



خصوصیات جریان‌های عرضی در کانال‌های مرکب پیچان

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

^۱ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۲۵
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

کلمات کلیدی:

کانال مرکب پیچان
سینوسیتی
عمق نسبی
جریان عرضی
گردابه

خلاصه: مسیل‌های طبیعی در طول مسیر خود همواره مماندرهایی تشکیل می‌دهند و در نظر گرفتن اثر این پیچ و خم‌ها در مسیر جریان بر الگوی خصوصیات جریان حائز اهمیت است. در هنگام بروز سیلاب، سطح آب از مقطع اصلی رودخانه فراتر رفته و وارد دشت‌های سیلابی آن می‌شود. در این حالت مقطع رودخانه به صورت مقطع مرکب در می‌آید. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار Flow3D که یک نرم‌افزار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است، به بررسی قدرت جریان عرضی و چرخش گردابه‌ها در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر عمق نسبی و میزان سینوسیتی پرداخته شده است. برای این منظور از شش کانال با مقدار سینوسیتی مختلف و سه عمق نسبی متفاوت استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد مقدار بیشینه قدرت چرخشی گردابه‌ها با افزایش میزان سینوسیتی از ۱ به ۱/۲۰۹، به طور متوسط در حدود ۱۹۵ درصد افزایش می‌یابد و مقدار بیشینه قدرت جریان عرضی و چرخش گردابه‌ها، در کانال با زاویه ۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی و میزان سینوسیتی ۱/۲۰۹ رخ می‌دهد. همچنین در مقطع اصلی کانال مرکب پیچان، برای تمام مقادیر سینوسیتی، با کاهش مقدار عمق نسبی، بر میزان قدرت جریان عرضی و چرخش گردابه‌ها افزوده شده و میزان تغییر قدرت جریان عرضی نسبت به تغییر عمق نسبی با افزایش میزان سینوسیتی کاسته می‌شود.

۱- مقدمه

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 سینوسیتی یا ضریب خمیدگی در پلان تغییر می‌کند. میزان سینوسیتی عدد بی‌بعدی می‌باشد که نسبت طول پیچان کانال اصلی به طول دشت سیلابی را نشان می‌دهد. زاویه مرکزی قوس پیچان رود (2θ) به عنوان معیاری جهت تقسیم‌بندی و شناسایی میزان توسعه پیچان رودی یک رودخانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. کورنایس (۱۹۸۰) برای بیان کیفی توسعه و پیشرفت پیچان رودی شدن در رودخانه‌ها آبرفتی و تمایز آنها از یکدیگر، با لحاظ نمودن زاویه مرکزی قوس، تقسیم‌بندی مطابق

جدول ۱ ارائه نموده است [۱].

تاکنون بررسی‌های زیادی در مورد الگوی پیچان رودی رودخانه‌ها با استفاده از شاخص کورنایس انجام شده است. به عنوان نمونه رضایی مقدم و خوشدل (۱۳۸۸) با بررسی پیچ و خم‌های رودخانه اهرچای در محدوده دشت ازومدل ورزقان به این نتیجه رسیدند که ۶۹/۱۱ درصد رودخانه در محدوده پیچان‌رود توسعه یافته می‌باشد [۲]. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) با توجه به تقسیم‌بندی کورنایس تغییرات شکل هندسی رودخانه قزل اوزن را مورد بررسی قرار دادند و نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ۲۵/۸۳ درصد از محدوده مورد مطالعه این رودخانه، در زمره‌ی پیچان‌رودی توسعه نیافته و ۵۵/۷۷ درصد از محدوده مورد مطالعه این رودخانه، در زمره پیچان‌رودی توسعه یافته قرار گرفته است [۳]. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۶) طی تحقیقی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.mohammadi@urmia.ac.ir



جدول ۱. تقسیم‌بندی رودخانه با توجه به زاویه مرکزی [۱]
Table 1. Divide the river according to the central angle

زاویه مرکزی (درجه)	شکل رودخانه
۰	مستقیم
۴۱-۱	شبه پیچان‌رودی
۸۵-۴۱	پیچان‌رودی توسعه نیافته
۱۵۸-۸۵	پیچان‌رودی توسعه یافته
۲۹۶-۱۵۸	پیچان‌رودی بیش از حد توسعه یافته
>۲۹۶	نعل اسبی

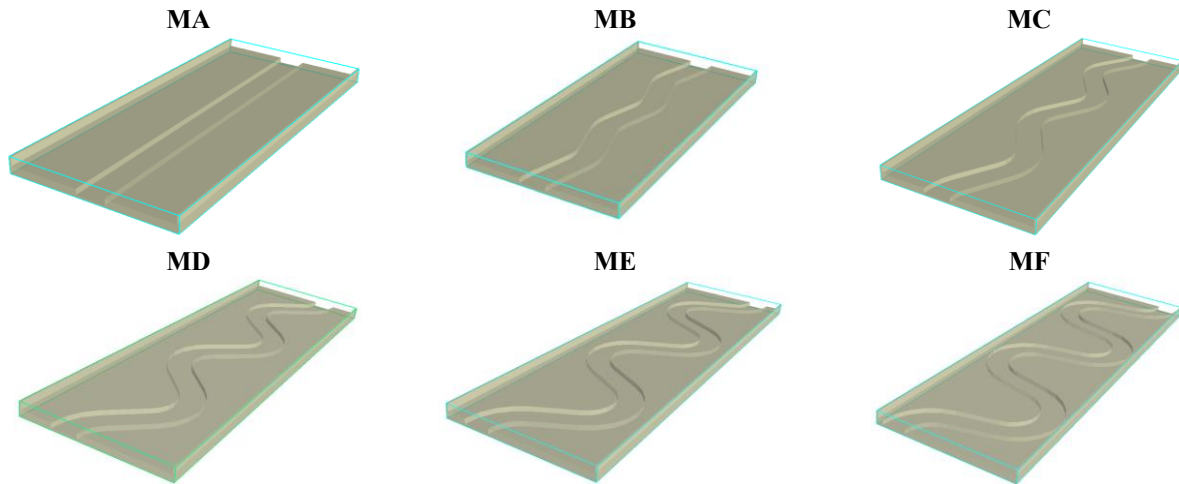
به بررسی الگوی پیچان‌رودی رودخانه آزاد رود پرداختند و نتیجه این تحقیق نشان داد که ۳۰/۲۹ درصد از طول این رودخانه در محدوده پیچان‌رودی توسعه نیافته و ۸/۶۸ درصد در محدوده پیچان‌رودی توسعه یافته می‌باشد [۴]. با توجه به بررسی‌هایی که روی الگوی پیچان‌رودی رودخانه‌های ایران انجام شد مشاهده می‌شود که بخش عظیمی از رودخانه‌ها در محدوده پیچان‌رودی توسعه یافته و توسعه نیافته قرار گرفته‌اند. 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 می‌باشند که از دو بخش کانال اصلی و سیلاب‌دشت تشکیل یافته‌اند. کانال اصلی بخشی است که تراز کف آن پایین‌تر از سیلاب‌دشت بوده و عموماً روان‌آب‌های 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 ناحیه سیلاب‌دشت و مقطع اصلی در کانال‌های مرکب، باعث ایجاد تنش برشی ظاهری، انتقال اندازه حرکت و ایجاد آشفتگی بین این دو ناحیه می‌شود و نهایتاً یک جریان عرضی تولید می‌گردد. در کانال‌های مرکب پیچان معمولاً کانال اصلی مسیری پیچان و سیلاب‌دشتهای مسیری مستقیم دارند. به علت انحنادار بودن کانال اصلی، 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. با توجه به هزینه بسیار زیاد و خطرات احتمالی مطالعات میدانی علی‌الخصوص در مواقع سیلابی توجه بیشتر پژوهشگران به سمت مدل‌سازی فیزیکی یا شبیه‌سازی عددی معطوف شده است. بررسی مکانیسم جریان کانال‌های مرکب پیچان موضوع

پژوهش بسیاری از محققین بوده است. به عنوان نمونه توبز و سوکی (۱۹۶۷) هیدرولیک جریان کانال مرکب پیچان و اتلاف انرژی مشاهده شده در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش عمق جریان و تبدیل مقطع جریان عبوری به صورت یک کانال مرکب، افزایش قابل توجهی در اتلاف انرژی رخ می‌دهد [۵]. نایت و همکاران (۱۹۸۳) با بررسی مشخصه‌های اندرکنش کانال اصلی و سیلاب‌دشت در کانال‌های مرکب به این نتیجه رسیدند که جریان در ناحیه‌های کم‌عمق باعث شتاب منفی جانبی در کانال اصلی می‌گردد [۶]. کیلی (۱۹۹۰) با مطالعه پارامترهای سرعت، دبی، شدت آشفتگی و جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب مستقیم و پیچان، اظهار داشت که شدت آشفتگی در کانال پیچان بیشتر از کانال مستقیم می‌باشد و بیشینه مقدار آن در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت در قوس داخلی رخ می‌دهد. همچنین در این پژوهش 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، به‌طوریکه آب در قوس برونی انباشته شده و شیبی رو به پایین به سمت قسمت داخلی دارد و سرعت در کانال اصلی کانال‌هایی پیچان، می‌تواند تا ۵۰ درصد نسبت به معادل آن در کانال‌های مستقیم کاهش یابد [۷]. همچنین نمونه آزمایش‌هایی در زمینه ساختار جریان در کانال‌های مرکب مستقیم و پیچان تحت عنوان FCF متعلق به دانشگاه بیرمنگام در دو بخش A و B انجام شده است [۸]. اروین و همکاران (۱۹۹۳) اثر پارامترهایی نظیر سینوسیته، هندسه کانال، زبری بستر، عمق جریان و شیب کانال را مورد بررسی قرار دادند [۹]. سلین و ویلتز (۱۹۹۶) طی مطالعاتی نشان دادند که سرعت بیشینه در کانال مرکب پیچان در نزدیکی قوس داخلی و در رأس آن به وجود می‌آید، ولی سپس کاهش یافته و به طرف قوس برونی خم حرکت می‌کند تا به پایین‌دست میرسد [۱۰]. شیونو و موتو (۱۹۹۸) با اندازه‌گیری آشفتگی و جریان ثانویه کانال پیچان، مکانیسم جریان در کانال مرکب پیچان را مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. اسپونر و شیونو (۲۰۰۳)، مدل ریاضی دو بعدی برای پیش‌بینی توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر در مقاطع مرکب پیچان با صرف‌نظر کردن اثر افت انرژی ناشی از نیروی گریز از مرکز و جریان ثانویه ارائه دادند [۱۲]. 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 سینوسیته، پارامتر اصلی است که باید در فرمولهای تجربی برای ارزیابی ظرفیت انتقال کانالها مورد توجه قرار گیرد [۱۳]. رامشوران و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی مدل فیزیکی رودخانه بلکواتر و پژوهش بر روی سیلابدشتهای افقی و شیبدار و کانالهای با سینوسیته مختلف، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی بستر را مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. شوکلا و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی مشخصات هیدرولیکی کانالهای مرکب پیچان پرداختند [۱۵]. شیونو و همکاران (۲۰۰۹) با توجه به مطالعات آزمایشگاهی، تأثیر زبری سیلابدشت را روی ساختار جریان، فرم بستر و نرخ انتقال رسوب در کانالهای مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. لیو و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه یک مدل تحلیلی، توزیع سرعت متوسط عمقی را در طول خم کانال مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. لیو و همکاران (۲۰۱۶) روشی را برای ارزیابی 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 [۱۸ و ۱۹]. شان و همکاران (۲۰۱۸) به پیش‌بینی زاویه مسیر جریان دو بعدی متوسط در امتداد خم پیچان در کانال‌های مرکب پیچان رودی پرداختند. اندازه‌گیری‌ها 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 [۲۰]. مونچو استیو و همکاران (۲۰۱۸) نیز ساختار جریان در کانال مرکب پیچان و گردابه‌های بزرگ جریان آشفته را با استفاده از مطالعه عددی مورد بررسی قرار دادند [۲۱]. فضلی و کاویانی اثر تغییر دبی و عرض ناحیه سیلابدشت را بر جریان عرضی در کانال مرکب مستطیل منشوری به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش عرض ناحیه سیلابدشت، قدرت چرخشی گردابه‌ها در ناحیه اتصال کانال اصلی به سیلابدشت افزایش می‌یابد [۲۲]. 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 [۲۳]. نجفیان و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی عددی و فیزیکی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلابدشتهای غیرمنشوری و زبر نشان دادند که زبری سیلابدشت‌ها بر مشخصه‌های جریان (مانند توزیع سرعت و گرادیان تنش برشی) تأثیر چشمگیری دارد [۲۴]. نجفیان و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از مدل‌سازی عددی و فیزیکی، خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن را مورد بررسی قرار دادند. بررسی نتایج مدل عددی نشان می‌دهد نرم‌افزار Flow3D دارای دقت مناسبی در پیش‌بینی خصوصیات جریان در کانال مرکب با زبری ناهمگن می‌باشد. ارزیابی عملکرد مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار نیز نشان داد که مدل آشفتگی RNG^1 نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی، به دلیل شبیه‌سازی بهتر گردابه‌ها در محل اتصال کانال اصلی و سیلابدشت‌ها در مدل‌سازی خصوصیات جریان کانال مرکب، دارای عملکرد بهتری است. در این تحقیق خطای مربع میانگین ریشه‌ای ($RMSE$) پارامترهای سرعت متوسط عمقی جریان و تنش برشی به ترتیب برابر 0.056 و 0.1 می‌باشد [۲۵]. نیکوبخت و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر پوشش گیاهی غیر مستغرق سیلابدشت را بر روی تغییرات بستر رودخانه‌های مئاندری ملایم با مقطع مرکب را مطالعه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که حضور پوشش گیاهی سبب شده است که موقعیت وقوع بیشترین عمق آشستگی در همه طول پیچان رود به سمت قوس خارجی تغییر یابد [۲۶]. نقوی و همکاران (۱۳۹۸) اثر ضریب خمیدگی را روی شرایط جریان در کانال‌های مرکب پیچان مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش ضریب خمیدگی مقدار سرعت متوسط عمقی کانال اصلی کاهش یافته و بیشینه ارتفاع سطح آب افزایش می‌یابد. همچنین در این مطالعه مشخص شد که بیشینه سرعت در قوس داخلی رخ داده و با افزایش ضریب خمیدگی از مقدار آن کاسته می‌شود [۲۷]. با توجه به مخاطرات وقوع سیل در حاشیه پیچان‌رودها و تنوع رودخانه‌ها با میزان سینوسیته مختلف، مطالعه جریانهای سیلابی کانال‌های پیچان ضروری به نظر میرسد. با مرور مطالعات انجام شده روی کانالهای مرکب، در این تحقیق قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی در کانال‌های مرکب پیچان با توجه به تغییر میزان سینوسیته و عمق نسبی، پس از صحت‌سنجی با داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از نرم‌افزار Flow3D محاسبه و ارزیابی شده است.

1 ReNormalization Group (RNG) turbulence model



شکل ۱. طرح شماتیک قسمتی از کانالهای مورد استفاده در این تحقیق با میزان سینوسیتهی مختلف
 Fig. 1. Schematic diagram of channels used in this study with different sinusoidal rates

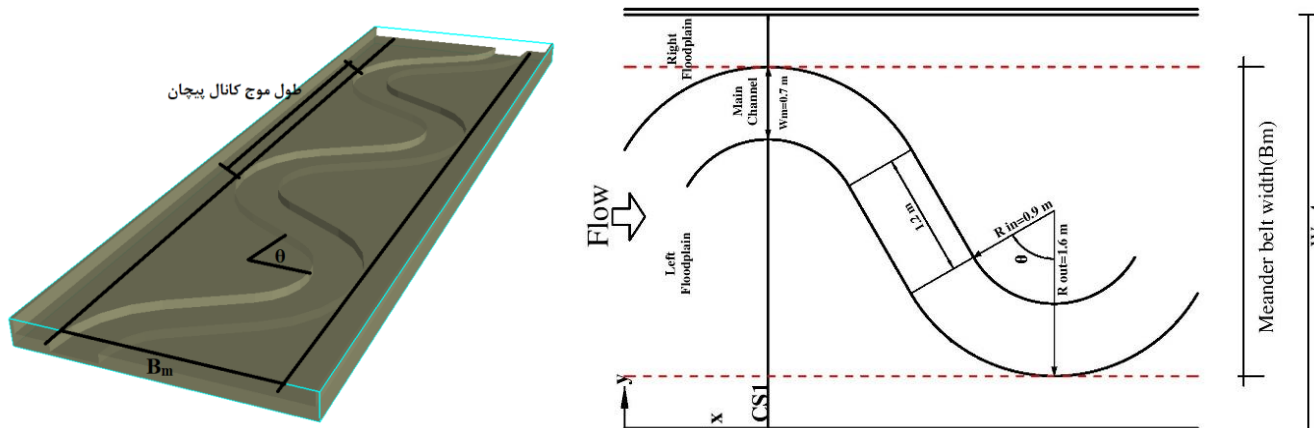
جدول ۲. پارامترهای هندسی کانالهای مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق
 Table 2. Geometric parameters of meandering compound channels used in this research

عمق جریان H (سانتی‌متر)	عمق نسبی Dr	دبی کل Q (مترمکعب بر ثانیه)	زاویه خط اتصال قوس‌ها θ (درجه)	مقدار سینوسیتهی	طول موج کانال (متر)	عرض محدوده پیچ و خم کانال B_m (متر)	کانال مورد بررسی
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۰	۱	-	۰/۷	MA1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۰	۱	-	۰/۷	MA2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۰	۱	-	۰/۷	MA3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۱۵	۱/۰۲۶	۳/۶۱	۱/۱	MB3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۳۰	۱/۰۹۶	۴/۵۸	۱/۶۳	MC3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۴۵	۱/۲۰۹	۵/۲۳	۲/۲۸	MD3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۶۰	۱/۳۸۱	۵/۵۳	۲/۹۹	ME3
۲۵/۵	۰/۴۵	۰/۱۸۹	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF1
۲۱/۶	۰/۳۵	۰/۱۱۳	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF2
۱۸/۹	۰/۲۶	۰/۰۸۵	۷۵	۱/۶۴۱	۵/۴۵	۳/۷۱	MF3

با مقدار سینوسیتهی مختلف و سه عمق نسبی متفاوت مطابق شکل ۱ و جدول ۲ استفاده شده است. عمق نسبی (Dr) از نسبت عمق جریان در سیلاب‌دشت (h_p) به عمق جریان در کانال اصلی (H) تعریف می‌شود. در همه کانال‌های مورد استفاده در این تحقیق، عرض

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی در کانال‌های مرکب پیچان، تحت اثر تغییر میزان سینوسیتهی کانال پیچان و عمق نسبی بررسی شده است. برای این منظور از شش کانال



شکل ۲. جزئیات هندسی و مقطع مورد سنجش
Fig. 2. Geometric details and section to be measured

روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی جهت رسیدن به جواب، دامنه مسأله به تعداد زیادی اجزای کوچک تقسیم شده و برای هر یک از این اجزاء، مسأله 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 پایه مورد استفاده در مدل FLOW3D معادلات ناویه-استوکس هستند که از پنج 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. در این تحقیق برای بررسی قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی در کانال‌های مرکب پیچان از نرم‌افزار FLOW3D استفاده شده و مدل آشفتگی نیز طوری انتخاب می‌شود که انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی داشته باشد. با توجه به مطالعات انجام شده روی کانال‌های مرکب، مدل آشفتگی RNG دارای انطباق بهتری با داده‌های آزمایشگاهی بوده، لذا در این تحقیق از این مدل آشفتگی در مدل‌سازی استفاده شده است.

همان‌طور که گفته شد، معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی و سه معادله مومنتم در جهت محورهای سه گانه مختصات هستند که به معادلات ناویه-استوکس موسوم‌اند. این معادلات برای جریان آشفته تراکم ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت و در فرم تانسوری با روابط (۲) و (۳) معرفی می‌شوند.

و ارتفاع کانال اصلی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۱۴ متر، شعاع قوس داخلی ۰/۹ متر، شعاع قوس خارجی ۱/۶ متر، طول خط اتصال خم‌ها ۱/۲ متر و عرض کانال مرکب پیچان ۴ متر می‌باشد. پلان و مشخصات هندسی کانال مرکب پیچان مورد استفاده در این تحقیق، در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۲، قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی در مقطع CS1 مورد بررسی قرار گرفته است. در نرم‌افزار Flow3D زبری معادل برای مشخصه ناهمواری بستر به صورت مقیاس طولی و با استفاده از فاکتور k_s تعریف می‌شود. 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 اکرز 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.

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

در این رابطه، k_s ارتفاع معادل زبری (متر)، n ضریب زبری مانینگ (ثانیه بر متر به توان یک سوم) و g تاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه).

۲-۱- مدل‌سازی عددی و معادلات حاکم

معادلات اساسی دینامیک سیالات شامل بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی هستند. با بهره‌گیری از روش دینامیک سیالات محاسباتی، با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر جریان سیال به معادلات جبری، امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با استفاده از

جدول ۳. مشخصات شبکه میدان محاسباتی و ریشه میانگین مربعات خطا سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1

Table 3. Computational field characteristics and root mean square error of depth averaged velocity in section CS1

RMSE (CS1- Dr 0.35) (m/s)	RMSE (CS1-Dr 0.45)(m/s)	منظم ابعاد مش مکعبی	نوع شبکه بندی
۰/۱۱۴	۰/۱۳۱	۳ سانتی متر	درشت (C)
۰/۰۸۷	۰/۱۰۳	۱/۵ سانتی متر	متوسط (M)
۰/۰۵۲	۰/۰۸۱	۱ سانتی متر	ریز (F)
۰/۰۵۱	۰/۰۷۹	۰/۷۵ سانتی متر	خیلی ریز (FS)

از آب باشد $F=I$ خواهد شد. اگر $F=0$ سلول مورد نظر خالی است و اگر $0 < F < I$ ، سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا است [۲۹ و ۲۸].

۲-۲- شبکه بندی میدان جریان و شرایط مرزی

شبکه حل در این مدل متشکل از سلول های مکعبی میباشد. برنامه FLOW3D فقط قابلیت تولید شبکه های منظم (مکعبی) را دارد لذا با توجه به منحنی بودن میدان جریان در نواحی دیواره کانال اصلی کانال مرکب پیچان رودی و رفتار خاص جریان در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب دشت و به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه بندی ریزتری استفاده گردد. ساختن شبکه مناسب برای میدان حل معادلات، دقت محاسبات، همگرایی و زمان محاسبات را تحت تأثیر قرار می دهد.

در کلیه مدل های عددی صورت گرفته، برای حصول نتایج درست و منطقی و کاهش خطا و زمان شبیه سازی، 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 بیشینه این دو پارامتر به ترتیب از ۱/۲۵ و ۳ تجاوز نکند. در تحقیق حاضر پس از بررسی شبکه بندی های مختلف، مطابق جدول ۳ 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 برای مدل عددی به گونه ای انتخاب می شود که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی لیو و همکاران که جهت صحت سنجی از آن استفاده شده 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 نرم افزار FLOW3D معادل

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3)$$

که در آن x_i و x_j محورهای مختصات در سیستم کارتزین، t زمان، ρ چگالی سیال، \bar{P} از متوسط، U_i و U_j سرعت و $u_i u_j$ انوسور تنش رینولدز می باشند.

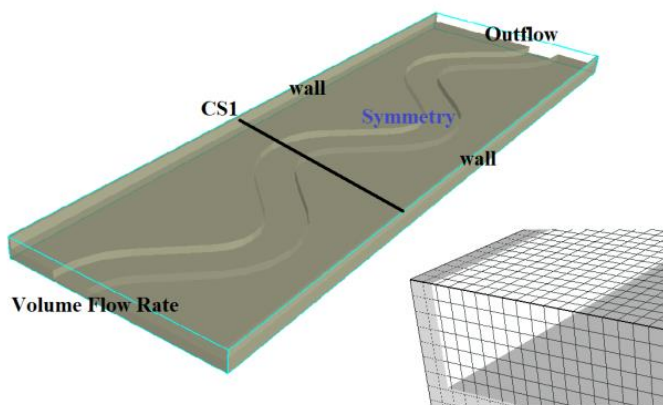
همچنین در این پژوهش، برای پیش بینی تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال (VOF) استفاده شده است. پروفیل سطح آزاد جریان در روش (VOF) با تعریف تابع $F(x, y, z, t)$ که بیانگر نسبت حجم اشغال شده توسط سیال به کل حجم میباشد و از معادلات (۴) و (۵) بدست می آید.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (F A_y V) \right] + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial z} (F A_z W) + \xi \left(\frac{F A_x u}{X} \right) \right] = FDIF + FSOR \quad (4)$$

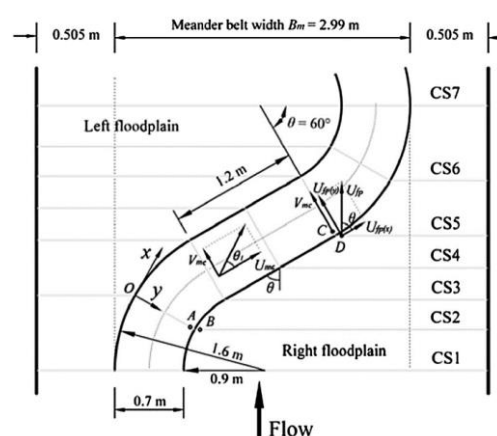
$$FDIF = \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\nu_F A_x \frac{\partial F}{\partial X} + R \frac{\partial}{\partial X} (\nu_F A_y \frac{\partial F}{\partial y})) \right] + \quad (5)$$

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

در این روابط u, v, w مولفه های سرعت، A_x, A_y, A_z جزء سطحی جریان در جهت x, y, z جزء حجمی جریان می باشد. در سیستم مختصات کارتزین R برابر (بوده و \square صفر میباشد. $FSOR$ نرخ زمانی تغییرات جزء حجمی سیال ناشی از منبع جرم در یک سلول محاسباتی است. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر



شکل ۳. شرایط مرزی و مش تعریف شده برای مدل عددی
Fig. 3. Boundary conditions and mesh defined for the numerical model



شکل ۴. نمایی از هندسه کانال مرکب پیچان [۱۷ و ۱۹]
Fig. 4. Geometry view of meandering compound channel

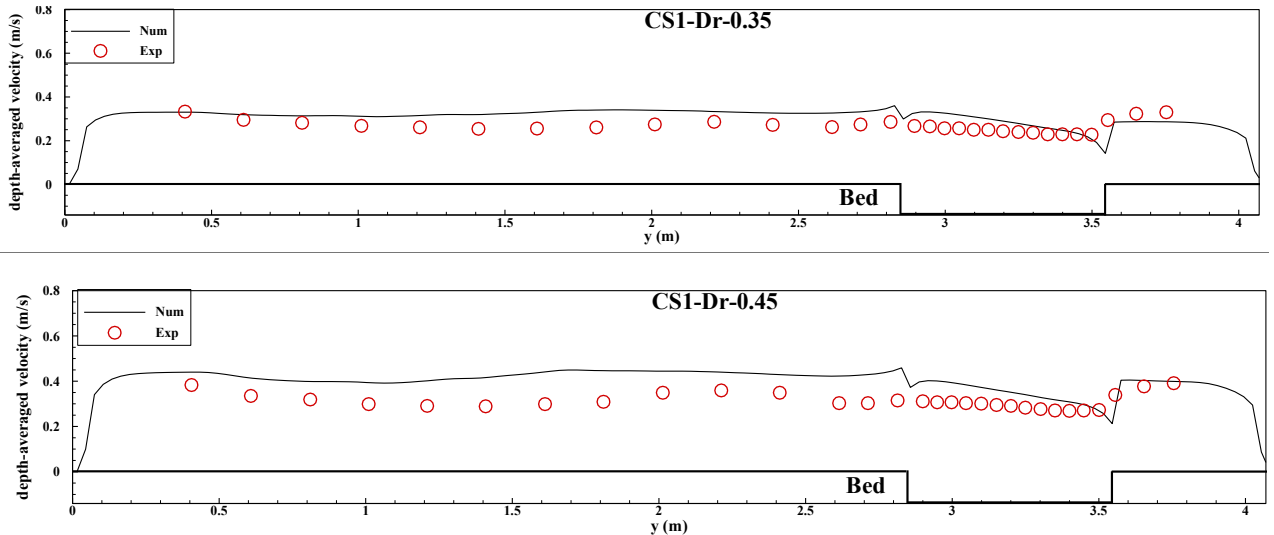
عمق ۱ متر در آزمایشگاه هیدرولیک و مهندسی رودخانه دانشگاه سیچوان چین انجام شده است [۱۷-۱۹]. در این کانال آزمایشگاهی شرایط جریان ME1، ME2 و ME3 (مطابق جدول ۲) مورد بررسی قرار گرفته است. پلان مشخصات هندسی کانال مورد استفاده جهت صحت سنجی در شکل ۴ نشان داده شده است.

با توجه به بررسی قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی در این تحقیق، داده‌های مربوط به سرعت در مقطع CS1 برای صحت‌سنجی استفاده گردید. به منظور بررسی میزان دقت نتایج مدل عددی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی پس از بررسی شبکه‌بندیهای مختلف مطابق جدول ۳، از شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه (۶) برای مقدار سرعت متوسط عمقی استفاده شده است.

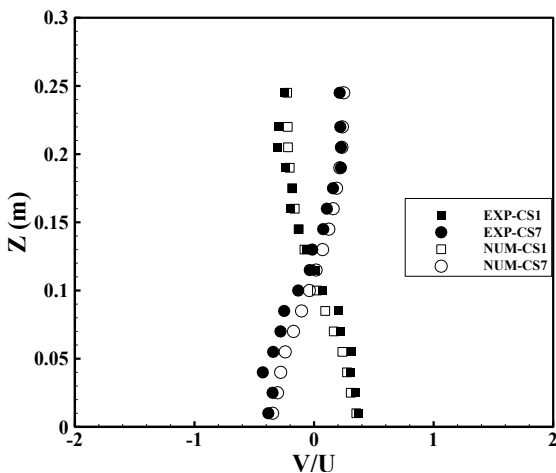
شرایط مرزی Volume Flow Rate (نرخ جریان حجمی) می‌باشد. برای شرایط مرزی پایین دست در شبیه سازی حاضر از شرط مرزی Outflow (خروجی) نرم‌افزار استفاده شد. در این شرط مرزی نیاز به اعمال پارامتر هیدرولیکی خاصی نمی‌باشد. برای اعمال شرایط مرزی در دیوارهای جانبی و کف کانال، از شرط مرزی wall (دیواره) استفاده گردید. کل سطح فوقانی میدان جریان نیز در این مدل‌سازی به صورت شرایط مرزی Symmetry (تقارن) تعریف شد. شرایط مرزی اعمال شده به مدل عددی و شبکه‌بندی در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

۲-۳- صحت‌سنجی نتایج

برای صحت‌سنجی و کنترل نتایج استخراج شده در تحقیق حاضر، از داده های آزمایشگاهی لیو و همکاران (۲۰۱۴) استفاده گردید. این آزمایشها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۳۵ متر، عرض ۴ متر و



شکل ۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی سرعت متوسط عمقی با شبکه بندی نوع F در مقطع CS1 کانال ME1 و ME2
 Fig. 5. Comparison of laboratory and numerical results of depth averaged velocity with type F mesh in CS1 section of ME1 and ME2 channels



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای نسبت سرعت عرضی به طولی در مرکز کانال اصلی مقاطع CS1 و CS7 در کانال ME1
 Fig. 6. Comparison of laboratory and numerical results for the ratio of transverse velocity to longitudinal in the center of the main channel of sections CS1 and CS7 in the channel ME1

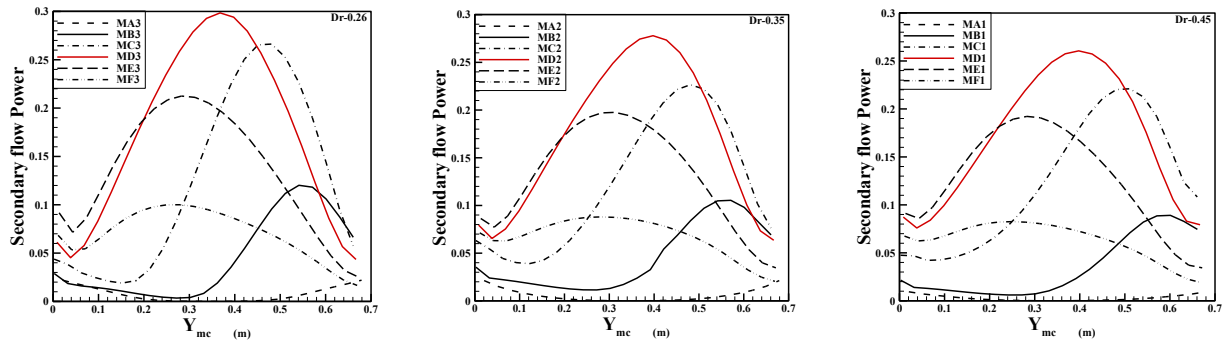
نشان‌دهنده شدت جریان ثانویه است. برای محاسبه قدرت جریان عرضی از مقادیر U و V که بیانگر مؤلفه سرعت در جهت X و Y هستند استفاده می‌شود. برای بررسی این موضوع و کنترل عملکرد صحیح نرم‌افزار، با توجه به داده‌های آزمایشگاهی موجود در تحقیق لیو و همکاران (۲۰۱۴)، نسبت سرعت عرضی به طولی (V/U) در محور عمود بر مرکز کانال اصلی در مقطع CS1 و CS7 محاسبه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - N_i)^2} \quad (6)$$

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

با توجه به نتایج جدول ۳، 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 شبکه بندی 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 شبکه‌بندی نوع F و FS، از شبکه‌بندی نوع F، با توجه به مدت زمان کمتر محاسبات برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. شکل ۵ مقایسه نتایج عددی شبکه‌بندی نوع F با داده‌های آزمایشگاهی سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 را برای عمق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۴۵ نشان می‌دهد. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) برای سرعت متوسط عمقی در مقطع CS1 برای عمق نسبی ۰/۳۵ و ۰/۴۵ به ترتیب ۰/۰۵۲ و ۰/۰۸۱ متر بر ثانیه می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار می‌باشد.

در کانال‌های مرکب پیچان، نسبت سرعت عرضی به طولی



شکل ۷. مقایسه قدرت جریان عرضی در کانال اصلی برای شش کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی متفاوت
Fig. 7. Comparison of secondary flow power in the main channel for six channels with different sinusoidal values at three different relative depths

$$V = (u^2 + v^2 + w^2)^{0.5} \quad (10)$$

در این روابط u ، v و w به ترتیب مولفه های سرعت در جهت x ، y ، z و g شتاب گرانش می باشد. در ادامه قدرت جریان عرضی در کانال اصلی مقطع CS1 برای ۱۸ مورد کانال مطابق جدول ۲ با توجه به تغییر مقدار سینوسیتهی و عمق نسبی محاسبه می شود. برای محاسبه قدرت جریان عرضی از رابطه (۸) استفاده می گردد و به منظور مقایسه مناسب تر، مجموع مقادیر قدرت جریان عرضی در عمق، در عرض کانال اصلی مقطع CS1 محاسبه می شود. تغییرات مجموع مقادیر قدرت جریان عرضی در عمق برای ۶ کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف، در سه عمق نسبی متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است.

همان گونه که در این شکل ها مشاهده می شود با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه قوس مرکز از صفر به ۴۵ درجه (کانال MA به MD)، مقدار قدرت جریان عرضی افزایش یافته و مقدار بیشینه آن از قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می کند. در ادامه همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه قوس مرکزی از ۴۵ به ۷۵ درجه (کانال MD به MF)، مقدار قدرت جریان عرضی کاهش یافته و مقدار بیشینه آن به سمت قوس داخلی میل می کند. با توجه به شکل ۷ مقدار بیشینه قدرت جریان عرضی با افزایش میزان سینوسیتهی در کانال MA به MD به طور متوسط در حدود ۱۴۹ درصد افزایش یافته و در کانال MD به MF در حدود ۶۸ درصد کاهش می یابد.

نمودار بیشینه مقدار قدرت جریان عرضی با توجه به تغییر میزان سینوسیتهی و عمق نسبی در شکل ۸ نشان داده شده است. همان طور

شکل ۶ نتایج آزمایشگاهی و عددی را برای نسبت سرعت عرضی به طولی به صورت مقایسه ای نشان می دهد که بیانگر توانایی بالای این نرم افزار در اندازه گیری سرعت عرضی و طولی می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- قدرت جریان عرضی

به منظور بررسی قدرت جریان عرضی در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر میزان سینوسیتهی و عمق نسبی از روابط شکری (۱۹۵۰) استفاده شده است. شکری با انجام مطالعاتی بر روی جریان در قوس رودخانه، ضمن تشریح مکانیسم جریان ثانویه، جهت بررسی کمی بر روی این پدیده، رابطه (۷) را برای قدرت جریان ثانویه معرفی کرده است [۳۰].

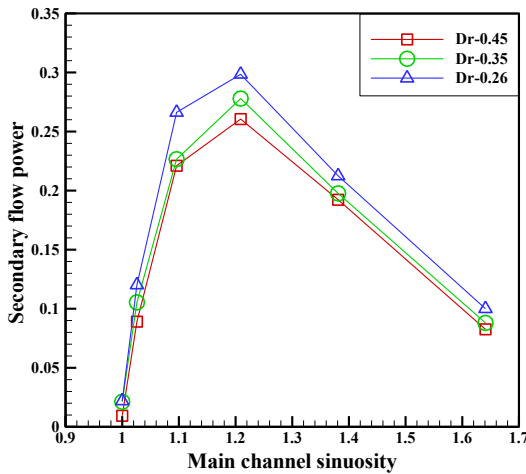
$$S_{yz} = \frac{K_{lateral}}{K_{main}} \quad (7)$$

این معیار در یک مقطع عرضی معین عبارت است از نسبت انرژی جنبشی جریان جانبی به انرژی جنبشی جریان اصلی که با توجه به رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$S_{yz} = \frac{\left(\frac{V_{yz}^2}{2g}\right)}{\left(\frac{V^2}{2g}\right)} \quad (8)$$

مقادیر V و V_{yz} با توجه به رابطه (۹) و (۱۰) در یک مقطع عرضی قابل محاسبه می باشد.

$$V_{yz} = (v^2 + w^2)^{0.5} \quad (9)$$



شکل ۸. بیشینه مقدار قدرت جریان عرضی با توجه به تغییر میزان سینوسیته و عمق نسبی

Fig. 8. Maximum value of secondary flow power due to changes in sinusoidal magnitude and relative depth

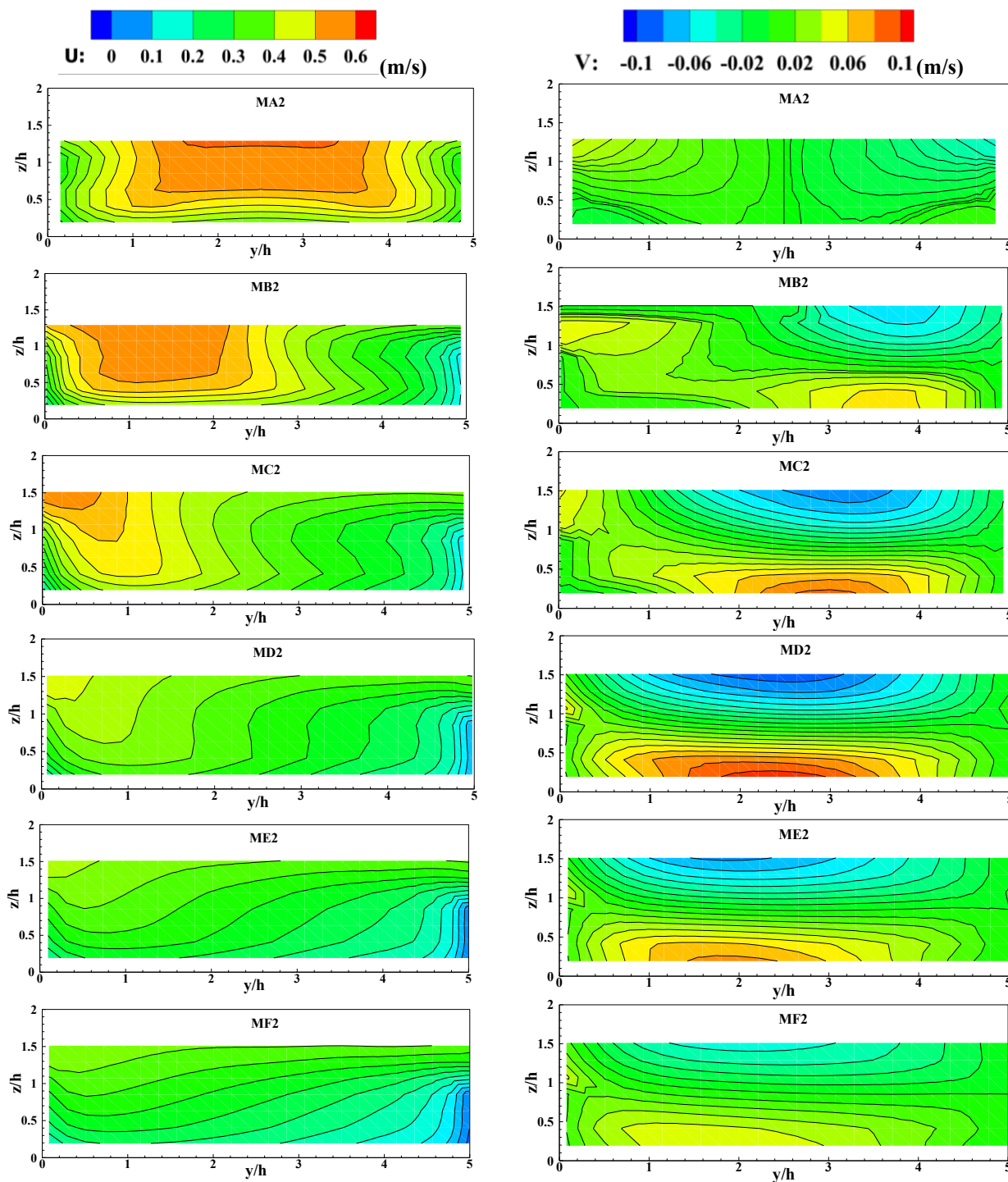
عرضی با افزایش قدرت جریان عرضی همراه می‌باشد. میزان تغییرات قدرت جریان عرضی با توجه به تغییر عمق نسبی برای کانال مرکب مستقیم (MA) در شکل ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد. برای سایر کانال‌ها (MB تا MF) با مقدار سینوسیته و زاویه قوس مرکزی مختلف نیز میزان تغییر قدرت جریان عرضی نسبت به تغییر عمق نسبی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این کانال‌ها مانند کانال MA، با کاهش عمق نسبی، بر میزان قدرت جریان عرضی افزوده می‌شود. بیشترین میزان حساسیت قدرت جریان عرضی نسبت به تغییر عمق نسبی در کانال MA می‌باشد که با افزایش میزان سینوسیته، میزان حساسیت نسبت به تغییر عمق نسبی کاسته می‌شود. به عنوان نمونه در کانال MA میزان افزایش قدرت جریان عرضی با کاهش عمق نسبی از ۰/۴۵ به ۰/۲۶ به میزان ۱۳۴ درصد بوده است؛ در حالی که در کانال ME این میزان افزایش ۱۱ درصد می‌باشد.

۳-۲- قدرت چرخش گردابه‌ها

جریان‌های عرضی در کانال مرکب باعث ایجاد گردابه‌هایی می‌شود که برای ارزیابی آنها می‌توان از معیار قدرت چرخشی گردابه یا Vorticity استفاده نمود. نرخ خالص چرخش پادساعتگرد یک المان به ابعاد $\Delta y * \Delta z$ حول محور X با توجه به شکل ۱۱ به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

که در این شکل مشخص شده است، بیشینه مقدار قدرت جریان عرضی در زاویه ۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی و میزان سینوسیته ۱/۲۰۹ رخ می‌دهد.

افزایش قدرت جریان عرضی با توجه به افزایش میزان سینوسیته، به علت افزایش سرعت عرضی جریان (V) و کاهش سرعت طولی (u) می‌باشد. تغییرات سرعت عرضی جریان (V) و سرعت طولی (u) کانال اصلی با توجه به تغییر میزان سینوسیته در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل فاصله‌های قائم و جانبی (y,z) توسط ارتفاع کانال اصلی ($h=0.14$) بی‌بعد شده و دیواره قائم کانال اصلی در قوس داخلی به عنوان مبدأ تعریف شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار سرعت طولی (u) با افزایش میزان سینوسیته کاهش می‌یابد. مقدار سرعت عرضی جریان (V) نیز با توجه به افزایش انحنا و نیروی گریز تا زاویه ۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی (کانال MD) افزایش یافته و به سمت مرکز کانال اصلی میل می‌کند. در ادامه با افزایش میزان سینوسیته از مقدار سرعت عرضی جریان کاسته شده و به سمت قوس داخلی میل می‌کند. با افزایش مقدار سرعت عرضی، انرژی جنبشی جریان جانبی افزایش یافته و با کاهش مقدار سرعت طولی، انرژی جنبشی جریان اصلی کاهش می‌یابد. لذا با توجه به رابطه (۸)، مقدار قدرت جریان ثانویه با افزایش میزان سینوسیته افزایش می‌یابد. در کانال مرکب مستقیم (MA)، مقدار قدرت جریان عرضی در مرکز کانال اصلی بسیار ناچیز بوده و با نزدیک شدن به سمت سیلاب‌دشت افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود در نزدیکی محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت می‌رسد. با توجه به تفاوت قابل توجه سرعت‌های طولی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت، برقراری جریان عرضی قوی در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت قابل پیش‌بینی می‌باشد. در کانال مرکب مستقیم (MA)، با کاهش عمق نسبی کانال، قدرت جریان عرضی افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان چنین بیان کرد که با کاهش عمق نسبی، سرعت طولی جریان در سیلاب‌دشت‌ها به میزان قابل توجهی کاهش یافته؛ در حالی که کاهش سرعت در ناحیه کانال اصلی در این حد نبوده و لذا اختلاف سرعت طولی در ناحیه سیلاب‌دشت و کانال اصلی با کاهش عمق نسبی، افزایش می‌یابد. افزایش اختلاف سرعت در این دو ناحیه (کانال اصلی و سیلاب‌دشت) باعث افزایش تبادل ممتوم شده و در نتیجه افزایش جریان عرضی را به دنبال خواهد داشت. افزایش جریان

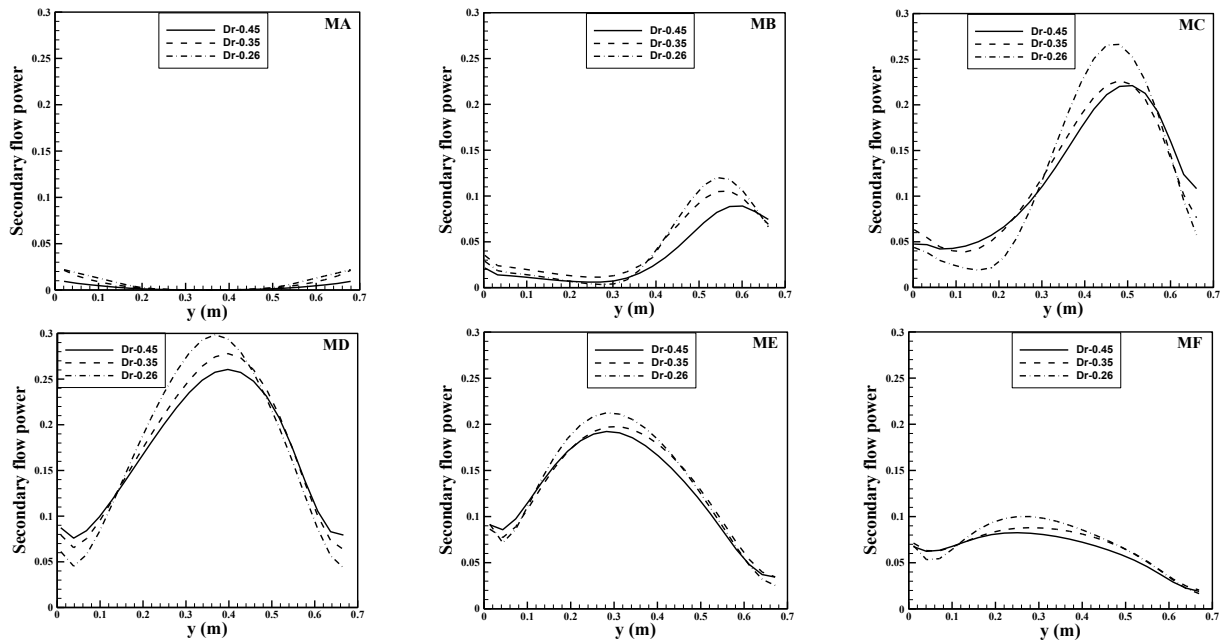


شکل ۹- تغییرات سرعت عرضی جریان (y-velocity) و سرعت طولی (x-velocity) کانال اصلی با توجه به تغییر میزان سینوسیته
 Fig. 9. Changes in transverse velocity (y-velocity) and longitudinal velocity (x-velocity) of the main channel due to changes in sinusoidal rate

به منظور بررسی روند تغییرات پارامتر Vorticity در کانال مرکب پیچان با توجه به تغییر میزان سینوسیته و عمق نسبی، این پارامتر در مقطع عرضی CS1 محاسبه می‌شود. برای محاسبه قدرت چرخشی گردابه‌ها از رابطه (۱۱) استفاده شده است. این رابطه قدرت

$$\bar{\omega}_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (11)$$

در این رابطه، مقدار چرخش حول محور x، w و v مولفه‌های سرعت در جهت محورهای y و z می‌باشند [۲۲].



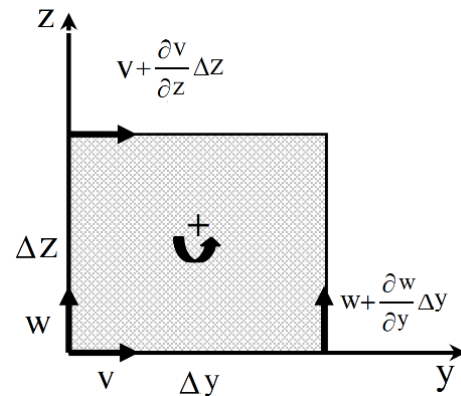
شکل ۱۰. مقایسه قدرت جریان عرضی در کانال اصلی برای هر کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی متفاوت
Fig. 10. Comparison of secondary flow power in the main channel for each channel with different sinusoidal values at three different relative depths

می‌باشد؛ به طوری که در سیلاب دشت سمت راست و نیمی از کانال اصلی جهت چرخش مثبت (پادساعتگرد) و در سیلاب دشت سمت چپ و نیمی از کانال اصلی جهت چرخش منفی (ساعتگرد) و در مرکز کانال اصلی صفر می‌باشد.

به عنوان نمونه، بردار چرخشی گردابه‌های کانال اصلی MA3 تا MF3 به همراه مقدار چرخش گردابه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود در کانال MA بردار چرخشی گردابه‌ها در کانال اصلی متقارن و مخالف هم می‌باشد. با افزایش میزان سینوسیتهی، قدرت چرخش گردابه‌های پادساعتگرد (جهت مثبت) افزایش یافته و چرخش گردابه‌های ساعتگرد (جهت منفی) کاهش یافته و تقارن چرخش بردارها از بین می‌رود؛ به طوری که در کانال MD میزان قدرت چرخش گردابه‌های پادساعتگرد به اوج خود می‌رسد.

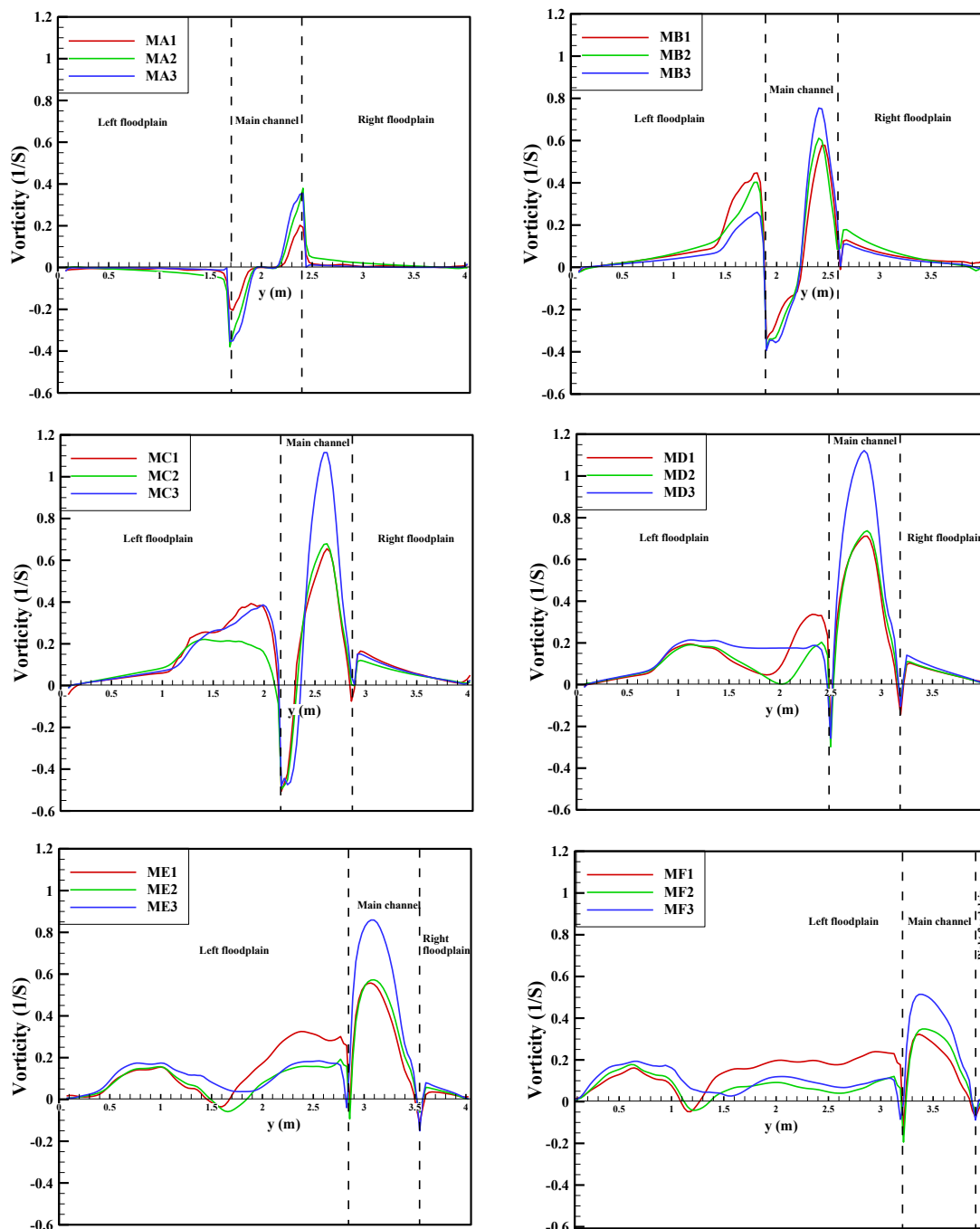
در ادامه برای مقایسه مناسب‌تر، تغییرات قدرت چرخشی گردابه متوسط‌گیری شده در عمق برای ۶ کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف، در سه عمق نسبی متفاوت در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه قوس مرکز از صفر به ۴۵ درجه (کانال MA به MD)، مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها افزایش یافته و مقدار بیشینه



شکل ۱۱. دیاگرام چرخش یک المان حول محور x
Fig. 11. Rotation diagram of an element around the x-axis

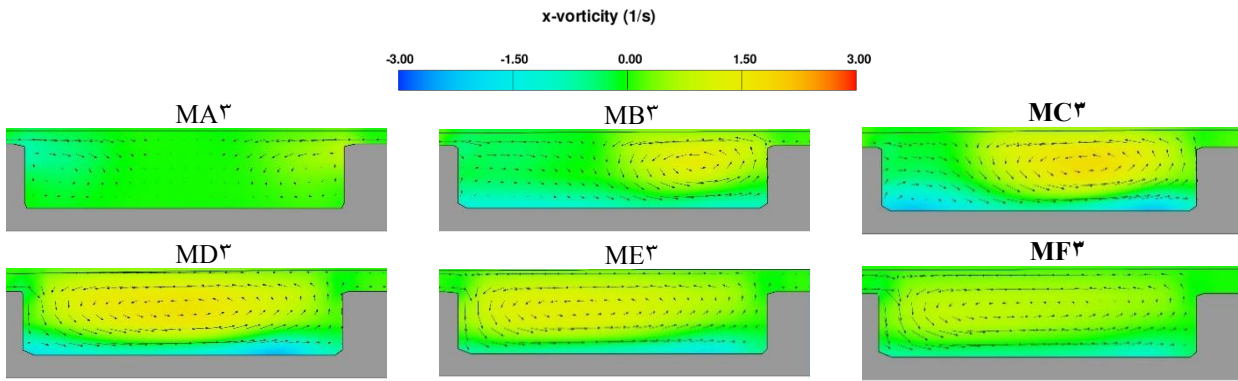
چرخشی گردابه حول محور اصلی جریان را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه مناسب‌تر، قدرت چرخشی گردابه متوسط‌گیری شده در عمق، در عرض مقطع CS1 محاسبه می‌شود. تغییرات قدرت چرخشی گردابه متوسط‌گیری شده در عمق برای کانال‌ها با مقدار سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی متفاوت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در کانال اصلی مقطع مرکب، برای تمام مقادیر سینوسیتهی، با کاهش مقدار عمق نسبی، بر میزان قدرت چرخش گردابه‌ها افزوده می‌شود. در کانال مرکب مستقیم MA قدرت چرخش گردابه‌ها در عرض مقطع CS1 متقارن



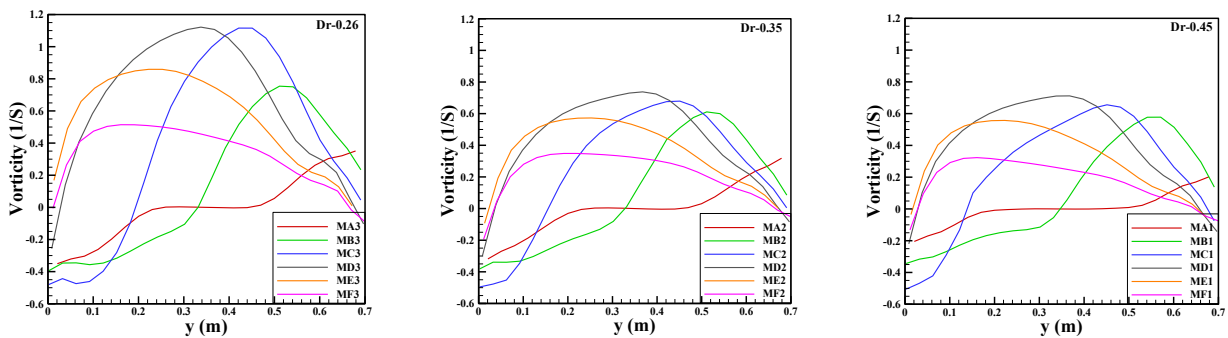
شکل ۱۲. مقایسه قدرت چرخشی گردابه‌ها در مقطع CS1 برای هر کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی متفاوت
Fig. 12. Comparison of the rotational power of vortices in the CS1 section for each channel with different sinusoidal values at three different relative depths

با افزایش میزان سینوسیتهی در کانال MA به MD به طور متوسط در حدود ۱۹۵ درصد افزایش یافته و در کانال MD به MF در حدود ۵۴ درصد کاهش می‌یابد. نمودار بیشینه مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها با توجه به تغییر میزان سینوسیتهی و عمق نسبی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص شده

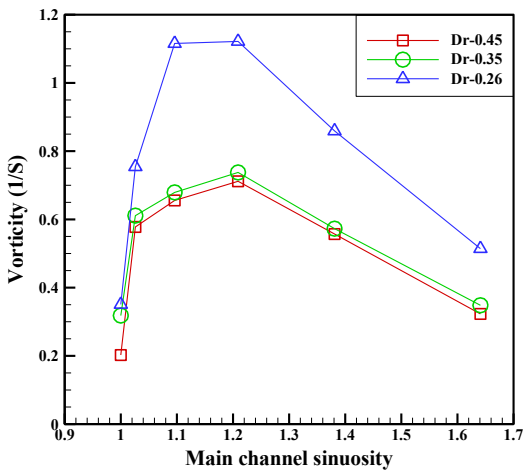
آن از قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند. در ادامه با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه قوس مرکزی از ۴۵ به ۷۵ درجه (کانال MD به MF)، مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها کاهش یافته و مقدار بیشینه آن به سمت قوس داخلی میل می‌کند. با توجه به شکل ۱۴، مقدار بیشینه قدرت چرخشی گردابه‌ها



شکل ۱۳- بردار چرخشی گردابه‌های کانال اصلی MA3 تا MF3 به همراه میزان چرخش گردابه‌ها
 Fig. 13. Vortex rotation vector of MA3 to MF3 main channel with vortex rotation rate



شکل ۱۴- مقایسه قدرت چرخشی گردابه‌ها در کانال اصلی برای شش کانال با مقدار سینوسیتهی مختلف در سه عمق نسبی
 Fig. 14. Comparison of the rotational power of vortices in the main channel for six channels with different



شکل ۱۵- بیشینه مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها با توجه به تغییر میزان سینوسیتهی و عمق نسبی

Fig. 15. Maximum value of rotational power of vortices due to changes in sinusoidal rate and relative depth

درجه (کانال MA به MD)، مقدار قدرت جریان عرضی افزایش یافته و مقدار بیشینه آن از قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند. با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه

است، بیشینه مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها در زاویه ۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی و میزان سینوسیتهی ۱/۲۰۹ رخ می‌دهد. با توجه به نمودار شکل ۱۵، میزان حساسیت تغییر قدرت چرخشی گردابه‌ها در عمق‌های نسبی پایین بیشتر است. به عنوان نمونه برای کانال MD، میزان تغییر قدرت چرخشی گردابه‌ها از عمق نسبی ۰/۴۵ به ۰/۳۵، افزایش به میزان ۴ درصد بوده است؛ درحالی‌که از عمق نسبی ۰/۳۵ به ۰/۲۶، به میزان ۵۲ درصد افزایش را شاهد هستیم.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، قدرت چرخش گردابه‌ها و جریان عرضی به عنوان مولد جریان‌های ثانویه در کانال مرکب پیچان تحت اثر تغییر میزان سینوسیتهی و عمق نسبی با استفاده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشد:

- با افزایش میزان سینوسیتهی و زاویه قوس مرکز از صفر به ۴۵

۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی و میزان سینوسیته $1/209$ رخ می‌دهد.
- در کانال اصلی مقطع مرکب، برای تمام مقادیر سینوسیته، با کاهش مقدار عمق نسبی، بر میزان قدرت چرخش گردابه‌ها افزوده می‌شود.

- در کانال MA بردار چرخشی گردابه‌ها در کانال اصلی متقارن و مخالف هم می‌باشد. با افزایش میزان سینوسیته، قدرت چرخش گردابه‌های پادساعتگرد (جهت مثبت) افزایش یافته و چرخش گردابه‌های ساعتگرد (جهت منفی) کاهش یافته و تقارن چرخش بردارها از بین می‌رود؛ به طوری که در کانال MD، میزان قدرت چرخش گردابه‌های پادساعتگرد به اوج خود می‌رسد.

- میزان حساسیت تغییر قدرت چرخشی گردابه‌ها در عمق‌های نسبی پایین بیشتر است. به عنوان نمونه برای کانال MD، میزان تغییر قدرت چرخشی گردابه‌ها از عمق نسبی $0/45$ به $0/35$ ، به میزان ۴ درصد افزایش بوده است؛ درحالی که از عمق نسبی $0/35$ به $0/26$ ، به میزان ۵۲ درصد افزایش را شاهد هستیم.

مراجع

- [1] M.R. Kornise, Meander Travel in Alluvial Streams, Proceedings of the International Workshop on Alluvial River Problems, Sarita Prakashan Meerut, New Delhi, India, 1980.
- [2] M.H. Rezaei Moghadam, K.A. Khoshdel, Research on Sinuosity of Ahar Chay Meanders in Ozomdel Plain, Varzeghan, East Azerbaijan, Iran. Journal of Geography and Environmental Planning, 20 (1) (2009) 112-101. (In Persian)
- [3] M.H. Rezaei Moghadam, M.R. Sarvati, S. Asghari Sareskanrood, Investigation of geometric alterations of Gezel Ozan River considering Geomorphologic and Geologic parameters, Journal of Geography and Environmental Planning, 23 (2) (2012) 14-1. (In Persian)
- [4] M.H. Rezaei Moghadam, M.R. Nikjoo, H. Maleki, An Investigation of Morphological Changes of Azadroud River Pattern using Geometric Indices, Journal of Geography and Environmental Planning, 28(4)(2018) 16-1. (In Persian)
- [5] G.H. Toebes, A.A. Sooky, Hydraulics of meandering rivers

قوس مرکزی از ۴۵ به ۷۵ درجه (کانال MD به MF)، مقدار قدرت جریان عرضی کاهش یافته و مقدار بیشینه آن به سمت قوس داخلی میل می‌کند. مقدار بیشینه قدرت جریان عرضی با افزایش میزان سینوسیته در کانال MA به MD، به طور متوسط در حدود ۱۴۹۱ درصد افزایش یافته و در کانال MD به MF، در حدود ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

- بیشینه مقدار قدرت جریان عرضی در زاویه ۴۵ درجه‌ای قوس مرکزی و میزان سینوسیته $1/209$ رخ می‌دهد.

- مقدار سرعت طولی (u) با افزایش میزان سینوسیته کاهش می‌یابد و مقدار سرعت عرضی جریان (v) نیز با افزایش میزان سینوسیته تا $1/209$ (کانال MD) افزایش یافته و در ادامه با افزایش میزان سینوسیته تا $1/641$ (کانال ME)، از مقدار سرعت عرضی جریان کاسته می‌شود.

- در کانال مرکب مستقیم (MA)، مقدار قدرت جریان عرضی در مرکز کانال اصلی بسیار ناچیز بوده و با نزدیک شدن به سمت سیلاب‌دشت افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود در نزدیکی محل اتصال کانال اصلی به سیلاب‌دشت می‌رسد.

- با کاهش عمق نسبی بر میزان قدرت جریان عرضی افزوده می‌شود. میزان حساسیت قدرت جریان عرضی نسبت به تغییر عمق نسبی در کانال MA بیشترین مقدار می‌باشد. با افزایش میزان سینوسیته، میزان حساسیت نسبت به تغییر عمق نسبی کاسته می‌شود. به عنوان نمونه در کانال MA، میزان افزایش قدرت جریان عرضی با کاهش عمق نسبی از $0/45$ به $0/26$ به میزان ۱۳۴ درصد بوده است؛ درحالی که در کانال ME، این میزان افزایش ۱۱ درصد می‌باشد.

- با افزایش میزان سینوسیته در کانال MA به MD، مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها افزایش یافته و مقدار بیشینه آن از قوس خارجی فاصله گرفته و به سمت مرکز کانال اصلی حرکت می‌کند. در ادامه با افزایش میزان سینوسیته در کانال MD به MF، مقدار قدرت چرخشی گردابه‌ها کاهش یافته و مقدار بیشینه آن به سمت قوس داخلی میل می‌کند. مقدار بیشینه قدرت چرخشی گردابه‌ها با افزایش میزان سینوسیته در کانال MA به MD، به طور متوسط در حدود ۱۹۵ درصد افزایش و در کانال MD به MF، در حدود ۵۴ درصد کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه قدرت چرخشی گردابه‌ها در زاویه

- [17] C. Liu, N. Wright, X. Liu, K. Yang, An analytical model for lateral depth-averaged velocity distributions along a meander in curved compound channels, *Advances in Water Resources*, 74 (2014) 26–43.
- [18] C. Liu, Y. Shan, X. Liu, K. Yang, Method for assessing stage-discharge in meandering compound channels, *ICE-Water Manage*, 169(1) (2016) 17–29.
- [19] C. Liu, Y. Shan, X. Liu, K. Yang, H. Liu, The effect of floodplain grass on the flow characteristics of meandering compound channels, *Journal of Hydrology*, 542(2016) 1-17.
- [20] Y. Shan, S. Huang, C. Liu, Y. Guo, K. Yang, Prediction of the depth-averaged two-dimensional flow direction along a meander in compound channels, *Journal of Hydrology*, 565(2018) 318–330.
- [21] I.J. Moncho-Estevé, G. Palau-Salvador, M. García-Villalba, Y. Muto, K. Shiono, A Numerical Study of the Complex Flow Structure in a Compound Meandering Channel, *Advances in Water Resources*, 116 (2018) 95–116.
- [22] M. Fazli, M.A. Kaviani, Investigation of Changing the Width of Flood Plains and Discharges on Secondary Flow in Prismatic Compound Channel, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 45(2) (2015) 47-58. (In Persian)
- [23] S. Saeed-Golanik, M. Mohammadi, Numerical Consideration of Hydraulic Aspects of Flow in Meandering Prismatic Compound Channels by Flow3D Model, *Proceedings. 5th International Congress on: Civil Eng, Architecture and Urban Development*, 26-28 December 2017, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [24] S.H. Najafian, H. Younesi, A. Parsaei, H. Torabi-Poudeh, Physical and Numerical Modeling of Flow in Heterogeneous Roughness Non-Prismatic Compound Open Channel, *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17(66) (2016)87-104. (In Persian)
- [25] S.H. Najafian, H. Younesi, A. Parsaei, H. Torabi-Poudeh, Physical and Numerical Modeling of Flow Properties in Prismatic Compound Open Channel with Heterogeneous Roughness, *Irrigation and Drainage Structures with flood plains*, A. S. C. E. J. of Waterways and Harbors, 33(1967) 236–213.
- [6] D.W. Knight, J.D. Demetriou, Flood plain and main channel flow interaction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (8) (1983) 1092–1073.
- [7] G. Kiely, Overbank flow in meandering channels the important mechanisms, *International Conference on River Flood Hydraulics*, (1990) 217–207.
- [8] M.L. Da Silveira e Lorena, Meandering compound flow, Ph.D. Thesis, University of Glasgow. UK, 1992.
- [9] D.A. Ervine, B.B. Willetts, R.H.J. Sellin, M. Lorena, Factors Affecting Conveyance in Meandering Compound Flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 119 (12) (1993) 1399-1383.
- [10] R.H.J. Sellin, 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.
- [11] K. Shiono, Y. Muto, Complex flow mechanisms in compound meandering channels with overbank flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 376 (1998) 261–221.
- [12] J. Spooner, k. Shiono, Compound Meandering Channels with overbank flow, *Water and Maritime Engineering*, 156(3)(2003) 225-233.
- [13] M. de Marchis, E. Napoli, The effect of geometrical parameters on the discharge capacity of meandering compound channels, *Advances in Water Resources*, 31(2008) 1662–1673.
- [14] P. Rameshwaran, X. Sun, K. Shiono, J.H. Chandler, R.H.J. Sellin, *The modelling of compound channel flow: Physical Model of River Black water*, Wallingford. UK, 2008.
- [15] D.R. Shukla, K. Shiono, CFD modelling of meandering channel during floods, *Proc. Inst. Civ. Eng.-Water Manag*, 161(2008)1–12.
- [16] K. Shiono, T.L. Chan, J. Spooner, P. Rameshwaran, J.H. Chandler, The effect of floodplain roughness on flow structures, bedforms and sediment transport rates in meandering channels with overbank flows: Part I, *Journal of Hydraulic Research*, 47(1) (2009) 5–19.

- Numerical modeling of cavitation on spillway's flip bucket, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10 (2016)438-444.
- [29] A. Parsaie, A. Moradinejad, A.H. Haghiabi, Numerical Modeling of Flow Pattern in Spillway Approach Channel, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12(1)(2018)1-9.
- [30] A. Shukry, Flow around Bends in an Open Flume, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 779-751(1950)115.
- Engineering Research, 18(68) (2017)1-16. (In Persian)
- [26] E. Nikubakht, H. Hamidifar, A. Keshavarzi, Effect of Floodplain Non-Submerged Vegetation on Bed Variation in Meandering Compound Rivers, *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 5(2)(2017) 470-461. (In Persian)
- [27] M. Naghavi, M. Mohammadi, GH. Mahtabi, Flow Velocity in Meandering Compound Channel under the Influence of Sinusoidal Change, *Modares Civil Engineering journal*, 19(5)(2019) 219-207. (In Persian)
- [28] A. Parsaie, S. Dehdar-Behbahani, A.H. Haghiabi,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Naghavi, M.A. Mohammadi, Gh. Mahtabi, Transverse Flow Characteristics in the Meandering Compound Channels , Amirkabir J. Civil Eng., 53(8) (2021) 3499-3516.

DOI: [10.22060/ceej.2021.17983.6728](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.17983.6728)



