

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران
رشته مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی عددی و آزمایشگاهی سرریزهای لبه تیز مرکب جانبی مثلثی-مثلثی

نگارنده: حسین خورشیدی میانایی

استاد راهنما
دکتر احمد احمدی

استاد مشاور
دکتر مجتبی عامری

تیر ۱۳۹۵

تقدیر نامه

تقدیم به مادر فداکار و بهتر از جانم
که بی عشق او پیمودن مسیر ممکن نبود
و پدر دلسوز و مهربانم
که همواره مشوق من در این راه بوده است.

تشکر و قدر دانی

خداوند بزرگ و بلند مرتبه را شاکرم که لطف و عنایتش را شامل حالم کرده و مرا در این مسیر یاری نمود.

در اینجا جا دارد از زحمات فراوان و ارزنده استاد فرهیخته و فرزانه، جناب آقای دکتر احمد احمدی که با دانش بسیار، مهربانی فراوان و شخصیت انسانی والای خود مرا در انجام این تحقیق راهنمایی نموده اند کمال تشکر را داشته باشم.

از زحمات بی دریغ جناب دکتر مجتبی عامری که با حسن خلق و فروتنی و با راهنمایی های کارساز و سازنده، زحمت مشاوره بنده در این پایان نامه را متقبل شده اند تقدیر و تشکر ویژه می نمایم.

قسمتی از محاسبات نرم افزاری این تحقیق به کمک ابر رایانه دانشگاه امیر کبیر انجام شده است که جا دارد از مسئولان مرتبط سپاس گزاری و تشکر لازم را داشته باشم.

در انتها از حمایت و کمک های پدر دلسوز و مادر مهربانم، دوستان عزیز و همه کسانی که به نحوی مرا در انجام این تحقیق یاری رسانده اند تشکر و قدر دانی می نمایم.

حسین خورشیدی میانایی

تیر ۱۳۹۵

تعهد نامه

اینجانب حسین خورشیدی میانایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی عددی و آزمایشگاهی سرریزهای لبه تیز مرکب جانبی مثلثی-مثلثی تحت راهنمایی دکتر احمد احمدی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است 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 تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- 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 اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

سرریز های جانبی از جمله سازه های هیدرولیکی پر کاربرد در کانال های انتقال آب، شبکه های آبیاری و جمع آوری فاضلاب می باشند. از دیگر کاربرد های این سازه می توان به عنوان سازه انحراف سیل، در مواقع سیلابی اشاره کرد. سرریز مثلثی ساده می تواند دبی های پایین را با دقت خوبی اندازه گیری کند اما برای عبور دبی های بالا مناسب نیست. لذا از نوع مرکب سرریز مثلثی- مثلثی برای تامین هر دو هدف اندازه گیری خوب دبی و عبور دبی های بالا استفاده می شود. در مورد نوع جانبی سرریز مرکب مثلثی- مثلثی هنوز مطالعه ای انجام نگرفته است. لذا در تحقیق حاضر سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی- مثلثی به صورت آزمایشگاهی و عددی در شرایط جریان زیر بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از داده های آزمایشگاهی و انجام آنالیز ابعادی، پارامتر های موثر بر ضریب دبی این سرریز به روش های دیمارچی و مستقیم شناسایی شده و برای هر روش رابطه ای برای ضریب دبی ارائه گردید. نتایج حاصل از روابط مذکور انطباق نسبتاً مناسبی را با مقادیر اندازه گیری شده نشان می دهد. همچنین تغییرات پروفیل طولی سطح آب در اثر تغییرات عدد فرود بالادست جریان در محل تاج سرریز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات نشان می دهد که با افزایش عدد فرود بالادست جریان، تغییرات ارتفاع جریان بر روی تاج سرریز شدت بیشتری می یابد.

در بخش عددی به کمک نرم افزار FLOW-3D به شبیه سازی جریان بر روی سرریز مورد بحث اقدام گردید. با توجه به محدودیت زمانی و هزینه لازم برای انجام آزمایشات و از طرف دیگر توسعه روز افزون مدل های دینامیک سیالات محاسباتی و توانایی این مدل ها در شبیه سازی شرایط متنوع برای پدیده مورد مطالعه، استفاده از این مدل ها توجیه بیشتری پیدا می کند. هدف از این شبیه سازی بررسی میزان توانایی نرم افزار FLOW-3D در مدل کردن جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی می باشد. وضعیت جریان در این شبیه سازی به صورت آشفته معرفی گردیده است. از بین مدل های آشفتگی موجود در این نرم افزار، مدل $RNG k - \epsilon$ به دلیل مدل پیشنهاد شده توسط سایر محققین، برای حل معادلات آشفتگی جریان مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار با داده های

آزمایشگاهی، حاکی از دقت مناسب نرم افزار FLOW-3D در شبیه سازی جریان بر روی سرریز ها می باشد؛ به نحوی که مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار برای دبی عبوری از روی سرریز اختلاف کمی با مقادیر آزمایشگاهی داشته و همچنین نرم افزار توانسته است شکل پروفیل سطح آب بر روی تاج سرریز را بخوبی مدل کند.

کلید واژه: سرریز جانبی، سرریز مثلثی، آنالیز ابعادی، ضریب دبی، FLOW 3D، مدل عددی

بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مثلثی

حسین خورشیدی میانایی، دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود
احمد احمدی، دانشیار، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود
مجتبی عامری، استادیار، گروه عمران دانشگاه آزاد واحد شاهرود

*تلفن نویسنده اصلی: ۰۹۱۱۳۵۶۴۲۵۴ ، پست الکترونیکی: h.khorshidi@hotmail.com

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه و کلیات

۱-۱	مقدمه.....	۲
۲-۱	تعریف سرریز ها.....	۳
۱-۲-۱	سرریز نرمال.....	۳
۲-۲-۱	سرریز جانبی.....	۳
۳-۱	موارد استفاده سرریز ها.....	۳
۴-۱	تقسیم بندی سرریز ها از نظر وضعیت لبه تاج.....	۵
۱-۴-۱	سرریز لبه تیز.....	۵
۲-۴-۱	سرریز لبه پهن.....	۶
۵-۱	تقسیم بندی سرریز ها از نظر مکان مورد استفاده.....	۸
۱-۵-۱	سرریز سد ها.....	۸
۲-۵-۱	سرریز های مورد استفاده در کانال ها و رودخانه ها.....	۸
۱-۲-۵-۱	سرریز های نرمال.....	۸
۲-۲-۵-۱	سرریز های جانبی.....	۹
۶-۱	سرریز های ساده.....	۱۰
۷-۱	سرریز های مرکب.....	۱۱
۸-۱	ضرورت انجام تحقیق.....	۱۳
۹-۱	هدف انجام تحقیق.....	۱۴
۱۰-۱	ساختار پایان نامه.....	۱۷

فصل دوم : مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲	مقدمه.....	۲۰
۲-۲	مطالعات آزمایشگاهی.....	۲۰
۱-۲-۲	مطالعات مربوط به سرریز جانبی لبه تیز ساده.....	۲۰
۲-۲-۲	مطالعات مربوط به سرریز مرکب.....	۳۰
۳-۲	مطالعات عددی.....	۳۷

فصل سوم : مواد و روش ها و معادلات حاکم

۱-۳	مقدمه.....	۴۲
۲-۳	جریان متغیر مکانی با کاهش دبی.....	۴۲
۳-۳	انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی.....	۴۴
۴-۳	ضریب دبی مستقیم.....	۴۶
۱-۴-۳	ضریب دبی مستقیم سرریز ساده مثلثی.....	۴۶
۱-۴-۳	ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب مثلثی.....	۴۷
۵-۳	ضریب دیمارچی.....	۵۰
۱-۵-۳	ضریب دیمارچی سرریز ساده مثلثی.....	۵۰

۵۲	۳-۵-۲ ضریب دیمارچی سرریز مرکب مثلثی
۵۳	۳-۶ آنالیز ابعادی
۵۶	۳-۷ مطالعات آزمایشگاهی
۶۰	۳-۸ محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آزمایشات
۶۲	۳-۹ نحوه پردازش داده ها
۶۲	۳-۱۰ آمارهای ارزیابی خطا
۶۴	۳-۱۱ معرفی نرم افزار FLOW-3D
۶۵	۳-۱۱-۱ روش VOF
۶۶	۳-۱۱-۲ روش FAVOR
۶۶	۳-۱۲ معادلات حاکم
۶۶	۳-۱۲-۱ سیستم مختصات مورد استفاده در نرم افزار FLOW-3D
۶۷	۳-۱۲-۲ معادله پیوستگی
۶۸	۳-۱۲-۳ معادله مومنتم
۶۹	۳-۱۳ مدل های آشفتگی
۷۰	۳-۱۴ انواع مدل های آشفتگی
۷۰	۳-۱۴-۱ مدل های صفر معادله ای
۷۱	۳-۱۴-۲ مدل های یک معادله ای
۷۱	۳-۱۴-۳ مدل های دو معادله ای
۷۱	۳-۱۴-۴ مدل های دارای معادله تنش
۷۲	۳-۱۴-۵ مدل های شبیه سازی گردابه های بزرگ
۷۲	۳-۱۵ مدل های آشفتگی مورد استفاده در FLOW-3D

فصل چهارم : مدلسازی عددی و تجزیه تحلیل داده های آزمایشگاهی و عددی

۷۶	۴-۱ مقدمه
۷۷	۴-۲ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی
۷۷	۴-۲-۱ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش مستقیم
۸۱	۴-۲-۲ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش دیمارچی
۸۳	۴-۳ بررسی فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی
۸۴	۴-۴ بررسی پیوسته بودن منحنی دبی-اشل برای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی
۸۵	۴-۵ رسم پروفیل طولی سطح آب در تاج سرریز و در محور وسط کانال
۹۰	۴-۶ مدل سازی عددی
۹۰	۴-۶-۱ مشخصات مدل عددی
۹۰	۴-۶-۲ ایجاد هندسه مرز های جامد
۹۰	۴-۶-۳ شبکه بندی
۹۳	۴-۶-۴ شرایط مرزی
۹۳	۴-۶-۵ بررسی مناسب بودن شبکه بندی انجام شده
۹۴	۴-۶-۶ تنظیمات اندازه گیری دبی خروجی
۹۴	۴-۶-۷ شرایط اولیه
۹۵	۴-۶-۸ اعمال شیب طولی کانال

- ۹۶-۶-۴ انتخاب مدل آشفتنگی.....۹۶
- ۹۶-۶-۴ زمان شبیه سازی.....۹۶
- ۹۶-۴-۷ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی.....۹۶
- ۹۶-۴-۷-۱ مقایسه مقادیر دبی آزمایشگاهی و عددی.....۹۶
- ۹۷-۴-۷-۲ بررسی میزان شباهت مدل کردن ناحیه دو طرف سرریز به جای کل طول کانال.....۹۷
- ۹۸-۴-۷-۳ بررسی شکل پروفیل سطح آب محاسبه شده توسط نرم افزار بر روی تاج سرریز.....۹۸

فصل پنجم : خلاصه نتایج و پیشنهادات

- ۱-۵ مقدمه.....۱۰۲
- ۲-۵ خلاصه نتایج.....۱۰۳
- ۳-۵ پیشنهادات.....۱۰۶
- مراجع.....۱۰۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) نمونه هایی از سرریز نرمال موجود در طبیعت..... ۴
- شکل (۲-۱) سرریز جانبی..... ۵
- شکل (۳-۱) مقایسه جریان بر روی سرریز های لبه تیز و لبه پهن..... ۶
- شکل (۴-۱) سرریز لبه تیز مثلثی و مستطیلی..... ۶
- شکل (۵-۱) سرریز لبه پهن مستطیلی و مثلثی..... ۷
- شکل (۶-۱) نمونه هایی از سرریز سد ها..... ۹
- شکل (۷-۱) نمونه هایی از سرریز مرکب..... ۱۲
- شکل (۱-۲) نمای سرریز جانبی [۵]..... ۲۱
- شکل (۲-۲) سرریز جانبی لبه پهن..... ۲۳
- شکل (۳-۲) نمای سرریز جانبی مثلثی [۱۳]..... ۲۷
- شکل (۴-۲) الگوی جریان در سرریز جانبی ذوزنقه ای در جریان زیر بحرانی ۲۹
- شکل (۵-۲) سرریز مرکب مثلثی-مثلثی [۲]..... ۳۰
- شکل (۶-۲) نمونه هایی از ترکیب دبی مقاطع بالا و پایین در تحقیق پیراتیپان و همکاران..... ۳۲
- شکل (۷-۲) سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی [۱۹]..... ۳۳
- شکل (۸-۲) نمایی از سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۰] (a) نمای روبرو (b) پلان..... ۳۵
- شکل (۹-۲) مقایسه ضریب دبی و دبی بر اساس رابطه (۲-۳۱) با مقادیر مشاهداتی در تحقیقات عامری و همکاران..... ۳۶
- شکل (۱۰-۲) نحوه شکل گیری جریان بر روی سرریز های لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۵]..... ۴۰
- شکل (۱-۳) نمایی از یک سرریز جانبی همراه با کانال اصلی..... ۴۴
- شکل (۲-۳) انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی..... ۴۵
- شکل (۳-۳) مقطع سرریز مثلثی..... ۴۶
- شکل (۴-۳) شمایی از یک سرریز مرکب مثلثی-مثلثی..... ۴۷
- شکل (۵-۳) نحوه محاسبه دبی سرریز مرکب مثلثی در روش ارائه شده توسط مارتینز و همکاران..... ۴۸
- شکل (۶-۳) معادل کردن سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز مثلثی ساده..... ۴۹
- شکل (۷-۳) جریان بر روی سرریز جانبی مثلثی..... ۵۱
- شکل (۸-۳) پارامتر های هندسی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی..... ۵۵
- شکل (۹-۳) نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر [۲۰]..... ۵۸
- شکل (۱۰-۳) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن..... ۵۸
- شکل (۱۱-۳) فلومتر آلتراسونیک به همراه اتصال نوع V سنسورها..... ۶۰
- شکل (۱-۴) نمودار دبی و ضریب دبی آزمایشگاهی بر حسب دبی و ضریب دبی محاسباتی..... ۸۰
- شکل (۲-۴) تاثیر پارامتر های Fr_1 و $\frac{y_1}{h}$ بر ضریب دبی آزمایشگاهی به روش مستقیم..... ۸۱
- شکل (۳-۴) مقایسه مقادیر دبی و ضریب دبی در حالت آزمایشگاهی و محاسباتی به روش دیمارچی..... ۸۲

- شکل (۴-۴) تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی..... ۸۳
- شکل (۵-۴) نمودار دبی بر حسب عمق برای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی..... ۸۴
- شکل (۶-۴) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز..... ۸۵
- شکل (۷-۴) بررسی تاثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز جانبی مرکب مثلثی..... ۸۸
- شکل (۸-۴) اهمیت اندازه مش در مدل کردن مناسب اضلاع شیب دار..... ۹۱
- شکل (۹-۴) نمایی از شبکه مش بندی استفاده شده در مدل..... ۹۱
- شکل (۱۰-۴) شرایط مرزی مدل شبیه سازی شده..... ۹۳
- شکل (۱۱-۴) نتیجه اجرای FAVOR برای مش بندی انجام شده بر روی سرریز..... ۹۴
- شکل (۱۲-۴) تنظیمات مربوط به بخش شرایط اولیه..... ۹۵
- شکل (۱۳-۴) نمودار دبی آزمایشگاهی نسبت به دبی عددی..... ۹۷
- شکل (۱۴-۴) بررسی تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان در شبیه سازی کل کانال و ناحیه دو طرف سرریز..... ۹۸
- شکل (۱۵-۴) بررسی نتایج ارائه شده توسط نرم افزار برای پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز..... ۹۹
- شکل (۱۶-۴) پروفیل های آزمایشگاهی و عددی منحنی سطح آب در تاج سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی..... ۱۰۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) مقایسه شاخص های آماری خطا برای دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی..... ۳۹
- جدول ۲-۲ نتایج مدل سازی قربانی و ابراهیمی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی..... ۳۹
- جدول (۱-۳) محدوده پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات..... ۶۱
- جدول (۲-۳) مشخصات هندسی سرریز های مورد استفاده در آزمایش..... ۶۱
- جدول (۳-۳) مشخصات رایانه مورد استفاده در مدل سازی..... ۶۴
- جدول (۱-۴) مقادیر پارامتر های ارزیابی خطا برای نشان دادن تاثیر $\frac{V_1}{W}$ بر ضریب دبی به روش مستقیم..... ۷۹
- جدول (۲-۴) مقادیر آمار های ارزیابی خطا دبی عبوری از سرریز به روش دیمارچی..... ۸۳
- جدول (۳-۴) مقایسه مقادیر دبی محاسبه شده توسط نرم افزار به دبی آزمایشگاهی..... ۹۷

فهرست علائم (بخش آزمایشگاهی)

w_1	ارتفاع تاج مثلث پایینی	A	سطح مقطع عرضی کانال
w_2	ارتفاع تاج مثلث بالایی	B	عرض کانال
\bar{w}	ارتفاع تاج معادل	C_d	ضریب دبی مستقیم
x	فاصله از بالادست سرریز	C_m	ضریب دبی دیمارچی
y	ارتفاع جریان	E	انرژی مخصوص
\bar{y}	متوسط عمق دوطرف سرریز	Fr_1	عدد فرود جریان در بالادست سرریز
α	ضریب تصحیح انرژی جنبشی	g	شتاب ثقل زمین
ρ	چگالی سیال	h	ارتفاع آب روی تاج سرریز
σ	کشش سطحی	L	طول سطح آزاد سرریز
θ	زاویه رأس مثلث	N	تعداد داده ها
θ_1	زاویه رأس مثلث پایینی	n	ضریب مانینگ
θ_2	زاویه رأس مثلث بالایی	Q	دبی در کانال اصلی
در بقیه موارد موجود در متن، اندیس های		Q_1	دبی کانال اصلی در ابتدای سرریز
۱ و ۲ به ترتیب به ابتدا و انتهای سرریز		Q_2	دبی کانال اصلی در انتهای سرریز
			اشاره دارند.
		Q_w	دبی عبوری از سرریز
		S_0	شیب طولی کانال
		S_f	شیب خط انرژی
		T	زمان
		V	سرعت متوسط جریان در کانال
		w	ارتفاع تاج سرریز

فهرست علائم (بخش عددی)

ρ	چگالی سیال	A	توابع سطح FAVOR
μ	لزجت سیال	b	افت جریان در محیط دارای خلل و فرج
μ_t	لزجت گردابی دینامیکی	$Diff_T$	عبارت پخش انرژی جنبشی آشفتگی
ε	نرخ اتلاف انرژی آشفتگی	$Diff_\varepsilon$	عبارت پخش اتلاف آشفتگی
σ_t	عدد پراوتل	f	شتاب ناشی از لزجت
τ_{ij}	تنش آشفتگی	G	شتاب ثقل
	اندیس های x، y و z به ترتیب به راستای	k	انرژی جنبشی آشفتگی
	مختصات x و y و z اشاره دارند.	L	مقیاس طول
		P_T	تولید انرژی آشفتگی
		R_{DIF}	عبارت پخش آشفتگی
		r_m	شعاع از مرجع ثابت
		R_{SOR}	منبع جرمی
		t	زمان
		u	سرعت در راستای x
		v	سرعت در راستای y
		V_F	کسر حجمی
		v_k	ضریب پخش
		v_t	لزجت گردابی سینماتیکی
		w	سرعت در راستای z

فصل اول
مقدمه و کلیات

در کانال های انتقال و توزیع آب و در شبکه های آبیاری، از سازه های گوناگونی برای کنترل سطح آب و انحراف جریان استفاده می شود. از جمله سازه های پرکاربرد برای این منظور سرریز های جانبی^۱ می باشند. این سرریز ها همچنین برای تخلیه جریان های مازاد ناشی از سیل و بهره برداری نامناسب آبگیر های بالادست کانال ها استفاده می شوند. از متداول ترین نوع سرریز های جانبی می توان به نوع مستطیلی و مثلثی آن اشاره کرد. سرریز های مثلثی^۲ برای اندازه گیری دقیق دبی های پایین مناسب هستند. اما برای عبور دبی های بالا لازم است که طول سرریز افزایش یابد که این امر هم مستلزم هزینه اضافی بوده و هم اینکه فضای زیادی را اشغال خواهد کرد. برای تامین هر دو هدف اندازه گیری دقیق دبی های پایین و نیز عبور دبی های بالا می توان از نوع مرکب سرریز مثلثی استفاده کرد. که شامل یک مثلث در پایین و یک مثلث با دهانه باز تر در مقطع بالایی می باشد. در تحقیقات انجام شده در مورد سرریز نرمال مرکب مثلثی-مثلثی مشخص شد که منحنی دبی-اشل در تمامی عمق های این سرریز پیوسته می باشد در حالیکه در بقیه انواع سرریز مرکب (به عنوان مثال مستطیلی-مستطیلی یا مثلثی-مستطیلی) در محل اتصال دو مقطع بالایی و پایینی این پیوستگی وجود ندارد.

با وجود تحقیقات انجام شده در مورد سرریز مرکب مثلثی-مثلثی^۳، هنوز در مورد نوع جانبی این سرریز مطالعه ای انجام نگرفته است. برای استفاده و بازده بهتر سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی، لازم است تا با مطالعه آزمایشگاهی بر روی این سازه، مشخصات و ویژگی های آن به درستی شناخته شده و پارامتر های موثر بر دبی عبوری از این سرریز شناسایی شود. با توجه به دلایلی که بررسی گردید، در این پژوهش سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. سپس چند مدل عددی توسط نرم افزار FLOW-3D تهیه گردید تا در صورت توانایی این نرم افزار در مدل کردن جریان عبوری بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی و ارائه جواب های مناسب

¹ Side Weirs

² Triangular Weirs

³ Compound triangular-triangular weir

برای دبی عبوری از روی این سرریز، مطالعات گسترده تری به صورت عددی توسط این نرم افزار بر روی سرریز مذکور انجام گیرد. چرا که مطالعات آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی خواهد بود و همچنین امکان ایجاد شرایط متنوع هندسی و هیدرولیکی در محیط آزمایشگاه فراهم نمی باشد. در این فصل به تعریف سرریز و معرفی انواع آن پرداخته می شود و همچنین ویژگی های هر نوع از سرریز ها نیز ذکر خواهد گردید.

۱-۲ تعریف سرریز

۱-۲-۱ سرریز نرمال^۴

هر مانعی که بر سر راه جریان در کانال قرار گیرد و باعث شود آب در پشت آن بالا آمده و سرعت آب در ضمن عبور از روی آن افزوده گردد، سرریز نرمال نامیده می شود.

۱-۲-۲ سرریز جانبی

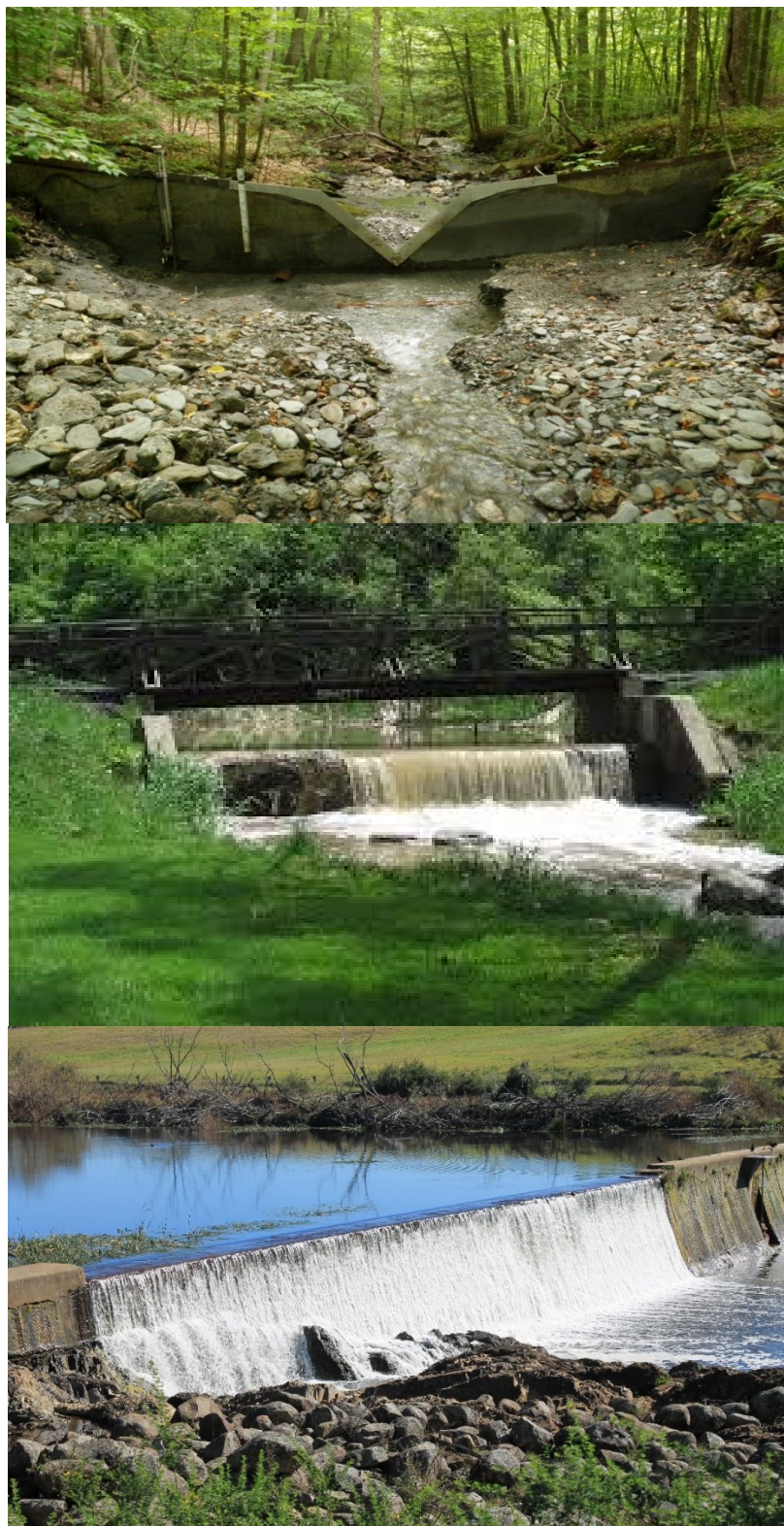
یک سرریز زوگذر آزاد است که در دیواره های جانبی کانال قرار گرفته است و وقتی سطح آزاد سیال در کانال بالاتر از تاج سرریز می شود، قسمتی از سیال از روی سرریز ریزش می کند.

۱-۳ موارد استفاده از سرریز ها

سرریز ها برای موارد زیر استفاده می شوند:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| الف) کنترل و انحراف سیلاب | ب) سیستم های آبیاری و انتقال آب |
| پ) اندازه گیری دبی عبوری از کانال | ت) تنظیم عمق آب در کانال |

⁴ Normal Weirs



شکل (۱-۱) نمونه هایی از سرریز نرمال موجود در طبیعت



شکل (۱-۲) سرریز جانبی

۴-۱ تقسیم بندی سرریز ها از نظر وضعیت لبه تاج

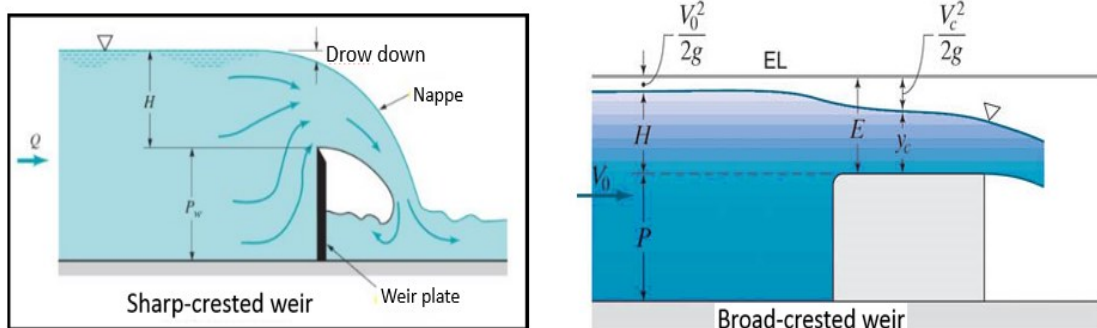
۱-۴-۱ سرریز لبه تیز^۵

سرریز های لبه تیز همان طوری که از نامگذاری آنها پیداست دارای لبه و تاجی تیز با ضخامت ۱ تا ۲ میلی متر می باشند. به طور کلی اگر ضخامت تاج سرریز آنقدر کم باشد که بر رابطه دبی-اشل تاثیر نداشته باشد سرریز را لبه تیز می نامند. این سرریز ها برای اندازه گیری دبی جریان و همچنین برای افزایش ارتفاع آب در بالادست کانال استفاده می شوند. همچنین برای طراحی سرریز های لبه پهن (سرریز سد ها) از روابط حاکم بر سرریز های لبه تیز استفاده می شود. جریان پایاب در این گونه سرریز ها باید به گونه ای باشد که عمق پایاب هیچ گونه تاثیری بر جریان عبوری از روی سرریز نداشته باشد و تیغه جریان به صورت سقوط آزاد از سرریز خارج شود.

⁵ Sharp-Crested Weirs

۱-۴-۲ سرریز لبه پهن^۶

تاج سرریز لبه پهن به طور معمول افقی می باشد. اما اگر به عنوان سرریز سد استفاده شود، دارای انحنای خاصی خواهد بود که انحنای آن طوری است که آب در هنگام عبور از روی سرریز بر روی سطح سرریز مماس باشد. در واقع از معادله منحنی آب روی سرریز لبه تیز، انحنای تاج سرریز لبه پهن طراحی می شود. همچنین سرریز های لبه پهن به علت اقتصادی بودن و سادگی در ساخت، به طور گسترده در سیستم های انتقال آب و اندازه گیری دبی جریان مورد استفاده قرار می گیرند. از دیگر ویژگی های این سرریز ها این است که آب در ضمن عبور از روی سرریز لبه پهن با تاج افقی، عمق بحرانی^۷ را تجربه می کند.



شکل (۳-۱) مقایسه جریان بر روی سرریز های لبه تیز و لبه پهن



شکل (۴-۱) سرریز لبه تیز مثلثی و مستطیلی

⁶ Broad-Crested Weirs

⁷ Critical Depth



شکل (۵-۱) سرریز لبه لبه پهن مستطیلی و مثلثی

۵-۱ تقسیم بندی سرریز ها از نظر مکان مورد استفاده

۱-۵-۱ سرریز سد ها^۸

این سرریز ها در بدنه ی سد و یا در کنار تاج سد برای تخلیه آب اضافی حاصل از بارندگی های شدید استفاده می شوند. به طور خلاصه می توان سرریز سدها را با توجه به دارا بودن یا نبودن دریچه و یا ساختن آن در بدنه ی سد یا خارج از آن تقسیم بندی نمود. از انواع سرریز های سد می توان به سرریز اوجی^۹، سرریز پلکانی^{۱۰}، سرریز نیلوفری^{۱۱}، سرریز سیفونی^{۱۲}، سرریز کلید پیانویی^{۱۳} و ... اشاره کرد.

۲-۵-۱ سرریز های مورد استفاده در کانال ها و رود خانه ها

سرریز ها را می توان از نظر وضعیت قرار گیری در کانال به دو دسته نرمال و جانبی تقسیم بندی کرد که در زیر به معرفی ویژگی های هر کدام پرداخته می شود.

۱-۲-۵-۱ سرریز های نرمال

از متداول ترین نوع سرریز ها هستند که از دیر باز مورد استفاده قرار می گرفتند. این نوع سرریز ها برای کنترل سطح آب بالادست و همچنین اندازه گیری دبی عبوری از کانال رود خانه مورد استفاده قرار می گیرند. در مواردی که نیاز به افزایش ارتفاع آب بالا دست باشد، این سرریز ها در مسیر جریان قرار گرفته و باعث افزایش سطح آب می شوند.

⁸ Spillways
⁹ Ogee Spillway
¹⁰ Stepped Spillway

¹¹ Morning Glory Spillway
¹² Siphon Spillway
¹³ PianoKey Spillway



ب) سرریز پلکاتی



الف) سرریز اوجی



د) سرریز کلید پیانویی



ج) سرریز نیلوفری

شکل (۶-۱) نمونه هایی از سرریز سد ها

۱-۵-۲-۲ سرریز های جانبی

سرریز جانبی در کناره های کانال نصب شده و وقتی ارتفاع آب در کانال از حدی فراتر رود، جریان اضافه را از خود عبور داده و وارد کانال جانبی می کنند و بدین صورت سطح آب کانال را نیز کنترل می کنند. همچنین در کانال های کشاورزی برای تقسیم آب ورودی، می توان از این سرریز ها در طول کانال و با ارتفاع تاج های مختلف استفاده کرد.

در مورد سدها، وقتی که محدود کردن ارتفاع طراحی سرریز با طولانی تر شدن تاج سرریز همراه باشد و تکیه گاه ها دارای شیب تند و به صورت پرتگاه باشد، انتخاب سرریز های جانبی می تواند مفید باشد. علاوه بر این در مورد سد های خاکی^{۱۴} نیز استفاده از سرریز های جانبی کاربرد فراوان دارد .

¹⁴ Embankment Dam

تئوری حاکم بر سرریز های جانبی از نوع جریان متغیر مکانی با کاهش دبی می باشد. در این نوع جریان ها تغییرات انرژی جنبشی در طول سرریز ناچیز فرض می شود. در فصل ۳ درباره معادلات این نوع جریان توضیح داده خواهد شد.

۱-۶ سرریز های ساده

سرریز ها را می توان از نظر شکل هندسی با مقاطع مستطیلی، مثلثی، دوزنقه ای، دایروی و ... ساخت. سرریز های مستطیلی^{۱۵} یکی از متداول ترین و قدیمی ترین نوع سرریز ها می باشند. بیشتر در کانال های کشاورزی و رود خانه ها استفاده شده و برای اندازه گیری دبی و عبور مقادیر زیاد نرخ جریان مناسب هستند.

سرریز های مثلثی به دلیل داشتن مقطع باریک، برای اندازه گیری دبی های کم با دقت بالا مناسب هستند. در این سرریز ها تنها با داشتن زاویه مثلث و ارتفاع آب روی سرریز می توان دبی عبوری از روی آن را اندازه گرفت. این سرریز ها معمولا با زاویه راس ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه ساخته می شوند.

سرریز های دوزنقه ای^{۱۶} بیشتر در کانال های انتقال آب کشاورزی به کار گرفته می شوند. از مزایای این سرریز ها امکان عبور بیشتر دبی می باشد.

¹⁵ Rectangular Weirs

¹⁶ Trapezoidal Weirs

۱-۷ سرریز های مرکب^{۱۷}

همان گونه که گفته شد، سرریز مثلثی برای اندازه گیری دقیق دبی کاربرد مناسبی دارد. سرریز های مستطیلی نیز برای عبور دبی های بالا مناسب هستند. با این رویکرد، سازمان احیای اراضی امریکا^{۱۸} برای اولین بار از ترکیب یک مثلث در پایین و یک مستطیل در بالا، سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را پیشنهاد کرد [۱]. در سرریز های مرکب مقطع پایینی برای عبور دبی های پایین و مقطع بالایی (که از نظر ابعاد بزرگتر است) برای عبور دبی های بیشتر استفاده می شود. به این صورت هر دو هدف اندازه گیری دقیق دبی در مقادیر کم جریان و عبور دبی های زیاد توسط این سرریز ها تامین می شود. اهمیت این سرریز ها زمانی که معبر هیدرولیکی دارای دبی متغیر می باشد بارزتر می شود.

سرریز های مرکب بسته به نوع استفاده به اشکال گوناگون ساخته می شوند که متداول ترین نوع آنها عبارتند از:

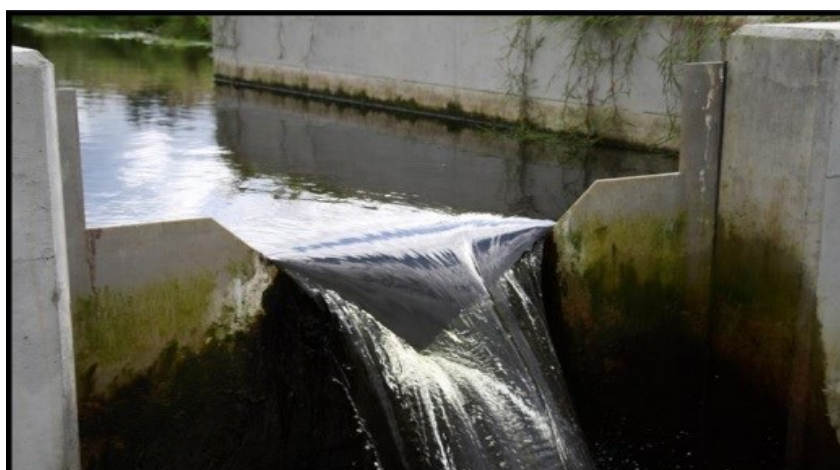
- ۱- مستطیلی-مستطیلی
- ۲- مثلثی-مستطیلی
- ۳- مثلثی-دوزنقه ای
- ۴- مثلثی-مثلثی
- ۵- مستطیلی-دوزنقه ای
- ۶- دوزنقه ای-دوزنقه ای

¹⁷ Compound Weirs

¹⁸ USBR



الف) سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی



ب) سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی



ج) سرریز مرکب مثلثی-مثلثی
شکل (۷-۱) نمونه هایی از سرریز مرکب

۸-۱ ضرورت انجام تحقیق

همان طور که گفته شد سرریز های مثلثی برای اندازه گیری دقیق دبی های پایین مناسب هستند. اما برای عبور دبی های بالا باید از نوع مرکب این نوع سرریز ها استفاده کرد. تا کنون مارتینز و همکاران [۲] ۱۹ و نیز پیراتیپان و همکاران [۳] ۲۰ در مورد نوع نرمال این سرریز مطالعاتی انجام داده اند. در این مطالعات مشخص شد که منحنی دبی-اشل در این سرریز بر خلاف دیگر سرریز های مرکب، دارای پیوستگی در محل اتصال مقاطع بالا و پایین می باشد. لذا این امکان وجود دارد که در تمامی عمق های جریان روی سرریز، دبی عبوری از سرریز بدرستی اندازه گیری شود.

با توجه به مطالب گفته شده، سرریز مرکب مثلثی-مثلثی قابلیت اندازه گیری دقیق دبی در مقادیر کم جریان و عبور دبی های بالا را دارا می باشد. همچنین با مطالعات انجام گرفته مشخص شد در نوع نرمال این سرریز منحنی دبی-اشل در تمامی اعماق روی این سرریز پیوسته است. با توجه به ویژگی های مثبت ذکر شده، هنوز مطالعه ای در مورد نوع جانبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی انجام نگرفته است تا بتوان از مزیت های آن در کانال های انتقال و توزیع آب و دیگر موارد قابل کاربرد استفاده کرد. لذا در این تحقیق لازم دیده شد که با مطالعه آزمایشگاهی بر روی سرریز فوق، به بررسی ویژگی ها و رفتار های هیدرولیکی آن وقتی به صورت جانبی در کانال مورد استفاده قرار می گیرد پرداخته شود. سپس بررسی شود که آیا در نوع جانبی این سرریز نیز پیوستگی در منحنی دبی-اشل دیده می شود یا خیر. برای استفاده بهینه از سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی باید این امکان وجود داشته باشد تا در عمق ها و دبی های مختلف در کانال بتوان میزان جریانی که سرریز از خود عبور می دهد را براحتی محاسبه نمود. به این ترتیب می توان بازده کانال های انتقال و توزیع آب را افزایش داد. با انجام این تحقیق می توان پارامتر های موثر بر ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را شناسایی و سپس رابطه ای برای ضریب دبی ارائه نمود که بر حسب پارامتر های موثر بر آن می باشد. با کمک

¹⁹ J.Martinez et al.

²⁰ Piratheepan et al.

رابطه ارائه شده می توان مقدار ضریب دبی و در نتیجه دبی عبوری از روی سرریز را در شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلف محاسبه نمود.

۹-۱ هدف انجام تحقیق

در این پژوهش سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته و به شناخت رفتار هیدرولیکی این نوع سرریز پرداخته خواهد شد. به طور کلی اهداف تحقیق حاضر را می توان به صورت پاسخ به سوالات زیر عنوان نمود :

(۱) چه پارامتر هایی در تعیین ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی موثر می باشند؟

در تعیین پارامتر های موثر بر ضریب دبی محققین بسیاری به بررسی این پارامتر ها برای سرریز های ساده و در برخی موارد برای سرریز های مرکب پرداختند. اغلب سعی می شود تا پارامتر های معرفی شده به صورت بی بعد ارائه گردد. یکی از روش های تعیین پارامتر های بی بعد استفاده از روش آنالیز ابعادی^{۲۱} به کمک تئوری باکینگهام^{۲۲} می باشد. در این پژوهش پس از شناخت پارامتر های موثر بر ضریب دبی، با استفاده از آنالیز ابعادی پارامتر های بی بعد موثر تعیین شده و سپس به بررسی میزان تاثیر هر کدام از این پارامتر ها بر ضریب دبی سرریز مرکب پرداخته می شود. همچنین سعی شده است تا با تنوع در مشخصات هندسی سرریز و مشخصات هیدرولیکی جریان، پارامتر های بیشتری بر ضریب دبی اثر گذارند و به صورت جامع تری به بررسی پارامتر های موثر پرداخته شود.

(۲) آیا می توان بر حسب پارامتر های موثر مورد بر ضریب دبی، رابطه ای جهت تخمین ضریب دبی به روش مستقیم و دیمارچی^{۲۳} ارائه داد ؟

²¹ Dimensional analysis

²² Buckingham theory

²³ De Marchi

با مشخص شدن پارامتر های بی بعد موثر بر ضریب دبی در هر کدام از روش های تعیین آن، می توان رابطه ای متشکل از پارامتر های موثر پیشنهاد نمود. نکته ی مهم نحوه ی تعیین ضرایب مجهول این روابط می باشد. در تحقیق حاضر پس از ارائه رابطه مورد نظر، ضرایب این رابطه با انجام رگرسیون غیر خطی و روش حداقل مربعات خطا مشخص خواهند شد. سپس نمودار ضریب دبی بدست آمده توسط این روابط نسبت به ضریب دبی آزمایشگاهی رسم و نتایج با هم مقایسه خواهند شد.

۳) با توجه به متغیر بودن مشخصات هندسی در سرریز مرکب مثلثی-مثلثی، چه روشی برای حل این مشکل و در نتیجه ارائه روابط جهت تخمین ضریب دبی وجود دارد؟

در سرریز های مرکب مقاطع بالایی و پایینی دارای ابعاد متفاوتی نسبت به هم هستند، در حالی که در تمامی معادلات موجود که شامل سرریز های ساده می باشد، این پارامتر ها به صورت ثابت قابل استفاده می باشند. لذا لازم است با ارائه راهکاری بتوان اثر این تغییرات را در پارامتر های ثابت لحاظ نمود.

۴) آیا فرضیات دیمارچی در مورد سرریز جانبی ساده در نوع مرکب سرریز جانبی به صورت مقطع مثلثی-مثلثی نیز صادق است یا خیر؟

با توجه به اینکه سرریز های جانبی توانایی اندازه گیری دقیق دبی عبوری و نیز خروج جریان با دبی های بالا را دارند، مطالعات گسترده ای در مورد این نوع سرریز ها انجام نگرفته است. لذا لازم است بررسی شود که معادلات اساسی سرریز های جانبی ساده (معادلات دیمارچی) در مورد نوع مرکب سرریز جانبی نیز برقرار است یا خیر؟

۵) به چه روش هایی می توان دبی عبوری از سرریز مرکب مثلثی-مثلثی را محاسبه کرد؟

تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه تعیین دبی سرریز های جانبی ساده به روش های مستقیم و دیمارچی انجام گرفته است. اما در مورد نحوه به کار گیری این روش ها در سرریز های جانبی مرکب

مطالعات اندکی صورت پذیرفته است. همچنین در مورد سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی هنوز مطالعه ای در باره چگونگی تعیین دبی عبوری از آن انجام نگرفته است. لذا در این پژوهش با بررسی چگونگی به کار گیری روش های مستقیم و دیمارچی برای تعیین دبی عبوری از این سرریز، رابطه ای برای تعیین دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش های پیشنهاد شده ارائه گردد. سپس دقت هر کدام از روش ها با توجه به اختلاف آنها با مقادیر آزمایشگاهی محاسبه خواهد شد.

۶) آیا سرریز لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی که به صورت جانبی در کانال نصب شده است، همانند نوع نرمال این سرریز، دارای پیوستگی در منحنی دبی-اشل می باشد یا خیر؟

در بررسی های انجام شده بر روی سرریز های مرکب مثلثی-مثلثی که در راستای عمود بر جریان و به صورت نرمال در کانال تعبیه شده بودند، مشخص شد که منحنی دبی-اشل در این سرریز ها دارای پیوستگی در تمامی عمق های روی سرریز می باشد. در حالیکه در دیگر انواع سرریز مرکب با مقاطع هندسی مختلف این پیوستگی دیده نمی شود و در محل اتصال دو مقطع یک شکست در منحنی دبی-اشل بوجود خواهد آمد. لذا در تحقیق حاضر بررسی می شود که در نوع جانبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی نیز پیوستگی ذکر شده در منحنی دبی-اشل وجود دارد یا خیر؟

۷) آیا می توان با نرم افزار های شبیه سازی عددی همانند نرم افزار FLOW-3D، جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را مدل کرده و به جواب های مطلوبی دست یافت؟ میزان دقت نتایج این نرم افزار در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی تا چه حد می باشد؟

در بررسی پدیده هایی که اطلاعات اندکی در مورد نحوه رفتار آنها وجود دارد، بررسی آزمایشگاهی یکی از بهترین گزینه ها بحساب خواهد آمد. سرریز های جانبی مرکب نیز از نظر رفتار هیدرولیکی یکی از انواع پدیده هایی هستند که اطلاعات چندانی از آن در دسترس نمی باشد. اما مطالعات آزمایشگاهی مستلزم هزینه و زمان کافی می باشد. از طرفی با توجه به پیشرفت سرعت پردازش رایانه های امروزی

و همچنین نرم افزار های عددی قدرتمندی که در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی^{۲۴} وجود دارند، می توان بررسی کرد که آیا این نرم افزار ها قالبیت شبیه سازی محیط آزمایشگاهی مورد نظر را دارند یا خیر؛ که در صورت مثبت بودن جواب می توان شرایط هیدرولیکی و هندسی مختلفی را با کمک این نرم افزار ها شبیه سازی کرد. در این تحقیق نیز از نرم افزار FLOW-3D که یکی از نرم افزار های جامع در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی بشمار می آید برای شبیه سازی جریان عبوری از سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی استفاده شده است و سپس جواب های بدست آمده از شبیه سازی با مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه مقایسه خواهد شد تا دقت این نرم افزار در مدل کردن پدیده مذکور مشخص شود.

۱-۱۰ ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر در ۵ فصل نوشته تدوین شده است. فصل اول شامل کلیات و تعاریف اولیه بود. مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در زمینه سرریز های جانبی لبه تیز در فصل دوم ارائه گردیده است. در فصل سوم معادلات حاکم بر جریان عبوری از سرریز جانبی بیان شده و سپس روش های محاسبه ضریب دبی برای مقاطع ساده و مرکب سرریز مثلثی ارائه گردیده است. محدوده هیدرولیکی آزمایش های انجام شده و همچنین نحوه انجام آزمایشات به همراه معرفی محیط و دستگاه های آزمایش از دیگر مطالب فصل سوم می باشد. در انتهای فصل سوم در مورد نرم افزار FLOW-3D و معادلات حاکم بر جریان آشفته^{۲۵} توضیحات لازم بیان می گردد. در فصل چهارم به بررسی نتایج و تحلیل آنها خواهیم پرداخت. همچنین مقایسه ای بین نتایج نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی انجام خواهد گرفت. خلاصه نتایج و دستاوردهای این پژوهش به همراه پیشنهادات در فصل پنجم پایان نامه حاضر تدوین شده است. لیست منابع و مراجع مورد استفاده در این تحقیق نیز در بخش مراجع آورده شده اند.

²⁴ computational Fluid Dynamics

²⁵ Turbulent flow

فصل دوم
مروری بر مطالعات گذشته

۱-۲ مقدمه

در زمینه سرریز های جانبی مطالعات فراوانی تا کنون به انجام رسیده است. بیشتر این مطالعات به صورت آزمایشگاهی بوده و به تعیین رابطه ای برای ضریب دبی سرریز جانبی و تعیین پارامتر های موثر بر ضریب دبی پرداخته شده است. اولین بار دیمارچی در سال ۱۹۳۴ با مطالعه بر روی سرریز جانبی مستطیلی و حل معادله حاکم بر جریان روی این سرریز ها، رابطه ای برای تعیین ضریب دبی این سرریز ارائه داد که به ضریب دیمارچی موسوم شد. پس از آن محققین بسیاری به بررسی صحت این رابطه و همچنین گسترش مطالعات مربوط به سرریز های جانبی با مقاطع هندسی مختلف پرداختند.

در این فصل به مرور مطالعات گذشته در زمینه سرریز های جانبی ساده و نیز سرریز های جانبی و نرمال مرکب پرداخته می شود. مطالعات به دو دسته آزمایشگاهی و عددی دسته بندی شده اند که مطالعات آزمایشگاهی سهم بیشتری از این فصل را به خود اختصاص داده اند.

۲-۲ مطالعات آزمایشگاهی

۱-۲-۲ مطالعات مربوط به سرریز جانبی لبه تیز ساده

دیمارچی

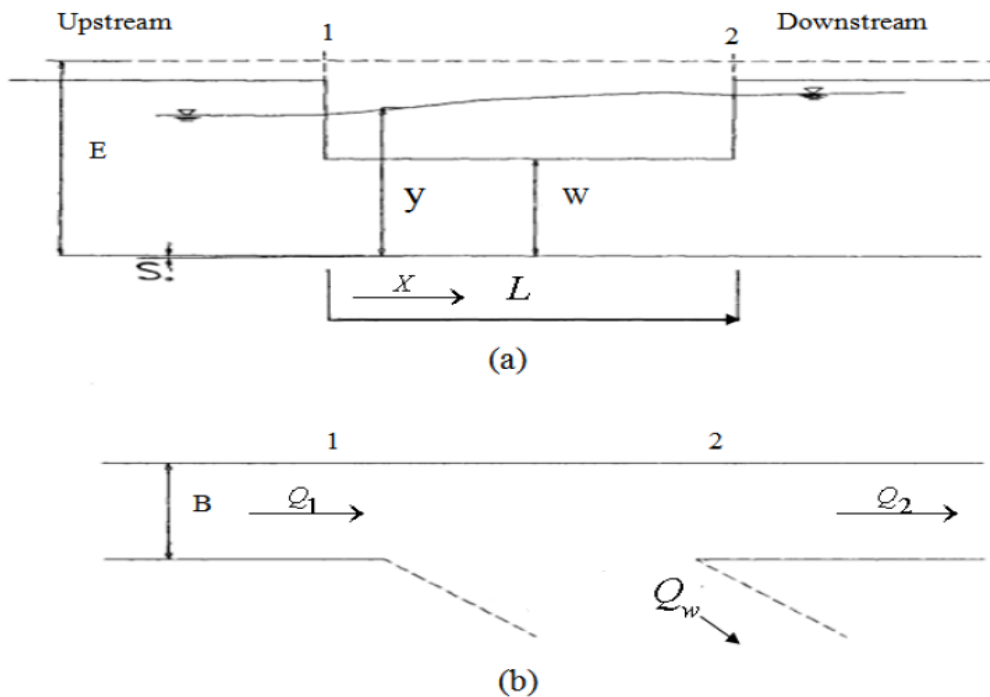
مطالعات مربوط به سرریز های جانبی از اوایل قرن بیستم آغاز شد. دیمارچی [۴] در سال ۱۹۳۴ با صرف نظر از افت انرژی در طول سرریز، رابطه ای برای دبی عبوری از سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی ارائه داد که به رابطه دیمارچی معروف است.

سابرامانیا و آواستی^{۲۶}

بعد از مطالعات دیمارچی، سابرامانیا و آواستی [۵] بر روی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی با ارتفاع تاج صفر یا ناچیز آزمایشاتی انجام دادند. آزمایشات ایشان در یک کانال افقی مستطیلی انجام شد. ایشان رابطه زیر را برای تعیین ضریب دبی (C_m) ارائه دادند :

$$C_m = C_m^* \sqrt{1 - \left(\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right)} \quad (1-2)$$

که C_m^* ضریب ثابت انقباض نام دارد و در آزمایشات ایشان مقدار این ضریب برابر ۰/۶۱۱ تعیین گردید. Fr_1 نیز نمایانگر عدد فرود^{۲۷} جریان در بالادست سرریز می باشد.



شکل ۱-۲ نمای سرریز جانبی [۵]

نتایجی که از تحقیقات سابرامانیا و آواستی حاصل شد به شرح زیر است :

²⁶ Subramanya and Awasthy

²⁷ Froude Number

الف) برای سرریز با ارتفاع صفر و در جریان زیر بحرانی^{۲۸}، ضریب C_m فقط به Fr_1 بستگی دارد و مقادیر پارامترهای بی بعد $\frac{L}{B}$ و $\frac{y_1}{L}$ و $\frac{w}{y_1}$ و تاثیر اندکی بر ضریب C_m دارند.

ب) برای جریان های فوق بحرانی^{۲۹}، ضریب دبی با Fr_1 به صورت خطی و با شیب کمی تغییر می کند.

$$C_m = 0.36 - 0.081Fr_1 \quad (۲-۲)$$

ج) ضریب دبی C_m برای سرریز های با ارتفاع تاج صفر و سرریز های با ارتفاع تاج محدود، تقریباً با هم برابرند.

رانگاراچو و همکاران^{۳۰}

رانگاراچو و همکاران [۶] پس از بررسی صحت معادله دیمارچی، به انجام آزمایشاتی بر روی سرریز جانبی مستطیلی، در دو حالت لبه تیز و لبه پهن پرداختند و سپس روابطی را برای محاسبه ضریب دبی در دو حالت فوق بیان کردند. ایشان با این استدلال که خروج جریان به سمت پایین دست سرریز افزایش می یابد، پارامتر عرض موثر B_e را در نظر گرفتند.

$$C_m = \frac{3 B_1}{2 B_e} \left(F \left(\frac{y}{E} \right)_2 - F \left(\frac{y}{E} \right)_1 \right)$$

$$B_e = B_2 - 0.05 \quad (۳-۲)$$

که در آن B_1 عرض کانال اصلی، B_e عرض سرریز و E انرژی مخصوص^{۳۱} است.

ایشان روابط (۲-۴) و (۲-۵) را به ترتیب برای سرریز جانبی لبه تیز و لبه پهن پیشنهاد دادند:

$$C_m = 0.81 - 0.6Fr_1 \quad (۴-۲)$$

$$C_m = (0.81 - 0.6Fr_1) \left(0.8 + 0.1 \frac{y_1 - w}{L} \right) \quad (۵-۲)$$

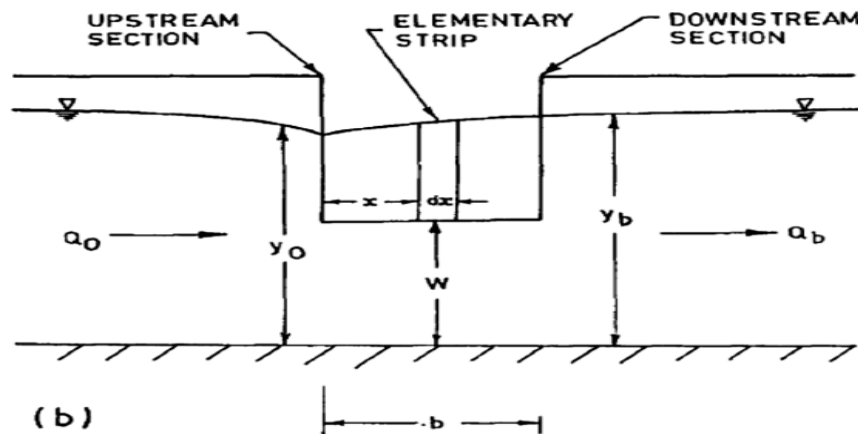
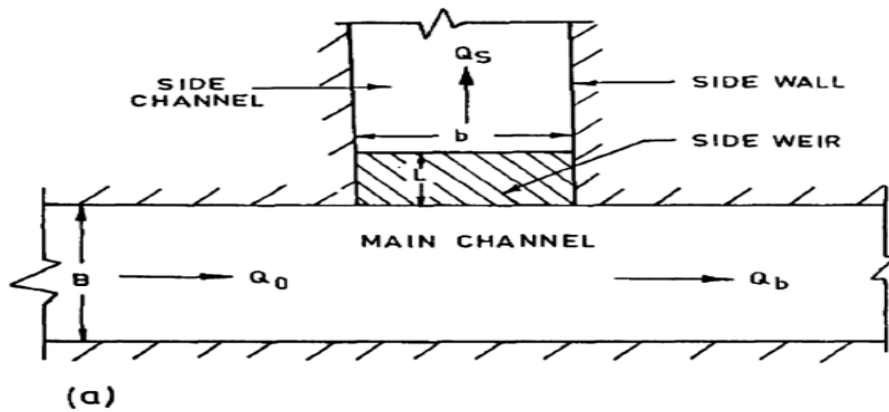
که در آن y_1 عمق جریان در بالادست سرریز، L و w به ترتیب طول و ارتفاع تاج سرریز می باشند.

²⁸ Subcritical Flow

²⁹ Supercritical Flow

³⁰ Ranga Raju et al.

³¹ Specific Energy



شکل (۲-۲) سرریز جانبی لبه پهن

کومار و پاتاک^{۳۲}

کومار و پاتاک [۷] به مطالعه سرریز جانبی لبه تیز مثلثی پرداختند و با انجام آزمایشاتی در شرایط جریان زیر بحرانی و برای سه زاویه راس مثلث ۶۰ و ۹۰ و ۱۲۰ رابطه ای برای ضریب دبی ارائه کردند. ایشان همچنین پارامتر $\frac{W}{y_1}$ را به دلیل تاثیر کم آن بر ضریب دبی، در رابطه های پیشنهادی لحاظ نکردند. روابط ضریب دبی برای ۳ زاویه ذکر شده به قرار زیر می باشد:

$$C_m = 0.642 - 0.042Fr_1 \quad \theta = 30^\circ \quad \text{الف (۶-۲)}$$

$$C_m = 0.668 - 0.381Fr_1 \quad \theta = 90^\circ \quad \text{ب (۶-۲)}$$

$$C_m = 0.619 - 0.203Fr_1 \quad \theta = 120^\circ \quad \text{ج (۶-۲)}$$

سینگ و همکاران^{۳۳}

سینگ و همکاران [۸] ابراز داشتند که ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی علاوه بر عدد فرود بالادست جریان (Fr_1)، به نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز ($\frac{w}{y_1}$) نیز بستگی دارد و رابطه ای خطی را بر حسب Fr_1 و $\left(\frac{w}{y_1}\right)$ برای محاسبه ضریب دبی ارائه دادند.

$$C_m = 0.33 - 0.18Fr_1 + 0.49\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad (7-2)$$

نتایج تحقیقات ایشان به شرح زیر می باشد :

الف) با محاسبه پروفیل سطح آب مشخص شد که عمق جریان در طول سرریز به سمت پایین دست افزایش می یابد و همچنین فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز، قابل قبول است.

ب) مقادیر C_d با عدد فرود جریان در بالادست سرریز (Fr_1) رابطه عکس داشته و با افزایش Fr_1 ، C_d کاهش می یابد.

$$C_d = 0.99 - 1.26Fr_1 \quad (8-2)$$

ج) با افزایش $\left(\frac{w}{y_1}\right)$ ، مقادیر C_d به طور خطی افزایش می یابند.

$$C_d = 0.24 + 0.24\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad (9-2)$$

جلیلی قاضی زاده و همکاران

جلیلی قاضی زاده و همکاران [۹] پارامترهای $\frac{L}{B}$ و $\frac{w}{y_1}$ و S_0 را در ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی وارد کرده و رابطه جدیدی را به صورت زیر ارائه دادند :

$$C_d = a + b(Fr_1) + c\left(\frac{w}{y_1}\right) + d\left(\frac{L}{B}\right) + e(S_0) \quad (10-2)$$

که در آن y_1 عمق آب در بالا دست سرریز، w ارتفاع تاج سرریز از کف کانال، L طول سرریز، B عرض کانال، S_0 شیب طولی کانال و Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست سرریز است.

³³ Singh et al.

با توجه به تحقیقات ایشان، پارامترهای S_0 و $\frac{L}{B}$ تاثیر چندانی بر مقادیر C_d نداشته اند و در نتیجه از رابطه C_d قابل حذف اند. در نتیجه رابطه زیر با توجه به داده های آزمایشگاهی بدست آمده است :

$$C_d = 0.71 - 0.41Fr_1 - 0.22\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad (11-2)$$

برقی و صالحی

برقی و صالحی [۱۰] با بررسی پروفیل طولی و پروفیل عرضی سطح آب در سرریز و همچنین با در نظر گرفتن عمق روی سرریز به عنوان عمق بحرانی، دبی سرریز جانبی را محاسبه و رابطه ای برای ضریب دبی ارائه دادند. ایشان همچنین رابطه ی بین عدد فرود جریان و ضریب دبی را به صورت یک چند جمله ای درجه ۲ بدست آوردند.

$$C_m = 0.5297Fr_1^2 + 0.1321Fr_1 + 0.6695 \quad (12-2)$$

رابطه کلی بدست آمده برای در این تحقیق به شرح زیر است:

$$C_d = 0.82 - 0.38Fr_1 - 0.22\left(\frac{w}{y_1}\right) + 0.08\left(\frac{L}{B}\right) \quad (13-2)$$

قدسیان ۲۰۰۴

قدسیان [۱۱] سرریز جانبی لبه تیز مثلثی را در شرایط جریان زیر بحرانی مورد بررسی قرار داد. وی با تغییر پارامترهای هیدرولیکی جریان و همچنین پارامترهای هندسی سرریز، ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی را به روش دیمارچی و برای ۴ زاویه راس مثلث (۳۰ و ۶۰ و ۹۰ و ۱۲۰) محاسبه کرده و رابطه ای را برای هر یک ارائه داد. پارامترهای موثر در روابط قدسیان عدد فرود بالا دست جریان و نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق بالا دست جریان می باشد.

$$C_m = 0.6246 - 0.367Fr_1 + 0.196\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad \theta = 30^\circ \quad \text{الف (14-2)}$$

$$C_m = 0.5404 - 0.2932Fr_1 + 0.1426\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad \theta = 60^\circ \quad \text{ب (14-2)}$$

$$C_m = 0.5607 - 0.2511Fr_1 + 0.1661\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad \theta = 90^\circ \quad \text{ج (14-2)}$$

$$C_m = 0.5523 - 0.1317Fr_1 + 0.0868 \quad \theta = 120^\circ \quad \text{د (14-2)}$$

هنر و کشاورز (۲۰۰۹)

هنر و کشاورز [۱۲] با گرد گوشه کردن دیواره های ورودی، به بررسی ضریب دبی سرریز های جانبی که در یک کانال مستطیلی قرار داشتند، پرداختند و دو رابطه در حالت بدون گردشگی و با گردشگی دیواره های ورودی برای ضریب دبی ارائه دادند.

الف) بدون گردشگی دیواره های ورودی

$$C_m = 0.466 - 0.126 \left(\frac{V_2}{V_1}\right) + 0.017 \left(\frac{Y_2}{W}\right) - 0.019 \left(\frac{Y_2}{W}\right)^2 \quad (16-2)$$

که V_2 سرعت متوسط جریان در ابتدا و انتهای سرریز بر حسب $\left(\frac{m}{s}\right)$ و Y_2 عمق آب در پایین دست سرریز می باشد.

ب) با گردشگی دیواره های ورودی

$$C_{dr} - C_m = 0.044 \left(\frac{L}{2W}\right) - 0.449 \left(\frac{2r}{L}\right) - 0.029 \left(\frac{W}{Y_2}\right) + 0.309 \quad (17-2)$$

که C_{dr} ضریب دبی در حالتی است که دیواره های ورودی سرریز جانبی گرد است. W ضخامت سرریز، r شعاع ناحیه گرد شده، Y_2 عمق آب در انتهای سرریز و مرکز کانال و L محیط ناحیه گرد شده می باشد.

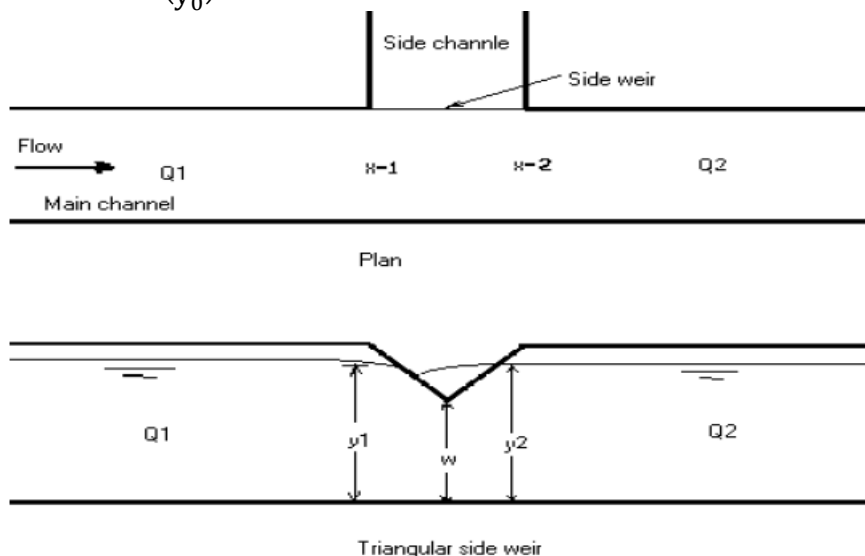
نتایج این بررسی نشان می دهد که دبی عبوری از سرریز های جانبی وقتی دیواره های ورودی دارای گردگوشگی هستند، حدود ۱۰٪ بیشتر از حالتی است که دیواره های کناری آن لبه تیز هستند.

اکبری طائمه و همکاران

اکبری طائمه و همکاران [۱۳] به صورت آزمایشگاهی به بررسی ضریب آبگذری سرریز جانبی مثلثی پرداختند. در بررسی ایشان سرریز های مثلثی با زاویه راس ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه همراه با تغییر در ارتفاع تاج سرریز و نیز تغییر در مشخصات هیدرولیکی جریان مورد آزمایش قرار گرفتند. ایشان ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی را تابع عدد فرود بالادست جریان (Fr_1) ، زاویه راس سرریز (θ) و نیز

نسبت ارتفاع آب روی سرریز به عمق آب در کانال اصلی $\left(\frac{h}{y_0}\right)$ دانستند و در نهایت رابطه زیر را برای ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی پیشنهاد دادند.

$$C_m = 0.458 Fr_1^{-0.176} \left(\frac{h}{y_0}\right)^{-0.164} \theta^{-0.057} \quad (18-2)$$



شکل (۳-۲) نمای سرریز جانبی مثلثی [۳۰]

دلکش و ابرازی

دلکش و ابرازی [۱۴] به بررسی سرریز جانبی مستطیلی در شرایط جریان زیر بحرانی پرداختند. طی بررسی های انجام شده توسط این دو، فرض دیمارچی برای ثابت بودن انرژی جنبشی در طول سرریز جانبی برای همه ی شرایط جریان صادق نمی باشد. ایشان اعلام داشتند وقتی نسبت $\frac{dE}{dy}$ در دو طرف سرریز مقدار بزرگتر از یک را اختیار کند ($\frac{dE}{dy} > 1$)، دیگر فرض $\frac{dE}{dx} = 0$ در طول سرریز جانبی برقرار نمی باشد و باید مقدار $\frac{dE}{dx}$ در معادلات لحاظ شود. در نتیجه معادله نهایی برای محاسبه C_m وقتی که $\frac{dE}{dy}$ در طول سرریز جانبی بزرگتر از یک باشد به صورت زیر ارائه شد:

$$2y((E_2 - y)^{0.5} - (E_1 - y)^{0.5}) = \frac{4l}{3b} C_m (y - w)^{1.5} \quad (19-2)$$

که در آن E_1 و E_2 به ترتیب انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای سرریز جانبی، y عمق جریان روی سرریز، l طول سرریز، b عرض کانال، w ارتفاع تاج سرریز و C_m ضریب دبی سرریز جانبی می باشد.

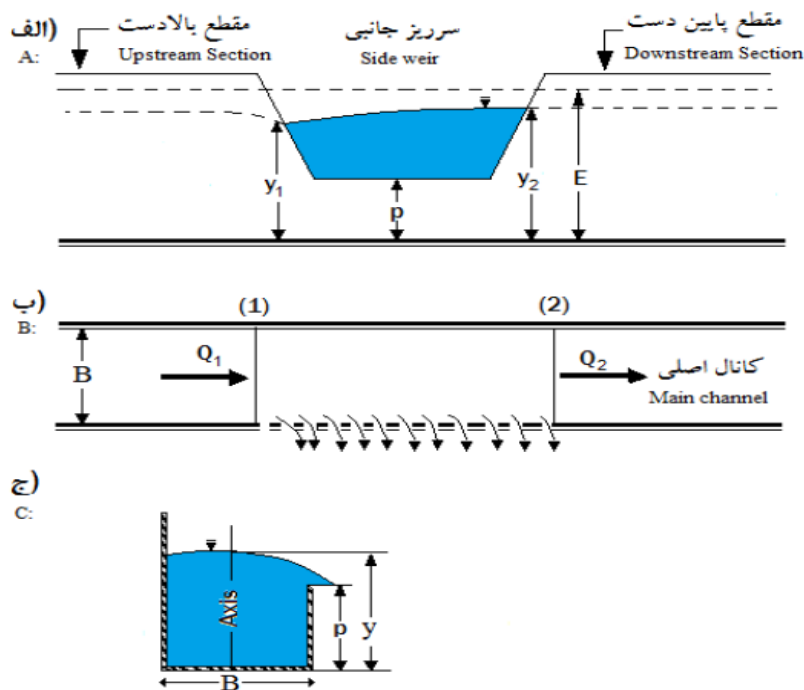
لازم به ذکر است در معادله ی بالا تغییرات عمق جریان در طول سرریز جانبی ناچیز فرض شده است.
ریاحی و وطن خواه

ریاحی و وطن خواه [۱۵] با مطالعه آزمایشگاهی بر روی سرریز جانبی دوزنقه ای به بررسی ویژگی های جریان بر روی این سرریز پرداخته و رابطه ای کلی برای ضریب دبی عبوری از این سرریز ارائه دادند. ایشان سرریز دوزنقه ای را ترکیبی از سرریز های مثلثی و مستطیلی در نظر گرفتند و از روابط دبی عبوری بر روی سرریز های مستطیلی و مثلثی، دبی سرریز دوزنقه ای را محاسبه کردند. همچنین ایشان با استفاده از سه حالت برای عمق آب که عمق ابتدای ورودی به سرریز (y_1)، عمق متوسط ابتدا و انتهای سرریز ($\frac{y_1+y_2}{2}$) و عمق وسط سرریز (y_{center}) می باشد، ضریب دبی متناظر با هر روش را محاسبه کردند.

نتایج حاصل از تحقیق ریاحی و وطن خواه بر روی سرریز جانبی دوزنقه ای به صورت زیر ارائه گردید.
الف) پروفیل سطح آب در اطراف سرریز به میزان قابل توجهی به عدد فرود جریان بستگی دارد. با افزایش عدد فرود شیب منحنی های عرضی افزایش پیدا می کند. در اعداد فرود پائین با توجه به اینکه تغییرات و نوسانات ناچیز است می توان از تغییرات صرف نظر کرد.

ب) در روابط بدست آمده برای ضریب دبی، با افزایش عدد فرود جریان خطای معادلات افزایش می یابد. علت این امر این است که با افزایش عدد فرود بر شدت تغییرات پروفیل سطح آب افزوده می شود.

ج) با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده از عمق متوسط جریان در رابطه ضریب دبی دارای دقت بالاتری نسبت به اعماق دیگر خواهد بود.



شکل (۲-۴) الگوی جریان در سرریز جانبی دوزنقه ای در جریان زیر بحرانی (الف) مقطع طولی، (ب) پلان و (ج) مقطع عرضی

رابطه کلی برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی دوزنقه ای که توسط ایشان پیشنهاد شده است به صورت زیر می باشد:

$$C_d = 0.085 Fr_1^{3.16} - 0.053 \left(\frac{b}{T}\right)^{1.4} - 0.032 \left(\frac{p}{y_1}\right)^{1.04} + 0.18 \left(\frac{z}{1+z}\right)^{1.09} + 0.55 \quad (2-20)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، y_1 عمق آب در ابتدای سرریز، p ارتفاع تاج سرریز، z شیب کناره های سرریز، b عرض سرریز و $T = b + 2zy$ می باشد.

پرندین و همکاران

پرندین و همکاران [۱۶] به بررسی خصوصیات جریان در سرریز های جانبی مستطیلی پرداختند. در

تحقیق انجام شده توسط ایشان به بررسی تغییرات ضریب دبی (C_d) نسبت به عدد فرود بالادست

جریان (Fr_1) و نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق آب بالای تاج سرریز $\left(\frac{b}{h}\right)$ اقدام شد. همچنین بررسی

تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز مورد مطالعه قرار گرفت و در نهایت نیم رخ های سطح آب

نیز در فواصل مختلف نسبت به سرریز بررسی گردید. نتایج حاصل از تغییرات پرندین و همکاران به

صورت زیر می باشد.

الف) با افزایش عدد فرود جریان Fr_1 ، میزان C_d نیز افزایش پیدا می کند.
 ب) هر چه به مقدار $\frac{b}{h}$ افزوده شود، میزان C_d نیز افزایش پیدا خواهد کرد.
 ج) پروفیل سطح آب در ابتدای سرریز دارای عمق کمتر نسبت به انتهای سرریز می باشد.
 د) طبق بررسی های ایشان محور وسط کانال مناسب ترین محور جهت اندازه گیری خصوصیات هیدرولیکی جریان می باشد. چرا که این محور تحت تاثیر ناحیه جداشدگی جریان قرار نمی گیرد.

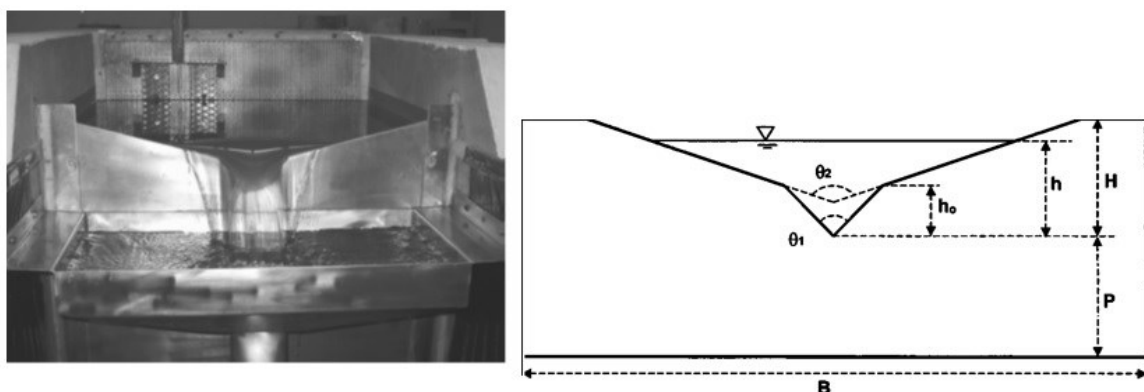
۲-۲-۲ مطالعات مربوط به سرریز مرکب

مطالعات USBR

سازمان احیای اراضی آمریکا با این تحلیل که سرریز مثلثی برای اندازه گیری دقیق دبی های پائین و سرریز مستطیلی برای عبور دبی های بالا مناسب می باشند، برای اولین بار سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را پیشنهاد داد و به بررسی آزمایشگاهی این نوع سرریز پرداخت. در بررسی های انجام شده مشخص شد که مشکل عدم پیوستگی در محل اتصال مقطع مثلث و مستطیل وجود دارد. مارتینز و همکاران (۲۰۰۵) برای رفع این مشکل سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را پیشنهاد دادند.

مطالعات مارتینز و همکاران

مارتینز و همکاران در سال ۲۰۰۵ برای اندازه گیری دبی حوضه آبریز یک سد کوهستانی، سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را پیشنهاد دادند. به این ترتیب در محدوده وسیعی از تغییرات دبی (کم آبی تا سیلابی) امکان اندازه گیری دبی عبوری وجود داشته و منحنی دبی-اشل نیز بدون هیچ ناپیوستگی (وجود ناپیوستگی در منحنی دبی-اشل سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی) قابل ترسیم بود.



شکل (۲-۵) سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲]

ایشان برای اندازه گیری دبی کل عبوری از سرریز مرکب، دبی عبوری از هر مقطع ساده را محاسبه و از جمع آنها دبی عبوری کل را بدست آورند. مارتینز و همکاران ابتدا با انجام آزمایشاتی بر روی سرریز های مثلثی ساده، ضریب دبی این سرریز ها را با زاویه راس مختلف محاسبه کردند و تحقیقات LMNO را درباره ضریب دبی سرریز های مثلثی تایید نمودند. همچنین بیان داشتند که رابطه ارائه شده توسط مهندسین LMNO [۱۷] (که برای زوایای بین ۰ تا ۱۲۰ درجه ارائه شده بود) تا زاویه راس ۱۵۰ درجه نیز دارای اعتبار است. رابطه ارائه شده توسط مارتینز و همکاران برای دبی عبوری از سرریز نرمال مرکب مثلثی-مثلثی به صورت رابطه (۲۱-۲) می باشد :

$$Q = \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) h^{5/2} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} - \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \quad (21-2)$$

که در آن C_{d1} و C_{d2} به ترتیب ضریب دبی برای قسمت های ν شکل با زوایای θ_1 و θ_2 می باشند.

ایشان رابطه (۲۱-۲) را بر حسب یک ضریب دبی کلی به صورت رابطه (۲۲-۲) بیان کردند.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left[\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[h^{5/2} - (h - h_0)^{5/2} \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \right] \quad (22-2)$$

که ضریب دبی کل در رابطه بالا به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$C_d = \frac{C_{d1} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + C_{d2} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \quad (23-2)$$

پیراتیپان و همکاران

پیراتیپان در ادامه کارهای مارتینز به بررسی آزمایشگاهی سرریز های مثلثی پرداخت. وی ۶ متد از

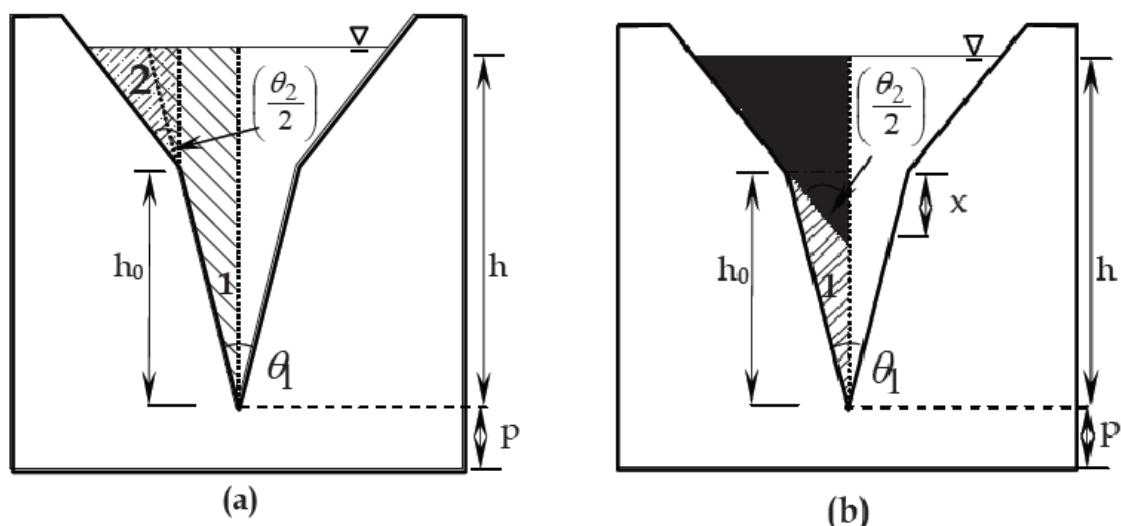
ترکیب دبی مقطع های بالا و پایین را مورد بررسی قرار داد و سپس رابطه ای که بهترین انطباق با

نتایج آزمایشگاهی را داشت به عنوان رابطه بهینه برای محاسبه دبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی

پیشنهاد داد. در نهایت رابطه بهینه به صورت رابطه زیر ارائه شد :

$$Q = \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) h^{5/2} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} - \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \quad (24-2)$$

C_{d2} و C_{d1} به ترتیب ضریب دبی مثلث با زاویه راس θ_2 و θ_1 می باشند. h_0 و h نیز در شکل (۶-۲) مشخص شده اند.



شکل (۶-۲) نمونه هایی از ترکیب دبی مقاطع بالا و پایین در تحقیق پیراتیپان و همکاران

رابطه بالا را می توان به صورت زیر بیان کرد :

$$Q = \frac{8}{15} C_{dc} \sqrt{2gh}^{5/2} \quad (25-2)$$

$$C_{dc} = C_{d1} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + C_{d2} \left[\tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right] \left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2} \quad (26-2)$$

جان و همکاران^{۳۴}

جان و همکاران [۱۸] چهار نوع سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی، مستطیلی-دووزنقه ای، مثلثی-مستطیلی و مثلثی-دووزنقه ای را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند و با رسم منحنی دبی-اشل برای سرریزها دریافتند که ناپیوستگی در منحنی دبی-اشل در محل اتصال مقاطع بالا و پایین وجود دارد. این در حالی است که در سرریز مرکب مثلثی-مثلثی مورد بررسی مارتینز و پیراتیپان این ناپیوستگی وجود ندارد.

³⁴ Jan et al.

ظهیری و همکاران

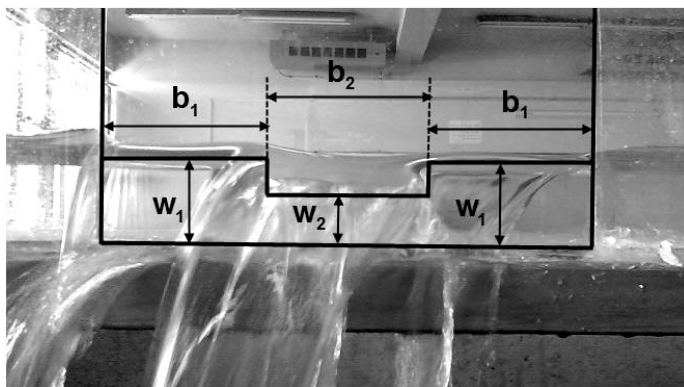
ظهیری و همکاران [۱۹] سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی را مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. ایشان ۱۲ مدل سرریز با ارتفاع تاج و عرض متغیر را مورد بررسی قرار دادند که در کل ۱۱۰ آزمایش انجام شد. ایشان پس از انجام آزمایشات و محاسبه ضریب دبی دیمارچی برای این سرریز ها، رابطه ای را برای ضریب دبی سرریز های لبه تیز مستطیلی-مستطیلی ارائه دادند. با استفاده از آنالیز ابعادی و مشخص نمودن پارامتر های موثر، رابطه زیر برای تخمین ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مستطیلی-مستطیلی پیشنهاد گردید :

$$C = a(Fr_1)^b + c\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^d + e\left(\frac{B}{y_1}\right)^f + g \quad (27-2)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود جریان در بالا دست سرریز، y_1 عمق آب در بالا دست سرریز، B عرض کانال و \bar{w} ارتفاع وزنی تاج^{۳۵} است که ظهیری و همکاران آن را به صورت زیر تعریف کرده اند :

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (28-2)$$

که b_1 و b_2 به ترتیب طول تاج مستطیل های بالا و پایین w_1 و w_2 به ترتیب ارتفاع تاج مقطع مستطیلی بالا و پایین در سرریز مرکب می باشند.



شکل ۲-۷ سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی [۱۹]

با استفاده از داده های حاصل از آزمایش و انجام رگرسیون خطی به روش حداقل مربعات خطا، رابطه ضریب دبی به صورت زیر بدست آمد :

$$C = -0.0551Fr_1 + 0.1063\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.1065} + 0.00168\left(\frac{B}{y_1}\right)^{1.179} + 0.412 \quad (29-2)$$

³⁵ The crest weight height

نتایج حاصل از تحقیقات ظهیری و همکاران به صورت زیر ارائه شده است :

۱- ضریب دبی در سرریز های جانبی لبه تیز مرکب نیز مشابه سرریز های لبه تیز ساده به صورت تابعی از سه پارامتر بی بعد عدد فرود جریان در بالادست سرریز، نسبت ارتفاع وزنی تاج سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز و نسبت عرض کانال به عمق کانال در بالادست سرریز می باشد.

۲- با بررسی رابطه های موجود دیگر محققین برای تخمین ضریب دبی سرریز های جانبی لبه تیز ساده، مشخص شد که هیچ یک از این روابط کارایی مناسب برای سرریز های جانبی مرکب را ندارند به طوری که ضریب تخلیه و دبی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب را کمتر از واقعیت برآورد می کنند. رابطه پینهریو و سیلوا(۱۹۹۷) و سینگ و همکاران(۱۹۹۴) با میانگین خطای نسبی ۹۲/۴ و ۱۶/۵ درصد، بیشترین و کمترین خطا را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارند. در حالی که رابطه پیشنهادی این تحقیق با خطای متوسط ۶/۴ درصد عملکرد و دقت بسیار بهتری دارد.

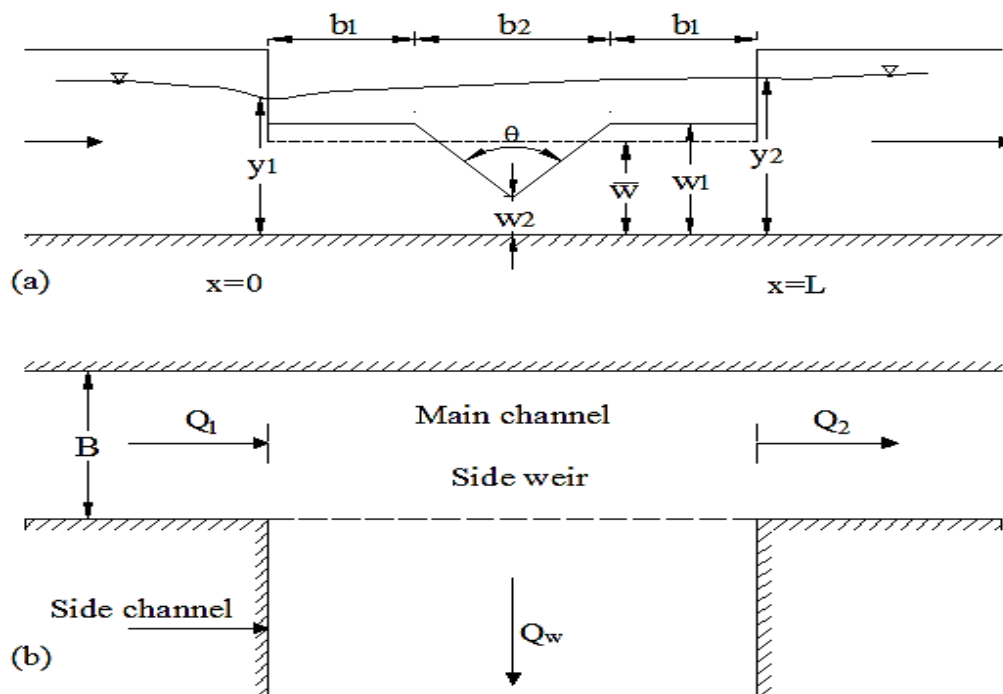
عامری و همکاران

عامری و همکاران [۲۰] یک مطالعه جامع بر روی سرریز های جانبی مرکب با مقاطع مستطیل-مستطیل و نیز مثلث-مستطیل در شرایط جریان زیر بحرانی انجام دادند. ایشان پارامتر های موثر بر ضریب دبی هر یک از سرریز های فوق را برای به سه روش مستقیم، دیمارچی و المانی تعیین کرده و در هر روش رابطه ای را برای ضریب دبی سرریز های مذکور ارائه دادند.

مطالعات ایشان در مورد سرریز های جانبی لبه تیز مثلثی-مستطیلی شامل تغییر در مشخصات هندسی سرریز از جمله ارتفاع تاج مقاطع، زاویه رأس مثلث ها و ... می باشد. در آزمایشات ایشان، از زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه برای مقاطع مثلثی استفاده شده است. با توجه به متغیر بودن ارتفاع تاج در سرریز مورد استفاده، ایشان نیز همانند مطالعات ظهیری و همکاران(۲۰۱۳) از ارتفاع وزنی تاج (\bar{W})

استفاده کرده و سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را به یک سرریز مستطیلی با ارتفاع تاج \bar{w} معادل نمودند. پارامتر ارتفاع وزنی تاج در سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی از رابطه (۳۰-۲) محاسبه می شود.

پارامتر های استفاده شده در رابطه بالا در شکل (۸-۲) مشخص شده اند.



شکل ۸-۲ نمایی از سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۰] (a) نمای روبرو (b) پلان

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_1b_2 + 0.5b_2(w_1 - w_2)}{2b_1 + b_2} \quad (30-2)$$

ایشان با انجام آنالیز ابعادی و رگرسیون غیر خطی، روابط زیر را برای ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی-مستطیلی به روش مستقیم و دیمارچی، ارائه دادند.

$$C_d = 0.154Fr_1^{0.166} + 0.473 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.711} + 0.213 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.201} \quad (31-2)$$

رابطه (۳۱-۲) ضریب دبی مستقیم سرریز لبه تیز جانبی مثلثی-مستطیلی با تجمیع داده های مربوط به زوایای ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه.

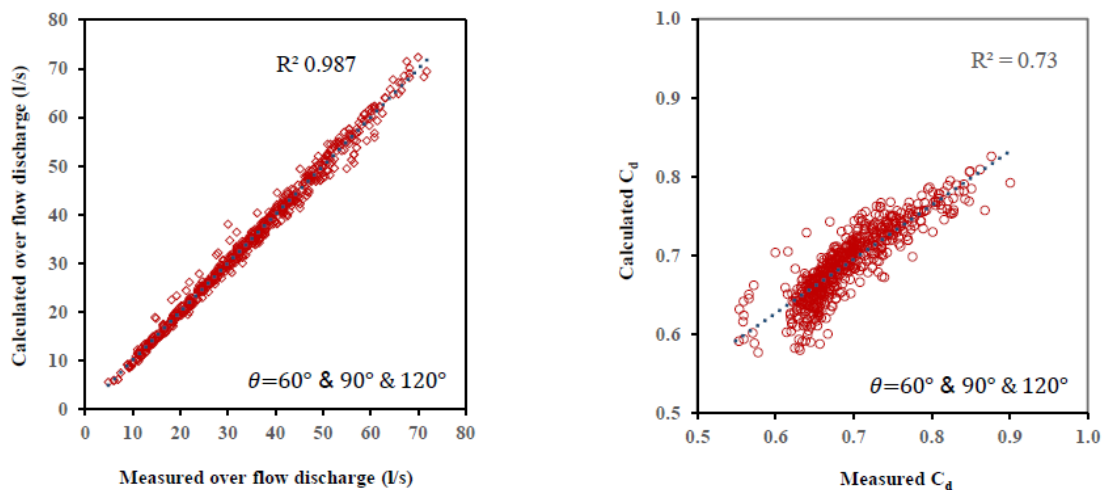
روابط زیر به ترتیب برای محاسبه ضریب دیمارچی در سرریز های لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی با زوایای رأس ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ درجه توسط عامری و همکاران پیشنهاد شده اند.

$$C_m = 0.5123 - 0.390Fr_1 + 0.4264 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{4.323} + 0.1514 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.202} \quad (32-2)$$

$$C_m = 0.5433 - 0.402Fr_1 + 0.3399 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{1.115} + 0.0116 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{0.412} \quad (33-2)$$

$$C_m = 0.5327 - 0.413Fr_1 + 0.16 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.672} + 0.0255 \left(\frac{L}{y_1}\right)^{1.313} \quad (34-2)$$

شکل (۹-۲) مقایسه مقادیر ضرایب دبی و دبی بدست آمده از رابطه (۳۱-۲) با نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد.



شکل (۹-۲) مقایسه ضریب دبی و دبی بر اساس رابطه (۳۱-۲) با مقادیر مشاهداتی در تحقیقات عامری و همکاران در تحقیقات ایشان در مورد سرریز های مرکب مستطیلی-مستطیلی نیز همانند سرریز مثلثی-مستطیلی از ارتفاع وزنی تاج (\bar{w}) برای رفع مشکل ارتفاع تاج متغیر استفاده شد که این پارامتر برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی از رابطه (۲۸-۲) محاسبه خواهد شد. ایشان پس از انجام آنالیز ابعادی و تعیین پارامتر های موثر بر ضریب دبی، رابطه (۳۵-۲) را برای ضریب دبی دیمارچی در سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی پیشنهاد نمودند.

$$C_m = 0.4874 - 0.5829Fr_1^{1.663} + 0.481 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.0491} - 0.2462 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.2194} \quad (35-2)$$

که در رابطه بالا، Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، \bar{w} ارتفاع وزنی تاج، y_1 عمق آب در بالادست سرریز، L طول سرریز و B عرض کانال اصلی می باشد.

۳-۲ مطالعات عددی

ایزدی و همکاران

ایزدی و همکاران [۲۱] با استفاده از داده های عددی بدست آمده از تحقیقات برقی و همکاران [۱۰] و حل معادلات متغیر مکانی به روش عددی رانگه کوتای مرتبه ۴، پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی را بدست آوردند. در این تحقیق خطای نسبی کمتر از ۵٪ محاسبه شده است که نشان از دقت کافی این روش برای تعیین پروفیل سطح آب دارد.

یوماز^{۳۶}

یوماز [۲۲] سرریز های جانبی در کانال مثلثی را مورد مطالعه قرار داد. وی با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در شرایط زیر بحرانی و فوق بحرانی، مدل عددی تفاضل محدود را برای محاسبه دبی خروجی از سرریز جانبی و پروفیل سطح آب روی این سرریز ارائه نمود.

سیاری و همکاران

سیاری و همکاران [۲۳] با مطالعه عددی بر روی سرریز جانبی دوزنقه ای لبه پهن، معادلات جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را برای این سرریز حل کردند. روش عددی مورد استفاده توسط ایشان روش رانجه کوتای مرتبه ۴ بوده است. با استفاده از تحلیل رگرسیون برای جواب های بدست آمده توسط این روش، مشخص شد که در شیب جانبی ۱,۵ درصد میزان $R^2 = 0.978$ و برای شیب جانبی

۲ درصد میزان $R^2 = 0.989$ می باشد که نشان از دقت مناسب این روش دارد. علاوه بر این سیاری و همکاران پروفیل سطح آب را نیز برای برای جریان عبوری از سرریز لبه پهن دوزنقه ای محاسبه کردند.

محمدیان و همکاران

محمدیان و همکاران [۲۴] به شبیه سازی جریان بر روی سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی واقع در یک کانال مستطیلی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D اقدام نمودند. برای واسنجی و صحت سنجی مدل عددی از داده های آزمایشگاهی باقری (۱۳۹۱) استفاده شد. در مجموع ۳ مدل عددی مورد شبیه سازی قرار گرفت که به دلیل صرفه جویی در زمان شبیه سازی، شبکه های مش بندی در این مدل ها نواحی ۲ طرف سرریز جانبی را پوشش داده اند. همچنین به دلیل اهمیت بیشتر پارامتر های هیدرولیکی در نزدیکی سرریز، برای این ناحیه از مش های ریزتری استفاده شده است. در مجموع برای هر مدل از ۲ مش بلوک با مش بندی غیر یکنواخت برای ایجاد شبکه حل استفاده شد. در مطالعه ایشان ۲ مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ و $RNG k - \varepsilon$ برای حل جریان آشفته موجود در کانال استفاده گردید و نتایج حاصل از این دو مدل با هم مقایسه شد. نتایج حاصل از این بررسی بطور خلاصه آورده شده است:

- ۱- با اجرای مدل های مختلف توسط نرم افزار FLOW-3D بر روی سرریز جانبی مرکب مستطیلی، مشخص شد که این مدل توانایی خوبی در مدل کردن الگوی جریان بر روی سرریز مذکور داراست.
- ۲- هر دو مدل آشفتگی $k - \varepsilon$ و $RNG k - \varepsilon$ نتایج قابل قبولی را در شبیه سازی جریان ارائه نمودند. اما مدل آشفتگی $RNG k - \varepsilon$ با توجه به آمارهای ارزیابی خطای اندازه گیری شده، نتایج دقیق تری نسبت به مدل دیگر ارائه داده است.
- ۳- با توجه به آمارهای ارزیابی خطا، نتایج ارائه شده توسط نرم افزار FLOW-3D برای دبی خروجی از روی سرریز مرکب مستطیلی با دارا بودن درصد میانگین مطلق خطا برابر ۷/۰۳۵ و ضریب رگرسیون برابر ۰/۹۷۹ از دقت مناسبی برخوردار می باشد.

جدول (۱-۲) مقایسه شاخص های آماری خطا برای دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی

شاخص های آماری	$ME(m^3 / s)$	$RMSE(m^3 / s)$	$MPAE$
مدل تلاطمی k-ε RNG	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۹۵	۷/۰۳۵
مدل تلاطمی k-ε	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۲۰۴	۷/۳۹۶

قربانی و ابراهیمی

قربانی و ابراهیمی [۲۵] سرریز نرمال مرکب مثلثی-مستطیلی را به کمک نرم افزار Flow-3D مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی از داده های آزمایشگاهی Martinez et al. جهت کالیبراسیون و صحت سنجی مدل عددی استفاده گردید. در پژوهش ایشان سه مدل سرریز نرمال مرکب مثلثی-مستطیلی با تغییر در ارتفاع تاج و طول سرریز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت جدول زیر ارائه گردید.

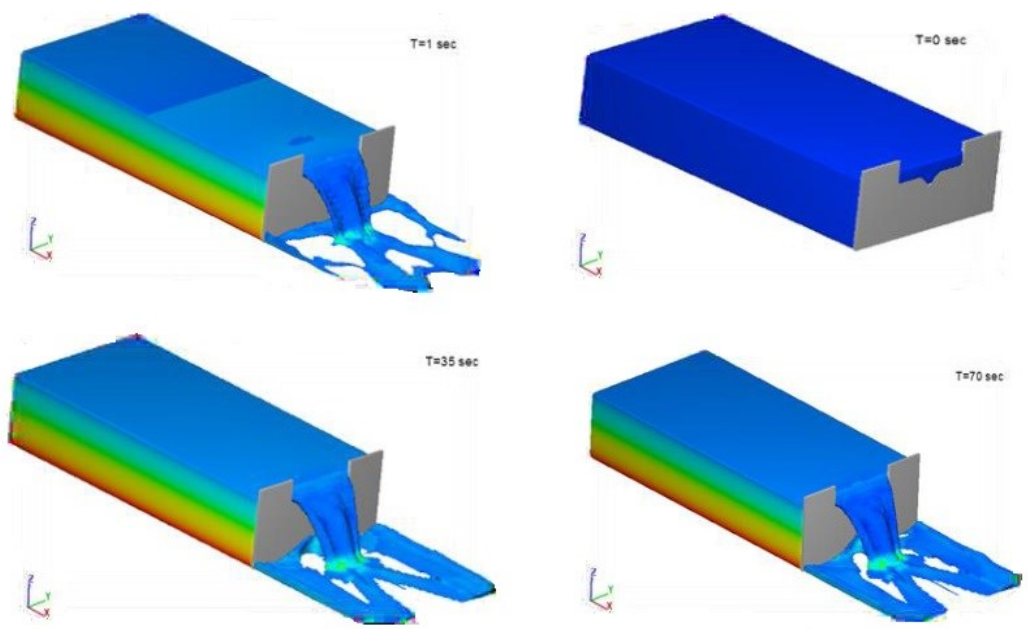
جدول ۲-۲ نتایج مدل سازی قربانی و ابراهیمی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

No. run	H Exp(cm)	Q Exp(lit/s)	Q Flow 3D(lit/s)	Error %
۱	۵۱/۳	۸/۰۶	۸/۹۳	۱۰/۷۹
۲	۵۲/۷	۱۶/۳۳	۱۷/۲۴	۵/۵۷
۳	۵۸/۸	۴۵/۵۵	۴۹/۵۳	۸/۷۴

همچنین ایشان معادله ضریب دبی در سرریز های نرمال لبه نیز مرکب مثلثی-مستطیلی را به صورت زیر محاسبه نمودند.

$$C_d = -0.164 \frac{b_1}{B} - 2.289 \frac{b_2}{B} + 0.0095 \frac{h_2}{h_1} - 0.210 \frac{B}{H} + 1.572 \quad (۳۶-۲)$$

که در آن b_1 و b_2 به ترتیب عرض های سرریز در قسمت مستطیلی و مثلثی، h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع آب در قسمت مستطیلی و مثلثی، B عرض کلی سرریز و H ارتفاع از کف سرریز تا سطح آب می باشد.



شکل (۲-۱۰) نحوه شکل گیری جریان بر روی سرریز های لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۵]

فصل سوم
مواد و روش ها و معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه

در ابتدای این فصل جریان کلی حاکم بر سرریز های جانبی تشریح و معادلات حاکم بر آن ارائه می گردد. سپس به معرفی ضریب دبی متوسط به روش های مستقیم و دیمارچی پرداخته می شود. همچنین به کمک آنالیز ابعادی پارامتر های موثر بر ضریب دبی ها شناسایی و معرفی می گردند. سپس روش های محاسبه ضرایب دبی برای هر دو نوع سرریز ساده و مرکب مثلثی ارائه می گردد. مشخصات تجهیزات و دستگاه های مورد استفاده در آزمایشگاه و نحوه انجام آزمایش ها بخش بعدی این فصل خواهد بود. در نهایت روابط محاسبه آمار های ارزیابی خطا بیان خواهد شد. پس از پایان قسمت آزمایشگاهی، به معرفی نرم افزار FLOW-3D و ویژگی های آن پرداخته می شود. سپس معادلات حاکم بر جریان های آشفته و نیز مدل های عددی حل جریان آشفته معرفی خواهند شد.

۳-۲ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی

در این نوع جریان ها با خروج آب به کانال جانبی یا خروج مقداری از جریان از کف مشبک، از دبی کانال اصلی کاسته شده و سطح آب در آن پائین می آید. اما این کاهش دبی باعث تغییرات قابل ملاحظه و سریع مشخصات جریان نمی شود. به همین منظور افت انرژی در این نوع جریان ها ناچیز بوده و از معادله انرژی برای تعیین معادلات حاکم بر آن استفاده می شود.

از فرضیات زیر برای حصول معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی استفاده می شود :

- ۱- جریان یک بعدی است.
- ۲- توزیع سرعت یکنواخت است.
- ۳- کانال مستطیلی شکل و افقی است.
- ۴- روابط مقاومت در برابر جریان یکنواخت (نظیر رابطه مانینگ) صادق است.
- ۵- جریان در بالا دست و پائین دست سرریز دائمی است.
- ۶- انحراف جریان در انرژی موجود در واحد جرم آب تاثیری ندارد.
- ۷- توزیع فشار به صورت هیدرواستاتیکی است.

انرژی کل در هر مقطع کانال نسبت به یک سطح مبنا برابر است با :

$$H = Z + y + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (1-3)$$

با مشتق گیری از رابطه بالا نسبت به محور طولی کانال (x) داریم :

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \left(\frac{2Q}{A^2} \cdot \frac{dQ}{dx} - \frac{2Q^2}{A^3} \cdot \frac{dA}{dx} \right) \quad (2-3)$$

در این معادله :

$$\frac{dH}{dx} = -S_f \quad , \quad \frac{dZ}{dx} = -S_0 \quad , \quad \frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = S_f \frac{dy}{dx}$$

می باشد. با جایگذاری در رابطه (2-3) خواهیم داشت :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2} \right) \cdot \left(\frac{dQ}{dx} \right)}{1 - \alpha Q^2 \cdot \frac{B}{gA^3}} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2} \right) \cdot \left(\frac{dQ}{dx} \right)}{1 - Fr^2} \quad (3-3)$$

بدین ترتیب معادله جریان های متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت رابطه (3-3) بیان می شود که در

آن عدد Fr عدد فرود جریان در بالادست سرریز، Q دبی کانال اصلی در بالا دست سرریز، α ضریب

تصحیح انرژی جنبشی در معادله انرژی، S_0 شیب طولی کانال، S_f شیب خط انرژی، B عرض کانال، L

طول سرریز، g شتاب گرانش زمین، A سطح مقطع کانال و $\frac{dQ}{dx}$ نرخ تغییر دبی نسبت به محور طولی

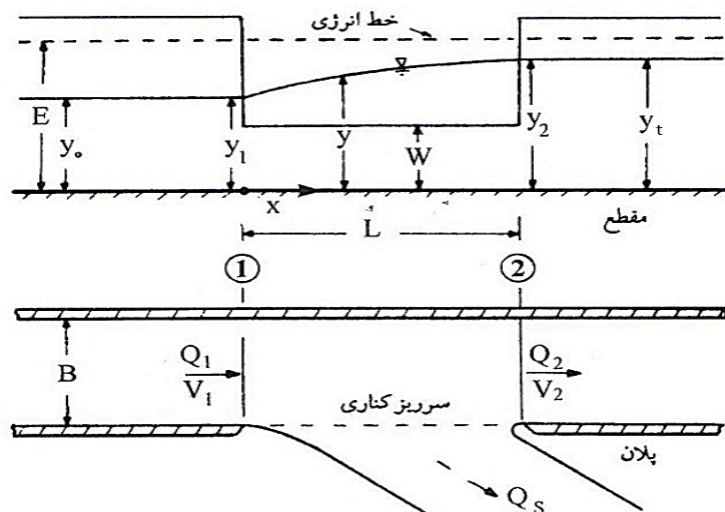
سرریز جانبی می باشد.

مقدار $\frac{dQ}{dx}$ در این نوع جریان به طور واضح مشخص نبوده و بستگی به مشخصات هندسی سرریز و

مشخصات هیدرولیکی جریان دارد که در نتیجه تعیین مقطع بحرانی به عنوان یک نقطه کنترل مشکل

خواهد بود. لذا برای رسم پروفیل سطح جریان باید ابتدا معادله $\frac{dQ}{dx}$ را در هر حالت مشخص کرد و

سپس توسط یکی از روش های عددی، پروفیل سطح جریان را محاسبه کرد.



شکل (۱-۳) نمایی از یک سرریز جانبی همراه با کانال اصلی

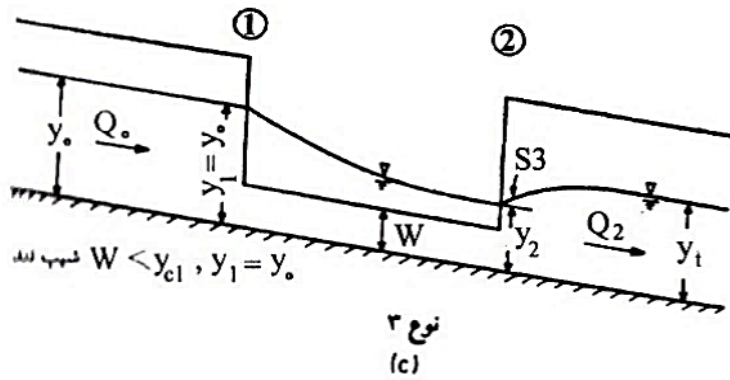
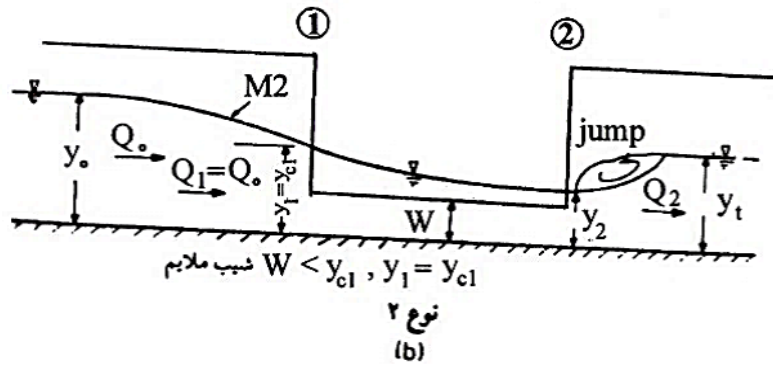
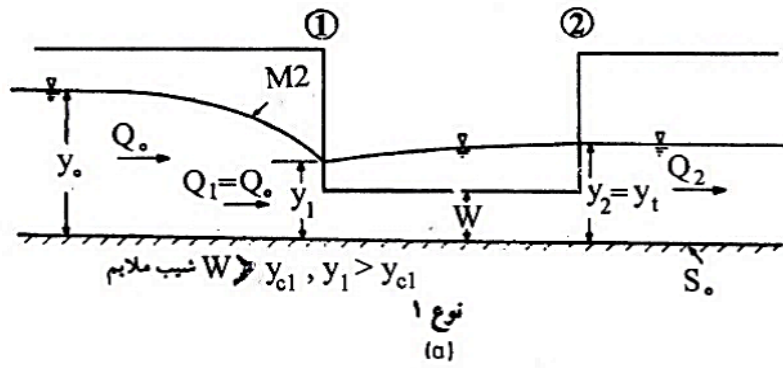
۳-۳ انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی

نوع ۱ در این حالت کانال دارای شیب ملایم و $w > y_{c1}$ می باشد جایی که y_{c1} عبارت است از عمق بحرانی دبی ورودی Q_1 در مقطع ۱ (شکل ۳-۲ a). در انتهای پایین دست، عمق نرمال کانال با دبی Q_2 حاکم بوده و لذا $y_2 = y_t$ که عمق پایاب در نظر گرفته شده است. عمق جریان در مقطع ۱ (y_1) از y_{c1} بیشتر و از عمق نرمال کانال بالادست که دارای شدت جریان $Q_0 = Q_1$ است کمتر می باشد. با استفاده از معادله انرژی مخصوص، واضح است که در چنین شرایطی و با توجه به شیب ملایم کانال، عمق جریان بتدریج در طول کانال افزایش یافته تا از y_1 به y_2 برسد. مقطع کنترل برای این حالت عمق جریان پایین دست $y_2 = y_t$ خواهد بود.

نوع ۲ کانال دارای شیب ملایم ($y_0 > y_{c1}$) ولی با $w < y_{c1}$ می باشد (شکل ۳-۲ b) که اگر سرریز طولانی باشد، امکان ایجاد جریان با عمق کمتر از عمق بحرانی وجود دارد. در انتهای بالادست سرریز عمق y_1 می تواند مساوی y_{c1} در نظر گرفته شده و در پائین دست عمق y_2 از طریق یک پرش به y_t خواهد رسید. اضافه می نماید که بسته به عمق پایاب، پرش می تواند به داخل منطقه سرریز نفوذ کرده و مقطع کنترل برای نیمرخ ۲، مقطع ۱ خواهد بود.

نوع ۳ شیب کانال تند ($y_0 < y_{c1}$) و $w < y_{c1}$ است (شکل ۳-۲ c). در طول سرریز بتدریج عمق جریان از $y_0 = y_1$ در مقطع ۱ کاهش پیدا کرده و در مقطع ۲ به حداقل خود می رسد و از آنجا برای

رسیدن به عمق پایاب (y_t) پروفیل سطح آب ناحیه S^3 را طی می کند. مقطع کنترل در این نوع جریان $y_1 = y_0$ در ابتدای سرریز است.



شکل (۲-۳) انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی

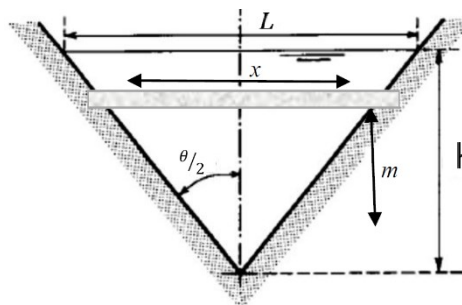
۴-۳ ضریب دبی مستقیم

۱-۴-۳ ضریب دبی مستقیم سرریز ساده مثلثی

سرریز های لبه تیز مثلثی با سطح مقطع ۷ شکل خود برای اندازه گیری دقیق دبی های کم مناسب می باشند. معادله جریان عبوری بر روی این سرریز ها به روش تحلیلی و با انتگرال گیری روی جزء نشان داده شده در شکل (۳-۳) بدست می آید. هندرسون^{۳۷} با فرضیات زیر معادله جریان عبوری از روی این سرریز ها را به صورت رابطه (۴-۳) ارائه داد [۲۷].

فرضیات هندرسون:

۱. جریان هنگام عبور از سرریز منقبض نمی شود.
۲. فشار در اطراف تیغه آب روی سرریز برابر فشار اتمسفر می باشد.
۳. جهت سرعت آب در روی سرریز به صورت افقی می باشد.



شکل (۳-۳) مقطع سرریز مثلثی

$$Q = \frac{8}{15} C_d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2gh}^{2.5} \quad (۴-۳)$$

که در رابطه بالا Q دبی عبوری از سرریز، θ زاویه رأس سرریز، g شتاب گرانش زمین، h ارتفاع آب روی تاج سرریز و C_d ضریب دبی سرریز می باشد. ضریب C_d شامل تاثیرات هندسه، ویسکوزیته و کشش سطحی آب هنگام عبور از سرریز می شود. در بیشتر شرایط کاربردی، تاثیرات ویسکوزیته و کشش سطحی می تواند ناچیز فرض شود و در نتیجه C_d تنها تابعی از پارامتر های هندسی در نظر گرفته می شود. محققین دیگری [۱ و ۲۸]، در مطالعات بعدی با افزودن فاکتور تصحیح k به h ، تاثیرات کشش

³⁷ Henderson

سطحی و ویسکوزیته را در نظر گرفتند. مقادیر تجربی و نمودارهایی که توسط محققین مختلف برای k

و C_d ارائه شده بودند، به صورت رابطه تجربی زیر تنظیم شدند [۱۷]:

$$C_d = 0.6072 - 0.000874\theta + 6.1 * 10^{-2}\theta^2 \quad (۵-۳)$$

$$K = 4.42 - 0.10350\theta + 1.005 * 10^{-3}\theta^2 - 3.24 * 10^{-6}\theta^3 \quad (۶-۳)$$

که تنها بر حسب زاویه رأس مثلث می باشد.

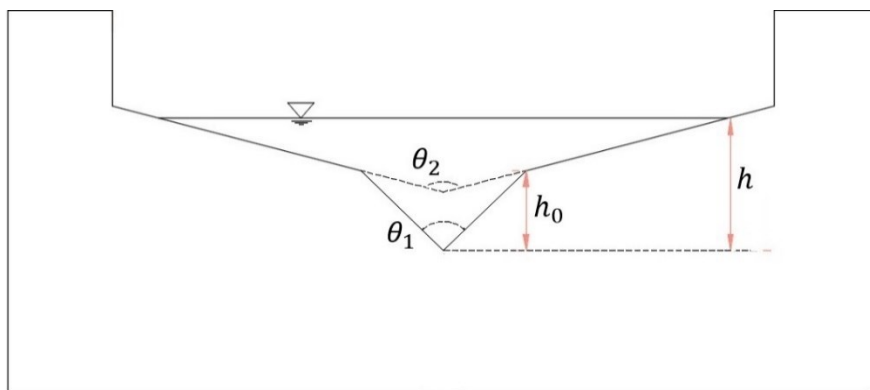
برای بدست آوردن ضریب دبی مستقیم آزمایشگاهی، پس از انجام آزمایشات و بدست آوردن پارامتر های هیدرولیکی آزمایش، با استفاده از رابطه (۷-۳) ضریب دبی آزمایشگاهی سرریز مثلثی ساده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_d = \frac{Q}{\frac{8}{15} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2gh}^{2.5}} \quad (۷-۳)$$

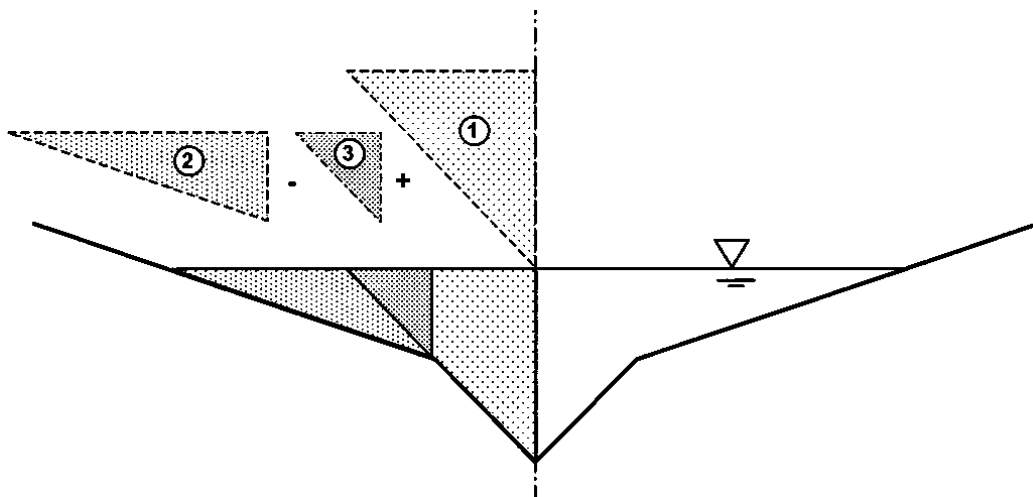
در بخش بعد به محاسبه این ضریب برای سرریز مرکب مثلثی-مثلثی خواهیم پرداخت.

۳-۴-۲ ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب مثلثی

برای بدست آوردن ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب دو روش وجود دارد. در روش اول سرریز مرکب به قسمت های ساده تقسیم شده و سپس دبی عبوری هر قسمت تعیین می شود. با جمع دبی عبوری قسمت های ساده، دبی کل عبوری از سرریز مرکب بدست می آید. این روش توسط مارتینز و همکاران [۲] برای بدست آوردن دبی عبوری از سرریز مرکب مثلثی-مثلثی پیشنهاد شده است.



شکل (۳-۴) شمایی از یک سرریز مرکب مثلثی-مثلثی



شکل (۵-۳) نحوه محاسبه دبی سرریز مرکب مثلثی در روش ارائه شده توسط مارتینز و همکاران

نکته مورد توجه آن است که برای محاسبه دبی عبوری هر قسمت باید از روابط ضریب دبی مربوط به همان قسمت استفاده شود.

طبق شکل (۵-۳) سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به ۳ قسمت تقسیم شده و دبی کل عبوری از جمع دبی قسمت های ساده بدست می آید.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (۸-۳)$$

$$Q = \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) h^{5/2} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} - \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \quad (۹-۳)$$

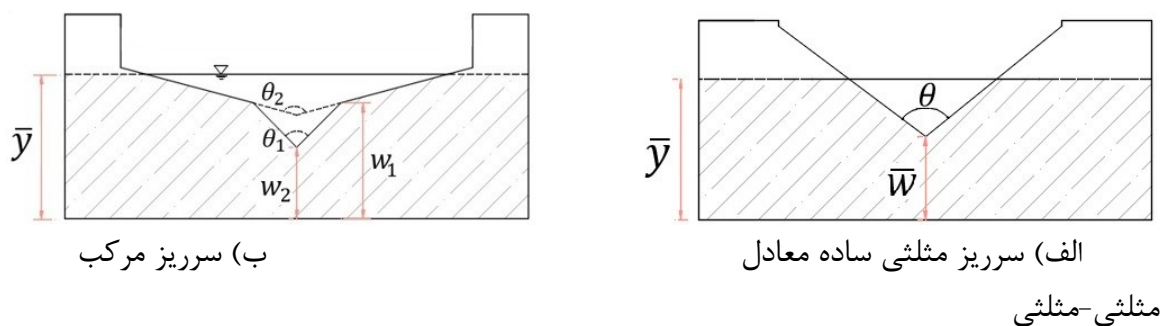
که در آن C_{d1} و C_{d2} به ترتیب ضریب دبی برای قسمت های v شکل با زوایای θ_1 و θ_2 می باشند. رابطه بالا که بر حسب ضریب دبی مثلث های بالایی و پایینی می باشد را می توان بر حسب یک ضریب دبی کلی نوشت :

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left[\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[h^{5/2} - (h - h_0)^{5/2} \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \right] \quad (۱۰-۳)$$

که C_d ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب مثلثی-مثلثی می باشد و از رابطه (۱۱-۳) بدست می آید.

$$C_d = \frac{C_{d1} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + C_{d2} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \quad (11-3)$$

اما در روش دوم سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز ساده مثلثی معادل می‌گردد. که سرریز معادل شده دارای زاویه رأس θ و ارتفاع تاج \bar{w} می‌باشد. ظهیری و همکاران [۱۹] این روش را برای معادل کردن سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به یک سرریز ساده به کار بردند. در شکل (۶-۳) نحوه معادل کردن سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز مثلثی ساده نشان داده شده است.



شکل (۶-۳) معادل کردن سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز مثلثی ساده

برای محاسبه \bar{w} (ارتفاع تاج سرریز معادل) باید مساحت قسمت‌های هاشور خورده الف و ب را در شکل (۶-۳) با هم برابر قرار داد. سپس رابطه بدست آمده را برای محاسبه \bar{w} حل کرد. نتیجه به یک رابطه درجه ۲ بر حسب \bar{w} ختم می‌شود. ریشه‌های این معادله (ارتفاع وزنی تاج) از رابطه (۱۲-۳) بدست می‌آید.

$$\bar{w} = \bar{y} \pm \sqrt{\Delta} \quad (12-3)$$

که \bar{w} ارتفاع تاج سرریز معادل، $\bar{y} = \frac{y_1 + y_2}{2}$ ارتفاع متوسط آب در بالادست و پایین دست سرریز و پارامتر Δ از رابطه (۱۳-۳) محاسبه می‌شود. پارامترهای w_1 و w_2 نیز در شکل (۶-۳) مشخص شده‌اند.

$$\Delta = \bar{y}^2 + w_1^2 - 2w_1\bar{y} + (w_2^2 - w_1^2 - 2w_2\bar{y} + 2w_1\bar{y}) / \tan\frac{\theta}{2} \quad (13-3)$$

در روابط بالا به مقدار زاویه θ برای بدست آوردن \bar{w} نیاز است. مقدار بهینه این زاویه را می توان به روش حداقل مربعات خطا بین دبی عبوری و دبی آزمایشگاهی (که در ادامه توضیح داده خواهد شد) تعیین کرد.

پس از مشخص شدن \bar{w} مقدار دبی عبوری از رابطه (۱۴-۳) بدست می آید.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} (\tan \frac{\theta}{2}) (\bar{y} - \bar{w})^{2.5} \quad (14-3)$$

در نتیجه ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب مثلثی-مثلثی در روش دوم به صورت زیر قابل محاسبه است :

$$C_d = \frac{Q}{\frac{8}{15} \sqrt{2g} (\tan \frac{\theta}{2}) (\bar{y} - \bar{w})^{2.5}} \quad (15-3)$$

۳-۵ ضریب دیمارچی

۳-۵-۱ ضریب دیمارچی سرریز مثلثی ساده

رابطه کلی جریان متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت رابطه (۱۶-۳) می باشد.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) \cdot \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \alpha Fr^2} \quad (16-3)$$

همان طور که گفته شد در جریان متغیر مکانی اتلاف انرژی مخصوص در طول سرریز ناچیز فرض می

شود که این فرض معادل $S_0 = S_f$ می باشد. حال اگر مقدار ضریب تصحیح انرژی جنبشی را برابر ۱

در نظر بگیریم، رابطه (۱۶-۳) به صورت رابطه (۱۷-۳) بدست خواهد آمد :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy \left(-\frac{dQ}{dx}\right)}{gB^2y^3 - Q^2} \quad (17-3)$$

که در آن B عرض کانال، $\frac{dQ}{dx}$ تغییرات دبی در طول سرریز و $\frac{dy}{dx}$ تغییرات عمق جریان در طول سرریز است.

کومار و پاتاک تغییرات دبی در طول سرریز مثلثی را به صورت رابطه زیر پیشنهاد دادند [۷]:

$$q = \left(-\frac{dQ}{dx}\right) = \frac{\frac{8}{15} C_m \sqrt{2g} (\tan \frac{\theta}{2}) (y - w)^{2.5}}{2 (\tan \frac{\theta}{2}) (y - w)} = \frac{4}{15} C_m \sqrt{2g} (y - w)^{1.5} \quad (18-3)$$

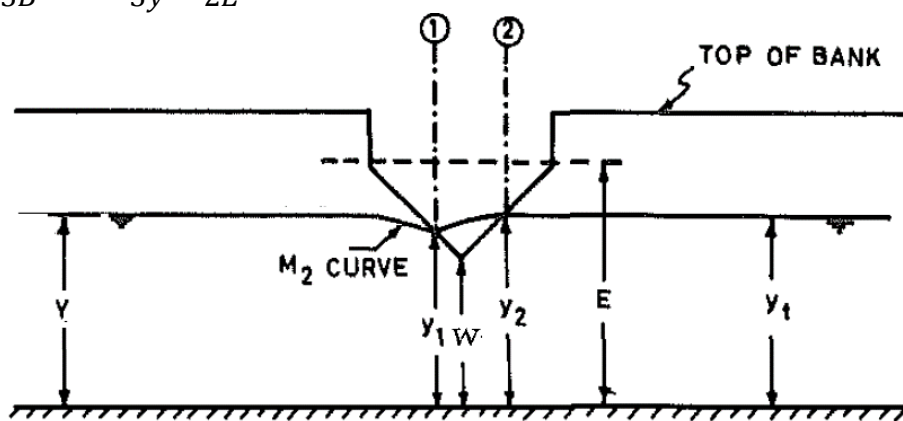
که در آن y عمق جریان، w ارتفاع تاج سرریز، g شتاب ثقل زمین و C_m ضریب دبی سرریز جانبی می باشد که به ضریب دیمارچی معروف است.

دبی در کانال مستطیلی شکل با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص، از رابطه (۱۹-۳) محاسبه می شود:

$$Q = By\sqrt{2g(E - y)} \quad (19-3)$$

با ترکیب روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) در معادله (۷-۳) خواهیم داشت :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{8C_m [(E - y)(y - w)^3]^{0.5}}{15B(3y - 2E)} \quad (20-3)$$



شکل (۷-۳) جریان بر روی سرریز جانبی مثلثی

با فرض مستقل بودن C_m از x و انتگرال گیری از رابطه بالا بین $x = L$ و $x = 0$ (به ترتیب نقاط مقاطع ۱ و ۲ در شکل (۷-۳))، نتیجه می شود :

$$L = x_2 - x_1 = \frac{15B}{4C_m} (\phi_2 - \phi_1) \quad (21-3)$$

که در آن L طول سرریز و ϕ تابع جریان متغیر دیمارچی می باشد که دیمارچی آن را به صورت رابطه (۲۲-۳) معرفی کرده است :

$$\phi = \frac{2E - 3w}{E - w} \left(\frac{E - y}{y - w} \right)^{0.5} - 3 \sin^{-1} \left(\frac{E - y}{E - w} \right) \quad (22-3)$$

در نتیجه ضریب دبی دیمارچی برای سرریز مثلثی ساده برابر خواهد شد با :

$$C_m = \frac{15B}{4L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (23-3)$$

که در آن

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{2E - 3w}{E - w} \left[\left(\frac{E - y_2}{y_2 - w} \right)^{0.5} - \left(\frac{E - y_1}{y_1 - w} \right)^{0.5} \right]$$

$$-3 \left[\sin^{-1} \left(\frac{E - y_2}{E - w} \right)^{0.5} - \sin^{-1} \left(\frac{E - y_1}{E - w} \right)^{0.5} \right] \quad (24-3)$$

در رابطه بالا اندیس های ۱ و ۲ به ترتیب به نقاط ابتدا و انتهای جریان روی سرریز اشاره دارند. حال اگر مقدار C_m مشخص باشد یا رابطه ای برای آن وجود داشته باشد برای بدست آوردن دبی عبوری از سرریز لبه تیز به روش دیمارچی، مطابق زیر عمل می شود :

۱- مشخصات جریان در بالا دست سرریز (Q_1 و y_1) و نیز مشخصات هندسی کانال و سرریز (w و B) اندازه گیری شود.

۲- با استفاده از رابطه (۲۳-۳) مقدار y_2 با روش سعی و خطا محاسبه شود.

۳- مقدار دبی کانال در پایین دست سرریز (Q_2) توسط رابطه (۱۹-۳) به ازای $y = y_2$ حاصل می گردد.

۴- دبی عبوری از سرریز جانبی (Q_w) از اختلاف بین دبی بالادست سرریز و دبی پایین دست سرریز بدست خواهد آمد :

$$Q_w = Q_1 - Q_2 \quad (25-3)$$

۳-۵-۲ ضریب دیمارچی سرریز مثلثی مرکب

در این روش برای حل مشکل ارتفاع تاج متغیر در طول سرریز مرکب، ابتدا سرریز مرکب را به سرریز ساده مثلثی معادل کرده و سپس به روش گفته شده برای سرریز های ساده، به تعیین ضریب دیمارچی پرداخته می شود. در واقع تنها کافیست در روابط ارائه شده برای ضریب دیمارچی سرریز ساده، به جای ارتفاع تاج (w) از ارتفاع تاج معادل (\bar{w}) استفاده شده و ضریب دیمارچی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی محاسبه شود. بقیه پارامتر های مورد استفاده برای تعیین ضریب دبی دیمارچی در سرریز مرکب و سرریز ساده معادل شده، برابر می باشند.

$$C_m = \frac{15B}{4L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (26-3)$$

که در آن:

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{2E - 3\bar{w}}{E - \bar{w}} \left[\left(\frac{E - y_2}{y_2 - \bar{w}} \right)^{0.5} - \left(\frac{E - y_1}{y_1 - \bar{w}} \right)^{0.5} \right] - 3 \left[\sin^{-1} \left(\frac{E - y_2}{E - \bar{w}} \right)^{0.5} - \sin^{-1} \left(\frac{E - y_1}{E - \bar{w}} \right)^{0.5} \right] \quad (27-3)$$

همان طور که در روش بدست آوردن ضریب دبی مستقیم ذکر شد، برای محاسبه \bar{w} علاوه بر پارامتر های w_1 و w_2 و \bar{w} به پارامتر θ (زاویه رأس سرریز معادل) نیز نیاز است. نکته مورد توجه در این روش این است که مقدار زاویه θ را نمی توان همانند روش قبل از رگرسیون غیر خطی با استفاده از حداقل مربعات خطا محاسبه کرد. چرا که در رابطه (27-3)، \bar{w} در مخرج کسر و مخرج تابع \sin^{-1} قرار دارد. از آنجا که در رگرسیون غیر خطی مقادیر θ آنقدر تغییر می کند تا تابع هدف بهینه شود، لذا برخی مقادیر θ ممکن است تابع هدف را به سمت بی نهایت میل دهد و روند ادامه محاسبات با خطا مواجه شود. لذا در این روش باید زاویه رأس سرریز معادل را انتخاب کرد. برای شباهت بیشتر معادل سازی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی با سرریز ساده مثلثی، مقدار θ را می توان برابر زاویه رأس مثلث بالایی در سرریز مرکب قرار داد تا از نظر پروفیل سطح آب روی سرریز شباهت بیشتری به سرریز مرکب اولیه برقرار باشد. علاوه بر این فاصله بین دو ضلع مثلث در سطح آب یا همان طول سطح آب روی سرریز (L)، بین سرریز مرکب اولیه و سرریز ساده معادل برابر خواهد بود. در نتیجه با مشخص شدن زاویه θ ، ارتفاع تاج سرریز معادل (\bar{w}) تعیین می شود و سپس ضریب دیمارچی از رابطه (26-3) محاسبه خواهد شد.

۳-۶ آنالیز ابعادی

آنالیز ابعادی روشی است که بین پارامتر های مختلف یک پدیده طبیعی، ارتباط برقرار می کند و در واقع تاثیر پارامتر های مختلف در آن پدیده را ارزیابی می کند. در مطالعات آزمایشگاهی پارامتر های متعددی دخالت دارند. به عنوان مثال در مطالعه آزمایشگاهی جریان در یک کانال، پارامتر های هیدرولیکی جریان و پارامتر های هندسی آزمایشگاه را می توان از عوامل موثر در نتیجه آزمایش

دانست. با استفاده از آنالیز ابعادی می توان این پارامتر ها را به پارامتر هایی که ترکیبی از پارامتر های اولیه می باشند تبدیل کرد و در واقع تعداد پارامتر ها را کاهش داد و رابطه ای نیز بین آنها برقرار کرد. روش کار به این صورت است که ابتدا پارامتر های موثر بر ضریب دبی تعیین می شوند. سپس به کمک تئوری باکینگهام یک سری پارامتر های بی بعد که ترکیبی از پارامتر های اولیه هستند بدست می آیند. در مرحله بعدی یک رابطه ریاضی مناسب بین پارامتر های بی بعد حاصله اعمال می شود. در نهایت به کمک داده های آزمایشگاهی، ضرایب مجهول رابطه ریاضی تعیین شده و رابطه ای مشخص برای ضریب دبی بدست خواهد آمد. در این مرحله می توان به کمک داده های آزمایشگاهی تاثیر هر کدام از پارامتر های بی بعد را بر ضریب دبی بررسی کرده و در صورت لزوم پارامتر های بی بعد کم تاثیر را از رابطه ضریب دبی حذف نمود. در تحقیق حاضر به دلیل ماهیت آزمایشگاهی آن، انجام آنالیز ابعادی ضروری می باشد که نحوه انجام آن شرح داده خواهد شد.

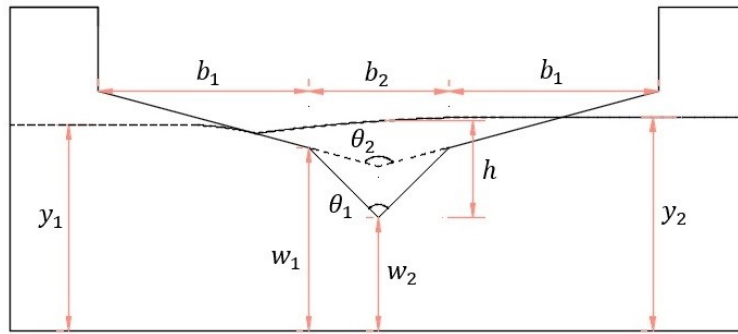
همان طور که گفته شد برای انجام آنالیز ابعادی، ابتدا پارامتر های موثر بر ضریب دبی مشخص می شوند. برای سرریز مرکب مثلثی-مثلثی پارامتر های موثر را می توان به صورت پارامتر های هیدرولیکی و هندسی دسته بندی کرد.

الف) پارامتر های هیدرولیکی موثر بر ضریب دبی

دبی در بالادست سرریز (Q_1)، عمق جریان در بالادست سرریز (y_1)، سرعت جریان در بالادست سرریز (V_1)، شتاب ثقل (g)، جرم حجمی مایع (ρ)، ویسکوزیته (μ) و کشش سطحی آب (σ)

ب) پارامتر های هندسی موثر بر ضریب دبی

طول سرریز (b_i)، ارتفاع تاج سرریز (w_i)، زوایای رأس مثلث های بالا و پایین (θ_1 و θ_2)، شیب طولی کانال (S_0)، ارتفاع آب روی تاج سرریز (h) و عرض کانال (B)



شکل (۸-۳) پارامتر های هندسی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی

در نتیجه ضریب شدت جریان را می توان با توجه به شکل (۸-۳) به صورت زیر ارائه نمود :

$$C_d = f(\rho, \sigma, g, \mu, Q_1, y_1, v_1, b_1, b_2, w_1, w_2, h, \theta_1, \theta_2, B, S_0) \quad (28-3)$$

از آنجا که Q_1 تابعی از y_1 و v_1 می باشد، می توان آن را حذف کرد. بعلاوه، برقی و همکاران [۱۰] اعلام داشتند که در جریان های زیر بحرانی تاثیر شیب قابل چشم پوشی می باشد و می توان آنرا از روابط حذف نمود. لذا :

$$C_d = f(\rho, \sigma, g, \mu, y_1, v_1, b_1, b_2, w_1, w_2, h, \theta_1, \theta_2, B) \quad (29-3)$$

که در آن y_1 عمق آب بالا دست سرریز، v_1 سرعت جریان در بالا دست سرریز، g شتاب زمین، ρ جرم حجمی مایع، μ ویسکوزیته سیال، b_i طول های سرریز، w_1 و w_2 به ترتیب ارتفاع تاج مثلث های بالایی و پایینی، θ_1 و θ_2 به ترتیب زاویه مثلث های بالا و پایین و B عرض کانال اصلی می باشد.

سپس آنالیز ابعادی با پارامتر های رابطه (۲۹-۳) انجام خواهد شد و به کمک تئوری باکینگهام، ضریب دبی به صورت تابعی از پارامتر های بی بعد زیر معرفی میگردد :

$$C_d = f\left(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}}, We = \frac{\rho y_1 v_1^2}{\sigma}, Re = \frac{\rho R v_1}{\mu}, \frac{y_1}{w_i}, \frac{y_1}{b_i}, \frac{y_1}{h}, \frac{y_1}{B}, \theta_1, \theta_2\right) \quad (30-3)$$

که در آن Fr_1 عدد فرود جریان در بالادست سرریز، We عدد وبر^{۳۸}، Re عدد رینولدز و R شعاع هیدرولیکی جریان می باشد.

با توجه به اینکه در آزمایشات این تحقیق همواره حداقل ارتفاع آب روی تاج سرریز بیش از ۵ میلیمتر بوده است، می توان از اثر عدد وبر (We) صرف نظر کرد [۱۹].

³⁸ Weber number

همچنین در جریان های آشفته می توان از اثر عدد رینولدز^{۳۹} (Re) چشم پوشی نمود. که در کلیه آزمایشات این تحقیق جریان به صورت آشفته بوده و در نتیجه تاثیر عدد رینولدز ناچیز می باشد.

در نهایت پرامتر های موثر بر ضریب دبی عبارت خواهند بود از :

$$C_d = f \left(Fr_1, \frac{y_1}{w_i}, \frac{y_1}{b_i}, \frac{y_1}{h}, \frac{y_1}{B}, \theta_1, \theta_2 \right) \quad (3-31)$$

که تابعی از عدد فرود جریان در بالادست سرریز (Fr_1)، نسبت عمق جریان بالادست سرریز به ارتفاع تاج سرریزها ($\frac{y_1}{w_i}$)، نسبت عمق جریان به طول سرریزها ($\frac{y_1}{b_i}$)، نسبت عمق جریان به ارتفاع آب روی تاج سرریز ($\frac{y_1}{h}$)، نسبت عمق جریان در بالادست سرریز به عرض کانال ($\frac{y_1}{B}$)، و زاویه رأس مثلث های بالا و پایین (θ_1, θ_2) می باشد.

۳-۷ مطالعات آزمایشگاهی

فلوم مورد آزمایش دارای طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۵ سانتی متر بوده است. جنس کف فلوم از ورق فلزی رنگ آمیزی شده و دیواره های آن از شیشه با ضخامت ۸ میلی متر ساخته شده است. در انتهای کانال یک دریچه متحرک^{۴۰} فولادی با ضخامت ۴ میلی متر و با بازشدگی قابل تنظیم تعبیه شده است تا در مواقعی که ارتفاع تاج سرریز زیاد است بتوان با پایین آوردن دریچه، عمق آب در کانال را افزایش داد و قرائت و برداشت داده ها امکان پذیر باشد. محلی که برای نصب سرریز در نظر گرفته شده است در فاصله ۴/۵ متری از ابتدای کانال می باشد. برای اندازه گیری عمق جریان از یک عمق سنج دیجیتالی^{۴۱} با دقت ۰/۰۱ میلی متر استفاده شده است. عمق سنج بر روی یک ارابه فلزی نصب گردید که این ارابه قابلیت حرکت در هر دو جهت طولی و عرضی کانال را دارا بوده است و براحتی می توان عمق جریان در نقاط مختلف محدوده سرریز را اندازه گیری کرد. جهت تامین آب مورد نیاز دو

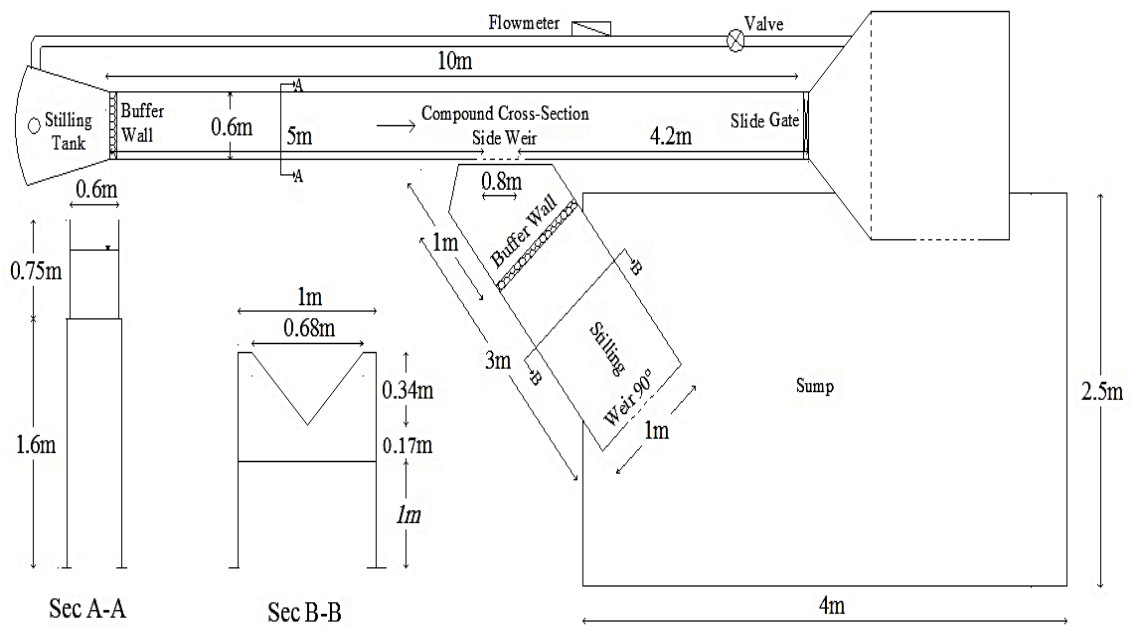
³⁹ Reynolds number

⁴¹ Point Gauge

⁴⁰ Slide Gate

مخزن با مجموع ظرفیت ۱۸ متر مکعب تعبیه گردید. برای تامین دبی از یک پمپ گریز از مرکز با توان خروجی ۱۲۰ لیتر بر ثانیه استفاده شده است و توسط دو شیر کشویی تنظیم دبی ورودی انجام می گیرد. همچنین با استفاده از یک فلومتر آلتراسونیک^{۴۲} با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه، میزان دبی ورودی اندازه گیری می گردد. این فلومتر از مدل TFM3100-F1 ساخت کارخانه اکتک ترکیه بود. برای نصب و راه اندازی دستگاه نیاز به اطلاعات فیزیکی لوله ورودی از جمله قطر لوله، ضخامت لوله و جنس لوله می باشد. همچنین نکات مورد نظر برای نصب سنسور ها از جمله فاصله آنها نسبت به یکدیگر و نحوه ی قرار گیری آنها بر روی لوله باید بدقت رعایت گردد چرا که تاثیر مهمی بر دبی اندازه گیری شده توسط دستگاه خواهد داشت. بعلاوه قابل ذکر است که جهت دقت بیشتر و جلوگیری از قرائت لحظه ای، تنظیم دمپینگ برای دستگاه ضروری است که برای این امر میانگین دبی های اندازه گیری شده در ۶۰ ثانیه به عنوان دبی ورودی مد نظر قرار خواهد گرفت. به منظور افزایش دقت اندازه گیری دبی، دستگاه توسط شرکت پشتیبانی آن کالیبره شد. جهت اندازه گیری دبی خروجی از سرریز جانبی مرکب، از یک سرریز نرمال مثلثی ۹۰ درجه کالیبره شده در انتهای یک مخزن فلزی جانبی به طول ۳ متر و عمق ۵۰ سانتی متر استفاده شده است. عمق جریان در این مخزن به کمک یک پیزومتر که در فاصله ۱/۵ متری از سرریز مثلثی تعبیه شده بود قرائت می گردید. برای جلوگیری از تلاطم جریان در کانال جانبی و دقت مناسب اندازه گیری عمق جریان توسط پیزومتر، ورق سوراخ دار در مسیر جریان کانال جانبی و در فاصله ۲ متری از سرریز مثلثی نصب شد.

⁴² Ultrasonic Flowmeter



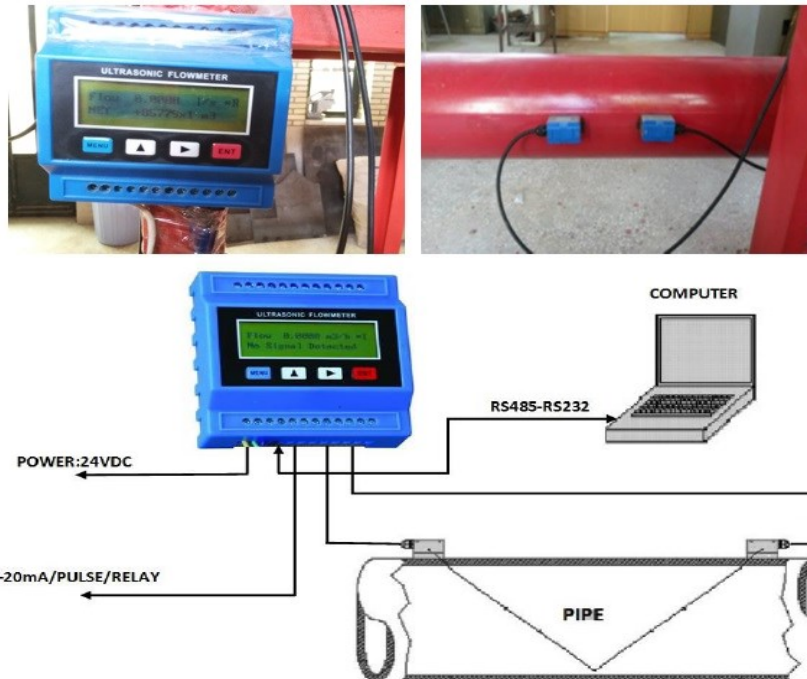
شکل (۹-۳) نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر



شکل (۱۰-۳) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن



ادامه شکل (۳-۱۰) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن



شکل (۳-۱۱) فلومتر آلتراسونیک به همراه اتصال نوع V سنسورها

۳-۸ محدوده پارامترهای هیدرولیکی و هندسی آزمایش

در تحقیق حاضر سعی شد با تغییر در مشخصات هندسی سرریز و نیز مشخصات هیدرولیکی جریان تاثیر هر دو عامل در ضریب دبی و در نتیجه دبی عبوری از سرریز جانبی مد نظر قرار گیرد. در آزمایش های انجام شده برای هر یک از سرریز ها ۴ دبی مختلف انتخاب شد و در هر یک از دبی ها ۵ عمق جریان بالادست متفاوت ایجاد گردید به نحوی که شرایط جریان در همه ی آزمایش ها در محدوده زیر بحرانی قرار گیرد.

جنس سرریز های جانبی مورد استفاده ورق فولادی با ضخامت ۱/۸ میلی متر انتخاب شده است. برش مقاطع سرریز نیز با دستگاه وایر کات انجام شد. این دستگاه از روی فایل اتوکد که مقطع سرریز در آن ترسیم شده است برش مقاطع را انجام می دهد. در نتیجه مقاطع مورد استفاده با دقت خوبی ساخته شده اند. دو تیپ مقطع با تغییر در زاویه راس مثلث بالایی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. تیپ اول شامل ۹ سرریز با زاویه ۹۰ درجه برای مثلث پایینی و زاویه ۱۲۰ درجه برای مثلث بالایی می باشد. در تیپ دوم مقاطع، زاویه مثلث بالایی به ۱۵۰ درجه تبدیل شده است. مقاطع سرریز

با مشخصات هندسی متفاوت طراحی و ساخته شد که محدوده پارامتر های هندسی آنها در جدول

(۲-۳) و همچنین بازه پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات در جدول (۱-۳) نمایش داده شده است.

جدول (۱-۳) محدوده پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات

	$\theta_1 = 90, \theta_2 = 120$	$\theta_1 = 90, \theta_2 = 150$
channel width(m)	۰/۶	۰/۶
slope	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
discharge (l/s)	۵۲-۱۰۰/۱	۴۸/۸۷-۶۶/۲۶
froude number	۰/۱۸-۰/۶۵	۰/۱۹-۰/۵۶
$\frac{y_1}{h}$	۱/۶۸-۲/۹۷	۱/۴-۱/۹
$\frac{y_1}{\bar{w}}$	۱/۴۷-۲/۴۳	۲/۰۶-۳/۱۹

جدول (۲-۳) مشخصات هندسی سرریز های مورد استفاده در آزمایش

weir number	θ_1	θ_2	$w_2(cm)$	$w_1(cm)$	L(cm)
۱	۹۰	۱۲۰	۵	۱۲/۵	۶۰
۲	۹۰	۱۲۰	۵	۱۵	۶۰
۳	۹۰	۱۲۰	۵	۱۷/۵	۶۰
۴	۹۰	۱۲۰	۷/۵	۱۵	۶۰
۵	۹۰	۱۲۰	۷/۵	۱۷/۵	۶۰
۶	۹۰	۱۲۰	۷/۵	۲۰	۵۵/۶۲
۷	۹۰	۱۲۰	۱۰	۱۷/۵	۵۸/۳۰
۸	۹۰	۱۲۰	۱۰	۲۰	۵۴/۶۴
۹	۹۰	۱۲۰	۱۰	۲۲/۵	۵۰/۹۸
۱۰	۹۰	۱۵۰	۵	۱۲/۵	۶۰
۱۱	۹۰	۱۵۰	۵	۱۵	۶۰
۱۲	۹۰	۱۵۰	۵	۱۷/۵	۶۰
۱۳	۹۰	۱۵۰	۷/۵	۱۵	۶۰
۱۴	۹۰	۱۵۰	۷/۵	۱۷/۵	۶۰
۱۵	۹۰	۱۵۰	۷/۵	۲۰	۶۰
۱۶	۹۰	۱۵۰	۱۰	۱۷/۵	۶۰
۱۷	۹۰	۱۵۰	۱۰	۲۰	۶۰
۱۸	۹۰	۱۵۰	۱۰	۲۲/۵	۶۰

با توجه به مقادیر عدد فرود در جدول (۱-۳) واضح است که همه آزمایشات در محدوده جریان زیر بحرانی انجام شده است.

۳-۹ نحوه پردازش داده ها

در حین انجام آزمایشات مقادیر اندازه گیری شده در جدولی که در نرم افزار اکسل^{۴۳} تهیه گردیده بود ثبت می شد. همچنین این جدول شامل پارامتر های هندسی سرریز های مورد آزمایش نیز می باشد. پس از انجام آزمایشات، مقادیر دبی واقعی عبوری از سرریز و مقادیر پارامتر های بی بعد ذکر شده در جدول (۱-۳) بدست می آید. سپس رابطه ای برای تخمین C_d که شامل همه ی پارامتر های بی بعد موجود در رابطه (۳-۲۹) باشد، تعریف می شود. برای بدست آوردن ضرایب مجهول این رابطه، از رگرسیون غیر خطی و روش حداقل مربعات خطا^{۴۴} بین مقادیر واقعی و محاسباتی دبی، استفاده می شود. این عمل در محیط اکسل و به کمک برنامه Solver که در خود نرم افزار اکسل تعبیه شده است انجام می گیرد. روش کار بدین صورت است که یکی از آمار های ارزیابی خطا به عنوان تابع هدف انتخاب خواهند شد و ضرایب مجهول رابطه ضریب دبی به عنوان متغیر های تصمیم گیری معرفی می گردند. برنامه Solver این ضرایب را آنقدر تغییر می دهد تا مقدار تابع هدف بهینه گردد. بدین ترتیب ضرایب مجهول رابطه ضریب دبی تعیین می شوند. همچنین برای محاسبه دبی عبوری از سرریز جانبی به روش دیمارچی که به صورت سعی و خطا صورت می گیرد برنامه ای در محیط اکسل نوشته شد.

۳-۱۰ آمار های ارزیابی خطا

جهت تعیین میزان دقت روابط پیشنهادی و ضرایب بدست آمده و مقایسه نتایج این روابط با مقادیر آزمایشگاهی از آمار های ارزیابی خطا شامل خطای متوسط (ME)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE)، میانگین نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی (σ)، ماکزیمم

⁴³ Excel

⁴⁴ least Square

خطای نسبی (Maximum Relative Error) و ضریب رگرسیون (R^2) استفاده می شود. روابط آمار های ارزیابی ذکر شده در زیر ارائه گردیده است.

۱- خطای متوسط

$$ME = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N |Q_c - Q_o| \quad (32-3)$$

۲- درصد خطای میانگین

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right| \quad (33-3)$$

۳- ماکزیمم خطای نسبی (Maximum Relative Error)

$$MRE = \max\left(\frac{Q_c - Q_o}{Q_o}\right) \quad (34-3)$$

۴- جذر میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_c - Q_o)^2} \quad (35-3)$$

۵- میانگین نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{Q_c}{Q_o} \quad (36-3)$$

۶- ماکزیمم خطای نسبی

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_c - \bar{Q}_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^N (Q_c - \bar{Q}_c)^2}} \quad (37-3)$$

که در این روابط Q_c دبی محاسباتی عبوری از سرریز، Q_o دبی مشاهداتی عبوری از سرریز و N تعداد داده ها می باشد.

پس از پایان بخش آزمایشگاهی این فصل، در قسمت عددی به معرفی نرم افزار FLOW-3D و معادلات جریان آشفته پرداخته می شود. جهت مدلسازی از نرم افزار FLOW-3D نسخه ی 10.0.1 نصب شده بر روی سیستم عامل Windows 7 از نوع ۶۴ بیتی استفاده شده است. مشخصات سیستم عامل مورد استفاده در جدول (۳-۳) قابل ارائه می باشد.

جدول (۳-۳) مشخصات رایانه مورد استفاده در مدل‌سازی

مشخصات	قطعه‌ی سخت‌افزاری
Intel Core i7-4790k CPU @ 4.00 GHz	پردازشگر
32 GB	حافظه
NVIDIA GeForce GTX 750 Ti	کارت گرافیک

۳-۱۱ معرفی نرم افزار FLOW-3D

مدل FLOW-3D از جمله مدل های قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می باشد. توسعه و پشتیبانی این مدل توسط Flow Science, Inc انجام می گیرد و هر ساله مدل جدیدی از آن با قابلیت های جدید به بازار عرضه می شود. این نرم افزار برای تحلیل جریان در سه بعد به روش حجم محدود کاربرد وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد. به دلیل قابلیت هایی که مدل FLOW-3D در زمینه شبیه سازی های هیدرولیکی دارد و جواب های قابل قبولی که در این زمینه ارائه می کند، کاربرد زیادی در صنعت پیدا کرده است. از جمله قابلیت های این برنامه در زمینه آنالیز هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش حجم سیال یا VOF در مدل کردن جریان های با سطح آزاد است.

الگو های فیزیکی متنوعی در مدل FLOW-3D برای شبیه سازی پدیده های هیدرولیکی وجود دارد. از جمله آنها می توان به الگو های آب های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون^{۴۵}، آشفتگی، محیط های متخلخل، چشمه و چاه، ورود هوا و ... اشاره کرد. از این الگو ها می توان در زمینه هایی چون محیط زیست، هوافضا، علوم دریایی، هیدرولیک، ریخته گری و ... استفاده نمود.

مدل FLOW-3D از شبکه های منظم متعامد سه بعدی برای آنالیز میدان جریان استفاده می کند. شاید این نوع شبکه به عنوان یک محدودیت تلقی شود در صورتیکه اولاً به دلیل تولید آسان این نوع

⁴⁵ cavitation

شبکه، نظم مناسب آن و اشغال کردن فضای کمتری از حافظه و ثابا به دلیل به کار گیری دو ابزار VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D، این نوع شبکه بندی یک مزیت می باشد. در ادامه به بررسی دو ابزار VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D پرداخته می شود.

۳-۱-۱ روش VOF

این روش مثالی از روش جز حجمی^{۴۶} می باشد. روش کار بدین صورت است که ناحیه ای که قرار است مدل شود به شبکه ای از المان های کوچکتر یا حجم کنترل هایی تقسیم بندی می شود. برای المان هایی که حاوی سیال هستند، مقادیری عددی برای هر کدام از متغیر های جریان مانند فشار، دما، عمق و ... در آن المان قرار داده می شود. معمولاً این مقادیر، بیانگر میانگین حجمی مقادیر در هر المان می باشند.

در جریان های دارای سطح آزاد، تمام سلول های بالای سطح آزاد جریان خالی از سیال و سلول هایی که توسط سطح آزاد^{۴۷} قطع می شوند قسمتی پر از سیال و قسمتی خالی از سیال می باشند. روش مناسب برای نشان دادن وضعیت سلول ها این است که کمیتی به نام F معرفی شود که معرف جزئی از سلول است که توسط سیال پر شده است. به کمیت F تابع حجم سیال (Volume of fluid) گفته می شود. در صورت مشخص شدن مقادیر F ، محل سطح آزاد و زاویه آن در میان سلول های میدان حل قابل تشخیص خواهد بود. این عمل با کنترل کردن مقدار سیال در سلول های مجاور انجام پذیر است. بعد از تعیین موقعیت و زاویه سطح جریان، می توان برای محاسبه حرکت سیال به اعمال شرایط مرزی مناسب در سطح جریان اقدام کرد. مقادیر F همراه با حرکت سیال حرکت خواهند کرد و در نتیجه سطوح آزاد به صورت خودکار با حرکت سیال در داخل یک شبکه ثابت رصد می شوند که این فرایند به نحوی خواهد بود که تابع F خاصیت پله ای بودن خود را حفظ کند. یکی از مزیت های بزرگ روش VOF این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچ گونه تغییر شکل و جابجایی در شبکه وجود نخواهد داشت.

⁴⁶ Volume Fraction Methods

⁴⁷ Free surface

در مدل FLOW-3D برای تشخیص هندسه صلب در شبکه ی مش از ابزار FAVOR استفاده می شود. همانند روش VOF که جز حجمی سیال در داخل هر سلول شبکه برای تعیین موقعیت سطح سیال استفاده می شود، کمیت جز حجمی دیگری نیز برای تشخیص سطوح بدنه صلب قابل استفاده است. همچنین از این کمیت می توان برای مشخص کردن حجمی از سلول که بوسیله بدنه صلب اشغال نشده است (V_f)، استفاده نمود. در نتیجه هرگاه حجم اشغال شده توسط بدنه صلب در هر سلول مشخص باشد، با روشی مشابه می توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. از مرز صلب تعیین شده برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن پیروی کند استفاده می شود.

۳-۱۲ معادلات حاکم

برای بیان معادلات حاکم در نرم افزار ، بجاست که ابتدا سیستم های مختصات موجود در این نرم افزار معرفی گردد.

۳-۱۲-۱ سیستم مختصات مورد استفاده در نرم افزار FLOW-3D

معادلات موجود در مدل FLOW-3D این قابلیت را دارند که در هر دو شکل کارتیزین (x, y, z) و استوانه ای (r, θ, z) نوشته شوند. فرم استوانه ای دارای یک سری عبارات اضافی می باشد که این عبارات دارای ضربی به نام ξ می باشند. در نتیجه وقتی که برای ξ مقدار یک لحاظ شود ($\xi = 1$)، هندسه استوانه ای و هنگامی که $\xi = 0$ باشد هندسه کارتیزین بدست می آید. محور های مختصات استوانه ای بدین صورت است که امتداد شعاعی آن به جای محور X ، زاویه ی انتقال به جای محور Y و مختصات محوری به جای محور Z ، لحاظ می شوند. [۳۰]

همان طور که گفته شد در این نرم افزار از دوا ابزار FAVOR و VOF به ترتیب برای تشخیص هندسه صلب و موقعیت سطح آزاد در شبکه مش بندی استفاده می شود. لذا تمام معادلات با تابع تخلخل

مساحت و حجم فرموله می گردند. توابع تخلخل همچنین برای بیان برخی ساده سازی ها در مشخصات سطوح آزاد و شرایط مرزی دیوار استفاده می شوند.

۲-۱۲-۳ معادله پیوستگی

معادله پیوستگی در حالت کلی به شکل زیر نوشته می شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (38-3)$$

که V_F کسر حجمی جریان، ρ چگالی سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم می باشند. مقادیر u, v, w و به ترتیب مقادیر سرعت در راستای x, y و z و یا r, θ و z هستند. R ضریبی است که بسته به نوع محور مختصات دارد. هنگامی که مختصات استوانه ای استفاده شود، لازم است مشتقات y به مشتقات قطبی تغییر شکل دهند. برای این تغییر کفایت در معادلات بالا مقدار R را برابر مقدار زیر قرار دهیم.

$$R = r_m / r \quad (39-3)$$

که در آن $y = r_m \theta$ و r_m برابر شعاع از مرجع ثابت است. A_x, A_y و A_z توابع سطح می باشند.

در نتیجه برای مختصات کارتزین $R = 1$ و $\xi = 0$ است و در مختصات استوانه ای $\xi = 1$ و R برابر رابطه (۳۹-۳) می باشد.

همان طور که گفته شد R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی می باشد که مقدار آن از رابطه زیر بدست می آید.

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (40-3)$$

که در رابطه بالا، v_ρ به صورت زیر قابل تعریف است

$$v_\rho = C_p \mu / \rho \quad (41-3)$$

μ برابر ضریب پخش مونتوم یا همان لزجت می باشد و C_p پارامتر ثابتی است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت^{۴۸} است [۲۹]. این حالت پخش جرم در فرآیندهای اختلاط آشفتگی مربوط به سیالاتی که چگالی آنها دارای گرادیان غیر یکنواخت می باشد، کاربرد دارد.

ترم آخر رابطه (۳-۳۸) همانگونه که گفته شد مربوط به دانسیته می باشد که به عنوان مثال برای تزریق جرم از خلل و فرج یک دیواره کاربرد دارد.

هنگامی که سیال مورد استفاده غیر قابل تراکم باشد، ρ در معادله پیوستگی ثابت بوده و مشتق آن صفر خواهد شد. لذا رابطه (۳-۳۸) به صورت رابطه (۳-۴۲) ساده سازی خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۳-۴۲)$$

۳-۱۲-۳ معادله مومنتم

معادلات حرکت برای مولفه های سرعت به صورت سه بعدی یا همان معادلات ناویر-استوکس به صورت رابطه (۳-۴۳) قابل ارائه می باشند. در معادلات ارائه شده عباراتی اضافی وجود دارد که هر کدام از آنها در ادامه تشریح خواهند شد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = \\ - \frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \end{aligned} \quad (۳-۴۳)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned}$$

⁴⁸ Turbulent Schmidt number

در روابط بالا (G_x, G_y, G_z) شتاب های بدنه، (f_x, f_y, f_z) شتاب های ناشی از لزجت، (b_x, b_y, b_z) افت جریان در محیط های دارای خلل و فرج و عبارت آخر سمت راست، برای تزریق جرم در سرعت صفر استفاده می شود. مولفه های W_w, V_w و u_w مولفه های سرعت جزء منبع می باشد و همچنین مولفه های W_s, V_s و u_s سرعت سیال در سطح منبع نسبت به خود سطح منبع می باشند.

شتاب های ناشی از لزجت برای سیالی با لزجت دینامیکی μ برابر است با :

$$\rho V_F f_x = w_{sx} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\}$$

$$\rho V_F f_y = w_{sy} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x - A_y \tau_{xy}) \right\} \quad (44-3)$$

$$\rho V_F f_z = w_{sz} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\}$$

که در آن :

$$\tau_{xx} = -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\}$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\}$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (45-3)$$

$$\tau_{xy} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\}$$

$$\tau_{xz} = -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\}$$

$$\tau_{yz} = -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\}$$

۳-۱۳ مدل های آشفته گی

پایه و اساس معادلات استفاده شده برای حل جریان های آرام و آشفته یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویر استوکس استفاده می شود با این تفاوت که برای حل جریان آشفته معادلات ناویر استوکس را متوسط گیری زمانی می کنند. بدین ترتیب عباراتی اضافی در معادله ی ناویر استوکس ظاهر خواهند شد که ماهیت آنها از نوع تنش در نظر گرفته می شود و به تنش های آشفته گی (تنش های رینولدز) موسوم هستند. مدل های آشفته گی برای حل عبارت های اضافی که در معادلات ناویر استوکس ظاهر شده اند، استفاده می شوند.

در اغلب مدل های آشفتگی از فرضیه بوزینسک برای حل تنش های رینولدزی استفاده می شود. در این فرضیه با استفاده از ضریبی به نام ضریب لزجت گردابی، تنش های رینولدزی به گردابان های سرعت نسبت داده می شود. لزجت گردابی به لزجت گردابی سینماتیکی (ν_t) و دینامیکی (μ_t) دسته بندی می شود. از آنجا که لزجت گردابی برای تخمین تنش های آشفتگی استفاده می شود پس باید تابعی از خصوصیات جریان آشفته باشد. مقیاس های طول و سرعت می توانند به عنوان انتخابی مناسب برای فرموله کردن لزجت گردابی باشند. لذا از فرمول زیر برای ارتباط بین لزجت گردابی دینامیکی و لزجت گردابی سینماتیکی استفاده می شود.

$$\mu_t = C\rho\nu_t l \quad (۴۶-۳)$$

که در آن C یک ضریب ثابت، ρ دانسیته سیال، ν_t مقیاس سرعت و l مقیاس طول می باشد. مدل های آشفتگی برای برآورد دو پارامتر مقیاس سرعت و مقیاس طول توسعه داده شده اند.

۳-۱۴ انواع مدل های آشفتگی

به طور کلی مدل های آشفتگی بر اساس تعداد معادلات دیفرانسیل و روشی که برای برآورد مقیاس طول و سرعت استفاده می کنند، به انواع زیر دسته بندی می شوند که هر کدام به اختصار توضیح داده خواهد شد.

۳-۱۴-۱ مدل های صفر معادله ای

در این مدل ها کمیت های آشفتگی مقیاس طول و یا سرعت با مقادیر بدست آمده در آزمایشگاه محاسبه می شوند و از معادلات دیفرانسیل برای حل آنها استفاده نمی شود. مدل طول اختلاط پرائنتل^{۴۹} مثالی از این نوع می باشد.

⁴⁹ Prandtl mixing-length model

۳-۱۴-۲ مدل های یک معادله ای^{۵۰}

مدل های یک معادله ای از یک رابطه دیفرانسیل بر حسب کمیت آشفتگی k استفاده می کنند.

پارامتر k که انرژی جنبشی آشفتگی می باشد به صورت رابطه (۳-۴۷) قابل تعریف است:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (۳-۴۷)$$

که علائم پرایم به معنای اختلاف از سرعت متوسط می باشد. مقیاس سرعت، به صورت زیر تعریف می شود:

$$v_t = \sqrt{k} \quad (۳-۴۸)$$

در نتیجه مجهولات آشفتگی تبدیل به پارامتر های k و l خواهند شد که کمیت k با حل معادله ناویر

استوکس برای این پارامتر تعیین می شود. در این روش کمیت l به صورت تجربی قابل ارائه است.

۳-۱۴-۳ مدل های دو معادله ای^{۵۱}

در این مدل ها هر دو کمیت های مقیاس طول و مقیاس سرعت از حل معادلات دیفرانسیلی بدست

خواهند آمد. در مدل دو معادله ای علاوه بر کمیت آشفتگی k ، کمیت آشفتگی دیگری به نام ε نیز

تعریف شده است که به کمیت اتلاف آشفتگی موسوم است. کمیت ε نماینده مقیاس طول می باشد.

۳-۱۴-۴ مدل گروه های نرمال شده رینولدز (RNG)^{۵۲}

این مدل متکی بر گروه های نرمال شده رینولدز (RNG) می باشد. در این روش از رویکرد آماری

برای بدست آوردن معادلات متوسط گیری شده برای کمیت های آشفتگی k (انرژی جنبشی آشفتگی)

و ε (نرخ اتلاف انرژی آشفتگی) استفاده می شود.

⁵⁰ On- equation, turbulent energy model

⁵¹ Two equation ($k - \varepsilon$)

⁵² Renormalization group(RNG)

۳-۱۴-۵ مدل های شبیه سازی گردابه های بزرگ^{۵۳}

در این مدل تمامی ساختار های آشفتگی که با استفاده از شبکه محاسباتی قابل تعیین هستند به طور مستقیم محاسبه خواهند شد و برای ساختار های کوچک تر از تقریب آنها استفاده می شود. هر چند این روش از دقت مناسب تری برخوردار می باشد اما حجم محاسبات آن بمراتب بیشتر خواهد بود.

۳-۱۵ مدل های آشفتگی مورد استفاده در FLOW-3D

نرم افزار FLOW-3D از پنج روش زیر برای حل جریان های آشفته استفاده می کند:

۱- مدل طول اختلاط پرانتل

۲- مدل یک معادله ای انرژی جنبشی آشفتگی

۳- مدل دو معادله ای $k - \epsilon$

۴- مدل گروه های نرمال شده (RNG)

۵- مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ

لازم به ذکر است به دلیل اثر کسر های حجمی و سطحی روش FAVOR در معادلات مربوط به مدل آشفتگی، معادلات مورد استفاده در FLOW-3D کمی با مدل سازی های قبلی متفاوت است. در مطالعه حاضر برای شبیه سازی جریان از روش $k - \epsilon$ استفاده شده است. دلیل این انتخاب نتایج سایر محققین در مقایسه بین مدل های آشفتگی مختلف برای شبیه سازی جریان بر روی سرریز های جانبی مرکب و سرریز های نرمال مرکب، بوده است [۲۴ و ۲۵]. لذا به معرفی معادلات روش $k - \epsilon$ پرداخته می شود. در مورد ماهیت بقیه روش های موجود در نرم افزار FLOW-3D با توجه به نوع مدل آشفتگی شان (یک معادله و دو معادله ای و ...) در بخش انواع مدل های آشفتگی (۳-۱۴) توضیحات مختصر داده شده است.

مدل آشفتگی $k - \epsilon$ RNG

این مدل از نوع مدل های آشفتگی دو معادله ای می باشد. لذا دو معادله برای بدست آوردن مقیاس های طول و سرعت باید حل شود. معادله اول مربوط به معادله انتقال انرژی آشفتگی (k) و معادله دیگر

⁵³ Large eddy simulation model

به انتقال برای اتلاف انرژی آشفتگی (ε) اشاره دارد. با توجه به وارد کردن اثرات کسر های حجمی و سطحی روش FAVOR، معادلات آشفتگی روش RNG در FLOW-3D به صورت زیر نوشته می شوند:

معادله لزجت سینماتیکی آشفتگی:

$$v_t = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (49-3)$$

معادله انتقال آشفتگی:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T \quad (50-3)$$

که در آن k_T انرژی جنبشی آشفتگی، ε_T اتلاف آشفتگی، V_F ، A_x ، A_y و A_z توابع CNU ، $FAVOR$ پارامتری است که مقدار آن در این روش برابر 0.185 بوده و P_T تولید انرژی آشفتگی می باشند. که مقدار P_T از رابطه زیر حاصل می شود:

$$P_T = CPRO \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{array}{l} 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} A_y \left(R \frac{\partial u}{\partial y} + \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{array} \right\} \quad (51-3)$$

که در آن $CPRO$ یک عبارت آشفتگی می باشد که مقدار پیش فرض ۱ برای آن در نظر گرفته می شود.

G_T (عبارت تولید شناوری) عبارت است از :

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (52-3)$$

که در آن $CRHO$ عبارت آشفتگی دیگری است که به عنوان پیش فرض صفر انتخاب می شود مگر برای جریان با شناور حرارتی که میزان $2/5$ را اختیار می کند. عبارت پخش از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Diff_T = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \end{aligned} \right\} \quad (53-3)$$

که در آن v_k ضریب پخش بوده و به کمک لزجت آشفته مقدار آن محاسبه می شود:

$$v_k = RMTKE \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (54-3)$$

همچنین معادله انتقال برای اتلاف آشفتگی، به صورت رابطه زیر ارائه می گردد :

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right\} =$$

$$\frac{CDIS1. \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3. G_T) + Diff_\varepsilon - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (55-3)$$

که ضرایب $CDIS1$ و $CDIS3$ به ترتیب برابر $1/42$ و $0/2$ می باشند. مقدار ضریب $CDIS2$ با استفاده

از دو عبارت انرژی جنبش آشفتگی (k_T) و تولید آشفتگی (P_T) بدست می آید.

پخش اتلاف برای ε_T توسط رابطه (56-3) قابل بیان است:

$$Diff_\varepsilon = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\varepsilon A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\varepsilon A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\varepsilon A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_\varepsilon A_x \varepsilon_T}{x} \end{aligned} \right\} \quad (56-3)$$

فصل چهارم

مدلسازی عددی و تجزیه تحلیل داده های آزمایشگاهی و عددی

۴-۱ مقدمه

در فصل حاضر داده های حاصل از آزمایش های انجام شده مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار خواهد گرفت. در ادامه روابط مربوطه استخراج و ارائه می گردد و نمودار های مربوط به نتایج ترسیم خواهد شد. پس از بررسی بخش آزمایشگاهی، نتایج حاصل از مدل کردن سرریز جانبی توسط نرم افزار Flow-3D مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه خواهد شد. در ادامه جزئیات بیشتری از روند ارائه مطالب فصل حاضر بیان می گردد.

همان طور که در فصل ۳ اشاره شد، ضریب دبی سرریز مرکب به پارامتر های بی بعدی که از طریق آنالیز ابعادی مشخص می شوند وابسته می باشد. که برای یافتن ضرایب مجهول این روابط از رگرسیون غیر خطی و از روش حداقل مربعات خطا بین دبی محاسباتی و دبی واقعی استفاده می شود. در این فصل روابط پیشنهادی ضریب دبی ارائه شده و ضرایب مجهول آن در هر روش تعیین می شوند. سپس دبی محاسباتی هر روش به کمک ضرایب بدست آمده آن روش محاسبه می شود و ضریب دبی های محاسباتی و واقعی و نیز دبی های محاسباتی و واقعی به صورت نموداری با هم مقایسه می شوند. علاوه بر موارد ذکر شده مطالب فصل حاضر به طور کلی شامل موضوعات زیر می باشد:

- (۱) ارائه ضریب دبی متوسط به روش مستقیم برای سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی
- (۲) ارائه ضریب دبی متوسط به روش دیمارچی برای سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی و کنترل فرض ناچیز بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی
- (۳) بررسی پیوسته بودن منحنی دبی-اشل در سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی
- (۴) رسم نمودار پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز و محور وسط کانال برای سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی
- (۵) مدل سازی با نرم افزار Flow 3D.
- (۶) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

۴-۲ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

در این قسمت نحوه محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به دو روش مستقیم و دیمارچی تشریح می گردد و برای هر روش رابطه ای جهت برآورد ضریب دبی ارائه خواهد شد. مقادیر واقعی ضریب دبی و دبی عبوری از سرریز با مقادیر بدست آمده از روابط پیشنهادی برای این پارامترها با یکدیگر مقایسه شده و میزان خطای روابط به کمک آمارهای ارزیابی خطا تعیین می گردد. در ادامه فرض صرف نظر کردن از تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی مرکب مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۲-۱ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش مستقیم

همان طور که در فصل ۳ اشاره شد جهت تعیین ضریب دبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به روش مستقیم، دو روش وجود دارد که هر دو روش در قسمت (۳-۴) فصل سوم به طور کامل تشریح شده اند.

در روش اول که توسط مارتینز و همکاران [۲] پیشنهاد شده است، پس از محاسبه مقادیر ضریب دبی به کمک داده های آزمایشگاهی، پارامترهای موثر بر آن توسط آنالیز ابعادی تعیین می گردد و رابطه ای جهت برآورد ضریب دبی پیشنهاد می گردد. اما در این روش متفاوت بودن ارتفاع تاج های مقاطع بالایی و پایینی سرریز مرکب و همچنین زوایای مختلف این دو مقطع، سبب بروز مشکل در به کار گیری روابط و ارائه رابطه ای جهت تخمین ضریب دبی خواهد شد. لذا برای رفع این مشکل از روش دوم که همان استفاده از ارتفاع تاج معادل (\bar{W}) می باشد، استفاده خواهد شد و بدین ترتیب سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز ساده مثلثی با ارتفاع تاج \bar{W} و زاویه رأس θ معادل می گردد. در نتیجه با توجه به آنالیز ابعادی و پارامترهای موثر بر ضریب دبی، رابطه پیشنهادی برای ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به صورت رابطه (۴-۱) قابل ارائه است.

$$C_d = a + bFr_1^c + d\left(\frac{y_1}{h}\right)^e + f\left(\frac{y_1}{\bar{W}}\right)^g \quad (1-4)$$

که در آن ضرایب a، b، c، d، e، f و g ضرایب ثابتی هستند که به کمک داده های آزمایشگاهی و با حداقل سازی مجموع مربعات خطا بین دبی مشاهداتی و دبی محاسباتی بدست می آیند. \bar{w} ارتفاع وزنی تاج می باشد که از رابطه (۳-۱۲) محاسبه می شود. همان طور که در فصل سوم بیان شد، برای محاسبه \bar{w} به زاویه θ نیاز است. مقدار بهینه این زاویه همراه با ضرایب ثابت رابطه ضریب دبی طوری تعیین می شوند که مقادیر دبی محاسباتی در مقایسه با دبی واقعی کمترین خطا را داشته باشند. در مورد جزئیات محاسبه این مجهولات (ضرایب رابطه ضریب دبی و زاویه θ) در قسمت (۳-۹) فصل سوم اشاره شده است.

پس از مشخص شدن مجهولات، رابطه پیشنهادی برای ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی- مثلثی به روش مستقیم به صورت روابط زیر پیشنهاد می گردد.

$$\theta_1 = 90, \theta_2 = 120$$

$$C_d = -0.016 + 0.368Fr_1^{-0.161} + 0.143 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.154} + 0.076 \left(\frac{y_1}{\bar{w}}\right)^{-0.07}$$

(۲-۴)

$$\theta = 114.46$$

$$\theta_1 = 90, \theta_2 = 150$$

$$C_d = 0.179 + 0.162Fr_1^{-0.193} + 0.177 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.105} - 0.187 \left(\frac{y_1}{\bar{w}}\right)^{-0.055}$$

(۳-۴)

که در روابط بالا Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، \bar{w} ارتفاع تاج معادل، y_1 عمق آب در ابتدای سرریز و h ارتفاع آب روی تاج سرریز می باشد.

در مطالعات پیشین در مورد سرریز جانبی مثلثی ساده، این نتیجه بدست آمده بود که پارامتر بی بعد $\frac{y_1}{\bar{w}}$ تاثیر چندانی بر ضریب دبی ندارد [۳]. برای بررسی این موضوع در سرریز مرکب جانبی مثلثی- مثلثی، پارامتر مذکور را از رابطه ضریب دبی (رابطه ۴-۱) حذف کرده و مجدداً ضرایب مجهول رابطه C_d تعیین می شود. روابط جدید به صورت زیر ارائه می گردد :

$$\theta_1 = 90, \theta_2 = 120$$

$$C_d = -0.008 + 0.424Fr_1^{-0.142} + 0.150 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.164}$$

(۴-۴)

$$\theta_1 = 90, \theta_r = 150$$

$$C_d = 0.226 + 0.244Fr_1^{-0.141} + 0.224 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.096}$$

$$\& \quad \theta = 139.32 \quad (5-4)$$

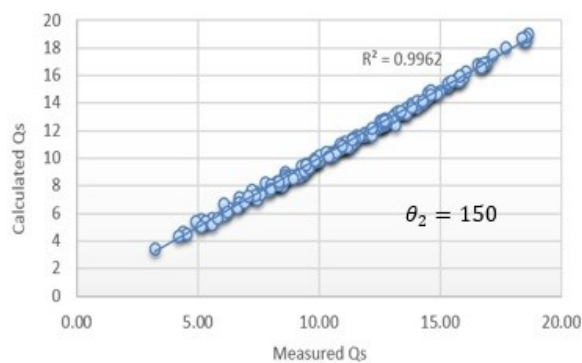
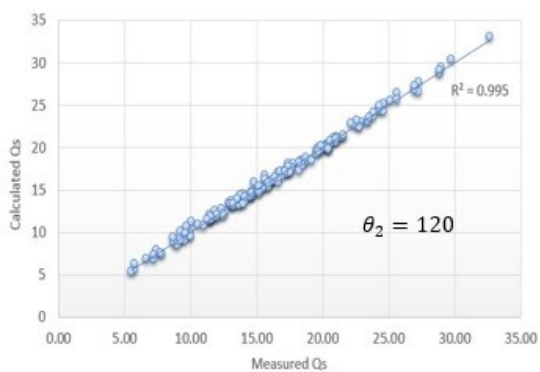
برای بررسی میزان تاثیر پارامتر $\frac{y_1}{w}$ ، مقادیر آمارهای ارزیابی خطا را در هر دو حالت وجود و یا عدم وجود این پارامتر در رابطه C_d ، مورد بررسی قرار می دهیم.

جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای ارزیابی خطا برای نشان دادن تاثیر $\frac{y_1}{w}$ بر ضریب دبی به روش مستقیم

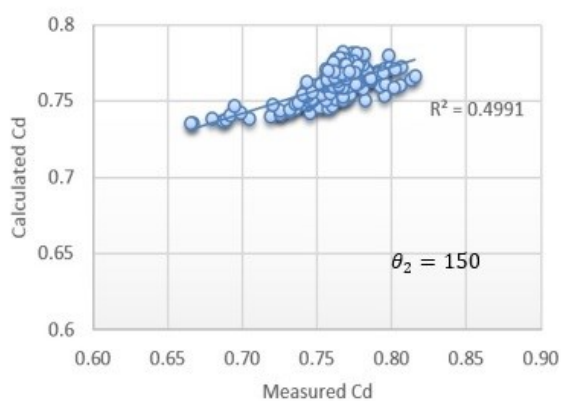
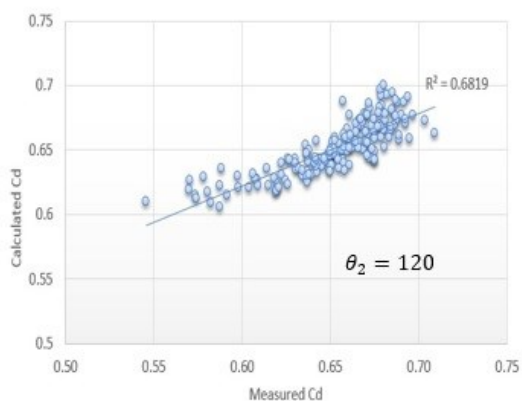
	$\theta_1 = 90, \theta_r = 120$			$\theta_1 = 90, \theta_r = 150$		
	با حضور C_d در $\frac{y_1}{w}$	بدون حضور C_d در $\frac{y_1}{w}$	اختلاف خطا	با حضور C_d در $\frac{y_1}{w}$	بدون حضور C_d در $\frac{y_1}{w}$	اختلاف خطا
RMSE	۰/۰۰۰۳۸۵	۰/۰۰۰۳۸۴	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۱۵	۰/۰۰۰۲۱۴	۰/۰۰۰۰۰۱
ME(%)	۰/۰۳۰۲۲۱	۰/۰۳۰۲۲۰	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۱۶۸۶۶	۰/۰۱۶۷۶۱	۰/۰۰۰۱۰۵
MAPE(%)	۲/۰۷۲	۲/۰۷۴	۰/۰۰۲	۱/۷۹۳	۱/۷۸۳	۰/۰۱
MRE	۰/۱۱۶۵۸	۰/۱۱۶۸۹	۰/۰۰۰۰۳	۰/۱۰۸۷۶	۰/۱۰۶۹۴	۰/۰۰۱۸۲
σ	۰/۹۹۹۹۲	۰/۹۹۹۷۰	۰/۰۰۰۰۲۲	۱/۰۰۰۰۴۶	۱/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۴
R^2 (دبی)	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	.	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	.

با توجه به جدول (۱-۴)، مقادیر خطا و همچنین ضریب رگرسیون دبی در دو جدول اختلاف بسیار جزئی دارند که این نشان دهنده عدم تاثیر پارامتر بی بعد $\frac{y_1}{w}$ بر ضریب دبی سرریز مرکب جانبی مثلثی- مثلثی می باشد. در نتیجه روابط (۴-۴) و (۵-۴) به عنوان روابط پیشنهاد شده برای ضریب دبی سرریز مرکب جانبی مثلثی- مثلثی به روش مستقیم در نظر گرفته می شوند. همچنین با توجه به جدول (۱-۴)، مقادیر خطا در محدوده کم و قابل قبولی قرار دارند که نشان دهنده دقت مناسب رابطه پیشنهادی می باشد. در نتیجه می توان ضریب دبی به روش مستقیم در سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را تابعی از عدد فرود بالادست جریان بالادست سرریز (Fr_1) و نسبت عمق ابتدای سرریز به ارتفاع آب روی تاج سرریز ($\frac{y_1}{h}$) در نظر گرفت.

در شکل (۱-۴) نمودار دبی محاسباتی به دبی آزمایشگاهی و نیز ضریب دبی محاسباتی به ضریب دبی آزمایشگاهی ترسیم شده است.

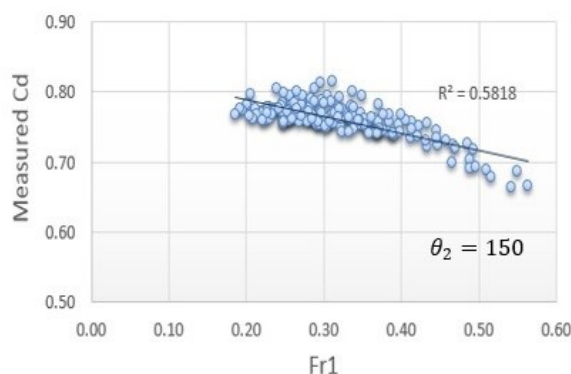
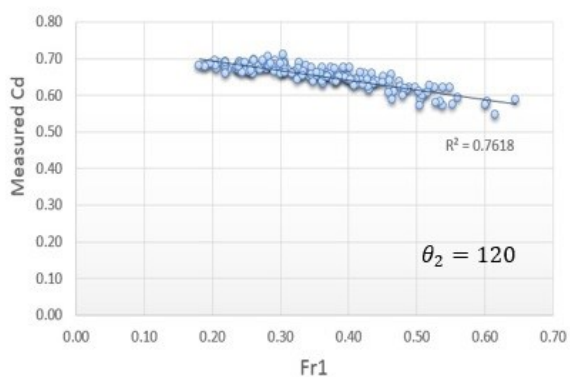


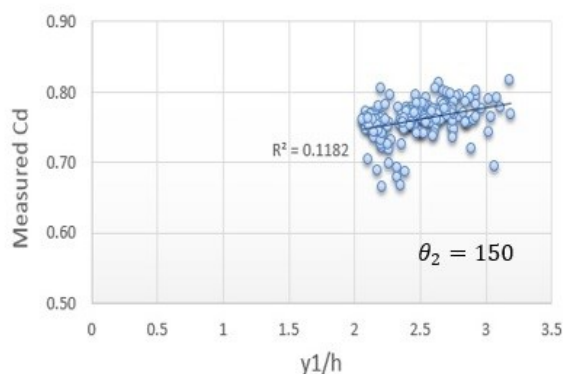
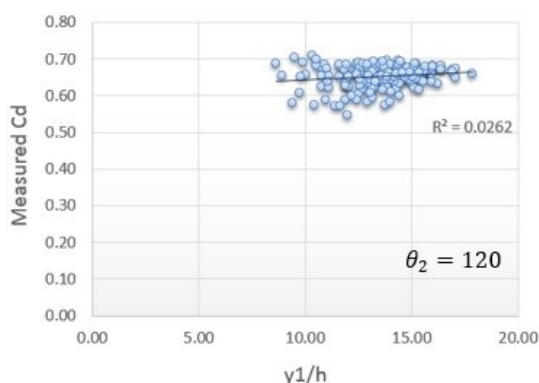
الف) نمودار دبی مشاهداتی به دبی محاسباتی در روش ضریب دبی مستقیم



ب) نمودار ضریب دبی آزمایشگاهی به ضریب دبی محاسباتی بدست آمده از رابطه (۴-۴) و رابطه (۴-۵) شکل (۴-۱) نمودار دبی و ضریب دبی آزمایشگاهی بر حسب دبی و ضریب دبی محاسباتی

با توجه به نمودارهای شکل (۴-۱)، ملاحظه می شود که دبی محاسباتی در مقایسه با دبی آزمایشگاهی اختلاف جزئی داشته و ضریب رگرسیون نمودار دبی در هر دو تیپ مقطع نزدیک به یک می باشد. همچنین در شکل (۴-۲) تغییرات پارامترهای بی بعد Fr_1 و $\frac{y_1}{h}$ در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی به صورت مجزا نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش عدد فرود بالا دست جریان ضریب دبی کاهش می یابد در حالیکه افزایش پارامتر بی بعد $\frac{y_1}{h}$ باعث افزایش ضریب دبی می گردد.





شکل (۴-۲) تاثیر پارامترهای Fr_1 و $\frac{y_1}{h}$ بر ضریب دبی آزمایشگاهی به روش مستقیم

۴-۲-۲ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش دیمارچی

در این قسمت ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به روش گفته شده در فصل قبل و بر پایه روابط ارائه شده توسط دیمارچی برای سرریزهای جانبی، تعیین می‌گردد. در این روش نیز همانند روش مستقیم، برای حل معضل ارتفاع تاج متغیر در مقاطع بالایی و پایینی سرریز و نیز زوایای رأس مختلف در دو مقطع سرریز مرکب، از ایده معادل کردن سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز مثلثی ساده با ارتفاع تاج \bar{w} و زاویه رأس θ استفاده می‌شود. پس از این مرحله، مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی به کمک داده‌های حاصل از آزمایش برای تمامی داده‌ها تعیین می‌شود و بعد از آن رابطه‌ای برای تخمین ضریب دیمارچی پیشنهاد می‌شود. رابطه مذکور شامل پارامترهای مهم و تاثیرگذار بر ضریب دبی دیمارچی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی می‌باشد که توسط آنالیز ابعادی حاصل شده‌اند. ضرایب مجهول این رابطه نیز همانند روش مستقیم بوسیله رگرسیون غیر خطی تعیین می‌شوند. پس از مشخص شدن این ضرایب، رابطه ضریب دبی دیمارچی برای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی به صورت زیر قابل ارائه است.

$$:\theta_1 = 90, \theta_2 = 120$$

$$C_m = -6.049 + 1.294Fr_1^{-0.12} + 1.021\left(\frac{y_1}{B}\right)^{-0.037} + 0.140\left(\frac{y_1}{\bar{w}}\right)^{-5.583} + 3.92\left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.012}$$

$$\& \theta = 113.35 \quad (4-6)$$

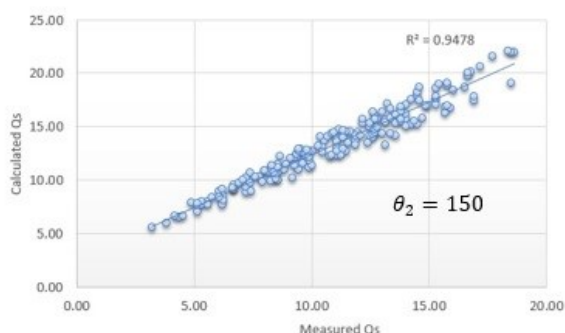
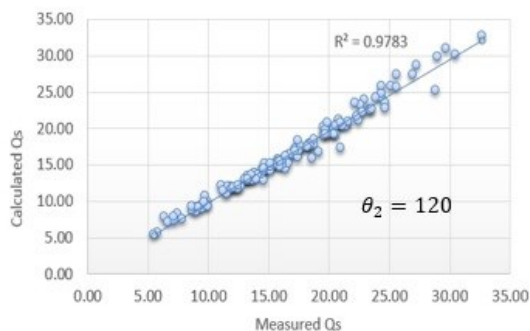
$$:\theta_1 = 90, \theta_2 = 150$$

$$C_m = 0.337 + 0.076Fr_1^{-0.209} - 0.201 \left(\frac{y_1}{B}\right)^{1.048} + 1.583 \left(\frac{y_1}{\bar{w}}\right)^{-2.555} + 3.916 \left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.221}$$

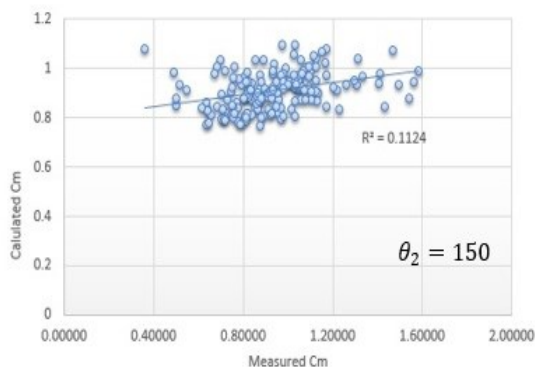
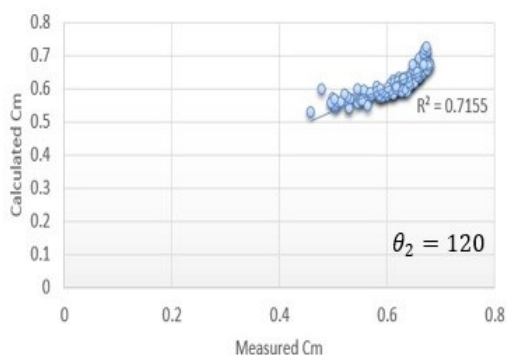
& $\theta = 150$ (۷-۴)

که در آن Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، y_1 عمق آب در ابتدای سرریز، L طول سرریز در سطح آب، B عرض کانال و \bar{w} ارتفاع تاج معادل می باشد. در نتیجه ضریب C_m تابع پارامترهای بی بعد عدد فرود بالادست جریان (Fr_1)، عمق آب در ابتدای سرریز (y_1)، عرض کانال (B)، طول سرریز در سطح آب (L) و ارتفاع تاج معادل (\bar{w}) می باشد.

برای مقایسه مقادیر دبی و ضریب دبی بدست آمده از رابطه اخیر با نتایج آزمایشگاهی، نمودارهای شکل (۳-۴) رسم شده اند.



الف) نمودار دبی آزمایشگاهی به محاسباتی در روش دیمارچی



ب) نمودار ضریب دبی مشاهداتی به ضریب دبی محاسباتی در روش دیمارچی

شکل (۳-۴) مقایسه مقادیر دبی و ضریب دبی در حالت آزمایشگاهی و محاسباتی به روش دیمارچی

در ادامه برای بررسی میزان دقت روابط پیشنهادی، انواع آمارهای ارزیابی خطا و نیز ضریب رگرسیون (R^2) بین دبی محاسباتی و دبی مشاهداتی محاسبه و در جدول (۲-۴) ارائه گردیده است.

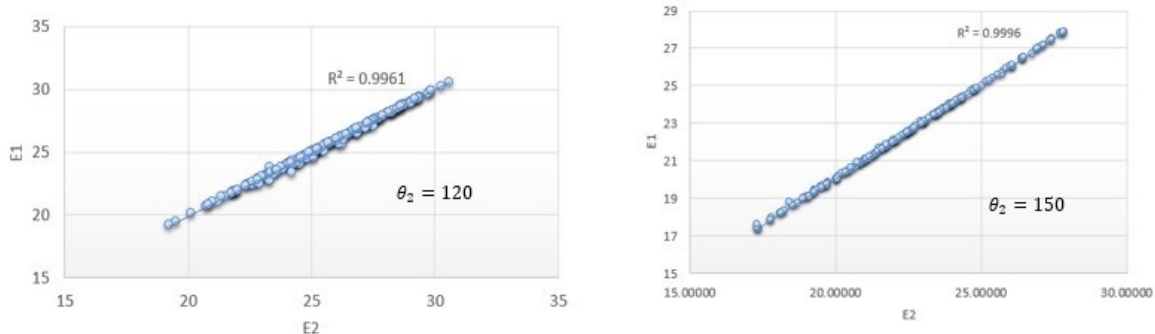
جدول (۲-۴) مقادیر آمار های ارزیابی خطا دبی عبوری از سرریز به روش دیمارچی

	$\theta_1 = 90, \theta_2 = 120$	$\theta_1 = 90, \theta_2 = 150$
RMSE	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۲۵
MAPE (%)	۴	۲۴/۶۶
ME (%)	۰/۰۶۶۰	۰/۲۳۷۹
MRE	۰/۲۱۲۲	۰/۴۱۹۷
σ	۰/۹۸۰۵	۱/۲۴۶۶
R^2	۰/۹۷۸۳	۰/۹۴۸۰

با دقت در جدول فوق مشاهده می شود که روابط پیشنهادی دارای دقت قابل قبولی در محاسبه دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی می باشند و این به معنی کارآمد بودن روش معادل کردن سرریز مرکب به یک سرریز ساده برای بدست آوردن رابطه ای جهت تخمین ضریب دبی می باشد.

۳-۴ بررسی فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی

برای بررسی صحت فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی، مقادیر انرژی مخصوص در بالادست و پایین دست این سرریز محاسبه و برای هر دو تیپ مقطع در نمودار زیر رسم شده است.



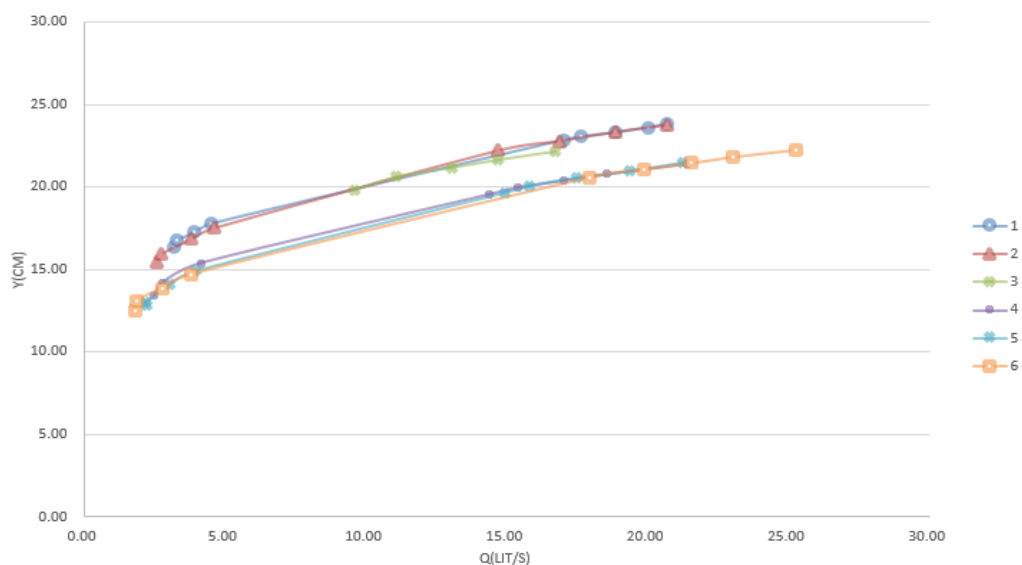
شکل (۴-۴) تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

نمودار های شکل (۴-۴) نشان می دهند که مقادیر انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی تقریباً با هم برابر بوده و در نتیجه می توان نتیجه گرفت که فرض دیمارچی در مورد انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای سرریز جانبی در این مورد نیز صدق می کند.

۴-۴ بررسی پیوسته بودن منحنی دبی-اشل برای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

همان گونه که در فصل دوم اشاره شده بود، مارتینز و همکاران [۲] و همچنین پیراتیپان و همکاران [۳] با انجام آزمایشاتی اعلام داشتند که منحنی دبی اشل در سرریز مرکب نرمال مثلثی-مثلثی پیوسته می باشد. این در حالی است با توجه به مشاهدات جان و همکاران [۱۸]، این پیوستگی در مورد سرریز های مرکب دیگر صدق نمی کند. در این قسمت برای چند سرریز نمودار دبی بر حسب ارتفاع برای سرریز مرکب جانبی مثلثی-مثلثی با توجه به داده های بدست آمده از آزمایشگاه ترسیم شد که نتایج آن در شکل (۵-۴) قابل مشاهده است.

با توجه به شکل (۵-۴) ملاحظه می گردد که در نوع جانبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی نیز همانند نوع نرمال آن، پیوستگی در منحنی دبی بر حسب عمق دیده می شود. در نتیجه در همه ی اعماق روی سرریز مذکور امکان محاسبه دبی عبوری از سرریز وجود دارد که این ویژگی از جمله مزیت های سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به شمار می آید.

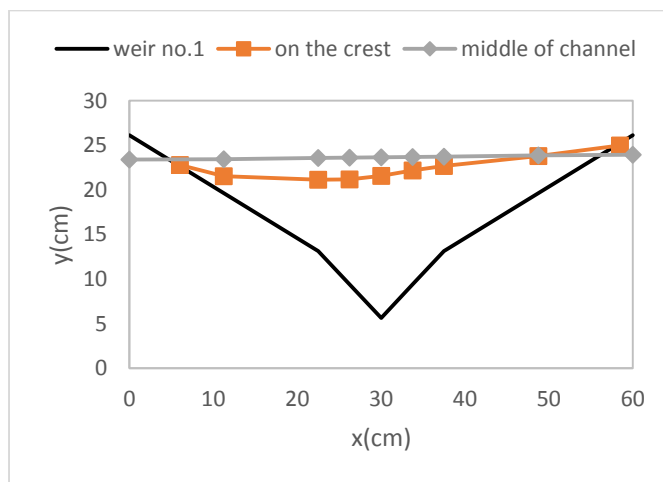


شکل (۵-۴) نمودار دبی بر حسب عمق برای سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

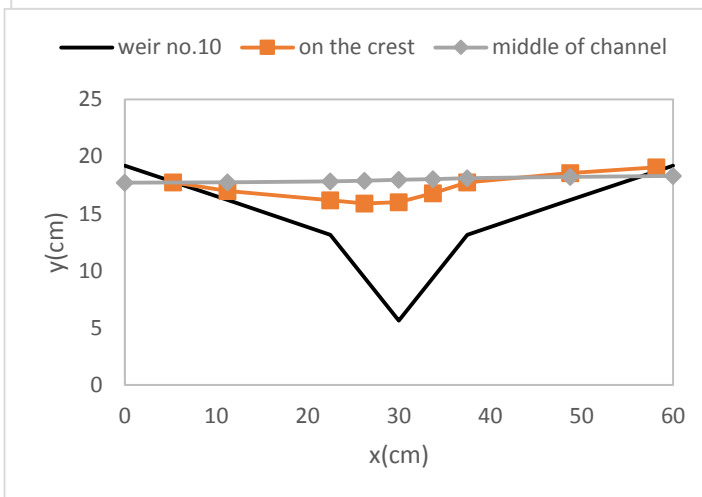
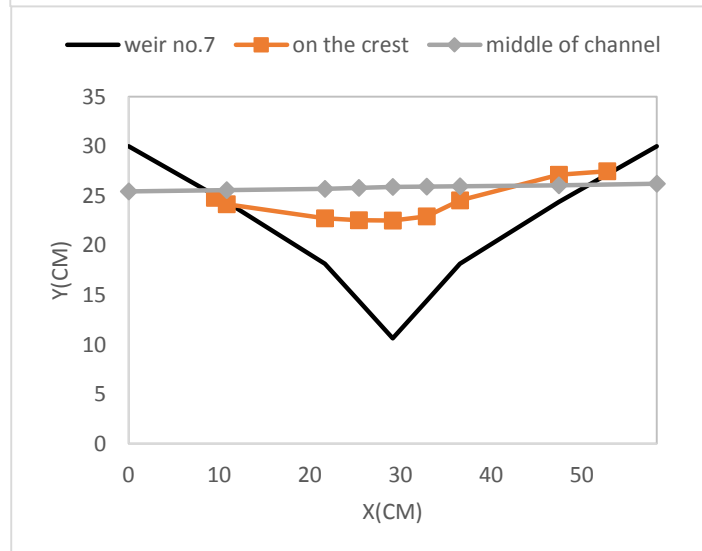
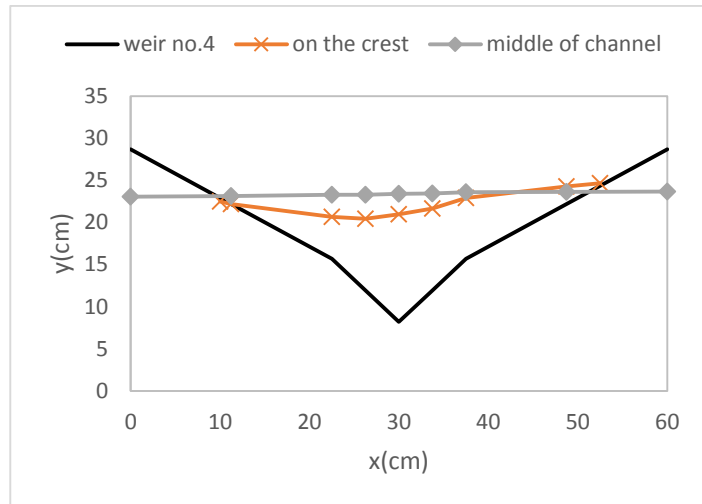
۴-۵ رسم پروفیل طولی سطح آب در محل تاج سرریز و در محور وسط کانال برای سرریز

جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

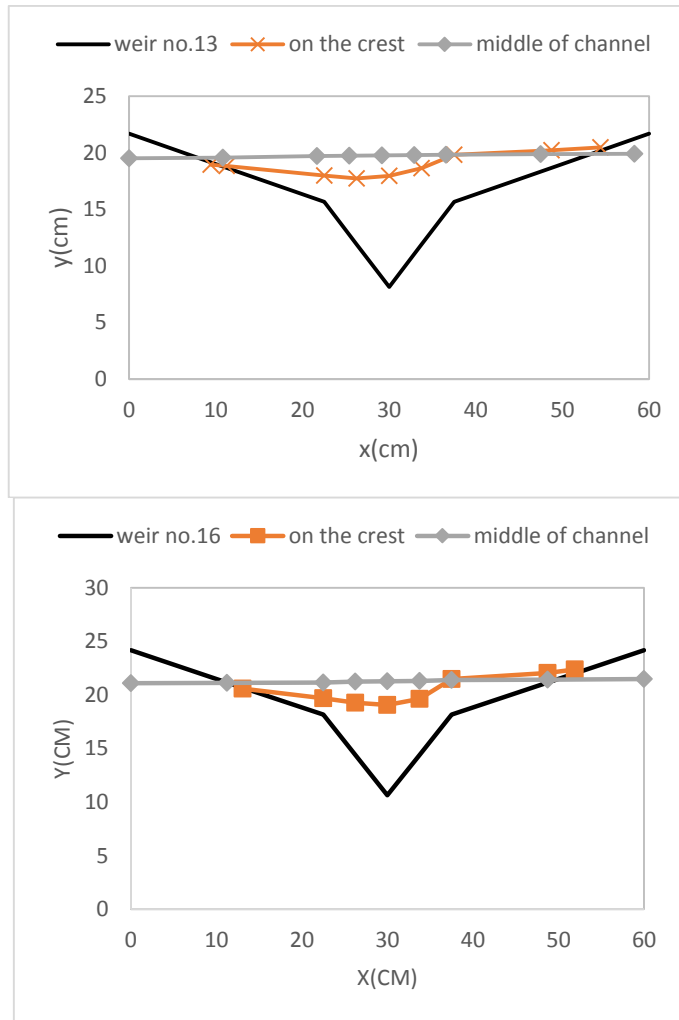
یکی دیگر از پارامترهای حائز اهمیت در خصوص عبور جریان بر روی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی، شکل پروفیل سطح آب در حین عبور از روی این سرریز می باشد. برای بررسی این مورد، پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال (در محدوده ابتدا تا انتهای سرریز) و بر روی تاج سرریز، در نمودارهای شکل (۴-۶) رسم شده اند. در انتخاب سرریزها برای رسم پروفیل سطح آب بر روی آنها، تغییر در ارتفاع مقطع همراه با تغییر زاویه مثلث بالایی مد نظر قرار گرفته است.



شکل (۴-۶) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز

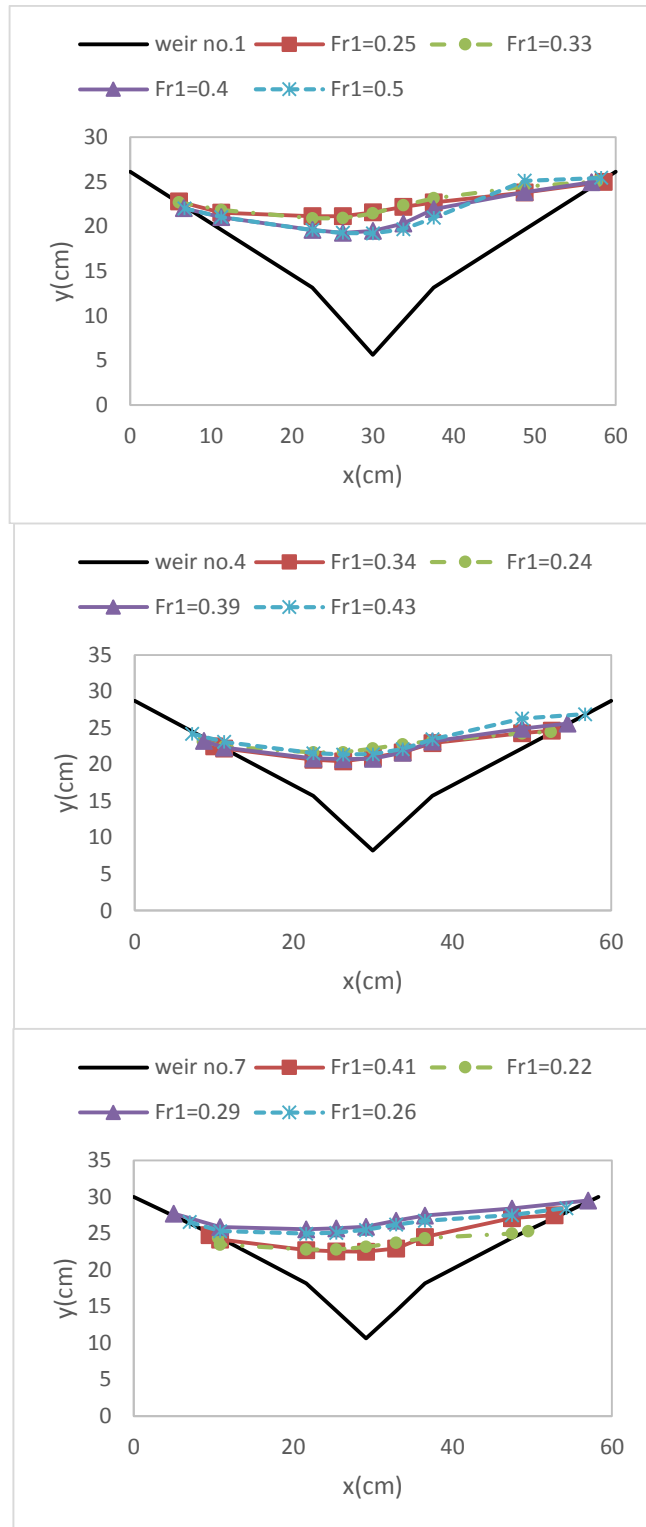


ادامه شکل (۴-۶) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز

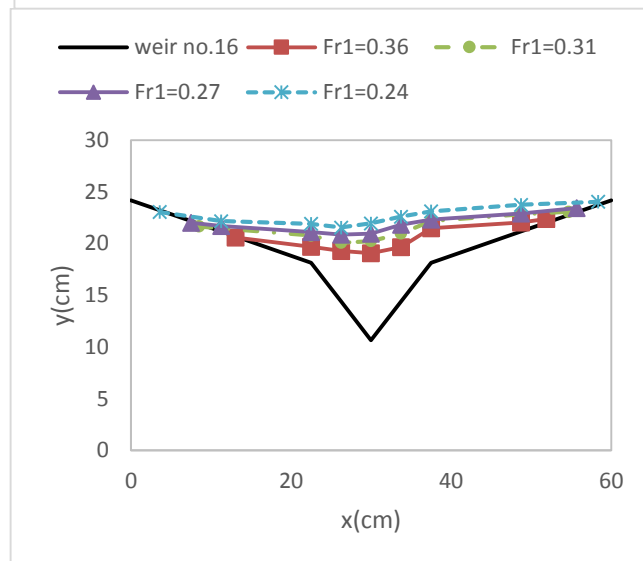
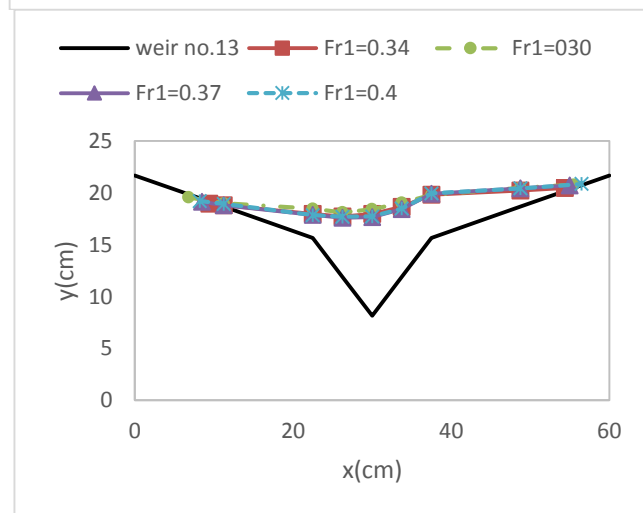
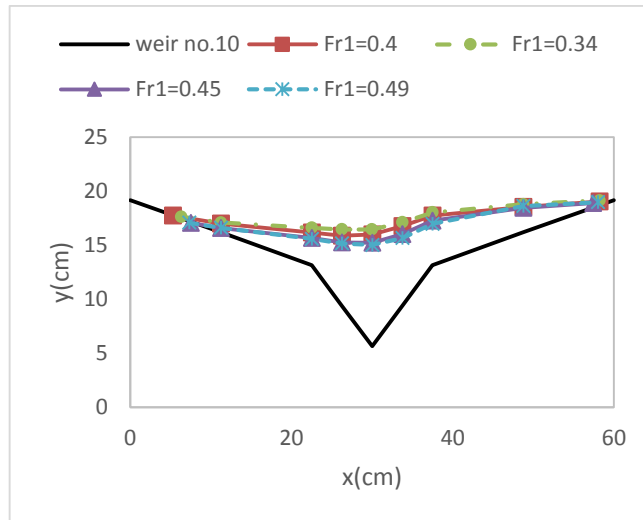


ادامه شکل (۴-۶) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز

با توجه به نمودار های شکل (۴-۶)، ملاحظه می شود که پروفیل جریان در محور مرکزی کانال با شیب ملایمی در حال افزایش است و بعلاوه در ابتدای سرریز این پروفیل تقریبا به حالت افقی می باشد. این بدین معنی است که اثرات ورودی سرریز، محور مرکزی را تحت تاثیر قرار نمی دهد و انتخاب این محور برای اندازه گیری های آزمایش، انتخابی مناسب می باشد. با بررسی پروفیل طولی جریان بر روی تاج سرریز، مشاهده می شود که ارتفاع جریان در ابتدای ورود به سرریز شروع به کاهش کرده به طوری که در وسط سرریز کمترین عمق سطح آب مشاهده می شود. سپس عمق جریان با شیب تندی شروع به افزایش می نماید و در انتهای سرریز عمق سطح آب روی تاج از عمق محور مرکزی کانال فراتر می رود. در تمامی سرریز های این تحقیق این رفتار برقرار می باشد. در ادامه، به کمک نمودار های شکل (۴-۷) به بررسی تاثیر پارامتر عدد فرود جریان بالادست بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز پرداخته می شود.



شکل (۴-۷) بررسی تاثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج در سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی



ادامه شکل (۷-۴) بررسی تاثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج در سرریز جانبی مرکب مثلثی همان طور که در نمودار های فوق پیداست، در اعداد فرود کم، منحنی سطح آب دارای افت عمق کمتری در ابتدای سرریز می باشد و بعد از وسط سرریز نیز جریان شروع به افزایش عمق با شیب

نسبتاً کمتری می نماید. اما با بیشتر شدن مقادیر عدد فرود بالادست مشاهده می شود که کاهش عمق جریان از ابتدای سرریز تا وسط سرریز با شیب تندی ایجاد شده و سپس با شیب بیشتری ارتفاع افزایش می یابد و بعد از آن این افزایش ارتفاع با شیب ملایم تری ادامه خواهد داشت. به طور کلی می توان گفت که افزایش عدد فرود بالادست سبب تغییرات شدید تری در روند تغییرات ارتفاع پروفیل سطح آب بر روی تاج سرریز مرکب جانبی مثلثی-مثلثی می گردد.

۴-۶ مدل سازی عددی

۴-۶-۱ مشخصات مدل عددی

پس از انجام آزمایشات و تجزیه و تحلیل داده های حاصل از آزمایشات، اقدام به مدل کردن فضای آزمایش در نرم افزار Flow-3D می نماییم. مشخصات محیط آزمایشگاهی به طور کامل در قسمت (۳-۷) از فصل سوم تشریح گردیده است. همچنین محدوده پارامترهای آزمایشگاهی نیز در قسمت (۳-۸) فصل قبل آورده شده است. سرریز مورد آزمایش دارای طول دهانه ۶۰ سانتی متر و ضخامت ۲ میلی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر می باشد. همچنین کانال مورد استفاده دارای شیب طولی ۰/۰۰۲ می باشد.

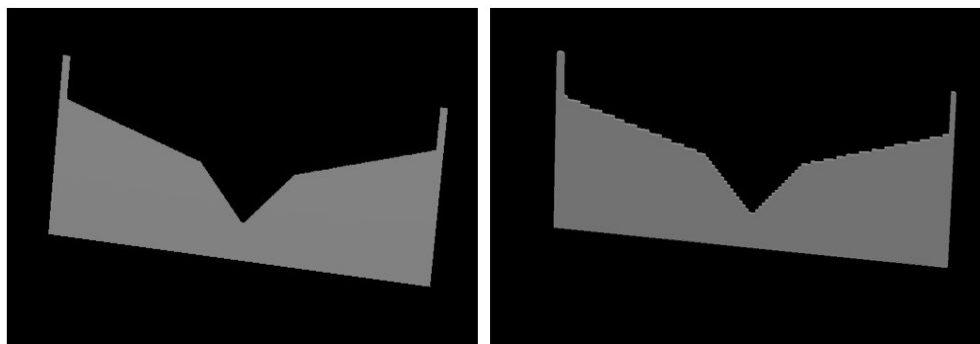
۴-۶-۲ ایجاد هندسه مرزهای جامد

از جمله ویژگی های مناسب نرم افزار Flow-3D امکان طراحی هندسه مورد نظر در نرم افزارهای مخصوص طراحی هندسی از جمله AutoCAD و .. می باشد. مزیت این ویژگی هنگام مدل کردن هندسه های پیچیده بارز تر می گردد. پس از طراحی هندسه مورد نظر و ذخیره آن به فرمت .stl ، امکان وارد کردن این مدل در نرم افزار Flow-3D فراهم می شود.

۴-۶-۳ شبکه بندی

برنامه Flow-3D فقط قابلیت تولید شبکه های حل منظم (مکعبی) را دارد. بدین معنی که مدل مورد نظر فقط می تواند در یک بلوک مکعب مستطیلی قرار گیرد که سلول های آن نیز منظم و به صورت مکعب مستطیل ایجاد می شود. این روش هر چند سرعت تولید شبکه های حل را بالا می برد و قابلیت

تولید نتایج مطلوب را حفظ می کند، اما برای هندسه هایی که دارای اضلاع شیب دار و انحنا دار هستند چندان مناسب نمی باشد. در تحقیق حاضر پس از وارد کردن فایل stl با توجه به اینکه سرریز مورد طراحی به صورت مثلثی-مثلثی می باشد، برای اینکه نرم افزار قادر باشد ضلع های مثلث را بخوبی مدل کند لازم است که اندازه مش ها ریز تر اعمال شود تا ضلع مثل ها به صورت دندانهای مدل نشود. در شکل (۴-۸) اهمیت این موضوع نشان داده شده است.

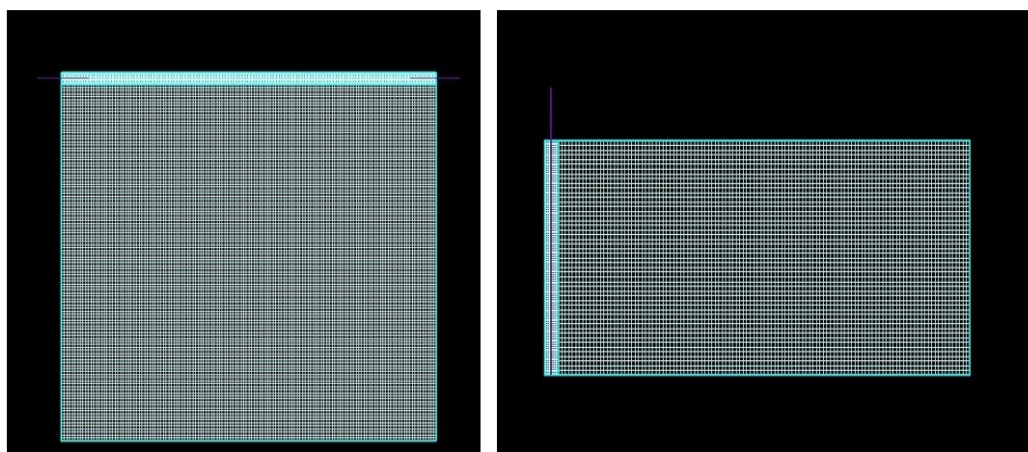


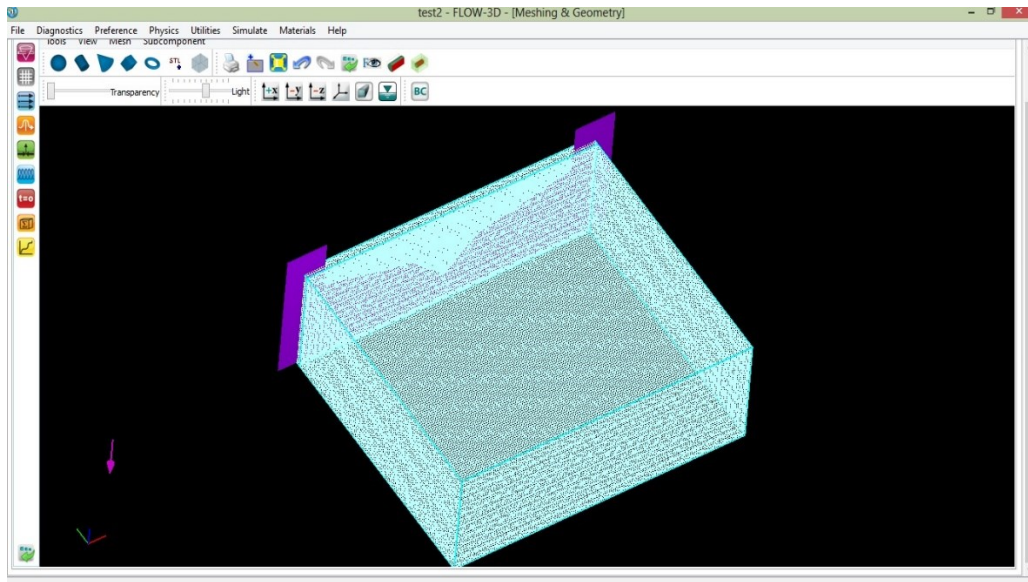
ب) مش بندی با اندازه مناسب

الف) مش بندی با اندازه نامناسب

شکل (۴-۸) اهمیت اندازه مش در مدل کردن مناسب اضلاع شیب دار

شبکه بندی مدل مورد نظر در دو بلوک انجام شده است. بلوک اول ناحیه کانال اصلی را مورد پوشش قرار داده و برای ناحیه شامل سرریز و کانال جانبی، از بلوک دوم استفاده شده است. در شبکه بندی حاضر در قسمت کانال اصلی از مش های درشت تر (۵ میلی متر) و در ناحیه سرریز از مش های ریز تر (۲ میلی متری) استفاده شده است و در مجموع شبکه حل متشکل از ۱۱۰۲۵۰۰ سلول می باشد. شکل (۴-۹) نحوه مش بندی مورد استفاده در این شبیه سازی را نشان می دهد.



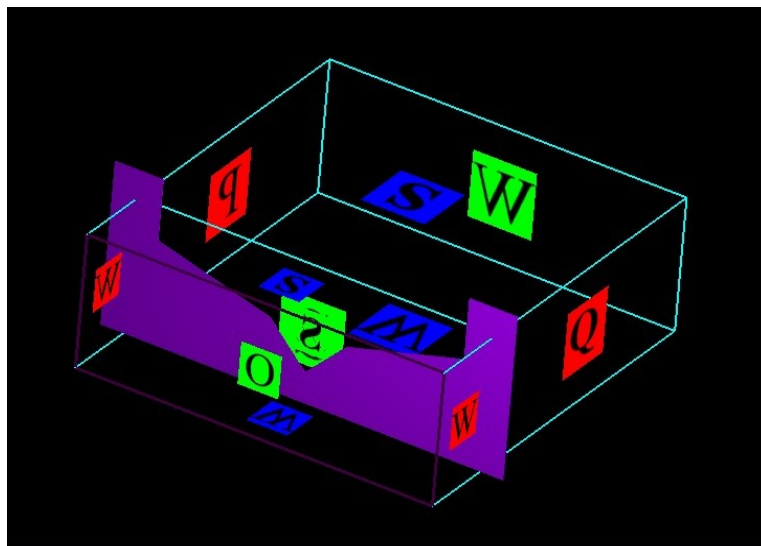


شکل (۴-۹) نمایی از شبکه مش بندی استفاده شده در مدل

از جمله محدودیت های پیش رو در این تحقیق، عدم امکان مدل کردن کل کانال و محدود کردن مش بندی در ناحیه دو طرف سرریز می باشد. با توجه به اینکه سرریز مورد مطالعه از نوع لبه تیز با ضخامت ۲ میلی متر می باشد پس در شبکه بلوک شامل سرریز، از سایز مش بزرگتر از ۲ میلی متر نمی توان استفاده کرد تا سرریز بخوبی مدل گردد. از طرفی در نرم افزار Flow-3D، برای دو بلوک مجاور هم، نسبت سایز مش های این دو بلوک نمی تواند بیشتر از ۲ الی ۳ باشد. با در نظر گرفتن طول ده متری کانال و محدود شدن سایز مش ها به اندازه های در واحد میلی متر و سانتی متر، با تعداد بسیار زیاد سلول در شبکه مش بندی مواجه هستیم. علاوه بر این، کوچک بودن سایز مش ها در قسمت سرریز و در مقابل سرعت به نسبت زیاد جریان در هنگام ریزش از روی سرریز، باعث کوچک شدن گام زمانی حل خواهد شد. به طوری که پس از مدتی گام زمانی به کمتر از 10^{-5} ثانیه رسیده و ثابت می ماند. به دلیل زمان طولانی لازم برای حل (با توجه به گام زمانی) و از طرفی مشکلات قطعی برق در حین اجرای نرم افزار و به تبع آن شروع مجدد شبیه سازی، ناحیه ۲ طرف سرریز به جای کل طول کانال مورد شبیه سازی قرار گرفت. در مورد میزان دقت و مشابه بودن شبیه سازی ناحیه دو طرف سرریز نسبت به کل طول کانال در ادامه این فصل در قسمت (۴-۶-۲) توضیحات لازم داده خواهد شد.

۴-۶-۴ شرایط مرزی

شرایط مرزی از جمله مهمترین قسمت های یک شبیه سازی عددی می باشد. اعمال درست این شرایط و تطبیق مناسب آنها با واقعیت پدیده مورد نظر، لازمه رسیدن به نتایج مطلوب در شبیه سازی عددی می باشد. در تحقیق حاضر و با توجه به شرایط موجود در آزمایشگاه، برای مرز ورودی کانال از شرط دبی با ارتفاع مشخص (volume flow rate)، برای مرز انتهایی کانال فشار مشخصه همراه با ارتفاع (specified pressure)، برای قسمت خروجی کانال جانبی شرط مرزی outflow و برای کف کانال ها گزینه wall استفاده شده است. همچنین برای دیوار های کناری به جز دیواره حاوی سرریز، شرط مرزی wall مد نظر قرار گرفته است. دیواره ای که سرریز در آن قرار دارد و نیز تمامی سطوح بالای سطح آب شرط مرزی تقارن (symmetry) را به خود اختصاص داده اند.



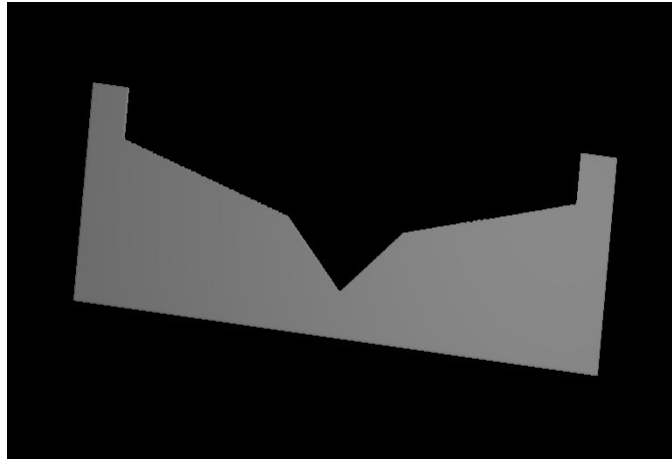
شکل (۴-۱۰) شرایط مرزی مدل شبیه سازی شده

. اطلاعات دبی ورودی به همراه عمق مربوط به آن و نیز ارتفاع مربوط به فشار مشخصه در مرز خروجی در جدول (۴-۳) ارائه شده است.

۴-۶-۵ بررسی مناسب بودن شبکه بندی انجام شده

همانطور که در بخش (۳-۱۱) توضیح داده شد، نرم افزار Flow-3D از ابزار FAVOR برای شبیه سازی سطوح و اجسام صلب استفاده می کند. با اجرای ابزار FAVOR می توان مشاهده کرد که آیا مش بندی مورد استفاده مناسب بوده است و نرم افزار توانسته است هندسه مورد نظر را بخوبی مدل کند یا

خیر. در شکل (۴-۱۱) نتیجه حاصل از اجرای FAVOR بر روی مش بندی اعمال شده بر مدل نشان داده شده است. ملاحظه می شود که با مش بندی انجام شده، هندسه سرریز از نظر شیب اضلاع و محل تقاطع اضلاع مثلث ها و ... بخوبی توسط نرم افزار مدل شده است.



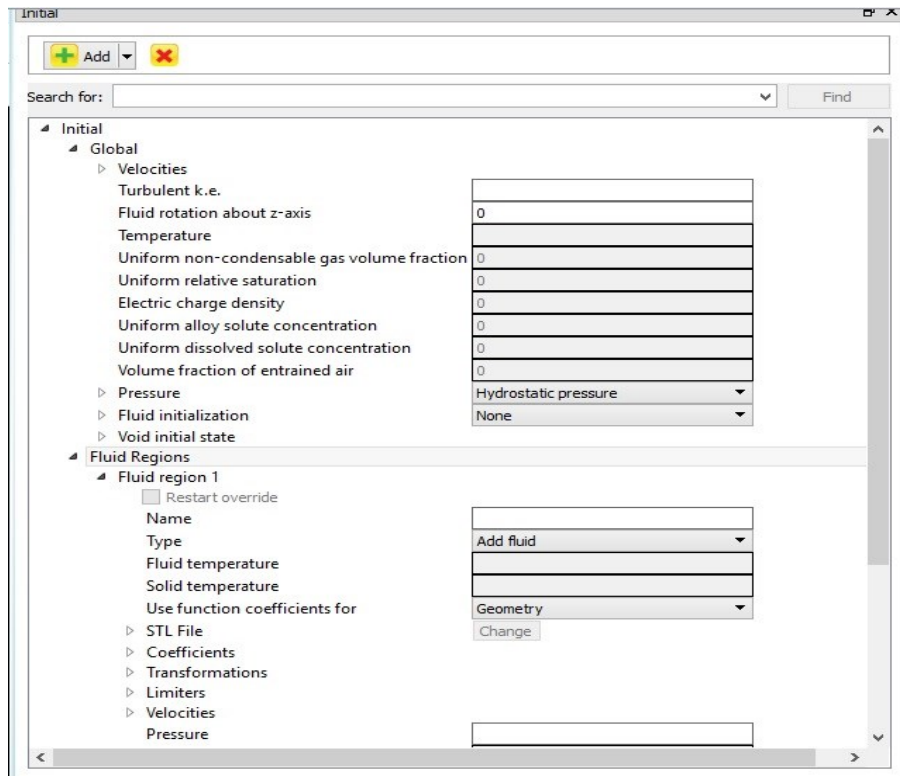
شکل (۴-۱۱) نتیجه اجرای FAVOR برای مش بندی انجام شده بر روی سرریز

۴-۶-۶ تنظیمات اندازه گیری دبی خروجی

در نرم افزار Flow-3D برای اینکه بتوانیم دبی خروجی از یک سطح را اندازه گیری کنیم، باید از گزینه Baffle که در نرم افزار برای این مورد در نظر گرفته شده است استفاده کرد. با قرار دادن یک Baffle در سطح مورد نظر، نیروهای وارد بر آن سطح و نیز دبی خروجی از آن در زمان شبیه سازی قابل محاسبه و ارائه خواهد بود. در مدل حاضر یک Baffle بر روی محور طولی سرریز تعبیه شده است تا دبی عبوری از سرریز توسط آن اندازه گیری شود.

۴-۶-۷ شرایط اولیه

قسمت شرایط اولیه در نرم افزار Flow-3D شامل دو بخش می باشد. در بخش اول، قسمت global، لازم است تا نحوه توزیع فشار تعیین شود که توزیع فشار هیدرواستاتیکی در مقابل گزینه pressur انتخاب می شود. در قسمت fluid regions که قسمت دوم این بخش می باشد، می توان قسمتی از شبکه حل را به سیال اختصاص داد. در مدل حاضر با توجه به داده های اندازه گیری شده در آزمایشگاه، متوسط عمق اندازه گیری شده در ابتدا و انتهای سرریز به عنوان عمق جریان در شرایط اولیه و سرعت معادل با این عمق به عنوان سرعت جریان در شرایط اولیه لحاظ شده است. لازم به توضیح است که اعمال این عمق زمان پایداری شبیه سازی را به طور موثری کاهش می دهد.



شکل (۴-۱۲) تنظیمات مربوط به بخش شرایط اولیه

۴-۶-۱ اعمال شیب طولی کانال

همان طور که گفته شد کانال مورد استفاده دارای شیب طولی ۰/۰۰۲ بوده است که برای اعمال این شیب یا باید در هندسه سرریز این شیب مد نظر قرار می گرفت یا در خود نرم افزار تنظیمات مربوطه اعمال می شد. از آنجایی که شبکه بندی نرم افزار فقط به صورت افقی و آن هم به صورت شبکه های منظم مکعبی قابل اعمال است، ایجاد شیب در هندسه باعث می شود که سلول های شبکه به صورت مورب توسط هندسه صلب قطع شوند که این امر چندان جالب به نظر نمی رسد. روش مناسب تر برای اعمال شیب طولی، لحاظ کردن شیب در قسمت مولفه های گرانش می باشد. در این صورت علاوه بر محور Z، محور X نیز دارای مولفه گرانشی خواهد بود که میزان این مولفه ها در رابطه (۴-۱۳) آورده شده است.

$$\begin{cases} g_x = g \sin(\theta) \\ g_z = -g \cos(\theta) \end{cases} \quad (4-13)$$

در رابطه فوق، θ زاویه معادل با شیب طولی مورد نظر می باشد.

۴-۶-۹ انتخاب مدل آشفتگی

در مورد انتخاب مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق و نیز دلیل انتخاب این مدل، در بخش (۳-۱۳) از فصل سوم توضیحات لازم داده شده است. همان طور که عنوان شد، مدل RNG (renormalized group) به عنوان مدل مناسب تر انتخاب گردیده است.

۴-۶-۱۰ زمان شبیه سازی

زمان مناسب شبیه سازی برای هر مدل مقدار زمانی است که جریان در آن مدت به شرایط پایدار خود برسد. انتخاب شرایط اولیه مناسب و نیز اعمال شرایط مرزی منطبق با واقعیت در تعیین زمان شبیه سازی موثر خواهند بود و باعث کاهش زمان لازم برای رسیدن به پایداری خواهند شد. در تحقیق حاضر پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای اجرا ۱۵ ثانیه مد نظر قرار گرفت.

۴-۷ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی

پس از پایان شبیه سازی به بررسی و تحلیل نتایج حاصل از مدل سازی عددی پرداخته می شود. برای سنجش میزان توانایی نرم افزار در مدل کردن جریان بر روی سرریز مورد بحث، نتایج حاصل از شبیه سازی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه خواهند شد. برای این منظور ابتدا به بررسی نتایج ارائه شده توسط نرم افزار برای دبی عبوری از روی سرریز و مقایسه این مقادیر با نتایج آزمایشگاهی پرداخته می شود.

۴-۷-۱ مقایسه مقادیر دبی آزمایشگاهی و عددی

یکی از اهداف اصلی این شبیه سازی تعیین دبی خروجی از سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی توسط نرم افزار Flow-3D و تعیین میزان دقت این نرم افزار در محاسبه دبی خروجی بر روی سرریز مذکور می باشد. لذا در این پژوهش ۳ مدل با دبی های مختلف شبیه سازی و دبی های خروجی آنها با مقادیر اندازه گیری شده در آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصله به همراه اطلاعات ورودی در جدول (۴-۳) قابل مشاهده است.

مشخصات سرریز های استفاده شده در شبیه سازی با توجه به شماره آنها، از جدول (۳-۲) فصل سوم قابل دسترسی می باشد. دلیل انتخاب این سرریز ها برای شبیه سازی، دقت بالای اندازه گیری جریان بر روی آنها می باشد.

جدول (۳-۴) مقایسه مقادیر دبی محاسبه شده توسط نرم افزار به دبی آزمایشگاهی

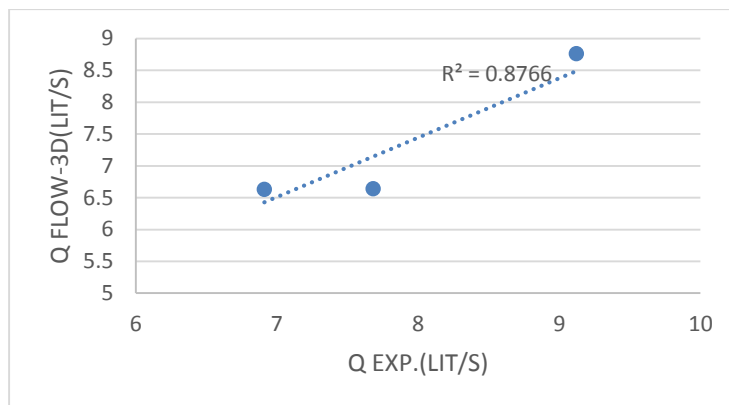
Model No.	Weir No.	Q _{inlet} (lit/s)	عمق بالادست سرریز (cm)	عمق پایین دست سرریز (cm)	Q _{s exp.} (lit/s)	Q _{s FLOW3-D} (lit/s)	Error %
۱	۱۰	۵۵/۰۱	۱۸/۳۲	۱۸/۶۲	۹/۱۲	۸/۷۶	۳/۹۴
۲	۱۰	۶۰/۱۳	۱۶/۶۵	۱۶/۹۵	۶/۹۱	۶/۶۳	۴/۰۵
۳	۱۳	۵۵	۲۱/۸۹	۲۲/۲۵	۷/۶۸	۶/۶۴	۱۳/۳۶

برای محاسبه خطای نسبی جدول فوق از رابطه (۴-۱۴) استفاده شده است:

$$Error \% = 100 * \frac{Q_{Exp.} - Q_{FLOW-3D}}{Q_{Exp.}} \quad (۴-۱۴)$$

با توجه به جدول (۳-۴) مشاهده می شود مقادیر خطاها در حد قابل قبولی بوده و در نتیجه مدل Flow-3D قابلیت مناسبی در مدل کردن جریان آشفته بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی دارد.

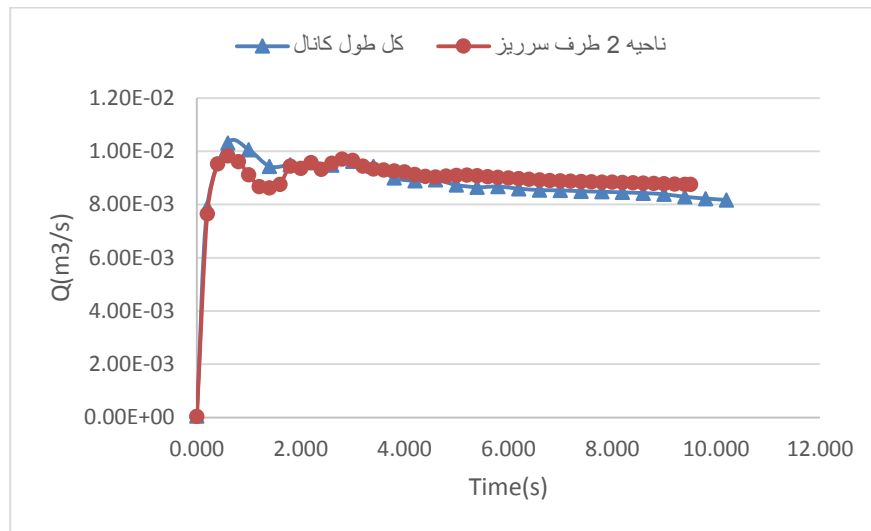
همچنین نمودار دبی آزمایشگاهی نسبت به دبی محاسبه شده توسط نرم افزار در شکل (۴-۱۳) ارائه شده است.



شکل (۴-۱۳) نمودار دبی آزمایشگاهی نسبت به دبی عددی

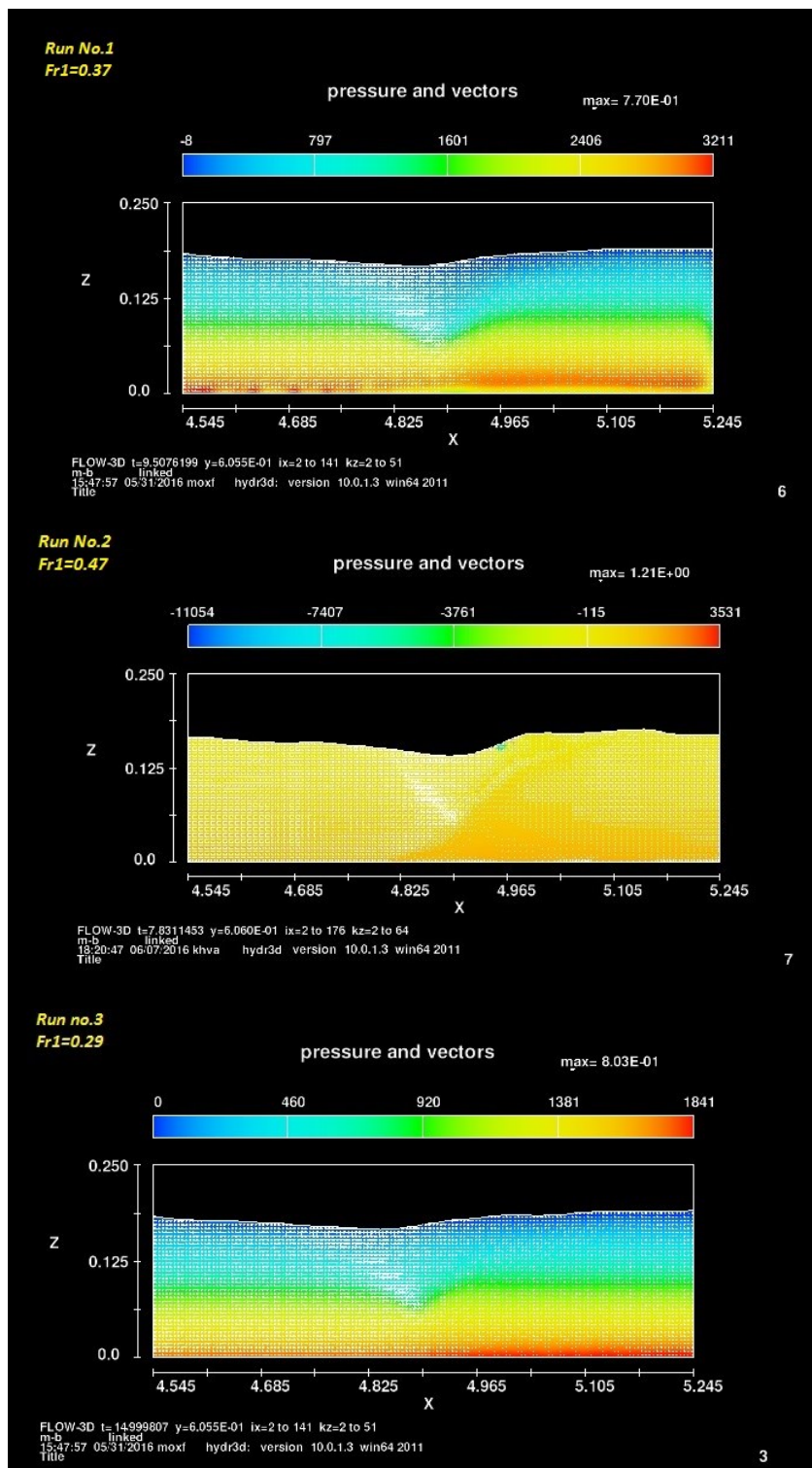
۴-۷-۲ بررسی میزان شباهت مدل کردن ناحیه دو طرف سرریز به جای کل طول کانال همان طور که قبلاً ذکر شد به دلیل محدودیت های بررسی شده، به مدل کردن ناحیه دو طرف سرریز به جای کل طول کانال اقدام گردید. در این مورد لازم به ذکر است که تصمیم به شبیه سازی ناحیه دو طرف سرریز به جای کل طول کانال، تا حد خوبی قابل قبول می باشد. در تحقیق حاضر ابتدا یک مدل با زمان ۱۰ ثانیه در کل طول کانال شبیه سازی شده و سپس همان مدل با مش بندی در ناحیه دو

طرف سرریز نیز مدل شده است. با مقایسه نمودار دبی عبوری بر حسب زمان برای مدل ذکر شده، روند تغییرات دبی برای مش بندی کل طول کانال و ناحیه دو طرف سرریز تقریباً مشابه به هم می باشد و اختلاف آنها در حد مناسبی می باشد. در شکل (۴-۱۴) نحوه تغییرات منحنی دبی بر حسب زمان در دو حالت شبیه سازی کل طول کانال و ناحیه دو طرف سرریز آورده شده است.



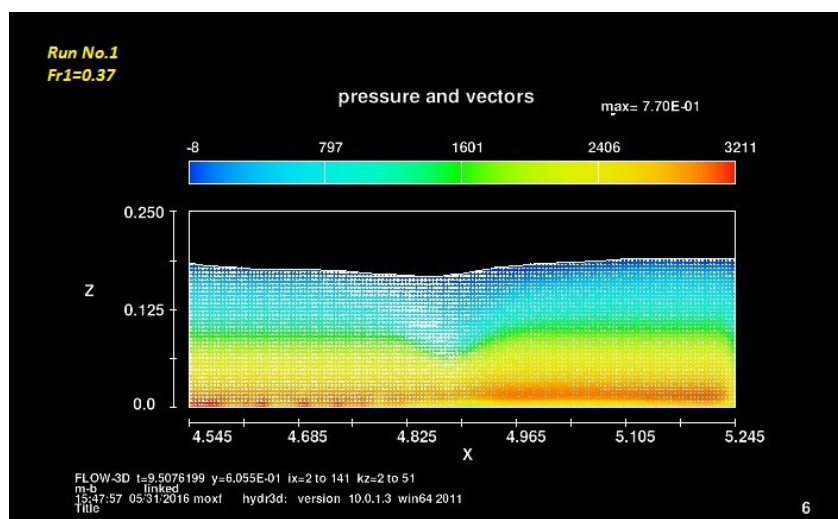
شکل (۴-۱۴) بررسی تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان در شبیه سازی کل کانال و ناحیه دو طرف سرریز

۴-۶-۳ بررسی شکل پروفیل سطح آب محاسبه شده توسط نرم افزار بر روی تاج سرریز همان گونه که مشاهده شد نرم افزار FLOW-3D در محاسبه دبی عبوری از روی سرریز در مقایسه با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی، جواب های قابل قبولی را به نمایش گذاشت. در مرحله بعدی به بررسی پروفیل طولی سطح آب در محل تاج سرریز پرداخته می شود و شکل محاسبه شده توسط نرم افزار برای این پروفیل با شکل بدست آمده از داده های آزمایشگاهی، برای سه مدل شبیه سازی شده، مقایسه خواهد شد. در شکل (۴-۱۵) پروفیل های بدست آمده برای منحنی سطح آب تاج سرریز حاصل از شبیه سازی نرم افزار، ارائه شده است.

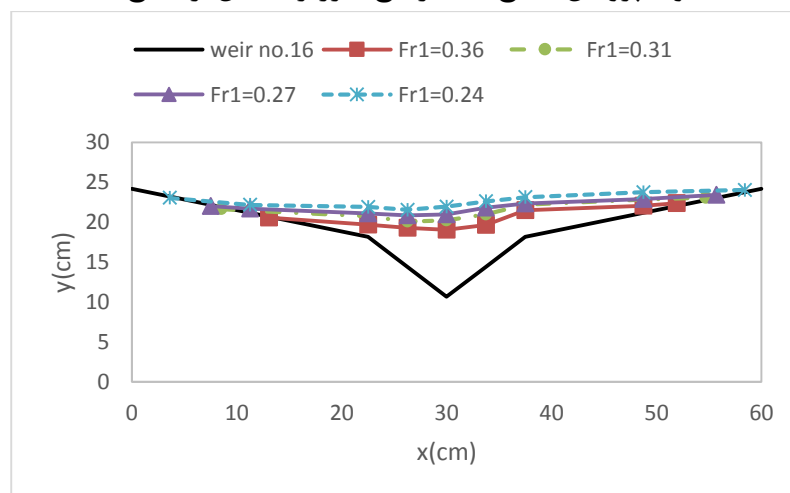


شکل (۴-۱۵) بررسی نتایج ارائه شده توسط نرم افزار برای پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز با توجه به تصاویر شکل (۴-۱۵) مشاهده می شود منحنی سطح آب از ابتدای سرریز شروع به کاهش ارتفاع نموده و این کاهش تا وسط سرریز ادامه خواهد داشت و بعد از آن شاهد افزایش ارتفاع سطح آب با شیبی بیشتر از شیب مربوط به کاهش ارتفاع، خواهیم بود. مشاهده می شود که روند تغییر ارتفاع

سطح آب در تاج سرریز که توسط نرم افزار محاسبه شده است مشابه پروفیل های آزمایشگاهی ارائه شده در شکل (۷-۴) برای منحنی سطح آب تاج سرریز می باشد. برای مشاهده بهتر این موضوع، یک نمونه پروفیل حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی در شکل (۴-۱۶) ارائه شده است.



الف) نمونه پروفیل سطح آب در تاج سرریز حاصل از نتایج عددی



ب) نمونه پروفیل سطح آب در تاج سرریز بدست آمده از داده های آزمایشگاهی شکل (۴-۱۶) نمونه پروفیل های آزمایشگاهی و عددی برای منحنی سطح آب در تاج سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی

فصل پنجم
خلاصه نتایج و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

در مطالعه حاضر، سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش آزمایشگاهی ۱۸ عدد سرریز با زاویه ۹۰ درجه در مثلث پایینی وزوایای ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه برای مثلث بالایی همراه با تغییر در ارتفاع تاج مقطع، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. در مجموع ۳۲۷ آزمایش در شرایط جریان زیر بحرانی انجام شد که از این بین ۱۴۶ آزمایش مربوط به سرریز های تیپ ۱ با زاویه ۹۰ درجه برای مثلث پایین و ۱۲۰ درجه برای مثلث بالا بوده و مابقی آزمایشات سرریز های تیپ ۲ را شامل می شود که زاویه مقطع بالایی در آنها به ۱۵۰ درجه تغییر داده شده است. در آزمایش های این تحقیق دبی عبوری توسط فلومتر التراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه و با متوسط گیری در بازه ۱۰۰ ثانیه اندازه گیری شده است. اندازه گیری دبی خروجی از سرریز مرکب با توجه به ارتفاع آب عبوری توسط یک سرریز نرمال مثلثی ساده که در کانال جانبی تعبیه و کالیبره شده است انجام شد. اندازه گیری های مربوط به عمق در محور مرکزی کانال و نیز در محل تاج سرریز با دقت ۰/۰۱ میلی متر به کمک عمق سنج دیجیتال انجام شده است. داده های حاصل از اندازه گیری آزمایشگاهی به محیط نرم افزار اکسل انتقال یافت. با تعیین پارامتر های مهم تاثیر گذار بر ضریب دبی عبوری، اقدام به انجام آنالیز ابعادی و تشخیص پارامتر های بی بعد موثر بر ضریب دبی گردید و سپس رابطه ای برای ضریب دبی بر حسب پارامتر های مذکور برای دو روش مستقیم و دیمارچی پیشنهاد شد. برای یافتن ضرایب مجهول رابطه ضریب دبی، از ابزار Solver که در نرم افزار اکسل تعبیه شده است استفاده گردید و مقدار بهینه این ضرایب طوری تعیین شد که دبی عبوری حاصل از این روابط با دبی آزمایشگاهی کمترین اختلاف را داشته باشد. پس از مشخص شدن ضرایب مجهول، نمودار ضریب دبی و دبی بدست آمده از این روابط نسبت به ضریب دبی و دبی آزمایشگاهی برای هر روش رسم و ارائه گردید. همچنین پارامتر های ارزیابی خطا برای تعیین میزان دقت این روابط به کار برده شد.

در بخش عددی به کمک نرم افزار FLOW-3D به شبیه سازی جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی اقدام شد. برای انجام مدل سازی، ابتدا مقطع هندسی سرریز توسط نرم افزار AutoCAD ساخته شده و به صورت فایل .stl به نرم افزار FLOW-3D وارد می گردد. در ادامه، مش بندی هندسه انجام و شرایط مرزی مدل تعریف می شود. در مرحله بعدی یک Baffle برای اندازه گیری دبی خروجی از سرریز، در محل سرریز تعبیه گردید. تاثیر شیب طولی کانال در گرانش مربوط به راستای X اعمال شد. با انتخاب سیال ویسکوز، مدل آشفتگی RNG با توجه به پیشنهاد دیگر محققین برای حل جریان آشفته انتخاب شد. شرایط اولیه برای مدل سازی شامل محیط پر از سیال با ارتفاع میانگین اعماق دو طرف سرریز و سرعت معادل با این ارتفاع برای کل طول کانال مش بندی می باشد.

با انتخاب زمان ۱۵ ثانیه به عنوان زمان بهینه، شبیه سازی توسط نرم افزار انجام شد. پس از پایان شبیه سازی، دبی خروجی بدست آمده از نرم افزار با دبی خروجی آزمایشگاهی مقایسه و میزان خطای آن ارائه گردد. برای بررسی بیشتر، پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز که توسط نرم افزار محاسبه شده است با پروفیل بدست آمده از داده های آزمایشگاهی مقایسه شد. خلاصه نتایج و پیشنهادات این تحقیق در ادامه آورده شده است.

۵-۲ خلاصه نتایج

خلاصه نتایج این فصل که شامل پاسخ به سوالات مطرح شده در فصل اول است به صورت زیر ارائه می گردد:

۱- با توجه به روش محاسبه برای ضریب دبی، پارامترهای موثر بی بعد حاصل از آنالیز ابعادی به صورت زیر بدست آمده است:

الف) ضریب دبی مستقیم سرریز مرکب مثلثی-مثلثی :

در مورد ضریب دبی مستقیم سرریز مذکور پارامترهای بی بعد موثر شامل $\frac{y_1}{h}$ و Fr_1 می باشد که تاثیرات Fr_1 نسبت به پارامتر دیگر بیشتر می باشد.

ب) ضریب دبی دیمارچی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی

طبق نتایج آنالیز ابعادی، در روش دیمارچی پارامترهای Fr_1 و $\frac{y_1}{B}$ و $\frac{y_1}{w}$ و $\frac{y_1}{l}$ بر ضریب دبی دیمارچی موثر می باشند.

۲- پس از آنالیز ابعادی و مشخص شدن پارامترهای بی بعد موثر، رابطه ای برای ضریب دبی در هر کدام از روش های دیمارچی و مستقیم پیشنهاد شده و ضرایب مجهول آنها مشخص گردید. نتایج برای رابطه ضریب دبی به صورت زیر ارائه شده است :

$$:\theta_1 = 90, \theta_r = 120$$

$$C_d = -0.008 + 0.424Fr_1^{-0.142} + 0.150 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.164}$$

$$\& \quad \theta = 114.51 \quad (1)$$

$$:\theta_1 = 90, \theta_r = 150$$

$$C_d = 0.226 + 0.244Fr_1^{-0.141} + 0.224 \left(\frac{y_1}{h}\right)^{0.096}$$

$$\& \quad \theta = 139.32 \quad (2)$$

$$:\theta_1 = 90, \theta_r = 120$$

$$C_m = -6.049 + 1.294Fr_1^{-0.12} + 1.021 \left(\frac{y_1}{B}\right)^{-0.037} + 0.140 \left(\frac{y_1}{W}\right)^{-5.583}$$

$$+ 3.92 \left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.012}$$

$$\& \quad \theta = 113.35 \quad (3)$$

$$:\theta_1 = 90, \theta_r = 150$$

$$C_m = 0.337 + 0.076Fr_1^{-0.209} - 0.201 \left(\frac{y_1}{B}\right)^{1.048} + 1.583 \left(\frac{y_1}{W}\right)^{-2.555}$$

$$+ 3.916 \left(\frac{y_1}{L}\right)^{0.221}$$

$$\& \quad \theta = 150 \quad (4)$$

که در روابط بالا Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، B عرض کانال، \bar{w} ارتفاع تاج معادل، L طول سرریز و h عمق سطح آب روی تاج سرریز می باشند.

۳- با توجه به اینکه در سرریز های مرکب ارتفاع تاج مقاطع در طول سرریز تغییر می کند، در روند انجام محاسبات برآورد دبی مشکلاتی ایجاد خواهد شد. برای حل این مشکل به جای ارتفاع تاج های متغیر از یک ارتفاع تاج معادل (\bar{W}) استفاده گردیده است. بدین صورت که سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به یک سرریز ساده با ارتفاع تاج ثابت (\bar{W}) معادل شده است.

۴- برای بررسی صحت فرض دیمارچی در مورد عدم اتلاف انرژی جریان هنگام عبور از سرریز جانبی، نمودار انرژی مخصوص جریان در بالادست و پایین دست سرریز رسم شد. مشاهده شد که تغییرات

انرژی مخصوص در حد بسیار کمی بوده است و لذا فرض دیمارچی در مورد سرریز های جانبی مرکب نیز صادق است.

۵- با محاسبه ضرایب دبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی به دو روش دیمارچی و مستقیم، می توان دبی را محاسبه کرد. نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد که هر دو روش فوق دقت مناسبی در برآورد دبی عبوری از سرریز مذکور دارا هستند. لازم به ذکر است روش مستقیم با کمی دقت بیشتر دبی را با تقریب بهتری برآورد می کند.

۶- مطالعه مارتینز و همکاران و همچنین پیراتیپان و همکاران موید این مطلب بود که برای سرریز های مرکب مثلثی-مثلثی نرمال، منحنی دبی اشل در تمامی اعماق روی جریان پیوسته است. برای بررسی این موضوع در مورد سرریز جانبی مرکب مثلثی-مثلثی، نمودار دبی بر حسب ارتفاع برای چند سرریز رسم و ارائه شد. نتایج حاکی از آن است که برای نوع جانبی سرریز مرکب مثلثی-مثلثی همانند نوع نرمال آن، پیوستگی منحنی دبی اشل در همه ی اعماق برقرار است.

۷- در تحقیق حاضر سرریز مرکب مثلثی-مثلثی با نرم افزار FLOW-3D مدل شده و نتایج حاصل از آن برای دبی عبوری از سرریز و منحنی سطح آب در تاج سرریز، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. طبق نتایج بدست آمده، برای دبی های محاسبه شده توسط نرم افزار خطاهای نسبی ۳/۹۴ ، ۴/۰۵ و ۱۳/۳۶ بدست آمده است. همچنین منحنی سطح آب در تاج سرریز که توسط نرم افزار محاسبه شد با شکل آزمایشگاهی مقایسه شد و این مقایسه حاکی از شباهت پروفیل سطح آب بدست آمده توسط نرم افزار و داده های آزمایشگاهی دارد. با توجه به خطاهای بدست آمده برای دبی عبوری و شباهت پروفیل سطح آب در دو حالت، نرم افزار FLOW-3D دقت قابل قبولی در شبیه سازی جریان بر روی سرریز لبه تیز مرکب جانبی مثلثی-مثلثی ارائه کرده است.

۳-۵ پیشنهادات

۱- در مطالعه حاضر زاویه رأس مثلث پایینی ثابت بوده و برای مثلث بالایی دو زاویه در نظر گرفته شده است. برای بررسی گسترده تر و جامع تر بر روی سرریز مورد بحث، پیشنهاد می شود مطالعات بیشتری با تغییر در زوایای رأس مثل های پایینی و بالایی انجام گیرد.

۲- در همه ی آزمایشات انجام شده در این سرریز، کانال دارای عرض ثابتی بوده است. با توجه به اینکه پارامتر عرض کانال یکی از پارامتر های تاثیر گذار بر ضریب دبی می باشد، لذا لازم است اثر تغییرات آن بر ضریب دبی دیده شود. در مطالعه حاضر این پارامتر به صورت شکل بی بعد $\left(\frac{V_1}{B}\right)$ بر ضریب دبی تاثیر می گذارد که به دلیل ثابت بودن، تاثیرات آن در حد چشمگیری نخواهد بود. لذا می توان در مطالعات بعدی، اثرات تغییر این پارامتر را بر ضریب دبی بررسی نمود.

۳- در تحقیق حاضر به دلیل محدودیت زمانی، تنها مدل $k - \varepsilon$ RNG بنا به پیشنهادات محققین دیگر، برای حل میدان آشفته جریان مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به ماهیت پیچیده جریان های آشفته لازم است تا دیگر مدل های آشفتگی نیز برای سرریز مذکور به کار گرفته شود و نسبت به هم مقایسه گردد.

۴- با توجه به امکانات محدود در محیط آزمایشگاه، امکان بررسی تاثیرات مختلف هیدرولیکی و هندسی بر ضریب دبی وجود ندارد. اما با توجه به نتایج تحقیق حاضر و تایید نرم افزار FLOW-3D بر شبیه سازی جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی، این امکان فراهم شده است تا با استفاده از این نرم افزار به بررسی کامل تر سرریز مذکور پرداخته شود.

- [١] United States Bureau of Reclamation (USBR), (1963). "Compound weir study" *Hydraulic Laboratory Report* No. Hyd. 505, 34 p.
- [٢] Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., Lopez, J.G., (2005). "Design and calibration of a compound sharp-crested weir" *J. Hydraul. Eng., ASCE* 131 (2), 112–116.
- [٣] Piratheepan, M., Winston, N.E.F., Pathirana, K.P.P., (2006). " Discharge measurements in open channels using compound sharp-crested weirs" *J. Ins. Eng., sri Lanka*. No. 03, 31.
- [٤] De Marchi, G., (1934). "Essay on the performance of lateral weirs" *L'Energia Elettrica Milano*, vol. 11, No. 11, Italy, pp. 849–860.
- [٥] Subramanya, K., Awasthy, S.C., (1972). "Spatially varied flow over side weirs" *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., ASCE* 98 (1), 1–10.
- [٦] Ranga Raju, K.G., Parasad, B., Gupta, S.K., 1979. "Side weir in rectangular channel". *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., ASCE* 105 (5), 547–554.
- [٧] Kumar, C.P. and Pathak, S.K. (1987). "Triangular side weirs" *J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE*, 113(1), pp 98-105.
- [٨] Singh, R., Manivannan, D., Satyanarayana, T., (1994). "Discharge coefficient of rectangular side weirs" *J. Irr. Drain. Eng., ASCE* 120 (4), 814–819.
- [٩] Jalili, M.R., Borghei, S.M., 1996. Discussion of "Discharge coefficient of rectangular side weirs", by Singh, R., Manivannan, D., Satyanarayana, *T. J. Irr. Drain. Eng., ASCE* 122 (2), 132.
- [١٠] Borghei, S.M., Jalili, M.R., Ghodsian, M., 1999. "Discharge coefficient for sharp crested side weir in subcritical flow". *J. Hydraul. Eng., ASCE* 125 (10), 1051–1056.

[۱۱] Ghodsian, M., (2004). "Flow over Triangular Side Weir" Scientia Iranica, Sharif University of Technology, Vol. 11, Nos. 1&2, 114-120.

[۱۲] Honar, T. and Keshavarzi, A. 2009. "Effect of Rounded-Edge Entrance on Discharge Coefficient of Side Weir in Rectangular Channels". Journal of Irrigation and Drainage. 58: 482-491.

[۱۳] اکبری طائمه، ر. و قدسیان، م. (۱۳۹۰) " تعیین آبگذری سرریز جانبی لبه تیز مثلثی " دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه گیلان

[۱۴] Delkash, M. Ebrazhi bakhshayesh, B. , 2014 "An Examination of Rectangular Side Weir Discharge Coefficient Equations under Subcritical Condition " International Journal of Hydraulic Engineering, 3(1):24-34

[۱۵] ریاحی، ص. و وطن خواه، ع. ر. (۱۳۹۴) " محاسبه بده سرریز جانبی ذوزنقه ای در رژیم جریان زیر بحرانی با استفاده از تئوری سرریز معمولی " نشریه آب و خاک، جلد ۲۹، شماره ۱، ص ۳۳-۳۴

[۱۶] پرندین، م. ح. و حیدرپور، م. و پرندین، م. ا. (۱۳۹۴) " بررسی خصوصیات جریان در سرریز جانبی مستطیلی " نشریه پژوهش های علوم کاربردی آب، سال اول، شماره اول، ص ۲۲-۱۳

[۱۷] LMNO Engineering Research and Software Ltd. (1999) "Focus on open channel flow measurement: V-notch weirs" Newsletter, Vol. 1, Athens, Ohio.

[۱۸] Jan, C.D., Chang, C.D., Lee, M.H., 2006. "Design and calibration of a compound sharp-crested weir", by Martinez, J., Reza, J., Morillas, M.T., Lopez, J.G. J. Hydraul.

[۱۹] ظهیری، ع. ا. و باقری، س. و قبادیان، ر. و دهقانی، ا. ا. و مفتاح هلقی، م. (۱۳۹۲). " بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب " مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد بیستم، شماره اول

[۲۰] عامری، م. و احمدی، ا. و دهقانی، ا.ا. (۱۳۹۴) " تعیین ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی - مستطیلی " مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و دوم، شماره سوم، ص ۱۰۵-۱۲۰

[۲۱] ایزدی نیا، ا.، م. حیدرپور و ع. کبیری سامانی. ۱۳۸۶. "تعیین پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی با استفاده از روش های حل عددی". ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، کرمان - دانشگاه شهید باهنر.

[۲۲] Uyumaz, A. and Smith, R.H. "Design procedure for flow over side weirs" J, Irrig. and Drain. Engrg. , ASCE, 117(1), pp 79-90 (1991)

[۲۳] سیاری، س.، ح. حدادی و م. رحیم پور. ۱۳۹۱. "ترسیم پروفیل سطح آب در سرریز جانبی دوزنقه ای لبه پهن با استفاده از روشهای عددی. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران" ارومیه - دانشگاه ارومیه، ۱۶ تا ۱۸ آبان ۱۳۹۱

[۲۴] محمدیان، ب. و ظهیری، ع. و مفتاح حلقی، م. و طوفانی موقر ه. (۱۳۹۳) " شبیه سازی عددی جریان از روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب با استفاده از نرم افزار FLOW-3D " یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ارومیه، دانشگاه ارومیه

[۲۵] قربانی، م. و ابراهیمی، ح. (۱۳۹۴) " مطالعه عددی ضریب آبگذری سرریز لبه تیز مرکب(مثلثی- مستطیلی) " کنفرانس سالانه تحقیقات در مهندسی عمران معماری و محیط زیست پایدار، تهران، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا، ۲۴ آذر ۱۳۹۴

[۲۶] حسینی، م. و ابریشمی، ج. (۱۳۸۹) " هیدرولیک کانال های باز " جلد اول، چاپ بیست و سوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد

[۲۷] Henderson, F. M. (1966). "Open channel flow", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

[۲۸] Kindswater, C.E., and Carter, R.W. (1959) "Discharge characteristics of rectangular thin plate weirs", Trans. American Society of Civil Engineering, Vol. 124, pp.772-822.

[۲۹] قاسم زاده، ف. کوچک زاده، ص. (۱۳۹۲) "شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D" جلد

اول، چاپ دوم، انتشارات نوآور

Abstract

Side weirs are common hydraulic structures in water transmission channels, Irrigation systems and sewage collection. This structure also can be used as flood diversion structure at flooded conditions. Triangular weir can measure low discharges accurately but not suitable for high discharges. therefore compound type of triangular weir is used to both purpose of accurate measurement and ferry high discharges. There have been no study done for sidelong type of compound triangular-triangular weir. So in this study compound triangular-triangular sharp-crested side wires were studied experimentally and numerically in subcritical flow conditions. By Using experimental data and dimensional analysis, effective parameters in discharge coefficient of this weir were specified in direct and De marchi methods and in each methods an equation Presented for discharge coefficient. Results from this equations have suitable adaptation with the experimental results. Besides, effects of changing upstream fluid number on water surface changes along crest of weir(on the crest) was checked. Observations illustrates that with imcreasing the upstream fluid number, water surface changes on the crest of the weir increases.

In numerical section, flow over discussed weir was simulated using FLOW-3D software. Due to time constraints and costs needed for laboratory investigations and on the other hand the increasing development of computational fluid dynamics models and the ability of these models to simulate various conditions for the phenomenon under study, more justified will be to use this models. the purpose of this simulation is to evaluate the FLOW-3D software's ability to simulate flow over compound triangular-triangular sharp-crested side wires. Flow situation in this simulation was introduced as turbulent flow to model.

Among the available turbulence models in this application, *RNG $k - \epsilon$* model as the model proposed by other researchers, was used to solve the equations of turbulent flow. comparison between silmulation results and experimental results,illustrates the suitable accuracy for FLOW-3D model to simulate flow over compound triangular-triangular sharp-crested side wires. So that the values calculated by the software for overflow discharge compare with experimental data had little differences.also surface shape on weir crest was modeled property. also the software could properly calculates the shape of water surface profile on the crest of the wier.

Key words: Side weir, Triangular weir, Dimensional analysis, Discharge coefficient, Flow-3D, Numerical model



Shahrood University of Technology
Faculty of Civil Engineering

MSc Thesis in Hydraulic Structures Engineering

**Experimental and numerical modeling of compound
triangular-triangular sharp-crested side weirs**

By: Hossein Khorshidi Mianaii

Supervisor:
Dr. Ahmad Ahmadi

Advisor:
Dr. Mojtaba Ameri

July 2016