

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

رشته مهندسی عمران گرایش سازه های هیدرولیکی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه های هیدرولیکی

تعیین ضریب آبگذری سرریز های لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی به روشهای عددی

و آزمایشگاهی

نگارنده: ایمان صائبی حصاری

استاد راهنما:

دکتر احمد احمدی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی عامری

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ۱۰۷
 تاریخ: ۲۰/۱۲/۹۵
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای ایمان صائبی حصارى به شماره دانشجویی ۹۲۳۷۵۱۴ رشته عمران گرایش سازه های هیدرولیکی تحت عنوان تعیین ضریب آبگذری سرریز های لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی به روشهای عددی و آزمایشگاهی که در تاریخ ۹۵/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: ۲ امتیاز ۱۷/۹۹) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۷/۹۹)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۵ - ۱۴/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار		۱- استاد راهنمای اول دکتر احمد احمدی
			۲- استاد راهنمای دوم
			۳- استاد مشاور دکتر مجتبی عامری
	استادیار		۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی دکتر مهدی گلی
	استاد		۵- استاد ممتحن اول دکتر امیر عباس عابدینی
	استاد		۶- استاد ممتحن دوم دکتر سعید گلیان

رئیس دانشکده: دکتر احمد احمدی

این اثر را در سبدهی از عشق و قدر دانی تقدیم میکنم به:

دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده ام برسم .

و به همسرم، اسطوره زندگیم، پناه خستگیم و امید بودنم که شوق آینده را در من زنده نگاه می دارد.

ایمان صائبی حصارى

بهمن ۹۵

تقدیر و تشکر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، به زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ برحسب وظیفه از استاد باکمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر احمد احمدی که در کمال سعه صدر، باحسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از جناب دکتر مجتبی عامری، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی رسید؛ از جناب مهندس حسین خورشیدی که در شرایط سخت انجام پژوهش یاری رسان اینجانب بودند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

اینجانب ایمان صائبی حصاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه های هیدرولیکی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین ضریب آگذری سرریز های لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی به روشهای عددی و آزمایشگاهی 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 ۱۳۹۵/۱۳/۱۷

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 جانبی به دلیل کاربرد وسیع در شبکه های انتقال آب از اهمیت زیادی برخوردار است و از طرفی سرریز های جانبی ساده نمی توانند نیاز عبور دبی های بالا را به همراه اندازه گیری دقیق دبی جریان برآورده سازند به همین دلیل سرریز های مرکب از جمله سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی که یکی از پرکاربرد ترین سرریزهای مرکب است اهمیت ویژه می یابند. با این تحقیق در دو بخش آزمایشگاهی و عددی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفت. در بخش آزمایشگاهی رابطه ای برای ضریب دبی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی بدست آورده شد به طوری که ابتدا توسط آنالیز ابعادی پارامتر های موثر بر ضریب دبی شناسایی شدند سپس توسط نرم افزار جانبی اکسل این پارامتر های موثر مورد تحلیل قرار گرفتند و کمیت هایی که دارای تأثیر مهم برای تعیین ضریب دبی سرریز ها بودند مشخص گردیدند. سپس نمودار ها و جداولی جهت مقایسه ضرایب دبی بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و محاسباتی تهیه شد که این مقایسه ها درستی رابطه بدست آمده برای ضریب دبی را تایید کرده و انطباق خوبی را بین نتایج نشان دادند. همچنین پروفیل جریان برای سرریز های مورد آزمایش بر روی تاج و در میانه کانال رسم گردید و نشان داد که با افزایش عدد فرود تغییرات ارتفاع آب در روی تاج سرریز شدت بیشتری می گیرد و همچنین در میانه کانال هرچه به سمت انتهای سرریز حرکت می کنیم ارتفاع آب با شیب ملایمی افزایش می یابد. در ادامه مطالعات ۴ سرریز در نرم افزار FLOW-3D مورد مدل سازی و شبیه سازی جریان قرار گرفتند که نتایج این بخش پس از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در خصوص دبی عبوری از سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی و محاسبه آمارهای ارزیابی خطا برای هر سرریز انطباق نسبتاً خوبی را نشان دادند و تایید کردند که میتوان از نرم افزار FLOW-3D جهت توسعه ی مطالعات بر روی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی بهره برد. لازم به

ذکر است که پروفیل های جریان بر روی تاج سرریز نیز رسم گردید که کاملاً با نمودار های رسم شده در بخش آزمایشگاهی منطبق هستند.

کلید واژه: سرریز لبه تیز، سرریز جانبی، سرریز مستطیلی، تحلیل ابعادی، مدل سازی عددی، FLOW-3D

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول-مقدمه و کلیات

۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ اهداف استفاده از سرریز ها.....
۳	۳-۱ انواع سرریز.....
۳	۱-۳-۱ بر اساس نحوه قرار گیری بر روی کانال.....
۴	۲-۳-۱ بر اساس وضعیت لبه تاج.....
۷	۳-۳-۱ بر اساس موارد استفاده.....
۸	۴-۳-۱ بر اساس مکان مورد استفاده
۱۰	۵-۳-۱ بر اساس شکل مقطع.....
۱۲	۴-۱ ضرورت انجام و اهداف تحقیق
۱۴	۵-۱ ساختار پایان نامه

فصل دوم- مروری بر تحقیقات گذشته

۱۶	۱-۲ مقدمه
۱۶	۲-۲ پژوهش های بنیادی انجام گرفته در خصوص سرریزهای ساده.....
۲۵	۳-۲ پژوهش های انجام گرفته در خصوص سرریزهای نرمال مرکب.....
۲۸	۴-۲ پژوهش های انجام گرفته در خصوص سرریزهای جانبی مرکب.....

فصل سوم-مواد و روش ها و معادلات حاکم

۳۶	۱-۳ مقدمه.....
۳۶	۲-۳ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی.....
۳۸	۳-۳ انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی

۴۰	۴-۳ روش مستقیم برای محاسبه ضرایب دبی.....
۴۰	۱-۴-۳ سرریز ساده مثلثی.....
۴۲	۲-۴-۳ سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی.....
۴۳	۵-۳ روش دیمارچی برای محاسبه ضرایب دبی.....
۴۳	۱-۵-۳ سرریز مستطیلی ساده.....
۴۶	۲-۵-۳ سرریز مستطیلی مرکب.....
۴۷	۶-۳ تحلیل ابعادی
۴۹	۷-۳ بخش آزمایشگاهی پژوهش.....
۵۳	۸-۳ محدوده پارامترهای متغیر آزمایش.....
۵۶	۹-۳ پردازش نتایج آزمایشگاهی.....
۵۷	۱۰-۳ آمارهای ارزیابی خطا
۵۸	۱۱-۳ معرفی نرم افزار FLOW-3D
۵۹	۱-۱۱-۳ شبکه بندی
۶۰	۲-۱۱-۳ روش VOF
۶۱	۳-۱۱-۳ روش FAVOR.....
۶۲	۱۲-۳ معادلات حاکم
۶۲	۱-۱۲-۳ معرفی سیستمهای مختصات برنامه.....
۶۲	۲-۱۲-۳ معادله پیوستگی
۶۴	۳-۱۲-۳ معادله مومنتم
۶۵	۱۳-۳ مدل های آشفتگی
۶۶	۱-۱۳-۳ معرفی انواع مدل های آشفتگی
۶۸	۲-۱۳-۳ مدل های آشفتگی مورد استفاده در FLOW-3D

فصل چهارم- پردازش داده های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی

۷۴	۱-۴ مقدمه
۷۵	۲-۴ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی

- ۴-۲-۱ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی به روش مستقیم ۷۵
- ۴-۲-۲ ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی به روش دیمارچی ۸۲
- ۴-۵ رسم پروفیل طولی سطح آب در محل تاج سرریز و در محور وسط کانال برای سرریز جانبی مرکب مستطیلی- مستطیلی ۸۴
- ۴-۶ مدلسازی عددی ۹۲
- ۴-۶-۱ مشخصات مدل عددی ۹۲
- ۴-۶-۲ ایجاد هندسه سرریز ۹۲
- ۴-۶-۳ مش بندی ۹۳
- ۴-۶-۴ شرایط مرزی ۹۵
- ۴-۶-۵ استفاده از favor جهت بررسی مش بندی ۹۷
- ۴-۶-۶ ایجاد Baffle ۹۸
- ۴-۶-۷ اعمال شرایط اولیه ۹۸
- ۴-۶-۸ اعمال شیب طولی کانال ۹۹
- ۴-۶-۹ انتخاب مدل آشفتگی ۱۰۰
- ۴-۶-۱۰ زمان پایداری آزمایش ۱۰۰
- ۴-۶-۱۱ رایانه های مورد استفاده و مدت زمان تکمیل شبیه سازی ۱۰۱
- ۴-۷-۱ مقایسه نتایج ۱۰۱
- ۴-۷-۱ مقایسه مقادیر دبی ۱۰۱
- ۴-۷-۲ مقایسه نتایج این پژوهش و سایر محققین ۱۰۵
- ۴-۷-۳ مقایسه نتایج مربوط به روش دیمارچی و مستقیم در این پژوهش ۱۰۶

فصل پنجم- خلاصه نتایج و پیشنهادات

- ۵-۱ مقدمه ۱۰۸
- ۵-۲ خلاصه نتایج ۱۰۹
- ۵-۳ پیشنهادات ۱۱۰
- مراجع ۱۱۳

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) مقایسه جریان بر روی سرریز های لبه تیز و لبه پهن.....	۵
شکل (۲-۱) نمونه هایی از سرریز نرمال.....	۶
شکل (۳-۱) نمونه ای از سرریز جانبی.....	۶
شکل (۴-۱) نمونه ای از سرریز جانبی.....	۷
شکل (۵-۱) نمونه هایی از سرریز سد ها.....	۸
شکل (۶-۱) سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی.....	۱۱
شکل (۷-۱) سرریز مرکب مثلثی-مثلثی.....	۱۲
شکل (۸-۱) سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی.....	۱۲
شکل (۱-۲) الگوی جریان در سرریز جانبی دوزنقه ای در جریان زیر بحرانی [۱۵].....	۲۲
شکل (۲-۲) سرریز جانبی مایل.....	۲۴
شکل (۳-۲) نمونه هایی از ترکیب دبی مقاطع بالا و پایین در تحقیق پیراتیپان و همکاران [۲۰].....	۲۷
شکل (۴-۲) سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی [۲۲].....	۲۹
شکل (۵-۲) نحوه شکل گیری جریان بر روی سرریز های لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۴].....	۳۲
شکل (۱-۳) نمایی از یک سرریز جانبی همراه با کانال اصلی.....	۳۸
شکل (۲-۳) انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی.....	۳۹
شکل (۳-۳) مقطع سرریز مثلثی [۲۵].....	۴۰
شکل (۴-۳) سرریز لبه تیز مثلثی [۲۵].....	۴۱
شکل (۵-۳) مقادیر k_n بر حسب زاویه [۲۵].....	۴۱
شکل (۶-۳) مقادیر C_{de} بر حسب زاویه [۲۵].....	۴۲
شکل (۷-۳) سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی.....	۴۳
شکل (۸-۳) سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی.....	۴۸
شکل (۹-۳) نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر [۲۵].....	۵۱

- شکل (۳-۱۰) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن ۵۱
- شکل (۳-۱۱) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن ۵۲
- شکل (۳-۱۲) فلومتر آلتراسونیک به همراه اتصال نوع V سنسورها ۵۳
- شکل (۳-۱۳) بررسی تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان در شبیه سازی کل کانال و ناحیه دو طرف سرریز [۲۸]..... ۶۰
- شکل (۴-۱) شمای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی ۷۵
- شکل (۴-۲) نمودار دبی و ضریب دبی آزمایشگاهی بر حسب دبی و ضریب دبی محاسباتی ۷۸
- شکل (۴-۳) تأثیر پارامتر $\frac{w}{y_1}$ بر ضریب دبی ۸۰
- شکل (۴-۴) تأثیر پارامتر Fr_1 بر ضریب دبی ۸۱
- شکل (۴-۵) مقایسه مقادیر دبی و ضریب دبی در حالت آزمایشگاهی و محاسباتی به روش دیمارچی ۸۳
- شکل (۴-۶) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز ۸۵
- شکل (۴-۷) بررسی تأثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز و میانه کانال ۸۹
- شکل (۴-۸) نمایی از شبکه مش بندی استفاده شده در مدل ۹۴
- شکل (۴-۹) شرایط مرزی مدل شبیه سازی شده ۹۵
- شکل (۴-۱۰) نتیجه اجرای FAVOR برای مش بندی انجام شده بر روی سرریز ۹۷
- شکل (۴-۱۱) نمای کلی بافل ایجاد شده بر روی سرریز..... ۹۸
- شکل (۴-۱۲) صفحه تنظیمات شرایط اولیه..... ۹۹
- شکل (۴-۱۳) پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز مربوط به مدل اول و دوم ۱۰۳
- شکل (۴-۱۴) پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز مربوط به مدل اول و دوم برای داده های آزمایشگاهی..... ۱۰۴

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) مقایسه شاخص های آماری خطا برای دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی..	۳۱
جدول (۲-۲) نتایج مدل سازی قربانی و ابراهیمی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی	۳۱
جدول (۱-۳) محدوده پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات	۵۴
جدول (۲-۳) محدوده پارامتر های هندسی آزمایشات	۵۴
جدول (۳-۳) مشخصات هندسی سرریز های مورد استفاده در آزمایش	۵۵
جدول (۱-۴) مقادیر پارامتر های ارزیابی خطا برای نشان دادن تأثیر $\frac{L}{y_1}$ بر ضریب دبی به روش مستقیم.....	۷۷
جدول (۲-۴) مقادیر آمار های ارزیابی خطا دبی عبوری از سرریز به روش دیمارچی	۸۴
جدول (۳-۴) مقایسه مقادیر دبی محاسبه شده توسط نرم افزار به دبی آزمایشگاهی	۱۰۲
جدول (۴-۴) مقادیر خطا برای تحقیقات عامری ظهیری و صائبی در خصوص سرریز های مستطیلی.....	۱۰۵
جدول (۵-۴) مقادیر خطا برای روش دیمارچی و مستقیم در این پژوهش.....	۱۰۶

فهرست علائم (بخش آزمایشگاهی)

α	ضریب تصحیح انرژی جنبشی	B	عرض کانال
ρ	چگالی سیال	C_m	ضریب دبی دیمارچی
σ	کشش سطحی	C_d	ضریب دبی مستقیم
A	توابع سطح FAVOR	E	انرژی مخصوص
b	افت جریان در محیط دارای تخلخل	Fr_1	عدد فرود جریان در بالادست سرریز
f	شتاب ناشی از لزجت	g	شتاب گرانش زمین
K	انرژی جنبشی آشفتگی	h	ارتفاع آب روی تاج سرریز
P_r	تولید انرژی آشفتگی	L	طول سرریز
R_{DIF}	پخش آشفتگی	N	تعداد داده ها
R_{SOR}	منبع جرمی	n	ضریب مانینگ
u	سرعت در راستای X	Q	دبی در کانال اصلی
v	سرعت در راستای Y	Q_w	دبی عبوری از سرریز
v_k	ضریب پخش	S_0	شیب طولی کانال
v_t	لزجت گردابی سینماتیکی	S_f	شیب خط انرژی
w	سرعت در راستای Z	T	زمان
μ	لزجت سیال	V	سرعت متوسط جریان در کانال
ε	نرخ اتلاف انرژی آشفتگی	W	ارتفاع تاج سرریز
τ_{ij}	تنش آشفتگی	\bar{w}	ارتفاع معادل تاج سرریز
	در صورت وجود اندیس های ۱ و ۲ برای علائم فوق	x	فاصله از بالا دست سرریز
	اندیس ۱ به ابتدا و اندیس ۲ به انتهای سرریز	y	ارتفاع آب
	مربوط می شود.		

فصل اول

مقدمه و کلیات

برای کنترل سطح آب و انحراف جریان در کانال های انتقال و توزیع آب و در شبکه های آبیاری به طور معمول سرریز های جانبی از کاربرد وسیعی برخوردار هستند، زیرا این سرریز ها برای تخلیه جریان های مازاد ناشی از سیل و بهره برداری نامناسب آبنگیزهای 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^۱ برای اندازه گیری دقیق دبی های پایین مناسب تر هستند اما سرریز های مستطیلی^۲ توانایی بیشتری در عبور دبی های بالا را دارند. در مورد سرریز های مثلثی 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 تأمین هر دو هدف اندازه گیری دقیق دبی های پایین و نیز عبور دبی های بالا می توان از نوع مرکب سرریز مستطیلی استفاده کرد. که شامل یک مستطیل در پایین و یک مستطیل با دهانه باز تر در مقطع بالایی می باشد.

با وجود تحقیقات انجام شده در مورد سرریز مرکب مستطیلی مستطیلی^۳ هنوز در مورد نوع جانبی این سرریز مطالعه ای جامع و کامل با پراکندگی مناسب انجام نگرفته است. برای استفاده و بازده بهتر سرریز جانبی مرکب مستطیلی، لازم است تا با مطالعه آزمایشگاهی بروی این سازه، مشخصات و ویژگی های آن به درستی شناخته شود و پارامتر های موثر بر دبی عبوری از این سرریز نیز شناسایی شود. با توجه به دلایلی که بررسی گردید، در این پژوهش سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی- مستطیلی 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 مستطیلی - مستطیلی و ارائه جواب های مناسب برای دبی عبوری

¹ triangular Weirs

² Rectangular weirs

³ Compound Rectangular - Rectangular weir

از روی این سرریز، مطالعات توسط این نرم افزار توسعه داده شود، چرا که مطالعات آزمایشگاهی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی می باشد و همچنین امکان ایجاد شرایط متنوع هندسی و هیدرولیکی در محیط آزمایشگاه فراهم نمی باشد.

۲-۱ اهداف استفاده از سرریز ها

۱. قابلیت اندازه گیری دبی عبوری

۲. هدایت سیلاب و تخلیه جریان

۳. تنظیم عمق آب بالا دست

۴. انحراف جریان

در ادامه به معرفی انواع سرریزها در تقسیم بندی های مختلف خواهیم پرداخت و خصوصیات هر کدام را به طور خلاصه بیان خواهیم کرد.

۳-۱ انواع سرریز

۱-۳-۱ براساس نحوه قرار گیری بر روی کانال

الف. سرریز نرمال^۱

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 Normal Weirs

ب. سرریز جانبی

یک سرریز زودگذر 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.

۱-۳-۲ براساس وضعیت لبه تاج

الف. سرریز لبه تیز^۱

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.

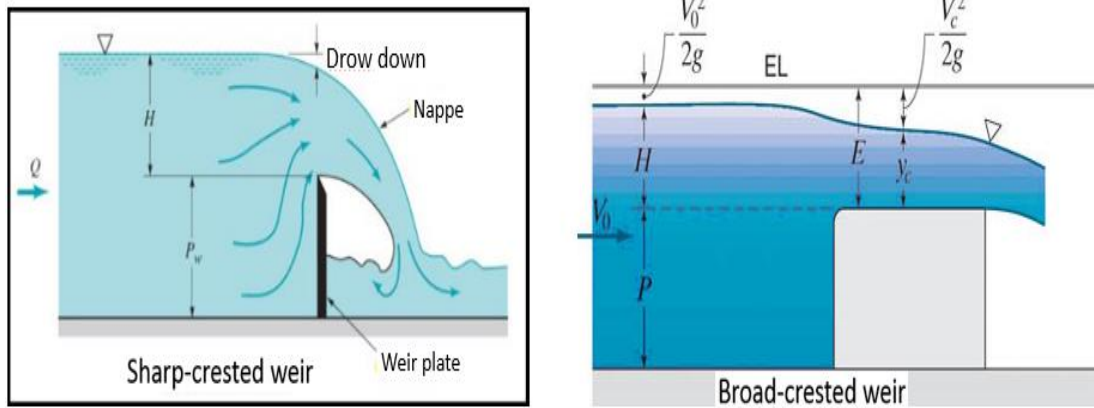
ب. سرریز لبه پهن^۲

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.

¹ Sharp-Crested Weirs

² Broad-Crested Weirs

از دیگر ویژگی‌های این سرریزها این است که آب در ضمن عبور از روی سرریز لبه پهن با تاج افقی، عمق بحرانی^۱ را تجربه می‌کند.



شکل (۱-۱) مقایسه جریان بر روی سرریزهای لبه تیز و لبه پهن

^۱ Critical Depth



شکل (۱-۲) نمونه هایی از سرریز نرمال



شکل (۱-۳) نمونه ای از سرریز جانبی



شکل (۱-۴) نمونه ای از سرریز جانبی

۳-۳-۱ براساس موارد استفاده

سرریزها 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

۴-۳-۱ براساس مکان مورد استفاده

الف. سرریز سد ها^۱

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^۲، سرریز پلکانی^۳، سرریز نیلوفری^۴، سرریز سیفونی^۵، سرریز کلید پیانویی^۶ و ... اشاره کرد.



ب) سرریز پلکانی



الف) سرریز اوجی



د) سرریز کلید پیانویی



ج) سرریز نیلوفری

شکل (۵-۱) نمونه هایی از سرریز سد ها

¹ Spillways

² Ogee Spillway

³ Stepped Spillway

⁴ Morning Glory Spillway

⁵ Siphon Spillway

⁶ PianoKey Spillway

ب. سرریز کانال ها و رودخانه 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. 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.

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^۱ نیز استفاده از سرریز های جانبی کاربرد فراوان دارد. 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 Embankment Dam

۵-۳-۱ براساس شکل مقطع

الف. سرریز های ساده

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

سرریز های مثلثی^۱ 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 معمولاً با زاویه رأس ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه ساخته می شوند.

سرریز های دوزنقه ای^۱ بیشتر در کانال های انتقال آب کشاورزی به کار گرفته می شوند. از مزایای این سرریز ها امکان عبور بیشتر دبی می باشد.

ب. سرریز های مرکب^۲

همان گونه که گفته شد، سرریز مثلثی برای اندازه گیری دقیق دبی کاربرد مناسبی دارد. سرریزهای مستطیلی نیز برای عبور دبی های بالا مناسب هستند. با این رویکرد، سازمان احیای اراضی آمریکا^۳ 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

¹ Trapezoidal Weirs

² Compound Weirs

³ USBR

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 تأمین 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



شکل (۶-۱) سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی



شکل (۱-۷) سرریز مرکب مثلثی-مثلثی



شکل (۱-۸) سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی

۴-۱ ضرورت انجام و اهداف تحقیق

سرریزهای جانبی در سازه های حفاظتی زیرگذر جاده ها محل های خطرناک و سیل خیز رودخانه ها و سرریز انتهایی برای تخلیه آب اضافی انتهای کانال های اصلی و بیشتر اوقات به منظور کنترل جریان و جلوگیری از افزایش آن در کانال بالادست، آب را به سمت کانال جانبی هدایت می کند

و این عمل بایستی پیش از اینکه سطح آب در کانال اصلی بیش از حد معینی فراتر رود صورت گیرد؛ بنابراین سرریزهای جانبی، به عنوان محدودکننده تراز جریان هم در نظر گرفته می شوند و همینطور برای اندازه گیری دبی از آنها استفاده می شود. برای تحقق این هدف سرریز مرکب مستطیلی_مستطیلی یکی از اصلی ترین گزینه های انتخاب سرریز مناسب است. در گذشته تحقیقاتی در مورد انواع سرریز جانبی انجام شده اما تحقیقات کامل با پراکندگی مناسب هندسی مقاطع سرریز جانبی مرکب مستطیلی_مستطیلی صورت 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. برای استفاده بهینه از سرریز جانبی مرکب مستطیلی_مستطیلی 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 به راحتی محاسبه نمود و بازده کانال های انتقال و توزیع آب را افزایش داد. در این تحقیق سعی شده است پارامتر های موثر بر ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی_مستطیلی شناسایی و سپس رابطه ای برای ضریب دبی ارائه شود که بر حسب پارامتر های موثر بر آن می باشد. با استفاده از این رابطه می توان دبی عبوری از سرریز و پروفیل سطح آب بر روی تاج سرریز و میانه کانال را در هندسه های متنوع سرریز و شرایط هیدرولیکی متفاوت بدست آورد. همچنین با مدل سازی آزمایش توسط نرم افزار FLOW-3D و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج نرم افزار می توان توانایی این نرم افزار را در مدلسازی این آزمایشات سنجید و در صورت همبستگی مطلوب نتایج آزمایشگاهی و عددی، از نرم افزار FLOW-3D برای توسعه نتایج استفاده نمود. با انجام این مطالعات از صرف هزینه و وقت برای مطالعات آزمایشگاهی در هر مورد خاص جلوگیری می شود.

۵-۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه سعی شده است مطالب ضروری و مرتبط در پنج فصل بیان شوند که کلیات هر فصل به شرح زیر می باشند.

فصل اول شامل تعاریف اولیه و مقدمه و همچنین ضرورت و هدف انجام این تحقیق بود. در فصل دوم به مرور مطالعات آزمایشگاهی و عددی گذشته در زمینه سرریز های جانبی پرداخته شده است. فصل سوم شامل معرفی دستگاه ها و محیط آزمایش و همچنین نحوه انجام آزمایشات و سپس بیان چگونگی برداشت نتایج از اطلاعات خام آزمایشگاهی و توضیحاتی در خصوص تحلیل ابعادی می شود در انتهای فصل به معرفی برنامه مدلسازی و شیوه کار آن و همچنین معادلات حاکم بر جریان آشفته^۱ توضیحات لازم بیان می گردد. فصل چهارم به تجزیه تحلیل نتایج اختصاص دارد که در ابتدا نتایج تحقیقات آزمایشگاهی بیان می شوند و توسط آمار های ارزیابی خطا تحلیل و نمودارهای لازم به همراه جداول نتایج جهت مقایسه ارائه می شود. در ادامه به توضیح دقیق کار با نرم افزار FLOW-3D و مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی پرداخته شده است. دستاورد های این پژوهش به طور خلاصه به همراه پیشنهادات در فصل پنجم گنجانده شده است و در بخش انتهایی پایان نامه نیز لیست منابع و مراجع آورده خواهد شد.

¹ Turbulent flow

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۱-۲ مقدمه

اولین تحقیقات در مورد سرریزهای جانبی از اوایل قرن ۱۹ میلادی آغاز گردید که منتهی به ارائه معادله ارزشمند دیمارچی [۲] در سال ۱۹۳۴ شد. دیمارچی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی را مورد مطالعه و آزمایش قرار داد و در روابط خود ضریب دبی دیمارچی (آبگذری) را به عنوان یک پارامتر ضروری در تعیین دبی عبوری از سرریز معرفی نمود. به دلیل عدم شناخت کافی از عوامل مؤثر بر ضریب دبی و چگونگی تعیین آن، بیشتر تحقیقات پس از وی در راستای ارائه روابط جهت برآورد و تخمین دقیق تر این ضریب بوده است.

در این فصل به مرور مطالعات گذشته در زمینه سرریزهای جانبی ساده و نیز سرریزهای جانبی و نرمال مرکب پرداخته می شود.

۲-۲ پژوهش های بنیادی انجام گرفته در خصوص سرریزهای ساده

سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲)

سابرامانیا و آواستی [۳] یک سرریز جانبی لبه تیز با ارتفاع تاج صفر یا محدود نصب شده را در نظر گرفتند و با انجام آزمایشهای متعدد برای حالت‌های جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی، روابطی را جهت محاسبه ضریب دبی سرریزهای مذکور پیشنهاد کردند.

$$C_m = C_m^* \sqrt{1 - \left(\frac{3Fr_1^2}{Fr_1^2 + 2} \right)} \quad (۱-۲)$$

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^۱ جریان در بالادست سرریز می باشد.

^۱ Froude Number

یوتیج (۱۹۷۲)

یوتیج [۴] در سال ۱۹۷۲ بامطالعه کارهای سابرامانیا و آواستی [۳] ابراز کرد که معادله ارائه شده توسط ایشان برای ارتفاع سرریز ($w > 0$) و عدد فرود ($Fr > 0.6$) دارای خطا است.

رانگا راجو و همکاران (۱۹۷۹)

رانگا راجو و همکاران [۵] 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.

$$C_m = \frac{3 B_1}{2 B_e} \left(F \left(\frac{y}{E} \right)_2 - F \left(\frac{y}{E} \right)_1 \right) \quad (۲-۲)$$

$$B_e = B_2 - 0.05 \quad (۳-۲)$$

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

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

$$C_m = 0.81 - 0.6Fr_1 \quad (۴-۲)$$

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

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

چیونگ (۱۹۹۱)

چیونگ [۶] در سال ۱۹۹۱ تحقیقات خود را بر روی سرریزهای جانبی مستطیلی در کانالهای دوزنقه ای متمرکز نمود و رابطه ای برای محاسبه ضریب دبی (تخلیه) در این حالت ارائه داد.

سوامی و همکاران (۱۹۹۴)

سوامی و همکاران [۷] با معرفی ضریب دبی المانی روابطی را برای محاسبه ضریب دبی سرریز های جانبی لبه تیز و لبه پهن مستطیلی ارائه کرده اند.

$$C_e = 0.447 \left[\left(\frac{44.7w}{49w + y} \right)^{6.67} + \left(\frac{y - w}{y} \right)^{6.67} \right]^{-0.15} \quad (۶-۲)$$

سینگ و همکاران (۱۹۹۴)

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.

$$C_m = 0.33 - 0.18Fr_1 + 0.49 \left(\frac{w}{y_1} \right) \quad (۷-۲)$$

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.

$$C_d = 0.99 - 1.26Fr_1 \quad (۸-۲)$$

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

$$C_d = 0.24 + 0.24 \left(\frac{w}{y_1} \right) \quad (۹-۲)$$

ایزدجو و شفافی بجستان (۱۳۷۵)

ایزدجو و شفافی بجستان [۹] روابط متعدد ارائه شده برای ضریب دبی سرریزهای جانبی لبه تیز را به منظور انتخاب یک رابطه مناسب مورد بررسی قرار دادند. آنها در این تحقیق تعداد ۶ مدل سرریز لبه تیز مستطیلی را در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز تحت شرایط هیدرولیکی مختلف آزمایش نموده و نتایج بدست آمده را تجزیه و تحلیل نمودند. در این بررسی مشخص شد رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۴) بهترین جواب را برای تخمین ضریب دبی سرریز می دهد و همچنین رابطه جدیدی برای ضریب دبی این سرریز استخراج شد.

رابطه ارائه شده برای Cd در این تحقیق که به کمک رگرسیون چند متغیره محاسبه شده است مطابق زیر می باشد:

$$C_d = 0.0759Fr_1^2 - 0.7364\frac{w}{y_1} + 0.0187\frac{L}{y_1} + 0.199 \quad (10-2)$$

ایشان ضمن مقایسه آماری و ترسیمی روابطی که در گذشته برای ضریب دبی در سرریزهای جانبی ارائه شده با نتایج تحقیق خود نشان دادند رابطه سینگ و همکاران (۱۹۹۴) با انحراف معیار ۹۹٪ بیشترین نزدیکی را با نتایج تحقیق حاضر دارد و به طور متوسط با نتایج آزمایش حدود ۳٪ اختلاف دارد.

جلیلی قاضی زاده و همکاران (۱۳۷۶)

جلیلی قاضی زاده و همکاران [۱۰] پارامترهای $\frac{L}{B}$ و $\frac{w}{y_1}$ و S_0 و Fr_1 را در ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی وارد کرده و رابطه جدیدی را به صورت زیر ارائه دادند:

$$C_d = a + b(Fr_1) + c\left(\frac{w}{y_1}\right) + d\left(\frac{L}{B}\right) + e(S_0) \quad (11-2)$$

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.

با توجه به تحقیقات ایشان، پارامترهای S_0 و $\frac{L}{B}$ تأثیر 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:

$$C_d = 0.71 - 0.41Fr_1 - 0.22\left(\frac{w}{y_1}\right) \quad (12-2)$$

برقعی و صالحی (۱۳۸۲)

برقعی و صالحی [۱۱] 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.

$$C_m = 0.5297Fr_1^2 + 0.1321Fr_1 + 0.6695 \quad (13-2)$$

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

$$C_d = 0.82 - 0.38Fr_1 - 0.22\left(\frac{w}{y_1}\right) + 0.08\left(\frac{L}{B}\right) \quad (14-2)$$

یوماز^۱ (1991)

یوماز [۱۲] سرریزهای 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.

^۱ Uyumaz

قدسیان (2004)

قدسیان [۱۳] سرریز جانبی لبه تیز مثلثی را در شرایط جریان زیر بحرانی مورد بررسی قرار داد. وی با تغییر پارامتر های هیدرولیکی جریان و همچنین پارامتر های هندسی سرریز، ضریب دبی سرریز جانبی مثلثی را به روش دیمارچی و برای ۴ زاویه رأس مثلث (۳۰ و ۶۰ و ۹۰ و ۱۲۰) محاسبه کرده و رابطه ای را برای هر یک ارائه داد.

ایزدی و همکاران (۱۳۸۶)

ایزدی و همکاران [۱۴] با استفاده از داده های عددی بدست آمده از تحقیقات برقی و همکاران 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.

ریاحی و وطن خواه (۱۳۹۴)

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 (V_1)، عمق متوسط ابتدا و انتهای سرریز ($\frac{y_1+y_2}{2}$) و عمق وسط سرریز (V_{center}) می باشد، ضریب دبی متناظر با هر روش را محاسبه کردند.

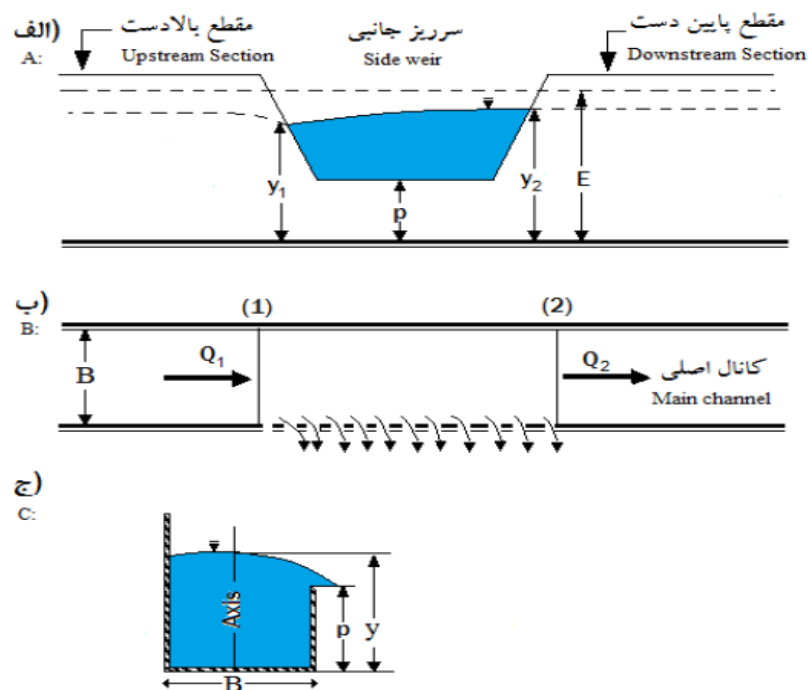
نتایج حاصل از تحقیق ریاحی و وطن خواه بر روی سرریز جانبی دوزنقه ای به صورت زیر ارائه

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 (۱-۲) الگوی جریان در سرریز جانبی دوزنقه ای در جریان زیر بحرانی [۱۵]

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 :

$$C_d = 0.085Fr_1^{3.16} - 0.053\left(\frac{b}{T}\right)^{1.4} - 0.032\left(\frac{p}{y_1}\right)^{1.04} + 0.18\left(\frac{z}{1+z}\right)^{1.09} + 0.55 \quad (۱۶-۲)$$

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.

سیاری و همکاران (۱۳۹۱)

سیاری و همکاران [۱۶] 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 جریان عبوری از سرریز لبه پهن دوزنقه ای محاسبه کردند.

پرندین و همکاران (۱۳۹۴)

پرندین و همکاران [۱۷] 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.

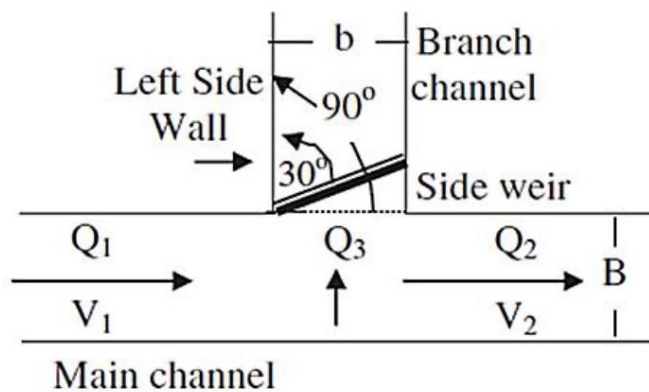
د) طبق بررسی های ایشان محور وسط کانال مناسب ترین محور جهت اندازه گیری خصوصیات هیدرولیکی جریان می باشد. چرا که این محور تحت تأثیر ناحیه جداشدگی جریان قرار نمی گیرد.

احمد (2011)

احمد [۱۸] با انجام آزمایش بر روی ۵ مدل فیزیکی سرریز جانبی لبه تیز مستطیلی با زوایای مختلف نسبت به راستای کانال اصلی به مطالعه و بررسی ضریب دبی المانی آن پرداخت و در سال ۲۰۱۳ با استفاده از حل عددی اویلر، ضریب دبی در سرریز جانبی مستطیلی با زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به راستای اصلی جریان (θ) در کانال را مورد مطالعه قرارداد و تأثیر زاویه قرارگیری سرریز جانبی بر ضریب دبی و میزان دبی خروجی را بررسی نمود.

وی نتیجه گرفت که از بین زوایای مذکور، دبی انحراف در زاویه ۳۰ درجه دارای بیشترین مقادیر می باشد. این در شرایطی است که در زاویه ۹۰ درجه مقادیر دبی ۷۰ درصد کمتر از آن بود. وی رابطه زیر را نیز برای تعیین ضریب دبی ارائه نمود:

$$C_d = 1.275 - 0.612Fr_1 - 0.522 \left(\frac{p}{y_1} \right) + 0.028 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.132\theta \quad (17-2)$$



شکل (۲-۲) سرریز جانبی مایل

۳-۲ پژوهش های انجام گرفته در خصوص سرریز های نرمال مرکب

برای اولین بار سازمان احیای اراضی آمریکا [۱] پا به عرصه تحقیق درباره سرریز های مرکب نهاد و برای اولین بار سرریز مرکب مثلثی-مستطیلی را پیشنهاد داد و به بررسی آزمایشگاهی این نوع سرریز پرداخت.

مطالعات مارتینز و همکاران (2005)

مارتینز و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۵ برای اندازه گیری دبی حوضه آبریز یک سد کوهستانی، سرریز مرکب مثلثی-مثلثی 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 قابل ترسیم بود.

$$Q = \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) h^{5/2} + \frac{8}{15} C_{d2} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} - \frac{8}{15} C_{d1} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \quad (18-2)$$

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 آوردند. مارتینز و همکاران ابتدا با انجام آزمایشاتی بر روی سرریز های مثلثی ساده، ضریب دبی این سرریز ها را با زاویه رأس مختلف محاسبه کردند. رابطه ارائه شده توسط مارتینز و همکاران برای دبی عبوری از سرریز نرمال مرکب مثلثی-مثلثی به صورت رابطه (۱۸-۲) می باشد:

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 (۱۸-۲) را بر حسب یک ضریب دبی کلی به صورت رابطه (۱۹-۲) بیان کردند.

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left[\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[h^{5/2} - (h - h_0)^{5/2} \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right) (h - h_0)^{5/2} \right] \quad (19-2)$$

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

$$C_d = \frac{C_{d1} \tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + C_{d2} \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \left[\frac{1}{\left(1 - \frac{h_0}{h}\right)^{5/2}} - 1 \right] + \tan\left(\frac{\theta_2}{2}\right)} \quad (20-2)$$

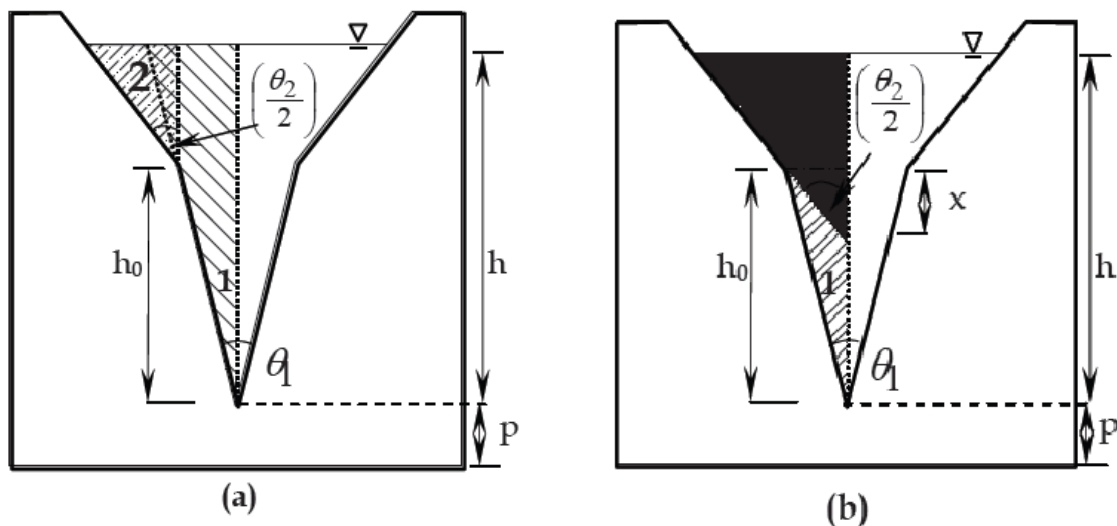
پیراتیپان و همکاران (2006)

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

پیراتیپان [۲۰] در ادامه کارهای مارتینز به بررسی آزمایشگاهی سرریزهای مثلثی پرداخت. وی ۶ روش از ترکیب دبی مقطع‌های بالا و پایین را مورد بررسی قرار داد و سپس رابطه‌ای 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:

C_{d1} و C_{d2} به ترتیب ضریب دبی مثلث با زاویه رأس θ_1 و θ_2 می‌باشند. h و h_0 نیز در شکل

(۲-۳) مشخص شده‌اند.



شکل (۲-۳) نمونه هایی از ترکیب دبی مقاطع بالا و پایین در تحقیق پیراتیپان و همکاران [۲۰]

رابطه بالا را می توان به صورت زیر بیان کرد :

$$Q = \frac{8}{15} C_{dc} \sqrt{2gh}^{5/2} \quad (22-2)$$

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

جان و همکاران^۱ (2006)

جان و همکاران [۲۱] 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.

^۱ Jan et al.

۴-۲ پژوهش های انجام گرفته در خصوص سرریز های جانبی مرکب

ظهیری و همکاران (۱۳۹۲)

ظهیری و همکاران [۲۲] 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 مؤثر، رابطه زیر برای تخمین ضریب دبی سرریز لبه تیز جانبی مستطیلی-مستطیلی پیشنهاد گردید :

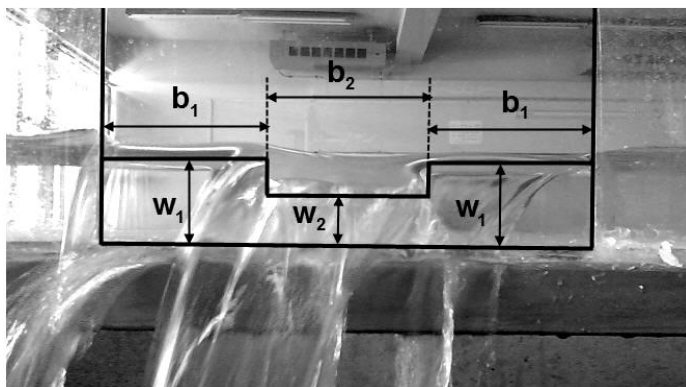
$$C = a(Fr_1)^b + c\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^d + e\left(\frac{B}{y_1}\right)^f + g \quad (24-2)$$

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^۱ است که ظهیری و همکاران آن را به صورت زیر تعریف کرده اند :

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (25-2)$$

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

^۱ The crest weight height



شکل (۴-۲) سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی [۲۲]

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 :

$$C = -0.0551Fr_1 + 0.1063 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.1065} + 0.00168 \left(\frac{B}{y_1}\right)^{1.179} + 0.412 \quad (26-2)$$

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.

محمدیان و همکاران [۲۳] 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. 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 پارامترهای 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 روش 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 (۱۳۹۴)

قربانی و ابراهیمی [۲۴] سرریز نرمال مرکب مثلثی-مستطیلی را به کمک نرم افزار FLOW-3D مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی از داده های آزمایشگاهی مارتینز و همکاران [۱۹] 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.

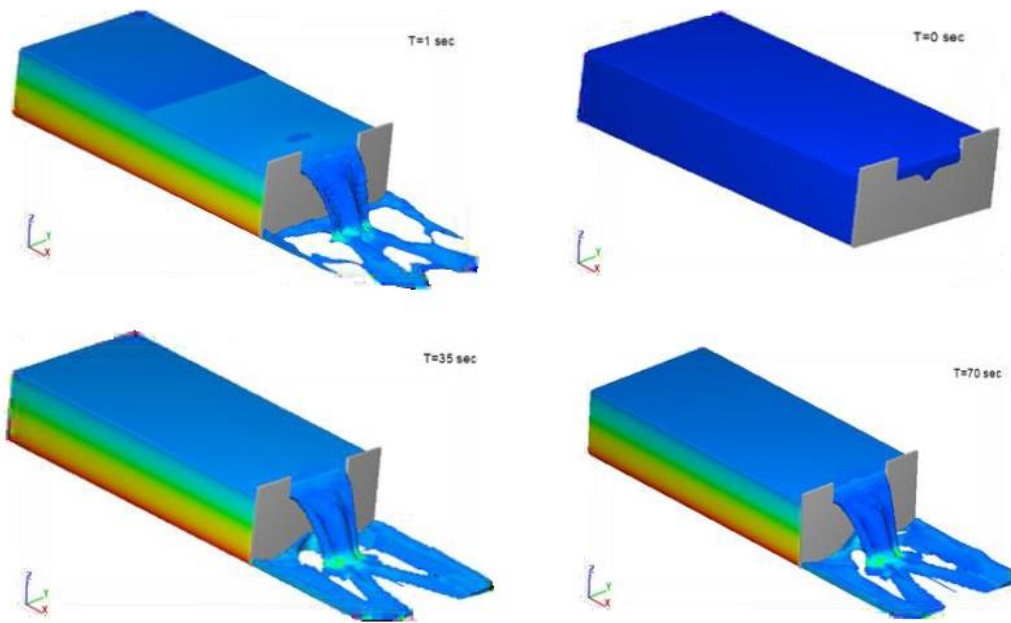
جدول (۲-۲) نتایج مدل سازی قربانی و ابراهیمی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

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

$$C_d = -0.164 \frac{b_1}{B} - 2.289 \frac{b_2}{B} + 0.0095 \frac{h_2}{h_1} - 0.210 \frac{B}{H} + 1.572 \quad (27-2)$$

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

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 (۵-۲) نحوه شکل گیری جریان بر روی سرریز های لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی [۲۴]

عامری و همکاران (۱۳۹۴)

عامری و همکاران [۲۵] پژوهش هایی بر روی سرریز های جانبی مرکب با مقاطع مستطیل-مستطیل و نیز مثلث-مستطیل در شرایط جریان زیر بحرانی انجام دادند. ایشان پارامتر های مؤثر بر ضریب دبی هر یک از سرریز های فوق را به سه روش مستقیم، دیمارچی و المانی تعیین کرده و در هر روش رابطه ای را برای ضریب دبی سرریز های مذکور ارائه دادند.

ایشان مقاطع مستطیلی-مستطیلی را در دو مقیاس کوچک و بزرگ در دو کانال جداگانه بررسی کردند، همانند مطالعات ظهیری و همکاران (۲۰۱۳) از ارتفاع وزنی تاج (\bar{w}) استفاده کرده و سرریز

مرکب مستطیلی-مستطیلی را به یک سرریز مستطیلی با ارتفاع تاج \bar{w} معادل نمودند. پارامتر ارتفاع وزنی تاج در سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی از رابطه (۲۸-۲) محاسبه می شود.

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

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

$$C_d = 0.7698 - 0.3327Fr_1^{0.1722} + 0.5685 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.5885} + 0.2163 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.5348} \quad (29-2)$$

$$C_d = 0.4874 - 0.5829Fr_1^{1.663} + 0.481 \left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{0.0491} + 0.2462 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.2194} \quad (30-2)$$

که در روابط 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.

صیادی و همکاران (۱۳۹۴)

صیادی و همکاران [۲۶] به بررسی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز لبه تیز مستطیلی با فشردگی جانبی و سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی پرداختند. نتایج کار ایشان نشان داد با افزایش دبی جریان در تمامی آزمایشات تا شروع جریان بصورت عبور از سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی، ضریب دبی کاهش می یابد. سپس با شروع به کار سرریز مرکب، با افزایش بار آبی روی سرریز، ضریب دبی با شیب زیادی افزایش می یابد و در انتهای هر آزمایش، یا به عبارتی با شروع جریان مستغرق، کاهش یافته و یا تقریباً ثابت می گردد. در نهایت نتایج نشان داد که ضریب دبی جریان عبوری از سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی، در شرایط هوادهی نشده بیشتر از حالت هوادهی شده می باشد.

خورشیدی و همکاران (۱۳۹۵)

خورشیدی و همکاران [۲۷] سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مثلثی را به دو روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ایشان رابطه ای برای محاسبه ضریب دبی به روش دیمارچی و مستقیم ارائه دادند و با بررسی آمارهای ارزیابی خطا برای مقادیر بدست آمده از این رابطه نتیجه گرفتند که این رابطه تقریب خوب و قابل قبولی را برای ضریب دبی ارائه می دهد. همچنین پس از شبیه سازی جریان عبوری از روی سرریز های مورد آزمایش نتیجه گرفتند که نرم افزار FLOW-3D قابلیت مناسبی در مدل سازی و تخمین جریان عبوری از سرریز مثلثی-مثلثی دارد.

شکری و همکاران (۱۳۹۵)

شکری و همکاران [۲۸] با بررسی تاثیر شیب طولی کانال بر ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی نتیجه گرفتند که شیب طولی کانال اثر ناچیزی بر ضریب دبی این سرریز ها دارد و می توان از آن صرف نظر کرد. همچنین توانایی نرم افزار FLOW-3D در شبیه سازی جریان عبوری از این سرریز ها را مورد مطالعه قرار دادند که مشخص شد این نرم افزار قابلیت مناسبی در شبیه سازی جریان عبوری از سرریز جانبی مرکب مثلثی-مستطیلی دارد.

فصل سوم

مواد و روش ها و معادلات حاکم

۱-۳ مقدمه

در ابتدای این فصل جریان متغیر مکانی با کاهش دبی که جریان حاکم بر سرریزهای جانبی است معرفی می‌گردد. سپس به معرفی ضریب دبی به روش‌های مستقیم و دیمارچی برای سرریزهای ساده و مرکب مستطیلی و همچنین سرریز ساده مثلثی پرداخته می‌شود. در بخش بعد به کمک آنالیز ابعادی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی موثر بر ضریب دبی معرفی می‌گردند. معرفی تجهیزات آزمایشگاه و شیوه عملکرد آنها و همچنین نحوه انجام آزمایشات در ادامه توضیح داده می‌شوند. سپس چگونگی پردازش داده‌ها و تحلیل نتایج با استفاده از انواع روابط مهم آمارهای ارزیابی خطا بیان می‌شوند. در انتهای فصل در مورد برنامه مدلسازی مورد استفاده در این تحقیق توضیحاتی ارائه می‌شود و به تشریح عملکرد نرم افزار FLOW-3D در انجام مدلسازی خواهیم پرداخت.

۲-۳ جریان متغیر مکانی با کاهش دبی

در این نوع جریان‌ها 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 پایین می‌آید. اما این کاهش دبی باعث تغییرات قابل ملاحظه و سریع مشخصات جریان نمی‌شود. به همین منظور افت انرژی در این نوع جریان‌ها ناچیز بوده و از معادله انرژی برای تعیین معادلات حاکم بر آن استفاده می‌شود.

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

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 پایین دست سرریز دائمی است.

۶. انحراف جریان در انرژی موجود در واحد جرم آب تأثیری 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 :

$$\frac{dA}{dx} = \frac{dA}{dy} \cdot \frac{dy}{dx} = S_f \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{dZ}{dx} = -S_0$$

$$\frac{dH}{dx} = -S_f$$

می باشد. با جایگذاری در رابطه (۲-۳) خواهیم داشت :

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

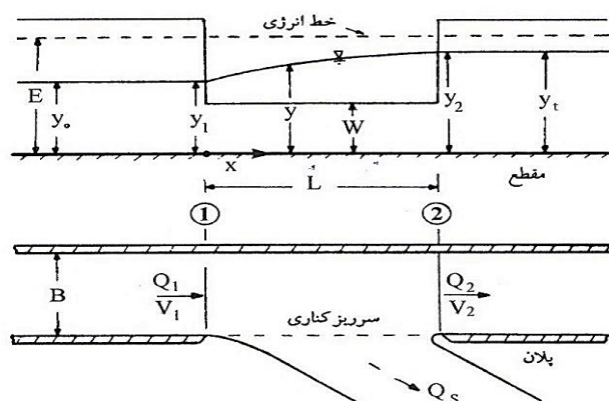
بدین ترتیب معادله جریان های متغیر مکانی با کاهش دبی به صورت رابطه (۳-۳) بیان می شود

که در آن 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.



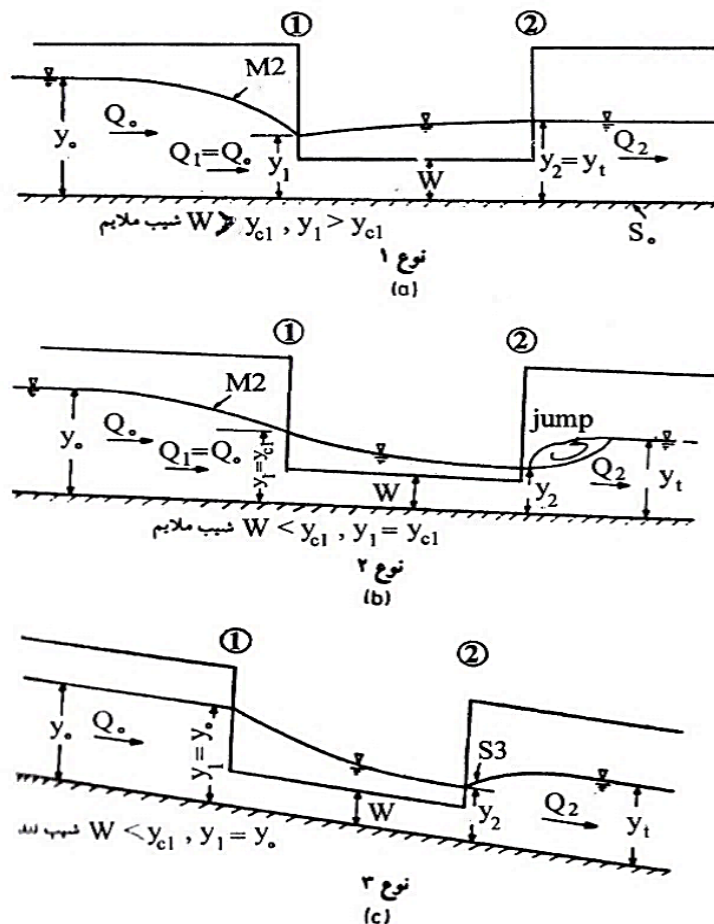
شکل (۱-۳) نمایی از یک سرریز جانبی همراه با کانال اصلی

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 y_0 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 به تدریج 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) 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 نیم رخ ۲، مقطع ۱ خواهد بود.

نوع ۳ شیب کانال تند ($y_0 < y_{c1}$) و $w < y_{c1}$ است شکل (۳-۲) در طول سرریز به تدریج عمق جریان از $y_1 = y_0$ 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 (۳-۲) انواع پروفیل جریان در سرریز جانبی

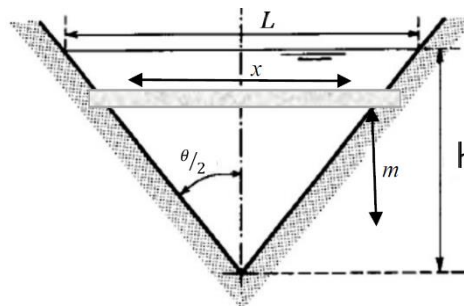
۴-۳ روش مستقیم برای محاسبه ضرایب دبی

۱-۴-۳ سرریز ساده مثلثی

سرریز های لبه تیز مثلثی با سطح مقطع V 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^۱ با فرضیات زیر معادله جریان عبوری از روی این سرریز ها را به صورت رابطه (۴-۳) ارائه داد [۲۹].

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 [۲۵]

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

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 تأثیرات هندسه، ویسکوزیته و کشش سطحی آب هنگام عبور از سرریز می شود. در بیشتر شرایط کاربردی، تأثیرات ویسکوزیته و

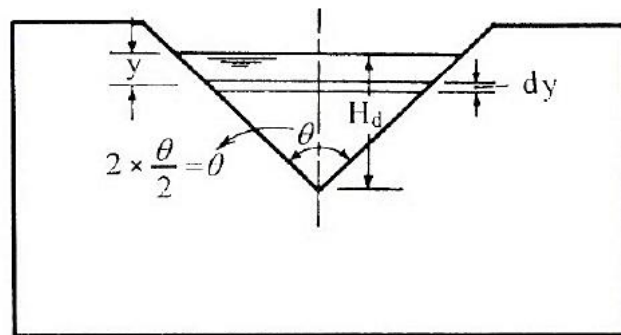
^۱ Henderson

کشش سطحی می تواند ناچیز فرض شود و در نتیجه C_d تنها تابعی از پارامترهای هندسی در نظر گرفته می شود.

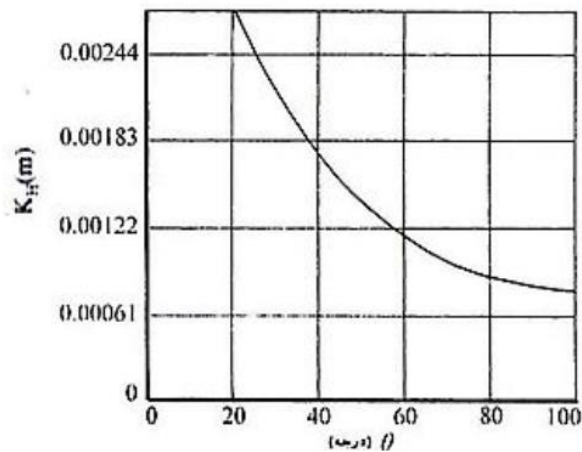
در استخراج رابطه فوق از انرژی حرکتی صرف نظر گردیده است. چون مقدار واقعی دبی از آنچه از رابطه (۳ - ۴) به دست می آید، کمتر است، باس (۱۹۷۶) جهت اصلاح آن، رابطه زیر را پیشنهاد داد:

$$Q = \frac{8}{15} C_{de} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{2gh_{de}}^{2.5} \quad (۵-۳)$$

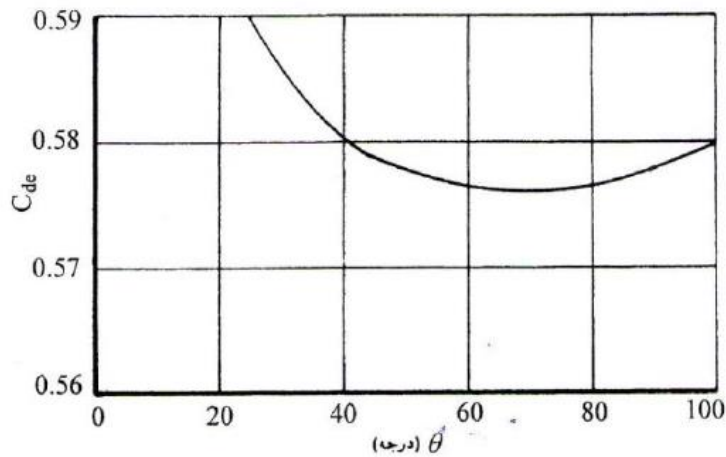
$$h_{de} = h_d + k_h \quad (۶-۳)$$



شکل (۳-۴) سرریز لبه تیز مثلثی [۲۵]



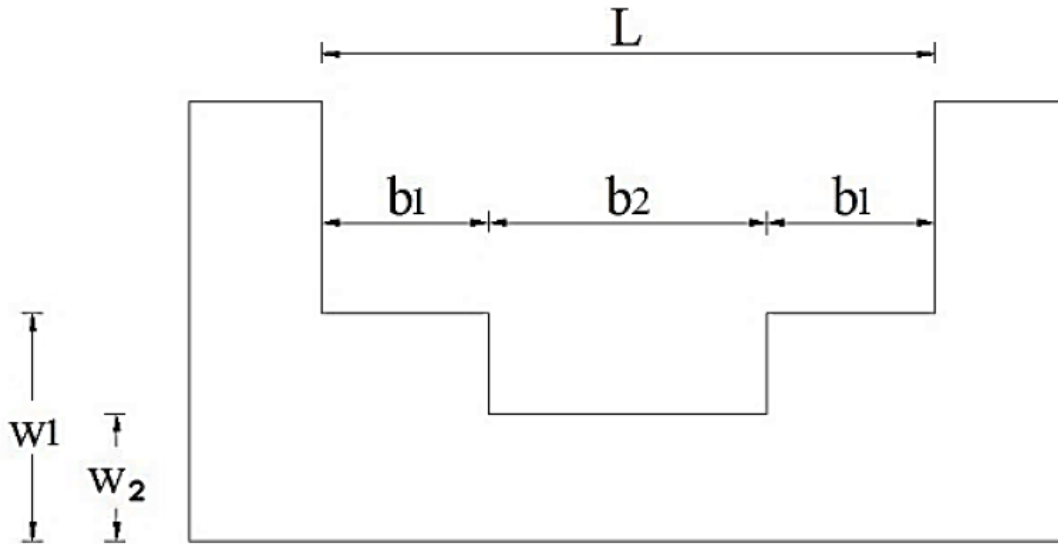
شکل (۳-۵) مقادیر k_h بر حسب زاویه [۲۵]



شکل (۶-۳) مقادیر C_{de} بر حسب زاویه [۲۵]

۲-۴-۳ سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی

به دلیل تغییر تراز تاج در سرریزهای مرکب در این شیوه از دو روش استفاده شده است. در روش نخست که از مطالعات مارتینز و همکاران [۱۹] برای سرریزهای نرمال مرکب مثلثی - مثلثی الگو گرفته شده است مقطع مرکب ۱ سرریز به چند سرریز ساده تجزیه شده و سپس با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مربوط به هر بخش، نسبت به تعیین دبی عبوری جزء اقدام می شود. با مجموع دبی های جزء، دبی کل عبوری از سرریز محاسبه می شود. لازم به ذکر است در این شیوه، جهت محاسبه ضریب دبی از روابط پیشنهادی سایر محققین برای سرریزهای ساده استفاده می گردد. به طوری که برای تعیین ضریب مذکور، مشخصات هندسی و هیدرولیکی همان بخش مقطع مرکب به کار گرفته می شود.



شکل (۷-۳) سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی

اما روش دوم به کارگیری پارامتر ارتفاع وزنی تاج است که توسط ظهیری و همکاران (۲۰۱۳) معرفی شد. به طوری که ضریب دبی برای سرریز مرکب مستطیلی - مستطیلی شکل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_d = \frac{Q_s}{\frac{2}{3} \sqrt{2gL} (y_1 - \bar{w})^{1.5}} \quad (7-3)$$

که ارتفاع وزنی تاج سرریز برابر است با:

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (8-3)$$

۵-۳ روش دیمارچی برای محاسبه ضرایب دبی

۱-۵-۳ سرریز مستطیلی ساده

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

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f - \left(\frac{\alpha Q}{gA^2}\right) \cdot \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \alpha Fr^2} \quad (9-3)$$

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 (۹-۳) به صورت رابطه (۱۰-۳) بدست خواهد آمد :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Qy(-\frac{dQ}{dx})}{gB^2y^3 - Q^2} \quad (10-3)$$

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.

از طرفی هندرسون (1966) رابطه تغییرات دبی در طول سرریز لبه تیز مستطیلی را ارائه داد که برابر است با:

$$q = \left(-\frac{dQ}{dx}\right) = \left(\frac{dQ_w}{dx}\right) = \frac{2}{3} C_m \sqrt{2g}(y-w)^{1.5} \quad (11-3)$$

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:

$$Q = By\sqrt{2g(E-y)} \quad (12-3)$$

با ترکیب روابط (۱۱-۳) و (۱۲-۳) در معادله (۱۰-۳) خواهیم داشت :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{4C_m [(E-y)(y-w)^3]^{0.5}}{3B(3y-2E)} \quad (13-3)$$

با فرض مستقل بودن C_m از x و انتگرال گیری از رابطه بالا بین $x = 0$ و $x = L$ (به ترتیب نقاط مقاطع ۱ و ۲ در شکل (۸-۳))، نتیجه می شود :

$$L = x_2 - x_1 = \frac{3B}{2 C_m} (\phi_2 - \phi_1) \quad (14-3)$$

که در آن L طول سرریز و ϕ تابع جریان متغیر دیمارچی می باشد که دیمارچی آن را به صورت رابطه (۱۵-۳) معرفی کرده است :

$$\phi = \frac{2E - 3w}{E - w} \left(\frac{E - y}{y - w} \right)^{0.5} - 3 \sin^{-1} \left(\frac{E - y}{E - w} \right) \quad (15-3)$$

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

$$C_m = \frac{3B}{2L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (16-3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \phi_2 - \phi_1 = & \frac{2E - 3w}{E - w} \left[\left(\frac{E - y_2}{y_2 - w} \right)^{0.5} - \left(\frac{E - y_1}{y_1 - w} \right)^{0.5} \right] \\ & - 3 \left[\sin^{-1} \left(\frac{E - y_2}{E - w} \right)^{0.5} - \sin^{-1} \left(\frac{E - y_1}{E - w} \right)^{0.5} \right] \end{aligned} \quad (17-3)$$

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 و با استفاده از رابطه (۱۲-۳) مقدار E بدست می آید.

۲. با استفاده از رابطه (۱۷-۳) مقدار y_2 محاسبه شود.

۳. مقدار دبی کانال در پایین دست سرریز (Q_2) توسط رابطه (۱۲-۳) 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 :

$$Q_w = Q_1 - Q_2 \quad (18-3)$$

۳-۵-۲ سرریز مستطیلی مرکب

در این روش برای حل مشکل ارتفاع تاج متغیر در طول سرریز مرکب، ابتدا سرریز مرکب را به سرریز ساده مستطیلی معادل کرده و سپس به روش گفته شده برای سرریز های ساده، به تعیین ضریب دیمارچی پرداخته می شود. در واقع تنها کفایت 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 مستطیلی - مستطیلی محاسبه شود. بقیه پارامتر های مورد استفاده برای تعیین ضریب دبی دیمارچی در سرریز مرکب و سرریز ساده معادل شده، برابر می باشند.

$$C_m = \frac{3B}{2L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (19-3)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} \phi_2 - \phi_1 &= \frac{2E - 3\bar{w}}{E - \bar{w}} \left[\left(\frac{E - y_2}{y_2 - \bar{w}} \right)^{0.5} - \left(\frac{E - y_1}{y_1 - \bar{w}} \right)^{0.5} \right] \\ &- 3 \left[\sin^{-1} \left(\frac{E - y_2}{E - \bar{w}} \right)^{0.5} - \sin^{-1} \left(\frac{E - y_1}{E - \bar{w}} \right)^{0.5} \right] \end{aligned} \quad (20-3)$$

همان طور که در روش بدست آوردن ضریب دبی مستقیم ذکر شد، برای محاسبه \bar{w} از فرمول

زیر استفاده می نماییم:

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (21-3)$$

۳-۶ تحلیل ابعادی

در علم مکانیک سیالات اغلب پدیده‌ها به متغیرهای زیادی وابسته‌اند و تجزیه و تحلیل آنها با استفاده از نمونه اصلی و این تعداد متغیر، کار پرهزینه و وقت‌گیری است این مشکل با استفاده از آنالیز ابعادی حل شده است بدین ترتیب که به جای استفاده از تک تک متغیرها، اعداد بدون بعد مربوط را بدست آورده و از آنها استفاده می‌کنیم و در نتیجه تعداد متغیرها کاهش می‌یابد. به این صورت که ابتدا پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی تعیین می‌شوند. سپس به کمک تئوری باکینگهام یک سری پارامترهای بی بعد که ترکیبی از پارامترهای اولیه هستند بدست می‌آیند. در این روش می‌توان تعدادی از پارامترهای بی بعد را با توجه به تجربیاتی که از مطالعات گذشته حاصل شده و محرز گردیده که در آن پدیده تأثیر ناچیزی دارند، نادیده گرفت و در نتیجه آنها را از روابط حذف نمود. در مرحله بعدی یک رابطه ریاضی مناسب بین پارامترهای بی بعد حاصله اعمال می‌شود. در نهایت به کمک داده‌های آزمایشگاهی، ضرایب مجهول رابطه ریاضی تعیین شده و رابطه‌ای مشخص برای ضریب دبی بدست خواهد آمد. در این مرحله به کمک داده‌های آزمایشگاهی تأثیر هر کدام از پارامترهای بی بعد را بر ضریب دبی بررسی کرده و در صورت لزوم پارامترهای بی بعد کم تأثیر را از رابطه ضریب دبی حذف می‌نماییم. در تحقیق حاضر به دلیل ماهیت آزمایشگاهی آن، انجام آنالیز ابعادی ضروری می‌باشد که نحوه انجام آن شرح داده خواهد شد.

برای سرریز مستطیلی پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی به صورت پارامترهای هیدرولیکی و هندسی دسته بندی می‌شوند.

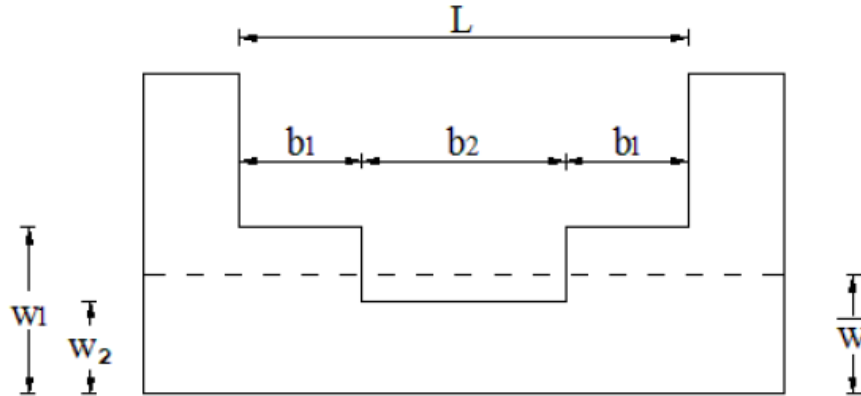
الف. پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر ضریب دبی

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. پارامترهای هندسی مؤثر بر ضریب دبی

طول سرریز (L)، ارتفاع تاج سرریز (w_i) و عرض کانال (B_i)



شکل (۸-۳) سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی

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

$$C_d = f(\rho, g, \mu, Q_1, \gamma_1, v_1, b_1, b_2, b_3, w_1, w_2, \psi, \sigma, B, S_0) \quad (22-3)$$

چون دبی جریان در بالادست سرریز (Q_1) تابعی از γ_1 ، B و v_1 است، می توان آن را از رابطه فوق حذف کرد همچنین به دلیل اینکه $b_1 = b_3$ است b_3 نیز از روابط حذف می شود، بنابراین داریم :

$$C_d = f(\rho, g, \mu, \gamma_1, v_1, b_1, b_2, w_1, w_2, \psi, \sigma, B, S_0) \quad (23-3)$$

پس از انجام آنالیز ابعادی به کمک تئوری باکینگهام، پارامترهای بی بعد مؤثر بر ضریب دبی به صورت زیر به دست می آیند :

$$C_d = f\left(Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g\gamma_1}}, We = \frac{\rho\gamma_1 v_1^2}{\sigma}, Re = \frac{\rho R v_1}{\mu}, \frac{w_i}{\gamma_1}, \frac{b_i}{\gamma_1}, \frac{b_i}{B}, \psi, S_0\right) \quad (24-3)$$

که در آن we عدد وبر، ψ زاویه انحراف جریان، ρ جرم حجمی آب، σ کشش سطحی آب و R شعاع هیدرولیکی است.

برقی و همکاران [۱۱] پس از انجام آزمایشات متعدد گزارش دادند که میتوان از اثر شیب کانال S_0 در شرایط زیر بحرانی جریان صرف نظر کرد .

از طرفی قدسیان [۱۳] با علم به اینکه حداقل ارتفاع آب روی سرریز هنگام برداشت داده های آزمایشگاه همواره تأمین شده است یعنی $(y_0 > 5mm)$ ، از مقدار عدد وبر در محاسباتش صرف نظر کرد و چون این معیار در این پژوهش نیز رعایت شده است اثر وبر از روابط حذف می گردد.

همچنین به دلیل اینکه در جریان آشفته تأثیر لزجت در مقایسه با اینرسی بسیار ناچیز است و چون در این آزمایش جریان همواره به صورت آشفته می باشد اثر پارامتر عدد رینولز هم نادیده گرفته می شود.

بر اساس مطالب ذکر شده پارامتر های بی بعد مؤثر بر ضریب دبی سرریز مستطیلی مرکب عبارتند از :

$$C_d = f \left(Fr_1, \frac{b_i}{B}, \frac{b_i}{y_1}, \frac{w_i}{y_1} \right) \quad (25-3)$$

۷-۳ بخش آزمایشگاهی پژوهش

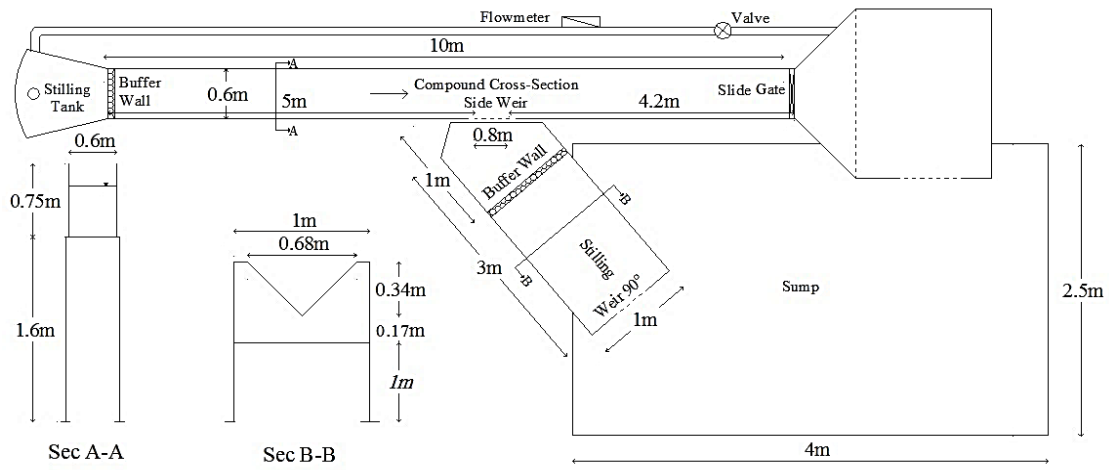
فلوم مورد آزمایش دارای طول ۱۰ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۷۵ سانتی متر بوده است. جنس کف فلوم از ورق فلزی رنگ آمیزی شده و دیواره های آن از شیشه با ضخامت ۸ میلی متر ساخته شده است. در انتهای کانال یک دریچه متحرک^۱ فولادی با ضخامت ۴ میلی متر و با بازشدگی قابل تنظیم تعبیه شده است تا در مواقعی که ارتفاع 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

^۱ Slide Gate

یک عمق سنج دیجیتالی^۱ 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 تأمین آب مورد نیاز دو مخزن با مجموع ظرفیت ۱۸ متر مکعب تعبیه گردید. برای تأمین 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^۲ 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 قرارگیری آنها بر روی لوله باید به دقت رعایت گردد چرا که تأثیر 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.

¹ Point Gauge

² Ultrasonic Flowmeter



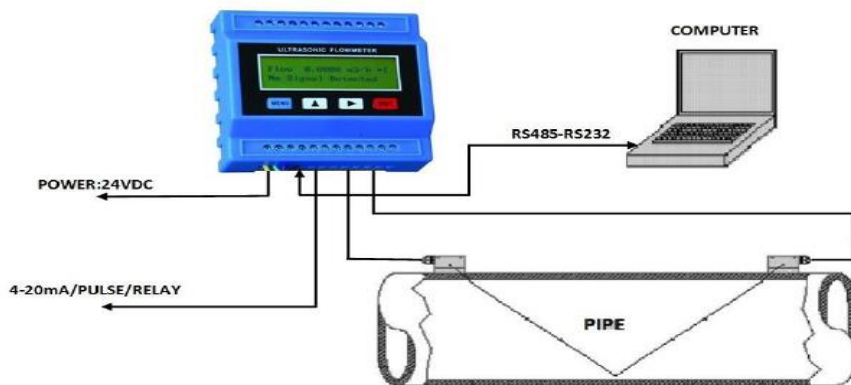
شکل (۳-۹) نمایی از فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده در تحقیق حاضر [۲۵]



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



شکل (۳-۱۱) تصاویری از فلوم آزمایشگاهی به همراه تجهیزات آن



شکل (۳-۱۲) فلومتر آلتراسونیک به همراه اتصال نوع V سنسورها

۳-۸ محدوده پارامتر های متغیر آزمایش

در تحقیق حاضر سعی شد با تغییر در مشخصات هندسی سرریز و نیز مشخصات هیدرولیکی جریان تأثیر 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 ۲ میلی متر انتخاب شده است. برش مقاطع سرریز نیز با دستگاه CNC 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 که دارای طول ۴۵cm و طول ۶۰cm بودند طراحی شدند. تیپ اول شامل ۱۱ سرریز با طول کل ۴۵cm می باشد و تیپ دوم مقاطع به طول ۶۰cm بود که شامل ۸ سرریز شد. مقاطع سرریز با مشخصات هندسی متفاوت طراحی و ساخته شد که محدوده پارامتر های هندسی آنها در جدول (۳-۲) و همچنین بازه پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات در جدول (۳-۱) نمایش داده شده است.

جدول (۱-۳) محدوده پارامتر های هیدرولیکی آزمایشات

پارامتر	محدوده تغییرات
Fr	۰/۲۵-۰/۹۷
Q (l/s)	۵۳/۵۷-۱۰۲/۴۰
h_{up} (cm)	۱۱/۳۰-۲۵/۳۵
y_1 (cm)	۱۱/۲۰-۲۷/۳۵
y_2 (cm)	۱۲/۸۲-۳۱/۲۱
y_{w1} (cm)	۱۰/۶۰-۲۶/۲۱
y_{w2} (cm)	۱۳/۳۳-۲۹/۳۴

جدول (۲-۳) محدوده پارامتر های هندسی آزمایشات

پارامتر	محدوده تغییرات
L	۴۵-۶۰
b_1 (cm)	۱۰-۲۰
b_2 (cm)	۱۰-۲۵
b_3 (cm)	۱۰-۲۰
w_1 (cm)	۹/۰۹-۱۹/۲۰
w_2 (cm)	۳/۸۴-۹/۷۵

مشخصات دقیق سرریز های جانبی مرکب لبه تیز استفاده شده در این پژوهش در جدول (۳-۳) قابل مشاهده می باشد که برای اطلاع از وضعیت قرار گیری هر پارامتر می توان از شکل (۸-۳) استفاده نمود.

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

شماره سرریز	b_1 (cm)	b_2 (cm)	b_3 (cm)	L (cm)	w_1 (cm)	w_2 (cm)
۱	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۹,۱	۶,۶۵
۲	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۴	۶,۴۸
۳	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۶,۴۵	۶,۴۶
۴	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۳,۹۸	۴,۰۹
۵	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۹,۰۹	۴,۰۷
۶	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۸,۹۵	۳,۸۴
۷	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۳,۹۱	۸,۹۳
۸	۱۵	۱۵	۱۵	۴۵	۱۹	۹
۹	۱۰	۲۵	۱۰	۴۵	۱۴	۴
۱۰	۱۲,۵	۲۰	۱۲,۵	۴۵	۱۴,۵۳	۴,۵۴
۱۱	۱۷,۵	۱۰	۱۷,۵	۴۵	۱۴,۳۸	۴,۳۸
۱۲	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۹,۳	۴,۳
۱۳	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۴,۳	۴,۳
۱۴	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۶,۶۵	۴,۱۵
۱۵	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۹,۱۸	۶,۷۸
۱۶	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۴,۲۰	۶,۷۲
۱۷	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۶,۷۵	۶,۷۲
۱۸	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۴,۷۵	۹,۷۵
۱۹	۲۰	۲۰	۲۰	۶۰	۱۹,۲	۹,۲

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

۹-۳ پردازش نتایج آزمایشگاهی

در حین انجام آزمایشات مقادیر اندازه گیری شده در جدولی که در نرم افزار اکسل^۱ تهیه گردیده بود ثبت می شد. همچنین این جدول شامل پارامترهای هندسی سرریزهای مورد آزمایش نیز می باشد. پس از انجام آزمایشات، مقادیر دبی واقعی عبوری از سرریز و مقادیر پارامترهای بی بعد ذکر شده در جدول (۱-۳) بدست می آید. سپس رابطه ای برای تخمین C_d که شامل همه ی پارامترهای بی بعد موجود در رابطه (۲۵-۳) باشد، تعریف می شود که در صورتی که در محاسبات مشخص شود پارامتر بی بعدی دارای تأثیر بسیار کم در تخمین C_d است این پارامتر از رابطه ضریب دبی حذف می گردد. برای بدست آوردن ضرایب مجهول این رابطه، از رگرسیون غیر خطی و روش حداقل مربعات خطا^۲ 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 آمارهای ارزیابی خطا به عنوان تابع هدف انتخاب خواهند شد و ضرایب مجهول رابطه ضریب دبی به عنوان متغیرهای 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.

^۱ Excel

^۲ least Square

۳- ۱۰ آمار های ارزیابی خطا

برای بدست آوردن برآوردی از میزان دقت روابط پیشنهادی و میزان تشابه نتایج بدست آمده از 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 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

$$ME = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N |Q_c - Q_o| \quad (26-3)$$

۲. درصد خطای میانگین

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_c - Q_o}{Q_o} \right| \quad (27-3)$$

۳. ماکزیمم خطای نسبی (Maximum Relative Error)

$$MRE = \max\left(\frac{Q_c - Q_o}{Q_o}\right) \quad (28-3)$$

۴. جذر میانگین مربعات خطا

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_c - Q_o)^2} \quad (29-3)$$

۵. میانگین نسبت مقادیر محاسباتی به مشاهداتی

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{Q_c}{Q_o} \quad (30-3)$$

۶. ماکزیمم خطای نسبی

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - \overline{Q_o})(Q_c - \overline{Q_c})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - \overline{Q_o})^2 \sum_{i=1}^N Q_c - \overline{Q_c}}} \quad (3-31)$$

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 10.0.4 نصب شده بر روی سیستم عامل windows server 2012 از نوع ۶۴ بیتی که دارای پردازنده ۱۶ هسته ای بود و همچنین نسخه ی 10.0.1 نصب شده بر روی سیستم عامل Windows 7 از نوع ۶۴ بیتی دارای پردازنده ۸ هسته ای استفاده شده است. هر دو سیستم دارای حافظه 32 GB می باشند.

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.

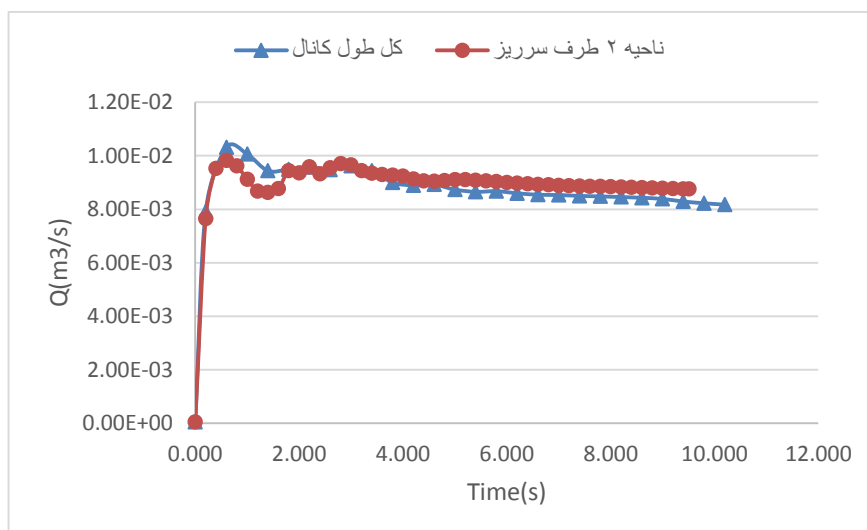
الگوهای فیزیکی متنوعی در مدل FLOW-3D برای شبیه سازی پدیده های هیدرولیکی وجود دارد. از جمله آنها می توان به الگوهای آب های کم عمق، لزجت، کاویتاسیون^۱، آشفتگی، محیط های متخلخل، چشمه و چاه، ورود هوا و ... اشاره کرد. از این الگوها می توان در زمینه هایی چون محیط زیست، هوافضا، علوم دریایی، هیدرولیک، ریخته 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 صورتی که اولاً به دلیل تولید آسان این نوع شبکه، نظم مناسب آن و اشغال کردن فضای کمتری از حافظه و ثانیاً به دلیل به کار گیری دو ابزار VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D، این نوع شبکه بندی یک مزیت می باشد.

۳-۱۱-۱ شبکه بندی

خورشیدی و همکاران [۲۸] در تحقیقات خود میزان شباهت مدل کردن ناحیه دو طرف سرریز به جای کل طول کانال را توسط نرم افزار FLOW-3D بررسی کردند. ایشان در تحقیق خود 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 را نیز مدل کردند. شکل (۳-۱۴) نمودارهای دبی عبوری بر حسب زمان در هر دو مدل مذکور را نشان می دهد. با مقایسه نمودار دبی عبوری بر حسب زمان، 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.

^۱ cavitation



شکل (۳-۱۳) بررسی تغییرات دبی خروجی بر حسب زمان در شبیه سازی کل کانال و ناحیه دو طرف سرریز [۲۸]

در این تحقیق برای مدل سازی کانال به جای مدل کردن کل طول کانال اصلی که امکان آن به دلیل محدودیت در پردازنده وجود نداشت فقط قسمت دو طرف سرریز مدل و مش بندی شده است.

در ادامه به بررسی دو ابزار VOF و FAVOR در مدل FLOW-3D پرداخته می شود.

۳-۱۱-۲ روش VOF

این روش مثالی از روش جز حجمی^۱ 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^۲ قطع می شوند قسمتی پر از سیال و قسمتی خالی از سیال می باشند.

¹ Volume Fraction Methods

² Free surface

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 فرآیند 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.

۳-۱۱-۳ روش FAVOR

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.

۱۲-۳ معادلات حاکم

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

۱-۱۲-۳ معرفی سیستمهای مختصات برنامه

معادلات موجود در مدل FLOW – 3D این قابلیت را دارند که در هر دو شکل کارترین (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 کارترین 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 دوابزار 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:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (۳۲-۳)$$

که V_F کسر حجمی جریان، ρ چگالی سیال، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم می باشند. مقادیر v و w به ترتیب مقادیر سرعت در راستای x و y و z و r و 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 کافیت در معادلات بالا مقدار R را برابر مقدار زیر قرار دهیم.

$$R = r_m/r \quad (33-3)$$

که در آن $y = r_m \theta$ و r_m برابر شعاع از مرجع ثابت می باشد.

در نتیجه برای مختصات کارتزین $R = 1$ و $\xi = 0$ است و در مختصات استوانه ای $\xi = 1$ و R برابر رابطه (33-3) می باشد.

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

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_\rho A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_\rho A_y R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_\rho A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\rho v_\rho A_x}{x} \quad (34-3)$$

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

$$v_\rho = C_p \mu / \rho \quad (35-3)$$

μ برابر ضریب پخش مونتوم یا همان لزجت می باشد و C_p پارامتر ثابتی است که معکوس آن مربوط به عدد آشفتگی اشمیت^۱ است [۳۰]. این حالت پخش جرم در فرآیند های اختلاط آشفتگی مربوط به سیالاتی که چگالی آنها دارای گرادیان غیر یکنواخت می باشد، کاربرد دارد.

ترم آخر رابطه (32-3) همانگونه که گفته شد مربوط به دانسیته می باشد که به عنوان مثال برای تزریق جرم از خلل و فرج یک دیواره کاربرد دارد.

¹ Turbulent Schmidt number

هنگامی که سیال مورد استفاده غیر قابل تراکم باشد، ρ در معادله پیوستگی ثابت بوده و مشتق

آن صفر خواهد شد. لذا رابطه (۳۲-۳) به صورت رابطه (۳۶-۳) ساده سازی خواهد شد:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (36-3)$$

۳-۱۲-۳ معادله مومنتم

معادلات حرکت برای مولفه های سرعت به صورت سه بعدی یا همان معادلات ناویر-استوکس به

صورت رابطه (۳۷-۳) قابل ارائه می باشند. در معادلات ارائه شده عباراتی اضافی وجود دارد که هر کدام

از آنها در ادامه تشریح خواهند شد:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v^2}{xV_F} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y uv}{xV_F} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (37-3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} =$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s)$$

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 :

$$\begin{aligned} \rho V_F f_x &= w_{sx} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xx}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{xz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xx} - A_y \tau_{yy}) \right\} \\ \rho V_F f_y &= w_{sy} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xy}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{yz}) + \frac{\xi}{x} (A_x - A_y \tau_{xy}) \right\} \quad (38-3) \\ \rho V_F f_z &= w_{sz} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (A_x \tau_{xz}) + R \frac{\partial}{\partial y} (A_y \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_z \tau_{zz}) + \frac{\xi}{x} (A_x \tau_{xz}) \right\} \end{aligned}$$

که در آن :

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{yy} &= -2\mu \left\{ R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \\ \tau_{zz} &= -2\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + R \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\xi u}{x} \right) \right\} \quad (39-3) \\ \tau_{xy} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial x} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\xi v}{x} \right\} \\ \tau_{xz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\ \tau_{yz} &= -\mu \left\{ \frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \end{aligned}$$

۱۳-۳ مدل های آشفته

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

(تنش های رینولدز) موسوم هستند. مدل های آشفتگی 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 گرادیان 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.

$$\mu_t = C\rho\nu_t l \quad (۴۰-۳)$$

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.

۳-۱۳-۱ معرفی 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.

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 پرانتل^۱ مثالی از این نوع می باشد.

۲. مدل های یک معادله ای^۲

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:

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (۳-۴۱)$$

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

$$v_t = \sqrt{k} \quad (۳-۴۲)$$

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. مدل های دو معادله ای^۳

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.

¹ Prandtl mixing-length model

² On- equation, turbulent energy model

³ Two equation ($k - \varepsilon$)

۴. مدل گروه های نرمال شده رینولدز (RNG)^۱

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.

۵. مدل های شبیه سازی گردابه های بزرگ^۲

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 به مراتب بیشتر خواهد بود.

۳-۱۳-۲ 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 پیرانتل

۲. مدل یک معادله ای انرژی جنبشی آشفتگی

۳. مدل دو معادله ای $k - \varepsilon$

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

¹ Renormalization group(RNG)

² Large eddy simulation model

مطالعه حاضر برای شبیه سازی جریان از روش $RNG k - \varepsilon$ استفاده شده است. دلیل این انتخاب نتایج سایر محققین در مقایسه بین مدل های آشفتگی مختلف برای شبیه سازی جریان بر روی سرریزهای جانبی مرکب و سرریز های نرمال مرکب، بوده است [۲۴ و ۲۶]. لذا به معرفی معادلات روش $RNG k - \varepsilon$ 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 $RNG k - \varepsilon$

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 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 آشفته:

$$v_t = CNU \frac{k_T^2}{\varepsilon_T} \quad (۳-۴۳)$$

معادله انتقال آشفتگی:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right\} = P_T + G_T + Diff_T - \varepsilon_T \quad (۳-۴۴)$$

که در آن k_T انرژی جنبشی آشفتگی، ε_T اتلاف آشفتگی، V_F ، A_x ، A_y و A_z توابع FAVOR، CNU پارامتری است که مقدار آن در این روش برابر ۰/۸۵ بوده و P_T تولید انرژی آشفتگی می باشند. که مقدار P_T از رابطه زیر حاصل می شود:

$$P_T = C_{SPRO} \left(\frac{\mu}{\rho V_F} \right) \left\{ \begin{aligned} & 2A_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2A_y \left(R \frac{\partial v}{\partial y} + \xi \frac{u}{x} \right)^2 + 2A_z \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial u}{\partial y} - \xi \frac{v}{x} \right) \left[A_x \frac{\partial v}{\partial x} A_y \left(R \frac{\partial u}{\partial y} + \xi \frac{v}{x} \right) \right] \\ & + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} + A_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ & + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} + A_y R \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (45-3)$$

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 :

$$G_T = -CRHO \left(\frac{\mu}{\rho^3} \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + R^2 \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (46-3)$$

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 ۲/۵ را اختیار می کند. عبارت پخش از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Diff_T = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(v_k A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_k A_y R \frac{\partial k_T}{\partial y} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial z} \left(v_k A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) \right) + \xi \frac{v_k A_x k_T}{x} \end{aligned} \right\} \quad (47-3)$$

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

$$v_k = RMTKE \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (48-3)$$

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

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

$$\frac{CDIS1. \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3. G_T) + Diff_\varepsilon - CDIS2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (49-3)$$

که ضرایب $CDIS1$ و $CDIS3$ به ترتیب برابر $۱/۴۲$ و $۰/۲$ می باشند. مقدار ضریب $CDIS2$ با

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

پخش اتلاف برای ε_T توسط رابطه (۵۰-۳) قابل بیان است:

$$Diff_{\varepsilon} = \frac{1}{V_F} \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(v_{\varepsilon} A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_{\varepsilon} A_y R \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} \right) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_{\varepsilon} A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) + \xi \frac{v_{\varepsilon} A_x \varepsilon_T}{x} \end{aligned} \right\} \quad (۵۰-۳)$$

فصل چهارم

پردازش داده های آزمایشگاهی و

مدلسازی 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:

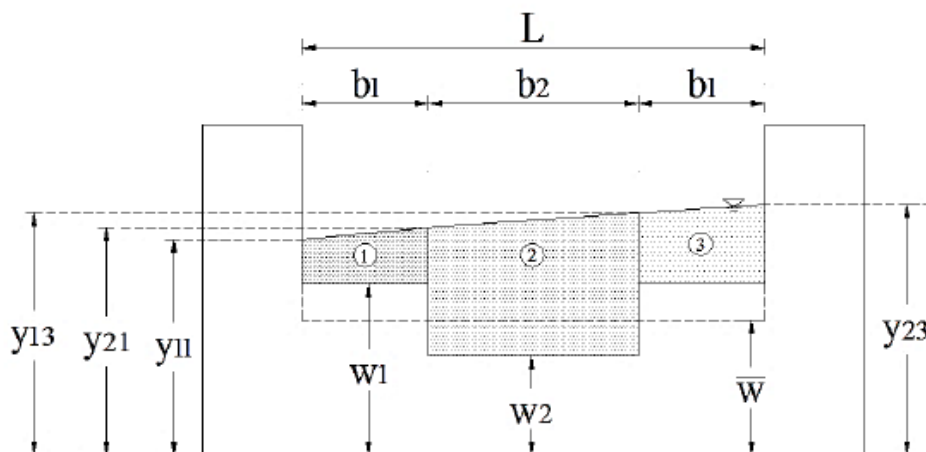
۱. ارائه ضریب دبی متوسط به روش مستقیم برای سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی - مستطیلی
۲. ارائه ضریب دبی متوسط به روش دیمارچی برای سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی - مستطیلی و کنترل فرض ناچیز بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی
۳. رسم نمودار پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز و محور وسط کانال برای سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی - مستطیلی از داده های آزمایشگاهی و عددی و مقایسه این دو دسته از نتایج
۴. مدل سازی با نرم افزار FLOW-3D
۵. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی

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

در این قسمت نحوه محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی 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.

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

در روش مستقیم که ساده ترین شیوه محاسبه دبی عبوری از سرریز است براساس رابطه تغییرات دبی در واحد طول سرریز، با داشتن پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز ضریب شدت جریان و به دنبال آن دبی عبوری از سرریز محاسبه می گردد.



شکل (۱-۴) شمای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی

باتوجه به رابطه تغییرات دبی در طول سرریز مستطیلی که توسط هندرسون به صورت رابطه (۱-۴) ارائه شد مشخص است که برای استفاده این رابطه برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی مشکلی وجود دارد و آن هم ثابت نبودن مقدار w در طول سرریز است.

$$Q_s = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2gL} (y_1 - w)^{1.5} \quad (۱-۴)$$

برای حل این مشکل از ارتفاع وزنی تاج سرریز به جای ارتفاع سرریز استفاده می شود که این روش اولین بار توسط ظهیری و همکاران [۲۳] معرفی شد و بعد از آن توسط عامری و همکاران [۲۷] به کار گرفته شد که نتایج قابل قبولی برای این روش ثبت شده است. در این شیوه سرریز مرکب با یک سرریز ساده به ارتفاع \bar{w} معادل می شود به طوری که ضریب دبی برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به صورت زیر ارائه می گردد:

$$C_d = \frac{Q_s}{\frac{2}{3} \sqrt{2gL} (y_1 - \bar{w})^{1.5}} \quad (۲-۴)$$

که در آن \bar{w} مطابق با شکل (۱-۴) ارتفاع وزنی تاج سرریز بوده و برای سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\bar{w} = \frac{2w_1 b_1 + w_2 b_2}{2b_1 + b_2} \quad (۳-۴)$$

به طوری که w_1 و b_1 به ترتیب ارتفاع و طول تاج سرریز در قسمت کناری و w_2 و b_2 ارتفاع و طول تاج در قسمت میانی سرریز هستند.

بعد از اتمام آزمایشات، با داشتن پارامترهای آزمایشگاهی مورد نظر، مقادیر C_d محاسبه شد. سپس به کمک نتایج و با استفاده از روش حداقل سازی مجموع مربعات خطا و تحلیل ابعادی، رابطه ای برای تخمین ضریب دبی سرریز جانبی لبه تیز مرکب پیشنهاد گردید.

$$C_d = 3.42988 + 0.12735 Fr^{1.46352} + 0.4462 \frac{\bar{w}}{y_1}^{3.24272} - 2.9022 \frac{L}{B}^{-0.059} \quad (۴-۴)$$

برای بررسی میزان تأثیر پارامتر $\frac{L}{y_1}$ ، 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.

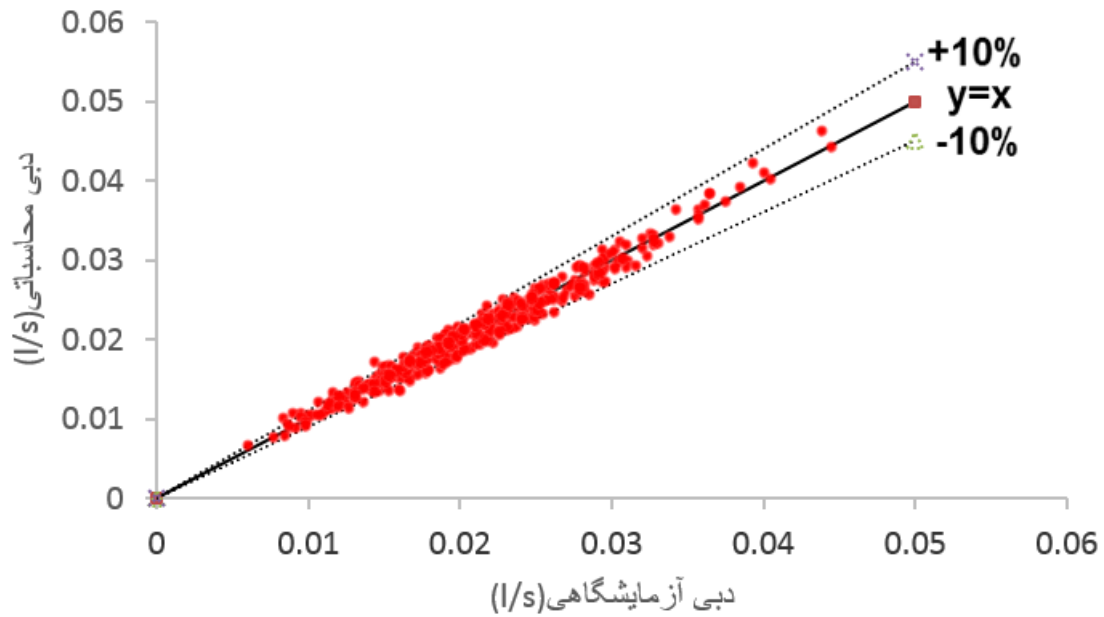
جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای ارزیابی خطا برای نشان دادن تأثیر $\frac{L}{y_1}$ بر ضریب دبی به روش مستقیم

نوع خطا	مقدار خطا		
	با حضور C_d در $\frac{L}{y_1}$	بدون حضور C_d در $\frac{L}{y_1}$	اختلاف خطا
RMSE	۰/۰۳۶۰۶۷۸	۰/۰۳۶۳۸۱۳	۰/۰۰۰۳۱۳۵
ME	۰/۰۲۸۳۳۲۶	۰/۰۲۸۹۰۵۲	۰/۰۰۰۵۷
MAPE	۰/۰۴۴۵۳۷۴	۰/۰۴۵۴۴۶۶	۰/۰۰۰۹۱
MRE	۰/۲۲۱۶۳۰	۰/۲۱۷۰۲۲	۰,۰۰۴۶۱
σ	۱/۰۰۳۰۴۷	۱/۰۰۳۰۸۵	۰/۰۰۰۰۳۸
R^2 (دبی)	۰/۹۷۲۳	۰/۹۷۱۷	۰/۰۰۰۶

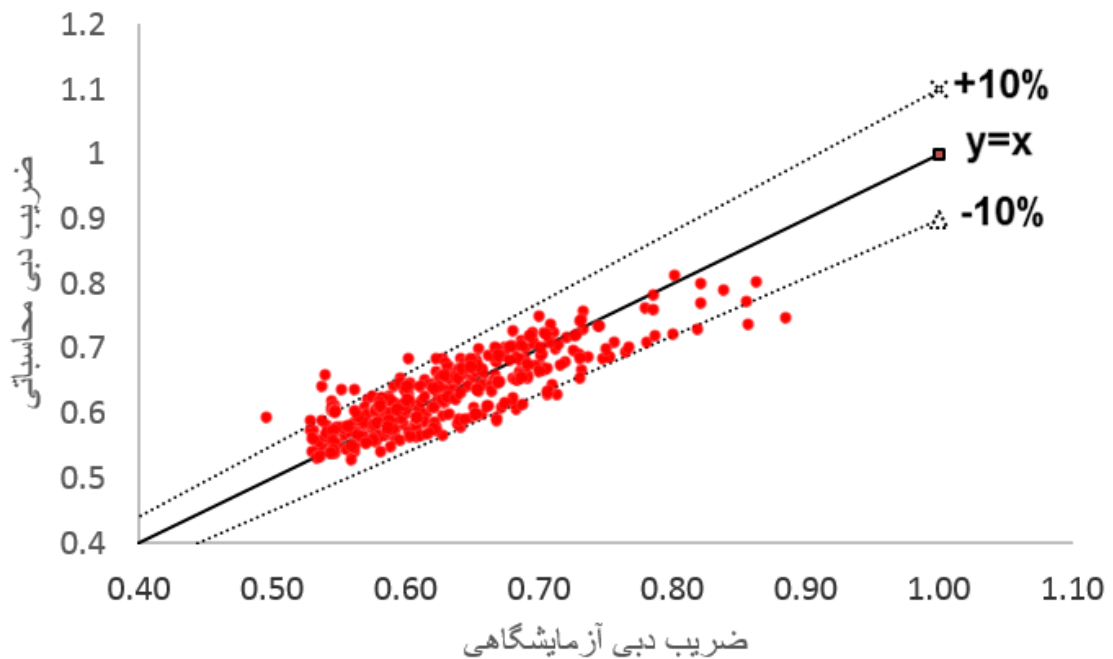
با توجه به جدول (۱-۴)، مقادیر خطا و همچنین ضریب رگرسیون دبی در دو حالت اختلاف بسیار جزئی دارند که این نشان دهنده عدم تأثیر پارامتر بی بعد $\frac{L}{y_1}$ بر ضریب دبی سرریز مرکب جانبی مستطیلی - مستطیلی می باشد. همچنین با توجه با جدول (۱-۴) خطاها در محدوده کم و قابل قبولی قرار دارند و رابطه (۴-۴) رابطه مناسبی برای برآورد ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مستطیلی - مستطیلی می باشد.

در شکل (۲-۴) نمودار دبی محاسباتی به دبی آزمایشگاهی و نیز ضریب دبی محاسباتی به ضریب

دبی آزمایشگاهی ترسیم شده است.



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

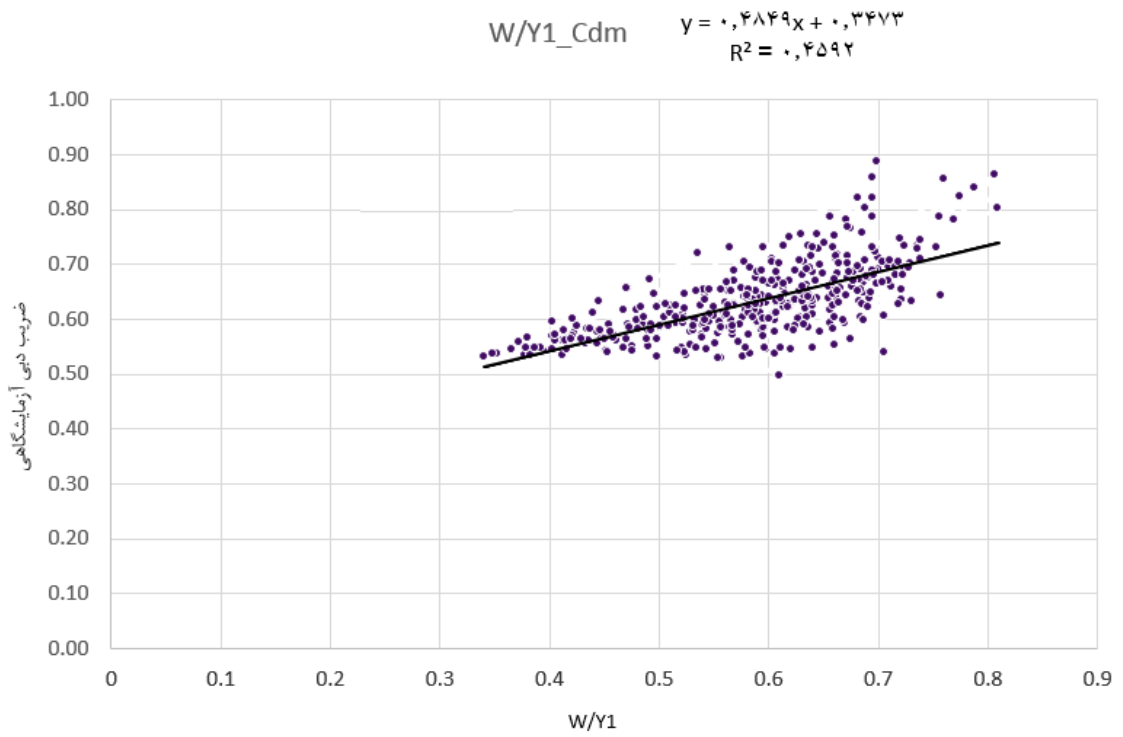


ب) نمودار ضریب دبی آزمایشگاهی به ضریب دبی محاسباتی بدست آمده از رابطه (۲-۴) و رابطه (۴-۴)

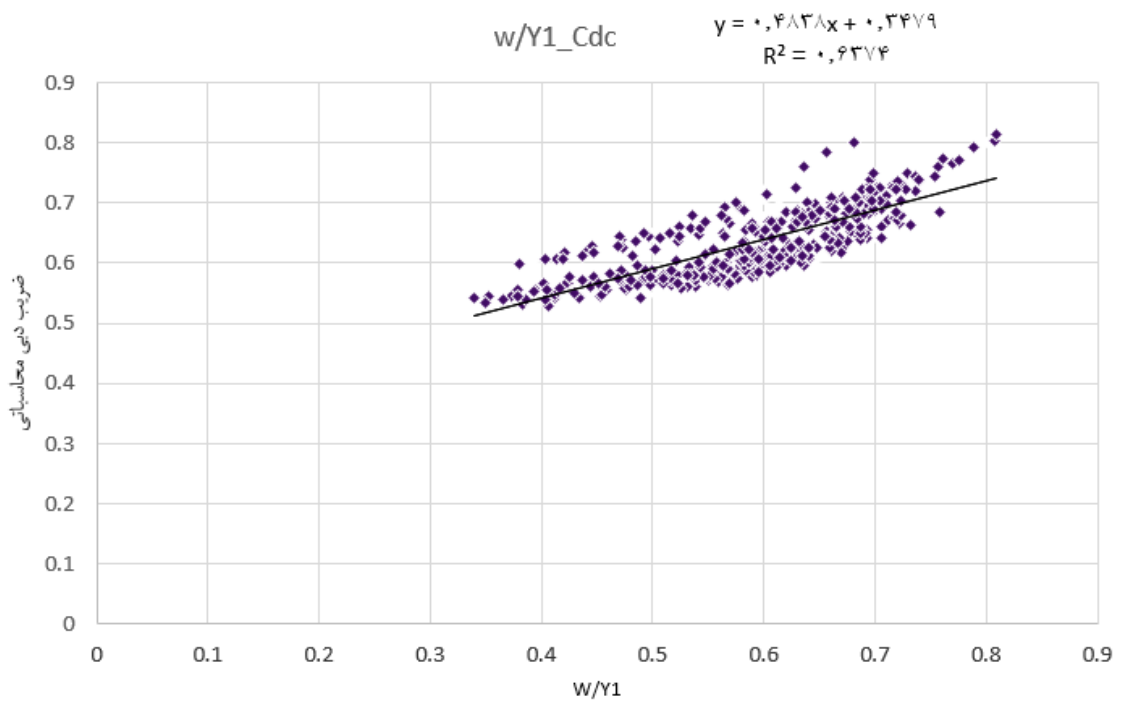
شکل (۲-۴) نمودار دبی و ضریب دبی آزمایشگاهی بر حسب دبی و ضریب دبی محاسباتی

با توجه به نمودارهای شکل (۴-۲)، ملاحظه می شود که دبی محاسباتی در مقایسه با دبی آزمایشگاهی اختلاف جزئی داشته است.

همچنین در شکل (۴-۳) تغییرات پارامترهای بی بعد Fr_1 و $\frac{w}{y_1}$ در مقابل ضریب دبی آزمایشگاهی و ضریب دبی محاسباتی به صورت مجزا نمایش داده شده است. ملاحظه می شود که با افزایش عدد فرود بالا دست جریان ضریب دبی افزایش می یابد و همینطور افزایش عدد بی بعد $\frac{w}{y_1}$ باعث افزایش ضریب دبی با شدت بیشتری نسبت به عدد فرود می گردد.

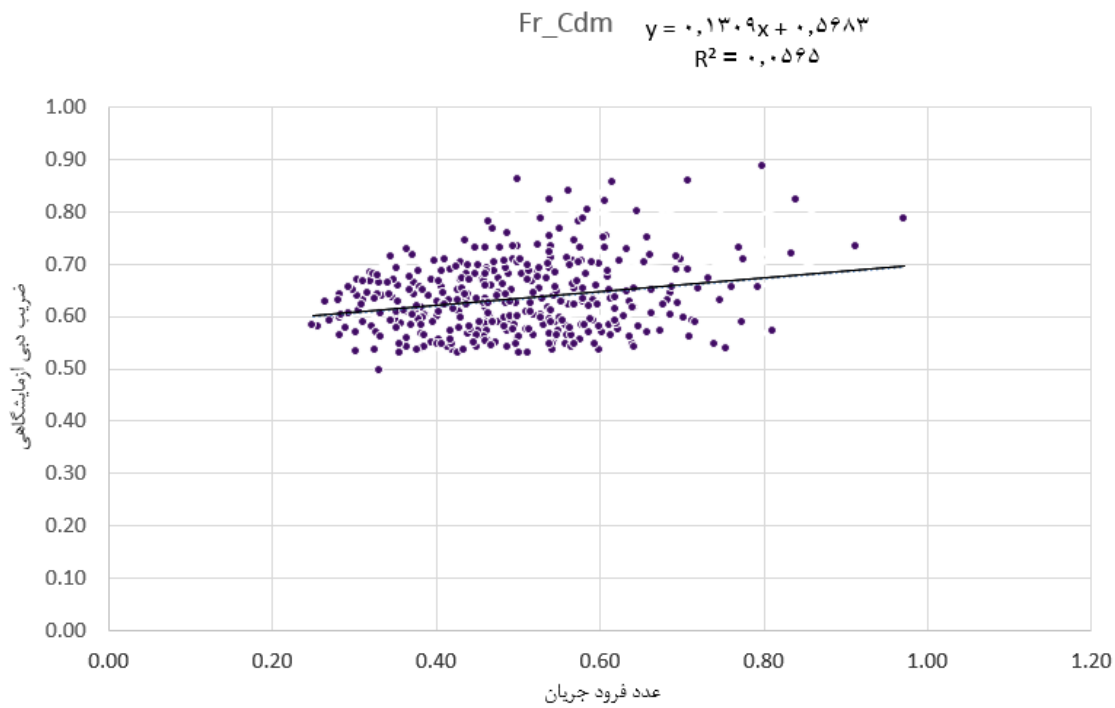


(الف) تأثیر پارامتر $\frac{W}{y_1}$ بر ضریب دبی آزمایشگاهی به روش مستقیم

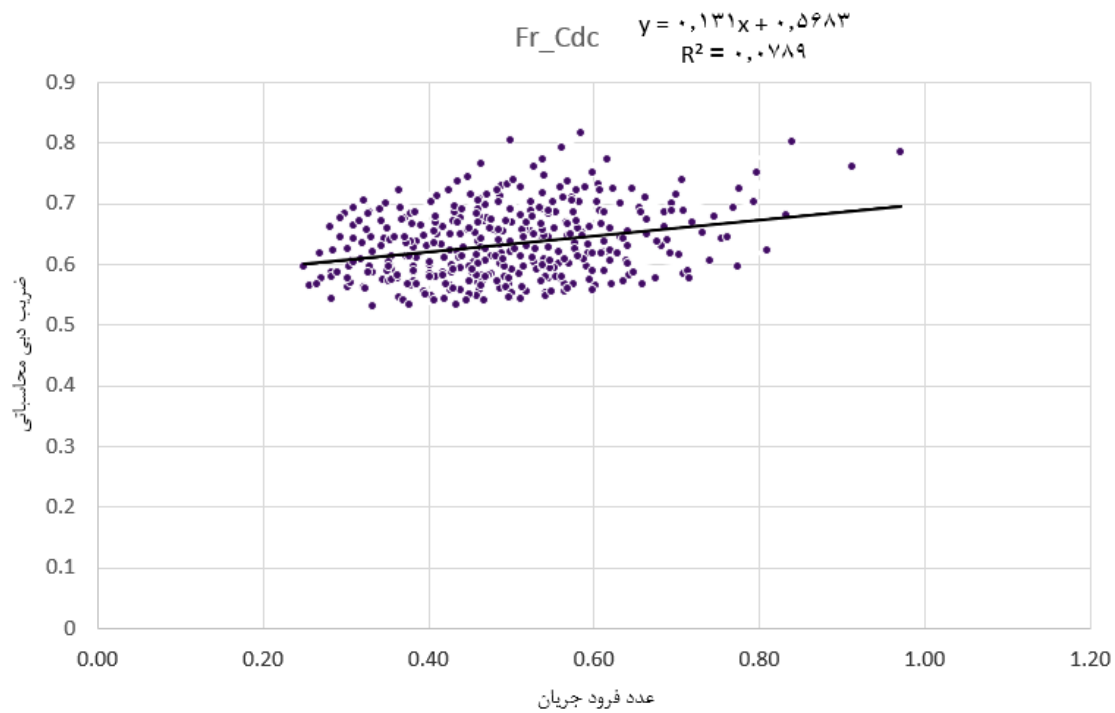


(ب) تأثیر پارامتر $\frac{W}{y_1}$ بر ضریب دبی محاسباتی به روش مستقیم

شکل (۳-۴) تأثیر پارامتر $\frac{W}{y_1}$ بر ضریب دبی



(الف) تأثیر پارامتر Fr_1 بر ضریب دبی آزمایشگاهی به روش مستقیم



(ب) تأثیر پارامتر Fr_1 بر ضریب دبی محاسباتی به روش مستقیم

شکل (۴-۴) تأثیر پارامتر Fr_1 بر ضریب دبی

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

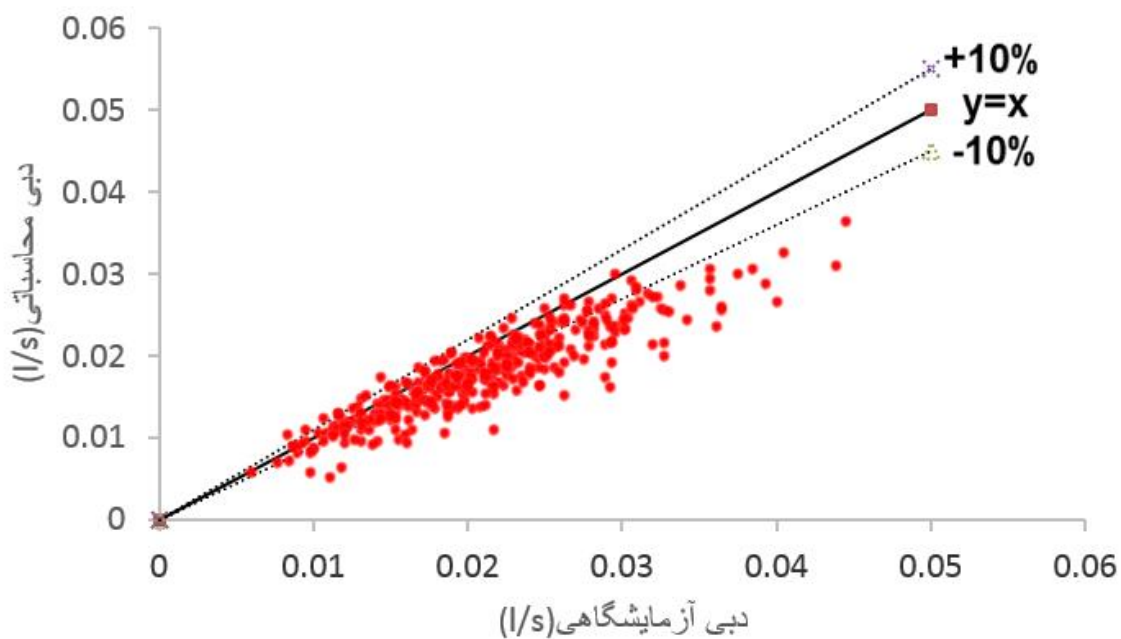
در این قسمت ضریب دبی سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی به روش گفته شده در فصل قبل و بر پایه روابط ارائه شده توسط دیمارچی برای سرریز های جانبی، تعیین می گردد. در این روش نیز همانند روش مستقیم، برای حل معضل ارتفاع تاج متغیر در مقاطع بالایی و پایینی سرریز از ایده معادل کردن سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی به یک سرریز مستطیلی ساده با ارتفاع تاج \bar{w} استفاده می شود. پس از این مرحله، مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی به کمک داده های حاصل از آزمایش برای تمامی داده ها تعیین می شود و بعد از آن رابطه ای برای تخمین ضریب دیمارچی پیشنهاد می شود. رابطه مذکور شامل پارامتر های مهم و تأثیرگذار بر ضریب دبی دیمارچی سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی می باشد که توسط آنالیز ابعادی حاصل شده اند. ضرایب مجهول این رابطه نیز همانند روش مستقیم بوسیله رگرسیون غیر خطی تعیین می شوند. پس از مشخص شدن این ضرایب، رابطه ضریب دبی دیمارچی برای سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی به صورت زیر قابل ارائه است.

$$C_m = 0.54453 - 0.27134Fr_1^{3.0585} + 0.6851 \left(\frac{W}{y_1}\right)^{2.5639} - 0.16097 \left(\frac{L}{B}\right)^{0.7292} \quad (5-4)$$

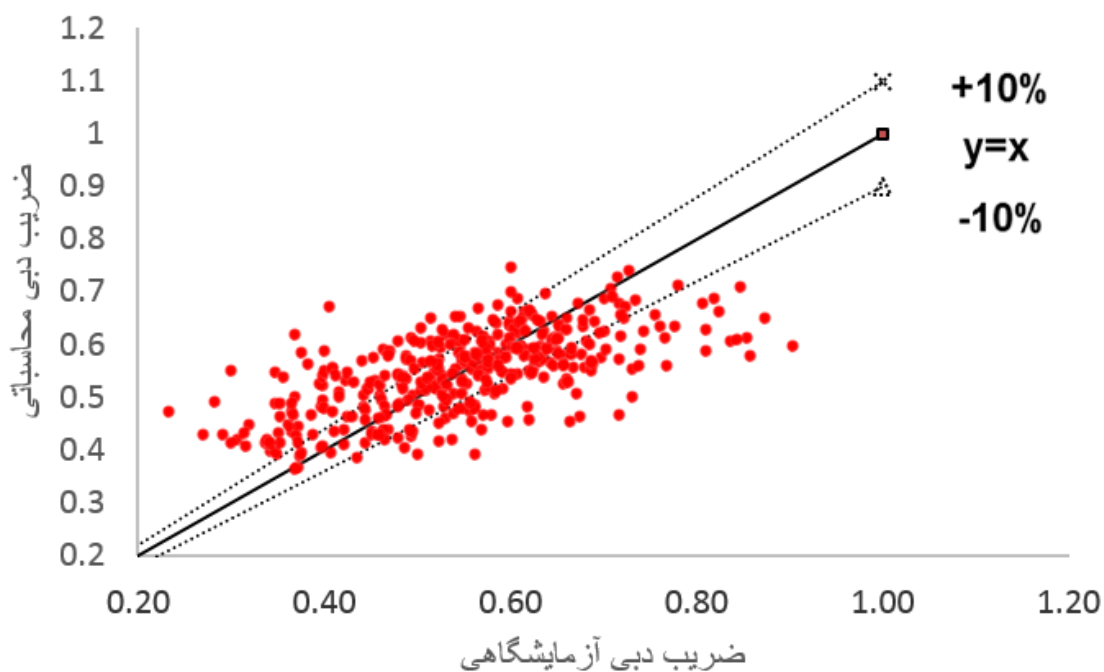
که در آن Fr_1 عدد فرود بالادست جریان، y_1 عمق آب در ابتدای سرریز، L طول سرریز در سطح آب، B عرض کانال و \bar{w} ارتفاع تاج معادل می باشد. در نتیجه ضریب C_m تابع پارامتر های بی بعد عدد فرود بالادست جریان (Fr_1)، عمق آب در ابتدای سرریز (y_1)، عرض کانال (B)، طول سرریز در سطح آب (L) و ارتفاع تاج معادل (\bar{w})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

برای مقایسه مقادیر دبی و ضریب دبی بدست آمده از رابطه اخیر با نتایج آزمایشگاهی، نمودارهای

شکل (۵-۴) رسم شده اند.



الف) نمودار دبی آزمایشگاهی به محاسباتی در روش دیمارچی



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

شکل (۴-۵) 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 مشاهده‌ای محاسبه و در جدول (۴-۲) ارائه گردیده است.

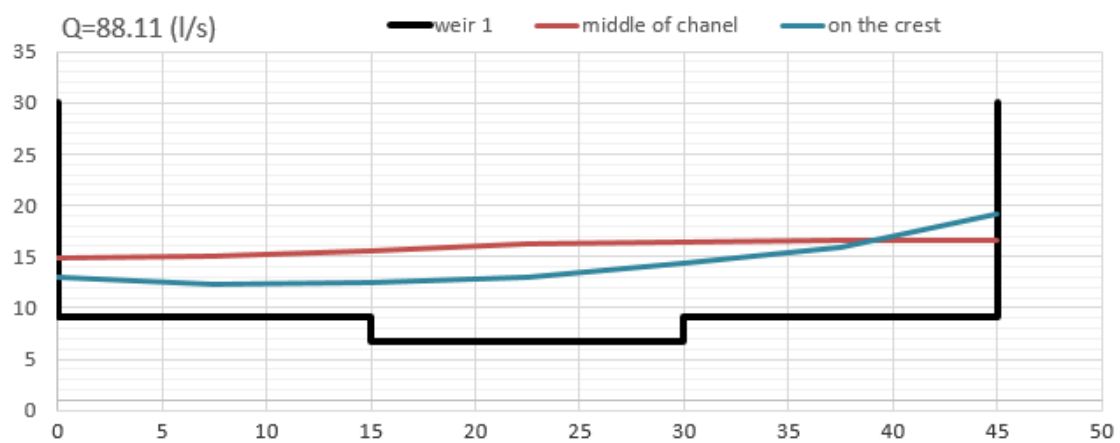
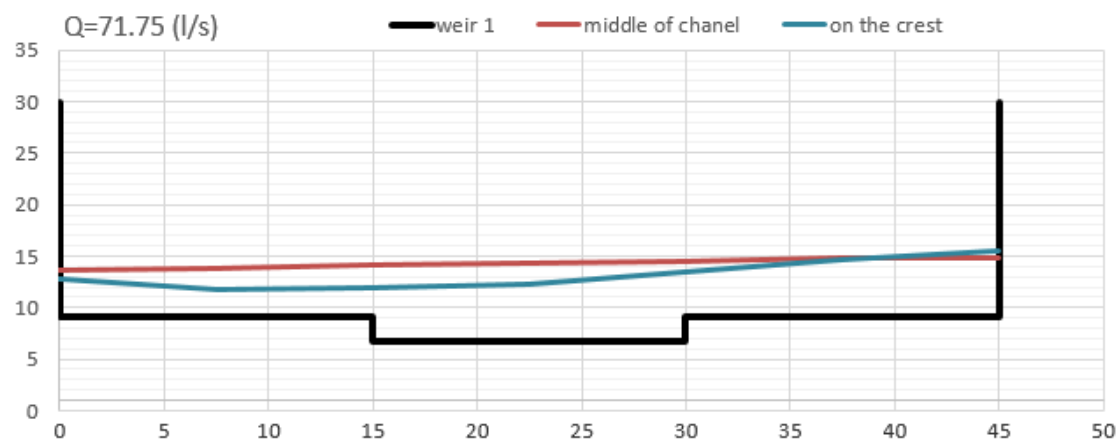
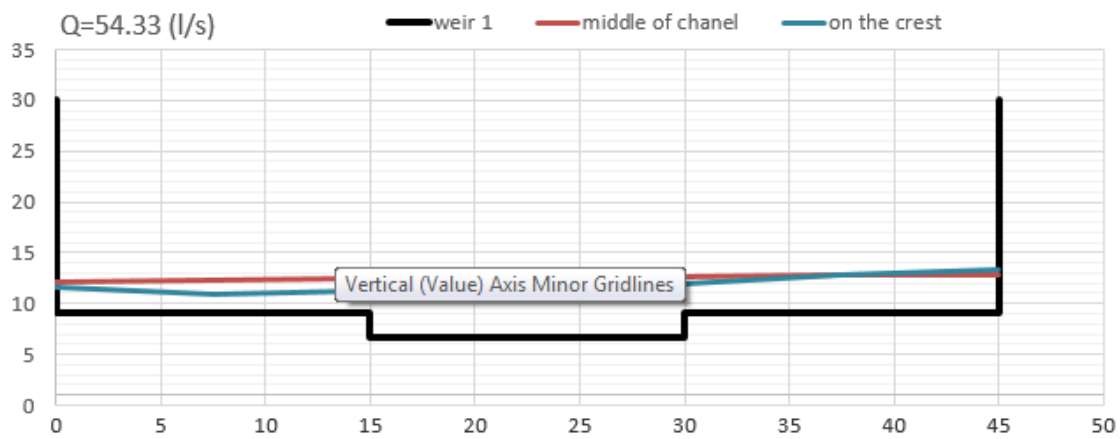
جدول (۴-۲) مقادیر آمار های ارزیابی خطا دبی عبوری از سرریز به روش دیمارچی

نوع خطا	مقدار خطا
	بدون حضور C_d در $\frac{y_1}{w}$
RMSE	۰/۰۹۱۳۷۶۷
ME(%)	۰/۰۷۰۴۳۹
MAPE(%)	۰/۱۳۷۷۴۷
σ	۱/۰۳۰۸۴
R^2 (دبی)	۰/۸۱۶۴

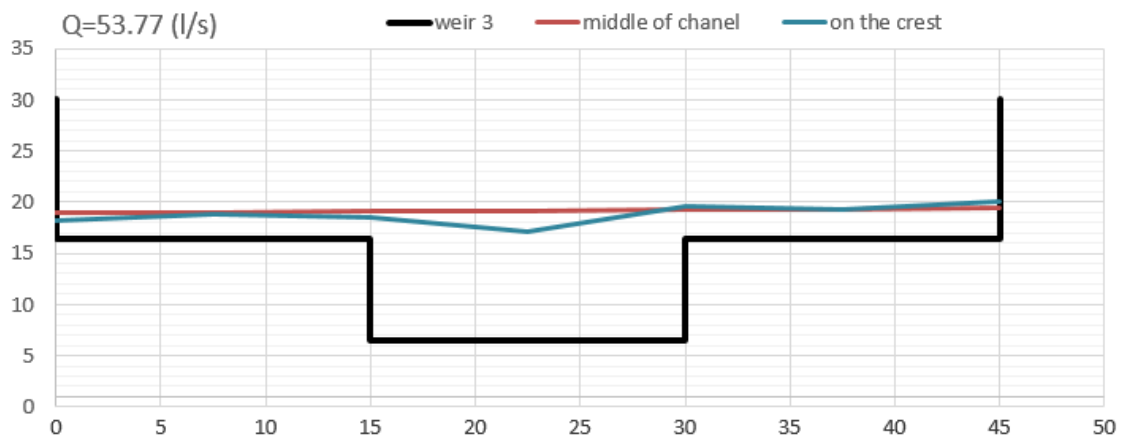
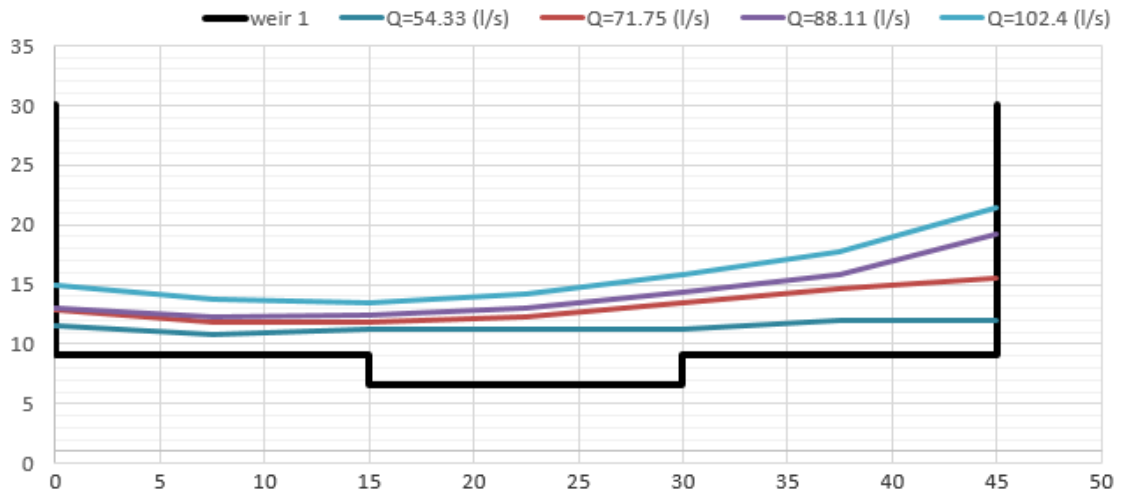
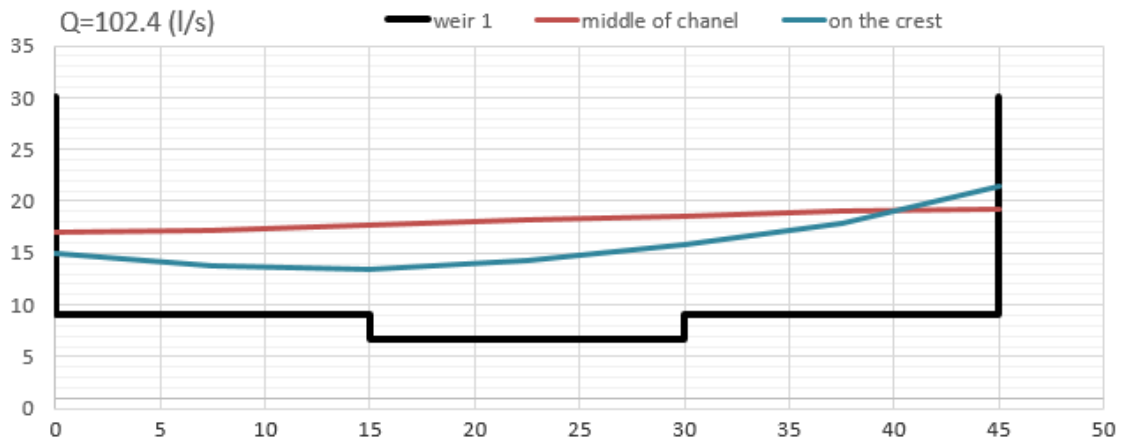
با دقت در جدول فوق مشاهده می شود که روابط پیشنهادی دارای دقت قابل قبولی در محاسبه دبی عبوری از سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی می باشند و این به معنی کارآمد بودن روش معادل کردن سرریز مرکب به یک سرریز ساده برای بدست آوردن رابطه ای جهت تخمین ضریب دبی می باشد.

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

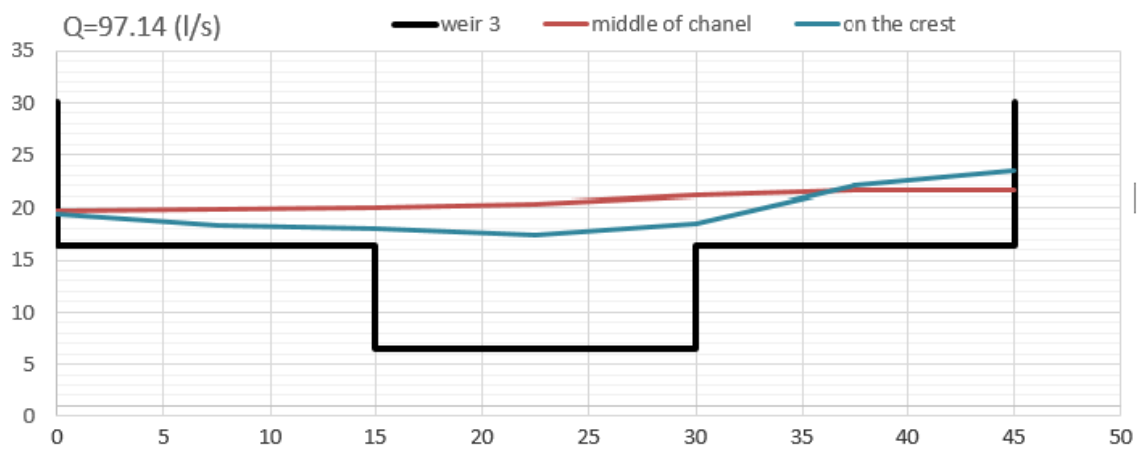
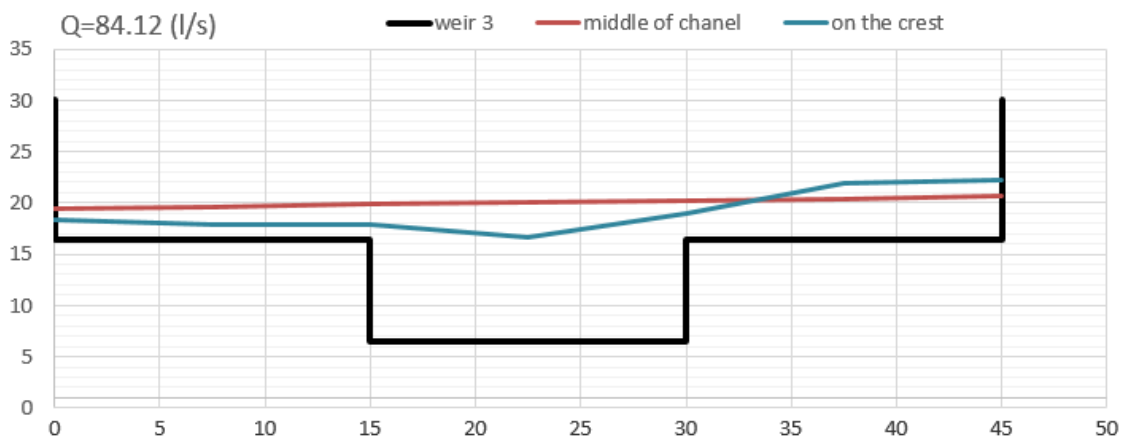
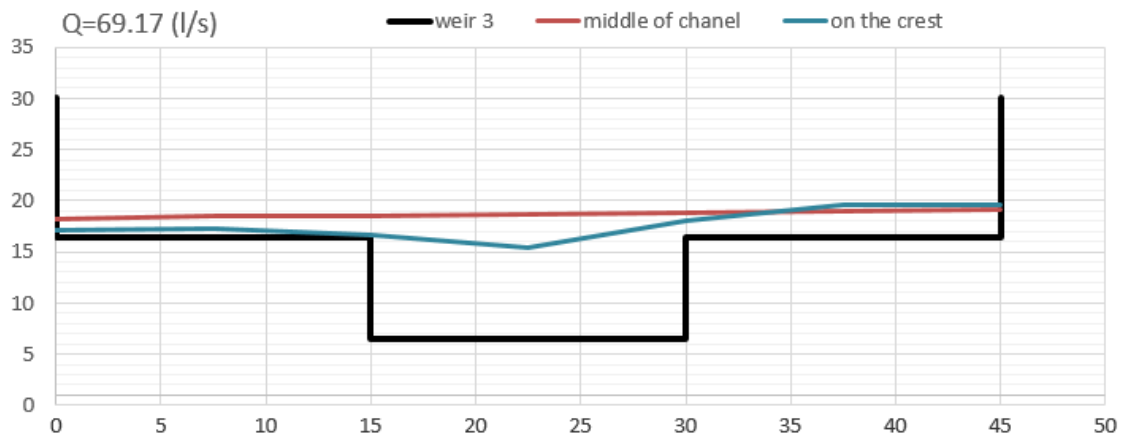
یکی دیگر از پارامتر های حائز اهمیت در خصوص عبور جریان بر روی سرریز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی، شکل پروفیل سطح آب در حین عبور از روی این سرریز می باشد. برای بررسی این مورد، پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال (در محدوده ابتدا تا انتهای سرریز) و بر روی تاج سرریز، در نمودار های شکل (۴-۶) رسم شده اند.



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

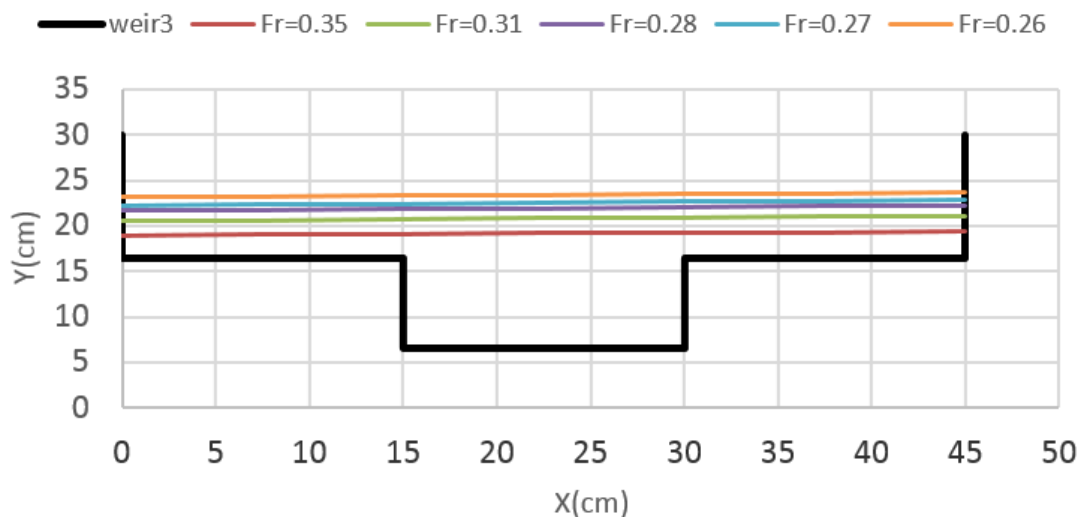


ادامه شکل (۴-۶) پروفیل های طولی سطح آب در محور مرکزی کانال و روی تاج سرریز

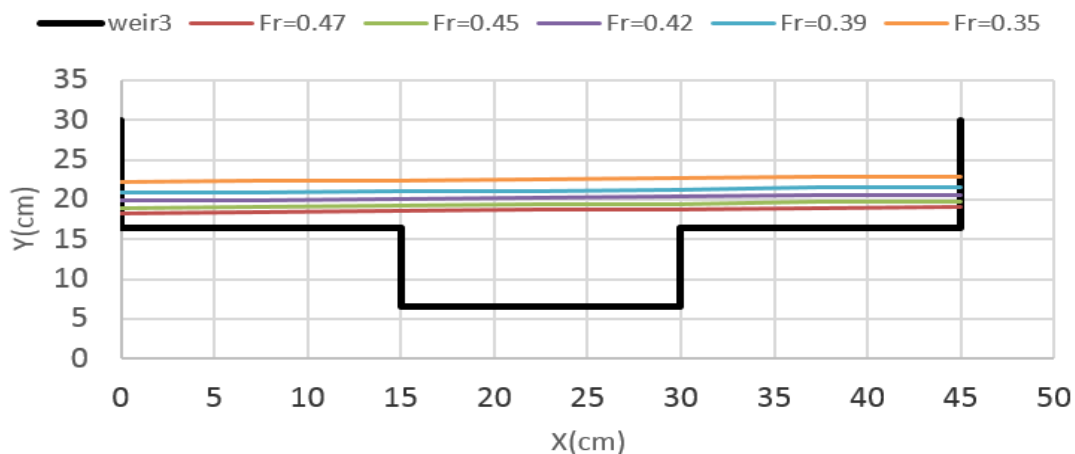
با توجه به نمودار های شکل (۴-۶)، در سرریز شماره ۳ و ۱ ملاحظه می شود که پروفیل جریان در محور مرکزی کانال با شیب ملایمی در حال افزایش است و بعلاوه در ابتدای سرریز این پروفیل تقریباً به حالت افقی می باشد. این بدین معنی است که اثرات ورودی سرریز، محور مرکزی را تحت تأثیر قرار نمی دهد و انتخاب این محور برای اندازه گیری های آزمایش، انتخابی مناسب می باشد. با بررسی پروفیل طولی جریان بر روی تاج سرریز، در سرریز شماره یک مشاهده می شود که ارتفاع جریان در ابتدای ورود به سرریز کاهش عمق چشمگیر داشته به طوری که کمترین عمق روی تاج سرریز مربوط به یک سوم ابتدای طول سرریز می باشد همچنین نمودار ها نشان می دهند که با افزایش دبی این عمق کمینه به جلوتر منتقل می شود اما همچنان در یک سوم ابتدای طول سرریز باقی می ماند، اما در سرریز شماره ۳ که دارای اختلاف بیشتری در مقادیر ارتفاع تاج سرریز مرکب می باشد مشاهده می گردد ابتدا ارتفاع سطح آب تقریباً ثابت بوده و سپس با شیب ملایم کم می شود و سپس افت شدید عمق آب را شاهد هستیم به طوری که در وسط سرریز کمترین عمق آب مشاهده می شود در تمام سرریز های این تحقیق که اختلاف ارتفاع چشمگیر در مقادیر w دارند این رفتار مشاهده می شود. در هر دو سرریز ارائه شده در انتهای طول سرریز در دبی های بالاتر که آزمایشات نشان می دهند دارای عدد فرود جریان بالاتری هم هستند 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 ادامه، به کمک نمودار های شکل (۴-۷) به بررسی تأثیر پارامتر عدد فرود جریان بالادست بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز و میانه کانال پرداخته می شود.

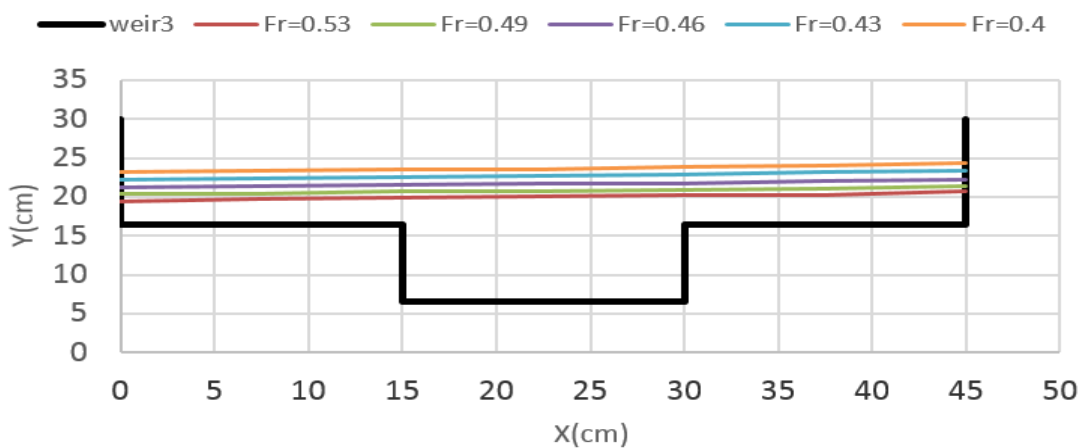
Q=53 (l/s)



Q=69 (l/s)

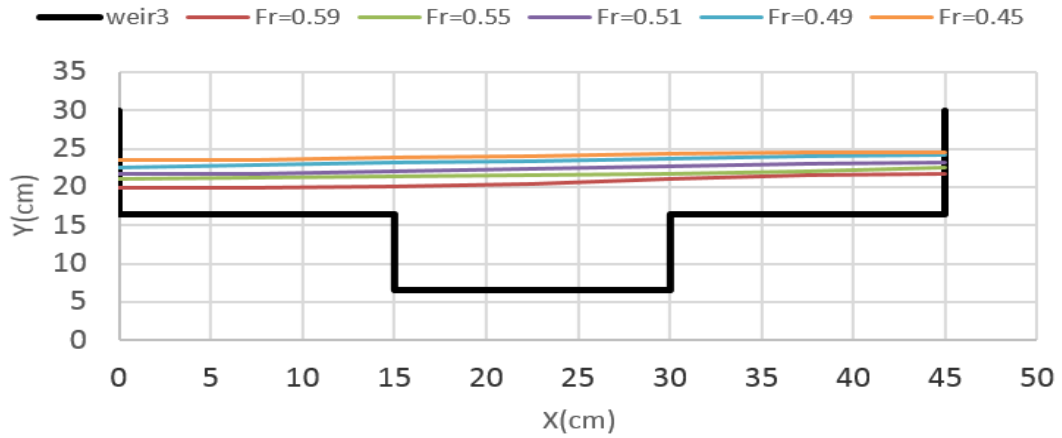


Q=84 (l/s)

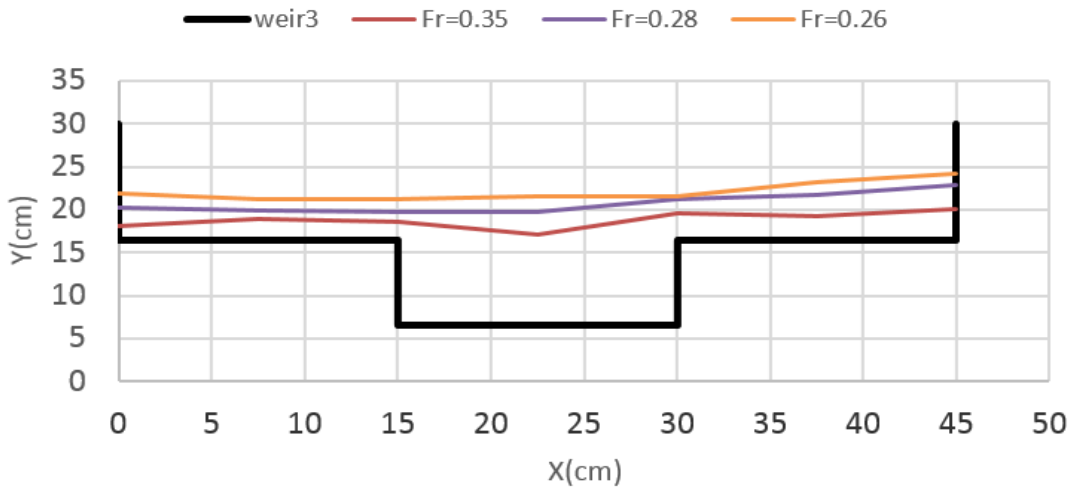


شکل (۴-۷) بررسی تأثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز و میانه کانال

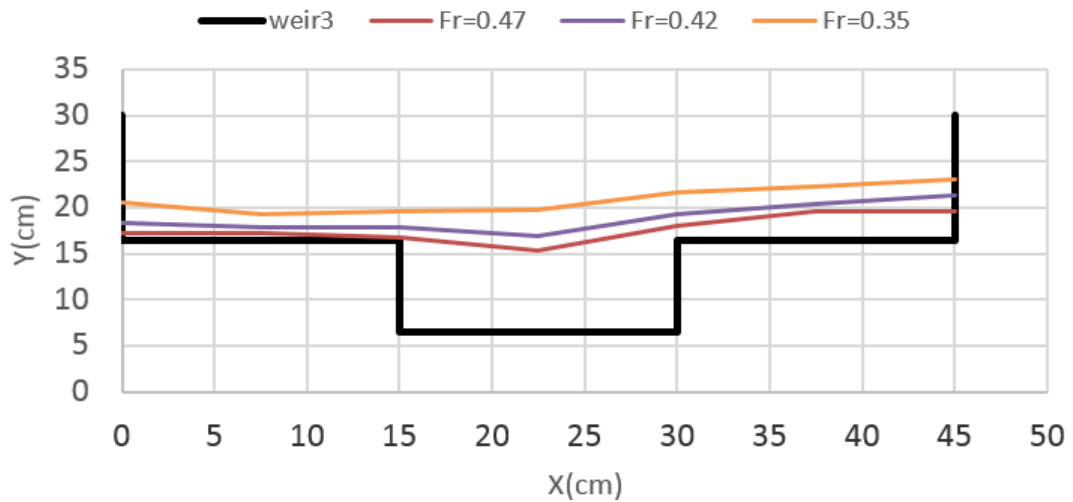
Q=97 (l/s)



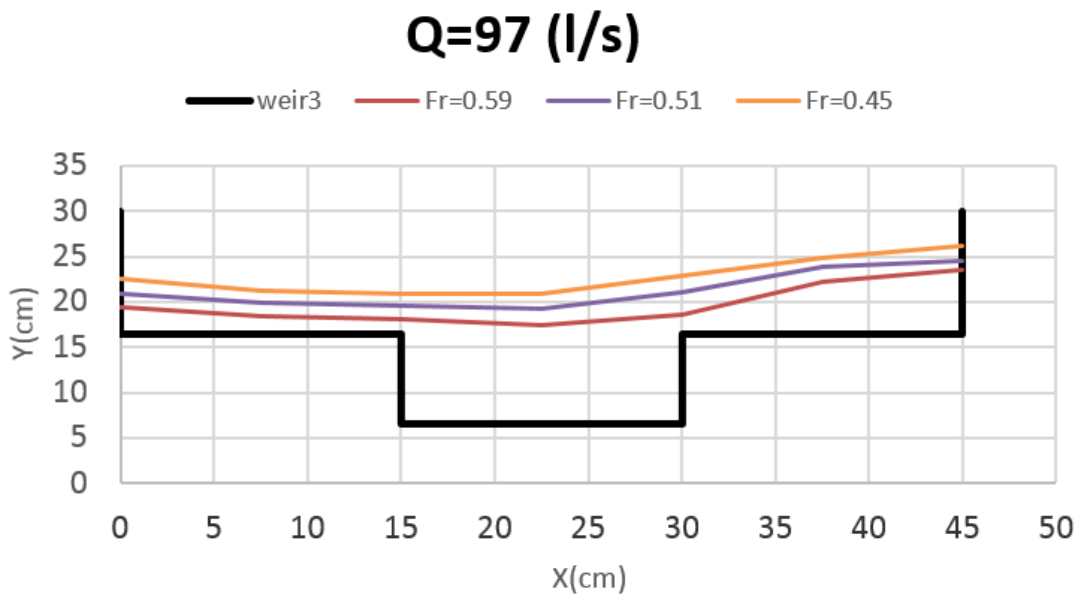
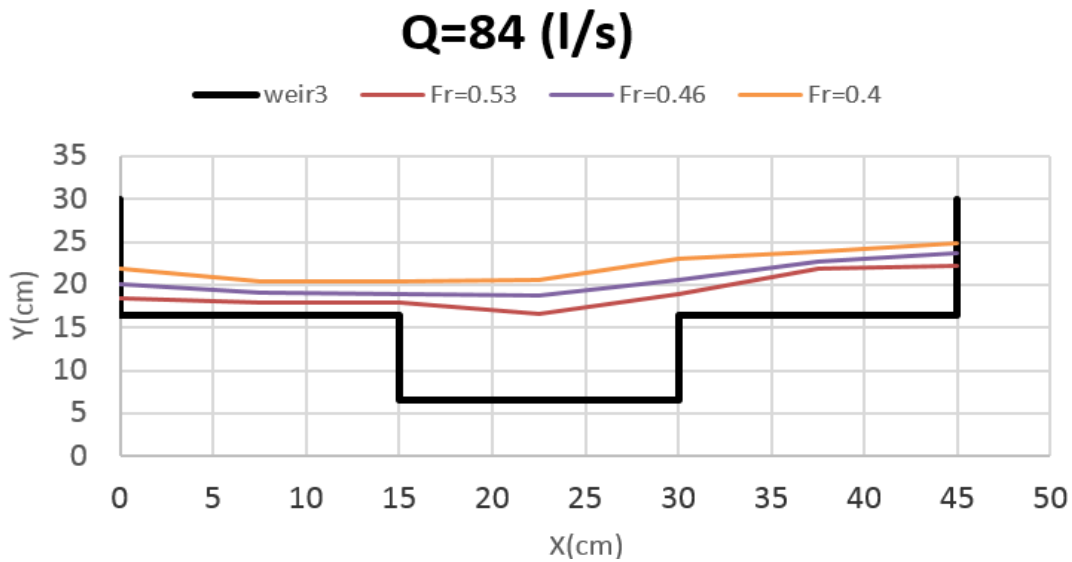
Q=53 (l/s)



Q=69 (l/s)



ادامه شکل (۷-۴) بررسی تأثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز و میانه کانال



ادامه شکل (۷-۴) بررسی تأثیر عدد فرود بالادست جریان بر پروفیل سطح آب روی تاج سرریز و میانه کانال

با توجه به نمودارهای فوق که از دبی‌های مختلف حاصل شده است در ابتدای سرریز سطح آب با شیب ملایمی تغییر می‌کند و بیشترین افت را در وسط سرریز شاهد هستیم، سپس با افزایش ارتفاع شدید و رسیدن به یک سوم انتهای سرریز پروفیل جریان آب شکل ملایم تری به خود می‌گیرد. در مجموع مشاهده می‌شود، افزایش عدد فرود سبب تغییرات شدید تری در روند تغییرات ارتفاع

پروفیل سطح آب بر روی تاج سرریز می گردد و با کم کردن عدد فرود جریان منحنی سطح آب شکل ملایم تری در سرریز مرکب مستطیلی_مستطیلی به خود می گیرد.

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 پارامتر های 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.

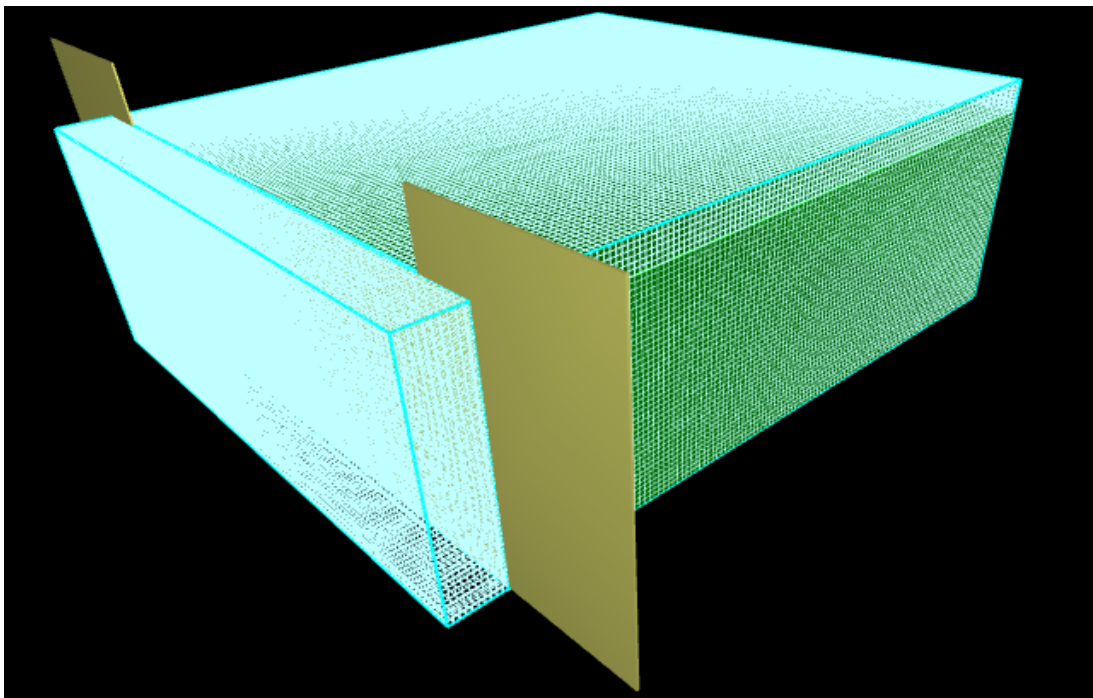
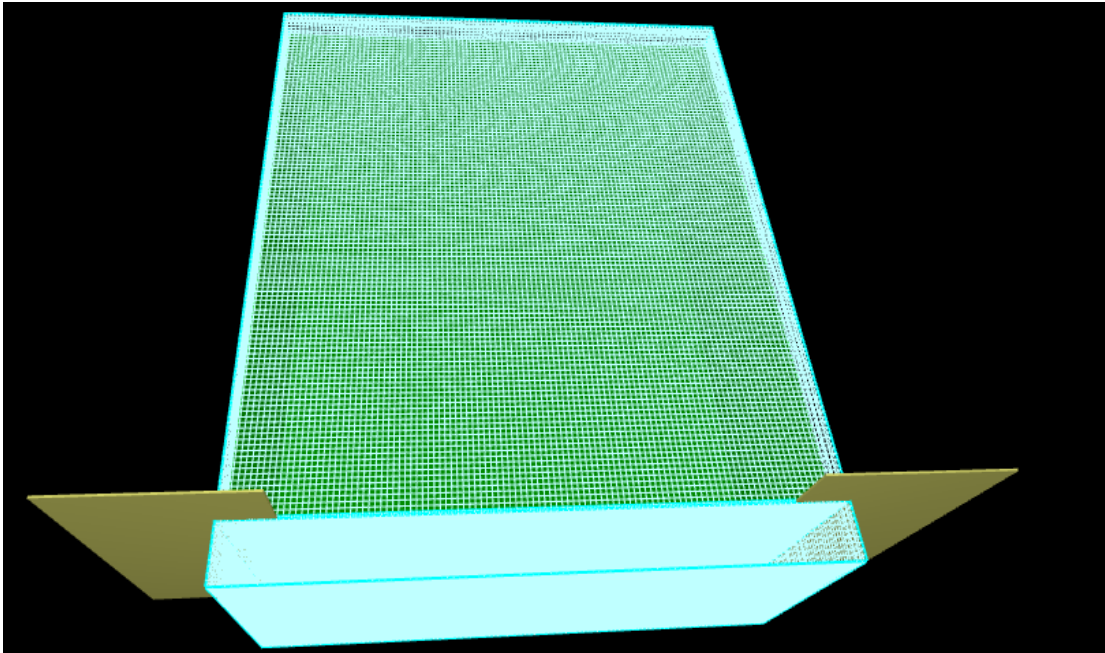
۴-۶-۲ ایجاد هندسه سرریز

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 بارزتر می گردد که در این تحقیق به دلیل ساده بودن شکل هندسی مدل و مشکلات احتمالی که بر اثر نا هماهنگی نرم افزار های FLOW-3D و سایر نرم افزار های طراحی هندسه میتواند به وقوع بپیوندد نیازی به استفاده از نرم افزار جانبی برای طراحی هندسه دیده نشد و از امکانات رسم مدل در داخل نرم افزار FLOW-3D در این تحقیق بهره مند شدیم.

۴-۶-۳ مش 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. در نتیجه برای مدل کردن سطوح شیب دار خوب به نظر نمی رسد و باید هندسه مدل در چهار چوب مکعب مستطیلی طراحی شود و شبکه بندی طوری انتخاب شود که تمام مدل را پوشش دهد.

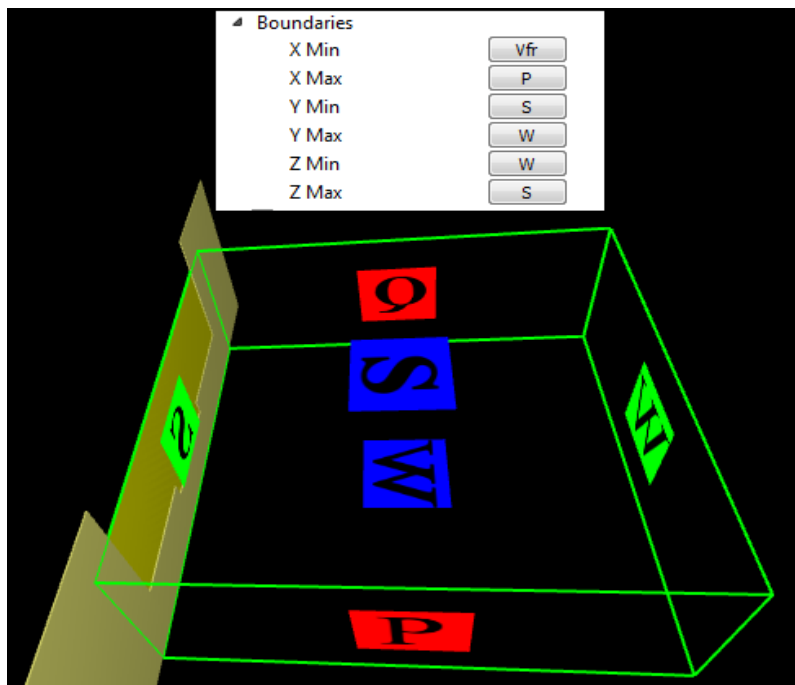
ضخامت ورق های فولادی که سرریزهای این پژوهش از آنها ساخته شده است ۲ میلی متر می باشد و این به آن معناست که برای آنکه نرم افزار FLOW-3D بتواند ورق ها را مدل کند باید حداقل در آن جهت اندازه سلول های شبکه بندی ۲ میلی تر باشد و همچنین توصیه می شود که ابعاد شبکه بندی در تمام جهت ها و همینطور در صفحه اتصال دو شبکه بهم نزدیک و در صورت امکان برابر باشد. با توجه به محدودیت های ذکر شده در این پژوهش از ۳ بلوک مستطیلی شکل برای شبکه بندی استفاده شده است که از آنها برای شبکه بندی کانال اصلی، کانال جانبی و سرریز جانبی استفاده شده است. اندازه سلول های بلوک مربوط به سرریز ۲ میلی متر و دو بلوک دیگر ۵ میلی متر می باشد. همینطور با توجه به مطلب گفته شده در بخش (۳-۱۱-۱) در این پژوهش فقط دو طرف سرریز به جای کل طول کانال اصلی مدل و مش بندی می شود. شکل (۴-۸) نحوه مش بندی مورد استفاده در این شبیه سازی را نشان می دهد.



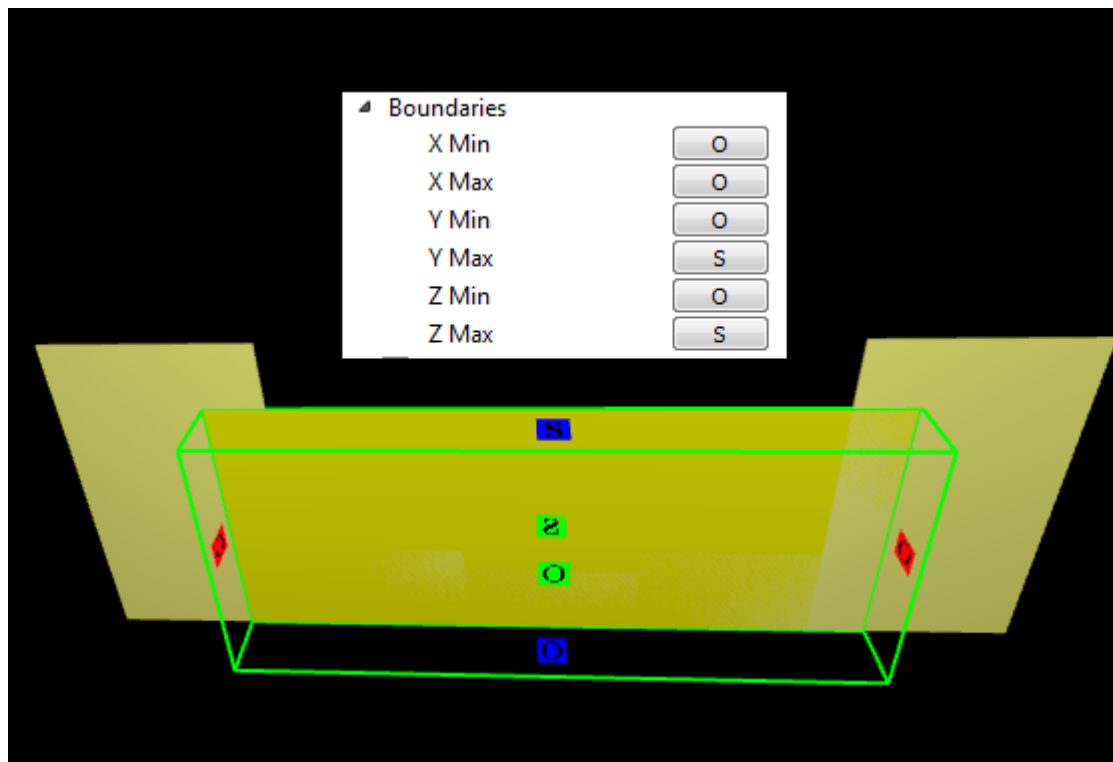
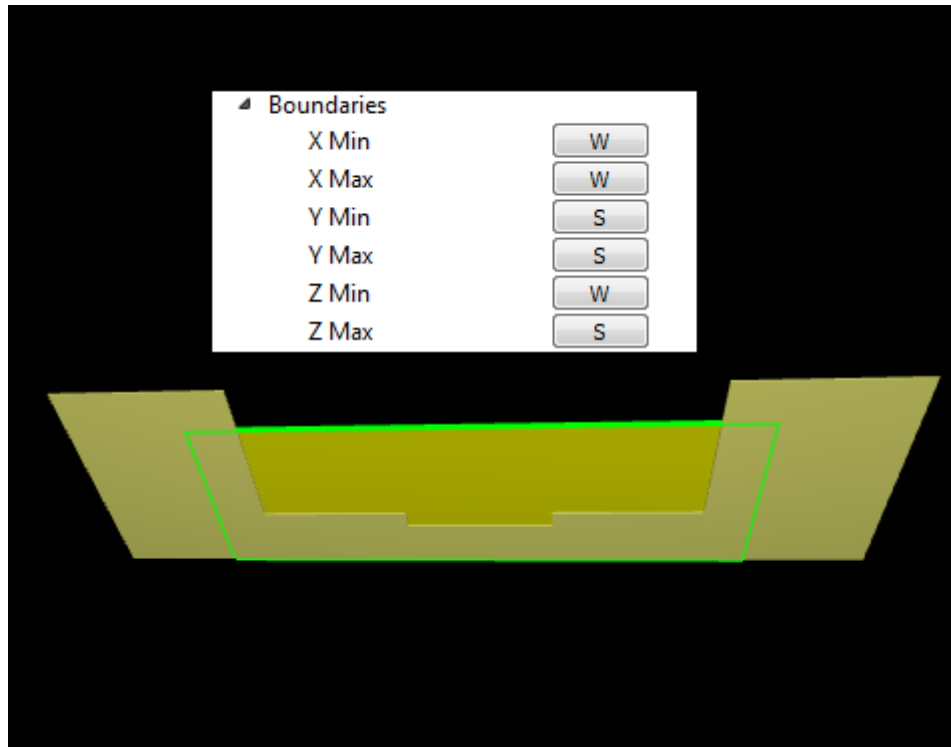
شکل (۴-۸) نمایی از شبکه مش بندی استفاده شده در مدل

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 (۴-۹) شرایط مرزی مدل شبیه سازی شده



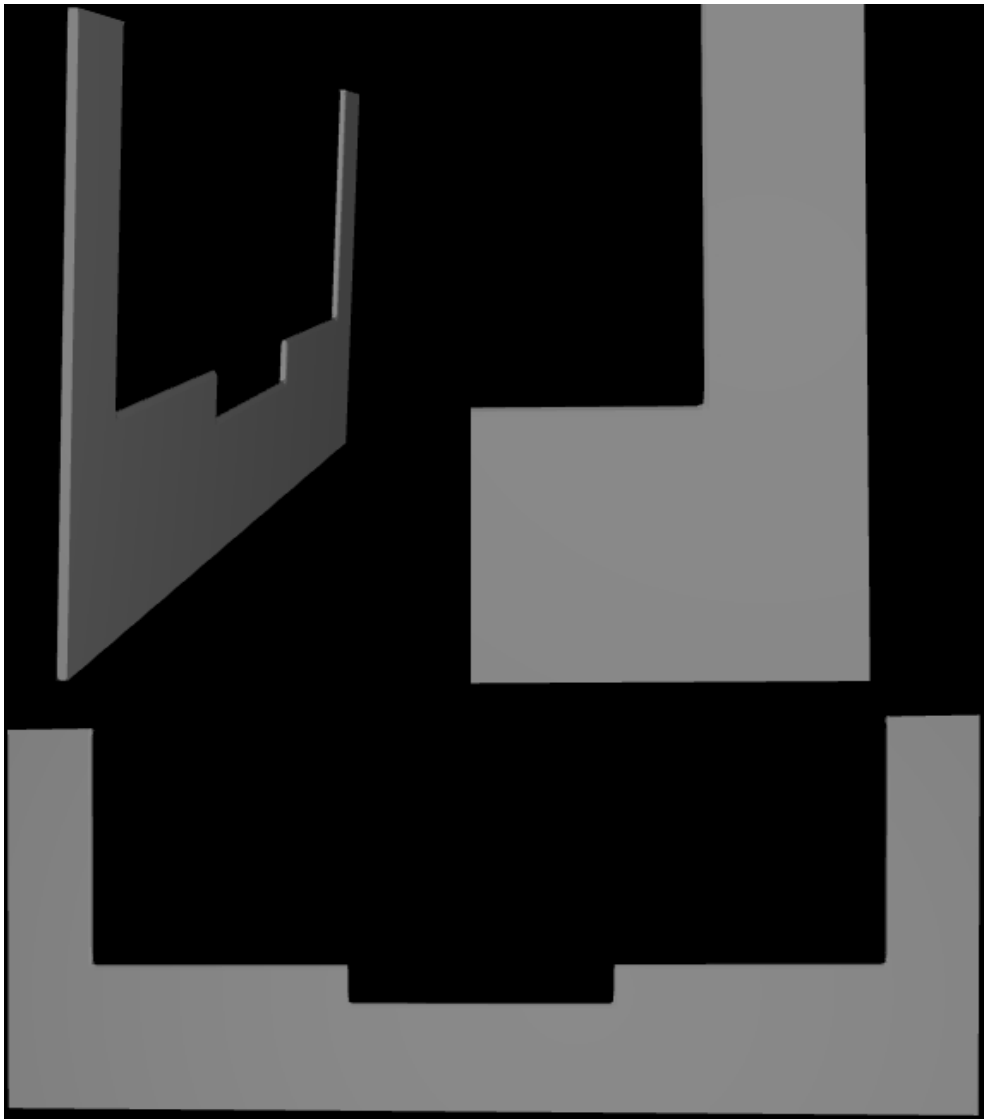
ادامه شکل (۴-۹) شرایط مرزی مدل شبیه سازی شده

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 استفاده از FAVOR جهت بررسی مش بندی

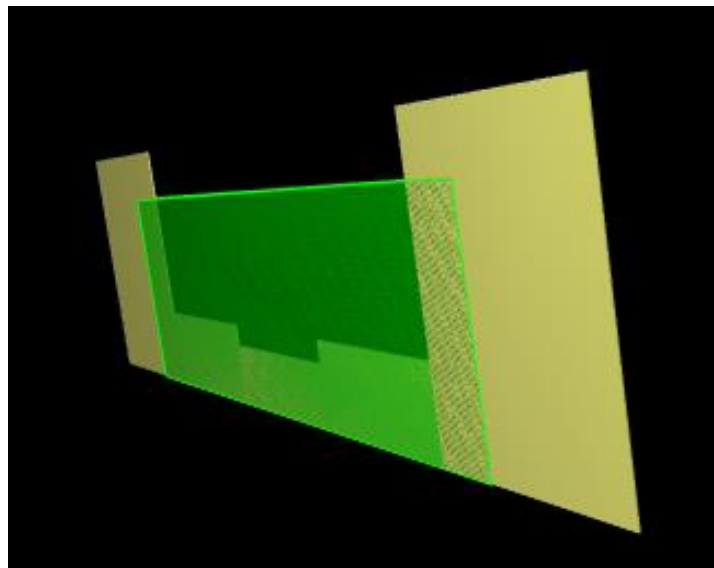
همانطور که در بخش (۳-۱۱) توضیح داده شد، نرم افزار FLOW-3D از ابزار FAVOR برای شبیه سازی سطوح و اجسام صلب استفاده می کند. با اجرای ابزار FAVOR می توان مشاهده کرد که آیا مش بندی مورد استفاده مناسب بوده است و نرم افزار توانسته است هندسه مورد نظر را بخوبی مدل کند یا خیر. در شکل (۴-۱۰) نتیجه حاصل از اجرای FAVOR بر روی مش بندی اعمال شده بر مدل نشان داده شده است. در شکل به وضوح مشخص است که هندسه سرریز به خوبی مدل شده است و در زوایای سرریز و ضخامت آن نا منظمی دیده نمی شود.



شکل (۴-۱۰) نتیجه اجرای FAVOR برای مش بندی انجام شده بر روی سرریز

۴-۶-۶ ایجاد Baffle

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.

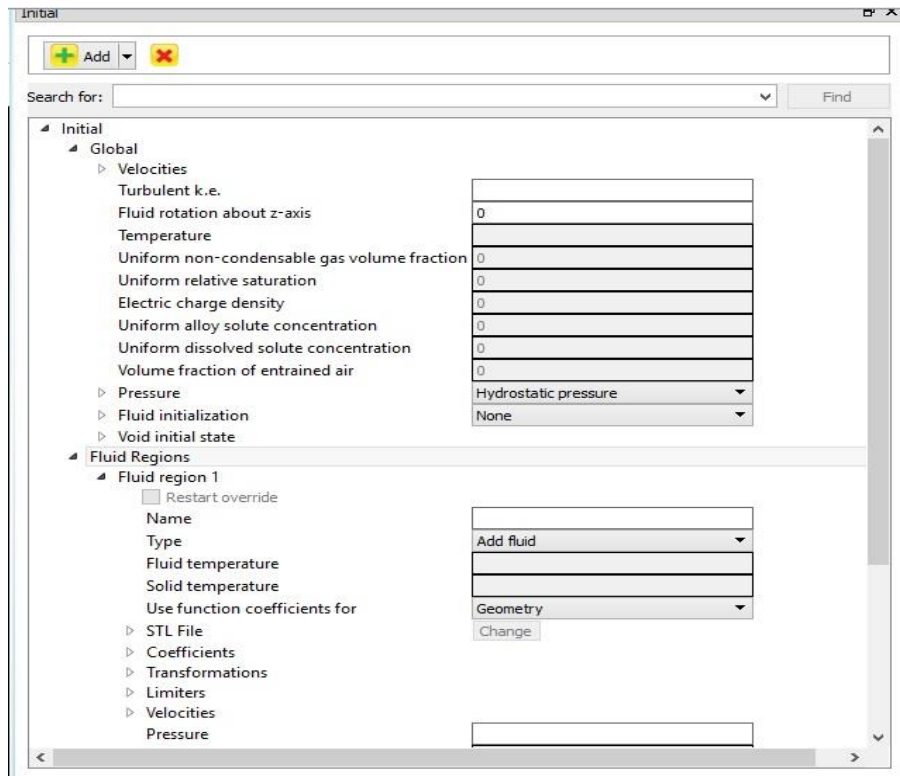


شکل (۴-۱۱) نمای کلی بافل ایجاد شده بر روی سرریز

۴-۶-۷ اعمال 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 سرعت ورودی با استفاده از عمق و دبی آزمایش محاسبه و در نرم افزار وارد شد. همچنین

در قسمت limiters حجم اولیه آب کانال اختصاص داده شد. اختصاص دادن سرعت و حجم اولیه آب به طور محسوس سرعت محاسبات را افزایش می دهد.



شکل (۴-۱۲) صفحه تنظیمات شرایط اولیه

۴-۶-۸ اعمال شیب طولی کانال

همان طور که گفته شد کانال مورد استفاده دارای شیب طولی 0.002 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. در این پژوهش هندسه مدل در خود نرم افزار طراحی شد که باز هم از مطالب فوق مستثنی نمی باشد و به طور کاملاً افقی و بدون لحاظ شیب مدلسازی انجام شد. 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.

$$\begin{cases} g_x = g \sin(\theta) = 0.002 * g \\ g_z = -g \cos(\theta) = 0.999998 * g \end{cases} \quad (۴-۶)$$

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 پایداری آزمایش

این زمان همان زمانیست که مدل آزمایشگاهی در طی آن به پایداری رسیده است. 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 در مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی خواهند شد. در تحقیق حاضر پس از بررسی چند مدل، زمان مناسب برای اجرا ۲۰ ثانیه مد نظر قرار گرفت.

۴-۶-۱۱ رایانه های مورد استفاده و مدت زمان تکمیل شبیه سازی

در این پژوهش برای انجام شبیه سازی از سیستم های محاسبات سنگین دانشگاه فردوسی استفاده شد که دارای پردازنده ۱۶ هسته ای و حافظه ی RAM برابر با ۳۲ گیگابایت و همچنین سیستم عامل این رایانه windows server 2012 بود. آنالیزهای انجام شده توسط این سیستم ها بین ۴ تا ۸ روز به طول انجامید که بسته به شرایط هندسی و هیدرولیکی مدل مورد شبیه سازی متفاوت بود.

۴-۷ مقایسه نتایج

در انتها 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.

۴-۷-۱ مقایسه مقادیر دبی

در این شبیه سازی سعی شد دبی خروجی از سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی توسط نرم افزار FLOW-3D مشخص شود و همچنین به تبع آن میزان دقت این نرم افزار در محاسبه دبی خروجی بر روی سرریز مذکور تعیین گردد. لذا در این پژوهش ۴ 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.

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

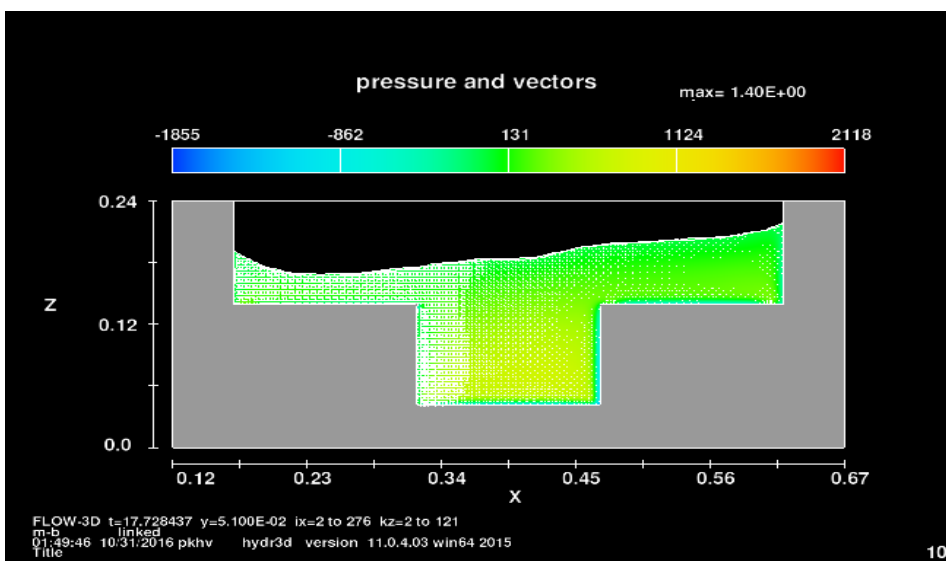
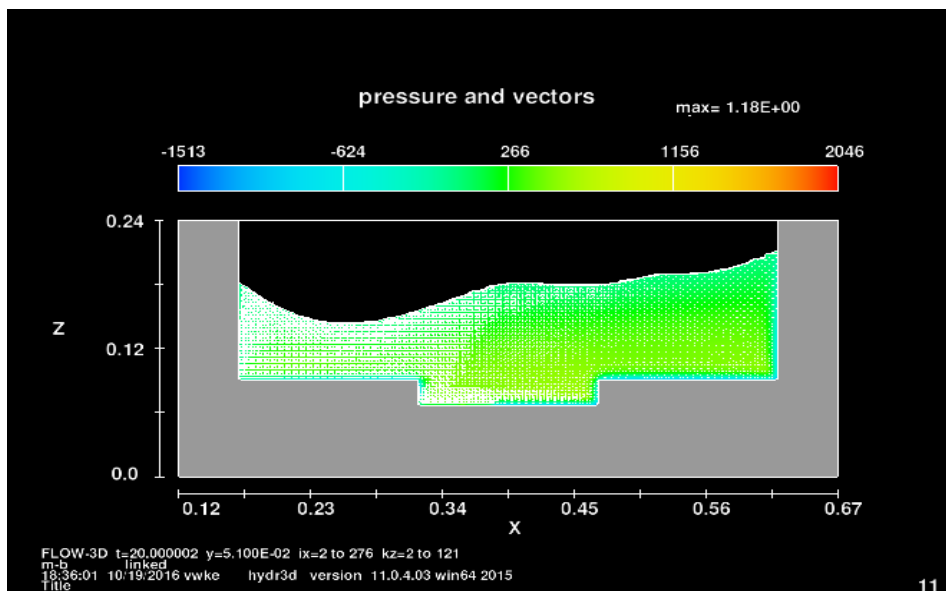
Model No.	Weir No.	Qinlet (lit/s)	عمق بالادست سرریز (cm)	عمق پایین دست سرریز (cm)	Qs exp. (lit/s)	Qs FLOW3-D (lit/s)	Error %
۱	۱	۷۱/۲۶	۲۰/۱	۲۱/۰۵	۲۸/۸۶	۳۳/۵۱	۱۶/۱۱
۲	۴	۶۷/۰۶	۲۰/۷۰	۲۱/۷۸	۲۴/۹۸	۳۰/۳۵	۲۱/۴۹
۳	۵	۵۳/۵۷	۱۵/۱۳	۱۶/۱۱	۲۹/۱۶	۳۴/۷۳	۱۹/۱۰
۴	۱۲	۵۹/۲	۱۱/۲	۱۳/۱۵	۱۸/۷	۲۰/۶۹	۱۰/۶۴

برای محاسبه خطای نسبی جدول فوق از رابطه (۷-۴) استفاده شده است:

$$Error \% = 100 * \frac{Q_{Exp.} - Q_{FLOW-3D}}{Q_{Exp.}} \quad (7-4)$$

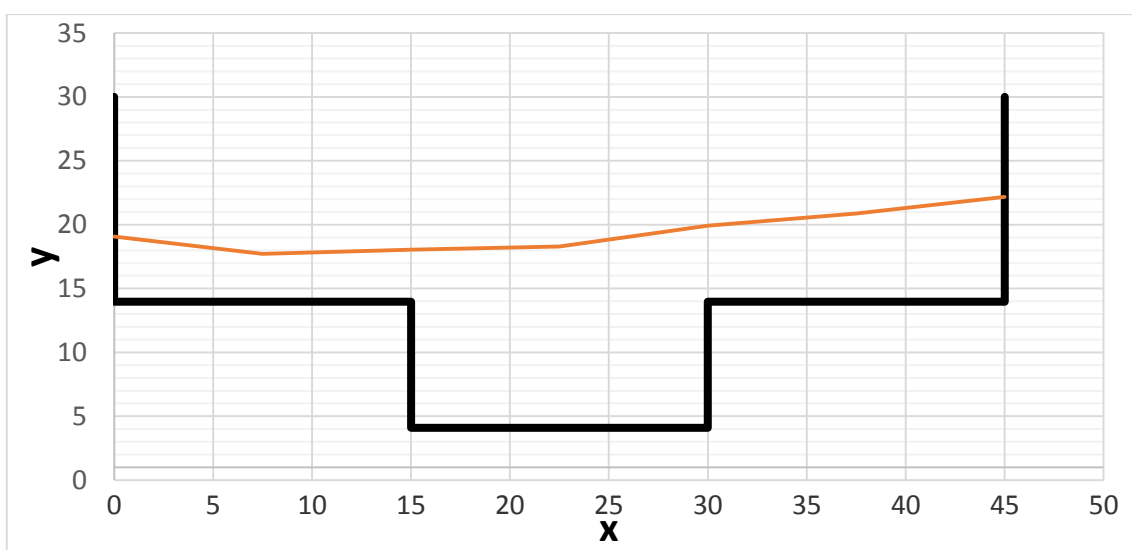
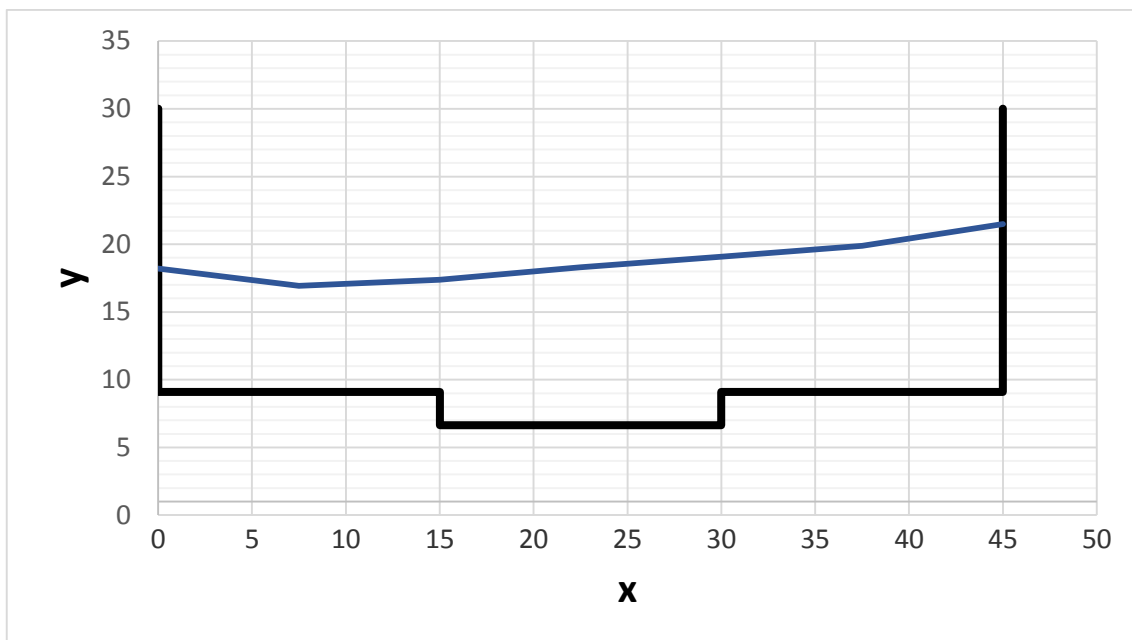
با توجه به جدول (۳-۴) مشاهده می شود مقادیر خطاها در حد نسبتاً قابل قبولی بوده و در نتیجه مدل FLOW-3D قابلیت مدل کردن جریان آشفته بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی را دارد.

در مرحله بعدی به بررسی پروفیل طولی سطح آب در محل تاج سرریز پرداخته می شود.



شکل (۴-۱۳) پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز مربوط به مدل اول و دوم

با توجه به تصاویر شکل (۴-۱۳) و شکل (۴-۱۴) مشاهده می شود منحنی سطح آب از ابتدای سرریز شروع به کاهش ارتفاع نموده و بعد از آن شاهد افزایش ارتفاع سطح آب با منحنی ارائه شده هستیم، همچنین با مقایسه پروفیل های رسم شده به روش عددی و روش آزمایشگاهی می توان تطابق نسبتاً خوبی را در رفتار جریان بر روی تاج سرریز در هر دو روش مشاهده کرد و این تطابق بیانگر آن است که نرم افزار FLOW_3D توانایی خوبی را در شبیه سازی جریان های عبوری از سرریز لبه تیز جانبی مرکب مستطیلی-مستطیلی دارا می باشد.



شکل (۴-۱۴) پروفیل سطح آب در محل تاج سرریز مربوط به مدل اول و دوم برای داده های آزمایشگاهی

۲-۷-۴ مقایسه نتایج این پژوهش و سایر محققین

در این بخش ابتدا رابطه ضریب دبی بدست آمده توسط ظهیری و همکاران و عامری و همکاران در کنار رابطه بدست آورده شده از این پژوهش ارائه میگردد و سپس آمارهای ارزیابی خطای این سه پژوهش مربوط به روش مستقیم به صورت جدولی مقایسه می گردد.

رابطه بدست آمده از این پژوهش:

$$C_d = 3.42988 + 0.12735Fr^{1.46352} + 0.4462 \frac{\bar{W}}{Y_1}^{3.24272} - 2.9022 \frac{L}{B}^{-0.059} \quad (۸-۴)$$

رابطه بدست آمده توسط ظهیری:

$$C_d = 0.412 + 0.0551Fr^1 + 0.1063 \frac{\bar{W}}{Y_1}^{2.1065} - 0.00168 \frac{B}{Y_1}^{1.1789} \quad (۹-۴)$$

رابطه بدست آمده توسط عامری:

$$C_d = 0.7698 + 0.3327Fr^{0.1722} + 0.5685 \frac{\bar{W}}{Y_1}^{0.5885} - 0.2163 \frac{L}{B}^{-0.5348} \quad (۱۰-۴)$$

جدول (۴-۴) مقادیر خطا برای تحقیقات عامری ظهیری و صائبی در خصوص سرریزهای مستطیلی

نوع خطا	مقدار خطا		
	صائبی	عامری	ظهیری
RMSE	۰/۰۳۶۳۸	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۰۳۸
ME	۰/۰۲۸۹۰	۰/۰۰۴۴	۰/۱۳۳
MAPE(%)	۴/۵۴	۶/۵۱	۹/۸۸

۳-۷-۴ مقایسه نتایج مربوط به روش دیمارچی و مستقیم در این پژوهش

جدول (۴-۵) مقادیر خطا برای روش دیمارچی و مستقیم در این پژوهش

نوع خطا	مقدار خطا	
	مستقیم	دیمارچی
<i>RMSE</i>	۰/۰۳۶۳۸	۰/۰۹۱۳۷
<i>ME</i>	۰/۰۲۸۹۰	۰/۰۷۰۴۳
<i>MAPE</i> (%)	۴/۵۴	۱۳/۷۷
σ	۱/۰۰۳۰۸۵	۱/۰۳۰۸۴
R^2 (دبی)	۰/۹۷۱۷	۰/۸۱۶۴

همانطور که مشاهده می شود نتایج مربوط به روش مستقیم دارای خطای کمتری نسبت به روش دیمارچی هستند و با توجه به این مقادیر می توان نتیجه گرفت روش مستقیم روش مناسب تری برای محاسبه ضریب دبی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی می باشد.

فصل پنجم

خلاصه نتایج و پیشنهادات

در بخش آزمایشگاهی این پژوهش ۱۸ سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی در شرایط زیر بحرانی مورد آزمایش قرار گرفت و در مجموع ۳۸۰ آزمایش انجام شد. در این تحقیق دبی کل عبوری توسط فلومترالتراسونیک با دقت ۰/۰۱ لیتر بر ثانیه وبا متوسط گیری (دمپینگ) در بازه ۶۰ ثانیه اندازه گیری شده است همچنین دبی خروجی از سرریز مرکب باتوجه به ارتفاع آب عبوری از یک سرریز نرمال مثلثی ساده که در کانال جانبی نصب شده بود اندازه گیری گردید. عمق های مربوط بر روی تاج سرریز و میانه کانال اصلی نیز توسط عمق سنج دیجیتال به دقت ۰/۰۱ میلی متر ثبت شده اند. بعد از به دست آوردن نتایج آزمایشگاهی اقدام به انجام آنالیز ابعادی و تشخیص پارامتر های بی بعد مؤثر بر ضریب دبی کردیم و سپس در نرم افزار اکسل رابطه ای برحسب پارامترهای مذکور به دست آورده شد این رابطه توسط حداقل گیری مجموع تفاضل مربعات که تابع هدف در آن RMSE بود ومتغیر های وابسته ضرایب پارامترهای مؤثر رابطه مذکور بوده اند.

رابطه مذکور برای محاسبه ضریب دبی به دو روش مستقیم دیمارچی پیشنهاد شدند وضرایب مجهول به گونه ای انتخاب شدند که ضریب دبی عبوری محاسبه شده با ضریب دبی حاصل از داده های آزمایشگاهی دارای کمترین اختلاف باشند. نمودارهای ضریب دبی و دبی حاصل از روابط مذکور بر حسب داده های آزمایشگاهی رسم وارائه گردیدند همچنین پارامترهای ارزیابی خطا برای تعیین دقت این روابط استفاده شد ونتایج آن در جداول مخصوص ارائه گردید.

در بخش عددی از نرفزار FLOW-3D برای شبیه سازی مدل آزمایشگاهی استفاده شد که مدل هندسی سرریز توسط نرم افزار طراحی هندسی داخلی نرم افزار انجام شد. مش بندی هندسه ساخته شده و اعمال شرایط مرزی و همچنین ایجاد بافل (Baffle) برای اندازه گیری دبی خروجی از سرریز از مراحل بعدی پژوهش بود. زمان شبیه سازی ۲۰ ثانیه انتخاب شد وشرایط اولیه ای برای حل سریعتر مدل توسط نرم افزار اعمال گردید. باتوجه به پیشنهاد محققین گذشته مدل گروه های نرمال شده

رینولدز (RNG) برای حل جریان آشفته استفاده گردید. سپس در مرحله آخر نتایج حاصل از مدل عددی بانتهای آزمایشگاهی مقایسه و میزان خطای آن ارائه گردید. در ادامه به ارائه خلاصه نتایج و پیشنهادات می پردازیم.

۲-۵ خلاصه نتایج

پارامترهای بی بعد بدست آمده از آنالیز ابعادی به صورت زیر می باشد.

$$C_d = f\left(Fr_1, \frac{b_i}{B}, \frac{w_i}{y_1}\right) \quad (۱-۵)$$

با مشخص شدن پارامترهای بی بعد مؤثر در ضریب دبی رابطه ای برای این ضریب در هریک از

روش های دیمارچی و مستقیم پیشنهاد شد که به صورت زیر ارائه می شود:

$$C_m = 0.54453 - 0.27134Fr_1^{3.0585} + .6851\left(\frac{\bar{w}}{y_1}\right)^{2.5639} - 0.16097\left(\frac{L}{B}\right)^{0.7292} \quad (۲-۵)$$

$$C_d = 3.42988 + 0.12735Fr_1^{1.46352} + 0.4462\frac{\bar{w}}{y_1}^{3.24272} - 2.9022\left(\frac{L}{B}\right)^{-0.059} \quad (۳-۵)$$

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.

مقدار \bar{w} برای حل مشکل تغییر ارتفاع سرریز در سرریزهای مرکب به کار می رود که توسط رابطه

زیر قابل محاسبه است :

$$\bar{w} = \frac{2w_1b_1 + w_2b_2}{2b_1 + b_2} \quad (۴-۵)$$

بعد از مشخص شدن فرمول محاسبه ضریب دبی در سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-

مستطیلی دبی سرریز به دو روش مستقیم و دیمارچی محاسبه می گردد و نتایج مقایسه این دبی ها

با مقادیر دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که هر دو روش از دقت مناسبی در برآورد

دبی عبوری از روی سرریز مرکب برخوردار هستند.

در قسمت مدل سازی عددی مشخص شد که دبی عبوری بدست آمده از مدلسازی عددی تخمین نسبتاً قابل قبولی از دبی آزمایشگاهی عبوری از سرریز می باشد و همینطور با مقایسه پروفیل های طولی سرریز حاصل از مدل سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نرم افزار FLOW-3D قابلیت شبیه سازی جریان بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی را دارا می باشد.

۳-۵ پیشنهادات

۱. پیشنهاد می شود با توجه به محدودیت در ساختن مدل های آزمایشگاهی متفاوت که به دلیل صرف هزینه و وقت زیاد و از طرفی با توجه به تایید نرم افزار FLOW-3D برای تحلیل و شبیه سازی جریان ها بر روی سرریز جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی بررسی های کامل تری بر روی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب مستطیلی-مستطیلی با شرایط هندسی و هیدولیکی متفاوت توسط این نرم افزار انجام گیرد.
۲. در همه ی آزمایشات انجام شده در این تحقیق، کانال دارای عرض ثابت $0/6$ بوده است. با توجه به اینکه پارامتر عرض کانال یکی از پارامتر های تأثیر 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 $(\frac{L}{B})$ بر ضریب دبی تأثیر می گذارد که به دلیل ثابت بودن، تأثیرات 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 $k - \epsilon$ 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 آشفته نیز برای سرریز مذکور به کار گرفته شود و نسبت به هم مقایسه گردد.
۴. در آزمایشهای تحقیق حاضر به دلیل عرض زیاد کانال جانبی و فاصله زیاد تا سرریز آب در هنگام خروج از سرریز مرکب به دیواره های کانال جانبی برخوردی نداشته اند و به راحتی وارد کانال

جانبی می گردند. با توجه به اینکه در بسیاری از پروژه های برداشت و زهکشی آب به دلیل فاصله کم سرریز تا کانال جانبی با محدودیت وارد کانال می شوند و تحقیقات گذشته بر روی سرریز های جانبی ساده تأثیر آن را بر ضریب دبی سرریز تایید می کند، لازم است برای سرریز های مرکب هم تأثیر وجود دیواره کانال جانبی بر ضریب دبی بررسی گردد.

۵. پیشنهاد می گردد آزمایشهای تحقیق حاضر و سایر محققین در خصوص سرریز های جانبی مرکب لبه نیز بر روی سرریز های جانبی لبه پهن نیز انجام گردد.

منابع و مراجع

- [۱] United States Bureau of Reclamation (USBR), (1963). "Compound weir study" Hydraulic Laboratory Report No. Hyd. 505, 34 p.
- [۲] De Marchi, G., (1934). "Essay on the performance of lateral weirs" L'Energia Elettrica Milano, vol. 11, No. 11, Italy, pp. 849–860.
- [۳] Subramanya, K., Awasthy, S.C., (1972). "Spatially varied flow over side weirs" J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng., ASCE 98 (1), 1–10.
- [۴] Yu-Tek, L., 1972. Discussion of "Spatially varied flow over side weirs" by Subramanya, K., Awasthy, S.C. J. Hydraul. Div., ASCE 98 (1), 2046–2048.
- [۵] 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.
- [۶] Cheong, H., 1991. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. J. Irr. Drain. Eng., ASCE 117 (4), 461–475.
- [۷] Swamee, P.K., Pathak, S.K., Mohan, M., Agrawal, S.K., Ali, M.S., 1994. Subcritical flow over rectangular side weir. J. Irr. Drain. Eng., ASCE 120 (1), 212–217.
- [۸] Singh, R., Manivannan, D., Satyanarayana, T., 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. J. Irr. Drain. Eng., ASCE 120 (4), 814–819.
- [۹] ایزدجو، ف. شفاعی بجزستان، م. ۱۳۷۵. "بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی در آبگیرهای جانبی". چهارمین سمینار مهندسی رودخانه. اهواز. بهمن ۷۵
- [۱۰] 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.
- [۱۱] Borghei, S.M., Jalili, M.R., Ghodsian, M., 2003. Discharge coefficient for sharp-crested side weirs in subcritical flow. Water Marit. Eng. 156 (2), 185–191.

- [۱۲] 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)
- [۱۳] Ghodsian, M., 2004. Flow over Triangular Side Weir. Scientia Iranica, Sharif University of Technology, Vol. 11, Nos. 1&2, 114-120.
- [۱۴] ایزدی نیا، ا. م. حیدر پور و ع. کبیری سامانی. ۱۳۸۶ "تعیین پروفیل سطح آب بر روی سرریز جانبی با استفاده از روشهای حل عددی". ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، کرمان - دانشگاه شهید باهنر
- [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 ۲۳-۳۴
- [۱۶] سیاری، س.، ح. حدادی و م. رحیم پور. ۱۳۹۱. "ترسیم پروفیل سطح آب در سرریز جانبی ذوزنقه ای لبه پهن با استفاده از روشهای عددی. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران " ارومیه- دانشگاه ارومیه، ۱۶ تا ۱۸ آبان ۱۳۹۱
- [۱۷] پرندین، م. ح. و حیدر پور، م. و پرندین، م. (۱۳۹۴) "بررسی خصوصیات جریان در سرریز جانبی مستطیلی" نشریه پژوهش های علوم کاربردی آب، سال اول، شماره اول، ص ۱۳-۲۲
- [۱۸] Ahmed, Y., Azza, N., Talal, A., 2013. Simulation of flow over side weir using simulink. Scientia Iranica Int. J. Sci. Technol., in press.
- [۱۹] 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.
- [۲۰] 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.
- [۲۱] Jan, C.D., Chang, C.D., Lee, M.H., 2006. Discussion of "Design and calibration of a compound sharp-crested weir", by Martinez, J., Recca, J., Morillas, M.T., Lopez, J.G. J. Hydraul. Eng., ASCE 132 (8), 868-871.
- [۲۲] ظهیری، ع. ا. و باقری، س. و قبادیان، ر. و دهقانی، ا. و مفتاح هلقی، م. (۱۳۹۲). "بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز های جانبی لبه تیز مرکب" مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، جلد بیستم، شماره اول

[۲۳] 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

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

[۲۵] عامری م، ۱۳۹۴ ، رساله دکتری: " ارزیابی جریان بر روی سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب در شرایط زیر بحرانی ، دانشکده عمران ، دانشگاه شاهرود

[۲۶] صیادی ، کیخسرو و منوچهر حیدریور، ۱۳۹۴، بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریز مستطیلی با فشردگی جانبی و سرریز مرکب مستطیلی-مستطیلی در شرایط آزاد و مستغرق، دومین کنفرانس سراسری توسعه محوری مهندسی عمران، معماری، برق و مکانیک ایران، گرگان

[۲۷] خورشیدی ح ، ۱۳۹۵ ، پایان نامه ارشد: " مدلسازی عددی و آزمایشگاهی سرریزهای لبه تیز مرکب جانبی مثلثی - مثلثی ، دانشکده عمران ، دانشگاه شاهرود

[۲۸] شکری س ، ۱۳۹۵ ، پایان نامه ارشد: " بررسی آزمایشگاهی و عددی تاثیر شیب کانال اصلی بر ضریب آبگذری سرریزهای جانبی لبه تیز مرکب مثلثی-مستطیلی ، دانشکده عمران ، دانشگاه شاهرود

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

[۳۰] قاسم زاده ، ف. کوچک زاده ، ص. (۱۳۹۲) " شبیه سازی مسائل هیدرولیکی در FLOW-3D" جلد اول ، چاپ دوم ، انتشارات نو آور

Abstract

Side weirs are among the important structures in water transmission networks. In oppose to simple side weirs, compound side weirs provide an accurate discharge measurements and are able to pass high rate of discharges. The rectangular-rectangular sharp-crested side weirs were studied experimentally and numerically in this research.

The effective parameters on the discharge coefficient of a rectangular compound side weir were first determined using dimensional analysis. An empirical relation for discharge coefficient was then developed using least square of errors method. The predicted discharges using this empirical relation showed a very good agreement with measured discharges. The water surface profile of flow over the weir crest and in the center line of the main channel were then plotted and they showed that with increasing the Froude number of main flow the water depth over the weir crest and the weir discharge in turn increases. The water depth in the main channel also increased moderately.

The Flow-3D software was employed to investigate the possibility of modeling the operation of compound side weirs. Four weir geometries were modeled in the software and the predicted discharges were compared with those of experiments. The results showed a good agreement approving the possibility of employing Flow-3D in determining the discharge of the compound rectangular side weirs. Finally the flow depth profile along the weir crest was drawn which was very close to the experimental results.

Keywords: sharp crested weir, side weir, rectangular weir, dimensional analysis, numerical modeling, FLOW-3D



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in water engineering and hydraulic structures

**Determining the discharge coefficient of compound
rectangular sharp crested side weirs using numerical and
experimental methods**

Iman Saebi Hesari

Supervisor

Dr Ahmad Ahmadi

Advisor

Dr Mojtaba Ameri

February 2017