

شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت جریان و تنش برشی در کانال‌های مرکب پیچان

محمد نقوی^۱، میرعلی محمدی^{۲*} و قربان مهتابی^۳

چکیده

در این پژوهش توزیع سرعت جریان و تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب پیچان تحت اثر تغییر عرض سیلاب‌دشت و عمق نسبی بررسی شد. برای این منظور از چهار کانال مرکب پیچان با عرض سیلاب‌دشت ۳/۳، ۴/۳۱، ۵/۳۲ و ۶/۳۳ متر و سه عمق نسبی ۰/۲۶، ۰/۳۵ و ۰/۴۵ استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داد که با افزایش عرض سیلاب‌دشت از مقدار سرعت متوسط عمقی و تنش برشی بستر کاسته می‌شود؛ به گونه‌ای که با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب‌دشت، مقدار حداکثر سرعت جریان در کانال اصلی ۲۴ درصد کاهش و میزان سرعت متوسط در عمق‌های نسبی ۰/۴۵ و ۰/۲۶ به ترتیب ۱۷ و ۲۱ درصد کاهش می‌یابد. اثر تغییر عرض سیلاب‌دشت روی تنش برشی بستر، در مقطع میانی بین دو تاج پیچان (مقطع CS3) دارای بیشترین مقدار است؛ به گونه‌ای که با افزایش ۹۲ درصدی عرض سیلاب‌دشت، تنش برشی بستر ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین میزان تنش برشی جداره در قوس داخلی کانال اصلی در تمامی کانال‌ها از تنش برشی جداره در قوس خارجی بیشتر بود، حداکثر مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی عمق لبریز کانال اصلی رخ می‌دهد و با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی جداره‌ها افزوده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی جداره، سرعت متوسط عمقی، کانال مرکب پیچان، عرض سیلاب‌دشت، عمق نسبی.

ارجاع: نقوی م.، محمدی م. و مهتابی ق. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی عددی توزیع سرعت جریان و تنش برشی در کانال‌های مرکب پیچان. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۲۳-۳۴.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.

۲- دانشیار مهندسی عمران- هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه.

۳- استادیار مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان.

* نویسنده مسئول: m.mohammadi@urmia.ac.ir

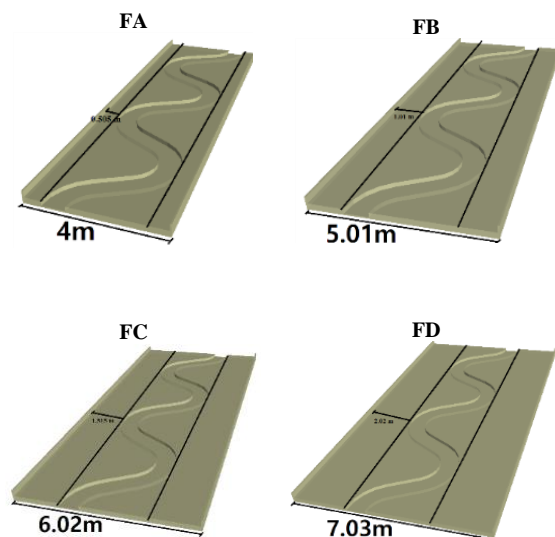
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳

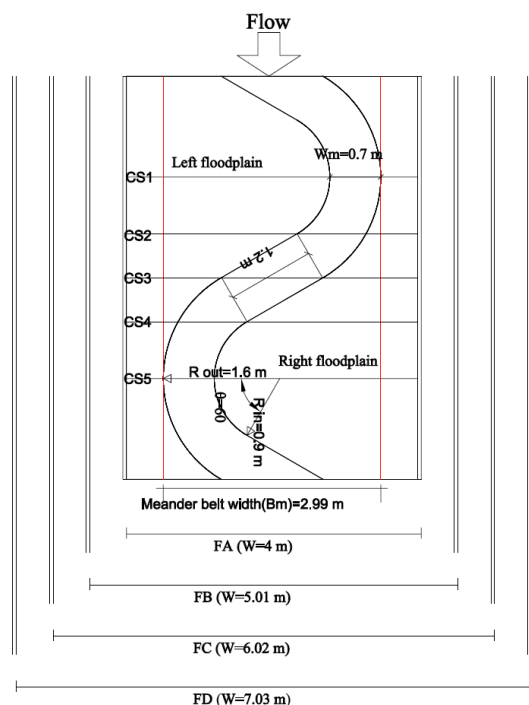
مقدمه

در رودخانه‌های پیچان، عرض سیلاب‌دشت با توجه به توپوگرافی منطقه همواره دستخوش تغییرات می‌شود؛ به گونه‌ای که عرض سیلاب‌دشت در مسیر رودخانه به صورت متناوب در حال کاهش یا افزایش است. هر تغییر عرض سیلاب‌دشت به‌ویژه در مواقع سیلابی روی وضعیت هیدرولیکی جریان نقش بسزایی دارد. در وضعیت عادی رودخانه، جریان در کانال اصلی برقرار است؛ درحالی‌که در سیلاب‌های شدید، سطح جریان از کانال اصلی فراتر می‌رود و وارد سیلاب‌دشت‌ها می‌شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به‌صورت یک کانال مرکب در می‌آید. جریان در کانال مرکب با ساختار پیچیده ناشی از وجود لایهٔ برشی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت شناخته می‌شود. اثر متقابل جریان سریع کانال اصلی و جریان آرام سیلاب‌دشت در حوالی فصل مشترک منجر به ایجاد آشفتگی و انتقال اندازهٔ حرکت بین این دو ناحیه می‌شود. این تبادل اندازهٔ حرکت موجب ایجاد مقاومت اضافی جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت آب‌گذری کانال می‌شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷). در یک کانال مرکب، تجزیه و تحلیل جریان تنها به توزیع سرعت محدود نمی‌شود؛ بلکه تغییرات تنش و نیروی برشی جداره بررسی می‌شود تا بتوان یک نمای کلی از تقسیم نیروی برشی در بخش‌های مختلف کانال به دست آورد. پیش‌بینی ویژگی‌های جریان در کانال‌های مرکب پیچان به دلیل ماهیت سه‌بعدی جریان، یک کار مشکل برانگیز برای مهندسان رودخانه و تاکنون در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است. برای نمونه تعدادی آزمایش را اروین و همکاران (۱۹۹۳)، شیونو و موتو (۱۹۹۸)، لاینس و همکاران (۲۰۰۱)، ورمیلتون و همکاران (۲۰۰۴) و شیونو و همکاران (۲۰۰۸) برای بررسی پارامترهای اصلی مؤثر در کانال‌های مرکب پیچان انجام دادند و دریافتند جریان سیلاب می‌تواند به طور قابل توجهی جریان کانال اصلی در بخش‌های مختلف را تحت تأثیر قرار دهد. شیونو و همکاران (۱۹۹۹) دبی عبوری در کانال‌های مرکب پیچان را با توجه به تغییر انحنای شیب بستر و عمق آب بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که میزان دبی عبوری به شیب بستر و انحنای وابسته است و روشی مبتنی بر آنالیز ابعادی در این پژوهش برای پیش‌بینی رابطهٔ دبی-عمق ارائه شد. بر اساس معادلهٔ حرکت میانگین عمق در سیستم

منحنی الخط، اسپونر و شیونو (۲۰۰۳)، موهانتی و همکاران (۲۰۱۴) و تانگ و نایت (۲۰۱۵) روش‌های جدیدی را برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مرکب پیچان پیشنهاد دادند. پاترا و همکاران (۲۰۰۴) ویژگی‌های توزیع سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مرکب پیچان را بررسی کردند و نتایج این تحقیق نشان داد که الگوهای توزیع جریان قبل و بعد از تبادل بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت تفاوت معناداری دارند. زراتی و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از یک مدل دو بعدی عمق متوسط در یک سیستم مختصات منحنی‌الخط به پیش‌بینی موفقیت‌آمیز پروفیل سطح آب و توزیع سرعت در کانال‌های مرکب پیچان دست یافتند. مارتین وید و همکاران (۲۰۰۸) با مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی عددی یک بعدی و مدل فیزیکی، نتیجه گرفتند شبیه‌سازی عددی یک بعدی، سرعت جریان را در کانال اصلی بیش از حد و در سیلاب‌دشت کمتر از مدل فیزیکی در نظر می‌گیرد. شیونو و همکاران (۲۰۰۹) مجموعه‌ای از آزمایش‌های را برای درک رفتارهای مقاومت جریان و میزان انتقال رسوب در کانال‌های مرکب پیچان با زبری متغیر سیلاب‌دشت انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با تغییر زبری سیلاب‌دشت فرم بستر و ساختار جریان به طور قابل توجهی تغییر می‌کند؛ به گونه‌ای که با افزایش زبری سیلاب‌دشت، در عمق‌های نسبی بالا چندین سلول جریان ثانویه در طول کانال پیچان ایجاد می‌شود. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع جانبی سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان بررسی کردند که نتایج نشان از دقت این مدل در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی داشت. شان و همکاران (۲۰۱۵) دو ترم تنش برشی مرتبه پایین را در معادلات حاکم نادیده گرفتند و روشی جدید برای پیش‌بینی توزیع جانبی سرعت متوسط عمقی در کانال‌های مرکب پیچان ارائه دادند. لیو و همکاران (۲۰۱۶) روشی را برای ارزیابی دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آنان با بررسی داده‌های آزمایشگاهی، توزیع سرعت جریان و تنش برشی عمودی در مقطع تاج و مقطع میانی کانال مرکب پیچان را مقایسه و تجزیه و تحلیل کردند. مشخص شد بهترین موقعیت برای پیش‌بینی منحنی دبی-عمق مقطع تاج پیچان‌رود است. لیو و همکاران (۲۰۱۶) خصوصیات جریان در کانال مرکب



شکل ۱- پلان شماتیک کانال‌های مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق با عرض سیلاب دشت مختلف



شکل ۲- پلان جزئیات هندسی و موقعیت مقاطع مورد سنجش

مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم

معادلات پایه مورد استفاده در نرم‌افزار FLOW3D معادلات ناویه-استوکس است که از پنج مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند. با توجه به مطالعات انجام شده روی کانال‌های مرکب، مدل آشفتگی RNG دارای انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی بوده؛ لذا در این پژوهش از این مدل آشفتگی در مدل‌سازی استفاده شد. معادله پیوستگی و

پیچان را تحت اثر سیلاب‌دشت پوشیده با چمن بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که وجود چمن در سیلاب‌دشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و کانال صاف کارایی بیشتری در انتقال آب دارد؛ به گونه‌ای که میزان دبی عبوری از کانال صاف به‌طور متوسط ۳۰ درصد بیشتر از کانال پوشیده با چمن در سیلاب‌دشت است. چن و همکاران (۲۰۱۵)، هریسون و همکاران (۲۰۱۵) و دینگ و همکاران (۲۰۱۷) چندین حل عددی دو بعدی با عمق متوسط ارائه دادند که برای تعیین سرعت متوسط عمقی، جهت بردار سرعت و بزرگی آن استفاده شد. نقوی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر ضریب خمیدگی، نشان دادند که نرم‌افزار FLOW3D عملکرد بالایی در شبیه‌سازی کانال مرکب پیچان و مدل آشفتگی RNG دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی جریان دارد.

در مطالعاتی که تاکنون در کانال‌های مرکب پیچان انجام شده است، تغییر عرض سیلاب‌دشت با توجه به وضعیت توپوگرافی منطقه که بخش مهمی از سیستم‌های رودخانه است، در نظر گرفته نشده است؛ لذا در این پژوهش اثر تغییر عرض سیلاب‌دشت و عمق نسبی کانال روی سرعت جریان و تنش برشی بستر در کانال مرکب پیچان با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای بررسی سرعت جریان و تنش برشی بستر در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر عرض سیلاب‌دشت و عمق نسبی از چهار کانال مرکب پیچان با عرض سیلاب‌دشت مختلف و سه عمق نسبی متفاوت مطابق شکل ۱ و جدول ۱ استفاده شده است. عمق نسبی (D_r) به‌صورت نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت (h_f) به عمق جریان در کانال اصلی (H) تعریف می‌شود. در همه کانال‌های مورد استفاده در این پژوهش، عرض و ارتفاع کانال اصلی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱۴ متر، شعاع قوس داخلی و خارجی ۰/۹ و ۱/۶ متر، طول خط اتصال خم ها ۱/۲ متر و عرض ناحیه پیچان ۲/۹۹ متر است. در شکل ۲ پلان مشخصات هندسی کانال مرکب پیچان مورد استفاده در این پژوهش، نشان داده شده است. مطابق شکل ۲ سرعت جریان و تنش برشی بستر در پنج مقطع بررسی شد.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y V) \right] + \quad (3)$$

$$\frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (FA_z W) + \xi \left(\frac{FA_x u}{X} \right) \right] = FDIF + FSOR$$

$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_F A_x \frac{\partial F}{\partial X}) + R \frac{\partial}{\partial X} (v_F A_y \frac{\partial F}{\partial y}) \right] \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial Z} (v_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \left(\frac{FA_x v_F}{X} \right) \right]$$

در این معادلات، u, v, w ، مؤلفه‌های سرعت، A_x, A_y, A_z ، جزء سطحی جریان در جهت‌های x, y, z و V_F جزء حجمی جریان هستند. در سیستم مختصات کارتزین، R برابر ۱ بوده و ξ صفر است. $FSOR$ نرخ زمانی تغییرات جزء حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است. تعریف تابع F وابسته به مسأله‌ای است که مدل می‌شود. چنان‌چه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد، $F=1$ و اگر سلول مورد نظر خالی باشد، $F=0$ و اگر سلول مورد نظر حاوی آب و هوا باشد، $0 < F < 1$ است.

معادله اندازه حرکت در جهت محورهای مختصات سه‌گانه که به معادلات ناویه-استوکس موسوم‌اند، برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت و در فرم تانسوری با معادلات (۱) و (۲) معرفی می‌شوند:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

که در آن x_i و x_j محورهای مختصات، t زمان، ρ چگالی سیال، \bar{p} فشار متوسط، U_i و U_j سرعت و $u'_i u'_j$ تانسور تنش رینولدز هستند. همچنین در این پژوهش، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF) استفاده شد. پروفیل سطح آزاد جریان در روش (VOF) با تعریف تابع $F(x, y, z, t)$ که بیانگر نسبت حجم اشغال شده توسط سیال به کل حجم است، از معادلات (۳) و (۴) به دست می‌آید:

جدول ۱- پارامترهای هندسی کانال‌های مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق

عمق جریان (H) (سانتی‌متر)	عمق نسبی (Dr)	دبی کل (Q) (مترمکعب بر ثانیه)	عرض کانال مرکب (W) (متر)	عرض سیلابدشت (متر)	کانال مورد بررسی
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۴	۳/۳	FA1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۴	۳/۳	FA2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۴	۳/۳	FA3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۵/۰۱	۴/۳۱	FB1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۵/۰۱	۴/۳۱	FB2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۵/۰۱	۴/۳۱	FB3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۶/۰۲	۵/۳۲	FC1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۶/۰۲	۵/۳۲	FC2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۶/۰۲	۵/۳۲	FC3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۷/۰۳	۶/۳۳	FD1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۷/۰۳	۶/۳۳	FD2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۷/۰۳	۶/۳۳	FD3

شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان‌رود و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی با سعی و خطاهای متعددی انجام شد. همچنین شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۱۴) که برای صحت‌سنجی از آن استفاده شده است، هماهنگی داشته باشد؛ بنابراین با توجه به داشتن دبی و عمق جریان ورودی، برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، شرایط مرزی و شبکه‌بندی هندسه کانال مطابق جدول ۲ و شکل ۳ تعریف شده است.

شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی

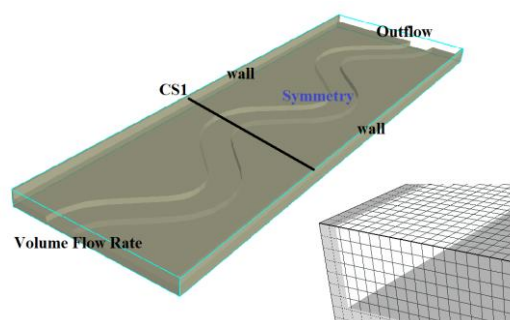
ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، هم‌گرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کلیه مدل‌های عددی، برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، طبق راهنمای برنامه FLOW3D ابعاد شبکه، به گونه‌ای تعیین شد که نسبت اندازه دو سلول مجاور و نسبت شکل تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و بیشینه مقدار این دو پارامتر، به ترتیب از ۱/۲۵ و ۳ تجاوز نکند. در این پژوهش، پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف مطابق جدول ۳ ریزکردن

جدول ۲- شرایط مرزی اعمال شده به مدل

خروجی کانال	ورودی کانال	دیوارهای کناری کانال	کف کانال	سقف کانال
خروج جریان	دبی ورودی	دیوار	دیوار	تقارن
Outflow	Volume Flow Rate	wall	wall	Symmetry

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (5)$$

در این معادله، N_i و E_i به ترتیب مقادیر داده‌های عددی و آزمایشگاهی و n تعداد داده‌هاست. در جدول ۳ عبارت DAV سرعت متوسط عمقی است. با توجه به نتایج جدول ۳، مشخص می‌شود که خطای ریشه میانگین مربعات پارامترهای جریان بر اساس شبیه‌سازی با شبکه‌بندی ریز (نوع F) در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد. همچنین در استفاده از شبکه‌بندی نوع FS، نتایج حاصل، اختلاف بسیار ناچیزی با شبکه‌بندی نوع F دارد که بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت کاهش ابعاد شبکه به بیش از یک مقدار معین نه تنها موجب بهتر شدن نتایج نمی‌شود، بلکه مدت زمان شبیه‌سازی را نیز افزایش می‌دهد. در نهایت با توجه به اختلاف ناچیز بین نتایج شبکه‌بندی نوع F و FS، از شبکه‌بندی نوع F، با توجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل ۴ مقایسه نتایج عددی پارامترها با شبکه‌بندی نوع F و داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات سرعت متوسط عمقی (DAV) در مقطع CS1 برای عمق نسبی ۰/۴۵ و ۰/۳۵ به ترتیب ۰/۰۸۱ و ۰/۰۵۲ و برای منحنی دبی- عمق ۰/۲۵ که نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار است.



شکل ۳- شرایط مرزی و شبکه بندی تعریف شده برای مدل عددی

صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در پژوهش، از داده‌های آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در مطالعه آزمایشگاهی لیو و همکاران وضعیت جریان در کانال FA1، FA2 و FA3 (مطابق جدول ۱) بررسی شد. در پژوهش حاضر از داده‌های مربوط به سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1، منحنی دبی- عمق و نسب سرعت عرضی به سرعت طولی جریان در مقاطع CS1,5 برای صحت‌سنجی استفاده شد. برای بررسی میزان دقت نتایج مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف مطابق جدول ۳، از شاخص آماری خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) مطابق معادله (۵) استفاده شد:

جدول ۳- مشخصات شبکه میدان محاسباتی و خطای ریشه میانگین مربعات

نوع شبکه‌بندی	ابعاد مش مکعبی منظم	RMSE(DAV)-CS1 Dr=0.35	RMSE(DAV)-CS1 Dr=0.45	RMSE منحنی دبی- عمق
درشت (C)	۳ سانتی‌متر	۰/۱۱۴	۰/۱۳۱	۰/۰۹۳
متوسط (M)	۱/۵ سانتی‌متر	۰/۰۸۷	۰/۱۰۳	۰/۰۴۷
ریز (F)	۱ سانتی‌متر	۰/۰۵۲	۰/۰۸۱	۰/۰۲۵
خیلی ریز (FS)	۰/۷۵ سانتی‌متر	۰/۰۵۱	۰/۰۷۹	۰/۰۲۴

نتایج و بحث

توزیع سرعت جریان در کانال اصلی و سرعت متوسط عمقی

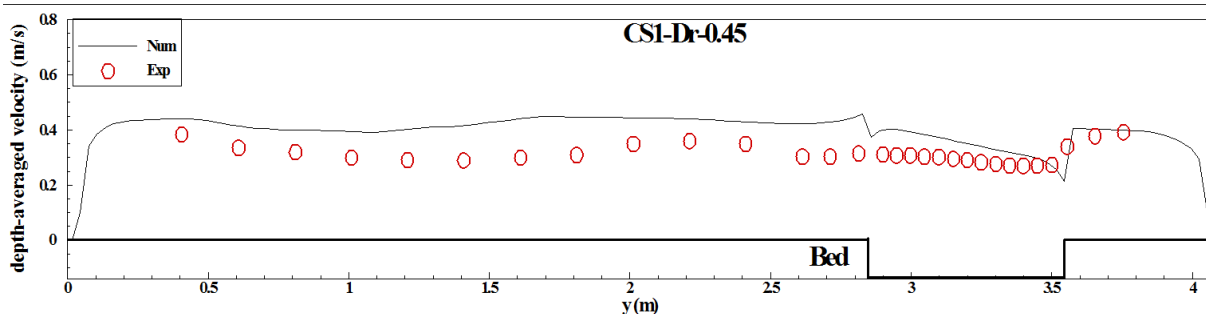
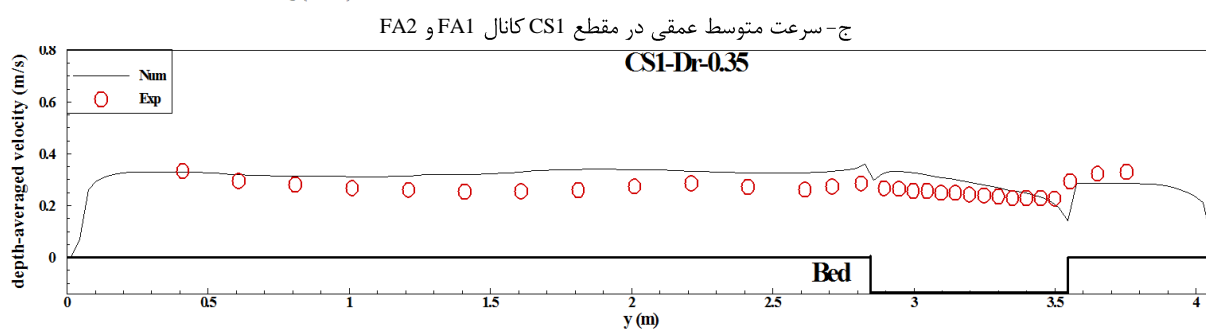
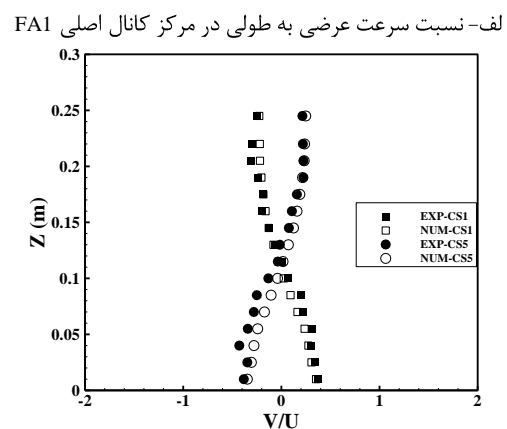
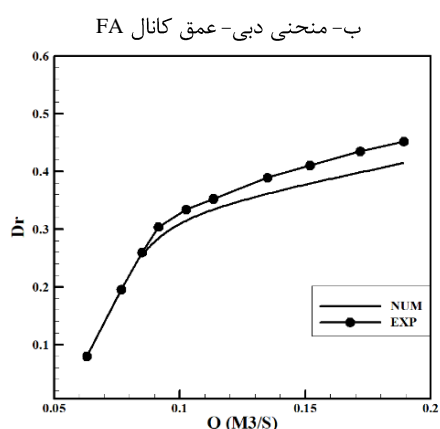
در شکل ۵ توزیع سرعت جریان در کانال اصلی مقطع CS1 برای عمق نسبی ۰/۴۵ با توجه به تغییر عرض سیلاب دشت نشان داده شده است. در این شکل فاصله‌های قائم و

جانبی (y,z) توسط ارتفاع کانال اصلی (h=0.14) بی‌بعد شده و دیواره قائم کانال اصلی در قوس داخلی به عنوان مبدا تعریف شده است. با توجه به تغییر عرض سیلاب دشت در کانال مرکب پیچان، مطابق شکل ۵ حداکثر مقدار سرعت جریان در کانال FA1 تا FD1، در $y/h \approx 0-1$ و در بالای سطح عمق لبریز کانال ($z/h \approx 1-2$) رخ داده

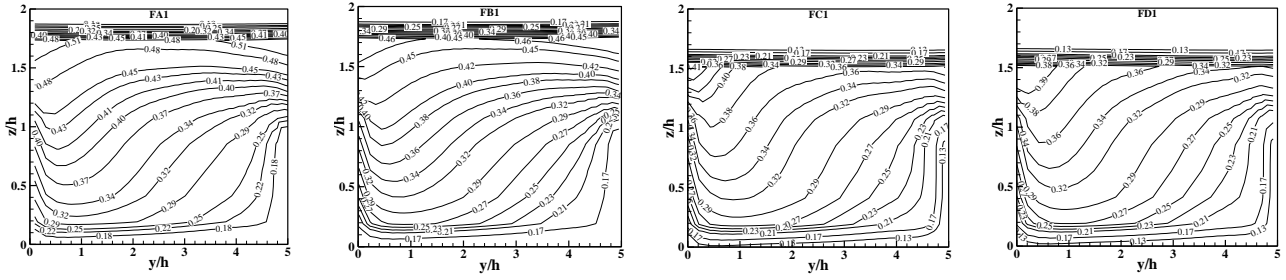
متوسط عمقی به گونه‌ای تغییر می‌کند که در مقاطع بعدی به سمت قوس داخلی نزدیک شود. در ادامه سرعت متوسط عمقی با توجه به تغییر عمق نسبی در مقطع CS1 محاسبه شد. در شکل ۷ این تغییرات برای عمق نسبی ۰/۲۶ و ۰/۳۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص شده است، با کاهش عمق نسبی از میزان سرعت متوسط عمقی کاسته می‌شود. در جدول ۴ میزان تغییر سرعت متوسط عمقی با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت و عمق نسبی برای کانال اصلی در مقطع CS1 نشان داده شده است. مطابق این جدول، میزان تغییر سرعت متوسط عمقی با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت برای عمق‌های نسبی پایین محسوس‌تر است.

است. با افزایش عرض سیلاب‌دشت از مقدار سرعت جریان حداکثر کاسته شده؛ به گونه‌ای که با افزایش عرض سیلاب‌دشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر، مقدار حداکثر سرعت جریان از ۰/۵۱ به ۰/۳۹ متر بر ثانیه (۲۴ درصد کاهش) تغییر می‌کند.

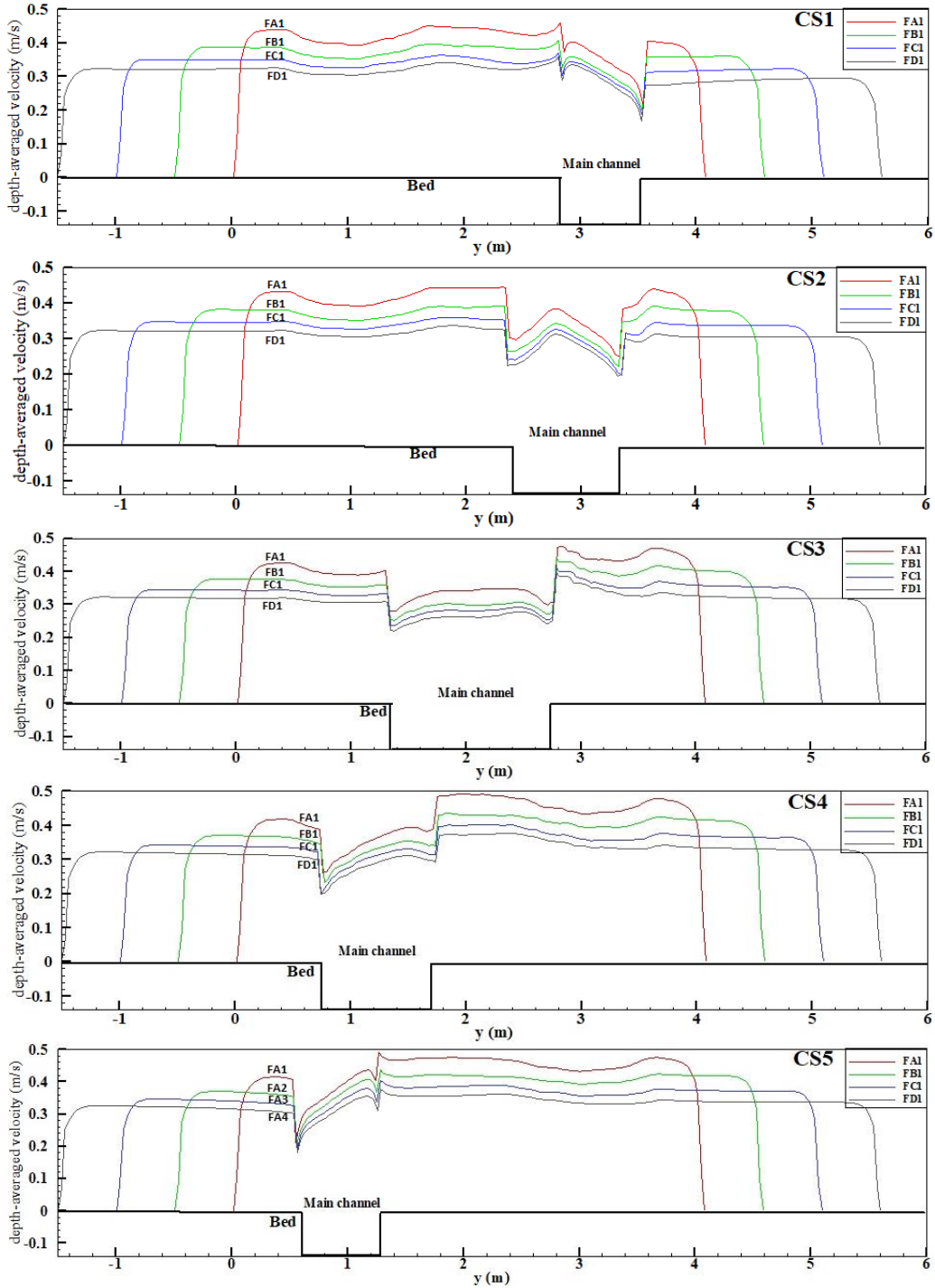
پس از بررسی پروفیل سرعت جریان، در ادامه سرعت متوسط عمقی برای کانال‌های FA تا FD در مقاطع CS1 تا CS5 برای عمق نسبی ۰/۴۵ محاسبه شد. مطابق شکل ۶، با افزایش عرض سیلاب‌دشت، به طور طبیعی میزان سرعت متوسط عمقی کاهش می‌یابد. در مقاطع CS1 و CS5 برای تمامی کانال‌ها، حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی کانال اصلی، در نزدیکی قوس داخلی رخ می‌دهد. در مقاطع CS2، CS3 و CS4 محل حداکثر مقدار سرعت



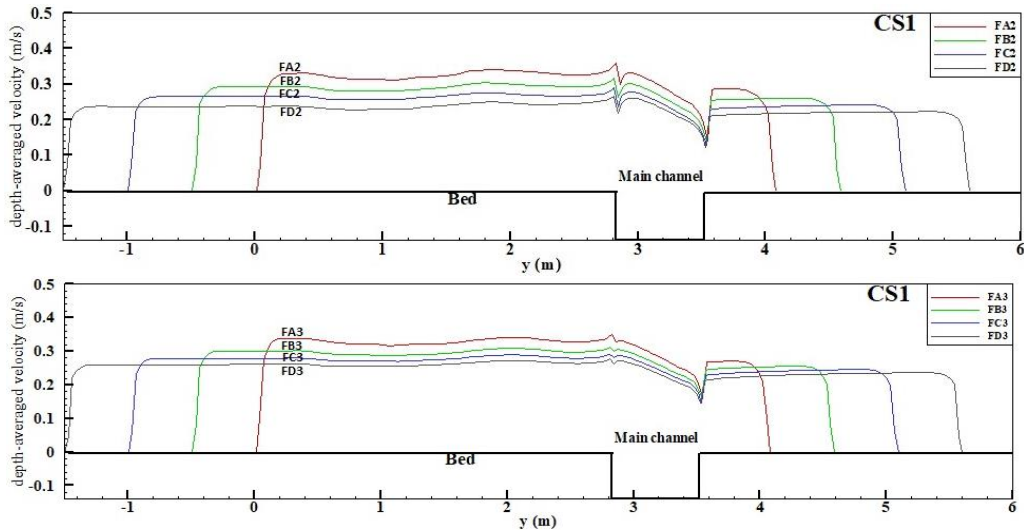
شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت جریان و منحنی دبی- عمق برای مدل با شبکه‌بندی نوع F



شکل ۵- توزیع سرعت جریان در کانال اصلی مقطع CS1 تحت اثر تغییر عرض سیلابدشت در عمق نسبی ۰/۴۵



شکل ۶- سرعت متوسط عمقی در مقاطع مختلف با عمق نسبی ۰/۴۵



شکل ۷- سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 با عمق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۲۶

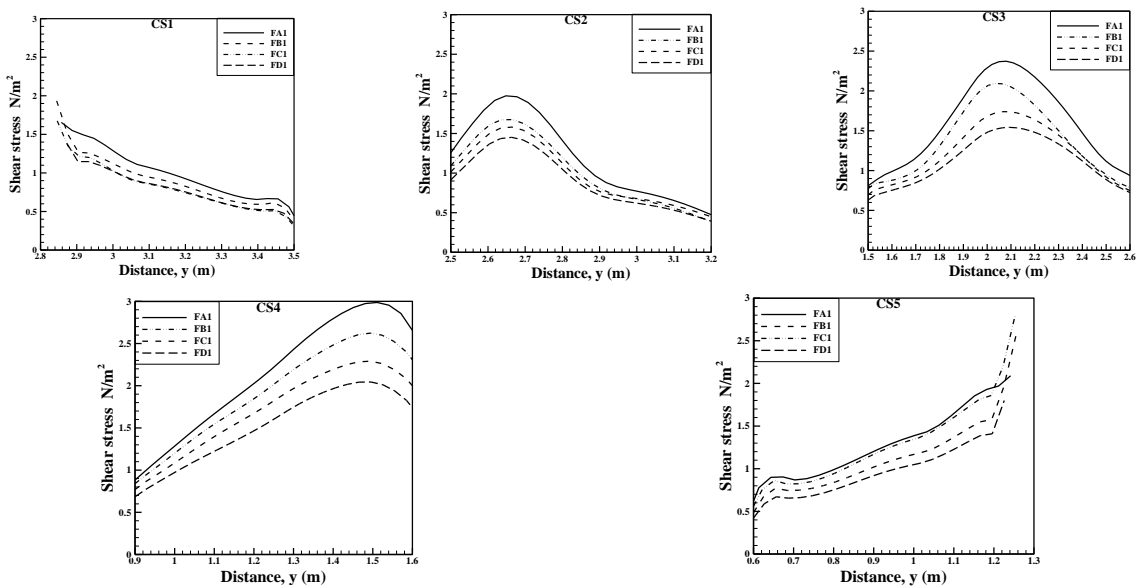
جدول ۴- میزان تغییر سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی مقطع CS1 با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت

	حداکثر سرعت متوسط عمقی در DR-0.26 (متر بر ثانیه)	حداکثر سرعت متوسط عمقی در DR-0.35 (متر بر ثانیه)	حداکثر سرعت متوسط عمقی در DR-0.45 (متر بر ثانیه)
FA	۰/۳۲۸	۰/۳۳۲	۰/۴۰۲
FD	۰/۲۵۹	۰/۲۶۲	۰/۳۳۴
میزان تغییرات (درصد)	۲۱	۲۱	۱۷

بستر در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی است (در مقاطع CS1, CS5) و با افزایش مقدار عرض سیلاب‌دشت در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر کاسته می‌شود.

توزیع تنش و نیروی برشی جداره کانال اصلی

در این بخش مطابق شکل ۸ توزیع تنش برشی بستر کانال اصلی در مقاطع مختلف برای هر یک از کانال‌های مرکب پیچان با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت ارائه شده است. مطابق این شکل، در هر یک از کانال‌ها تنش برشی



شکل ۸- توزیع تنش برشی بستر کانال اصلی در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت در عمق نسبی ۰/۴۵

بیشترین تأثیر در تغییر مقدار پارامترها را روی مقطع CS3 دارد. در طول کانال اصلی، مقطع CS3 بیشترین انحنا را نسبت به امتداد جریان اصلی رودخانه دارد و می‌توان گفت کاهش عرض سیلاب‌دشت باید بیشترین تأثیر در تغییرات تنش را در این مقطع ایجاد کند که در نتایج جدول ۵ نیز دقیقاً همین مسأله اثبات شده است.

در ادامه، در جدول ۵ میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت در کانال اصلی مقطع CS1 تا CS5 برای عمق نسبی ۰/۴۵ نشان داده شده است. میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر، در کانال اصلی مقطع CS3 دارای بیشترین مقدار و در مقطع CS5 دارای کمترین مقدار است؛ بنابراین تغییر عرض سیلاب‌دشت

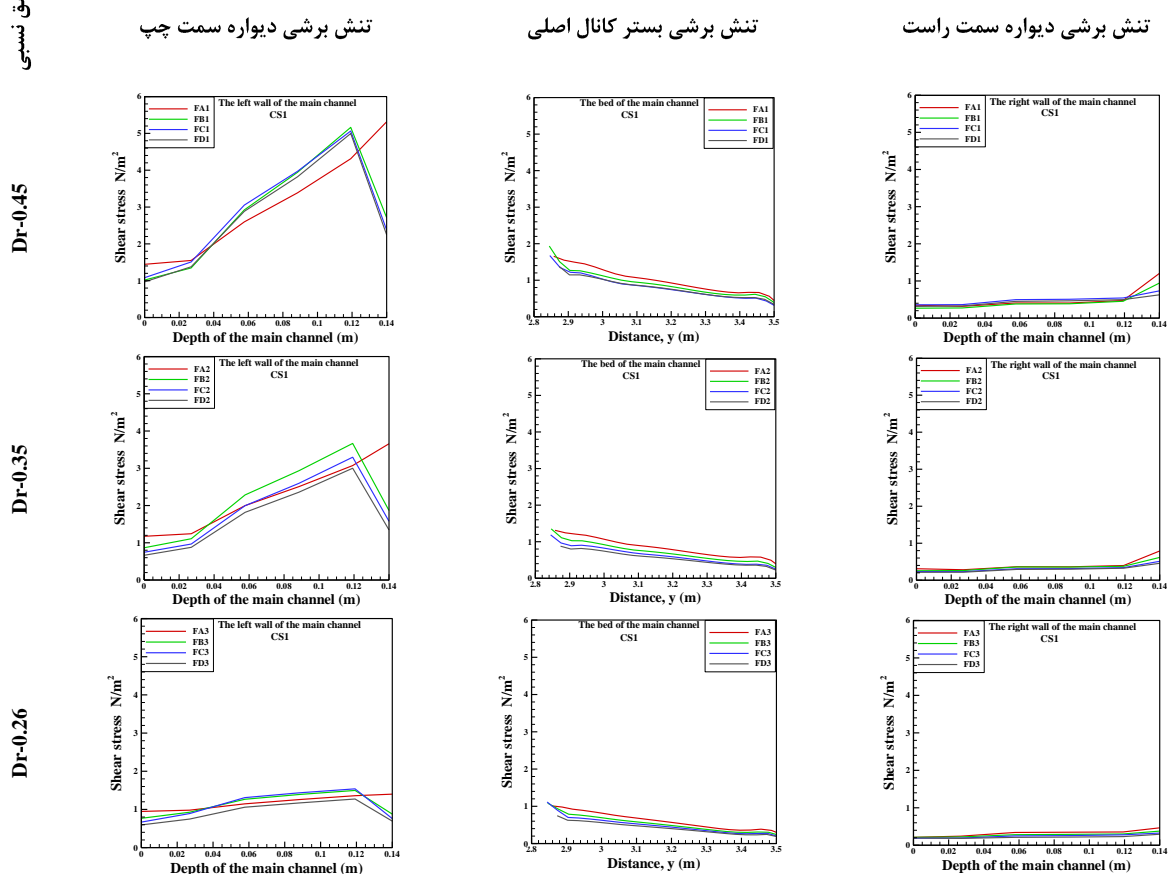
جدول ۵- میزان تغییر تنش برشی بستر در کانال اصلی مقطع CS1 تا CS5 با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت

	تنش برشی بستر CS1	تنش برشی بستر CS2	تنش برشی بستر CS3	تنش برشی بستر CS4	تنش برشی بستر CS5
FA	۱/۶۵۵	۱/۹۷۵	۲/۳۷۳	۲/۹۸۷	۲/۰۸۹
FD	۱/۳۷۸	۱/۴۵۱	۱/۵۴۳	۲/۰۴۴	۱/۸۰۰
درصد تغییرات	۱۷	۲۷	۳۵	۳۲	۱۴

تنش برشی دیواره قوس خارجی (دیواره سمت راست کانال اصلی) بیشتر است. در هریک از کانال‌ها حداکثر مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی عمق لبریز کانال اصلی ($h=0.14$) رخ می‌دهد و با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی دیواره‌ها افزوده می‌شود.

در شکل ۹ تغییرات تنش برشی بستر و دیواره‌های کانال اصلی مقطع CS1 برای عمق نسبی و عرض سیلاب‌دشت‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۹ میزان تنش برشی دیواره قوس داخلی (دیواره سمت چپ کانال اصلی) مقطع CS1 در تمامی کانال‌ها از

عمق نسبی



شکل ۹- میزان تغییرات تنش برشی بستر و دیواره‌های کانال اصلی در مقطع CS1 با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت در سه عمق نسبی

در جدول ۶ توزیع نیروی برشی بستر و دیوارهای کانال اصلی در مقطع CS1 برای هرکانال به‌صورت درصدی از نیروی برشی کل نشان داده شده است. پس از مشخص شدن توزیع نیروی برشی مرزی در مقطع CS1 برای هرکانال، مطابق شکل ۱۰ توزیع نیروی برشی به‌صورت نمودار نمایش داده شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش عرض سیلاب‌دشت، سهم نیروی برشی دیوار قوس داخلی (دیوار سمت چپ) افزایش یافته، سهم نیروی برشی بستر کاهش می‌یابد و سهم دیوار قوس خارجی (دیوار سمت راست) تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

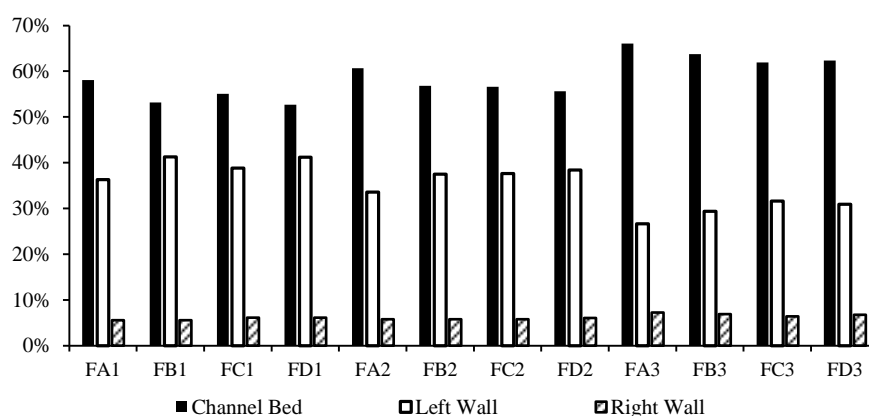
در ادامه نیروی برشی بستر و دیوارها در مقطع CS1 با توجه به توزیع تنش برشی در محیط مرطوب کانال اصلی محاسبه می‌شود. نیروی برشی بستر و دیوارها از طریق انتگرال تنش برشی مرزی روی محیط مرطوب، مطابق معادلات (۶)، (۷) و (۸) محاسبه می‌شود. نیروی برشی جداره کل مقطع نیز از مجموع معادلات بالا قابل محاسبه است.

$$SF_{LeftWall} = \int_{LeftWall} \tau dp \quad (۶)$$

$$SF_{RightWall} = \int_{RightWall} \tau dp \quad (۷)$$

$$SF_{Bed} = \int_{Bed} \tau dp \quad (۸)$$

$$SF_T = \int_{LeftWall} \tau dp + \int_{RightWall} \tau dp + \int_{Bed} \tau dp \quad (۹)$$



شکل ۱۰- توزیع نیروی برشی بستر و دیواره‌های قوس داخلی و خارجی کانال اصلی در مقطع CS1 به‌صورت درصدی از نیروی برشی

جدول ۶- توزیع نیروی برشی بستر و دیوارهای کانال اصلی در مقطع CS1

نوع کانال بررسی	نیروی برشی در دیوار قوس داخلی $SF_{LeftWall}$ (نیوتن بر مترمربع)	نیروی برشی در دیوار قوس خارجی $SF_{RightWall}$ (نیوتن بر مترمربع)	نیروی برشی بستر SF_{Bed} (نیوتن بر مترمربع)	نیروی برشی کل SF_T (نیوتن بر مترمربع)	درصد نیروی برشی دیوار قوس داخلی بر حسب تنش برشی کل $SF_{LeftWall}$ as % of SF_T	درصد نیروی برشی دیوار قوس خارجی بر حسب تنش برشی کل $SF_{RightWall}$ as % of SF_T	درصد نیروی برشی بستر بر حسب تنش برشی کل SF_{Bed} as % of SF_T
FA1	۰/۴۱۵	۰/۰۶۴	۰/۶۶۴	۱/۱۴۳	۰/۳۶	۰/۰۶	۰/۵۸
FA2	۰/۳۰۷	۰/۰۵۳	۰/۵۵۵	۰/۹۱۵	۰/۳۴	۰/۰۶	۰/۶۱
FA3	۰/۱۶۵	۰/۰۴۵	۰/۴۰۹	۰/۶۱۹	۰/۲۷	۰/۰۷	۰/۶۶
FB1	۰/۴۲۵	۰/۰۵۷	۰/۵۴۷	۱/۰۲۹	۰/۴۱	۰/۰۶	۰/۵۳
FB2	۰/۳۱۸	۰/۰۴۹	۰/۴۸۲	۰/۸۴۹	۰/۳۷	۰/۰۶	۰/۵۷
FB3	۰/۱۶۶	۰/۰۳۹	۰/۳۶۰	۰/۵۶۵	۰/۲۹	۰/۰۷	۰/۶۴
FC1	۰/۴۲۹	۰/۰۶۸	۰/۶۰۸	۱/۱۰۵	۰/۳۹	۰/۰۶	۰/۵۵
FC2	۰/۲۸۱	۰/۰۴۳	۰/۴۲۳	۰/۷۴۷	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۵۷
FC3	۰/۱۶۷	۰/۰۳۴	۰/۳۲۷	۰/۵۲۸	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۶۲
FD1	۰/۴۱۱	۰/۰۶۱	۰/۵۲۵	۰/۹۹۷	۰/۴۱	۰/۰۶	۰/۵۳
FD2	۰/۲۵۴	۰/۰۴۰	۰/۳۶۸	۰/۶۶۲	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۵۶
FD3	۰/۱۳۸	۰/۰۳۰	۰/۲۷۸	۰/۴۴۶	۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۶۲

نتیجه‌گیری

برشی بستر کاهش می‌یابد و سهم دیوار قوس خارجی (دیوار سمت راست) تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

در این پژوهش، سرعت جریان و تنش برشی جداره کانال‌های مرکب پیچان با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت و عمق نسبی بررسی شد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتایج حاصل از این پژوهش را به شرح زیر بیان کرد:

- با افزایش عمق نسبی و عمق جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، میزان سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در بستر افزایش می‌یابد.

- میزان تغییر سرعت متوسط عمقی با توجه به تغییر عرض سیلاب‌دشت از $3/3$ به $6/33$ متر (۹۲ درصد افزایش)، برای عمق‌های نسبی پایین محسوس‌تر است؛ به گونه‌ای که برای عمق نسبی $0/45$ میزان تغییر سرعت ۱۷ درصد کاهش، ولی برای عمق نسبی $0/35$ و $0/26$ میزان تغییر حدود ۲۱ درصد کاهش است.

- میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به افزایش عرض سیلاب‌دشت از $3/3$ به $6/33$ متر (۹۲ درصد افزایش)، در کانال اصلی مقطع CS3 و CS5 دارای بیشترین و کمترین مقدار کاهش (۳۵ درصد و ۱۴ درصد) است.

- در کانال مرکب پیچان، حداکثر مقدار سرعت جریان در کانال اصلی در نزدیکی قوس داخلی ($y/h \approx 0-1$) و در بالای سطح عمق لبریز کانال ($z/h \approx 1-2$) رخ می‌دهد و با افزایش عرض سیلاب‌دشت از مقدار سرعت جریان حداکثر کاسته می‌شود. مقدار حداکثر سرعت جریان با افزایش عرض سیلاب‌دشت از $3/3$ به $6/33$ متر، از $0/51$ به $0/39$ متر بر ثانیه (۲۴ درصد کاهش) تغییر می‌کند.

- در هر یک از کانال‌ها، تنش برشی بستر در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی است (در مقطع CS1, CS5) و با افزایش مقدار عرض سیلاب‌دشت در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر کاسته می‌شود.

- میزان تنش برشی دیواره قوس داخلی (دیواره سمت چپ کانال اصلی) مقطع CS1 در تمامی کانال‌ها از تنش برشی دیواره قوس خارجی (دیواره سمت راست کانال اصلی) بیشتر است، حداکثر مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی عمق لبریز کانال اصلی ($h=0.14$) رخ می‌دهد و با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی دیواره‌ها افزوده می‌شود.

- با افزایش عرض سیلاب‌دشت، سهم نیروی برشی دیوار قوس داخلی (دیوار سمت چپ) افزایش، سهم نیروی

منابع

۱. نقوی م. محمدی م. و مهتابی ق. ۱۳۹۸. سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی. مجله مهندسی عمران مدرس. ۱۹(۵): ۲۰۷-۲۱۹.
2. Chen R. Shao S. Liu X. and Zhou X. 2015. Applications of Shallow Water SPH Model in Mountainous Rivers. Journal of Applied Fluid Mechanics. 8(4): 863-870.
3. Ding Y. Liu Y. Liu X. Chen R. and Shao S. 2017. Applications of coupled explicitimplicit solution of SWEs for unsteady flow in Yangtze River, Water. 9(3): 91.
4. Ervine D. A. Willetts B. B. Sellin R. H. J. and Lorena M. 1993. Factors affecting conveyance in meandering compound flows. Journal of Hydraulic Engineering. 119(12): 1383-1399.
5. Harrison L. R. Dunne T. and Fisher G. B. 2015. Hydraulic and geomorphic processes in an overbank flood along a meandering, gravel-bed river: implications for chute formation. Earth Surface Processes and Landforms. 40(9): 1239-1253.
6. Liu C. Wright N. Liu X. and Yang K. 2014. An analytical model for lateral depth-averaged velocity distributions along a meander in curved compound channels. Advances in Water Resources. 74: 26-43.
7. Liu C. Shan Y. Liu X. and Yang K. 2016. Method for assessing stage-discharge in meandering compound channels. J. ICE-Water Management. 169(1): 17-29.
8. Liu C. Shan Y. Liu X. Yang K. and Liu H. 2016. The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels. Journal of Hydrology. 542: 1-17.
9. Lyness J. F. Myers W. R. C. Cassells J. B. C. and O'Sullivan J. J. 2001. The influence of planform on flow resistance in mobile bed compound channels. Proceedings of the ICE - Water and Maritime Engineering. 148(1): 5-14.
10. Martin-Vide J. P. Moreta P. J. M. and Lopez-Querol S. 2008. Improved 1-D modelling in compound meandering channels with vegetated floodplains. Journal of Hydraulic Research. IAHR. 46(2): 265-276.
11. Mohanty L. Patra K. C. Khatua K. K. and Patnaik M. 2014. Modelling the depth-

- averaged velocity in trapezoidal meandering channels. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 20(1): 111-118.
12. Patra K. C. Kar S. K. and Bhattacharya A. K. 2004. Flow and velocity distribution in meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering* ., ASCE. 130(5): 398-411.
 13. Shan Y. Liu C. and Luo M. 2015. Simple analytical model for depth-averaged velocity in meandering compound channels. *Applied Mathematics and Mechanics*. 36(6): 707-718.
 14. Shiono K. and Muto Y. 1998. Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 376: 221-261.
 15. Shiono K. Al-Romaih J. S. and Knight D. W. 1999. Stage-discharge assessment in compound meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering* ., ASCE. 125(1): 66-77.
 16. Shiono K. Spooner J. Chan T. Rameshwaran P. and Chandler J. 2008. Flow characteristics in meandering channels with non-mobile. *Journal of Hydraulic Research*., IAHR. 46(1): 113-132.
 17. Shiono K. Chan T. L. Spooner J. Rameshwaran P. and Chandler J. H. 2009. The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: part II. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR. 47(1): 20-28.
 18. Spooner J. and Shiono K. 2003. Modelling of meandering channels for overbank flow. *Water and Maritime Engineering*. 156(3): 225-233.
 19. Tang X. and Knight D. W. 2015. The lateral distribution of depth-averaged velocity in a channel flow bend. *Journal of Hydro-Environment Research*. 9(4): 532-541.
 20. Wormleaton P. R. Sellin R. H. J. and Bryant T. 2004. Conveyance in a two-stage meandering channel with a mobile bed. *Journal of Hydraulic Research*. 42(5): 14.
 21. Yang K. Cao S. and Knight D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(2): 148-159.
 22. Zarrati A. R. Tamai N. and Jin Y. C. 2005. Mathematical modeling of meandering channels with a generalized depth averaged model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131(6): 467-475.