌ها و کف رودخانه را به صورت سه بعدی بیان نماید. از آنجایی که استفاده از یک مدل سه بعدی به دلیل دخالت فرسایش کناره‌ای و عامل‌های دخیل در آن به طور نسبی هزینه بر است، برخی از پژوهشگران مدل‌های دو بعدی را پیشنهاد می‌کنند، که توانایی مقابله با یک مدل سه بعدی را از نظر کارایی داشته باشد. بدیهی است که تنها مدل های دو بعدی ای می‌توانند تا حدودی کارایی یک مدل سه بعدی را در این مقوله داشته باشند که به نحوی قادر به شبیه سازی اثر جریان های ثانویه باشند، [۲].

وو [۱۱]، در مطالعات خود به شبیه سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداخت؛ همچنین با استفاده از مدل‌عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمود. بر اساس مقایسه، این نتیجه حاصل شد که تمام مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی (نزدیک) در مورد جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در مورد جریان‌های پیچیده،

دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و RNG نتایجی واقعی‌تر را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. همچنین بر اساس این پژوهش، در میان مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k-\varepsilon$ و مدل RNG در مورد جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری ارایه می‌کنند.

مین دوک و همکاران [۸]، یک مدل دو بعدی متوسط گیری شده در عمق را برای جریان ناپایدار در رودخانه های با هندسه نامنظم توسعه دادند که از معادلات حاکم شامل پیوستگی و اندازه حرکت (گشتاور) و همچنین یک معادله آشفتگی $k-\varepsilon$ در نظام مختصات منحنی استفاده نمودند. برای حل این معادلات از روش حجم محدود (FVM) استفاده شد. سپس مدل عددی با استفاده از مدل هیدرولیکی رودخانه راین آزمایش گردید. لازم به ذکر است که در اندازه گیری های مدل هیدرولیکی، بیشترین تمرکز بر روی حداقل تراز آب بین آب شکن ها و دیوار خاکریز قرار داده شده بود. در پایان نتایج عددی نشان داد، اثر آب شکن ها بر توزیع سرعت، بخوبی توسط مدل عددی شبیه سازی شد.

قاسم و چاودری [۵]، یک مدل دوبعدی متوسط گیری شده در عمق برای مدل‌سازی جریان ناپایدار و تغییرشکل بستر در کانال های پیچان‌رود آبرفتی ارایه نمودند. در این مدل، تغییرشکل بستر بر پایه معادله پیوستگی رسوب بود. معادلات جریان ناپایدار همراه با معادله پیوستگی رسوب با استفاده از روش عددی تفاوت محدود (FDM) حل شدند. برای تایید این مدل، داده های اندازه‌گیری شده در فلوم های آزمایشگاهی با قوس‌های ۱۴۰° تا ۱۸۰° استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد، توافق خوبی بین پستی و بلندی بستر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد.

گو و جین [۳]، مدلی یک بعدی را برای شبیه سازی بستر در کانال های آبرفتی ارایه کردند که نوعی مدل جریان ناپایدار و حمل رسوب بود و برای حل معادلات حاکم بر جریان، از روش حجم کنترل استفاده شد. در پایان، مقایسه نتایج عددی بدست آمده از این مدل با داده های تجربی ارایه شده توسط گای و همکاران، راین، لی و یو از یک طرف و نتایج محاسباتی از مدل HEC-۶ از سوی دیگر، نشان داد که قابلیت مدل پیشنهادی، به ویژه در محاسبه غلظت رسوب و پروفیل های تراز بستر رودخانه بسیار مناسب است.

مطالعات منصوری و همکاران [۷]، در یک مطالعه آزمایشگاهی، خاصیت سه‌بعدی جریان در خم‌های رودخانه را با مدل‌های عددی سه‌بعدی شبیه‌سازی نمودند. در این مطالعه، با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM، ابتدا الگوی جریان آشفته در دو قوس ۱۸۰ درجه از یک کانال آزمایشگاهی با انحنای نسبی متفاوت که در آنها بستر کانال صلب بود، بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که مدل تا حدی به انتخاب شبکه، حساس است ولی الگوی جریان شبیه سازی شده توسط مدل با الگوی جریان واقعی مطابقت دارد.

بک و باسون [۱]، از مدل عددی دو بعدی Mike-۲۱C بر روی دهانه رودخانه کلین، واقع در جنوب آفریقا، برای تحلیل الگوی جریان و روند تخلیه رسوب و تاثیر اختلاف ارتفاع سطح آب بر روی دبی سرریزی و ارزیابی اثر شکاف ها در ایجاد اختلاف تراز سطح آب رودخانه استفاده نمود.

همانطور که ملاحظه می‌شود، در تمامی پژوهش‌های فوق، یک مدل فیزیکی با مدل های عددی مقایسه شده اند و مطالعات انجام شده بر روی الگوی جریان و انتقال رسوبات در یک کانال مستقیم‌الخط انجام یافته است؛ ولی در این پژوهش، تصمیم بر آن شد که پا را از حالات نظری و آزمایشگاهی فراتر گذاشته و با انتخاب یک مدل عددی دوبعدی توانمند، قابلیت های آن در شبیه‌سازی الگوی جریان در طبیعت (مطالعه صحرایی یا میدانی) بررسی شود.

مشخصات مدل عددی D۲EHCC

مدل عددی CCHE۲D، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز می‌باشد که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی، دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. این مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده که برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده (Pre-Processor) 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، وو [۱۰].

معادلات حاکم بر جریان

مدل عددی CCHE۲D، برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (Depth- Average) استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی معادلات انتقال آشفتگی، از دو مدل صفر معادله‌ای به نام های توزیع سهموی و مدل طول اختلاط لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود (FEM) صورت می‌گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به ترتیب با استفاده از روش‌های: تصحیح سرعت و تکرار گوس-سایدل و حداکثر ضمنی یا SIP انجام می‌شود، ژانگ و وو [۱۲ و ۱۰]. در ذیل معادلات پیوستگی (۱) و حرکت (۲ و ۳) آمده است.

الف) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

و ب) معادله حرکت

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+u\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}+f_{Cor}v \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial z}{\partial y}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{by}}{\rho h}+f_{Cor}u \qquad (۳)$$

شکل ۱- نمایی از وضعیت موجود رودخانه خشکه رود؛ الف) پل عیسی‌آباد، ب) اثر تراوش آب و ج) رسوبات حساس به فرسایش.

که در این معادلات، u و v مولفه سرعت در عمق میانگین بترتیب در جهت x و y؛ g شدت نیروی ثقل؛ z تراز سطح آب، ρ چگالی آب، h عمق آب، f_{Cor} عامل کوریولیس، τ_x و τ_y و τ_x و τ_y نیروی رینولدز انتگرال گیری شده از عمق و τ_{bx} و τ_{by} نیروی برشی سطح بستر، در راستای x و y هستند، [۹].

ج) معادله آشفتگی

برای شبیه‌سازی اثر آشفتگی بر الگوی جریان و بستن سامانه معادلات حاکم، مدل CCHE۲D از مدل های لزجت گردابه‌ای سهموی، طول اختلاط و $k-\varepsilon$ بهره می برد. در این پژوهش نیز برای شبیه‌سازی الگوی جریان آشفته، از مدل استاندارد و توانمند $k-\varepsilon$ بهره بردیم که در این مدل، معادله k برای انرژی جنبشی آشفته (توربولانس) و ε برای نرخ پراکندگی انرژی توربولانس تعریف می شود؛ در ذیل معادلات مربوط به این مدل ترکیبی (٤ و ٥) آمده است [۱۱].

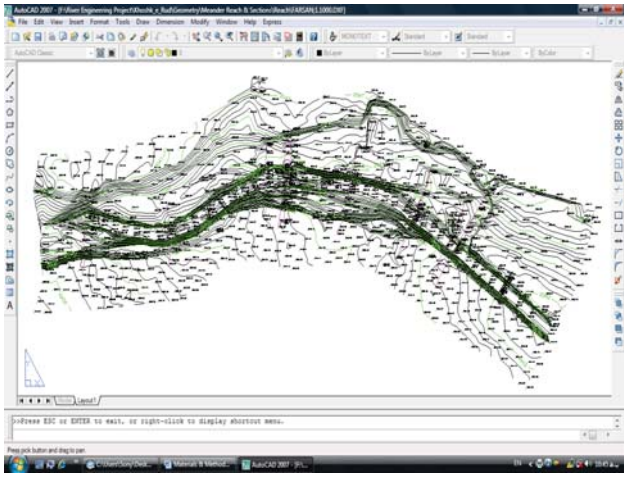
$$k = \frac{1}{2}\overline{u}_i'\overline{u}_i' \qquad (٤)$$

$$\varepsilon = \mu_t \frac{\partial \overline{u}_i'}{\partial x_i}\frac{\partial \overline{u}_i'}{\partial x_j} \qquad (٥)$$

مواد و روش‌ها

الف) موقعیت طبیعی منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه، بازه‌ای پیچان‌رود از رودخانه خشکه‌رود در حوضه آبخیز شهر فارسان و استان چهارمحال و بختیاری است. دو نکته قابل تامل در بازه مورد مطالعه وجود دارد که عبارتند از: پل عیسی‌آباد در بالادست که بر روی الگوی جریان بازه تاثیر می‌گذارد و پدیده برداشت نامناسب شن و ماسه توسط کارخانه شن‌شویی گوجان در پایین‌دست که باعث تشدید حفره آبشویی در پایین‌دست قوس می شود. موقعیت جغرافیایی رودخانه، ٤٥٥٦٩٦/٥٢ طول شرقی و ٣٥٧١٣٤٧/٣١ عرض شمالی است. طول بازه پیچان‌رود ٤٩٤/m۲، حداکثر تراز ارتفاعی (نسبت به سطح دریاهای آزاد) m۲۰٤٦، حداقل m۲۰٤۱ و شیب عمومی ۰/۰۱ است. گفتنی است که محدوده بازه پیچان‌رود انتخابی، از لحاظ ریخت شناختی فاقد عوارض مشخص در بستر رودخانه بوده، جنس رسوبات از نوع آبرفتی کواترنر و با حساسیت به فرسایش بالا می‌باشد، پدیده تراوش آب از درز و شکاف‌های موجود در کناره‌های کانال قابل مشاهده است و همچنین در طول قوس انتخابی، پوشش گیاهی بارز و مشخصی دیده نمی شود. در شکل (۱) نمایی از وضعیت موجود رودخانه خشکه رود فارسان را مشاهده می‌کنید.

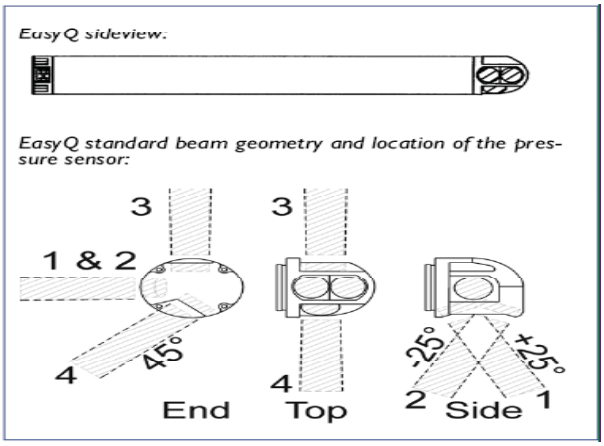


شکل ۲- نمایی از پلان نقشه برداری شده و مقاطع اندازه گیری عامل‌های جریان.

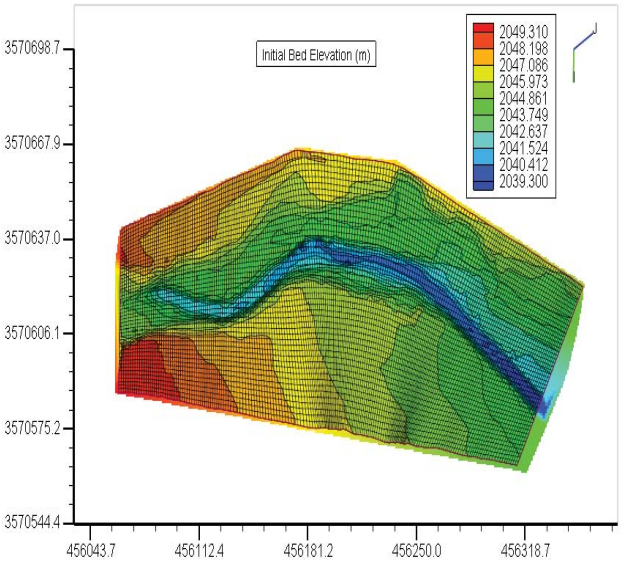
ب) اندازه‌گیری‌های داده‌های میدانی مورد نیاز مدل عددی CCHE۲D

به طور کلی برای انجام فرایند مدل‌سازی، تهیه عامل‌هایی الزامی می‌باشند که عبارت از: ۱- داده‌های مرتبط با تعریف هندسه رودخانه، مانند مختصات X، Y و Z؛ ۲- داده‌های مرتبط با تراز سطح آب رودخانه؛ ۳- داده‌های مربوط به ضریب زبری، سرعت و دبی جریان آب می‌باشد. بر این اساس پس از بازدید میدانی بازه پیچان‌رود انتخابی از رودخانه خشکه رود، ۹ مقطع عرضی انتخاب گردید و به کمک دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال نقشه برداری از آن انجام شد. سپس، نقشه نهایی به شکلی تهیه گردید که پلان نهایی، دارای مولفه ارتفاع یا Z بوده و بدین وسیله بتوان، فایل پستی و بلندی ورودی به نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی با پسوند *.mesh_xyz را ساخت. شکل (۲) پلان نقشه‌برداری شده از بازه است.

در گام بعدی، در سه مقطع عرضی (مطابق شکل ۲)، عامل سرعت دو بعدی جریان و عمق آب به کمک دستگاه Easy Q ™ و نمایانه اندازه‌گیری شد. در انتخاب مقاطع، بیشترین تاکید بر دو خم (قوس) متوالی رودخانه بود تا بتوان تاثیر جریان ثانویه و نیروی گریز از



شکل ۳- نمایی از پلان تجهیزات اندازه گیری سرعت دستگاه Easy Q™ و نحوه استقرار آن در منطقه



شکل ٤-شبکه محاسباتی (Mesh) تهیه شده با مدل CCHE2D.

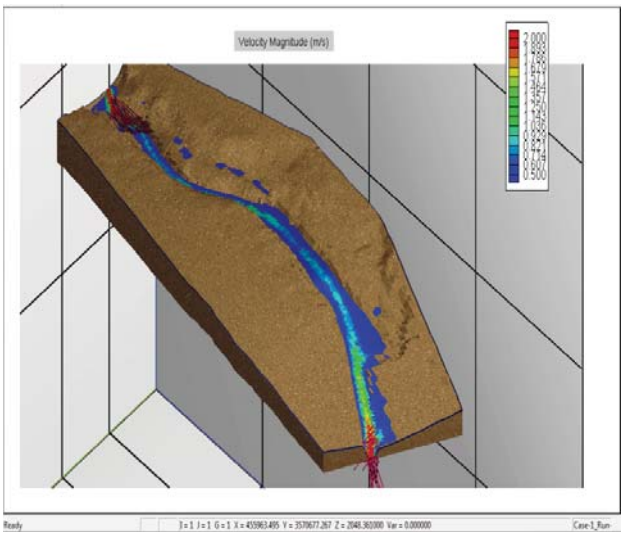
مرکز (کوریولیس) را در سر پیچها بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر بررسی نمود.

برای اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان، بایستی دستگاه Easy Q ™ کاملا داخل جریان آب قرار گیرد و برای این هدف، یک ثبات (مشابه پل تلفریک) طراحی و ساخته شده و سپس دستگاه بر روی آن نصب شد تا در هر مرحله قرائت، دستگاه کاملا ساکن و بدون لرزش باشد و همچنین قابلیت جابجایی در عرض، برای برداشت داده‌های جریان از ساحل سمت چپ تا راست و هم قابلیت جابجایی در عمق رودخانه را برای برداشت داده‌های جریان از سطح آب تا کف بستر به فواصل ۰/۲، ۰/٤، ۰/٦ و ۰/۸ از عمق، به طور توأم داشته باشد.

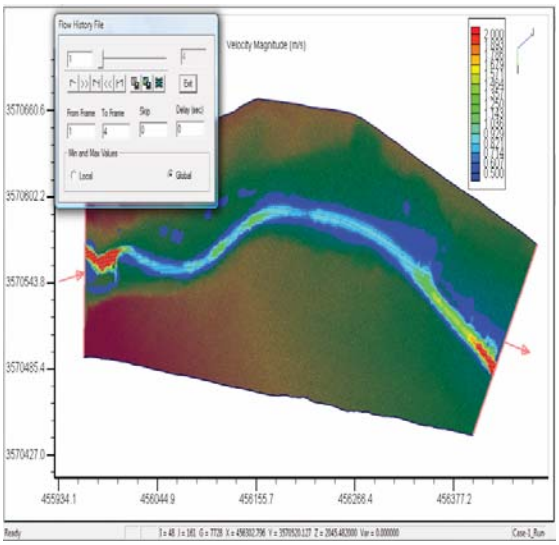
ج) تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D

مدل عددی مذکور، سه نوع ریخت شناختی کلی از رودخانه‌ها را پوشش می‌دهد که عبارتند از: ۱- کانال تک بلوکی؛ ۲- کانال تک بلوکی با جزیره و ۳- کانال چند بلوکی با انشعاب.

در مطالعه حاضر، با توجه به شکل پلان رودخانه خشکه رود، حالت کانال تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی (CCHE-MESH) انتخاب شد. همچنین مراحل تولید شبکه با استفاده از داده‌های توپوگرافی بازه پیچان‌رود انتخابی (شامل مقادیر X، Y و Z) به صورت خلاصه شامل موارد ذیل بود: ایجاد محیط کار؛ بارگذاری داده‌های پستی و بلندی با پسوند *.mesh_xyz؛ تعریف مرزهای بلوک؛ تولید شبکه محاسبات ی جبری؛ تولید شبکه محاسباتی عددی؛ ارزیابی شبکه محاسباتی؛ درون‌یابی رقوم بستر رودخانه؛ ذخیره شبکه با پسوند *.geo و نمایش شبکه. شکل ٤ شبکه محاسباتی تهیه شده محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



الف)



ب)

شکل ۵ - نمایش الف) نتایج شبیه‌سازی جریان در جهات I یا J همرا با بردارهای سرعت؛ ب) گرفتن خروجی از فایل پیشینه جریان.

د) شبیه‌سازی الگوی جریان با مدل CCHE2D

برای انجام شبیه‌سازی الگوی جریان پایدار رودخانه خشکه‌رود فارسان با استفاده از نرم‌افزار CCHE-GUI، ابتدا شرایط اولیه جریان، شامل: تراز آب در بالادست و پایین‌دست و ضریب زبری تنظیم می شود؛ در مرحله بعدی، می بایست عامل‌های جریان آب، شامل: عامل‌های شبیه‌سازی از قبیل گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی، محاسبه جریان ناپایدار و انتخاب فرمول محاسبه زبری، تنظیم شود؛ در مرحله آخر نیز شرایط مرزی ورودی و خروجی رودخانه، تنظیم شود؛ پس از اتمام تنظیمات مدل، مرحله ی اجرا (Run) مدل CCHE۲D است.

نتایج و بحث

با اتمام شبیه‌سازی الگوی جریان با حالت پیش فرض مدل CCHE۲D (شبکه محاسباتی با ابعاد ۲۰۰*۴۸ و ضریب زبری برآورد شده ۰/۰۳۵)، نتایج پیش بینی مدل برای عامل تغییرات سرعت در هر سه مقطع، جداگانه رسم شد. لازم به توضیح است که فاصله طولی از ساحل سمت چپ رودخانه (Distance) نیز به کمک رابطه (٦) محاسبه شد:

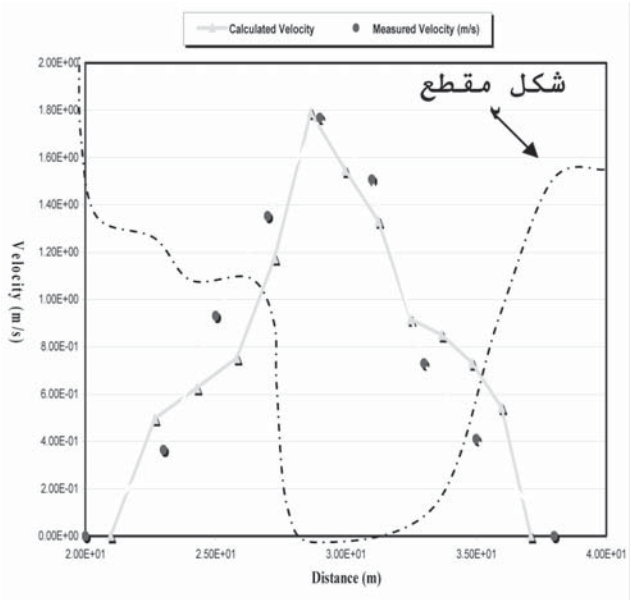
$$D_i = \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} + D_{i-1} \qquad (٦)$$

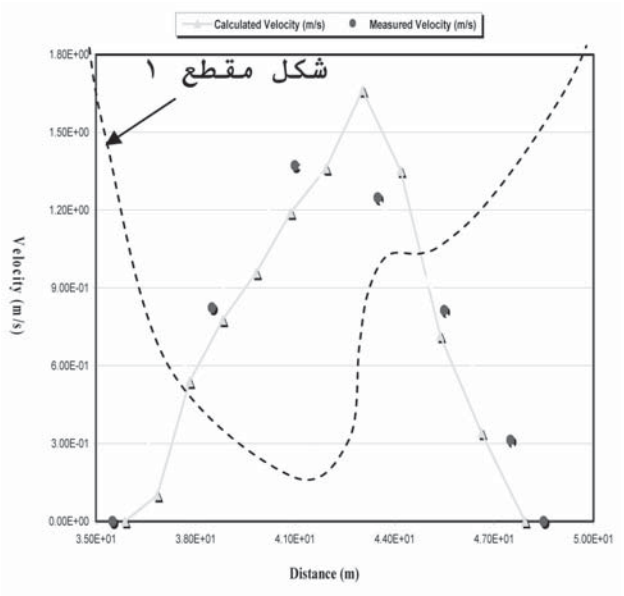
در این معادله، X و Y به ترتیب مختصات طول و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر از مقطع عرضی و D، فاصله طولی از ساحل سمت چپ روخانه می‌باشند.

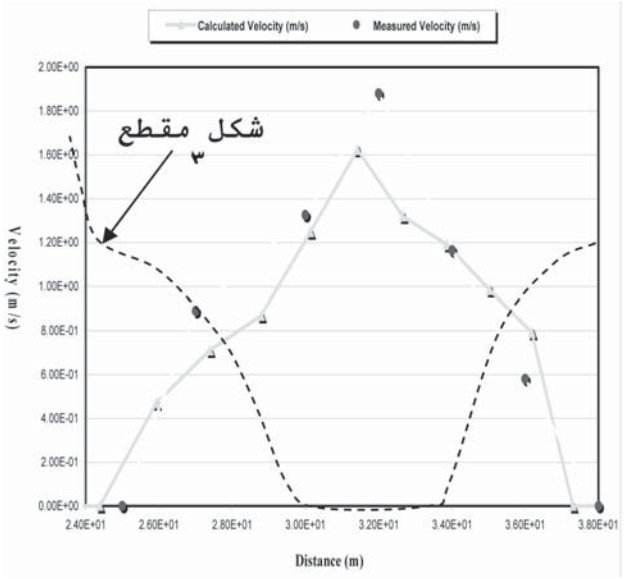
شکل٦، نمودار تغییرات سرعت آب را نشان می‌دهد که محور xها، مقادیر فاصله از ساحل سمت چپ رودخانه (D) بوده و محور yها، به ترتیب مقادیر سرعت محاسباتی از مدل و سرعت اندازه‌گیری شده در طبیعت می‌باشد.

همچنین در شکل های مذکور، شکل شماتیک مقاطع عرضی مورد بررسی ارایه شده است تا بتوان قضاوت بهتری نسبت به نتایج اندازه گیری و محاسباتی سرعت نسبت به شکل و موقعیت مقطع عرضی ارایه نمود. همانطور که از نتایج ارائه شده مشخص است، نمودار شبیه سازی سرعت در سه مقطع انطباق خوبی با نتایج اندازه گیری صحرایی متناظر دارد. در مقطع شماره ۱ که خم چپ گرد را تجربه نموده است حداکثر سرعت محاسباتی و اندازه گیری نزدیک به کناره ترانشه ای راست رودخانه می باشد. در مقطع شماره ۲ که در خم راستگرد واقع شده است، حداکثر سرعت اندازه گیری و محاسباتی در نزدیکی کناره ترانشه ای چپ رودخانه حاصل شده است. در مقطع شماره ۳ نیز که به طور تقریب در بازه مستقیم رودخانه قرار دارد، حداکثر سرعت اندازه گیری و محاسباتی در قسمت میانی مقطع بدست آمده است. در ادامه پژوهش، نتایج بدست آمده از مدل (Calculated) را با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت (Measured /Observed) در حالت میانگین گیری شده از داده‌ها با هم مقایسه شد که نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی جریان (مولفه سرعت) می باشد. این مقایسه در جدول ۱ و شکل ۷، آمده است.

در ادامه و برای بررسی دقیقتر نتایج از دو روش آماری (جذر میانگین مربع خطا یا R.M.S.E و میانگین درصد خطای مطلق یا M.A.P.E) برای ارزیابی دقت مدل استفاده شد؛ معادلات این دو روش در روابط (۷) و (۸) آورده شده است. در جدول ۲، درصد خطای مدل در پیش بینی عامل سرعت جریان آب با هر دو روش



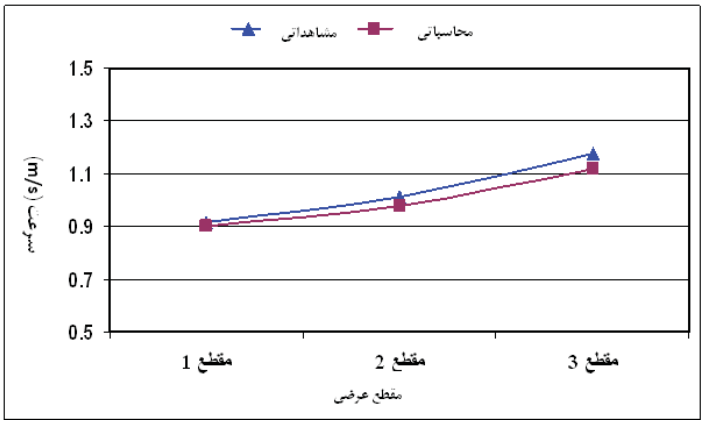




شکل ٦- نمودار تغییرات سرعت جریان شبیه‌سازی شده با مدل و اندازه‌گیری شده در طبیعت در سه مقطع مورد بررسی

جدول ۱ - مقایسه مقادیر متوسط سرعت جریان اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده در سه مقطع مورد بررسی

مقاطع اندازه‌گیری شده	متوسط متر سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده	متوسط سرعت جریان (V) شبیه سازی شده با مدل و با شبکه محاسباتی به ابعاد ۴۸*۲۰۰ و زبری ۰/۰۳۵
مقطع ۱	۰/۹۱٤	۰/۹
مقطع ۲	۱/۰۱	۰/۹۷۸
مقطع ۳	۱/۱۷٤	۱/۱۲



شکل۷ – مقایسه مقادیر متوسط سرعت جریان اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده در سه مقطع مورد بررسی

جدول ۲ – جذر میانگین مربع خطا یا R.M.S.E و میانگین درصد خطای مطلق یا M.A.P.E

عامل سرعت جریان آب	نوع روش آماری
۰/۰۳۳٤	جذر میانگین مربع خطا
٪۲/۸۷۳	میانگین درصد خطای مطلق

R.M.S.E و M.A.P.E آمده است.

$$R.M.S.E = \sqrt{\left|\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Q_o - Q_e)^2\right|} \quad (۷)$$

$$M.A.P.E = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Q_o - Q_e}{Q_o}\right| * 100 \quad (۸)$$

که در این روابط، Q_o، مقدار مشاهداتی در طبیعت و Q_e، مقدار برآوردی از مدل است.

نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج مدل عددی CCHE۲D، می‌توان گفت:

۱– مدل مذکور در پیش بینی مقادیر سرعت جریان، کمترین خطای ممکن را داشته و نتایج حاصل از مدل اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. لذا نتایج پژوهش، توانمندی بالای مدل در پیش بینی دقیق عامل سرعت جریان را تایید نمود.

۲– نتایج بدست آمده از اندازه گیری صحرایی نشان داد که در مقطع ۱ (واقع در خم چپگرد)، حداکثر سرعت به سمت کناره ترانشه ای راست رودخانه، در مقطع ۲ (واقع در خم راستگرد)، حداکثر سرعت به سمت کناره ترانشه ای چپ رودخانه و در مقطع شماره ۳ (واقع در مسیر مستقیم رودخانه)، حداکثر سرعت در قسمت میانی مقطع رودخانه متمایل است و مدل عددی نیز نتایجی مشابه آن شبیه سازی نموده است.

۳– پیشنهاد می شود برای ارزیابی دقیق‌تر مدل، می‌بایست اندازه‌گیری مشخصه های جریان در مقاطع بیشتر و با دبی های مختلف، به ویژه با دبی‌های سیلابی، انجام شود.

تشکر و قدردانی

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

منابع

1- Beck, JS and Basson, GR, 2008, Klein River Estuary (South Africa): 2D numerical modelling of estuary breaching, Department of Civil Engineering, Water SA Vol. 34 No. 1. P:14.

2- Ghodsian, M., 2008, Laboratory estimation of flow pattern at 90 degree bend. 4th National Congress of Civil Engineering, Mag 4-6, Sharif University of Tehran. P: 7. (In Persian)

3- Guo, Q and Jin, Y. 1999. Modeling sediment transport using depth-averaged and moment equations. Journal of Hydraulic Engineering. 125(12): 1262–1269.

4- Ikeda, S., Parker, G., and Sawai, K. 1981. Bend theory of river meanders, linear development. Journal of Fluid Mechanics. 112: 363–377.

5- Kassem, A. A., and Chaudhry, M. H. 2002. Numerical Modeling of Bed Elevation in Channel Bends. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 128(5): 507-514.

6- Leopold, L. B., and Wolman، M. G. 1994. River channel patterns: braided، meandering and straight. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., USA. P:12.

7- Mansouri, A.R., Salehi`Neyshabouri, A.A, Honarbakhsh A. 2006. Three Dimensional Numerical simulation of bed change at 180 degree bend. M.Sc thesis, University of Tarbiat Modares, Tehran. P: 120. (In Persian)

8- Minh-Duc, B., Wenka, T., and Rodi, W. 2004. Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels, Journal of Hydraulic Engineering. 130(9): 894–904.

9- Rodi, W. 1976. A new algebraic relation of calculating the Reynolds stresses. ZAMM. 56, pp. 1219–1221.

10- Wu, W. 2008. Computational River Dynamics, NCCHE, Tech Report No- NCCHE-TR- 2008- 5, University of Mississippi, USA, P:11.

11- Wu, W. 2009. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Tech Report No. NCCHE-TR- 2001-3, NCCHE, University of Mississippi, USA, P: 12.

12- Zhang, Y., Jia, Y., and Wang, S.Y. 2007. A Conservative Multi-block Algorithm for Two-dimensional Numerical Model. Joarnal of Mathematics Science. 11 (2).