مجله پژوهش آب ایران جلد ۱۵/ شماره ۱/ پیاپی ۴۰/ بهار ۱۴۰۰ (۳۲–۳۴)

مقاله پژوهشی

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

محمد نقوى'، ميرعلى محمدى ُّو قربان مهتابي "

# چکیدہ

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 چهارکانال مرکب پیچان با عرض سیلابدشت ۲/۳، ۴/۳۱، ۲/۳۵ و ۶/۳۳ متر و سه عمق نسبی ۲/۱۰، ۳/۱۰ و ۴/۱۰ 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 ۲۲ درصدی عرض سیلابدشت، مقدار حداکثر سرعت جریان در کانال اصلی ۲۴ درصد کاهش و میزان سرعت متوسط درعمقهای نسبی ۴/۰۰و ۲/۰۶ بهترتیب ۱۷ و دراکثر سرعت جریان در کانال اصلی ۲۴ درصد کاهش و میزان سرعت متوسط درعمقهای نسبی ۱۹/۰و ۲/۰۶ بهترتیب ۱۷ و داکثر سرعت جریان در کانال اصلی ۲۴ درصد کاهش و میزان سرعت متوسط درعمقهای نسبی ماز، دو تاج پیچان (مقطع 233) 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

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.

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

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

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

<sup>\*</sup>نویسنده مسئول: m.mohammadi@urmia.ac.ir تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۳

### مقدمه

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 منحنی الخط 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 می گیرد. شیونو و همکاران (۲۰۰۹) مجموعهای از آزمایشهای را برای درک رفتارهای مقاومت جریان و میزان انتقال رسوب در کانالهای مرکب پیچان با زبری متغير سيلابدشت انجام دادند. نتايج اين 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 می شود. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزيع جانبي سرعت متوسط عمقي را در طول خم كانال 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 كردند. مشخص شد بهترين موقعيت براى پيشبينى منحنى دبى- عمق مقطع تاج پيچانرود است. ليو و همکاران (۲۰۱۶) خصوصیات جریان در کانال مرکب

توپوگرافی منطقه همواره دستخوش تغییرات میشود؛ به گونهی که عرض سیلابدشت در مسیر رودخانه بهصورت 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 درکانال اصلی برقرار است؛ درحالی که در سیلابهای شدید، سطح جریان از کانال اصلی فراتر میرود و وارد سیلابدشتها می شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به صورت یک کانال مرکب در می آید. جریان در کانال مرکب با ساختار پیچیده ناشی از وجود لايه برشى در فصل مشترك بين كانال اصلى و سيلابدشت شناخته مي شود. اثر متقابل جريان سريع کانال اصلی و جریان آرام سیلابدشت در حوالی فصل مشترک منجر به ایجاد آشفتگی و انتقال اندازهٔ حرکت بین این دو ناحیه می شود. این تبادل اندازهٔ حرکت موجب ایجاد مقاومت اضافی جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت آبگذری کانال می شود (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷). در یک كانال مركب، تجزيه و تحليل جريان تنها به توزيع سرعت محدود نمی شود؛ بلکه تغییرات تنش و نیروی بر شی 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 می تواند 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 انحنا، شیب بستر و عمق آب بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که میزان دبی عبوری به شیب بستر و انحناء 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

در رودخانههای پیچان، عرض سیلابدشت با توجه به

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)، هریسون و همکاران 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 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 درکانال 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 (Dr) بهصورت نسبت عمق جریان در سیلابدشت (h<sub>f</sub>) به عمق جریان در کانال اصلی (H) تعریف میشود. در همهٔ کانالهای مورد استفاده در این پژوهش، عرض و ارتفاع کانال اصلی بهترتیب ۷/۰ و طول خط اتصال خم ها ۱/۲ متر و عرض ناحیه پیچان طول خط اتصال خم ها ۱/۲ متر و عرض ناحیه پیچان 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.



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





### مدلسازی عددی و معادلات حاکم

معادلات پایهٔ 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. معادلهٔ پیوستگی و

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y V) \right] + \tag{(7)}$$

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

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

$$+ \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial Z} (\upsilon_F A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi (\frac{FA_x \upsilon_F}{X} \right]$$
((7)

 معادلهٔ اندازهٔ حرکت در جهت محورهای مختصات سهگانه که به معادلات ناویه- استوکس موسوماند، برای جریان آشفتهٔ تراکمناپذیر با لزجت و چگالی ثابت و در فرم تانسوری با معادلات (۱) و (۲) معرفی می شوند:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

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

که در آن  $x_i$  و  $x_i$  محورهای مختصات، t زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $\overline{P}$  فشار متوسط،  $U_i$  و  $U_i$  سرعت و  $u_i$  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:

ين تحقيق	استفاده در ا	یچان مورد ا	ی مرکب پا	سی کانالھا	مترهای هند،	حدول ۱- پارا
----------	--------------	-------------	-----------	------------	-------------	--------------

عمق جریان (H) (سانتیمتر)	عمق نسبی (Dr) 	دبی کل (Q) (مترمکعب برثانیه)	عرض کانال مرکب (W) (متر)	عرض سيلابدشت (متر)	کانال مورد بررسی
۲۵/۵	٠/۴۵	•/189	۴	٣/٣	FA1
Y 1/8	٠/٣۵	•/115	۴	٣/٣	FA2
۱۸/۹	۰ /۲ <i>۶</i>	•/•٨۵	۴	٣/٣	FA3
۲۵/۵	٠/۴۵	•/189	۵/۰۱	۴/۳۱	FB1
Y 1/8	۰/۳۵	•/115	۵/۰۱	۴/۳۱	FB2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۵/۰۱	۴/۳۱	FB3
۲۵/۵	٠/۴۵	•/189	۶/۰۲	۵/۳۲	FC1
Y 1/8	۰/۳۵	•/\\\\	۶/۰۲	۵/۳۲	FC2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۶/۰۲	۵/۳۲	FC3
۲۵/۵	۰/۴۵	•/1/9	٧/ • ٣	۶/۳۳	FD1
51/8	٠/٣۵	•/11٣	٧/ • ٣	۶/۳۳	FD2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	٧/•٣	۶/۳۳	FD3

# شبکهبندی میدان جریان و شرایطمرزی

ساختن شبکهٔ مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، هم گرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار میدهد. در کلیهٔ 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 بیشینهٔ مقدار این دو پارامتر، بهترتیب از ۱/۲۵ و ۳ تجاوز نکند. در این پژوهش، پس از بررسی شبکهبندیهای مختلف مطابق جدول ۳ ریزکردن

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 می شود 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 هندسهٔ کانال مطابق جدول ۲ و شکل تعریف شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی اعمال شده به مدل

رودی دیوار تقارن	
Symmetry wall wall Volume F	خروج جريان دبی ow Rate Outflow

(۵)



عددی

## صحتسنجي نتايج

برای صحتسنجی و کنترل نتایج استخراج شده در پژوهش، از دادههای آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. در مطالعهٔ آزمایشگاهی لیو و همکاران وضعیت جریان درکانال FA3 وFA3 (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 درS1,5 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 معادلهٔ (۵) استفاده شد:

در این معادله، N<sub>i</sub> و E<sub>i</sub> بهترتیب 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 می شود که خطای ریشه میانگین مربعات پارامترهای جریان بر اساس شبیهسازی با شبکهبندی ریز (نوعF) در مقایسه با دادههای آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد. همچنین در استفاده از شبکهبندی نوع FS، نتایج حاصل، اختلاف بسیار ناچیزی با شبکهبندی نوع F داردکه بر این اساس میتوان نتیجه گرفت کاهش ابعاد شبکه به بیش از یک مقدار معین نه تنها موجب بهتر شدن نتایج نمی شود، بلکه مدت زمان شبیه سازی 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 بهترتیب ۰/۰۸۱ و ۰/۰۵۲ و برای منحنی دبی– عمق ۰/۰۲۵ که نشاندهندهٔ دقت مناسب شبیهسازی جریان توسط نرمافزار است.

لله میانگین مربعات	، <b>و خطای ریش</b>	ان محاسباتی	شبکه مید	<b>ی ۳- مشخصات</b>	جدول
--------------------	---------------------	-------------	----------	--------------------	------

RMSE منحنی دبی- عمق	RMSE(DAV)-CS1 Dr=0.35	RMSE(DAV)-CS1 Dr=0.45	ابعاد مش مكعبي منظم	نوع شبكەبندى
۰/۰۹۳	•/114	•/١٣١	۳ سانتیمتر	درشت (C)
•/• 44	• /• AY	۰/۱۰۳	۱/۵ سانتیمتر	متوسط (M)
۰/۰۲۵	۰/۰۵۲	•/• A )	۱ سانتیمتر	ريز (F)
•/•74	۰/۰۵۱	•/•٧٩	۰/۷۵ سانتیمتر	خیلی ریز (FS)

#### نتايج و بحث

توزیع سرعت جریان درکانال 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) بی بعد شده و دیوارهٔ قائم کانال اصلی در قوس داخلی بهعنوان 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 1-0-/ رخ داده و در بالای سطح عمق لبریز کانال (z/h≈1-2) رخ داده

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

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 ۱/۵۱ به ۰/۳۹ متر بر ثانیه (۲۴ درصد کاهش) تغییر می کند.

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 سیلاب دشت، 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 می دهد. در مقاطع CS2 و CS4 محل حداکثر مقدار سرعت

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 مراح و ۲۸٫۰ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص شده است، با کاهش عمق نسبی از میزان شکل مشخص شده است، با کاهش عمق نسبی از میزان تعییرسرعت متوسط عمقی کاسته میشود. در جدول ۴ میزان سرعت متوسط عمقی کاسته میشود. در مدول ۴ میزان تغییرسرعت 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 محسوس تر است.



شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت جریان و منحی 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 ۴۵/۲





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

	حداکثر سرعت متوسط عمقی در	حداکثر سرعت متوسط عمقی در	حداکثر سرعت متوسط عمقی در
	DR-0.26	DR-0.35	DR-0.45
	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)	(متر بر ثانیه)
FA	•/٣٢٨	• /٣٣٢	•/4•4
FD	•/۲۵٩	• / ۲۶۲	•/٣٣۴
میزان تغییرات (درصد)	۲۱	<b>K</b> 1	١٧

توزیع تنش و نیروی برشی جداره کانال اصلی

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

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.



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

در ادامه، در جدول ۵ میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به تغییرعرض سیلاب دشت در کانال اصلی مقطع CS1 تا CS5 برای عمق نسبی ۴۵/۰ نشان داده شده است. میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به تغییر عرض سیلاب دشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر، در کانال اصلی مقطعCS3 دارای بیشترین مقدار و در مقطع CS5 دارای کمترین مقدار است؛ بنابراین تغییر عرض سیلاب دشت

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 سیلاب دشت باید بیشترین تأثیر در تغییرات تنش را در این مقطع ایجاد کند که در نتایج جدول ۵ نیز دقیقاً همین مسأله اثبات شده است.

جدول ۵- میزان تغییرتنش 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	١/٩٧۵	۲/۳V۳	۲/۹۸۷	۲/۰۸۹
FD	١/٣٧٨	1/401	1/542	2/. 44	۱/۸۰۰
درصد تغييرات	١٢	۲۷	۳۵	٣٢	۱۴

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

تنش برشی دیواره قوس خارجی (دیوارهٔ 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.



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 ادامه نیروی برشی بستر و دیوارهها در مقطع CS1 با توجه به توزیع تنش برشی در محیط مرطوب کانال اصلی محاسبه میشود. نیروی برشی بستر و دیوارهها 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.

$$SF_{LeftWall} = \int_{LeftWall} zdp \tag{9}$$

$$SF_{RightWall} = \int_{RightWall} \pi dp \tag{Y}$$

$$SF_{Bed} = \int_{Ped} \pi dp \tag{(A)}$$

$$SF_{T} = \int_{LeftWall} \pi dp + \int_{RightWall} \pi dp + \int_{Bed} \pi dp$$
(9)

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 (دیوارسمت راست) تقریباً ثابت باقی میماند.



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

SF <sub>Bel</sub> as % of SF <sub>T</sub> درصد نیروی برشی بستر بر حسب تنش برشی کل	SF <sub>Right wall</sub> as % of SF <sub>T</sub> درصد نیروی برشی دیوار قوس خارجی بر حسب تنش برشی کل	SFL <sub>felt Wall</sub> as % of SF <sub>T</sub> درصد نیروی برشی دیوار قوس داخلی بر حسب تنش برشی کل	نیروی برشی کل <sub>T</sub> Fr (نیوتن بر مترمریع)	نیروی برشی بستر <sub>bed</sub> SF <sub>Bed</sub> (نیوتن بر مترمربع)	نيروى برشى در ديوار قوس خارجى الم <sup>الالها</sup> SFR (نيوتن بر مترمربع)	نیروی برشی در دیوار قوس داخلی <sub>اله</sub> بر <sub>امدا</sub> SR (نیوتن بر مترمربع)	نوع کانال مورد بررسی
+/۵۸	•/•۶	۰/۳۶	1/143	•/994	•/•۶۴	۰/۴۱۵	FA1
۰/۶۱	•/•۶	٠/٣۴	۰/۹۱۵	•/۵۵۵	۰/۰۵۳	• /٣ • Y	FA2
•  88	•/•Y	• / Y Y	<i>٠ /۶</i> ۱۹	۰/۴۰۹	۰/۰۴۵	۰/۱۶۵	FA3
•/۵٣	•/•۶	•/۴١	۱/• ۲۹	•/۵۴٧	•/• ۵Y	۰/۴۲۵	FB1
•/۵Y	•/•۶	• /٣V	۰/۸۴۹	•/۴٨٢	٠/٠۴٩	۰/۳۱۸	FB2
•/94	•/•Y	٠/٢٩	• /۵۶۵	۰/٣۶٠	٠/٠٣٩	•/188	FB3
•/۵۵	•/•۶	٠/٣٩	۱/۱۰۵	۰/۶۰۸	۰/۰۶۸	٠/۴۲٩	FC1
•/۵Y	•/•۶	٠/٣٨	•/٧۴٧	•/۴۲۳	۰/۰۴۳	۰/۲۸۱	FC2
•/87	•/•۶	٠/٣٢	۰/۵۲۸	٠/٣٢٧	•/•٣۴	·/18Y	FC3
۰/۵۳	•/•۶	٠/۴١	٠/٩٩٧	•/۵۲۵	۰/۰۶۱	۰/۴۱۱	FD1
•/۵۶	•/•۶	٠/٣٨	•/888	۰/۳۶۸	•/• *•	۰/۲۵۴	FD2
•/87	•/•Y	۰/۳۱	•/449	٠/٢٧٨	•/•٣•	۰/۱۳۸	FD3

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

نتيجهگيرى

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 درکانال اصلی و سیلابدشت، میزان سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در بستر افزایش می یابد.

- میزان تغییر سرعت متوسط عمقی با توجه به تغییر عرض سیلاب دشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر (۹۲ درصد افزایش)، برای عمقهای نسبی پایین محسوس تر است؛ به گونهای که برای عمق نسبی ۱۸/۰ میزان تغییر سرعت ۱۷ درصد کاهش، ولی برای عمق نسبی ۳۵/۰ و ۲۶/۰ میزان تغییر حدود ۲۱ درصد کاهش است.

– میزان تغییر تنش برشی بستر با توجه به افزایش عرض سیلابدشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر (۹۲ درصد افزایش)، در کانال اصلی مقطع CS3 وCS5 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 (1-0≈4/) و در بالای سطح عمق لبریز کانال (2-1≈1/) رخ میدهد و با افزایش عرض سیلابدشت از مقدار سرعت جریان حداکثر کاسته میشود. مقدار حداکثر سرعت جریان با افزایش عرض سیلابدشت از ۳/۳ به ۶/۳۳ متر، از ۵/۱۰ به ۲/۹ 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 دیوارهٔ قوس داخلی (دیوارهٔ سمت چپ کانال اصلی) مقطع CS1 در تمامی کانالها از تنش برشی دیواره قوس خارجی (دیوارهٔ 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

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

# منابع

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Liu C. Wright N. Liu X. and Yang K. 2014. An analytical model for lateral depthaveraged velocity distributions along a meander in curved compound channels. Advances in Water Resources. 74: 26-43.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.