

تأثیر عمق نسبی سیلاب روی هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب پیچان

محمد نقوی^۱، میرعلی محمدی^۲، قربان مهتابی^۳

تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵

مقاله برگرفته از طرح تحقیقاتی

چکیده

رودخانه‌ها به عنوان مسیره‌های اصلی و زهکش‌های طبیعی، همواره نقش قابل توجهی در انتقال جریان‌های سیلابی دارند. در زمان وقوع سیل، آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی می‌شود. در این حالت مقطع رودخانه به صورت مقطع مرکب در می‌آید. در این تحقیق با مطالعه هیدرولیک کانال‌های مرکب پیچان، اثر تغییر عمق نسبی جریان سیلابی روی شرایط هیدرولیکی جریان و میزان دبی عبوری از مقطع اصلی رودخانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با بهره‌گیری از نرم‌افزار Flow3D شش کانال با میزان سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی با میزان دبی سیلابی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۶ به ۰/۴۵ (۷۳٪ افزایش)، میزان سرعت متوسط عمقی در تمامی کانال‌ها به دلیل کاهش مقاومت جریان به‌طور متوسط ۲۵٪ افزایش و میزان دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل به‌طور متوسط در تمامی مقادیر سینوسیتهی، ۳۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد تنش برشی بستر در نزدیکی قوس داخلی کانال اصلی بیشتر از قوس خارجی بوده که با کاهش عمق نسبی در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر و سرعت جریان کاسته می‌شود و میزان تنش برشی دیواره قوس داخلی کانال اصلی در تمام کانال‌ها از تنش برشی دیواره قوس خارجی بیشتر بوده که با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی دیواره افزوده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کانال مرکب پیچان، عمق نسبی، تنش برشی بستر، سرعت جریان، Flow3D.

^۱ دانشجوی دکترای مهندسی عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.naghavi@urmia.ac.ir
^۲ دانشیار گروه مهندسی عمران - هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران،

m.mohammadi@urmia.ac.ir (نویسنده مسئول)

^۳ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، ghmahtabi@znu.ac.ir



مقدمه

یکی از موضوعات مهمی که همواره مورد توجه محققین بوده، موضوع سیلاب می باشد. خسارات ناشی از سیل و طغیان رودخانه همه ساله بخش وسیعی از مسایل زیست محیطی را تحت تاثیر خود قرار می دهد. مهندسین رودخانه به دنبال راه حل هایی برای کاهش اثرات سیلاب هستند. برای کنترل و مهار سیلاب، اقدامات سازه‌ای و غیر سازه‌ای متفاوتی از جمله بهره برداری مناسب از سدهای مخزنی، احداث سدهای تاخیری، احداث خاکریزهای طولی و انحراف سیل به دشت‌های اطراف انجام شده است. بیشتر این راه حل ها اغلب برای نگه داشتن جریان می باشد که این روش ها در برآورده کردن کامل اهداف، اکثرا با شکست مواجه می شوند و جریان در سیلاب‌دشت ها توسعه می یابد. دیدگاه دیگر کنترل سیلاب تمرکز بر اثر کانال اصلی-سیلاب‌دشت به جای کانال منفرد می باشد. قانون جدید ایجاد فضا برای آب، قدمی به سوی استفاده پایدار از سیلاب‌دشت بوده و امروزه نقش حیاتی سیلاب‌دشت ها، استراتژی برای کاهش اثر سیلاب تشخیص داده شده است. پیش نیاز اعمال این قانون فهم فرایند هیدرودینامیکی ارتباط سیلاب‌دشت و کانال اصلی می باشد. تبادل جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت پیچیده بوده و در دبی های به اندازه کافی بالا، که سیلاب‌دشت از آب پوشیده شود، جریان کانال اصلی و جریان سیلاب‌دشت در کنار یکدیگر ساختار جریان پیچیده ای را ایجاد می کنند (Tang & Knight, 2008). بنابراین اولین گام برای کنترل سیلاب، شناسایی درست و مناسب رفتار رودخانه در هنگام وقوع سیل می باشد. در پایین دست رودخانه با توجه به شیب کم و بافت ماسه ای مصالح کف، پیشروی قوس بیرونی بیشتر شده و پیچان رودهایی با میزان خمیدگی زیاد شکل می گیرد و مقاومت جریان به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و در هنگام بروز سیلاب سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به صورت یک کانال مرکب در می آید. کانال‌های مرکب، مقاطع هیدرولیکی هستند که از دو بخش، کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل یافته‌اند. جریان

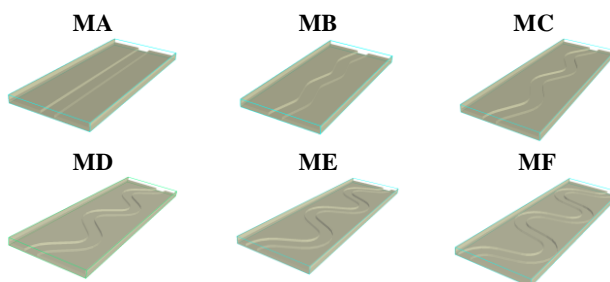
در کانال مرکب با ساختار پیچیده ناشی از وجود لایه برشی در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت شناخته می شود. اثر متقابل جریان سریع کانال اصلی و جریان آرام سیلاب‌دشت در حوالی فصل مشترک منجر به ایجاد آشفتگی و انتقال مومنتم بین این دو ناحیه می شود. این تبادل مومنتم موجب ایجاد مقاومت اضافی جریان و در نتیجه کاهش ظرفیت آگذری کانال می شود. با توجه به هزینه بسیار زیاد و خطرات احتمالی مطالعات میدانی علی‌الخصوص در مواقع سیلابی توجه بیشتر پژوهشگران به سمت مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه سازی عددی معطوف شده است. در دهه های اخیر، مطالعات گسترده ای در مورد ساختار جریان سه بعدی، ویژگی های آشفتگی و جریان های ثانویه در کانال های مرکب مستقیم توسط Knight & Sellin, Knight & Demetriou (1983), Carling et al. (1987), Tominaga et al. (1989), Yang et al. (2002) و Yang et al. (2007) انجام شده است. علاوه بر این، روش‌های توزیع جانبی LDM برای سرعت متوسط عمقی و تنش برشی بستر همراه با جریان های ثانویه و گردابی توسط Shiono & Knight (1991), Liu et al. (2007), Rameshwaran & Shiono (2013) و Yang et al. (2013) توسعه داده شده است. این محققان نشان دادند که جریان‌های ثانویه روی پیش‌بینی سرعت و تنش برشی بستر تأثیر می‌گذارد و نادیده گرفتن آنها منجر به نتایج ضعیف می‌شود. بنابراین، Ervine et al. (1993) و Spooner (2001) عبارت جریان ثانویه جدیدی ارائه دادند که در مقطع راس قوس کانال مرکب پیچان با بستر ثابت و متحرک استفاده شده است. انجام مطالعات آزمایشگاهی روی کانال های مرکب پیچان با بستر ثابت نشان دادند که قدرت سلول جریان ثانویه در کانال اصلی به دلیل اثر نیروی گریز از مرکز قویتر از سیلاب‌دشت است. برای جریان سیلابی در کانال های مرکب، روش‌های پیش بینی دبی توسط بهرام پور و همکاران (۱۳۹۸) ارائه شده است. در این تحقیق با استفاده از رویکردهای داده محور از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و ماشین‌های بردار پشتیبان

نشان داد که وجود چمن در سیلابدشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و کانال صاف کارایی بیشتری در انتقال آب دارد به طوری که میزان دبی عبوری از کانال صاف به طور متوسط ۳۰ درصد بیشتر از کانال پوشیده با چمن در سیلابدشت می باشد. در زمینه شبیه سازی جریان با استفاده از نرم افزار Flow3D مطالعات زیادی تاکنون انجام شده است که به عنوان نمونه می توان به تحقیقات انجام شده توسط نجفیان و همکاران (۱۳۹۶) و نقوی و همکاران (۱۳۹۸) اشاره کرد. در این مطالعات، مدل آشفتگی RNG به عنوان بهترین مدل برای شبیه سازی جریان در میدان های دارای انحناء و یا پیچیدگی در هندسه ارائه شده است. علی رغم پیچیده بودن الگوی جریان در کانال های مرکب پیچان و اهمیت مدیریت سیلاب در این کانال ها، تحقیقات کمی در زمینه تأثیر عمق نسبی روی توزیع سرعت جریان، تنش برشی جداره و میزان دبی عبوری از کانال ها با میزان سینوسیته های مختلف انجام شده است. لذا در این تحقیق به منظور کنترل سیلاب در دبی های مختلف، پارامترهای هیدرولیکی جریان در عمق های نسبی مختلف سیلاب با استفاده از شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

برای بررسی سرعت جریان و تنش برشی بستر در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر میزان سینوسیته و عمق نسبی، از شش کانال با میزان سینوسیته مختلف و سه عمق نسبی متفاوت مطابق شکل ۱ و جدول ۱ استفاده شده است

(کلاس بندی SVM و رگرسیونی SVR) و همچنین روش تجربی کانال تقسیم شده به روش تقسیم بندی عمودی (DCM) دبی کانال مرکب پیش بینی شده است. (Ervin & Ellis (1987) نیز با تقسیم مقطع مرکب پیچان به سه ناحیه، روشی را برای محاسبه رابطه دبی-اشل ارائه نمودند که دارای تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی محققین دیگر در محاسبه دبی کانال مرکب می باشد. (Ervin et al. (2000) مدل ریاضی شبه دوبعدی توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب مستقیم و پیچان را با ساده سازی به صورت تحلیلی حل نمودند. (De Marchis & Napoli (2008) اثر پارامترهای هندسی را روی ظرفیت انتقال کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل عددی نشان داد که میزان سینوسیته، پارامتر اصلی است که باید در فرمول های تجربی برای ارزیابی ظرفیت انتقال کانال های مورد توجه قرار گیرد. (Liu et al. (2014) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع جانبی سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند که نشان از دقت این مدل در مقایسه با داده های آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی دارد. (Liu et al. (2016) روشی را برای ارزیابی دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آنها با بررسی داده های آزمایشگاهی، توزیع سرعت جریان و تنش برشی عمودی در مقطع تاج و مقطع میانی کانال مرکب پیچان را مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار دادند و مشخص شد بهترین موقعیت برای پیش بینی منحنی دبی-اشل مقطع تاج پیچان رود می باشد. (Liu et al. (2016) خصوصیات جریان در کانال مرکب پیچان را تحت اثر سیلابدشت پوشیده با چمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق



شکل(۱): طرح شماتیک کانال‌های مورد استفاده در این تحقیق

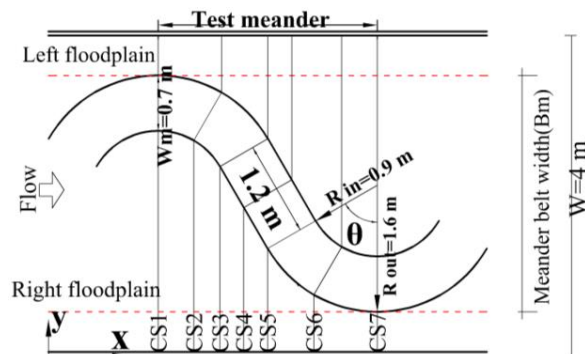
جدول(۱): مقادیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی جریان

عمق نسبی (Dr)	زاویه خط اتصال خم‌ها (θ)	مقدار سینوسیتهی	طول موج (متر)	عرض پیچ و خم (متر) (B_m)	کانال مورد بررسی
۰/۴۵	۰	۱	-	۰/۷	MA1
۰/۳۵	۰	۱	-	۰/۷	MA2
۰/۲۶	۰	۱	-	۰/۷	MA3
۰/۴۵	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB1
۰/۳۵	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB2
۰/۲۶	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB3
۰/۴۵	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC1
۰/۳۵	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC2
۰/۲۶	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC3
۰/۴۵	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD1
۰/۳۵	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD2
۰/۲۶	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD3
۰/۴۵	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME1
۰/۳۵	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME2
۰/۲۶	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME3
۰/۴۵	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF1
۰/۳۵	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF2
۰/۲۶	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF3

در جدول ۱، عمق نسبی (Dr) به صورت نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق نسبی ۰/۱۴ متر، عمق جریان در سیلاب‌دشت برای عمق نسبی ۰/۴۵، ۰/۳۵ و ۰/۲۶ به ترتیب ۱/۵، ۱/۶ و ۴/۹ سانتی متر، شعاع قوس داخلی و خارجی ۰/۹ و ۱/۶ متر و طول خط اتصال خم‌ها ۱/۲ متر می‌باشد. شکل ۲ پلان مشخصات هندسی کانال مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق این شکل میزان دبی

در جدول ۱، عمق نسبی (Dr) به صورت نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت به عمق جریان در کانال اصلی (ارتفاع کانال اصلی + عمق جریان در سیلاب‌دشت) تعریف می‌شود. میزان سینوسیتهی نیز عدد بی بعدی می‌باشد که نسبت طول پیچان کانال اصلی به طول دشت سیلابی را نشان می‌دهد. در همه کانال‌های مورد استفاده در این تحقیق، عرض و ارتفاع کانال اصلی به ترتیب ۰/۷ و

عبوری از کانال اصلی و سرعت جریان در هفت مقطع مورد بررسی قرار گرفته است



شکل (۲): پلان جزییات هندسی و مقاطع مورد سنجش

لزجت و چگالی ثابت به صورت تانسوری با روابط ۱ و ۲ معرفی شده‌اند.

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

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

که در آن x_i و x_j محورهای مختصات در سیستم کارترین، t زمان، ρ چگالی سیال، \bar{P} فشار متوسط، U_i و U_j سرعت و $\overline{u'_i u'_j}$ تانسور تنش رینولدز می‌باشند. همچنین، در این مطالعه عددی، برای پیش بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال VOF استفاده شده است. 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 می‌باشد، از معادله ۳ و ۴ به دست می‌آید.

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

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

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

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

در این روابط، 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 می‌باشند. در سیستم مختصات کارترین، R برابر ۱ بوده و ξ صفر می‌باشد. $FSOR$ نرخ زمانی تغییرات جزء

شبیه سازی عددی و معادلات حاکم

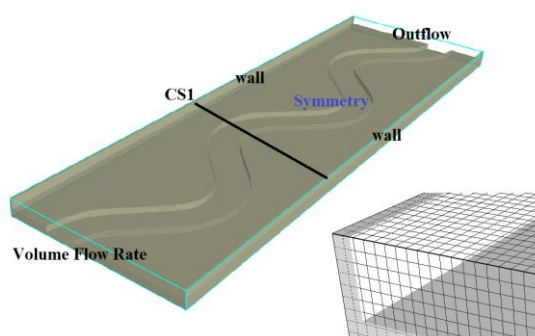
با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی و تبدیل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان به معادلات جبری، امکان حل عددی معادلات اساسی سیالات (بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی) فراهم می‌شود. با استفاده از روش‌های مختلف، دامنه مسئله به تعداد زیادی اجزای کوچک تقسیم شده و برای هر یک از این اجزا، مسئله حل می‌شود. در میان تمامی روش‌ها، روش حجم محدود کارایی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد و بیشتر نرم‌افزارهای تجاری در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی نیز بر مبنای این روش بسط و توسعه یافته‌اند. یکی از معروف‌ترین نرم‌افزارهای تجاری FLOW3D می‌باشد. معادلات پایه‌ای مورد استفاده در مدل FLOW3D معادلات ناویه استوکس هستند و از پنچ مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند و توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامترهای هیدرولیکی جریان مانند عمق و سرعت در جهات مختلف را داراست. با توجه به توانایی بالای این نرم افزار در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی، برای بررسی اثر عمق نسبی کانال مرکب پیچان روی سرعت و تنش برشی بستر از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده است. معادلات پیوستگی و مومنتم که به معادلات ناویه استوکس معروف هستند برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با

برای مدل عددی نیز به گونه‌ای انتخاب شد که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی هماهنگی داشته باشد. بنابراین با توجه به داشتن دبی و عمق جریان ورودی، برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی مدل عددی استفاده گردید. این شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW3D معادل شرایط مرزی Volume Flow Rate (نرخ جریان حجمی) می‌باشد. برای شرایط مرزی پایین‌دست در شبیه‌سازی حاضر از شرط مرزی Outflow نرم‌افزار استفاده شد. در این شرط مرزی نیاز به اعمال پارامتر هیدرولیکی خاصی نمی‌باشد. برای اعمال شرایط مرزی در دیوارهای جانبی و کف کانال، از شرط مرزی wall (دیواره) استفاده گردید. کل سطح فوقانی میدان جریان نیز در این مدل‌سازی به صورت شرایط مرزی Symmetry (تقارن) تعریف شد. شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است. تعریف تابع F وابسته به مسئله ای 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.

شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی

شبکه بندی میدان جریان در تحقیق حاضر متشکل از سلول‌های مکعبی می‌باشد. در کلیه مدل‌های عددی صورت گرفته، برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه‌سازی، طبق راهنمای برنامه FLOW3D، ابعاد شبکه طوری تعیین شد که نسبت اندازه دو سلول مجاور و نسبت شکل تا حد ممکن نزدیک به ۱ باشد و حداکثر این دو پارامتر به ترتیب از ۱/۲۵ و ۳ تجاوز نکند (قاسم زاده، ۱۳۹۲). در تحقیق حاضر پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف، مطابق جدول ۲ ریز کردن شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان-رود و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی، با سعی و خطاهای متعددی انجام شد. شرایط مرزی اعمال شده



شکل (۳): شرایط مرزی و شبکه بندی مدل عددی

دارد لذا در این تحقیق برای شبیه سازی عددی از مدل آشفتگی RNG استفاده شده است. در مطالعه آزمایشگاهی لیو و همکاران شرایط جریان در کانال ME1، ME2 و ME3 (مطابق جدول ۱) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق حاضر از داده‌های مربوط به سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1، میزان دبی عبوری از کانال اصلی و منحنی دبی-عمق برای صحت‌سنجی استفاده

صحت سنجی نتایج

برای صحت سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی Liu et al. (2014) (Liu et al. & 2016) استفاده شده است. با توجه به مطالعات عددی که توسط نجفیان و همکاران (۱۳۹۶) و نقوی و همکاران (۱۳۹۸) روی کانال‌های مرکب انجام شد مشخص گردید مدل آشفتگی RNG دارای انطباق بهتری با شرایط جریان

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 شبکه بندی نوع F و FS، از شبکه بندی نوع F، با توجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه سازی ها استفاده شد. شکل‌های ۵، ۴ و ۶ مقایسه نتایج عددی پارامترهای جریان با شبکه بندی نوع F و داده‌های آزمایشگاهی را در کانال ME نشان می‌دهد. مقدار خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) برای سرعت متوسط عمقی (DAV) در مقطع CS1 برای عمق منحنی دبی-اشل ۰/۲۵ می‌باشد که نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی جریان توسط نرم افزار می باشد

گردید. به منظور بررسی میزان دقت نتایج مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پس از بررسی شبکه‌بندی-های مختلف مطابق جدول ۲، از شاخص آماری خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) مطابق رابطه ۵ استفاده شده است.

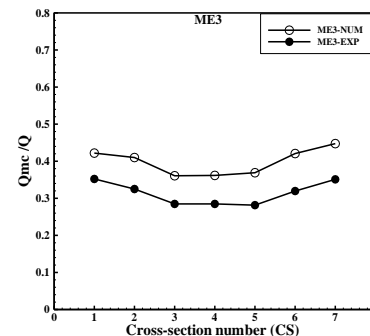
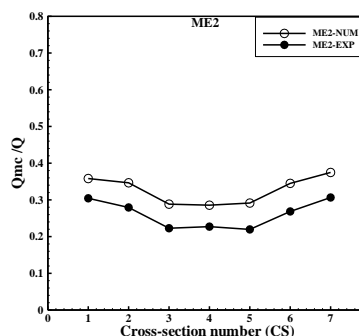
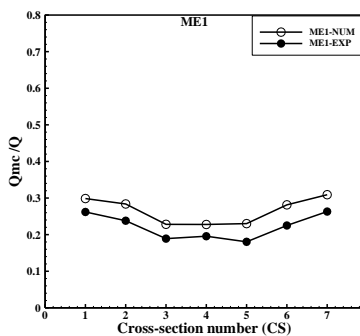
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (5)$$

در این رابطه E_i و N_i به ترتیب مقادیر داده های عددی و آزمایشگاهی و n تعداد داده ها می باشد.

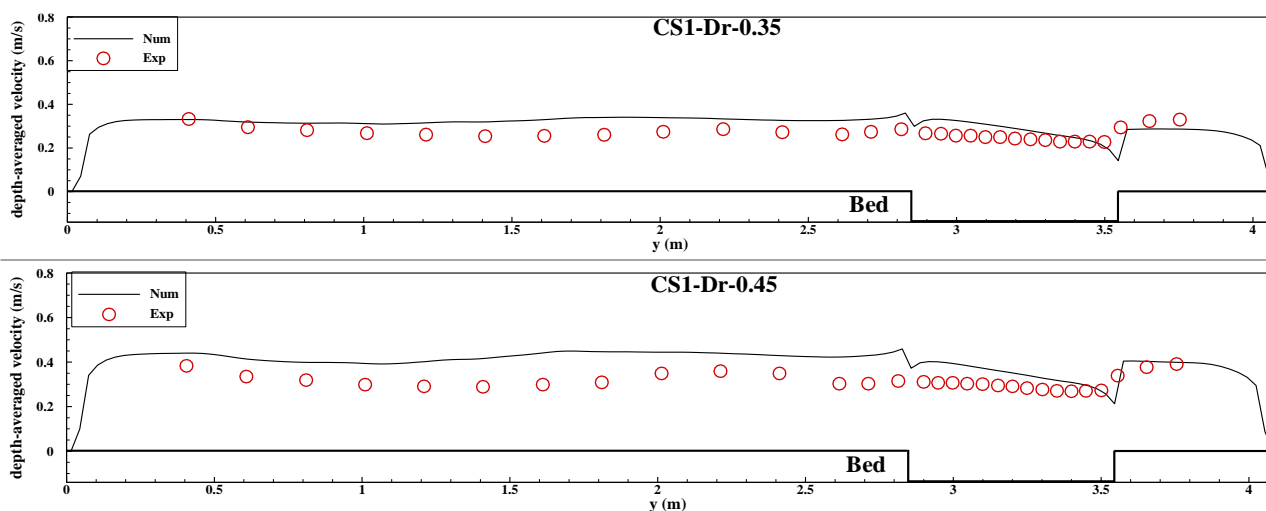
در جدول ۲ عبارت DAV سرعت متوسط عمقی، Dr عمق نسبی و Q_{mc}/Q نسبت دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل می باشد. با توجه به نتایج جدول ۲، مشخص می‌شود که خطای ریشه میانگین مربعات پارامترهای جریان براساس شبیه‌سازی با شبکه‌بندی ریز (نوع F) در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی اختلاف ناچیزی دارد. همچنین در استفاده از شبکه‌بندی نوع FS، نتایج حاصل، اختلاف

جدول (۲): مشخصات شبکه میدان محاسباتی و خطای ریشه میانگین مربعات دبی و سرعت متوسط عمقی مقطع CS1 در کانال ME1,2,3

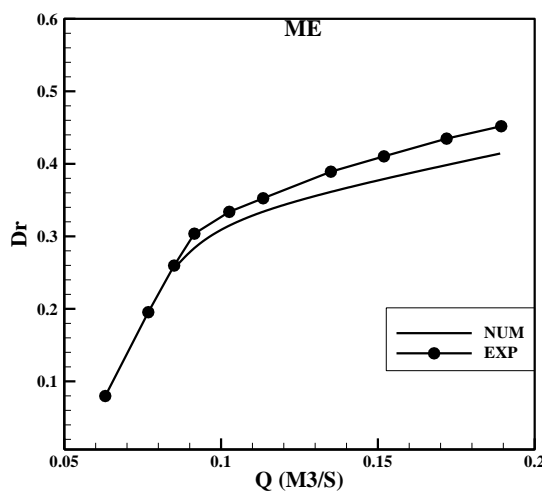
RMSE منحنی دبی- عمق	RMSE (Q_{mc}/Q) Dr-0.26	RMSE (Q_{mc}/Q) Dr-0.35	RMSE (Q_{mc}/Q) Dr-0.45	RMSE (DAV) CS1 Dr-0.35	RMSE (DAV) CS1 Dr-0.45	ابعاد مش مکعبی منظم	نوع شبکه بندی
۰/۰۹۳	۰/۱۴۹	۰/۱۲۶	۰/۱۰۱	۰/۱۱۴	۰/۱۳۱	۳ سانتی متر	درشت (C)
۰/۰۴۷	۰/۱۱۸	۰/۰۹۷	۰/۰۷۳	۰/۰۸۷	۰/۱۰۳	۱/۵ سانتی متر	متوسط (M)
۰/۰۲۵	۰/۰۸۵	۰/۰۶۶	۰/۰۴۴	۰/۰۵۲	۰/۰۸۱	۱ سانتی متر	ریز (F)
۰/۰۲۴	۰/۰۸۲	۰/۰۶۴	۰/۰۴۳	۰/۰۵۱	۰/۰۷۹	۰/۷۵ سانتی متر	خیلی ریز (FS)



شکل (۴): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی میزان دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل با شبکه‌بندی نوع F در کانال ME1 و ME2 و ME3



شکل (۵): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت متوسط عمقی با شبکه‌بندی نوع F در مقطع کانال CS1 و ME1 و ME2



شکل (۶): نتایج آزمایشگاهی و عددی منحنی دبی-عمق

نتایج و بحث

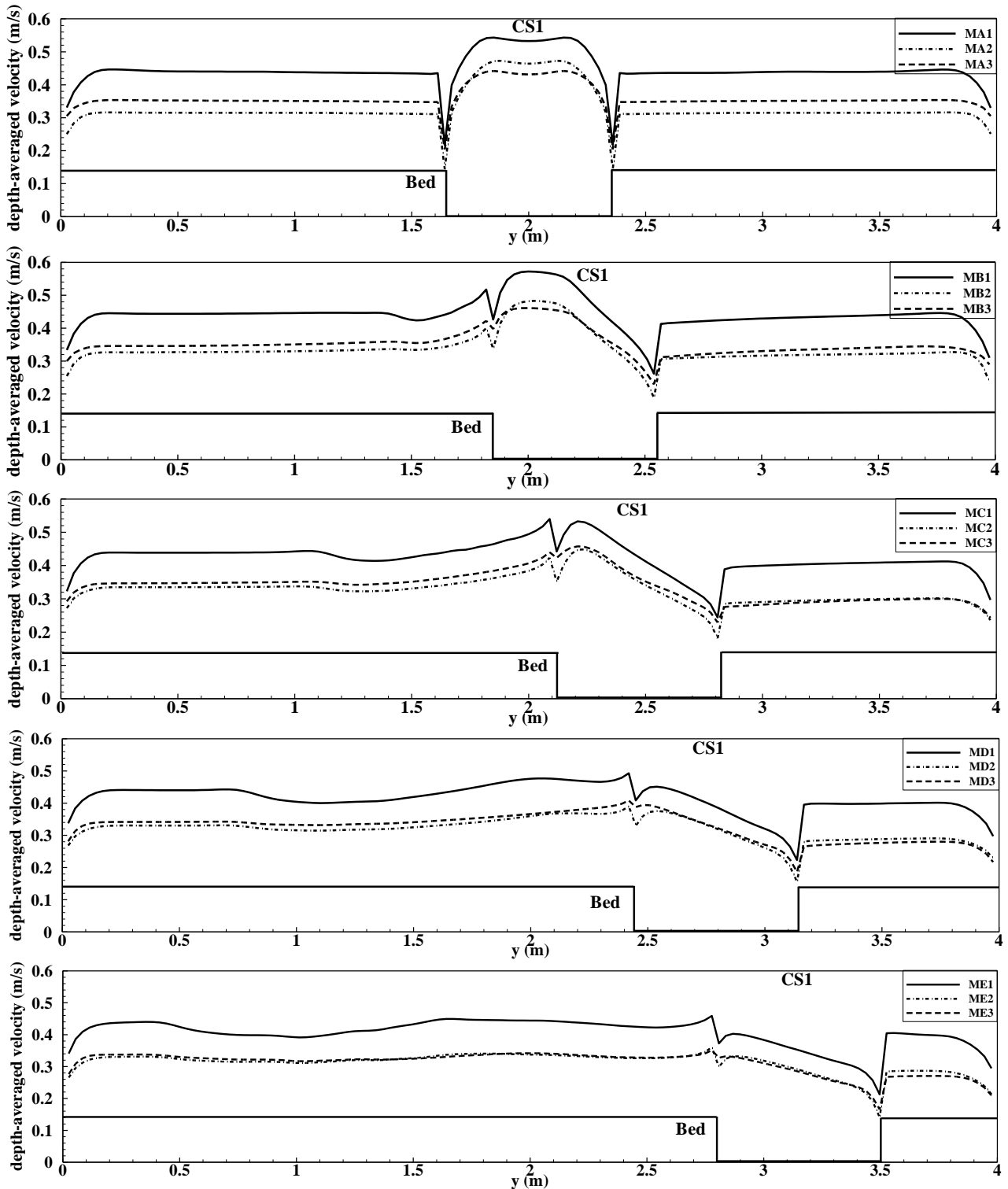
سرعت متوسط عمقی و سرعت متوسط کلی

در شکل ۷ سرعت متوسط عمقی برای کانال‌های MA تا MF در مقطع CS1 با توجه به تغییر عمق نسبی نشان داده شده است. در این شکل $depth\ averaged\ velocity$ در محور قائم، سرعت متوسط عمقی می‌باشد. مطابق این شکل با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۶ به ۰/۴۵ (۷۳٪ افزایش)، میزان سرعت متوسط عمقی در تمامی کانال‌ها به طور متوسط ۲۵٪ افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت متوسط عمقی در تغییر عمق نسبی از ۰/۳۵ به ۰/۴۵ نسبت به تغییر عمق نسبی از ۰/۲۶ به ۰/۳۵ به دلیل کاهش مقاومت جریان محسوس‌تر می‌باشد و برای

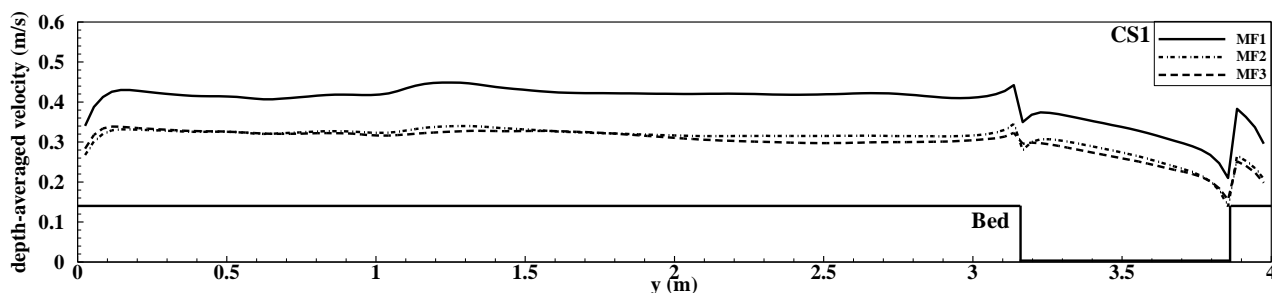
عمق‌های نسبی پایین تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در تمامی کانال‌ها حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی کانال اصلی، در قوس داخلی رخ می‌دهد و در کانال‌های MA، MB و MC حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی بیشتر از سیلاب‌دشت می‌باشد. در کانال‌های MD، ME و MF با افزایش میزان سینوسیته و مقاومت جریان، سرعت جریان حداکثر در کانال اصلی کاهش می‌یابد به طوری که مقدار سرعت متوسط عمقی در سیلاب‌دشت بیشتر از کانال اصلی می‌شود. در تمامی کانال‌ها با مقدار سینوسیته مختلف، برای هر عمق نسبی، میزان سرعت جریان در سیلاب‌دشت‌ها تقریباً یکسان

افزایش میزان سینوسیتی و مقاومت جریان کاهش می‌یابد.

می‌باشد و فقط سرعت جریان در کانال اصلی با توجه به



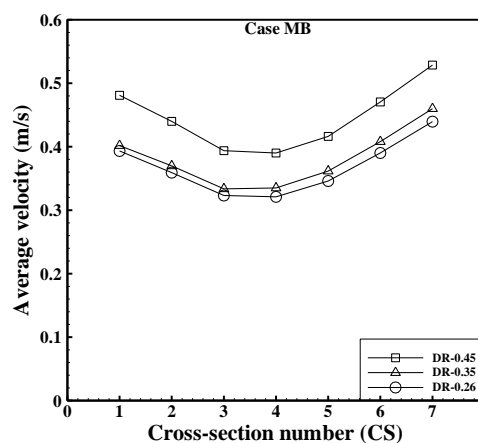
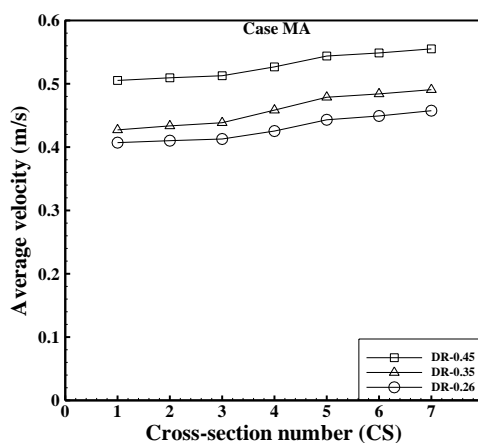
شکل (۷): سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیتی



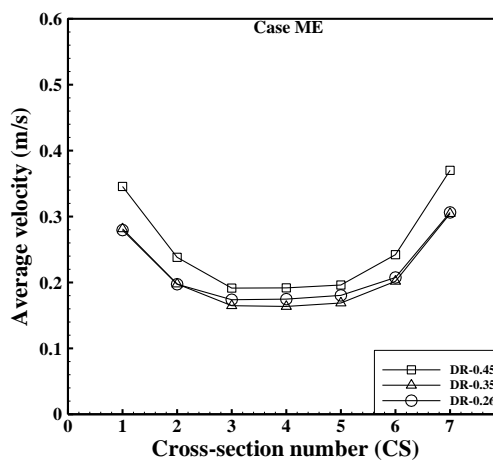
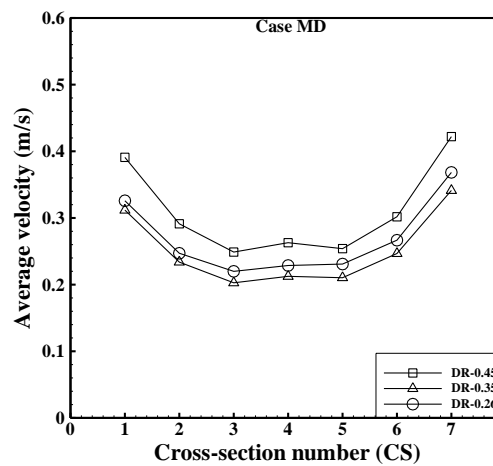
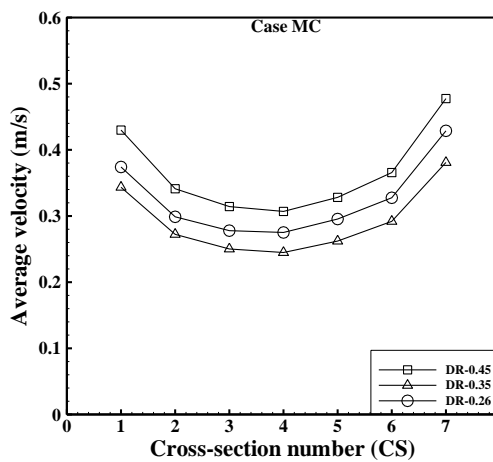
ادامه شکل (۷): سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسی

مطابق این شکل در تمامی کانال ها با افزایش عمق نسبی بر میزان سرعت متوسط کلی مقاطع اصلی افزوده می شود بطوریکه در عمق های نسبی بالا این تغییرات محسوس تر است

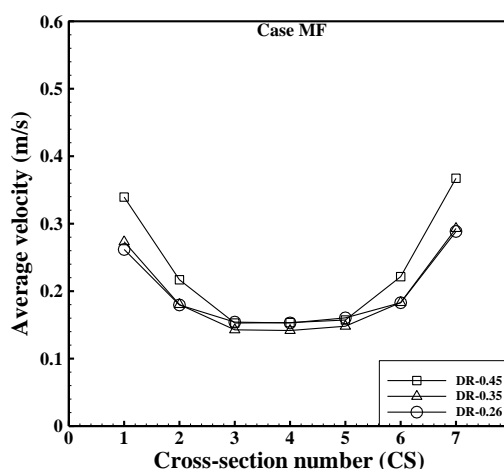
در ادامه سرعت متوسط کانال اصلی در مقطع CS1 تا CS7 کانال های مرکب پیچان با توجه به تغییر عمق نسبی و میزان سینوسی محاسبه می شود. شکل ۸ این تغییرات را برای کانال های MA تا MF نشان می دهد.



شکل (۸): سرعت متوسط کانال اصلی در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسی



ادامه شکل (۸): سرعت متوسط کانال اصلی در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته



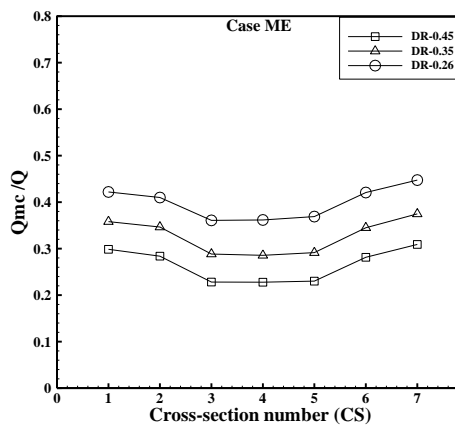
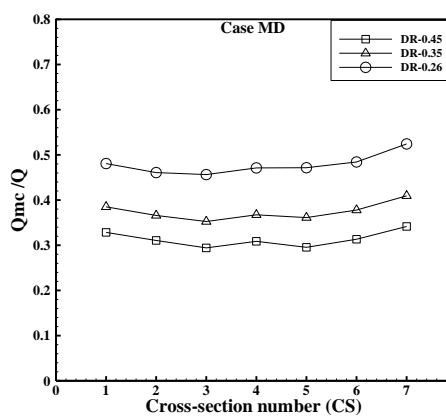
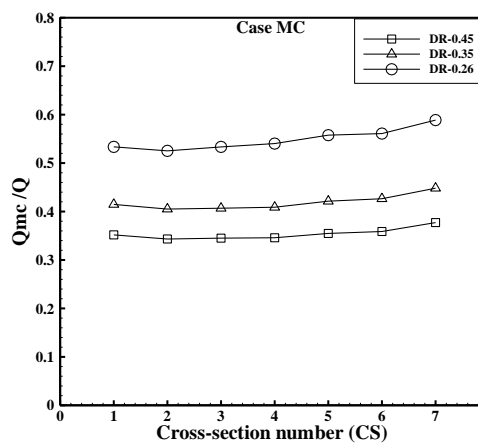
ادامه شکل (۸): سرعت متوسط کانال اصلی در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته

کاهش می یابد. دبی عبوری از کانال اصلی ارتباط مستقیمی با عمق نسبی دارد به طوری که با کاهش عمق نسبی، مقاومت جریان در سیلابدشت ها زیاد شده و به دنبال آن دبی عبوری از سیلابدشت کاهش می یابد و در نتیجه دبی عبوری از کانال اصلی نسبت به دبی کل زیاد می شود. میزان متوسط دبی عبوری از مقاطع مختلف کانال اصلی با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته در هر یک از کانال ها در جدول ۳ نشان داده شده است. مطابق جدول ۳ با افزایش میزان سینوسیته از ۱ (کانال MA) به ۱/۶۴۱ (کانال MF) میزان دبی عبوری از کانال اصلی به طور متوسط در تمامی عمق های نسبی ۴۶ درصد کاهش می یابد. همچنین با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۶ به ۰/۴۵، میزان دبی عبوری از کانال اصلی به طور متوسط در تمامی مقادیر سینوسیته ۳۳ درصد کاهش می یابد

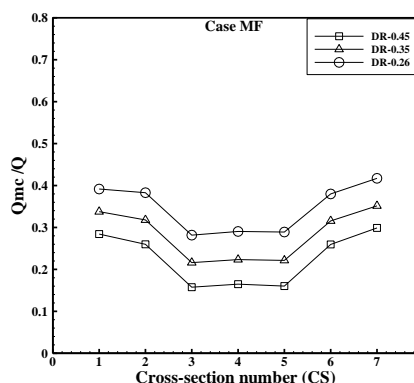
در مقاطع میانی (CS3,4,5) کانال های مرکب پیچان با میزان سینوسیته بالا (ME و MF)، افزایش عمق نسبی تغییر محسوسی در سرعت متوسط کلی ایجاد نمی کند و آن به این علت است که در کانال های پیچان با میزان سینوسیته بالا مقاومت جریان زیاد بوده و به دنبال آن سرعت جریان کانال اصلی پایین می باشد لذا تغییر عمق نسبی تغییر چندانی روی سرعت جریان ندارد.

میزان دبی عبوری از کانال اصلی

در این بخش، میزان دبی عبوری از مقطع کانال اصلی نسبت به دبی کل با توجه به تغییر عمق نسبی مطابق شکل ۹ بررسی می شود. در این شکل Q_{mc} دبی عبوری از مقطع کانال اصلی و Q دبی کل می باشد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود با افزایش عمق نسبی و میزان سینوسیته، دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل



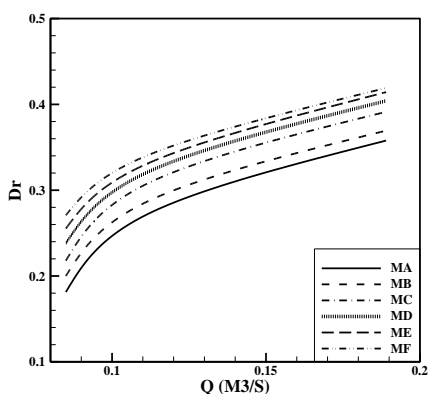
شکل (۹): میزان دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل، در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته



ادامه شکل (۹): میزان دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل، در مقاطع مختلف با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته

میزان دبی عبوری از کانال مستقیم MA به مراتب خیلی بیشتر از کانال های پیچان می باشد. همچنین به ازای یک دبی سیلاب ثابت، عمق جریان در کانال های پیچان با افزایش میزان سینوسیته بیشتر می شود

در ادامه منحنی دبی-عمق برای کانال های مختلف در شکل ۱۰ رسم شده است. در این نمودار Dr عمق نسبی و Q دبی عبوری می باشد. مطابق شکل ۱۰ با افزایش میزان سینوسیته، منحنی دبی اشل به سمت بالا میل می کند بطوریکه در یک عمق نسبی یا ارتفاع ثابت از جریان،



شکل (۱۰): منحنی دبی-عمق کانال های MA تا MF

جدول (۳): میزان متوسط دبی عبوری از مقاطع کانال اصلی

کانال	میانگین دبی عبوری از کانال اصلی	میزان کاهش، با افزایش عمق نسبی
	نسبت به دبی کل (Q_{mc}/Q) در عمق نسبی ۰/۲۶	در عمق نسبی ۰/۴۵
MA	۰/۵۹۹	۰/۴۲۵
MB	۰/۵۶۸	۰/۳۹۳
MC	۰/۵۴۹	۰/۳۵۴
MD	۰/۴۷۸	۰/۳۱۳
ME	۰/۳۹۹	۰/۲۶۶
MF	۰/۳۴۸	۰/۲۲۶

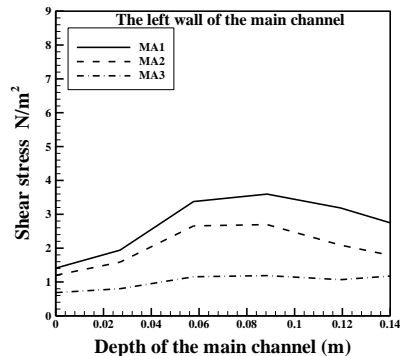
تنش برشی بستر و دیواره‌های کانال اصلی

در شکل ۱۱ توزیع تنش برشی بستر و دیواره‌های کانال اصلی در مقطع CS1 برای هر یک از کانال‌های مرکب با توجه به تغییر عمق نسبی و میزان سینوسیته نشان داده شده است. مطابق این شکل برای هر یک از کانال‌ها تنش برشی بستر در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی بوده و با افزایش میزان سینوسیته و کاهش عمق نسبی در کانال مرکب پیچان، از مقدار تنش برشی بستر کاسته می‌شود. همچنین میزان تنش برشی دیواره قوس داخلی مقطع CS1 در تمامی کانال‌ها از تنش برشی دیواره قوس خارجی کانال اصلی بیشتر بوده و میزان اختلاف تنش برشی دیواره قوس داخلی و خارجی در هر یک از کانال‌ها با افزایش مقدار سینوسیته تقریباً افزایش می‌یابد. در هر یک از کانال

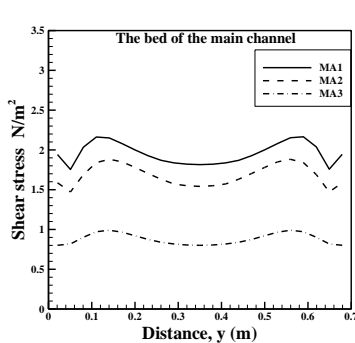
ها حداکثر مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی عمق لبریز کانال (Bankfull level) رخ می‌دهد و با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی دیواره‌ها افزوده می‌شود. مطابق شکل ۱۱ حداکثر تنش برشی بستر و دیواره قوس داخلی با افزایش میزان سینوسیته در کانال MA تا MCL افزایش یافته و سپس در کانال MC به اوج خود می‌رسد و در ادامه با افزایش میزان سینوسیته، مقدار حداکثر تنش برشی در کانال MC تا MF روند نزولی درپیش گرفته و کاهش می‌یابد. این نوع تغییرات تنش برشی بستر و دیواره برای تمامی عمق‌های نسبی صادق می‌باشد. روند تغییرات تنش برشی دیواره سمت راست به استثناء کانال MA، مشابه دیواره سمت چپ و بستر کانال اصلی می‌باشد

تنش برشی دیواره قوس داخلی

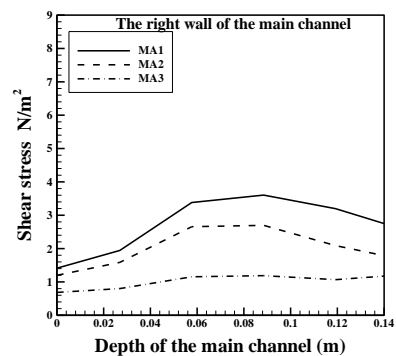
MA



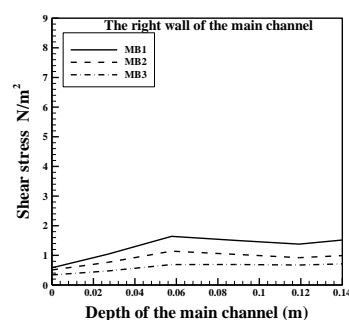
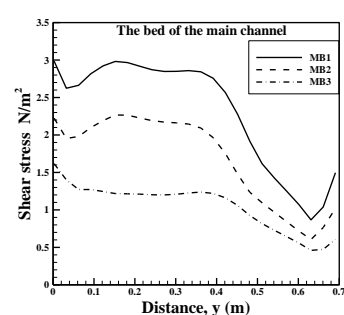
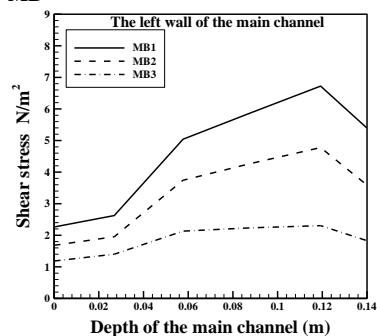
تنش برشی بستر کانال اصلی



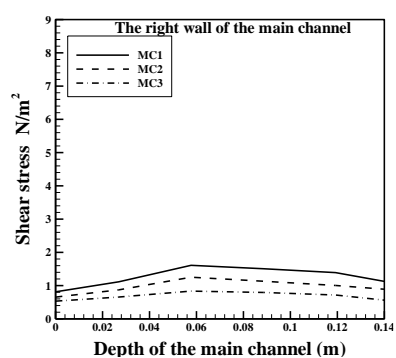
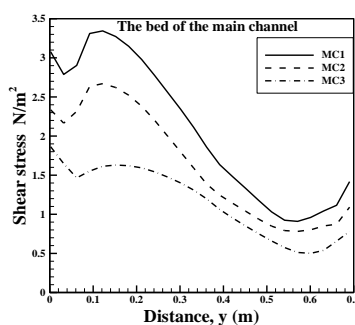
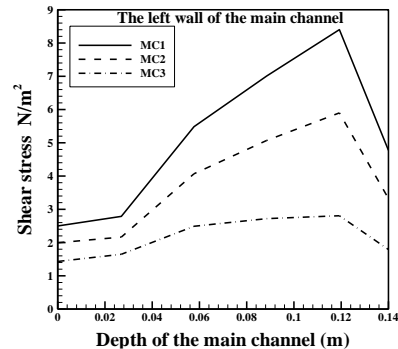
تنش برشی دیواره قوس خارجی



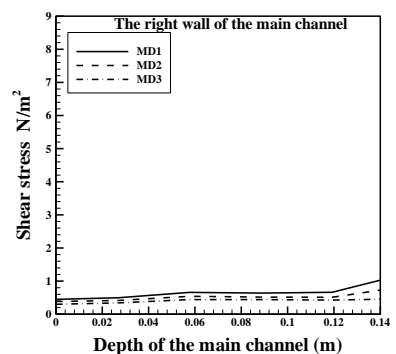
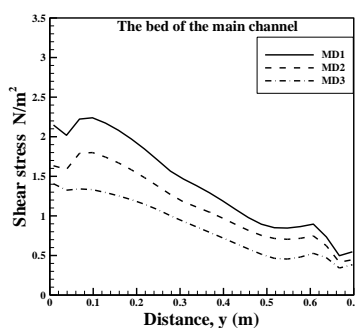
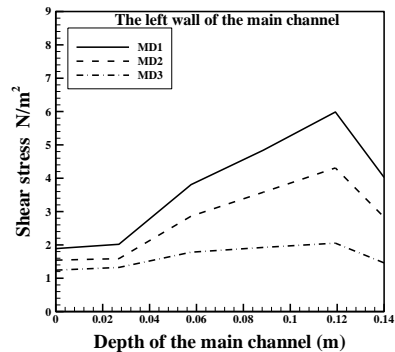
MB

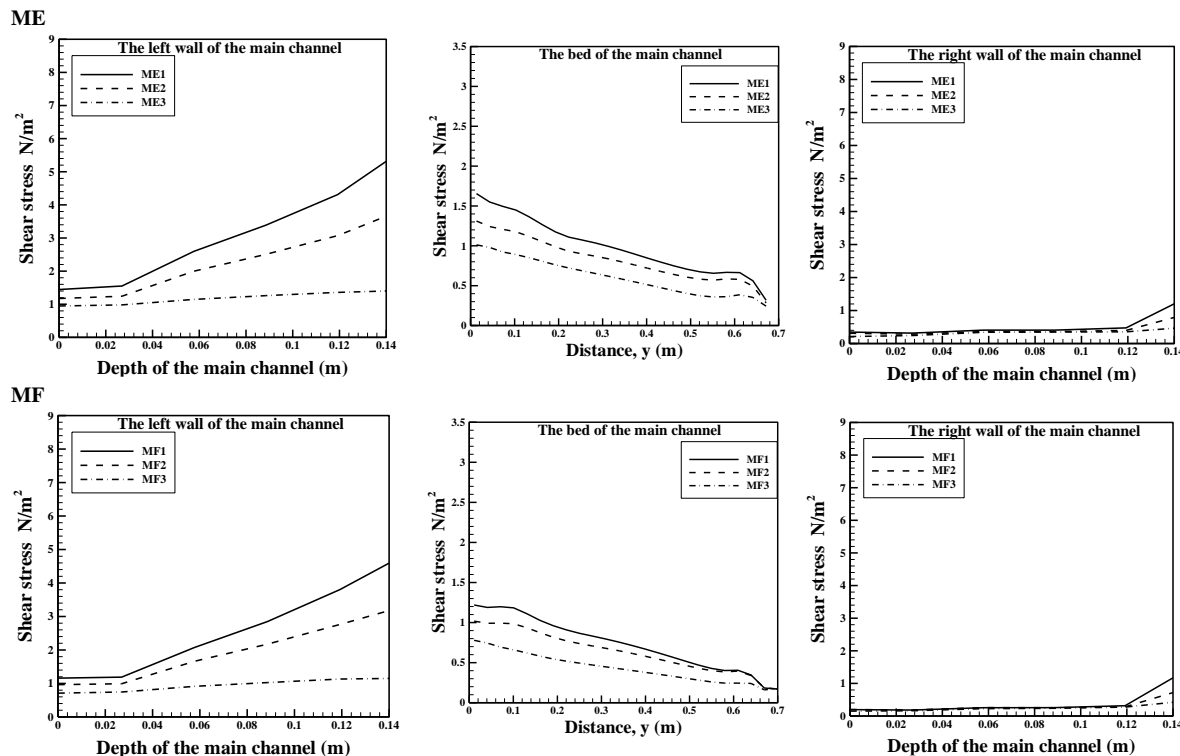


MC



MD





شکل (۱۱): میزان تغییرات تنش برشی بستر و دیواره های کانال اصلی در مقطع CS1 با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیته

در ادامه نیروی برشی بستر و دیواره های کانال اصلی مقطع CS1 با توجه به توزیع تنش برشی در محیط مرطوب کانال اصلی محاسبه می شود. نیروی برشی بستر و دیواره ها از طریق انتگرال تنش برشی مرزی روی محیط مرطوب، مطابق روابط ۷،۶ و ۸ محاسبه می شود. نیروی برشی مرزی کل نیز از مجموع مقادیر روابط ۷،۶ و ۸ به صورت رابطه ۹ قابل محاسبه است.

در این روابط $SF_{Leftwall}$ ، $SF_{Rightwall}$ ، SF_{Bed} و SF_T به ترتیب نیروی برشی دیواره سمت چپ و راست (قوس داخلی و خارجی)، نیروی برشی بستر و دیواره های قوس داخلی و خارجی کانال اصلی در مقطع CS1 برای هر کانال به صورت درصدی از نیروی برشی کل نشان داده شده است. در این جدول $(SF_{Bed}, SF_{Rightwall}, SF_{Leftwall})$ as % of SF_T نسبت نیروی برشی هر بخش از جداره کانال (بستر، دیواره قوس داخلی و خارجی) به نیروی برشی کل برحسب درصد می باشد.

$$SF_{LeftWall} = \int_{LeftWall} \tau dp \quad (6)$$

$$SF_{RightWall} = \int_{RightWall} \tau dp \quad (7)$$

$$SF_{Bed} = \int_{Bed} \tau dp \quad (8)$$

$$SF_T = \int_{LeftWall} \tau dp + \int_{RightWall} \tau dp + \int_{Bed} \tau dp \quad (9)$$

جدول (۴): توزیع نیروی برشی بستر و دیواره های قوس

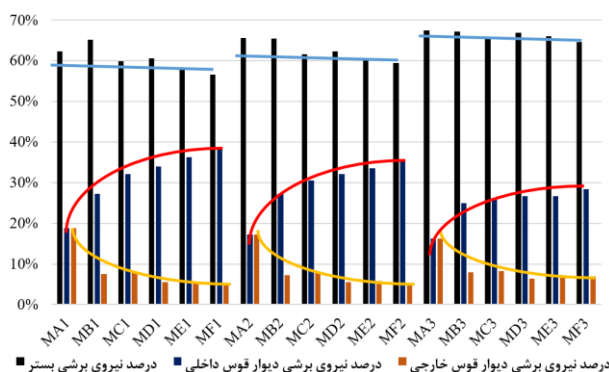
کانال	$SF_{Left Wall}$ (N/m ²)	$SF_{Right Wall}$ (N/m ²)	SF_{Bed} (N/m ²)	$SF_{Left Wall}$ as % of SF_T	$SF_{Right Wall}$ as % of SF_T	SF_{Bed} as % of SF_T
MA1	۰/۴۰۰	۰/۴۰۱	۱/۳۲۸	۰/۶۲۴	۰/۱۸۸	۰/۱۸۸
MA2	۰/۲۹۹	۰/۲۹۹	۱/۱۴۲	۰/۶۵۶	۰/۱۷۲	۰/۱۷۲
MA3	۰/۱۴۴	۰/۱۴۴	۰/۵۹۸	۰/۶۷۵	۰/۱۶۳	۰/۱۶۳
MB1	۰/۶۷۲	۰/۱۸۶	۱/۶۰۳	۰/۶۵۱	۰/۰۷۶	۰/۲۷۳
MB2	۰/۴۸۶	۰/۱۳۰	۱/۱۶۸	۰/۶۵۵	۰/۰۷۳	۰/۲۷۲

ادامه جدول (۴): توزیع نیروی برشی بستر و دیواره های قوس

۰/۶۷۲	۰/۰۷۹	۰/۲۴۹	۰/۷۲۵	۰/۰۸۶	۰/۲۶۹	MB3
۰/۶۰۰	۰/۰۷۹	۰/۳۲۲	۱/۴۲۴	۰/۱۸۷	۰/۷۶۵	MC1
۰/۶۱۶	۰/۰۷۸	۰/۳۰۵	۱/۱۲۴	۰/۱۴۳	۰/۵۵۷	MC2
۰/۶۵۶	۰/۰۸۳	۰/۲۶۲	۰/۷۹۷	۰/۱۰۱	۰/۳۱۸	MC3
۰/۶۰۵	۰/۰۵۵	۰/۳۴۰	۰/۹۷۲	۰/۰۸۸	۰/۵۴۶	MD1
۰/۶۲۳	۰/۰۵۶	۰/۳۲۱	۰/۷۸۷	۰/۰۷۰	۰/۴۰۵	MD2
۰/۶۷۰	۰/۰۶۴	۰/۲۶۷	۰/۵۹۶	۰/۰۵۷	۰/۲۳۷	MD3
۰/۵۸۱	۰/۰۵۶	۰/۳۶۳	۰/۶۶۴	۰/۰۶۴	۰/۴۱۵	ME1
۰/۶۰۶	۰/۰۵۸	۰/۳۳۶	۰/۵۵۵	۰/۰۵۳	۰/۳۰۷	ME2
۰/۶۶۱	۰/۰۷۳	۰/۲۶۶	۰/۴۰۹	۰/۰۴۵	۰/۱۶۵	ME3
۰/۵۶۶	۰/۰۴۹	۰/۳۸۵	۰/۵۱۱	۰/۰۴۴	۰/۳۴۷	MF1
۰/۵۹۴	۰/۰۵۲	۰/۳۵۴	۰/۴۴۲	۰/۰۳۹	۰/۲۶۴	MF2
۰/۶۴۶	۰/۰۷۰	۰/۲۸۴	۰/۳۰۰	۰/۰۳۲	۰/۱۳۲	MF3

نیروی برشی بستر از نیروی برشی کل نیز تقریباً ثابت باقی می ماند. همچنین مطابق جدول ۴ و شکل ۱۲ برای هر کانال با میزان سینوسیتی مشخص، با افزایش عمق نسبی، میزان سهم نیروی برشی دیواره قوس داخلی از نیروی برشی کل افزایش یافته ولی سهم نیروی برشی بستر و دیواره قوس خارجی کاهش می یابد

پس از مشخص شدن توزیع نیروی برشی مرزی مطابق جدول ۴، در ادامه نمودار توزیع نیروی برشی به صورت شکل ۱۲ نمایش داده شد. همانطور که در جدول ۴ و شکل ۱۲ مشاهده می شود برای هر عمق نسبی، با افزایش میزان سینوسیتی، سهم نیروی برشی دیوار قوس داخلی از نیروی برشی کل افزایش یافته و سهم نیروی برشی دیوار قوس خارجی از نیروی برشی کل کاهش می یابد و سهم



شکل (۱۲): توزیع نیروی برشی بستر و دیواره های قوس داخلی و خارجی بر حسب درصدی از نیروی برشی کل

متوسط ۲۵٪ افزایش می یابد. این افزایش سرعت متوسط عمقی در تغییر عمق نسبی از ۳۵/۰ به ۴۵/۰ محسوس ترمی باشد و برای عمق های نسبی پایین تغییر چندانی مشاهده نمی شود.

۲- در تمامی کانال های مرکب، حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی کانال اصلی، در قوس داخلی رخ می دهد و در کانال های با میزان سینوسیتی پایین، حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی در کانال اصلی بیشتر از سیلاب دشت می باشد و با افزایش میزان سینوسیتی و مقاومت جریان

نتیجه گیری

در این تحقیق، توزیع سرعت، تنش و نیروی برشی جداره، میزان دبی عبوری از کانال اصلی و منحنی دبی اشل کانال های مرکب پیچان با توجه به تغییر عمق نسبی و سینوسیتی مورد بررسی قرار گرفت. در یک جمع بندی کلی می توان نتایج حاصل از این مطالعه را به صورت زیر بیان نمود:

۱- با افزایش عمق نسبی از ۲۶/۰ به ۴۵/۰ (۷۳٪ افزایش)، میزان سرعت متوسط عمقی در تمامی کانال ها به طور

اصلی) بیشتر بوده و میزان اختلاف تنش برشی دیواره قوس داخلی و خارجی در هر یک از کانال ها با افزایش مقدار سینوسیتی تقریباً افزایش می یابد.

۶- در هر یک از کانال ها حداکثر مقدار تنش برشی دیواره در نزدیکی عمق لبریز کانال (Bankfull level) رخ می دهد و با افزایش عمق نسبی بر میزان تنش برشی دیواره ها افزوده می شود.

۷- حداکثر تنش برشی بستر و دیواره سمت چپ (دیوار قوس داخلی) با افزایش میزان سینوسیتی در کانال MA تا MC افزایش یافته و سپس در کانال MC به اوج خود می رسد و در ادامه با افزایش میزان سینوسیتی، مقدار حداکثر تنش برشی در کانال MC تا MF روند نزولی را در پیش گرفته و کاهش می یابد.

۸- با افزایش میزان سینوسیتی، سهم نیروی برشی دیواره قوس داخلی (دیوار سمت چپ) افزایش یافته و سهم نیروی برشی بستر تقریباً ثابت باقی می ماند و سهم نیروی برشی دیواره قوس خارجی (دیوار سمت راست) کاهش می یابد.

در کانال اصلی، حداکثر مقدار سرعت متوسط عمقی در سیلابدشت بیشتر از کانال اصلی می شود.

۳- با افزایش عمق نسبی و میزان سینوسیتی، مقدار دبی عبوری از کانال اصلی به دبی کل کاهش می یابد. به طوریکه با افزایش میزان سینوسیتی از ۱ به ۱/۶۴۱ میزان دبی عبوری از کانال اصلی به طور متوسط در تمامی عمق های نسبی ۴۶ درصد کاهش می یابد. همچنین با افزایش عمق نسبی از ۰/۲۶ به ۰/۴۵، میزان دبی عبوری از کانال اصلی به طور متوسط در تمامی مقادیر سینوسیتی ۳۳ درصد کاهش می یابد.

۴- تنش برشی بستر در نزدیکی قوس داخلی کانال اصلی بیشتر از قوس خارجی بوده و با کاهش عمق نسبی در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر کاسته می شود.

۵- میزان تنش برشی دیواره قوس داخلی (دیوار سمت چپ کانال اصلی) مقطع CS1 در تمامی کانال ها از تنش برشی دیواره قوس خارجی (دیواره سمت راست کانال

منابع

- بهرام پور، م.، بارانی، غ و ذونعمت کرمانی، م. ۱۳۹۸. پیش بینی دبی جریان در مقاطع مرکب، مقایسه روش های داده محور و تجربی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، سال ۹، شماره ۳۶، ص ۲۵-۳۹.
- قاسم زاده، ف. ۱۳۹۲. شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در Flow 3D. انتشارات نوآور، تهران.
- نجفیان، ش.، یونسی، ح.، پارسایی، ع و ترابی پوده، ح. ۱۳۹۶. مدلسازی عددی و فیزیکی خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن. نشریه تحقیقات کاربردی مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸، شماره ۶۸، ص ۱-۱۶.
- نقوی، م.، محمدی، م و مهتابی، ق. ۱۳۹۸. سرعت جریان در کانال مرکب پیچان تحت تأثیر ضریب خمیدگی. مجله مهندسی عمران مدرس، دوره ۱۹، شماره ۵، ص ۲۰۸-۲۱۹.
- Carling, P.A., Cao, Z., Holland, M. J., Ervine, D. A. and Babaeyan-Koopaei, K. 2002. Turbulent flow across a natural compound channel, *Water Resources Research*, 38(12).
- De Marchis, M. and Napoli, E. 2008. The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels, *Advances in Water Resources*, 31:1662-1673.
- Ervine, D.A. and Ellis, J. 1987. Experimental and computational Aspects of Overbank Flood-Plain Flow, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 78(4): 315-325.
- 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.
- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H.J. 2000. Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 126(9): 653-669.
- Knight, D.W. and Demetriou, J. D. 1983. Flood plain and main channel flow interaction, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8): 1073-1092.



- Knight, D.W. and Sellin, R. H. J. 1987. The SERC flood channel facility, *Journal of Institution of Water and Environment Management*, 41(4): 198-204.
- Liu, C., Luo, X., Liu, X.N. and Yang, K.J. 2013. Modeling depth-averaged velocity and bed shear stress in compound channels with emergent and submerged vegetation, *Advances in Water Resources*, 60: 148-159.
- 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.
- 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.
- Rameshwaran, P. and Shiono, K. 2007. Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains, *Journal of Hydraulic Research*, 45(3): 302-315.
- Shiono, K. and Knight, D. W. 1991. Turbulent open channel flows with variable depth across the channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 222: 617-646.
- 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., Muto, Y., Knight, D.W. and Hyde, A.F.L. 1999. Energy losses due to secondary flow and turbulence in meandering channel for overbank flows, *Journal of Hydraulic Research*, 37(5):641-664.
- Spooner, j. 2001. Flow structures in a compound meandering channel with flat and natural bedforms, Ph.D. thesis, Loughborough University, UK.
- Tang, X. and Knight, D.W. 2008. Lateral depth-averaged velocity distributions and bed shear in rectangular compound channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9): 1337-1342.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, 27(1): 149-173.
- Yang, K. J., Cao, S.Y. and Knight, D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2):148-159.
- Yang, K.J., Nie, R.H., Liu, X.N. and Cao, S.Y. 2013. Modeling depth-averaged velocity and boundary shear stress in rectangular compound channels with secondary flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1): 76-83.



On the effect of relative flood depth on flow hydraulics in meandering compound channels

Mohammad Naghavi¹, Mirali Mohammadi^{2□}, Ghorban Mahtabi³

Abstract

The rivers, as the main watercourse and natural drainages, always play a significant role in the conveyance of flood flows. During floods, the water crosses the main section of the river and enters the floodplains. In this case the river crossing becomes a compound cross section. In present research work, by studying meandering compound channels, the effect of changing relative depth of flood currents on the hydraulic flow conditions and the rate of discharge are investigated. For this purpose, six channels with different sinusoidal rates at three relative depths with different flood rates were investigated by FLOW3D software. The results of numerical simulation show that by increasing relative depths from 0.26 to 0.45 (73% increase), the depth averaged velocity in all channels increased by 25% and the rate of discharge passing through the main channel decreased by 33%. Also, the results of this study show that the bed shear stress near the inner arch of the main channel is more than the outer arch and by reducing the relative depth in the compound channel, the amount of bed shear stress and flow velocity decreases. And the amount of shear stress of the inner arch wall of the main channel in all channels is higher than that of the outer arch wall, and by increasing the relative depth the amount of shear stress of the wall is increased.

Keywords: meandering compound channel, relative depth, bed shear stress, flow velocity, Flow3D.

¹ Ph.D. Candidate in Civil Eng. Water & Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University, P O Box 165, Urmia 57565-15311. m.naghavi@urmia.ac.ir

^{2□} Associate Professor in Civil Eng. Hydraulics & River Eng. Mechanics, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University, P O Box 165, Urmia 57565-15311. m.mohammadi@urmia.ac.ir

³ Assistant Professor in Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan. ghmahtabi@znu.ac.ir



On the effect of relative flood depth on flow hydraulics in Meandering Compound Channels

Mohammad Naghavi¹, Mirali Mohammadi², Ghorban Mahtabi³

Introduction

Natural rivers are rarely in direct flow because of regulating the energy grade-line, and usually have a curved path to which it is referred to as "meandering channels". After the appearance of meandering rivers, with the passage of time and the lateral movement of the meanders, the external bending progression and the sinusoidal or curvature is increased. In the meandering channels, the curvature of the meandering sections with a dimensionless number can be defined as the sinusoidal which is the ratio of meander length of the main channel to the floodplain length. By increasing sinusoidal slope number, flow velocity and river discharge capacity decrease. As a result, the risk of flood has increased significantly and during floods the water level exceeds to the main river boundary and enters to the floodplains. In this case, due to the interaction between higher velocities in the main channel and the slower velocities in the floodplains and the exchange of the momentum between these two regions, the flow profile is constantly changing. Due to the cost and risks of field studies in times of floods, more attention of researchers has been focused on physical modeling or numerical simulation. In recent decades, extensive studies on the three-dimensional flow structure and secondary flows in direct composite channels have been conducted by Knight & Demetriou (1983), Knight & Sellin (1987), Tominaga et al. (1989), Carling et al. (2002) and Yang et al. (2007).

Methodology

In this research, using FLOW3D software, which is a powerful one in the field of computational fluid dynamics (CFD), an investigation takes into Flow velocity and shear stress of the wall in meandering compound channels under the influence of sinusoidal rate change and relative depth. For this purpose, six channels with different sinuosity and three relative depths were used (Figure1&Table1). Figure 2 shows the plan geometric characteristics of the meandering compound channels used in this research. According to this figure, the flow rate through the main channel and the flow velocity in seven sections have been investigated. According to studies performed on compound channels, the RNG turbulence model has better adaptation to laboratory data, so in this research, this turbulence model has been used in modeling. In this study, the boundary conditions applied to the numerical model are for the upstream boundary of the channel, the Volume Flow Rate and for the downstream boundary of the Outflow. To apply the boundary conditions in the side walls and the floor of the channel, the boundary condition of the wall was used. The upper surface of the flow field was also defined as symmetry boundary conditions in this modeling. Laboratory data of Liu et al. (2014 & 2016) were used to validate and control the results extracted in the present study.

¹ Ph.D. Candidate in Civil Eng. Water & Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University

² Associate Professor in Civil Eng. Hydraulics & River Eng. Mechanics, Department of Civil Engineering, Faculty of Eng., Urmia University Corresponding Author: Email: m.mohammadi@urmia.ac.ir

³ Assistant Professor in Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan

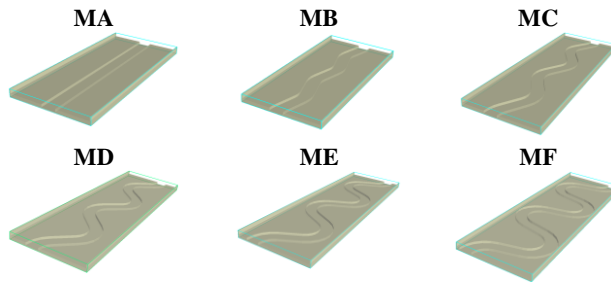


Figure 1. Channels used in this research

Table 1. meandering compound channels parameters

Case	channel sinuosity	θ
MA	1	0
MB	1.026	15
MC	1.096	30
MD	1.209	45
ME	1.381	60
MF	1.641	75

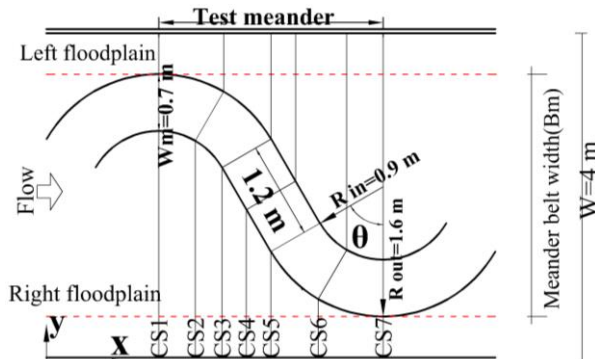


Figure 2. Plan details of geometry and measuring sections (Case ME).

Discussion and Conclusion

In this research, the depth-averaged velocity, shear stress of the wall and Stage-discharge curves in the CS1 section is calculated. The Stage-discharge curves for different channels is shown in Figure 3. In this diagram, D_r is the relative depth and Q is the flow rate. As shown in Figure 3, with increasing sinusoidal rate, at a relative depth, the flow rate through the direct channel is much higher than the meandering channels.

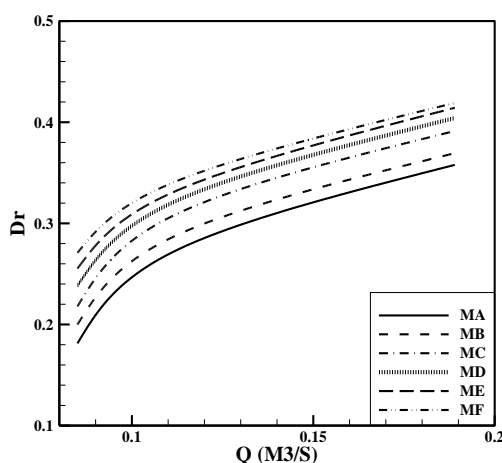


Figure 3. Stage-discharge curves

In a general conclusion, the results of this study can be expressed as follows:

- By increasing the relative depth from 0.26 to 0.45 (73% increase), the depth-averaged velocity in all channels increases by an average of 25%.
- In all meandering compound channels, the maximum depth-averaged velocity of the main channel occurs in the inner arc.
- In channels with low sinusoidal rate, the maximum depth-averaged velocity in the main channel is higher than the floodplain.
- As the relative depth and sinusoidal rate increase, the flow rate from the main channel to the total flow rate decreases. As the sinusoidal rate increases from 1 to 1.641, the flow rate through the main channel decreases by 46%.
- Shear stress of the bed near the inner arch of the main channel is higher than the outer arch and by reducing the relative depth of the meandering compound channels, the shear stress of the bed is reduced.

4. The most important references

- Carling, P.A., Cao, Z., Holland, M. J., Ervine, D. A. and Babaeyan-Koopaei, K. 2002. Turbulent flow across a natural compound channel, *Water Resour Research*, 38(12).
- Knight, D.W. and Demetriou, J. D. 1983. Flood plain and main channel flow interaction, *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(8): 1073-1092.
- Knight, D.W. and Sellin, R. H. J. 1987. The SERC flood channel facility, *Journal of Institution of Water and Environment Management*, 41(4): 198-204.
- 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.
- 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.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. 1989. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows, *Journal of Hydraulic Research*, 27(1): 149-173.
- Yang, K. J., Cao, S.Y. and Knight, D. W. 2007. Flow patterns in compound channels with vegetated floodplains, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2):148-159.