

مقایسه و شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه ملایم با استفاده از مدل‌های SRH-2D و CCHE2D

علی آرمان^{۱*}، جواد ظهیری^۲، پریا فتاحی^۳ و سارا قنبری^۴

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی

^۲ استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی

^۴ دانش‌آموخته سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی

(دریافت: ۹۵/۸/۲۵، پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۲، نشر آنلاین: ۹۵/۱۲/۲۳)

چکیده

پدیده فرسایش و رسوبگذاری در سواحل یکی از بالاترین خسارات وارده به رودخانه‌ها می‌باشد. در قوس رودخانه، نیروهای هیدرودینامیکی جریان‌های ثانویه را به وجود آورده و خطوط جریان سطحی را به سمت ساحل بیرونی و خطوط جریان نزدیک به بستر را به سمت ساحل داخلی منحرف می‌سازند. از این رو مطالعه جریان در کانال‌های خمیده و قوسی شکل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های دو بعدی SRH-2D و CCHE2D و نیز با هدف مقایسه دو مدل مذکور، به شبیه‌سازی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداخته شده است. به منظور صحت‌سنجی، نتایج مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوی جریان با نتایج حاصل از مدل‌ها، نشان‌دهنده قابلیت بالای هر دو مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس می‌باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که سرعت‌های محاسبه شده از مدل‌های عددی CCHE2D و SRH-2D نسبت به مقادیر آزمایشگاهی برداشت شده، به ترتیب دارای خطای ۶/۷۷٪ و ۷/۴۲٪ می‌باشند. همچنین متوسط مقادیر پارامترهای آماری MAE، RMSE و R^2 در مدل CCHE2D به ترتیب برابر با ۲/۶۵، ۳/۲۲ و ۰/۹۳ و در نرم‌افزار SRH-2D برابر با ۲/۲۵، ۲/۹۰ و ۰/۹۵ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: الگوی جریان، قوس ۹۰ درجه، مدل عددی CCHE2D، مدل عددی SRH-2D

۱- مقدمه

زهکشی می‌باشند و همچنین در معرض فرسایش و رسوبگذاری شدید هستند، مطالعه آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. Siray (۱۹۷۶) تعریفی نسبتاً کاربردی برای جریان ثانویه ارائه داده است: اگر در یک جریان سه بعدی، اندازه یک بردار تشکیل شده از تعادل دو مؤلفه از بردار سرعت محلی، در مقایسه با مؤلفه سوم کوچک باشد، بردار سرعت اخیر (بردار سوم)، جریان اصلی در کانال را تشکیل می‌دهد و دو مؤلفه قبلی جریان‌های ثانویه را تشکیل می‌دهند.

Prandtl (۱۹۵۲) جریان ثانویه را برحسب نوع نیروهای به وجود آورنده آن به دو دسته کلی تقسیم می‌کند:

۱- جریان ثانویه ناشی از آشفتگی

۲- جریان ثانویه ناشی از فشار

فرآیند جریان در رودخانه‌های طبیعی یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های موجود در طبیعت می‌باشد. رودخانه‌های طبیعی به ندرت در یک مسیر مستقیم جریان دارند و بیشتر رودخانه‌ها به صورت مئاندر یک الگوی سینوسی را می‌پیمایند. جریان در مجاری هیدرولیکی دارای طبیعتی سه بعدی بوده و علاوه بر جهت غالب، که همان جهت اصلی نامیده می‌شود، در جهات دیگر نیز وجود دارد. این جریان‌ها که در داخل مقطع عرضی رخ می‌دهند به جریان‌های ثانویه موسوم هستند. ترکیب جریان‌های ثانویه و طولی در رودخانه‌ها باعث تشکیل جریان حلزونی می‌گردد که عامل اصلی فرسایش در قوس بیرونی و حمل رسوبات بستر به سمت قوس داخلی و رسوبگذاری در این ناحیه است. از آن‌جا که قوس‌ها مکان مناسبی برای آبرگیری شبکه‌های آبیاری و

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۳-۳۸۳۲۳۲۷۷

آدرس ایمیل: a.arman@razi.ac.ir (ع. آرمان)، zahiri1983@gmail.com (ج. ظهیری)، fatahi9270@gmail.com (پ. فتاحی)،

saraghanbari70@yahoo.com (س. قنبری)

در قوس‌ها و خم‌ها می‌باشند. به دلیل حجم بسیار بالای محاسبات در شبیه‌سازی‌های دوبعدی و سه‌بعدی، در پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های دوبعدی CCHE2D و SRH-2D و با هدف مقایسه دو مدل مذکور، به شبیه‌سازی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداخته می‌شود. تاکنون مطالعات فراوانی به منظور مشخص نمودن خصوصیات و الگوی جریان در قوس‌های با بستر صلب انجام شده است که در اینجا تنها به پژوهش‌های صورت گرفته با استفاده از مدل‌های دوبعدی SRH-2D و CCHE2D اشاره می‌گردد.

Booij (۲۰۰۳) به مدل‌سازی ساختار جریان ثانویه در قوس ۱۸۰ درجه با بستر صلب پرداخت. و نتایج حاصل از دو مدل $k-\epsilon$ و روش گردابه‌های بزرگ را با یکدیگر مقایسه نمود. نتایج بیانگر عدم کارایی مدل $k-\epsilon$ در مدل‌سازی سلول چرخشی خلاف جهت دیواره خارجی بود.

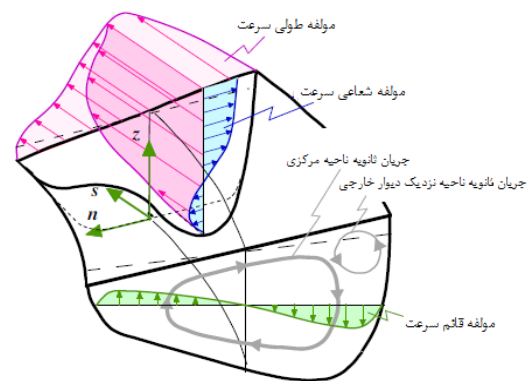
تائبی و همکاران (۱۳۸۸)، به شبیه‌سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند. بررسی تغییرات سرعت در طول کانال نشان داد که با عبور جریان از ورودی قوس، موقعیت حداکثر سرعت در مقاطع عرضی به نزدیک دیواره داخلی کشیده می‌شود. با قدرت یافتن جریان ثانویه، حداکثر سرعت از دیواره داخلی فاصله گرفته و به سمت میانه کانال متمایل می‌گردد. با پیش‌روی جریان در کانال، حداکثر سرعت در مقاطع به سمت دیواره خارجی کانال منتقل می‌شود.

Moges و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل دوبعدی SRH-2D هیدرولیک جریان و رسوب در رودخانه‌های مائندری را شبیه‌سازی نمودند و در نهایت بهترین معادله را برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب و تغییرات بستر در شرایط رسوبی تعیین کردند. Naji Abhari و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه پرداختند. بررسی نتایج نشان داد که سرعت‌های بیشینه تا زاویه ۳۰ درجه نزدیک دیواره داخلی قرار دارند و پس از آن به دیواره خارجی منتقل می‌شوند.

مغربی (۱۳۹۰) به بررسی الگوی جریان آشفته در بازه‌ای از رودخانه کارون شامل دو خم ۱۸۰ درجه تند به صورت دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق در حالت غیر دائمی توسط مدل MIKE21FM و CCHE2D پرداخت. نتایج نشان داد که هر دو مدل به درستی، الگوی جریان در ناحیه مورد بررسی را شبیه سازی می‌کنند. اما تفاوت‌هایی در نتایج حاصل از مدل‌سازی در دو نرم‌افزار وجود دارد که ناشی از نحوه حل معادلات و توانایی‌های متفاوت این دو نرم‌افزار می‌باشد.

اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثرات گزینه‌های مختلف اصلاح مسیر در بازه پیمان‌رودی از رودخانه شلمان-

وی جریان ثانویه ناشی از آشفتگی را به خاطر وجود اختلاف تنش‌های آشفته‌گی در مجاری با مقاطع غیر دایروی می‌داند و قدرت آن‌ها را در حدود ۵ تا ۱۰ درصد قدرت جریان طولی ذکر می‌کند. ایشان عامل شکل‌دهنده جریان ثانویه ناشی از فشار را نیز، نیروی گریز از مرکز معرفی می‌کند که از طریق ایجاد شیب جانبی در سطح آب، باعث ایجاد اختلاف فشار بین دیواره داخلی و خارجی می‌شود و قدرت این نوع جریان ثانویه را در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد قدرت جریان طولی عنوان کرده است. لذا این‌گونه می‌توان عنوان کرد که با ورود جریان به قوس، نیروی گریز از مرکز بر آن اثر می‌کند که این نیرو در راستای شعاع قوس و نیز در جهت عمق به خاطر تغییرات سرعت، متغیر می‌باشد. نیروی گریز از مرکز موجود در خم باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این پدیده باعث ایجاد گرادبان فشار جانبی در داخل مقطع خواهد شد. حال هرگاه گرادبان فشار مزبور بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در جهت عرضی داخل مقطع شکل می‌گیرد که همان جریان ثانویه می‌باشد. در اثر این جریان، ذرات موجود در سطح آب به طرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات سیال در کف به طرف دیواره داخلی جابه جا می‌شوند (Prandtl, ۱۹۵۲). در شکل (۱) الگوی جریان ثانویه نشان داده شده است علاوه بر این در این شکل جریان ثانویه دیگری در نزدیک دیواره خارجی نیز وجود دارد. اگرچه این جریان ثانویه از قدرت چرخشی کمتری برخوردار می‌باشد اما عامل مهمی در فرسایش دیواره خارجی می‌باشد.



شکل ۱- الگوی جریان شکل گرفته در کانال قوسی شکل
(نشریه ۵۱۶، ۱۳۸۸)

تاکنون مدل‌های عددی فراوانی در خصوص الگوی جریان در رودخانه‌ها تجاری شده و در دسترس محققان علم مهندسی رودخانه قرار گرفته است. در این بین مدل‌های دو بعدی و سه بعدی دارای دقت بسیار بالاتری در خصوص شبیه‌سازی جریان

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی مدل SRH-2D

نرم‌افزار SRH-2D توسط موسسه USBR توسعه داده شده است و هیدرولیک جریان و رسوب را در دو بعد برای سیستم‌های رودخانه‌ای شبیه‌سازی می‌کند. این مدل قابلیت شبکه‌بندی و تولید مش را ندارد و مش مورد نیاز آن با استفاده از نرم‌افزار SMS که تنها قابلیت تولید مش مثلثی را دارد، تهیه و سپس در محیط SRH-2D فراخوانی می‌گردد. از فایل‌های خروجی مدل برای مشاهده و بررسی الگوی جریان شبیه‌سازی شده استفاده می‌گردد. فرمت فایل خروجی مدل توسط کاربر انتخاب می‌شود و اغلب فایل‌های خروجی با فرمت TECPLOT ذخیره می‌شوند.

۲-۱-۱- معادلات حاکم

این مدل معادلات موج دینامیک میانگین‌گیری شده در عمق (معادلات استاندارد سنت ونانت) را به روش عددی حجم محدود حل می‌کند. معادلات دو بعدی مورد استفاده در مدل عبارتند از:

(۱)

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} = D_{xx} + D_{xy} \quad (2)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} = D_{yx} + D_{yy} \quad (3)$$

در معادلات بالا t زمان، x و y مختصات دو بعدی نقاط، h عمق آب و U و V به ترتیب متوسط سرعت در راستای x و y ، e نرخ بارش مازاد، g شتاب ثقل، T_{xx} ، T_{xy} و T_{yy} متوسط فشار ناشی از جریان متلاطم، D_{xx} ، D_{xy} ، D_{yx} و D_{yy} عبارات پراکندگی به دلیل میانگین‌گیری، $h = Zb + Z$ که در آن Z تراز سطح آب و Zb رقوم بستر می‌باشد. ρ جرم واحد حجم آب و τ_{bx} و τ_{by} تنش برشی (اصطکاک) وارد بر بستر می‌باشند که این اصطکاک با استفاده از زبری مانینگ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{\tau_{bx}}{\tau_{by}} \right) = \rho c_f \left(\frac{U}{V} \right) \sqrt{U^2 + V^2} \quad (4)$$

$$C_f = \frac{gn^2}{n^3} \quad (5)$$

$$T_{xx} = 2(\theta + \theta_t) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad (6)$$

$$T_{xy} = (\theta + \theta_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (7)$$

رود استان گیلان با استفاده از مدل CCHE2D پرداختند. آن‌ها برای چهار میانبر پیشنهادی پارامترهای تغییرات تراز کف، سرعت و تنش برشی قبل و بعد از اجرای مسیرهای پیشنهادی را مورد بررسی قرار دادند و مناسب‌ترین گزینه اصلاح مسیر که کمترین تغییرات را در مشخصات جریان و هندسه رودخانه ایجاد می‌نمود، معرفی کردند.

فتحی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی الگوی جریان در بازه‌ای از پیچان رود طبیعی رودخانه خشکه رود فارس با استفاده از مدل عددی CCHE2D پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در صورت ورود شبکه محاسباتی استاندارد به مدل، این مدل در پیش‌بینی مقادیر سرعت جریان از دقت بالایی برخوردار بوده و داده‌های شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری صحرائی، شباهت زیادی دارند.

مرادی و قبادیان (۱۳۹۳) با استفاده از مدل دو بعدی SRH-2D به شبیه‌سازی دو بعدی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت پرداختند. خصوصیات جریان از جمله پروفیل عرضی سرعت طولی، مسیر سرعت حداکثر در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت، پروفیل طولی سطح آب در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت و نحوه توزیع تنش برشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج صحت سنجی نشان داد که مدل عددی به خوبی میدان جریان در قوس یکنواخت را شبیه‌سازی می‌نماید.

قبادیان و قنبری (۱۳۹۴) به بررسی تأثیر انحنای کانال فرعی بر الگوی جریان در تلاقی ۹۰ درجه کانال‌های روباز با استفاده از مدل دو بعدی SRH-2D پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بیشترین خطا در خط مرکزی کانال کمتر از ۳ درصد و در محدود ناحیه جدا شدگی جریان حدود ۷/۵ درصد می‌باشد.

اکثر پژوهش‌های صورت گرفته در مسیرهای قوسی، در زمینه مطالعه بر روی مدل‌های فیزیکی در شرایط آزمایشگاهی بوده است. همچنین مطالعاتی که در زمینه کاربرد نرم‌افزارهای مختلف در مسیرهای قوسی صورت پذیرفته، عمدتاً به بررسی الگوی جریان با استفاده از یک مدل عددی پرداخته‌اند. تا کنون مقایسه‌ای میان دو مدل CCHE2D و SRH-2D صورت نپذیرفته است که از نوآوری‌های این پژوهش مقایسه الگوی جریان در دو نرم‌افزار مذکور می‌باشد.

با توجه به توضیحات فوق، در این پژوهش به شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از دو مدل CCHE2D و SRH-2D پرداخته می‌شود و در ادامه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این دو مدل با استفاده از پارامترهای آماری با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

معادله‌ای توزیع سهموی و مدل طول اختلاط لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ را به کار می‌برد. ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی در یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده تحت عنوان CCHE-MESH صورت می‌گیرد و حل میدان جریان و انتقال رسوب و همچنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار CCHE-GUI انجام می‌شود. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود صورت می‌گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به ترتیب با استفاده از روش تصحیح سرعت و روش‌های تکرار گوس-سایدل و SIP انجام می‌شود. مدل مش‌ساز این نرم‌افزار تنها قابلیت تولید مش‌های مستطیلی را دارد.

۲-۱-۲- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و مومنتم جریان متوسط‌گیری شده در عمق برای جریان‌های آشفته در دستگاه مختصات کارتزین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + U \frac{\partial (hU)}{\partial x} + V \frac{\partial (hV)}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor} V \quad (13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial (h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{cor} U \quad (14)$$

در معادلات فوق U و V به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y است، g شتاب جاذبه، Z تراز ارتفاعی سطح آب، ρ دانسیته، h عمق محلی جریان و f_{cor} ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، τ_{xx} ، τ_{xy} ، τ_{yx} ، τ_{yy} تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق و τ_{bx} ، τ_{by} تنش‌های برشی بستر در راستای x و y می‌باشند. این مدل قابلیت تولید مش مستطیلی را در میدان جریان دارا می‌باشد. لازم به ذکر است که بر اساس تطابق بیشتر نتایج شبیه‌سازی شده مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ با نتایج آزمایشگاهی در هر دو مدل، این مدل آشفتگی از میان سه مدل آشفتگی توزیع سهموی، طول اختلاط و مدل $k-\varepsilon$ ، انتخاب شد. به دلیل محدودیت‌های دو مدل تنها از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد در هر دو مدل استفاده می‌شود. ضمناً در مرحله صحت سنجی و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، کالیبراسیون لازم صورت پذیرفت و مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ به عنوان مدل برتر که بیشترین انطباق را با داده‌های آزمایشگاهی دارا بود، به عنوان مدل برتر انتخاب گردید.

$$T_{xx} = 2(\vartheta + \vartheta_t) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3} k \quad (8)$$

که در آن v : لزجت دینامیکی سیال و v_t لزجت گردابی و آشفته k انرژی جنبشی در حالت آشفته می‌باشد.

v_t با استفاده از دو مدل اغتشاش توزیع سهموی و $k-\varepsilon$ محاسبه می‌شود. در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی جریان در قوس از مدل اغتشاش $k-\varepsilon$ استفاده شده است. در مدل $k-\varepsilon$ از معادله $\vartheta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ دو معادله دیگر مدل به صورت زیر حل می‌شوند:

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial hUk}{\partial x} + \frac{\partial hVk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{hvt}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{hvt}{\sigma k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + ph + pkk - h\varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial hV\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{hvt}{\sigma \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{hvt}{\sigma \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} ph + p\varepsilon b - C_{\varepsilon 2} h \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

در مدل SRH-2D ضریب زبری مانینگ با جریان تغییر نمی‌کند ولی با تغییر جنس بستر n هم تغییر می‌کند. علاوه بر n یک شاخص زبری دیگر هم موجود می‌باشد که زبری معادل نام دارد و KS می‌باشد. برای مقاطع عرضی، n و KS باید هم شامل تأثیرات اندازه ذرات دانه‌بندی بستر و هم شامل نوع بستر باشند. این دو پارامتر به صورت زیر با استفاده از فرمول استریکلر به هم قابل تبدیل می‌باشند: لازم به ذکر است که این مدل قابلیت تولید مش مثلثی را دارا می‌باشد.

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{A} \quad (11)$$

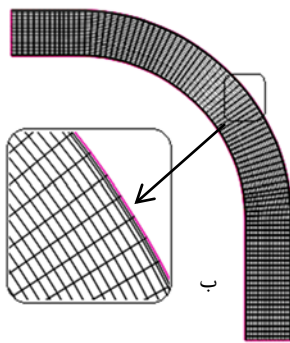
در معادله بالا، A پارامتر ثابتی است که به اندازه ذرات رسوب، شکل مقطع، پوشش گیاهی و شکل کانال بستگی دارد و مقدار آن در حدود ۲۶ می‌باشد.

۲-۲- معرفی مدل عددی CCHE2D

نرم‌افزار CCHE2D یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز می‌باشد که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی دانشکده می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه شده و توسعه یافته است. این مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده که برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی جملات انتقال آشفتگی دو مدل صفر

۲-۳- معرفی مدل آزمایشگاهی

قوس به کار رفته در حل عددی این پژوهش بر مبنای یک فلوم قوسی ۹۰ درجه ملایم است که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز و بر مبنای پژوهش ظهیری و همکاران (۱۳۹۱) مدل‌سازی شده است. مشخصات فلوم آزمایشگاهی در شکل (۲) آورده شده است. با توجه به نسبت شعاع قوس به عرض مجرای برابر با ۴، نتیجه‌گیری می‌شود که قوس به کار رفته در این پژوهش، در محدوده قوس‌های ملایم می‌باشد.



شکل ۳- شمایی از شبکه به کار رفته در نرم‌افزار
الف (SRH-2D)، ب (CCHE2D)

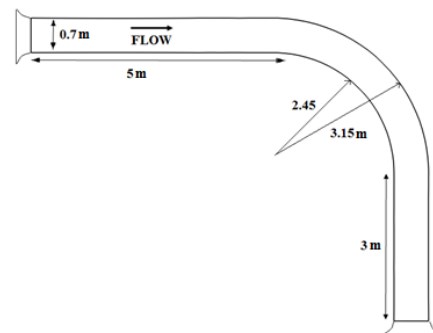
۲-۵- شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط اولیه برای شبیه‌سازی جریان، شامل عمق اولیه آب، ضریب زبری و ارتفاع بستر کانال می‌باشد که بر اساس مشخصات مدل آزمایشگاهی اعمال گردید. شرایط مرزی اعمال شده در ورودی و خروجی مدل در حالت ماندگار شامل دبی ۳۴ لیتر بر ثانیه در مرز ورودی و عمق آب برابر با ۱۴ سانتی‌متر در مرز خروجی می‌باشد. ضمناً ضریب زبری مانینگ با توجه به مصالح کف، برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

پایان زمان شبیه‌سازی در مدل SRH-2D بر اساس باقی‌مانده‌های خطا برابر ۰/۰۰۰۱ و در مدل CCHE2D بر اساس اختلاف دبی در واحد عرض ورودی و خروجی فلوم و به میزان ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شد. همچنین گام‌های زمانی در هر دو مدل برابر با ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد.

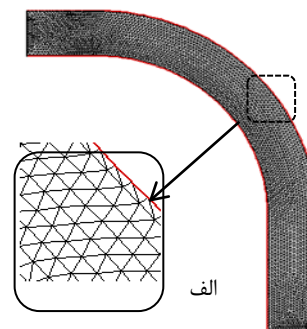
در شکل (۴) الگو و مسیر وقوع حداکثر سرعت در قوس شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مذکور در حالت متوسط‌گیری شده در عمق، ارائه گردیده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است در هر دو مدل الگوی پیش‌بینی شده روند نسبتاً مشابهی را دارد به گونه‌ای که در ابتدای قوس حداکثر سرعت در قوس داخلی اتفاق می‌افتد و با پیش‌روی جریان این سرعت به تدریج از قوس داخلی به قوس خارجی منتقل می‌گردد و در انتهای قوس حداکثر سرعت در قوس خارجی رخ می‌دهد. تفاوت ملموس این دو مدل در این است که سرعت‌های پیش‌بینی شده توسط مدل SRH-2D نسبت به مدل CCHE2D دارای مقادیر کمتری می‌باشند.



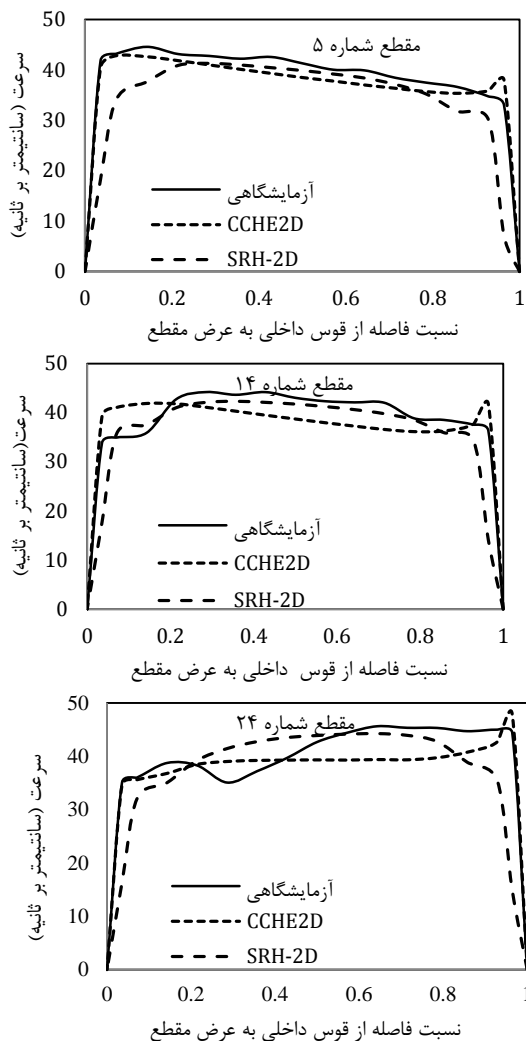
شکل ۲- شکل شماتیک فلوم آزمایشگاهی

۲-۴- تشکیل شبکه

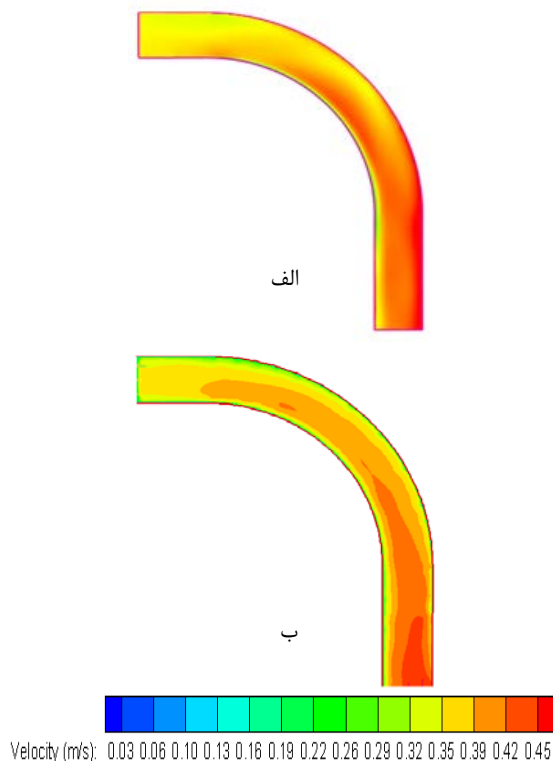
شکل (۳) نمایی از شبکه تشکیل شده توسط دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در هر دو نرم‌افزار هندسه میدان مورد مطالعه به گونه‌ای تعریف شده که در نواحی نزدیک به جداره به منظور افزایش دقت، از شبکه‌بندی ریزتری استفاده گردد. به منظور کاهش حجم و زمان محاسبات از قسمت مستقیم ابتدای فلوم صرف‌نظر شد.



همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در ابتدای قوس حداکثر سرعت در مجاورت قوس داخلی و در انتهای قوس در مجاورت قوس خارجی رخ می‌دهد که در شبیه‌سازی‌های صورت پذیرفته توسط مدل‌های CCHE2D و SRH-2D، پروفیل‌های سرعت به درستی تشخیص داده شده است. مدل CCHE2D در محاسبه سرعت در جداره از دقت بیشتری برخوردار است اما سرعت اندازه‌گیری شده توسط مدل SRH-2D با افزایش فاصله از دیواره‌ها به پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر شده است. با ورود به مرکز قوس حداکثر سرعت به تدریج حالت یکنواخت‌تری پیدا می‌کند همان‌طور که در این مقطع نیز مشاهده می‌شود مدل SRH-2D به پروفیل اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر و از دقت بیشتری برخوردار است نهایتاً در انتهای قوس حداکثر سرعت به سمت دیوار خارجی قوس متمایل می‌گردد در این مقطع نیز CCHE2D با دقت بیشتری قادر به پیش‌بینی سرعت در دیواره‌ها بوده است.

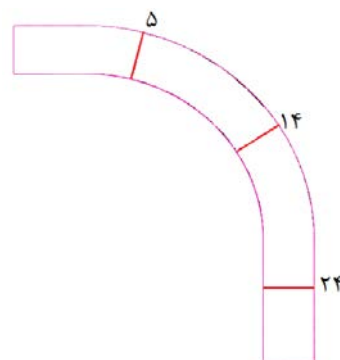


شکل ۶- پروفیل عرضی سرعت در مقاطع مختلف

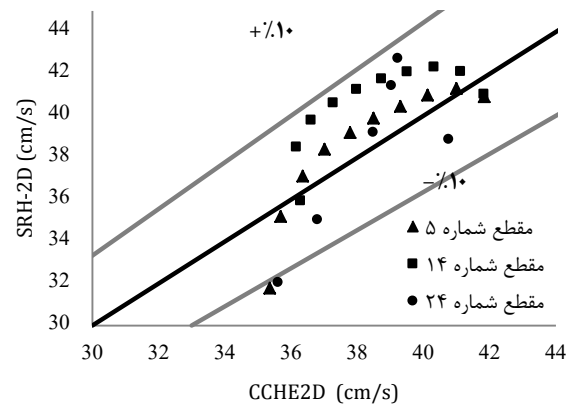
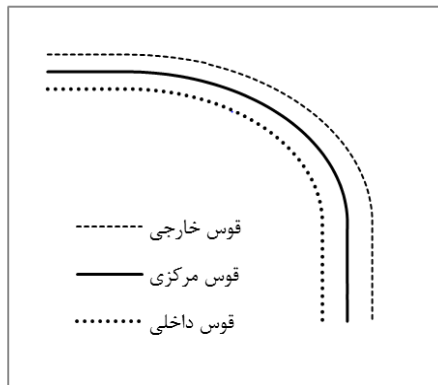


شکل ۴- الگوی سرعت پیش‌بینی شده توسط: الف) مدل CCHE2D، ب) مدل SRH-2D

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی در هر دو مدل، سرعت در مقاطع عرضی مختلف با سرعت‌های آزمایشگاهی که توسط سرعت‌سنج سه‌بعدی الکترومغناطیس JFE ALEC و در نقاط مختلف عمقی برداشت شده‌اند، مقایسه و متوسط درصد خطا برای هر مقطع محاسبه گردید. از بین مقاطع عرضی، سه مقطع به گونه‌ای انتخاب گردید که محدوده مورد مطالعه را به خوبی پوشش دهند. در شکل (۵) مقاطع انتخاب شده نشان داده شده است. در شکل (۶) روند تغییرات پروفیل عرضی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق، در مقاطع مختلف ترسیم شده است.



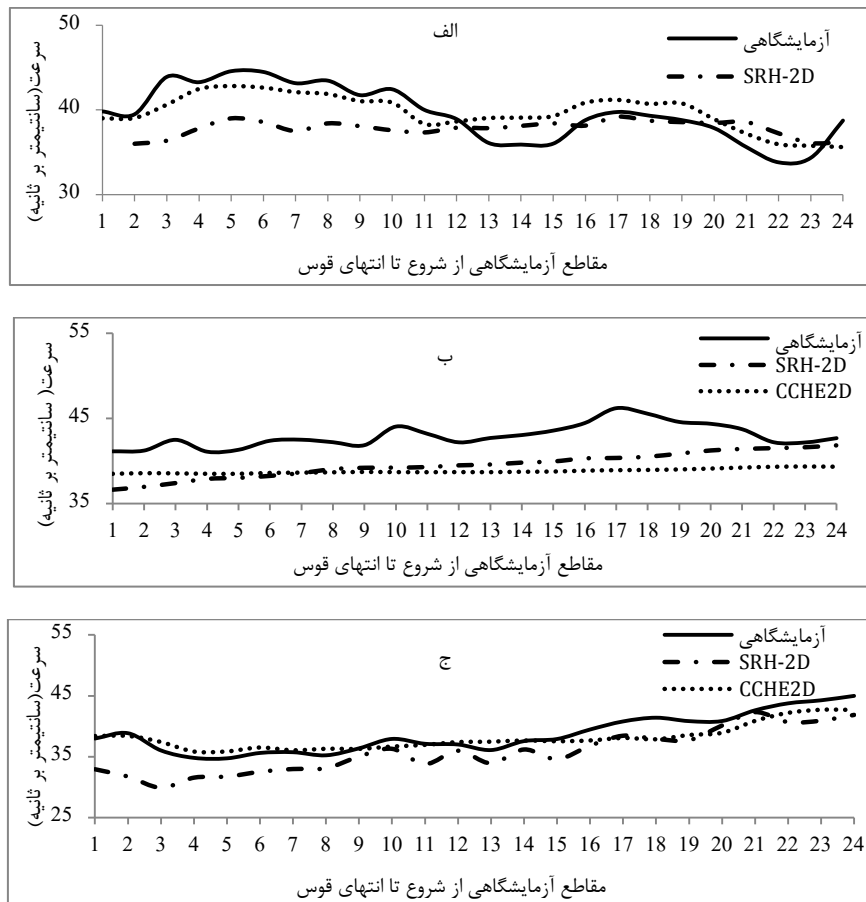
شکل ۵- مقاطع انتخابی جهت مقایسه پروفیل‌های عرضی سرعت



شکل ۷- مقایسه سرعت‌های شبیه‌سازی شده در دو نرم‌افزار

شکل ۸- موقعیت قرارگیری پروفیل‌های طول

در شکل (۷) مقایسه بین سرعت‌های شبیه‌سازی شده توسط دو مدل مذکور در مقاطع ۵، ۱۴ و ۲۴ نشان داده شده است. به منظور بررسی دقت شبیه‌سازی سرعت‌های طولی، سه پروفیل طولی در قوس‌های داخلی، مرکزی و خارجی مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شد. این پروفیل‌ها به ترتیب در فاصله ۱۰، ۳۵ و ۶۰ سانتی-متری از دیواره داخلی قرار گرفته‌اند.



شکل ۹- مقایسه پروفیل طولی سرعت در: (الف) قوس داخلی، (ب) قوس مرکزی، (ج) قوس خارجی با داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۱- پارامترهای آماری محاسبه شده در هریک از مدل‌ها

R ²		RMSE		MAE		شماره مقطع
SRH-2D	CCHE2D	SRH-2D	CCHE2D	SRH-2D	CCHE2D	
۰/۹۶	۰/۹۷	۲/۹۰	۲/۱۹	۲/۲۰	۱/۸۴	۵
۰/۹۸	۰/۹۰	۱/۷۱	۴/۰۵	۱/۴۶	۳/۴۷	۱۴
۰/۹۲	۰/۹۳	۴/۱	۳/۴۳	۳/۱	۲/۶۶	۲۴

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل‌های عددی CCHE2D و SRH-2D، به بررسی الگوی جریان در یک قوس ۹۰ درجه ملایم پرداخته شد. تحلیل نتایج در هر دو مدل نشان می‌دهد که حداکثر سرعت در ورودی قوس، در مجاورت قوس داخلی و خروجی قوس در مجاورت قوس خارجی و در انتهای قوس اتفاق می‌افتد. همچنین مقایسه نتایج در دو مدل نشان می‌دهد که مدل CCHE2D در محاسبه سرعت در دیواره‌ها از دقت بیشتری برخوردار است اما سرعت اندازه‌گیری شده توسط مدل SRH-2D با افزایش فاصله از دیواره‌ها به پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است و از دقت بیشتری برخوردار است. تفاوت ملموس این دو مدل در این است که سرعت‌های پیش‌بینی شده توسط مدل SRH-2D نسبت به مدل CCHE2D دارای مقادیر کمتری می‌باشد. صحت‌سنجی نتایج با استفاده از مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌ها با نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. بدین ترتیب که در مقاطع عرضی مختلف سرعت‌های شبیه‌سازی شده با سرعت‌های آزمایشگاهی مقایسه و متوسط درصد خطا برای هر مقطع محاسبه گردید. نتایج بیانگر این است که هر دو مدل الگوی جریان در قوس را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده به گونه‌ای که میانگین درصد خطا در تخمین پروفیل عرضی سرعت در مدل CCHE2D برابر ۶/۷۷ و در مدل SRH-2D برابر ۷/۴۲ می‌باشد.

۵- مراجع

اسمعیلی ورکی م، زمانی ا، کاظمی‌راد م، "شبیه‌سازی عددی گزینه‌های مختلف اصلاح مسیر در رودخانه‌های پیچان‌رودی (مطالعه موردی رودخانه سلمان‌رود استان گیلان)"، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۱.

تائبی ح، شفاعی بجستان م، کاهه م، "شبیه‌سازی عددی جریان در قوس ۹۰ درجه با استفاده از مدل CCHE2D"، هشتمین

در شکل (۹) مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت در قوس داخلی، مرکزی و خارجی نشان داده شده است. در هر دو شبیه‌سازی، بیش‌ترین مقدار سرعت در ابتدای قوس در قوس داخلی و در انتهای قوس در قوس خارجی رخ می‌دهد. این روند در هر دو مدل دیده می‌شود اما شرایط در قوس مرکزی برای دو مدل مذکور دارای تفاوت‌هایی است به گونه‌ای که در مدل CCHE2D سرعت در قوس مرکزی تقریباً یکنواخت است ولی در مدل SRH-2D با پیش‌روی به سمت انتهای قوس سرعت روند افزایشی داشته و به طور کلی دامنه نوسانات سرعت در مدل CCHE2D نسبت به مدل SRH-2D بیشتر است. این امر می‌تواند ناشی از دلایل مختلفی همچون تأثیر مرزهای کناری، تفاوت در معادلات حاکم بر دو نرم‌افزار و متفاوت بودن مش‌های تولید شده توسط دو نرم‌افزار باشد. مش‌های به کار رفته در مدل SRH-2D از نوع مثلثی و در مدل CCHE2D از نوع مربعی می‌باشد. مجموعه این عوامل می‌توانند در نتایج خروجی دو مدل تأثیرگذار باشند.

پس از مقایسه داده‌های خروجی دو مدل و استخراج پروفیل‌های عرضی و طولی سرعت، جهت بررسی دقت هریک از مدل‌ها از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا و متوسط خطای مطلق استفاده شد که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(v_0)_i - (v_i)]^2} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N abs[(v_0)_i - (v_i)] \quad (16)$$

در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، v_0 سرعت برداشت شده در آزمایشگاه و v سرعت محاسبه شده توسط هریک از نرم‌افزارها می‌باشند. نتایج در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به جدول (۱) متوسط مقادیر پارامترهای آماری MAE ، $RMSE$ و R^2 در مدل CCHE2D به ترتیب برابر با ۲/۶۵، ۳/۲۲ و ۰/۹۳ و در نرم‌افزار SRH-2D برابر با ۲/۲۵، ۲/۹۰ و ۰/۹۵ می‌باشد.

- مغربی م، "مقایسه مدل‌های MIKE21 FM و CCHE2D در شبیه‌سازی الگوی جریان در قوس رودخانه (مطالعه موردی رودخانه کارون)"، اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران، ۱۳۹۰.
- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، "راهنمای طراحی، ساخت و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای"، نشریه شماره ۵۱۶، ۱۳۸۸.
- Booij R, "Measurements and large eddy simulations of some curved flumes", *Journal of Turbulence*, 2003, 4 (1).
- Ciray C, "On secondary currents", 12th IAHR Congress, Fort Collins, 1976.
- Moges EM, "Evaluation of sediment transport equations and parameter sensitivity analysis using the SRH-2D model", PhD Thesis, Universität Stuttgart, 2010.
- Naji Abhari M, Ghodsian M, Vaghefi M, Panahpur N, "Experimental and Numerical Simulation of Flow in a 90° Bend", *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21 (3), 292-298.
- Prandtl L, "Essentials of fluid dynamics", Hofner Publishing Company, New York, US, 1952.
- سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۸.
- ظهیری م، کاشفی‌پور س م، شفاعی بجستان م، قمشی م، "تأثیر پارامترهای هندسی ریپرپ بر محافظت آبشکن‌ها در قوس ۹۰ درجه"، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۱۳۹۱، ۳۵ (۴)، ۴۹-۵۸.
- فتحی م، هنربخش ا، رستمی م، "شبیه‌سازی الگوی جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی با استفاده از مدل CCHE2D"، *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۳۹۱، ۶ (۱۹)، ۵۹-۶۶.
- قبادیان ر، قنبری س، "بررسی تأثیر انحنای کانال فرعی بر الگوی جریان در تلاقی ۹۰ درجه کانال‌های روباز با استفاده از مدل دوبعدی SRH-2D"، *چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان*، ۱۳۹۴.
- مرادی م، قبادیان ر، "شبیه‌سازی دو بعدی الگوی جریان در قوس ۱۸۰ درجه یکنواخت با استفاده از مدل دو بعدی SRH-2D"، *چهارمین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان*، ۱۳۹۳.

EXTENDED ABSTRACT

Comparison and Simulation of Flow Pattern in a 90 Degree Mild Bend Using CCHE2D and SRH-2D Models

Ali Arman^{a,*}, Javad Zahiri^b, Parya Fatahi^a, Sara Ghanbari^a

^a Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran

^b Khuzestan Ramin Agriculture and Natural Resources, Mollasani, Iran

Received: 15 November 2016; **Accepted:** 12 March 2017

Keywords:

Flow pattern, 90 degree mild bend, CCHE2D numerical model, SRH-2D numerical model

1. Introduction

Flow in river bends is three-dimensional, the combination of secondary flow and longitudinal flow in rivers leads to the formation of helical flow which is the main cause of erosion in the outer bend and sedimentation in the inner bend. So far, many numerical models regarding flow patterns in rivers have been introduced and available to river engineering scholars. Moges et al. (2010) simulated the hydraulic and sediment flow in Meander Rivers using SRH-2D two-dimensional model and eventually determined the best equation for predicting the water surface profile and bed level changes in sediment situations. Naji Abhari et al. (2010) studied the flow pattern in a 90 degree bend. The results of their study results showed that from the beginning of the bend till the 30 degrees angle the maximum velocity is close to the inner wall and from the 30 degree angle till the end of the bend the maximum velocity is diverted to the outer bend. Maghrebi (2012) studied the turbulent flow pattern in a longitudinal range of Karoon river, containing two 180 degree steep bends using MIKE21FM and CCHE2D models, the results showed that that both models simulate the flow pattern accurately. The aim of the present study is simulation of the flow pattern in a 90 degree mild bend using CCHE2D and SRH2D models.

2. Methodology

2.1. SRH-2D model

The SRH-2D model has been developed by the USBR institute and simulates the hydraulic and sediment flow in two-dimensions for river systems. This model lacks the ability to mesh and generate mesh. Therefore the required mesh is provided by the SMS software which is only able to provide triangle mesh, then it is loaded in SRH2D. The models output files are used for viewing the simulated flow patterns.

2.2. CCHE2D model

The CCHE2D software is a numerical model for simulating turbulent flow and sediment transport in open channels, which was developed in the international center of hydraulic sciences and computational

* Corresponding Author

E-mail addresses: a.arman@razi.ac.ir (Ali Arman), zahiri1983@gmail.com (Javad Zahiri), fatahi9270@gmail.com (Parya Fatahi), saraghanbari70@yahoo.com (Sara Ghanbari)

engineering of Mississippi faculty in America. This model is a two-dimensional hydrodynamic model that uses depth averaged Reynolds equations for solving the flow field.

2.3 Laboratory model

The bend used in this study is based on a 90 degree mild bend that was modeled in the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University in Ahvaz, based on Zahiri et al. (2012) study (Fig. 1).

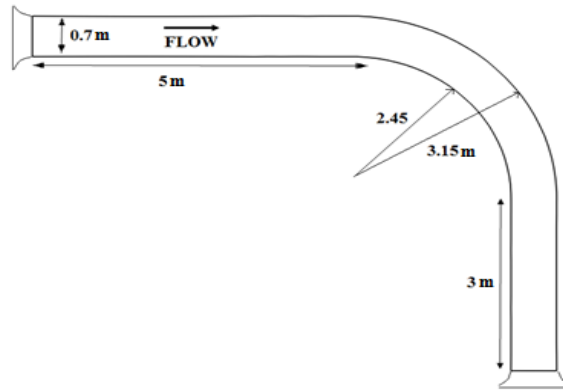


Fig 1. Schematic plan of experimental flume

3. Results and discussion

In order to validate the simulation results in both models, the velocity in various cross sections were compared with experimental velocities which were measured using an electromagnetic velocity meter and the average percentage or error for each section was calculated.

Fig. 2 shows the changes of lateral profile of depth averaged velocity in different sections. It can be seen that at the beginning of the bend the maximum velocity is close to the inner wall and at the end of the bend it is close to the outer wall, which shows that the CCHE2D and SRH-2D models have accurately simulated the velocity profiles.

Comparison of longitudinal velocity profiles in the inner, center and outer bend showed that in both simulations, the maximum velocity at the beginning of the bend occurs in the inner bend and at the end of the bend it occurs in the outer bend, this trend was observed in both models. But in the center of the bend the models showed different results for example for the CCHE2D model the velocity in the center bend is almost uniform while for the SRH-2D model as the flow moves towards the end of the bend the velocity increases, generally the range of velocity fluctuation in the CCHE2D model is less than the SRH-2D model. This might be attributed to different reasons such as: The effect of lateral boundaries, the difference in the equations governed on the two soft wares and the difference in the meshes generated by the two soft wares. The SRH-2D model uses triangle meshes while the CCHE2D model uses square meshes.

The tangible difference between the models is that the predicted velocities by the SRH-2D model have less values compared to the CCHE2D model. For both models the results were verified by comparing the simulation results with the experimental results. Therefore for each cross section the simulated velocities were compared with experimental velocities and the average percentage of error for each section was calculated. The results indicate both models high ability in simulating the flow pattern in river bends. The simulation results showed that the velocity calculated by the CCHE2D and SRH-2D numerical models have 6.77% and 7.42% errors respectively compared to experimental data.

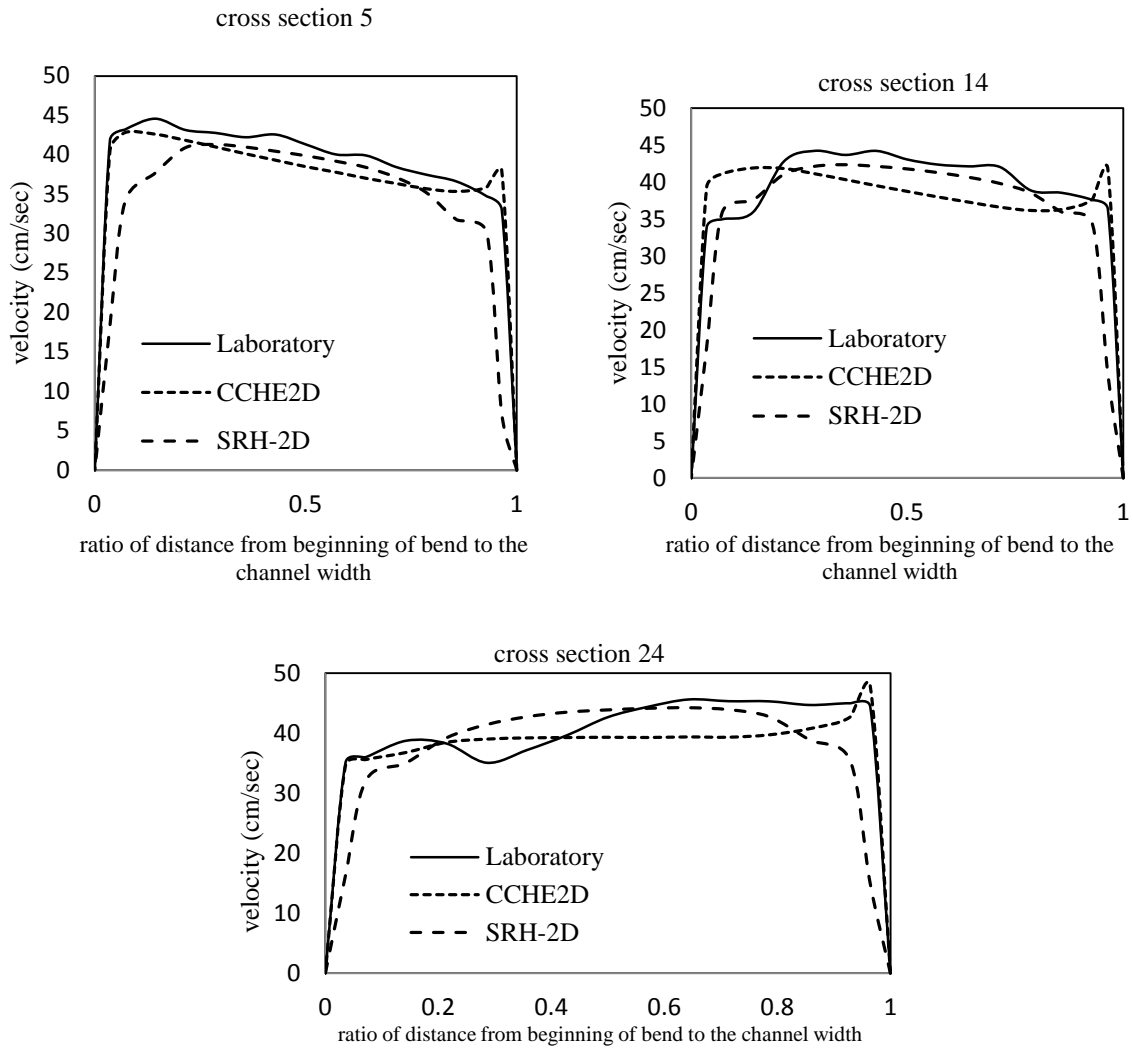


Fig 2. The changes of lateral profile of depth averaged velocity in different sections

4. Conclusion

In this research the flow patterns in a 90 degree mild bend have been simulated using CCHE2D and SRH2D models and the simulation results have been compared. The results show that both models accurately simulate the velocity profiles and the predicted velocities by the SRH-2D model have less value compared to the CCHE2D model. The results also indicate that the velocity calculated by the CCHE2D and SRH-2D numerical models have 6.77% and 7.42% errors respectively compared to experimental data.

5. References

- Maghrebi M, "The comparison of CCHE2D and MIKE21 FM models in simulating the flow pattern in river bends (Case study: Karoon river)", The 1st International and 3rd National Conference on Dam and Hydroelectric Power Plants", Tehran, Iran, 2012 (In Farsi).
- Moges, EM, "Evaluation of sediment transport equations and parameter sensitivity analysis using the SRH-2D Model", PhD Thesis, Universität Stuttgart, 2010.
- Naji Abhari M, Ghodsian M, Vaghefi M, Panahpur N, "Experimental and numerical simulation of flow in a 90o bend", Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21 (3), 292-298.
- Zahiri J, Kahefipour SM, Shafai Bahestan M, Ghomeshi M, "Riprap stability around spurs in the bend", Journal of Irrigation Science and Engineering, 2012, 35 (4), 49-58 (In Farsi).