





دانشکده مهندسی عمران

گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی انتقال رسوب در خم‌ها با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D

لیلا بیطرف

استاد راهنما:

دکتر رامین امینی

استاد مشاور:

دکتر ابراهیم علامتیان

شهریور ۱۳۹۴



دانشکده مهندسی عمران
گروه مهندسی آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی انتقال رسوب در خمها با استفاده از نرم افزار CCHE2D

در تاریخ ۹۴/۰۶/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضا	استاد مشاور	امضا	استاد راهنما
	نام و نام خانوادگی: دکتر ابراهیم علامتیان		نام و نام خانوادگی: دکتر رامین امینی

امضا	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضا	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی گلی		نام و نام خانوادگی: دکتر مهدی عجمی
			نام و نام خانوادگی: دکتر سعید گلپان

تقدیم به پدر و مادرم

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند موفق به اتمام این پایان نامه شدم، وظیفه خود میدانم تا از تمامی کسانی که به هر نحوی در طی مراحل انجام این تحقیق مساعدت نموده اند قدردانی و تشکر کنم.

نخست بر خود لازم می‌دانم تا از اساتید راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر رامین امینی و جناب آقای دکتر ابراهیم علامتیان، به دلیل زحمات و حمایت‌های پیوسته، آموزش‌ها و رهنمودهای ارزشمند، تشویق‌ها و دلگرمی‌هایشان در تمام مدت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از زحمات و کمک‌های بی‌دریغ جناب آقای دکتر محمد رستمی و همکاری صمیمانه ایشان قدردانی و تشکر نمایم.

در انتها از زحمات و الطاف پدر و مادر مهربان و سایر اعضای خانواده که همواره حامی و مشوق بنده در دوران تحصیل بوده‌اند، تشکر نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **لیلا بیطرف** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - گرایش سازه‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه **مدلسازی انتقال رسوب در خم‌ها با استفاده از نرم افزار CCHE2D** تحت راهنمایی دکتر رامین امینی و دکتر ابراهیم علامتیان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام >> دانشگاه شاهرود<< و یا <<shahrood university>> به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

یکی از مسائل قابل توجه در مهندسی رودخانه، آبشستگی، رسوبگذاری و تغییرات توپوگرافی بستر رودخانه در محل قوس می‌باشد. سازوکار و رفتار جریان در قوس رودخانه‌ها در مقایسه با مسیر مستقیم بسیار پیچیده‌تر است. در اثر نیروی گریز از مرکز و اندرکنش آن با گرادیان‌های فشار جانبی ناشی از شیب جانبی سطح آب در قوس، جریان ثانویه شکل می‌گیرد. در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیر یکنواخت سرعت طولی، الگوی جریان خاصی بنام جریان حلزونی تشکیل می‌شود که باعث تغییرات زیادی در الگوی جریان قوس نسبت به جریان در کانال مستقیم می‌شود. این پدیده بر روی توپوگرافی بستر، تغییرات آن و آبشستگی و رسوبگذاری سواحل داخلی و خارجی تأثیر عمده ای دارد. شناخت توپوگرافی بستر در قوسها برای مشخص کردن مواضع آبشستگی و رسوبگذاری به منظور تعیین مناسب ترین موقعیت برای احداث سازه‌های هیدرولیکی نظیر آبشکن، آبگیر و نیز مدیریت ساماندهی رودخانه‌ها ضروری است.

در خصوص بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه‌ها، مطالعات میدانی و آزمایشگاهی فراوانی صورت گرفته ولی به صورت عددی مطالعه چندانی صورت نگرفته است. در حال حاضر مدل‌های عددی مختلفی در زمینه شبیه‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب در کانال‌های روباز توسعه داده شده است. در این پایان نامه، از مدل عددی دو بعدی متوسط گیری شده در عمق CCHE2D استفاده شد. هدف اصلی این پایان نامه، مدلسازی انتقال رسوب در خم‌ها با استفاده از مدل عددی CCHE2D می‌باشد. بدین منظور از نتایج دو مرجع آزمایشگاهی موجود که به بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در کانال‌های مارپیچی سینوسی پرداخته‌اند، جهت صحت سنجی مدل CCHE2D استفاده شد. و همچنین با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D، تأثیر پارامترهای هندسی از قبیل (شعاع انحنای خم، زاویه انحنای خم و شیب طولی کف کانال) و شرایط هیدرولیکی از قبیل (دبی، عمق، سرعت جریان و عدد فرود) بر الگوی جریان و توپوگرافی بستر بررسی شد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی نشان می‌دهد که با کاهش شعاع انحنای خم، تغییرات توپوگرافی بستر، میزان رسوبگذاری و آبشستگی افزایش می‌یابد، با افزایش زاویه انحنای خم، میزان رسوبگذاری و آبشستگی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب طولی کف کانال، میزان آبشستگی و عمق آبشستگی در ساحل خارجی افزایش می‌یابد و فاصله بین دو چاله آبشستگی نیز افزایش می‌یابد، و در مقابل رسوبگذاری در ساحل داخلی کاهش می‌یابد و همچنین انباشت رسوبات به خروجی قوس منتقل می‌گردد.

به منظور بررسی تأثیر شرایط جریان ورودی به خم بر توپوگرافی بستر، شبیه‌سازی‌ها برای مقادیر مختلف نسبت U/U_c (سرعت جریان ورودی و U_c سرعت بحرانی برای حرکت رسوب) در مسیر مستقیم ورودی قوس انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که در حالت $U/U_c < 1$ فقط یک چاله فرسایشی در نزدیکی خروجی قوس به وجود می‌آید. در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ دو چاله فرسایشی در دیواره خارجی نزدیک یکدیگر یا در حالت ادغام شده تشکیل می‌شوند و در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ دو چاله فرسایشی در دیواره خارجی قوس تشکیل می‌شود.

کلمات کلیدی: آبشستگی، توپوگرافی بستر، رسوبگذاری، خم، نرم‌افزار CCHE2D

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست شکل‌ها.....	ن
فهرست جداول.....	ر
فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- اهمیت موضوع.....	۲
۳-۱- اهداف.....	۴
۴-۱- ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم: هیدرولیک جریان در خم.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها.....	۸
۱-۲-۲- دسته‌بندی رودخانه‌ها در پلان.....	۱۰
۲-۲-۲- رودخانه‌های مستقیم.....	۱۰
۳-۲-۲- رودخانه‌های شریانی.....	۱۰
۴-۲-۲- رودخانه‌های پیچانرودی.....	۱۱
۵-۲-۲- عوامل پیچانرودی.....	۱۳
۶-۲-۲- مشخصه‌های مهم جریان در پیچانرودها.....	۱۴
۱-۶-۲-۲- جریان‌های ثانویه.....	۱۴
۲-۶-۲-۲- خیزاب.....	۱۷
۳-۶-۲-۲- اضافه‌افت اصطکاکی در پیچانرودها.....	۱۹
۷-۲-۲- توزیع سرعت و تنش برشی.....	۲۰

۲۱.....	۸-۲-۲-معادلات جریان در خم رودخانه‌ها.....
۲۷.....	۹-۲-۲-فرسایش در خم رودخانه‌ها.....
۳۱.....	فصل سوم: پیشینه و سابقه تحقیق.....
۳۲.....	۱-۳-مقدمه.....
۳۲.....	۲-۳-تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی الگوی جریان در خم رودخانه.....
۳۲.....	۱-۲-۳-تحقیقات خارجی.....
۳۴.....	۲-۲-۳-تحقیقات داخلی.....
۳۵.....	۳-۳-تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی انتقال رسوب در خم رودخانه.....
۳۵.....	۱-۳-۳-تحقیقات خارجی.....
۳۹.....	۲-۳-۳-تحقیقات داخلی.....
۳۹.....	۴-۳-تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب بوسیله نرم افزار CCHE2D.....
۳۹.....	۱-۴-۳-تحقیقات خارجی.....
۴۱.....	۲-۴-۳-تحقیقات داخلی.....
۴۵.....	فصل چهارم: معادلات حاکم بر جریان و رسوب.....
۴۶.....	۱-۴-مقدمه.....
۴۶.....	۲-۴-مشخصات مدل عددی CCHE2D.....
۴۶.....	۱-۲-۴-مقدمه.....
۴۹.....	۲-۲-۴-معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب.....
۴۹.....	۱-۲-۲-۴-معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر میدان جریان آب.....
۴۹.....	۲-۲-۲-۴-مدل‌های آشفتگی.....
۵۰.....	۱-۲-۲-۲-۴-مدل‌های مبتنی بر لزجت گردابه‌ای.....

- ۵۰.....k-ε مدل دو معادله ای ۲-۲-۲-۲-۴
- ۵۰.....معادلات حاکم بر محاسبات انتقال رسوب ۳-۲-۲-۲-۴
- ۵۱.....معادلات انتقال رسوب متوسط گیری شده در عمق ۱-۳-۲-۲-۴
- ۵۲.....روش های شبیه سازی انتقال بار رسوب ۲-۳-۲-۲-۴
- ۵۳.....فرآیند عمومی استفاده از مدل CCHE ۳-۲-۴
- ۵۴.....شبیه سازی عددی ۳-۴
- ۵۴.....صحت سنجی نرم افزار (جریان ماندگار) ۱-۳-۴
- ۵۴.....مشخصات مدل آزمایشگاهی ۱-۱-۳-۴
- ۵۵.....تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی ۲-۱-۳-۴
- ۵۶.....واسنجی مدل عددی ۳-۱-۳-۴
- ۵۸.....نتایج و بحث ۴-۱-۳-۴
- ۵۹.....صحت سنجی نرم افزار (انتقال رسوب) ۲-۳-۴
- ۵۹.....مشخصات مدل آزمایشگاهی ۱-۲-۳-۴
- ۶۰.....تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی ۲-۲-۳-۴
- ۶۱.....واسنجی مدل عددی ۳-۲-۳-۴
- ۶۳.....نتایج و بحث ۴-۲-۳-۴
- ۶۷.....فصل پنجم: شبیه سازی، استخراج نتایج و بحث
- ۶۸.....مقدمه ۱-۵
- ۶۸.....شبیه سازی جریان و انتقال رسوب ۲-۵
- ۶۸.....بررسی تأثیر شعاع انحنا خم بر الگوی جریان و انتقال رسوب ۱-۲-۵
- ۶۸.....مشخصات مدل هندسی ۱-۱-۲-۵
- ۶۸.....تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی ۲-۱-۲-۵
- ۷۰.....بررسی تأثیر زاویه خم بر الگوی جریان و انتقال رسوب ۲-۲-۵

- ۷۰-۲-۲-۱-مشخصات مدل هندسی.....۷۰
- ۷۰-۲-۲-۲-تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی.....۷۰
- ۷۱-۲-۳-بررسی تأثیر شیب طولی کف کانال بر الگوی جریان و انتقال رسوب.....۷۱
- ۷۱-۲-۳-۱-مشخصات مدل هندسی.....۷۱
- ۷۲-۲-۳-۲-تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی.....۷۲
- ۷۳-۲-۴-بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر الگوی جریان و انتقال رسوب.....۷۳
- ۷۳-۲-۴-۱-مشخصات مدل هندسی.....۷۳
- ۷۳-۲-۴-۲-شرایط هیدرولیکی شبیه‌سازی‌ها.....۷۳
- ۷۴-۲-۴-۳-تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی.....۷۴
- ۷۵-۳-نتایج شبیه‌سازی جریان.....۷۵
- ۷۵-۳-۱-بررسی تأثیر شعاع انحنای خم بر الگوی جریان.....۷۵
- ۷۹-۳-۲-بررسی تأثیر زاویه خم بر الگوی جریان.....۷۹
- ۸۳-۳-۳-بررسی تأثیر شیب طولی کف کانال بر الگوی جریان.....۸۳
- ۸۷-۳-۴-بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر الگوی جریان.....۸۷
- ۸۷-۳-۴-۱-نتایج در حالت $U/U_c < 1$۸۷
- ۹۱-۳-۴-۲-نتایج در حالت $1 < U/U_c < 1.1$۹۱
- ۹۴-۳-۴-۳-نتایج در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$۹۴
- ۹۸-۴-نتایج شبیه‌سازی انتقال رسوب.....۹۸
- ۹۸-۴-۱-بررسی تأثیر شعاع انحنای خم بر توپوگرافی بستر.....۹۸
- ۱۰۴-۴-۲-بررسی تأثیر زاویه خم بر توپوگرافی بستر.....۱۰۴
- ۱۱۲-۴-۳-بررسی تأثیر شیب طولی خم بر توپوگرافی بستر.....۱۱۲
- ۱۱۷-۴-۴-بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر توپوگرافی بستر.....۱۱۷
- ۱۱۷-۴-۴-۱-نتایج در حالت $U/U_c < 1$۱۱۷

۱۲۲.....	۵-۴-۲-نتایج در حالت $1 < U/U_c < 1.1$
۱۲۶.....	۵-۴-۳-نتایج در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$
۱۳۲.....	فصل ششم: خلاصه، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۳۴.....	۶-۱-خلاصه
۱۳۵.....	۶-۲-نتیجه‌گیری
۱۳۵.....	۶-۲-۱-شبه سازی جریان
۱۳۵.....	۶-۲-۱-۱-شعاع انحنای خم
۱۳۵.....	۶-۲-۱-۲-زاویه انحنای خم
۱۳۶.....	۶-۲-۱-۳-شیب طولی کف کانال
۱۳۶.....	۶-۲-۱-۴-مشخصات جریان ورودی به خم
۱۳۷.....	۶-۲-۲-انتقال رسوب
۱۳۷.....	۶-۲-۲-۱-شعاع انحنای خم
۱۳۸.....	۶-۲-۲-۲-زاویه انحنای خم
۱۳۹.....	۶-۲-۲-۳-شیب طولی کف کانال
۱۳۹.....	۶-۲-۲-۴-مشخصات جریان ورودی به خم
۱۴۰.....	۶-۳-پیشنهادات
۱۴۱.....	مراجع

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- شکل رودخانه‌ها در پلان.....	۱۲
شکل ۲-۲- مشخصات هندسی یک چم کامل در رودخانه.....	۱۲
شکل ۳-۲- الگوی جریان شکل گرفته در بازه قوسی شکل از کانال روباز.....	۱۵
شکل ۴-۲- نمایی از جریان ثانویه و جریان حلزونی، الف-جریان ثانویه، ب-جریان حلزونی.....	۱۵
شکل ۵-۲- جریان‌های ثانویه طولی و عرضی در خم رودخانه.....	۱۶
شکل ۶-۲- سرعت U و U_{YZ} در خم رودخانه‌ها.....	۱۷
شکل ۷-۲- سیستم مختصات دکارتی.....	۲۳
شکل ۸-۲- تعمیق ژرفای بستر در یک خمیدگی رودخانه.....	۲۸
شکل ۹-۲- آبشستگی در خمیدگی.....	۲۸
شکل ۱-۴- نمایش الگوی جریان و انتقال رسوب در ستون قائم جریان.....	۵۲
شکل ۲-۴- الگوریتم فرآیند عمومی و کلی شبیه‌سازی عددی در مدل CCHE2D.....	۵۳
شکل ۳-۴- کالیبراسیون مدل (سرعت جریان متوسط‌گیری شده در عمق) (الف) زاویه انحراف 30° ، (ب) زاویه انحراف 110° . نقاط نشان‌دهنده داده‌های مشاهداتی و خطوط نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی میباشد.....	۵۷
شکل ۴-۴- ساختار جریان شبیه‌سازی شده در کانال مارپیچی با زاویه انحراف 30° ، بستر ثابت، و دبی ۲.۱ لیتر بر ثانیه، (الف) جریان اولیه، (ب) جریان ثانویه (جریان آب از چپ به راست).....	۵۸
شکل ۵-۴- ساختار جریان شبیه‌سازی شده در کانال مارپیچی با زاویه انحراف 110° ، بستر ثابت، و دبی ۲.۰۱ لیتر بر ثانیه، (الف) جریان اولیه، (ب) جریان ثانویه (جریان آب از چپ به راست).....	۵۹
شکل ۶-۴- مشخصات پلان فلوم آزمایشگاهی.....	۶۰
شکل ۷-۴- کالیبراسیون مدل (اجرای MB-2 ترمینی).....	۶۲

شکل ۴-۸- تغییرشکل بستر در دومین خم کانال مئاندری در زمان‌های الف) ۰.۱ دقیقه، ب) ۷ دقیقه، ج) ۱۴ دقیقه، د) ۲۳ دقیقه، ه) ۳۳ دقیقه، و) ۵۲ دقیقه..... ۶۴

شکل ۴-۹- توزیع مجدد رسوبات در کانال مئاندری در زمان‌های الف) ۰، ب) ۱ ساعت، ج) ۲ ساعت، د) ۳ ساعت، ه) ۴ ساعت، و) ۶ ساعت..... ۶۵

شکل ۵-۱- الگوی جریان در سه شعاع انحنای مرکزی الف) ۲.۴، ب) ۱.۸ و ج) ۱.۲ متر (جریان آب از چپ به راست)..... ۷۶

شکل ۵-۲- تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر..... ۷۷

شکل ۵-۳- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر..... ۷۷

شکل ۵-۴- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر..... ۷۸

شکل ۵-۵- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر..... ۷۸

شکل ۵-۶- تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی‌بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر..... ۷۹

شکل ۵-۷- الگوی جریان در زوایای الف) ۶۰، ب) ۹۰، ج) ۱۲۰ و د) ۱۸۰ درجه (جریان آب از چپ به راست)..... ۸۰

شکل ۵-۸- تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه..... ۸۱

شکل ۵-۹- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه..... ۸۱

شکل ۵-۱۰- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه..... ۸۲

شکل ۵-۱۱- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه..... ۸۲

شکل ۵-۱۲- تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی‌بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه..... ۸۳

شکل ۵-۱۳- الگوی جریان در شیب‌های طولی الف) ۰.۰۰۱۵، ب) ۰.۰۰۲۰ و ج) ۰.۰۰۲۵ (جریان آب از چپ به راست)..... ۸۴

- شکل ۵-۱۴- تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵..... ۸۵
- شکل ۵-۱۵- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵..... ۸۵
- شکل ۵-۱۶- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵..... ۸۶
- شکل ۵-۱۷- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵..... ۸۶
- شکل ۵-۱۸- تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی‌بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵..... ۸۷
- شکل ۵-۱۹- الگوی جریان در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های الف (۲۵، ب (۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)..... ۸۸
- شکل ۵-۲۰- تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۸۹
- شکل ۵-۲۱- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۸۹
- شکل ۵-۲۲- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۰
- شکل ۵-۲۳- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۰
- شکل ۵-۲۴- تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۱
- شکل ۵-۲۵- الگوی جریان در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های الف (۲۵، ب (۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)..... ۹۲
- شکل ۵-۲۶- تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۲

- شکل ۵-۲۷- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۳
- شکل ۵-۲۸- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۳
- شکل ۵-۲۹- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۴
- شکل ۵-۳۰- تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۴
- شکل ۵-۳۱- الگوی جریان در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)..... ۹۵
- شکل ۵-۳۲- تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۶
- شکل ۵-۳۳- تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۶
- شکل ۵-۳۴- تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۷
- شکل ۵-۳۵- تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۷
- شکل ۵-۳۶- تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۹۸
- شکل ۵-۳۷- نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در شعاع انحنای، الف) ۲.۴، ب) ۱.۸ و ج) ۱.۲ متر..... ۱۰۰
- شکل ۵-۳۸- نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شعاع انحنای مختلف در مقاطع، الف) فاصله $B/6$ از دیواره خارجی قوس، ب) محور قوس و ج) فاصله $B/6$ از دیواره داخلی قوس در برابر مقاطع مختلف قوس..... ۱۰۱

- شکل ۵-۳۹-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شعاع انحنای مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۰۳
- شکل ۵-۴۰-نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در زوایای، (الف) ۶۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۱۸۰ درجه..... ۱۰۷
- شکل ۵-۴۱-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در زوایای مختلف، (الف) ۶۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۱۸۰ درجه در برابر مقاطع مختلف کانال..... ۱۰۹
- شکل ۵-۴۲-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در زوایای مختلف، (الف) ۶۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۱۸۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۱۱
- شکل ۵-۴۳-نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در شیب‌های طولی (الف) ۰.۰۰۱۵، (ب) ۰.۰۰۲۰ و (ج) ۰.۰۰۲۵..... ۱۱۳
- شکل ۵-۴۴-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شیب‌های طولی مختلف در مقاطع، (الف) فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس، (ب) محور قوس و (ج) فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس در برابر مقاطع مختلف قوس..... ۱۱۵
- شکل ۵-۴۵-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شیب‌های طولی مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۱۷
- شکل ۵-۴۶-نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۱۱۸
- شکل ۵-۴۷-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $U/U_c < 1$ برای دبی‌های مختلف، (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس..... ۱۲۰

شکل ۵-۴۸-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۲۱

شکل ۵-۴۹-نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی‌های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۱۲۳

شکل ۵-۵۰-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی‌های مختلف، (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس..... ۱۲۴

شکل ۵-۵۱-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی‌های مختلف، (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس . (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۲۶

شکل ۵-۵۲-نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه..... ۱۲۸

شکل ۵-۵۳-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $1.25 < U/U_c < 1.33$ برای دبی‌های مختلف، (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس..... ۱۳۰

شکل ۵-۵۴-نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است)..... ۱۳۱

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۸.....	جدول ۱-۲- مقدار ضریب C در رابطه (۲-۲).....
۳۴.....	جدول ۱-۳- مشخصات مدل فیزیکی در آزمایش وانعلیا.....
۵۵.....	جدول ۱-۴- مشخصات جریان و هندسی آزمایش داسیلور.....
۵۹.....	جدول ۲-۴- مشخصات جریان و هندسی آزمایش ترمینی.....
۶۳.....	جدول ۳-۴- ارزیابی کالیبراسیون مدل در شرایط آزمایش ترمینی.....
۷۴.....	جدول ۱-۵- خلاصه شرایط هیدرولیکی در شبیه‌سازی‌های انجام شده.....

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

رودخانه یکی از سیستم‌های طبیعی است که از دیرباز، ارتباط تنگاتنگی با زندگی بشر داشته است و همواره یکی از اصلی‌ترین منابع تأمین آب می‌باشد. از زمانهای قدیم محل سکونت و فعالیت‌های بشر در اطراف رودخانه‌ها متمرکز بوده است. هرگاه بشر توانسته است که رودخانه را در خدمت خود قرار دهد، احساس رضایت و خوشحالی کرده، اما در زمانی که اینکار عملی نبوده است در اثر نیروی مخرب رودخانه، خسارت‌هایی را متحمل شده و احساس نارضایتی نموده است. فرآیند جریان در رودخانه‌های طبیعی، یکی از پیچیده‌ترین و ناشناخته‌ترین پدیده‌های موجود در طبیعت است. جریان در رودخانه‌ها از نوع آشفته^۱ و کاملاً سه‌بعدی^۲ بوده و در عین حال رودخانه در بستری کاملاً نامنظم جریان دارد که همواره در معرض تغییرات ناشی از فرآیند آبستگی^۳ و رسوبگذاری^۴ است.

۱-۲- اهمیت موضوع

از آنجا که رودخانه‌های طبیعی به ندرت در مسیری مستقیم جریان دارند و معمولاً در الگویی نامنظم مسیر خود را طی می‌کنند، لذا مطالعه جریان در کانال‌های خمیده و قوسی^۵ شکل در بررسی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده است.

رودخانه‌های پیچانرودی را میتوان به عنوان یکی از مواردی دانست که جریان آب بسیار پیچیده در آن برقرار است. با ورود جریان به قوس نیروی گریز از مرکز بر آن اثر می‌کند که این نیرو در راستای شعاع قوس و نیز در جهت عمق بخاطر تغییر سرعت متغیر می‌باشد. نیروی گریز از مرکز موجود در خم باعث ایجاد شیب عرضی در سطح آب می‌شود و باعث می‌شود که سطح آب را در قوس بیرونی بالا برده و در قوس داخلی باعث کاهش عمق می‌شود. این پدیده باعث ایجاد گرادیان فشار جانبی در

1- Turbulent
2- Three-dimensional
3- Scouring
4- Deposition
5- Curved

داخل مقطع خواهد شد. هرگاه گرادبان فشار مزبور بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند، جریانی در جهت عرضی داخل مقطع شکل می‌گیرد که به جریان ثانویه^۱ موسوم است که با نام هایی چون حرکت ثانویه، چرخش ثانویه، جریان عرضی و چرخش عرضی نیز نامیده می‌شود. در اثر این جریان، ذرات موجود در سطح آب بطرف دیواره بیرونی حرکت کرده و ذرات موجود در کف بطرف دیواره داخلی جابجا می‌شوند. در اثر اندرکنش جریان ثانویه با پروفیل غیر یکنواخت سرعت طولی، الگوی جریان خاصی بنام جریان حلزونی^۲ تشکیل می‌شود که باعث تغییرات زیادی در الگوی جریان قوس نسبت به جریان در کانال مستقیم می‌شود. این جریان حلزونی اصلی‌ترین نقش را بر روی توپوگرافی بستر، تغییرات آن و نیز چگونگی توزیع تنش برشی در کف کانال و آبستگي و رسوبگذاري سواحل داخلی و خارجی ایفا می‌کند. مسیر حرکت ذرات سیال و رسوب بستر به قدرت جریان حلزونی در کانال بستگی دارد.

امروزه با توسعه امکانات نرم‌افزاری و بهره‌گیری از فناوری‌های جدید، انجام سنجش‌های میدانی، بررسی‌های دقیق آزمایشگاهی و پردازش سریع اطلاعات، شناخت هرچه بهتر فرآیند جریان و انتقال رسوب^۳ در رودخانه‌ها فراهم گردیده و با تکیه بر تجارب ارزنده دهه‌های اخیر زمینه لازم برای معرفی روش‌های مناسب مدلسازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب رودخانه‌ها محقق شده است.

بررسی درازمدت و یا حتی کوتاه‌مدت تغییرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی در رودخانه‌ها بدون استفاده از مدل‌های ریاضی امری تقریباً غیرممکن می‌باشد. از طرفی مطالعه این‌گونه تغییرات با استفاده از مدل‌های فیزیکی مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار بالایی می‌باشد که در بسیاری از موارد از لحاظ اقتصادی توجیه‌چندانی ندارد. با توجه به اهمیت تغییرات ریخت‌شناسی و رسوبی رودخانه‌ها در مسیر اصلی و یا پیچان‌رودها، محققین و مهندسين را بر آن داشت که با استفاده از مدل‌های ریاضی به بررسی و پیش‌بینی این تغییرات بپردازند. به همین خاطر هر روزه شاهد این می‌باشیم که مدل‌های

1- Secondary Flow
2- Spiral Flow
3- Sediment Transport

مختلف با توانمندی‌های بسیار بالا توسعه داده می‌شوند که هر کدام در نوع خود از روشهای عددی خاص جهت تحلیل فرآیندهای هیدرولیکی و رسوبی استفاده می‌کنند. در حال حاضر مدل‌های مختلفی در زمینه شبیه‌سازی هیدرودینامیک و انتقال رسوب در کانال‌های روباز توسعه داده شده است که از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل CCHE2D اشاره نمود. این مدل یک مدل دوبعدی^۱ متوسط‌گیری شده در عمق^۲ می‌باشد که برای هر دو حالت جریان ماندگار^۳ و غیرماندگار^۴ قابل است. از روش المان مؤثر^۵ (نوعی از روش المان محدود^۶) و حجم کنترل برای حل معادلات حاکم و از روش سطوح خشک برای شبیه‌سازی جریان‌های غیرماندگار و حرکت مرزهای آن استفاده می‌کند.

۱-۳- اهداف

آنچه مسلم است در رابطه با بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در رودخانه در مسیر مستقیم تحقیقات فراوانی انجام شده است. اما بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه به صورت میدانی و آزمایشگاهی کم و به صورت عددی به ندرت انجام شده است. لذا هدف از این مطالعه، بررسی و مدل‌سازی عددی جریان در خم به همراه رسوب می‌باشد که با توجه به توانایی مدل CCHE2D در این زمینه، مدل‌سازی با این نرم‌افزار انجام می‌شود. اهداف مطالعه حاضر عبارتند از:

- ۱- مدل‌سازی جریان همراه با رسوب در خم و نحوه توزیع رسوب در آن
- ۲- بررسی تأثیر شعاع انحنای خم در الگوی رسوبگذاری در آن
- ۳- تحقیق در رابطه با تأثیر زاویه خم در الگوی رسوبگذاری در آن
- ۴- بررسی اثر مشخصات جریان ورودی به خم در الگوی رسوبگذاری در خم
- ۵- بررسی تأثیر شیب طولی کانال در موارد فوق

1- Two-Dimensional
2- Depth-Averaged
3- Steady
4- Unsteady
5- Efficient Element Method
6- Finite Element Method

۱-۴- ساختار پایان نامه

پس از بیان ضرورت و اهمیت بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه‌ها و اهداف تحقیق حاضر در این فصل، در فصل دوم، هیدرولیک جریان در خم بررسی می‌گردد. در فصل سوم پیشینه تحقیق در مورد بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم‌ها ارائه می‌شود و در ادامه به مروری از مطالعات انجام شده در زمینه‌های مختلف، توسط نرم افزار CCHE2D پرداخته می‌شود. سپس در فصل چهارم، مشخصات مدل عددی CCHE2D معرفی و سپس مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی بیان شده و با بهره‌گیری از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی به صحت‌سنجی مدل عددی جریان و رسوب و ارزیابی نتایج پرداخته می‌شود. در فصل پنجم به شبیه‌سازی عددی جریان در خم به همراه رسوب با استفاده از مدل CCHE2D به منظور بررسی اهداف این مطالعه پرداخته می‌شود. در ادامه مراحل مختلف تحقیق ارائه شده و در مورد هر مرحله توضیح داده می‌شود. و نتایج حاصل از انجام تحقیق بیان می‌شود و نتایج مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. و در انتها، در فصل ششم، نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه می‌شود.

فصل دوم

هیدرولیک جریان در خم

۲-۱- مقدمه

فصل حاضر مروری بر هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها است. در این فصل کلیاتی در مورد هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها و شکل رودخانه‌ها در پلان بیان می‌گردد و مشخصه‌های مهم جریان در خم رودخانه‌ها شامل جریان‌های ثانویه، خیزاب، اضافه افت اصطکاک، توزیع سرعت و تنش برشی کف در آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها

ارزیابی مقادیر مشخصه‌های جریان نظیر سرعت، عمق، دبی در آبراهه و سیلابدشته^۱ و رفتار فیزیکی جریان رودخانه‌ها در شرایط طبیعی و یا تحت تأثیر کارهای بشری اصول هیدرولیک رودخانه‌ها را به وجود می‌آورد. پیش‌بینی رفتار جریان و تعیین مقادیر مشخصه‌های جریان به خاطر ماهیت سه بعدی^۲ و پیچیده آن، نوسانات سرعت و آشفتگی، تغییرات زبری، هندسه نامنظم رودخانه در پلان و مقاطع عرضی، تغییرات شیب، عرض و عمق به سادگی امکان‌پذیر نبوده و شناخت ماهیت جریان و فرآیند های رودخانه‌ای پیش نیاز تمامی تجزیه و تحلیل‌ها می‌باشد [۱].

جریان در رودخانه‌ها عموماً زیربحرانی و متلاطم^۳ است و در حالت‌های سیلابی جریان غیردائم^۴ و در حالت های عادی می‌توان جریان را دائمی^۵ در نظر گرفت [۲]. فرآیندهای حاکم بر رودخانه به دو دسته تقسیم می‌شوند که ارتباط تنگاتنگی با هم دارند. این دو فرآیند عبارتند از: (۱) حرکت جریان آب در رودخانه‌ها که با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت به رابطه ریاضی تعمیم می‌یابد، و (۲) حمل رسوب و فرسایش در رودخانه‌ها که با استفاده از تئوری‌های موجود برای تنش‌های برشی، نیروهای برشی و معادله پیوستگی جریان مواد جامد بیان می‌گردد، و روابط زیادی برای این منظور

1- Flood-Plains
2- Three Dimension
3- Turbulance
4- Unsteady
5- Steady

توسط محققین مختلف ارائه شده است. با وجود ارتباط تنگاتنگ بین دو فرآیند بالا، معمولاً فرآیند حرکت آب و ماهیت آن بیشتر مورد توجه بوده و از طریق شبیه‌سازی جریان آب در رودخانه‌ها و تلفیق آن با روابط ارائه شده توسط محققین در زمینه حمل رسوب، فرآیند تغییرات رودخانه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳].

ابزار مورد استفاده محققین در این راستا سه قسم است [۳]:

الف) مشاهدات صحرایی و تجربیات، که اندوخته با ارزشی برای مهندسی و محققین می‌باشد. از آنجا که دانش انسان در مورد بسیاری از پدیده‌های موجود در طبیعت ناقص است، تجربیات و مشاهدات صحرایی برای تحلیل علت پدیده‌ها و تفسیر آنها مفید خواهد بود و از سوی دیگر پارامترهای تجربی موجود در روابط و معادلات هیدرولیک نیز به این بعد از تحقیقات و بررسیها قوت می‌بخشد.

ب) مدل‌های فیزیکی نیز از ابزارهای مناسبی جهت مشاهده، تحقیق و بررسی پدیده‌های مختلف در هیدرولیک رودخانه از جمله الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه‌ها می‌باشد. استفاده از تجهیزات مناسب اندازه‌گیری و مشاهده الگوی جریان برای یک قسمت از یک خم رودخانه، تعیین توزیع سرعت، مقایسه سرعتها در نقاط مختلف و تجزیه و تحلیل مقادیر آنها برای پیشگویی‌ها و یا رسیدن به یک رابطه کلی حائز اهمیت است.

پ) روشهای عددی و مدل‌های ریاضی در تحلیل هیدرولیک رودخانه‌ها با رشد و پیشرفت کامپیوترها کاربرد فراوانی یافته‌اند و نتایج قابل قبولی از آنها بدست می‌آید، بطوریکه در بسیاری از موارد مدل‌های کامپیوتری بجای روشهای دیگر استفاده می‌شود.

بطور کلی هنوز در بسیاری از مسائل پیچیده مطالعات رودخانه‌ای استفاده همزمان از سه روش فوق کامل‌ترین راه جهت پیش‌بینی رفتار جریان به ویژه در خم رودخانه‌ها می‌باشد [۳].

۲-۲-۱- دسته‌بندی رودخانه‌ها در پلان

فرآیندهای حرکت آب و حمل رسوب در رودخانه‌ها به خاطر تغییر و تحول در بستر و در کناره‌ها شکلهای بسیار متنوعی برای رودخانه‌ها در پلان بوجود می‌آید و در رودخانه‌ها اغلب بصورت مسیره‌های پر پیچ و خم و نامنظم جاری هستند. علاوه بر فرآیندهای فوق‌الذکر مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه و تشکیلات زمین‌شناسی نیز در تغییرات شکل و پلان رودخانه سهیم هستند. از نظر شکل پلان رودخانه‌ها به سه دسته کلی رودخانه‌های مستقیم^۱، شریانی^۲ و پیچانرودی^۳ تقسیم می‌شوند. شکل (۱-۲) تقسیم بندی رودخانه‌ها در پلان را نشان می‌دهد.

۲-۲-۲- رودخانه‌های مستقیم

این حالت عموماً در بازه‌های کوتاه دیده می‌شود و قابلیت تغییر به حالت شریانی یا پیچانرودی در صورت ایجاد هر گونه ناهماهنگی در مقطع را دارد. خط القعر در بازه‌های مستقیم رودخانه‌ها معمولاً یک مسیر موج سینوسی ملایم را به طور انتزاعی در کف رودخانه تشکیل می‌دهند.

۲-۲-۳- رودخانه‌های شریانی

به رودخانه‌هایی که در مسیر خود شاخه شاخه شده و جزیره‌های رسوبی در وسط شاخه‌ها بوجود می‌آید، رودخانه‌های شریانی می‌گویند. علت دقیق شریانی شدن رودخانه‌ها مشخص نیست، با ایجاد ناپایداری در قسمت‌های کم عمق و تشکیل جزیره در این قسمت‌ها رودخانه شاخه شاخه می‌گردد. با وقوع سیلابهای شدید در این رودخانه‌ها الگوی شریانی جدیدی به وجود می‌آید [۴].

1- Straight Rivers
2- Braided Rivers
3- Meandering Rivers

۲-۲-۴- رودخانه‌های پیچانرودی

عموماً در قسمت میانی طول رودخانه‌ها و شیب‌های کم، رودخانه بصورت یک موج کامل سینوسی دیده می‌شود، که به آن چم^۱ گفته می‌شود. برای بیان مشخصات هندسی رودخانه‌های پیچانرودی طبق شکل (۲-۲) پارامترهای زیر تعریف می‌شود:

خط‌القعر: اگر عمیق‌ترین نقاط بستر رودخانه در طول یک مسیر بهم وصل شوند، خطی بدست می‌آید، که به آن خط‌القعر می‌گویند.

محور رودخانه: پاره‌خطهایی که دو دیواره رودخانه را در سطح تماس با آب و عمود بر جهت اصلی جریان بهم وصل می‌کنند، بیانگر عرض رودخانه برای دبی خاصی می‌باشند اگر وسط کلیه پاره‌خطها بهم وصل شود، محور رودخانه بدست می‌آید.

فاصله قوسی: طول محور رودخانه در یک حلقه چم، از یک نقطه عطف تا نقطه عطف انحنای بعدی بنام فاصله قوسی خوانده می‌شود.

طول موج: فاصله افقی بین دو نقطه عطف را در پلان هر حلقه چم، طول موج آن می‌گویند.

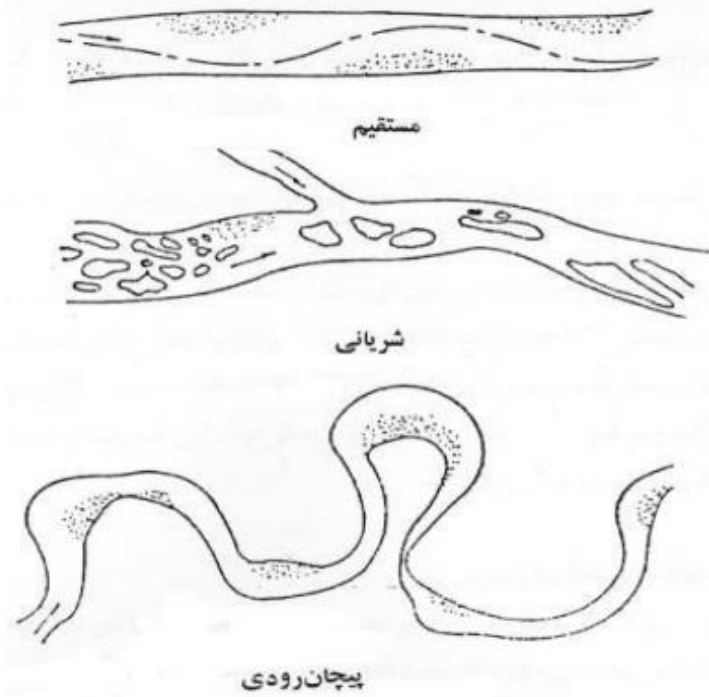
شعاع متوسط انحنای: عبارتست از شعاع دایره‌ای که بر قسمت عمده انحنای خم، مماس باشد.

عرض کمربند چم: حداکثر فاصله عمودی بین انحنای بیرونی یا دوقوس متوالی را عرض کمربند می‌نامند.

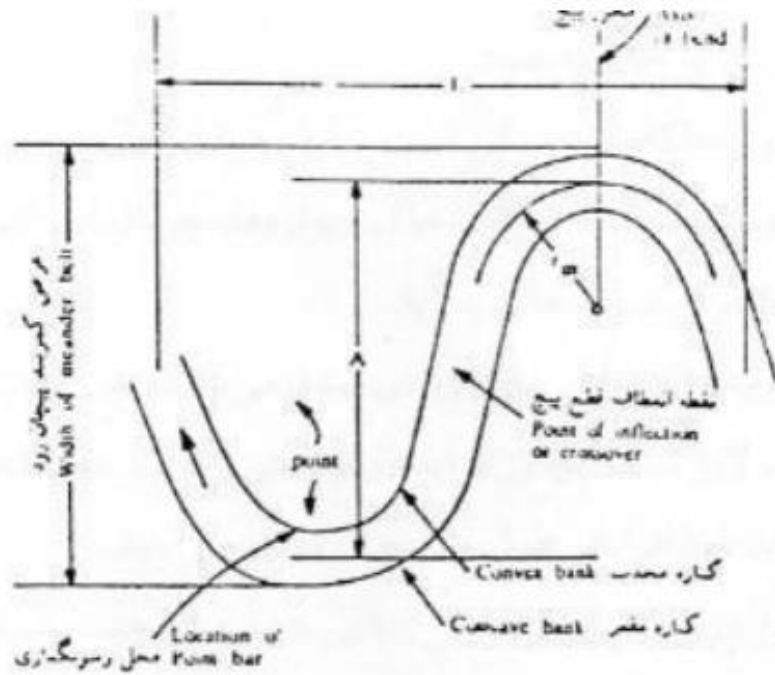
قطعه پیچ محور جریان: قسمتی از مسیر نسبتاً مستقیم بین دو انحنای می‌باشد.

ضریب پیچشی^۲: عبارتست از نسبت طول آبراهه به طول مسیر مستقیم آن که عملاً طول آبراهه همان طول بستر عادی برای دبی کم و طول مستقیم، طول بستر سیلابی برای دبی زیاد است که از مسیر گلوگاه چم عبور می‌نماید. در این صورت می‌توان این ضریب را مساوی با نسبت شیب بستر عادی به شیب بستر سیلابی دانست.

1- Meander
2- Sinosity



شکل (۱-۲) شکل رودخانه ها در پلان



L = meander length (wave length) طول پیچان رود یا طول موج

A = amplitude دامنه نوسانات

r = mean radius of curvature شعاع متوسط انحناء

شکل (۲-۲) مشخصات هندسی یک چم کامل در رودخانه

۲-۲-۵- عوامل پیچانرودی

در مورد سازوکار پیچانرودی و فرآیند شروع آن محققین زیادی مطالعه نموده و تئوریهای مختلفی برای تشکیل پیچانرودی ارائه نموده‌اند، ولی هنوز هم عامل پیچانرودی بطور کامل روشن نیست [۵]. در یک جمع‌بندی کلی از نظریه‌ها و تئوریهای ذکرشده توسط محققین مختلف عامل پیچانرودی را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

۱- تخریب موضعی دیواره‌ها که خود ممکن است بدلیل حرکت حلزونی، تنش برشی جریان، عدم

کفایت مقاومت برشی دیواره‌ها، اشباع شدن خاک دیواره‌ها پدید آید.

۲- عامل شیب طولی رودخانه، دلیل پیچانرودی شدن می‌باشد. بدین ترتیب که چون شیب از

حدی که برای انتقال ذرات لازم است تجاوز نماید، وضعیتی رخ می‌دهد که مسیر رودخانه

بصورت پیچان رودی در می‌آید و با افزایش طول، شیب آن کاهش می‌یابد.

۳- حرکت دورانی زمین در تمایل به فرسایش جانبی دیواره در جهت شرقی-غربی و یا غربی-

شرقی در برخی از رودخانه‌ها با شیب طولانی و بسیار ملایم موجب پیچانرودی است.

۴- تأثیر نیروی گریز از مرکز در افزایش ارتفاع سطح آب در کناره خارجی رودخانه عامل گسترده

پیچانرودی است.

۵- اتلاف انرژی مازاد بر تداوم جریان و یا اتلاف آن در بستر رودخانه برای رسیدن به حالت

تعادل.

تعدادی از محققین معتقدند که راه طبیعی اتلاف انرژی اضافی برای حفظ تعادل در رودخانه‌ها که در

اثر آن تغییر جریان و یا دبی مواد رسوبی ایجاد می‌شود با افزایش طول رودخانه بصورت پیچانرودی و

کاهش شیب طولی آن صورت می‌گیرد [۵].

۲-۲-۶- مشخصه‌های مهم جریان در پیچان‌رودها

هنگام عبور جریان از مسیرهای انحنا دار وجود نیروی گریز از مرکز مزید بر علت شده و روی مشخصه های جریان اثر می‌گذارد. اثرات مهم پیچان‌رودی یا انحنای جریان روی هیدرولیک جریان شامل: تشدید جریانهای ثانویه، خیزآب، تغییر توزیع سرعت فرسایش کناره‌های خارجی و رسوبگذاری در کناره‌های داخلی و اضافه افت اصطکاکی در خم رودخانه می‌باشد. مشخصات هندسی جریان شامل توپوگرافی بستر، شعاع انحنای عرض و عمق جریان، در ضعف و قوت این پدیده‌ها بسیار مؤثر می‌باشند [۵]. فرسایش کناره‌های خارجی رودخانه و رسوبگذاری در کناره‌های داخلی فرآیند پیچیده و مهمی می‌باشد که خارج از بحث این مطالعه می‌باشد.

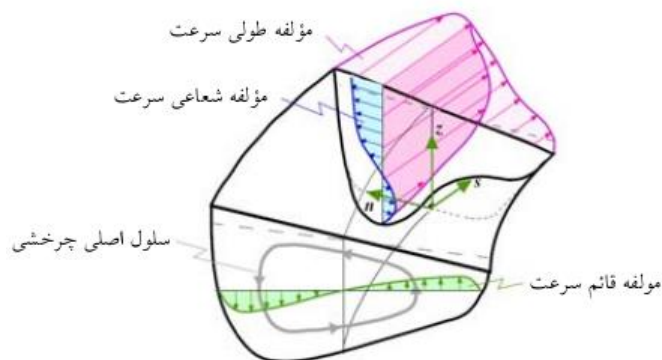
۲-۲-۶-۱- جریانهای ثانویه

جریانهای ثانویه و یا حلزونی^۱ به حرکت مارپیچی ذرات آب که در جهت کلی جریان آب حرکت می‌نماید، گفته می‌شود. و چنین استنباط می‌گردد که علاوه بر مؤلفه کلی سرعت در جهت عمود بر سطح مقطع جریان مؤلفه‌های دیگری از سرعت وجود دارند که بر مقطع جریان عمود نیستند [۶]. در مسیرهای مستقیم جریانهای ثانویه بخاطر وجود تنشهای برشی جداره‌های آبراهه بوجود می‌آیند ولی جریانهای ثانویه در خم رودخانه‌ها از اختلاف سرعت در سطح آب و کف بستر، نیروی گریز از مرکز و اصطکاک دیواره‌های بستر و کناره‌ها تولید می‌شوند [۵].

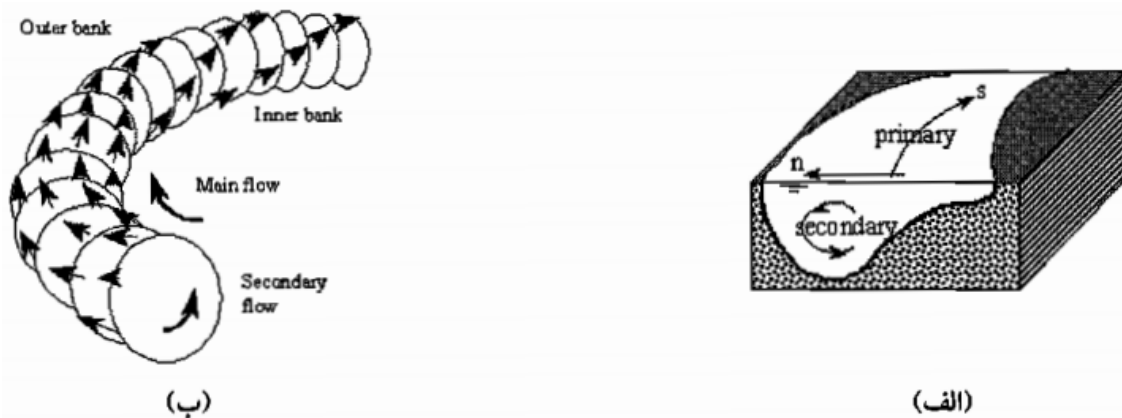
مکانیزم جریان در قوس رودخانه‌ها نسبت به مسیرهای مستقیم پیچیدگی فراوانی دارد. از جمله مشخصات بارز جریان در قوس‌ها وجود جریانهای حلزونی است که از اندرکنش جریان ثانویه و اینرسی جریان به وجود می‌آید. جریان ثانویه نیز به نوبه خود از عدم تعادل موضعی بین نیروی گریز از مرکز و نیروی فشاری ناشی از بالافتادگی تراز سطح آب در قوس خارجی، به وجود می‌آید. شکل (۲-۳)

1- Spiral Flow

الگوی جریان ثانویه شکل گرفته در بازه قوسی شکل از کانال روباز را نشان می‌دهد. به بیان دیگر به علت اینکه سرعت جریان در لایه‌های سطحی نسبت به لایه‌های تحتانی بیشتر است، لذا شتاب جانبی مرکز موجب می‌شود که ذرات جریان در قسمت‌های فوقانی به سمت ساحل خارجی رانده شوند. با توجه به ارضای قانون پیوستگی، لازم است ذرات جریان در لایه‌های پایینی به سمت قوس داخلی حرکت کرده و ذرات رسوب در کف بستر را به سمت قوس داخلی منتقل کند. بنابراین با قرارگیری ذرات جریان در مسیر قوسی، یک جریان عرضی شکل می‌گیرد که در بستر به سمت قوس داخلی و در سطح به سمت قوس خارجی است. از ترکیب این جریان عرضی با جریان طولی، جریان حلزونی مانند به وجود می‌آید. این جریان حلزونی نقش بسیار مؤثری در شکل‌دهی عرضی بستر - که وابسته به تنش برشی کف در راستای عرضی است - ایفا می‌کند. شکل (۲-۴) جریان ثانویه و حلزونی را در مسیر قوسی شکل نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) الگوی جریان شکل گرفته در بازه قوسی شکل از کانال روباز [۷]



شکل (۲-۴) نمایی از جریان ثانویه و جریان حلزونی، الف-جریان ثانویه، ب-جریان حلزونی [۸]

قدرت جریان ثانویه (S_{yz}) بصورت نسبتی از انرژی جنبشی متوسط حرکت جانبی^۱ به انرژی جنبشی جریان در مقطع عرضی تعریف می‌شود. از آنجا که انرژی جنبشی جریان با توان دوم سرعت رابطه دارد. قدرت جریان ثانویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

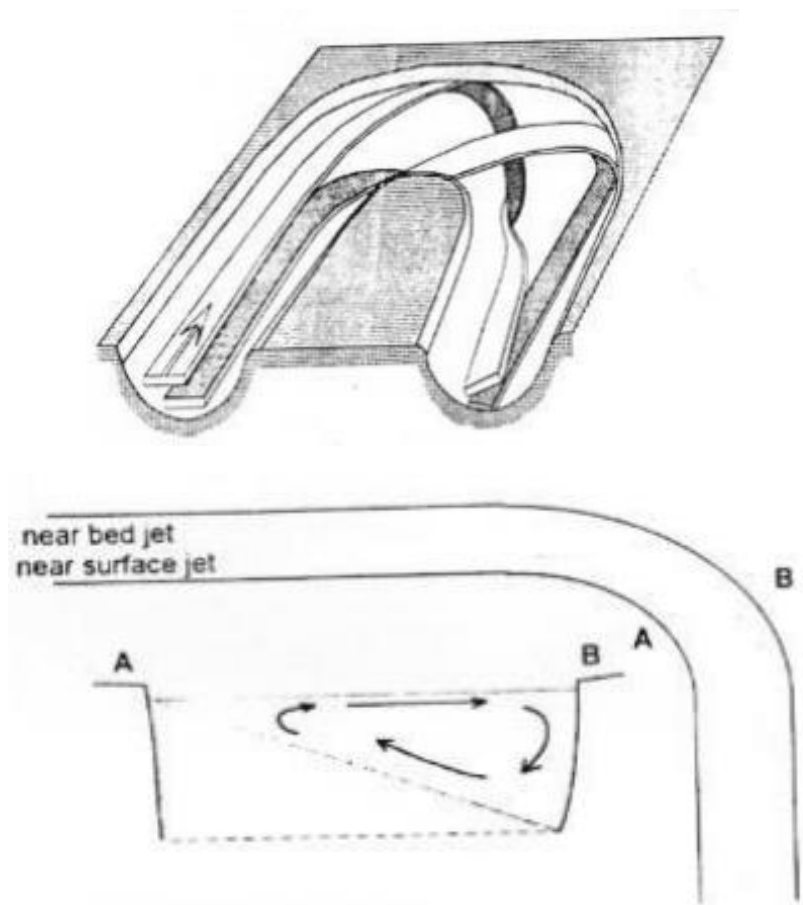
$$S_{yz} = \frac{U_{yz}^2}{U^2} \quad (1-2)$$

که:

U_{yz} : سرعت متوسط منتهجه روی صفحه yz

U : سرعت متوسط جریان در مقطع عرضی

S_{yz} : قدرت و یا توان جریان ثانویه

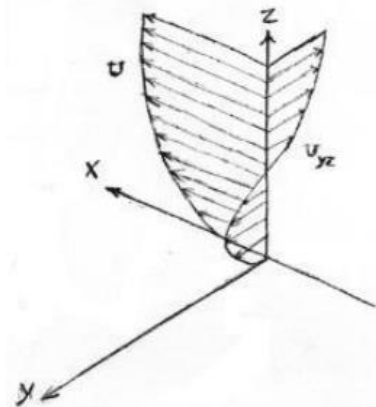


شکل (۵-۲) جریانهای ثانویه طولی و عرضی در خم رودخانه

1- Lateral motion

در شکل (۶-۲) جهت سرعتهای V_{YZ} و V نشان داده شده است. برای محاسبه قدرت جریان ثانویه متوسط سرعت در عمق بدست آمده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با افزایش مقدار عدد رینولدز جریان $(Re = \frac{UD}{\nu})$ قدرت جریان ثانویه کاهش می‌یابد و همچنین با افزایش نسبت شعاع به عرض و نسبت عرض به عمق نیز کاهش می‌یابد [۵].



شکل (۶-۲) سرعت U و U_{YZ} در خم رودخانه‌ها

۲-۲-۶-۲-۲- خیزاب^۱

یکی دیگر از پدیده‌های جریان در خم رودخانه‌ها وقوع خیزاب است. اثر خیزاب باعث مایل شدن سطح آب در یک مقطع می‌گردد. این پدیده به علت تفاوت انحنا سرعت جریان در سطح آب و بستر به وجود می‌آید. در این پدیده سطح آب در قسمت خارجی انحنا بالا و در قسمت داخلی آن پایین می‌افتد [۹].

شیب سطح آب در خم رودخانه از درجه $\frac{U^2}{gR}$ و اختلاف تراز سطح آب در طول عرض B از درجه $\frac{BU^2}{gR}$ می‌باشد (R شعاع انحنا پیچ رودخانه است).

وودوارد و پوسی^۲ در سال ۱۹۴۱ رابطه زیر را برای خیزاب در کانالهای منظم ارائه نموده‌اند [۹]:

$$\Delta y = C \frac{BU^2}{gR_c} \quad (۲-۲)$$

C : ضریبی است که بسته به نوع جریان، مقطع کانال و هندسه خم از جدول (۱-۲) بدست می‌آید.

1- Superelevation
2- Woodward and Posey

R_c : شعاع انحنای خط مرکزی پیچ می‌باشد.

جدول (۱-۲) مقدار ضریب C در رابطه (۲-۲)

مقدار C	نوع خم	نوع کانال	نوع جریان مقطع کانال
۰/۵	دایره ای ساده	مستطیلی	آرام
۰/۵	دایره ای ساده	ذوزنقه ای	آرام
۱	دایره ای ساده	مستطیلی	سریع
۱	حلزونی انتقالی	ذوزنقه ای	سریع
۰/۵	حلزونی انتقالی	مستطیلی	سریع

در مسیر انحنادار، مسیر سرعت جریان حداکثر از مسیر عادی انحراف پیدا می‌کند و به طرف دیواره خارجی حرکت می‌کند. این امر باعث پایین افتادگی عمق جریان در دیواره‌های قسمت داخلی خم می‌گردد. اگر جریان زیر بحرانی باشد از جنبه نظری می‌توان توزیع سرعت را در آن بصورت جریان آزاد گردابی در نظر گرفت و با استفاده از این فرض پروفیل عرضی سطح آب بدست می‌آید.

وودوارد در سال ۱۹۴۱ فرض نمود که سرعت جریان در پلان در کنار بستر صفر و در وسط به حداکثر می‌رسد. در حد فاصل صفر تا حداکثر تغییرات آن بصورت سهموی^۱ است و با استفاده از قانون دوم نیوتن رابطه زیر برای اضافه ارتفاع یا خیزاب بدست می‌آید [۱۰].

$$\Delta y = \frac{U^2 \max}{g} \left[\frac{20 R_c}{3 B} - 16 \frac{R_c^2}{B^3} + \left(\frac{4 R_c^2}{B^2} - 1 \right) \ln \frac{2 R_c + B}{2 R_c - B} \right] \quad (3-2)$$

با استفاده از قانون دوم نیوتن برای خطوط جریان و انتگرال گیری در تمام سطح مقطع، پروفیل عرضی سطح آب در خم بدست می‌آید و رابطه اضافه ارتفاع بصورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta h = 2/3 \frac{U_z^2}{g} \cdot \log \frac{R_c}{R} \quad (4-2)$$

R : شعاع انحنای خط جریان در مسیر کانال و یا خم

1- Parabolic

U_z : سرعت رشته جریان پیشرو^۱ از رابطه $U_z = \frac{C}{R}$ بدست می‌آید که در آن C ضریب ثابت چرخش^۲ در حرکت آزاد گردابی است.

پدیده خیزاب در جریانهای دائمی از اهمیت کمتری برخوردار است. همچنین در رودخانه‌های عریض بخاطر گسترش جریان در یک پهنه وسیع و نسبت عرض به عمق زیاد کم اهمیت است.

۲-۲-۶-۳- اضافه افت اصطکاکی در پیچان رودها

مقاومت جریان در آبراهه بطور مشخصی در خم رودخانه‌ها افزایش یافته و افت اصطکاک تشدید می‌گردد. افزایش مقاومت اصطکاکی در خم رودخانه‌ها را می‌توان به افت‌های موضعی در خم لوله‌ها تشبیه نمود. روشهای متفاوتی به صورت بسیار ساده تا روشهای تجربی و روشهای پیچیده در این مورد ارائه شده‌اند که بر اساس متغیرهای مختلف هندسی و جریان در پیچان رودها بنا نهاده شده‌اند و نتایج متفاوتی را می‌دهند. البته هر کدام از این روشها دارای محدودیتها و شرایط خاصی هستند.

اگر خم رودخانه‌ها را بازه‌های مستقیم در نظر بگیریم برای جریان یکنواخت با فرض شیب کف برابر شیب سطح آب، با استفاده از رابطه دارسی-وایسباخ مقدار V از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V = \left(\frac{8gRS_0}{f} \right)^{0.5} \quad (5-2)$$

f: ضریب اصلاحی دارسی-وایسباخ

R: شعاع هیدرولیکی جریان

S_0 : شیب رودخانه

g: شتاب ثقل

f ضریبی است که از زبری بستر و مشخصات جریان بدست می‌آید. در مورد خم رودخانه‌ها مقدار f بدست آمده کمتر از اصطکاک و مقاومت جریان در آن می‌باشد. مفهوم اضافه افت اصطکاکی در تخمین ضریب زبری و واسنجی مدل‌های یک بعدی جریان در رودخانه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

2- Forward Filamental Velocity
3- Circulation Constant

گرچه مدل‌های ریاضی یک بعدی از دقت لازم برای شبیه‌سازی در پیچان‌رودها برخوردار نیستند ولی با دقت موردنیاز در طرح‌های کنترل سیلاب استفاده فراوانی یافته است. برای محاسبه اضافه افت اصطکاکی روشهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در مورد برخی از این روشها تحقیقات هنوز هم ادامه دارد. مهمترین روشهای مورد استفاده عبارتند از:

- روش SCS^1
- روش خطی SCS^2
- روش توپیس و سوکای 3
- روش چانگ 4
- روش اصلاح شده‌ی چانگ

۲-۲-۷- توزیع سرعت و تنش برشی

محققان دیگری نیز با استفاده از روش تحلیل تئوری، توزیع سرعت و تنش برشی قوس‌ها و آزمایش روی مدل علل و ویژگی‌های تغییرپذیری قوس‌ها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. بر پایه اینگونه بررسی‌ها، با ازدیاد تنش برشی در بستر توأم با افزایش بار کف و تنش در کناره‌ها، فرسایش و تخریب دیواره‌ها اتفاق خواهد افتاد. عوامل مهمی که روی توزیع تنش در قوس‌ها مؤثر می‌باشد عبارتند از:

- انحنای نسبی قوس $\frac{r}{w}$ یعنی نسبت شعاع انحنای به عرض رودخانه
- نحوه توزیع سرعت در مقطع ورودی به قوس
- زاویه قوس
- نسبت عرض به عمق
- عدد رینولدز

1- Soil Conservation Service Method
 1- Linear Soil Conversation Service Method
 2- Toebes and Sooky Method
 3- Chang Method

- عدد فرود

- فاکتور زبری بستر

- نحوه تغییرات مقطع جریان در قسمت ورودی، میانه و خروجی قوس

بر پایه تحقیقات واشنی^۱ و گرید^۲ در سال ۱۹۷۵ و چودری^۳ و ناراسیمهان^۴ وقتی نسبت $\frac{r}{w}$ در یک قوس بیشتر از ۳.۵ باشد توزیع تنش برشی در مقطع ورودی قوس تقریباً یکنواخت بوده و منطقه حداکثر تنش در قسمت خروجی قوس و دیواره خارجی آن اتفاق می‌افتد. هرگاه این نسبت کمتر از ۳.۵ گردد، دو منطقه تنش حداکثر بوجود خواهد آمد که یکی در قسمت خروجی قوس و دیواره خارجی آن و دیگری در قسمت ورودی قوس و دیواره داخلی آن دیده می‌شود. در شرایطی که نسبت $\frac{r}{w}$ خیلی کم و به حد ۱.۲۵ نزدیک باشد، منطقه تنش برشی بطور کامل در محدوده دیواره داخلی قرار می‌گیرد.

۲-۸- معادلات جریان در خم رودخانه ها

تحلیل جریان سه بعدی با وجود پارامترهای مربوط به آشفتگی و لزجت پیچیده و بسیار وقت گیر است و حذف برخی پارامترها یا تبدیل جریان سه بعدی به دوبعدی و یا یک بعدی با توجه به نوع مسئله و اهداف تحقیقات و مطالعات مهندسی ممکن است قابل قبول باشد. اما برخی مسائل به تحلیل دقیق نیاز خواهد داشت.

برای بسیاری از رودخانه‌ها نسبت عرض به عمق بیش از ۲۰ متر می‌باشد. در این موارد و موارد مشابه اهمیت تغییرات سرعت قائم نسبت به سرعت‌های طولی و عرضی بسیار ناچیز است و معادلات سه بعدی جریان با متوسط‌گیری در قائم (یعنی متوسط‌گیری عمقی) به معادلات دوبعدی برای جریان در پلان تبدیل می‌گردند که می‌توان الگوی جریان را برای رودخانه‌ها تشریح نماید.

1- Vashney
2- Grade
3- Choudray
4- Narasimhan

استفاده از جریان دوبعدی برای بررسی الگوی جریان در برخی موارد ویژه هم مورد بررسی است. برای نمونه الگوی جریان در محدوده پله‌های چند دهانه و عریض با وجود دشت سیلابی در بالادست و پایین دست آن و توزیع جریان در دهانه‌ها با استفاده از مدل یک‌بعدی امکان‌پذیر نبوده و نیاز به استفاده از مدل دوبعدی جریان دارد.

در مورد خم رودخانه‌ها معمولاً یافتن محل مناسب آبگیرها، اصلاح مناسب مسیر و انحراف جریان به دلیل وجود شکل نامنظم بستر در پلان مسئله‌ای است که نمی‌توان با تحلیل یک بعدی جریان به نتایج و پیش‌بینی‌های مناسبی دست یافت، و در بیشتر موارد منجر به ساخت مدل فیزیکی از محدوده مورد مطالعه و تحقیق روی الگوی جریان و عملکرد طرح می‌گردد. در این مدل‌ها مسیرهای حرکت در پلان و مشخصات و توزیع سرعت در ورود به منطقه انحراف یا آبگیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش دیگر برای بررسی جریان در خم رودخانه‌ها استفاده از معادلات حاکم بر جریان است. اصول بقاء جرم و اندازه حرکت شکل عمومی معادلات جریان بصورت سه‌بعدی است که با فرضیات ساده کننده آنرا می‌توان به جریان‌های دوبعدی تبدیل نمود. معادلات متوسط زمانی بقای اندازه حرکت برای جریان آشفته در جهت‌های x (افقی)، y (افقی)، z (فائتم) و در جریان دائمی بصورت زیر می‌باشد:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} + \tau_x \right] \quad (۶-۲)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} + \tau_y \right] \quad (۷-۲)$$

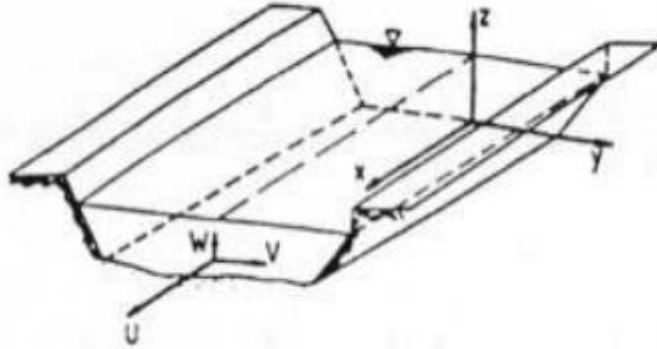
$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{zy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} + \tau_z \right] \quad (۸-۲)$$

x و y و z: جهات مختصات دکارتی

u و v و w: اجزاء و مقادیر بردار سرعت متوسط نقطه‌ای در جهت x و y و z طبق شکل (۲-۵).

g: شتاب ثقل

p: جرم مخصوص آب



شکل (۷-۲) سیستم مختصات دکارتی

P: فشار در نقطه موردنظر

ϵ_{xx} و ϵ_{xy} و غیره: ضرایب لزجت جریان‌های گردابی که پخشیدگی اندازه حرکت در جهت پانویس اول به پانویس دوم را نشان می‌دهد.

τ_x و τ_y و τ_z : تنش‌های برشی مربوط به اثر جداره‌های جریان

معادله قانون بقاء جرم نیز بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (۹-۲)$$

در معادلات فوق آب غیرقابل تراکم و اثر آشفتگی با استفاده از لزجت جریان گردابی که توسط بوسینسک ارائه شده است، در نظر گرفته است. بخاطر پیچیدگی‌های موجود در حل توأم معادلات فوق معمولاً تنها ابزار مناسب و قابل اطمینان استفاده از مدل فیزیکی می‌باشد. روش‌های عددی نیز ابزار دیگری هستند که با ساده‌سازی این معادلات به معادلات جریان دوبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. حل معادلات سه‌بعدی با استفاده از روش‌های عددی معمول هنوز کاربرد بسیار وسیع پیدا نکرده و نتایج آنها با داده‌های صحرایی و مدل فیزیکی کنترل می‌گردد.

معادلات دوبعدی جریان با فرضیات زیر و انجام یکسری عملیات، ساده‌سازی و متوسط‌گیری در عمق از معادلات (۶-۲)، (۷-۲) و (۸-۲) حاصل می‌شود.

۱- توزیع سرعت در عمق یکنواخت است.

۲- کف کانال یا رودخانه ثابت فرض می‌شود.

۳- شیب کف کانال کم است.

۴- افت‌های اصطکاکی با استفاده از روابط جریان دائم بدست می‌آیند.

۵- ضریب لزجت گردابی در همه جهات یکسان است.

با توجه به فرضیات فوق‌الذکر معادلات دوبعدی جریان توسط چودوری و همکاران در سال ۱۹۹۵

بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial(hU)}{\partial x} + \frac{\partial(hV)}{\partial y} = 0 \quad (10-2)$$

$$\frac{\partial(hU^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} + gh \frac{\partial}{\partial x} (h + z_b) + \frac{1}{\rho} \tau_{bx} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) = 0 \quad (11-2)$$

$$\frac{\partial(hUV)}{\partial x} + \frac{\partial(hV^2)}{\partial y} + gh \frac{\partial}{\partial y} (h + z_b) + \frac{1}{\rho} \tau_{by} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) = 0 \quad (12-2)$$

U و V: سرعت متوسط عمقی هستند و از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$U = \frac{1}{h} \int_0^h u dz \quad (13-2)$$

$$V = \frac{1}{h} \int_0^h v dz \quad (14-2)$$

Z_b : تراز بستر

تنش‌های برشی غالب، تنش‌های برشی کف می‌باشند و با استفاده از روابط جریان دائم بدست می‌آیند

و بصورت روابط زیر نوشته می‌شوند:

$$\tau_{bx} = \rho C_b U \sqrt{(U^2 + V^2)} \quad (15-2)$$

$$\tau_{by} = \rho C_b V \sqrt{(U^2 + V^2)} \quad (16-2)$$

C_b : ضریب زبری کف و با استفاده از رابطه مانینگ بصورت زیر بیان می‌شود:

$$C_b = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (17-2)$$

تنش‌های مؤثر آشفتگی می‌باشند که بر اساس مفهوم لزجت جریان‌های گردابی T_{xx} ، T_{xy} ، T_{yy} بوسینسک و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$T_{xx} = \frac{2\rho\varepsilon_m}{h} \frac{\partial(hU)}{\partial x} \quad (18-2)$$

$$T_{xy} = \frac{2\rho\varepsilon_m}{h} \left(\frac{\partial(hU)}{\partial y} + \frac{\partial(hV)}{\partial x} \right) \quad (19-2)$$

$$T_{yy} = \frac{2\rho\varepsilon_m}{h} \frac{\partial(hV)}{\partial y} \quad (20-2)$$

ε_m : متوسط ضریب لزجت سینماتیکی و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\varepsilon_m = \frac{1}{6} \cdot k \cdot U_* \cdot H \quad (21-2)$$

$$U_* = \sqrt{\frac{gn^2}{h^3} (U^2 + V^2)} \quad (22-2)$$

در کارهای دریایی و بررسی جریان در دریاچه و دریاها برای تنش‌های برشی آشفتگی در معادلات اندازه حرکت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{\partial}{\partial x} \left(eh \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(0.5eh \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right) \quad (23-2)$$

T : تنش مؤثر آشفتگی

e : ضریب اسماگرنسکی در سال ۱۹۶۳ می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$e = C_s \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (24-2)$$

C_s : ثابت اسماگرنسکی که مقدار آن بین ۰.۲۵ تا ۱ می‌باشد.

Δ : ابعاد شبکه مورد استفاده برای حل عددی معادلات جریان در پلان

برای رودخانه‌های عریض (نسبت عرض به عمق بیش از ۲۰) از این روابط می‌توان استفاده نمود.

معادلات (۲-۱۰)، (۲-۱۱) و (۲-۱۲) برای محاسبه الگوی جریان در پلان رودخانه‌ها و در مختصات دکارتی به کار می‌رود. استخراج معادلات فوق در مختصات استوانه‌ای و یا منحنی‌الخط^۱ با استفاده از شعاع انحنا خطوط جریان طولی و عرضی صورت می‌گیرد. معادلات جریان در مختصات استوانه‌ای در مورد خم های با شعاع ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد و در مورد خم‌های نامنظم از مختصات منحنی‌الخط و یا مختصات دکارتی استفاده می‌شود. محاسبه‌ی الگوی جریان با استفاده از مدل ریاضی معادلات جریان و تکنیکهای عددی و کامپیوتر انجام می‌شود. علاوه بر داده‌های هندسی و جریان نیاز به واسنجی و ارزیابی مدل ریاضی می‌باشد. داده‌های واسنجی شامل موارد زیر است:

الف) زبری کف: برای مشخص نمودن تغییرات زبری بستر در نقاط مختلف مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ب) لزجت جریان‌های گردابی: مدل‌های دوبعدی جریان به ضرایب تبادل آشفتگی که اغلب پخشیدگی گردابی نامیده می‌شود، نیاز است و دقت شبیه‌سازی جریان‌های گردابی بسته به مدل آشفتگی انتخاب شده است. اختلاط آشفتگی در رودخانه‌ها اغلب به صورت جوشش‌های سطحی آب و تشکیل و زوال گرداب‌های بزرگ و کوچک قابل مشاهده است. در مدل‌های یک‌بعدی ضرایب انتقال آشفتگی بصورت ضرایب افت تنگ‌شدگی و گشادشدگی بیان می‌شوند. راه حل کلی برای واسنجی مدل ریاضی دوبعدی این است که مقادیر زبری کف با استفاده از داده‌های مدل فیزیکی واسنجی گردد و سپس با ضرایب انتقال آشفتگی مقادیر بزرگی در نظر گرفته شده و سپس با آنچه در طبیعت و یا مدل فیزیکی قابل مشاهده است شبیه‌سازی می‌گردد. در مدل نمودن رودخانه‌ها، توپوگرافی و نا همگنی زبری بستر و کناره‌ها در نقاط مختلف یکی از معضلات مهم در حل عددی مدل‌های دوبعدی رودخانه‌ای می‌باشد. تشکیل گردابها نیز تحت تأثیر زبری جریان، شکل بستر و مشخصات جریان صورت می‌گیرد.

1- Curvilinear

چودوری و مولز^۱ در سال ۱۹۹۵ با حل عددی روابط جریان دو بعدی، جریان در پرش هیدرولیکی در کانال‌های مستقیم، جریان در تنگ‌شدگی تدریجی کانال، الگوی جریان در نزدیکی آبشکن‌ها، شبیه سازی دوبعدی جریان در شکست سد و الگوی جریان در یک خم ۱۸۰ درجه را مورد بررسی قرار داده‌اند. ایشان در روابط خود از مفهوم لزجت جریان‌های گردابی بوسینسک استفاده نموده‌اند. نتایج محاسبات الگوی جریان در خم ۱۸۰ درجه را با آزمایش‌های انجام شده توسط روزوسکی^۲ در سال ۱۹۵۷ مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که معادلات جریان دوبعدی با فرضیات فوق‌الذکر تطابق خوبی با نتایج حاصل از مدل فیزیکی نشان می‌دهد. خطای بین مدل دوبعدی و نتایج آزمایشگاهی در حدود ۴.۸ درصد بوده است. آزمایش‌های انجام شده توسط روزوسکی در فلوم آزمایشگاهی مستطیلی بوده و اثر توپوگرافی در تغییر عمق جریان در جداره‌ها قابل مشاهده نبوده است.

۲-۲-۹- فرسایش در خم رودخانه‌ها

بطور کلی آبشستگی در خمیدگی به پارامترهای محلی (شعاع خمیدگی، عمق جریان، دانه‌بندی مصالح) و تأثیرات (توزیع مجدد جریان و حمل رسوب) بستگی دارد. در بخش بیرونی خمیدگی در اثر جریان مارپیچی آب، آبشستگی بیشتری رخ می‌دهد. تدوین معادله‌ای برای پیش‌بینی آبشستگی در خمیدگی دشوار می‌باشد. لیکن چنین ابزار محاسباتی برای ارائه تخمینی اولیه از آبشستگی اغلب موردنیاز است. در این قبیل موارد باید از پارامترهای محلی که بر حلی کاملاً توسعه‌یافته استوار می‌باشد، استفاده کرد. کاربرد این روش در شکل (۲-۹) نشان داده شده است [۱۱].

مدت زمان لازم برای تغییر پروفیل عرضی مجرا را می‌توان با رابطه زیر محاسبه کرد:

$$T_{os} = 0.85\sqrt{\Psi}/(\pi^2 S) \quad (25-2)$$

که در آن:

S: حمل رسوب در واحد عرض (m^2/s)

1- Chaudhry and Molls
2- Rozovski

Ψ : پارامتر شیلدز

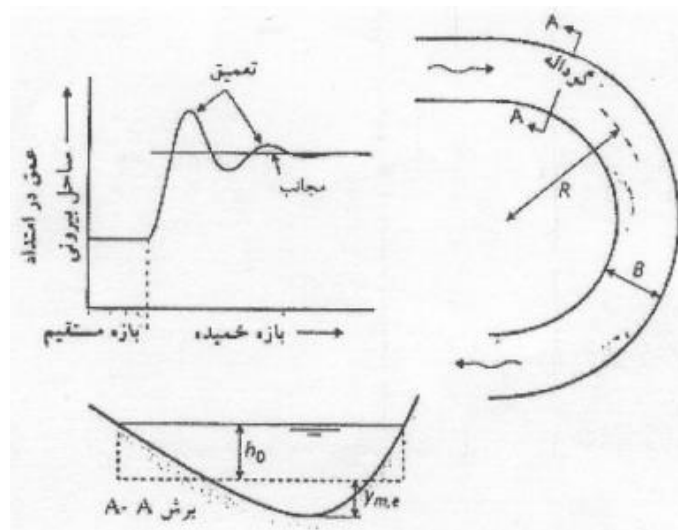
T_{os} : زمان لازم برای تغییر پروفیل عرضی

B: عرض مجرا (m)

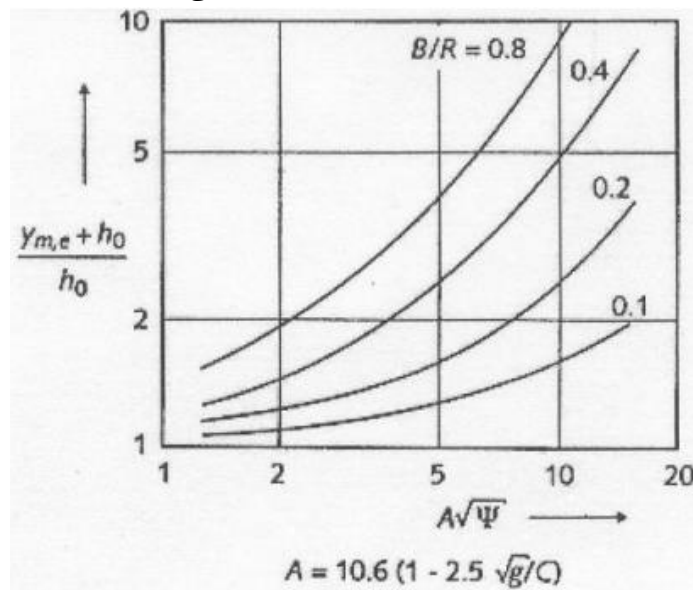
در روشی دیگر عمق فرسایش در یک خمیدگی را با رابطه تجربی زیر برآورد می‌کنند:

به ازاء $2 < R/B < 22$

$$\frac{y_{me}}{h} = 1.07 - \log\left(\frac{R}{B} - 2\right) \quad (2-26)$$



شکل (۸-۲) تعمیق ژرفای بستر در یک خمیدگی رودخانه [۱۱]



شکل (۹-۲) آبشستگی در خمیدگی [۱۱]

که در آن R شعاع خمیدگی است.

معادله (۲-۲۶) هم بر آزمایشات انجام شده در فلوم و هم بر مشاهدات بر سازه‌های اصلی در رودخانه های بزرگ (با عمق جریان تا ۱۷ متر) که در آنها اندازه میانه رسوبات از ۰.۳ تا ۶۳ میلیمتر بوده، استوار می باشد. حاشیه خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از این معادله تجربی و مشاهدات عینی از آبستگي در حدود ۰.۰۲۵ بوده است. برای یک تخمین اولیه، می‌توان فرض کرد که عمق آبستگي در خمیدگی برابر با عمق جریان باشد. این تخمین محافظه کارانه برای مقادیر بزرگتر از R/B می‌باشد [۱۱].

فصل سوم

پیشینه و سابقه تحقیق

۳-۱- مقدمه

آنچه مسلم است در رابطه با بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در رودخانه در مسیر مستقیم تحقیقات فراوانی توسط دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی داخلی و بالاصح خارج از کشور انجام شده است اما بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه به صورت آزمایشگاهی و میدانی کم و به صورت عددی به ندرت انجام شده است. اما جهت پیش‌درآمدی بر تحقیق حاضر خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در رابطه با الگوی جریان و انتقال رسوب در خم‌ها و هم چنین نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده توسط نرم افزار CCHE2D، مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه، در داخل و خارج در ادامه می‌آید.

۳-۲- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی الگوی جریان در خم رودخانه

۳-۲-۱- تحقیقات خارجی

شاید شکر^۱ در سال ۱۹۵۰ اولین فردی بود که بررسی الگوی جریان در قوس رودخانه با استفاده از مدل فیزیکی را انجام داد.

شکر با استفاده از یک فلوم مستطیلی با پلان دایره‌ای شکل با زاویه مرکزی 45° تا 180° افزایش عمق آب در کناره خارجی را مورد بررسی قرار داد. رزوفسکی^۲ با استفاده از یک فلوم آزمایشگاهی 180° که ورودی و خروجی آن بازه‌های مستقیمی بودند، آزمایش‌هایی بر روی توزیع سرعت، عمق آب و توزیع تنش انجام داد. طول فلوم مورد استفاده ایشان ۶ متر و قسمت خروجی ۳ متر بود.

کامل‌ترین تحقیق انجام شده روی الگوی جریان در قوس رودخانه‌ها توسط رزوفسکی انجام شده است [۱۲]. رزوفسکی در سال ۱۹۵۷ ابتدا جریان در قوس رودخانه را بصورت ریاضی بسط داده و

1- Shukry

2- Rozovskii

توزیع سرعت‌های طولی و عرضی را مورد بررسی قرار داد و پس از آن با استفاده از مدل فیزیکی جریان در یک قوس 180° با نسبت شعاع به عرض ۱ را بررسی نموده است [۱۳].

ایشان اثر پارامترهای مختلف را تشریح نمود ولی اثر دیوارهای کانال مستطیلی را روی جریان‌های عرضی نادیده گرفته و نتایج آزمایش‌های خود در نزدیکی دیواره را غیر قابل اطمینان عنوان نموده است.

آیپین^۱ در سال ۱۹۶۲ و ین^۲ در سال ۱۹۶۵ توزیع سرعت در قوس منظم و با مقطع دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. مشاهدات آنها نشان می‌دهد که حداکثر سرعت با توجه به مشخصه‌های مدل فیزیکی آنها در کناره داخلی ورودی رخ می‌دهد و سپس توزیع سرعت در عمق به سمت یکنواخت شدن میل می‌کند و در زاویه 60° سرعت حداکثر بطرف قوس خارجی حرکت می‌کند [۱۴]. اولین مطالعات در مورد میدان میانگین سرعت در مجاری روباز توسط بازن و دارسی^۳ انجام شده است. این دو شخص توزیع سرعت در عمق را با لوله پیتو اندازه‌گیری نمودند و نقطه سرعت ماکزیمم که انتظار می‌رفت در سطح آب باشد را بدست آوردند. این نقطه اندکی زیر آب قرار دارد و یافته‌های اخیر نشان می‌دهد که این موضوع نقش مهمی در ایجاد جریان‌های ثانویه دارد [۱۵].

خالد^۴ آزمایشهایی روی کانالهای باز با زاویه مرکزی 29° تا 116° را برای بررسی توزیع سرعت و توزیع تنش‌های برشی انجام داده است. جکسون^۵ در سال ۱۹۵۷ نیز آزمایشهایی روی یک قوس 180° و با نسبت شعاع به عرض‌های ۰.۵ تا ۵.۵ و برای تعیین پروفیل سرعت انجام داده است. ترونی و رایس^۶ نیز برای اندازه‌گیری جریان‌های ثانویه در یک رودخانه با شعاع‌های ۱۱ و ۱۳ متر و زاویه‌های به ترتیب 170° و 155° با عرض‌های مختلف ۱۰.۲ متر تا ۵.۸ متر و عمق متوسط ۰.۲۸ تا ۰.۴ متر انجام داده است [۱۵].

1- Ipen
2 - Yen
3- Bazin and Darcy
4- Khalid
5- Jackson
6- Colin R.Thorone & Samira Rais

انور^۱ در سال ۱۹۸۶ نیز با استفاده از سرعت‌سنج‌های اندازه‌گیر سه‌بعدی سرعت را در قوس رودخانه ای کوچک در انگلیس با شعاع داخلی ۱۹ متر انجام داده است. هدف او از این آزمایش‌ها بدست‌آوردن ساختار آشفتگی و تنش‌های برشی و نرمال و توزیع سرعت‌های طولی و عرضی در قوس رودخانه‌ها بوده است و ایشان نتیجه گرفت که الگوی سرعت در ورودی قوس به شعاع قوس بستگی ندارد ولی در خروجی اثرات الگوی جریان مربوط به قوس باقی می‌ماند [۱۵].

تنش‌های برشی در کناره خارجی قسمت ورودی قوس رخ می‌دهد و تا خروج از قوس همچنان در کناره خارجی بیشترین مقدار خود را حفظ می‌کند. همین نتایج توسط جکسون نیز بدست آمده است. برای مقادیر نسبت شعاع به عرض کمتر از ۱ سرعت‌های حداکثر در نزدیکی قوس داخلی رخ می‌دهند. در هر حال محدوده مختلف آزمایش‌ها نتایج مختلفی را بدست می‌دهد که هر کدام از آنها در محدوده آزمایش قابل تفسیر هستند [۱۳].

۳-۲-۲- تحقیقات داخلی

محمودی و انعلیا در سال ۱۳۷۷ در مورد الگوی جریان در پیچان‌رودها با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه آن با مدل ریاضی در دانشگاه صنعتی شریف تحقیق نمود که خلاصه آن در ادامه می‌آید [۱۶]. ایشان با مقیاس کردن مشخصات یکی از قوس‌های 90° کارون مدلی با مقیاس ۱:۵۰ با کف بتنی طراحی کرد.

مشخصات مدل فیزیکی مورد استفاده به شرح زیر می‌باشد:

جدول (۱-۳) مشخصات مدل فیزیکی در آزمایش وانعلیا

مساحت مدل (mm)	عرض تقریبی مقاطع مدل (m)	عمق متوسط در دبی غالب (Cm)	عمق متوسط در دبی مقطع پر (Cm)	دبی حداقل Lit/s	دبی حداکثر Lit/s
۶۰ × ۸۰	≈ ۴	۱۰	۱۴	۵۰/۹	۱۶۹/۷

ابتدا با تجزیه و تحلیل مقادیر نقطه‌ای سرعت، توزیع سرعت در عمق در مقاطع عرضی، در عرض و پلان مورد بررسی قرار گرفت. سپس سطح تراز آب اندازه‌گیری شده از مدل ارزیابی شد. با استفاده از نتایج اندازه‌گیری در مدل فیزیکی، مدل دو بعدی جریان واسنجی و نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی با نتایج مدل یک‌بعدی و دوبعدی مقایسه گردید.

نتایج نهایی این تحقیق بصورت زیر است:

۱- توزیع سرعت طولی در طول قوس یکنواخت‌تر می‌گردد و یکنواختی توزیع سرعت تا خروجی قوس ادامه می‌یابد.

۲- جریان در پیچان‌رودهای با نسبت شعاع به عرض کمتر از یک سه‌بعدی است و ساده‌سازی آن به جریان دوبعدی و یک‌بعدی با صرف‌نظر از توزیع عمقی سرعت‌های طولی و توزیع سرعت در مقطع عرضی با خطای قابل توجهی همراه است.

۳- مدل دوبعدی متوسط‌گیری در عمق، الگوی جریان در پیچان‌رودها و گردابه‌ها را بخوبی شبیه سازی می‌کند اما بخاطر اثر شکل هندسی پیچان‌رود و ساده‌سازی‌های انجام شده در مورد برخی پارامترها دارای نتایج تقریبی می‌باشد و بدقت شبکه‌ها و شبیه‌سازی هندسه مقادیر ضریب زبری و ضریب آشفتگی بستگی دارد [۵].

۳-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی انتقال رسوب در خم رودخانه

۳-۳-۱- تحقیقات خارجی

رزوفسکی در سال ۱۹۵۷ بر اساس مشاهدات صحرائی ملاحظه کرد که بیشینه فرسایش در کناره مقعر، در موقعیت حداکثر انحنا نیست بلکه در پایین دست آن (حدود ۱.۵ برابر عرض آبراهه) روی میدهد [۱۷]. وی در سال ۱۹۶۱ ارتباط بین شیب عرضی بستر با نسبت عمق جریان به شعاع انحنای قوس را توصیف کرد. رزوفسکی در سال ۱۹۶۱ و ین در سال ۱۹۶۵ مشخصات جریان و توزیع تنش برشی را در قوس با بستر ثابت مطالعه نمود [۱۸] و [۱۹].

آیپین و درینکر^۱ در سال ۱۹۶۲ با تزریق ماده رنگی مشاهده نمودند که رشته‌های رنگی نازک در بستر کانال بطرف قوس داخل می‌باشد در حالیکه مسیر رنگی ایجاد شده در سطح آب تمایل به ساحل خارجی دارد [۲۰].

ین^۲ در سال ۱۹۶۷ همچنین مشخصات جریان و اندرکنش آن با تغییرات بستر را مطالعه کرد [۲۱]. آلن^۳ در سال ۱۹۷۰ اثر غیریکنواختی مصالح بر پشته رسوبی را با توجه به نیروی وارد بر ذرات رسوب بستر بررسی کرد [۲۲].

انگلاند^۴ در سال ۱۹۷۴ الگوی جریان و توپوگرافی بستر را بررسی کرد و رابطه‌ای را برای تعیین حداکثر عمق آبستگي در قوس به دست آورد [۲۳].

کیکاوا^۵ و همکاران در سال ۱۹۷۶ و فالکن و کندی^۶ در سال ۱۹۸۳ شرح دقیقتری از جریان و شکل تغییرات بستر را در رودخانه های قوسی با جریان دائم ارائه کردند [۲۴] و [۲۵].

زیرمن و کندی^۷ در سال ۱۹۷۸ برای شیب عرضی بستر در قوس بر پایه کارهای تحلیلی رابطه‌ای به دست آوردند که مهمترین پارامتر مؤثر در آن مشخصات و چگالی رسوب است [۲۶].

کوچ و فلوکسترا^۸ در سال ۱۹۸۱ با انجام آزمایشهایی بر روی کانال ۱۸۰ درجه با دانه‌بندی یکنواخت، تغییرات بستر در کانال را بررسی کردند [۸].

اودگارد^۹ در سال ۱۹۸۱ بر اساس داده‌های صحرایی چنین نتیجه گرفت که شیب جانبی بستر با نسبت عمق جریان به شعاع انحنا (D/r) متناسب است [۲۷]. وی در سال ۱۹۸۲ همچنین نشان داد

1- Ippen, A. T., and Drinker, P. A

2- Yen

3- Allen

4- Engelund

5- Kikkawa

6- Falcon, M. A., and Kennedy, J. F

7- Zimmermann, C. and J. F. Kennedy

8- Koch, F. G. and Flukstra, C

9- Odgaard

که وزن ذرات رسوب و نیروی برشی، برخی از عوامل مهم و مؤثر بر حرکت عرضی رسوب است. و برای توزیع سرعت جریان و قطر ذرات بستر روابطی را ارائه کرد [۲۸].

یاماوکا^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۳ به بررسی محل شکلگیری چاله فرسایشی بر روی قوس نامنظم پرداختند و نتیجه گرفتند که چاله فرسایشی بعد از رأس قوس قرار دارد. آنان این پدیده را تأثیر مستقیم اصطکاک دیواره ها بر کل میدان جریان عنوان نمودند [۲۹].

ایکیدا و نیشیمورا^۲ در سال ۱۹۸۶ مدل ریاضی را برای شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی و توپوگرافی بستر در کانال سینوسی شکل ارائه و نتایج آن را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه و مشاهده کردند که حداکثر عمق آبشستگی در زاویه ۶۰ درجه از ابتدای خم اتفاق می‌افتد [۳۰].

ایکیدا و همکاران در سال ۱۹۸۷ پدیده مرتب شدن عرضی مصالح بستر را مطالعه کرده و بیان کردند که این پدیده می‌تواند تا ۴۰ درصد حداکثر عمق آبشستگی را در منطقه توسعه‌یافته کاهش دهد [۳۱].

اودگارد و برگز^۳ در سال ۱۹۸۸ به بررسی آزمایشگاهی توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک پرداختند [۳۲]، همچنین بر اساس حل معادلات پیوستگی و ممنتوم، مدلی را برای شبیه‌سازی جریان در رودخانه آبرفتی ارائه کرد [۳۲].

یاماموتو^۴ در سال ۱۹۸۹ الگوی جریان، رسوب و شکل حرکت توده‌های ماسه‌ای در آبراهه‌های پیچانرودی با زوایای مرکزی مختلف را نشان داد و مشاهده نمود که همواره تمرکز جریان به سمت قوس خارجی می‌باشد [۳۳].

ین و لین^۵ در سال ۱۹۹۰ با انجام آزمایشهایی بر روی رسوباتی با نسبت‌های مختلف اندازه ذرات، نشان دادند که این پارامتر نقش بسزایی در تغییرات زمانی بستر دارد [۳۴].

1- Yamaoka

2- Ikeda S. and Nishimura, T

3- Odgaard, A. J., and Bergs, M. A

4- Yamamoto

5- Yen, C. L., and Lin, Y. L

ین و شین^۱ در سال ۱۹۹۰ نیز تحقیقاتی را در قوس ۹۰ درجه انجام دادند و مدلی را برای شبیه‌سازی توپوگرافی بستر در خم ۹۰ درجه با مقطع مستطیلی به دست آوردند [۳۵].

یالین و داسیلوا^۲ در سال ۱۹۹۷ به بررسی محل وقوع انباشت رسوبات و چاله فرسایشی برای دو قوس پیچانرودی ملایم و تند پرداختند [۳۶].

بلانکارت و گراف^۳ در سال ۲۰۰۱ الگوی جریان و توزیع آشفتگی را در فلومی با دیوار صلب و شعاع انحنای ۱۲۰ درجه بررسی کرده و در خصوص تفاوت‌های ساختار آشفتگی در قوس و مسیر مستقیم به نتایجی دست یافتند [۳۷].

هم چنین بلانکارت در سال ۲۰۰۲ با انجام آزمایشاتی بر روی یک فلوم قوسی ۱۲۰ درجه با بستر متحرک، محل حداکثر فرسایش بستر در قوس و همچنین الگوی جریان ثانویه را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل شکل‌گیری دو چاله در قوس را نشان می‌دهد [۳۸].

شمس^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۲ با استفاده از برنامه فلونت به آنالیز عددی انتقال رسوب در خم رودخانه‌ها و با سایزبندی مختلف دانه‌بندی بستر پرداختند و الگوی جریان در یک کانالی که با مقیاس ۱:۱۰۰ ساخته شده بود اندازه‌گیری شد و با مدل عددی مقایسه گردید و نتیجه گرفتند که کمیت‌های متوسط جریان با مدل عددی شباهت دارد اما پارامترهای آشفتگی با مدل عددی متفاوت می‌باشد [۳۹].

هرس بربر و شلیسیس^۵ در سال ۲۰۰۲ برای تعیین تأثیر زبری دیوار بر فرآیند آبشستگی در قوس، آزمایشهایی را در قوس ۹۰ درجه با مصالح با دانه بندی مختلف انجام دادند [۴۰].

1- Yen and Shin Ya ho

2- Da Silva, A. M. F. and Yalin, M. S

3- Blankart, K., and Graf, W. H

4- Shams

1- Hersberber. D. and Schleiss. A. J

۳-۳-۲- تحقیقات داخلی

صالحی نیشابوری و اقبال زاده اثر جریان را بر جابه‌جایی حفره در قوس ۱۸۰ درجه مطالعه کردند [۴۱]. دهقانی و همکاران اثر جریان بر توپوگرافی بستر را در قوس ۱۸۰ درجه مطالعه کرده و رابطه‌ای را برای تعیین حداکثر عمق آبشستگی به دست آوردند، همچنین برای تعیین پروفیل عرضی بستر در قوس ۱۸۰ درجه رابطه ذیل را ارائه کرده‌اند [۴۲]:

$$\frac{\Delta Z}{h_0} = -a \tanh \left[10 \left(\frac{R}{R_c} - b \right) \right] \quad (3-3)$$

$\frac{\Delta Z}{h_0}$ نسبت تغییرات بستر به عمق اولیه جریان در کانال بالادست و $\frac{R}{R_c}$ نسبت شعاع انحنای نقطه مفروض به شعاع انحنای مرکزی و ضرایب a و b تابع عدد فرود است.

۳-۴- تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب

بوسیله نرم‌افزار CCHE2D

۳-۴-۱- تحقیقات خارجی

چانگ و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۹ با استفاده از مدل محاسباتی CCHE2D انتقال بار رسوب (معلق و بستر) مخزن سد جی جی واقع در تایوان را شبیه‌سازی نمودند. تغییرات ژئومورفولوژی داخل مخزن را در طی ۹ واقعه طوفان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های تغییرات مورفولوژی مقایسه شد و نشان داد که مدل CCHE2D قادر به ارائه تغییرات مورفولوژیک معقول و واقع بینانه‌ای است [۴۳].

زورکفلی و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۱ با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D جریان در دریاچه هاراپن واقع در مالزی را مدل‌سازی نمودند. نرم‌افزار CCHE2D قادر به انجام شبیه‌سازی جریان به صورت دوبعدی با مازول انتقال رسوب برای دریاچه می‌باشد. با استفاده از خروجی برآورد شده از CCHE2D، تعدادی

2- Zhang et al
2- Ghani et al

منطقه خاص از نواحی رسوبی با غلظت بالا در دریاچه یافت شد. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که تعدادی از نقاط دریاچه نیاز به پاکسازی دارند و همچنین چند راه حل برای غلبه بر این مشکل بطوری که هزینه موردنیاز برای احیای دریاچه کاهش یابد پیشنهاد شد [۴۴].

هه و چن^۱ در سال ۲۰۱۳ تأثیر جریان‌های ثانویه ناشی از انحنای کانال و توپوگرافی بستر را بر روی تغییر مکان یا توزیع مجدد جریان اولیه در کانال‌های مارپیچی سینوسی بوسیله مدل CCHE2D بررسی نمودند. نتایج محاسبه شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در دو نمونه از مطالعات آزمایشگاهی منتشر شده که به بررسی مشخصات جریان منحنی تحت شرایط مرزی خوب کنترل شده شامل جریان پایدار و مواد بستر با دانه‌بندی یکنواخت پرداخته اند، مقایسه شده است. آزمایشات داسیلور^۲ در سال ۱۹۹۵ و ترمینی^۳ در سال ۲۰۰۹ برای این مطالعه انتخاب شدند که به ترتیب دارای بستر ثابت و متحرک بودند. نتایج محاسبه شده نشان دادند که تغییر مکان جریان اولیه از ساحل داخلی به خارجی در کانال‌های منحنی از جریان‌های ثانویه ناشی از توپوگرافی بستر نسبت به جریان‌های ثانویه ناشی از انحنای بیشتر تأثیر می‌پذیرند. درک اثرات نسبی جریان‌های ثانویه ناشی از انحنای توپوگرافی بستر درک ساختار جریان در مائندرها و طراحی کانال پایدار را بهبود می‌بخشد [۴۵].

چن و هه در سال ۲۰۱۳ با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق و انتقال رسوب CCHE2D، در یک فلوم مارپیچی با دامنه بزرگ، هیدرولیک جریان، انتقال رسوب و تغییر شکل بستر را شبیه‌سازی نمودند. شکل پلان فلوم یک کانال سینوسی با زاویه انحراف ۱۱۰ درجه مطابق با شرایط آزمایش انجام شده توسط ترمینی در سال ۲۰۰۹ بود. مواد بستر در فلوم به صورت رسوبات با دانه بندی یکنواخت رفتار نمودند و شبیه‌سازی توسط مازول انتقال رسوب وو (۲۰۰۱) انجام شد. تغییرات در ارتفاع بستر بوسیله حل معادله بقاء جرم رسوب محاسبه شد. مدل

1- Chen, D., He, L

2- Da Silva

3- Termini

بوسیله مقایسه نتایج محاسبه شده با تغییر شکل مشاهده شده بستر بعد از ۱۵۰ دقیقه کالیبره شد. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که در این آزمایش عددی، مشخص‌ترین نواحی فرسایش و رسوب، ابتدا در سمت راست بالای راس قوس رخ می‌دهد و به تدریج و با گذشت زمان به سمت پایین دست کشیده می‌شود. بیشترین رسوب برداشته شده از ساحل خارجی در خم بعدی انباشته می‌شود، اما در تقاطع جلویی در خط مرکزی حول رأس قوس آبستتگی تکمیل می‌گردد [۴۶].

۳-۴-۲- تحقیقات داخلی

نجات دهکردی و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CCHE2D الگوی جریان آشفته و پدیده انتقال رسوب در یک بازه از رودخانه کارون (محدوده شهر گتوند) را شبیه سازی نمودند. پس از تعریف هندسه میدان، برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق استفاده شد. تنش‌های رینولدز و بستن سیستم معادلات حاکم، با استفاده از مدل آشفتگی دومعادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد مدلسازی شد. در مرحله بعد، معادلات انتقال بار رسوبات معلق و بستر بر اساس الگوی جریان حاصل از مرحله قبل حل شد. سپس با تنظیم شبکه‌بندی، مراحل بالا ادامه یافت تا جریان و رسوب به یک حالت تعادل نسبی رسیدند. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل سازی، منحنی دبی-اشل (به عنوان نقطه کنترل هیدرولیک میدان) حاصل از مدل با نتایج میدانی حاصل از رودخانه، غلظت رسوبات ثبت شده (نقطه کنترل محاسبات انتقال رسوب) و نیز وضعیت کیفی با شرایط فرسایش و رسوب‌گذاری رودخانه مقایسه شد که این مقایسه نشان از هماهنگی نتایج داشت. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد که مدل مزبور توانایی مناسبی در شبیه‌سازی الگوی جریان از جمله در پیش بینی میدان سرعت دارد و شرایط فرسایشی و رسوب‌گذاری منطقه نشان از فرسایش پذیری بالای این بازه از رودخانه در مقابل سیلابهای احتمالی دارد [۴۷].

مغربی و صالحی نیشابوری در سال ۱۳۸۸ با استفاده از مدل عددی CCHE2D مهاجرت در رودخانه ی کارون را شبیه‌سازی نمودند. بدین منظور از اطلاعات میدانی موجود در فاصله‌ی زمانی بین سال های ۱۳۷۵ الی ۱۳۸۱ استفاده شد. میدان جریان با استفاده از هیدروگراف رودخانه‌ی کارون در حد

فاصل سال های طرح شبیه سازی شد. آشفتگی با استفاده از مدل $k-\epsilon$ متوسط گیری شده در عمق و انتقال رسوب با استفاده از معادلات غیرمتعادل انتقال رسوب شبیه سازی شد، و فرسایش کناره ای با استفاده از مدل Osman and Thorne شبیه سازی شد. مقایسه نتایج میدانی و خروجی های حاصل از مدل عددی نشان داد که دقت نرم افزار CCHE2D در پیش بینی مهاجرت رودخانه ای مناسب می باشد [۴۸].

رستمی و همکاران در سال ۱۳۹۱ مزیت و اهمیت یک مدل عددی به منظور پیش بینی و پایش فرآیندهای حاکم بر جریان رودخانه ها را مورد بحث قرار دادند. به همین منظور و با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و تنش های برشی ناشی از آن بر فرسایش رودخانه ای، از مدل دو بعدی CCHE2D برای شبیه سازی الگوی جریان در بازه ای از پیچانرود طبیعی (رودخانه خشکه رود فارسان-ایران) بهره گرفتند. در این بررسی با بهره گیری از نقشه های پستی و بلندی محدوده مورد مطالعه، ابتدا هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف، تهیه و سپس بر اساس مشخصات اندازه گیری شده جریان رودخانه، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی همچون توزیع عمق و سرعت جریان در خم رودخانه استخراج گردید. نتایج نشان دادند که در صورت ورود شبکه محاسباتی استاندارد به مدل، این مدل در پیش بینی مقادیر سرعت جریان از دقت بالایی برخوردار بوده و داده های شبیه سازی شده در مقایسه با داده های حاصل از اندازه گیری صحرائی شباهت زیادی دارند. نتایج حاصله نشان دادند که بهره گیری از مدل های دینامیک سیالات محاسباتی CFD برای مدلسازی جریان آب، ما را یک گام به پیش بینی های کلی تر برای فرآیندهای حاکم بر جریان در رودخانه های پیچانرودی نزدیکتر می کند. هم چنین مدل CCHE2D از قابلیت خوبی جهت پیش بینی مشخصات جریان در رودخانه های پیچان برخوردار است [۴۹].

رستمی و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی کارایی مدل عددی CCHE2D به عنوان یک مدل دو بعدی متوسط گیری شده در عمق برای شبیه سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوبگذاری در محل

تلاقی شاخه های فرعی با رودخانه اصلی پرداختند. در این تحقیق از نتایج مدل آزمایشگاهی موجود که به بررسی الگوی جریان ورسوب در محل تلاقی کانال فرعی به عرض ۰.۱۵ متر با یک کانال اصلی به عرض ۰.۵ متر برای دبی های مختلف جریان و دبی رسوب تزریقی یکسان پرداخته است، جهت کالیبراسیون و همچنین ارزیابی دقت مدل CCHE2D استفاده گردید. تحلیل آماری نشان داد که در سطح اطمینان ۰.۹۹٪، مدل عددی با ضریب تعیین متوسط ۰.۸۵ و متوسط خطای مطلق حدود ۲.۶۷۵ درصد قادر به پیش بینی پروفیل سطح آب، با ضریب تعیین متوسط ۰.۹ و حداکثر متوسط خطای مطلق حدود ۱۵.۲ درصد قادر به شبیه سازی پروفیل طولی رسوب گذاری، با ضریب تعیین متوسط ۰.۸۲ و حداکثر متوسط خطای مطلق حدود ۱۸.۲ درصد قادر به شبیه سازی پروفیل طولی فرسایش و با ضریب تعیین ۰.۹۹ و متوسط خطای مطلق حدود ۱۲.۴ درصد قادر به شبیه سازی حداکثر عمق رسوب گذاری و یا حداکثر عمق فرسایش در محل تلاقی نسبت به نتایج مشاهداتی در مدل آزمایشگاهی می باشد [۵۰].

فصل چهارم

معادلات حاکم بر جریان و رسوب

۴-۱- مقدمه:

به منظور دستیابی به اهداف مطالعه حاضر ابتدا مشخصات مدل عددی مورد استفاده معرفی و سپس مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی بیان شده و با بهره‌گیری از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی به صحت سنجی مدل عددی جریان و رسوب و ارزیابی نتایج پرداخته میشود.

۴-۲- مشخصات مدل عددی CCHE2D:

۴-۲-۱- مقدمه:

نرم افزار CCHE2D یک مدل عددی^۱ برای شبیه‌سازی^۲ جریان آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز می‌باشد که در سال ۱۹۹۷ در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی (NCCHE) دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه شده و توسعه یافته است. این مدل نسخه دوبعدی و تکامل یافته مدل CCHE1D می‌باشد که برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان و انتقال رسوب در کانال‌های روباز توسعه یافته است. این مدل جزو مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی بوده که برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق^۳ استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی جملات انتقال آشفتگی، دو مدل صفر معادله‌ای توزیع سهموی^۴ و مدل طول اختلاط^۵ لزجت گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله ای k-ε را به کار می‌برد. همچنین این مدل برای هر دو حالت جریان ماندگار^۶ و غیر ماندگار^۷ قابل استفاده است و از روش المان مؤثر^۸ (نوعی از روش المان محدود^۹) و حجم کنترل کنترل برای حل معادلات حاکم و از روش سطوح خشک برای شبیه‌سازی جریان غیر ماندگار و

-
- 1- Numerical Model
 - 2- Simulation
 - 3- Depth-Averaged
 - 4- Parabolic Eddy Viscosity
 - 5- Mixing Length
 - 6- Steady
 - 7- Unsteady
 - 8- Efficient Element Method
 - 9- Finite Element Method

حرکت مرزهای آن استفاده می‌کند. مدل شبیه‌ساز پدیده انتقال رسوب این نرم‌افزار، توانایی مدلسازی انتقال هر دو فاز بار معلق و بستر در حالت غیرتعادلی، غیر یکنواخت و رسوب چسبنده و غیرچسبنده را دارد. همچنین این نرم‌افزار تأثیر جریان های ثانویه بر نحوه انتقال ذرات رسوب بار بستر در بازه‌های قوسی را در نظر می‌گیرد [۵۱].

برای حل عددی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای (PDE) در مکانیک سیالات، مشتق‌های پاره‌ای را باید تقریب زد. با این تقریب‌ها، مشتق‌های پاره‌ای به عبارت‌های تفاضل محدودی تبدیل می‌شوند که معادلات دیفرانسیل پاره‌ای را به معادلات جبری تبدیل می‌کنند. معادلات جبری حاصل را معادلات تفاضل محدود می‌نامند. این معادلات جبری را در شبکه ایجاد شده در قلمرو مورد نظر حل می‌کنیم. معمولاً قلمرو محاسبات به شکل مستطیل انتخاب می‌شود و نقاط داخلی شبکه بر روی خطوط شبکه توزیع می‌شوند. بنابراین، نقاط شبکه را می‌توان به راحتی با خطوط شبکه مشخص کرد. این نوع شبکه را شبکه با سازمان می‌نامند. دسته دیگری از شبکه‌ها به گونه‌ای ساخته می‌شود که نقاط شبکه را نمی‌توان بر روی خطوطی از شبکه که به صورت منظم تعریف شده‌اند، مرتبط کرد. این نوع شبکه را شبکه بی سازمان گویند. برای حل معادلات مذکور از روش‌های عددی مختلفی استفاده می‌شود، اما موفقیت حل معادلات PDE تا حدود خیلی زیادی وابسته است به کیفیت شبکه محاسباتی می‌باشد. برای سنجش میزان کیفیت شبکه محاسباتی معمولاً از پارامترهای تعامد و همواری^۱ استفاده می‌گردد. ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی در یک نرم‌افزار مجزای پیش‌پردازنده^۲ تحت عنوان CCHE-MESH Generator صورت می‌گیرد، این مدل توانایی پشتیبانی از انواع اطلاعات هندسی را دارا بوده و از توابع مختلفی جهت تولید شبکه محاسباتی بهره می‌برد. مدل CCHE2D نیز همانند تمامی مدل‌ها جهت شبیه‌سازی نیازمند اطلاعات توپوگرافی از محدوده مطالعاتی می‌باشد [۵۲].

1- Orthogonality and Smoothness
2- Pre Processor

پس از تهیه مدل هندسی و شبکه محاسباتی، در این مرحله برای اجرای یک شبیه‌سازی مطلوب و قابل قبول در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها، نیاز به یک محیط گرافیکی واسط کاربر (GUI) جهت تحلیل معادلات جریان و رسوب می‌باشد. مدل مذکور یک سیستم آنالیز پیشرفته برای ارزیابی جریان رودخانه‌ای آشفته، ناپایدار و پدیده‌های حمل رسوب و کیفیت آب به صورت دویبعدی می‌باشد. این مدل عددی بر اساس قوانین بقا و ریاضیات بنا شده است و بایستی بسیاری از پارامترهای فیزیکی و ریاضی جهت شبیه‌سازی یک پدیده را به آن معرفی نمود. به همین منظور باید تمام این پارامترها را شناسایی و از صحت آنها اطمینان حاصل نمود. در واقع، یک مدل عددی تقریبی از فرآیندهای حقیقی فیزیکی در جهان می‌باشد و برای مسایل فیزیکی بسیار ساده دقت مقادیر شبیه‌سازی شده مانند سرعت جریان و رقوم سطح آب دارای محدودیت می‌باشد. این مدل نیز همچون مدل‌های عددی دیگر از این قاعده مستثنی نبوده است و دارای خطاهای ناشی از تقریب ریاضی و فیزیکی می‌باشد. اما آنچه که مسلم است استفاده مناسب از مدل و نحوه معرفی صحیح پارامترهای مورد نیاز آن می‌تواند تا حدودی اثر خطای ناشی از تقریب‌های مذکور را به حداقل برساند. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود (FEM) صورت می‌گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به ترتیب با استفاده از روش تصحیح سرعت و روش‌های تکرار گوس-سایدل و حداکثر ضمنی یا SIP^۱ انجام می‌شود [۵۳].

در ادامه معادلات حاکم بر میدان جریان و انتقال رسوب به کار گرفته شده در این مدل و روش‌های حل آنها به طور مختصر شرح داده می‌شود.

1- Strongly Implicit Procedure

۴-۲-۲- معادلات حاکم بر جریان آب و رسوب

۴-۲-۲-۱- معادلات هیدرودینامیکی حاکم بر میدان جریان آب

با توجه به اینکه جریان کانال‌های باز اغلب جزو مسائل آبهای کم‌عمق^۱ می‌باشند، لذا تأثیر حرکت قائم ذرات آب از اهمیت چندانی برخوردار نبوده و به همین دلیل معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق در اکثر موارد برای شبیه‌سازی مسائل هیدرودینامیکی رودخانه‌ها از دقت و کارایی کافی برخوردار می‌باشند. معادلات پیوستگی و مومنوم جریان متوسط‌گیری در عمق برای جریان‌های آشفته در دستگاه مختصات کارتزین را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۵۳].

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1-4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor}v \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + f_{cor}u \quad (3-4)$$

در معادلات فوق، u و v به ترتیب بیانگر مؤلفه‌های سرعت متوسط‌گیری شده در عمق در راستای x و y زمان، t شتاب جاذبه، Z بیانگر تراز ارتفاعی سطح آب، ρ دانسیته آب، h عمق محلی جریان و f_{cor} ضریب ضریب مربوط به شتاب کوریولیس، τ_{xx} ، τ_{xy} ، τ_{yx} ، τ_{yy} و تنش‌های رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق و تنش‌های برشی بستر در راستای x و y می‌باشند.

۴-۲-۲-۲- مدل‌های آشفته‌گی

برای شبیه‌سازی اثر آشفته‌گی بر رفتار جریان متوسط و بستن سیستم معادلات حاکم، در معادلات (۴-۲) و (۳-۴) تنش‌های رینولدز با استفاده از ایده بوزینسک^۲ و از طریق ضریب تناسب لزجت گردابه‌ای ν_t به نرخ کرنش‌های متوسط جریان مرتبط می‌شوند [۵۳].

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4-4)$$

1- Shallow Water
2- Boussinesq's Assumption

۴-۲-۳-۱- معادلات انتقال رسوب متوسط‌گیری شده در عمق^۱

اساس مدل‌سازی انتقال رسوب توسط معادله جابه‌جایی-پخش متوسط‌گیری شده در عمق برای انتقال

بار معلق و معادله پیوستگی برای بار بستر صورت می‌گیرد [۵۴].

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s h \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + E_{bk} - D_{bk} \quad (۷-۴)$$

$$(1 - p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial(\delta \overline{c_{bk}})}{\partial t} + \frac{\partial q_{bkx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bky}}{\partial y} = -E_{bk} + D_{bk}, \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (۸-۴)$$

اندیس k بیانگر کلاس ابعادی^۲ ذرات رسوب می‌باشد. در رابطه (۷-۴)، C_k و ε_s به ترتیب عبارتند از

غلظت بار رسوبات معلق و ضریب پخش گردابه‌ای^۳ رسوب که ε_s از رابطه $\varepsilon_s = v_t / \sigma_s$ محاسبه می

شود. v_t و σ_s به ترتیب لزجت گردابه‌ای جریان و عدد اشمیت-پرانتل آشفتگی^۴ (که بین ۰.۵ و ۱

قرار دارد) می‌باشند. E_{bk} و D_{bk} به ترتیب بیانگر نرخ ورود ذرات رسوب از ناحیه بار بستر به ناحیه بار

معلق و نرخ ته‌نشینی ذرات رسوب در مرز بین نواحی بار بستر و معلق می‌باشد شکل (۱-۴).

$$E_{bk} - D_{bk} = \alpha \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (۹-۴)$$

ضریب α پارامتری است در مدل‌سازی انتقال رسوب به نام ضریب تطبیقی^۵ غیرتعادلی بار معلق، ω_{sk}

سرعت سقوط^۶ مربوط به کلاس ابعادی ذرات رسوب و C_{*k} بیانگر غلظت رسوبات در حالت تعادلی

(ظرفیت انتقال رسوب) می‌باشد.

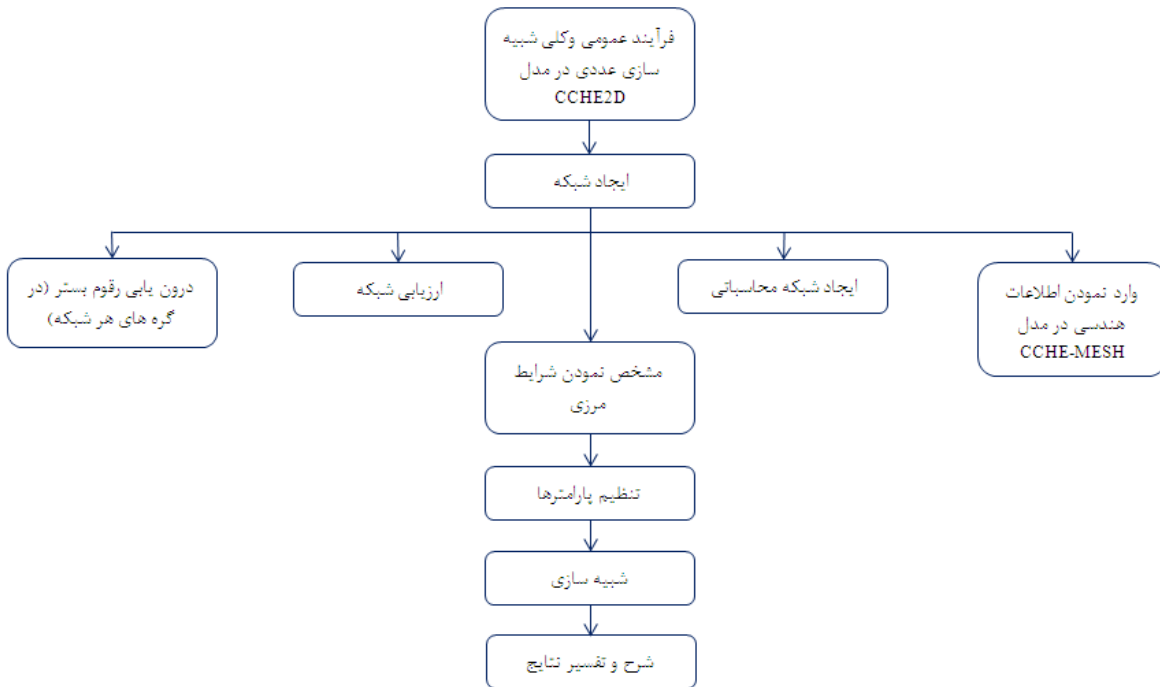
در رابطه (۸-۴)، p' تخلخل مواد کف، $\overline{c_{bk}}$ غلظت متوسط^۷ بار بستر در منطقه حرکت بار بستر، δ

ضخامت لایه بستر، q_{bkx} و q_{bky} مؤلفه‌های نرخ انتقال بار بستر در راستای x و y می‌باشند. ترم اول

-
- 1- Depth-Averaged Sediment Transport
 - 2- Size Class
 - 3- Eddy Diffusivity
 - 4- Turbulent Prandtl-Schmidt Number
 - 5- Adaptation Factor
 - 6- Settling Velocity
 - 7- Average Concentration

۳-۲-۴- فرآیند عمومی استفاده از مدل CCHE

مدل‌های عددی بر حل معادلات ناویر استوکس استوار بوده که مقادیر مرزی از شرایط اولیه مسئله می‌باشد. ابتدا می‌بایست شرایط اولیه و مرزی مسئله مشخص گردد. فرآیند عمومی و کلی شبیه‌سازی عددی در مدل CCHE2D به صورت الگوریتم زیر بیان می‌شود [۵۳]:



شکل (۲-۴) الگوریتم فرآیند عمومی و کلی شبیه سازی عددی در مدل CCHE2D

۴-۳- شبیه‌سازی عددی

در این بخش از مطالعه به منظور آشنایی با شبیه‌سازی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم بوسیله نرم افزار CCHE2D و بررسی توانایی مدل عددی در این زمینه، با توجه به تحقیقات انجام شده توسط چن و هه در سال ۲۰۱۳ [۴۵] و [۴۶]، به شبیه‌سازی عددی موارد مذکور می‌پردازیم. به همین منظور در هر بخش ابتدا مشخصات مدل آزمایشگاهی معرفی شده و با بهره‌گیری از نتایج مدل آزمایشگاهی به صحت‌سنجی مدل عددی و ارزیابی نتایج پرداخته شده که در ادامه به تشریح مراحل فوق پرداخته شده است.

۴-۳-۱- صحت‌سنجی نرم‌افزار (جریان ماندگار)

۴-۳-۱-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این بخش از آزمایش داسیلور در سال ۱۹۹۵ [۵۵] استفاده شد. این آزمایش دارای یک کانال سینوسی کوچک با زاویه انحراف 30° و طول ۵.۴ متر، و یک کانال سینوسی بزرگ با زاویه انحراف 110° و طول ۱۸.۶ متر می‌باشد. دو کانال تبدیل مستقیم به طول‌های ۰.۸ و ۰.۶ متر به ترتیب به ورودی و خروجی متصل شده است. کف کانال تخت و ثابت می‌باشد. بستر فلوم با ماسه کوارتز با قطر متوسط ۲.۲ میلی‌متر پوشیده شده است. جزئیات مشخصات جریان و هندسی آزمایش داسیلور در جدول (۴-۱) خلاصه شده است.

جدول (۱-۴) مشخصات جریان و هندسی آزمایش داسیلور [۵۵]

	θ_0	RUN	$\Lambda = 2\pi B$ (m)	L (m)	δ	Q ($l s^{-1}$)	D_{50} (mm)	B (cm)	h_m (cm)
da Silver	30°	30 ₂ /1*	2.513	2.694	1.07	2.10	2.20	40	3.2
(1995)	110°	110 ₂ /3*	2.513	9.298	3.70	2.01	2.20	40	3.0

(Continue)

	θ_0	RUN	S_{bc}	U_m (cm/s)	v^* (cm/s)	Re	(Fr)
da Silver (1995)	30°	30 ₂ /1*	1/1000	16.4	1.77	5250	0.086
	110°	110 ₂ /3*	1/1120	16.7	1.62	5000	0.095

در جدول فوق θ_0 زاویه انحراف، Λ طول موج مئاندر و $\Lambda \approx 2\pi B$ ، L طول یک کانال منحنی روی یک طول موج مئاندري، δ ضریب پیچشی، Q دبی جریان، D_{50} قطر متوسط رسوبات، B عرض جریان، h_m عمق جریان متوسط کانال، S_{bc} شیب بستر، U_m سرعت متوسط کانال، v^* سرعت برشی، Re عدد رینولدز و Fr عدد فرود است.

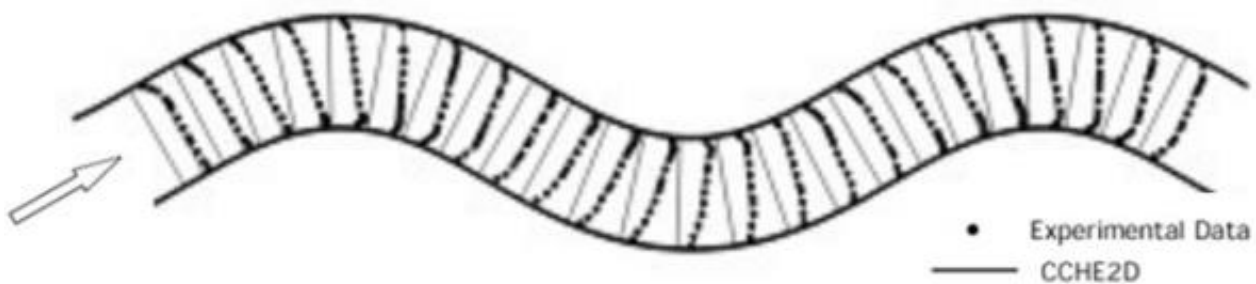
۴-۳-۱-۲- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

مدل عددی CCHE2D با به کارگیری نرم افزار پیش پردازنده CCHE-MESH به ایجاد یک شبکه ساختاری دوبعدی برای میدان موردنظر می پردازد. به همین منظور ابتدا دو مدل رقومی منطبق بر مشخصات مدل آزمایشگاهی، مربوط به دو کانال سینوسی مورد نظر تولید گردید و سپس نتایج حاصله به نرم افزار CCHE2D-MESH برای تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی گردید. پس از ورود داده های هندسی به محیط نرم افزار و تعیین مرزهای کانال، محدوده موردنظر با استفاده از روش جبری و محاسباتی شبکه بندی شده است. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده است. خطوط شبکه طوری تنظیم شد که تا حد کافی هموار بوده و در ضمن خطوط مزبور در دو جهت، حالت متعامد داشته باشند. ابعاد شبکه محاسباتی برای کانال سینوسی کوچک، 25×327 و برای کانال سینوسی بزرگ، 25×967 انتخاب گردید. با انجام این عملیات مجموع تعداد سلول های تولید شده برای کانال سینوسی کوچک 7824 و برای کانال سینوسی بزرگ 23184 می باشد. پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی،

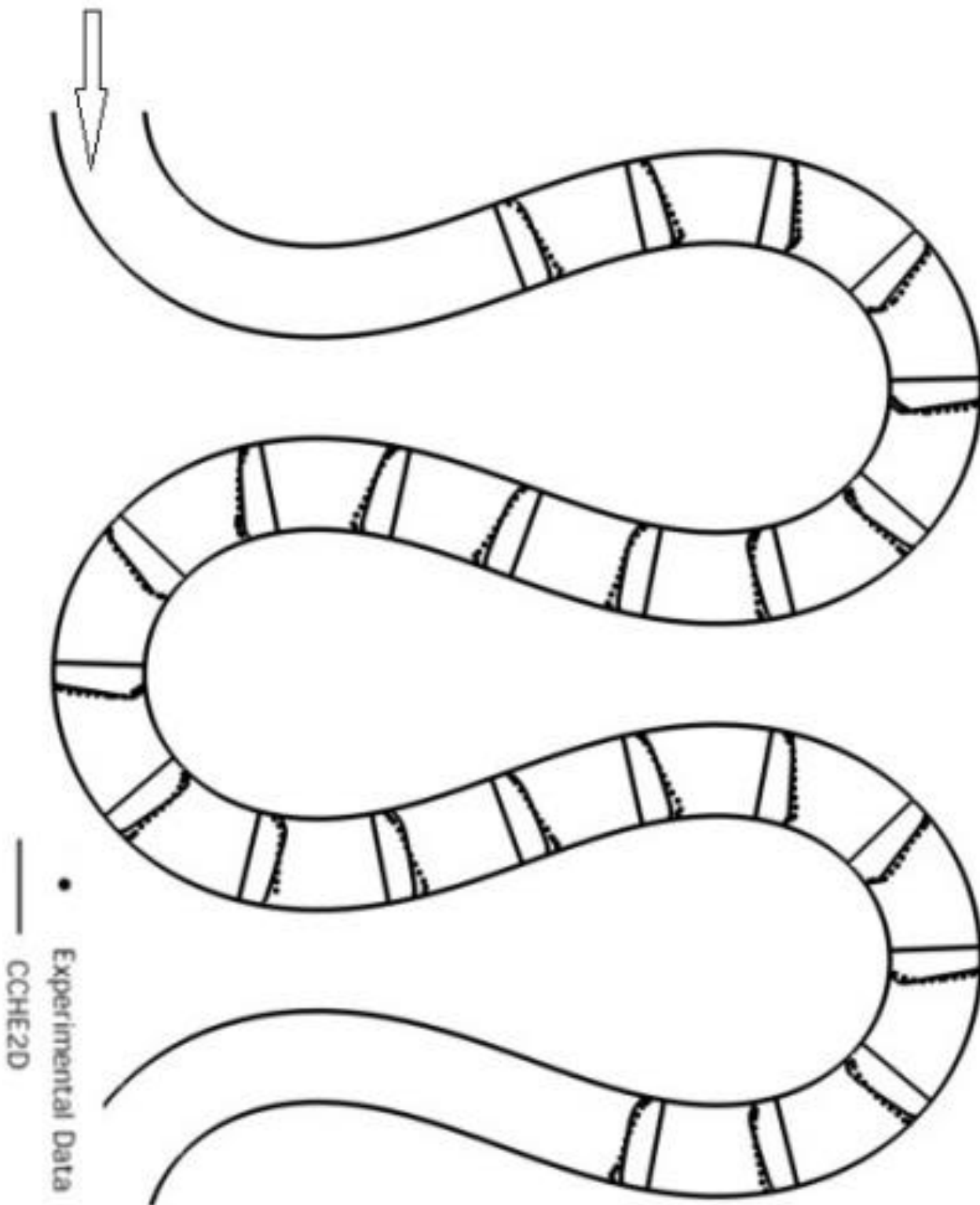
شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در ورودی کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و برای کانال سینوسی کوچک و بزرگ به ترتیب مقدار ۲.۱ و ۲۰.۱ لیتر بر ثانیه به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و عمق نرمال با توجه به شیب طولی به آن معرفی گردید. سطح آبی با تراز ۰.۳۲ و ۰.۳ متر به ترتیب برای کانال کوچک و بزرگ، به عنوان شرایط اولیه برای عمق آب بالادست و با تراز عمق نرمال برای عمق آب پایین دست به مدل معرفی شد. از معادله وو و ونگ برای محاسبه زبری بستر استفاده شد. پس از معرفی شرایط اولیه و مرزی و ضریب مقاومت بستر، مدل تا دستیابی به شرایط تعادل اجرا گردید. همانند مدل‌های آزمایشگاهی، در مدل عددی نیز شرایط تعادل و اتمام زمان شبیه‌سازی، زمانی محرز می‌گردد که تغییرات محسوسی در نتایج پروفیل سطح آب، در محل خم مشاهده نگردد.

۳-۱-۳-۴- واسنجی مدل عددی

مدل CCHE2D با استفاده از اندازه‌گیری‌ها برای بدست آوردن پارامترهای مناسب برای محاسبه جریان کالیبره شد. شکل (۳-۴) نتایج کالیبراسیون سرعت‌های جریان متوسط‌گیری شده در عمق را نشان می‌دهد. کالیبراسیون مدل به طور کلی رضایت بخش است.



(الف)



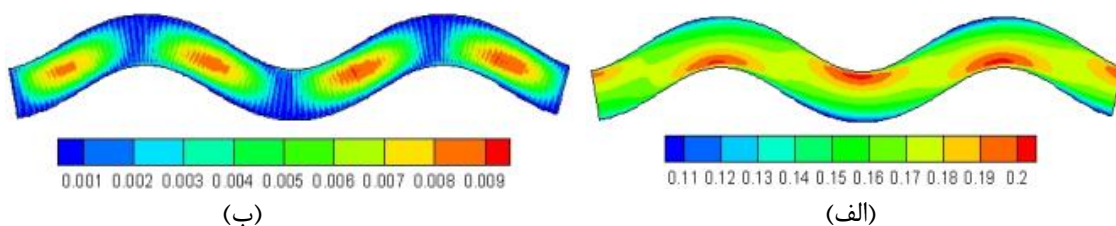
(ب)

شکل (۳-۴) کالیبراسیون مدل (سرعت جریان متوسط گیری شده در عمق) (الف) زاویه انحراف 30° ، (ب) زاویه انحراف 110° . نقاط نشان دهنده داده های مشاهداتی و خطوط نشان دهنده نتایج شبیه سازی میباشد.

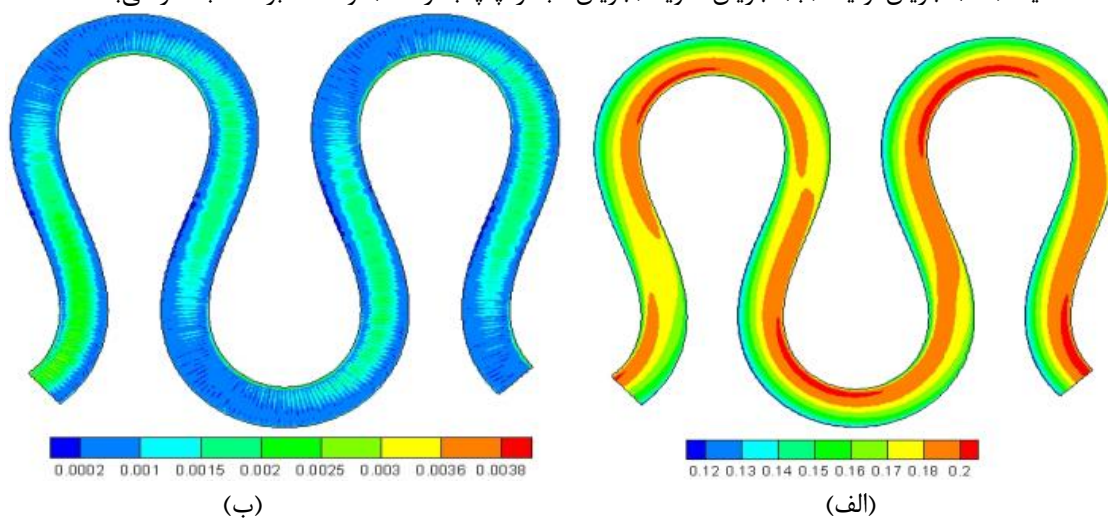
۴-۳-۱-۴- نتایج و بحث

شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) ساختار جریان شبیه‌سازی شده در دو کانال سینوسی با زاویه انحراف 30° و 110° نشان می‌دهد. این شکل‌ها شدت جریان اولیه (طولی) و جریان ثانویه (عرضی) را نمایش می‌دهد.

بستر این کانال‌ها ثابت است. بنابراین، جریان‌های ثانویه نشان داده شده در شکل‌های (۴-۴-ب) و (۴-۵-ب) تنها به علت انحنای کانال ایجاد می‌شوند. بر اساس شکل‌های مذکور هسته جریان اولیه ماکزیمم در ساحل داخلی باقی می‌ماند تا اینکه به قسمت‌های متقاطع می‌رسد. موقعیت هسته جریان‌های بالا در کانال‌های با حرکت موجی بالا، تمایل به انتقال به سمت بالا دست دارد. در مقابل، جریان‌های ثانویه در حوالی قسمت‌های انتقالی با سرعت ماکزیمم حدود 2% - 5% جریان اولیه قویتر هستند.



شکل (۴-۴) ساختار جریان شبیه‌سازی شده در کانال مارپیچی با زاویه انحراف 30° ، بستر ثابت، و دبی 2.1 لیتر بر ثانیه، (الف) جریان اولیه، (ب) جریان ثانویه (جریان آب از چپ به راست). واحدها بر حسب متر می‌باشد.



شکل (۴-۵) ساختار جریان شبیه‌سازی شده در کانال مارپیچی با زاویه انحراف 110° ، بستر ثابت، و دبی 2.01 لیتر بر ثانیه، (الف) جریان اولیه، (ب) جریان ثانویه (جریان آب از چپ به راست). واحدها بر حسب متر می‌باشد.

۴-۳-۲- صحت سنجی نرم افزار (انتقال رسوب)

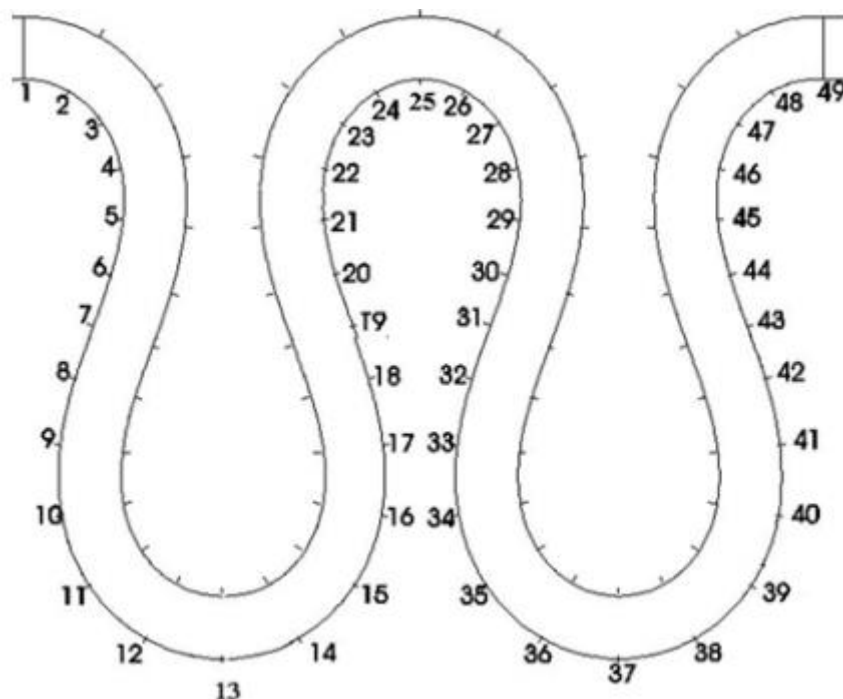
۴-۳-۲-۱- مشخصات مدل آزمایشگاهی

در این بخش از آزمایش ترمینی در سال 2009 [۵۶] استفاده شد. مشخصات پلان و موقعیت مقاطع عرضی اندازه‌گیری شده، در شکل (۴-۶) نشان داده شده است. شکل پلان فلوم یک کانال سینوسی با زاویه انحراف 110° می‌باشد. طول کانال 23.46 متر و نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال 2.31 می‌باشد. عرض کانال 0.5 متر است. فلوم دارای بستر متحرک است. بستر فلوم از ماسه کوارتز با قطر متوسط 0.65 میلیمتر و انحراف استاندارد هندسی 1.3 میلیمتر پوشیده شده است. تنش برشی مرزی بحرانی برای هوادهی قطر متوسط رسوب 0.35 نیوتن بر متر مربع تخمین زده شده است. دیگر مشخصات جریان و هندسی مورد استفاده در آزمایش ترمینی در جدول (۴-۲) خلاصه شده است.

جدول (۴-۲) مشخصات جریان و هندسی آزمایش ترمینی [۵۶]

	θ_0	RUN	$\Lambda = 2\pi B$ (m)	L (m)	δ	Q ($l s^{-1}$)	D_{50} (mm)	B (cm)	h_m (cm)
Termini (2009)	110°	MB-2	3.142	11.712	3.73	19.0	0.65	50	5.5
(Continue)									
	θ_0	RUN	S_{bc}	U_m (cm/s)	(Fr)				
Termini (2009)	110°	MB-2	0.371	69.1	0.900				

در جدول فوق θ_0 زاویه انحراف، Λ طول موج مئاندر و $\Lambda \approx 2\pi B$ ، L طول یک کانال منحنی روی یک طول موج مئاندری، δ ضریب پیچشی، Q دبی جریان، D_{50} قطر متوسط، B عرض جریان، h_m عمق جریان متوسط کانال، S_{bc} شیب بستر، U_m سرعت متوسط کانال، Re عدد رینولدز و Fr عدد فرود است.



شکل (۴-۶) مشخصات پلان فلوم آزمایشگاهی [۵۶]

۴-۳-۲- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

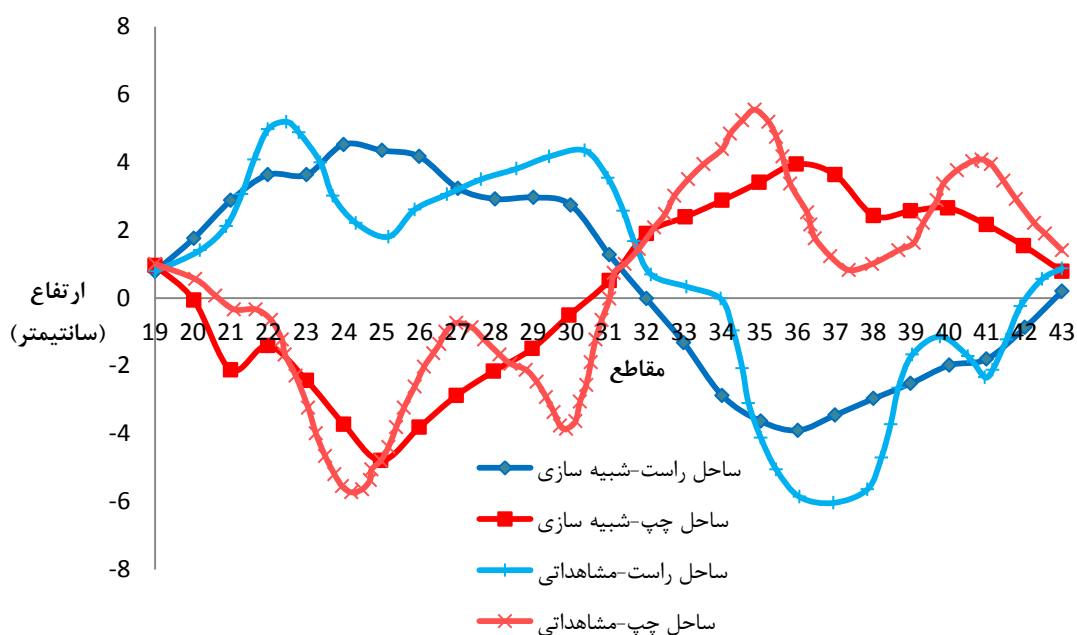
مدل عددی CCHE2D با به کارگیری نرم‌افزار پیش‌پردازنده CCHE-MESH به ایجاد یک شبکه ساختاری دو بعدی برای میدان موردنظر می‌پردازد. به همین منظور ابتدا یک مدل رقومی منطبق بر مشخصات مدل آزمایشگاهی تولید گردید و سپس نتایج حاصله به نرم افزار CCHE2D-MESH برای تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی گردید. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم افزار و تعیین مرزهای کانال، محدوده مورد نظر با استفاده از روش جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شده است. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده است. خطوط شبکه طوری تنظیم شد که تا حد کافی هموار بوده و در ضمن خطوط مزبور در دو جهت، حالت متعامد داشته باشند. ابعاد شبکه محاسباتی 26×1211 انتخاب گردید که با انجام این عملیات مجموع تعداد سلول‌های تولید شده در این مدل 30250 می‌باشد.

پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم‌افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در

ورودی کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و مقدار ۱۹ لیتر بر ثانیه به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و عمق نرمال با توجه به شیب طولی ۰.۳۷، به آن معرفی گردید. سطح آبی با تراز ۰.۰۵۵ متر به عنوان شرایط اولیه برای عمق آب بالادست و با تراز عمق نرمال برای عمق آب پایین دست به مدل معرفی شد. برای شبیه‌سازی رسوب اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال گردید. به دلیل عدم تزریق رسوب در کانال تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (شامل دانه‌بندی، روابط تعیین ظرفیت انتقال رسوب و...) اکتفا گردید، به این منظور از معادله وو و همکاران برای انتقال بار بستر استفاده شده است. مدل آشفتگی توزیع سهموی لزجت گردابه‌ای و ضریب لغزش دیواره ۰.۵ انتخاب شد. همچنین از معادله وو و ونگ برای محاسبه زبری بستر استفاده شد. مدل بوسیله مقایسه نتایج محاسبه شده با تغییر شکل مشاهده شده بستر بعد از ۱۵۰ دقیقه کالیبره شد. پس از کالیبراسیون شبیه‌سازی انتقال رسوب و تغییر شکل بستر در کانال منحنی انجام شد.

۴-۳-۲-۳- واسنجی مدل عددی

مدل بوسیله مقایسه نتایج محاسبه شده با تغییر شکل مشاهده شده بستر بعد از ۱۵۰ دقیقه کالیبره شد (شکل ۴-۷). بر اساس شکل (۴-۷)، کالیبراسیون مدل به طور کلی رضایت‌بخش است. مدل تغییرات بستر (فرسایش و رسوبگذاری) در آخرین خم را کمتر از مقادیر مشاهده شده برآورد نمود. که ممکن است ناشی از عدم دقت جمله پخش در معادلات حاکم جریان باشد.



شکل (۷-۴) کالیبراسیون مدل (اجرای MB-2 ترمینی [۵۶])

برای تعیین کمیت کارایی کالیبراسیون، درصد بياس (PBIAS) و آمار باقی مانده نش-ساتکلیف (NS) در این قسمت در جمله‌های تغییر توپوگرافی محاسبه شده در برابر اندازه‌گیری‌ها استفاده شده است. PBIAS و NS به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$PBIAS = \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})}{\sum_{t=1}^N q_t^{obs}} \times 100\% \quad (10-4)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_t^{sim} - q_t^{obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_t^{obs} - q_t^{mean})^2} \quad (11-4)$$

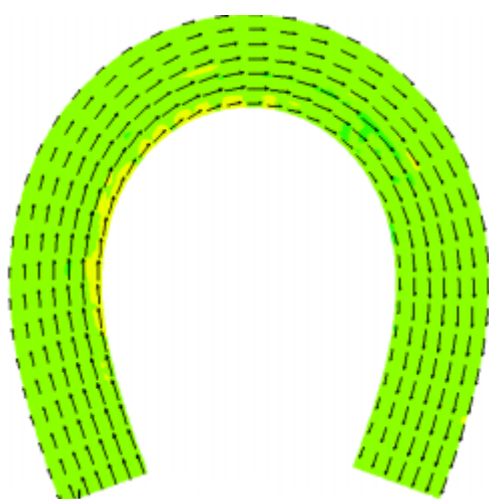
که q_t^{mean} مقدار متوسط مقادیر مشاهداتی است، q^{sim} و q^{obs} به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی می‌باشند. زیر نویس t نشان‌دهنده هر مقطع عرضی می‌باشد. مقدار PBIAS تمایل نتایج شبیه‌سازی به بزرگتر یا کوچکتر بودن نسبت به نقطه مقابل مشاهداتی آنها را نشان می‌دهد. مقدار بهینه PBIAS صفر است. مقدار NS کسری از واریانس مقادیر مشاهداتی شرح داده شده بوسیله مدل در جمله‌های مقدار نسبی واریانس باقی‌مانده به واریانس داده‌ها است. مقدار بهینه NS یک واحد مثبت است. جدول (۳-۴) نتایج کالیبراسیون مربوط به PBIAS و NS را بطور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول (۳-۴) ارزیابی کالیبراسیون مدل در شرایط آزمایش ترمینی

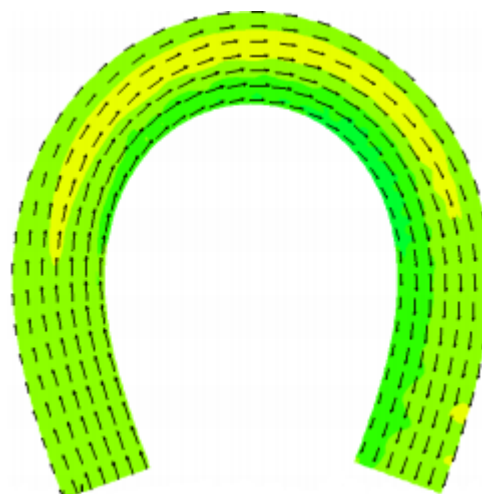
مقاطع عرضی کانال	ساحل چپ		ساحل راست	
	PBIAS	NS	PBIAS	NS
۱۹-۳۱	-۳۲.۸۴	۰.۷۵	-۰.۶۴	۰.۷۹
۳۱-۴۳	۰.۰۶	۰.۷۱	۴.۶۸	۰.۸۴
۱۹-۴۳	-۷.۶۵	۰.۷۸	۷.۷۷	۰.۷۶

۴-۳-۲-۴- نتایج و بحث

پس از کالیبراسیون، شبیه‌سازی انتقال رسوب و تغییر شکل بستر در کانال منحنی انجام شد. شکل (۴-۸) تغییر شکل بستر در دومین خم کانال مئاندری در زمان های الف) (۰.۱ دقیقه، ب) (۷ دقیقه، ج) (۱۴ دقیقه، د) (۲۳ دقیقه، ه) (۳۳ دقیقه، و) (۵۲ دقیقه را نشان می‌دهد. در مدل‌سازی عددی، مشخص ترین مناطق رسوبی و فرسایشی ابتدا در سمت راست بالای رأس قوس اتفاق می‌افتد و به تدریج با گذشت زمان به سمت پایین دست توسعه پیدا می‌کند. ابتدا انباشت ماسه‌ای در ساحل داخلی تشکیل می‌شود، و سپس فرسایش در ساحل خارجی به وجود می‌آید. نوسانات ماسه‌ای در شبیه‌سازی نیز مشاهده می‌شود.

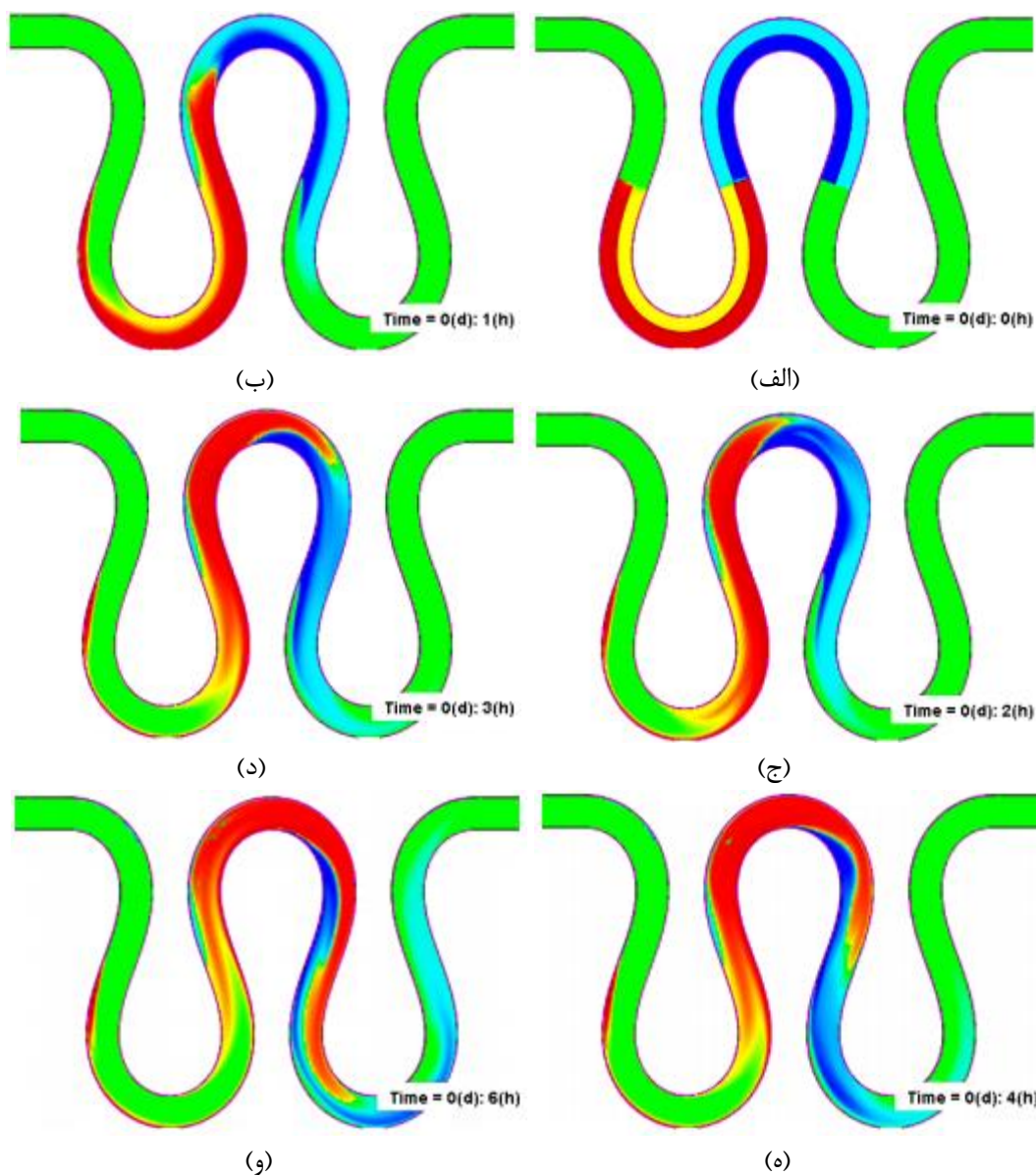


(ب)



(الف)

شکل (۹-۴) انتقال رسوب در کانال منحنی را نشان می‌دهد. در زمان اولیه ۰ دقیقه، رنگ ساختگی ذرات رسوب در کناره‌های داخلی و خارجی دو خم متوالی از طریق افزایش و کاهش ۰.۱ درصدی اندازه ذرات مشاهده می‌شود. از اینرو، می‌توانیم ذرات رنگی که به سمت پایین دست منتقل می‌شوند را مشاهده کنیم. شکل (۹-۴) فرآیند انتقال رسوب و رسوبگذاری را در مدت ۶ ساعت نشان می‌دهد. براساس شکل (۹-۴) بیشترین رسوب برداشته شده از ساحل خارجی در خم بعدی انباشته می‌شود، اما تقاطع جلویی خط مرکزی حول رأس به طور کلی در معرض آبشستگی قرار می‌گیرد.



شکل (۹-۴) توزیع مجدد رسوبات در کانال مماندری در زمان‌های الف (۰، ب ۱ ساعت، ج ۲ ساعت، د ۳ ساعت، ه ۴ ساعت، و ۶ ساعت

با این حال، هنوز هم تعیین این موضوع که چند درصد از رسوبات تقاطع خط مرکزی فرسایش پیدا خواهند کرد، مشکل است. چرا که مدل CCHE2D فقط ترکیب مواد روی سطح بستر را محاسبه میکند.

فصل پنجم

شبيه سازى، استخراج نتايج و بحث

۵-۱- مقدمه

همان‌گونه که در فصل چهارم مشاهده گردید، صحت‌سنجی مدل‌سازی نرم‌افزار با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی مربوطه انجام شد و توانایی مدل CCHE2D در زمینه مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب در خم‌ها اثبات گردید. به همین منظور در این مرحله از تحقیق به شبیه‌سازی موارد مورد توجه در این مطالعه و استخراج نتایج می‌پردازیم.

۵-۲- شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب

۵-۲-۱- بررسی تأثیر شعاع انحنای خم بر الگوی جریان و انتقال رسوب

۵-۲-۱-۱- مشخصات مدل هندسی

مدل هندسی مورد استفاده در این بخش کانالی با قوس ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۰.۵ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۰.۵ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای مرکزی ۲.۴ متر (قوس ملایم با نسبت شعاع انحنای در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۴)، ۱.۸ متر (قوس متوسط با نسبت شعاع انحنای در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۳) و ۱.۲ متر (قوس تند با نسبت شعاع انحنای در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۲) به هم متصل گردیده است. کانال از جنس شیشه می‌باشد. شیب کانال صفر، ارتفاع آن ۷۰ سانتیمتر و عرض آن ۶۰ سانتیمتر است. کف کانال رسوباتی با قطر متوسط ۱.۲۸ میلیمتر و انحراف معیار ۱.۳ میلیمتر تا عمق ۳۵ سانتیمتری پوشیده شده است. دبی جریان و عدد فرود در کلیه مدل‌سازی‌ها ثابت و به ترتیب برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه و ۰.۳۴ می‌باشد.

۵-۲-۱-۲- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

با توجه به توضیحات داده شده در فصل قبل در خصوص تولید شبکه محاسباتی، برای تهیه شبکه‌های محاسباتی مربوط به این مطالعه، ابتدا مدل‌های رقومی منطبق بر مشخصات هندسی کانال‌ها، مربوط

به هر بخش مورد مطالعه تولید گردید و سپس نتایج حاصله به نرم افزار CCHE2D-MESH برای تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی گردید. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزهای کانال، محدوده موردنظر با استفاده از روش جبری و محاسباتی شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینه شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، 0.01×0.01 متر برای هر یک از سلول‌های کانال انتخاب شد. خطوط شبکه طوری تنظیم شد که تا حد کافی هموار بوده و در ضمن خطوط مزبور در دو جهت، حالت متعامد داشته باشند. با انجام این عملیات مجموع تعداد سلول‌های تولید شده مربوط به این بخش، برای شعاع انحنای تند 17280 ، برای شعاع انحنای متوسط 22980 و برای شعاع انحنای ملایم 28620 می‌باشد.

پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در ورودی کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و مقدار 25 لیتر بر ثانیه به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و مقدار 0.115 متر به آن معرفی گردید. برای شبیه‌سازی رسوب اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال گردید. به دلیل عدم تزریق رسوب در کانال تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (شامل دانه‌بندی، روابط تعیین ظرفیت انتقال رسوب و...) اکتفا گردید. سطح آبی با تراز 0.115 متر به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شد. یکی از پارامترهای اصلی که در نتیجه برآورد یا تخمین به مدل عددی معرفی می‌گردد ضریب مقاومت جریان یا ضریب مانینگ می‌باشد. به این منظور با توجه به قطر متوسط ذرات ($D50$) و با استفاده از رابطه ساپرامانیا $\left(\frac{D50}{21.1}\right)^{\frac{1}{6}}$ مقدار ضریب مانینگ 0.016 برآورد و این مقدار به مدل عددی معرفی گردید. پس از معرفی شرایط اولیه و مرزی و ضریب مقاومت بستر، مدل با گام زمانی 0.01 ثانیه تا دستیابی به شرایط تعادل اجرا گردید.

در شبیه سازی جریان شرایط تعادل پس از ۱۵۰ ثانیه حاصل شد. همانند مدل های آزمایشگاهی، در مدل عددی نیز شرایط تعادل و اتمام زمان شبیه سازی، زمانی محرز می گردد که تغییرات محسوسی در نتایج پروفیل سطح آب، در محل خم مشاهده نگردد. و برای شبیه سازی انتقال رسوب، زمان شبیه سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شد.

۵-۲-۲- بررسی تأثیر زاویه خم بر الگوی جریان و انتقال رسوب

۵-۲-۲-۱- مشخصات مدل هندسی

مدل هندسی مورد استفاده در این بخش کانالی مستطیلی در نظر گرفته شد. که این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۰.۵ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۰.۵ متر در پایین دست تشکیل می شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس هایی با زاویه مرکزی ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه و به شعاع انحنای مرکزی ۲.۴ متر (قوس ملایم با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۴) به هم متصل گردیده است. کانال از جنس شیشه می باشد. شیب کانال صفر، ارتفاع آن ۷۰ سانتیمتر و عرض آن ۶۰ سانتیمتر است. کف کانال رسوباتی با قطر متوسط ۱.۲۸ میلیمتر و انحراف معیار ۱.۳ میلیمتر تا عمق ۳۵ سانتیمتری پوشیده شده است. دبی جریان و عدد فرود در کلیه مدلسازی ها ثابت و به ترتیب برابر ۲۵ لیتر بر ثانیه و ۰.۳۴ می باشد.

۵-۲-۲-۲- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

با توجه به توضیحات داده شده قبلی در خصوص تولید شبکه محاسباتی، مجموع تعداد سلول های تولید شده مربوط به این بخش برای زاویه مرکزی ۶۰ درجه ۲۱۰۶۰، برای زاویه مرکزی ۹۰ درجه ۲۸۶۲۰، برای زاویه مرکزی ۱۲۰ درجه ۳۶۱۲۰ و برای زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه ۵۱۲۴۰ می باشد.

پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و شبیه سازی جریان آب و رسوب به نرم افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه سازی جریان آب، در ورودی

کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و مقدار ۲۵ لیتر بر ثانیه به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و مقدار ۰.۱۱۵ متر به آن معرفی گردید. برای شبیه سازی رسوب اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال گردید. به دلیل عدم تزریق رسوب در کانال تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (شامل دانه بندی، روابط تعیین ظرفیت انتقال رسوب و...) اکتفا گردید. سطح آبی با تراز ۰.۱۱۵ متر به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شد. یکی از پارامترهای اصلی که در نتیجه برآورد یا تخمین به مدل عددی معرفی می‌گردد ضریب مقاومت جریان یا ضریب مانینگ می باشد. به این منظور با توجه به قطر متوسط ذرات (D50) و با استفاده از رابطه ساپرامانیا مقدار ضریب مانینگ ۰.۰۱۶ برآورد و این مقدار به مدل عددی معرفی گردید. پس از معرفی شرایط اولیه و مرزی و ضریب مقاومت بستر، مدل با گام زمانی ۰.۰۱ ثانیه تا دستیابی به شرایط تعادل اجرا گردید. در شبیه سازی جریان شرایط تعادل پس از ۱۵۰ ثانیه حاصل شد. همانند مدل‌های آزمایشگاهی، در مدل عددی نیز شرایط تعادل و اتمام زمان شبیه‌سازی، زمانی محرز می‌گردد که تغییرات محسوسی در نتایج پروفیل سطح آب، در محل خم مشاهده نگردد. و برای شبیه سازی انتقال رسوب، زمان شبیه سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شد.

۵-۲-۳- بررسی تأثیر شیب طولی کف کانال بر الگوی جریان و انتقال رسوب

۵-۲-۳-۱- مشخصات مدل هندسی

مدل هندسی مورد استفاده در این بخش کانالی با قوس ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۰.۵ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۰.۵ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای مرکزی ۲.۴ متر (قوس ملایم با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۴) به هم متصل گردیده است. این کانال با سه شیب طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲ و ۰.۰۰۲۵ در نظر گرفته شد. کانال از جنس شیشه می باشد. ارتفاع آن ۷۰ سانتیمتر و عرض آن ۶۰ سانتیمتر است. کف کانال رسوباتی با قطر

متوسط ۱.۲۸ میلیمتر و انحراف معیار ۱.۳ میلیمتر تا عمق ۲۵ سانتیمتری پوشیده شده است. دبی جریان و عدد فرود در کلیه مدلسازی‌ها ثابت و به ترتیب برابر ۳۵ لیتر بر ثانیه و ۰.۳۴ می‌باشد.

۵-۲-۳-۲- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

با توجه به توضیحات داده شده قبلی در خصوص تولید شبکه محاسباتی، مجموع تعداد سلول‌های تولید شده مربوط به این بخش برای سه شیب طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۰۲ و ۰.۰۰۲۵، ۲۸۶۲۰ می‌باشد.

پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در ورودی کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و مقدار ۲۵ لیتر بر ثانیه به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و عمق نرمال به مقدار ۰.۰۹۸ متر برای شیب طولی ۰.۰۰۱۵، عمق نرمال به مقدار ۰.۰۸۹ برای شیب طولی ۰.۰۰۲ و عمق نرمال به مقدار ۰.۰۸۳ متر برای شیب طولی ۰.۰۰۲۵ به آن معرفی گردید. برای شبیه‌سازی رسوب اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال گردید. به دلیل عدم تزریق رسوب در کانال تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (شامل دانه بندی، روابط تعیین ظرفیت انتقال رسوب و...) اکتفا گردید. سطح آبی با تراز ۰.۱۱۵ متر به عنوان شرایط اولیه برای عمق آب بالادست و با تراز عمق نرمال به مقدار ۰.۰۹۸ متر برای شیب طولی ۰.۰۰۱۵، عمق نرمال به مقدار ۰.۰۸۹ برای شیب طولی ۰.۰۰۲ و عمق نرمال به مقدار ۰.۰۸۳ متر برای شیب طولی ۰.۰۰۲۵ برای عمق آب پایین دست به مدل معرفی شد. یکی از پارامترهای اصلی که در نتیجه برآورد یا تخمین به مدل عددی معرفی می‌گردد ضریب مقاومت جریان یا ضریب مانینگ می‌باشد. به این منظور با توجه به قطر متوسط ذرات (D50) و با استفاده از رابطه سابرامانیا مقدار ضریب مانینگ ۰.۰۱۶ برآورد و این مقدار به مدل عددی معرفی گردید. پس از معرفی شرایط اولیه و مرزی و ضریب مقاومت بستر، مدل با گام زمانی ۰.۰۱ ثانیه تادستیایی به شرایط تعادل اجرا گردید. در شبیه‌سازی جریان شرایط تعادل پس از ۱۵۰ ثانیه حاصل شد. همانند مدل‌های آزمایشگاهی، در مدل

عددی نیز شرایط تعادل و اتمام زمان شبیه‌سازی، زمانی محرز می‌گردد که تغییرات محسوسی در نتایج پروفیل سطح آب، در محل خم مشاهده نگردد. و برای شبیه سازی انتقال رسوب، زمان شبیه سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شد.

۵-۲-۴- بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر الگوی جریان و انتقال

رسوب

۵-۲-۴-۱- مشخصات مدل هندسی

مدل هندسی مورد استفاده در این بخش کانالی با قوس ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. این کانال از یک قسمت مستقیم به طول ۰.۵ متر در بالادست و همچنین قسمت مستقیمی به طول ۰.۵ متر در پایین دست تشکیل می‌شود که این دو مسیر مستقیم توسط قوس ۹۰ درجه به شعاع انحنای مرکزی ۲.۴ متر (قوس ملایم با نسبت شعاع انحنا در مرکز قوس به عرض کانال مساوی ۴) به هم متصل گردیده است. کانال از جنس شیشه می‌باشد. شیب کانال صفر، ارتفاع آن ۷۰ سانتیمتر و عرض آن ۶۰ سانتیمتر است. کف کانال رسوباتی با قطر متوسط ۱.۲۸ میلیمتر و انحراف معیار ۱.۳ میلیمتر تا عمق ۳۵ سانتیمتری پوشیده شده است.

۵-۲-۴-۲- شرایط هیدرولیکی شبیه‌سازی‌ها

شرایط هیدرولیکی جریان به گونه‌ای تنظیم شد که از نظر سرعت جریان در مسیر مستقیم قبل از قوس سه حالت $U/U_c < 1$ ، $1 < U/U_c < 1.1$ و $1.24 < U/U_c < 1.33$ برقرار باشد. تنظیم این شرایط منجر به برقراری شرایط هیدرولیکی متفاوتی از نظر عمق و سرعت جریان و نیز عدد فرود می‌شود. محدوده دبی بین ۲۵ تا ۴۲ لیتر بر ثانیه انتخاب و سپس با تنظیم عمق، سرعت مناسب برای تأمین شرایط فوق فراهم شد. برای محاسبه سرعت بحرانی از رابطه FHWA [۵۸] استفاده شد. خلاصه‌ای از این شرایط هیدرولیکی در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول (۵-۱) خلاصه شرایط هیدرولیکی در شبیه‌سازی‌های انجام شده

ردیف	Q (Lit/s)	U (m/s)	h_0 (m)	U/Uc	Fr
۱	۲۵	۰.۳۵۶	۰.۱۱۷	۰.۸۶۷	۰.۳۰۰
۲	۲۵	۰.۴۰۱	۰.۱۰۴	۱.۰۴۰	۰.۳۹۳
۳	۲۵	۰.۴۹۰	۰.۰۸۵	۱.۳۲۲	۰.۵۸۸
۴	۳۷	۰.۴۲۲	۰.۱۴۶	۰.۹۱۲	۰.۲۳۹
۵	۳۷	۰.۴۵۳	۰.۱۳۶	۱.۱۰۰	۰.۳۴۰
۶	۳۷	۰.۵۲۳	۰.۱۱۸	۱.۳۲۵	۰.۴۵۱
۷	۴۲	۰.۴۲۴	۰.۱۶۵	۰.۹۲۸	۰.۲۲۵
۸	۴۲	۰.۴۵۲	۰.۱۵۵	۱.۰۹۱	۰.۲۹۷
۹	۴۲	۰.۵۲۶	۰.۱۳۳	۱.۳۰۶	۰.۴۰۳

در این جدول Q دبی جریان بر حسب لیتر بر ثانیه، h_0 عمق جریان ورودی بر حسب متر، U سرعت جریان ورودی بر حسب متر بر ثانیه، Uc سرعت بحرانی جریان برای حرکت رسوب در مسیر مستقیم بر حسب متر بر ثانیه و Fr عدد فرود است.

۵-۲-۴-۳- تولید شبکه محاسباتی و معرفی شرایط اولیه و مرزی

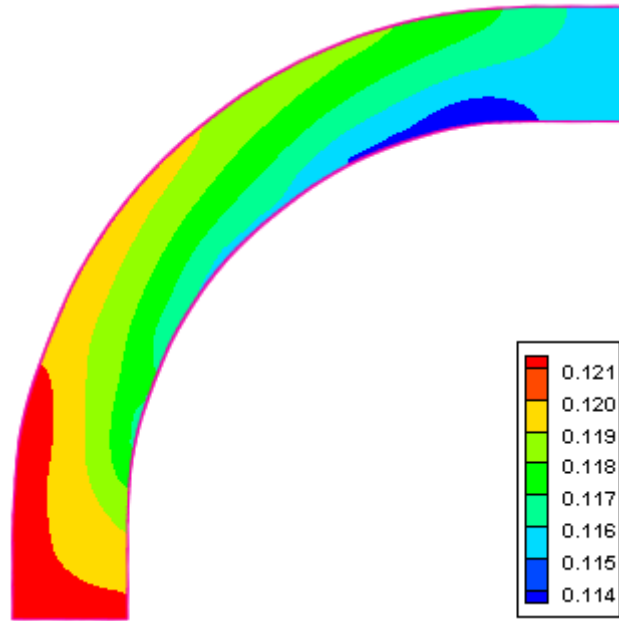
با توجه به توضیحات داده شده قبلی در خصوص تولید شبکه محاسباتی، مجموع تعداد سلول‌های تولید شده مربوط به این بخش برای کانال با قوس ۹۰ درجه و شعاع انحنا ۲۸۶۲۰ می‌باشد. پس از تولید شبکه محاسباتی، مدل برای تعیین شرایط مرزی، شرایط اولیه و شبیه‌سازی جریان آب و رسوب به نرم‌افزار CCHE-GUI معرفی گردید. در این مرحله برای شبیه‌سازی جریان آب، در ورودی کانال از شرط مرزی دبی جریان استفاده و مقادیر مندرج در جدول ۵-۱ به آن معرفی گردید. در پایین دست کانال از شرط مرزی سطح آب استفاده و مقادیر مندرج در جدول ۵-۱ به آن معرفی گردید. برای شبیه‌سازی رسوب اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال گردید. به دلیل عدم تزریق

رسوب در کانال تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (شامل دانه‌بندی، روابط تعیین ظرفیت انتقال رسوب و...) اکتفا گردید. همچنین سطح آبی مطابق با مقادیر مندرج در جدول ۵-۱ نیز به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شد. یکی از پارامترهای اصلی که در نتیجه برآورد یا تخمین به مدل عددی معرفی می‌گردد ضریب مقاومت جریان یا ضریب مانینگ می‌باشد. به این منظور با توجه به قطر متوسط ذرات (D50) و با استفاده از رابطه ساپرامانیا مقدار ضریب مانینگ ۰.۰۱۶ برآورد و این مقدار به مدل عددی معرفی گردید. پس از معرفی شرایط اولیه و مرزی و ضریب مقاومت بستر، مدل با گام زمانی ۰.۰۱ ثانیه تا دستیابی به شرایط تعادل اجرا گردید. در شبیه‌سازی جریان شرایط تعادل پس از ۱۵۰ ثانیه حاصل شد. همانند مدل‌های آزمایشگاهی، در مدل عددی نیز شرایط تعادل و اتمام زمان شبیه‌سازی، زمانی محرز می‌گردد که تغییرات محسوسی در نتایج پروفیل سطح آب، در محل خم مشاهده نگردد. و برای شبیه‌سازی انتقال رسوب، زمان شبیه‌سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شد.

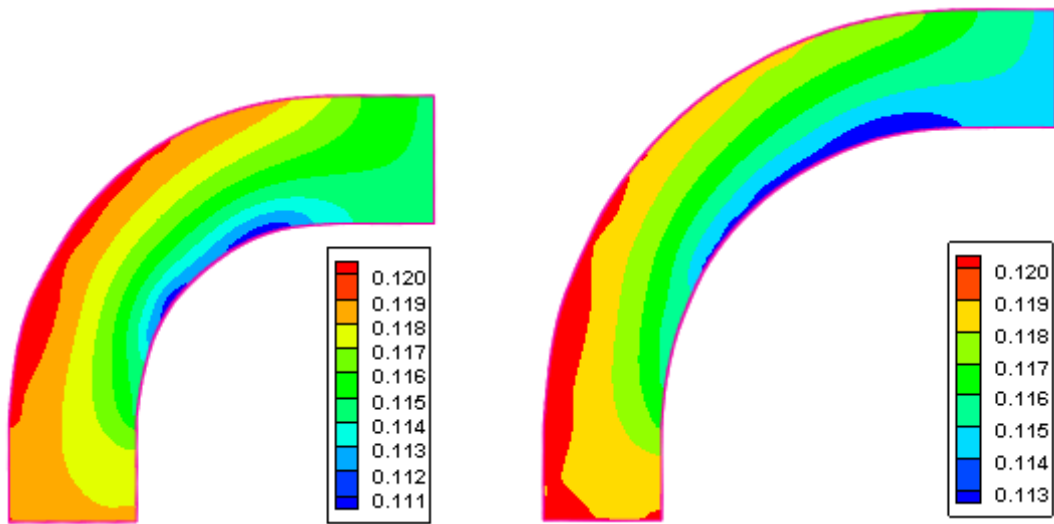
۵-۳- نتایج شبیه‌سازی جریان

۵-۳-۱- بررسی تأثیر شعاع انحنای خم بر الگوی جریان

پس از انجام شبیه‌سازی جریان برای سه شعاع انحنای مورد نظر نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود. شکل (۵-۱) الگوی جریان در پلان کانال در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع انحنای خم، عمق آب در دیواره داخلی و خارجی کانال افزایش پیدا می‌کند، و همچنین محل عمق آب ماکزیمم به ورودی قوس مایل‌تر و محل عمق آب مینیمم به خروجی قوس مایل‌تر می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شعاع انحنای خم، عمق آب در کانال افزایش می‌یابد.



(الف)

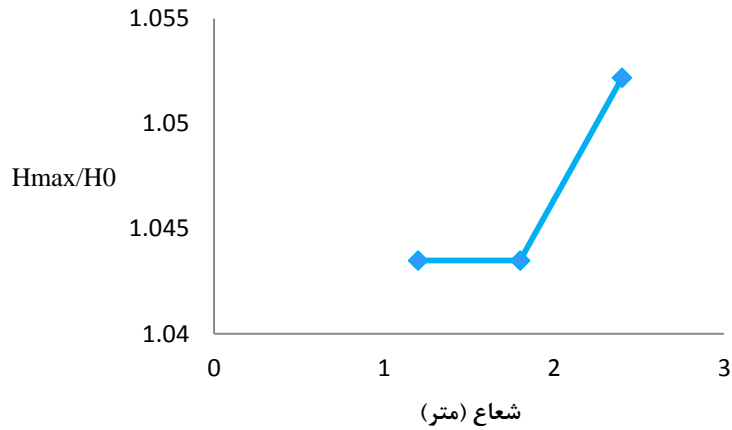


(ج)

(ب)

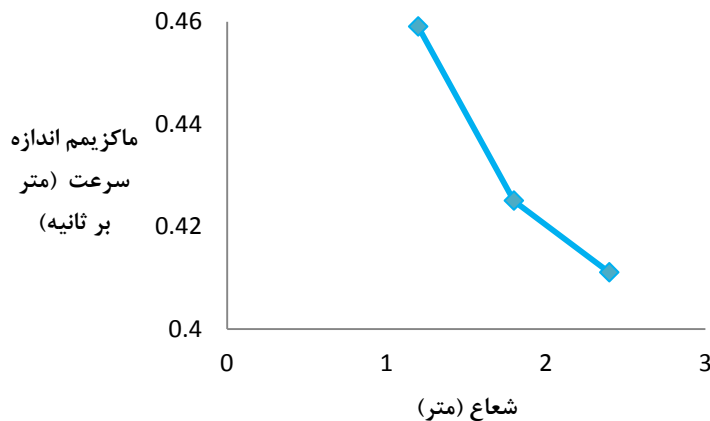
شکل (۱-۵) الگوی جریان در سه شعاع انحنای مرکزی الف (۲.۴، ب) ۱.۸ و ج) ۱.۲ متر (جریان آب از چپ به راست) شکل (۲-۵) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، عمق آب ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای مرکزی از ۱.۲ متر به ۱.۸ متر تغییری نمی‌کند، اما با افزایش شعاع انحنای مرکزی از ۱.۸ متر به ۲.۴ متر افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت عمق آب ماکزیمم، با افزایش

شعاع انحنای مرکزی از ۱.۲ متر (قوس تند) به ۱.۸ متر (قوس متوسط) تغییری نمی‌کند، اما با افزایش شعاع انحنای مرکزی از ۱.۸ متر (قوس متوسط) به ۲.۴ متر (قوس ملایم) افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۵) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر

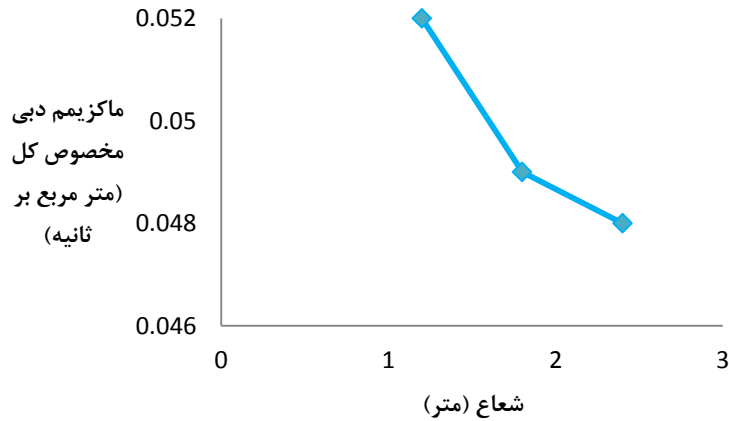
شکل (۳-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنا کاهش می‌یابد، و در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شعاع انحنای خم اندازه سرعت ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۳-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر

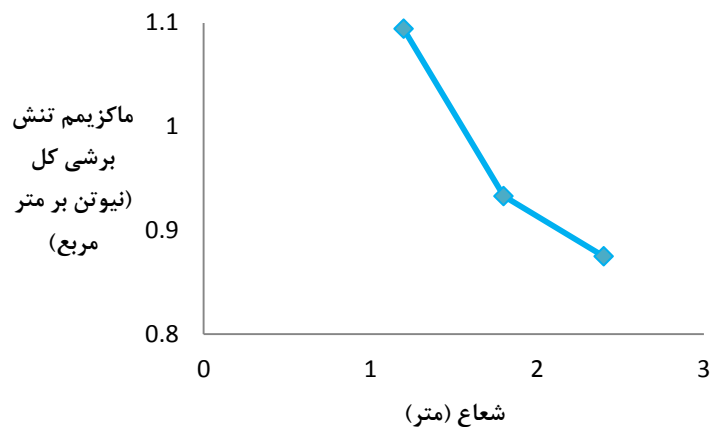
شکل (۴-۵) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنا کاهش

می یابد، و در نتیجه می توان گفت با افزایش شعاع انحنای خم دبی مخصوص کل ماکزیمم کاهش پیدا می کند.



شکل (۴-۵) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۱.۲، ۱.۸ و ۲.۴ متر

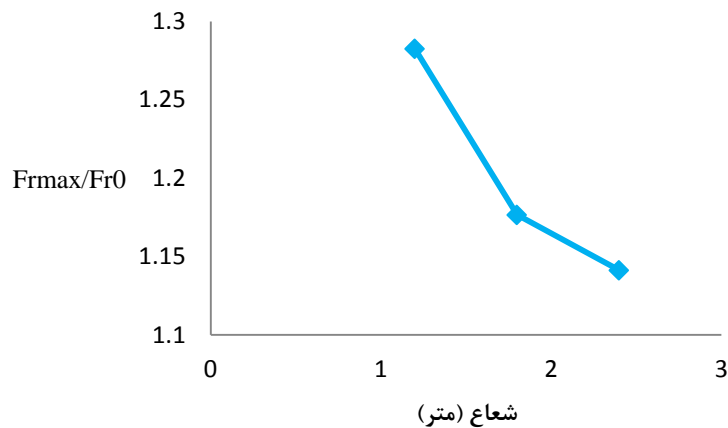
شکل (۵-۵) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۱.۲، ۱.۸ و ۲.۴ متر را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای کاهش می یابد، و در نتیجه می توان گفت با افزایش شعاع انحنای خم تنش برشی کل ماکزیمم کاهش پیدا می کند.



شکل (۵-۵) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در سه شعاع انحنای مرکزی ۱.۲، ۱.۸ و ۲.۴ متر

شکل (۶-۵) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۱.۲، ۱.۸ و ۲.۴ متر را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عدد فرود ماکزیمم، با

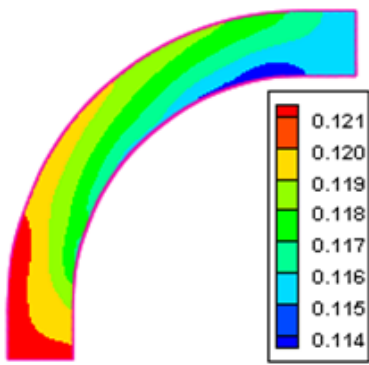
افزایش شعاع انحنا کاهش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شعاع انحنای خم عدد فرود ماکزیمم کاهش پیدا می‌کند.



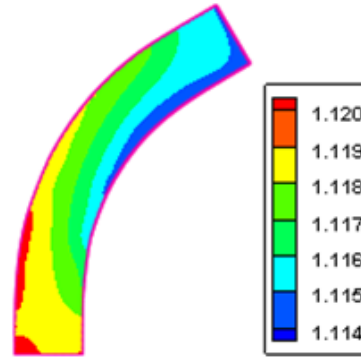
شکل (۵-۶) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در سه شعاع انحنای مرکزی ۲.۴، ۱.۸ و ۱.۲ متر

۵-۳-۲- بررسی تأثیر زاویه خم بر الگوی جریان

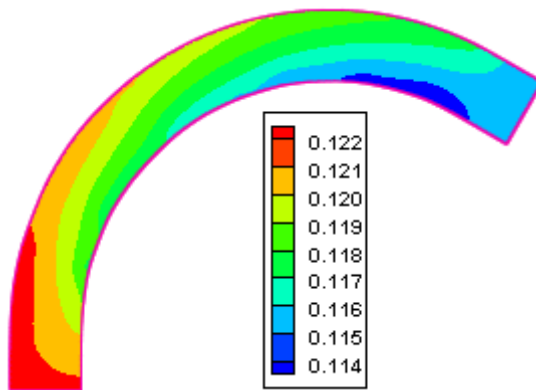
پس از انجام شبیه‌سازی جریان برای چهار زاویه مرکزی مورد نظر، نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود. شکل (۵-۷) الگوی جریان در پلان کانال در زوایای مرکزی ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه خم عمق آب در دیواره خارجی افزایش می‌یابد اما در دیواره داخلی تغییری نمی‌کند، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش زاویه خم، عمق آب ماکزیمم افزایش می‌یابد اما عمق آب مینیمم تغییری نمی‌کند.



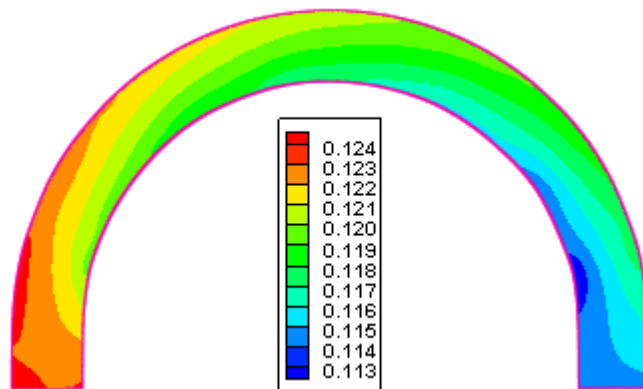
(ب)



(الف)

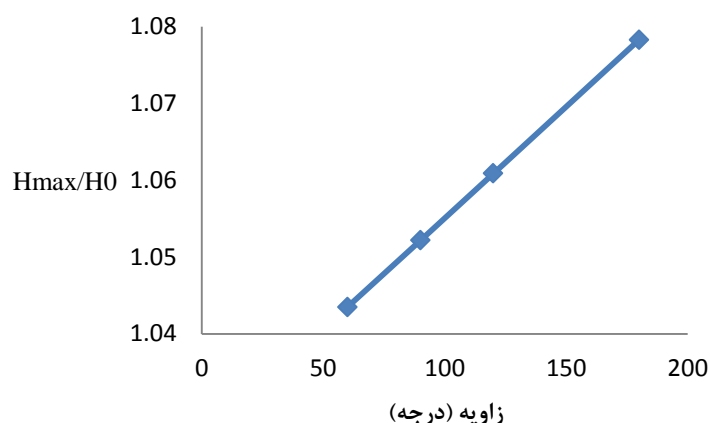


(ج)



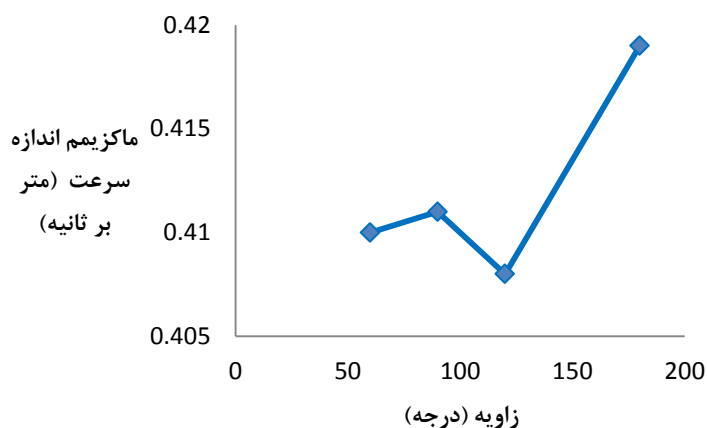
(د)

شکل (۵-۷) الگوی جریان در زوایای الف (۶۰، ب (۹۰، ج (۱۲۰ و د) ۱۸۰ درجه (جریان آب از چپ به راست)
 شکل (۵-۸) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در زوایای مرکزی
 ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عمق آب ماکزیمم، با
 افزایش زاویه مرکزی خم افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش زاویه مرکزی خم عمق آب
 ماکزیمم به طور خطی افزایش پیدا می کند.



شکل (۸-۵) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه

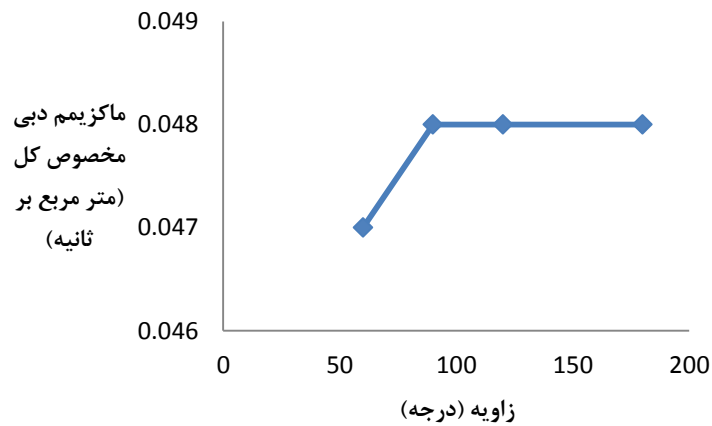
شکل (۹-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از ۶۰ به ۹۰ درجه افزایش، با افزایش زاویه از ۹۰ به ۱۲۰ درجه کاهش و با افزایش زاویه از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه مجدداً افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش زاویه مرکزی خم اندازه سرعت ماکزیمم از الگوی خاصی پیروی نمی کند.



شکل (۹-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه

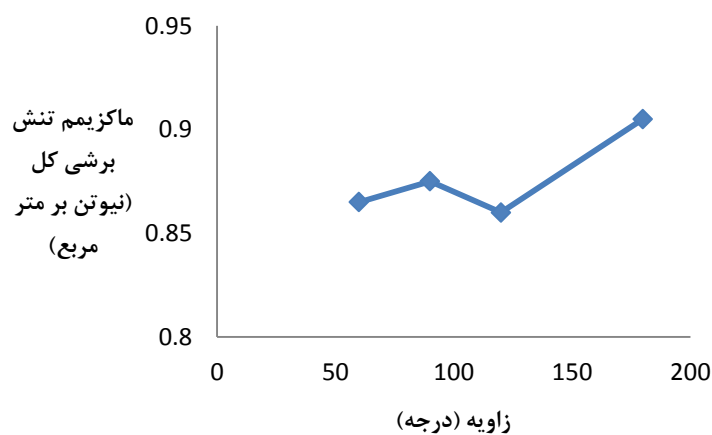
شکل (۱۰-۵) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از ۶۰

به ۹۰ درجه افزایش می‌یابد، و پس از آن با افزایش زاویه به ۱۲۰ و سپس به ۱۸۰ درجه، تغییری نمی‌کند، در نتیجه می‌توان گفت در زوایای بزرگتر از ۹۰ درجه دبی مخصوص کل ثابت می‌باشد.



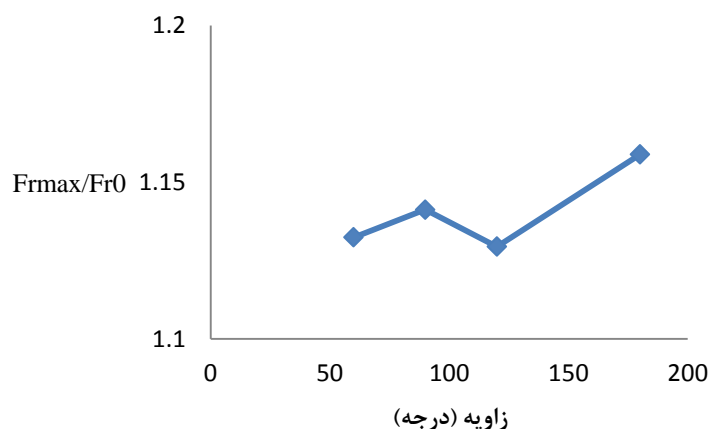
شکل (۵-۱۰) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه

شکل (۵-۱۱) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از ۶۰ به ۹۰ درجه افزایش، با افزایش زاویه از ۹۰ به ۱۲۰ درجه کاهش و با افزایش زاویه از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه مجدداً افزایش می‌یابد، و در نتیجه می‌توان گفت با افزایش زاویه مرکزی خم تنش برشی کل ماکزیمم از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.



شکل (۵-۱۱) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه

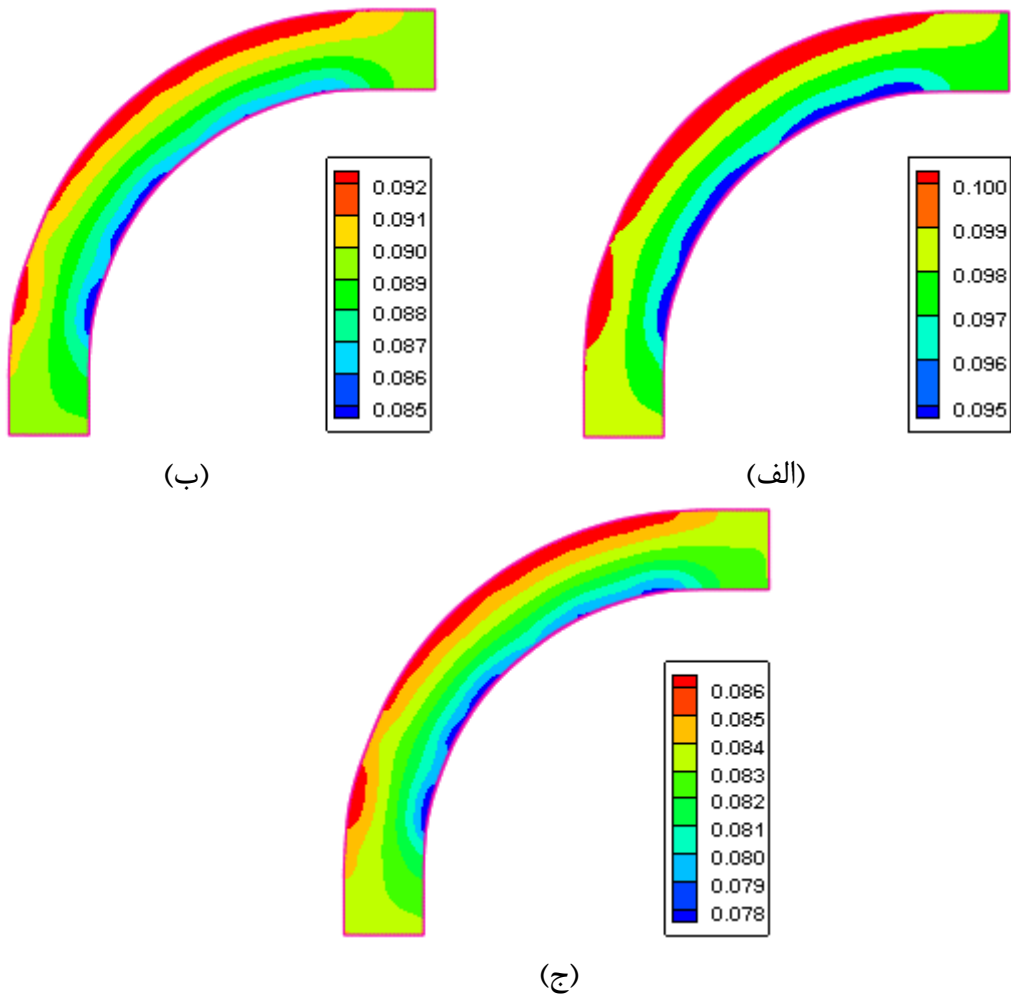
شکل (۵-۱۲) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عدد فرود ماکزیمم، با افزایش زاویه از ۶۰ به ۹۰ درجه افزایش، با افزایش زاویه از ۹۰ به ۱۲۰ درجه کاهش و با افزایش زاویه از ۱۲۰ به ۱۸۰ درجه افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش زاویه خم عدد فرود ماکزیمم از الگوی خاصی پیروی نمی کند.



شکل (۵-۱۲) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه

۵-۳-۳- بررسی تأثیر شیب طولی کف کانال بر الگوی جریان

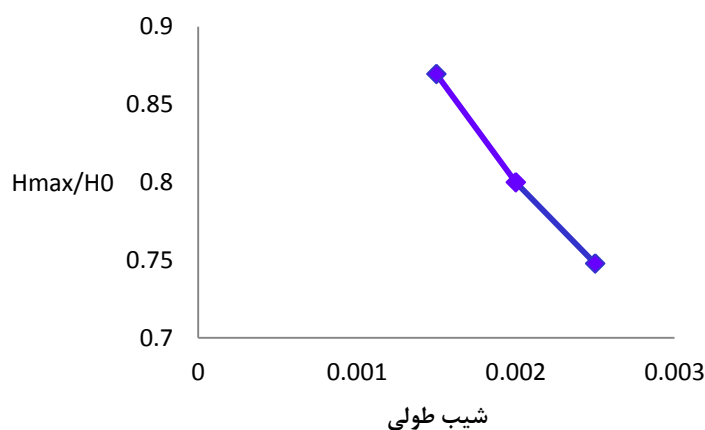
پس از انجام شبیه سازی جریان برای سه شیب طولی مورد نظر نتایج حاصل از این شبیه سازی ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می شود. شکل (۵-۱۳) الگوی جریان در پلان کانال در سه شیب طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، با افزایش شیب طولی کف کانال، عمق آب در دیواره داخلی و خارجی کانال کاهش پیدا می کند.



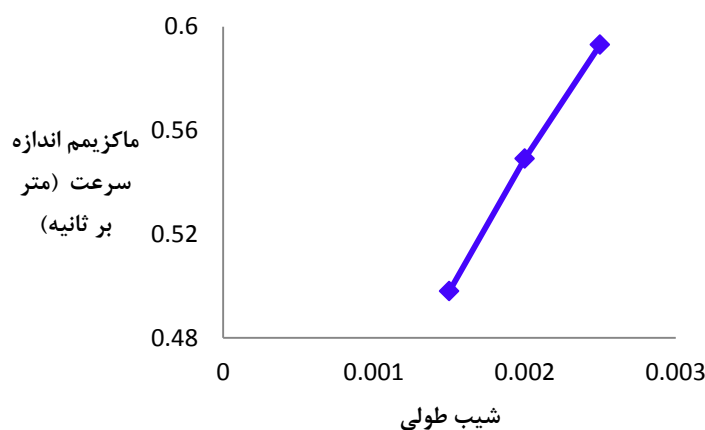
شکل (۵-۱۳) الگوی جریان در شیب های طولی الف (۰.۰۰۱۵، ب (۰.۰۰۲۰ و ج) ۰.۰۰۲۵ (جریان آب از چپ به

راست)

شکل (۵-۱۴) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در سه شیب طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عمق آب ماکزیمم، با افزایش شیب طولی کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش شیب طولی کف کانال عمق آب ماکزیمم کاهش پیدا می کند.

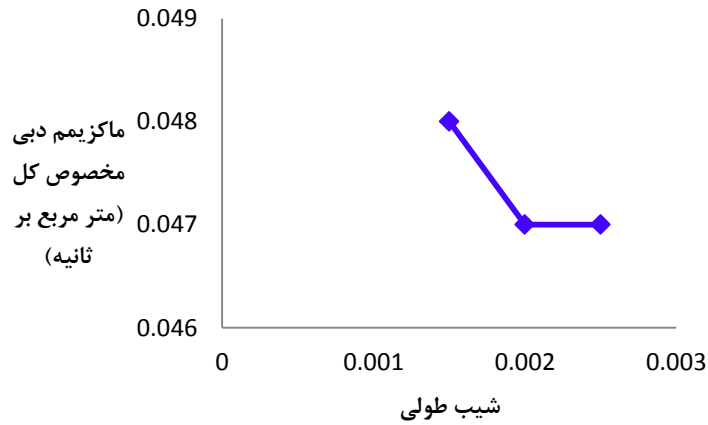


شکل (۵-۱۴) تغییرات عمق آب ماکزیمم بی‌بعد شده با عمق جریان در بالادست خم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اندازه سرعت ماکزیمم در سه شیب طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵ را می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شیب طولی کف کانال اندازه سرعت ماکزیمم به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.



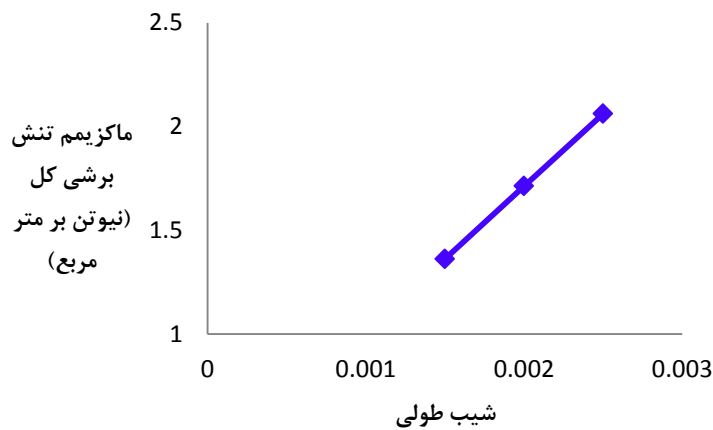
شکل (۵-۱۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در شیب‌های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش شیب طولی از ۰.۰۰۱۵ به ۰.۰۰۲۰ کاهش پیدا می‌کند، و پس از آن با افزایش شیب طولی از ۰.۰۰۲۰ به ۰.۰۰۲۵

تغییری نمی‌کند، در نتیجه می‌توان گفت در شیب طولی بزرگتر از 0.0020 دبی مخصوص کل ماکزیمم ثابت می‌باشد.



شکل (۵-۱۶) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در شیب‌های طولی 0.0015 ، 0.0020 و 0.0025

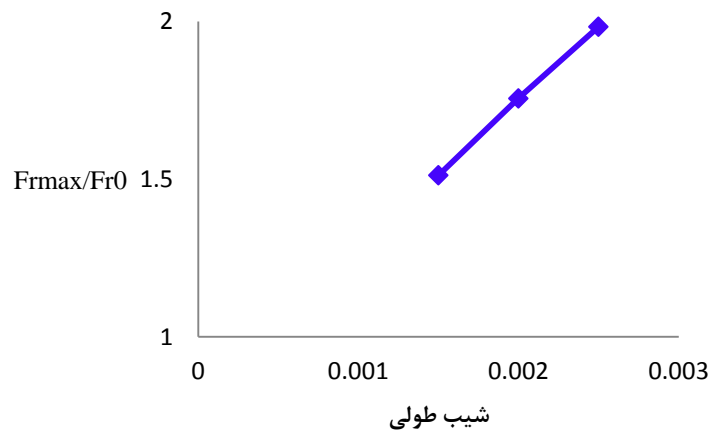
شکل (۵-۱۷) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در سه شیب طولی 0.0015 ، 0.0020 و 0.0025 را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش شیب طولی تنش برشی کل ماکزیمم افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شیب طولی کف کانال تنش برشی کل ماکزیمم به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۵-۱۷) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در شیب‌های طولی 0.0015 ، 0.0020 و 0.0025

شکل (۵-۱۸) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی‌بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در سه شیب طولی 0.0015 ، 0.0020 و 0.0025 را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، عدد فرود

ماکزیمم، با افزایش شیب طولی افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت با افزایش شیب طولی کف کانال عدد فرود ماکزیمم به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.

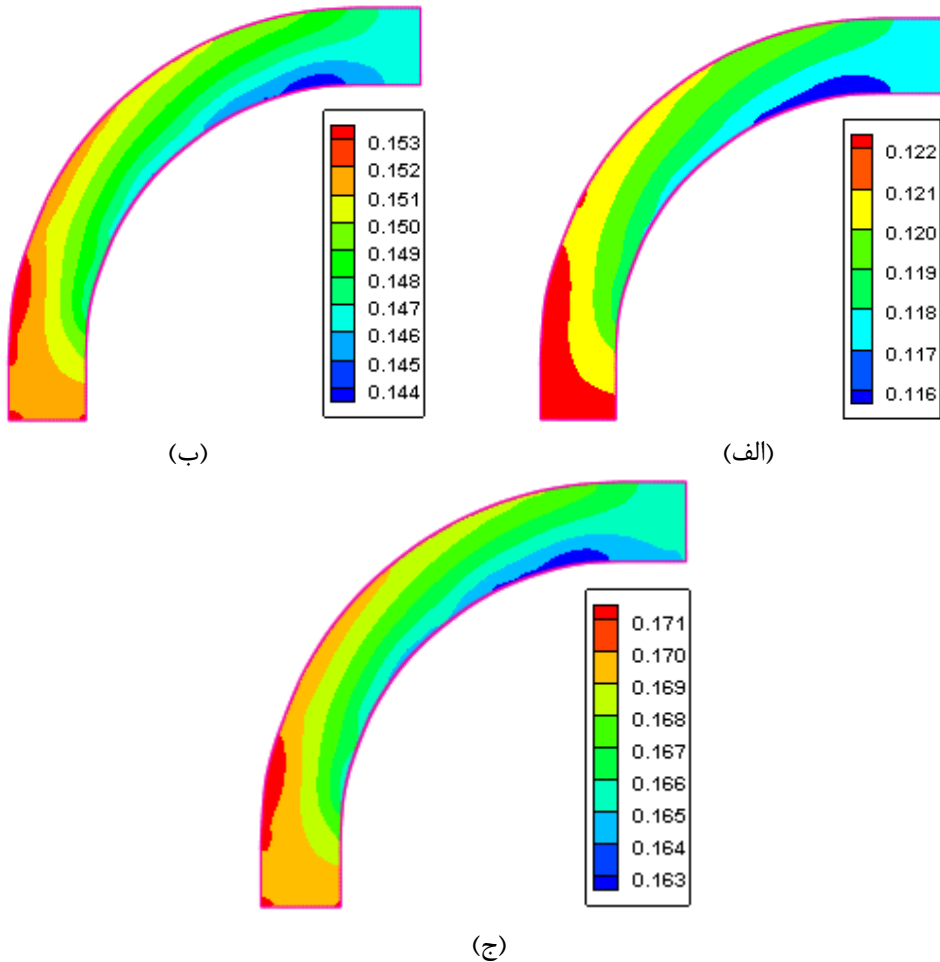


شکل (۵-۱۸) تغییرات عدد فرود ماکزیمم بی بعد شده با عدد فرود در بالادست خم در شیب های طولی ۰.۰۰۱۵، ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵.

۵-۳-۴ - بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر الگوی جریان

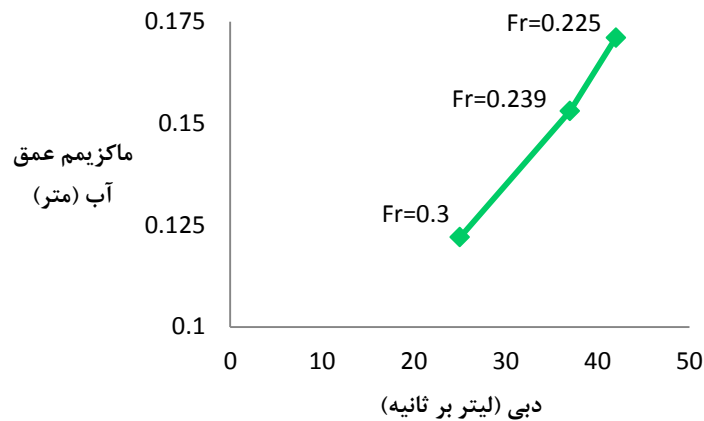
۵-۳-۴-۱ - نتایج در حالت $U/U_c < 1$

پس از انجام شبیه‌سازی جریان برای حالت $U/U_c < 1$ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود. شکل (۵-۱۹) الگوی جریان در پلان کانال در دبی‌های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی، عمق آب در کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در دیواره داخلی و خارجی قوس افزایش پیدا می‌کند.

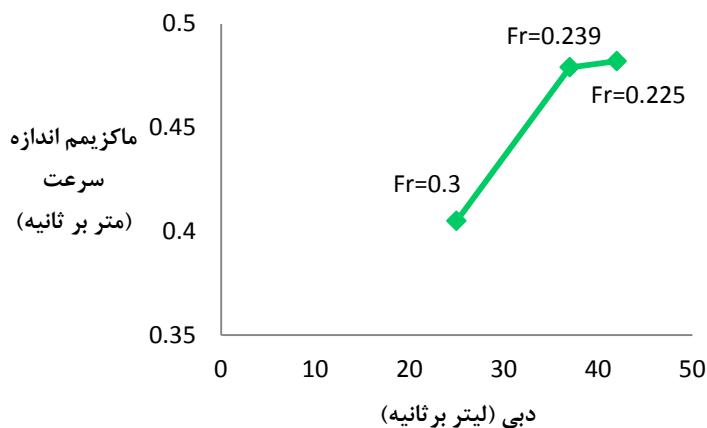


شکل (۵-۱۹) الگوی جریان در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)

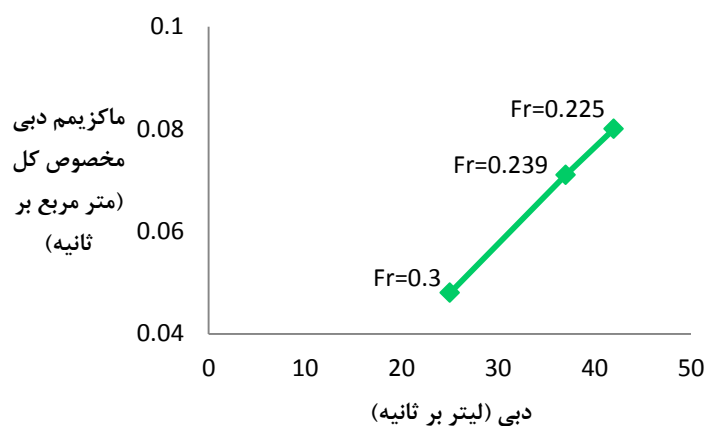
شکل (۵-۲۰) تغییرات عمق آب ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا میکند.



شکل (۵-۲۰) تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه شکل (۵-۲۱) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان از ۲۵ به ۳۷ افزایش و با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه افزایش اندکی می یابد. در نتیجه می توان گفت اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا می کند.

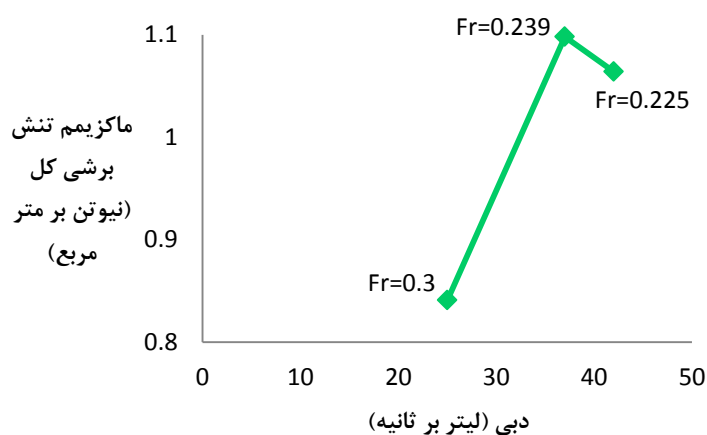


شکل (۵-۲۱) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه شکل (۵-۲۲) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم با افزایش دبی افزایش می یابد. در نتیجه می توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، دبی مخصوص کل ماکزیمم به طور خطی افزایش پیدا می کند.



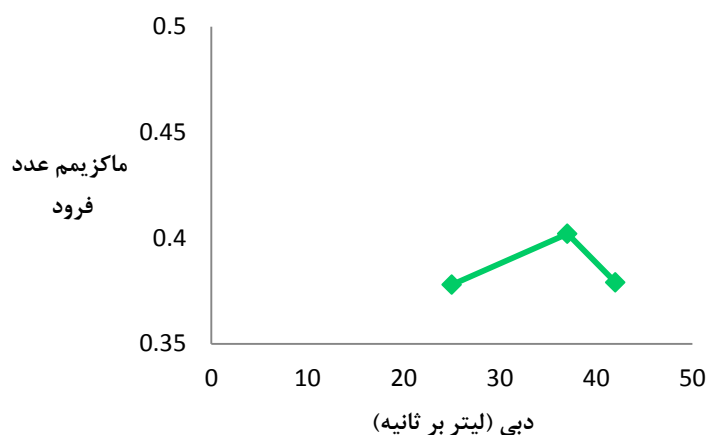
شکل (۵-۲۲) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۵-۲۳) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی از ۲۵ به ۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش چشمگیر و با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، تنش برشی کل ماکزیمم از الگوی خاصی پیروی نمی کند.



شکل (۵-۲۳) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

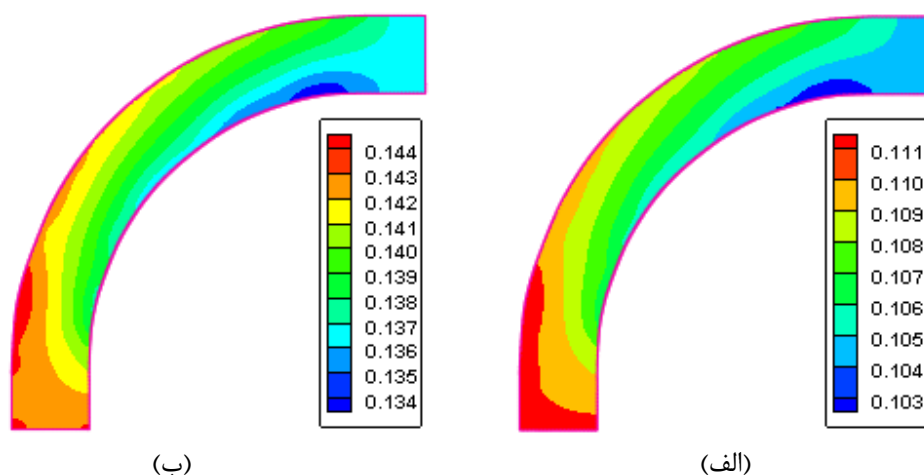
شکل (۵-۲۴) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در دبی های ۳۷، ۲۵ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی جریان از ۲۵ به ۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش ، و سپس با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، عدد فرود ماکزیمم از الگوی خاصی پیروی نمی کند.

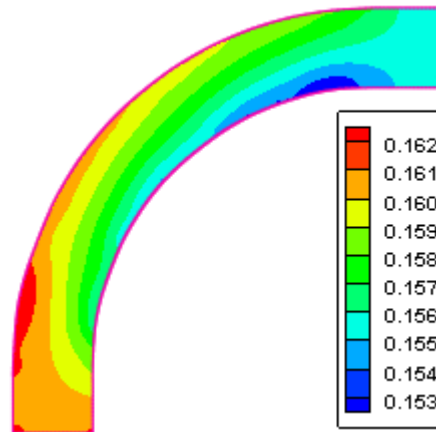


شکل (۵-۲۴) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

۵-۳-۴-۲- نتایج در حالت $1 < U/U_c < 1.1$

پس از انجام شبیه‌سازی جریان برای حالت $1 < U/U_c < 1.1$ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامتر های مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می‌شود. شکل (۵-۲۵) الگوی جریان در پلان کانال در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی، عمق آب در کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در دیواره داخلی و خارجی قوس افزایش پیدا می‌کند.

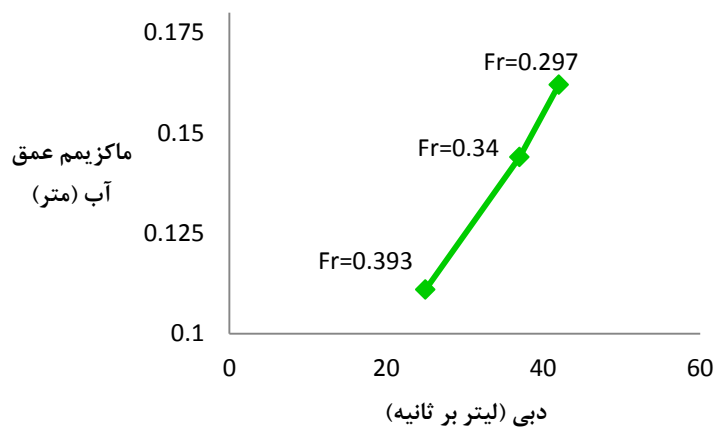




(ج)

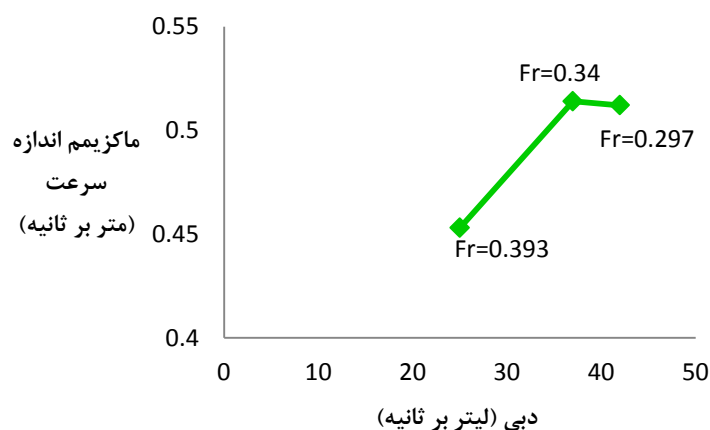
شکل (۵-۲۵) الگوی جریان در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های الف (۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)

شکل (۵-۲۶) تغییرات عمق آب ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت عمق آب ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، افزایش پیدا می کند.

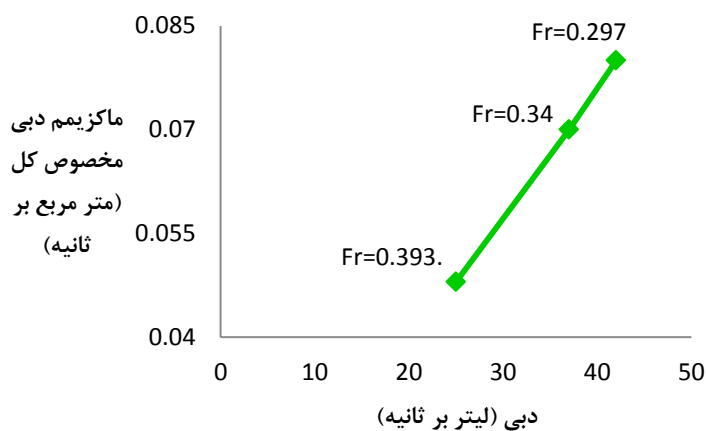


شکل (۵-۲۶) تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۵-۲۷) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان از ۲۵ به ۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش و با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت اندازه سرعت ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، از الگوی خاصی پیروی نمی کند.

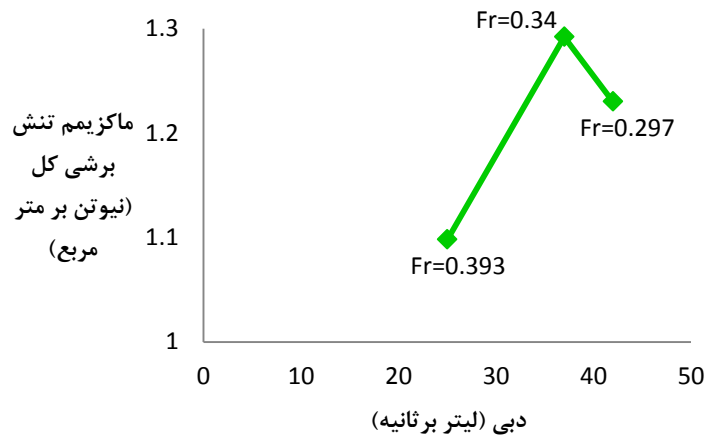


شکل (۵-۲۷) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه شکل (۵-۲۸) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش دبی، افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت دبی مخصوص کل ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، به طور خطی افزایش پیدا می کند.

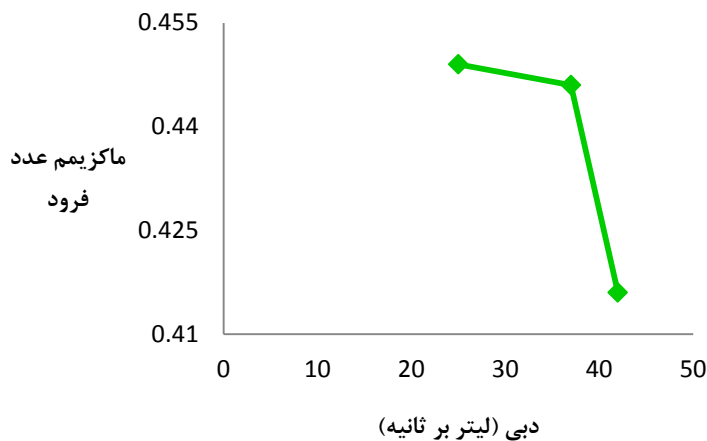


شکل (۵-۲۸) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۵-۲۹) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی از ۲۵ به ۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش، و سپس با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت تنش برشی کل ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، از الگوی خاصی پیروی نمی کند.



شکل (۵-۲۹) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه شکل (۵-۳۰) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی، کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت عدد فرود ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، کاهش پیدا می کند.

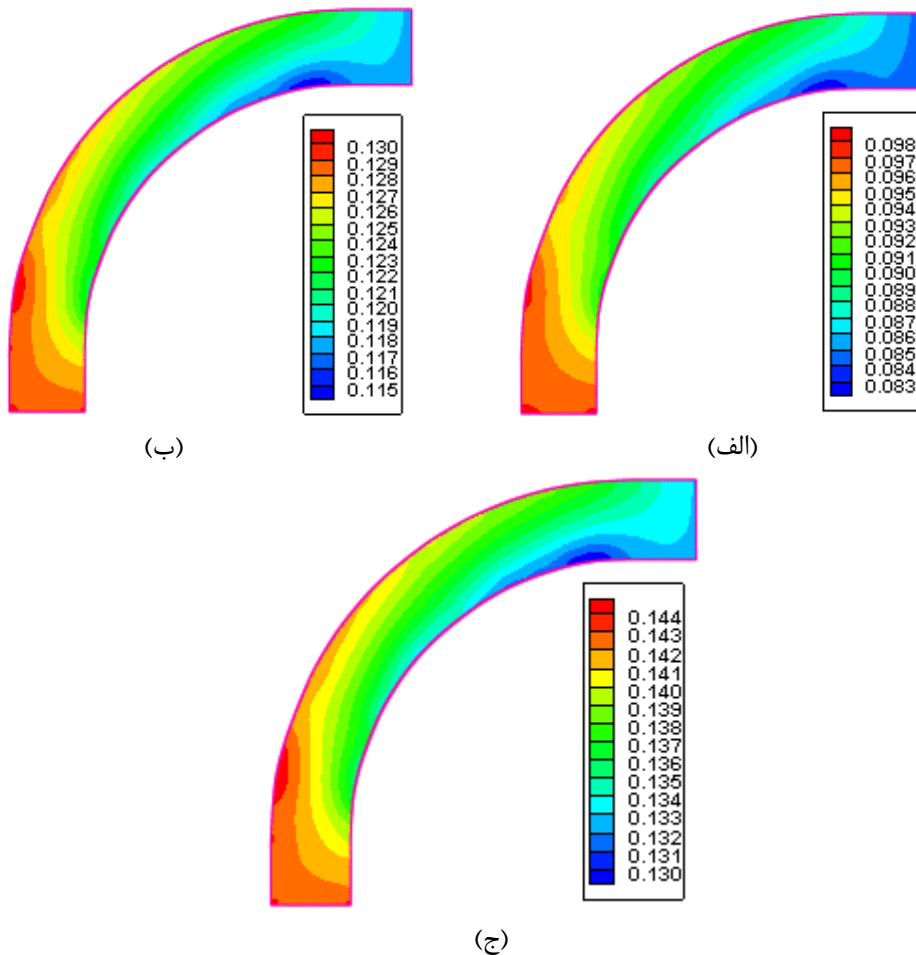


شکل (۵-۳۰) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

۵-۳-۴-۳- نتایج در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$

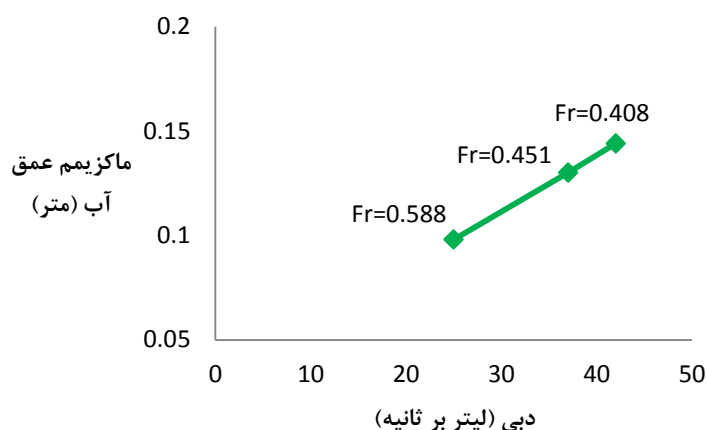
پس از انجام شبیه سازی جریان برای حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ نتایج حاصل از این شبیه سازی ها به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج پرداخته می شود. شکل (۵-۳۱) الگوی جریان در پلان کانال در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، با افزایش دبی،

عمق آب در کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه می‌توان گفت با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در دیواره داخلی و خارجی قوس افزایش پیدا می‌کند.

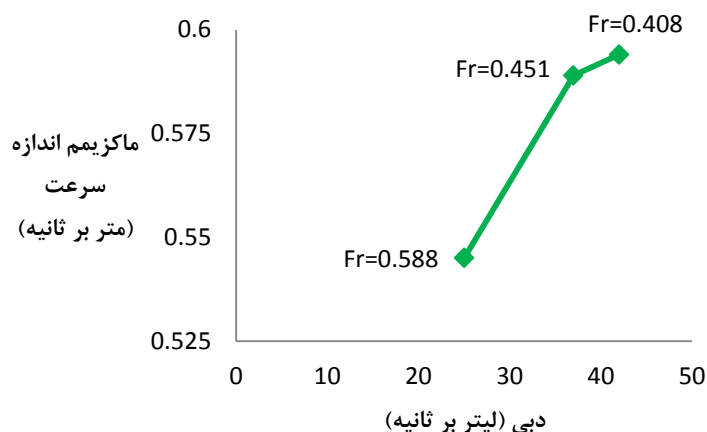


شکل (۵-۳۱) الگوی جریان در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های الف (۲۵، ب (۳۷، ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه (جریان آب از چپ به راست)

شکل (۵-۳۲) تغییرات عمق آب ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود، عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد، در نتیجه می‌توان گفت عمق آب ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.

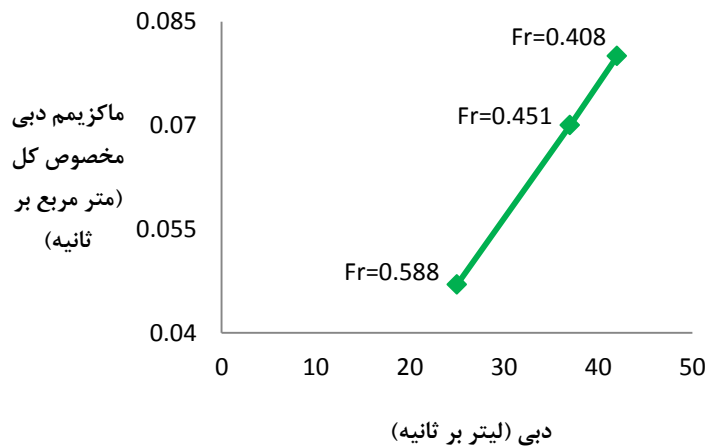


شکل (۳۲-۵) تغییرات عمق آب ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه شکل (۳۳-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت اندازه سرعت ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، افزایش پیدا میکند.



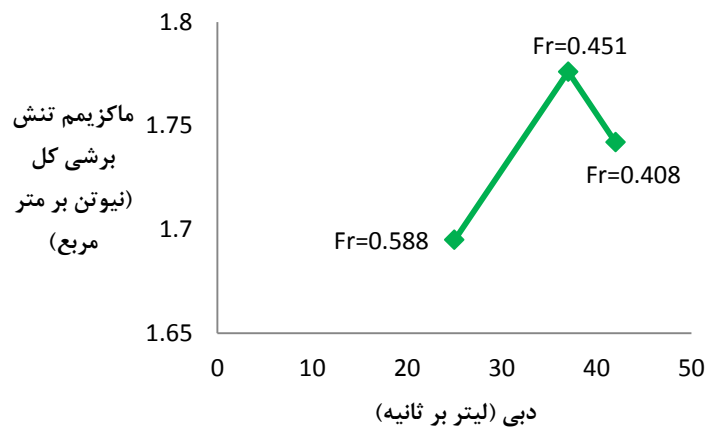
شکل (۳۳-۵) تغییرات اندازه سرعت ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۳۴-۵) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش دبی، افزایش می یابد، در نتیجه می توان گفت دبی مخصوص کل ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، به طور خطی افزایش پیدا می کند.



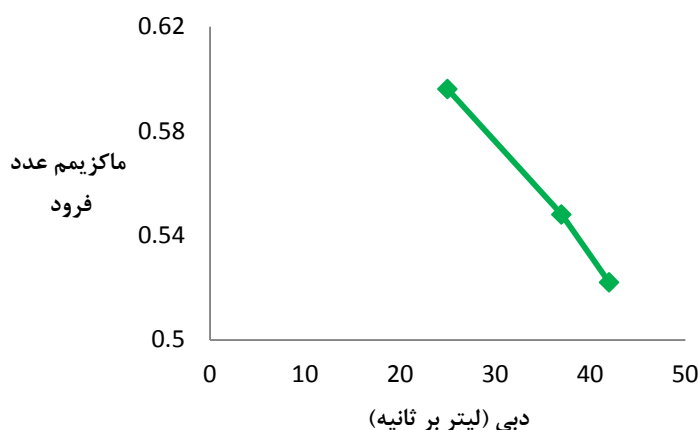
شکل (۳۴-۵) تغییرات دبی مخصوص کل ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۳۵-۵) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی از ۲۵ به ۳۷ لیتر بر ثانیه افزایش، و سپس با افزایش دبی از ۳۷ به ۴۲ لیتر بر ثانیه کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت تنش برشی کل ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، از الگوی خاصی پیروی نمی کند.



شکل (۳۵-۵) تغییرات تنش برشی کل ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

شکل (۳۶-۵) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود، عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی، کاهش می یابد، در نتیجه می توان گفت عدد فرود ماکزیمم با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، کاهش پیدا می کند.



شکل (۳۶-۵) تغییرات عدد فرود ماکزیمم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی های ۲۵، ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه

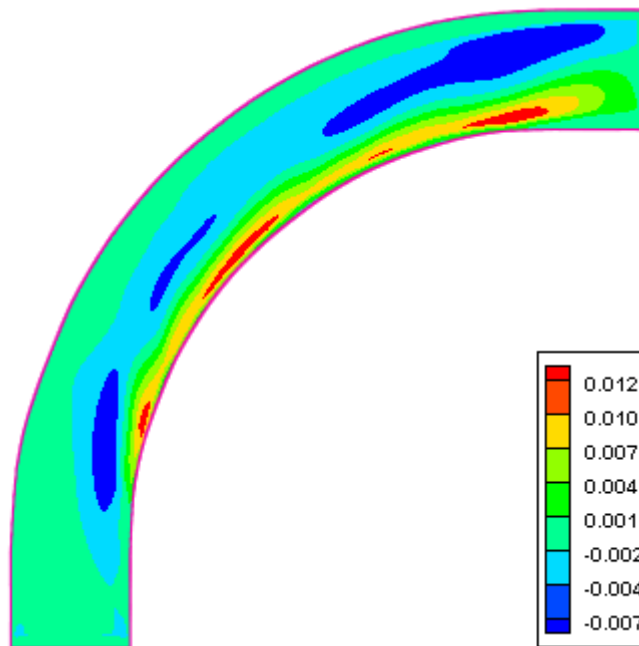
۵-۴- نتایج شبیه سازی انتقال رسوب

۵-۴-۱- بررسی تأثیر شعاع انحنای خم بر توپوگرافی بستر

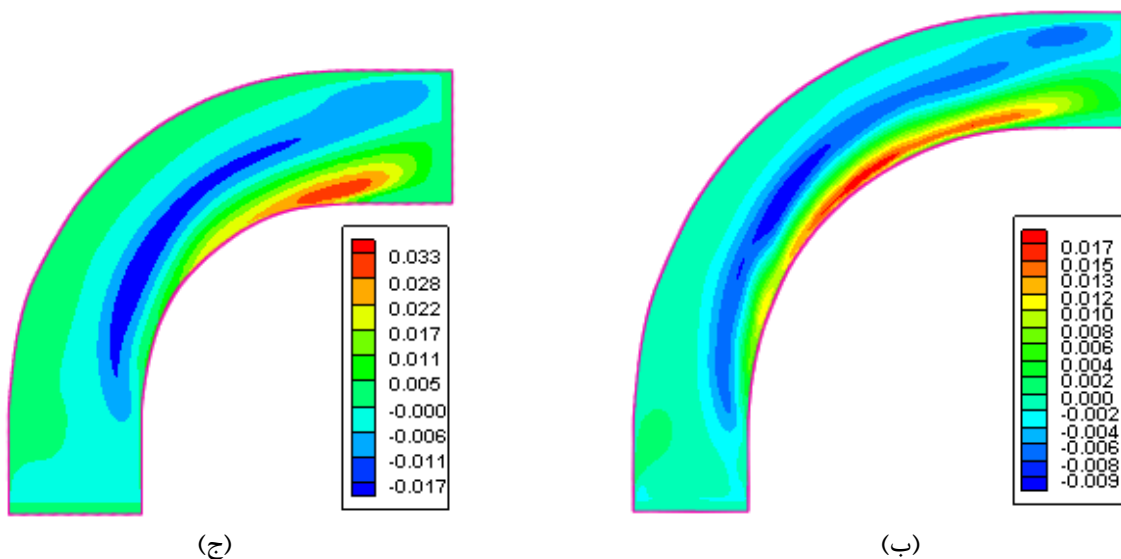
پس از انجام شبیه سازی انتقال رسوب برای سه شعاع انحنای مورد نظر نتایج حاصل از این شبیه سازی ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می پردازیم.

در شکل (۳۷-۵) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس ۹۰ درجه و با شعاع انحنای مختلف مشاهده می شود. در شکل (۳۷-۵ الف) توپوگرافی بستر مربوط به شعاع انحنای معادل ۴ برابر عرض قوس مشاهده می شود. این قوس از لحاظ انحنا در دسته قوس های ملایم قرار می گیرد و همانطور که مشاهده می گردد از زاویه حدود ۶۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی مشاهده می گردد که دلیل آن متمایل شدن خط سرعت بیشینه در نزدیکی بستر به سمت قوس خارجی می باشد. در این حالت توده رسوبی دوم تقریباً از موقعیت ۸۰ درجه آغاز شده و تا موقعیت ۹۰ درجه توسعه می یابد. حضور این توده رسوبی نیز - که بر اثر حضور جریان ثانویه کم قدرت تشکیل می شود - به تشکیل چاله آبشستگی در موقعیت خروجی قوس کمک می کند. توده رسوبی اول نیز ناشی از جریان های ثانویه با جهت از قوس خارج به سمت قوس داخل در نزدیک بستر می باشد، در این وضعیت آبشستگی کوچکی در

حوالی توده رسوبی اول شکل می‌گیرد که دلیل آن نیز جریان ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده در اطراف این توده رسوبی است. در شکل (۵-۳۷-ب) توپوگرافی بستر مربوط به شعاع انحنای معادل ۳ برابر عرض قوس، که از لحاظ شعاع انحنای بین قوس تند و ملایم قرار دارد، مشاهده می‌گردد. در این شکل آبشستگی در قوس خارجی و در مسیر مستقیم پایین دست قوس مشاهده می‌شود. همچنین آبشستگی در نزدیکی قوس داخلی و در محدوده حدود ۳۰ تا ۵۵ درجه ایجاد شده است. رسوبات خروجی از محدوده آبشستگی ذکر شده به دلیل اینکه در این قوس سرعت بیشینه در نزدیکی کف به سمت قوس داخلی متمایل است در ساحل داخلی انباشته می‌شود. تغییرات ذکر شده در شکل (۵-۳۷-ب) به صورت محسوس‌تری در شکل (۵-۳۷-ج) که مربوط به قوس با شعاع انحنای معادل ۲ برابر عرض کانال می‌باشد، مشاهده می‌گردد. در این قوس که در دسته قوس‌های تند قرار دارد تمایل سرعت بیشینه نزدیک بستر به سمت قوس داخلی نسبت به دو قوس دیگر بیشتر است.

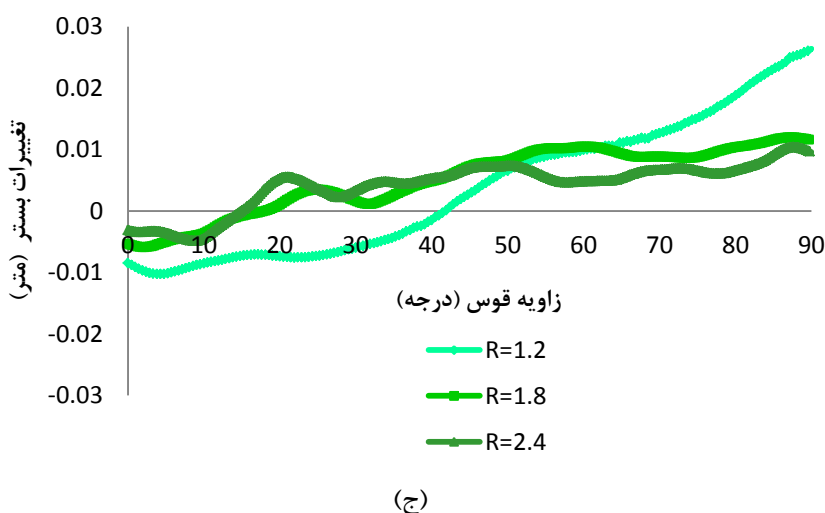
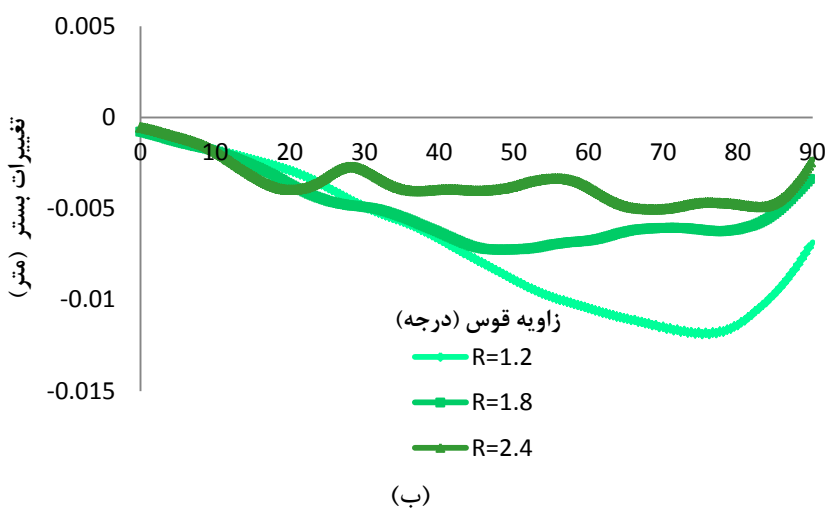
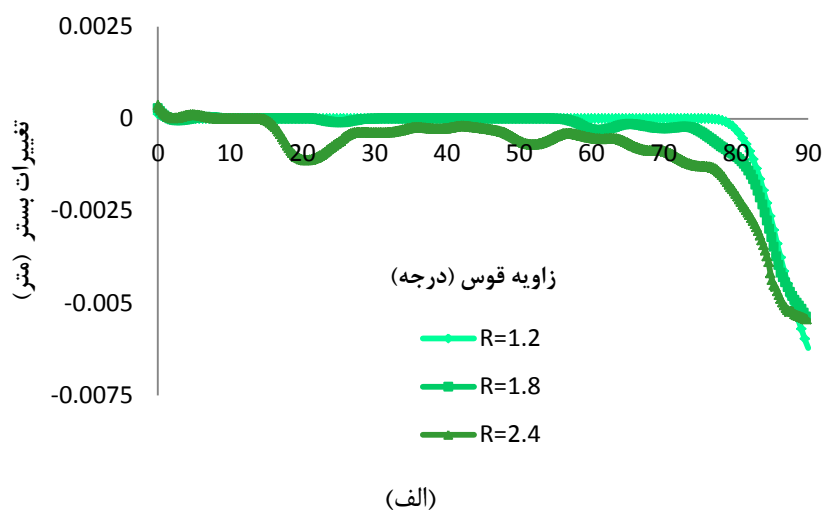


(الف)



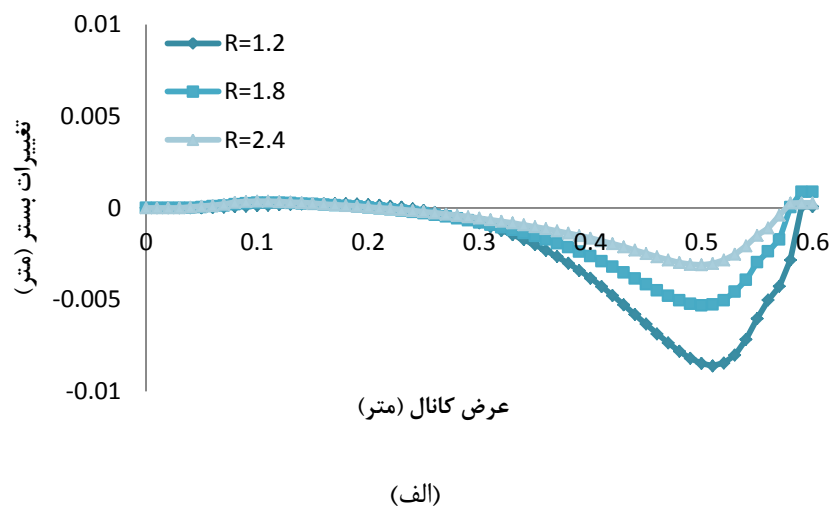
شکل (۵-۳۷) نمونه ای از توپوگرافی بستر در شعاع انحنای، (الف) ۲.۴، (ب) ۱.۸ و (ج) ۱.۲ متر

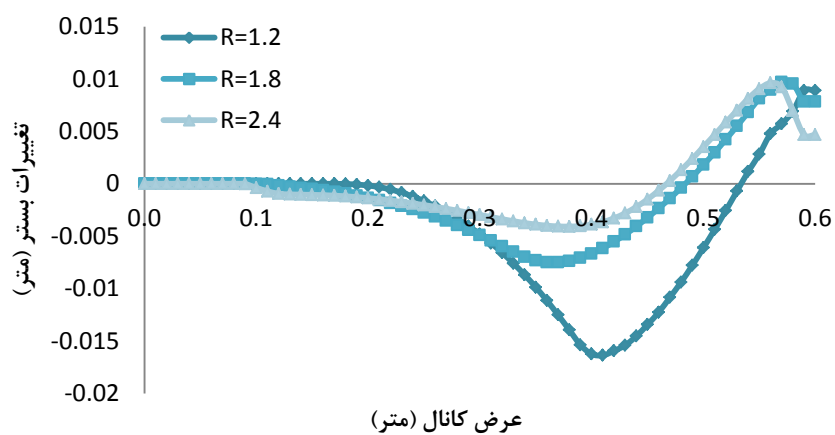
شکل (۵-۳۸) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شعاع انحنای مختلف در برابر مقاطع مختلف قوس را در سه مقطع نزدیک دیواره خارجی، مرکز و نزدیک دیواره داخلی نشان می‌دهد. در این شکل ها B عرض کانال است. شکل (۵-۳۸-الف) مقطع طولی نزدیک به دیواره خارجی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده میشود آبشستگی در نزدیکی ساحل خارجی و در مورد قوس با شعاع انحنای ملایم در مقطع ۶۰ درجه به بعد بنا به دلایل ذکر شده مشهود می‌باشد. در مقطع طولی مربوط به محور قوس همانطور که در شکل (۵-۳۸-ب) مشاهده میشود آبشستگی در قوس تند و در محدوده ۱۵ تا ۸۵ درجه مشاهده میشود. در شکل (۵-۳۸-ج) و در مقطع نزدیک قوس داخلی، در کلیه قوس ها رسوبگذاری اتفاق افتاده است که در مورد قوس تند در محدوده ۴۰ تا بعد از زاویه ۹۰ درجه و در مورد قوس ملایم دو توده رسوبی در محدوده بین ۳۵ تا ۵۰ درجه و در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه مشهود می‌باشد.



شکل (۵-۳۸) نمونه ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شعاع انحناهای مختلف در مقطع، الف) فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس، ب) محور قوس و ج) فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس در برابر مقاطع مختلف قوس شکل (۵-۳۹) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شعاع انحناهای مختلف در برابر عرض کانال را در مقاطع مختلف نشان می دهد. شکل (۵-۳۹-الف) مقطع ۰ درجه را نشان میدهد و همانطور که

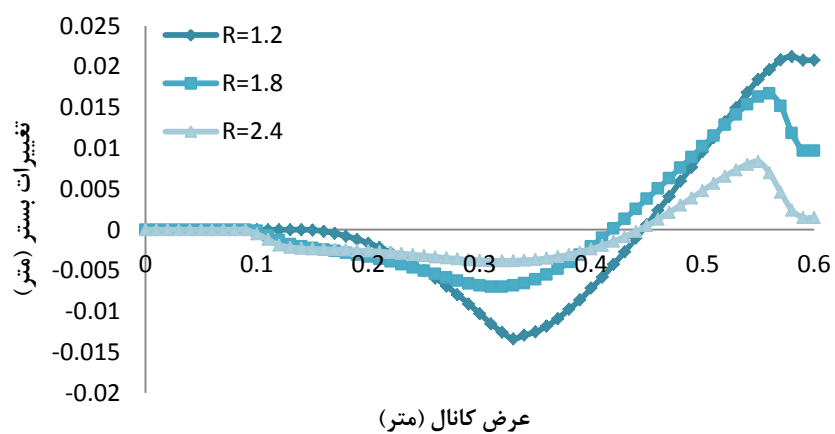
مشاهده میشود بستر نسبت به حالت اولیه خود تغییر محسوسی نداشته است. شکل (۵-۳۹-ب) مقطع ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. در این مقطع همانطور که مشاهده می‌شود در قوس با شعاع انحنای معادل ۴ برابر عرض کانال تغییرات توپوگرافی بستر در مقایسه با دو شعاع انحنای معادل ۳ و ۲ برابر عرض کانال خفیف‌تر است. اما با افزایش شعاع انحنای در این مقطع رسوبگذاری در قوس داخلی افزایش می‌یابد که ناشی از تغییر الگوی جریان ثانویه می‌باشد. در مورد قوس تند همانطور که مشاهده میشود در فاصله بین ۴۰ تا ۹۰ درصد عرض مقطع و از قوس خارجی آبستنگی و پس از آن و تا قوس داخلی رسوبگذاری واقع شده است. در شکل (۵-۳۹-ج) و در مقطع ۶۰ درجه، در شعاع انحنای مختلف در قوس داخلی انباشت رسوبات مشاهده می‌گردد که این پدیده در مورد قوس تند بیشتر دیده می‌شود. شکل (۵-۳۹-د) بیانگر مقطع ۹۰ درجه می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود در این مقطع آبستنگی به ساحل خارجی نزدیکتر می‌شود که دلیل آن تغییر مکان هندسی سرعت بیشینه در نزدیکی بستر به سمت قوس خارجی و افزایش تنش برشی در این ناحیه می‌باشد.





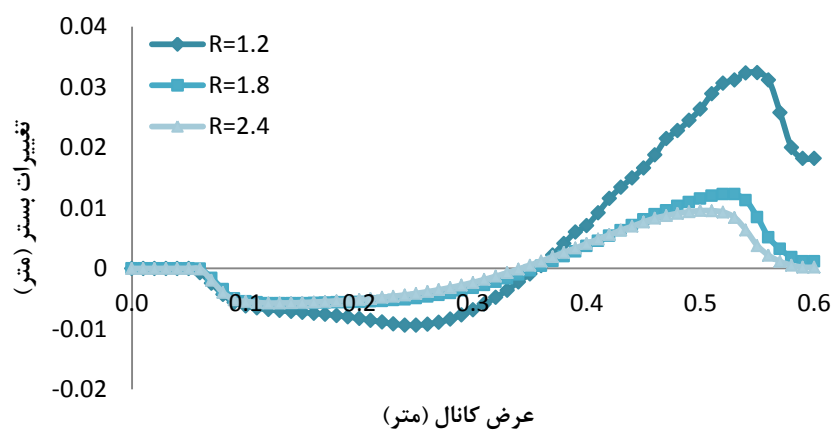
عرض کانال (متر)

(ب)



عرض کانال (متر)

(ج)



عرض کانال (متر)

(د)

شکل (۵-۳۹) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شعاع انحنای مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

۵-۴-۲- بررسی تأثیر زاویه خم بر توپوگرافی بستر

پس از انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب برای زوایای مورد نظر نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می‌پردازیم.

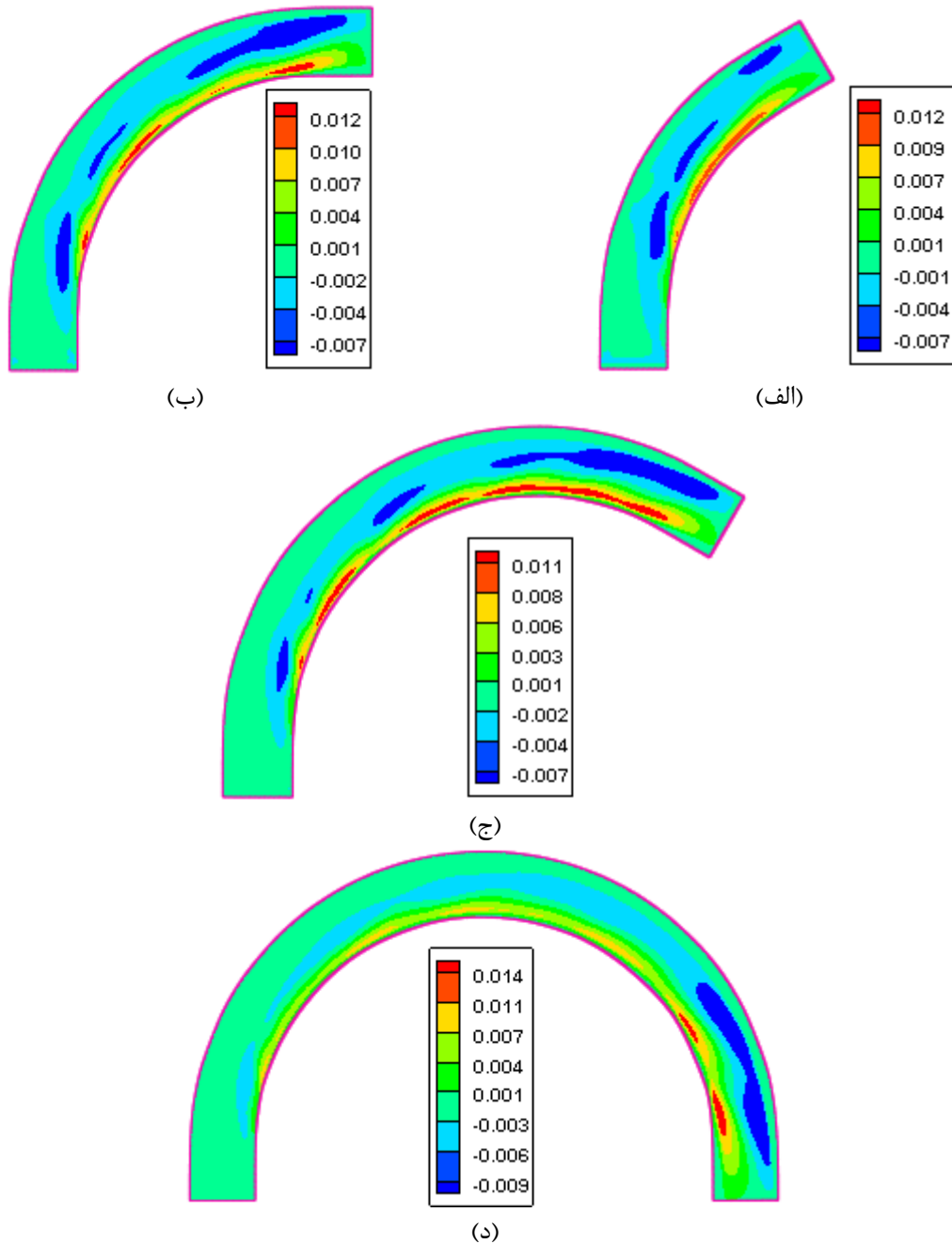
در شکل (۵-۴۰) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس با شعاع انحنای مرکزی معادل ۴ برابر عرض کانال و زوایای مختلف مشاهده می‌شود. شکل (۵-۴۰-الف) توپوگرافی بستر مربوط به زاویه ۶۰ درجه را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌گردد در قوس خارجی و در مسیر مستقیم پایین دست قوس آبشستگی مشاهده می‌گردد. در محدوده بین ۲۵ تا ۵۵ درجه و در قوس داخلی رسوبگذاری مشاهده می‌شود که ناشی از جریان‌های ثانویه با جهت از قوس خارج به سمت قوس داخل در نزدیکی بستر می‌باشد، در این وضعیت یک چاله آبشستگی در بالای توده رسوبی شکل می‌گیرد. که دلیل آن نیز جریان ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده در اطراف توده رسوبی است.

شکل (۵-۴۰-ب) توپوگرافی بستر مربوط به زاویه ۹۰ درجه را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌گردد از زاویه حدود ۶۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی مشاهده می‌گردد که دلیل آن متمایل شدن خط سرعت بیشینه در نزدیکی بستر به سمت قوس خارجی می‌باشد. در این حالت توده رسوبی دوم تقریباً از موقعیت ۸۰ درجه آغاز شده و تا موقعیت ۹۰ درجه توسعه می‌یابد. حضور این توده رسوبی نیز- که بر اثر حضور جریان ثانویه کم قدرت تشکیل می‌شود - به تشکیل چاله آبشستگی در موقعیت خروجی قوس کمک می‌کند. توده رسوبی اول نیز ناشی از جریان‌های ثانویه با جهت از قوس خارج به سمت قوس داخل در نزدیک بستر می‌باشد، در این وضعیت آبشستگی کوچکی در حوالی توده رسوبی اول شکل می‌گیرد که دلیل آن نیز جریان ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده در اطراف این توده رسوبی است.

در شکل (۵-۴۰-ج) توپوگرافی بستر مربوط به زاویه ۱۲۰ درجه را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌گردد از زاویه حدود ۸۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی مشاهده می‌گردد که دلیل آن متمایل شدن خط سرعت بیشینه در نزدیکی بستر به سمت قوس خارجی می‌باشد. در این حالت توده رسوبی سوم تقریباً از موقعیت ۷۵ درجه آغاز شده و تا موقعیت ۱۲۰ درجه توسعه می‌یابد. حضور این توده رسوبی نیز - که بر اثر حضور جریان ثانویه کم قدرت تشکیل می‌شود - به تشکیل چاله آبشستگی در موقعیت خروجی قوس کمک می‌کند. توده رسوبی دوم نیز ناشی از جریان‌های ثانویه با جهت از قوس خارج به سمت قوس داخل در نزدیک بستر می‌باشد، در این وضعیت آبشستگی کوچکی در حوالی توده رسوبی دوم شکل می‌گیرد که دلیل آن نیز جریان ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده در اطراف این توده رسوبی است. همانطور که مشاهده می‌شود این دو توده رسوبی بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. نزدیک بودن این دو توده رسوبی به یکدیگر سبب می‌شود که رفتار آنها شبیه به یک توده رسوبی باشد. از آنجا که نوسانات مؤلفه عرضی سرعت به مقدار سرعت بستگی دارد، لذا به دلیل کم بودن سرعت جریان، این نوسانات نیز کم بوده و توده‌های رسوبی به یکدیگر نزدیک شده‌اند. توده رسوبی اول نیز ناشی از جریان‌های ثانویه با جهت از قوس خارج به سمت قوس داخل در نزدیک بستر می‌باشد.

در شکل (۵-۴۰-د) توپوگرافی بستر مربوط به زاویه ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌گردد در نیمه دوم قوس و از زاویه حدود ۱۴۵ درجه و در قوس خارجی دو چاله آبشستگی مشاهده می‌گردد و علت این پدیده این است که در قوس خارجی و نزدیک به انتهای خم - که در آن گرادبان منفی فشار وجود دارد - نسبت به قسمت‌های دیگر قوس، تنش برشی بیشتر است. از حدود زاویه ۲۰ تا ۲۵ درجه، رسوبات در کف به قوس داخلی هدایت می‌شود و در سطح آب، حرکت ذرات جریان به سمت قوس خارجی است، دلیل این پدیده وجود جریان ثانویه و شکل‌گیری آن در ناحیه در حال توسعه خم است.

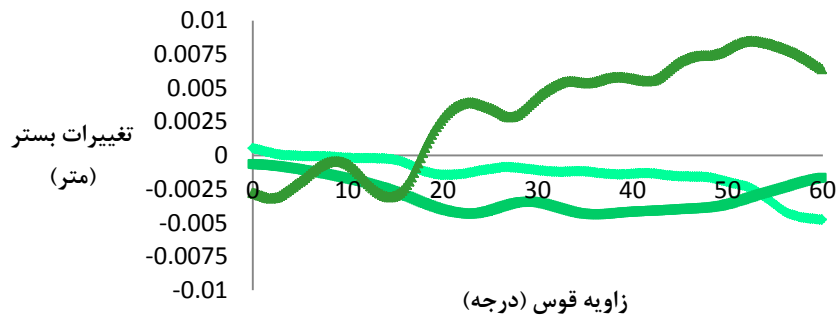
دو توده رسوبی روبروی چاله‌های آبشستگی و در قوس داخلی تشکیل شده است. که این پدیده ناشی از جریان ثانویه است که مقدار حداکثر سرعت را در سطح آب به قوس خارجی منتقل و رسوبات را در کف به سمت قوس داخلی هدایت می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود توده های رسوبی تقریباً به یکدیگر متصل شده‌اند. نزدیک بودن این دو توده رسوبی به یکدیگر سبب می‌شود که رفتار آنها شبیه به یک توده رسوبی باشد. دو چاله فرسایشی نیز در هم ادغام شده‌اند. از آنجا که نوسانات مؤلفه عرضی سرعت به مقدار سرعت بستگی دارد، لذا به دلیل کم بودن سرعت جریان، این نوسانات نیز کم بوده و چاله‌های آبشستگی و توده‌های رسوبی به یکدیگر متصل شده‌اند. نکته قابل توجه دیگر، اثر موجی تغییرات توپوگرافی در طول کانال است. عامل نوسانی بودن بستر کف کانال، نوسانی بودن سرعت جریان در راستای عمود بر جریان یا در جهت شعاعی است. ابعاد ناهمواریهای بستر در قوس داخلی کوچکتر و در قوس خارجی بزرگتر است، علت این پدیده، اثر جریان حلزونی است. همانطور که مشاهده می‌شود در نیمه اول قوس اثری از شکل‌گیری توده رسوبی و چاله آبشستگی نمی‌باشد از آنجا که تغییرات ضریب زبری بر مقدار تنش برشی بستر (τ) تأثیر می‌گذارد، پیش‌بینی می‌شود که افزایش ضریب زبری با تغییر در آستانه حرکت نخستین ذره رسوب بستر، به افزایش در مقدار رسوبگذاری و به خصوص فرسایش منجر شود. علت این تفاوت این است که جدایی ذرات رسوب تأثیر مستقیمی از ضریب زبری می‌گیرند، اما ته‌نشینی و رسوبگذاری آنها، تحت تأثیر پارامترهای دیگری نظیر نحوه رشد جریان ثانویه و غیره بوده و لذا ضریب زبری، آن تأثیر شدید را بر فرآیند رسوبگذاری ندارد.



شکل (۴۰-۵) نمونه ای از توپوگرافی بستر در زوایای، (الف) ۶۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۱۸۰ درجه شکل (۴۱-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در زوایای ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه در برابر مقاطع مختلف کانال را نشان می دهد. در این شکل ها B عرض کانال است. شکل (الف-۴۱-۵) پروفیل طولی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۶۰ درجه را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می شود آبشستگی در انتهای قوس و در مقطع نزدیک به دیواره خارجی و همچنین رسوبگذاری از زاویه حدود ۲۵ درجه و در مقطع نزدیک به دیواره داخلی کاملاً مشهود است. در شکل (ب-۴۱-۵) پروفیل طولی

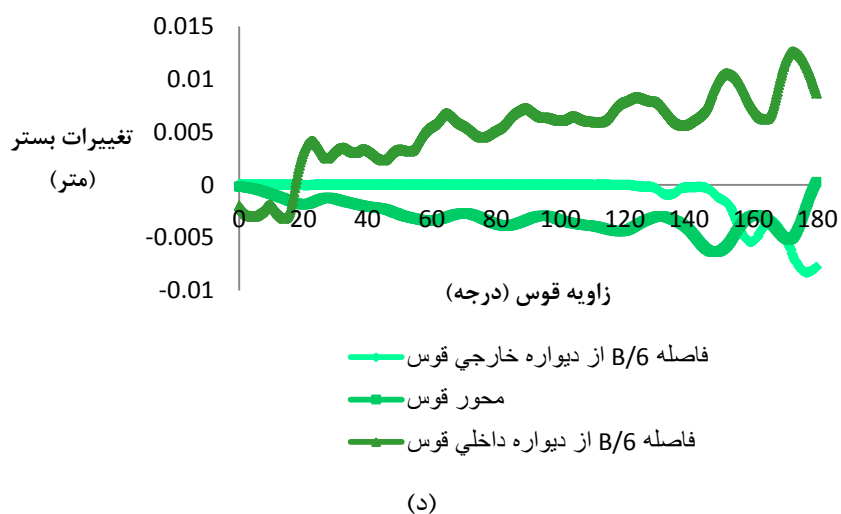
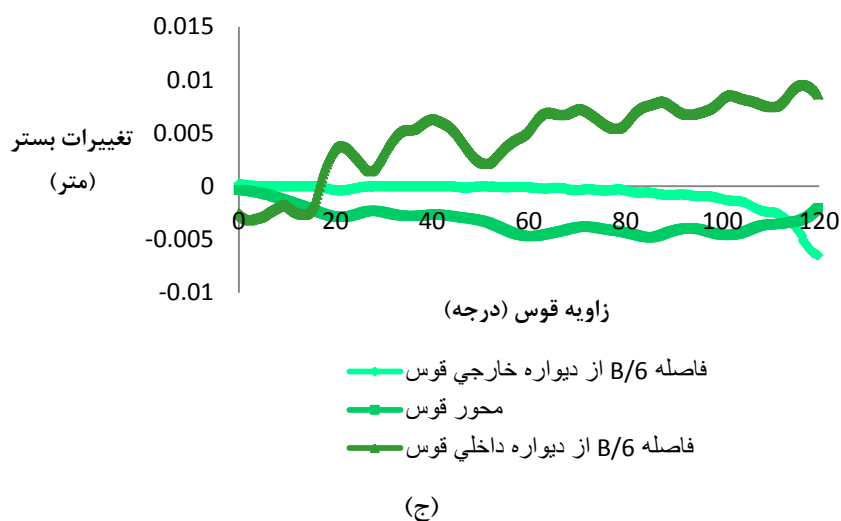
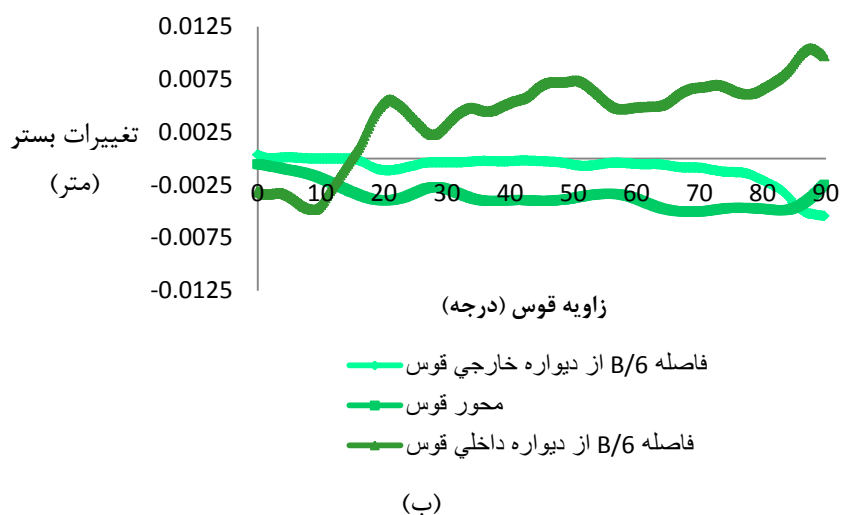
بستر در زاویه انحنای مرکزی ۹۰ درجه مشاهده می شود، با توجه به این شکل وجود دو توده رسوبی در دیواره داخلی (دو بالا آمدگی کاملاً جدا) و یک چاله فرسایشی در دیواره خارجی (یک پایین افتادگی مشخص) در نزدیکی خروجی قوس مشاهده می شود. همانگونه که مشاهده می شود توده رسوبی دوم از لحاظ ابعاد و ارتفاع، بزرگتر از توده رسوبی اول است.

شکل (۵-۴۱-ج) پروفیل طولی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۱۲۰ درجه را نشان می دهد، با توجه به این شکل وجود توده های رسوبی در دیواره داخلی و یک چاله فرسایشی در دیواره خارجی (یک پایین افتادگی مشخص) در نزدیکی خروجی قوس مشاهده می شود. شکل (۵-۴۱-د) پروفیل طولی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۱۸۰ درجه را نشان می دهد، همانگونه که مشاهده می شود در انتهای قوس وجود دو توده رسوبی نزدیک به هم در دیواره داخلی و همچنین دو چاله فرسایشی متصل به هم در دیواره خارجی کاملاً مشهود است.



- فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
- محور قوس
- فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

(الف)

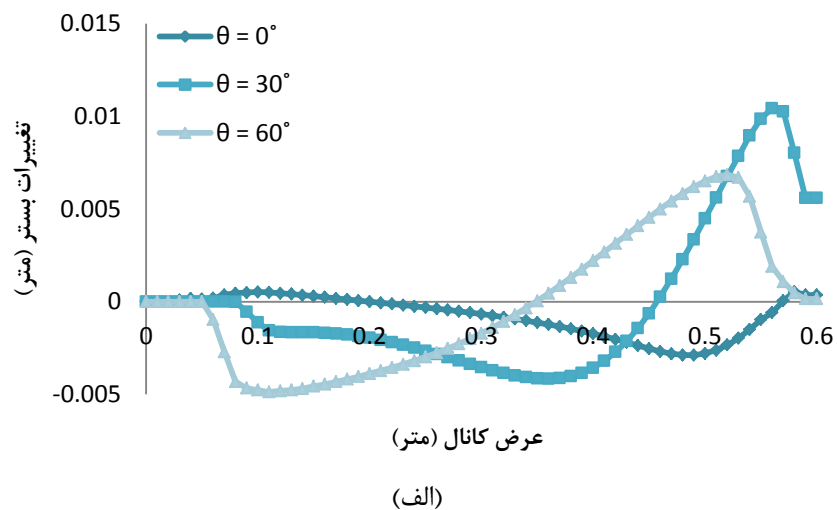


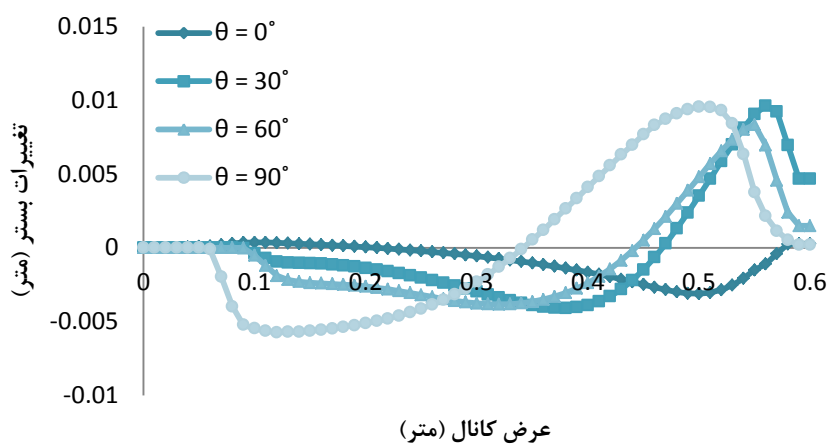
شکل (۴۱-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در زوایای مختلف، الف) ۶۰، ب) ۹۰، ج) ۱۲۰ و د) ۱۸۰ درجه در برابر مقاطع مختلف کانال

شکل (۴۲-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در زوایای مرکزی ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۸۰

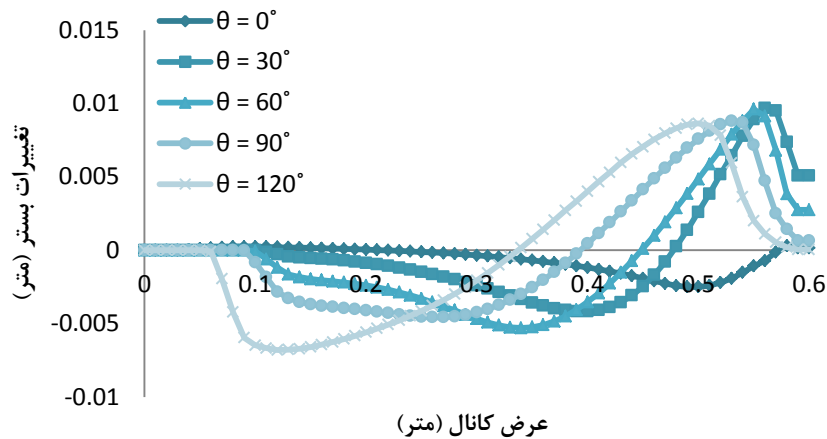
درجه در برابر عرض کانال را نشان می دهد. در این شکل ها θ موقعیت زاویه ای مقطع عرضی است.

شکل (۵-۴۲-الف) پروفیل عرضی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۶۰ درجه را نشان می‌دهد، همانگونه که مشاهده می‌شود آبشستگی در دیواره خارجی در انتهای قوس و در مقطع ۶۰ درجه کاملاً مشهود است. شکل (۵-۴۲-ب) پروفیل عرضی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۹۰ درجه را نشان می‌دهد، همانگونه مشاهده می‌شود، بیشترین ارتفاع رسوبگذاری و عمق آبشستگی در انتهای قوس و در زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. شکل (۵-۴۲-ج) پروفیل عرضی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۱۲۰ درجه را نشان می‌دهد، با توجه به این شکل بیشترین عمق آبشستگی در انتهای قوس و در زاویه ۱۲۰ درجه مشاهده می‌شود. شکل (۵-۴۲-د) پروفیل عرضی بستر در زاویه انحنای مرکزی ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد، با توجه به پروفیل‌های عرضی نوسانی بودن توپوگرافی بستر مشاهده می‌شود، که عامل نوسانی بودن بستر کف کانال، نوسانی بودن سرعت جریان در راستای عمود بر جریان یا در جهت شعاعی است.

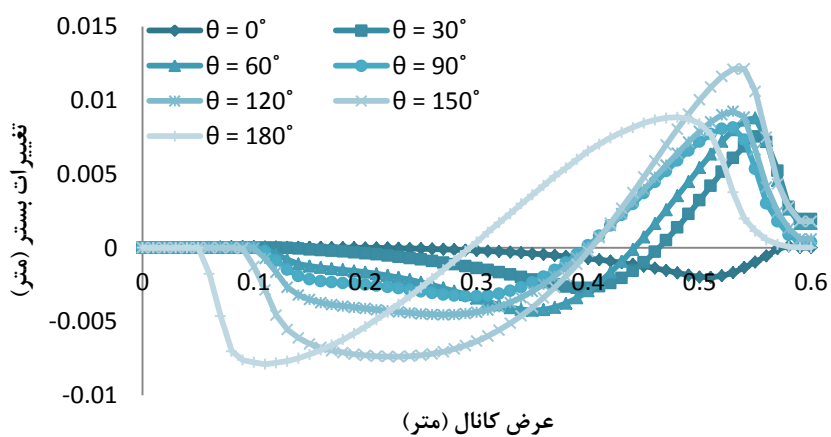




(ب)



(ج)



(د)

شکل (۴۲-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در زوایای مختلف، (الف) ۶۰، (ب) ۹۰، (ج) ۱۲۰ و (د) ۱۸۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

۵-۴-۳- بررسی تأثیر شیب طولی خم بر توپوگرافی بستر

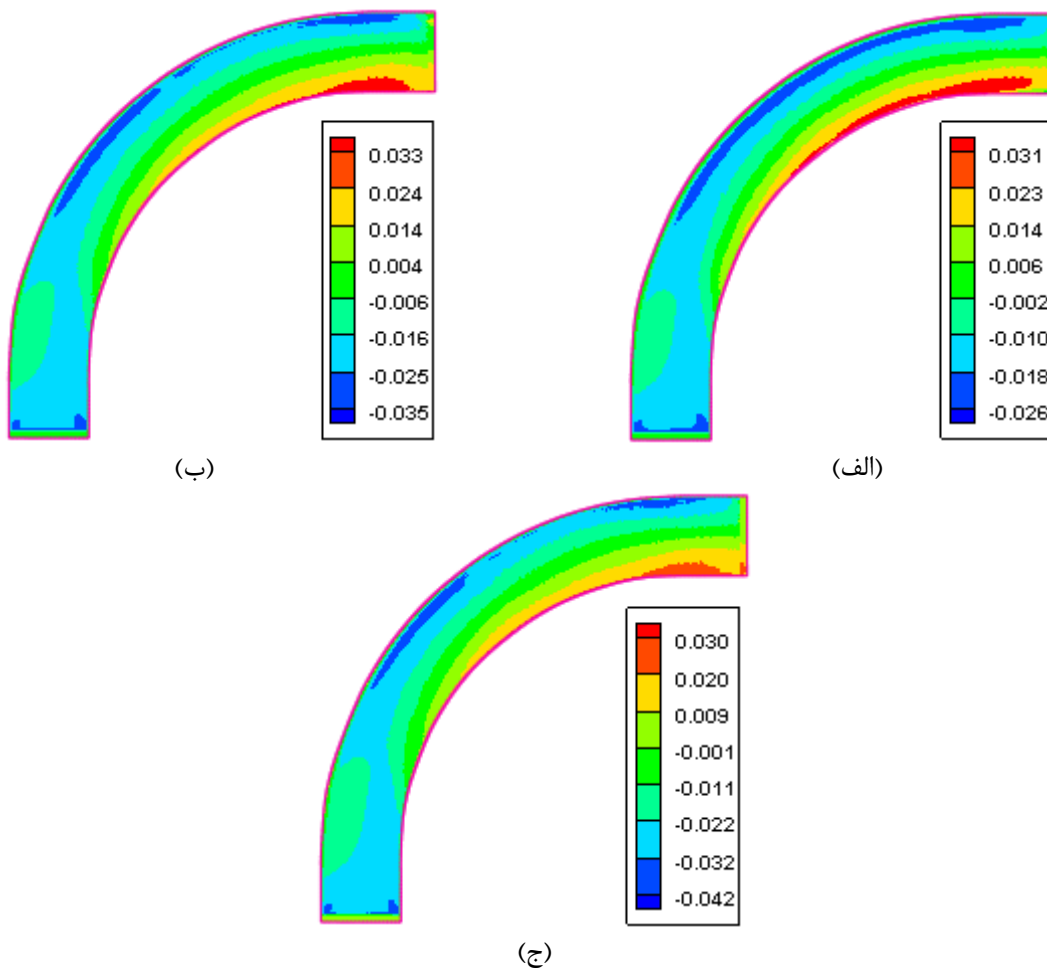
پس از انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب برای سه شیب طولی مورد نظر نتایج حاصل از این شبیه‌سازی ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می‌پردازیم.

در شکل (۵-۴۳) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس ۹۰ درجه و با شیب‌های طولی مختلف مشاهده می‌شود. در شکل (۵-۴۳-الف) توپوگرافی بستر مربوط به شیب طولی ۰.۰۰۱۵ مشاهده می‌شود. در این حالت دو توده رسوبی در جداره داخلی قوس تشکیل شده که این توده رسوبی تقریباً به یکدیگر متصل شده‌اند. نزدیک بودن این دو توده رسوبی به یکدیگر سبب می‌شود که رفتار آنها شبیه به یک توده رسوبی باشد. لذا در این حالت نیز دو چاله فرسایشی یا بسیار به هم نزدیکند یا در هم ادغام شده‌اند. از آنجا که نوسانات مؤلفه عرضی سرعت به مقدار سرعت بستگی دارد، لذا در این حالت به علت کم بودن سرعت جریان، این نوسانات نیز کمتر بوده و چاله‌های آبستگي و توده‌های رسوبی به یکدیگر متصل شده‌اند.

شکل (۵-۴۳-ب) توپوگرافی بستر مربوط به شیب طولی ۰.۰۰۲۰، را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، توده رسوبی از زاویه حدود ۳۵ درجه آغاز شده و تا بعد از زاویه ۹۰ درجه توسعه می‌یابد. از آنجاییکه در موقعیت خروجی قوس در جداره داخلی سرعت جریان کم بوده و گرادیان مثبت فشار طولی سبب کاهش بیشتر سرعت جریان می‌شود و نیز به دلیل تأثیر جریان ثانویه، بیشترین ارتفاع توده رسوبی در موقعیت خروجی قوس تشکیل می‌شود.

همچنین در این شیب طولی، اولین چاله آبستگي از حدود زاویه ۲۵ درجه شروع شده، در این حالت به علت افزایش شیب طولی بستر سرعت جریان بیشتر بوده و باعث افزایش قدرت جریان ثانویه می‌شود، و این امر باعث ایجاد دو چاله آبستگي و افزایش عمق چاله آبستگي می‌شود. با توجه ب

فاصله تشکیل شده در بین دو چاله آبشستگی در قوس خارجی می‌توان نتیجه گرفت که توپوگرافی بستر حالت نوسانی دارد. علت نوسانی بودن توپوگرافی بستر، نوسان مؤلفه عرضی سرعت است. تغییرات ذکر شده در شکل (۵-۴۳-ب) به صورت محسوس‌تری در شکل (۵-۴۳-ج) که مربوط به قوس با شیب طولی ۰.۰۰۲۵ می‌باشد، مشاهده می‌گردد.



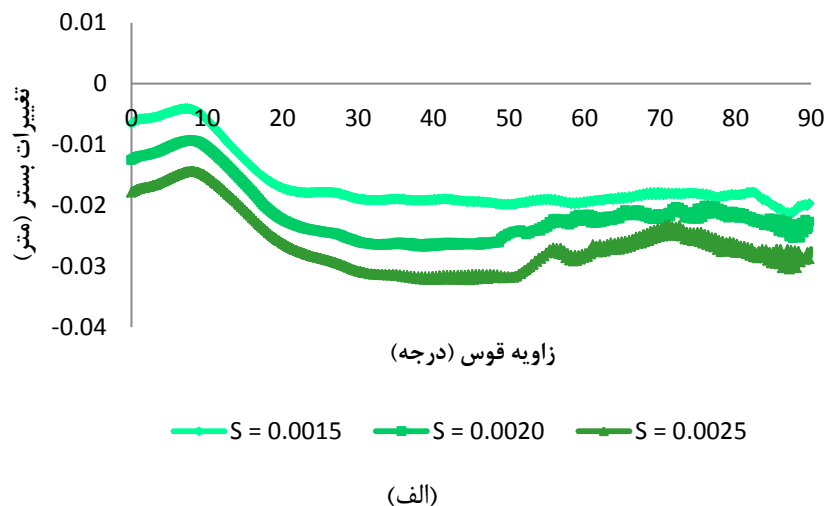
شکل (۵-۴۳) نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در شیب‌های طولی (الف) ۰.۰۰۱۵، (ب) ۰.۰۰۲۰ و (ج) ۰.۰۰۲۵. شکل (۵-۴۴) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شیب‌های طولی مختلف در برابر مقاطع مختلف قوس را در سه مقطع نزدیک دیواره خارجی، مرکز و نزدیک دیواره داخلی نشان می‌دهد. در این شکل‌ها B عرض کانال است.

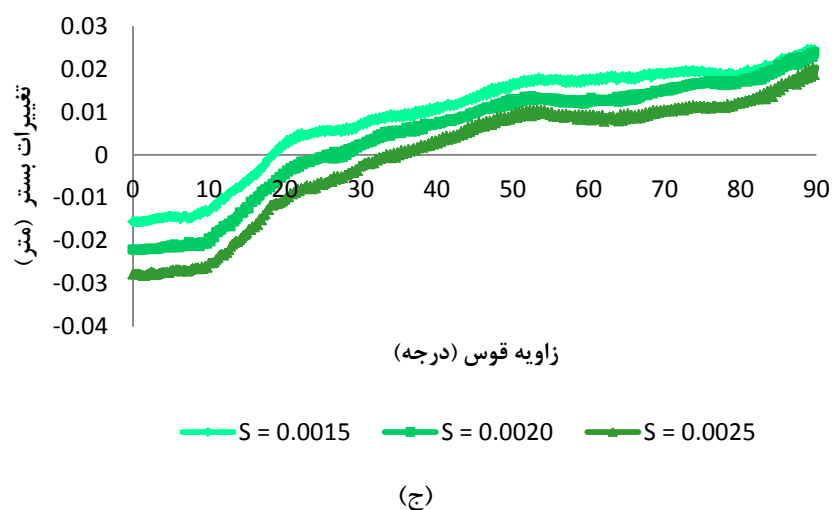
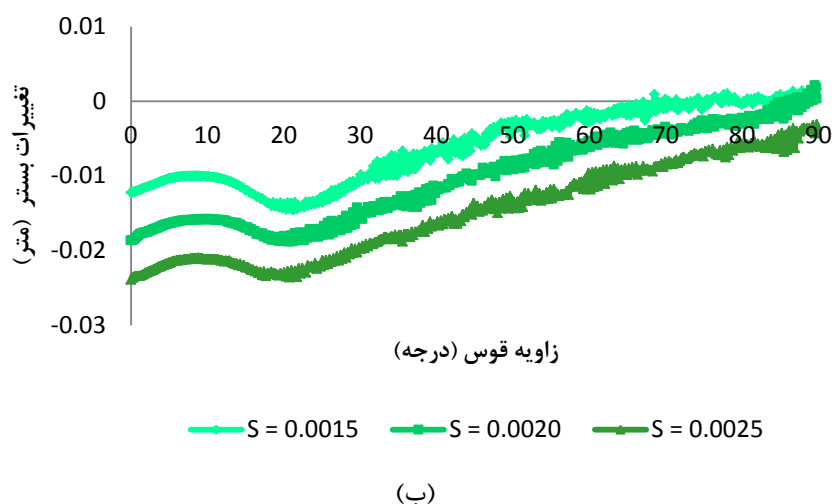
شکل (۵-۴۴-الف) پروفیل‌های طولی در مقطع نزدیک دیواره خارجی را نشان می‌دهد، همانگونه که مشاهده می‌شود در مورد شیب طولی ۰.۰۰۱۵، شرایط تفکیک کامل دو چاله آبشستگی از یکدیگر

فراهم نیست، بطوریکه برای چاله آبشستگی، فقط یک چاله با طول نسبتاً زیاد تشکیل شده است. در حالیکه در مورد شیبهای طولی ۰.۰۰۲۰ و ۰.۰۰۲۵، در دیواره خارجی دو چاله آبشستگی به خوبی دیده می‌شود. (دو فرورفتگی در نزدیکی دیواره خارجی کاملاً قابل مشاهده بوده و نشان‌دهنده دو چاله آبشستگی جدا از هم است.) تغییرات نوسانی بستر در دیواره خارجی قوس - که بر اثر نوسان در مؤلفه عرضی سرعت جریان رخ میدهد - به وضوح در این شکلها مشاهده میشود. و همانگونه که مشاهده میشود با افزایش شیب طولی کف کانال، میزان و عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

همانگونه که در شکل (۵-۴۴-ب) مشاهده میشود با دور شدن از ساحل خارجی و در محور قوس رفته رفته رسوبگذاری در طول کانال اتفاق می‌افتد.

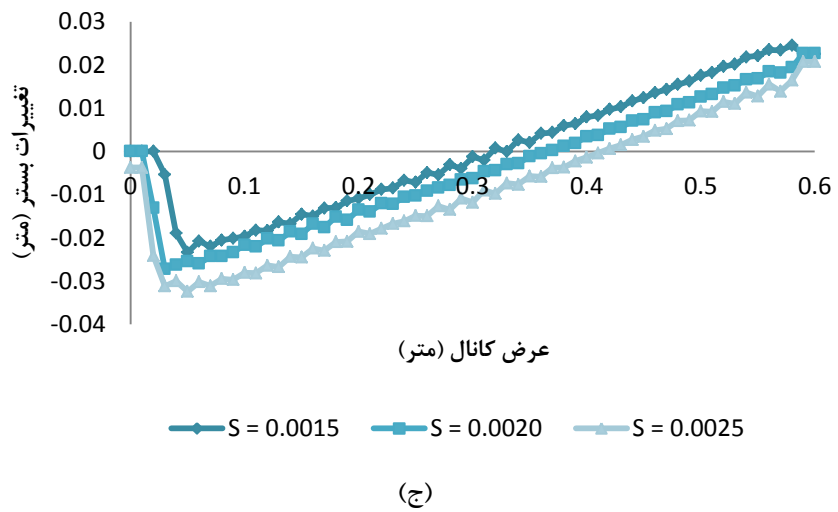
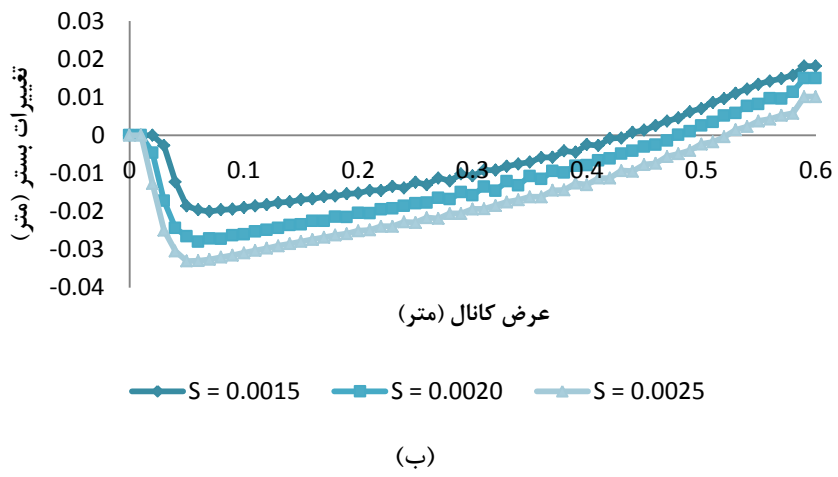
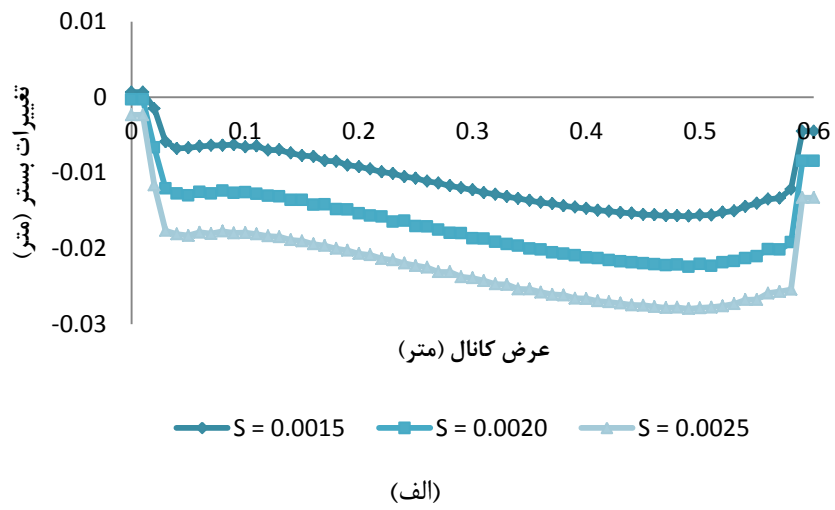
شکل (۵-۴۴-ج) پروفیل‌های طولی در مقطع نزدیک دیواره داخلی را نشان میدهد، همانگونه که مشاهده میشود، تقریباً از محدوده حوالی رأس قوس رسوبگذاری آغاز شده و با افزایش شیب طولی انباشت رسوبات به خروجی قوس منتقل میشود، و به دلیل تأثیر جریان ثانویه، بیشترین ارتفاع توده رسوبی در موقعیت خروجی قوس تشکیل می‌شود.

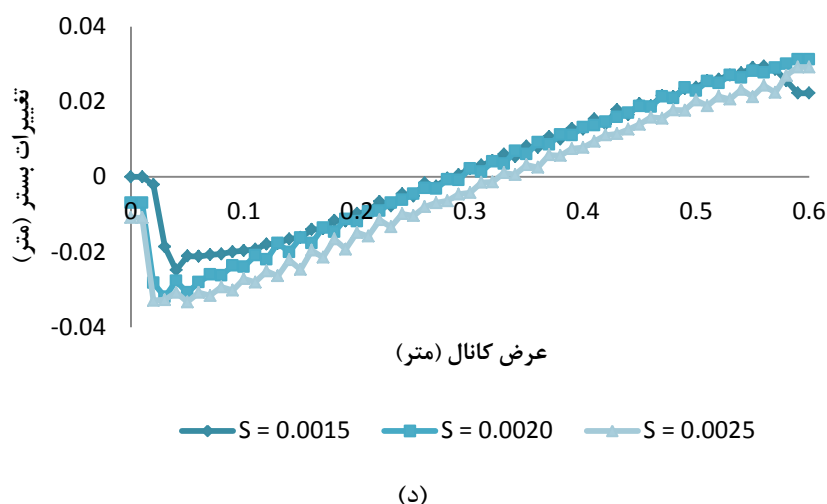




شکل (۴۴-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در شیب‌های طولی مختلف در مقاطع، الف) فاصله $B/6$ از دیواره خارجی قوس، ب) محور قوس و ج) فاصله $B/6$ از دیواره داخلی قوس در برابر مقاطع مختلف قوس

شکل (۴۵-۵) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شیب‌های طولی مختلف در برابر عرض کانال را در مقاطع، .، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش شیب طولی کف کانال آبستگي در ساحل خارجی افزایش می‌یابد و در مقابل رسوبگذاری در ساحل داخلی کاهش می‌یابد.





شکل (۴۵-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در شیب‌های طولی مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

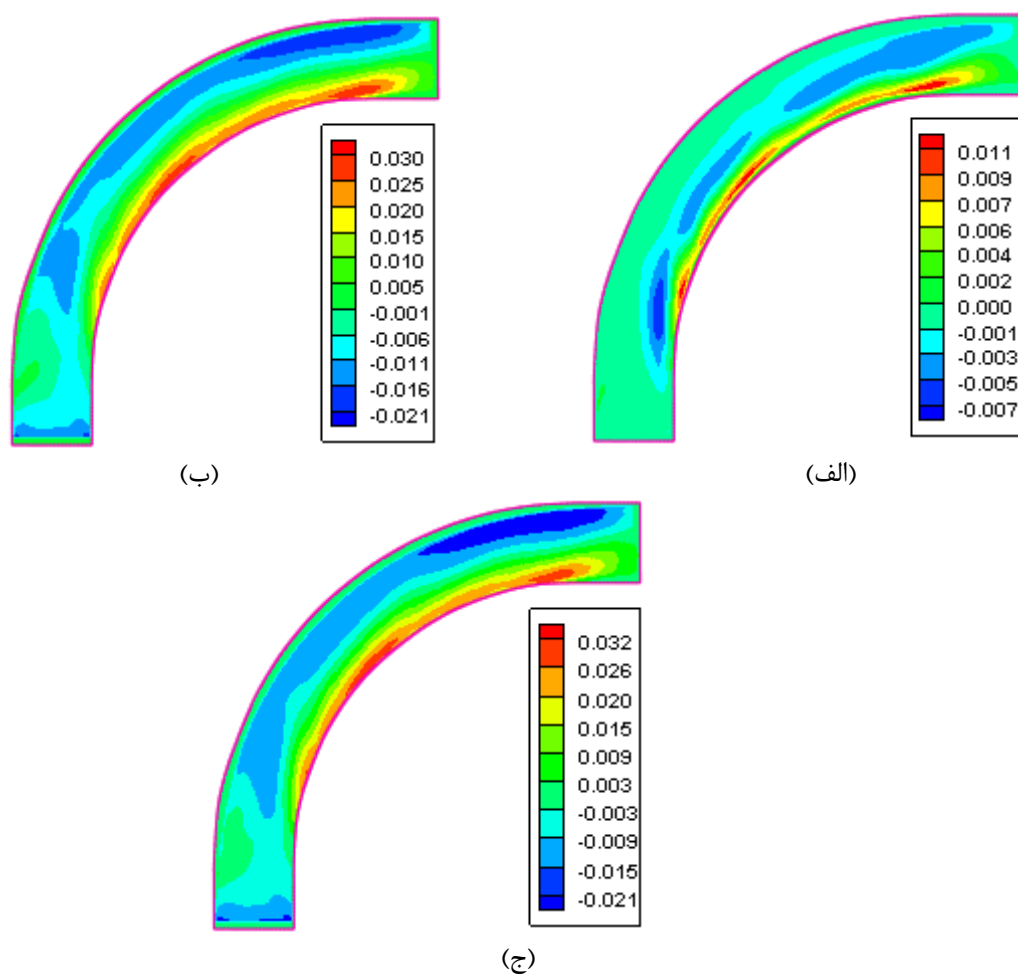
۴-۴-۵- بررسی تأثیر مشخصات جریان ورودی به خم بر توپوگرافی بستر

۴-۴-۵-۱- نتایج در حالت $U/U_c < 1$

پس از انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب برای حالت $U/U_c < 1$ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می‌پردازیم.

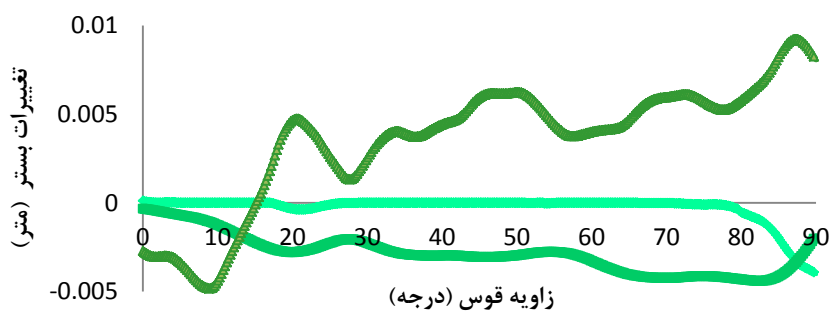
در شکل (۴۶-۵) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس ۹۰ درجه با شعاع انحنای ملایم در حالت $U/U_c < 1$ و برای دبی‌ها و اعداد فرود مختلف مشاهده می‌شود. با توجه به پایین بودن سرعت جریان در این حالت، قدرت جریان ثانویه- که به سرعت جریان بستگی دارد- در امتداد جداره خارجی قوس برای ایجاد فرسایش در جداره خارجی کافی نیست. لذا فرسایش فقط در محدوده خروجی قوس که سرعت بیشینه جریان طولی به قوس خارجی منتقل شده، اتفاق می‌افتد. در این حالت توده رسوبی اول از زاویه ۳۵ درجه، در جداره داخلی آغاز می‌شود. موقعیت ۳۵ درجه محل تقریبی توسعه جریان ثانویه است. همچنین در موقعیت حدود ۴۵ درجه در جداره داخلی - که حداکثر ارتفاع توده رسوبی اول در آن ایجاد شده- محدوده تقریبی تغییر موقعیت سرعت بیشینه از جداره داخلی به محدوده وسط قوس و به تدریج به جداره خارجی قوس است. توده رسوبی دوم تقریباً از موقعیت ۸۰ درجه آغاز

شده و با توجه به دبی جریان تا موقعیت حدود ۹۰ درجه توسعه می‌یابد. موقعیت حضور این توده رسوبی نیز- که بر اثر حضور جریان ثانویه کم قدرت تشکیل میشود- به تشکیل چاله آبستگي در موقعیت خروجی قوس کمک میکند. همچنین در شکل (۵-۴۶-الف) آبستگي کوچکی در حوالی توده رسوبی اول شکل میگیرد که دلیل آن نیز جریان ثانویه و گردابه‌های ایجاد شده در اطراف این توده رسوبی است.



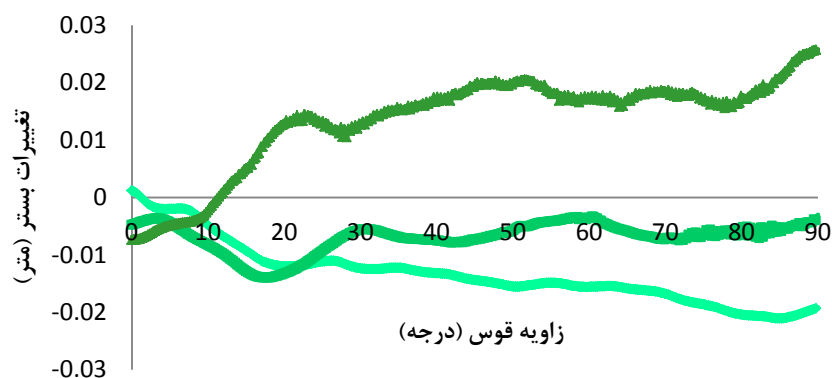
شکل (۵-۴۶) نمونه ای از توپوگرافی بستر در حالت $U/U_c < 1$ در دبی های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر برثانیه به منظور بررسی بیشتر توپوگرافی بستر در موقعیتهای آبستگي و رسوبگذاری، پروفیل‌های طولی بستر در سه مقطع نزدیک دیواره خارجی، مرکز و نزدیک دیواره داخلی قوس ترسیم شده است. در این شکل‌ها B عرض کانال است.

در شکل (۴۷-۵) پروفیل طولی بستر در حالت $U/U_c < 1$ برای دبی‌های مختلف در برابر مقاطع مختلف قوس ترسیم شده است. با توجه به این شکل وجود دو توده رسوبی در جداره داخلی (دو بالا آمدگی کاملاً جدا) و یک چاله فرسایشی (یک پایین‌افتادگی مشخص) در نزدیکی خروجی قوس در تمامی حالت‌ها مشاهده می‌شود. همانگونه که مشاهده میشود توده رسوبی دوم از لحاظ ابعاد و ارتفاع، بزرگتر از توده رسوبی اول است.



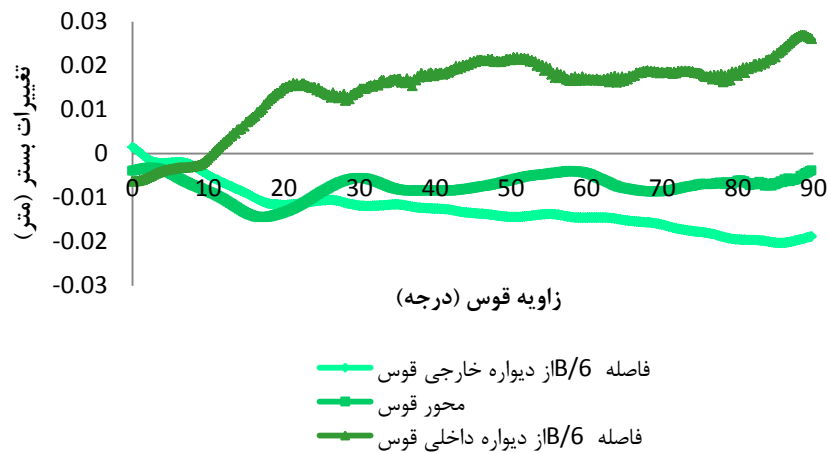
فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
محور قوس
فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

(الف)



فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
محور قوس
فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

(ب)

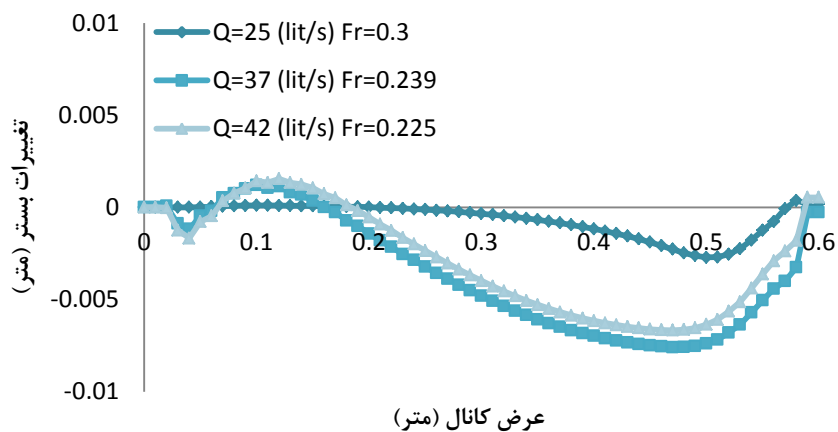


(ج)

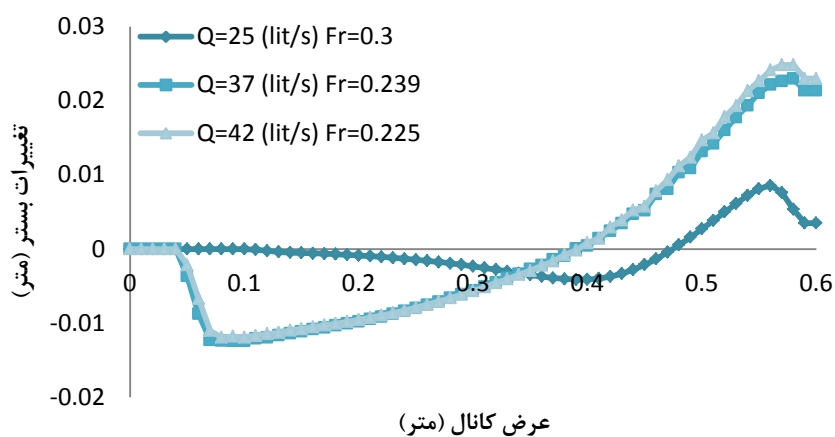
شکل (۵-۴۷) نمونه ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $U/U_c < 1$ برای دبی‌های مختلف، الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج)

۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس

در شکل (۵-۴۸) پروفیل عرضی بستر در مقاطع مختلف قوس در حالت $U/U_c < 1$ برای دبی‌های مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود میزان رسوبگذاری و آبشستگی در مقاطع مختلف قوس افزایش می‌یابد. در دبی‌های ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه پروفیل‌های عرضی در مقاطع مختلف قوس تقریباً بر هم منطبق‌اند. در نتیجه می‌توان گفت در دبی‌های بیشتر از ۳۷ لیتر بر ثانیه تغییرات بستر تقریباً یکسان می‌باشد.

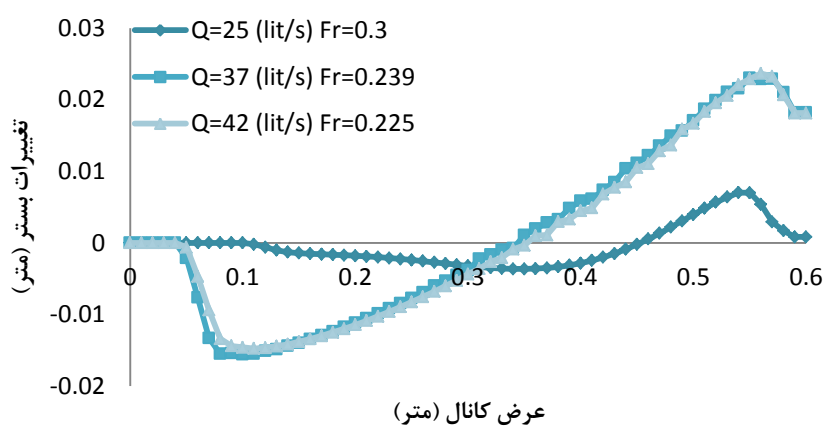


(الف)



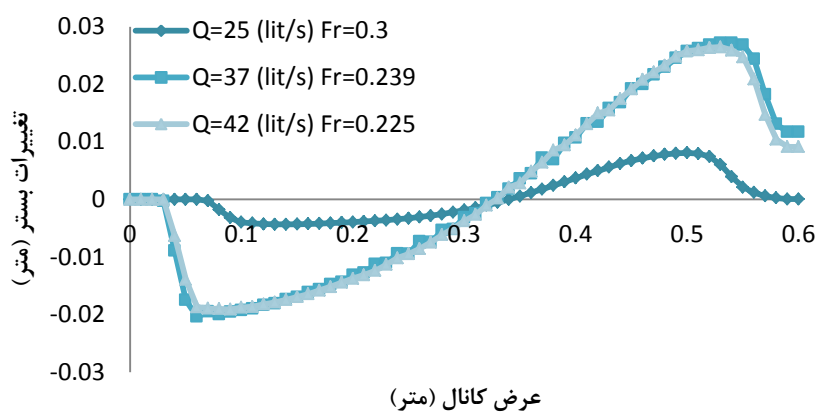
عرض کانال (متر)

(ب)



عرض کانال (متر)

(ج)



عرض کانال (متر)

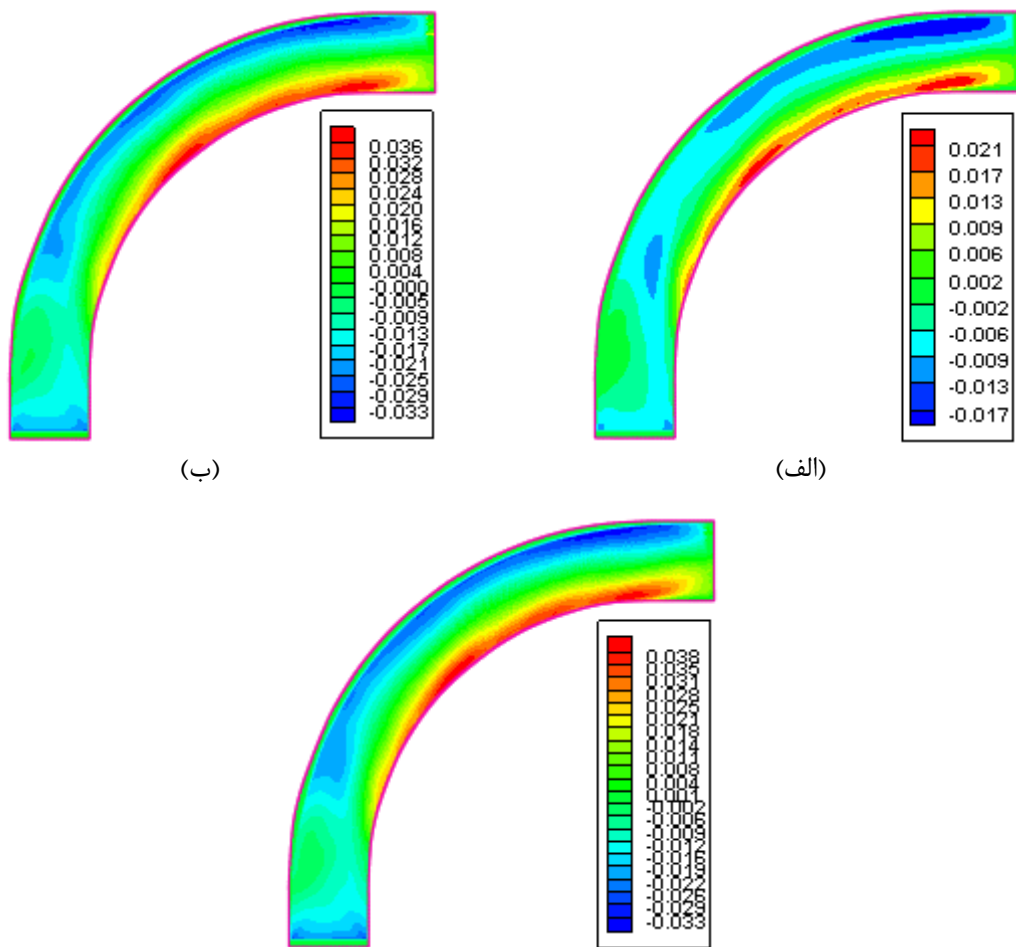
(د)

شکل (۴۸-۵) نمونه ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در حالت $U/U_c < 1$ در دبی‌های مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

۵-۴-۲- نتایج در حالت $1 < U/U_c < 1.1$

پس از انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب برای حالت $1 < U/U_c < 1.1$ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می‌پردازیم.

در شکل (۵-۴۹) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس ۹۰ درجه با شعاع انحنای ملایم در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ و برای دبی‌ها و اعداد فرود مختلف مشاهده می‌شود. تفاوت این حالت با حالت‌های قبل در آن است که در این حالت سرعت جریان در ناحیه مستقیم ورودی، نزدیک به سرعت بحرانی برای حرکت رسوبها است. همانگونه که مشاهده میشود دو چاله فرسایشی در جداره خارجی قوس تشکیل شده که بسیار به هم نزدیکند یا در هم ادغام شده‌اند. از آنجا که نوسانات مؤلفه عرضی سرعت به مقدار سرعت بستگی دارد، لذا در این وضعیت که سرعت جریان کمتر است، این نوسانات نیز کمتر بوده و چاله‌های آبستگي به یکدیگر متصل شده‌اند. مقایسه این حالت با حالت‌های قبلی نشان میدهد که فقط در این حالت میتوان دو چاله آبستگي را به یکدیگر متصل دانست. بدیهی است در مواردی که سرعت کمی بیشتر شده، تمایل به تشکیل دو چاله فرسایشی در جداره خارجی افزایش یافته است. در این حالت توده رسوبی اول از زاویه ۳۵ درجه، در جداره داخلی آغاز می‌شود. موقعیت ۳۵ درجه محل تقریبی توسعه جریان ثانویه است. همچنین در موقعیت حدود ۴۵ درجه در جداره داخلی - که حداکثر ارتفاع توده رسوبی اول در آن ایجاد شده - محدوده تقریبی تغییر موقعیت سرعت بیشینه از جداره داخلی به محدوده وسط قوس و به تدریج به جداره خارجی قوس است. توده رسوبی دوم تقریباً از موقعیت ۸۰ درجه آغاز شده و با توجه به دبی جریان تا موقعیت بعد از زاویه ۹۰ درجه توسعه می‌یابد.

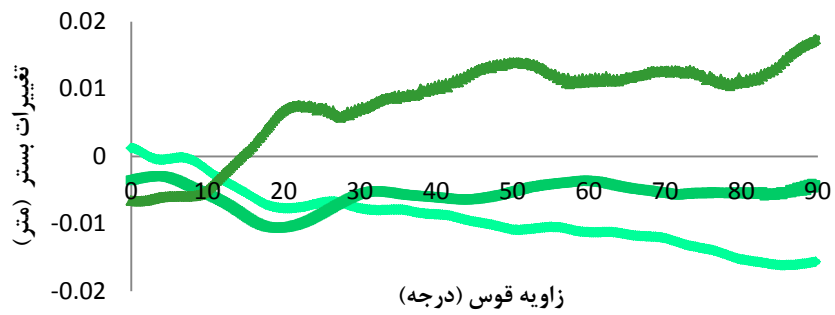


(ب)

(الف)

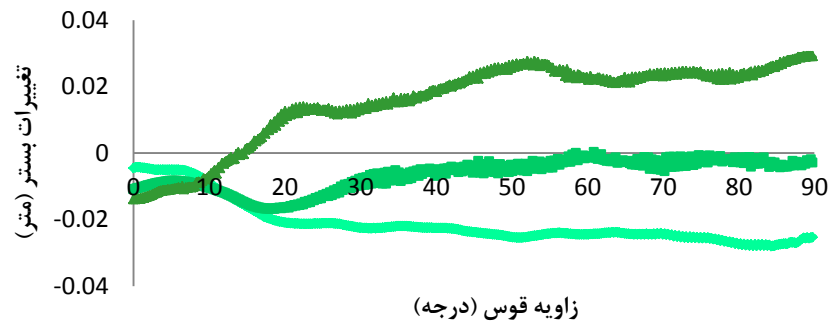
(ج)

شکل (۵-۴۹) نمونه ای از توپوگرافی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ در دبی های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در شکل (۵-۵۰) پروفیل های طولی در سه مقطع نزدیک دیواره خارجی، مرکز و نزدیک دیواره داخلی در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی های مختلف در برابر مقاطع مختلف قوس ترسیم شده است. در این شکل ها B عرض کانال است. همانگونه که مشاهده میشود در این حالت، شرایط تفکیک کامل دو چاله آبشستگی از یکدیگر فراهم نیست، بطوریکه برای چاله آبشستگی، فقط یک چاله با طول نسبتاً زیاد تشکیل شده است. همچنین در پروفیل طولی نزدیک دیواره داخلی دو برآمدگی قابل مشاهده است که ارتفاع دو برآمدگی تقریباً یکسان است.



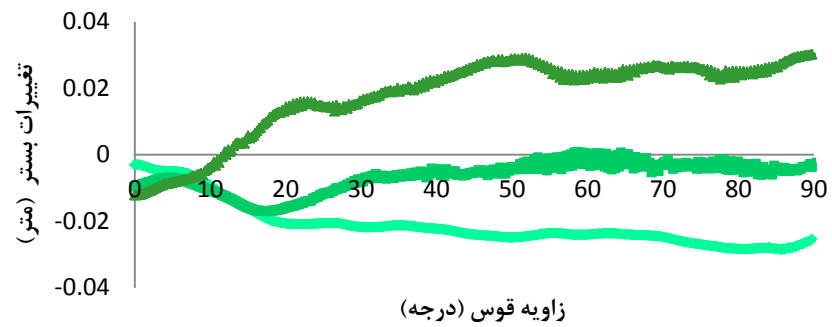
فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
محور قوس
فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

(الف)



فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
محور قوس
فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

(ب)

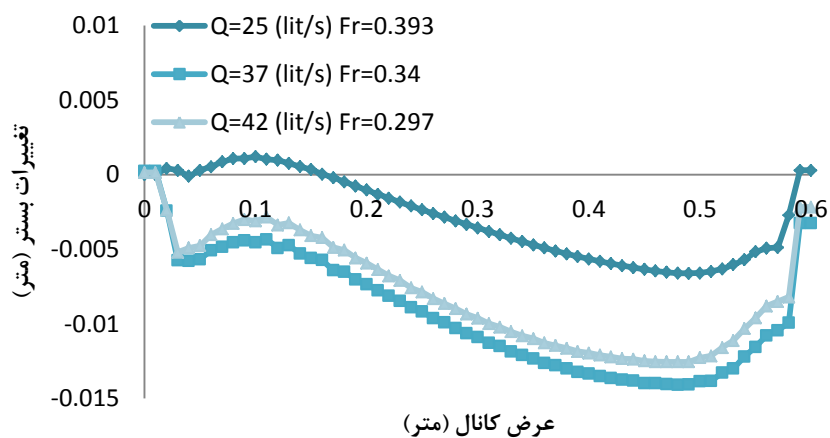


فاصله B/6 از دیواره خارجی قوس
محور قوس
فاصله B/6 از دیواره داخلی قوس

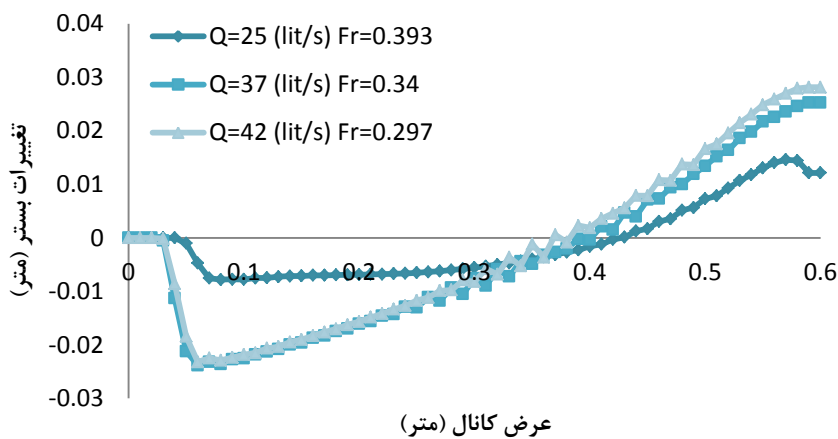
(ج)

شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی‌های مختلف، الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس

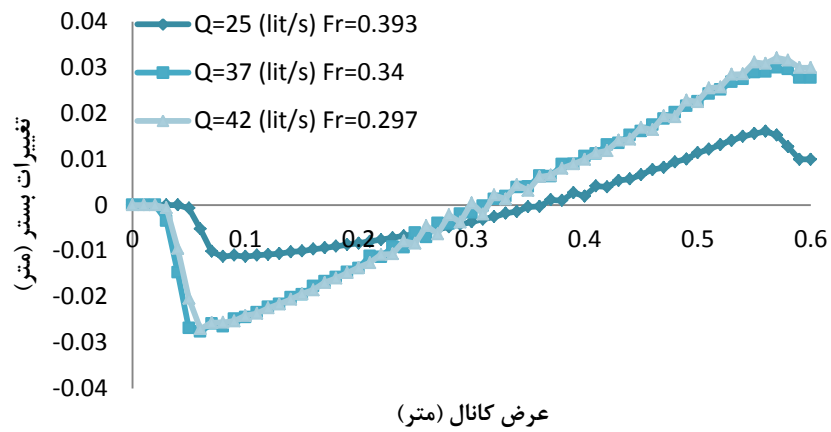
در شکل (۵-۵۱) پروفیل عرضی بستر در مقاطع مختلف قوس در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی های مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می شود، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود میزان رسوبگذاری و آبستنگی در مقاطع مختلف قوس افزایش می یابد. در دبی های ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه پروفیل های عرضی در مقاطع مختلف قوس تقریباً بر هم منطبق اند. در نتیجه میتوان گفت در دبی های بیشتر از ۳۷ لیتر بر ثانیه تغییرات بستر تقریباً یکسان میباشد.



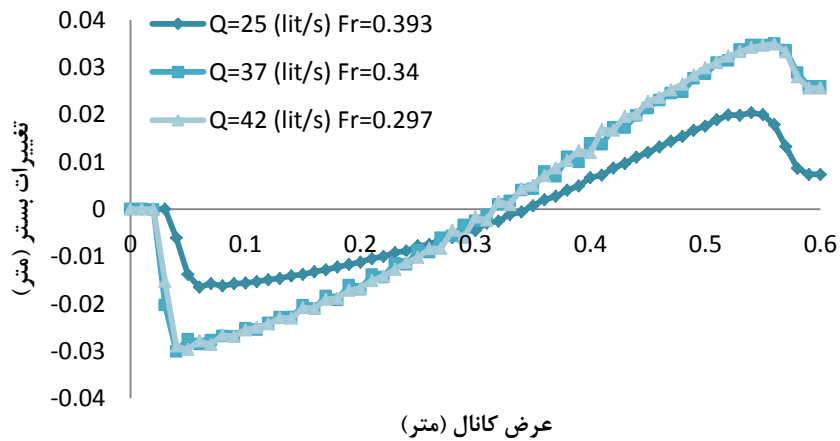
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

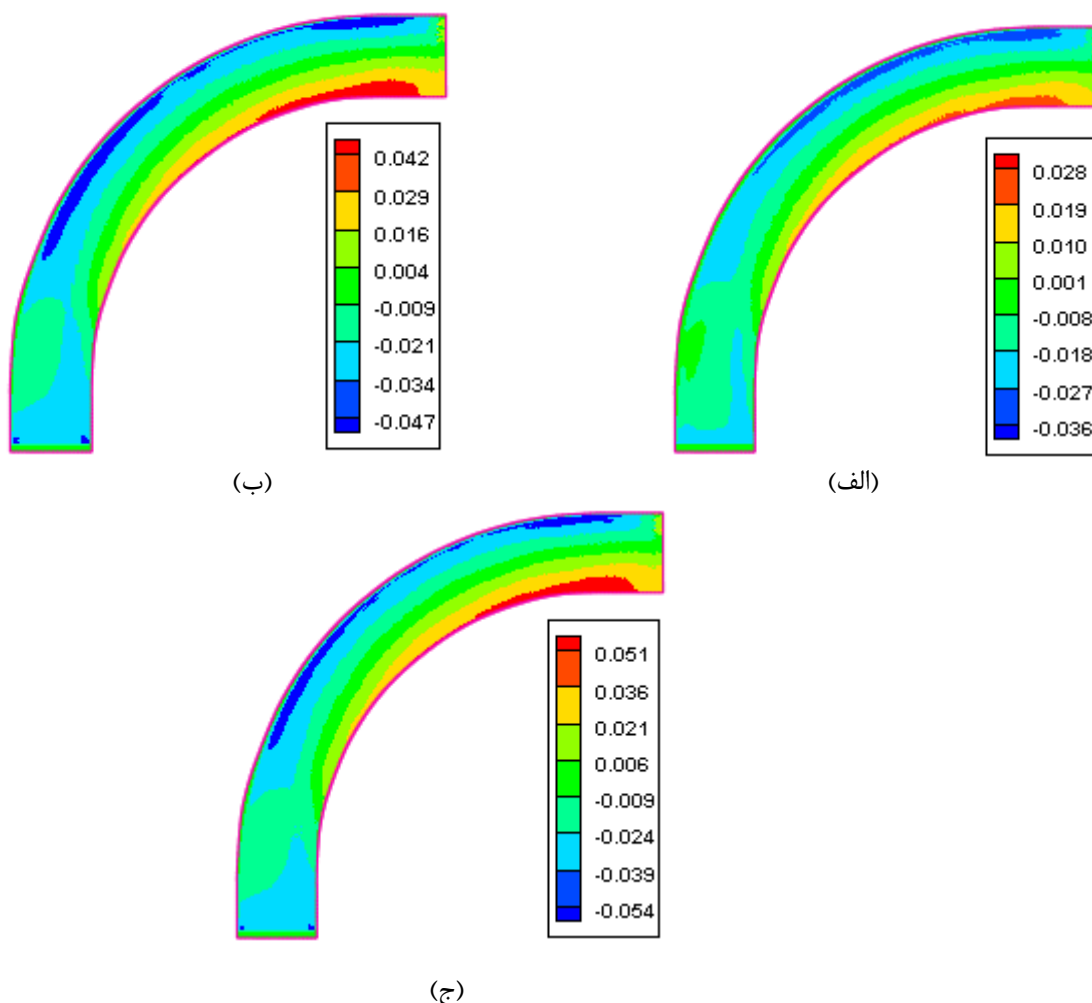
شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ برای دبی‌های مختلف، الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

۵-۳-۴-۳- نتایج در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$

پس از انجام شبیه‌سازی انتقال رسوب برای حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شده است که در ادامه به توصیف و تفسیر این نتایج می‌پردازیم.

در شکل (۵-۵۲) تغییرات توپوگرافی بستر مربوط به قوس ۹۰ درجه با شعاع انحنای ملایم در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ و برای دبی‌ها و اعداد فرود مختلف مشاهده می‌شود. در شکل (۵-۵۲-الف) دو توده رسوبی در جداره داخلی قوس تشکیل شده که این دو توده رسوبی تقریباً به یکدیگر متصل شده‌اند. نزدیک بودن این دو توده رسوبی به یکدیگر سبب می‌شود که رفتار آنها شبیه به یک توده رسوبی باشد. توده رسوبی اول از زاویه ۳۵ درجه آغاز می‌شود و توده رسوبی دوم تا بعد از زاویه ۹۰ درجه و در خروجی قوس توسعه می‌یابد. از آنجا که در موقعیت خروجی قوس در جداره داخلی سرعت جریان کم بوده و گرادیان مثبت فشار طولی سبب کاهش بیشتر سرعت جریان می‌شود و نیز به دلیل تأثیر جریان ثانویه، توده رسوبی دوم در این موقعیت تشکیل می‌شود. اولین چاله آبستگي از حدود زاویه ۲۰ درجه شروع می‌شود، با افزایش دبی جریان فاصله بین دو چاله آبستگي افزایش می‌یابد. حداکثر عمق چاله آبستگي، در نزدیکی حداکثر ارتفاع توده رسوبی واقع می‌شود. دلیل این امر آن است که در این حالت سرعت جریان بیشتر بوده و باعث افزایش قدرت جریان ثانویه می‌شود. از سوی دیگر سرعت طولی نیز بر اثر کاهش عرضی ناشی از توده‌های رسوبی افزایش یافته و باعث افزایش تنش برشی و آبستگي می‌شود. با توجه به فاصله تشکیل شده در بین دو چاله آبستگي در جداره خارجی قوس میتوان نتیجه گرفت که توپوگرافی بستر حالت نوسانی دارد. علت نوسانی بودن توپوگرافی بستر، نوسان مؤلفه عرضی سرعت است.

همچنین از شکل (۵-۵۲) میتوان استنتاج کرد که با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود میزان رسوبگذاری و آبستگي افزایش پیدا میکند.

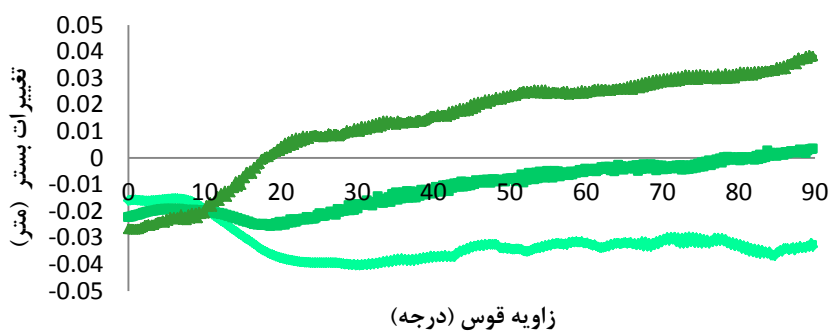
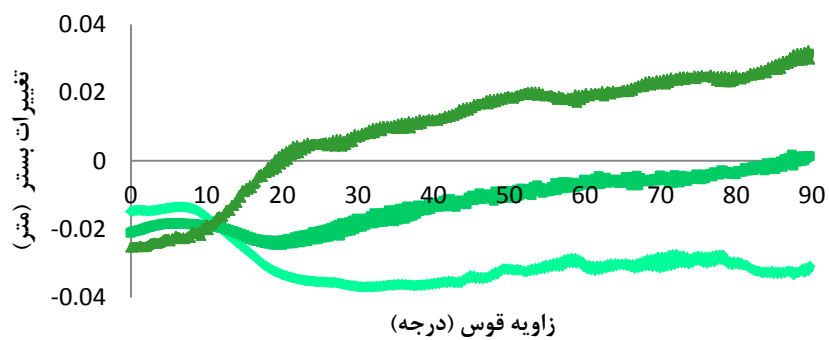
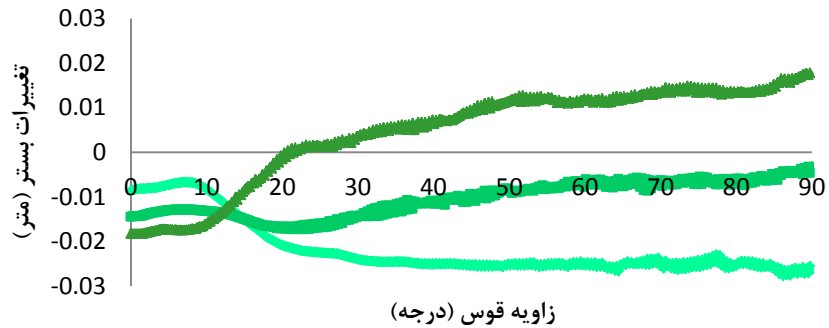


شکل (۵-۵۲) نمونه‌ای از توپوگرافی بستر در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های (الف) ۲۵، (ب) ۳۷ و (ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه

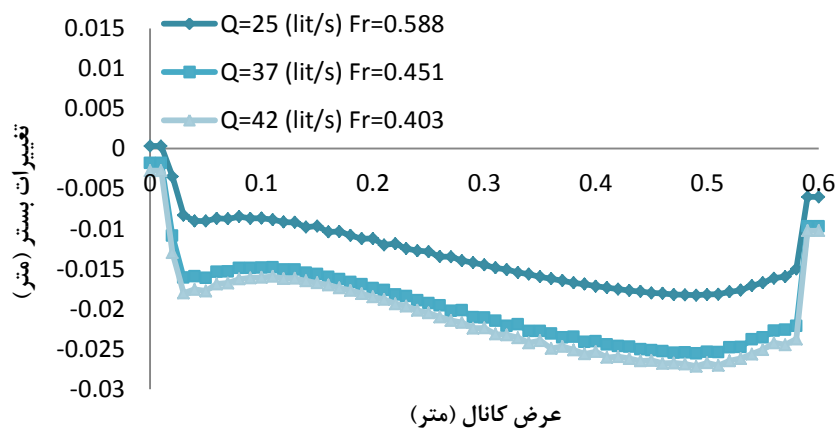
شکل (۵-۵۳) پروفیل‌های طولی بستر در سه مقطع نزدیک دیواره خارجی، مرکز و نزدیک دیواره داخلی را در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ برای دبی‌های مختلف در برابر مقاطع مختلف قوس نشان می‌دهد. در این شکل ها B عرض کانال است.

در این شکل در جداره خارجی دو چاله آبستگي به خوبی دیده می‌شود. (دو فرورفتگی در پروفیل طولی نزدیک جداره خارجی کاملاً قابل مشاهده بوده و نشان‌دهنده دو چاله آبستگي جدا از هم است.) تغییرات نوسانی بستر در دیواره خارجی قوس - که بر اثر نوسان در مؤلفه عرضی سرعت جریان رخ می‌دهد - به وضوح در این شکلها مشاهده میشود.

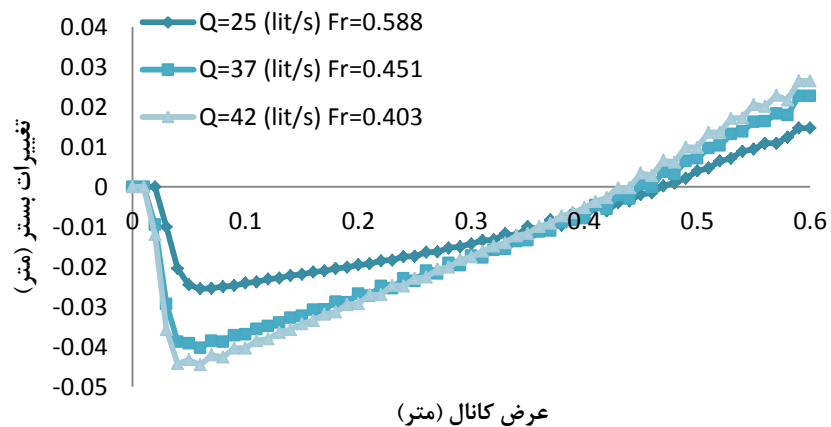
در این حالت شرایط تفکیک کامل دو توده رسوبی از یکدیگر فراهم نیست، و توده رسوبی دوم به صورت یک توده کم ارتفاع با شیب کم تشکیل شده است.



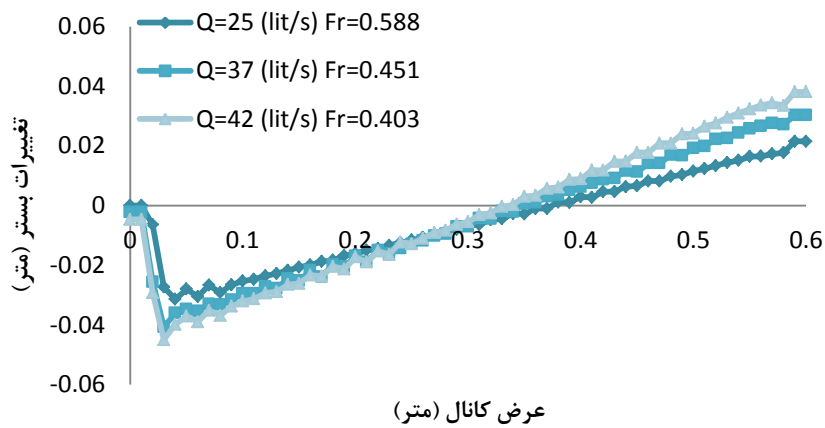
شکل (۵-۵۳) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل طولی بستر در حالت $1.25 < U/U_c < 1.33$ برای دبی‌های مختلف، الف) ۲۵، ب) ۳۷ و ج) ۴۲ لیتر بر ثانیه در برابر مقاطع مختلف قوس در شکل (۵-۵۴) پروفیل عرضی بستر در مقاطع مختلف قوس در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ برای دبی‌های مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود میزان رسوبگذاری و آبشستگی در مقاطع مختلف قوس افزایش می‌یابد. و همچنین شیب عرضی بستر افزایش می‌یابد. در دبی‌های ۳۷ و ۴۲ لیتر بر ثانیه پروفیل‌های عرضی در مقاطع مختلف قوس تقریباً بر هم منطبق‌اند. در نتیجه میتوان گفت در دبی‌های بیشتر از ۳۷ لیتر بر ثانیه تغییرات بستر تقریباً یکسان میباشد.



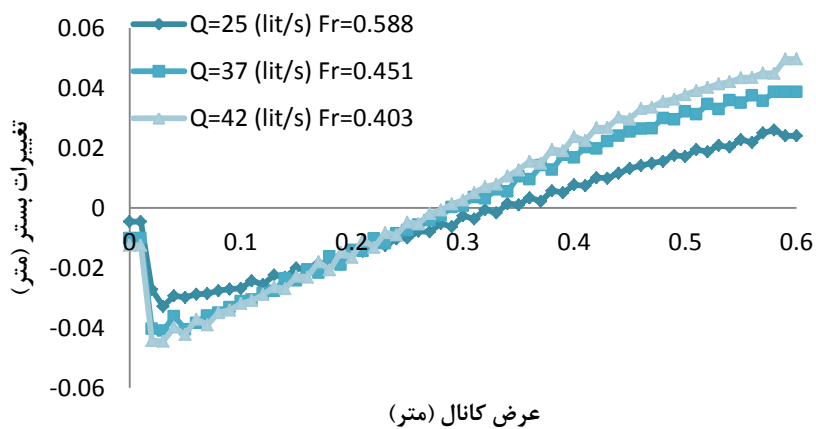
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵-۵) نمونه‌ای از تغییرات پروفیل عرضی بستر در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ در دبی‌های مختلف در مقاطع، (الف) ۰، (ب) ۳۰، (ج) ۶۰ و (د) ۹۰ درجه در برابر عرض کانال (سمت چپ نشان دهنده دیواره خارجی و سمت راست نشان دهنده دیواره داخلی است).

فصل ششم

خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- خلاصه

در این تحقیق در فصل اول، ابتدا ضرورت و اهمیت بررسی الگوی جریان و انتقال رسوب در خم رودخانه ها بیان شد و سپس کلیاتی در مورد مطالعه انجام شده و اهداف آن بیان شد. در فصل دوم، مروری بر هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها انجام شد و کلیاتی در مورد هیدرولیک جریان در خم رودخانه‌ها و شکل رودخانه‌ها در پلان بیان شد و مشخصه‌های مهم جریان در خم رودخانه‌ها شامل جریانهای ثانویه، خیزاب، اضافه افت اصطکاکی، توزیع سرعت و تنش برشی کف در آنها مورد بررسی قرار گرفت. در فصل سوم، جهت پیش درآمدی بر تحقیق حاضر خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در رابطه با الگوی جریان و انتقال رسوب در خم‌ها و هم چنین نمونه‌ای از تحقیقات انجام شده توسط نرم افزار CCHE2D، مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه، در داخل و خارج آورده شد. در فصل چهارم، ابتدا مشخصات مدل عددی CCHE2D معرفی و سپس مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی بیان شد و با بهره‌گیری از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی به صحت سنجی مدل عددی جریان و رسوب و ارزیابی نتایج پرداخته شد. در فصل پنجم، با استفاده از نرم‌افزار CCHE2D، تأثیر پارامترهای هندسی از قبیل (شعاع انحنای خم، زاویه انحنای خم و شیب طولی کف کانال) و شرایط هیدرولیکی از قبیل (دبی، عمق، سرعت جریان و عدد فرود) بر الگوی جریان و توپوگرافی بستر بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان به صورت نمایش الگوی جریان و نمودارهای نمایش تغییرات پارامترهای مختلف و نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال رسوب به صورت نمایش الگوی رسوبگذاری و فرسایش و نمودارهای نمایش تغییرات پروفیل‌های طولی و عرضی در مقاطع مختلف خم ارائه شد. در فصل حاضر، نتیجه گیری کلی این تحقیق و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده بیان شده است.

۶-۲- نتیجه‌گیری

۶-۲-۱- شبیه‌سازی جریان

الگوی جریان‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که سرعت بیشینه در هنگام ورود به قوس در نزدیکی دیواره داخلی قرار گرفته و تا زاویه حدود ۴۵ درجه این حالت ادامه دارد. سپس به محور فلوم نزدیک شده و در نزدیکی خروجی قوس به دیواره خارجی منتقل می‌شود.

۶-۲-۱-۱- شعاع انحنای خم

اجرای مدل عددی با شعاع انحنای متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش شعاع انحنای خم، عمق آب در کانال افزایش می‌یابد.

عمق آب ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای مرکزی از ۱.۲ متر (قوس تند) به ۱.۸ متر (قوس متوسط) تغییری نمی‌کند، اما با افزایش شعاع انحنای مرکزی از ۱.۸ متر (قوس متوسط) به ۲.۴ متر (قوس ملایم) افزایش می‌یابد.

اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای خم کاهش پیدا می‌کند.

دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای خم کاهش پیدا می‌کند.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای خم کاهش پیدا می‌کند.

عدد فرود ماکزیمم، با افزایش شعاع انحنای خم کاهش پیدا می‌کند.

۶-۲-۱-۲- زاویه انحنای خم

اجرای مدل عددی با زوایای مرکزی متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش زاویه مرکزی خم، عمق آب ماکزیمم به طور خطی افزایش می‌یابد اما عمق آب مینیمم تغییری نمی‌کند.

اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.

دبی مخصوص کل، در زوایای مرکزی بزرگتر از ۹۰ درجه ثابت می‌باشد.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند.

عدد فرود ماکزیمم، با افزایش زاویه مرکزی خم از الگوی خاصی پیروی نمی کند.

۶-۲-۱-۳- شیب طولی کف کانال

اجرای مدل عددی با شیبهای طولی متفاوت نشان میدهد که با افزایش شیب طولی کف کانال، عمق

آب در دیواره داخلی و خارجی کانال کاهش پیدا می کند.

عمق آب ماکزیمم، با افزایش شیب طولی کف کانال کاهش پیدا می کند.

اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش شیب طولی کف کانال به طور خطی افزایش پیدا می کند .

دبی مخصوص کل ماکزیمم، در شیب های طولی بزرگتر از 0.020 ثابت می باشد.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش شیب طولی کف کانال به طور خطی افزایش پیدا می کند.

عدد فرود ماکزیمم، با افزایش شیب طولی کف کانال به طور خطی افزایش پیدا می کند.

۶-۲-۱-۴- مشخصات جریان ورودی به خم

اجرای مدل عددی با شرایط هیدرولیکی متفاوت در حالت $U/U_c < 1$ نشان میدهد که با افزایش دبی

جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در کانال افزایش پیدا می کند.

عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا میکند.

اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا می کند.

دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود به طور خطی افزایش پیدا می

کند.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود از الگوی خاصی پیروی نمی کند.

عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود از الگوی خاصی پیروی نمی کند.

اجرای مدل عددی با شرایط هیدرولیکی متفاوت در حالت $1 < U/U_c < 1.1$ نشان میدهد که با

افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در کانال افزایش پیدا می کند.

عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا می کند.

اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود کاهش پیدا می‌کند. اجرای مدل عددی با شرایط هیدرولیکی متفاوت در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود عمق آب در کانال افزایش پیدا می‌کند.

عمق آب ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود به طور خطی افزایش پیدا می‌کند. اندازه سرعت ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود افزایش پیدا می‌کند. دبی مخصوص کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود به طور خطی افزایش پیدا می‌کند.

تنش برشی کل ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. عدد فرود ماکزیمم، با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود کاهش پیدا می‌کند.

۶-۲-۲- انتقال رسوب

در حالت کلی در تمامی شبیه‌سازی‌ها، قوس خارجی در معرض فرسایش و قوس داخلی در معرض رسوبگذاری قرار دارد. علت اصلی این پدیده وجود جریان ثانویه است که مقدار حداکثر سرعت را در سطح آب به قوس خارجی منتقل کرده و رسوبات را در کف به سمت قوس داخلی هدایت می‌کند.

۶-۲-۲-۱- شعاع انحنای خم

در قوس با شعاع انحنای ملایم، از زاویه حدود ۶۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی و دو توده رسوبی در محدوده بین ۳۵ تا ۵۰ درجه و در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه در قوس داخلی مشاهده می‌شود. همچنین آبشستگی کوچکی در حوالی توده رسوبی اول تشکیل می‌شود.

در قوس با شعاع انحنای متوسط، آبشستگی در قوس خارجی و در مسیر مستقیم پایین دست قوس مشاهده میشود. همچنین آبشستگی در نزدیکی قوس داخلی و در محدوده بین ۳۰ تا ۵۵ درجه ایجاد شده است. رسوبات خروجی از محدوده آبشستگی ذکر شده در ساحل داخلی انباشته میشود.

در قوس با شعاع انحنای تند، تمایل سرعت بیشینه نزدیک بستر به سمت قوس داخلی نسبت به دو قوس دیگر بیشتر است. تغییرات ذکر شده در قوس با شعاع انحنای متوسط به صورت محسوس تری در قوس با شعاع انحنای تند مشاهده می گردد.

اجرای مدل عددی با شعاع انحنای متفاوت نشان میدهد که با کاهش شعاع انحنای خم، تغییرات توپوگرافی بستر، میزان رسوبگذاری و آبشستگی افزایش می یابد.

۶-۲-۲- زاویه انحنای خم

در قوس با زاویه مرکزی ۶۰ درجه، در قوس خارجی و در مسیر مستقیم پایین دست قوس آبشستگی و در محدوده بین ۲۵ تا ۵۵ درجه و در قوس داخلی رسوبگذاری مشاهده می شود، همچنین آبشستگی کوچکی در بالای توده رسوبی تشکیل می شود.

در قوس با زاویه مرکزی ۹۰ درجه، از زاویه حدود ۶۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی و دو توده رسوبی در محدوده بین ۳۵ تا ۵۰ درجه و در محدوده ۸۰ تا ۹۰ درجه در قوس داخلی مشاهده میشود. همچنین آبشستگی کوچکی در حوالی توده رسوبی اول تشکیل میشود.

در قوس با زاویه مرکزی ۱۲۰ درجه، از زاویه حدود ۸۰ درجه و در قوس خارجی آبشستگی و در قوس داخلی در محدوده بین ۲۵ تا ۴۵ درجه توده رسوبی اول، در محدوده بین ۵۵ تا ۷۰ درجه توده رسوبی دوم و در محدوده بین ۷۵ تا ۱۲۰ درجه توده رسوبی سوم مشاهده میشود، که دو توده رسوبی دوم و سوم بسیار به هم نزدیکند. همچنین آبشستگی کوچکی در حوالی توده رسوبی دوم تشکیل میشود.

در قوس با زاویه مرکزی ۱۸۰ درجه، از زاویه حدود ۱۴۵ درجه در قوس خارجی و در انتهای قوس دو چاله آبشستگی مشاهده می شود که در هم ادغام شده اند، همچنین در روبروی این چاله های

آبشستگی و در قوس داخلی دو توده رسوبی مشاهده می‌شود که یا به هم متصل اند یا بسیار نزدیک اند.

۶-۲-۳- شیب طولی کف کانال

در قوس با شیب طولی ۰.۰۰۱۵، دو توده رسوبی در دیواره داخلی مشاهده می‌شود که توده رسوبی اول از زاویه حدود ۳۰ درجه آغاز می‌شود و توده رسوبی دوم که به توده رسوبی اول متصل است تا بعد از زاویه ۹۰ درجه و در خروجی قوس توسعه می‌یابد. همچنین در این وضعیت دو چاله آبشستگی در دیواره خارجی تشکیل می‌شود که یا به هم نزدیکند یا در هم ادغام شده‌اند، اولین چاله آبشستگی از زاویه ۲۵ درجه شروع می‌شود.

در قوس با شیب طولی ۰.۰۰۲۰، یک توده رسوبی که از زاویه حدود ۳۵ درجه آغاز شده و تا بعد از زاویه ۹۰ درجه ادامه می‌یابد، مشاهده می‌شود. همچنین دو چاله آبشستگی جدا از هم در دیواره خارجی دیده می‌شود، اولین چاله آبشستگی از زاویه ۲۵ درجه شروع می‌شود.

در قوس با شیب طولی ۰.۰۰۲۵، یک توده رسوبی که از زاویه حدود ۴۰ درجه آغاز شده و تا بعد از زاویه ۹۰ درجه ادامه می‌یابد، مشاهده می‌شود. همچنین دو چاله آبشستگی جدا از هم در دیواره خارجی دیده می‌شود، اولین چاله آبشستگی از زاویه ۳۰ درجه شروع می‌شود.

اجرای مدل عددی با شیبهای طولی متفاوت نشان می‌دهد که با افزایش شیب طولی کف کانال، میزان آبشستگی و عمق آبشستگی در ساحل خارجی افزایش می‌یابد و فاصله بین دو چاله آبشستگی نیز افزایش می‌یابد، و در مقابل رسوبگذاری در ساحل داخلی کاهش می‌یابد و همچنین انباشت رسوبات به خروجی قوس منتقل می‌گردد.

۶-۲-۴- مشخصات جریان ورودی به خم

در حالت $U/U_c < 1$ توده رسوبی کوچکی در موقعیت زاویه ۳۵ تا ۵۰ درجه و توده رسوبی بزرگتری در نزدیکی خروجی قوس در جداره داخلی شکل می‌گیرد. در همین حالت فقط یک چاله آبشستگی در محدوده خروجی قوس و در جداره خارجی آن به وجود می‌آید.

در حالتی که سرعت جریان کمی بزرگتر از آستانه حرکت در مسیر مستقیم است ($1 < U/U_c <$) دو توده رسوبی مشاهده می شود که اولی در محدوده زاویه ۳۵ تا ۵۰ درجه و توده رسوبی دوم تقریباً از موقعیت ۸۰ درجه آغاز شده و با توجه به دبی جریان تا موقعیت بعد از زاویه ۹۰ درجه ادامه می یابد. در این حالت دو چاله آبستگي یا به هم نزدیکند یا در هم ادغام شده اند.

در حالت $1.24 < U/U_c < 1.33$ دو توده رسوبی مشاهده میشود که توده رسوبی اول از زاویه ۳۵ درجه آغاز میشود و توده رسوبی دوم که به توده رسوبی اول متصل است یا بر روی آن تشکیل شده است تا بعد از زاویه ۹۰ درجه و در خروجی قوس توسعه می یابد. هر دو توده رسوبی در مجاورت دیواره داخلی شکل گرفته است. در همین حالت دو چاله آبستگي جدا از هم دیده میشود. در این حالت پروفیل طولی بستر، از وضعیت نوسانی بستر حکایت دارد که این الگوی نوسانی بستر، ناشی از نوسانی بودن مؤلفه سرعت در جهت عرضی است.

اجرای مدل عددی با شرایط هیدرولیکی متفاوت در حالت های مختلف $U/U_c < 1$ ، $1 < U/U_c <$ و 1.1 و $1.24 < U/U_c < 1.33$ نشان میدهد که با افزایش دبی جریان و کاهش عدد فرود، میزان رسوبگذاری و آبستگي افزایش می یابد.

۶-۳- پیشنهادات

مدل هیدرودینامیکی و انتقال رسوب دوبعدی CCHE2D، متوسط گیری شده در عمق، الگوی جریان در پیچان رودها و گردابه ها را بخوبی شبیه سازی می کند اما بخاطر اثر شکل هندسی پیچانرود و ساده سازی های انجام شده در مورد برخی پارامترها دارای نتایج تقریبی می باشد و بدقت شبکه ها و شبیه سازی هندسه، مقادیر ضریب زبری و ضریب آشفتگی بستگی دارد.

برای مدلسازی عددی تغییرات بستر در مسیرهای رودخانه ای لازم است آثار جریان حلزونی بر ذرات سیال و رسوب در مدل اعمال شود، فقط مدل عددی سه بعدی توانایی مدلسازی کامل چنین پدیده

مهمی در ریخت شناسی جریان های رودخانه ای خواهد داشت. به همین منظور پیشنهاد می شود در صورت نیاز به مدلسازی های دقیق تر از مدل عددی سه بعدی استفاده شود.

در ادامه این تحقیق پیشنهاد می شود که در یک مطالعه موردی در بازه ای از یک رودخانه طبیعی، شبیه سازی الگوی جریان و پدیده انتقال رسوب بوسیله مدل هیدرودینامیکی CCHE2D، صورت پذیرد.

مراجع:

- [1] Chang, H. H., (1984), "Variation Of Flow Resistance Through Curved Channels", ASCE. Journal Of Hydraulic Eng., Vol. 110, No. 2.
- [2] Agaceioglu, H., Yalcin, Y., (1998), "Side Weir Flow In Curved Channels", ASCE. Journal of Hydraulic Eng., Vol. 124, No. 3, Page. 163-175.
- [3] ASCE., (1996), River Hydraulic Technical Engineering And Design Guides As Adopted From The U.S.Army Corps of Engineers., No. 19 ASCE press.
- [4] Ashworth, J., Philip, sean. J., Bennet, L., best & Stuart, J. Mcllelland., (1996), "Coherent Flow Structure In Open Channel Flow", IAHR, Hydrocom.
- [5] Then, Knini. Nini., (1994), PhD. Thesis, "River Plan Form Movement In An Alluvial Plain", Balkema, Brookfield.
- [۶] مغربی م، (۱۳۷۶)، "بررسی جریان های ثانویه در یک کانال روباز سینوسی با استفاده از مدل آزمایشگاهی"، اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [7] Blankaert, K., Graf, W. H., (1999), "Outer-bank cell of secondary circulation and boundary shear stress in open-channel bends", Proc. 1 st RCEM symp., pp. 533-543.
- [8] Koch, F. G., and Flukstra, C., (1981), "Bed level computations for curved alluvial channels", Proc.XIXth congress of the Int.Assoc. for Hydr. Res., New Delhi, India, 2,357.
- [9] ACSE., Hydraulic Collected Grid. ASCE. Journal of Hydraulic Engineering., Vol. 123, No.5.
- [۱۰] نجمایی م، (۱۳۷۲) "هیدرولیک کاربردی" جلد دوم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- [۱۱] شرکت طرح نواندیشان، (۱۳۸۲) "گزارش مطالعات سیلاب و هیدرولیک رودخانه های متقاطع با مسیر"، پروژه بزرگراه شهید کلانتری.
- [12] Novak, P., and J. Cabelka., (1981), *Models in Journal of Hydraulic Engineering.*, Pitman, London.
- [13] Rozovski, I. L., (1973), "Flow Of Water In Bends Of Open Channels", *Acude. my science of Ukranianian SSR., kiev.*
- [14] Ouillon, S., Dartus, D., (1997), "Three-dimentional Computation of flow around groyne", *Journal of Hydraulic Engineering.*, vol. 123(11).
- [15] Anvar, Habib., (1986), "Turbulent Structure in a river bend", *ASCE. Journal of Hydraulic Engineering.*, 112(8).
- [۱۶] محمودی وانعلیا م، (۱۳۷۷)، رساله دکتری: "بررسی الگوی جریان در پیچان رودها با استفاده از مدل فیزیکی و مقایسه آن با مدل ریاضی"، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- [17]Rozovskii, I. L., (1957), "Flow of Water in Bend of Open Channel", *Academy of science of the Ukraine SSR, Institute of hydrology and hydraulic engineering.*
- [18] Rozovskii, I. L., (1961), "Flow of water in bends of open channels", No. OTS60-51133, Y. Prushansky, translation, Office of Technical Services, U. S. Dept. of Commerce, Washington, D. C., pp. 1222-1240.
- [19] Yen, B. C., and Lee, K. T., (1965), "Characteristics of subcritical flow in meandering channel", *Iowa Inst. Of Hyd. Res, Iowa.*
- [20] Ippen, A. T., and Drinker, P. A., (1962), "Boundary Shear Stress in Curved Trapezoidal Channels", *Journal of Hydraulic Division.*, Vol. 88, No. HY5.
- [21] Yen, C. L., (1967), PhD. Thesis, "Bed configuration and characteristics of subcritical flow in meandering channel sorting in channel bend with unsteady flow", *University of Iowa, Iowa.*

- [22] Allen, J. R. L., (1970), "A quantitative model of grain size and sedimentary structures in lateral deposits", *Geological J.*, 7, 129-146.
- [23] Engelund, F., (1974), "Flow and bed topography in channel bends", *J. Hydraulic Div.*, Vol. 100, No. 11, pp. 1631-1648.
- [24] Kikkawa, H., Ikeda, S., and Kitagawa, A., (1967), "Flow and bed topography in curved open channel", *J. Hydraulic Engrg.*, 102 (9), 1327-1342.
- [25] Falcon, M. A., and Kennedy, J. F., (1983), "Flow in alluvial river curves" *J. Fluid Mech.*, 133, 1-16.
- [26] Zimmermann, C., and Kennedy, J. F., (1978), "Transverse bed slopes in curved alluvial streams", *J. Hydraulic Div.*, Vol. 104, No. 1, pp. 1010-1018.
- [27] Odgaard, A. J., (1981), "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends", *ASCE. Journal of Hydraulic Engineering.*, Vol.107, No.12, pp. 166-169.
- [28] Odgaard, A. J., (1982), "Bed characteristics in alluvial channel bends", *J. Hydraulic Div.*, Vol.108, No. 11, pp. 1268-1281.
- [29] Yamaoka, I., And Hasigawa, H., (1983), "Effects of Bends and Alternating Bars on Meander Evolution", *River Meandering*, pp. 783-790.
- [30] Ikeda, S., and Nishimura, T., (1986), "Flow and Bed Profile in meandering Sand-silt Rivers", *ASCE. journal of Hydraulic Engineering.*, Vol. 112, No. 7, pp. 562-579.
- [31] Ikeda, S., Yamasaka, M., and Chiyode, M., (1987), "Bed topography and sorting in bends", *J. Hydraulic Engrg.*, 113(2), 190-206.
- [32] Odgaard, A. J., and Bergs, M. A., (1988), "Flow processes in a curved alluvial channel", *Water Resource Res.*, Vol. 24, No. 1, pp. 45-56.

[33] Yamamoto, K., (1989), "General Description on Features of Alluvial River", Public Works Research Institute, Ministry of Construction of Japan.

[34] Yen, C. L., and Lin, Y. L., (1990), "Bed material and bed topography in channel bend", Proc.7th Asian and Pacific Div. Congress, IAHR, 213-218.

[35] Yen., and Shin, Yaho., (1990), "Bed evolution in channl bends", J. Hydraulic. Eng., Vol. 116, No .4, pp. 461-473.

[36] Da Silva, A. M. F., and Yalin, M. S., (1997), "Laboratory Measurements in Sine-Generated Meandering Channels", International Journal of Sediment Research., Vol.12, No.1, pp. 16-28.

[37] Blankart, K., and Graf, W. H., (2001), "Mean flow and turbulence in open channel bend", J. Hydraulic Eng., Vol.127, No.10, pp. 835-846.

[38] Blanckaert, K., (2002), "Modeling of Secondary Flow Structure in River Bends", River Flow, Bousmar & Zech (eds.), pp. 127-133.

[39] Shams, M., and Ahmadi, G., and smith, D. H., (2002), "Computational Modeling of Flow and Sediment Transport and Deposition in Meandering Rivers", Advanced in water Resources., pp. 689-699.

[40] Hersberber, D., and Schleiss, A. J., (2002), "Influnence of the wall macro-roughness of the scour process in curved channels", Laboratory constructions hydraulic, pp. 121-132.

[۴۱] صالحی نیشابوری ع ا، و اقبالزاده ا، (۱۳۸۱)، "بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه"، ششمین سمینار بین المللی رودخانه، صص ۵۶۷-۵۷۴، دانشگاه شهید چمران اهواز.

[۴۲] دهقانی ا ا، قدسیان م، صالحی نیشابوری ع ا، و شفیع فر م، (۱۳۸۶) "بررسی اثر جریان بر توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه با بستر متحرک"، مجله هیدرولیک انجمن هیدرولیک ایران.

[43]Zhang, Y., Jia, Y., Yeh, K., Liao, C., Wang, S., (2009), "Numerical Simulation of Sediment Transport and Morphological Change of JiJi Weir

Reservoir”, World Environmental and Water Resources Congress 2009., pp. 1-12.

[44] Zorkeflee, A., Hasan, Kah., H, Lee., Hazi, Md., Azamathulla., and Aminuddin, Ab., Ghani., (2011), “Flow Simulation For Lake Harapan Using CCHE2D – A Case Study”, From Journal (205) International Journal of Modelling and Simulation.

[45] He, L., and Chen, D., (2013), “Modeling Curvature- and Topography-driven Secondary Currents in Sine-generated Meandering Channels”, World Environmental and Water Resources Congress., pp. 1727-1735.

[46] Chen, D., He, L., (2013), “Modeling Sediment Transport in Sine-Generated Meandering Channels”, World Environmental and Water Resources Congress., pp. 1992-1999.

[47] نجات دهکردی آ، صالحی نیشابوری ع ا، و صفرزاده ا، (۱۳۸۷)، "مطالعه هیدرودینامیکی الگوی جریان آشفته و پدیده انتقال رسوب در رودخانه کارون با استفاده از مدل عددی دو بعدی"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب.

[48] مغربی م، و صالحی نیشابوری ع ا، (۱۳۸۸)، "شبیه سازی عددی مهاجرت در پیچانرود ها"، هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه.

[49] رستمی م، فتحی م، و هنر بخش ا، (۱۳۹۱) "شبیه سازی الگوی جریان در رودخانه های پیچانرودی با استفاده از مدل CCHE2D" مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۱۹.

[50] رستمی م، حبیبی س، و موسوی ع ا، (۱۳۹۳)، "بررسی عددی الگوی جریان و رسوب در محل تلاقی رودخانه ها" نشریه علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۴.

[51] Jia, Yafei., and Wang, Sam. S. Y., (2001), “CCHE2D: Two Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady

Open Channel Flows Over Loose Bed”, NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-1, Feb 2001.

[52] Zhang, Yaoxin., and Jia, Yafei., (2009), “CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator User’s Manual-Version 3.x.” NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2009-.1, Feb 2009.

[53] Zhang, Yaoxin., (2006), “CCHE-GUI - Graphical Users Interface for NCCHE Model User’s Manual – Version 3.0.” NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2006-.2, Oct 2006.

[54] Wu, Weiming., (2001), “CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1).” NCCHE Technical Report, NCCHE-TR-2001-3, Aug 2001.

[55] Da Silva, A. M. F., (1995), Phd. thesis, “Turbulent flow in sine-generated meandering channels”, Queen’s University.

[56] Termini, D., (2009), “Experimental observations of flow and bed processes in large-amplitude meandering flume”, J. Hydraulic Eng., 575–587.

[57] Chow, V.T., (1959), “Open Channel Hydraulics”, McGraw-Hill Book, Singapore.

[58] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, (2003), “Bottomless culvert scour study”, Hydraulic Engineering Circular, Publication No. FHWA-RD, pp. 02-078.

Abstract

Among significant issues in river engineering are scouring, sedimentation, and alterations in riverbed topography in the location of the river's bend. The setup and behavior of flow in river bends are more complicated in comparison with a straight course. Due to the centrifugal force and its interaction with lateral pressure gradients caused by lateral slope of water surface in the bend, a secondary flow forms. By an interaction between the secondary flow and non-uniform profile of longitudinal velocity a particular flow pattern known as spiral flow forms that causes great changes in the bend's flow pattern in comparison with flows in straight channels. This phenomenon has a significant effect on riverbed topography, its alterations, and scouring and sedimentation in inner and outer banks. An understanding of the topography of the bed in bends is necessary for determination of scouring and sedimentation areas in order to decide the most appropriate location to construct hydraulic structures such as groynes and basins, and also to manage organizing the rivers.

In regard of studying flow and sediment transport patterns in river bends, numerous field and laboratory studies have been carried out, but only a few numerical studies are available. Currently, various numerical models have been developed for simulation of hydrodynamics and sediment transport in open channels. In this thesis CCHE2D – a depth-averaged two dimensional model – was utilized. Furthermore, the main purpose of this thesis is modeling sediment transport in bends using the CCHE2D numerical model. In order to achieve this goal, results from two available laboratory-based references that have examined the pattern of flow and sediment transport in sine-generated meandering channels were used for verification of the CCHE2D model. Also, utilizing the CCHE2D software, effects of geometrical parameters (including bend radius, bend angle, and longitudinal slope of the channel bed) and hydraulic conditions (including flow discharge, depth, flow velocity, and Froude number) on flow pattern and topography of the bed were investigated.

Results from the numerical model show that:

- By reducing the bend radius alterations in bed's topography, the amount of sedimentation, and scour increase.

- By increasing the bend angle, the amount of sedimentation and scour increase.
- Also by increasing the longitudinal slope of channel's bed, the amount and depth of scouring in the outer bank increase and the distance between two scouring holes increases too. In contrast, sedimentation in the inner bank decreases and also sedimentation pile shifts to the bend's exit.

In order to study the effect of the bend's inflow conditions on the bed's topography, simulations were carried out for different values of U/U_c ratio (U is the inflow velocity, and U_c is the critical velocity for transportation of the sediments) in the straight course leading to the bend's entrance. Results show that for $U/U_c < 1$, only one scouring hole forms near the bend's exit. When $1 < U/U_c < 1.1$, two scouring holes form near each other or in a merged state at the outer wall. And when $1.24 < U/U_c < 1.33$, two scouring holes form at the outer wall of the bend.

Keywords: Scouring, Topography of the bed, Sedimentation, Bend, CCHE2D software



University Of Shahrood

Department Of Civil Engineering

**Modeling of sediment transport in bends using
CCHE2D software**

Leila Bitaraf

Supervisor:

Dr. Ramin Amini

September 2015