

## شدت آشفته‌گی و تنش برشی جداره در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر ضریب خمیدگی

محمد نقوی<sup>۱</sup>، میر علی محمدی<sup>۲\*</sup> و قربان مهتابی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۳	کانال‌های مرکب مقاطع هیدرولیکی می‌باشند که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل یافته‌اند. در رودخانه‌های پیچان، با گذشت زمان و حرکت جانبی پیچ‌ها، میزان پیشروی قوس بیرونی افزایش یافته و مقدار سینوسیتی یا خمیدگی در پلان گسترش می‌یابد. در این رودخانه‌ها، انحنای بخش‌های پیچان با پارامتر بی‌بعدی به نام عدد سینوسیتی تعریف می‌شود که عبارت از نسبت طول پیچان کانال اصلی به طول دشت سیلابی می‌باشد. با افزایش عدد سینوسیتی، شیب، سرعت جریان و ظرفیت انتقال دبی رودخانه کاهش می‌یابد. در نتیجه، خطر سیلابی شدن به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می‌شود. آگاهی از توزیع تنش برشی جداره و شدت آشفته‌گی جریان در عرض رودخانه برای پیش‌بینی تغییرات هندسی مقطع و مورفولوژی بستر آن ضروری است. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار Flow3D که یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد، به بررسی توزیع سرعت در نزدیک بستر، تنش برشی جداره و شدت و انرژی آشفته‌گی در کانال اصلی پیچان‌رود تحت تأثیر اعداد سینوسیتی مختلف پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که با افزایش عدد سینوسیتی کانال از ۱ به ۱/۶۴۱، سرعت در نزدیکی بستر و تنش برشی کاهش یافته و شدت و انرژی آشفته‌گی افزایش می‌یابد. به‌طوری که حداکثر مقدار پارامترهای فوق در تمامی کانال مرکب پیچان در قوس داخلی رخ می‌دهد.
<b>واژگان کلیدی:</b> کانال مرکب، پیچان، عدد سینوسیتی، تنش برشی جداره، شدت آشفته‌گی جریان، Flow3D	

### ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

افزایش یافته و در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می‌شود. در این حالت، مقطع جریان عبوری به صورت یک کانال مرکب در می‌آید. کانال‌های مرکب، مقاطع هیدرولیکی هستند که از دو بخش، کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل یافته‌اند. کانال اصلی بخشی است که تراز کف آن پایین‌تر از سیلاب‌دشت بوده و عموماً رواناب‌های معمول و دبی پایه را که در اکثر مواقع در رودخانه جریان دارد منتقل می‌کند. جریان در کانال‌های مرکب با جریان در کانال‌های ساده متفاوت است. چرا که اختلاف سرعت بین

رودخانه‌ها در مسیر خود، به ویژه در منطقه دشت و جلگه، معمولاً دارای مسیر پیچان بوده و به ندرت رودخانه‌ای وجود دارد که در طول قابل توجهی از مسیر خود به صورت مستقیم باشد. در رودخانه‌های پیچان، با گذشت زمان و حرکت جانبی پیچ‌ها، میزان پیشروی قوس بیرونی افزایش یافته و میزان سینوسیتی یا خمیدگی در پلان افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار عدد سینوسیتی، شیب، سرعت جریان و ظرفیت انتقال دبی رودخانه کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، خطر سیلابی شدن به‌طور قابل توجهی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.mohammadi@urmia.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه  
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران - هیدرولیک و مکانیک مهندسی رودخانه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه  
۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان

ارزیابی تنش برشی مرزی در کانال اصلی و دیواره دشت سیلابی در مکان‌های مختلف از مسیر پیچان مورد نیاز است. در علم هیدرولیک، کانال‌های مرکب، جریان‌هایی همواره آشفته‌اند. در جریان‌های آشفته، علاوه بر تأثیر لزجت دینامیک، حرکات پراکنده ذرات نیز در مقاومت جریان در مقابل نیروی برشی عمل می‌کند، که در این مورد خاصیتی از جریان با عنوان لزجت گردابی مطرح می‌شود. به طور کلی، آشفته‌گی از طریق حرکت گردابه‌ای در جریان شکل می‌گیرد. پژوهشگران روش‌های غیرمستقیم زیادی را برای تعیین مقدار تقریبی تنش برشی در کف و دیواره‌های رودخانه ارائه داده‌اند. در این روش‌ها، تنش برشی براساس پارامترهای اصلی هندسی و هیدرولیک جریان کانال مرکب محاسبه می‌شود.

توبز و سوکی (۱۹۶۷) هیدرولیک جریان کانال مرکب پیچان‌رودی و اتلاف انرژی مشاهده شده در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در شرایطی که جریان بالاتر از عمق لبریز کانال باشد افزایش قابل توجهی در اتلاف انرژی مشاهده می‌شود [۷]. مایرز (۱۹۷۸) با بررسی مقاومت جریان و تنش برشی ظاهری در مرز تماس عمودی کانال اصلی و سیلاب‌دشت دریافت که مقاومت جریان و تنش برشی ظاهری در عمق کم بیشتر از عمق زیاد می‌باشد [۸]. ورملیتون و همکاران (۱۹۸۲) با بررسی تنش برشی ظاهری دریافتند که با افزایش زبری دشت سیلابی، تنش برشی ظاهری افزایش می‌یابد [۹]. نایت و همکاران (۱۹۸۳) با بررسی مشخصه‌های اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت در کانال‌های مرکب به این نتیجه رسیدند که جریان در ناحیه‌های کم عمق باعث شتاب منفی جانبی در کانال اصلی می‌گردد [۱۰]. نایت و همکاران (۱۹۸۴) روشی تجربی را برای محاسبه تنش برشی متوسط در بستر و دیواره کانال‌های مستقیم مستطیلی ارائه نمودند [۱۱]. شیونو و نایت (۱۹۸۸) مدل تحلیلی-دوبعدی براساس معادله ناویه-استوکس برای حل توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در مقاطع ساده و مرکب ارائه نمودند. سپس در سال ۱۹۹۱ با اصلاح این مدل، اثر جریان‌های ثانویه نیز در نظر گرفته شد [۱۲]. براساس نتایج، مدل شبه دوبعدی شیونو و نایت و با توجه به در نظر گرفتن اثر جریان‌های ثانویه، دارای دقت بهتری بود. تامای و کواهارا (۱۹۸۹) نیز نتیجه گرفتند که افزایش برش ظاهری ناشی از زبری، باعث آشفته‌گی در سطح

ناحیه سیلاب‌دشت و کانال اصلی به دلیل تفاوت قابل توجه زبری، عمق جریان و شکل مقطع در ناحیه سیلاب دشت و کانال اصلی باعث انتقال اندازه حرکت و ایجاد آشفته‌گی بین این دو ناحیه می‌شود. هنگامی که رودخانه به صورت کانال اصلی و بسترهای سیلابی و همچنین انحنادار مدل‌سازی شود پیچیدگی مسئله فوق‌العاده بیشتر می‌گردد. به علت انحنادار بودن کانال، آبی که در بسترهای سیلابی جاری است از روی آبی که در کانال اصلی در جریان است عبور کرده و در نتیجه اندرکنش‌ها و تبدلات بیشتری بین آن‌ها رخ می‌دهد که بایستی در مدل‌سازی جریان مد نظر قرار گیرند. تحلیل جریان و رسوب در رودخانه‌ها به منظور مطالعه طرح‌های ساماندهی یا مدیریتی صورت می‌گیرد. پژوهشگران از مطالعات میدانی، مدل‌سازی فیزیکی و شبیه‌سازی عددی در بررسی جریان و رسوب در رودخانه‌ها استفاده می‌کنند. هزینه بسیار زیاد و خطرات احتمالی مطالعات میدانی، به‌ویژه در مواقع سیلابی، توجه بیشتر پژوهشگران را به سمت مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه‌سازی عددی معطوف داشته است. در مقایسه با مدل‌سازی فیزیکی، مدل‌های عددی کم هزینه‌تر بوده و به راحتی امکان تغییر پارامترهای مختلف و بررسی تأثیر آنها در نتایج وجود دارد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر، توجه بیشتری به مطالعات عددی در مدل‌سازی جریان شده است. به عنوان نمونه، می‌توان به مطالعات کین و همکاران [۱]، موسته و اتما [۲]، گونزالز و بومباردلی [۳]، شاملو و جعفری [۴]، آخریا و همکاران [۵] و والش و همکاران [۶] اشاره نمود.

تنش برشی وارد بر کف و جداره‌های کانال مرکب پیچان یکی از مهم‌ترین پارامترهای جریان در کانال‌های روباز و رودخانه‌هاست. این پارامتر در بسیاری از معادله‌های مهم هیدرولیک و انتقال رسوب مانند انتقال بار معلق و بستر، محاسبه‌های طراحی کانال‌های مرکب پایدار، انتخاب محل مناسب آبرگیر، محاسبات طراحی سازه‌های کنترل و نیز برای شبیه‌سازی تغییرات هندسه رودخانه‌ها کاربرد دارد. آگاهی از توزیع تنش برشی در عرض رودخانه‌ها و کانال مرکب جهت بررسی فرسایش دیواره‌ها و کف ضروری است. توزیع تنش برشی در امتداد محیط مرطوب به طور مستقیم از ساختار جریان در یک کانال باز تأثیر می‌پذیرد. همچنین توزیع تنش برشی به طور عمده به شکل سطح مقطع و ساختار سلول‌های جریان ثانویه بستگی دارد. بنابراین،

دبی در کانال مرکب پیچان ارائه دادند. آن‌ها همچنین خصوصیات جریان در کانال مرکب پیچان را تحت اثر سیلاب‌دشت پوشیده با چمن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وجود چمن در سیلاب‌دشت روی انتقال کانال تأثیر قابل توجهی دارد و میزان دبی عبوری آن را نسبت به حالت کانال صاف ۳۰ درصد کاهش می‌دهد [۲۱ و ۲۲]. شان و همکاران (۲۰۱۷) با ارائه یک مدل تحلیلی به برآورد منحنی دبی-اشل در کانال مرکب پیچان با پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر مستغرق پرداختند. نتایج نشان داد که همگرایی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برقرار است [۲۳]. شان و همکاران (۲۰۱۸) به پیش‌بینی زاویه مسیر جریان دوبعدی متوسط در امتداد خم پیچان در کانال‌های مرکب پیچان‌رودی پرداختند. اندازه-گیری‌ها نشان داد که ارتفاع سلول جریان ثانویه در کانال اصلی با پوشش گیاهی در سیلاب‌دشت نسبت به یک کانال بدون پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و زاویه مسیر جریان به ارتفاع سلول جریان ثانویه وابسته است [۲۴]. اژدری مقدم و تاج‌نسایی (۱۳۸۹) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS CFX تغییرات سلول جریان ثانویه و توزیع سرعت عمق متوسط و تنش برشی مرزی را تحت افزایش یکنواخت در زبری جداره، در کانال روباز دوزنقه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی حاکی از آن است که تغییر ابعاد و موقعیت قرارگیری سلول‌ها در اثر افزایش یکنواخت زبری بوده و همچنین این افزایش موجب کاهش سرعت متوسط عمقی و افزایش تنش برشی مرزی می‌گردد [۲۵]. ضیائی راد و جعفری ندوشن (۱۳۹۰) جریان آشفته سیال عبوری از داخل یک کانال با دندان‌های مثلثی، مربعی و نیم‌دایره‌ای را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق حاکی از این است که با افزایش ارتفاع دندان‌ها، گردابه‌ها زیاد شده و نوسانات افزایش می‌یابد [۲۶]. اکبری‌ان کاخکی (۱۳۹۴) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D توزیع تنش برشی را در کانال‌های باز مورد بررسی قرار دادند. پس از بررسی و کنترل حساسیت شبکه بندی در مدل‌سازی، مدل RNG به عنوان بهترین مدل در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی تعیین شد [۲۷]. نجفیان و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و عددی، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلاب‌دشت‌های غیرمنشوری و زبر را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی نشان

جریان می‌گردد. [۱۳]. کیلی (۱۹۹۰) سرعت، دبی، شدت آشفستگی و جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب مستقیم و پیچان را مورد بررسی قرار داد و اظهار داشت که شدت آشفستگی در کانال پیچان بیشتر از کانال مستقیم می‌باشد و حداکثر مقدار آن در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت در قوس داخلی رخ می‌دهد. همچنین، در این مطالعه مشخص شد که شدت جریان‌های ثانویه در کانال‌های پیچان بسیار بیشتر از کانال‌های مستقیم است و این جریان‌ها مشخصات سطح آزاد آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به طوری که آب در قوس بیرونی انباشته شده و شیبی رو به پایین به سمت قسمت داخلی دارد و سرعت در کانال اصلی کانال‌های پیچان می‌تواند تا ۵۰ درصد نسبت به معادل آن در کانال‌های مستقیم کاهش یابد [۱۴]. سلین و ویلتز (۱۹۹۶) نشان دادند که سرعت بیشینه در نزدیکی قوس داخلی و در رأس آن به وجود می‌آید. ولی سپس کاهش یافته و به طرف قوس بیرونی خم حرکت می‌کند تا به پایین دست می‌رسد [۱۵]. اسپونر و شیونو (۲۰۰۳) یک مدل ریاضی دوبعدی برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در مقاطع مرکب پیچان با صرف نظر کردن اثر انرژی ناشی از نیروی گریز از مرکز و جریان ثانویه ارائه دادند [۱۶]. دمارچیز و همکاران (۲۰۰۸) اثر پارامترهای هندسی را روی ظرفیت انتقال کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل عددی نشان داد که میزان سینوسیتی، پارامتر اصلی است که باید در فرمول‌های تجربی برای ارزیابی ظرفیت انتقال کانال‌های مورد توجه قرار گیرد [۱۷]. رامشوران و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی مدل فیزیکی رودخانه بلک واتر و مطالعه روی سیلاب‌دشت‌های افقی و شیب‌دار و کانال‌های با سینوسیتی مختلف، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۸]. موشانت (۲۰۱۱) شبیه‌سازی جریان آشفته درون کانال را با زبری‌هایی که اغتشاش را تشدید می‌کردند انجام داد. وی در شبیه‌سازی خود با استفاده از مدل عددی دریافت که اندازه و طول ناحیه چرخش با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد و انرژی جنبشی آشفستگی در نزدیکی دیواره با افزایش ارتفاع دندان یا نسبت انقباض کاهش خواهد یافت [۱۹]. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. لیو و همکاران (۲۰۱۶) روشی را برای ارزیابی

جریان، پروفیل‌های تنش برشی بستر و میزان آشفتگی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، جریان کانال مرکب پیچان با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D شبیه‌سازی گردید و پس از صحت‌سنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی، نتایج ارزیابی و تحلیل شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D، دقت مدل آشفتگی RNG نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی برای شبیه‌سازی جریان کانال مرکب پیچان بیشتر بوده و لذا در این تحقیق از این مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی میدان جریان استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، برای بررسی عددی تأثیر مقدار سینوسیته (ضریب خمیدگی) کانال‌های مرکب پیچان بر شرایط هیدرولیکی جریان، شش نوع کانال با میزان مختلف سینوسیته مطابق شکل (۱) و جدول ۱ مدل‌سازی گردید. برای این شش نوع کانال، پلان مشخصات هندسی در شکل (۲) نشان داده شده و مطابق این شکل شرایط جریان در هفت مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، دبی جریان ورودی کلیه کانال‌ها ۰/۱۸۹ متر مکعب بر ثانیه، عمق و عرض کانال اصلی مستطیلی به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۷ متر، عمق و عرض جریان ورودی به کانال مرکب ۰/۲۵۵ و ۴ متر می‌باشد. لازم به ذکر است که نرم‌افزار FLOW3D فاکتور  $k_s$  را به‌عنوان زبری معادل برای مشخصه ناهمواری بستر به صورت مقیاس طولی در نظر می‌گیرد. در این تحقیق، با توجه به ضریب زبری مانینگ ارائه شده در آزمایش‌های لیو و همکاران که در بخش صحت‌سنجی از آن استفاده شده و با توجه به معادله آکرز (۱۹۹۱) که به صورت رابطه ۱ ارائه شده است، مقدار  $k_s$  به‌دست می‌آید که این مقدار در شبیه‌سازی‌ها به عنوان ضخامت زبری معادل برای بستر مورد استفاده قرار گرفت.

$$k_s = (8.25n\sqrt{g})^6 \quad (1)$$

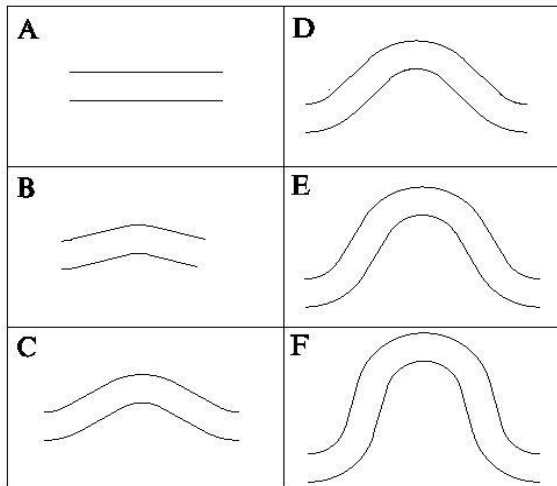
برای بررسی اثر ضریب خمیدگی، در هر مورد از کانال‌های A تا F، نمای دید مقاطع عمودی در هر یک از نمودارها برخلاف جهت حرکت جریان می‌باشد.

## ۲-۱- مدل‌سازی عددی

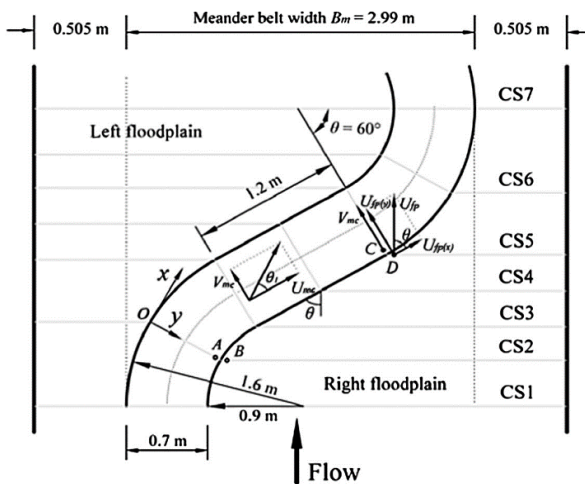
معادلات اساسی دینامیک سیالات شامل بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی هستند. با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی، با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای

داد که مدل Flow3D با به‌کارگیری مدل آشفتگی گروه-های نرمال شده رینولدز (RNG) دارای دقت مناسبی در شبیه‌سازی جریان در این‌گونه مقاطع است [۲۸]. نجفیان و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی، خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن را مورد بررسی قراردادند. بررسی نتایج مدل‌سازی عددی بیانگر این بود که نرم‌افزار Flow3D دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی خصوصیات جریان در کانال مرکب با زبری ناهمگن است. ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار نیز نشان داد که مدل آشفتگی RNG نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، به دلیل شبیه‌سازی بهتر گردابه‌ها در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در مدل‌سازی خصوصیات جریان در کانال مرکب، دارای عملکرد بهتری است. براساس نتایج، خطای مربع میانگین ریشه‌ای (RMSE) مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی برای پارامترهای سرعت متوسط عمقی جریان و تنش برشی به ترتیب برابر ۰/۰۵۶ و ۰/۱ بود [۲۹]. کرمی مقدم و سبزواری (۱۳۹۶) با استفاده از نرم‌افزار Flow3D تأثیر پوشش گیاهی را بر روی تنش برشی و سرعت جریان در کانال مرکب کانال مورد بررسی قرار دادند که نشان از دقت بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی تنش برشی و سرعت جریان دارد [۳۰]. درویش مجنی (۱۳۹۶) با توجه به توانایی بالای نرم‌افزار Flow3D، هیدرولیک جریان و انتقال رسوب را در کانال مرکب مستقیم مورد بررسی قرار دادند [۳۱]. سعید گلانیک و محمدی (۱۳۹۶) با بررسی عددی مشخصات هیدرولیکی جریان در کانال مرکب پیچان و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی هاردویک (۱۹۹۲)، نشان دادند که نرم‌افزار FLOW3D دقت بالایی در مدل‌سازی کانال مرکب پیچان دارد [۳۲]. شاه مردان و نوروزی (۱۳۹۶) تأثیر و نقش شکل‌گیری گردابه‌های متقارن و نامتقارن و تعداد آنها بر افت فشار و تلفات جریان در تبدیلات واگرایی تدریجی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند [۳۳].

همانطور که گفته شد رودخانه‌ها به ندرت در مسیری مستقیم جریان دارند و اکثراً به صورت پیچان بوده که با گذشت زمان و حرکت جانبی پیچ‌ها، میزان پیشروی قوس بیرونی افزایش یافته و میزان سینوسیته یا ضریب خمیدگی در پلان تغییر می‌کند لذا در این تحقیق با توجه به تغییر میزان سینوسیته کانال مرکب پیچان و تغییر پارامترهای



شکل ۱- طرح شماتیک کانال‌های مورد استفاده در این تحقیق با مقادیر مختلف سینوسیتهی مختلف



شکل ۲- پلان جزئیات هندسی و مقاطع مورد سنجش در کانال

جدول ۱- پارامترهای هندسی برای شش نوع کانال A تا F

نوع کانال مورد بررسی	عرض محدوده پیچ و خم ( $B_m$ ) (متر)	طول موج (متر)	شعاع داخلی (متر)	شعاع خارجی (متر)	طول خط اتصال خم‌ها (متر)	مقدار سینوسیتهی	زاویه خط اتصال خم‌ها ( $\theta$ ) (درجه)
A	۰/۷	-	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱	۰
B	۱/۱	۳/۶۱	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱/۰۲۶	۱۵
C	۱/۶۳	۴/۵۸	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱/۰۹۶	۳۰
D	۲/۲۸	۵/۲۳	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱/۲۰۹	۴۵
E	۲/۹۹	۵/۵۳	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱/۳۸۱	۶۰
F	۳/۷۱	۵/۴۵	۰/۹	۱/۶	۱/۲	۱/۶۴۱	۷۵

معروف هستند که برای جریان آشفته تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت روابط ۲ و ۳ معرفی شده‌اند.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

حاکم بر جریان سیال به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت رسیدن به جواب، دامنه مسئله به تعداد زیادی اجزای کوچک تقسیم شده و برای هر یک از این اجزاء، 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 پنج مدل آشفتگی مختلف در حل خصوصیات جریان‌های آشفته استفاده می‌کند و توانایی نمایش تغییرات لحظه‌ای پارامتر-های هیدرولیکی جریان مانند عمق و سرعت در جهت مختلف را داراست. با توجه به توانایی بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی پدیده‌های هیدرولیکی، در این تحقیق برای بررسی اثر ضریب خمیدگی کانال مرکب پیچان روی سرعت و تنش برشی بستر و شدت آشفتگی جریان از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده است. همچنین در این تحقیق با توجه به مطالعات انجام شده، از مدل آشفتگی RNG به واسطه انطباق بهتر با شرایط جریان استفاده شده است.

## ۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت سیال در کانال مرکب پیچانرود عبارت‌اند از معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهت محورهای سه‌گانه مختصات که به معادلات ناویه-استوکس

$$u = \bar{u} + u' \quad (۶)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (۷)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (۸)$$

که در این روابط  $u$ ،  $v$  و  $w$  سرعت لحظه‌ای،  $u'$ ،  $v'$  و  $w'$  مقادیر نوسانات سرعت،  $\bar{u}$ ،  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$  متوسط‌های زمانی سرعت می‌باشند. متوسط نوسانات آشفتگی به صورت جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت یا  $RMS = \sqrt{u'^2}$  تعریف می‌شود که این پارامتر می‌تواند تصویر واضح‌تری از میزان نوسانات سرعت را نشان دهد. جذر میانگین مربعات نوسانات سرعت از طریق روابط ۹ تا ۱۱ نیز محاسبه می‌گردد.

$$u_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right]^{0.5} \quad (۹)$$

$$v_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{0.5} \quad (۱۰)$$

$$w_{rms} = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 \right]^{0.5} \quad (۱۱)$$

یکی از پارامترهای کاربردی در زمینه آشفتگی، شدت آشفتگی نسبی است. این پارامتر برای بیان میزان نوسانات آشفتگی به کار می‌رود و مطابق روابط ۱۲ تا ۱۴ تعریف می‌گردد.

$$\hat{u} = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad (۱۲)$$

$$\hat{v} = \frac{\sqrt{v'^2}}{\bar{v}} = \frac{v_{rms}}{\bar{v}} \quad (۱۳)$$

$$\hat{w} = \frac{\sqrt{w'^2}}{\bar{w}} = \frac{w_{rms}}{\bar{w}} \quad (۱۴)$$

انرژی آشفتگی نیز از طریق حرکت و تکامل گردابه‌ها در جریان به وجود می‌آید. پارامتر انرژی جنبشی آشفتگی ( $K$ ) نماینده‌ی سه‌بعدی از میزان انرژی جنبشی موجود در هر نقطه است که به صورت رابطه‌ی ۱۵ تعریف می‌گردد.

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (۱۵)$$

### ۲-۳- شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی

شبکه حل در این مدل متشکل از سلول‌های مکعبی می‌باشد. برنامه FLOW3D فقط قابلیت تولید شبکه‌های منظم (مکعب مستطیلی) را دارد. لذا، با توجه به منحنی بودن میدان جریان در نواحی دیواره کانال اصلی کانال

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j}) \quad (۳)$$

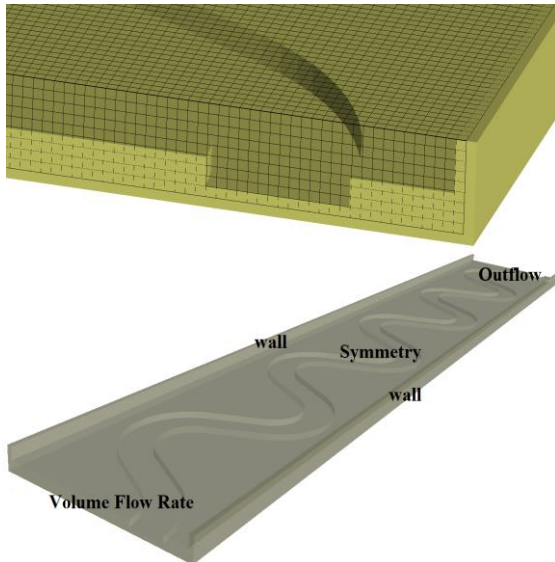
که در آن‌ها  $x_i$  و  $x_j$  محورهای مختصات در سیستم کارترین،  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $\bar{p}$  فشار متوسط،  $U_i$  و  $U_j$  سرعت و  $\overline{u'_i u'_j}$  تانسور تنش رینولدز می‌باشند. همچنین، در این مطالعه عددی، برای پیش بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال VOF استفاده شده است.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

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) \right] + \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) + \xi \left( \frac{FA_x u}{X} \right) \right] = FDIF + FSOR \quad (۴)$$

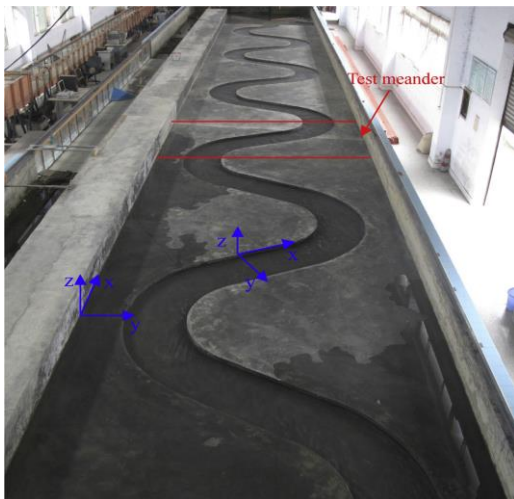
$$FDIF = \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (v_f A_x \frac{\partial F}{\partial X} + R \frac{\partial}{\partial X} (v_f A_y \frac{\partial F}{\partial y})) \right] + \frac{1}{V_f} \left[ \frac{\partial}{\partial z} (v_f A_z \frac{\partial F}{\partial z}) + \xi \left( \frac{FA_x v_f}{X} \right) \right] \quad (۵)$$

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  $\xi$  صفر می‌باشد.  $FSOR$  نرخ زمانی تغییرات جزء حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد  $F=1$  خواهد شد. اگر  $F=0$  سلول مورد نظر خالی است و اگر  $0 < F < 1$ ، سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا است. در جریان‌های آشفته، علاوه بر تأثیر لزجت دینامیک، حرکات پراکنده‌ی ذرات نیز در مقاومت جریان در مقابل نیروهای برشی عمل می‌کنند، که در این مورد خاصیتی از جریان با عنوان لزجت گردابی مطرح می‌شود. به طور کلی، آشفتگی از طریق حرکت گردابه‌ها در جریان شکل می‌گیرد. گردابه‌ها به صورت گروه بزرگی از ذرات جریان که در راستا-های مختلف حرکت کرده، تغییر شکل داده، چرخیده و یا به چند گردابه تقسیم می‌شوند. با گذر جریان از یک نقطه، وجود گردابه‌های بزرگ و کوچک می‌تواند باعث تولید نوسانات سرعت کم یا زیاد در جریان سیال گردد. در این گونه جریان‌ها، سرعت لحظه‌ای و سایر پارامترها مطابق روابط ۶ تا ۸ تعریف می‌گردند.

مقطع ۰/۱۸۹ متر مکعب بر ثانیه، عمق جریان ۰/۲۵۵ متر و ارتفاع کانال اصلی ۰/۱۴ متر می‌باشد [۲۰ و ۲۲]. در تحقیق لیو و همکاران (۲۰۱۴)، مشخصات هیدرولیکی جریان صرفاً در کانال با سینوسی نوع E مورد بررسی قرار گرفته است. تصویر کانال مورد استفاده جهت صحت‌سنجی و محل اندازه‌گیری داده‌ها در این آزمایش در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- شبکه‌بندی میدان جریان و شرایط مرزی تعریف‌شده برای مدل عددی



شکل ۴- نمایی از هندسه کانال مرکب پیچان دانشگاه سیچوان- چین [۲۰]

با توجه به بررسی سرعت در نزدیکی بستر، تنش برشی بستر و شدت آشفتگی جریان در این تحقیق که همگی وابسته به سرعت هستند، از سرعت متوسط عمقی در مقطع کانال اصلی برای صحت‌سنجی استفاده شده است. به‌منظور بررسی میزان دقت نتایج محاسبات مدل عددی نسبت به

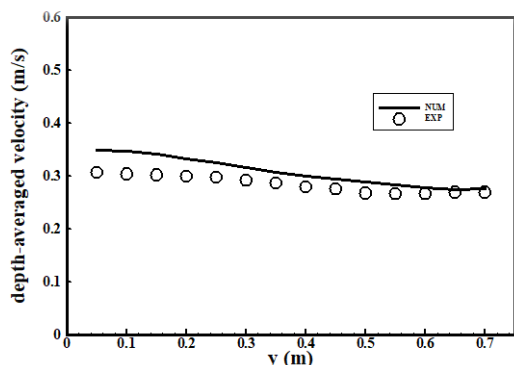
مرکب پیچان‌رودی و رفتار خاص جریان در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت و به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه‌بندی ریزتری استفاده گردد. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، هم‌گرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در کلیه مدل‌های عددی صورت گرفته، برای حصول نتایج درست 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. در تحقیق حاضر پس از بررسی شبکه‌بندی‌های مختلف، مطابق جدول ۲ ریز کردن شبکه تا رسیدن به انحنای مناسب در کانال اصلی پیچان‌رود و نزدیک شدن به نتایج آزمایشگاهی، با سعی و خطاهای متعددی انجام شد.

شرایط مرزی اعمال شده 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 (خروجی) 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.

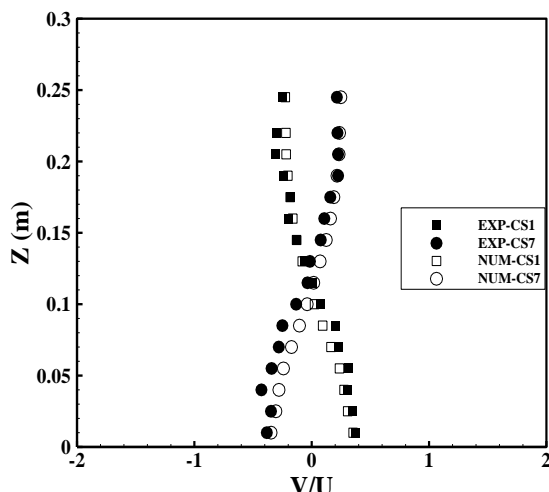
## ۲-۴- صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در تحقیق حاضر، از داده‌های آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده است. این آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۳۵ متر، عرض ۴ متر و عمق ۱ متر در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه سیچوان چین انجام شده است. در این کانال آزمایشگاهی دبی عبوری کل

بیشترین انحنا را می‌باشند محاسبه شده است. شکل (۶) نتایج آزمایشگاهی و عددی را برای نسبت سرعت عرضی به طولی به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد که بیانگر توانایی بالای این نرم‌افزار در اندازه‌گیری سرعت عرضی و طولی می‌باشد.



شکل ۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1



شکل ۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نسبت سرعت عرضی به طولی در مرکز کانال اصلی مقاطع CS1 و CS7

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- جریان ثانویه و پروفیل سرعت

یکی از پارامترهایی که در تعیین تنش برشی بستر مؤثر است مقدار سرعت جریان می‌باشد. در یک کانال مرکب پیچان با حرکت در طول خم، زاویه بین راستای جریان کانال اصلی و راستای سیلاب‌دشت مستقیم تغییر می‌کند (به عنوان نمونه در کانال مرکب پیچان E با ضریب خمیدگی ۱/۳۸۱ زاویه  $\theta$  در CS1 برابر صفر درجه و در CS3 برابر ۶۰ درجه می‌باشد). بنابراین جریان ثانویه در کانال اصلی پیچان رودها تحت تأثیر دو جزء جریان

مقادیر آزمایشگاهی، پس از بررسی شبکه بندی‌های مختلف مطابق جدول ۲، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه ۱۶، برای محاسبه خطای سرعت متوسط عمقی استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (16)$$

در این رابطه  $E_i$  و  $N_i$  مقادیر داده‌های عددی و آزمایشگاهی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

جدول ۲- مشخصات شبکه‌بندی میدان محاسباتی و ریشه میانگین مربعات خطا سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1

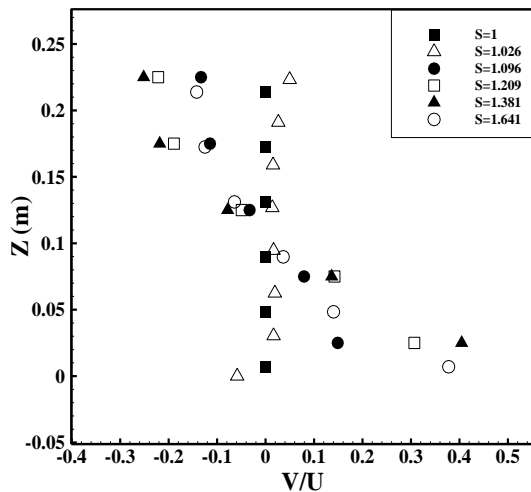
RMSE	ابعاد مش مکعبی منظم	نوع شبکه بندی
۰/۱۰۴	۴ سانتی متر	درشت (C)
۰/۰۵۷	۲ سانتی متر	متوسط (M)
۰/۰۲۶	۱/۵ سانتی متر	ریز (F)
۰/۰۲۵	۱ سانتی متر	خیلی ریز (FS)

با توجه به نتایج جدول ۲، مشخص می‌شود که مقادیر سرعت متوسط عمقی حاصل از شبیه‌سازی با شبکه‌بندی نوع F در مقطع CS1 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 نتایج شبکه بندی نوع F و FS، از شبکه‌بندی نوع F، با توجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل (۵) مقایسه نتایج عددی شبکه بندی نوع F با داده‌های آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 را نشان می‌دهد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای سرعت متوسط عمقی ۰/۰۲۶ می‌باشد که بیانگر دقت بالای محاسبات عددی در اندازه‌گیری سرعت متوسط عمقی است.

در کانال‌های مرکب پیچان، نسبت سرعت عرضی به طولی نشان دهنده شدت جریان ثانویه است. برای بررسی این موضوع و کنترل عملکرد صحیح نرم افزار، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود در تحقیق لیو و همکاران (۲۰۱۴)، نسبت سرعت عرضی به طولی ( $V/U$ ) در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقطع CS1 و CS7 که دارای



بیشترین مقدار خود در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۴ می‌رسد. با افزایش شعاع انحناء و نیروی گریز از مرکز در خم خارجی کانال مرکب پیچان، تراکم خطوط جریان افزایش یافته و در نتیجه مقاومت جریان افزایش می‌یابد. با افزایش مقاومت جریان در خم خارجی، مقدار سرعت کاهش پیدا می‌کند.



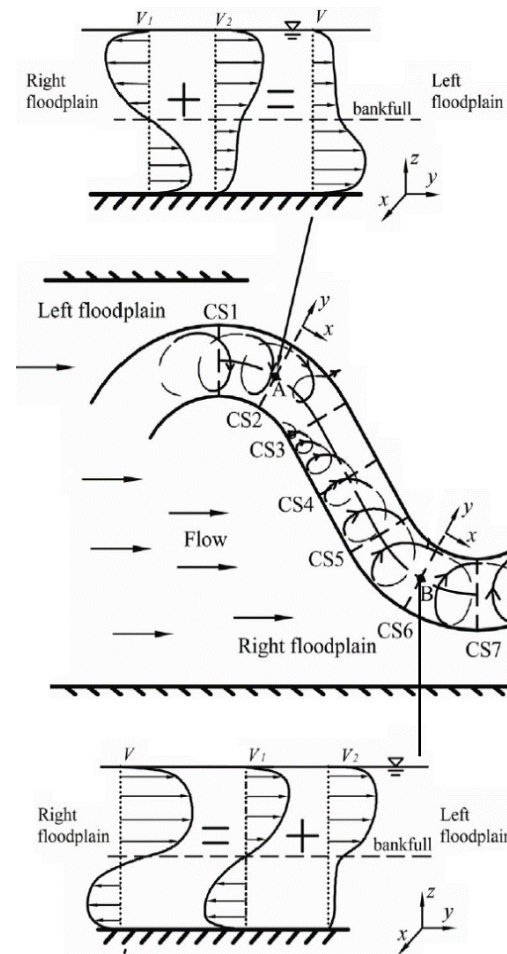
شکل ۸- نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی (v/u) در خط مرکزی کانال اصلی پیچان در مقطع CS1 برای ۶ مورد کانال F تا A

با توجه به توزیع سرعت نزدیک بستر، در شکل (۹) حداکثر مقدار سرعت در کانال مرکب مستقیم در مرکز کانال رخ داده و با افزایش میزان سینوسیتی به سمت خم داخلی حرکت کرده و کاهش می‌یابد. بنابراین حداکثر مقدار سرعت در خم داخلی با افزایش میزان سینوسیتی و شعاع انحناء کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده در هر یک از کانال‌ها حاکی از آن است که مقادیر بیشینه سرعت در قوس داخلی و مقادیر کمینه سرعت در قوس خارجی اتفاق می‌افتد. این نتایج برخلاف ساختار جریان در مقاطع ساده (جریان غیر سیلابی یا پایه) پیچان رود است.

با بررسی پروفیل سرعت در مقطع CS1، مطابق شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که حداکثر مقدار سرعت در مقطع کانال اصلی، در سمت قوس داخلی و در عمقی نزدیک به سطح آب و حداقل مقدار سرعت نیز در قوس خارجی و در کف مقطع اصلی کانال رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که این مقادیر حداکثر و حداقل سرعت در مقطع کانال اصلی با افزایش مقدار سینوسیتی کاهش می‌یابد. در مقطع CS1، سمت چپ مقطع قوس داخلی و سمت راست مقطع، قوس خارجی می‌باشد.

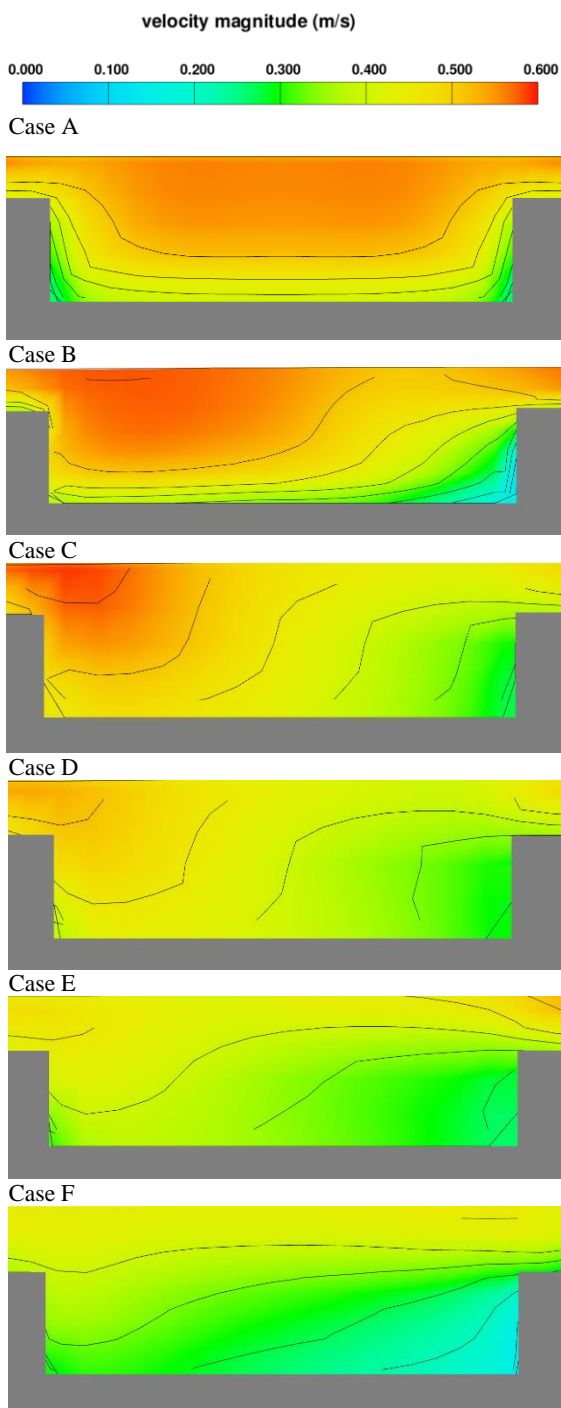
می‌باشد. جریان ناشی نیروی گریز از مرکز ( $V_1$ ) و جریان ناشی از سیلاب دشت بالادست ( $V_2$ )، که تأثیر توأم این دو جزء جریان در شکل (۷) نشان داده شده است.

نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی نشان دهنده شدت جریان ثانویه در کانال‌های مرکب پیچان است. برای این منظور در هر ۶ نوع کانال با مقدار سینوسیتی مختلف، نسبت سرعت عرضی به سرعت طولی ( $V/U$ ) در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقطع CS1 که دارای بیشترین انحناء در هر مقدار سینوسیتی می‌باشد محاسبه شده است. شکل ۸ تغییر مقدار  $V/U$  در محور مرکزی کانال اصلی با توجه به تغییرات مقدار سینوسیتی را نشان می‌دهد.



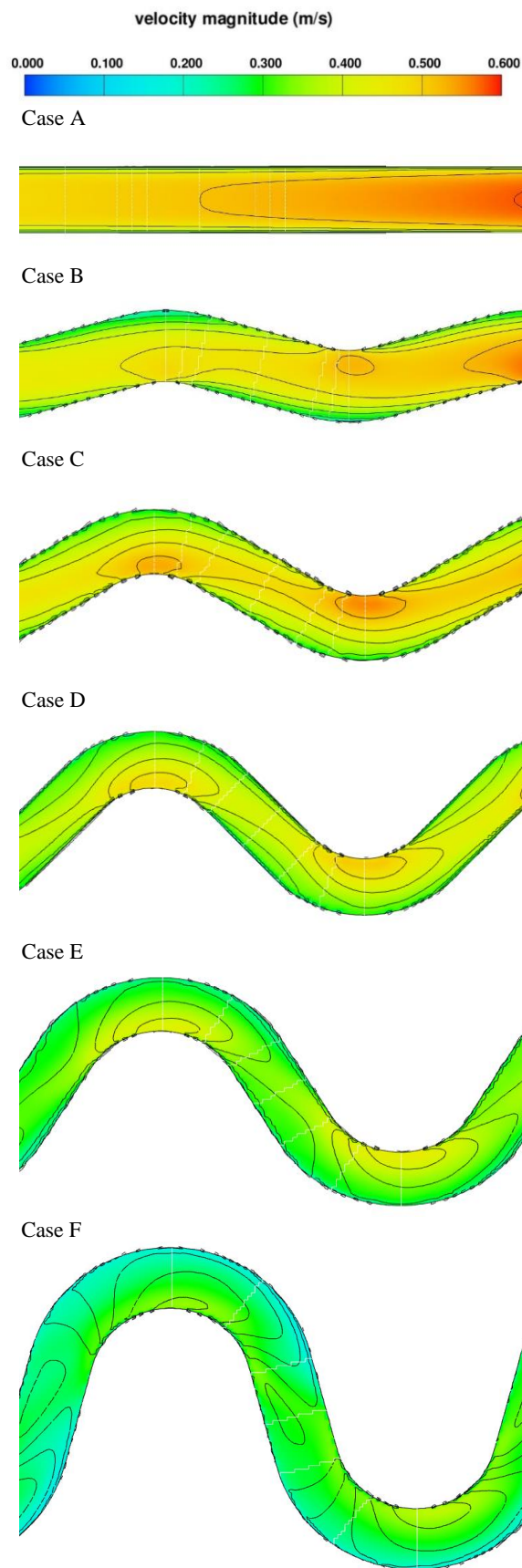
شکل ۷- مکانیسم تولید جریان ثانویه در کانال اصلی پیچان رود و توزیع قائم سرعت‌های عرضی در CS2 و CS6 [۲۰]

در مقطع CS1 نسبت  $V/U$  برای کانال مرکب مستقیم ( $S=1$ ) با توجه به عدم وجود نیروی گریز از مرکز و ناچیز بودن سرعت عرضی تقریباً صفر می‌باشد. با افزایش مقدار سینوسیتی کانال، مقدار  $V/U$  افزایش یافته و در نهایت به



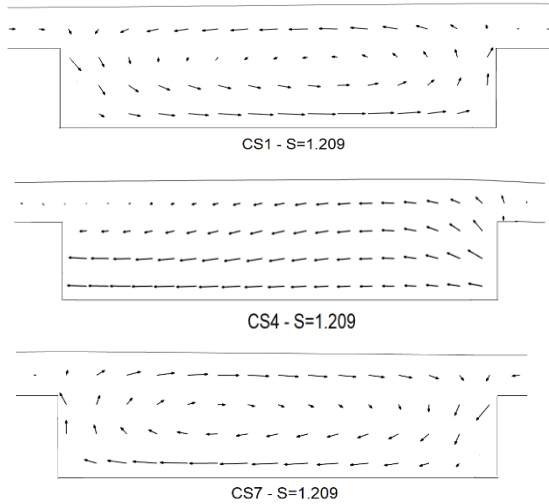
شکل ۱۰- پروفیل سرعت در مقطع CS1 کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

پس از بررسی توزیع سرعت، در ادامه به نحوه توزیع بردارهای سرعت در مقاطع مختلف عرضی برای هر یک از مدل‌ها پرداخته می‌شود. شکل (۱۱) نحوه توزیع بردارهای سرعت در سه مقطع ابتدایی (CS1)، میانی (CS4) و انتهایی (CS7) را در هر یک از مدل‌های A تا F نشان می‌دهد. در هر یک از نمودارها نمای دید بر خلاف جهت حرکت جریان می‌باشد. مطابق نتایج شکل (۱۱)، در داخل

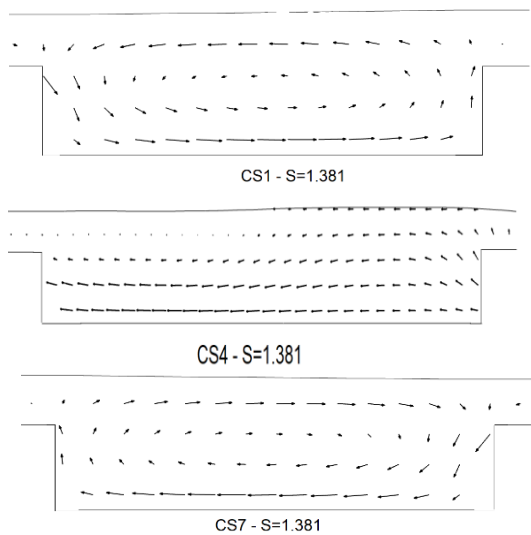


شکل ۹- پروفیل سرعت در نزدیکی بستر کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

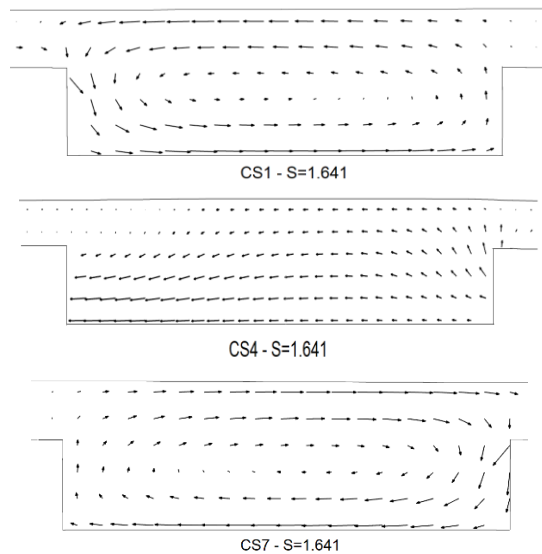
## Case D



## Case E



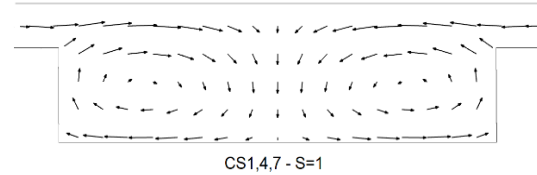
## Case F



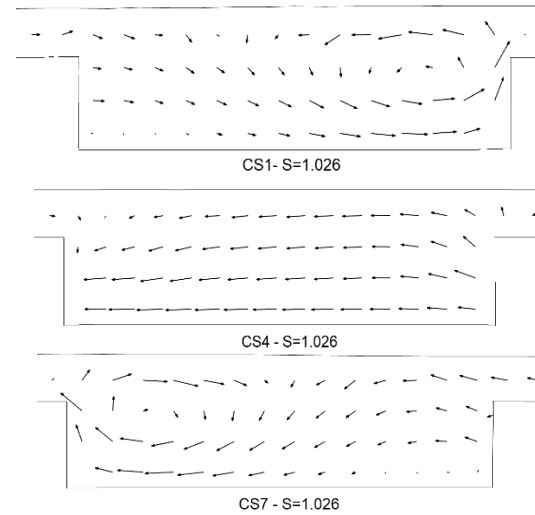
شکل ۱۱- توزیع بردارهای سرعت در مقاطع مختلف عرضی

کانال اصلی، در حالت A جریان‌های گردابی ثانویه از سمت دیواره کناری به طرف محور مرکزی کانال به صورت متقارن تشکیل شده است. در حالت‌های B تا F، در محل راس قوس (در مقاطع CS1 و CS7)، جریان‌های گردابی ثانویه به سمت دیواره بیرونی متمرکز شده و با افزایش مقدار ضریب خمیدگی، ابعاد جریان گردابی افزایش یافته به طوری که در حالت F، کل مقطع عرضی کانال اصلی را در بر گرفته است.

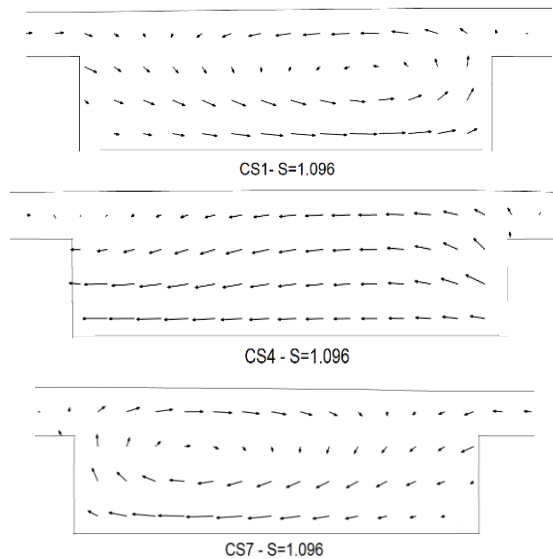
## Case A



## Case B



## Case C

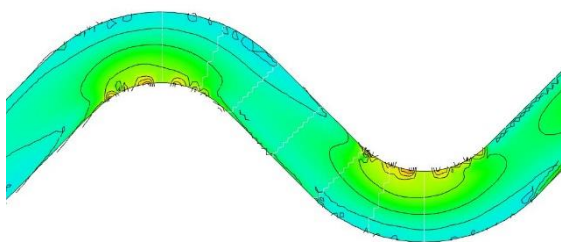


### ۳-۲- پروفیل تنش برشی جداره در کانال اصلی

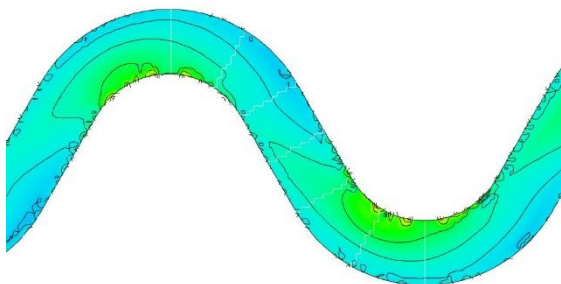
طبق مطالعات انجام شده، توزیع تنش برشی مرزی در طول محیط خیس شده تابع عواملی از قبیل شکل مقطع، زبری و شدت جریان ثانویه می باشد. با توجه به تغییر مقدار سینوسیتی کانال در این تحقیق، شدت جریان ثانویه تغییر کرده و به دنبال آن تنش برشی بستر تغییر می کند. در این بخش، توزیع تنش برشی در بستر کانال اصلی برای هریک از کانال های مرکب پیچان با توجه به تغییر مقدار سینوسیتی مختلف به دست آمده است. این تغییرات در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

همان طور که در این شکل ها مشخص شده، در هر یک از کانال ها، تنش برشی بستر در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی می باشد و با افزایش مقدار سینوسیتی در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر کاسته می شود. در هر یک از کانال ها، حداکثر مقدار تنش برشی بستر در قوس داخلی مقاطع CS1,7 رخ می دهد. مطابق شکل (۱۳)، در مقطع کانال اصلی، با افزایش مقدار سینوسیتی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار حداکثر تنش برشی بستر از ۱/۶ به ۰/۸ پاسکال (۵۰ درصد کاهش) تغییر می کند. در این نمودار، عرض مقطع کانال اصلی می باشد.

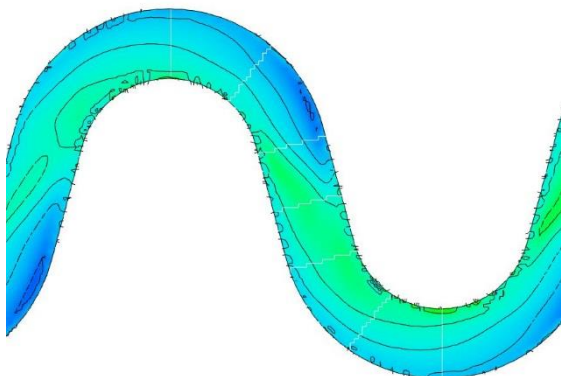
Case D



Case E



Case F

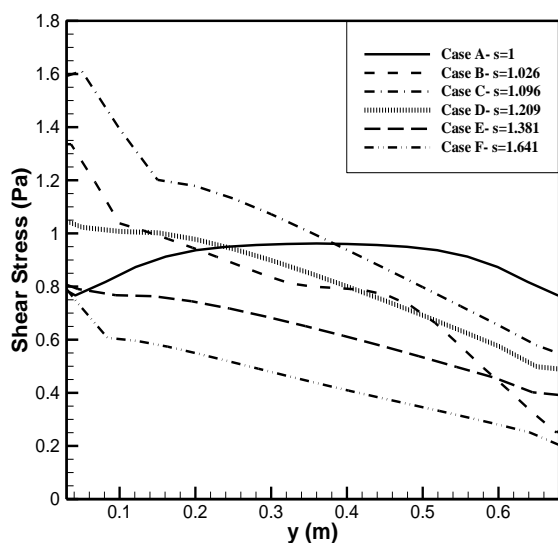


shear stress (Pa)



شکل ۱۲- تنش برشی بستر کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A

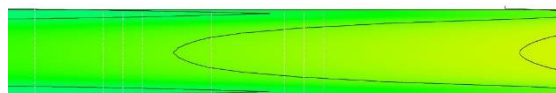
F تا



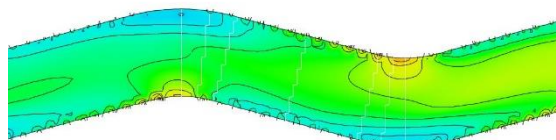
شکل ۱۳- تنش برشی بستر در مقطع CS1 کانال اصلی برای

۶ مورد کانال A تا F

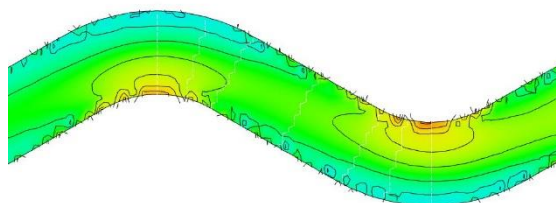
Case A



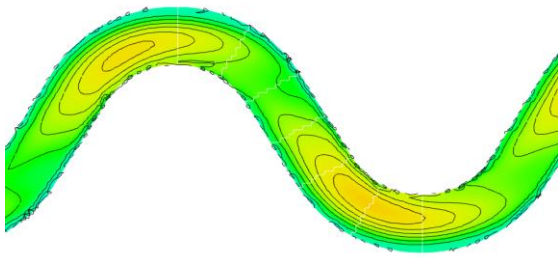
Case B



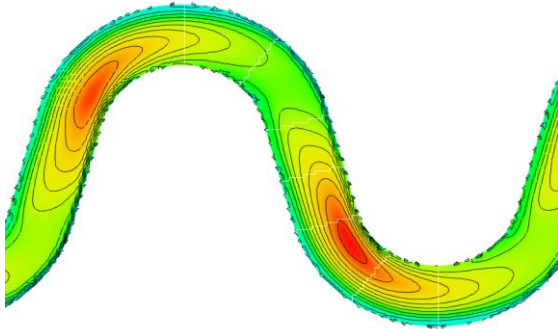
Case C



Case E



Case F



شکل ۱۴- شدت آشفتگی در نزدیکی بستر کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

در ادامه، به بررسی شدت آشفتگی در مقطع CS1 پرداخته می‌شود. مطابق شکل (۱۵)، با افزایش میزان سینوسیته بر شدت آشفتگی در مقطع کانال اصلی افزوده شده و حداکثر مقدار آشفتگی از بستر و دیواره‌های کناری، مخصوصاً از سمت سیلاب‌دشت قوس خارجی، به عمق میانی کانال اصلی (عمق ۱۴ سانتی‌متری)، نزدیک به قوس داخلی گسترش می‌یابد.

### ۳-۴- انرژی آشفتگی در کانال اصلی

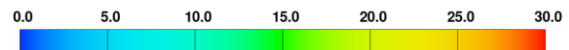
انرژی ناشی از آشفتگی در بستر کانال اصلی برای ۶ مورد کانال در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشخص شده است، میزان انرژی آشفتگی در بستر کانال اصلی با افزایش مقدار سینوسیته، افزایش یافته و محل آن به سمت چپ تاج قوس داخلی حرکت می‌کند (جهت جریان از چپ به راست می‌باشد).

شکل (۱۷) پروفیل انرژی آشفتگی را برای مقطع CS1 نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، حداکثر مقدار انرژی آشفتگی از کف و دیواره کانال اصلی گسترش یافته و با افزایش مقدار سینوسیته، مقدار حداکثر به سمت عمق میانی (عمق ۱۴ سانتی‌متری کانال اصلی) نزدیک به قوس داخلی حرکت می‌کند. گسترش انرژی آشفتگی با افزایش میزان سینوسیته، عمدتاً از سمت سیلاب‌دشت قوس خارجی کانال‌ها می‌باشد.

### ۳-۳- شدت آشفتگی جریان در کانال اصلی

شایع‌ترین شکل جریان در طبیعت، شکل آشفته آن است. پدیده حرکت آشفته که به‌عنوان آشفتگی شناخته می‌شود، عبارت است از یک حرکت گردابی که معمولاً در رودخانه رینولدز بالا به‌وجود می‌آید. پیچان‌رودی کانال یا رودخانه بر انحناء خطوط جریان و ساختار آشفتگی تأثیر فراوان دارد. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود شدت آشفتگی در بستر کانال اصلی با افزایش میزان سینوسیته به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به‌طوری که حداکثر مقدار آشفتگی به سمت قوس داخلی متمایل است. همچنین همان‌طور که در شکل‌ها مشهود است، محل وقوع حداکثر مقدار آشفتگی در بستر کانال اصلی با افزایش میزان سینوسیته از رأس قوس (CS1,7) فاصله گرفته و به سمت چپ متمایل می‌شود (جهت جریان از چپ به راست می‌باشد).

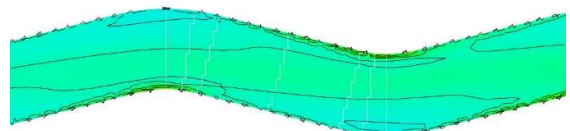
turbulence intensity; % contours



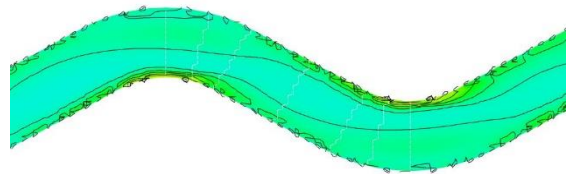
Case A



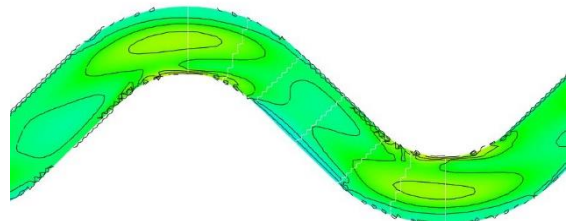
Case B

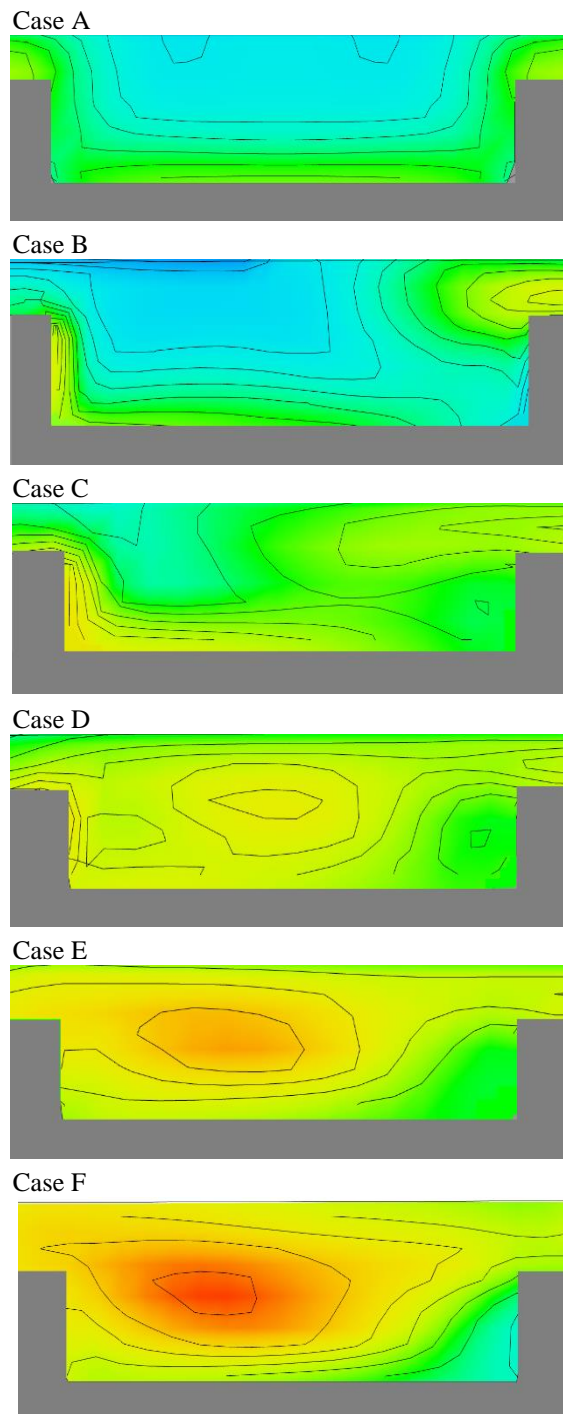
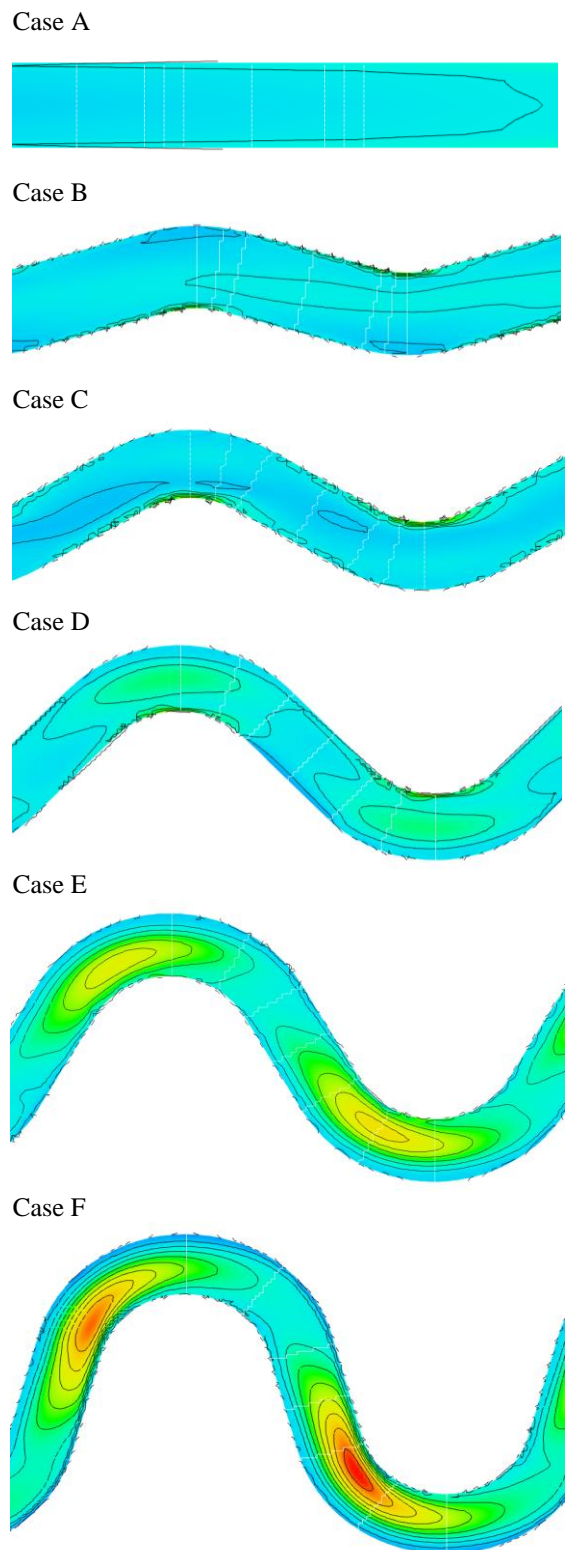
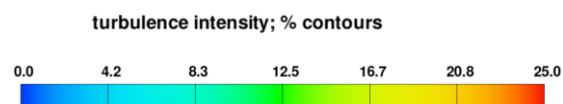
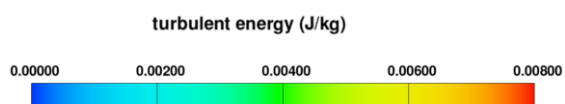


Case C



Case D





شکل ۱۵- شدت آشفتگی در مقطع CS1 کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

شکل ۱۶- انرژی آشفتگی در نزدیکی بستر کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

سینوسیتی به سمت خم داخلی حرکت کرده و کاهش می‌یابد. با افزایش میزان سینوسیتی، تراکم خطوط جریان افزایش یافته و در نتیجه مقاومت جریان افزایش می‌یابد و به دنبال آن مقدار سرعت کاهش می‌یابد. بنابراین حداکثر مقدار سرعت در خم داخلی با افزایش میزان سینوسیتی کاهش می‌یابد.

۲- حداکثر مقدار سرعت در مقطع CS1 کانال اصلی، در سمت قوس داخلی و در نزدیکی سطح آب و حداقل مقدار سرعت نیز در قوس خارجی و در نزدیکی کف مقطع اصلی کانال رخ می‌دهد. مقادیر حداکثر و حداقل سرعت در مقطع کانال اصلی با افزایش مقدار سینوسیتی کاهش می‌یابد.

۳- تنش برشی بستر در قوس داخلی بیشتر از قوس خارجی بوده و با افزایش مقدار سینوسیتی در کانال مرکب پیچان، از میزان تنش برشی بستر کاسته می‌شود.

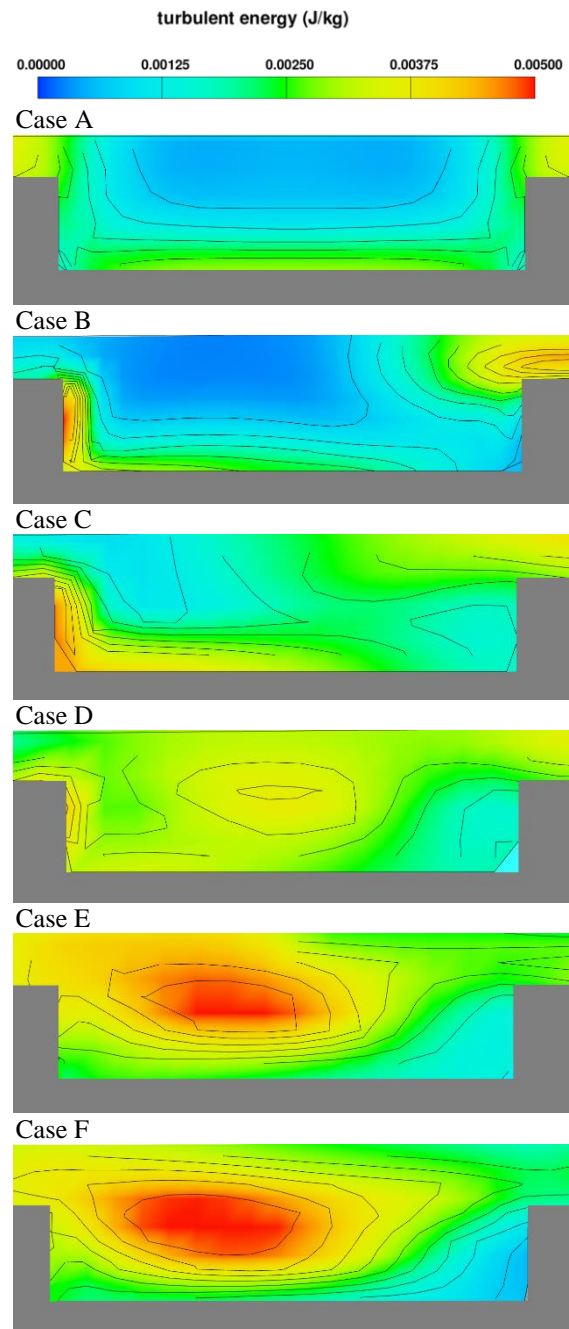
۴- در مقطع CS1 کانال اصلی، با افزایش میزان سینوسیتی از ۱ به ۱/۶۴۱، مقدار حداکثر تنش برشی بستر از ۱/۶ به ۰/۸ پاسکال (۵۰ درصد کاهش) تغییر می‌کند.

۵- شدت آشفستگی در بستر کانال اصلی با افزایش میزان سینوسیتی به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد. به طوری که حداکثر مقدار آشفستگی به سمت قوس داخلی متمایل است. ۶- محل وقوع حداکثر مقدار شدت آشفستگی در بستر کانال اصلی با افزایش میزان سینوسیتی از رأس قوس (CS1,7) فاصله گرفته و به سمت چپ متمایل می‌شود (جهت جریان از چپ به راست می‌باشد).

۷- با افزایش میزان سینوسیتی کانال، بر شدت آشفستگی در مقطع کانال اصلی افزوده شده و حداکثر مقدار آشفستگی از بستر و دیواره‌های کناری، مخصوصاً از سمت سیلاب‌دشت قوس خارجی، به عمق میانی کانال اصلی (عمق ۱۴ سانتی-متری)، نزدیک به قوس داخلی گسترش می‌یابد.

۸- میزان انرژی آشفستگی در بستر کانال اصلی با افزایش مقدار سینوسیتی، افزایش می‌یابد.

۹- حداکثر مقدار انرژی آشفستگی در مقطع CS1 از کف و دیواره کانال اصلی گسترش یافته و با افزایش مقدار سینوسیتی، مقدار حداکثر به سمت عمق میانی حرکت می‌کند. گسترش انرژی آشفستگی با افزایش میزان سینوسیتی، عمدتاً از سمت سیلاب‌دشت قوس خارجی کانال‌ها می‌باشد



شکل ۱۷- انرژی آشفستگی در مقطع کانال اصلی برای ۶ مورد کانال A تا F

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، توزیع سرعت، تنش برشی بستر، شدت و انرژی آشفستگی در نزدیک بستر و مقطع CS1 با استفاده از مدل عددی FLOW3D مورد بررسی قرار گرفت. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتایج حاصل از این بررسی را به صورت زیر بیان نمود:

۱- حداکثر مقدار سرعت در نزدیک بستر در کانال مرکب مستقیم در مرکز کانال رخ داده و با افزایش میزان

## ۵- مراجع

- [1] J. W. Kean, R. A. Kuhnle, J. D. Smith, C. V. Alonso, and E. J. Langendoen, "Test of a method to calculate near-bank velocity and boundary shear stress", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No.7, 2002, pp. 588-601.
- [2] M. Muste, and R. Ettema, "Scale effects in flume experiments on flow around a spur dike in flat bed channel", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 7, July 2004, pp. 635- 646.
- [3] A. E. González, and F. A. Bombardelli, "Two phase flow theoretical and numerical models for hydraulic jumps including air entrainment", XXXI IAHR Congress, Seoul, Korea, 2005.
- [۴] حمید شاملو و پویا جعفری، "بررسی اثر زبری کف در الگوی جریان اطراف پایه پل به کمک نرم‌افزار Flow3D"، *کنگره مهندسی عمران، تهران، ایران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت، دوره ۴، ۱۳۸۷*.
- [5] A. Acharya, "Experimental study and numerical simulation of flow and sediment transport around a series of spur dikes", PhD Thesis, Graduate College, University of Arizona, 2001.
- [6] B. W. Walsh, and J. A. Vasquez "CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow", 33<sup>rd</sup> IAHR Congress of Water Engineering for a Sustainable Environment, Vancouver, British Columbia, Canada, 2009.
- [7] G. H. Toebes and A. A. Sooky, "Hydraulics of meandering rivers with flood plains", *ASCE J. of Waterways and Harbors*, 1967, Vol. 33, pp. 213–236.
- [8] W. Myers, "Momentum transfer in a compound channel", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 1978, Vol. 16, pp. 139-150.
- [9] P. Wormleaton, J. Allen, and P. Hadjipanous, "Discharge assessment in compound channel flow", *ASCE Journal of Hydraulics Division*, 1982, Vol. 108, pp.975-994.
- [10] D. W. Knight, and J. D. Demetriou, "Flood plain and main channel flow interaction", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, Vol. 109, No. 8, pp. 1073–1092.
- [11] D. W. Knight, and E. Mohammed, "Boundary shear in symmetrical compound channels", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, Vol. 110, pp. 1412-1430.
- [12] K. Shiono, and D. W. Knight, "Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 222, pp. 617-646, 1991.
- [13] Y. Kawahara, and N. Tamai, "Mechanism of lateral momentum transfer in compound channel flows", XXXIII IAHR Congress, Ottawa, Canada, pp. 463-470, 21-25 August, 1989.
- [14] G. Kiely, "Overbank flow in meandering channels the important mechanisms", *International Conference on River Flood Hydraulics*, pp. 207-217, 1990
- [15] R. H. J. Sellin, and B. B. Willetts, "Three-dimensional structures, memory and energy dissipation in meandering compound channel flow, floodplain processes". Edited by Anderson, M. G. Walling, D. E. and Bates, P. D. Chichester, England, John Wiley & Sons, 1996.
- [16] J. Spooner, and K. Shiono, "Compound meandering channels with overbank flow", *Water and Maritime Engineering*, Vol. 156, No. 3, 2003, pp. 225-233.
- [17] M. De Marchis, and E. Napoli, "The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels", *Advances in Water Resources*, Vol. 31, 2008, pp. 1662–1673.
- [18] P. Rameshwaran, X. Sun, K. Shiono, J.H. Chandler, and R. H. J. Sellin, "The modelling of compound channel flow: Physical model of River Blackwater", Wallingford, UK, 2008.
- [19] K. S. Mushatet, "Simulation of turbulent flow and heat transfer over a backward-facing step with ribs turbulators", *Thermal Science*, Vol. 15, No. 1, 2011, pp. 245-255.
- [20] C. Liu, N. Wright, X. Liu, and K. Yang, "An analytical model for lateral depth-averaged velocity distributions along a meander in curved compound channels", *Advances in Water Resources*, Vol. 74, 2014, pp. 26–43.
- [21] C. Liu, Y. Shan, X. Liu, and K. Yang, "Method for assessing stage-discharge in meandering compound channels", *ICE-Water Management*, Vol. 169, No. 1, 2016, pp. 17-29.
- [22] C. Liu, Y. Shan, X. Liu, K. Yang, and H. Liu, "The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels", *Journal of Hydrology*, Vol. 542, 2016, pp. 1-17.



- [23] Y. Shan, X. Liu, K. Yang, and C. Liu, "Analytical model for stage-discharge estimation in meandering compound channels with submerged flexible vegetation", *Advances in Water Resources*, Vol. 108, 2017, pp. 170–183.
- [24] Y. Shan, S. Huang, C. Liu, Y. Guo, and K. Yang, "Prediction of the depth-averaged two-dimensional flow direction along a meander in compound channels", *Journal of Hydrology*, Vol. 565, 2018, pp. 318–330.
- [۲۵] مهدی اژدری مقدم و مهنا تاج نسایی، "مدل سازی عددی سلول های جریان ثانویه در کانال های دوزنقه ای با زبری یکنواخت"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۸، شماره ۲۰، بهار ۱۳۸۹، صفحه ۵۷-۷۰.
- [۲۶] مسعود ضیائی راد و ابوالفضل جعفری ندوشن، "بررسی عددی تأثیر هندسه دندانه های روی سطح بر جریان آشفته و انتقال حرارت در یک کانال مستطیلی"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۹، شماره ۲۷، زمستان ۱۳۹۰، صفحه ۳۷-۴۸.
- [۲۷] مجید اکبریان کاخکی، "بررسی عددی توزیع تنش برشی در کانال های روباز با استفاده از نرم افزار FLOW3D"، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، بهمن ۱۳۹۴.
- [۲۸] شادی نجفیان، حجت الله یونسی، عباس پارسایی و حسن ترابی پوده، "مدل سازی فیزیکی و عددی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلاب دشت های غیرمنشوری و زبر"، نشریه تحقیقات کاربردی مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۷، شماره ۶۶، ۱۳۹۵، صفحه ۸۷-۱۰۴.
- [۲۹] شادی نجفیان، حجت الله یونسی، عباس پارسایی و حسن ترابی پوده، "مدل سازی عددی و فیزیکی خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن"، نشریه تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸، شماره ۶۸، ۱۳۹۶، صفحه ۱-۱۶.
- [۳۰] مهدی کرمی مقدم و تورج سبزواری، "تأثیر پوشش گیاهی بر تنش برشی و سرعت جریان در کانال مرکب با استفاده از مدل Flow3D"، نشریه هیدرولیک، دوره ۱۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۲۹-۴۰.
- [۳۱] فرزاد درویش مجنی، "شبیه سازی هیدرولیک جریان و انتقال رسوب در مقاطع مرکب مستقیم با استفاده از FLOW3D"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، بهمن ۱۳۹۶.
- [۳۲] سهراب سعید گلانیک و میرعلی محمدی، "بررسی عددی مشخصه های هیدرولیکی جریان در کانال های مرکب منشوری پیچان با مدل Flow3D"، کنگره بین المللی عمران معماری و توسعه شهری، تهران، ایران، ۵ تا ۷ دی، دوره ۵، ۱۳۹۶.
- [۳۳] محمد محسن شاه مردان و محمود نوروزی، "بررسی عددی تأثیر گردابه ها بر روی افت فشار و تلفات جریان در داخل کانال با انبساط تدریجی صفحه ای"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۴۵-۶۰.